

**Tutto quello che avreste voluto
sapere sul cielo
(ma non avete mai osato chiedere)**



**Aspetti poco noti di Astronomia,
Astrofisica e Astronautica**

Autori vari - A cura di Franco Bagnoli e Giovanna Pacini

apice libri

Indice

Introduzione.....	5
Gli autori	7
Le associazioni e gli enti.....	13
La strana coppia che ha portato lo spazio in TV.....	17
Fragole, pompieri e GPS.....	25
L’astronomia nella Biblioteca Apostolica Vaticana	33
Astrolinguistica: breve introduzione alla scienza di parlare con gli alieni	49
All’anagrafe: buco nero. Storia di un buco che ha più volte cambiato nome	61
La realtà dei fumetti: gli esopianeti.....	73
Uno starnuto stellare.....	85
Entrare in orbita lunare è più facile a farsi che a dirsi.....	93
Teoria e pratica della difesa planetaria: la missione di deflessione asteroidale DART/LICIACube.....	101
Tanto tempo fa... In una galassia nana, non troppo lontana!	117
Il ciclo del carbonio e il clima di Venere, Terra e Marte	129
«ASTROSpigolature».....	147
Note e collegamenti.....	182



Disegno di Martina Rossi

Introduzione

Questo è un libro collettivo, nato in seno all'associazione Caffè-Scienza APS, ma che poi si è esteso ad altre associazioni ed enti, e che ha visto la partecipazione di molti autori, sia di testi che di disegni (Martina Rossi).

Il tema, come avrete già capito, è quello di trattare argomenti, spigolature, aspetti poco noti legati allo spazio, ovvero temi di astronomia, astrofisica e astronautica.

Siamo rimasti piacevolmente stupiti dall'entusiasmo e dalla professionalità mostrata dai vari autori, per cui siamo sicuri che la lettura sarà stimolante.

Il copyright dei vari articoli è dei rispettivi autori, quindi se l'argomento vi interessa e volete ampliarlo, contattateli (eventualmente scrivendo a info@caffescienza.it).

Non dimenticate di dare un'occhiata alle attività delle varie associazioni ed enti, elencate nella sezione apposita, sono tutte composte da persone che lavorano con entusiasmo per fornire un servizio alla collettività.

Le note e i link sono stati messi collettivamente in una sezione apposita, così chi legge l'edizione cartacea non deve digitare la url, ma basta che segua il qr code qui accanto (che punta a <http://www.caffescienza.it/aaa>).



Buona lettura.

Franco Bagnoli e Giovanna Pacini



Disegno di Martina Rossi.

Gli autori

Maria Giulia Andretta



Maria Giulia Andretta è PhD in Storia della Scienza e delle Tecniche all'Università di Bologna e dopo la laurea in Astronomia e in Scienze Filosofiche ha integrato il suo percorso con il Master in Comunicazione delle scienze presso l'Università di Padova.

È coautrice di "Stregati dalla Luna" (Carocci, 2019) scritto con Marco Ciardi, con prefazione di Piero Angela e autrice di "Dalla Terra a Marte" (Carocci, 2022). La sua tesi di dottorato sulla conquista della Luna è stata premiata dall'*International Astronomical Union* per la sezione *Education, Outreach and Heritage*. Si interessa dei rapporti tra scienza, cinema e mass media e della storia della scienza.

Ha al suo attivo diverse pubblicazioni nazionali e internazionali ed è stata docente a contratto di Divulgazione e giornalismo scientifico presso il corso di Didattica e comunicazione delle Scienze naturali dell'Alma Mater. Inse-

gna Filosofia e Storia al liceo scientifico ed è consulente di Genus Bononiae e della Fondazione Golinelli.

Franco Bagnoli



Franco è un fisico teorico della materia e lavora nel Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Firenze. È stato direttore del Centro Interdipartimentale per lo Studio di Dinamiche Complesse (CSDC, Università di Firenze), ed è stato il coordinatore nazionale o locale di vari progetti europei, nazionali e dell'INFN.

Studia la fisica dei sistemi complessi con applicazioni alle scienze cognitive, biologia evuzionistica, dinamica delle popolazioni e delle opinioni. Si occupa anche di didattica della fisica, divulgazione e partecipazione.

È presidente dell'Associazione Caffè-Scienza di Firenze, co-autore dei libri della collana caffè-scienza (Apice Libri) e co-conduttore della trasmissione RadioMoka su NovaRadio.

Stefano Ciabattini



Stefano Ciabattini è assegnista di ricerca presso il Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Firenze.

Le sue aree di interesse e di ricerca riguardano molti settori dell'Astrofisica, dalla Cosmologia alla Fisica delle Galassie, dalla Fisica Stellare alla formazione di pianeti, nonché l'abitabilità dal punto di vista astrofisico. Ha conseguito la Laurea Magistrale in Scienze Fisiche e Astrofisiche con la sua Tesi "Le Prime Galassie Abitabili" presso l'Università di Firenze, dove a breve inizierà il Corso di Dottorato in Fisica e Astronomia.

Alessio Coppola



Studente del corso di laurea magistrale in Scienze fisiche e astrofisiche dell'Università degli studi di Firenze. Ha conseguito la laurea triennale in Fisica e Astrofisica presso la stessa università.

È interessato alla divulgazione scientifica, collabora con il Planetario della Fondazione Scienza e Tecnica, dove ha svolto un tirocinio curriculare e dove attualmente si occupa di attività divulgative di astronomia con scuole e pubblico generico. Collabora inoltre con l'Associazione Caffè-Scienza APS e con OpenLab-Centro di Servizi per l'educazione e la divulgazione scientifica,¹ partecipando con quest'ultimo ad eventi divulgativi come la Notte europea delle Ricercatrici e dei Ricercatori.

Alessio Focardi



Laureato in Fisica e Astrofisica presso l'Università degli studi di Firenze divide il suo tempo fra l'insegnamento liceale in fisica e matematica, il tutoring universitario e la divulgazione e comunicazione della scienza sui social e dal vivo.

Alessio collabora attivamente con molte associazioni che si occupano di comunicazione della scienza fra cui:

Associazione Astrofili Fiorentini, Minerva Divulgazione, OpenLab - Centro di Servizi per l'educazione e la divulgazione scientifica, Caffè - Scienza APS. Sui social fa parte del team di Cronache dal Silenzio ed è moderatore della pagina Facebook ad esso associata: Spazio Astronomia.

Recentemente ha creato la sua pagina dal nome "Spazi di Fock" in cui tratta temi riguardanti l'astrofisica, la fisica e la matematica, anche attraverso aneddoti e storie.

Giuliano Giuffrida



Giuliano Giuffrida lavora per il Coordinamento dei Servizi Informatici della Biblioteca Apostolica Vaticana, è coinvolto nella gestione dei database di catalogazione dei manoscritti e nel progetto di digitalizzazione dei manoscritti antichi della Biblioteca.

In particolare, Giuliano è coinvolto nella gestione dell'archivio a lungo termine basato sul FITS, studia nuove metodologie di preservazione del dato digitale e collabora ad attività di ricerca sul digitale, dalla codicologia quantitativa all'applicazione di tecniche di intelligenza artificiale sui manoscritti digitalizzati, si interessa anche di Storia dell'Astronomia.

Giuliano ha una laurea in Fisica e un Dottorato di ricerca in Astronomia, entrambi conseguiti presso l'Università di Roma Tor Vergata. Ha lavorato presso l'Osservatorio Astronomico di Roma, l'*European Southern Observatory*, l'Agenzia Spaziale Italiana e collaborato con l'Agenzia Spaziale Europea, prima di arrivare in Biblioteca Apostolica Vaticana nel 2016.

Lorenzo De Piccoli



Lorenzo De Piccoli è un neolaureato in Storia della Scienza presso l'Università degli Studi di Firenze.

I suoi interessi di ricerca riguardano principalmente la storia e l'epistemologia delle scienze spaziali, con particolare riferimento all'astrobiologia, al SETI, e ai precursori di questi ultimi. La sua tesi di laurea magistrale, intitolata *Silentium Universi. Storia del SETI e del Paradosso di Fermi*, è stata premiata con il Premio di Laurea SISFA 2023 della Società Italiana degli Storici della Fisica e dell'Astronomia.

Aldo Piombino



Laureato in Scienze Geologiche, si interessa di vari ambiti delle Scienze della Terra. Ha collaborato con l'*International Institute of Humankind Studies* diretto dal prof. Brunetto Chiarelli e con l'autorità di Bacino distrettuale dell'Appennino Centrale.

Collabora con il gruppo di Geologia applicata dell'Università di Firenze diretto dal prof. Nicola Casagli per il quale si occupa di monitoraggi satellitari e di divulgazione sulle problematiche dell'assetto del territorio. Studia anche i rapporti tra fenomeni geologici, cambiamenti climatici ed evoluzione della vita lungo la storia della Terra.

Appassionato di divulgazione scientifica, nel 2007 crea "*Scienzeedintorni*", un blog di divulgazione scientifica, in cui tratta argomenti che vanno dalle Scienze della Terra a biologia, ambiente, energia, antropologia e storia della Scienza e collabora attivamente alle attività dell'associazione Caffè-scienza APS. Ha anche scritto un saggio sulle cause geologiche degli eventi di estinzione di massa.

Alessandro Rossi



Alessandro Rossi si occupa di dinamica del volo spaziale, meccanica celeste e scienze planetarie presso l'Istituto di Fisica Applicata (IFAC) del Consiglio Nazionale delle Ricerche di Sesto Fiorentino. È membro dello science team delle missioni DART/LICIACube e Hera.

Autore di oltre 100 articoli su riviste internazionali con revisione, nel 2016 ha ricevuto il Premio Edoardo Kramer della Fondazione Edoardo Kramer; e dell'Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere per i suoi studi sulla dinamica dei detriti spaziali in orbita terrestre. L'asteroide 1990 RV2 è stato nominato (5185) Alerossi in riconoscimento del suo contributo allo studio degli asteroidi e dei detriti spaziali.

Martina Rossi



Martina ha appena conseguito il titolo di Dottorato di ricerca in Astronomia presso l'Università di Firenze e attualmente lavora come assegnista di ricerca presso l'università degli studi di Bologna. Il suo campo di ricerca è prevalentemente la cosmologia e l'evoluzione chimica dell'universo con un particolare focus sulle prime stelle. Collabora con il gruppo NEFERTITI e fa parte di 4MOST-4DWARFS, un progetto di studio di galassie nane. Nel tempo libero si diletta nel disegno digitale creando illustrazioni, disegni e loghi.

Martina è autrice dei disegni nel libro.

Stefania Salvadori



Stefania Salvadori è Professore Asso-

ciato presso il Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Firenze dove è rientrata nel 2017 con una borsa Rita Levi Montalcini. Dal 2019 è coordinatrice del progetto europeo NEFERTITI (ERC starting) con il quale ha potuto creare il proprio gruppo di ricerca per studiare le prime stelle e le prime galassie attraverso l'archeologia stellare.

Domitilla Tapinassi



Laureata in fisica ed astrofisica presso l'Università degli studi di Firenze, si interessa di diversi ambiti divulgativi dell'astrofisica.

Dopo la laurea ha affrontato un percorso di divulgazione scientifica che l'ha portata al Planetario della Fondazione Scienza e Tecnica, dove occupa il ruolo di planetarista con attività di divulgazione per scuole e famiglie. Collabora inoltre con l'associazione Caffè-Scienza APS con la quale ha partecipato ad eventi come ad esempio "La fisica dei supereroi".

Gianmarco Vespia

Gianmarco vive in Slovacchia e al momento fa il Project Manager.

Nel 1997 ha vinto le Olimpiadi Nazionali di Fisica, successivamente ha studiato matematica alla Scuola Normale Superiore, dove ha conseguito laurea e dottorato, e infine ha lasciato il settore scientifico per quello IT.

Fa attivamente divulgazione scientifica, è stato autore di molte voci scientifiche di Wikipedia in italiano, collabora con l'Italian Space and Astronautics Association, ed è stato speaker al Master in Comunicazione della SISSA.

Le associazioni e gli enti

Associazione Caffè-Scienza APS



L'associazione Caffè-Scienza APS², che opera su Firenze e Prato, è formata da volontari e si occupa di organizzare dibattiti partecipati (ovvero, in cui è dato molto spazio alle domande del pubblico) su temi che spaziano dalla scienza alla tecnologia, dalla psicologia alla storia, dalla medicina all'alimentazione (ovvero su quasi tutto) a patto che il taglio sia scientifico.

Organizza anche cine-scienza ed una trasmissione radio (Radio Moka) su Nova Radio.

Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università di Firenze



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

DIPARTIMENTO
DI FISICA E
ASTRONOMIA

Le attività del Dipartimento di Fisica e Astronomia³ dell'Università di Firenze spaziano dalla fisica teorica a tutti i settori più attuali della fisica sperimentale e applicata. In particolare, il dipartimento ospita un gruppo di astrofisici le cui ricerche, svolte in

stretta collaborazione con l'Osservatorio di Arcetri e l'INAF (Istituto Nazionale di Astrofisica), spaziano dalla fisica solare, alla fisica dei plasmi, agli esopianeti, alle galassie ed alla cosmologia, senza dimenticare l'importante ruolo guida che volgono in missioni dell'ESA (Agenzia Spaziale Europea) o in grandi progetti dell'ESO (European Southern Observatory).

Italian Space and Astronautics Association, ISAA APS



L'Italian Space and Astronautics Association, ISAA APS,⁴ è un'associazione culturale senza fini di lucro fondata nel 2008 che ha come scopo la divulgazione delle scienze spaziali e astronautiche in lingua italiana. Queste attività vengono portate avanti attraverso numerose iniziative, on-line e sul territorio.

Le iniziative principali online sono il forum di discussione,⁵ il blog collettivo di notizie,⁶ e il podcast.⁷

Con cadenza biennale organizza la convention AstronautiCon, un evento con centinaia di partecipanti che dà spazio sia a soci e simpatizzanti, sia a

una serie di ospiti speciali come astronauti ESA e NASA ed esperti del settore.

Le attività di ISAA APS sono portate avanti grazie al lavoro dei suoi soci volontari, e l'associazione si sostiene unicamente grazie alle quote del tesseramento e alle donazioni. ISAA APS non ha sponsor e non monetizza in alcun modo i contenuti dei suoi siti.

L'associazione ha ricevuto numerosi premi e menzioni da personaggi autorevoli per la sua attività divulgativa. Nel 2011 AstronautiCast ha vinto l'*European Podcast Award* nella categoria "Best non profit Podcast in Italy".

Biblioteca Apostolica Vaticana



La Biblioteca Apostolica Vaticana⁸ è la raccolta libraria dei Papi, fondata da

Niccolò V (1447-1455) e da lui installata nel Palazzo Apostolico, poi trasferita nel Cortile del Belvedere ai tempi di Sisto V (1585-1590).

Conserva un patrimonio in continuo arricchimento, attualmente composto da circa 80.000 manoscritti, oltre a 1.600.000 libri a stampa, più di 100.000 unità grafiche e altrettante monete e medaglie.

Al suo interno sono anche un Laboratorio di Restauro specializzato in tutti i tipi di manufatti e di materiali presenti in collezione, e un Laboratorio Fotografico, che si occupa sia della digitalizzazione e riproduzione fotografica, ma anche di analisi multispettrali; dall'Istituzione dipende anche la Scuola Vaticana di Biblioteconomia, che organizza corsi biennali di formazione per bibliotecari.

