



Agenzia Spaziale Italiana

EXPLORA

Copyright © Agenzia Spaziale Italiana 2018

Tutti i diritti riservati

Ideazione a cura di
Vittorio Cotronei
Donatella Marucci

Supervisione a cura di
Vittorio Cotronei
Sara Piccirillo
Francesca Ferranti

Testi a cura di
Amedeo Balbi, Daniela Billi, Alessandro Rizzo, Livio Narici (Università degli Studi di Roma "Tor Vergata"), Carmen Arena, Giovanna Aronne, Veronica De Micco, Stefania De Pascale, Roberta Paradiso (Università degli Studi di Napoli Federico II), Cesare Lobascio (Thales Alenia Space Italia), Samantha Cristoforetti, Luca Parmitano, Roberto Vittori (astronauti ESA/EAC, AM), Angelo Zinzi, Francesca Ferranti, Sara Piccirillo, Vittorio Cotronei, Germana Galoforo (Agenzia Spaziale Italiana), Belakovskiy Mark Samuilovich (Institute of Biomedical Problems, Moscow, Russia), Gentry Lee (Jet Propulsion Laboratory (JPL) Pasadena, USA).

Progetto Grafico a cura di
Donatella Marucci

Credits Image: NASA/ESA/JAXA.

Agenzia Spaziale Italiana
Viale del Politecnico snc
00133 Roma - Italia



“Penso alla ciclicità delle mie molecole, pronte a sopravvivermi, a ritornare in circolo girovagando per l’atmosfera e non provo tristezza. Ci sono stata, qualcuno si ricorderà di me e se così non fosse, non importa”. Margherita Hack

A Proto Pippia, persona rara e pioniere della biologia spaziale italiana.



INDICE

Explora

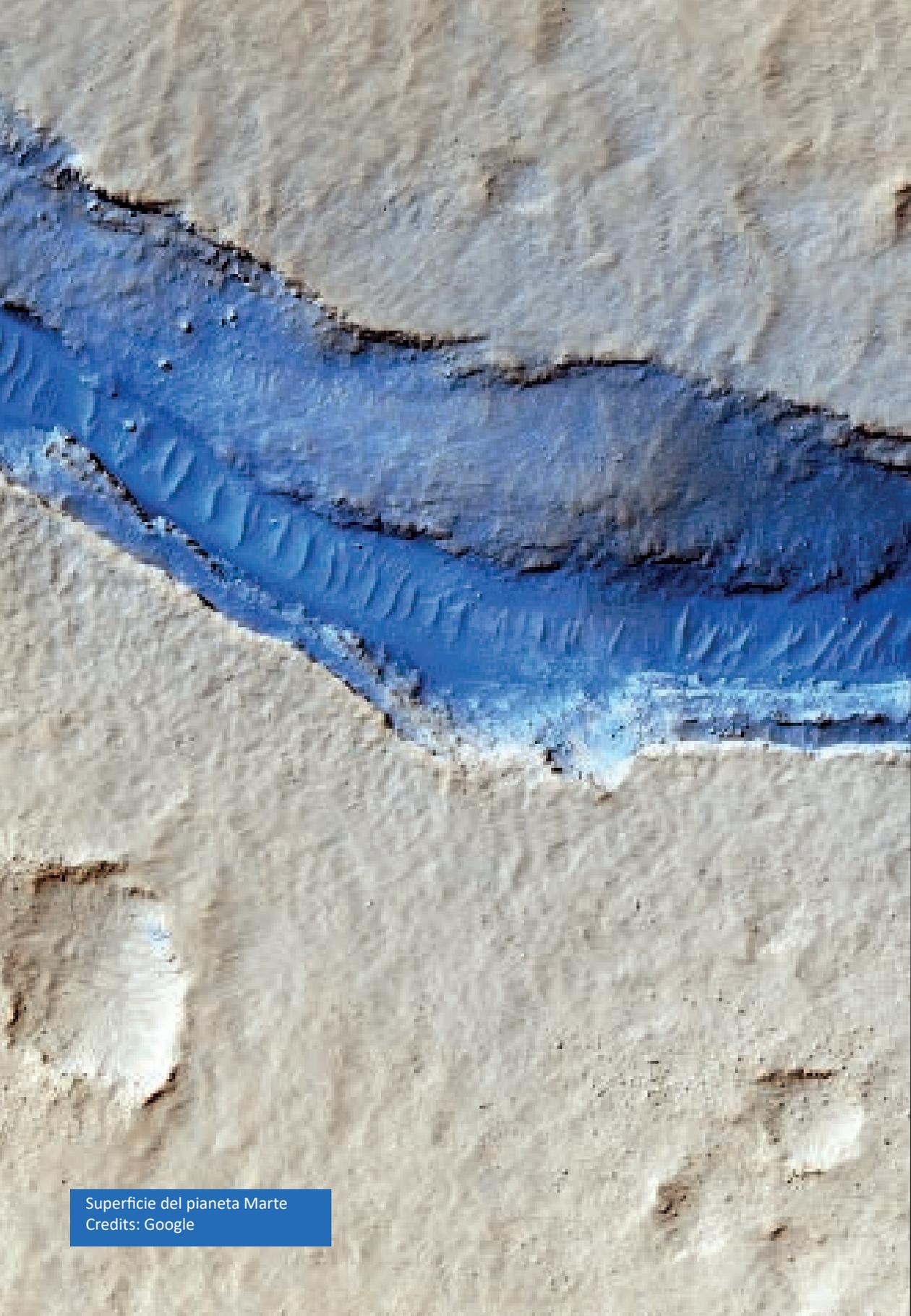
L' Esplorazione Umana dello Spazio

La Stazione Spaziale Internazionale

L' Esplorazione Robotica dello Spazio

Le Piante nello Spazio

Astrobiologia



Superficie del pianeta Marte
Credits: Google

EXPLORA

Siamo soli nell'universo? Qual è l'origine della vita sulla Terra? Potremo un giorno realizzare insediamenti umani al di fuori del nostro pianeta utilizzando le piante quale fonte di energia e vita?

Il viaggio inizia e ci porta nello spazio profondo, dove solo sonde sofisticate possono arrivare. Ma saliremo anche a bordo della stazione spaziale internazionale dove astronauti, provenienti da ogni parte del mondo, soggiornano ininterrottamente da più di 15 anni, alternando vari equipaggi.

Esploriamo per comprendere l'universo che ci circonda, la capacità della vita di adattarsi a condizioni estreme e ricercarla altrove.

Abbiamo esplorato pianeti rocciosi, pianeti giganti e messo in luce il grande interesse esobiologico di mondi quali Europa, Encelado e Ganimede che nascondono, con ogni probabilità, un oceano di acqua al di sotto della loro superficie. Come Marte, di cui, nel 2018, è stata accertata, da un radar italiano a bordo della sonda Mars Express, la presenza di acqua allo stato liquido nel sottosuolo. Una grandissima scoperta scientifica che fa onore al nostro paese.

Siamo atterrati sulla Luna, Venere, Marte, Titano e persino su una cometa, la Churyumov-Gerasimenko dove

abbiamo trovato il più semplice degli amminoacidi (la glicina), ma anche il fosforo (che si trova negli acidi nucleici).

L'uomo, nel frattempo, ha costruito una casa/laboratorio, che viaggia veloce, orbitando 400Km sopra alla Terra. Questa sofisticata e complessa struttura potrà fornire indicazioni e risposte utili sulla nostra concreta possibilità di vivere su altri pianeti. Perché è lì che un giorno vorremmo arrivare.

E così, i viaggi robotici interplanetari e le missioni umane vanno a braccetto. Gli uni esplorando i pianeti e, le altre, la possibilità che l'uomo possa vivere in luoghi diversi e lontani scrutati e studiati dalle sonde che lo hanno preceduto.

Ad oggi Marte è considerata la meta più probabile, ma sono diverse le destinazioni potenzialmente interessanti nel nostro sistema solare.

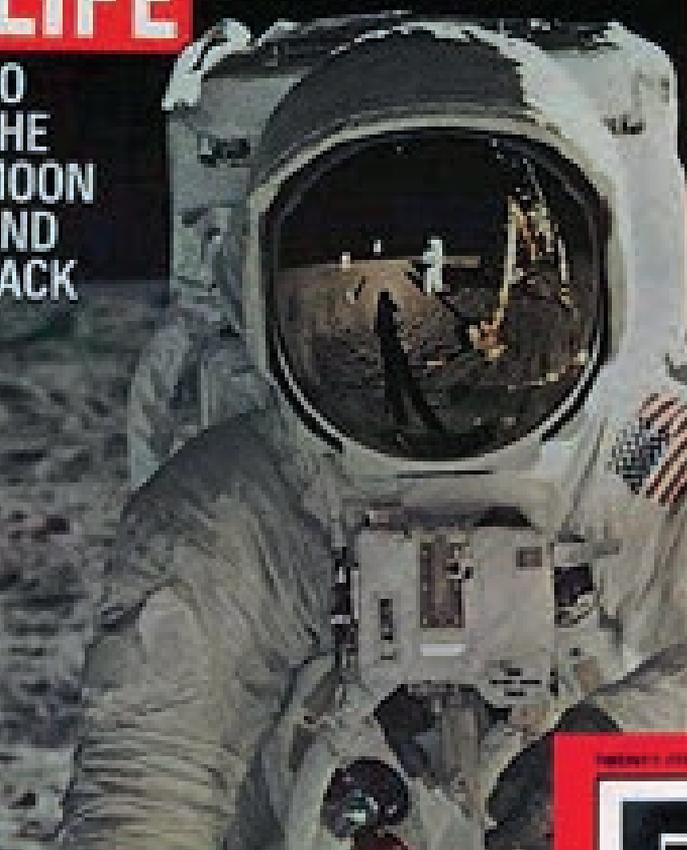
Questo piccolo, grande viaggio è quello che faremo insieme nelle pagine che seguono.....

Buona lettura!

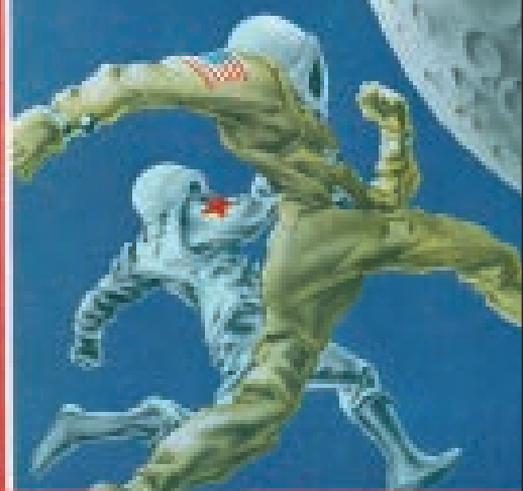
LIFE

SPECIAL EDITION

TO
THE
MOON
AND
BACK



TIM



LIFE

**19 PAGES
ON SPACE**

INSIDE YURI'S CAPSULE
CELEBRATION IN MOSCOW
REACT ON WASHINGTON
U.S. SPACE FUTURE



Gagarin Greets Moscowites

20

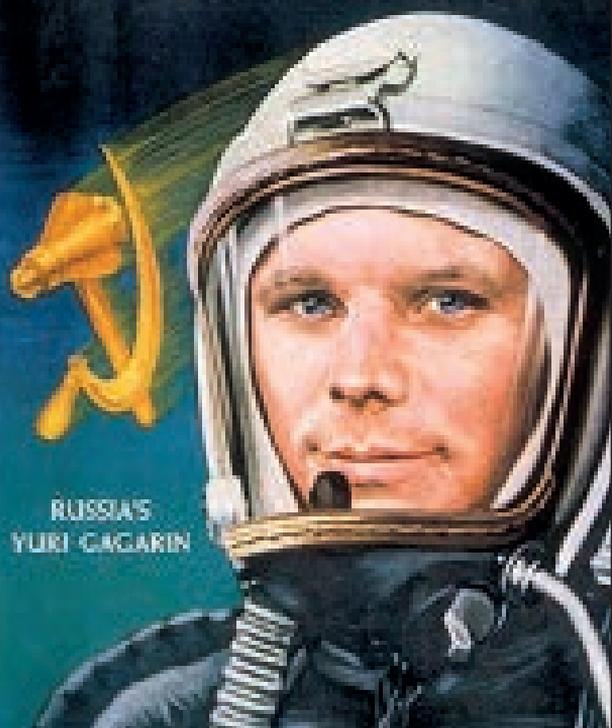
NOVEMBER 1968 (1968)

177

TIME

MAN IN SPACE

THE WEEKLY NEWSMAGAZINE



RUSSIA'S
YURI GAGARIN



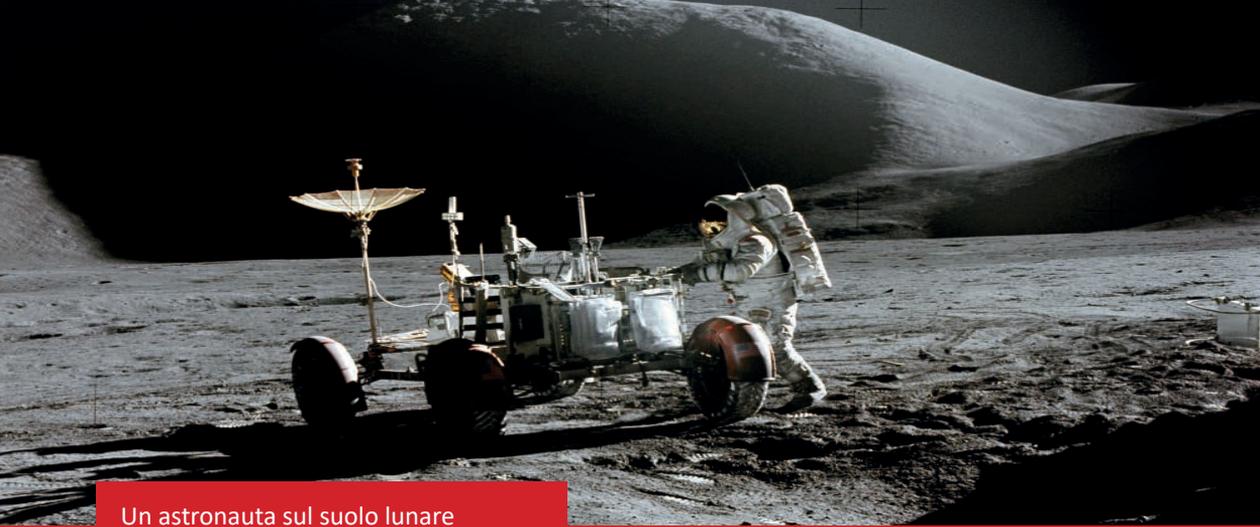
ESPLORAZIONE UMANA DELLO SPAZIO

As Man has evolved through time, one of the things that has differentiated him from the rest of the Animal Kingdom has been his desire for knowledge. There is an irresistible attraction towards all that is unknown: any new territory beckons to him like the chant of the sirens moved Odysseus. An unexplored horizon must be overcome to reveal what lies beyond. Any known limit must be surpassed. First, it was the Columns of Hercules. Then, it was an Ocean. And once we learned to fly, our eyes turned toward the sky. Nothing has been more intriguing and beguiling than the infinite darkness of the night sky. Nothing has suggested more stories than the emptiness we imagine there, and the infinite worlds certain to exist, yet perhaps forever beyond our grasp. We feel our ultimate destiny lies there: we have begun a long voyage, yet have accomplished only the first small steps. Like any truly meaningful voyage, its worth lies in the trip itself,

for we may never reach our destination. Travelling, we leave behind former boundaries reaching new horizons. In so doing, we fulfill our destiny to satisfy our hunger for knowledge and understanding of the Universe. We are fulfilling our role as Humans.

Luca Parmitano

Missione Volare (2013)



Un astronauta sul suolo lunare
Credits: NASA

L'esplorazione umana dello Spazio

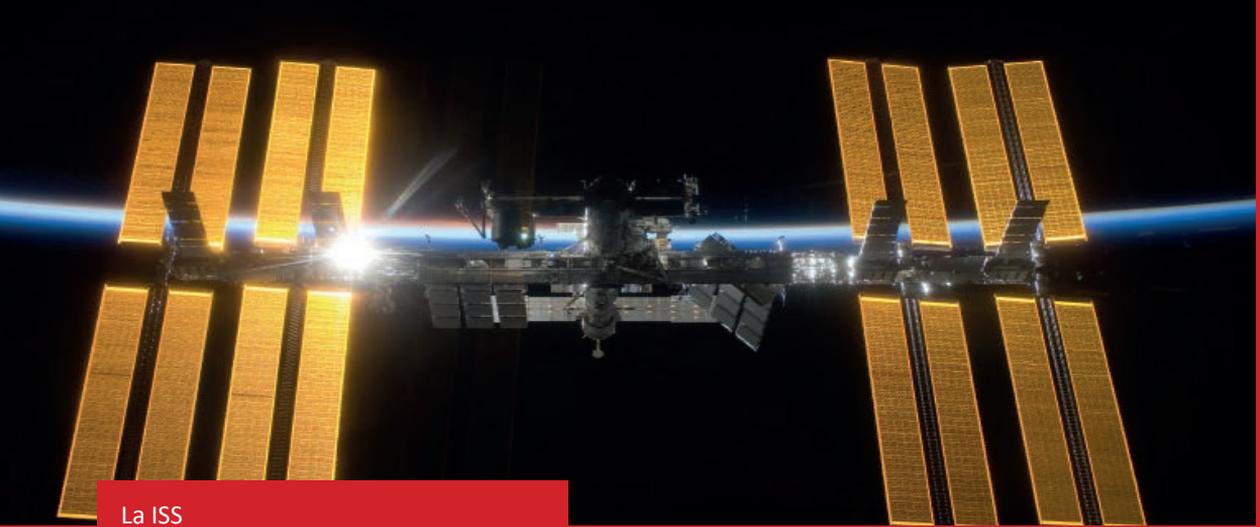
L'esplorazione spaziale è uno straordinario viaggio che risponde alla necessità dell'uomo di far fronte alla sua innata curiosità e al desiderio di affrontare nuove sfide e scoprire nuovi mondi, di spingersi oltre i confini della conoscenza, i limiti scientifici e tecnologici. L'esplorazione spaziale ci aiuta ad affrontare importanti quesiti scientifici e filosofici relativi al nostro posto nell'Universo, alla storia del nostro sistema solare e alla presenza di vita oltre la Terra. Ma soprattutto, affrontare le importanti sfide che essa comporta è e sarà un forte incentivo allo sviluppo di nuove tecnologie e contribuirà, infine, a promuovere una pacifica collaborazione internazionale. Per secoli, gli uomini hanno sognato di lasciare la Terra e di viaggiare verso altri mondi e nel 1957, l'Unione Sovietica ha compiuto il primo passo nello Spazio lanciando un piccolo satellite, lo Sputnik. L'era spaziale ha inizio!

Le prime attività esplorative hanno visto entrare in competizione come protagonisti l'Unione Sovietica e gli Stati Uniti dando inizio a quella che verrà definita corsa allo Spazio. Il primo uomo a compiere un volo orbitale intorno alla Terra fu proprio un cosmonauta russo, Yuri Gagarin, nel 1961. Da allora più di 500 astronauti hanno volato nello Spazio. L'equipaggio della missione americana Apollo 11 fu, invece, il primo a mettere piede sulla Luna e, ad oggi, sono venti gli astronauti che hanno raggiunto il nostro satellite e 12 coloro che hanno camminato sulla sua superficie. Sebbene il programma di esplorazione lunare si sia concluso nel 1972, l'esplorazione dello Spazio non si è fermata. Sonde senza equipaggio sono state inviate verso tutti i pianeti del Sistema Solare e verso numerosi satelliti, asteroidi e comete, raccogliendo una serie di informazioni, che potrebbero rendere più sempli-

ci le future missioni umane su altri pianeti.

L'International Space Exploration Coordination Group (ISECG), al quale appartengono ben 15 agenzie spaziali tra cui anche l'Agenzia Spaziale Europea (ESA) e l'Agenzia Spaziale Italiana (ASI), ha definito nel 2018 il piano strategico di esplorazione spaziale per il prossimo ventennio: la Global Exploration Roadmap (GER). In questa roadmap, che ha come obiettivo finale la realizzazione di missioni umane su Marte, la Stazione Spaziale Internazionale (ISS) rappresenta il primo fondamentale passo verso l'esplorazione a lungo raggio, che porterà ad espandere la presenza dell'uomo nel Sistema Solare. Sebbene siano ancora molte le sfide tecnologiche e le problematiche da superare prima che l'esplorazione umana della superficie di Marte possa realizzarsi, continui progressi vengono fatti rendendo la meta sempre più vicina. In questo scenario, tre sono gli elementi chiave su cui punteranno le agenzie spaziali nei prossimi anni: la ISS che, grazie alla sua collocazione davvero unica, offre l'opportunità di fare ricerca nel settore della fisica, delle scienze dei materiali e della biomedicina, di sviluppare nuove tecnologie che permetteranno di incrementare le nostre conoscenze sullo Spazio e di rendere percorribile la strada verso il pianeta rosso e lo Spazio profondo; le missioni robotiche, che fornendo preziose informazioni sulla Luna, gli asteroidi e Marte, contribuiranno a rendere le future missioni umane più sicure e più produttive; le

missioni umane oltre l'orbita bassa della Terra, nelle vicinanze della Luna o sulla superficie lunare, che permetteranno non solo di compiere nuove scoperte scientifiche ed approfondire le conoscenze sugli asteroidi e sulla Luna stessa, ma daranno anche modo di testare e valutare le modalità di trasporto, i sistemi abitativi, i supporti robotici e altre tecnologie chiave per le missioni di lunga durata, rappresentando una dimostrazione pratica delle capacità e delle tecniche necessarie per l'esplorazione planetaria. Un progetto così ambizioso richiederà una notevole cooperazione internazionale al fine di coordinare gli investimenti tecnologici e gli sforzi volti a ridurre i rischi per la salute umana, aumentare il numero di individui che potranno partecipare alle missioni di esplorazione, il tempo che questi potranno trascorrere a destinazione nonché il loro grado di autosufficienza.



La ISS
Credits: NASA

Le ricadute dell'esplorazione spaziale nella vita di tutti i giorni

Nel corso degli anni, le nazioni hanno cooperato in maniera crescente per condurre missioni nello Spazio sempre più complesse, dimostrando in maniera tangibile che le intese a livello internazionale sono un fattore determinante per garantirne il successo. Nel segno di questa ottica collaborativa, già a partire dai primi voli nello Spazio apparve evidente come le attività correlate all'esplorazione costituissero un importante impulso per la scienza e per la tecnologia comportando benefici sia diretti che indiretti per la vita dell'uomo.

I primi includono l'ampliamento delle conoscenze scientifiche, la diffusione di tecnologie innovative, l'apertura di nuovi mercati e la cooperazione fra le nazioni. Benefici indiretti sono, invece, quelli in grado di produrre nel tempo un miglioramento della

qualità della vita, quali: la crescita della ricchezza (i consistenti investimenti che accompagnano i programmi di esplorazione creano le condizioni per una globale crescita del settore industriale); l'ampliamento delle conoscenze in ambito biomedico e biotecnologico (l'osservazione della risposta del nostro organismo alle condizioni di microgravità ha, ad esempio, permesso di comprendere meglio il processo dell'invecchiamento); la protezione dell'ambiente (molti aspetti che devono essere presi in considerazione nelle missioni, quali la sostenibilità, la necessità di riciclare i rifiuti prodotti e di utilizzare risorse spesso limitate, possono essere utili anche sulla Terra); la sicurezza (l'individuazione di modi sempre migliori per garantire la protezione del nostro pianeta da eventi

catastrofici, quali possibili collisioni con asteroidi, nascono soprattutto dalla collaborazione tra le nazioni). Infine le missioni di esplorazione spaziale appagano la nostra curiosità permettendo di trovare possibili risposte ad alcune delle domande

che l'uomo si pone da millenni: qual è la natura dell'Universo? Il destino dell'umanità è legato alla Terra? Noi e il nostro pianeta siamo unici? C'è vita da qualche altra parte nell'Universo?

Risorse vitali necessarie al sostentamento dell'uomo nello Spazio

Rispetto alla situazione della ISS, che si trova in bassa orbita terrestre, il futuro dell'esplorazione planetaria è ancora più sfidante, se consideriamo la quantità delle risorse necessarie per sostenere la vita umana. Dobbiamo, infatti, fornire ossigeno, acqua e cibo all'equipaggio: 5 kg circa per persona al giorno si possono considerare il "minimo indispensabile", valido per la ISS o un veicolo di trasferimento in condizioni nominali. Per una base di superficie tuttavia le necessità di acqua aumenteranno: si dovrà prevedere ad esempio una doccia, che non è presente - e sarebbe poco pratica - sulle stazioni orbitanti; lavatrice e lavastoviglie, in modo da ridurre i rifornimenti di abbigliamento e stoviglie. Pur prevedendo consumi idrici ottimizzati, il fabbisogno di acqua pro capite sale a circa 15 - 30 litri al giorno. Le 5,5 tonnellate all'anno totali per persona che ne risultano meritano l'atten-

zione dei progettisti della missione, sempre attenti alle masse dei sistemi di trasporto, di lancio e trasferimento, e alle difficoltà dei relativi rifornimenti. Rispetto a sistemi basati sul semplice stoccaggio delle risorse e dei rifiuti, l'ago della bilancia potrebbe pendere verso sistemi di tipo "rigenerativo", ossia che rigenerano e riciclano le risorse, passando da una gestione delle stesse ad "anello aperto" verso una gestione ad "anello chiuso".



Le impronte del rover Curiosity su
Marte
Credits: NASA

Prossima fermata Marte

Marte, e la probabilità di una vita extraterrestre, ha da sempre affascinato l'umanità, e con l'inizio dell'era spaziale, è stato oggetto d'interesse da parte di scienziati, ed ingegneri. I primi successi nell'esplorazione del pianeta rosso risalgono agli anni '60-'70 quando le prime sonde si poggiarono sulla sua superficie. Tra le più importanti ricordiamo sicuramente le sonde gemelle Viking alla metà degli anni '70.

Tuttavia i dati raccolti risultarono piuttosto deludenti per tutti coloro che speravano di scoprire l'esistenza di vita sul pianeta rosso.

Marte è attualmente un pianeta molto ostile per ospitare la vita. Ha una temperatura sempre inferiore ai 15°C che può scendere fino a -130°C nelle notti invernali. Ha un'atmosfera con il 95% di anidride carbonica, e troppo sottile per proteggere la superficie dalle radiazioni ultraviolette del Sole. Notizie più incoraggianti

sono arrivate però qualche anno più tardi con le missioni successive. Le foto scattate dai veicoli che hanno orbitato intorno a Marte, tra le quali la missione dell'ESA Mars Express, che ha un forte contributo italiano, hanno permesso di tracciare l'intera mappa del pianeta e hanno mostrato che, un tempo, sulla superficie di questo pianeta scorreva l'acqua. Anche se oggi non c'è vita, potrebbe essere però esistita nel lontano passato marziano. Nel 2018 il radar italiano MARSIS (Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding), a bordo della sonda europea Mars Express, ha permesso di identificare aree di acqua salata nella profondità del sottosuolo marziano. Con la presenza di acqua potrebbero essere presenti anche forme di vita. Sulla Terra esistono, infatti, batteri che sopravvivono in condizioni così estreme, gli estremofili.

Confinamento/isolamento nelle missioni spaziali

Una delle principali sfide da affrontare per l'uomo nello Spazio è rappresentata dalla necessità di vivere in un ambiente isolato, confinato ed estremo. Le missioni spaziali si svolgono in spazi abitativi ristretti e ambienti lavorativi limitati, causando stress e problematiche comportamentali che possono interferire con la produttività e il buon esito della missione. Diversi fattori come la provenienza culturale degli astronauti, la nazionalità, i ruoli e l'orientamento sessuale possono rendere difficili i rapporti interpersonali tra i membri dell'equipaggio, diventando importanti aspetti di cui tener conto per lavorare armoniosamente ed evitare problemi per il buon andamento della missione.

Le difficoltà comunicative, l'inte-

grazione uomo/macchina, la motivazione ed il ruolo dell'individuo all'interno dell'equipaggio, la nostalgia di casa e il design poco confortevole delle navicelle sono ulteriori fattori da considerare. Negli anni sono stati condotti numerosi studi comportamentali, sia di simulazione a Terra che nel corso di missioni spaziali, durante le quali i partecipanti venivano invitati a redigere diari personali riportando sensazioni e stati emotivi. I risultati ottenuti hanno permesso di individuare alcune criticità e le possibili contromisure da adottare, quali ad esempio la possibilità di comunicare periodicamente con la propria famiglia e con gli amici e di scrivere su social networks che permettono di condividere la propria esperienza con il mondo esterno, limitando gli effetti psicologici negativi dovuti al confinamento.

