

SERGIO MUGNAI\*

## Programmi di esplorazione spaziale promossi dall'Agenzia Spaziale Europea (ESA)

### I. IL PASSATO DELL'ESPLORAZIONE SPAZIALE

Nel corso della storia l'interesse e lo studio dello spazio extraterrestre da parte umana risale a epoche remote e difficilmente identificabili. Fin dalle prime testimonianze relative a epoche preistoriche l'uomo ha osservato e rappresentato elementi celesti, ma solamente dalla seconda metà del XX secolo, con l'evoluzione delle tecnologie aerospaziali, si è potuto fisicamente allontanare dall'atmosfera terrestre, e con uomini o mezzi automatici iniziare l'esplorazione spaziale. Le motivazioni all'origine dei viaggi spaziali e dell'astronautica sono comunque state le più molteplici, e variabili. Un potente motore allo sviluppo tecnologico necessario a effettuare i primi viaggi spaziali partì dalla ricerca del prestigio internazionale e dalla necessità di supremazia tecnologica da parte di alcuni Stati (USA, URSS), motivi per cui nacque la corsa all'esplorazione dello spazio a partire dagli anni Cinquanta del XX secolo.

Il primo oggetto lanciato in orbita attorno alla Terra è stato lo Sputnik 1 nel 1957 da parte dell'allora Unione Sovietica. Gli strumenti a bordo dello Sputnik 1 rimasero funzionanti per 21 giorni. Alla fine, la navicella bruciò durante la fase di rientro in atmosfera il 3 gennaio 1958 dopo circa 1.400 orbite e 70.000.000 km. Seguirono a esso i primi voli con equipaggi animali. La celebre cagnetta Laika, lanciata nello spazio nel secondo volo orbitale terrestre il 3 novembre 1957, divenne il primo essere vivente a entrare in orbita, o comunque il primo essere vivente superiore, considerando il fatto che lo Sputnik 1 alloggiava sicuramente microorganismi.

\* HSO-USB, ESA-ESTEC, Noordwijk, The Netherlands

Nella storia dell'esplorazione spaziale alcune date rappresentano le pietre miliari di questa avventura e descrivono benissimo il cammino dell'uomo nello Spazio:

– *12 aprile 1961*: il cosmonauta Yuri Gagarin fu il primo essere umano a volare nello spazio esterno alla Terra. Il volo dell'allora maggiore Yuri Gagarin iniziò il 12 aprile 1961, alle ore 9:07 di Mosca, all'interno della navicella Vostok 1 (Oriente 1), del peso di 4,7 tonnellate: Gagarin pronunciò la celebre espressione «*поехали!*» (*pojechali*, “andiamo!”) al decollo per il volo spaziale. Compì un'intera orbita ellittica attorno alla Terra, raggiungendo un'altitudine massima (apogeo) di 302 km e una minima (perigeo) di 175 km, viaggiando a una velocità di 27.400 km/h. Per tale missione Gagarin aveva scelto il soprannome Кедр “Kedr” (“cedro”), usato durante il collegamento via radio. Dopo 88 minuti di volo intorno al nostro pianeta, senza avere il controllo della navicella spaziale ma guidato da un computer controllato dalla base, la capsula frenò la sua corsa accendendo i retrorazzi, in modo da consentire il rientro nell'atmosfera terrestre. Il volo terminò alle 10:20 ora di Mosca. Sul sito [www.firstorbit.org](http://www.firstorbit.org), una collaborazione fra l'ESA e l'equipaggio della ISS, è possibile visionare un film che ritrae ciò che Gagarin vide nel suo viaggio nello spazio. Facendo collimare il percorso orbitante della ISS con quello della navicella Vostok-1, e filmando la stessa visuale della Terra, è stato possibile “ricreare” lo stesso viaggio. A rendere affascinante il filmato è l'aver sovrapposto le immagini con i commenti originali di Gagarin.

– *20 luglio 1969*: nell'ambito del programma Apollo gli astronauti Neil Armstrong e Buzz Aldrin, nel 1969, furono i primi uomini ad atterrare sulla Luna e camminare sulla sua superficie. In seguito, altri dieci uomini compirono lo stesso gesto nel periodo compreso tra il 1969 e il 1972. Sei ore e mezza dopo aver toccato il suolo, alle 2:57 UTC (4:57 italiane), Armstrong discese sulla superficie e fece il suo *grande passo per l'umanità*. Aldrin lo seguì, e i due astronauti trascorsero 2 ore e 31 minuti a fotografare la superficie lunare e a raccogliere campioni di roccia. Dopo più di 21 ore e mezza sulla superficie lunare, si ricongiunsero a Collins sul “Columbia” con 20,87 kg di rocce lunari e rientrarono sulla Terra il 24 luglio.