Due sono gli scopi primari della Vaticana, ossia la conservazione del patrimonio e la sua divulgazione presso la comunità degli studiosi, alla quale essa è aperta tutto l'anno senza nessun tipo di restrizione ideologica o religiosa, essendo l'unico criterio di ammissione quello della idoneità scientifica del richiedente.

Fondazione Scienza e Tecnica di Firenze



La Fondazione Scienza e Tecnica,⁹ con il suo Museo, promuove e diffonde la cultura scientifica e tecnologica, a partire dal recupero e dalla valorizzazione del suo patrimonio storico scientifico ottocentesco appartenuto all'Istituto Tecnico di Firenze.

Scopo della Fondazione è far conoscere e rendere fruibile una dotazione di altissimo valore, rimasta finora quasi sconosciuta, che si è conservata per oltre un secolo nella sua sede originaria: una ricca collezione composta da raccolte naturalistiche, strumenti scientifici, modelli di macchine, prodotti manifatturieri, fondi librari di interesse storico.

Il Museo, oltre alla missione di tutela e valorizzazione incrementata da perio-

diche mostre e percorsi di approfondimento anche on-line, offre visite guidate alle Collezioni, lezioni al Planetario, laboratori didattici e proposte didattiche per le scuole.

Osservatorio Polifunzionale del Chianti



L'Osservatorio Polifunzionale del Chianti (OPC)¹⁰ è una struttura pubblica, aperta e accessibile a carattere scientifico multifunzionale, dedicata a ricerca, didattica e divulgazione.

Realizzato dai Comuni di Tavarnelle Val di Pesa e Barberino Val d'Elsa con un investimento iniziale di € 450.000, è gestito dall'Università di Firenze. Localizzato nei pressi di San Donato in Poggio è situato all'interno del Parco Botanico del Chianti, uno dei rari esempi di ambiente autoctono del Chianti, tutelato e gestito dall'OPC.



Disegno di Martina Rossi.

La strana coppia che ha portato lo spazio in TV

Maria Giulia Andretta

Agli inizi degli anni Cinquanta due personaggi apparentemente distantissimi per formazione, interessi e storie personali iniziano a collaborare negli *Studios*, animati da una comune passione per l'esplorazione dello Spazio: Wernher von Braun ed Walter Elias Disney.

Von Braun è un ingegnere tedesco, famoso per il suo ruolo chiave nella progettazione e nello sviluppo dei razzi V2 che il Terzo Reich aveva lanciato contro le coste britanniche nell'estate del 1944. Al termine della Seconda Guerra Mondiale si arrende alle truppe statunitensi e, insieme a molti suoi colleghi, viene portato negli Stati Uniti e inserito nel programma *Paperclip*, un'operazione segreta per reclutare scienziati tedeschi di rilievo da utilizzare nel programma militare e poi spaziale americano.

A dieci anni dalla fine della guerra, l'ingegnere tedesco aveva già riabilitato la sua immagine e gli era chiara la possibilità che gli veniva fornita di coronare il suo avveniristico sogno di portare l'uomo sulla Luna. Per diffondere le sue idee e arrivare a un pubblico più ampio, aveva iniziato una collaborazione con la rivista *Collier*, molto diffusa a livello nazionale, dove sosteneva le sue tesi sulla esplorazione dello Spazio.

Questi articoli, che gli avevano dato la prima vera e propria opportunità per parlare dei piani di conquista americani, erano inoltre arricchiti da illustrazioni di artisti rinomati che lavorano fianco a fianco con gli scienziati.

In questo modo, tutti gli inserti risultavano realistici e mostravano tecnologie avanzate e pionieristiche che si spingevano oltre le visioni fantascientifiche, con un taglio divulgativo che rendeva i contenuti, normalmente adatti solo ad esperti, accessibili a tutti. I lettori non faticano ad appassionarsi alla visione del futuro di von Braun e il giornale raggiunge una tiratura di circa quattro milioni di copie. L'ex nemico diventa una risorsa sotto molti punti di vista.



Figura 1: Wernher von Braun con vari modelli di razzi.

Su un altro fronte, Walter Elias Disney, avrà un ruolo significativo nella crescita dell'industria dell'intrattenimento grazie al suo amore per il disegno e alla sua passione per l'arte e l'animazione.

Dopo un breve periodo a Hollywood, dove studia per diventare regista cinematografico, nel 1923 fonda, insieme a suo fratello Roy Disney, i Disney Brothers Studios, nota oggi come *The Walt Disney Company*. Il papà di Topolino, presentato al pubblico nel 1928 nel famoso cortometraggio *Steamboat Willie*, cavalca l'onda del successo delle sue produzioni e, da grande imprenditore, si lancia nella realizzazione di parchi tematici tanto che nel 1955 inaugura Disneyland, in California.

In ogni parco riserverà sempre una delle aree a *Tomorrowland*, una sezione creata con l'idea di guardare al passato non con un senso di nostalgia, ma come premessa per una vera e propria esaltazione del futuro e delle possibilità del progresso.

La passione di Walt Disney per l'esplorazione dello Spazio e la tecnologia è nota, ed è stata un elemento importante nella creazione dell'immagi-

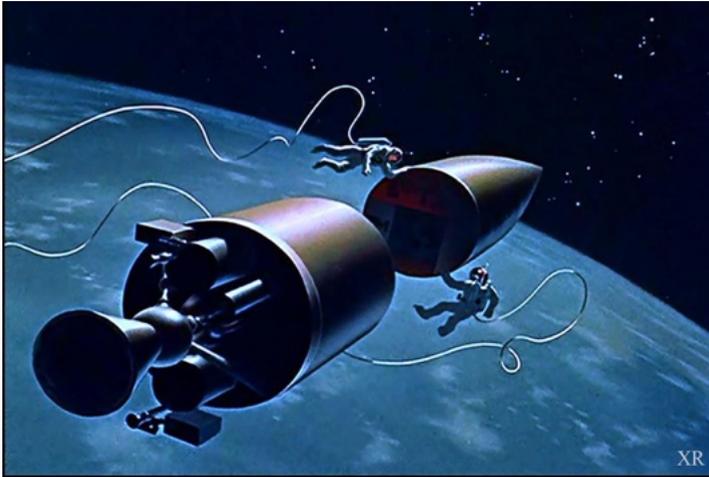


Figura 2: *Men in Space: Astronauti e navi spaziali secondo von Braun e Disney.*

nario della Disney che contribuirà a stimolare l'interesse e l'entusiasmo del pubblico verso la scienza e l'avventura dell'uomo nello Spazio. La sua innata curiosità per l'innovazione si riflette nel suo lavoro e nelle produzioni cinematografiche e televisive. Disney mantiene stretti legami con l'industria aerospaziale e, durante la Space race saranno moltissime le visite alle rampe di lancio tanto che, per il suo supporto, riceverà encomi e riconoscimenti dai pionieri dell'esplorazione spaziale e dagli ingegneri della NASA.

Tra le collaborazioni più significative e strategiche del reparto aeronautico statunitense, quella con Walt Disney è sicuramente una delle più importanti. Già nel 1948, uno degli episodi del decimo classico dei *Walt Disney Animation Studios*, *Melody Time*, raccontava la storia del viaggio sulla Luna della cowgirl Sue. Tuttavia, l'interesse della Disney per lo Spazio, troverà terreno fertile un decennio successivo, grazie al sodalizio con Wernher von Braun.

In quegli anni c'erano circa 15 milioni di televisori negli Stati Uniti ed è chiaro che questo cambiamento nella comunicazione avrebbe potuto influire positivamente sulla percezione della corsa allo Spazio. Walt Disney aveva già utilizzato i film come strumento di propaganda per intrattene-

re e informare gli americani, e sia lui che Von Braun sfruttano appieno il potenziale dei nuovi media per diffondere le loro idee legate alla nuova frontiera.

A quel tempo, Disney stava lavorando alla serie televisiva Disneyland, in seguito rinominata *Walt Disney's Wonderful World of Color*, e von Braun si unirà a lui come consulente tecnico dei programmi legati allo Spazio, che attireranno l'attenzione del produttore principale, Ward Kimbal.

Il primo programma televisivo, *Man in Space*, andato in onda su ABC il 9 marzo 1955, mirava a combinare gli strumenti del produttore con le intuizioni degli scienziati, per dare un quadro accurato del piano finale della grande avventura dell'uomo nello Spazio. Lo spettacolo sarà ribattezzato *Reality Science* e combinerà un nuovo approccio scientifico con tecniche di animazione a marchio Disney.

Parte dello show era dedicata alla spiegazione dei principi scientifici di base, utilizzando un busto animato di Isaac Newton, ma le spiegazioni tecniche si sono rapidamente trasformate in animazioni comiche e sono stati mostrati anche filmati dietro le quinte che mostrano gli scienziati elaborare i dettagli di produzione con gli artisti e i produttori.

Von Braun diventa, in breve tempo, una star dello schermo e mentre racconta che un razzo passeggeri a quattro stadi potrebbe essere costruito e testato in 10 anni, viene affiancato da sequenze animate che illustrano le sue idee futuristiche. L'ingegnere si assicura che i tecnici Disney costruiscano modelli accurati dei veicoli spaziali, garantendo grandi effetti speciali per il pubblico da un lato, ma anche modelli utili e coerenti per gli ingegneri.



Figura 3: Walt Disney e Wernher von Braun.

Il secondo episodio della serie *Man and Moon*, andato in onda il 28 dicembre dello stesso anno, prevedeva un realistico e credibile viaggio verso il satellite organizzato in due fasi: la prima prevedeva la costruzione di una stazione spaziale a forma di ruota, che fungesse da scalo e potesse ospitare a bordo 50 persone; la seconda, invece, comprendeva il volo della stazione orbitante verso la Luna. Questa stazione orbitante, che passerà in parte inosservata nel documentario della Disney, sarà consacrata alla fama nel 1968 da alcune delle sequenze più famose di *2001: A Space Odyssey* di Stanley Kubrick.

Per questo film, infatti, il regista si avvale della consulenza tecnica di Harry Lange, collaboratore di von Braun presso la sezione Progetti Futuri della NASA. Nel documentario della Disney, gli attori sono invitati a interpretare l'equipaggio che lascia la stazione spaziale e la suspense si intensifica quando un meteorite colpisce la nave e gli astronauti sono costretti a eseguire numerose riparazioni di emergenza. L'episodio finale, *Mars and Beyond*, che conclude la trilogia nel 1957, sottolinea che il Pianeta Rosso è una meta intermedia necessaria tra la Luna e lo Spazio e insiste sul fatto che esso sia l'unico candidato per ospitare forme di vita e diventare una nuova casa per l'umanità in un lontano futuro.

Gli ascolti della serie della Disney si aggirarono intorno a circa 42 milioni di spettatori ed anche i critici televisivi più severi dell'epoca risposero positivamente agli spettacoli, riconoscendo che parte del successo era dovuto principalmente ai contributi tecnici. Questi consentirono la creazione di immagini credibili che andavano oltre la semplice immaginazione e di ottenere fondi con una ricaduta anche sulle priorità dei programmi spaziali. Questo lavoro persuasivo avrà infatti un impatto anche sul presidente Eisenhower, il quale, proprio in questo periodo, annuncerà che gli Stati Uniti si sarebbero impegnati a inviare un satellite nello Spazio entro la fine dell'Anno geofisico internazionale fissata per il dicembre del 1958. Il successo dei programmi della coppia W&W, l'ingegnere e l'artista, sono una pietra miliare nella divulgazione scientifica, nella nuova alleanza tra scienza tecnologia e comunicazione.

Un anno dopo il terzo episodio, il 29 luglio 1958, viene fondata la NASA, che diventa responsabile del programma spaziale civile e del volo spaziale umano e robotico, ereditando gran parte del lavoro svolto dall'esercito statunitense e dalla NACA, l'agenzia che aveva supervisionato la ricerca aerospaziale prima della sua istituzione. La NASA nasce come risultato diretto dello spirito di competizione per l'esplorazione spaziale

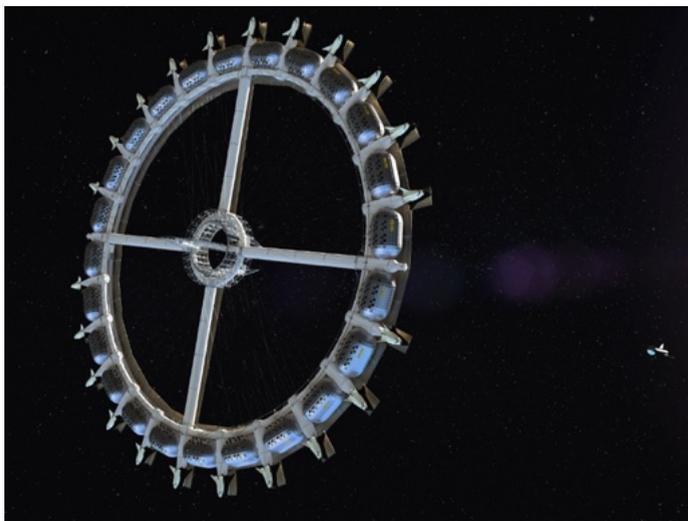


Figura 4: La base spaziale progettata da von Braun.

scaturito dal lancio dello Sputnik 1, il primo satellite artificiale da parte dell'Unione Sovietica e inizierà da subito a lavorare ad un piano comunicativo che potesse coinvolgere appassionati e non solo.

Quello stesso anno, il Time aveva già dedicato una copertina a Wernher von Braun, definendolo *Missileman*, ed era chiaro che, dopo i primi insuccessi, sarebbe iniziata una nuova fase della corsa allo Spazio, che avrebbe visto gli Stati Uniti sempre più coinvolti e il pubblico sempre più interessato e partecipe. Tra il 1959 e il 1960 la televisione americana, dopo il successo dei documentari spaziali della Disney, produce una serie di film di fantascienza intitolata *Men in Space*, in cui l'Aeronautica degli Stati Uniti è impegnata nell'organizzazione di spedizioni di astronauti sulla Luna e su Marte, illustrando anche la vita degli equipaggi nello Spazio.

Per tutti gli anni Sessanta le energie, gli interessi, le curiosità saranno concentrate sui programmi Mercury, Gemini e Apollo e con il 20 luglio del 1969 si raggiunge il picco di quel fenomeno che sarà definito dalla stampa una "febbre lunare", una vera e propria *Moonmania*.

Tuttavia, bisogna notare che con la fine dell'esplorazione umana della Luna, nel 1972, il Pianeta Rosso è già diventato il nuovo obiettivo ed è talmente importante, contemporaneo, economicamente vincente che perfino a Disneyland, in California, nel 1975, l'attrazione Flight to the Moon diventa Mission to Mars, in quanto, avendo l'uomo ormai raggiunto il satellite, l'attrazione era considerata superata.

Il nuovo spettacolo viene progettato in collaborazione con la NASA per restituire ai visitatori la suggestione di essere lanciati su un veicolo spaziale per poi avvicinarsi alla superficie del pianeta. Nel 1993 l'attrazione viene poi sostituita con *Alien Encounter*, mentre, nel 2003, è stata inaugurata a Orlando, in sostituzione della precedente Horizons, l'attrazione Mission: Space, nell'area *Future World*, alla presenza dei vertici della NASA e di alcuni pionieri dei programmi Mercury, Gemini e Apollo.

L'attrazione simula l'addestramento degli astronauti per la prima missione con equipaggio su Marte a bordo dell'immaginario X-2 Deep Space Shuttle nel 2036 subito dopo il 75° anniversario del primo volo di Jurij Gagarin, il primo essere umano ad aver raggiunto lo Spazio. Da notare che l'anno 2036 può essere dedotto dalle targhe nella coda dell'attrazione che celebrano il volo spaziale umano. Non ci resta che aspettare di scoprire che cosa ci riserverà il futuro, nei prossimi 12 anni.