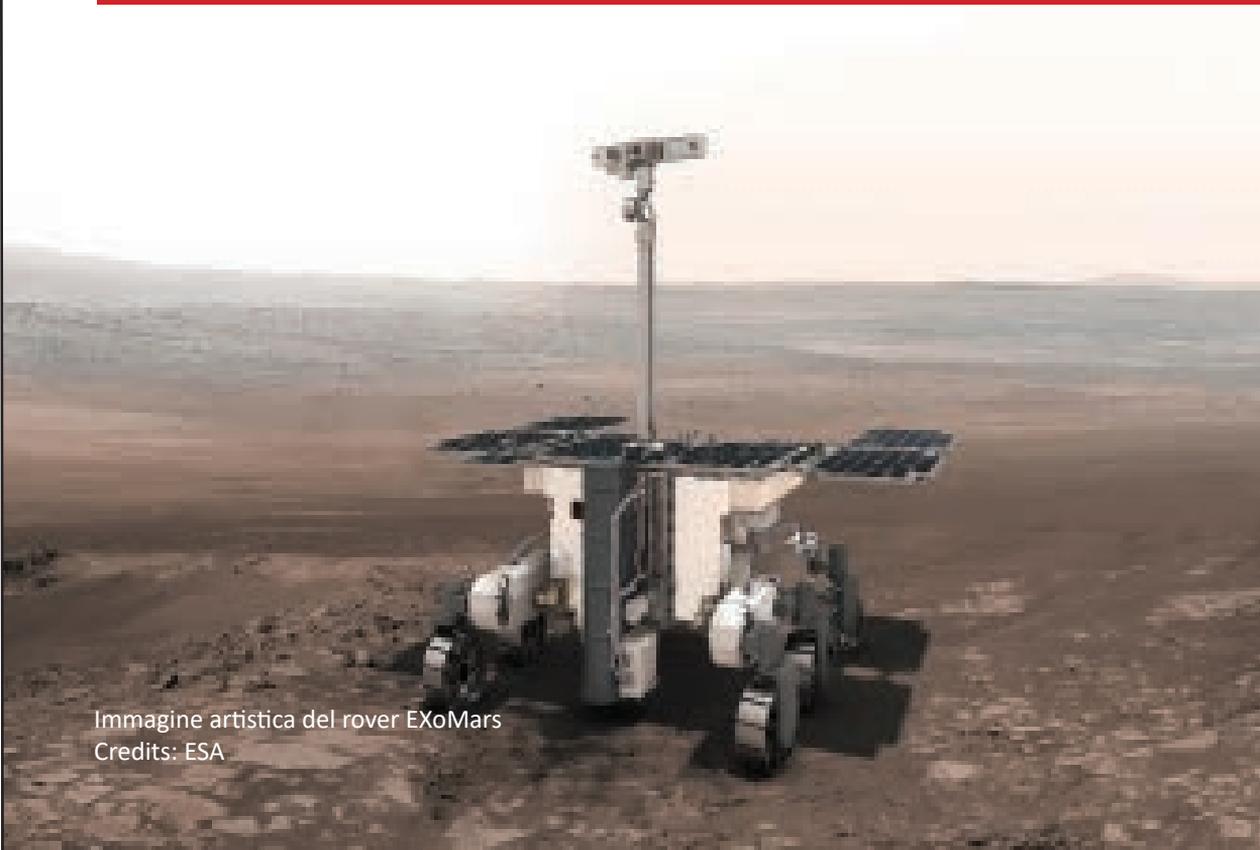


Immagine artistica del rover EXoMars
Credits: ESA



Astronauti all'esterno della ISS
Credits: NASA

Lo Spazio: un ambiente estremo

L'umanità si è evoluta sulla Terra, dove sono garantite condizioni ambientali e risorse idonee alla vita degli organismi biologici che la popolano. L'uomo si trova a suo agio senza particolari protezioni quando la temperatura è compresa tra i 18°/26°C gradi e l'umidità relativa tra il 25% e il 70%. La vita umana richiede risorse primarie: aria respirabile, ad una pressione tipicamente di 1 atmosfera (1013 hPa), di cui circa il 21% di ossigeno, acqua potabile e cibo. L'uomo, senza adeguati sistemi di supporto, tollera per tempi limitati condizioni diverse e carenza di risorse, ma ha appreso, nei secoli, strategie che gli hanno permesso di esplorare ambienti anche molto ospitali: dai poli ai deserti, dai mari all'alta montagna e, in tempi più recenti, le profondità oceaniche e lo Spazio, dove l'ambiente diviene estremo e letale. Lo Spazio è, infatti,

un ambiente ostico caratterizzato da fattori ostili quali radiazioni, assenza di atmosfera, estremi di temperatura e microgravità, i cui effetti sulla fisiologia del corpo umano restano ancora da definire completamente.

I voli suborbitali

La parola suborbitale identifica il moto di un corpo che supera il confine superiore della nostra atmosfera (100 km), ma ritorna sulla Terra senza completare un'orbita. Per convenzione usiamo la "Karman line", ossia una distanza dal suolo pari a 100 km, come la quota di riferimento al di sopra della quale si considera essere nello spazio.

Il 5 maggio 1961 fu Alan Shepard, a bordo della capsula Freedom 7, il primo americano ad arrivare nello spazio, ossia a superare i 100 km di quota, con un volo suborbitale della

durata di 15 minuti, terminato con un ammaraggio.

Poco dopo, il 19 Luglio 1963 Joseph Walker, a bordo del velivolo X-15, superava a sua volta i 100 km, arrivando nello spazio. Lo X-15 era di fatto un aereo e può essere considerato il primo prototipo di spaziplano. Esso, infatti, al contrario della Freedom 7, atterrava su una pista. Il vantaggio dello spaziplano è evidente: atterra e riparte da pista ed è quindi facilmente riutilizzabile, mentre la capsula, utilizzata nel primo volo suborbitale, decolla da una base di lancio ed atterra in zone remote del pianeta.

Possiamo, quindi, considerare lo spaziplano come il naturale sviluppo dell'aeroplano.

Il volo suborbitale è destinato a rivoluzionare non soltanto il trasporto aereo, ma anche l'accesso allo spazio. Infatti, spingere la tecnologia degli aereoplani verso spaziplani ci per-

mette di segnare l'avvio del trasporto di futura generazione. Numerosi progetti di spaziplani sono rimasti a livello di prototipo, a causa dell'oggettiva difficoltà nella realizzazione degli stessi. In tempi recenti, Virgin Galactic ha dato, però, un nuovo impulso alla tecnologia degli spaziplani con la loro "SpaceShip", interessante sistema caratterizzato da ali retraibili.

L'Italia possiede le condizioni geografiche e climatiche ideali per il volo suborbitale, ha numerosi aeroporti che possono essere trasformati in spazioporti ed ha tradizione e competenze nel settore della ricerca medica aerospaziale, essenziali per la condotta in sicurezza delle operazioni ad alta quota. Per questo motivo, il volo suborbitale rappresenta una grande opportunità per il nostro Paese, che potrebbe diventare futuro leader nel settore.



Gli astronauti Roberto Vittori e Paolo Nespoli sulla ISS
Credits: ESA



Astronauti in allenamento a Og
Credits: NASA

La forza di gravità

Sulla Terra tutti i corpi sono soggetti alla forza gravitazionale. Questa forza è il motivo per cui, ad esempio, un oggetto cade a terra. Tuttavia, siamo talmente abituati alla gravità che la diamo per scontata e ci sembra piuttosto naturale che un oggetto cada quando lo si lascia. E' sempre questa forza che ci tiene con i piedi per terra e che ci impedisce di sollevarci spontaneamente a mezz'aria o di spiccare salti vertiginosi. La presenza costante di questa forza, sebbene non percepita, ha in effetti influito in maniera determinante sullo sviluppo e la forma di tutte le cose compreso il nostro corpo. I muscoli, i tendini, le ossa e il cuore, ad esempio, si sono sviluppati nella forma che conosciamo per "convivere" in modo ottimale con questa forza. La forza gravitazionale è una forza di attrazione che esiste tra due masse, oggetti o particelle qualsiasi. Isaac Newton scoprì che, presi due

oggetti qualsiasi nell'Universo, questa forza li attrae l'uno all'altro e l'attrazione è tanto più grande quanto maggiori sono le masse degli oggetti. Al contrario quanto più sono distanti, tanto minore è l'attrazione tra di essi. Proprio per effetto della forza di attrazione gravitazionale, il Sole e tutti i pianeti si attraggono reciprocamente. Poiché il Sole possiede una massa di gran lunga superiore (1.989×10^{30} kg), la Terra (5.972×10^{24} kg) e gli altri pianeti ruotano attorno ad esso. Per lo stesso motivo, la Luna ruota attorno alla Terra che ha una massa 30 volte maggiore di quella lunare. L'attrazione della Luna si manifesta, invece, sulla Terra sotto forma di maree: la Luna attrae l'acqua degli oceani, causando l'alta e la bassa marea. La forza gravitazionale viene misurata in Newton (N) ed è il prodotto tra la massa di un oggetto e la sua accelerazione verso un pianeta. L'accelerazione gravitazionale sul-

la Terra è pari a 9.8 m/s^2 . Quando due oggetti cadono verso la Terra, la forza di gravità agisce su entrambi. Se non vi sono altre forze che agiscono su di essi, gli oggetti presentano allora la stessa accelerazione. Tuttavia, nelle vicinanze della superficie terrestre sono presenti anche altre forze che agiscono sugli oggetti, come ad esempio l'attrito, causato dalla resistenza all'aria, che riduce la velocità di un oggetto in caduta. Più la superficie di un oggetto è ampia, maggiore sarà la resistenza dell'aria e di conseguenza il suo rallentamento. La massa è la quantità di materia che un oggetto contiene e viene misurata in chilogrammi (kg).

La massa di un oggetto è quindi la stessa in qualsiasi punto dell'Universo. Il peso di un oggetto è, invece, il risultato della gravità e pertanto dipende dal suo ambiente. Il peso di un oggetto sulla Terra viene misurato dalla relazione tra la massa dell'oggetto e l'accelerazione gravitazionale sulla Terra. Sulla Luna l'accelerazione dovuta alle forze gravitazionali è pari ad un sesto dell'accelerazione sulla Terra per cui, sebbene gli astronauti abbiano la stessa massa, il loro peso è un sesto di quello misurato sulla Terra. È per questo motivo che sulla Luna gli astronauti saltano invece di camminare. Quando un oggetto è in caduta libera continua e non vi sono forze esterne che agiscono su di esso, l'oggetto diventa privo di peso. Questo stato è denominato gravità zero. Nella realtà, tuttavia, è molto difficile eliminare completamente tutte le forze esterne. Un

oggetto in orbita intorno alla Terra, infatti, sebbene a molti chilometri di distanza dal suolo, sarà soggetto ad attrito, in quanto è ancora presente una certa resistenza dovuta all'atmosfera terrestre residua. Per indicare l'ambiente a gravità ridotta è quindi più corretto utilizzare il termine microgravità.

Effetti del volo spaziale sull'uomo

Come esseri viventi terrestri ci siamo evoluti con la costante presenza della forza di gravità (vedi paragrafo precedente). Questa forza, anche se non l'avvertiamo, ha modellato il nostro corpo nel corso della nostra evoluzione. Il cuore, le ossa, i muscoli, il sistema nervoso, l'apparato vestibolare etc. hanno caratteristiche anatomiche e fisiologiche ben precise che si sono sviluppate tenendo conto di questa costante e onnipresente forza.

Quando però ce ne andiamo a spasso nello Spazio e ci allontaniamo dal nostro pianeta, le cose cambiano un bel po'. Più ci allontaniamo e più questa forza decresce e diventa nuovamente presente se ci avviciniamo o atterriamo su un altro pianeta. Questa forza è proporzionale alla distanza cui ci troviamo e alla massa del pianeta, è legata cioè alla sua forza di attrazione e dunque ecco perché sulla Terra parliamo di 1g e, per esempio, sulla Luna, che è ben più piccola, di 1/6 di g. Sulla ISS la situazione è un po' diversa. Per mantenerci a una certa distanza dalla Terra e non esserne catturati sino a caderci sopra attrat-



Un astronauta durante una “passageggiata spaziale” fuori la ISS
Credits: NASA/ESA

ti dalla gravità, abbiamo necessità di girarci velocemente intorno ad una velocità tale che ci mantiene in equilibrio intorno ad essa a circa 400 km dalla sua superficie. L'equilibrio tra forza centrifuga e forza di gravità crea una condizione che corrisponde a una situazione simile all'assenza di gravità o meglio di "microgravità" poiché, benché modesta, la forza di gravità è sempre presente.

Ma cosa succede quando ci troviamo in questa situazione? Ci ritroviamo in una sorta di sogno, fluttuiamo nell'ambiente muovendoci senza più necessità di usare le nostre gambe e il soffitto o il pavimento sono per noi la stessa cosa non essendoci più un sopra o un sotto. Tutto diventa un po' confuso, strano. Potremmo assimilare quello che avviene nel corpo umano a una vera e propria rivoluzione, dove i riferimenti vengono modificati instaurando un nuovo ordine cui l'organismo, con il tempo, si adatta. Le modifiche più evidenti sono a carico del sistema cardiocircolatorio, osseo, muscolare, nervoso e vestibolare ma in realtà nessun organo o sistema ne è immune.

Nel tempo, tuttavia, il nostro corpo si adatta e raggiunge un nuovo "ordine" compatibile con il nuovo ambiente. Ecco che dunque le nostre ossa, muscoli e cuore riducono le loro "dimensioni" poiché non hanno necessità di contrastare più una forza così potente come sulla Terra. Il nostro sistema endocrino adatta il rilascio di ormoni, che regolano le funzioni del nostro organismo, in funzione della nuova situazione

ambientale e così via. Il ritorno a Terra, dopo gli usuali sei mesi delle attuali missioni sulla ISS, richiede un periodo più o meno lungo per recuperare una condizione pre-volo. Sebbene il processo abbia una variabile individuale, mediamente circa un anno e mezzo è necessario per un recupero completo e si presuppone che questo tempo si amplifichi in rapporto alla durata della missione nello Spazio.

Ma non abbiamo molte certezze sulle permanenze molto lunghe. Il limite massimo di soggiorno nello Spazio, ad oggi sperimentato da un essere umano, è stato di poco superiore a un anno e i casi sono davvero pochi per trarre conclusioni significative (31 astronauti hanno trascorso, in più missioni, oltre un anno nello Spazio ma solo uno, il russo Poliakov, vi ha soggiornato per 438 giorni continuativi!). Ma se rimanessimo più a lungo? Cosa succederebbe al nostro organismo viaggiando nello Spazio o vivendo su un pianeta con una gravità fortemente ridotta rispetto al nostro pianeta? Saremmo in grado di tornare e vivere nuovamente sulla Terra dopo che tali modifiche si sono consolidate nel tempo? E quali "contromisure" dovremmo sviluppare per contrastare o limitare queste modifiche in modo da rendere il nostro rientro sicuro? Questo, tra i tanti, è uno dei quesiti chiave cui la biomedicina cerca di dare risposta prima di intraprendere il nostro lungo cammino nello Spazio profondo.



La ISS
Credits: NASA/ESA

L'atmosfera

Con il termine atmosfera indichiamo l'insieme dei gas che circondano un corpo celeste e che, a causa della forza di gravità, rimane perfettamente aderente alla superficie del corpo stesso accompagnandolo nei suoi movimenti nello Spazio. La composizione dell'atmosfera terrestre è oggi ben conosciuta: l'aria è una soluzione di vari gas: azoto (78% del volume), ossigeno (21%), anidride carbonica (0,03%) e gas rari (in quantità trascurabile). Essa, inoltre, non è mai completamente secca e contiene quantità variabili di vapore acqueo, che si accumula negli strati bassi dell'atmosfera e la cui concentrazione può variare notevolmente; il vapore acqueo è il responsabile della formazione delle nubi e delle precipitazioni. Esso proviene per la maggior parte dall'evaporazione delle acque superficiali, oceaniche e continentali e, in parte, è prodotto dagli esseri viventi nei processi re-

spiratori e nella traspirazione. Esiste un equilibrio chimico nell'atmosfera, per cui la percentuale dei singoli gas rimane invariata, nonostante il fatto che alcuni di essi vengano impiegati nei cicli biologici; tale equilibrio è oggi minacciato dall'emissione nell'atmosfera di gas prodotti dalle attività umane, che tendono a provocare variazioni nella composizione chimica dell'atmosfera inquinandola. Si può affermare che non esiste un limite superiore netto dell'atmosfera, ma essa sfuma gradualmente verso lo Spazio vuoto. Poiché l'atmosfera ha caratteristiche diverse di temperatura, di densità, di composizione, a mano a mano che dal suolo si sale a livelli più elevati, è possibile distinguere in essa una struttura a zone concentriche, differenziate e separate da intervalli di discontinuità. Dal basso verso l'alto si succedono troposfera, stratosfera, mesosfera, termosfera e esosfera.

Le Radiazioni

Ad oggi le radiazioni sono il problema principale da affrontare per l'esplorazione umana dello Spazio. Ma cosa sono? Qual è la loro natura? Esse sono costituite da particelle cariche (elettroni, protoni, ioni) e da particelle neutre (fotoni), che interagendo con la materia vi depositano energia, danneggiandola. Tali particelle sono prodotte e accelerate nel cosmo dalle stelle, le pulsar (stelle di neutroni), le supernovae (stelle alla fine della vita che esplodendo emettono una quantità di energia superiore a quella emessa nei milioni di anni in cui hanno brillato) e dalle nubi di gas e polveri che le circondano (supernovae remnant). Tutte queste particelle fanno parte dei raggi cosmici, che insieme alla radiazione solare, costituiscono le due fonti principali di radiazioni potenzialmente letali per l'esplorazione del nostro Sistema Solare da parte dell'uomo. Infine, nella interazione fra queste particelle e i materiali di cui è costituita, ad esempio, la navicella spaziale, si producono anche i neutroni, particelle prive di carica che possono essere molto pericolose.

Il nostro pianeta ci protegge dai raggi cosmici con il campo magnetico e con l'atmosfera. È tuttavia sbagliato credere che l'uomo viva in un ambiente privo di radiazioni: basti infatti pensare al ruolo determinante che queste hanno avuto nello sviluppo della vita sulla Terra, dove grazie all'energia che esse rilasciano hanno permesso di modificare alcuni composti chimici formando

le basi azotate, i mattoni del DNA. Occorre notare che tale esposizione degli esseri viventi non è avvenuta solo nei primordi della Terra: nella vita di tutti i giorni siamo infatti continuamente esposti alle radiazioni, ad esempio quelle che provengono dai radionuclidi (elementi radioattivi) presenti nella crosta terrestre. Un esempio? La banana è uno dei frutti più radioattivi, a causa dell'alto contenuto di potassio (K) e quindi del suo isotopo radioattivo ⁴⁰K (atomo con lo stesso numero di protoni ma diverso numero di neutroni).

Possiamo dunque affermare che, al di sotto di un certo livello, la vita ha bisogno delle radiazioni: nello spazio il problema è che esse raggiungono livelli troppo alti, tali da mettere in pericolo la vita umana.

Ma allora com'è stato possibile affrontare le missioni spaziali? Come ha fatto l'uomo ad arrivare sulla Luna? Come fa l'uomo a rimanere a bordo della Stazione Spaziale Internazionale per periodi lunghi anche 12 mesi?

Sulla Terra, quando il livello delle radiazioni di una sorgente è molto alto, si utilizzano materiali pesanti come il piombo o il calcestruzzo per costruire barriere che assorbano le radiazioni. Tali schermi, a seconda della grandezza, possono arrivare a pesare anche tonnellate. Proprio a causa del peso questa soluzione non può essere utilizzata nello Spazio: basti pensare che il lancio di ogni Kg di materiale sulla stazione spaziale costa all'incirca 40 mila dollari. Come fare dunque?

La soluzione per le missioni lunari



è legata al tempo: la missione apollo 11 è durata solamente 8 giorni. L'energia depositata dalle radiazioni cosmiche e solari, parzialmente filtrata dalle pareti della capsula, per una così breve permanenza non ha mai raggiunto livelli critici. E per la Stazione Spaziale Internazionale, dove abbiamo detto che i tempi di permanenza sono lunghi anche un anno? La soluzione è stata fornita dalla Terra: la ISS orbita a soli 400 Km dalla superficie ed è ancora abbastanza schermata dal campo magnetico terrestre, e, in minima parte, dall'atmosfera residua a quell'altezza. Certo, il livello di radiazione a bordo è più alto di quello a terra, ma non è critico. Questo non significa che esso non venga attentamente monitorato da appositi esperimenti, i cui risultati sono utilizzati per pianificare missioni future nello Spazio, come la missione su Marte. Cosa abbiamo

appreso, ad oggi, da tutti questi dati? Come è possibile minimizzare, magari in un futuro annullare, gli effetti nocivi sull'uomo della radiazione cosmica?

La cosa più importante che abbiamo capito è che per mitigare il rischio dell'esposizione degli astronauti alle radiazioni occorre agire su diversi fronti.

In particolare abbiamo compreso che, per proteggere il veicolo spaziale dalle radiazioni, oltre all'utilizzo di materiali già impiegati nell'astronautica, come il polyethylene o il kevlar (utilizzato anche come scudo a protezione delle micro-meteoriti), potrà essere necessario utilizzare sistemi "attivi", ad esempio replicando, in piccolo, gli effetti del campo magnetico terrestre. Ciò richiede lo sviluppo di tecnologie che ci consentano di generare dei campi magnetici che schermino tutta o parte della navi-

cella spaziale, o della base spaziale. Inoltre, occorre sviluppare anche sistemi di forecasting (previsione) dell'andamento dell'ambiente di radiazione nel nostro sistema solare (space-weather), in modo da poter pianificare in anticipo le missioni minimizzando il rischio. A tali contromisure si deve aggiungere il contributo della cosiddetta biologia sintetica, utilizzata per lo sviluppo di farmaci in grado di riparare i tessuti umani dai danni prodotti dalle radiazioni, o renderli meno sensibili ad esse.

L'effetto delle radiazioni sugli esseri viventi

Come abbiamo già accennato, quando una particella interagisce con la materia, rilascia in essa una certa quantità di energia. In particolare nei tessuti umani tale rilascio è legato di solito ad un danneggiamento delle cellule di cui sono composti. Se il danno è a carico della membrana cellulare (la membrana che divide la cellula da tutto ciò che è esterno) o di alcuni organuli come i lisosomi (organuli responsabili della degradazione di sostanze estranee e componenti cellulari), la cellula corre il rischio di morire. Il danneggiamento più grave si ha però quando le radiazioni interagiscono col nucleo cellulare che contiene il patrimonio genetico della cellula, il DNA. Proprio perché la vita sulla Terra si è evoluta con le radiazioni, la cellula possiede degli specifici enzimi che sono preposti a riparare il danno al DNA. Se però

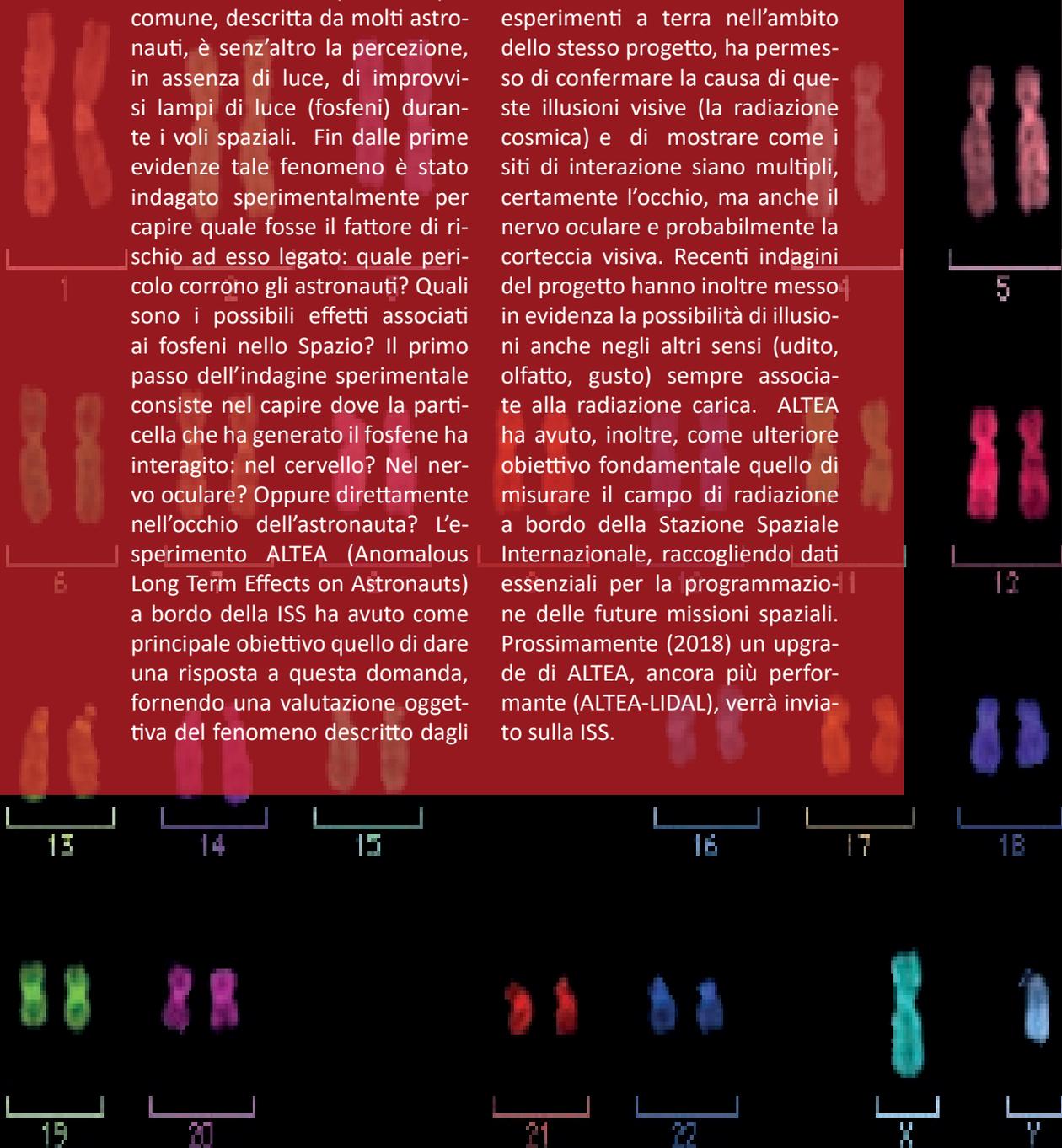
il danno è molto grave, tali enzimi possono sbagliare nella riparazione producendo una mutazione. Generalmente quando questo avviene entrano in gioco ulteriori meccanismi di sicurezza che inducono la cellula a entrare in uno stato di quiescenza o di morte cellulare programmata (apoptosi), in modo da evitare che la mutazione venga ereditata dalle cellule discendenti. Alle volte accade però che tutti questi meccanismi falliscano e la mutazione in questione sia maligna: questo è il meccanismo di sviluppo dei tumori legati alle radiazioni. Recentemente, inoltre, si è iniziato a studiare le problematiche legate all'interazione della radiazione cosmica con il sistema cardiovascolare, o con il sistema nervoso centrale. È, infatti, possibile ipotizzare che tali sistemi, se sottoposti alle dosi tipiche di un lungo viaggio spaziale, potrebbero andare incontro a "malfunzionamenti". Ad esempio, negli ultimi mesi sono stati pubblicati articoli scientifici che ipotizzano una correlazione tra l'insorgenza di demenze precoci e l'esposizione all'irradiazione cosmica.