– *12 aprile 1981*: lo Space Transportation System (abbreviazione: “STS”), comunemente noto come Space Shuttle, è stato un sistema di lancio riutilizzabile e di navette spaziali della NASA, l'ente governativo statunitense responsabile dei programmi spaziali. Lanciato in orbita per la prima volta il 12 aprile 1981, ha portato a termine la sua ultima missione il 21 luglio 2011.

## 2. IL PRESENTE DELL'ESPLORAZIONE SPAZIALE: LA STAZIONE SPAZIALE INTERNAZIONALE (ISS)

La Stazione Spaziale Internazionale (International Space Station o ISS) è una stazione spaziale modulare dedicata alla ricerca scientifica che si trova in orbita terrestre bassa (LEO, Low Earth Orbit), gestita come progetto congiunto da cinque diverse agenzie spaziali: la statunitense NASA, la russa RKA, l'europea ESA, la giapponese JAXA, la canadese CSA. Viene mantenuta a un'orbita compresa tra i 278 km e i 460 km di altitudine e viaggia a una velocità media di 27.743,8 km/h, completando 15,7 orbite al giorno. È abitata ininterrottamente dal 2 novembre 2000; l'equipaggio, da allora, è stato sostituito più volte, variando da due a sei astronauti o cosmonauti.

Costruita a partire dal 1998, è stata completata nel 2012; dovrebbe restare in funzione almeno fino al 2020 ma più probabilmente la sua vita sarà estesa al 2028. Il suo obiettivo, come è stato definito da ESA, è quello di sviluppare e testare tecnologie per l'esplorazione spaziale, sviluppare tecnologie in grado di mantenere in vita un equipaggio in missioni oltre l'orbita terrestre e acquisire esperienze operative per voli spaziali di lunga durata, nonché servire come un laboratorio di ricerca in un ambiente di microgravità, in cui gli equipaggi conducono esperimenti di biologia, chimica, medicina, fisiologia e fisica e compiono osservazioni astronomiche e meteorologiche.

La struttura della ISS, con i suoi oltre cento metri di intelaiatura, copre un'area maggiore di qualsiasi altra stazione spaziale precedente, tanto da renderla visibile dalla Terra a occhio nudo. Le sezioni di cui è composta sono gestite da centri di controllo missione a terra, resi operativi dalle agenzie spaziali che partecipano al progetto.

La stazione viene servita periodicamente da navicelle *Soyuz*, navette *Progress*, *Space X Dragon* e dall'*ATV* (Automated Transfer Vehicle) dell'ESA, ed è stata visitata da astronauti e cosmonauti provenienti da più di 15 paesi diversi.

## 3. IL PROGRAMMA ELIPS NELLE SCIENZE DELLA VITA E NELLA BIOLOGIA VEGETALE

L'attività di ricerca promossa dall'ESA sulla ISS è essenzialmente guidata dal Programma Europeo per le Scienze della Vita e per la Fisica (ELIPS). ELIPS assicura che l'investimento dell'Europa nello sviluppo e nella utilizzazione dell'ISS produca i migliori risultati scientifici possibili. Per raggiungere questo scopo, ELIPS promuove la cooperazione globale dei ricercatori, una *peer*

*review* internazionale delle proposte presentate, e il coordinamento europeo dello sviluppo dei payload e dell'utilizzo delle risorse. ELIPS copre una vasta gamma di discipline scientifiche, dalla fisica, alla chimica, biologia, fisiologia, psicologia. ELIPS è attualmente finanziato da 15 stati membri dell'ESA (Austria, Belgio, Danimarca, Francia, Germania, Grecia, Irlanda, Italia, Norvegia, Paesi Bassi, Regno Unito, Repubblica Ceca, Romania, Svezia, Svizzera) insieme al Canada come membro esterno cooperante. L'unicità di questo programma è che il suo orientamento è basato sugli input derivanti dalle comunità scientifiche e industriali che lo rendono di altissima qualità. Il programma non si limita esclusivamente all'utilizzo della ISS, ma prevede anche l'uso delle altre *facilities* ESA a terra per la ricerca in microgravità quali voli parabolici, drop tower e sounding rocket. In termini di argomenti di ricerca, il programma ELIPS è organizzato in *research cornerstones*. Nel campo di scienze della vita, in particolare nell'ambito della biologia, questi argomenti si focalizzano sull'effetto della gravità nei processi fisiologici e metabolici fondamentali delle cellule animali e vegetali. Da questa ricerca i risultati mirano a capire in maniera migliore l'adattamento cellulare a un ambiente ostile che può in seguito venire utilizzato a fini medici e biotecnologici, come ad esempio lo studio del sistema immunitario, l'osteoporosi o la produzione di cibo.