La divulgazione scientifica di oggi deve molto a questo filone e a queste sinergie che hanno permesso di accrescere l'alfabetizzazione scientifica, incoraggiare il pensiero critico e contribuire a informare e formare il pubblico su tematiche, fino ad allora ritenute d'élite, di tecnologi e scienziati.

Riferimenti bibliografici

M.G. Andretta, *Dalla Terra a Marte. L'affascinante avventura del Pianeta rosso*, Roma, Carocci, 2022.

M.G. Andretta, M. Ciardi, *Stregati dalla Luna. Il sogno del volo spaziale da Jules Verne all'Apollo 11*, Roma, Carocci, 2019.

W. Biddle, *Dark Side of the Moon: Wernher von Braun, the Third Reich, and the Space Race*, New York-London, Norton, 2009.

M. Ciardi, *Le metamorfosi di Atlantide. Storie scientifiche e immaginarie da Platone a Walt Disney*, Roma, Carocci, 2011.

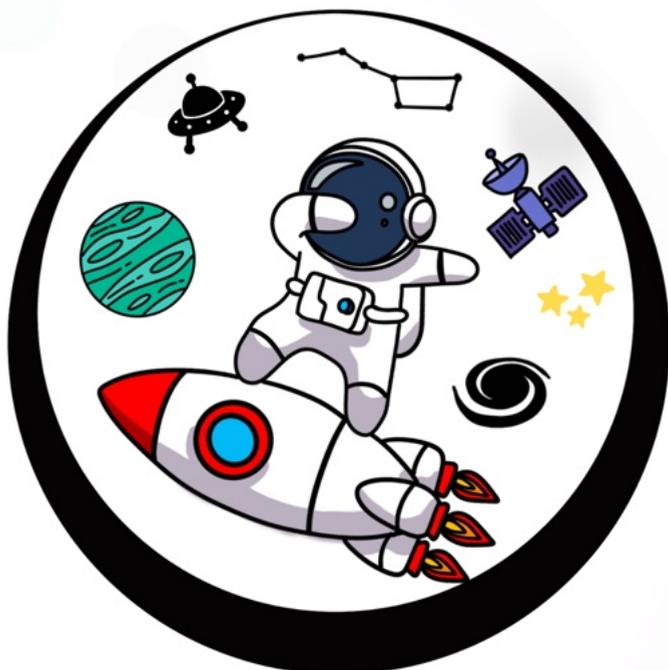
R. Chiavini, G.F. Pizzo, M. Tetro, *Il grande cinema di fantascienza: aspettando il monolito nero (1902-1967) - Volume 2 di Il grande cinema di fantascienza*, Gremese, Collana gli Album, 2003.

M. Merzagola, *Scienza da vedere: l'immaginario scientifico sul grande e sul piccolo schermo*, Milano, Sironi Editori, 2006.

L. Romersa, *Von Braun racconta*, Milano, Ugo Mursia Editore, 2011.

M. Sanfilippo, *Il Medioevo secondo Walt Disney. Come l'America ha reinventato l'Età di Mezzo*, Roma, Castelvechchi, 2003.

S. Zavoli, *Von Braun, l'uomo della Luna*, Milano, Longanesi, 1969.



Disegno di Martina Rossi

Fragole, pompieri e GPS

Alessio Coppola

Domenica mattina. Neil ha dimenticato le fragole per la torta di sua figlia Daisy, che oggi compie dieci anni. Neil si precipita in auto e cerca con il GPS il supermercato aperto più vicino. Lo trova, accende il motore, parte. Tra gli scaffali ecco le fragole, rosse e fresche. Le mette nel carrello, paga alla cassa con la carta di credito e torna in auto. Accende il motore e corre verso casa. La festa sta per iniziare. Ad un tratto un bagliore dietro di lui. Un camion dei pompieri ha acceso la sirena e vuole superarlo. Neil accosta e li fa passare. Mancano cinque minuti alla festa. Arriva a casa, mette le fragole sulla torta e la porta in salotto. La festa di Daisy è appena iniziata.

Neil sarà forse felice di aver trovato le fragole per sua figlia, ma lungo la strada non ha fatto caso a qualcosa. Anzi, a più di una cosa. Forse anche tu che stai leggendo non hai notato le invenzioni spaziali che Neil ha incontrato.

Tecnologie spaziali. Oggetti che abbiamo sotto gli occhi ogni giorno e che forse, come Neil, diamo per scontati, senza sapere che sono nati per risolvere questioni legate allo spazio e agli astronauti. Molte di queste invenzioni sono state sviluppate dalla NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), l'agenzia governativa civile responsabile del programma spaziale e della ricerca aerospaziale degli Stati Uniti d'America.

A partire dal 1976 la NASA pubblica ogni anno un catalogo¹¹ in cui vengono presentati i 50 brevetti tecnologici che hanno avuto le maggiori ricadute nella società negli ultimi 12 mesi. Dalla medicina ai trasporti, dall'ambiente alla sicurezza pubblica. Fino a oggi sono state pubblicate più di 2000 invenzioni.

Torniamo ora alle fragole di Neil e cerchiamo le invenzioni spaziali nascoste tra le righe della storia.

GPS (Global Positioning System)

Per trovare il supermercato aperto più vicino, Neil ha usato il GPS. Questa tecnologia, che usiamo per capire quali strade percorrere, è nata nell'ambito spaziale.

Il Global Positioning System (GPS) è un sistema di radionavigazione spaziale che può individuare una posizione sulla Terra con precisione a livello del metro. Il ricevitore GPS sulla Terra riceve il segnale da almeno 3-4 satelliti, che sono sincronizzati tra loro tramite orologi atomici. In base alla posizione dei satelliti e al tempo impiegato dai segnali per arrivare al ricevitore, si calcola la posizione sulla Terra.

La storia del GPS parte dalla Guerra Fredda. Nel 1957 l'Unione Sovietica lanciò lo Sputnik I, il primo satellite artificiale a orbitare attorno alla Terra. Durante il volo, lo Sputnik I emetteva un segnale radio. Due fisici statunitensi, William Guier e George Weiffenbach, dell'Applied Physics Laboratory (APL) della Johns Hopkins University, monitorano le trasmissioni del satellite.

Durante le osservazioni si accorsero che la frequenza dei segnali aumentava man mano che il satellite si avvicinava e diminuiva quando il satellite si allontanava. Questo fenomeno si chiama Effetto Doppler. A partire da questo, gli scienziati usarono i segnali radio per tracciare la posizione e il movimento di Sputnik I da terra.

In seguito, nacque la domanda: se la posizione di un satellite può essere determinata da terra tramite lo spostamento di frequenza del suo segnale radio, si può fare il contrario? Si può individuare la posizione di un punto sulla Terra, data quella del satellite? Da qui nacque l'idea del GPS.

Nel 1958, l'*Advanced Research Projects Agency* (ARPA) utilizzò questo principio per sviluppare Transit, il primo sistema di navigazione satellitare globale al mondo. Il primo satellite fu lanciato nel 1960 e forniva informazioni a utenti militari e commerciali, compresi i sottomarini missilistici della Marina.

Il programma fu trasferito alla Marina a metà degli anni '60 e nel 1968 una costellazione di 36 satelliti era pienamente operativa. La tecnologia di Transit fornì una precisione di decine di metri e fu nota per "aver migliorato l'accuratezza delle mappe delle aree terrestri della Terra di quasi due ordini di grandezza".

Nel 1967, la Marina degli Stati Uniti sviluppò il satellite Timation, che dimostrò la fattibilità di collocare orologi precisi nello spazio, una tecnologia necessaria per il GPS.



Figura 1: Scrubber per la rimozione di etilene.¹²

All'inizio degli anni '70, il Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti, per garantire la disponibilità di un sistema di navigazione satellitare per la difesa, progettò Navstar, dotato inizialmente di 24 satelliti.

Nel 1983 il volo 007 della *Korean Air Lines*, con a bordo 269 persone, fu abbattuto da un aereo sovietico, dopo essersi addentrato, a causa di errori di navigazione, in uno spazio aereo proibito. Dopo questo evento il presidente degli USA Ronald Reagan emise una direttiva per rendere il GPS disponibile per l'aviazione civile.

Con il tempo la tecnologia GPS si diffuse sempre più nella vita quotidiana. Nel 1999 la società Benefon rilasciò Benefon Esc!, il primo telefono dotato di GPS che avrebbe aperto la strada a molti altri. In seguito, questa tecnologia iniziò a comparire anche nelle automobili.

Fragole fresche

Al supermercato Neil ha trovato fragole rosse e fresche. Come fanno le fragole a restare fresche così a lungo? Perché le mele sono così lucenti sugli scaffali?

Senza la NASA le fragole marcirebbero prima e le banane diventerebbero nere in breve tempo. Per la conservazione dei cibi, infatti, si usa una tec-

nologia sviluppata in origine per gli astronauti, per evitare che frutta e verdura marcissero velocemente nello spazio.

La maturazione di un alimento dipende da una sostanza chiamata etilene. L'etilene (C_2H_4) è un gas naturale, inodore e incolore emesso dalle piante che accelera la maturazione dei frutti e l'invecchiamento dei fiori, favorendone la decomposizione. Questo gas fa diventare le banane da verdi a gialle, i pomodori da verdi a rossi.

In ambienti di crescita chiusi, come su un veicolo spaziale o in una serra terrestre, l'etilene si accumula rapidamente e le piante maturano troppo velocemente.

Consideriamo per esempio un avocado acerbo e una banana, chiusi in una busta di carta per 24 ore. Rispetto all'avocado, la banana produce più etilene. Questo resta intrappolato nella busta e fa maturare velocemente l'avocado acerbo. La navicella spaziale è come la busta di carta. Qualunque prodotto al suo interno matura velocemente a causa dell'etilene. La NASA cercava un metodo per eliminare questo gas, per evitare che frutta e verdura marcissero in tempi brevi. Negli anni '90 gli scienziati del *Marshall Space Flight Center* svilupparono un dispositivo di riduzione dell'etilene chiamato scrubber (Figura 1). Questo strumento aspirava l'etilene attraverso tubi rivestiti da sottili strati di biossido di titanio (TiO_2) esposti a luce ultravioletta, che convertiva l'etilene in acqua (H_2O) e anidride carbonica (CO_2).

Lo scrubber fu lanciato per la prima volta a bordo della missione STS-73 dello Space Shuttle Columbia nel 1995, dove fu usato con successo per preservare un raccolto di piante di patate.

Oggi questo sistema è usato nei supermercati e anche in ambito sanitario, per depurare l'aria di ambulatori medici, sale operatorie e aree di attesa, dove possono accumularsi germi e batteri.

Pompieri

Mentre tornava a casa, Neil ha fatto passare un camion dei pompieri con la sirena accesa. Anche i vigili del fuoco sono legati alla NASA.

Nel 1967, durante un addestramento della missione Apollo 1, tre astronauti persero la vita in un incendio. Dopo questo evento, la NASA cominciò a progettare nuove tute e maschere per gli astronauti, realizzate con materiale non infiammabile.

Alla fine degli anni '50, all'Università dell'Illinois il chimico Carl Marvel sintetizzò per la prima volta un polimero (una lunga molecola che si ripete) chiamato Polibenzimidazolo (PBI). Questo nuovo materiale si dimostrò subito particolarmente resistente e stabile ad altissime temperature.

Inizialmente fu usato per realizzare paracaduti ignifughi per l'atterraggio dei jet da combattimento. In seguito, all'inizio degli anni '60, la NASA e l'*Air Force Materials Laboratory*, un laboratorio di ricerca dell'aeronautica statunitense, usarono il PBI nell'ambito aerospaziale. Dopo l'incidente dell'Apollo 1, la *Celanese Corporation* di New York, azienda specializzata nella produzione di materiali avanzati, fu incaricata di sviluppare un tessuto in fibre di PBI per le nuove tute spaziali. Il risultato fu notevole: un tessuto resistente non solo a temperature estreme (fino a 500 °C) ma anche all'abrasione e ad agenti chimici e biologici.

Negli anni '70 e '80 il PBI fu usato per tutti gli astronauti nei programmi Apollo, Skylab e Shuttle (Figura 2). Queste nuove tecnologie trovarono una nuova applicazione dal 1971 in risposta a un'esigenza espressa dai vigili del fuoco statunitensi.

Il PBI fu usato come materiale non infiammabile per le divise dei pompieri, che prima indossavano giacche di cotone canvas, uno strato interno di gomma e stivali di gomma.



Figura 2: Replica della tuta spaziale Apollo, realizzata in PBI, esposta alla Chemical Heritage Foundation.¹³

Un'altra innovazione riguardò le bombole di ossigeno (Figura 3). Il sistema di respirazione tradizionale era pesante e ingombrante e causava quindi un affaticamento estremo.

Molti vigili del fuoco preferivano non utilizzare l'attrezzatura, scegliendo di correre il rischio di essere sopraffatti dal fumo piuttosto che rischiare il collasso per il caldo e l'esaurimento. Di conseguenza le lesioni da inalazione di fumo erano in aumento.

In collaborazione con la *Fire Technology Division* del *National Bureau of Standards*, la NASA istituì un progetto tecnologico, sotto la direzione del *Johnson Space Center (JSC)*, per sviluppare nuovi respiratori ispirandosi ai sistemi usati dagli astronauti dell'*Apollo* sulla Luna.

Due società, la *Martin Marietta Corporation* e la *Structural Composites Industries Inc.* proposero di costruire bombole di ossigeno più leggere, usando la tecnologia originariamente sviluppata per gli involucri dei motori a razzo.

Fu realizzata una bombola di ossigeno dal peso di 9 Kg e dalla durata di 45 minuti, mentre quella precedente pesava circa 13 Kg e durava 30 minuti. Il serbatoio posteriore era rivestito in alluminio avvolto da fibre di vetro impregnate di resina, che eliminavano la corrosione e alleggerivano il peso del carico.

Fu rinnovato anche il sistema di fissaggio delle bombole. Prima queste si fissavano sulle spalle, mentre le nuove spostavano il carico sui fianchi, migliorando il comfort di chi le indossava. Inoltre, la nuova maschera facciale si adattava meglio al viso e garantiva maggiore visibilità.

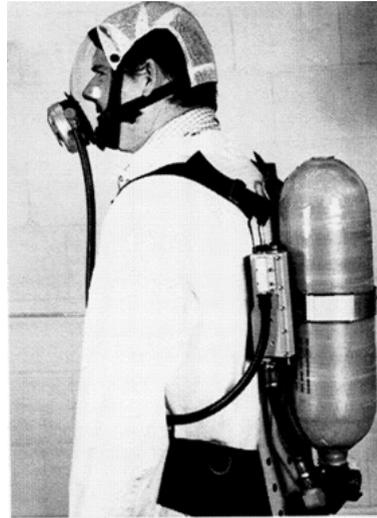


Figura 3: Sistema di respirazione. Design originale di JSC, che servì come punto di partenza per nuove attrezzature antincendio.¹⁴

GPS, fragole fresche e pompieri. Ma le invenzioni della NASA non si fermano qui. Nella nostra storia sono nascoste altre tecnologie.