Interazione tra radiazione cosmica e il sistema nervoso: l'esperimento ALTEA

Nel campo dei possibili "malfunzionamenti" dell'organismo dovuti all'esposizione alle radiazioni, l'interazione della radiazione cosmica o solare col sistema nervoso centrale può dare vita a percezioni sensoriali anomale negli astronauti

durante i voli nello Spazio. La più comune, descritta da molti astronauti, è senz'altro la percezione, in assenza di luce, di improvvisi lampi di luce (fosfeni) durante i voli spaziali. Fin dalle prime evidenze tale fenomeno è stato indagato sperimentalmente per capire quale fosse il fattore di rischio ad esso legato: quale pericolo corrono gli astronauti? Quali sono i possibili effetti associati ai fosfeni nello Spazio? Il primo passo dell'indagine sperimentale consiste nel capire dove la particella che ha generato il fosfene ha interagito: nel cervello? Nel nervo oculare? Oppure direttamente nell'occhio dell'astronauta? L'esperimento ALTEA (Anomalous Long Term Effects on Astronauts) a bordo della ISS ha avuto come principale obiettivo quello di dare una risposta a questa domanda, fornendo una valutazione oggettiva del fenomeno descritto dagli

astronauti. Coadiuvato da diversi esperimenti a terra nell'ambito dello stesso progetto, ha permesso di confermare la causa di queste illusioni visive (la radiazione cosmica) e di mostrare come i siti di interazione siano multipli, certamente l'occhio, ma anche il nervo oculare e probabilmente la corteccia visiva. Recenti indagini del progetto hanno inoltre messo in evidenza la possibilità di illusioni anche negli altri sensi (udito, olfatto, gusto) sempre associate alla radiazione carica. ALTEA ha avuto, inoltre, come ulteriore obiettivo fondamentale quello di misurare il campo di radiazione a bordo della Stazione Spaziale Internazionale, raccogliendo dati essenziali per la programmazione delle future missioni spaziali. Prossimamente (2018) un upgrade di ALTEA, ancora più performante (ALTEA-LIDAL), verrà inviato sulla ISS.



Cariotipo di linfociti umani da sangue periferico dopo esposizione a ioni pesanti in acceleratori di particelle che simulano la radiazione cosmica.
Credits: M. Durante, GSI Darmstadt



La facility EXPOSE a bordo della ISS
Credits: ESA

La Biologia Sintetica

La biologia sintetica è una disciplina nata negli Stati Uniti nel 2000 dall'integrazione tra le competenze proprie dell'ingegneria genetica e quelle della biologia molecolare, al fine di costruire in laboratorio sistemi biologici artificiali attraverso l'assemblaggio di sequenze nucleotidiche sintetizzate chimicamente.

La biologia sintetica considera un sistema biologico come una combinazione di singoli elementi funzionali ricombinabili in nuove configurazioni in modo da ridisegnare funzioni già esistenti oppure crearne di nuove. Una tale ingegnerizzazione, coinvolgendo varie discipline, dalla genetica all'ingegneria genetica, dalla fisica alla chimica, dall'informatica alla biologia dei sistemi, presuppone aspetti concettuali e tecnici più complessi rispetto a quelli per la produzione di organismi geneticamente modificati.

In base al modo in cui gli elemen-

ti funzionali vengono identificati e assemblati, la biologia sintetica utilizza due approcci: uno basato sulla riduzione della complessità e definito top-down (dall'alto in basso) e l'altro teso a produrre complesse funzioni biologiche a partire da molecole prebiotiche semplici, e definito bottom-up (dal basso in alto).

Nell'approccio top-down vengono utilizzati organismi già esistenti (batteri e virus), nei quali viene identificato il genoma minimo attraverso l'eliminazione progressiva di geni non essenziali alla crescita e alla replicazione. Questo traguardo è il primo passo per costruire in laboratorio un batterio artificiale, il cui genoma minimo è poi implementato con componenti biologici necessari per svolgere determinati compiti. Lo scopo è quello di disegnare e realizzare batteri artificiali che svolgono funzioni di interesse applicativo, sia nell'ambito delle te-

rapie mediche che della protezione dell'ambiente. Tuttavia, a differenza dell'ingegneria genetica, in cui la modificazione di un organismo riguarda solo pochi geni, la biologia sintetica riscrive al computer la sequenza del genoma minimo, lo sintetizza *in vitro* chimicamente e inserisce nuovi moduli auto-assemblabili in modo da realizzare un organismo artificiale con determinati circuiti metabolici. È per questo motivo che tale approccio viene anche definito "ingegneria genetica estrema".

La biologia sintetica intende quindi individuare le parti funzionali di base a partire dalle quali ricostruire batteri artificiali; queste sequenze di DNA sono chiamate BioBrick (mattoni biologici) e sono depositate nel Registry of Standard Biological Parts (registro delle parti biologiche standard) del Massachusetts Institute of Technology di Boston, realizzato nel contesto di iGEM (International Genetically Engineered Machine), una competizione di biologia sintetica per giovani studenti. Questo approccio esalta dunque una visione modulare dei sistemi biologici artificiali, in cui funzioni specifiche sono realizzate mediante l'assemblaggio di interruttori, i cui schemi sono simili a quelli di circuiti elettronici. Lo scopo ultimo di questo tipo di approccio è lo sviluppo di nuove tecniche per la progettazione di vaccini, farmaci e biocarburanti avanzati, così come la possibilità di ottenere tessuti innovativi e applicazioni nel biorimedio dell'inquinamento ambientale. Il vantaggio della biologia sintetica risiede nella produzione di sostanze e di processi metabolici di interesse

con tempi e costi minori rispetto a quelli ottenuti con tecniche di biotecnologia. L'approccio bottom-up, detto anche modello Lego, non utilizza organismi già presenti in natura ma intende realizzare complesse funzioni biologiche a partire dall'assemblaggio dei componenti base: DNA e proteine. Lo scopo è quello di costruire una cellula minima utilizzando lipidi, simili a quelli delle membrane cellulari, al cui interno possano avvenire reazioni biologiche semplici. Ad oggi si è riusciti a costruire in laboratorio una protocellula, costituita da una membrana di acidi grassi, che racchiude materiale genetico che può servire da stampo per la sintesi di altro materiale genetico. Pertanto questo approccio si spinge ben oltre l'ingegneria genetica ed è detto anche di "biologia sintetica assoluta".

Così mentre l'approccio top-down ha applicazioni industriali come la sintesi di nuove molecole quello bottom-up contribuisce allo studio dell'origine della vita: costruire una cellula artificiale partendo da molecole semplici fornisce indicazioni preziose per capire come si sia originata la vita sulla Terra.

Quindi con l'approccio top-down la biologia sintetica potrebbe farci compiere un balzo in avanti nel futuro con la creazione di organismi sintetici che potrebbero contribuire alla salvaguardia della nostra salute e di quella del nostro pianeta, mentre con l'approccio bottom-up e la riproduzione di una cellula primordiale potrebbe farci compiere un balzo indietro nel tempo di oltre 3,7 miliardi di anni sulle tracce delle prime mole-

cole da cui si è evoluta la vita sulla Terra.

I Batteri artificiali

Il *Mycoplasma mycoides* JCVI-syn1.0 è il primo esempio di batterio sintetico fabbricato dall'uomo e derivato interamente da un genoma sintetico, costruito con un sintetizzatore chimico a partire da 4 diverse sostanze chimiche, i nucleotidi, seguendo le informazioni sulla sequenza fornita da un computer.

Questo batterio è stato sintetizzato nel 2010 nel J. Craig Venter Institute (JCVI) dopo un decennio di numerose sfide e imprevisti. Per esempio l'inserimento nella sequenza nucleotidica di un nucleotide sbagliato ne ha rallentato la costruzione perché il batterio artificiale non si moltiplicava e non produceva proteine. Per realizzare JCVI-syn1.0 è stato utilizzato un genoma batterico di piccole dimensioni, quello del *Mycoplasma mycoides* con 901 geni, che è stato sintetizzato *in vitro* ed infine inserito in *Mycoplasma capricolum* privato del proprio genoma. Per ricostruire l'intero genoma sono state sintetizzate 1078 sequenze di DNA, ciascuna da 1080 nucleotidi coppie di basi. Per assemblarle nell'ordine corretto, ciascuna sequenza aveva alle estremità 80 coppie di basi che si sovrapponevano con quelle delle sequenze vicine. Inoltre, per riconoscere l'origine sintetica del cromosoma assemblato, alcune sequenze contenevano sequenze di basi che, in codice, decifrano un indirizzo e-mail, i nomi di alcune delle perso-

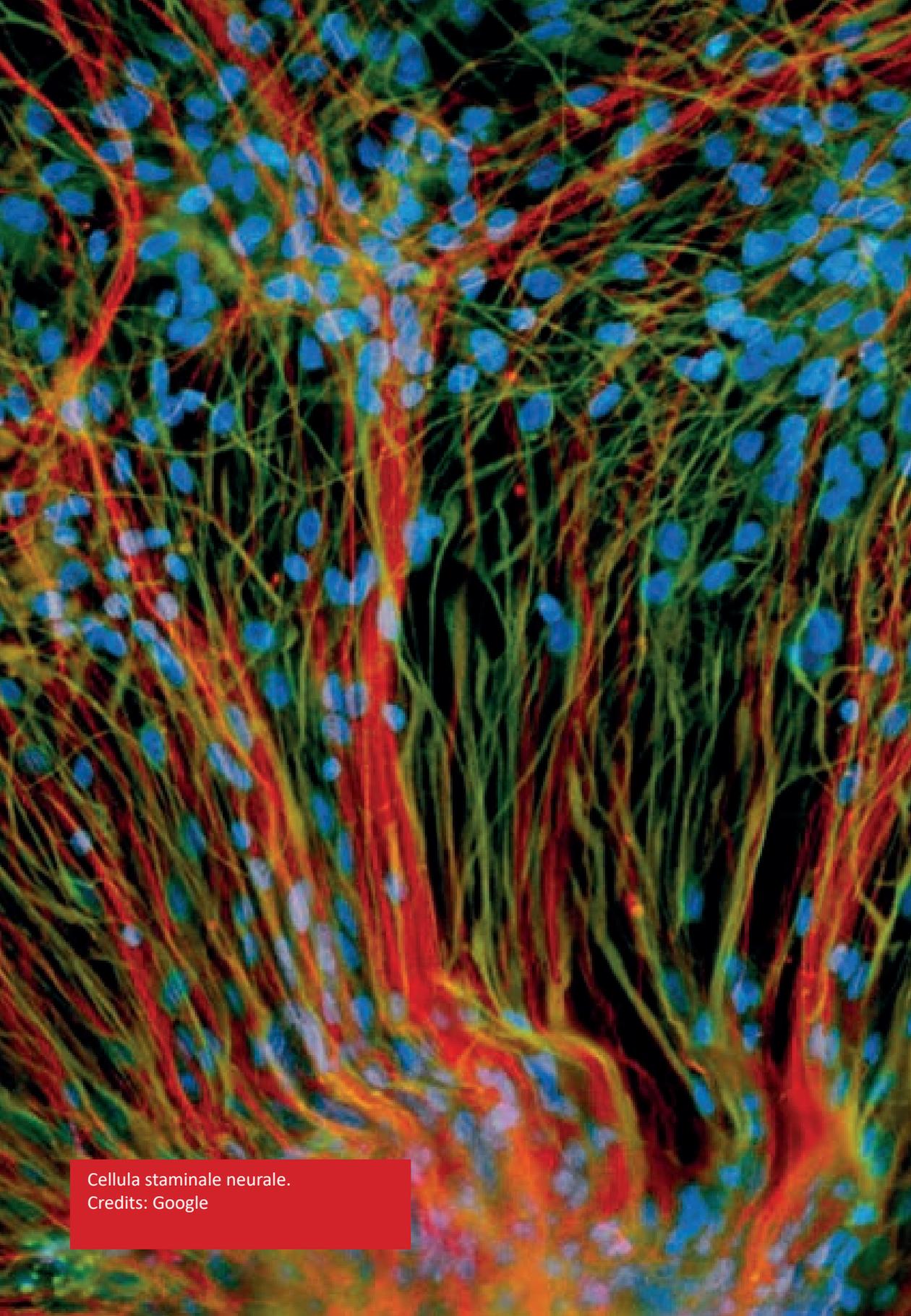
ne coinvolte nel progetto e citazioni famose. Tuttavia le attrezzature disponibili erano in grado di assemblare solo sequenze di DNA molto brevi e pertanto l'assemblaggio delle sequenze, prima in segmenti di 10.000 coppie di basi, quindi di 100.000, fino al cromosoma completo, è stato possibile utilizzando il sistema di ricombinazione del lievito. Il batterio sintetico JCVI-syn1.0 è dunque un mix di sequenze nucleotidiche e di componenti di cellule diverse, e fornisce la prova che è possibile riprogrammare una cellula esistente a partire da un genoma sintetico. Tuttavia va anche evidenziato che per la sua realizzazione è stato utilizzato come "contenitore" un altro batterio privato del suo genoma, il quale ha fornito la parete cellulare e il citoplasma con i suoi costituenti. Infine, nel 2016 attraverso la progressiva eliminazione di geni non essenziali è stato realizzato il batterio sintetico JCVI-Syn3.0 in grado di crescere e riprodursi con un genoma minimo di soli 473 geni.

Applicazioni Spaziali della Biologia Sintetica

Sulla Terra siamo abituati a consumare diversi composti di origine microbica, come l'ossigeno prodotto dai fototrofi, oppure cibo e bevande derivanti da microorganismi commestibili e dai loro processi di fermentazione (come yogurt e vino), medicinali, varie sostanze chimiche, biomateriali, biocarburante, e altro ancora. Perché allora non usare i microorganismi per far

fronte ai bisogni dell'uomo nello Spazio, così come facciamo sulla Terra? Perché non disegnare batteri sintetici che svolgano determinati compiti? La biologia sintetica potrebbe, infatti, ridurre sensibilmente i costi dell'esplorazione umana dello Spazio abilitando i sistemi di supporto alla vita, attraverso la produzione di prodotti di consumo *in situ* oppure, per esempio, sintetizzando componenti strutturali, come bioplastiche o inchiostro per stampanti 3D. L'entusiasmo per le applicazioni spaziali della biologia sintetica deve però confrontarsi con il fatto che gli organismi si sono evoluti sulla Terra e che le condizioni non-terrestri risultano generalmente ostili; inoltre, gli strumenti e la tecnologia devono essere adattati a tali condizioni. Tuttavia i primi passi per risolvere la sfida del trasferire la biologia sintetica dal laboratorio allo Spazio sono già stati mossi. Sempre più apparati di biologia molecolare vengono testati in condizioni di microgravità: per esempio la ISS è stata recentemente equipaggiata con una piattaforma per condurre l'analisi dell'espressione genica e con un termociclatore miniaturizzato per am-

plificare il DNA; la NASA sta inoltre sviluppando un apparecchio per isolare macromolecole in microgravità, mentre un sequenziatore di DNA, già testato durante un volo parabolico, è ora in uso a bordo della ISS. La biologia sintetica offre una soluzione per la pionieristica colonizzazione di altri mondi, ad esempio di Marte. Infatti l'esplorazione umana dello Spazio è severamente limitata dai costi dei lanci di materiale nello spazio. I microbi pesando poco occuperebbero uno Spazio insignificante nella navicella spaziale e, una volta giunti a destinazione, potrebbero essere coltivati per fornire le risorse a supporto dell'insediamento umano. Si potrebbe dunque pianificare la costruzione di un avamposto marziano fornito di una banca di costrutti genetici per conferire ai microbi specifiche funzioni a seconda delle necessità. Come ultimo obiettivo questi microbi sintetici potrebbero essere, inoltre, in grado di crescere utilizzando le risorse disponibili in situ, diminuendo così ulteriormente la dipendenza dalla Terra dell'avamposto marziano. Una tale strategia è indicata come "sfruttamento delle risorse *in situ*".



Cellula staminale neurale.
Credits: Google



LA STAZIONE SPAZIALE INTERNAZIONALE

Oggi l'umanità ha già praticamente fatto un passo oltre l'orbita terrestre e in futuro ci saranno i voli su Marte, la costruzione di basi lunari, la conquista dello spazio interplanetario. La partecipazione dell'uomo può ampliare notevolmente la gamma e i risultati di una ricerca condotta con l'obiettivo di comprendere e, forse, in futuro di colonizzare il cosmo.

Durante il volo l'uomo è esposto agli effetti negativi di vari fattori ambientali: assenza di gravità, ridistribuzione del sangue nel corpo, mancanza di supporto del carico, ipocinesia, isolamento, stress, irraggiamento da raggi cosmici, vibrazioni, rumore e altri ancora. La vita nello spazio è sostanzialmente diversa da quella usuale che gli astronauti conducono sulla Terra. Un essere umano a causa di tali condizioni ambientali subisce variazioni significative e assai dannose dei propri ritmi biologici.

La fattibilità di viaggi interplanetari sarà basata in futuro sull'esperienza

acquisita dai voli orbitali dell'uomo della durata di oltre un anno – durante i quali un efficace sistema di assistenza medica ha permesso di difendere la salute degli astronauti e ha fornito loro la possibilità di ritornare integri alle condizioni di gravità terrestre.

I futuri voli al di là dell'orbita terrestre richiedono un'accurata pianificazione e preparazione poiché ancora molti sono i quesiti irrisolti. Saranno necessarie numerose ricerche che dovranno fornire le tecnologie e le conoscenze biomediche necessarie a questa complessa, affascinante impresa.

Belakovskiy Mark Samuilovich

Head of the Department of Scientific Achievement, Institute of Biomedical Problems, Moscow.



L'esecuzione di un esperimento sulla ISS
Credits: ESA

ISS: un laboratorio di ricerca fluttuante nello spazio

Provate ad immaginare un laboratorio fluttuante nello Spazio in assenza di peso al servizio della scienza e dell'industria terrestre. Ebbene, questo laboratorio esiste già. Si tratta della Stazione Spaziale Internazionale che è in orbita ad un'altitudine di 400 Km dalla Terra e che garantirà, nei piani attuali, la presenza umana permanente nello Spazio sino al 2024. Tutto ebbe inizio il 25 gennaio del 1984, quando gli Stati Uniti invitarono le altre nazioni a prendere parte alla realizzazione di una stazione spaziale "con equipaggio permanente". L'Europa, rappresentata dall'ESA, il Canada e il Giappone risposero con entusiasmo e iniziarono a collaborare alla definizione del progetto. Nel 1993, la Russia divenne il quinto partner, facendo del progetto il più vasto programma di collaborazione internazionale fino ad oggi intrapreso nell'ambito della scienza e della tecnologia. La ISS è infatti il

frutto del lavoro congiunto di 5 agenzie spaziali rappresentanti 15 nazioni: Stati Uniti, Canada, Giappone, Russia, 11 Stati membri dell'Agenzia Spaziale Europea.



Il laboratorio COLUMBUS della ISS
Credits: ESA

Una collaborazione su scala mondiale

*“Nella Stazione Spaziale Internazionale c’è un traffico infernale”
(Gianni Rodari, La Stazione Spaziale)*

Avamposto della colonizzazione dello Spazio, laboratorio di ricerca scientifica unico nel suo genere, luogo di sperimentazione delle tecnologie più avanzate, la Stazione Spaziale Internazionale (o ISS, International Space Station) è il più importante programma di cooperazione internazionale mai realizzato. È il risultato di una estesa cooperazione scientifica e tecnologica tra USA, Russia, Giappone, Canada e gli 11 paesi europei che aderiscono all’ESA (Belgio, Danimarca, Francia, Germania, Italia, Norvegia, Paesi Bassi, Spagna, Svezia, Svizzera e Inghilterra). Dal 2000, quando salì a bordo il primo equipaggio permanente, la ISS (la cui costruzione ha avuto inizio nel 1998) assicura una ininterrotta presenza umana nello

Spazio. Con i suoi sette laboratori pressurizzati e le nove piattaforme esterne, rappresenta un vero e proprio laboratorio orbitante per la ricerca scientifica e tecnologica. Consente di condurre esperimenti impossibili sulla Terra in diverse aree tematiche, dalla fisica alla chimica, dalla biologia alla medicina e naturalmente nel campo dell’osservazione dell’Universo e del pianeta Terra. Persone di diversa estrazione, formazione e nazionalità lavorano e collaborano insieme per curare nei minimi dettagli il funzionamento di questa enorme costruzione spaziale. Sono richiesti tecnici e specialisti in pressoché tutti i campi della scienza e della tecnica. Una stazione spaziale fa anche affidamento sulla forza lavoro di manager, consulenti legali, specialisti delle relazioni internazionali e naturalmente di astronauti.



La MIR
Credits: Roscosmos

Le prime stazioni spaziali

La prima stazione spaziale in orbita fu la sovietica “Salyut” (che in russo significa “saluto”), realizzata nel 1971. Nel corso degli 11 anni che seguirono, l’Unione Sovietica lanciò nello Spazio altri 6 laboratori, i cui obiettivi erano sia militari che scientifici. Il primo laboratorio americano, lo “Skylab”, venne invece lanciato nel 1973 e fu abitato soltanto negli anni 1973-1974. Successivamente fu ideato un nuovo programma, lo Spacelab, che nacque dalla collaborazione tra NASA e ESRO (attualmente ESA). Il modulo Spacelab, costruito dall’Agenzia Spaziale Europea, veniva installato nel vano di carico dello Space Transportation System (STS) e collegato alla cabina di quest’ultimo mediante un tunnel. L’STS, comunemente noto come Space Shuttle, è stato un sistema di lancio spaziale riutilizzabile della NASA adibito a missioni spaziali in orbita intorno alla Terra. Lanciato per la prima volta nel 1981, ha portato a termine la sua ultima missione nel 2011. Lo Spacelab era un laboratorio riutilizzabile e consisteva in numerosi componenti, incluso un modulo pressurizzato e zone non pressurizzate. Una nuova

era nello sviluppo delle stazioni spaziali ebbe però inizio quando, nel febbraio del 1986, venne lanciato il primo componente della stazione spaziale sovietica “Mir” (che in russo significa “pace”). Il piano consisteva nell’assemblare direttamente nello Spazio, nell’arco di diversi anni, una stazione modulare costituita da ben sei parti. Tuttavia, l’insorgenza di difficoltà economiche rinviò il completamento della Mir e, solo al termine della Guerra Fredda e grazie ad un contributo finanziario da parte degli Stati Uniti, fu possibile portare avanti questo ambizioso programma. L’America in cambio ottenne la possibilità di far salire i propri astronauti a bordo della Mir e di acquisire esperienza in vista della realizzazione della ISS. Anche l’Europa ebbe l’opportunità di inviare due dei propri astronauti sulla stazione spaziale nell’ambito del progetto Euromir. Le attività comuni sulla Mir vennero portate a termine nella seconda metà del 1998, quando il programma della ISS stava già prendendo corpo. La Mir fece il suo rientro distruttivo programmato il 23 marzo 2001.

Dove si trova la ISS

La ISS orbita intorno alla Terra ad una distanza di circa 400 Km dalla superficie terrestre. Sebbene questa possa sembrare una distanza notevole, in realtà è possibile vedere la Stazione, ad occhio nudo, in una serata limpida. Quando è visibile, la ISS somiglia ad una stella vagante che si sposta nel cielo. Il momento migliore per vederla è appena dopo il tramonto o immediatamente prima dell'alba. In questi intervalli di tempo noi, come osservatori, ci troviamo nell'ombra della Terra e attorno a noi vi è il buio, mentre la ISS, che viaggia ad una elevata altitudine,

è ancora illuminata dal Sole. Sebbene la ISS segua sempre la stessa orbita, compiendo un giro completo intorno alla Terra ogni 90 minuti, essa non attraversa sempre gli stessi luoghi del nostro pianeta. Ciò è dovuto al fatto che anche la Terra ruota intorno al proprio asse, una volta ogni 24 ore. Ogni volta che la ISS raggiunge lo stesso punto della propria orbita, la Terra ha ruotato e al di sotto della ISS vi è un luogo diverso. L'orbita della Stazione Spaziale copre l'85% della superficie terrestre, soltanto le regioni più settentrionali e più meridionali della Terra non sono in grado di vederla.





I "pezzi" che compongono la ISS
Credits: ESA

ISS: un grande puzzle

L'assemblaggio in orbita della ISS è iniziato nel 1998 ed è stato completato nel 2011. Rappresenta la più grande struttura mai costruita dall'uomo nello Spazio. Con un peso di 455 tonnellate, una lunghezza di circa 100 metri e una larghezza di circa 80 metri, la Stazione si estende su un'area delle dimensioni di un campo di calcio. Il volume pressurizzato della ISS, pari a 1200 m³ è equivalente a quello di due jumbo jet Boeing 747. Vi è spazio a sufficienza per ospitare fino a sette membri dell'equipaggio e capacità per realizzare una vasta gamma di esperimenti scientifici. A tutt'oggi, non esistono razzi sufficientemente grandi o potenti per lanciare nello Spazio una struttura di queste dimensioni. Esattamente come un puzzle, la ISS è stata assemblata congiungendo circa 100 pezzi, trasportati nello Spazio con oltre 50 lanci di diversi veicoli. L'assemblaggio dei vari pezzi è stato eseguito utiliz-

zando bracci robotici sia dallo Space Shuttle americano sia dalla ISS, mentre gli astronauti hanno contribuito a completare il lavoro con un totale di 160 passeggiate spaziali. L'attuale architettura vede la ISS costituita da moduli pressurizzati in lega di alluminio per lo più adibiti a laboratori, un traliccio munito di un complesso sistema di pannelli solari per la generazione dell'energia usata a bordo e varie piattaforme esterne per l'installazione di equipaggiamenti ed esperimenti operanti in ambiente non pressurizzato. La partecipazione europea, ed in particolare italiana, alla costruzione della ISS è stata significativa; in Italia, infatti, sono stati realizzati molti degli elementi pressurizzati della Stazione Spaziale. Tra questi troviamo:

- i tre moduli logistici MPLM (Multi-Purpose Logistic Module) Leonardo, Raffaello e Donatello. Lanciati nella stiva dello Space Shuttle,

rifornivano la ISS di materiale che richiedeva un ambiente pressurizzato e riportavano a terra equipaggiamenti non più necessari a bordo. Leonardo è stato poi modificato per renderlo compatibile alla permanenza continua nello Spazio ed è diventato l'ultimo elemento abitabile aggiunto alla configurazione permanente della ISS, divenendo il PMM (Permanent Multipurpose Module);

- il Nodo 2 con funzione abitativa ed il Nodo 3 che ospita apparecchiature per la produzione e purificazione di acqua e la generazione di ossigeno;
- la struttura primaria e secondaria del laboratorio europeo Columbus concepito per condurre molteplici esperimenti di medicina, biologia, scienza dei materiali, fisi-

ca dei fluidi e ogni altra ricerca che possa trarre vantaggio dallo svolgimento in condizioni di assenza di peso;

- il modulo cargo dei 5 veicoli di approvvigionamento europei ATV (Auto-mated Transfer Vehicle);
- la Cupola, modulo di osservazione e controllo, che offre agli astronauti un punto di osservazione per la guida delle operazioni robotiche all'esterno della ISS e per il monitoraggio delle operazioni di attracco dei veicoli in visita e delle passeggiate spaziali. La chiara visuale della Terra e dei corpi celesti permette, inoltre, di usare la Cupola per una varietà di applicazioni scientifiche nel settore dell'osservazioni della Terra, dell'atmosfera e dell'Universo.

Come fa la ISS a rimanere in orbita

Per raggiungere l'orbita e rimanere, la ISS deve acquistare e mantenere una velocità specifica. La velocità necessaria per rimanere in orbita dipende dalla distanza dalla Terra. Se la velocità è troppo ridotta, il veicolo spaziale ricadrà sulla Terra. Se, invece, la velocità è troppo elevata, il veicolo verrà proiettato nello Spazio. Per generare una velocità adeguata è necessario applicare una forza che acceleri il veicolo spaziale. Se la forza applicata non è sufficiente, la forza terrestre (gravità) attrarrà il veicolo sulla Terra. Se, invece, la

forza applicata è troppo grande, la forza gravitazionale della Terra non sarà sufficiente per mantenere in orbita il veicolo. La ISS e gli altri satelliti orbitano dunque attorno alla Terra analogamente alla Luna. La Terra e gli altri pianeti del nostro sistema solare orbitano attorno al Sole. Ma quanto tempo impiegano i pianeti del nostro Sistema Solare per orbitare attorno alla loro stella (in mesi terrestri)? Mercurio: 3 mesi; Venere: 7 mesi; Terra: 12 mesi; Marte: 23 mesi; Giove: 142 mesi; Saturno: 354 mesi; Urano: 1008 mesi; Nettuno: 1978 mesi; Plutone: 2976 mesi.