In particolare, la ricerca in biologia vegetale copre diverse aree, dalla biologia dello sviluppo, alla biologia molecolare. La ricerca nella biologia vegetale in ambiente spaziale viene portata avanti ormai da decenni. Una delle aree principali è lo studio del meccanismo di risposta gravitropica, grazie al quale le piante percepiscono la gravità, e come questo meccanismo viene alterato in sua assenza. Questo fattore viene considerato di assoluta importanza per le future missioni spaziali esplorative dove un altissimo grado di autosufficienza rispetto alla produzione e alla disponibilità di cibo viene richiesta agli equipaggi. Per questa ragione, non è soltanto vantaggioso determinare il meccanismo di percezione, ma anche determinare quali specie (o cultivar della stessa specie) hanno maggiori capacità di adattamento a tale ambiente, caratterizzato sia da totale assenza di gravità che da gravità minore, come sulla Luna o su Marte. Oltre all'impatto che questa ricerca può avere sul futuro delle missioni spaziali, è importante sottolineare come l'incremento di conoscenza nell'ambito dei processi vegetali di crescita e come questi vengono alterati da condizioni ambientali differenti possa avere un impatto positivo sui processi produttivi terrestri.

Molti fisiologi vegetali hanno condotto esperimenti per valutare la percezione della gravità nelle piante rispetto alla minima accelerazione che conduce a una risposta misurabile, la minima durata di gravità costante per stimolare

una risposta e la minima durata di stimoli gravitazionali ripetuti. L'esperimento Gravi-2, condotto sulla ISS nel 2007 (Driss-Ecole et al., 2008), aveva lo scopo di studiare il limite minimo di gravità necessario per la risposta gravitropica di semenzali di *Lens culinaria*. Nella prima parte dell'esperimento i semenzali erano stati fatti germinare e crescere in assenza di gravità per 15 ore. Successivamente i semenzali venivano centrifugati per quasi 14 ore a livelli di gravità fra 0.003g e 0.01g. Nella seconda parte dell'esperimento i semenzali venivano lasciati crescere per 21.5 ore in assenza di gravità, seguiti da 9 ore di gravità indotta dalla centrifuga a livelli compresi fra 0.012g e 0.2 g (il controllo a 0g era ovviamente sempre in assenza di gravità). L'analisi dell'immagine (venivano scattate foto ai semenzali a intervallo predefinito e costante) ha mostrato come le radici embrionali curvavano in direzione opposta ai cotiledoni per poi raddrizzarsi dopo 17-30 ore dall'idratazione. Grazie a questo raddrizzamento l'apice radicale era orientato all'angolo ottimale di curvatura (120-135°) durante il periodo di centrifugazione. Un punto interessante era che le radici cresciute in assenza di gravità erano più sensibili rispetto a quelle cresciute in 1g. Il limite di gravità percepito da questi semenzali è stato calcolato come compreso fra 0g e 0.002g, per la precisione  $1.4 \times 10^{-5}$  grazie all'uso del modello iperbolico. Nella primavera 2013 volerà l'esperimento successivo, Gravi-2, che analizzerà la distribuzione del calcio nelle cellule (il calcio è un messaggero secondario molto attivo) e le proteine *target* del calcio nell'apice radicale.

Un altro esperimento di biologia vegetale condotto sulla ISS nel 2007, denominato Multigen-1, aveva lo scopo di investigare l'influenza della gravità sui processi di circumnutazione (Mugnai et al., 2007) dello stelo di *Arabidopsis thaliana* (Johnsson et al., 2009; Solheim et al., 2009). In condizioni di assenza di gravità la maggior parte dei movimenti dello stelo erano di tipo randomizzato, ma veniva comunque mantenuto un certo grado di ritmicità, sebbene di misura inferiore (5-10 volte) quello riscontrabile in 1g. Una volta che veniva introdotto il fattore gravità (0.8g mediante centrifuga) il periodo di circumnutazione arrivava a raggiungere 60', fino a 85' nel periodo di buio. L'analisi dell'immagine 3D indicava che questi movimenti avevano direzionalità diverse. Dopo che la centrifuga veniva fermata, nessun movimento circumnutazionale veniva riscontrato. Questi risultati integrano osservazioni recenti e confermano come l'esistenza di movimenti circumnutazionali in assenza di gravità avvengano comunque, nonostante abbiano un minor numero di cicli e minor ampiezza. L'importanza della gravità nell'amplificare questi movimenti oscillatori è stata quindi dimostrata.