Neil paga alla cassa con la carta di credito. La NASA sviluppò un sistema di controllo del credito usando le tecnologie del programma Apollo. E come fa Neil a essere sicuro che le fragole siano buone? Grazie all'HACCP (Hazard Analysis and Critical Control Point), un sistema di controllo della produzione di alimenti, usato oggi nelle industrie, che nasce perché la NASA voleva mandare nello spazio cibo sicuro per gli astronauti.

Tante invenzioni. Dalla medicina ai trasporti, dall'ambiente alla sicurezza pubblica.

Vale la pena allora investire miliardi di dollari nelle missioni spaziali e nella ricerca in fisica e astrofisica? Qualcosa inventato oggi per lo spazio servirà domani per qualcos'altro?

Chissà cosa risponderebbe Neil... Chissà come avrebbe trovato le fragole per Daisy senza le invenzioni della NASA.

Referenze

Dalla NASA alla vita quotidiana - MEDIA INAF.¹⁵

Un mondo senza la NASA episodi 1-2 – Rai Scuola

Global Positioning System – Wikipedia.¹⁶

What is GPS? | NASA.¹⁷

Global Positioning System History | NASA.¹⁸

Brief History of GPS | The Aerospace Corporation. ¹⁹

Fresh Veggies From Space | NASA Spinoff.²⁰

Preserving Fresh Fruit | NASA Spinoff.²¹

Air Purifiers Eliminate Pathogens, Preserve Food | NASA Spinoff.²²

Le cose che ci ha lasciato il programma Apollo - Il Post.²³

Space Technology for the Fire Department - NASA Technical Reports Server (NTRS).²⁴

Fireman's Air Tanks - NASA Technical Reports Server (NTRS).²⁵



Disegno di Martina Rossi

L'astronomia nella Biblioteca Apostolica Vaticana

Giuliano Giuffrida

Fondata a metà del XV secolo, ma erede diretta di Biblioteche papali precedenti, la Biblioteca Apostolica Vaticana – da qui in avanti semplicemente Biblioteca – è indubbiamente una di quelle più antiche e conosciute al mondo.

Formalmente è la Biblioteca del Papa, ma è frequentata quotidianamente da studiosi di tutto il mondo, e preserva innumerevoli tesori: libri stampati (più di 1 milione), incunaboli (9000 circa), manoscritti antichi (più di 80000), lettere e archivi, monete e medaglie.

Poco noto però è quanta astronomia ci sia in Biblioteca, e non mi riferisco solo ai numerosissimi libri, stampati o manoscritti, a carattere astronomico, autentici pezzi fondamentali di storia dell'astronomia.

L'astronomia è presente prima di tutto nel cuore del progetto di digitalizzazione, con l'uso del formato FITS, ma moltissime sono anche le tecniche ideate o utilizzate dagli astronomi che possono essere applicate al patrimonio digitale della Biblioteca.

Di seguito presenterò innanzitutto il progetto di digitalizzazione del patrimonio librario della Biblioteca, mostrando le caratteristiche del formato FITS tanto noto agli astronomi e spiegando perché è utile alla Biblioteca. Passerò quindi a parlare della norma UNI 11845:2022, "Processi di gestione della conservazione a lungo termine di immagini digitali con l'uso del formato FITS", della quale sono relatore e che è ora al centro dell'archivio di conservazione a lungo termine digitale della Biblioteca. A seguire descriverò tecniche di analisi immagini utilizzate in Biblioteca, dalla codicologia digitale all'analisi dei palinsesti, e infine parlerò degli studi sulla storia dell'astronomia.

Il progetto di digitalizzazione

Tra i circa 80000 manoscritti antichi custoditi in Biblioteca vi sono pezzi di inestimabile valore storico e culturale; elencare i più pregiati e noti



Figura 1: Vat.gr.1594 31v, Vat.gr.1291 9r. Copyright Biblioteca Apostolica Vaticana.

richiederebbe un volume intero, mi limiterò a citarne quattro tra i più interessanti:

1. Vat.gr.1209, anche noto come Codex Vaticanus B, uno dei più importanti e antichi manoscritti contenenti il testo della Bibbia completo, prodotto nel IV secolo.
2. Vat.lat.3225, anche noto come Virgilio Vaticano, uno dei più antichi manoscritti miniati contenente parte dell'Eneide e delle Georgiche, prodotto probabilmente a Roma nel IV secolo.
3. Vat.gr.1291, una delle copie complete più antiche delle Tavole Manuali di Tolomeo di Alessandria, prodotto probabilmente a Costantinopoli nel IX secolo.
4. Vat.gr.1594, una copia completa dell'Almagesto di Tolomeo di Alessandria, prodotto probabilmente a Costantinopoli nel IX secolo.

Nelle figure 1 e 2 sono visibili quattro immagini tratte dal portale “DVL” della Biblioteca,²⁶ invito il lettore a raggiungere il nostro portale per perdersi tra le meraviglie custodite nei 26000 volumi già digitalizzati.



Figura 2: Vat.gr.1209 8, Vat.lat.3225 18v. Copyright Biblioteca Apostolica Vaticana.

Gli ultimi due manoscritti precedentemente citati (Vat.gr.1291 e Vat. gr. 1594) sono forse i manoscritti a carattere astronomico più famosi tra quelli custoditi in Biblioteca.

Consultare dal vivo i manoscritti della Biblioteca è possibile, ma complesso: va richiesto l'accesso in Biblioteca, presentando opportune referenze, ovviamente il prestito è fuori discussione e si può accedere ai manoscritti soltanto all'interno della Biblioteca.

I pezzi più pregiati, come i 4 elencati sopra, sono disponibili soltanto ottenendo un permesso speciale, e i pezzi più fragili possono essere del tutto esclusi dalla consultazione.

Tutte queste precauzioni vengono ovviamente prese per tutelare il bene librario; uno dei principali mandati della Biblioteca è infatti proprio la preservazione dei manoscritti antichi.

La Biblioteca Apostolica Vaticana ha in realtà diversi compiti, riassumibili però in 3 mandati principali:

1. Preservare e arricchire il proprio patrimonio, poiché il bene librario, archivistico e numismatico va conservato al meglio e tramandato alle future generazioni, un compito che la Biblioteca svolge con successo da ormai quasi 600 anni;

2. Studiare e catalogare e il patrimonio per metterlo a disposizione nel modo più efficace possibile;
3. Disseminare, in modo da mettere a disposizione degli studiosi di tutto il mondo il patrimonio della biblioteca.

Purtroppo, spesso la preservazione entra in contrasto con i mandati di studio e disseminazione; in conseguenza di ciò, molti manoscritti sono stati poco studiati nel corso dei secoli.

Anche per risolvere questo problema, e ottemperare dunque al meglio al proprio mandato, nel 2010 la Biblioteca ha lanciato un ambizioso progetto di digitalizzazione del patrimonio di manoscritti e incunaboli per metterli a disposizione degli studiosi via web.

Ad oggi (Agosto 2023) sono stati digitalizzati più di 26000 volumi per un totale di circa 9 milioni di immagini digitali. Uno dei punti di forza del progetto è l'omogeneità del dataset acquisito: il 90% delle immagini è acquisito con scanner METIS,²⁷ che hanno performance molto simili e calibrazione in colore omogenea e vengono utilizzati per produrre file 24 bit (8 bit per canale colore) a 400 dpi di risoluzione. Il percorso è ancora molto lungo, serviranno ancora diverse decine di anni per completare la digitalizzazione di tutti i manoscritti e gli incunaboli, e nel frattempo verranno certamente inserite diverse opere stampate di egual pregio. Tutti i manoscritti e incunaboli già digitalizzati sono disponibili online,²⁸ liberamente consultabili senza necessità di registrazione.

L'archivio occupa al momento circa 600 TB (terabytes); questo "corpus digitale" costituisce a tutti gli effetti una nuova "acquisizione" della Biblioteca, un patrimonio digitale che, al pari di quello fisico, merita di essere studiato, conservato e tramandato. È qui entra in gioco l'astronomia e il formato FITS.

Maggiori dettagli su tutto il processo di digitalizzazione della Biblioteca saranno disponibili nel volume *"The Process for the Digitization of Manuscripts in the Vatican Library"*, ora in fase di revisione e la cui uscita è prevista nel 2024.

LTDP, FITS e UNI 11845:2022

Per molti astronomi e appassionati di astronomia il formato FITS non ha certamente bisogno di presentazioni: ideato tra la fine degli anni '70 e l'inizio degli anni '80 per facilitare lo scambio dati tra astronomi (infatti

FITS sta per *Flexible Image Transport System*), fu progettato per ospitare tabelle di dati e immagini astronomiche. Il formato è aperto e di libero utilizzo, privo di drm o protezioni di qualunque tipo.

Quando l'informatica era ancora piuttosto giovane e in rapidissima evoluzione, si scelse volutamente una struttura semplice: un file FITS "base" è composto di due parti, una prima di header, scritta esclusivamente in codifica ASCII, e una seconda per i dati.²⁹

Il blocco di header contiene essenzialmente le informazioni fondamentali che permettono di comprendere la natura del blocco dati (immagine o tabella e loro caratteristiche) e di fruirne sia chiarendo come accedere al dato che arricchendolo con i metadati necessari al suo pieno sfruttamento. Ciò viene ottenuto utilizzando uno dei più antichi e semplici sistemi di codifica dati: la codifica ASCII.

Ad esempio, analizziamo rapidamente una semplice immagine astronomica monocromatica³⁰ ottenuta nella luce visibile da strumenti come il telescopio spaziale Hubble³¹ o uno dei telescopi ESO.³²

Nel blocco di header troveremo anzitutto i dettagli utili ad aprire l'immagine, quindi il numero dei punti sull'asse x, quello dei punti sull'asse y e quello di bit per ogni valore del dato ossia, nel nostro caso, il numero di bit necessari a rappresentare il valore di ogni pixel.

A seguire avremo il tempo di esposizione, la data e l'airmass dell'atmosfera al momento dell'osservazione, i dettagli della camera utilizzata e così via.

Una struttura del file estremamente semplice, dunque: per visualizzare l'immagine basterà scrivere poche righe di codice, e, anche senza conoscere il formato, sarà sufficiente interpretare le prime righe di codifica ascii per capire rapidamente come fare.

Si può tranquillamente dire che il formato è "self-documented", ossia contiene al suo interno, in un modo facilmente accessibile, tutta la documentazione necessaria ad aprire e fruire il dato.

Inoltre, è semplice, partendo dalle informazioni contenute nell'header, predire quali bit contengono il valore di ogni pixel dell'immagine e puntare direttamente ad essi; questo rende il formato "trasparente". Questi sono esattamente due dei requisiti che deve possedere un file per essere idoneo alla conservazione di dati a lungo termine.³³

Chiunque utilizzi un computer da almeno un paio di decenni capisce chiaramente il problema: il mondo dell'informatica è da sempre in rapidissima evoluzione, un file prodotto 10 anni fa può facilmente presentare qualche problema di incompatibilità con i moderni software, e uno scritto 30 o 40 anni fa può talvolta essere letto soltanto con hardware e software dell'epoca per una piena fruibilità del dato.

Come garantire la piena accessibilità di un archivio informatico per i decenni a venire?

Ci sono essenzialmente due strade: convertire periodicamente il proprio archivio in formati moderni, oppure utilizzarne uno che dia garanzie di leggibilità anche a distanza di decine di anni.

La prima strada richiede ovviamente dei costanti interventi sull'archivio e comporta il rischio di perdere o alterare dati e metadati nei vari processi di conversione.

Per quanto riguarda la seconda strada, la Library Of Congress ha da tempo stabilito i criteri fondamentali che un formato file deve soddisfare per essere idoneo alla conservazione a lungo termine. I 7 criteri sono: *Disclosure, Adoption, Transparency, Self-documentation, External dependencies, Impact of patents e Technical protection mechanism*.

Come il lettore avrà già intuito, il formato FITS li soddisfa tutti: abbiamo già chiarito "*Self-documentation*" e "*Trasparenza*", inoltre il formato dispone di documentazione completa, di tools e driver pronti all'uso (*Disclosure*), è largamente adottato nel mondo astronomico e si sta diffondendo anche in ambito archivistico/bibliotecario (*Adoption*) non ha protezioni di alcun tipo, è di libero uso e non richiede alcun software o hardware proprietario (*Technical protection mechanism, Impact of patents e External dependencies*).

In sintesi, il lettore avrà ormai compreso che il formato FITS, benché nato principalmente per lo scambio dati, si è rivelato un formato formidabile per i fini della conservazione del dato digitale a lungo termine.

Tuttavia, utilizzare il giusto formato non è sufficiente a garantire la piena fruibilità di un archivio digitale; è necessario interrogarsi anche sui requisiti che un archivio digitale deve soddisfare per l'idoneità a lungo termine.

Per rispondere a tale interrogativo, UNI (Ente italiano di normazione) ha radunato un comitato di esperti³⁴ interessati a conservare le immagini digitali a lungo termine. Per essere sicuri di raccogliere le necessità di ambiti diversi, il comitato è composto da persone provenienti da differenti realtà: Biblioteca Apostolica Vaticana,³⁵ Associazione italiana biblioteche, Ministero della cultura, Associazione nazionale archivista italiana, European Space Agency, Istituto nazionale di astrofisica, Università di Roma Tor Vergata, Università della Calabria, Banca d'Italia, Uninfo, Pipl italia srl, Db seret srl, Smartpath srl.

Il lavoro, durato circa due anni, ha portato alla produzione di una nuova norma UNI: UNI 11845:2022 "Processi di gestione della conservazione a lungo termine di immagini digitali con l'uso del formato FITS".³⁶ La norma definisce una serie di requisiti che un archivio di immagini digitali, che utilizzi il formato FITS, deve seguire per l'idoneità alla conservazione a lungo termine.

Nel mio duplice ruolo di rappresentante della Biblioteca Apostolica Vaticana e relatore della norma, mi sono occupato sia di presentare le esigenze della Biblioteca, sia di raccogliere le necessità di tutti per arrivare a stilare, con la collaborazione degli altri membri, un documento che potesse soddisfare i requisiti di professionisti provenienti da mondi anche molto diversi, ma col comune intento di creare un archivio immagini che fosse davvero fruibile nel lungo termine.

L'obiettivo difatti è molto ambizioso: si vuole realizzare un archivio che possa essere utilizzato persino senza alcuna documentazione esterna, senza conoscenza pregressa del dato, e il più possibile indipendente dall'hardware e software utilizzato per generarlo.

Per realizzare tale obiettivo, la norma specifica 7 requisiti generali che ogni archivio deve soddisfare per la conservazione a lungo termine, successivamente convertiti in una serie di requisiti puntuali elencati e descritti nella norma stessa, Riassunti qui di seguito.

1. **Omogeneità:** l'archivio deve contenere file con la stessa struttura interna e con le stesse specifiche. Laddove ciò non fosse possibile, vanno creati dei sotto-archivi omogenei.
2. **Validazione:** vanno implementati due diversi protocolli di validazione; un controllo "in tempo reale" dei file prima della trascrizione nell'ambiente di conservazione a lungo termine, e un controllo

“pianificato” che, almeno una volta l'anno, deve verificare tutti i file contenuti nell'archivio. Lo scopo è di confermare che i file soddisfino i requisiti della norma UNI ed eventuali requisiti del progetto in corso, e di scoprire quanto prima eventuali fenomeni di corruzione o perdita del dato.

3. **Conversione:** i file utilizzati per la conservazione a lungo termine potrebbe non essere idonei ad altri utilizzi (analisi, disseminazione). Va dunque realizzato e mantenuto un convertitore che crei i file necessari all'utente partendo sempre dal master.
4. **Information retrieval:** tutte le informazioni necessarie a una piena fruizione dell'archivio devono essere contenute nell'archivio stesso, e deve essere implementato un metodo efficiente di estrazione di tali informazioni.