L'interno della ISS
Credits: ESA/NASA

I sistemi di controllo ambientale e supporto alla vita

Le orbite terrestri e gli ambienti spaziali planetari sono caratterizzati da assenza di aria respirabile, temperature estreme, modificate condizioni di gravità, radiazioni ionizzanti. Questi aspetti pongono problemi di sopravvivenza significativi per gli esseri viventi presenti a bordo nonché di efficienza per i sistemi e le apparecchiature che devono operare in tali condizioni ambientali. In generale più sono critiche le condizioni ambientali previste durante una missione, più è lontana la fonte dei rifornimenti, più sarà complesso il Sistema di Controllo Ambientale e Supporto alla Vita (Environmental Control & Life Support Systems – ECLSS). Ogni modulo spaziale include Sistemi di questo tipo, le cui funzioni riguardano sia il controllo dell'ambiente abitabile che la gestione delle risorse vitali. Più in particolare, gli astronauti e le attrezzature attualmente a bordo della ISS sfruttano sistemi fisico-chimi-

ci e la loro configurazione per un modulo della ISS può essere molto complessa, una vera e propria sfida per i progettisti! Il Nodo 2, per esempio, deve collegare tutti i moduli adiacenti ad esso collegati, il che aumenta notevolmente la complessità della configurazione dei sistemi fluidici. Ad oggi siamo in grado di condurre le operazioni di controllo ambientale, in termini di gestione in sicurezza dell'atmosfera interna (pressione, composizione, temperatura, umidità e contaminazione) in condizioni normali e di emergenza. Sappiamo, ad esempio, rilevare ed estinguere incendi in condizioni di microgravità. Siamo, inoltre, in grado di affrontare i problemi di qualità dell'aria interna relativi alla presenza di contaminazione gassosa, particellare e microbica, attraverso i sistemi di ventilazione e rimozione, ma anche operando una rigorosa selezione preventiva dei materiali da utilizzare a bordo.

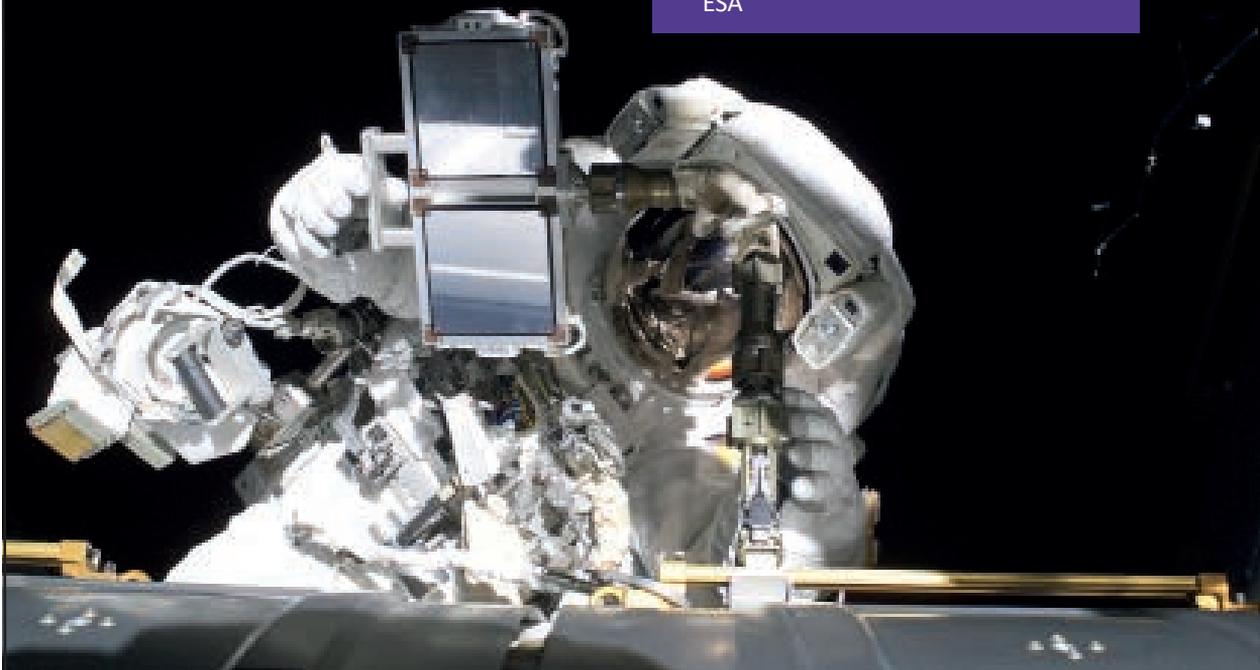
Vivere a bordo della ISS

La difficoltà di realizzare missioni prolungate o insediamenti permanenti non è solo relativa alla soluzione dei quesiti posti dagli eventuali limiti fisiologici, ma anche alla definizione dell'ambiente e dei sistemi necessari all'uomo per lavorare efficacemente come individuo e come parte di un gruppo capace di mantenere un equilibrio psicologico nelle condizioni espresse dal volo spaziale. Attualmente la ISS è abitata costantemente da sei astronauti che rimangono normalmente a bordo per un massimo di sei mesi. Dopo la dismissione dello Space Shuttle americano nel 2011, gli astronauti possono raggiungere la ISS solo a bordo del razzo russo Soyuz.

A partire dal novembre del 2000, le navicelle Soyuz effettuano il trasporto degli equipaggi (non più di tre persone) sulla ISS. Da allora, una di esse resta sempre attraccata alla Stazione Spaziale per poter essere utilizzata in

caso di emergenza, qualora gli astronauti debbano rientrare con urgenza a Terra per situazioni impreviste. Il lancio viene effettuato dal Cosmodromo di Baikonur in Kazakistan; raggiunta l'orbita, in sei ore circa, le fasi di rendez-vous (avvicinamento alla ISS) e docking (attracco) avvengono automaticamente, ma con il costante monitoraggio dell'equipaggio. La fase di rientro viene, invece, completata in meno di tre ore e mezza e l'atterraggio avviene sulle steppe del Kazakistan in Asia Centrale. Dal 2006, inoltre, la NASA ha cominciato ad investire risorse tecniche e finanziarie per stimolare il settore privato allo sviluppo di sistemi di trasporto spaziali sicuri, affidabili e convenienti. Questa iniziativa ha consentito la messa a punto di nuovi veicoli di lancio e di trasporto, per l'invio di carichi da e verso la ISS, che prendono il nome di COTS (Commercial Orbital Transportations Services).

L'astronauta Thomas Reiter a lavoro all'esterno della ISS. Credits: NASA/ESA





L'uscita degli astronauti verso l'esterno della ISS

Credits: ESA/NASA

Come passano la giornata gli astronauti

Poiché la ISS orbita intorno alla Terra in 90 minuti non esiste il ritmo di 24 ore, scandito dal giorno e dalla notte, cui siamo abituati sulla Terra. Durante un'orbita, la ISS si trova alla luce del Sole per 45 minuti e all'ombra della Terra per i rimanenti 45 minuti. Tuttavia, gli astronauti cercano di mantenere un ritmo artificiale di 24 ore che sia il più possibile simile a quello "terrestre". Utilizzano, infatti, come riferimento il Greenwich Mean Time (GMT), ovvero l'ora locale in corrispondenza del meridiano che attraversa Greenwich (Inghilterra), per tentare di dormire per 8 ore durante la "notte" e di lavorare per 8-10 ore nei giorni feriali. Il resto della giornata viene invece dedicata a mangiare, fare esercizio fisico, rilassarsi e divertirsi. Tuttavia, dal lunedì al venerdì, gli astronauti seguono una routine molto strutturata: gli orari dei pasti sono prestabiliti, così come quelli delle pause di relax, delle riunioni, dei momenti di privacy e di svago. Se non vi sono particolari esperimenti da se-

guire o lavori di manutenzione da svolgere, il sabato gli astronauti lavorano solo per 4 ore, mentre la domenica hanno la giornata libera. In ogni caso, il programma giornaliero può sempre essere scombussolato da eventi imprevisti o dall'arrivo di navicelle. Molto tempo viene dedicato all'esecuzione di esperimenti scientifici, ma ovviamente anche al controllo e alla manutenzione degli strumenti e delle apparecchiature di bordo. Tutte le attività a bordo vengono registrate in un diario. Per qualsiasi equipaggio è essenziale disporre di tempo da dedicare anche al relax e ai rapporti interpersonali. Il momento dei pasti rappresenta in genere un'occasione per stare piacevolmente insieme e la sera l'equipaggio spesso si riunisce per guardare un film in DVD. Nel tempo libero gli astronauti possono ricevere una videochiamata dai familiari, una volta alla settimana, e possono ovviamente scambiare messaggi e-mail tutti i giorni con amici e conoscenti. Possono, inoltre, portare con

loro oggetti personali, libri, giochi, musica da utilizzare come intrattenimento nel tempo libero. Oltre alla musica registrata, alcuni astronauti portano nello Spazio i propri strumenti musicali. Un'altra delle loro attività preferite è guardare la Terra e scattare foto attraverso la Cupola. Durante le ore diurne è possibile vedere la straordinaria natura "terrestre" ma anche le opere costruite dall'uomo. Quando invece sulla Terra è notte, si possono osservare le città illuminate e nell'oscurità è possibile individuare vulcani attivi o fulmini durante i temporali.

Immaginate di camminare nello Spazio e di girare attorno alla Terra ad una velocità di circa 28.000 km/h. Questo è quello che centinaia di esploratori dello Spazio hanno sperimentato negli ultimi 50 anni. Le Extravehicular Activity (EVA) o "passeggiate nello Spazio" rappresentano una parte essenziale del lavoro di un astronauta. Consentono, infatti, di installare nuove apparecchiature ed esperimenti e di effettuare attività di manutenzione e riparazione all'esterno della struttura. Dal 1998 sono servite quasi 1.000 ore di attività extraveicolari per costruire e riparare la Stazione Spaziale Internazionale. Durante le passeggiate spaziali, gli astronauti indossano tute protettive per muoversi nel vuoto e sono spesso trasportati da un punto all'altro della Stazione sull'estremità di un braccio robotico. Vi sono, inoltre, speciali corrimano che facilitano i loro spostamenti. Per non rischiare di volare via e perdersi nello Spazio, gli astronauti sono legati alla Stazione per mezzo di cavi sottili. Naturalmente, anche tutti gli utensili degli astronauti devono sempre essere fissati saldamente. Questi utensili sono

molto simili alle chiavi e ai cacciaviti elettrici che è possibile acquistare in un qualsiasi negozio di ferramenta e vengono impiegati per serrare bulloni e bloccare saldamente l'uno all'altro i vari componenti della ISS. Le passeggiate nello Spazio possono durare molte ore. Il record è stato segnato da Susan Helms e James Voss che hanno trascorso quasi nove ore nello Spazio nel marzo 2001.

Dormire a bordo della ISS

Dopo una lunga giornata di lavoro in orbita, non c'è niente di meglio di una buona notte di sonno! Dormire nello Spazio, però, è un'esperienza un po' diversa da quella cui siamo abituati sulla Terra. Non c'è un sopra e un sotto e tutto è senza peso e dunque gli astronauti possono fissare le proprie cuccette a una parete o al soffitto e dormire in qualsiasi posizione, purché, appunto, le cuccette siano fissate a una parete in modo da non fluttuare e andare a sbattere contro qualcosa. Sulla ISS i membri dell'equipaggio dormono generalmente nelle proprie piccole cabine. Se non ce ne sono abbastanza per tutti gli astronauti a bordo, un astronauta può accomodarsi in uno dei moduli della ISS. Le cabine private americane sono insonorizzate e qui gli astronauti possono ascoltare musica, usare un computer portatile e riporre gli effetti personali in un grande cassetto o in reti fissate alle pareti della cabina. La cabina dispone anche di una luce di lettura, una mensola e una scrivania. È importante che le cabine siano ben aerate, altrimenti gli astronauti possono svegliarsi in debito di ossigeno a causa della bolla di anidride carbonica che si forma attorno alla loro te-

sta durante la respirazione. Sulla Terra, l'aria viene costantemente mossa dalle correnti di convezione che si formano quando l'aria calda, più leggera, sale mentre l'aria fresca, più pesante, scende. Queste correnti però non hanno alcun effetto in condizioni di assenza di peso, dove non vi sono oggetti più o meno leggeri di altri. Senza i ventilatori, l'anidride carbonica espirata durante il sonno da un astronauta non circolerebbe e il gas rimarrebbe intrappolato in una bolla intorno alla sua testa. Sulla ISS vi sono 16 tramonti ed albe ogni 24 ore e pertanto non è facile capire quando è il momento di dormire. Gli astronauti lavorano e dormono secondo un programma giornaliero. Generalmente è previsto che dormano otto ore al termine di ogni giornata di missione. Possono indos-

sare mascherine o oscurare le finestre per evitare la luce del Sole durante il sonno. Per svegliarsi usano una sveglia o la musica trasmessa dalla centrale di controllo della missione sulla Terra. La mancanza di moto e l'emozione di trovarsi nello Spazio possono però disturbare il sonno di un astronauta. Gli astronauti, proprio come noi, possono soffrire di problemi di insonnia durante le missioni. La comunità medica sta conducendo, tra gli altri, una serie di esperimenti sull'effetto che luci di diverso colore e intensità hanno sul tono dell'umore e sul sonno.

Sembra infatti che l'inibizione o il rilascio della melatonina, l'ormone che "promuove" il sonno, possa essere influenzato dal tipo di illuminazione.

La cupola della ISS vista dall'esterno.
Credits: ESA/NASA





Confezioni di cibo sulla ISS
Credits: ESA/NASA

Cosa mangiano gli astronauti

Negli ultimi 50 anni sono stati fatti molti progressi nell'alimentazione degli astronauti. Tuttavia, c'è ancora molto da fare per mantenere un buono stato nutrizionale dell'equipaggio in previsione di viaggi di lunga durata su Marte e oltre. L'alimentazione a cui furono sottoposti i primi astronauti è un'altra dimostrazione del loro spirito pionieristico: gli equipaggi dovettero sopportare cubetti di cibo liofilizzato freddo che si reidratava solo al contatto con la saliva e paste insapori che venivano spremute direttamente in bocca da tubetti come dentifricio. Il cibo non era per niente appetitoso! Nei cinquant'anni trascorsi dal primo viaggio dell'uomo nello Spazio, i cibi per gli astronauti si sono trasformati da intrugli poco gradevoli a manicaretti preparati dai più grandi chef del mondo. Sono stati creati anche piatti speciali per festeggiare il Capodanno,

i compleanni o l'arrivo di un nuovo membro dell'equipaggio. Si tratta di piatti che devono rispettare i rigidi standard individuati dalla NASA: avere un giusto apporto di proteine e minerali, ma poco sale. La durata dell'alimento deve essere compresa tra i 18 e i 24 mesi, ma senza l'impiego di conservanti: via libera alle metodiche che permettono la conservazione del cibo, ad esempio il trattamento termico, con un'attenzione molto speciale al mantenimento del colore e del gusto.

I principali problemi nutrizionali sono infatti tre: il mantenimento delle proprietà organolettiche del cibo (le proprietà chimico-fisiche quali il sapore e l'odore percepite dagli organi di senso) che deve essere appetibile anche dopo lunghi periodi di conservazione; l'efficacia nutrizionale, per mitigare i problemi associati alle condizioni ambientali (microgravità, attività fisica

limitata); la sicurezza del cibo, che deve potersi conservare per lunghi periodi di tempo. Inoltre il momento del pasto è molto importante per gli astronauti poiché rappresenta un'opportunità di aggregazione e integrazione per l'equipaggio: durante la giornata standard in orbita, infatti, gli astronauti sono occupati in compiti diversi nei vari moduli della ISS e le possibilità di socializzare possono essere scarse. Pur con i limiti determinati dalla necessità di conservare il cibo in forma congelata, disidratata e liofilizzata è importante mantenere l'appetibilità degli alimenti, così come poter scegliere tra diversi tipi di alimenti sembra essere importante per il morale dell'equipaggio. Attualmente sono disponibili oltre 200 ricette e gli stessi astronauti possono scegliere i menù prima della missione. Il cibo "spaziale" è confezionato in pacchetti singoli, preparato in piccole porzioni ed è cotto nella cucina di bordo dotata di scaldavivande, frigorifero e distributore di acqua calda e fredda. Le bevande, sorseggiate da sacchetti di plastica con cannuccie, sono fornite sotto forma di polvere disidratata e mescolate con acqua prima del consumo. Sono previsti tre pasti al giorno, oltre agli snack che possono essere consumati in qualsiasi momento della giornata; vengono forniti condimenti come ketchup, senape, maionese e sono disponibili anche sale e pepe, ma solo in forma liquida. Gli astronauti riportano, inoltre, una diminuzione sensibile dell'olfatto e del gusto durante la loro permanenza nello Spazio. Spiega Paolo Nespoli, vice-comandante di una spedizione sulla

ISS e primo italiano a compiere una missione di lunga durata: "Il cibo è una delle maggiori criticità a bordo. Nelle condizioni che si creano nella Stazione Spaziale si percepisce meno il profumo del cibo e questo è essenziale per stimolare l'appetito. Ciò, assieme all'assenza di gravità che causa la perdita del tono muscolare, porta a un deperimento fisico". Per questo motivo, durante la missione viene chiesto agli astronauti di compilare un questionario indicando i cibi che consumano giornalmente e un nutrizionista fornisce supporto e consigli su come migliorare la dieta, se necessario. L'apporto nutrizionale viene monitorato selezionando attentamente gli alimenti da portare a bordo per conoscere esattamente quello che gli astronauti assumeranno in termini di nutrienti e calorie, tenendo conto anche dell'attività fisica svolta. Da approfondite ricerche è emerso che, sebbene gli astronauti consumino solo poche calorie in meno, vi sono alcune importanti differenze tra una dieta bilanciata sulla Terra e una dieta bilanciata nello Spazio. Ad esempio, sulla Terra, la vitamina D3 viene prodotta dalla reazione di una sostanza chimica naturalmente presente nella pelle, il 7-deidrocolesterolo, con i raggi UV-B. Nello Spazio, però, gli astronauti non possono sintetizzare la vitamina D e pertanto devono assumere alimenti che sono stati arricchiti con questa vitamina. Inoltre, l'organismo ha bisogno di ferro per produrre l'emoglobina (la principale componente dei globuli rossi), la mioglobina (un'importante proteina delle cellule muscolari) e certi enzimi. Uno degli

effetti secondari della permanenza degli astronauti nello Spazio è la riduzione del numero di globuli rossi. Questo fenomeno, insieme al calo dell'emoglobina, fa sì che la quantità di ferro necessaria all'organismo diminuisca ed è quindi importante ridurne l'apporto con la dieta. Infine, in assenza di peso, anche con normali livelli di assunzione di sodio, si attivano degli ormoni che causano la ritenzione e l'accumulo nell'organismo di questo elemento. Per questa ragione, l'introduzione di sodio, un minerale che assumiamo principalmente dal cloruro di sodio o sale da cucina con la dieta, deve essere attentamente controllata. Insieme al potassio, il sodio aiuta a mantenere la distribuzione dell'acqua e regola la pressione sanguigna e la funzionalità cardiaca. Inoltre, la contaminazione microbica potrebbe mettere in serio

pericolo la salute dell'equipaggio. Per questo motivo il cibo deve subire trattamenti che ne eliminino i rischi e che permettano, al contempo, la conservazione degli alimenti per periodo piuttosto lunghi.

Niente briciole!

A bordo della ISS è possibile mangiare una grande varietà di alimenti, basta evitare cibi poco salutari e pesanti e quelli che possono sgretolarsi e perdere residui. Immagina, infatti, cosa accadrebbe dando un bel morso ad un fragrante biscotto. Di sicuro verremmo avvolti da una marea di briciole, che andrebbero in giro per tutta la Stazione Spaziale e questo è assolutamente da evitare! Altrimenti rischieremo di avere un ambiente sporco, pieno di residui di cibo, compromettendo così le condizioni igieniche sulla ISS.

La cena per celebrare il 50° anniversario del volo di Jurij Gagarin sulla ISS
Credits: ESA/NASA





Una sessione di allenamento sulla ISS.
Credits: ESA/NASA

Perché gli astronauti si allenano sulla ISS?

A causa dell'assenza di peso i muscoli e le ossa degli astronauti si indeboliscono presentando un'importante perdita di calcio nelle ossa. Inoltre, per la mancanza di pressione idrostatica, i fluidi corporei si spostano "verso l'alto" determinando un effetto caratteristico del volo spaziale che gli americani chiamano "puffy face and chicken legs", ovvero visi gonfi e zampe da gallina (sottili). Ovviamente tutto l'organismo è soggetto a modifiche più o meno importanti in relazione, peraltro, alla durata di permanenza nello Spazio. Quanto più lunga è la permanenza di un astronauta nello Spazio, tanto più marcati saranno i cambiamenti che si verificano. Così i sistemi cardiocircolatorio, muscoloscheletrico, vestibolare, immunitario etc. si modificano per "adattarsi" al nuovo e insolito ambiente. Per mantenersi in forma per il rientro sulla Terra dopo gli usuali 6 mesi di permanenza nello spazio, ogni membro dell'equipaggio

della ISS, trascorre fino a due ore al giorno allenandosi in "palestra". Tutto questo esercizio è necessario, da un lato, per contrastare il declino fisico che si verifica durante i lunghi voli nello Spazio ma, allo stesso tempo, facilita anche il riadattamento degli astronauti alla normale gravità una volta rientrati sulla Terra. I medici mantengono sotto controllo costante la forma fisica dell'equipaggio e ne registrano i cambiamenti. Se necessario, possono raccomandare agli astronauti di modificare i loro programmi di esercizi. Tra le diverse attrezzature a disposizione degli astronauti vi sono due tapis-roulant, una macchina per gli esercizi di resistenza e una bicicletta ergometrica. L'utilizzatore può compiere una serie di esercizi fisici trattenuto da corde elastiche. Un computer portatile tiene sotto controllo la frequenza cardiaca e gli altri parametri vitali durante la sessione di allenamento.



Una goccia libera sulla ISS.
Credits: ESA/NASA

L'acqua a bordo della ISS

In condizioni di assenza di peso, l'acqua non cade sul "pavimento", ma fluttua liberamente sotto forma di gocce. Esiste una forza, chiamata tensione superficiale, che agisce tra le molecole dell'acqua esercitando una trazione verso l'interno sulle molecole presenti in superficie. Questa forza fa sì che la superficie del liquido si comporti come se fosse una pelle elastica, come un palloncino. Questo spiega perché l'acqua, in condizioni di assenza di peso, forma tante sfere. A bordo della ISS l'acqua è una risorsa limitata e costosa. Il motivo è che lo spazio di conservazione dell'acqua è limitato e che l'acqua non è continuamente disponibile, in quanto deve essere portata sulla ISS dalla Terra. Trasportare un litro di acqua nello Spazio costa circa 20.000 euro e quindi un bicchiere di acqua è decisamente il drink più costoso che un astronauta possa bere!

Con il programma ATV (Automated Transfer Vehicle) dell'ESA abbiamo imparato a gestire e trasportare in modo sicuro l'acqua potabile per gli astronauti.

L'Agenzia spaziale russa predilige per i cosmonauti acqua di falda, soprattutto per il suo contenuto di minerali come calcio e magnesio. E la vuole addizionata di fluoro, per la salute dei denti. Al contrario, gli astronauti statunitensi preferiscono un'acqua decisamente più "light" (residuo fisso inferiore a 100 mg/l), proveniente dalle sorgenti montane del Pian della Mussa, e quindi meno mineralizzata. Non solo gusti e obiettivi nutrizionali diversi, ma anche metodi diversi di disinfezione a garanzia del controllo microbiologico: argento ottenuto da elettrolisi per i russi, iodio per gli americani. E di conseguenza diverse precauzioni per la produzione, l'immagazzinamento e la certificazione

di qualità, sicurezza e stabilità nel tempo. Con 4 missioni di ATV sono state portate sulla ISS quasi 2 tonnellate di acqua russa! Dopo un lungo processo di studio e di raccolta di dati è stato possibile definire un processo affidabile per il mantenimento della qualità dell'acqua durante tutto il ciclo vita: pre-trattamento dei serbatoi utilizzati per raccogliere e trasferire l'acqua a terra, caricamento e controllo periodico della qualità dell'acqua, dalla produzione al lancio.

Prodotta a Torino e lanciata da Kourou, in Guyana Francese, l'acqua potabile arriva agli astronauti per mantenere a bordo le necessarie scorte idriche, e per compensare la quota che non si riesce a rigenerare a bordo. Sulla ISS infatti, l'acqua si risparmia e si ricicla. Il consumo pro-capite da parte degli astronauti è di circa 2 litri per bere e reidratare il cibo disidratato, e di mezzo litro per lavarsi con semplici panni umidi. Niente sprechi quindi: il risultato è un consumo di acqua davvero minimo, se confrontato con i 200 litri circa al giorno del cittadino medio italiano! Ma l'astronauta non si limita ad un uso moderato e razionale di questa preziosa risorsa: tramite processi chimico-fisici di rigenerazione e purificazione presenti a bordo, il ciclo dell'acqua può essere chiuso quasi del tutto, recuperandone il 95% circa, a partire dall'urina e dall'umidità dell'aria di cabina condensata nei sistemi di condizionamento. L'urina di oggi è... il caffè di domani!

Dato che l'acqua (H_2O) contiene ossigeno, attraverso il processo di elettrolisi è possibile anche ricavare questo gas prezioso per la respirazio-

ne degli astronauti. L'idrogeno ottenuto dall'elettrolisi, a sua volta viene combinato con l'anidride carbonica che gli astronauti espirano in cabina, in un reattore Sabatier. In tal modo si riottiene ulteriore ossigeno, e metano, che al momento non avendo un uso specifico sulla ISS viene disperso nello spazio... quale esempio dell'imperfetta "chiusura dei cicli" oggi in essere.

Il Nodo 3, costruito in Italia, ospita le tecnologie per la rigenerazione chimico-fisica per l'acqua e l'aria in un armadio tecnico (rack) dedicato.

Il sistema di condensazione dell'acqua

Avete mai notato che se, in una giornata fredda, una persona con gli occhiali entra in un luogo caldo e umido i suoi occhiali si appannano immediatamente? Uno strato di vapore costituito da tante piccole gocce d'acqua si depositerà infatti sulle lenti. Sfruttando questo principio è possibile recuperare l'acqua dall'umidità dell'aria a bordo della ISS! L'aria calda e umida viene fatta passare attraverso una superficie fredda, su cui si formano piccole gocce d'acqua (condensa). A causa dell'assenza di peso però, le gocce d'acqua non sono più pesanti dell'aria e quindi non scivoleranno sulla superficie per poter essere raccolte sul fondo. È stato possibile ovviare facilmente a questo problema facendo ruotare la superficie. Tale rotazione porta le gocce verso l'esterno della superficie stessa, dove verranno quindi raccolte. È, inoltre, possibile utilizzare superfici con rivestimenti idrofili

unitamente ai cosiddetti “slurper” (piccoli fori con tubi di aspirazione sul retro). In questo sistema, il rivestimento idrofilo viene utilizzato per fare aderire l’acqua alla superficie, e gli “slurper” per aspirarla.

Il sistema di depurazione dell’acqua

Dopo essere stata raccolta, l’acqua condensata deve essere depurata rimuovendo microrganismi, ioni e molecole indesiderati, per salvaguardare la salute dell’equipaggio. La depurazione viene eseguita in varie fasi:

1. L’acqua da depurare entra nel depuratore che rimuove le bolle di gas dal liquido per poterli trattare separatamente, utilizzando apparecchiature e processi più semplici nelle fasi successive.
2. A seguito della rimozione del gas, l’acqua viene filtrata con un apposito filtro che trattiene e intrappo-

la tutte le particelle con diametro superiore a 0.5 micron (per avere un’idea di queste dimensioni basti pensare che lo spessore medio di un capello è di circa 10 micron).

3. In seguito, l’acqua viene indotta a passare attraverso una superficie contenente materiale a scambio ionico, rimuovendo gran parte degli agenti contaminanti.

4. A questo punto, rimangono solo alcune piccole molecole da eliminare prima di poter riutilizzare l’acqua. Questo sarà possibile facendo riscaldare l’acqua oltre i 100°C e facendola passare attraverso un catalizzatore. Se al termine del processo vi sono ancora particelle residue, l’acqua dopo essere stata raffreddata, viene ancora sottoposta al trattamento. Quando l’acqua fuoriesce dal depuratore, è più pulita dell’acqua che la maggior parte di noi beve sulla Terra!

La sudorazione degli astronauti

Con il cibo e le bevande un astronauta consuma circa 2,7 litri di acqua al giorno. La maggior parte di questa acqua viene espulsa dall’organismo, sia allo stato liquido (sotto forma di urina o sudore) sia come vapore (attraverso i pori della pelle o la respirazione). Se il vapore acqueo che fuoriesce dall’organismo non venisse eliminato dall’aria, la Stazione assomiglierebbe ben presto ad una sauna e gli astronauti avrebbero difficoltà a respirare. È importante, inol-

tre, evitare che si formino gocce d’acqua in punti dove potrebbero causare problemi alla strumentazione. A tal proposito, il sistema di supporto alla vita della ISS svolge diverse funzioni: mantiene pulita l’aria della cabina filtrandola per rimuovere particelle e microrganismi, garantisce una miscelazione di gas e una pressione dell’aria adeguate e una temperatura ottimale. Se, ad esempio, il livello di umidità dell’aria raggiunge livelli troppo elevati, il sistema si assicura che il vapore acqueo in eccesso venga rimosso.