In generale, la ricerca in biologia vegetale sulla ISS ha fatto e sta facendo

uso di numerose *facilities* sperimentali sulla ISS, dal Kubik all'EMCS (European Modular Cultivation System). La maggior parte degli esperimenti vengono condotti sulla specie modello *Arabidopsis thaliana*, data la esatta e completa conoscenza del suo genoma, la sua adattabilità e l'enorme numero di genotipi e mutanti esistenti. Insieme a Multigen-1, descritto in precedenza, altri interessanti esperimenti condotti in passato su *A. thaliana* su ISS sono stati ROOT, che mirava a studiare le modificazioni che avvenivano nella proliferazione cellulare (Matía et al., 2007), e ARABIDOPS-ISS (Vukich et al., 2012), condotto dal prof. Mancuso dell'Università di Firenze, con lo scopo di investigare l'up- e down- regulation del genoma di *A. thaliana* in assenza di gravità.

#### 4. IL FUTURO DELL'ESPLORAZIONE SPAZIALE

La strategia futura di esplorazione spaziale umana comincia con la Stazione Spaziale Internazionale (ISS) come il primo importante passo verso l'atterraggio su Marte e la successiva espansione umana nello spazio. Altre missioni esplorative sono state pianificate, quali quelle miranti a un ritorno sulla Luna e quelle per la colonizzazione di asteroidi, entrambe fondamentali per poter pianificare le future missioni marziane. Ingegneri e scienziati di tutto il mondo stanno lavorando sulle attività preparatorie essenziali per estendere la presenza umana nello spazio ed esplorare il pianeta Marte. Grazie allo sviluppo di un percorso condiviso, le agenzie spaziali (ESA, NASA, CSA, JAXA e Roscosmos) tentano di coordinare i loro investimenti per massimizzare i risultati e arrivare agli obiettivi previsti con quella che viene denominata "Global Exploration Roadmap". Molteplici attività sono attualmente in corso o pianificate nelle seguenti aree, ognuna della quali presenta opportunità di coordinamento e cooperazione globale:

- *Uso della ISS per l'esplorazione spaziale*: la recente decisione dei partner di estendere la vita della ISS fino ad almeno il 2020 assicura il fatto che la ISS possa venire effettivamente ed efficacemente utilizzata per l'esplorazione, sia dalle agenzie partner che da nuovi partner;

- *Missioni robotiche*: le missioni robotiche sono sempre servite come precursori alle missioni umane di esplorazione spaziale. Le missioni robotiche sono essenziali per mantenere la sicurezza e il successo delle missioni umane, oltre ad assicurare il massimo ritorno possibile degli investimenti richiesti per la successiva esplorazione spaziale umana. Esempi di missioni robotiche promosse da ESA per il futuro prossimo sono la

SCOPO	OBIETTIVO
La ricerca della vita	Trovare evidenze di vita passata e/o presente
Estendere la presenza umana	Esplorare il potenziale di altre destinazioni all'interno del nostro sistema solare in grado di sostenere la vita
	Esplorare nuove destinazioni
	Incrementare le opportunità per gli astronauti
	Incrementare l'auto-sostenibilità dell'Uomo nello spazio
Sviluppare le tecnologie adeguate	Testare contromisure e tecniche per mantenere elevata la salute e la performance degli equipaggi
	Mitigare l'effetto delle radiazioni
	Dimostrare e testare l'efficienza di tecnologie in grado di produrre e immagazzinare energia
	Sviluppare tecnologie di <i>life support system</i> efficienti e durature
	Sviluppare e validare strumenti per l'utilizzo di materie prime presenti nello spazio
	Sviluppare tecnologie in grado di supportare gli esperimenti e la ricerca scientifica
Scienza per supportare l'esplorazione	Valutare la salute umana nello spazio
	Caratterizzare la geologia, la topografia e le condizioni ambientali delle destinazioni
	Caratterizzare le risorse disponibili a destinazione

Tab. 1

sonda Exomars (studierà l'ambiente marziano soprattutto dal punto di vista dell'astrobiologia) e BepiColombo, un doppio satellite per l'esplorazione di Mercurio;

– *Sviluppo tecnologico avanzato*: l'esplorazione umana oltre LEO richiederà una nuova generazione di capacità e di sistemi che incorporino tecnologie ancora non scoperte.