Gli ultimi 3 requisiti chiedono infine che l'archivio contenga al suo interno la risposta a 3 domande di fondamentale importanza:

5. **Contenuto semantico**-Che cosa contiene il dato? Una descrizione, anche minima, deve essere presente nell'archivio.
6. **Storia e origine**-Qual è l'origine del dato e la sua storia? Informazioni sulla genesi del file (dispositivo di acquisizione, software, personale coinvolto) e sulla sua storia (eventi di modifica del dato) devono essere documentati nell'archivio.
7. **Modelli strutturali**-Come sono interconnessi i dati? Se i dati archiviati hanno dei collegamenti necessari alla loro piena fruizione, ad esempio pagine digitalizzate che appartengono a uno stesso manoscritto, questi collegamenti devono essere esplicitati nell'archivio.

L'attività di normazione deve molto al mondo dell'astronomia, non solo per l'uso del formato FITS. In commissione erano presenti un dipendente INAF (Giuseppe Di Persio), un astronomo dell'Università di Roma Tor Vergata (Prof. Roberto Buonanno), ed io, che ho portato il mio contributo derivante anche dall'esperienza accumulata lavorando nella missione ESA Gaia e nell'*Asi Science Data Center* (ASDC, successivamente l'acronimo è mutato in SSDC, è un centro dati dell'Agenzia Spaziale Italiana), e dall'interazione con diversi responsabili di archivi ESA (*European Space Agency*), ESO (*European Southern Observatory*) e INAF.

Ulteriori dettagli saranno presto disponibili negli articoli indicati in bibliografia e sono ovviamente disponibili nella norma stessa.

Passiamo ora dalla conservazione all'analisi del patrimonio digitale della Biblioteca, portando due esempi di analisi ora in corso in Biblioteca che beneficiano anche di tecniche provenienti dal mondo dell'astronomia o comunque largamente utilizzate anche in ambito astronomico.

La codicologia quantitativa

La codicologia è una scienza che studia i libri manoscritti nel loro aspetto materiale, andando quindi ad analizzare non il contenuto letterario, ma la struttura stessa del libro (rilegature, cuciture, studio dei materiali utilizzati, struttura della pagina).

Essa tratta essenzialmente un libro come un oggetto archeologico, cercando di tracciarne la genesi e la storia; dunque come e quando è stato prodotto, quante e quali modifiche ha subito nel tempo.

La codicologia quantitativa è una branca della codicologia che mira a studiare quello che in termini moderni definiamo il "layout" della pagina, ossia la disposizione di testo, immagini e decorazioni all'interno delle pagine del libro. Il termine tecnico utilizzato in codicologia è "*mise en page*".

Lo studio della *mise en page* si fa trasformando una pagina in una serie di numeri:

1. Il coefficiente di riempimento, ossia il rapporto tra la superficie dello specchio di scrittura (il più piccolo rettangolo che contiene il testo, o la somma dei più piccoli rettangoli che contengono il testo nel caso di testo a più colonne) e la superficie della pagina.
2. Il coefficiente di sfruttamento, ovvero la densità dei caratteri all'interno del testo
3. Il numero di colonne in cui è diviso il testo.
4. Il numero di righe di testo per colonna.
5. Superficie della pagina.
6. Rapporto altezza su larghezza della pagina e dello specchio di scrittura.
7. Colore della pergamena, colore dell'inchiostro.

8. Distanza tra le linee di testo.
9. Distanza tra le colonne di testo.

A questi possiamo aggiungere due nuovi parametri estratti dalle immagini digitali, ossia:

10. Il rapporto tra il numero di pixel contenenti inchiostro e il numero di pixel totali sull'intera pagina.
11. Il medesimo rapporto ricavato all'interno del solo specchio di scrittura.

A cosa servono tutti questi parametri?

I copisti tardoantichi e medievali seguivano per lo più precise regole di scrittura; la pergamena era un bene prezioso e andava sfruttata al meglio. Un copista che lavorava in un centro di produzione del libro (ad esempio un monastero) veniva istruito sia a sfruttare al meglio il materiale a disposizione, sia a soddisfare le attese dell'utilizzatore finale del libro, andando incontro ai gusti e alle esigenze dei lettori dell'epoca.

Detto in altri termini, il copista non agiva in modo casuale o di propria iniziativa nel disporre testo, miniature e decorazioni, bensì seguiva dettami tipici del luogo e della data di produzione.

La conseguenza di ciò è ovvia: ricavando i sopracitati parametri per ogni pagina e andando a studiare la distribuzione dei parametri in uno spazio n-dimensionale, si possono ottenere importanti indizi sul luogo e tempo di scrittura, e, al contempo, ricostruire ricette di scrittura ormai perdute.

Senza entrare troppo nei dettagli, per ricavare questi parametri il primo, fondamentale passo è riconoscere in quali pixel è presente inchiostro e in quali la sola pergamena, tenendo conto che la pergamena è ben lontana dall'essere un foglio bianco. Essa ha invece molti "difetti": follicoli piliferi, macchie, tracce di restauro, strappi o buchi. Lo stesso inchiostro può avere diversi colori e può sbiadire, diventando difficile da rivelare; dunque, questo primo passo è già molto delicato.

Successivamente i pixel contenenti inchiostro vanno studiati per ottenere i vari parametri.

Come astronomo ho fatto per anni fotometria stellare:³⁷ dovevo discriminare i pixel contenenti il segnale proveniente da oggetti astronomici da quelli che contenevano segnali provenienti dall'atmosfera terrestre,

successivamente dovevo combinare i vari pixel e cercare di capire se quello trovato fosse soltanto rumore, un raggio cosmico, un satellite o un difetto della camera. Dovevo quindi comprendere se il segnale letto fosse quello di una galassia, di un asteroide, o di una stella, e infine trasformavo il tutto in una serie di parametri che descrivono il contenuto delle immagini.

Il lettore ormai avrà capito che i due compiti, quello del codicologo quantitativo che lavora con immagini digitali e quello dell'astronomo che fa fotometria, si somigliano molto; dunque, non sarà sorprendente scoprire che moltissime tecniche di analisi immagini nate in astronomia, o largamente utilizzate in astronomia, si sono rivelate utilissime per le analisi codicologiche. Cito a titolo di esempio le tecniche di estrazione del fondo cielo, quelle di deblending³⁸ e infine tecniche di analisi delle forme. Esempi di studi ancora in corso sono citati nella bibliografia.

L'analisi immagine però non è utile solo in studi di codicologia quantitativa digitale, ma anche in molti altri ambiti. Ne fornirò un esempio nel prossimo paragrafo.

I palinsesti

Per secoli la pergamena è stato il supporto di scrittura più utilizzato; realizzata a partire da pelli di animali (pecore, capre, vitelli) è un materiale resistente, durevole e molto versatile. Tuttavia, il lungo e laborioso processo di lavorazione, e la necessità di disporre di molta pelle, quindi di molti animali, per produrre un solo libro, rendeva la pergamena un supporto molto costoso. Ma le caratteristiche fisiche della pergamena permettono anche di cancellare il testo scritto: tramite trattamenti particolare di lavaggio e raschiatura, l'inchiostro sbiadisce fino a scomparire quasi del tutto, rendendo la pergamena pronta a ospitare nuovi testi. Non stupirà il lettore sapere che tale pratica di "riscrittura" è rimasta molto diffusa per tutto il medioevo; libri ritenuti non più utili venivano smembrati e le pergamene ottenute, che già nel medioevo potevano avere un'età di diversi secoli, venivano dunque riutilizzate. Sono questi i cosiddetti palinsesti.

Fortunatamente le procedure di pulizia della pergamena non rimuovono mai del tutto il testo, ed è possibile recuperarlo con tecniche particolari.

Più di 500 manoscritti della Biblioteca Apostolica Vaticana ospitano dei fogli palinsesti, e probabilmente molti altri attendono di essere scoperti.

Cito due esempi che mi sono particolarmente cari: un nuovo testo delle "Storie" di Polibio su un particolare della terza guerra punica del quale lo storico greco fu testimone diretto, e un manoscritto astronomico greco/arabo che descriverò più avanti.

Il termine tecnico corretto per il testo "cancellato" che si vuole recuperare è "scriptio inferior", mentre il testo che lo ha sostituito è chiamato "scriptio superior".

Esistono addirittura fogli che sono stati lavati e riscritti 2 o 3 volte, quindi con più strati di scriptio inferior presenti.

Ma quali sono queste tecniche particolari che permettono di far riemergere il testo cancellato?

Già in passato si osservò che, illuminando i fogli palinsesti con luce ultravioletta, il testo sottostante risultava molto più visibile, permettendo in alcuni casi un suo recupero completo.

Si capì anche che combinando lampade che illuminano le pagine a diverse lunghezze d'onda, dall'infrarosso all'ultravioletto passando ovviamente per il visibile, e filtrando poi la luce riflessa dal foglio con vari filtri, si potevano ottenere immagini con lo scriptio inferior molto presente o del tutto assente, mentre lo scriptio superior resta sempre per lo più dominante.

Le immagini multispettrali così acquisite sono certamente molto utili per ricostruire lo scriptio inferior, tuttavia lo scriptio superior è sempre di intralcio, e spesso rende difficile la lettura.

Sarebbe utile elaborare un algoritmo che permetta di ridurre al minimo la scrittura superiore, modificando le immagini in modo tale che non contengano la "feature" che è comune a tutte quelle di partenza: la presenza dominante della scriptio superior. Il lettore con competenze di statistica e analisi dati avrà già capito che esiste una tecnica di analisi molto nota che fa esattamente questo: l'analisi a componenti principali (PCA).

Si tratta di una tecnica utilizzata per ridurre il numero delle variabili in gioco in un sistema. Le variabili di partenza vengono proiettate su un nuovo piano cartesiano in modo tale che siano ordinate in ordine decrescente di varianza, ossia di contenuto informativo.



Figura 2: *Vat. sir. 623. pt. 2, ff. 133r+136v | 134r+135v*, a sinistra foto in luce naturale, a destra il risultato ottenuto con analisi PCA. Notare che il manoscritto che conteneva l'attuale scriptio inferior è stato tagliato ottenendo 4 pagine da una pagina iniziale.

Applicando tale tecnica ai pixel delle immagini multispettrali (le variabili, dunque, sono i valori del pixel che rappresenta la stessa porzione di immagine illuminata e filtrata in diverse lunghezze d'onda), se ne ottengono delle nuove che, combinate linearmente, permettono di ottenere nuovamente le immagini di partenza.

“Ordine decrescente di varianza” implica che combinando linearmente soltanto le prime immagini ottenute dall'analisi PCA è possibile ottenere nuovamente tutte le immagini di partenza perdendo poca informazione. Questo è normalmente l'uso che si fa dell'analisi PCA: ridurre il numero di dimensioni in gioco semplificando lo studio delle variazioni delle variabili iniziali.

Tuttavia, quello che interessa ora a noi è un altro effetto: la maggior parte dell'informazione è contenuta nella prima componente principale, e tale informazione è assente, o comunque molto ridotta, nelle componenti secondarie. Qual è l'informazione che domina tutte le immagini multispettrali di un foglio palinsesto? Ovviamente la scrittura superiore, dunque

le componenti secondarie vedranno un contributo assai ridotto della scrittura superiore; combinandole opportunamente, sarà possibile ottenere immagini in cui la scrittura inferiore ora è dominante.

Un esempio di applicazione di tale tecnica è visibile in figura 2: a sinistra le pagine sono illuminate con luce visibile, a destra viene invece mostrato il risultato ottenuto combinando 3 componenti secondarie derivate dall'analisi di 18 immagini multispettrali di partenza.

L'analisi a componenti principali è usata in tutti i campi dell'astronomia ed è nota a moltissimi astronomi; io stesso l'ho utilizzata negli studi fatti per la realizzazione di un modulo software della pipeline della missione Gaia, uno strumento ESA che sta mappando l'intero cielo.

Un'interessante raccolta di articoli dedicata allo studio dei palinsesti è disponibile nel secondo numero di "*Vatican Library Review*", disponibile online.³⁹

Storia dell'astronomia

Lascio per ultimo l'argomento forse più ovvio, ma la cui importanza viene spesso trascurata. Tutti riconoscono l'importanza di ricostruire al meglio la storia di tutte le scienze, e in particolare di quella più antica di tutte, ossia l'astronomia. Comprendere il modo di pensare di astronomi vissuti secoli o millenni fa ci aiuta a capire meglio il contesto storico in cui lavoravano e l'evoluzione del pensiero umano, e in alcuni casi può persino portarci a riconsiderare il modo di fare ricerca moderno. La quantità di manuali di storia dell'astronomia e la sterminata bibliografia scientifica dedicata possono indurci a credere che ormai tutto sia chiaro e compreso. Non è così.

Ci sono numerosi punti oscuri da chiarire; cito a titolo di esempio buona parte dell'astronomia islamica e bizantina, ma anche tanta astronomia ellenistica. La Biblioteca Apostolica Vaticana custodisce un'autentica miniera di testi astronomici, spesso noti a studiosi di manoscritti ma meno a studiosi di storia della scienza e del tutto sconosciuti agli astronomi professionisti e al grande pubblico.

Non sono da sottovalutare anche i palinsesti a carattere astronomico, che possono gettare nuova luce su porzioni di storia dell'astronomia che sono del tutto oscure. Uno studio efficace e completo di manoscritti antichi a tema astronomico è tuttavia una sfida difficile, che richiede la col-

laborazione di figure professionali che parlano linguaggi tecnici anche molto diversi tra loro.

Recentemente (Giugno 2023) ho potuto portare a termine un lavoro⁴⁰ durato circa due anni e realizzato con due colleghi esperti di paleografia araba (Delio Vania Proverbio) e greca (András Németh). Abbiamo studiato fogli palinsesti contenenti l'introduzione al "Piccolo commento alle Tavole manuali di Tolomeo" in arabo, ma con termini in greco, e di parte delle "Tavole Manuali di Tolomeo", scritte in greco ma con un'importante aggiunta in arabo. In figura 2 è mostrata proprio la ricostruzione di uno dei fogli palinsesti di maggiore importanza.

Lo studio ci ha permesso di comprendere che i fogli appartenevano a un unico volume, realizzato, probabilmente a scopi didattici, nella seconda metà del VIII secolo mescolando greco e arabo. Dunque, è stato prodotto proprio quando, come sappiamo da fonti molto più tarde, gli astronomi arabi stavano recuperando la conoscenza astronomica greco/romana per fonderla con quella persiana/indiana. Questo rende il palinsesto che ho avuto la fortuna di poter studiare un testimone diretto di un momento cruciale della storia dell'astronomia.

Conclusioni

Quanta astronomia c'è dunque nella Biblioteca Apostolica Vaticana? Ormai il lettore avrà compreso che ci sono molte risposte. Ci sono formati nati nel mondo dell'astronomia, tecniche di conservazione e analisi del dato ideate o ampiamente utilizzate in ambito astronomico che possono essere molto utili nella conservazione e nello studio del digitale, e che vengono quotidianamente utilizzate.

Infine, c'è molto da studiare nell'ambito della storia dell'astronomia che è sconosciuto al grande pubblico e talvolta anche agli specialisti, la Biblioteca è una vera e propria miniera da scrutare con attenzione e passione. Questo intreccio tra astronomia e studio e conservazione del libro manoscritto non deve stupire, come diceva Cicerone:

Omnes artes, quae ad humanitatem pertinent, habent quoddam commune vinculum, et quasi cognatione quadam inter se continentur

Infatti, tutti gli studi che riguardano la cultura, hanno per così dire un vincolo comune e sono tra loro legate da una certa parentela.