Lavarsi a bordo della ISS
Credits: ESA/NASA

L'igiene personale a bordo della ISS

Per la loro igiene personale, gli astronauti hanno a disposizione un piccolo kit che contiene: un pettine, un paio di forbici, uno spazzolino da denti, dentifricio, sapone, shampoo, salviette e fazzolettini. Per gli uomini sono previsti anche un rasoio, crema da barba e dopobarba, mentre le donne possono, eventualmente, portare dei cosmetici. Il kit è provvisto di velcro, in modo tale che gli astronauti possano attaccarlo alla parete ed evitare che si metta a fluttuare mentre si lavano i denti!

La doccia

Alcune stazioni spaziali precedenti erano dotate di docce, ma sulla ISS non sono state previste. Al loro posto, per lavarsi, gli astronauti usano un panno umido e insaponato. Per lavarsi i capelli, gli astronauti fanno uso di un tipo speciale di shampoo che si applica come un normale

shampoo, ma viene rimosso con una salvietta. Non è necessario ricorrere all'acqua per eliminarlo. Questi shampoo sono acquistabili anche sulla Terra, dal momento che risultano utili in viaggi in cui l'accesso all'acqua è limitato.

Lavarsi i Denti

Per lavarsi i denti, gli astronauti usano un normale dentifricio. Aspirano l'acqua da un apposito dispenser, ma siccome non vi è un lavandino in cui sputarla, la sputano in un fazzolettino, che poi gettano. In alternativa, possono utilizzare un dentifricio commestibile, che è stato appositamente studiato per risparmiare acqua.

Radersi

A bordo della ISS, è possibile radersi con un rasoio elettrico, ma questa operazione deve essere eseguita ac-

canto a un tubo di aspirazione, per evitare che i peli si spargano ovunque. Radersi con la crema può rivelarsi una vera e propria sfida a bordo della ISS, in quanto non vi sono lavandini e l'acqua e la crema da barba tendono ad aderire al viso. La crema e i peli devono essere rimossi dalla lama del rasoio con un fazzolettino, che, quindi, andrà accuratamente gettato: i residui sottili e appiccicosi non devono sfuggire!

Andare alla toilette

Quando gli astronauti vanno alla toilette, la prima cosa che devono fare è agganciarsi con una cinghia,

per evitare di fluttuare. Aniché utilizzare l'acqua, la toilette possiede un tubo di aspirazione che, con un flusso d'aria, convoglia i rifiuti in un foro di aspirazione. I rifiuti solidi, vengono quindi compressi e successivamente smaltiti, mentre l'urina viene raccolta in un contenitore separato per poi essere riciclata. L'urina depurata viene, infatti, trattata per generare altri prodotti, uno dei quali è l'aria che l'equipaggio respira.





Immagine artistica delle fasi finali della missione Cassini
Credits: ESA

ESPLORAZIONE ROBOTICA DELLO SPAZIO

Soon after Sputnik started the Space Age in 1957, and the United States had joined the Soviet Union as a spacefaring nation, scientists and engineers realized that robotic missions to the planets and other bodies in our solar system were not only possible, but also could answer questions that humankind had been asking for hundreds of years. What are these other bodies that orbit the Sun? Are they like the Earth? Do they support life and perhaps intelligence? Are we alone in the universe? Beginning slowly with the Mariner flybys of Venus and Mars in the early 1960s, in a mere fifty years humanity has designed and deployed a robotic mission to every planet in the solar system and many of its asteroids, comets, and moons. We have orbited the Moon, Mercury, Venus, Mars, Jupiter, and Saturn. We have landed on the Moon, Venus, Mars, Titan, and the comet Churyumov-Gerasimenko. We have roved around the surface of Mars. Moreover, we have returned to Earth samples of the solar wind and the coma of the comet Wild-2. Moreover, what have we found? Wonders beyond those imagined in the science fiction novels that prece-

ded the Space Age. There are hundreds of geysers spurting material out of the inside of the Saturnian moon Enceladus, and some of that material ends up becoming a ring around the gas giant Saturn. The Jovian moon Io, wracked by internal tidal stresses, and is literally riddled with volcanoes that blast out sulfur and other atoms at enormous velocities. We have analyzed samples in sophisticated laboratories roving on Mars, and have found that there are locations on the red planet where Earth life could survive. Because of this flurry of exploration, 99.9% of everything that the human species knows about our solar system has been learned in these fifty years. We have not found life elsewhere, but our understanding of the origin and destiny of our solar system, and therefore OUR own origin and destiny, has been incredibly increased by our robot explorers.

Gentry Lee

Chief Engineer for the Solar System Exploration Directorate at the Jet Propulsion Laboratory (JPL) in Pasadena, California.



Andromeda ripresa da SWIFT
Credits: ESA

L'esplorazione robotica interplanetaria

L'esplorazione robotica interplanetaria è di fondamentale importanza per approfondire temi a prima vista molto distanti tra loro, come la formazione del Sistema Solare e lo sviluppo della vita, ma è anche importante per lo sviluppo di tecnologie che sempre più spesso hanno ricadute sulla nostra vita di tutti i giorni. A partire dalla fine del millennio scorso la filosofia seguita da chi programma le missioni di esplorazione planetaria è cambiata. In passato si sfruttavano veloci passaggi ravvicinati che ci permettevano di osservare fuggacemente per la prima volta nuovi mondi, mentre oggi si preferisce immettere le varie sonde con la strumentazione in orbita ai corpi celesti obiettivo della missione. Questo consente di poterli studiare in maniera dettagliata. Se tra gli anni '60/80 sonde come le Pioneer e le Voyager ci avevano fornito un piccolo, ma succulento, assaggio

di mondi mai visti prima, dagli anni '90 abbiamo conoscenze sempre più approfondite di Marte e delle lune di Giove e Saturno. Proprio negli ultimi anni poi, abbiamo compiuto un altro passo fondamentale, riuscendo ad osservare con continuità da vicino i corpi celesti che testimoniano la formazione del Sistema Solare, gli asteroidi, le comete e i pianeti nani, che tutti insieme prendono il nome di "corpi minori".

Oggi sappiamo quindi con certezza che un tempo su Marte c'erano le condizioni climatiche giuste per la presenza di acqua liquida in superficie e che ci sono lune di Giove e Saturno che ancora oggi possiedono un oceano di acqua liquida sotto la loro superficie. Sappiano, inoltre, che su Titano c'è una sorta di "mondo al contrario", con fiumi, laghi, nubi, piogge e nevicate fatte non di acqua, come qui sulla Terra, ma di metano ed altri idrocarburi, e che i corpi



nori sono molto più complessi di quanto immaginabile con le semplici osservazioni da Terra. Oltre alle ricadute scientifiche, ognuna di queste missioni rappresenta un proficuo investimento tecnologico: poiché nello Spazio pesi e consumi energetici sono fattori limitanti, l'automazione e l'affidabilità ri-

sultano fondamentali. Per questo motivo quelle che un tempo erano semplici macchine capaci solo di eseguire comandi precaricati oggi si sono evolute in robot in grado di individuare in completa autonomia il percorso migliore da seguire sulla superficie marziana.

La nebulosa Tarantola ripresa da Chandra X-ray Observatory, Hubble Space Telescope (HST), Spitzer Space Telescope
Credits: NASA



La Terra ripresa dalla Luna
Credits: NASA/JAXA

Il fascino della Luna

Recenti dati ottenuti dalle missioni robotiche (quali immagini ad alta risoluzione e informazioni sulla composizione chimica del suolo) e dalle nuove analisi effettuate con tecniche di ultima generazione sui campioni raccolti nelle missioni Apollo e sui meteoriti lunari, rivelano che la Luna può fornirci molte informazioni sul Sistema Solare e su come questo si sia evoluto nel tempo. Questo lavoro ha rafforzato il razionale scientifico dell'esplorazione lunare, che potrebbe beneficiare del ritorno dell'uomo sulla superficie del nostro satellite. Un'intrigante possibilità emersa da queste indagini è che sulla superficie priva di aria ed apparentemente arida della Luna vi sia acqua congelata nelle profondità dei crateri vicino ai poli. L'acqua è probabilmente il risultato di impatti con comete verificatisi milioni di anni fa, cosa che la rende scientificamente ancora più interessante. Le comete sono, infatti,

costituite dal materiale originario da cui nacque il Sistema Solare circa cinque miliardi di anni fa per cui sarebbe davvero importante trovarne ed esaminarne qualche campione. L'acqua renderebbe anche più semplice la costruzione di una base lunare e permetterebbe di utilizzare l'energia solare per trasformare l'acqua in ossigeno e persino in combustibile per razzi, riducendo, almeno in parte, la necessità di trasportare l'acqua dalla Terra. Prima di poter realizzare una vera base lunare funzionante, dovremo però sviluppare nuovi mezzi di propulsione e di atterraggio. Lo sviluppo di queste nuove tecnologie sarà estremamente utile anche per il successivo passo verso l'esterno, in rotta verso il pianeta Marte. La Luna permetterà, inoltre, di imparare a vivere e lavorare in un ambiente a gravità parziale e di valutare le conseguenze che questo comporta sulla salute umana.

Il progetto Moon Mapping e le missioni Chang'e

Ogni astronauta, primo fra tutti Yuri Gagarin, ha avuto la possibilità di osservare la Terra nella sua interezza, senza nessuno dei confini creati dall'uomo. Questa atmosfera di collaborazione tra popoli distanti, sia fisicamente che culturalmente, è ben rappresentata nel progetto Moon Mapping, grazie al quale università, istituti di ricerca e studenti italiani e cinesi stanno attivamente collaborando allo studio dei dati lunari raccolti dalle missioni cinesi Chang'e.

Il programma lunare cinese Chang'e è iniziato nel 2007 con il lancio degli orbiter Chang'e 1 e Chang'e 2 (2010) ed è arrivato ad un importante traguardo con l'arrivo sul suolo lunare del rover Yutu, associato alla missione Chang'e 3, nel dicembre 2013.

Ognuna di queste missioni ha permesso di raccogliere informazioni importanti sull'ambiente lunare. Tuttavia l'interesse della Cina per l'esplorazione lunare è ancora vivo, tanto che Pechino ha già programmato una missione di "sample return" entro il 2020.

Queste missioni e questo progetto rappresentano la volontà della Cina di entrare fattivamente nell'ambito della comunità scientifica internazionale anche per quanto riguarda le scienze planetarie. La collaborazione tra studenti avrà, inoltre, importanti ricadute per entrambe le nazioni, con gli italiani che potranno fare esperienza di dati altrimenti inaccessibili ed i cinesi che potranno apprendere molto da una collaborazione internazionale di tale portata.



Il suolo Marziano ripreso dalla missione MRO

Credits: University of Arizona/HiRISE-LPL

I pianeti rocciosi

I primi corpi celesti oggetto di esplorazione robotica sono stati i pianeti rocciosi (o terrestri), sia per la loro relativa vicinanza, sia per la possibilità di studiare superfici, tutto sommato, simili a quella terrestre.

In particolare Venere e Marte, considerati per molti versi fratelli (o almeno cugini) della Terra, sono stati raggiunti da missioni orbitanti ed anche da alcuni lander sin dagli anni '60. Tuttavia, nel caso di Venere, queste missioni sono state per lo più infruttuose, soprattutto a causa dell'atmosfera densa fino a 90 volte quella terrestre e con temperature capaci di fondere il piombo. È per questo motivo che una conoscenza approfondita di Venere è stata possibile solo con la missione europea Venus Express (2006) che, nel corso dei suoi nove anni di osservazione, è riuscita a darci importanti indicazioni sui fenomeni atmosferici e sulle caratteristiche superficiali di questo pianeta, tra cui la scoperta di attività vulcanica recente (su tempi scala della geologia). Marte, invece, promet-

teva la scoperta di scenari abitati da civiltà aliene, almeno stando all'errata traduzione in inglese delle osservazioni dell'astronomo italiano Giovanni Schiaparelli, il quale aveva individuato la presenza di canali in superficie, ma senza mai volerne intendere la loro natura artificiale. Nel suo articolo in italiano Schiaparelli aveva definito le formazioni da lui osservate come "canali", tradotte poi in inglese (non da lui) in "canals" (che corrisponde a canali artificiali), piuttosto che "channels" (ovvero canali naturali).

Nonostante già le primissime immagini inviate nel 1965 a terra dalla sonda Mariner 4 fossero esplicite nel mostrare la realtà desertica ed invivibile della superficie marziana, il "Pianeta Rosso" è sempre stato quello che maggiormente ha attirato l'attenzione dei planetologi, soprattutto per la presenza di strutture superficiali, quali delta di fiumi e canyon, evidentemente generate dall'antica presenza di acqua liquida.

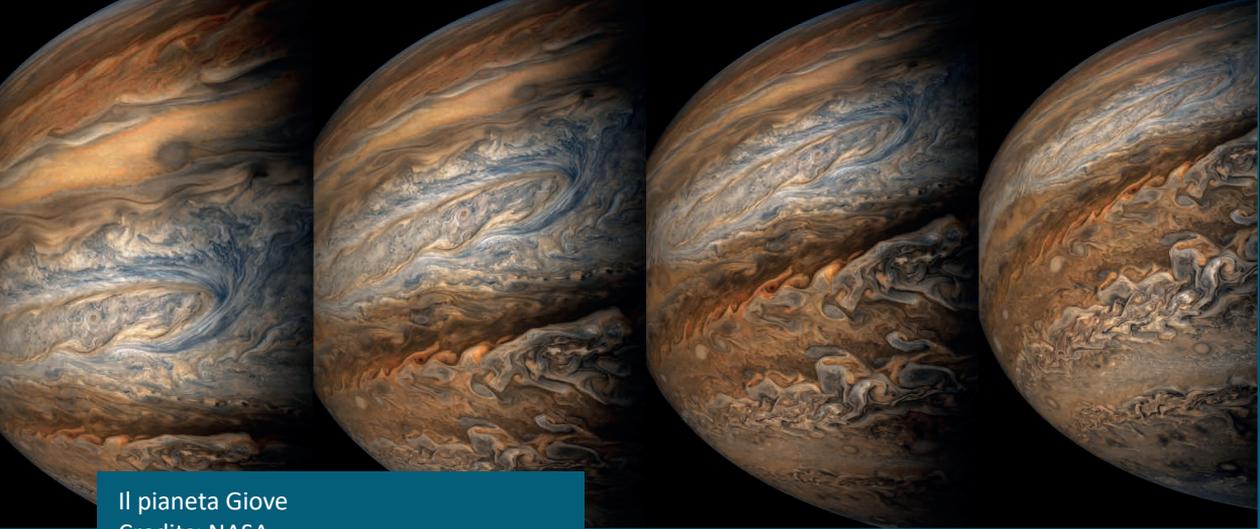
A tutt'oggi Marte ha dimostrato di avere un ambiente inospitale per la vita,

ma le ultime missioni, in particolare la MRO (Mars Reconnaissance Orbiter) lanciata dalla NASA nel 2005, ci hanno mostrato un pianeta vivo, almeno dal punto di vista atmosferico e geologico e con la possibilità di avere acqua liquida in superficie, seppur per periodi di tempo limitati e in aree geografiche ristrette. In attesa di una esplorazione umana, prevista comunque non prima del 2040, le prossime missioni si concentreranno prevalentemente sul sottosuolo, l'unico ambiente che le micidiali radiazioni ultraviolette solari, non schermate da atmosfera e campo magnetico, non sono state in grado di sterilizzare. Tra i pianeti rocciosi l'ultimo ad essere esplorato è stato Mercurio, soprattutto a causa delle difficoltà intrinseche nel raggiungere un corpo tanto vicino al Sole, dovute sia alle complesse traiettorie necessarie, sia alle alte temperature cui le sonde devono essere esposte. Per questo motivo solo nel 1974 ci fu il primo passaggio ravvicinato da parte della sonda NASA Mariner 10 e, solo ben 33 anni dopo, la sonda MESSENGER (sempre della NASA) fu la prima a rimanere in orbita e a completare la mappatura dell'intera superficie. Per il 2018 è previsto il lancio della missione ESA BepiColombo, dedicata a Giuseppe Colombo, professore ordinario di Meccanica Applicata presso la facoltà di ingegneria dell'Università di Padova, che per primo riuscì a calcolare le traiettorie giuste per eseguire i passaggi ravvicinati della Mariner 10.

La missione ExoMars

Dopo il successo della missione Mars Express, arrivata in orbita marziana

nel 2003 ed ancora attiva nell'acquisizione di dati scientifici, l'ESA ha programmato una nuova missione (in collaborazione con l'agenzia russa Roscosmos), denominata ExoMars, divisa in due parti e con le potenzialità per effettuare scoperte che passeranno alla storia. La prima parte della missione è stata lanciata a marzo 2016 e ha raggiunto Marte sette mesi dopo. Anche se il lander Schiaparelli (il cui scopo principale era quasi esclusivamente tecnologico) ha fallito il suo corretto atterraggio sul suolo di Marte, la sonda TGO (Trace Gas Orbiter) ha svolto secondo programma le operazioni previste e si trova ora in orbita per raccogliere informazioni sull'atmosfera marziana e per essere pronta nel 2020, quando farà da satellite di telecomunicazioni tra il rover Pasteur e la Terra. Questo rover farà parte della seconda fase di ExoMars, che prenderà il via nel 2020 e che, grazie alle sue elevate capacità scientifiche, ci permetterà di conoscere ad un livello di dettaglio senza precedenti l'ambiente marziano, con particolare attenzione al sottosuolo. Pasteur avrà la capacità di muoversi di circa 100 metri al giorno, individuando, in totale autonomia, i percorsi migliori per raggiungere gli obiettivi scientifici identificati di volta in volta dai ricercatori. La serie di strumenti a bordo del rover, comprensivi di camera ad alta risoluzione, spettrometro infrarosso, radar per lo studio del sottosuolo, trapano con spettrometro infrarosso, spettrometro Raman e analizzatore di molecole organiche, sarà la prima appositamente progettata per cercare segni di vita su Marte.



Il pianeta Giove
Credits: NASA

I pianeti giganti

Alcune delle prime osservazioni effettuate da Galileo Galilei con il suo telescopio furono dedicate a Giove e, mostrando la presenza di altri corpi in orbita intorno ad esso, convinsero il fondatore del metodo scientifico della non centralità della Terra nel Sistema Solare e nell'Universo.

Da quelle notti del 1610 sono dovuti passare non meno di tre secoli e mezzo per ottenere immagini ravvicinate di Giove, Saturno, Urano e Nettuno, i quattro pianeti giganti del Sistema Solare. Le sonde NASA Pioneer 10 e 11 e Voyager 1 e 2 ci hanno però mostrato degli scenari incredibili, soprattutto individuando, in alcuni dei satelliti di questi pianeti, dei posti potenzialmente adatti alla vita. Queste quattro sonde sono le nostre ambasciatrici verso l'infinito, portano, infatti, targhe, iscrizioni e registrazioni audio relative alla nostra civiltà: ma solo l'invio di altre sonde, questa volta destinate ad orbitare

per lunghi periodi intorno a Giove e Saturno, ci hanno permesso di approfondire le nostre conoscenze.

Le missioni della NASA Galileo e Cassini (che in realtà nasce da una collaborazione tra NASA, ESA e ASI) hanno realmente dimostrato il grande interesse esobiologico di mondi quali Europa, Encelado e Ganimede che nascondono con ogni probabilità un oceano di acqua al di sotto della loro superficie. Mentre Titano ha mostrato a Huygens, il lander di Cassini, il suo mondo fatto di laghi, fiumi, piogge e nubi di metano.

Per questo motivo nuove missioni sono allo studio verso questi pianeti, tra le quali Juno, arrivata da poco in orbita a Giove, Juice, ormai pronta al lancio, ed altre, progettate per osservare nel dettaglio proprio quei satelliti che sono potenzialmente in grado di ospitare la vita.

La missione Cassini

Lanciata da Cape Canaveral il 15 ottobre 1997 ed arrivata in orbita saturniana nel 2004, la sonda Cassini-Huygens è la più grande navicella interplanetaria mai costruita, alimentata da tre generatori termoelettrici e dotata di 12 differenti strumenti scientifici.

Il 24 dicembre 2004 ha sganciato verso la superficie di Titano il lander Huygens che ci ha permesso di ottenere immagini incredibili della superficie di questo vero e proprio “mondo alla rovescia” che possiede un ciclo idrogeologico fatto da idrocarburi.

Nel corso dei suoi fin qui dodici anni di osservazione gli strumenti a bordo della Cassini hanno permesso di effettuare scoperte fondamentali riguardanti sia l'ambiente di Saturno (tra le quali, ad esempio, lo studio del vortice polare esagonale), sia le sue innumerevoli lune ed i suoi spettacolari anelli.

In particolare, utilizzando sia lo studio dello spettro elettromagnetico

che quello delle anomalie gravitazionali, è stato confermato un oceano presente sotto gran parte della superficie di Encelado, dal quale si sprigionano getti di acqua mista a silicati, che fanno pensare ad un ambiente sottomarino simile a quello che sulla Terra si osserva nei pressi dei “black smokers”, dove si pensa possa essersi originata la vita. L'osservazione da remoto di Titano ha permesso di ottenere dati precisi sulla profondità e sulla morfologia dei laghi di metano presenti in corrispondenza delle sue regioni polari, mostrando anche evidenti variazioni stagionali.

A fine 2017 si è svolto il cosiddetto “Gran Finale” della missione, con l'entrata della sonda nella densa atmosfera di Saturno: la decisione di terminare in questo modo la missione è stata presa per evitare impatti incontrollati con le superficie dei satelliti naturali, considerato il loro grande interesse esobiologico e la conseguente necessità di non contaminarli con materiali terrestri.

Immagine artistica delle fasi finali della missione Cassini
Credits: ESA



Il lander Philae della Missione Rosetta si avvicina alla Cometa
Credits: ESA

I corpi minori

Dopo decenni nei quali asteroidi, comete e pianeti nani sono stati studiati quasi esclusivamente tramite osservazioni da Terra ed il confronto con meteoriti, negli ultimi anni una nuova era dell'esplorazione robotica del Sistema Solare ha avuto il via, con l'inizio delle fasi scientifiche principali di missioni come ESA Rosetta, NASA New Horizons e NASA Dawn. Tutte e tre hanno dovuto viaggiare per lungo tempo prima di raggiungere i loro obiettivi finali permettendo però un enorme balzo in avanti nelle nostre conoscenze.

Questi corpi celesti sono generalmente considerati i testimoni della nascita del Sistema Solare perché, o a causa della loro massa ridotta, o per la loro estrema distanza dal Sole, non hanno mai avuto l'energia sufficiente per iniziare i processi di differenziazione geologica o di alterazione acquosa. Il primo processo consiste nella formazione di diversi

strati a seconda del peso degli elementi presenti, andando a formare un nucleo, un mantello ed una crosta ben separati tra loro e formati da minerali diversi da quelli presenti prima dell'inizio del processo. Questo processo è però strettamente dipendente dalla massa del corpo celeste e quindi dalla sua gravità, ragion per cui in corpi piccoli (e di forme irregolari, come la cometa 67P) difficilmente esso avviene.

Il secondo fenomeno è invece dovuto alla presenza di acqua allo stato liquido, che funge da mezzo nel quale i minerali prima si disciolgono e poi si ricombinano così da formare nuovi minerali: ovviamente in oggetti che restano sempre in zone fredde e lontane dal Sole è difficile pensare alla presenza di acqua liquida, per lo meno in superficie.

Ciò è particolarmente vero per gli oggetti più piccoli e freddi, come le comete, che conservano al loro in-

terno tutti i composti primordiali e che sono spesso collegate alla teoria della “panspermia”, una teoria sull’origine della vita secondo la quale i primi organismi viventi sono arrivati sulla Terra dallo Spazio.

La sonda New Horizons è partita per studiare da vicino l’allora nono pianeta del Sistema Solare, poi “declassato” a pianeta nano per via della sua orbita troppo dissimile da quella dei suoi otto fratelli maggiori. Il 14 luglio del 2015 ha osservato, per una manciata di ore, per la prima volta Plutone da vicino, più di 80 anni dopo la sua scoperta. I dati raccolti ci stanno mostrando un mondo piccolo, ma enormemente complesso, con attività vulcanica criogenica, catene montuose giovanissime e un’atmosfera con la presenza di nubi.

La missione Dawn è stata invece la prima ad entrare in orbita, in due fasi successive, intorno a due oggetti della fascia degli asteroidi, rispettivamente l’asteroide Vesta ed il pianeta nano Cerere. Lo studio di Vesta ha permesso di confermare questo oggetto come l’origine dei meteoriti HED (acronimo costituito dalle iniziali dei tipi di meteoriti compresi, Howarditi, Eucriti e Diogeniti), considerata la loro estrema somiglianza spettrale con differenti zone di Vesta. In particolare, si è scoperto che Vesta ha subito due

enormi impatti in epoche differenti in corrispondenza del Polo Sud e, confrontando le rocce che tale impatto ha portato in superficie con le meteoriti HED, si è notato che ad ogni strato corrisponde un tipo di meteorite HED differente. Cerere è invece apparso subito molto interessante per la presenza di zone brillanti all’interno di alcuni crateri, zone che, anche considerando la scoperta di grossi depositi di carbonati sulla sua superficie, sembrano proprio collegate a fenomeni ricollegabili alla presenza di acqua liquida.

La missione dell’ESA Rosetta è stata invece la prima ad orbitare intorno ad una cometa, permettendoci di seguire tutte le fasi cui essa va incontro, passando da quelle di bassa attività, fino ad osservare i picchi di attività estrema, quando, approssimandosi al Sole, i composti più volatili vengono espulsi dal nucleo sotto forma di gas. A differenza di quanto si pensava fino alle osservazioni di Rosetta, le comete non possono essere considerate “palle di ghiaccio sporco”, essendo costituite principalmente da blocchi di ghiaccio poco legati tra loro e molto porosi al loro interno, ricoperti da uno strato di composti organici che rendono la sua superficie estremamente scura (riflettendo appe

La missione Rosetta

L'idea di una missione che esplorasse da vicino una cometa nacque subito dopo le eccezionali immagini della cometa di Halley ottenute con la missione Giotto nel 1986. Tuttavia solo nel 2004 è stato possibile effettuare il lancio della missione Rosetta che, dopo dieci anni di viaggio interplanetario (durante i quali ha osservato anche la Terra, Marte ed i due asteroidi Steins e Lutetia), ha raggiunto l'orbita della cometa 67P Churyumov-Gerasimenko (o più semplicemente identificata come 67P). Il nome della missione è dovuto al fatto che, come con la Stele di Rosetta fu possibile decifrare i geroglifici egizi, con la sonda Rosetta gli scienziati si auguravano di poter comprendere i segreti delle comete. L'obiettivo può essere considerato raggiunto, con la caratterizzazione del sottosuolo, della superficie e dei getti della cometa studiata. Rosetta ha permesso di capire che le superfici cometa-

rie contengono molti composti organici differenti, tra i quali anche la glicina, il primo amminoacido. I mattoni della vita sono quindi stati trovati sulla cometa 67P.

Preziose sono, inoltre, le informazioni raccolte grazie all'accompanimento del lander Philae, che, pur avendo rimbalzato per tre volte sulla superficie della cometa, ha comunque acquisito dati per circa due giorni (così come previsto dalla missione nominale), facendoci conoscere in grande dettaglio la superficie della stessa (nonché l'assenza di un campo magnetico). Il 30 settembre 2016 la sonda Rosetta ha terminato la missione andandosi a poggiare sulla superficie della cometa 67P e acquisendo dati fino all'ultimo istante. Prima di poter archiviare per sempre i dati di questa eccezionale missione, gli scienziati hanno quindi ancora molto lavoro da fare per analizzarli tutti.

Illustrazione artistica del lander Phiale
sul suolo della Cometa
Credits: ESA





Ipotesi di serre sul pianete Marte
Credits: NASA



LE PIANTE NELLO SPAZIO

Come sarebbe un mondo senza piante? Difficile anche solo immaginare che potrebbe esistere, essendo noi umani legati a doppio filo simbiotico con il mondo vegetale. Senza parlare del fatto che le piante hanno colonizzato il nostro pianeta per prime e lo hanno trasformato radicalmente permettendo l'arrivo del mondo animale cui noi apparteniamo. Sono convinto che se noi esseri umani continuassimo nell'utilizzo corrente delle risorse del nostro pianeta, faremmo la fine dei dinosauri e forse saranno proprio le piante che, ancora una volta, riporteranno e manterranno la vita

animale sulla Terra. Portiamole quindi con noi nello Spazio per conoscerle meglio e affinché ci aiutino a sostenere la vita. Chissà, assieme magari riusciremo a trasformare altri pianeti in nuovi mondi abitabili!