Gli obiettivi comuni della Global Exploration Roadmap sono invece descritti nella tabella 1.

## RIASSUNTO

L'esplorazione umana e robotica della Luna, degli asteroidi e di Marte rafforzerà e arricchirà il futuro dell'Umanità, unendo i diversi Paesi per una causa comune, rivelando nuove conoscenze e stimolando l'innovazione tecnica e commerciale. A partire dallo storico volo di Yuri Gagarin il 12 aprile 1961, i primi 50 anni del volo spaziale umano hanno creato una forte partnership che ha condotto a importanti scoperte e innovazioni, ed è stata fonte di ispirazione per tutta l'Umanità. ESA ha sempre svolto un ruolo di primo piano in questa avventura, sia per quanto riguarda l'esplorazione umana che per l'applicazione terrestre di tutte le innovazioni tecnologiche. Dopo un breve riassunto sulla passata esperienza nei voli spaziali umani, questo capitolo si

concentrerà sullo stato attuale della ricerca scientifica promossa da ESA nell'ambito della biologia vegetale e sullo sviluppo dei futuri programmi di esplorazione dello spazio.

#### ABSTRACT

Human and robotic exploration of the Moon, asteroids, and Mars will strengthen and enrich humanity's future, bringing nations together in a common cause, revealing new knowledge, and stimulating technical and commercial innovation. Building on the historic flight of Yuri Gagarin on April 12, 1961, the first 50 years of human spaceflight have resulted in strong partnerships that have brought discoveries, innovations, and inspiration to all mankind. ESA always played a leading role in this adventure, both for human exploration and the terrestrial application of all the technological innovation. After a brief resume of the past experience in human spaceflights, this chapter will focus on the present status of ESA scientific research in plant biology and the development of future programmes for space exploration.

#### RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- DRISS-ECOLE D., LEGUÉ V., CARNÉRO-DIAZ E., PERBAL G. (2008): *Gravisensitivity and automorphogenesis of lentil seedling roots grown on board the International Space Station*, «Physiologia Plantarum», 134, pp. 191-201.
- JOHNSON A., SOLHEIM B.G.B., IVERSEN T.-H. (2009): *Gravity amplifies and microgravity decreases circumnutations in Arabidopsis thaliana stems: results from a space experiment*, «New Phytologist», 182, pp. 621-629.
- MATÍ A., GONZÁLEZ-CAMACHO, MARCO R., KISS, J.Z., GASSET G., VAN LOON J., MEDINA F.J. (2007): *The "ROOT" experiment of the "Cervantes" spanish Soyuz mission: Cell proliferation and nucleolar activity alterations in Arabidopsis roots germinated in real or simulated microgravity*, «Microgravity Science and Technology», 19, pp. 128-132.
- MUGNAI S., AZZARELLO E., MASI E., PANDOLFI C., MANCUSO S. (2007): *Nutation in plants*, in *Rhythms in Plants* (Mancuso S. and Shabala S., Eds.), Springer, Berlin, pp. 77-90.
- SOLHEIM B.G.B., JOHNSON A., IVERSEN T.-H. (2009): *Ultradian rhythms in Arabidopsis thaliana leaves in microgravity*, «New Phytologist», 183, pp. 1043-1052.
- VUKICH M., GANGA P.G., CAVALIERI D., RIZZETTO L., RIVERO D., POLLASTRI S., MUGNAI S., MANCUSO S., PASTORELLI S., LAMBREVA M., ANTONACCI A., MARGONELLI A., BERTALAN I., JOHANNINGMEIER U., GIARDI M.T., REA G., PUGLIESE M.G., QUARTO M., ROCA V., ZANINI A., BORLA O., REBECCHI L., ALTIERO T., GUIDETTI R., CESARI M., MARCHIORO T., BERTOLANI R., PACE E., DE SIO A., CASAROSA M., TOZZETTI L., BRANCIAMORE S., GALLORI E., SCARIGELLA M., BRUZZI M., BUCCIOLINI M., TALAMONTI C., DONATI A., ZOLESI V. (2012): *BIOKIS: A Model Payload for Multidisciplinary Experiments in Microgravity*, «Microgravity Science and Technology», 24, pp. 397-409.