Cicerone, Pro Archia

E forse il legame più profondo tra astronomia e studio dei manoscritti è la bellezza del soggetto studiato: la meraviglia e l'emozione che si provano davanti ad un cielo stellato sono le stesse suscitate dalla visione di un manoscritto miniato.

Riferimenti bibliografici

AA.VV., *The Vatican Library Review*, 1(2).⁴¹

AA.VV., *The Process for the Digitization of Manuscripts in the Vatican Library*, in uscita nel 2024. In particolare, si rimanda ai seguenti articoli:

G. Giuffrida, *The FITS format: analysis and use*.

G. Giuffrida, *The FITS keywords and use of PREMIS-FITS File*

P. Manoni, *Standardization initiatives: the UNI 11845:2022 - Where did the UNI 11845:2022 standard "Process for managing the long-term storage of digital images with the use of the FITS format" start?*

G. Giuffrida, *Standardization initiatives: the UNI 11845:2022 - The requirements for the standard*

G. Giuffrida, *A Percentage of ink across the centuries: a first analysis of the digital corpus of the Vatican Library*

G. Giuffrida, A. Németh, D.V. Proverbio, *An Arabic-Greek Codex of Ptolemy's Handy Tables from the Eighth Century: Reassessment of the Arabic Winds List and the Horizon Diagram in Vat. sir. 623*. *The Vatican Library Review*, 2, 1 (2023).⁴²

M. Foffi, *Development of large-scale analysis techniques for feature extraction in ancient manuscripts of the Vatican Apostolic Library*. Master's degree thesis in Physics, Tor Vergata University AA 2020/2021. Supervisors: M.Casolino, G.Giuffrida

G. Giuffrida, *Dall'astronomia alla codicologia: tecniche di analisi dati astronomiche applicate al patrimonio digitale della Biblioteca Apostolica Vaticana*, *Giornale di astronomia* 2021-06.⁴³

Astrolinguistica: breve introduzione alla scienza di parlare con gli alieni

Lorenzo De Piccoli

Fin dall'antichità, da quando gli esseri umani hanno iniziato a osservare e studiare il cielo, l'idea che su altri pianeti possano esistere esseri viventi, in particolare creature dotate di intelligenza, ha affascinato filosofi naturali, scrittori, poeti e intellettuali. Molte opere speculative sugli "abitanti dei pianeti" e sulla "pluralità dei mondi" sono state scritte nel corso dei secoli. Tuttavia, nel ventesimo secolo, una profonda innovazione nell'astronomia e nelle scienze spaziali fece intravedere ad alcuni scienziati la possibilità di abbandonare la speculazione puramente teorica e di mettersi attivamente alla ricerca dei nostri lontani cugini interstellari.

Tale innovazione fu la comparsa della radioastronomia: con tale termine si indica l'insieme delle tecniche che studiano gli oggetti celesti mediante l'analisi delle onde radio che essi emettono. Mentre l'astronomia tradizionale si limita a osservare e a studiare la piccola porzione dello spettro elettromagnetico corrispondente alla luce visibile, la radioastronomia permette di ottenere una conoscenza più ampia e precisa dei corpi celesti, specialmente di quelli molto distanti; infatti, la natura delle onde radio, dalla lunghezza d'onda molto più ampia rispetto alla luce visibile, fa sì che esse si propaghino più facilmente attraverso lo spazio interstellare e l'atmosfera terrestre.

La radioastronomia nacque intorno agli anni '30 del secolo scorso, ed impiegò qualche decennio a diffondersi e a mettere stabilmente radici tra la comunità scientifica internazionale; alla fine degli anni '50, due scienziati, Giuseppe Cocconi e Philip Morrison, si resero conto che le onde radio, per i motivi appena spiegati (e anche perché, ovviamente, si muovono alla velocità della luce), sono il miglior mezzo immaginabile per comunicare su distanze interstellari. Questo significa che, se esistesse una qualche forma di intelligenza extraterrestre intenzionata a comunicare con noi o con altre forme di vita intelligente nello spazio, allora il mezzo ideale per una simile comunicazione sarebbero le onde radio, che potrebbero essere intercettate dai nostri radiotelescopi.

Quest'idea spinse molti scienziati a puntare i radiotelescopi verso lo spazio, nella speranza di intercettare un messaggio da qualche fonte extraterrestre: nacque così il programma di ricerca oggi noto come SETI, o *Search for Extraterrestrial Intelligence*. Naturalmente, questo pone tutta una serie di domande: anche ammesso che degli extraterrestri intelligenti esistano, e che stiano inviando messaggi via radio, come faremmo a riconoscere un messaggio alieno (magari codificato in un modo per noi del tutto inimmaginabile) dal rumore di fondo o da fonti naturali di onde radio? E anche ammesso che un radiotelescopio riesca a ricevere un segnale che è incontrovertibilmente un messaggio extraterrestre, saremmo in grado di decifrarlo?

Domande come queste hanno stimolato l'immaginazione di molti scrittori di fantascienza: Stanisław Lem, in particolare, ha esplorato queste tematiche in capolavori del genere come *La Voce del Padrone* e *Il Pianeta del Silenzio*. Tuttavia, nel mondo reale, non abbiamo ricevuto nessun segnale tale da indurci anche solo a sospettare ragionevolmente di avere tra le mani un messaggio dagli extraterrestri: a più di sessant'anni dalle prime ricerche SETI, l'universo rimane un posto molto silenzioso. Gli scienziati sulla Terra hanno però provato a rispondere anche a un'altra domanda: ammesso che esistano degli extraterrestri intelligenti capaci di ricevere messaggi radio, come dovrebbe essere fatto il messaggio per poter convogliare un contenuto informativo agli stessi extraterrestri? In altre parole: come possiamo noi comporre un messaggio tale che sia compreso da eventuali ascoltatori extraterrestri?

Questa domanda era ricorrente tra gli scienziati fin dall'inizio della storia del SETI, che infatti era un tempo più noto come CETI, o *Communication with Extraterrestrial Intelligence*. Come instaurare una comunicazione con creature che postuliamo essere intelligenti (qualsiasi cosa voglia dire esattamente intelligenza, una definizione non facile da indicare con certezza), ma che potrebbero comunicare tra di loro in modo totalmente diverso da noi, e che ovviamente (ammesso che abbiano qualcosa di simile al linguaggio) non parlano nessuna cosa simile alle lingue terrestri?

Una prima soluzione fu di utilizzare delle immagini. Molti sistemi di comunicazione, antichi e moderni, utilizzano pittogrammi o rappresentazioni per convogliare contenuti semantici: è facile capire come il disegno di una casa sia un buon modo per convogliare con abbastanza chiarezza e precisione l'idea astratta di "casa, domicilio, abitazione", ma anche in-

dicare un oggetto concreto (ad esempio, una specifica casa). Questa idea fu alla base di quello che fu forse il più famoso messaggio interstellare mai inviato, la trasmissione di Arecibo.

Tale messaggio fu inviato nel 1974 da un grande radiotelescopio (oggi non più esistente) ad Arecibo, sull'isola caraibica di Porto Rico. Concretamente, il messaggio consisteva di una stringa di cifre binarie, cioè di una stringa di 1 e di 0: in totale, si trattava di 1.679 cifre. Tale numero non fu scelto a caso: 1.679 è infatti un numero semiprimo, cioè un prodotto di due numeri primi (73 e 23).

La speranza degli scienziati dietro al progetto, tra cui pionieri del SETI come Frank Drake e Carl Sagan, era che una volta ricevuto il messaggio gli ascoltatori extraterrestri fossero in grado di riconoscere la particolarità del numero 1.679 come prodotto di due primi: la stringa di uno e di zero di per sé non significa nulla. Immaginiamo però di disegnare una griglia alta 73 caselle e larga 23, colorando ogni quadrato che nel messaggio di Arecibo corrisponde a un 1 e lasciando vuoto ogni quadrato che corrisponde a uno 0. Il risultato sarebbe quello mostrato in figura 1.

In altre parole, il messaggio di Arecibo era una sorta di gioco enigmistico: una serie di istruzioni, codificate in binario, che se correttamente interpretate avrebbero portato un "solutore abile" a disegnare l'immagine qui riportata.

Questa immagine, che va "letta" dall'alto verso il basso, contiene diversi elementi che dovrebbero rappresentare aspetti importanti della biologia e della tecnologia umana.

Nella sezione più in alto, sono rappresentati in forma di tabella binaria i numeri da 1 a 10. Subito sotto, allo stesso modo vengono rappresentati i numeri 1, 6, 7, 8 e 15, cioè i numeri atomici che corrispondono all'idro-

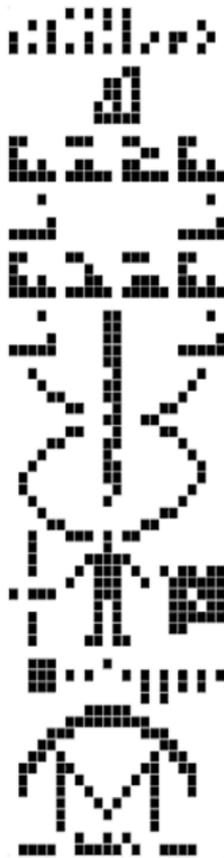


Figura 1: Il messaggio di Arecibo

geno, al carbonio, all'azoto, all'ossigeno e al fosforo; i cinque elementi che compongono il DNA. Immediatamente sotto, vengono descritti i nucleotidi che compongono il DNA sotto forma di sequenze degli elementi appena introdotti.

A seguire si trova un disegno stilizzato di una doppia elica (di nuovo, che indica il DNA; la colonna al centro è una rappresentazione del numero di paia di nucleotidi che compongono il genoma umano) e di un essere umano, affiancato da indicazioni, di nuovo codificate in binario, dell'altezza media di un essere umano e delle dimensioni della popolazione mondiale. Ancora al di sotto, sono rappresentati il Sole e i pianeti del sistema solare (con la Terra più in alto, a indicare che si tratta del pianeta da cui proviene il messaggio); la sezione più in basso rappresenta il radiotelescopio di Arecibo, con il suo diametro indicato, di nuovo, sotto forma di tabella binaria.

Il messaggio di Arecibo contiene tutta una serie di ingegnose soluzioni per cercare di rappresentare, nel modo più compatto possibile, una gran quantità di informazioni sulla biologia della Terra, sul suo posto nel sistema solare, sugli esseri umani e sulle loro capacità tecnologiche. Tuttavia, ha dei limiti evidenti; innanzitutto, la scommessa che degli extraterrestri siano in grado di riconoscere il numero 1.679 come semiprimo e quindi di ricomporre correttamente il messaggio (disponendo la sequenza su una griglia alta 23 caselle e larga 73, invece che alta 73 e larga 23, si ottiene infatti un'immagine incomprensibile).

Anche ammesso che il messaggio sia ricomposto correttamente, un extraterrestre, per quanto intelligente, potrebbe avere difficoltà a estrarne un significato: un disegno di un omino stilizzato è immediatamente comprensibile a chiunque come un'indicazione di un concetto astratto (quale "umanità" o "persona"), ma una simile identificazione potrebbe risultare più problematica a un essere che non ha nessuna idea di cosa sia un umano.

Il problema potrebbe sembrare ancora più grave per quanto riguarda gli altri elementi del messaggio. Chiunque riesca a raccogliere il messaggio di Arecibo potrebbe avere una biologia molto diversa dalla nostra, o non conoscere affatto la rappresentazione sotto forma di tabelle binarie dei numeri, ad esempio. Problemi del genere sembrano essere inevitabili e connaturati ai messaggi per immagini. È molto difficile trasmettere in-

formazioni complesse e precise utilizzando unicamente pittogrammi e ideogrammi, specialmente se volessimo evitare di fare alcun riferimento ad altri codici usati per trasmettere informazioni (ad esempio il binario).

Lanciato a velocità della luce verso l'Ammasso Globulare di Ercole (o M 13), il messaggio di Arecibo impiegherà circa 25mila anni a raggiungere la sua destinazione. I suoi creatori, tra cui Drake e Sagan, lo hanno inteso più che altro come un'impresa simbolica o dimostrativa. Questo però non ha impedito ad alcuni scienziati di porsi obiettivi più ambiziosi. Se comunicare efficacemente per immagini è impossibile, allora quello che serve è un linguaggio: un linguaggio universale, costruito in modo tale da poter trasmettere messaggi in modo preciso e chiaro a qualsiasi destinatario, terrestre o extraterrestre, purché sia abbastanza intelligente (di nuovo, qualsiasi cosa significhi di preciso essere intelligente).

Il sogno di un linguaggio "universale" o "filosofico", in grado di essere comprensibile a qualsiasi essere razionale e di evitare le imprecisioni e le ambiguità tipiche dei linguaggi naturali, è in realtà piuttosto antico: teorizzazioni e tentativi del genere possono essere fatti risalire addirittura al Diciassettesimo secolo, quando pensatori come il ceco Giovanni Comenio, il tedesco Gottfried Leibniz e l'inglese John Wilkins sperimentarono con idee come la *mathesis universalis* o il *philosophical language*.

Simili tentativi vennero messi alla berlina da Voltaire, che nel *Candido* trasforma Leibniz nel precettore Pangloss. Al Diciannovesimo secolo risalgono i primi tentativi coronati da un certo successo di creare una lingua che si proponeva di essere universale, in particolare l'Esperanto; tuttavia, l'Esperanto e altre lingue simili erano pensate come lingua ausiliaria, cioè per facilitare la comunicazione tra persone che parlano diverse lingue terrestri. Simili idee non possono funzionare allo scopo di comunicare con degli extraterrestri (ammesso che esistano), visto che plausibilmente non conosceranno nessuna lingua terrestre; anzi, è probabile che i loro linguaggi, ammesso che comunichino tra di loro con qualcosa di simile a un linguaggio, siano inconcepibilmente diversi dai nostri.

Una possibile chiave per risolvere il problema sarebbe individuare un qualche elemento che accomuni tutte le creature dotate di qualcosa di simile a ciò che noi comunemente chiamiamo intelligenza. Questa fu l'intuizione di Lancelot Hogben (1895 -1975), matematico inglese dai molteplici interessi, tra cui l'applicazione della matematica alla medicina e alla biologia, nonché la divulgazione scientifica e i rapporti tra scienza e

politica. Hogben venne invitato nel 1952 a tenere una lezione alla *British Interplanetary Society*, una società scientifica con sede a Londra dedicata all'esplorazione spaziale.

Il tema della lezione era un linguaggio per comunicare con degli ipotetici "vicini celestiali", chiamato da Hogben "astraglossa". Nel corso della sua breve lezione, Hogben abbozzò l'idea di un linguaggio interamente fondato sull'aritmetica. Secondo lui, ogni essere sufficientemente intelligente da organizzare la propria vita a seconda del mutare delle stagioni dovrà condividere con noi il concetto di numero.