Paolo Nespoli

Missione STS-120 (2007) - Missione MagISStra (2010) – Missione Vita (2017)



Esperimento di coltivazione sulla ISS
Credits: NASA/ESA

Perché far crescere le piante nello Spazio?

"Spaceship Earth" offers all we need to live. When exploring our Solar System, it would be ideal if we could take Earth's ecosystem with us to survive and feel comfortable. Obviously, this is impractical but can we scale down our ecosystem to provide our travel needs?

ESA Melissa Team

Le piante sulla Terra svolgono un ruolo fondamentale per la vita in quanto sono capaci di "catturare" l'energia del sole e "conservarla" in molecole ad elevato contenuto energetico nel processo di fotosintesi clorofilliana. Attraverso la fotosintesi, le piante convertono anidride carbonica (CO₂) ed acqua (H₂O) in composti organici (glucosio), utilizzando la radiazione solare come fonte di energia e rilasciando ossigeno come prodotto di scarto. Le piante sono

quindi essenziali per la vita sulla Terra poiché, oltre ad essere "i polmoni verdi", in quanto generatori di ossigeno, rappresentano la base delle catene alimentari, sono infatti produttori primari capaci di utilizzare molecole inorganiche per formare composti organici (cibo), dai quali altri organismi traggono l'energia per vivere. Nel corso dell'evoluzione della vita sulla Terra, la comparsa della via metabolica della fotosintesi nei primi organismi fotosintetici procarioti ha determinato una profonda modifica dell'ambiente: l'aumento di ossigeno libero rilasciato come prodotto di scarto ha determinato a cascata la generazione di altre vie metaboliche, prima tra tutte la respirazione ossigenica. Fino alla comparsa della respirazione, l'evoluzione è stata

piuttosto lenta: infatti se riportassimo i 4,5 miliardi di anni di storia della Terra in una scala di 24 ore (con ogni secondo corrispondente a circa 52000 anni), avremmo la comparsa della vita intorno alle 5 del mattino, vita che è rimasta allo stadio di cellule procariote fino alle prime ore del pomeriggio. La comparsa dei processi di fotosintesi (intorno alle 6 del mattino) e respirazione (dopo mezzogiorno) possono essere considerati quindi due momenti chiave fondamentali per la profonda modifica dell'ambiente terrestre che ha permesso successivamente l'evoluzione di sistemi biologici sempre più complessi, fino ad arrivare alle piante a fiore, agli animali ed infine all'uomo solo nelle ore della sera.

Tutta la vita sulla Terra, quindi la stessa sopravvivenza dell'uomo, è direttamente o indirettamente dipendente dalle piante. In qualsiasi ambiente, è difficile immaginare di sostenere la vita umana per lunghi periodi in assenza delle piante. La possibilità quindi di realizzare missioni spaziali di lungo periodo, a bordo di piattaforme spaziali orbitanti o planetarie, è basata sulla creazione di un ambiente "simile alla Terra" (Earth-like), ossia un sistema ecologico artificiale, in cui differenti organismi siano in grado di interagire tra loro stabilendo rapporti di interazione

molto stretta per trarne reciproco vantaggio (simbiosi mutualistica). In questi sistemi, le piante, inoltre, svolgerebbero anche un ruolo fondamentale di supporto psicologico nelle condizioni di isolamento estremo a cui vanno incontro gli astronauti. La realizzazione di sistemi per la coltivazione di piante a bordo delle piattaforme spaziali non può, tuttavia, prescindere dalla conoscenza degli effetti che i fattori spaziali hanno sulla crescita e lo sviluppo delle stesse, dal punto di vista sia dell'efficienza e del funzionamento delle vie metaboliche che della quantità e qualità nutrizionale del cibo fresco prodotto.

In questo capitolo, sono riportati alcuni concetti di base di ecologia e biologia vegetale, che permettono la comprensione del funzionamento di sistemi ecologici chiusi di supporto alla vita basati sulle piante. Sono, inoltre, brevemente descritti alcuni aspetti della coltivazione delle piante all'interno di tali sistemi ecologici di supporto alla vita. Sono discussi, infine, gli effetti che i principali fattori ambientali spaziali possono avere sullo sviluppo delle piante, quindi sulla loro capacità di rigenerare le risorse.



Esperimento di coltivazione sulla ISS
Credits: NASA/ESA

Ecosistemi sulla Terra e Sistemi Ecologici Chiusi di Supporto alla Vita nello Spazio

L'ecosistema: struttura e funzione

L'ecosistema rappresenta l'insieme degli organismi viventi e dell'ambiente abiotico nel quale essi vivono e con cui essi stabiliscono sia uno scambio di materia che di energia. Ogni ecosistema è costituito da due componenti: componente abiotica e componente biotica.

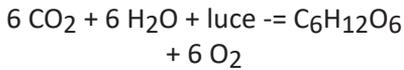
La componente abiotica di un ecosistema comprende atmosfera, idrosfera e litosfera e le sostanze inorganiche e organiche presenti nell'ambiente, come elementi chimici (tra cui azoto, carbonio, fosforo, zolfo) e molecole biologiche (carboidrati, proteine, lipidi). Il comparto biotico è costituito da tre classi di organismi viventi: 1) produttori, organismi autotrofi (piante ed alcuni

batteri) capaci di "costruire" sostanze organiche a partire da sostanze inorganiche; 2) consumatori, organismi eterotrofi che si nutrono di altri organismi vegetali (erbivori, fitofagi) o animali (carnivori); 3) decompositori, organismi eterotrofi (batteri, funghi, altri organismi saprofagi) che degradano le molecole organiche e liberano nell'ambiente sostanze più semplici in una forma prontamente utilizzabile dai produttori.

Il funzionamento di un ecosistema è garantito da un flusso di energia e da un ciclo della materia.

Negli ecosistemi naturali, il flusso di energia trae origine dalla radiazione solare, che solo gli organismi produttori possono utilizzare e grazie alla quale sono in grado di trasformare la sostanza inorganica (CO₂, H₂O) in sostanza organica (zuccheri) tramite

il processo di fotosintesi. Questo complesso processo può essere sintetizzato nella seguente reazione fondamentale:



Consiste difatti nell'ossidazione dell'acqua e nella riduzione dell'anidride carbonica, con formazione di glucosio ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) e di ossigeno, grazie all'energia fornita dalla radiazione solare.

Ecosistema naturale vs ecosistema artificiale: un confronto alla pari?

In un ecosistema terrestre, la maggior parte dell'energia deriva dalla fotosintesi effettuata dagli organismi vegetali (produttori). La fotosintesi è infatti il processo responsabile della produzione della maggior parte del carbonio organico presente. Questa energia è trasferita nella catena trofica agli organismi eterotrofi (consumatori) ovvero erbivori e carnivori. Alla morte di questi, il ciclo energetico si richiude con l'intervento degli organismi detritivori e decompositori (batteri e funghi) che, tramite i processi di decomposizione e mineralizzazione della sostanza organica, consentono il riciclo della materia organica ed il ritorno dei nutrienti in forma disponibile per le piante.

Proprio prendendo a modello quanto succede in natura, è possibile immaginare di "esportare" e sostenere la vita in ambienti extra-terrestri realizzando ecosistemi

artificiali, conosciuti come Sistemi Biorigenerativi di Supporto alla Vita (Biorigenerative Life Support System, BLSS) o Sistemi Ecologici Controllati di Supporto alla Vita (Controlled Ecological Life Support System, CELSS) (vedi anche "I sistemi di controllo ambientale e supporto alla vita-ECLSS" cap. ISS). Si tratta di ecosistemi artificiali in miniatura basati sulle interazioni tra uomo, microrganismi e piante, in cui ciascuno utilizza come risorsa i prodotti di scarto dell'altro.

Un BLSS va analizzato parallelamente ad un ecosistema terrestre. In esso, gli organismi autotrofi, ed in particolare le piante superiori, assumono un ruolo fondamentale poiché sono in grado di svolgere le stesse funzioni che svolgono in un ecosistema naturale. Esse sono in grado di: rigenerare l'aria, assorbendo CO_2 ed emettendo O_2 , tramite la fotosintesi, purificare l'acqua mediante il processo di traspirazione, fornire cibo fresco all'equipaggio con la loro biomassa. Inoltre, dopo il processo di digestione mediato dai microrganismi presenti in speciali bioreattori, le parti vegetali non edibili insieme ai prodotti di scarto degli astronauti possono fornire nuovamente i nutrienti per la crescita delle piante. Al pari degli ecosistemi naturali, per poter garantire l'auto-sufficienza di questi mini-ecosistemi è necessaria energia luminosa come unico input, che può giungere direttamente dal sole come fonte naturale, o da speciali sistemi di illuminazione artificiale.

La luce e la fotosintesi

La luce rappresenta la forza motrice che guida la fotosintesi e costituisce dunque un fattore ecologico indispensabile alla crescita e al corretto sviluppo morfologico delle piante. La fotosintesi risponde repentinamente a variazioni della quantità di luce e generalmente, in condizioni di integrità dell'apparato fotosintetico, all'aumentare dell'intensità luminosa si assiste ad un altrettanto repentino incremento del processo fotosintetico, fino ad un valore massimo di fotosintesi. Generalmente la quantità ottimale di luce per la fotosintesi varia in funzione della specie, soprattutto del tipo di metabolismo fotosintetico, dello stadio di sviluppo e delle condizioni generali di crescita.

Ottimizzare la crescita delle piante grazie anche al miglioramento dei sistemi di illuminazione (ad esempio mediante l'utilizzo di lampade

LED- Light Emitting Diodes) è uno dei principali obiettivi della ricerca spaziale nell'ambito dei sistemi biologici rigenerativi. L'aumento dell'efficienza fotosintetica che ne deriverebbe sarebbe di grande utilità nell'ottica di missioni di lunga durata dove le piante, oltre alle funzioni descritte, fornirebbero la principale fonte di cibo per l'equipaggio. In maniera specifica, l'ottimizzazione del processo fotosintetico nello Spazio può essere realizzato attraverso il controllo sia quantitativo che qualitativo della luce, scegliendo opportune lunghezze d'onda del visibile, che promuovano nelle piante non solo una migliore fotosintesi ma anche l'evoluzione di specifiche caratteristiche nutrizionali, quali maggior contenuto di proteine, composti antiossidanti e vitamine.



Membri dell'equipaggio Expedition 44 sulla ISS mentre mangiano la prima lattuga prodotta nello Spazio
Credits: NASA

Rigenerazione delle risorse nello Spazio e coltivazione delle piante

La rigenerazione delle risorse

Attualmente, le risorse necessarie per sostenere la vita umana nelle missioni spaziali di breve durata sono interamente trasportate dalla Terra. In avamposti con equipaggio permanente (ad esempio la International Space Station, ISS), parte delle risorse necessarie a sostenere la vita umana è il prodotto di fenomeni di rigenerazione all'interno di sistemi di supporto alla vita (Life Support Systems, LSS). Tali sistemi, ad oggi, utilizzano processi fisici e chimici per molteplici funzioni: attraverso un opportuno procedimento, ad esempio, è possibile recuperare acqua potabile dal sudore e dalle urine degli stessi astronauti. Nelle missioni di lunga durata (per es. su Marte), il rifornimento periodico ed il parallelo smaltimento dei rifiuti sarebbero logisticamente

ed economicamente insostenibili. I programmi internazionali di esplorazione dello Spazio sono indirizzati oggi a missioni che prevedono una permanenza dell'uomo nello Spazio per periodi sempre più lunghi (es. basi su Luna o su Marte). Una lunga permanenza dell'uomo nello Spazio richiede la risoluzione di problematiche di tipo tecnico-ingegneristico, medico e di approvvigionamento delle risorse. Ad esempio la possibilità di abitare una base su Marte ad oggi è limitata a circa 30 giorni. Il lancio degli astronauti infatti avviene quando la Terra è quasi in congiunzione con Marte (minima distanza tra i due pianeti) ed è necessario dopo un mese abbandonare la base e rientrare sul nostro pianeta. Oltre questo tempo infatti, la Terra tende ad allontanarsi dal pianeta rosso, rendendo il rientro degli astronauti sempre più lungo ed oneroso in termini di risorse.

Una missione di questo tipo dovrebbe durare in tutto circa 500 giorni. Se si vuole ipotizzare una missione un po' più complessa, allora bisogna pensare di dover lasciare gli astronauti fino ad una successiva congiunzione Terra-Marte. Per una missione di lunga durata di questo tipo non sarebbe realistico pensare di rifornire dalla Terra tutte le risorse necessarie, in termini di cibo, acqua e ossigeno, per soddisfare i fabbisogni dell'equipaggio. Pertanto, le missioni interplanetarie e le lunghe permanenze sulle piattaforme spaziali dipendono dallo sviluppo e dall'utilizzo efficiente di sistemi di tipo biorigenerativo, in cui è possibile sostenere le necessità degli equipaggi attraverso una continua rigenerazione delle risorse, fino ad arrivare alla completa autosufficienza.

L'evoluzione dei sistemi chimico-fisici prevede l'inserimento di componenti biologiche che aggiungono la parola "bioregenerative" agli LSS trasformandoli in BLSS. I BLSS sono ecosistemi artificiali basati sulle interazioni tra uomo, microorganismi (microalghe, batteri) e organismi fotosintetizzanti (alghe e piante superiori), alloggiati in relativi compartimenti, in cui ciascuno utilizza come risorsa i prodotti di scarto del metabolismo dell'altro, in un ideale ciclo chiuso. In tale contesto, scegliendo opportunamente le specie, le piante hanno un ruolo cruciale potendo assolvere a diverse funzioni fondamentali: i) rigenerare l'aria assorbendo anidride carbonica ed emettendo ossigeno attraverso la fotosintesi, ii) purificare l'acqua mediante la traspirazione, e iii) riciclare i prodotti

Il progetto ESA-MELISSA

Il progetto ESA- MELISSA (Micro-Ecological Life Support System Alternative) a cui partecipano numerose istituzioni di ricerca di diversi Paesi Europei, studia la possibilità di sviluppare un sistema biorigenerativo per il supporto della vita nello Spazio in missioni di lunga durata (es. Luna o Marte), mediante l'impiego di microrganismi e piante superiori.

L'elemento guida di MELISSA è la generazione di cibo fresco, acqua e ossigeno a partire da reflui del metabolismo umano (anidride carbonica, feci e urine) ed altri residui organici. A tale scopo, obiettivo del progetto è la creazione di un ecosistema artificiale composto da diversi tipi di batteri (termofili anaerobi, fotoeterotrofi, nitrifi-

canti e fotosintetici), piante superiori e componenti dell'equipaggio. Tale ecosistema è articolato in 5 compartimenti intercomunicanti, che realizzano uno scambio di materiali ed energia all'interno di un ciclo chiuso. In particolare, tre compartimenti alloggiano bioreattori, in cui specifici batteri elaborano i prodotti di scarto degli astronauti e delle piante, liberando minerali (come l'azoto in forma di nitrati) ed anidride carbonica, essenziali per la crescita delle piante. Il quarto compartimento ospita batteri fotosintetizzanti e piante, che utilizzano i minerali e l'anidride carbonica nella fotosintesi, sfruttando la luce come fonte di energia, e producono alimenti, acqua e ossigeno per gli astronauti, i consumatori del quinto compartimento.

degli scarti dell'equipaggio (feci, urine) producendo cibo fresco. Tali funzioni potrebbero essere svolte anche semplicemente dalle alghe, ma la presenza di piante superiori, nel caso di specie di interesse alimentare, offre un vantaggio importante sia dal punto di vista nutrizionale, anche per la maggiore palatabilità dei prodotti vegetali ottenibili, sia dal punto di vista del benessere psicologico degli astronauti, per l'azione di mitigazione dello stress da isolamento. Lo studio dei BLSS fu avviato negli anni '50 dall'aeronautica degli Stati Uniti, che finanziò esperimenti su alghe (in particolare del genere *Chlorella*) per la rigenerazione dell'aria nei sottomarini. La NASA iniziò le ricerche per l'utilizzo dei BLSS negli anni '60 su batteri autotrofi e solo nei primi anni '80 incluse piante superiori. Indagini approfondite furono condotte su alghe e piante superiori anche in Russia, già a partire dagli anni '60, quindi in Giappone e Canada dagli anni '80. In Europa, il programma dell'ESA MELISSA (Micro-Ecological Life Support System Alternative), iniziato nel 1989, fu originariamente concepito con il cianobatterio *Arthrospira platensis* (noto come alga *Spirulina*) come unico organismo fotosintetico. Tuttavia, i limiti nell'efficienza rigenerativa e la ridotta appetibilità e versatilità del cibo prodotto evidenziarono l'esigenza di abbinare le piante ai batteri. I BLSS non sono ancora impiegati nello Spazio in quanto non sono ancora stati risolti numerosi problemi di natura tecnica (per es. limitazioni di peso e volume, consumo energetico elevato) ed agronomica. Ad oggi, pertanto, la coltivazione delle piante in orbita è limitata a moduli sperimentali (camere di crescita) di dimensione ridotta, finalizzati allo

svolgimento di esperimenti di biologia vegetale o alla produzione di modeste quantità di cibo a scopo, più che altro, dimostrativo. Materiale vegetale è stato lanciato in orbita in voli senza equipaggio già negli anni '60, e in presenza di equipaggio dal 1971, sia in missioni brevi (es. sullo Space Shuttle americano e sulla Shenzhou cinese), che di lunga durata (sulle stazioni sovietiche Salyut e Mir e sulla ISS). Ultimo della serie dei moduli di coltivazione è il Veggie, sviluppato dalla NASA e in funzione sulla ISS dal 2014. Gli esperimenti condotti hanno stabilito che le piante sono in grado di crescere nello Spazio e di completare un intero ciclo di vita ("da-seme-a-seme") e, quindi, potenzialmente, di svolgere le funzioni a loro ascritte. Nell'agosto del 2015, membri dell'equipaggio Expedition 44 hanno mangiato per la prima volta una lattuga prodotta sulla ISS, in 33 giorni di coltivazione nel modulo Veggie. In questa ottica, è ipotizzabile che sistemi di maggiori dimensioni (per es. serre spaziali) possano garantire una parziale autonomia delle future colonie spaziali. Nelle basi planetarie, inoltre, si potrebbero sfruttare risorse disponibili localmente come ad esempio la regolite (suolo lunare o marziano) come substrato di coltivazione, per superare le limitazioni di peso e volume per il trasporto di materiali sui veicoli spaziali. Nelle basi planetarie, infine, la presenza della forza di gravità, seppure ridotta rispetto alla Terra (1/6 g sulla Luna e 1/3 g su Marte), permetterebbe l'adozione di tecnologie di irrigazione dipendenti dall'effetto gravitazionale che sulle piattaforme orbitanti, in condizioni di microgravità, non sono utilizzabili.

Le camere di crescita per la ricerca spaziale ed il controllo ambientale

Affinché le piante possano assolvere in modo efficiente alle funzioni descritte, diventando quindi efficienti “rigeneratori”, è necessario che siano allevate in opportune condizioni ambientali (per es. intensità luminosa, concentrazione di CO₂, temperatura ed umidità relativa) e colturali (per es. nutrizione idrica e minerale). Pertanto, gli esperimenti finalizzati alla realizzazione di BLSS sono condotti in camere di crescita equipaggiate di sistemi per il controllo preciso di tali parametri.

Nel corso di questi esperimenti, vengono definiti i valori dei parametri ambientali e i protocolli di coltivazione per le diverse specie candidate. Questi si ritengono ottimali quando sono in grado di determinare, nelle diverse colture (specie candidate), una crescita rapida e uniforme e rese produttive elevate, minimizzando gli scarti della coltivazione. La caratterizzazione del comportamento delle piante nello specifico ambiente di coltivazione è, inoltre, necessaria per determinare i necessari input (energia, acqua, nutrienti, CO₂) e, in particolare, per prevedere i tempi e le dinamiche di produzione dei conseguenti output (acqua, O₂, biomassa edibile e scarti) del sistema.

Diverse camere di crescita sono state progettate in tutto il mondo per la ricerca spaziale. Tra le più sofisticate, utilizzate in passato o ancora in uso per gli esperimenti sulla Terra, ricordiamo la BIOS-3 Facility presso l'Istituto di Biofisica di Krasnoyarsk (Russia, Siberia), la Biomass Production Chamber della NASA, operativa dal 1988 al 2000 al Kennedy Space Center di Cape

Canaveral (Florida, USA), la Japanese Closed Ecological Experiment Facility (CEEF) nella Prefettura di Aomori (Giappone), la Controlled Environment Systems Facility dell'Università di Guelph (Ontario, Canada), e l'Higher Plant Chamber (HPC) dell'ESA (realizzata nell'ambito del progetto MELiSSA), presso l'Università Autonoma di Barcellona (Spagna).

I sistemi di coltivazione e la distribuzione di acqua e di nutrienti

La coltivazione delle piante nei BLSS è condotta in sistemi detti “fuori suolo” che comprendono i “sistemi idroponici”, in cui le piante sono allevate in contenitori ed alimentate da soluzioni acquose complete degli elementi nutritivi necessari.

Tra le varie tipologie di idroponica, una delle più utilizzate nelle sperimentazioni preliminari a Terra è basata sulla tecnica della Nutrient Film Technique (NFT). Nell'NFT, le piante sono collocate in canaline, leggermente inclinate, in cui le radici sono lambite da un sottile film di soluzione nutritiva ricircolante. Il ricircolo della soluzione drenata (ciclo chiuso) prevede la correzione del volume e della concentrazione di nutrienti, alterati per l'assorbimento da parte delle radici. In alternativa, possono essere impiegati substrati solidi chimicamente inerti (es. lana di roccia), dotati di buona capacità di ritenzione idrica e in grado di fornire ancoraggio e supporto alle radici, o minerali in grado di trattenere e rilasciare gradualmente i nutrienti (es. zeoliti). La somministrazione della soluzione nutritiva (fertirrigazione) è effettuata con sistemi a microportate di erogazione (microirrigazione), e gli

interventi hanno frequenza e durata variabili in funzione del tipo di substrato, della coltura e dello stadio di sviluppo (accrescimento vegetativo, fioritura, formazione di frutti, semi o tuberi). Quando è gestita correttamente, l'idroponica consente di ottenere produzioni elevate anche in termini qualitativi. Tuttavia, molte delle specie candidate sono comunemente coltivate in campo in piena aria su suolo e richiedono ricerche specifiche per la messa a punto dei sistemi di coltivazione e la definizione dei fabbisogni delle piante. In questo contesto, la ricerca è anche impegnata nel verificare se e come le caratteristiche nutrizionali, note per le colture in suolo, sono alterate dalla coltivazione in sistemi idroponici in ambiente controllato.

Infine, occorre ricordare che i sistemi di irrigazione utilizzati sulla Terra non sono adatti ad alcuni scenari di missioni spaziali (per es. a bordo di stazioni orbitanti), dove la microgravità modifica il comportamento dei fluidi. Infatti, mentre la gravità presente su pianeti e satelliti (Luna, Marte), potrebbe consentire l'impiego di sistemi idroponici simili a quelli normalmente utilizzati sulla Terra (NFT, floating system, aeroponica) e di metodi irrigui gravimetrici o a goccia, tali metodi non possono essere utilizzati in microgravità, a causa della mancata separazione tra la fase liquida e quella gassosa. Le diverse condizioni di ipo-, iper- e microgravità presenti nello Spazio impongono quindi lo studio ed il superamento di alcuni problemi, quali ad esempio il mantenimento della continuità idraulica e la prevenzione dell'ipossia radicale in modo da ampliare le prospettive applicative dei sistemi idroponici. In presenza di microgravità, l'adozione

di opportune combinazioni substrato di coltivazione/sistema di distribuzione dell'acqua è un aspetto cruciale. Tra i sistemi proposti per la ISS, ad esempio, si ricorda il Porous Tube Plant Nutrient Delivery System e il Capillary Mat Rooting System, sviluppati dalla NASA e basati rispettivamente su tubi o materassini porosi. In particolare, il substrato deve avere elevata capillarità per consentire il movimento dell'acqua, ed il sistema di irrigazione deve garantirne una distribuzione uniforme.

I sistemi di illuminazione

La produttività delle piante, sia in termini di quantità che di qualità dei prodotti, dipende dalla quantità (intensità) e qualità (spettro o composizione in lunghezze d'onda, o "colore") della radiazione luminosa. La luce influenza la fisiologia, la morfologia e l'anatomia delle piante ed interagisce con altre variabili ambientali (es. temperatura e concentrazione di CO₂) e colturali (es. disponibilità di nutrienti) nel definirne la risposta all'ambiente di crescita. La luce, infatti, non fornisce solo l'energia per la fotosintesi ma anche "segnali" che determinano la forma della pianta (fotomorfogenesi) e la composizione chimica dei tessuti. In particolare, l'intensità e lo spettro della luce influenzano gli scambi gassosi (fotosintesi e traspirazione), l'asportazione di nutrienti e la sintesi di metaboliti e ormoni. Pertanto, obiettivo cruciale per la realizzazione dei BLSS è la conoscenza del livello ottimale di radiazione e della migliore composizione spettrale per le diverse colture.

Storicamente, le camere di crescita erano equipaggiate con sorgenti

luminose in grado di riprodurre nel modo più fedele la luce solare o “luce bianca” (per es. lampade ad alta pressione di sodio in combinazione con lampade a ioduri metallici). Tuttavia studi recenti di fisiologia vegetale hanno dimostrato che ogni colore della luce svolge un ruolo nel regolare precise funzioni biologiche: la luce blu e rossa, ad esempio, promuovono la sintesi dei pigmenti fotosintetici e aumentano il ritmo della fotosintesi. Pertanto,

nelle coltivazioni in ambiente controllato le lampade tradizionali sono state affiancate o sostituite da LED monocromatici. Esperimenti di volo spaziale hanno dimostrato, inoltre, che interazioni possono verificarsi anche tra luce e fattori spaziali: a titolo di esempio, in piante sottoposte ad esposizione prolungata alla microgravità, la fotosintesi è stata influenzata dalla microgravità solo in condizioni di elevata intensità luminosa.

La scelta delle specie da coltivare

L’obiettivo di realizzare nello Spazio una produzione di cibo in grado di soddisfare i fabbisogni dell’equipaggio, in termini di quantità e qualità, richiede la scelta di specie vegetali idonee. Numerosi aspetti tecnici e nutrizionali devono essere considerati nella selezione delle “colture candidate”. In alcuni scenari di missione (per es. a bordo di stazioni orbitanti), le limitazioni tecniche dipendono dalla ridotta disponibilità di volume ed energia e di tempo dell’equipaggio. A tale riguardo, vengono preferite colture caratterizzate da ciclo breve, taglia ridotta, resistenza a malattie ed alta produttività. Quest’ultima va intesa anche come rapporto tra frazione edibile e biomassa totale delle piante, definito “Indice di raccolta”,

che dipende dalla specie e, nell’ambito di questa, dalla cultivar (varietà coltivata) ma può, entro certi limiti, essere migliorato con idonee tecniche colturali. L’indice di raccolta rappresenta un requisito importante nella selezione, determinando il volume necessario per lo stoccaggio degli scarti vegetali sulle stazioni orbitanti. Nelle missioni di lunga durata e per le future colonie spaziali, per rispondere ai fabbisogni nutrizionali dell’equipaggio, sono preferite colture che forniscono alimenti con elevato contenuto energetico, di carboidrati e di proteine (es. grano tenero e grano duro, riso, patata, soia) oltre a colture da consumo fresco (pomodoro, lattuga).



Esperimento di coltivazione sulla ISS
Credits: NASA/ESA

Fattori ambientali spaziali e crescita delle piante

Perché studiare l'effetto dei fattori spaziali sulle piante?

Lo Spazio è un ambiente inospitale per la vita delle piante e degli animali che si sono adattati a vivere sulla Terra in un lungo processo di evoluzione. Nello Spazio, sulla Luna o su Marte, qualsiasi organismo adattato a vivere sulla Terra sarebbe sottoposto a livelli di fattori ambientali completamente differenti da quelli normalmente percepiti sulla Terra: temperature troppo elevate o troppo basse, diversa durata dei cicli giorno-notte, variazioni di composizione e pressione atmosferica, gravità ridotta e presenza di radiazioni cosmiche non sufficientemente schermate dall'atmosfera, sono solo alcuni dei fattori che rendono altamente improbabile la sopravvivenza degli organismi senza l'ausilio di moduli abitativi e serre spaziali in cui riportare tali fattori a livelli compatibili

con la vita. Tuttavia, tutti gli organismi hanno maggiori o minori capacità di sopravvivere a variazioni nei cambiamenti ambientali, mettendo in atto meccanismi di adattamento a livello strutturale e fisiologico. La comprensione di tali meccanismi e dei livelli di adattamento alla variazione dei fattori ambientali è fondamentale per realizzare i BLSS. Infatti, la capacità delle piante di agire come componenti attive dei BLSS, quindi la stessa efficienza di rigenerazione, dipende proprio da come esse crescono e reagiscono in presenza di determinati livelli dei fattori ambientali.