Prendendo ispirazione dai sistemi numerici usati nel linguaggio maya e cinese, nonché dal sistema dei numeri romani, Hogben delinea un sistema linguistico composto da unità numeriche (o *dashes*, indicati con "1") e di "radioglifi", o particolari "simboli" (o *flashes*), ciascuno dei quali denota una particolare operazione matematica o concetto. Disporre dashes e flashes in una trasmissione radio permetterebbe di esprimere concetti aritmetici anche complessi. Hogben suggerisce, come esempio di prima trasmissione, l'equazione matematica " $1 + 2 + 3 = 6$ ", che in astraglossa dovrebbe scriversi:

i) 1..Fa..1.1..Fa..1.1.1..Fb..1.1.1.1.1.1

ii) 1..Fa..1.1..Fa..1.1.1..Fb..Fs..Fb..1.1.1.1.1.1

Nella prima riga, vediamo subito un dash, che, come detto rappresenta un'unità numerica: la ripetizione iterata serve per indicare numeri diversi dall'uno ("1.1" rappresenta il 2, "1.1.1" rappresenta il 3 e così via). F_a è un flash che indica l'operatore di addizione (può essere letto come un "+"), e F_b è un flash che rappresenta la relazione di uguaglianza ("=").

La seconda riga è identica alla prima, con la differenza che viene introdotto un nuovo flash, F_s , che è equivalente a "1.1.1.1.1", cioè al numero 6. Questa trasmissione contiene quindi non solo l'idea di addizione e di equivalenza tra numeri, ma anche una spiegazione del fatto che certi simboli si possono sostituire ad altri (F_s è infatti equivalente a 1.1.1.1.1). Da qui, si procede per astrazione a costruire radioglifi o flashes più complessi; allo stesso modo in cui molti caratteri cinesi sono composti da più elementi, si potrebbero costruire radioglifi del tipo " F_{r-d} " per indicare "questo è un esempio di una certa regola d". Ad esempio:

$F_{r-1}..1..F_a..1..F_b..1.1 (1 + 1 = 2)$

$F_{r-1}..1..F_{a..1.1}..F_{b..1.1.1} (1 + 2 = 3)$

$F_{r-1}..1..F_{a..1.1.1}..F_{b..1.1.1.1} (1 + 3 = 4)$

...

Quelli sopra sono tutti esempi della regola di successione (qui definita "regola 1" o semplicemente 1), mediante cui si costruisce l'insieme dei numeri naturali. Avendo posto queste fondamenta, Hogben si propone di utilizzarle per definire operazioni linguistiche come l'affermazione (cioè l'affermare che qualcosa è vero), la negazione (cioè l'affermare che qualcosa è falso), e la domanda (cioè il richiedere un'informazione mancante).

Per l'affermazione non serve che fare altro che ripetere quanto appena detto: trasmettere $F_{r-1}..1..F_{a..1}..F_{b..1.1}$ significa affermare che $1 + 1 = 2$ è una regola corretta. La negazione richiede un nuovo radioglifo, indicato come F_{n-d} , seguito da un'operazione sbagliata:

$F_{n-1}..1..F_{a..1}..F_{b..1.1.1}$

Questa stringa indica va letta così: $1 + 1 = 3$ ($1..F_{a..1}..F_{b..1.1.1}$) non è un corretto esempio della regola 1 (F_{n-1}), cioè, in altre parole, $1 + 1 = 3$ non è una regola esatta.

Per le domande, dobbiamo inserire un nuovo flash (F_q) che "richiede" di essere sostituito da qualcosa, un po' come le incognite nelle equazioni:

$1..F_{a..F_q}..F_{b..1.1.1.1}$

Tradotta in un linguaggio a noi più familiare, questa stringa equivale a " $1 + x = 4$ ". Hogben procede per ulteriori passaggi a costruire strutture utilizzabili per comunicare operazioni linguistiche come l'assenso, il diniego, il dubbio, per instaurare un pattern di domande e risposte sull'aritmetica.

Una trasmissione costruita con un linguaggio sarebbe in grado di comunicare a chiunque la intercetti contenuti piuttosto precisi (mediante la definizione di radioglifi sempre più complessi), e tutto ciò che è richiesto a chi la riceve è conoscere e riconoscere, nella trasmissione radio, dei concetti aritmetici. Non a caso, Hogben fa continuamente riferimento alla metafora dell'insegnamento dell'aritmetica a una classe di studenti giovani, inesperti, ma svegli, e capaci di riconoscere nella prima trasmissione ($1 + 2 + 3 = 6$) il fondamento di alcune regole fondamentali che,

venendo applicate ripetutamente, formano strutture sempre più complesse e articolate, in modo analogo a quanto avviene con degli studenti nel corso degli anni che impiegano a studiare la matematica.

Il fatto che il tentativo di una comunicazione interstellare abbia uno spiccato aspetto pedagogico dev'essere apparso chiaro anche ad Hans Freudenthal (1905-1990). Freudenthal fu un importante matematico del Novecento: tra i matematici, è principalmente ricordato per i suoi contributi nei campi dell'algebra e della topologia.

Freudenthal ebbe una vita travagliata: nato in Germania da una famiglia ebraica, da giovane si trasferì nei Paesi Bassi, dove visse per gran parte della sua vita e fu costretto, durante il periodo della seconda guerra mondiale, a nascondersi dalle truppe tedesche che occuparono il paese. Nella seconda metà della sua vita, Freudenthal si dedicò molto alla pedagogia della matematica, fondando, tra le altre cose, un'importante rivista scientifica internazionale sull'argomento (*Educational Studies in Mathematics*, tuttora esistente e tra le principali nel campo). Freudenthal fu inoltre la mente dietro a quello che oggi è il più noto e compiuto tra i tentativi di creare un linguaggio interstellare, o una Lingua cosmica: Lincos.

Nei piani di Freudenthal, il progetto Lincos doveva essere esposto in due volumi, intitolati *Lincos. Design of a Language for Cosmic Intercourse*: il primo volume fu pubblicato nel 1960, proprio nello stesso periodo in cui i primi progetti SETI stavano prendendo il via. L'idea di Freudenthal è per certi versi simile a quella di Hogben: costruire un linguaggio intorno all'aritmetica, capace di instaurare un pattern di domande e risposte intorno a problemi aritmetici e di essere progressivamente arricchito da elementi sempre più complessi e in grado di trasmettere più informazioni. La differenza principale con il lavoro di Hogben, che consistette di una lezione che, trascritta, equivale a poche pagine, sono le dimensioni: il libro di Freudenthal consiste di centinaia di pagine dense di formule e riflessioni su concetti di logica matematica, linguistica e semantica.

La struttura dell'opera si articola in diverse parti. Nell'introduzione vengono delineati chiaramente gli obiettivi e i presupposti teorici adottati da Freudenthal: l'idea è di creare pezzo dopo pezzo un linguaggio universale comprensibile a chiunque sia privo di nozioni relative ai nostri linguaggi naturali e che non debba fare ricorso a indicare oggetti nel

mondo fisico per spiegare i significati dei termini (come avviene comunemente quando, ad esempio, si insegna ai neonati il significato di una parola come "mela" indicando il frutto). Il linguaggio dev'essere adatto infatti ad essere utilizzato, trasmesso da onde radio, attraverso le distanze siderali per comunicare (almeno potenzialmente) l'intera mole di tutto lo scibile umano: la prima parte del libro è dedicata all'introduzione dei concetti matematici fondamentali su cui si baseranno le comunicazioni future.

La seconda parte è dedicata al tempo, e alla codifica linguistica di un "orologio" (cioè di un modo per indicare il passaggio e i momenti nel tempo). Terza e quarta parte sono dedicate rispettivamente all'introduzione di azioni (come ad esempio chiedere, conoscere, pensare, esistere, invecchiare, desiderare, vincere) e di concetti fisici (lo spazio, il movimento, la massa...). Mettendo tutto insieme, Freudenthal offre alcuni esempi di una "conversazione" trasmissibile via Lincos:

Ha Inq Hb ?x 2x = 5

Hb Inq Ha 5/2

Ha Inq Hb Ben

Naturalmente, tutti i simboli qui utilizzati sono da sostituire con appropriati "radioglifi". In linguaggio naturale, la conversazione potrebbe essere espressa così: un individuo (Ha) chiede (Inq) a un altro individuo (Hb) quale valore si può assegnare a un x (?x) tale che $2x = 5$. Hb risponde "5/2"; Ha risponde positivamente (Ben).

Il secondo volume del libro di Freudenthal avrebbe dovuto contenere istruzioni per utilizzare Lincos in modo da comunicare concetti più complessi come gli oggetti del mondo materiale, nozioni relative al pianeta Terra e alla sua biologia, e comportamenti più articolati e complessi. Tale volume non venne mai scritto: forse Freudenthal si rese conto di quanto fosse complesso il compito che si era posto, oppure semplicemente morì prima di potersi dedicare appieno.

Lincos rimase comunque per molti anni il tentativo più vicino a una realizzazione compiuta e completa del sogno dei visionari filosofici come Leibniz: una vera lingua universale, capace di essere utilizzata per comunicare in modo chiaro e preciso senza bisogno di ricorrere all'indicare oggetti fisici, e quindi in grado di instaurare una comunicazione che sorpassi le barriere fisiche (le immense distanze spazio-temporali del co-

smo) e linguistiche (l'impossibilità, da parte degli alieni, di imparare le lingue terrestri venendo sulla Terra).

Non a caso, tale progetto ebbe un certo seguito, e molti si interessarono successivamente alle problematiche sollevate dal lavoro di Freudenthal: Marvin Minsky (1927 - 2016) famoso matematico e informatico statunitense, tra i padri dell'intelligenza artificiale, scrisse un articolo dedicato a Freudenthal per chiedersi se possiamo davvero essere sicuri che l'aritmetica, su cui Lincos si fonda, sia davvero condivisa da tutte le forme di intelligenza nel cosmo. Non potrebbe essere invece che dalle parti di Alpha Centauri o di Betelgeuse gli abitanti che vivono lì abbiano principi aritmetici fondamentali totalmente diversi dai nostri?

Minsky risponde, argomentando, che le nozioni aritmetiche devono essere condivise da tutte le creature che possiamo ragionevolmente definire intelligenti, e che quindi un progetto come quello di Freudenthal è sensato.

Altri ricercatori hanno utilizzato le idee di Freudenthal per mandare un vero messaggio nello spazio: è il caso del progetto *Cosmic Call*, una serie di messaggi codificati in lincos inviati dal radiotelescopio di Jevpatorija, in Crimea, nel 1999 e nel 2003. Altri ancora hanno ulteriormente raffinato le idee di Freudenthal, utilizzando strumenti matematici e logici più sofisticati per creare "Lincos 2.0": è il caso di Alexander Ollongren, matematico olandese autore di un libro del 2013 intitolato *Astrolinguistics*.

Ad oggi, l'astrolinguistica è un programma di ricerca poco praticato seppur affascinante: l'obiettivo è quello di realizzare finalmente, e nel modo più elegante possibile, l'obiettivo fissato da Freudenthal (e da Leibniz, Wilkins e molti altri): una vera lingua universale. Può sembrare un obiettivo piuttosto astruso: perché creare una lingua per comunicare con intelligenze extraterrestri quando non sappiamo neppure se queste ultime esistono o no?

Tuttavia, una simile ricerca ha evidenti implicazioni anche a livello teorico, sui rapporti esistenti tra linguistica e matematica. Forse è un sogno pensare che un giorno scambieremo messaggi, magari in Lincos, con altre specie che abitano nella nostra galassia: a volte però anche i sogni meritano un piccolo posto nel grande mondo della ricerca scientifica.

Riferimenti bibliografici

Per un generale approfondimento sull'astrolinguistica e la sua storia, inclusi il messaggio di Arecibo, la lincos e il progetto Cosmic Call, si veda Oberhaus D., *Extraterrestrial Languages*, MIT Press, Cambridge, 2019.

L'articolo di Cocconi e Morrison sulle comunicazioni interstellari è stato pubblicato su *Nature*: Cocconi G. & Morrison P., *Searching for Interstellar Communications*, *Nature* **184**, 844 (1959).

La lezione di Hogben sull'astraglossa è stata trascritta e pubblicata in una raccolta di suoi saggi: si veda Hogben L., *Astraglossa or First Steps in Celestial Syntax*, in Hogben L., *Science in Authority*, George Allen & Unwin, Londra, 1963, pp. 122-135.

Il testo di Freudenthal sulla lincos è Freudenthal H., *Lincos. Design of a Language for Cosmic Intercourse, Part I*, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1960.

L'articolo di Minsky è reperibile sul sito del MIT Media Lab.⁴⁴ In alternativa, per un'edizione cartacea si veda Minsky M., *Communication with Alien Intelligence*, in Regis E. (ed.), *Extraterrestrials. Science and alien intelligence*, Cambridge University Press, Cambridge, 1985.

Il libro di Ollongren su "Lincos 2.0" è Ollongren A., *Astrolinguistics: Design of a Linguistic System for Interstellar Communication Based on Logic*, Springer, New York, 2013.



Disegno di Martina Rossi.

All'anagrafe: buco nero.

Storia di un buco che ha più volte cambiato nome

Alessio Focardi

*Lasciati guardare un po' più a fondo
finché si può
un ultimo saluto al nostro tempo
e tutto finisce qui*

*È futile comprendere perché
a volte i pensieri si confondono
e mischiano speranze e realtà
segnali che si perdono così
un radar pronto quando chiude il cielo e noi
colpevoli di troppa oscurità*

Subsonica - Lasciati



Figura 1: Opera di Anish Kapoor fotografata alla mostra dal titolo "Untrue unreal" presso Palazzo Strozzi a Firenze.

Si sa, come diceva il buon vecchio Galileo ne "Il Saggiatore", che la matematica è la lingua adatta a descrivere la natura e la fisica non può che farne buon uso. Non sorprendetevi quindi se inizio questo capitolo con una breve analisi linguistica delle parole! Pronti? Cominciamo!

La parola "buco" fa venire subito a mente una cavità, solitamente tondeggiante, capace di accumulare gli oggetti che ci cadono dentro, come potrebbe essere ad esempio un pozzo. Mentre la parola "nero" (intesa come colore) si utilizza, citando fonti lessicografiche quali il Vocabolario Treccani, per un oggetto che "assorbe integralmente tutta la luce che lo investe".

Secondo questa prima impressione linguistica un buco nero dovrebbe essere qualcosa capace di inglobare luce e oggetti, mostrando solo la sua oscurità. La verità non è molto lontana da quanto appena detto, ed è sui "perché" che si gioca tutta la differenza fra la sensazione che suscitano le parole e la realtà fisica descritta da questi misteriosi oggetti fisici.

I concetti fisici, spesso, non sono direttamente accessibili alla nostra conoscenza come lo è la nostra conoscenza del pozzo menzionato prima. In quel caso, si ha esperienza del concetto “buco”, acquisita attraverso l'esperienza corporea con il mondo e gli oggetti. In fisica (e in altre branche del sapere) si utilizzano spesso delle strategie in grado di estendere la nostra conoscenza del mondo a ciò che non conosciamo ancora o che non possiamo esperire, utilizzando parole che abbiamo già per descriverlo.

Questo meccanismo è di fatto un'analogia (nota in linguistica come metafora concettuale [1]) e porta con sé una specifica prospettiva che non riflette interamente la complessa realtà dei buchi neri. Vedremo nel corso del capitolo che altre analogie si sono succedute nella tortuosa storia che ha portato alla nascita del nome “buco nero”.⁴⁵

Volendo parlare di buchi neri e più in generale di astrofisica, non possiamo non parlare di gravità e partire quindi dal padre della teoria della gravitazione universale: Sir Isaac Newton. Grazie a Newton (1642 - 1727) sappiamo che due corpi con massa sono reciprocamente attratti gravitazionalmente sia che siano molto massivi come, ad esempio, il Sole e la Terra, sia che abbiano masse piccole. Questa è la ragione per cui una mela lanciata verso l'alto tende a tornare in basso, cadendo talvolta sulla testa del povero Sir Isaac.