Nello Spazio, i due fattori "spaziali" principali che possono alterare lo sviluppo delle piante sono la gravità ridotta e le radiazioni ionizzanti. Esperimenti condotti nello Spazio, o a Terra in condizioni simulate, hanno messo in evidenza che tutti gli organismi possono subire alterazioni a seguito dell'esposizione a

tali fattori a tutti i livelli (molecolare, cellulare, anatomico, biochimico e fisiologico). A differenza dei sistemi unicellulari, le piante superiori presentano tutta la complessità di organizzazione degli organismi pluricellulari in cui alcuni tipi cellulari e processi sono più vulnerabili di altri. Inoltre, presentano diverse fasi di sviluppo (da seme secco fino alla pianta adulta) caratterizzate da una diversa sensibilità ai fattori ambientali. Studi di biologia vegetale spaziale hanno evidenziato che alcune alterazioni indotte dai fattori spaziali a livello cellulare e molecolare, nonché alcuni processi di riparazione messi in atto contro tali alterazioni, sono simili a quelli riscontrati nelle cellule animali.

Tuttavia, esperimenti realizzati nello Spazio a bordo di piattaforme in LEO (Low Earth Orbit) hanno dimostrato che, nonostante la presenza di alterazioni riscontrate a livello cellulare, le piante sembrano capaci di mettere in atto dei meccanismi di acclimatazione ai fattori spaziali, non ancora completamente compresi, che permettono di superare tali aberrazioni per garantire la crescita e la riproduzione.

Attualmente la ricerca sulla risposta delle piante ai diversi fattori ambientali spaziali vede coinvolte diverse discipline i cui risultati devono essere integrati per una comprensione completa dei meccanismi di risposta. Capire l'effetto dei fattori spaziali sulla crescita delle piante è importante non solo dal punto di vista scientifico, per meglio comprendere alcuni processi di sviluppo (utilizzando quindi lo Spazio come un laboratorio

speciale), ma anche per conoscere le diverse dosi soglia dei fattori spaziali che le piante possono tollerare in modo che, non solo non ne venga messa a rischio la sopravvivenza, ma venga garantita la loro capacità di rigenerazione delle risorse, la produttività e qualità degli organi utilizzati come cibo.

Le radiazioni ionizzanti

Gli elevati livelli di radiazioni ionizzanti (radiazione cosmica), a cui sono sottoposti tutti gli organismi nelle missioni spaziali di lungo periodo, rappresentano attualmente il principale limite per l'esplorazione spaziale interplanetaria. Le radiazioni ionizzanti sono radiazioni dotate di un'energia tale da poter ionizzare gli atomi e le molecole con cui interagiscono.

Gli effetti delle radiazioni ionizzanti sulle piante dipendono non solo dal tipo di radiazione, ma anche da dosi e tempi di esposizione (acuta o cronica), e dalle caratteristiche dell'organismo (specie, cultivar, stato fisiologico, momento del ciclo vitale) al momento dell'irraggiamento. Specie vegetali diverse sono caratterizzate da una diversa capacità di resistenza contro le radiazioni ionizzanti (radioresistenza), ma tutte in generale sono più resistenti degli organismi animali. Nelle piante, inoltre, si verifica un fenomeno noto come "ormesi": basse dosi di radiazione ionizzante possono avere effetti stimolatori positivi su alcuni processi di sviluppo. In diverse specie, è stato infatti dimostrato che alcuni processi biologici, tra cui la germinazione dei semi

e lo sviluppo radicale, sono positivamente influenzati dall'esposizione a basse dosi di radiazione ionizzante. Alcuni fenomeni indotti da basse dosi di radiazione, come ad esempio il nanismo, possono addirittura essere considerati positivi per la gestione della coltivazione nel caso di scenari di missione in cui i volumi sono limitati. Anche nelle piante, tuttavia, superata una certa dose soglia, la radiazione ionizzante ha effetti tossici o letali.

Gli effetti delle radiazioni ionizzanti sulle piante, visibili a livello morfologico e fisiologico, possono essere la conseguenza di modifiche indotte a livello genetico. Tuttavia, la radiazione può indurre anche danni diretti dovuti all'interazione con specifiche strutture cellulari (per es. le varie componenti delle pareti cellulari) o alla produzione di radicali liberi (ROS - Reactive Oxygen Species, molecole instabili ed estremamente reattive), che possono danneggiare macromolecole strutturali e funzionali quali lipidi, proteine e acidi nucleici.

Le piante sono capaci di mettere in atto diversi meccanismi che poi determinano la loro radioresistenza. In generale, quando la radiazione colpisce i tessuti e gli organi, si avvia un complesso meccanismo di reazione da parte della cellula vegetale che tenta di "arginare" o di "riparare" il danno. Ad esempio, si osserva l'aumento della sintesi o dell'espressione di enzimi che riparano eventuali danni a carico del DNA, l'incremento della sintesi di sostanze fenoliche, ossia specifiche molecole che agiscono da schermo

naturale contro la radiazione, oppure l'aumento dell'attività antiossidante di alcuni enzimi che porta alla rimozione di radicali liberi prodotti a seguito dell'esposizione alla radiazione e responsabili di danni ossidativi letali alle membrane cellulari. Un importante fenomeno alla base dell'elevata radioresistenza delle piante è la poliploidia, ossia la presenza di più copie del genoma in ciascuna cellula. Gli organismi poliploidi infatti mostrano una sorta di ridondanza genetica per cui se una copia di un gene è danneggiata, ne esiste una di riserva (backup) che garantisce l'espressione del gene stesso, poiché è altamente improbabile che la radiazione danneggi esattamente lo stesso gene nelle diverse copie disponibili del genoma.

Considerata l'elevata influenza che le radiazioni hanno sul metabolismo delle piante, è importante valutarne gli effetti sulla quantità e qualità delle parti eduli prodotte.

La gravità ridotta

La microgravità è storicamente il fattore più studiato nelle sperimentazioni di biologia vegetale spaziale. Come accennato, numerosi esperimenti a bordo di veicoli e stazioni spaziali hanno dimostrato che le piante sono capaci di completare il ciclo vitale da-seme-a-seme in assenza di gravità, o meglio in condizioni di microgravità. Tuttavia, la microgravità può provocare alterazioni nel normale svolgimento di alcuni processi vitali.

Dai numerosi studi svolti diretta-

mente nello Spazio, a bordo di veicoli spaziali o di stazioni orbitanti, è emerso che la microgravità influenza la crescita delle piante a livello molecolare, cellulare, e morfo-fisiologico. Il fenomeno più studiato in biologia vegetale spaziale è certamente il gravitropismo (o geotropismo). Mentre infatti, sulla Terra, in condizioni di normale attrazione gravitazionale, il gravitropismo rappresenta lo stimolo dominante che guida la direzione di crescita delle radici, che si sviluppano quindi in una direzione di crescita preferenziale lungo la verticale (con stessa direzione e verso del vettore della forza di gravità), nello Spazio, in condizioni di microgravità, le radici si sviluppano senza una direzione di crescita preferenziale e si perde la bipolarità della crescita delle piante (crescita del germoglio e della radice in verso opposto). Grazie a studi nello Spazio, unico ambiente in cui è possibile annullare completamente lo stimolo dominante della forza di gravità, è stato possibile chiarire i meccanismi della percezione dello stimolo gravitazionale. La microgravità, oltre a influenzare direttamente alcuni processi biologici, può anche influenzare indirettamente la crescita e lo sviluppo delle piante a causa della sua influenza su alcuni fenomeni fisici: ad esempio, le alterazioni nella dinamica dei fluidi e l'assenza di moti convettivi possono causare problemi nella diffusione dei gas e dei liquidi nei substrati di crescita o nell'aria circostante. Tali alterazioni possono determinare problemi per l'assorbimento idrico e minerale, riduzione della traspirazione o più in generale degli scambi gassosi

delle piante ed accumulo di etilene, un ormone normalmente prodotto dalle piante in alcuni momenti del ciclo vitale, ma che in concentrazioni eccessive può ostacolare alcuni processi vitali anticipando fenomeni di senescenza naturale. Difatti, nei primi esperimenti, effettuati nello Spazio in piccole camere di crescita, il mancato completamento dei cicli da-seme-a-seme (seed-to-seed) è stato attribuito a problemi nel controllo ambientale delle camere di crescita utilizzate a bordo in cui si verificavano, appunto, accumulo di etilene, eccesso di umidità o scarsità di anidride carbonica a causa della ridotta ventilazione. La possibilità di distinguere gli effetti diretti da quelli indiretti causati dalla microgravità sulla crescita delle piante è di fondamentale importanza per la gestione del controllo ambientale nei moduli di coltivazione per le piattaforme spaziali.



Esperimento di coltivazione sulla ISS
Credits: NASA/ESA

“Take-home message” e scenari di missione

Nel contesto generale della realizzazione di missioni spaziali di lunga durata, è ormai accettata la necessità di realizzare sistemi biorigenerativi di supporto alla vita in cui le piante possono essere considerate elementi chiave per la loro capacità di rigenerare l’atmosfera, recuperare acqua e fornire cibo fresco per l’integrazione della dieta degli astronauti.

Numerosi esperimenti di biologia vegetale spaziale hanno evidenziato che le piante possono crescere e completare il ciclo vitale da-seme-a-seme nello Spazio, premesso che le condizioni ambientali delle camere di crescita siano opportunamente gestite. Tuttavia, la capacità di rigenerare risorse e la produttività delle piante nei BLSS, soprattutto in presenza di fattori spaziali, potrebbero essere profondamente alterate. Di conseguenza è importante aumentare le conoscenze su come la crescita delle piante è influenzata dai fattori spaziali per definire i requisiti dei sistemi per la coltivazione delle piante nello

Spazio. L’importanza e i livelli dei fattori ambientali da considerare per la definizione di tali requisiti, dipende fortemente dagli scenari di missione. Infatti, mentre a bordo delle stazioni orbitanti, la microgravità e i volumi ridotti possono essere considerati fortemente limitanti per la coltivazione delle piante, tali fattori possono diventare secondari nel caso della realizzazione di coltivazioni in serre planetarie per le quali, invece, le radiazioni ionizzanti rappresentano la principale criticità da affrontare.

Al fine di realizzare ecosistemi artificiali in cui produttori, consumatori e degradatori interagiscano per ottenere un’efficiente rigenerazione delle risorse, è necessario integrare le conoscenze di diverse discipline per raggiungere una comprensione completa dei processi biologici, per definire i requisiti specie-specifici per la coltivazione (massimizzando le rese e minimizzando gli scarti) e per sviluppare nuove tecnologie a supporto della vita nello Spazio.

L'esperimento MUTI-TROP a bordo della ISS

MULTI-TROP (MULTI-TROPismo) è il nome dell'esperimento vincitore del concorso Yiss - Youth ISS Science, bandito dall'Agenzia Spaziale Italiana, e nato dalla collaborazione tra il Dipartimento di Agraria dell'Università degli Studi di Napoli Federico II ed il Liceo Scientifico F. Silvestri di Portici (Napoli). L'esperimento è stato svolto a bordo della ISS nel corso dell' Expedition 52/53 - VITA, che ha visto coinvolto l'astronauta Paolo Nespoli.

Lo scopo di questo esperimento è stato quello di analizzare l'interazione tra i maggiori fattori di controllo della direzione di crescita delle radici, senza l'interferenza del fattore gravità che sulla Terra è lo stimolo dominante (gravitropismo). In particolare si voleva verificare se, a bordo della ISS, è possibile guidare la crescita della radice attraverso altri stimoli, quali la "presenza di acqua" (idrotropismo) e la "presenza di elementi nutritivi" nel substrato (chemiotropismo).

Per verificare l'interazione dei tre tropismi sullo sviluppo direzionale degli

apici radicali, è stato condotto un esperimento di germinazione di semi nell'unità sperimentale YING-B2 di BLOKON. Subito prima del volo i semi sono stati posizionati nelle camere di crescita dell'EU-YING-B2, ciascuna delle quali è stata riempita in parte da un substrato inerte contenente solo acqua (stimolo idrotropico), in parte dallo stesso substrato contenente una soluzione ricca di elementi nutritivi (stimolo chemiotropico), in parte dall'aria. La germinazione è avvenuta in condizioni di microgravità e la crescita dei semi germinati è stata interrotta a bordo con un fissativo chimico iniettato automaticamente per bloccare tutti i processi metabolici. Al rientro, l'analisi dei parametri biomeccanici, citologici, anatomici e funzionali di ogni seme germinato ha permesso di capire quale dei tre stimoli ha prevalso e come hanno interagito tra loro.

Quest'esperimento ha fornito informazioni utili non solo per la produzione di cibo fresco nello Spazio, ma anche per migliorare i processi di coltivazione delle piante sulla Terra riducendo sprechi di acqua e consumo di fertilizzanti.

Piante coltivate sulla ISS
Credits: NASA/ESA



La Nebulosa della Carena ripresa da
Hubble
Credits: NASA



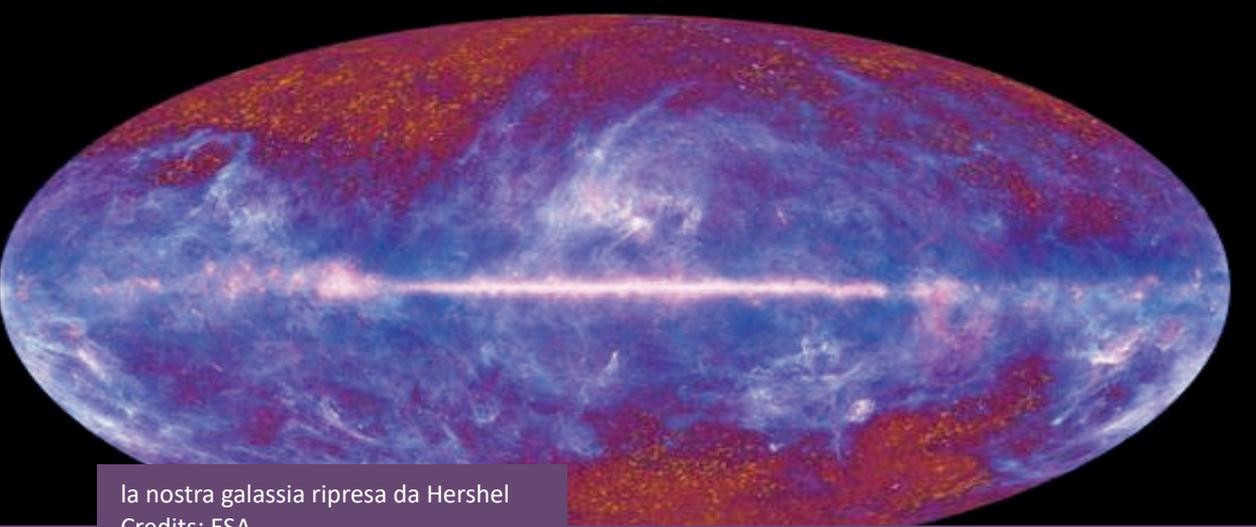
L'ASTROBIOLOGIA

“Se gli altri animali contemplano a testa bassa la terra, la faccia dell’uomo l’ha alzata, gli ha imposto la vista del cielo perché levasse lo sguardo spingendolo fino alle stelle”. Così scrive Ovidio nelle Metamorfosi, riconoscendo nella meraviglia di fronte al cielo stellato l’origine prima di quel senso del mistero, di quelle domande fondamentali che da sempre occupano la mente e il cuore di donne e uomini. Tra queste forse la più ricca di implicazioni riguarda l’origine della vita, sulla quale esistono tante ipotesi, ma ancora poche certezze: dove e come è nata la vita? Quali sono le condizioni necessarie a sostenerla? Esiste la vita altrove nell’universo?

I pezzi del puzzle arrivano dalle discipline più diverse, dai laboratori, dal profondo degli oceani, dai luoghi più inospitali del nostro pianeta, ma anche dallo Spazio:

dalla Stazione Spaziale Internazionale, da Marte, dalla cometa Churyumov - Gerasimenko studiata dall’ambiziosa missione Rosetta. Questa breve introduzione all’astrobiologia è un volo di ricognizione nei vari luoghi, fisici o figurati, ove si sta cercando di rendere il mistero meno fitto. Preparatevi ad un viaggio vertiginoso e, se ogni tanto resterete senza fiato, fermatevi e sedetevi un attimo a contemplare il cielo stellato.

Samantha Cristoforetti
Missione Futura (2014)



la nostra galassia ripresa da Hershel
Credits: ESA

Introduzione all'Astrobiologia

“A volte credo che ci sia vita negli altri pianeti, a volte credo di no. In qualsiasi dei due casi la conclusione è sorprendente.”

Carl Sagan

L'astrobiologia è una disciplina che cerca di rispondere, con un approccio scientifico, a uno degli interrogativi filosofici più antichi dell'umanità: siamo soli nell'universo?

Il termine “exobiology” fu coniato negli anni '60 nel contesto del programma di esplorazione spaziale della NASA che, nel 1976 con la missione Viking, portò su Marte la strumentazione per cercare forme di vita sul suo suolo. I risultati discordanti sull'attività metabolica e l'esito negativo dell'analisi sulla presenza di composti organici nei campioni di suolo - la vita come noi la conosciamo è basata sulla chimica del carbonio - frenarono la realizzazione di altre missioni a carattere astrobiologico.

Circa 40 anni dopo la missione Viking sappiamo che la presenza nel suolo

marziano di composti fortemente ossidanti (perclorati) influenzò negativamente il metodo analitico utilizzato per il rilevamento dei composti organici. Inoltre, i dati sperimentali sulla sopravvivenza di microrganismi terrestri e sulla persistenza di macromolecole biologiche (bioimpronte) dopo l'esposizione alle radiazioni solari e cosmiche che raggiungono la superficie marziana, indicano che la ricerca di vita passata o presente deve essere limitata al sottosuolo. D'altronde, anche sulla Terra, quando le condizioni chimico-fisiche diventano estreme, la vita si rifugia in nicchie sub-superficiali - come suggerito dal ritrovamento di microrganismi che vivono sotto il ghiaccio di alcuni laghi antartici oppure all'interno di rocce nei deserti caldi e freddi - purché sia presente acqua allo stato liquido e una fonte di energia (solare o chimica).

Nel 1995, venti anni dopo l'insuccesso della missione Viking, tre fatti riaccesero l'interesse per la ricerca di vita oltre la Terra, spingendo l'orizzonte del-

le ricerche anche al di là del confine del sistema solare: l'annuncio della presenza di tracce fossili di vita nel meteorite di provenienza marziana ALH84001, che in seguito furono attribuite ad una origine non biologica; la scoperta di 51 Pegasi b, il primo pianeta extrasolare orbitante intorno ad una stella simile al nostro Sole; la prova dell'esistenza di un oceano di acqua allo stato liquido sotto la superficie ghiacciata della luna di Giove, Europa, grazie ai dati trasmessi della sonda spaziale ESA Galileo.

La scoperta dei pianeti extrasolari ha prospettato la possibilità di mondi abitabili nella nostra galassia, se non addirittura l'esistenza di un gemello del nostro pianeta. La presenza di acqua allo stato liquido sotto la superficie di Europa, luna di Giove, ha suggerito l'esistenza di nicchie abitabili in lune ghiacciate di pianeti gassosi incompatibili con la vita. Infine, anche se non sorretto da alcuna prova sperimentale, l'annuncio di forme di vita fossile nel meteorite marziano ha aumentato la nostra percezione sulla complessità degli eventi collegati con l'origine della vita sulla Terra. Ciò si inserisce in un interesse più generale, che riguarda il ruolo svolto da meteoriti e comete nel trasportare sulla Terra i mattoni della vita (amminoacidi e DNA), sintetizzati nello spazio interstellare a partire dagli elementi più abbondanti nell'universo, i CHONPS (ovvero carbonio, idrogeno, ossigeno, azoto, fosforo e zolfo).

Infatti, diversi amminoacidi sono stati ritrovati in alcuni meteoriti di tipo carbonaceo che hanno un'età stimata maggiore di 4 miliardi di anni, come Murchison, un meteorite caduto in Australia nel 1969. Molte missioni spaziali sono state realizzate allo scopo di contribuire alla com-

preensione dell'origine della vita sulla Terra. Nella coda della cometa Wild 2, riportata sulla Terra nel 2006 dalla missione NASA Stardust iniziata nel 1999, è stata identificata la glicina (un amminoacido che si trova nelle proteine). Nel 2015, il più semplice amminoacido, la glicina, ma anche il fosforo (che si trova negli acidi nucleici), sono stati identificati sulla cometa 67P Churyumov-Gerasimenko studiata dalla missione europea Rosetta iniziata nel 2004. Nel 2016 è stata lanciata la sonda NASA OSIRIS-REX che avrà il compito di raggiungere un asteroide, prelevarne un frammento e riportarlo a Terra tra circa 7 anni.

È bene inoltre sottolineare che oltre 120 diversi tipi di molecole organiche complesse, tra cui anche la glicina, sono stati osservati frequentemente nello spazio interstellare, attraverso le tecniche di analisi spettroscopica delle righe molecolari. La formazione di queste molecole fa parte dei processi chimici che avvengono all'interno delle nubi molecolari da cui si formano stelle e pianeti. È quindi molto probabile che esse siano disponibili anche in altri sistemi planetari. A loro volta, gli elementi CHONPS sono il risultato dell'arricchimento del mezzo interstellare con gli atomi pesanti prodotti all'interno dei nuclei stellari, un processo che ha richiesto diverse generazioni di stelle per raggiungere le abbondanze di elementi attualmente presenti nella galassia. Infatti, in origine, nell'Universo erano presenti solo i due atomi più semplici, idrogeno e elio, assieme a tracce trascurabili di altri elementi leggeri. La possibilità di innescare reazioni chimiche che coinvolgono atomi e molecole più complesse è quindi il risultato diretto dell'evoluzione dell'universo e dei meccanismi di produ-

zione energetica nelle stelle. Cercare la vita altrove è strettamente connesso al problema di capire come questa si sia originata sulla Terra. In questo senso il primo esperimento di astrobiologia è stato condotto nel 1953 da Stanley Lloyd Miller e Harold Urey, i quali dimostrarono che i mattoni della vita (gli amminoacidi) si possono formare dai componenti dell'atmosfera primordiale (metano, idrogeno e ammoniaca), in presenza di scariche elettriche. Che le prime molecole biologiche - e poi da queste le prime forme cellulari, si siano formate in una piccola pozza calda, come scriveva Charles R. Darwin, non è l'unica ipotesi sull'origine della vita. Largamente condivisa è l'ipotesi che la vita si sia originata nelle profondità oceaniche, al buio e in assenza di ossigeno, in camini idrotermali noti come Lost City. Questo suggerisce che i primi passi dell'origine della vita sarebbero avvenuti a temperature superiori ai 100°C con la comparsa dell'ultimo antenato comune universale (*last universal common ancestor*, LUCA) un organismo chemiolitotrofo ipertermofilo (ovvero amante delle alte temperature e capace di cibarsi direttamente dell'energia chimica intrappolata nei costituenti delle rocce). Solamente dopo la comparsa di microorganismi capaci di fotosintesi ossigenica, i cianobatteri, l'atmosfera primitiva è stata ossigenata e la Terra è diventata abitabile per organismi con un metabolismo aerobico.

Poiché un requisito fondamentale per la vita è la presenza di acqua allo stato liquido, la ricerca di vita in altri sistemi planetari è concentrata per ora sugli esopianeti nella zona di abitabilità, cioè ad una distanza tale dalla loro stella da permettere, ad una data pressione, di mantenere l'acqua allo stato liquido sulla loro superficie.

Questa limitazione è legata all'impossibilità, a causa dell'estrema distanza, di fare osservazioni *in situ* con missioni robotiche, come nel caso dei corpi del Sistema Solare, e di conseguenza alla necessità di individuare segni di attività biologica nelle atmosfere planetarie o sulla superficie, attraverso l'analisi spettroscopica. Negli ultimi anni, il numero di esopianeti è cresciuto rapidamente arrivando ad alcune migliaia. Ciò è stato possibile sia grazie all'uso di nuovi strumenti a terra, che alla realizzazione di osservatori spaziali come Corot e in seguito Kepler della NASA. Oggi abbiamo quindi a disposizione un catalogo piuttosto ampio di sistemi planetari attorno ad altre stelle e cominciamo a essere in grado di effettuare stime statistiche sull'abbondanza di pianeti rocciosi potenzialmente abitabili nella nostra galassia. Secondo alcune di queste stime almeno una stella su cinque potrebbe avere un pianeta potenzialmente abitabile, il che significherebbe che nella nostra galassia potrebbero esistere miliardi di pianeti dove la vita potrebbe aver avuto origine.

Accanto a questo, bisogna tenere presente che il concetto di zona abitabile è un termine operativo che può avere eccezioni importanti. Un esempio lampante è la presenza di acqua allo stato liquido sotto la superficie di Europa e della luna di Saturno, Encelado, entrambi ben al di fuori della zona abitabile del Sistema Solare. A questo riguardo, è interessante sottolineare che questi oggetti celesti, un tempo ritenuti del tutto inadatti a ospitare la vita, sono oggi considerati tra gli obiettivi di studio futuro più interessanti per l'astrobiologia. In particolare, alcune missioni spaziali in fase di studio o di realizzazione, come JUICE dell'ESA, avranno come scopo proprio quello

di studiare più da vicino Europa, per raccogliere ulteriori evidenze sull'esistenza dell'oceano subglaciale e per preparare la possibile esplorazione di

questo ambiente, in cerca di possibili prove della presenza di organismi viventi al suo interno.

La costellazione del Granchio
Credits: ESA





Roccia marziana analizzata dal rover
Curiosity
Credits: NASA

Estremofili terrestri e la ricerca di vita altrove

La capacità della vita di adattarsi a condizioni estreme è tra i fattori che più fortemente incoraggiano la sua ricerca altrove nell'Universo. L'esplorazione di luoghi remoti, spesso inaccessibili all'uomo, caratterizzati da condizioni ostili alla vita, ha dimostrato che organismi noti come estremofili (letteralmente "amanti dell'estremo"), generalmente batteri e archeobatteri, proliferano in condizioni di temperatura, pressione, acidità e alcalinità letali per la maggior parte degli esseri viventi.

Nel 1969, il batterio termofilo *Thermus aquaticus*, che cresce a 70°C, fu isolato da una sorgente termale nello Yellowstone National Park. Da allora, il valore della temperatura compatibile con la vita si è innalzato ulteriormente: prima a 90°C, nel 1982, con il batterio *Thermotoga maritima*, e poi fino a 121°C quando, nel 2003, negli sfatatoi idrotermali sui fondali oceanici furono scoperte colonie di archea ipertermofili. Allo stesso tempo, la temperatura minima tollerata dagli psicrofili è sce-

sa fino a -13°C quando, nel 2012, una comunità microbica è stata rinvenuta sotto lo strato di ghiaccio del lago Vida in Antartide. La scoperta di nicchie abitate subglaciali conferma che la vita trova il modo di preservarsi in ambienti estremi, e lascia aperta la possibilità della sua presenza in alcune lune ghiacciate del sistema solare, come Europa ed Encelado, dove si sospetta la presenza di oceani sotterranei di acqua liquida.

Esistono poi altri estremofili, detti radiofili, capaci di tollerare dosi elevate di radiazioni ionizzanti, circa 3.000 volte superiori a quelle letali per l'uomo: tra questi, il batterio *Deinococcus radiodurans*, isolato dopo un processo di sterilizzazione di cibo in scatola, e cianobatteri del genere *Chroococcidiopsis*, isolati da deserti caldi e freddi. Poiché tali dosi di radiazione non sono naturalmente presenti sul nostro pianeta, si pensa che la radioresistenza sia una conseguenza della resistenza al disseccamento. Intriganti sono infatti quegli organismi in grado di spegnere

il proprio metabolismo al momento del disseccamento e di riaccenderlo al momento della reidratazione. Capaci di anidrobiosi (vita senz'acqua) sono anche alcuni batteri e cianobatteri che non differenziano forme di resistenza (spore e acineti), il lievito, i tardigradi e i rotiferi.

Nel 2006 batteri e cianobatteri anidrobionti sono stati identificati nel cuore iper-arido del deserto di Atacama, in Cile, considerato l'analogo terrestre di Marte per la carenza di acqua. In luoghi come questi, l'attività metabolica è possibile solo quando il fenomeno della deliquescenza rende temporaneamente disponibile acqua liquida. Nelle Valli Secche dell'Antartide, un altro analogo terrestre di Marte, comunità endolitiche formate da licheni, funghi, cianobatteri e alghe furono scoperte nel 1976, proprio mentre la missione Viking non riusciva a trovare evidenze di vita sul suolo marziano.

Gli organismi terrestri non solamente proliferano nelle condizioni ambientali più disparate, ma alcuni di loro, detti autotrofi, sono in grado di sfruttare diverse fonti di energia per trasformare l'anidride carbonica in composti organici e ottenere energia chimica (ATP). Ad esempio, sebbene la più comune forma di fotosintesi ossigenica è quella che utilizza la luce visibile, l'inaspettata capacità di alcuni cianobatteri di fotosintetizzare nell'infrarosso ha aperto interessanti scenari sulla possibilità di vita in esopianeti attorno a stelle con spettri elettromagnetici diversi da quello del Sole. Inoltre, l'esistenza di fotosintesi non ossigenica svolta da microrganismi anaerobi e fotolitotrofici (quali i batteri verdi e i batteri rossi-solfurei), basata sull'ossidazione di composti ridotti dello zolfo, come l'acido

solfidrico, ha evidenziato che la vita non necessariamente è associata alla presenza di ossigeno nell'atmosfera. Ancora più peculiare è la capacità di alcuni batteri isolati dagli sfiatatoi idrotermali di svolgere fotosintesi non ossigenica utilizzando luce infrarossa di origine geotermale. Infine, altri batteri noti come chemioautotrofi, o chemiolitotrofi, non utilizzano la luce per ottenere energia, bensì l'ossidazione di composti inorganici e l'anidride carbonica come fonte di carbonio. Tra questi, l'esistenza di batteri nitrificanti, ferrobatteri, solfobatteri e archea metanogeni amplia il ventaglio di possibilità metabolica degli organismi viventi, aumentando le probabilità che la vita possa esistere altrove nell'Universo.

Microorganismi nello Spazio

Lo sviluppo di programmi spaziali per il volo umano ha consentito di studiare l'effetto dell'ambiente spaziale sui microorganismi terrestri. Poiché tale ambiente è ostile alla vita a causa delle condizioni di vuoto e per le elevate dosi di radiazione solare e cosmica, le spore batteriche, grazie alle loro caratteristiche di resistenza, sono state le prime ad essere utilizzate, seguite poi da estremofili resistenti alle radiazioni e alla disidratazione. Durante le missioni Gemini 9 e Gemini 12 del 1966, per la prima volta spore del batterio *Bacillus subtilis* furono esposte per alcune ore all'ambiente spaziale oltre lo strato di ozono dell'atmosfera che scherma la componente più dannosa della radiazione ultravioletta – quella assorbita dal DNA. Poiché la loro sopravvivenza aumentava quando

schermate da uno strato sottile di alluminio, apparve evidente che una radiazione non penetrante, come quella ultravioletta, ne limitava maggiormente la sopravvivenza. Nel 1972, durante la missione Apollo 16, spore di *Bacillus subtilis* furono trasportate oltre la protezione del campo magnetico terrestre ed esposte all'azione delle radiazioni ionizzanti, compresi gli ioni pesanti; pur essendo questi ultimi letali, la loro scarsa abbondanza (1% della radiazione cosmica) consentì la sopravvivenza di alcune spore. Il record di sopravvivenza dopo 6 anni di permanenza nello Spazio fu stabilito quando spore di *Bacillus subtilis* furono esposte come multistrati (per garantirne la protezione dalle radiazioni ultraviolette) utilizzando la Long Duration Exposure Facility della NASA. La missione prevedeva che la piattaforma, portata in bassa orbita terrestre nel 1984, fosse recuperata undici mesi dopo: purtroppo, a seguito del tragico incidente dello Space Shuttle Challenger, essa fu riportata a terra dallo Space Shuttle Columbia nel 1990.

L'esposizione per circa un anno all'ambiente spaziale di spore di *Bacillus subtilis* e del batterio *Deinococcus radiodurans* fu possibile utilizzando il satellite EURECA dell'Agenzia Spaziale Europea, lanciato in orbita nel 1992 con lo Space Shuttle Atlantis e recuperato nel 1993 dallo Space Shuttle Endeavour.

Lo sviluppo da parte dell'Agenzia Spaziale Europea del contenitore scientifico Biopan, installato sulla capsula recuperabile russa Foton, permise tra il 1994 e il 2007 la realizzazione di numerosi esperimenti di esposizione in bassa orbita terrestre, per periodi di circa due settimane. Si raccolsero così evidenze sulla capacità non solamente delle spore batteriche ma anche di

organismi più complessi, come licheni e tardigradi, di sopravvivere al vuoto spaziale e alle radiazioni presenti in bassa orbita terrestre, e cioè di essere in grado una volta riportati a Terra e reidratati, di riparare i danni accumulati durante l'esposizione in bassa orbita terrestre. Il fatto che la sopravvivenza di spore batteriche non risultò alterata quando esposte in presenza di simulanti meteoritici, permise di formulare l'ipotesi della litopanspermia (lithos=roccia, pan=tutto, sperma=origine) per la quale la vita, se protetta da materiale roccioso, potrebbe trasferirsi tra pianeti.

Successivamente l'esposizione di organismi terrestri all'ambiente spaziale per periodi prolungati di tempo (superiori ai 12 mesi) fu possibile utilizzando il contenitore scientifico Expose, realizzato dall'Agenzia Spaziale Europea e installato al di fuori della Stazione Spaziale Internazionale (ISS), sul modulo europeo Columbus (Expose-E) oppure su quello russo Zvezda (Expose-R). Per la missione Expose-E (iniziata nel 2008 quando lo Space Shuttle Atlantis portò il contenitore scientifico sulla ISS e terminata dopo 18 mesi con il suo ritorno con lo Shuttle Discovery) furono selezionati spore e microorganismi isolati da ambienti terrestri estremi, quali cianobatteri, funghi e licheni, la cui resistenza per brevi periodi all'ambiente spaziale era già stata riportata con gli esperimenti sulla piattaforma Biopan. Fu così possibile documentare la sopravvivenza di questi organismi dopo oltre un anno di esposizione all'ambiente spaziale.

Con la missione Expose-R del 2008 una selezione ancora più ampia di organismi, comprendente spore, semi, cianobatteri, alghe, batteri alofili, funghi, licheni e briofite fu esposta all'ambiente spaziale per 22 mesi. Tale missione

iniziata con il trasposto del contenitore Expose-R sulla ISS con il cargo russo Progress è terminata con il rientro dei campioni a Terra nel 2011. La varietà degli organismi utilizzati è stata ulteriormente ampliata nella successiva missione Expose-R2, iniziata nel 2014 e terminata nel 2016 con un'esposizione all'ambiente spaziale di 16 mesi, con i due esperimenti BOSS (Biofilm Organisms Surfing Space) e BIOMEX (Biology and Mars Experiment). In particolare, sfruttando la possibilità di simulare le condizioni marziane in bassa orbita terrestre, in una parte del contenitore scientifico Expose-R2 alcuni estremofili e macromolecole biologiche sono state esposte in presenza di simulanti il suolo marziano e lunare, al fine di ottenere informazioni per la ricerca di vita passata o presente su Marte e in previsione di future sperimentazioni sulla superficie lunare. Infine, le prime informazioni sulla capacità del *Bacillus subtilis* di fronteggiare l'esposizione all'ambiente spaziale, non nello stato dormiente di spora, ma nella forma vegetativa metabolicamente attiva, sono state ottenute per la prima volta nel 2011 grazie ad esperimenti realizzati dalla NASA su piccoli satelliti.

Metodi per la ricerca di esopianeti

La ricerca di indizi di attività biologica fuori dal nostro sistema solare è appena agli inizi.

Cercare esopianeti (ovvero pianeti in orbita intorno ad altre stelle) è un compito arduo, e solo da vent'anni gli astronomi sono riusciti a trovare la prima evidenza osservativa della

loro esistenza. La ragione della difficoltà sta nella scarsa luminosità di un pianeta rispetto alla propria stella e nella ridotta separazione tra i due oggetti celesti. Ciò rende impossibile, nei casi generali, ottenere un'immagine diretta del pianeta. Bisogna quindi ricorrere a metodi di rivelazione indiretta.

Il primo metodo per la ricerca di esopianeti a essere applicato con successo è stato il metodo detto della "velocità radiale". Questo si basa sull'osservazione del movimento periodico di una stella indotto dalla presenza di uno o più pianeti legati gravitazionalmente ad essa. Tanto la stella che i suoi pianeti orbitano attorno al centro di massa del sistema, e questo si traduce in una variazione della posizione della stella con il passare del tempo. Il moto della stella, sebbene in genere molto piccolo, può essere misurato attraverso la variazione delle righe spettrali della luce che essa emette (un fenomeno dovuto al cosiddetto "effetto Doppler"), che è legata alla velocità della stella lungo la direzione di osservazione (da cui il nome del metodo). Il metodo della velocità radiale permette non soltanto di inferire la presenza di esopianeti ma anche di calcolare la loro distanza orbitale e di ottenere una stima della loro massa. Il primo esopianeta mai osservato, 51 Pegasi, è stato scoperto nel 1995 proprio con questo metodo.

Un altro importante metodo per la rivelazione di esopianeti è il cosiddetto "metodo del transito". In questo caso, viene osservata la minuscola variazione nella luminosità di una stella dovuta al passaggio di uno o più pianeti tra la nostra direzione di osservazione e la stella stessa.

In altre parole, il transito oscura parzialmente la stella alla nostra vista, e ciò ci permette di dedurre la presenza dell'esopianeta e di misurarne il diametro, oltre che la sua distanza orbitale. Il metodo, tuttavia, funziona solo in presenza di un allineamento estremamente preciso tra la stella e il pianeta lungo la direzione di osservazione, e richiede perciò il monitoraggio di un grande insieme di stelle per avere buone probabilità di riuscita. L'osservazione dei transiti è stata applicata con grande successo dal satellite della NASA Kepler, che dal 2009 ha scoperto oltre mille esopianeti, molti dei quali di dimensioni paragonabili a quelle della Terra e a distanze orbitali che ricadono nella cosiddetta fascia di abitabilità (ovvero la zona dove le temperature superficiali potrebbero essere compatibili con la presenza di acqua liquida). Tra i metodi di rivelazione di esopianeti usati più raramente, il più rilevante è quello basato sul fenomeno della "lente gravitazionale": si basa sull'osservazione della deviazione dei raggi luminosi, prevista dalla teoria della relatività generale di Einstein, indotta dalla presenza di una stella e dei suoi pianeti sulla luce di un'altra stella che si trovi lungo la direzione di osservazione.

Attualmente, gli esopianeti di cui è stata confermata la scoperta sono oltre 3000. Le estrapolazioni statistiche effettuate sulla base dei dati esistenti consentono di affermare che, molto probabilmente, ogni stella della nostra galassia ha almeno un pianeta. Il numero di esopianeti conosciuti è destinato a crescere ulteriormente nei prossimi anni, con ulteriori campagne di osservazione da terra e con missioni spaziali progettate allo scopo (come Cheops e PLATO dell'ESA). I progressi nelle tecnologie osservative previste

per il prossimo ventennio, assieme alla costruzione di grandi telescopi come lo European Extremely Large Telescope, permetteranno anche di ottenere le prime immagini dirette di pianeti in orbita attorno alle stelle più vicine.

Ricerca di vita su esopianeti

Data l'enorme distanza che ci separa anche dalle stelle più vicine, è estremamente improbabile che potremo mai ricercare tracce di vita *in situ* sugli esopianeti, quantomeno in un futuro non troppo remoto. È però possibile mettere a punto tecniche che possano permetterci, attraverso osservazioni a distanza, di cercare indicazioni sulla presenza di marcatori associati all'attività biologica. Nei prossimi anni, molta attenzione verrà dedicata alla caratterizzazione degli esopianeti già scoperti, ovvero alla ricostruzione di un quadro il più possibile completo delle loro condizioni fisiche. Per gli esopianeti di cui è nota sia la massa che il raggio (ovvero quelli osservati tanto con il metodo della velocità radiale che con quello del transito) è possibile ottenere una stima della densità e, da questa, risalire a un modello della composizione (se, ad esempio, il pianeta è roccioso o gassoso, e così via). Potrà inoltre essere ipotizzata la presenza di altri fattori, come un'attività vulcanica. Per i pianeti che si trovano in fascia di abitabilità, e che presentano altre caratteristiche che rendano probabile un ambiente non ostile alla vita, sarà interessante quindi proseguire l'indagine: il passo più importante sarà la determinazione della presenza di un'atmosfera e, possibilmente, uno studio della sua composizione.

Questo potrà essere ottenuto attraverso l'indagine spettroscopica della luce

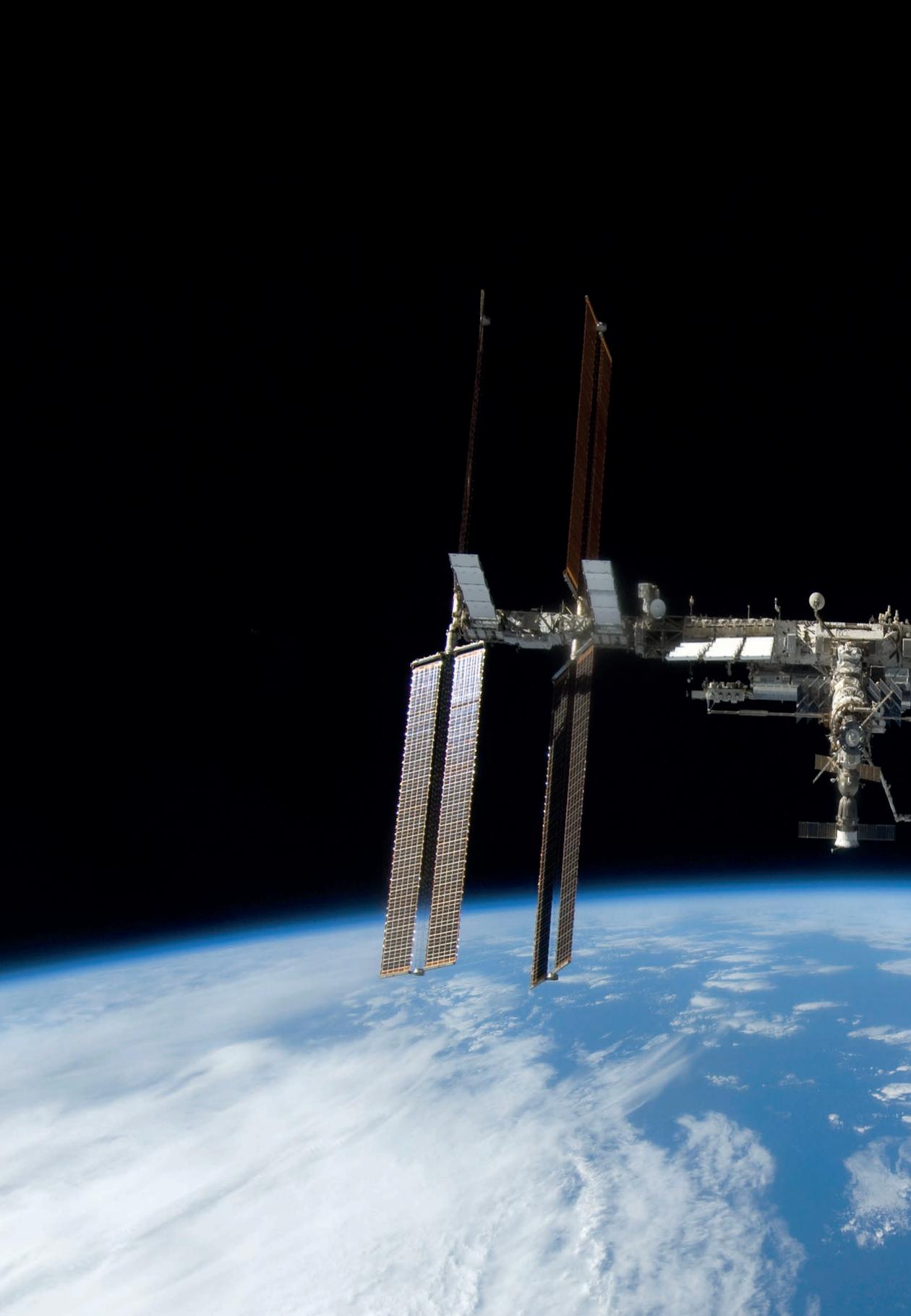
che arriva dal sistema stella-pianeta. Durante il transito dell'esopianeta di fronte alla stella, una parte della luce della stella può essere assorbita o diffusa dall'atmosfera del pianeta. Se questo accade, le righe spettrali osservate possono dare indicazioni sulla composizione atmosferica. Questa tecnica è stata già applicata con successo a esopianeti con una forte componente gassosa, e ha portato all'individuazione di molecole contenute nella loro atmosfera. La sfida futura sarà applicare la stessa tecnica a esopianeti di tipo roccioso, con una atmosfera più sottile.

Attraverso questo tipo di indagine, oltre a ottenere un quadro più chiaro sul clima e quindi sulla potenziale abitabilità degli esopianeti, si potranno anche individuare molecole che, sulla Terra, sono note per essere associate all'attività biologica. Tra queste, l'ossigeno molecolare (prodotto dagli organismi fotosintetici), l'ozono (prodotto dall'interazione tra la radiazione stellare ultravioletta e l'ossigeno molecolare), il metano (che sulla Terra è immesso nell'at-

mosfera soprattutto dagli organismi viventi). In particolare, la presenza simultanea di coppie di ossido-riduzione, come, appunto, l'ossigeno e il metano, sarebbe una forte indicazione della presenza di squilibri chimici, possibilmente indotti dall'attività biologica.

Un'altra linea di indagine volta a trovare segni di attività biologica sugli esopianeti riguarda la possibilità di studiare la luce riflessa dalla loro superficie. È noto che alcuni pigmenti associati all'attività fotosintetica hanno specifiche caratteristiche di riflessione, che potrebbero essere utilizzate per riconoscere a distanza la loro presenza. Ad esempio, il fogliame terrestre presenta una netta risalita nella radiazione elettromagnetica riflessa nella banda infrarossa, che viene usata abitualmente per monitorare da satellite lo stato della vegetazione sul nostro pianeta. Si tratta, naturalmente, di osservazioni molto difficili allo stato delle tecnologie attuali, ma che potrebbero essere alla portata di futuri strumenti sia dallo Spazio che a terra.





BIBLIOGRAFIA



ESPLORAZIONE UMANA DELLO SPAZIO

Bibliografia

Lothian A., Pettersen S. 2004. International Space Station – Education Kit. ESA Publications Division.

International Space Exploration Coordination Group. The Global Exploration Roadmap. 2013. (https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/ger_2018_small_mobile.pdf)

International Space Exploration Coordination Group. Benefits Stemming from Space Exploration. 2013. (http://www.asi.it/files/ISECG_Benefit_White_Paper_September_2013_0.pdf).

Slobodian R. 2012. Space Psychology: Psychosocial Challenges of Living in Space - Isolation and Culture. York University. (http://www.academia.edu/2238167/Space_Psychology_Psychosocial_Challenges_of_Living_in_Space_-_Isolation_and_Culture).

Neviani I., Pignocchino Feyles C. 1998. Geografia Generale. Società Editrice Internazionale.

Battifoglia E. 2017. Vita sintetica. Breve storia degli organismi che non esistono in natura. Hoepli.

Narici L. 2008. Heavy ions light flashes and brain functions: recent observations at accelerators and in spaceflight. *New J. Phys.* 10.

Zaconte V., Casolino M., Di Fino L., La Tessa C., Larosa M., Narici L., Picozza P. 2010. High energy radiation fluences in the ISS-USLab: ion discrimination and particle abundances. *Radiat. Meas.* 45.

Narici L., Casolino M., Di Fino L., Larosa M., Picozza P., Zaconte V. 2015. Radiation survey in the International Space Station. *J. Space Weather Space Clim.* 5: A37.

Narici L., Casolino M., Di Fino L., Larosa M., Picozza P., Rizzo A., Zaconte V. 2017. Performances of Kevlar and Polyethylene as radiation shielding on-board the International Space Station in high latitude radiation environment. *Scientific Reports.* 7: 1644.

Sitografia

<https://www.asi.it/it/educational/liss-a-lezione-sulla-iss>

<http://www.nasa.gov/exploration/about/isecg/>

http://www.esa.int/esaKIDSit/SEM14EBE8JG_LifeinSpace_0.html

http://www.esa.int/esaKIDSit/SEMJXRZ14CH_LifeinSpace_0.html

http://www.asi.it/en/activity/solar_system/isecg_benefits_stemming_from_sopace_exploration

http://www.enea.it/it/enea_informa/le-parole-dellenergia/fissione-nucleare/effetti-delle-radiazioni-sulla-salute

<https://www.asi.it/it/attivita/abitare-lo-spazio/abitabilita-nello-spazio/lo-strumento-altea>

http://www.nasa.gov/centers/marshall/pdf/100422main_radiation_shielding_facts.pdf

LA STAZIONE SPAZIALE INTERNAZIONALE

Bibliografia

Lothian A., Pettersen S. 2004. International Space Station – Education Kit. ESA Publications Division.

Vivere sulla Terra, vivere nello spazio. Gli elementi della vita. Cibo per il futuro. 2009. ESA Human Space Flight.

Human Research Program, Annual Report, NASA, 2008.

Reference Guide to the International Space Station, NASA, 2006.

Sitografia

<https://www.asi.it/it/educational/liss-a-lezione-sulla-iss>

http://www.esa.int/Our_Activities/Human_Spaceflight

http://www.esa.int/esaKIDSit/SEMT4T9TVPG_LifeinSpace_0.html
www.spaceflight.nasa.gov/living/index.html

http://www.esa.int/Our_Activities/Human_Spaceflight/Astronauts/Living_in_space

<http://spaceflight.nasa.gov/living/factsheets/water.html>

<http://www.altecspace.it/focus-tematico/che-cose-la-stazione-spaziale-internazionale>

<http://www.repubblica.it/tecnologia/2014/01/24/news/pranzo-spazio-76825397/>

http://www.esa.int/esaKIDSit/SEMP6T9TVPG_LifeinSpace_0.html

http://www.esa.int/esaKIDSit/SEMXV8XJD1E_LifeinSpace_0.html

http://www.asi.it/it/attivita/abitabilita/mplm_e_pmm

http://www.esa.int/esaKIDSit/SEMPET9TVPG_LifeinSpace_0.html

http://www.esa.int/esaKIDSit/SEMKGS66AQH_LifeinSpace_0.html

http://www.esa.int/esaKIDSit/SEMT69XJD1E_LifeinSpace_0.html

http://www.esa.int/esaKIDSit/SEMT5T9TVPG_LifeinSpace_0.html

http://www.esa.int/ita/ESA_in_your_country/Italy/Gli_astronauti_europei_si_addestrano_per_la_Stazione_Spaziale

<https://www.nasa.gov/hrp>

ESPLORAZIONE ROBOTICA DELLO SPAZIO

Sitografia

https://www.ilmessaggero.it/tecnologia/scienza/la_nasa_pronti_a_tornare_sulla_luna_sara_la_base_per_i_viaggi_per_marte-3793300.html

<https://www.asi.it/it/news/a-pechino-la-settimana-italia-cinahttp://>

www.lanuovasardegna.it/tempo-libero/2017/12/12/news/moon-mapping-il-progetto-di-italia-e-cina-1.16232990

<https://www.asi.it/it/news/venus-express-10-anni-fa-il-lift>

<https://www.asi.it/it/news/buon-compleanno-mro>

<https://www.asi.it/it/news/la-danza-dei-mega-cicloni>

http://www.repubblica.it/scienze/2018/05/14/news/c_e_acqua_su_una_luna_di_giove_ora_cercheremo_li_forme_di_vita_-196403441/

<https://www.youtube.com/watch?v=liuqhPSAUyg>

<https://www.youtube.com/watch?v=97BAqQcL4t4> <http://www.asitv.it/media/vod/v/3186>

<http://www.asi.it/it/flash/esplorare/rosetta>

LE PIANTE NELLO SPAZIO

Bibliografia

Albiol J., Godia F., Luis Montesinos J., Pérez J., Vernerey A., Cabello F., Creus N., Morist A., Mengual X. 2000. Biological Life Support System demonstration facility: the MELiSSa pilot plant. SAE Technical Paper 2000-01-2379. SAE Int., Warrendale, PA, USA.

Arena C., De Micco V., Virzo De Santo A. 2012. Bioregenerative Life Support Systems in the Space (BLSS): Effects of radiation on plants. *Annales Kinesiologiae* 3: 87-98.

Arena C., De Micco V., Macaeva E., Quintens R. 2014. Space radiation effects on plant and mammalian cells. *Acta Astronautica* 104: 419-431.

De Micco V., Arena C., Pignalosa D., Durante M. 2011. Effects of sparsely and densely ionizing radiation on plants. *Radiation and Environmental Biophysics* 50: 1-19.

De Micco V., De Pascale S., Paradiso R., Aronne G. 2014. Microgra-

vity effects on different stages of higher plant life cycle and completion of the seed-to-seed cycle. *Plant Biology* 16: 31-38.

Kordyum E.L. 2014. Plant cell gravisensitivity and adaptation to microgravity *Plant Biology* 16: 79-90.

Levine H.G., Georgiana K.T., Norikane J.H. 2003. Fluid behavior under microgravity conditions within plant nutrient delivery systems: Parabolic flight investigations. SAE Technical Paper 2003-01-2483. SAE Int., Warrendale, PA, USA.

Massa G.D., Kim H.H., Wheeler R.M., Mitchell C.A. 2008. Plant productivity in response to LED lighting. *HortScience* 43: 1951-1956.

Moore R., Clark W.D., Kingsley R.S., Vodopich D. 1995. *Botany*, Wm.C. Brown Morita, R., Kusaba, M., Iida, S., Yamaguchi, H., Nishio, T., Nishimura, M. 2009. Molecular characterization of mutations induced by gamma irradiation in rice. *Genes & Genetic Systems* 84: 361-370.

Paradiso R., De Micco V., Buonomo R., Aronne G., Barbieri G., De Pascale S. 2014. Soilless cultivation of soybean for Bioregenerative Life Support Systems (BLSSs): a literature review and the experience of the MELISSA Project - Food characterization Phase I. *Plant Biology* 16: 69-78.

Paradiso R., De Pascale S. 2012. Soia coltivata nello spazio. *Culture Protette*, Rubrica Secondo la SOI, 6: 84-86.

Ruyters G, Braun M. 2014. Plant biology in space: recent accomplishments and recommendations for future research. *Plant Biology* 16: 4-11.

Steinberg S.L., Poritz D. 2005. Measurement of hydraulic characteristics of porous media used to grow plants in microgravity. *Soil Science Society of America Journal* 69: 301-310.

Wheeler R.M., Mackowiak C.L., Stutte G.W., Sager J.C., Yorio N.C., Ruffe L.M., Fortson R.E., Dreschel T.W., Knott W.M., Corey K.A. 1996. NASA's biomass production chamber: a testbed for bioregenerative life support studies. *Advances in Space Research* 18: 215-224.

Wheeler R.M., Carbon balance in biorigenerative life support systems: Effects of systems closure, waste management, and crop harvest index. 2003. *Advance Space Research* 31: 169-175.

Wolff S.A., Coelho L.H., Zabrodina M., Brinckmann E., Kittang A.I. 2013. Plant mineral nutrition, gas exchange and photosynthesis in space: A review. *Advances in Space Research* 51: 465-475.

Yorio N.C., Goins G.D., Kagie H.R.; Wheeler R.M.; Sager J.C. 2001. Improving spinach, radish, and lettuce growth under red light-emitting diodes (LEDs) with blue light supplementation. *HortScience* 36: 380-383.

Zabel P., Bamsey M., Schubert D., Tajmar M. 2016. Review and analysis of over 40 years of space plant growth systems. *Life Sciences in Space Research* 10: 1-16.

ASTROBIOLOGIA

Bibliografia

A. Balbi, "Dove sono tutti quanti?" Rizzoli (2016)

Giovanni F. Bignami- I marziani siamo noi. Un filo rosso dal Big Bang alla vita. Zanichelli (2010)

Ernesto di Mauro, Raffaele Saladino – Dal Big Bang alla cellula madre. L'origine della vita. Il Mulino (2016)

Sitografia

<http://kepler.nasa.gov>

<http://exoplanet.eu>

<https://exoplanets.nasa.gov>