Se lanciasimo la mela, o forse vi è più familiare un razzo, con una velocità abbastanza elevata scopriremmo che, nonostante la forza di gravità sia ancora presente, l'energia può risultare sufficiente a far scappare il fuggitivo dalle grinfie terrestri. Questa velocità, senza troppa fantasia, viene chiamata “velocità di fuga”: $v_{\infty} = \sqrt{2GM/R}$

Questa equazione lega la velocità v_{∞} necessaria a scappare da un pianeta alla sua massa M ed al suo raggio R , in particolar modo ci informa che più il pianeta è massivo e compatto più sarà difficile compiere questo atto. Se ad esempio volessimo fuggire dalla Terra sarebbe necessaria una velocità di circa 11 km/s, mentre per lanciare qualcosa dal Sole avremmo bisogno di raggiungere ben 620 km/s.

Ma cosa accadrebbe se, per magia, il nostro pianeta diventasse sempre più piccolo e compatto? Anche se la massa rimanesse la stessa la diminuzione del raggio porterebbe ad un incremento della velocità di fuga. Ad un certo punto la velocità diventerebbe così grande da eguagliare

quella della luce e, se la luce non può più uscire, ciò che rimane deve essere necessariamente oscurità: ossia, un buco nero.

Questo è ciò che effettivamente accade (per fortuna non accade e non accadrà alla Terra), quando le stelle con una massa abbastanza grande finiscono il loro combustibile nucleare e non riescono più a contrastare il loro stesso peso.

Il primo scienziato, o per meglio dire filosofo naturale, a pensare di unire l'ipotesi della luce come corpuscolo, ovvero come una particella, alla teoria della gravitazione di Newton fu l'inglese John Michell (1724 - 1793). Michell nel 1783 ipotizzò che i corpuscoli di luce emessi dalle stelle ad alte velocità dovessero essere influenzati dalla gravità della stella stessa proprio come la mela di Newton o il razzo fuggitivo. Da considerazioni sull'energia cinetica e gravitazionale Michell fu in grado di affermare che deve esistere una circonferenza critica per la quale la velocità di fuga risulta uguale a quella della luce: erano appena nate le "stelle oscure", la versione settecentesca dei moderni buchi neri [2]. Possiamo notare come già agli albori degli studi su questo fenomeno la terminologia utilizzata catturava un aspetto legato alle nostre capacità percettive, quello dell'assenza di luce.

Oggi sappiamo che la teoria di Michell non è corretta. Il filosofo naturale infatti partiva dall'ipotesi che la luce fosse una particella con una certa massa e che quindi fosse influenzata dalla gravità della stella secondo la legge di gravitazione universale di Newton. Secondo il filosofo naturale inglese l'Universo poteva contenere un elevato numero di stelle oscure, rese invisibili ai nostri occhi poiché la loro luce, una volta emessa, era costretta a tornarsene indietro dalla stella che l'aveva prodotta.

La sua tesi, sostenuta il 27 novembre 1783 davanti ai colleghi della Royal Society di Londra, non venne tuttavia presa sul serio e la storia di John Michell rimane ancora oggi poco conosciuta; spesso è infatti un altro scienziato ad essere ritenuto il primo a teorizzare i buchi neri: Pierre Simon Laplace (1749 - 1827). Fu infatti lo scienziato francese, 13 anni dopo Michell, a rendere popolare questa affascinante idea mettendola nero su bianco nella prima edizione della sua opera "*L'esposizione del sistema del mondo*", senza citare tuttavia il collega inglese.

Nello stesso periodo storico gli esperimenti di Thomas Young (1773 - 1829) portarono alla scoperta dell'interferenza della luce con sé stessa,

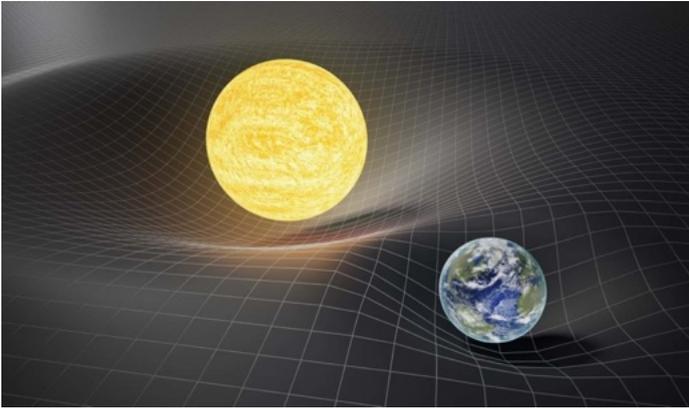


Figura 2: Rappresentazione artistica dell'analogia dello spaziotempo come telo secondo la relatività generale. Il sole deforma maggiormente lo spaziotempo rispetto alla Terra e la costringe a muoversi secondo traiettorie curve.

questa sembrò una chiara evidenza a favore dell'interpretazione della luce come un'onda, in completo contrasto con la teoria corpuscolare necessaria a far rimanere in piedi le stelle oscure. La teoria di Michell fu costretta ad andare in letargo e Laplace già nella terza edizione della sua opera, risalente al 1808, abbandonò la tesi della loro esistenza.

Ci volle almeno un altro secolo per riportare alla ribalta l'affascinante idea dei buchi neri, grazie al cambio di paradigma dovuto all'elaborazione di una nuova teoria: la relatività generale di Albert Einstein (1879 - 1955) nel 1915 [3]. Non fu però Einstein a teorizzare quelli che oggi chiamiamo buchi neri, ma il meno conosciuto Karl Schwarzschild (1873 - 1916) il quale, mentre prestava servizio nell'esercito tedesco durante la Prima guerra mondiale, lesse della nuova teoria e decise di analizzare le sue conseguenze dal punto di vista astrofisico.

Secondo la relatività generale la gravità non è più una forza che si esercita fra due corpi massivi, come nella teoria Newtoniana, ma un effetto geometrico dovuto alla presenza di massa e/o energia, capaci di modificare lo spaziotempo.

L'analogia che viene spesso utilizzata per dare un'idea della prospettiva Einsteiniana è quella che fa riferimento ad un telo (lo spaziotempo) che viene deformato una volta poggiate le masse. Immaginate di prendere un telo e di far muovere delle biglie sopra. Se il telo è ben teso il loro

moto sarà approssimativamente rettilineo. Proviamo adesso a fare lo stesso esperimento mettendo questa volta una massa abbastanza grossa da provocare un avvallamento al centro del telo. Noterete che la sua deformazione costringe le biglie a muoversi in maniera differente, non più rettilinea, ma compiendo curve. Secondo questa analogia la grossa massa al centro potrebbe essere il Sole, mentre le biglie i pianeti del sistema solare. Sebbene questa sia solo una analogia, con tutti i suoi limiti e difetti, permette di riflettere sulla diversa visione con l'interazione a distanza dovuta alla gravitazione di Newton.

Schwarzschild decise quindi di studiare come lo spaziotempo (il telo dell'esempio precedente) venisse modificato dalla presenza di una stella completamente sferica, non ruotante e senza una carica elettrica. Sorprendentemente Schwarzschild scoprì le stelle oscure ormai dimenticate da tempo, anche se con un significato completamente nuovo.

Secondo i suoi calcoli una stella avente una massa racchiusa in un raggio critico, il "raggio di Schwarzschild", avrebbe distorto così tanto lo spaziotempo da non lasciar fuggire nulla dal suo interno, nemmeno la luce! [4]

Schwarzschild, dal fronte russo, scrisse allora ad Einstein un articolo in cui descriveva i suoi calcoli, presentati successivamente da Einstein stesso all'Accademia prussiana delle Scienze nel 1916. Purtroppo, lo scambio epistolare fra i due scienziati non durò a lungo, Karl Schwarzschild mentre era sul fronte russo si ammalò e morì nello stesso anno, lasciando una gigantesca impronta nella storia della fisica moderna.

Le stelle oscure, tornate in vita con il nuovo nome di "singolarità di Schwarzschild" non vennero però prese troppo sul serio dai fisici del tempo. Albert Einstein stesso e Arthur Eddington (1882 - 1944), i più famosi esperti della relatività generale a quel tempo, furono i primi a non dare troppo peso alla scoperta di Schwarzschild.

Nel 1939 Einstein stesso pubblicò alcuni calcoli relativistici in cui dimostrava la non possibile esistenza fisica, ma solo matematica, delle singolarità di Schwarzschild arrivando a scrivere che "Il risultato finale di questa ricerca è una spiegazione evidente del perché le singolarità di Schwarzschild non esistono nella realtà fisica" [5].

Secondo Einstein la gravità di una stella sarebbe stata in ogni caso controbilanciata da altre forze in modo da non arrivare mai alla circonferenza critica. Tuttavia, anche i geni sbagliano e, sebbene i calcoli di Einstein

fossero corretti, la sua interpretazione, come sappiamo oggi, era errata poiché non prevedeva la possibilità di una implosione.

Riguardo al rifiuto dell'esistenza dei buchi neri negli anni Venti e Trenta dello scorso secolo ha scritto in tempi più recenti il fisico Werner Israel (1931 - 2022). Secondo Israel il fatto che le stelle oscure di Michell e Laplace fossero accettate dalla comunità scientifica del XVIII secolo mentre le singolarità di Schwarzschild non lo fossero è da cercare nella "persistenza e stabilità della materia". [6]

Le stelle oscure potevano essere fatte di qualsiasi materia e benché fossero non visibili da lontano, un eventuale osservatore abbastanza vicino alla stella sarebbe riuscito a veder zampillare le particelle luminose e addirittura a prelevare campioni di materiale della stella per poi riportarli a casa sulla Terra. Per le singolarità di Schwarzschild tutto questo era impossibile: ciò che oltrepassa la circonferenza critica non fa più ritorno e non è visibile né da vicino né da lontano. Un duro boccone da digerire con facilità.

Verso fine anni Trenta una spinta verso la possibile esistenza dei buchi neri fu offerta dal fisico statunitense Robert J. Oppenheimer (1904 - 1967) e da un suo studente, Hartland Sweet Snyder (1913 - 1962). Oppenheimer aveva appena concluso il suo studio sulle stelle di neutroni [7, 8], teorizzate anni prima da Fritz Zwicky (1898 - 1974), ed era fortemente convinto che le stelle massive, una volta arrivate a fine del loro ciclo vitale, dovessero implodere.

Utilizzando un modello molto semplificato Oppenheimer e Snyder riuscirono a dimostrare che l'implosione poteva accadere. D'altra parte, vi erano però alcune perplessità che giocavano a loro sfavore: il loro modello era troppo approssimativo poiché non teneva conto di alcuni effetti che potevano contrastare l'implosione come la rotazione della stella, la sua pressione e la densità al loro interno, considerata uniforme per semplicità [9].

Un altro aspetto che fece storcere il naso a molti scienziati era dovuto ad un "paradosso" nei loro risultati. Secondo un osservatore statico esterno, ovvero che rimane sempre alla stessa distanza dalla stella, quest'ultima sarebbe implosa sempre più lentamente fino a rimanere congelata nella sua circonferenza critica, col risultato finale che per tale osservatore la

stella non sarebbe mai implosa veramente. Questo effetto, quasi magico, era il risultato estremo della dilatazione gravitazionale del tempo!

Cosa diversa sarebbe accaduta secondo un osservatore in movimento verso la superficie stellare, per il quale questo effetto non sarebbe stato presente e avrebbe visto il collasso stellare completarsi con successo.

Oppenheimer nel 1939 e negli anni successivi non avrebbe potuto in alcun modo considerare maggiori dettagli fisici poiché sarebbe servita una tecnologia informatica più sofisticata: solo un computer abbastanza potente sarebbe riuscito a tener conto della pressione, delle reazioni nucleari e dell'espulsione di materia e radiazione durante l'implosione. Sarebbe stato necessario almeno un ventennio per poter tornare in maniera efficace sul problema studiato da Oppenheimer e Snyder.

Durante questo arco temporale, infatti, tutti gli ingredienti citati precedentemente e non considerati nei calcoli vennero studiati a fondo per la costruzione della bomba a idrogeno. Sembra folle da credere ma una delle ricadute scientifiche della ricerca militare fu proprio la descrizione del collasso gravitazionale di una stella.

Alla fine degli anni Cinquanta il fisico statunitense Stirling Auchincloss Colgate (1925 - 2013), incuriosito dal problema del collasso stellare, decise di simularlo utilizzando un computer. Le simulazioni, effettuate dallo stesso Colgate, assieme a Richard White e Michael May, riuscivano a contenere tutte le informazioni che servivano per descrivere la fisica all'interno della stella, sebbene la sua rotazione fosse ancora fuori dalla loro portata.

I loro risultati furono impressionanti: una stella con una massa piccola, finisce la sua vita nel bagliore di un'esplosione di supernova, lasciandosi dietro una stella di neutroni, esattamente come ipotizzato da Zwicky trent'anni prima! Se la stella fosse sufficientemente massiva, invece, niente potrebbe contrastare il suo collasso gravitazionale e si creerebbe un buco nero, come avevano previsto Oppenheimer e Snyder [10-12].

È giusto precisare che anche i sovietici non se ne stavano con le mani in mano. Nello stesso periodo il fisico sovietico Yakov Borisovich Zel'dovich (1914 - 1987), annoiato dall'attività di progettazione di armamenti nucleari, cominciò ad interessarsi a questioni riguardanti la teoria delle particelle e l'astrofisica, implosione stellare inclusa. Grazie all'aiuto di alcuni giovani colleghi quali Dmitri Nadezhin, Vladimir Imshennik e

Mikhail Podurets, Zel'dovich riuscì contemporaneamente e indipendentemente dai fisici americani a trovare gli stessi risultati [13-15].

Secondo Kip Thorne (1940 - In vita), vincitore del premio Nobel per la fisica nel 2017, la comprensione dell'implosione e dei buchi neri è stata ostacolata anche dalla scelta terminologica di chiamare la circonferenza critica con il nome di "singolarità di Schwarzschild" [16].

In fisica, infatti, le singolarità hanno a che fare con valori infiniti delle osservabili fisiche e non piacciono particolarmente ai fisici poiché indicano che qualcosa non funziona. La descrizione matematica di Schwarzschild prevede infatti non una, ma ben due singolarità. La prima non è altro che la circonferenza critica, mentre la seconda è presente al centro dell'oggetto collassato. Come sappiamo oggi grazie a Finkelstein (1929 - 2016), la prima singolarità non indica un luogo nel quale la forza di gravità diventa infinita, bensì delimita il confine dal quale non è possibile tornare indietro una volta oltrepassato. [17] Ma non finisce qui! Non solo nessun oggetto, una volta sorpassato il confine, non può più tornare indietro, ma non può nemmeno fare una pausa caffè nei pressi del bordo, dovrebbe per forza proseguire il suo viaggio verso il centro.

Sorte diversa accade per la singolarità centrale, la quale è una vera e propria patologia della teoria, curabile probabilmente attraverso una teoria capace di unire la relatività generale con la meccanica quantistica, la teoria utilizzata spesso (ma non solo) per descrivere fenomeni che avvengono nell'infinitesimamente piccolo.

La comprensione di questo importante fatto fece sì che negli anni Cinquanta le singolarità di Schwarzschild vennero abbandonate in favore di un nome più suggestivo coniato dal fisico Wolfgang Rindler (1924 - 2019): il noto "orizzonte degli eventi" (altra metafora concettuale!). Questa denominazione è infatti più trasparente e incisiva rispetto alla precedente *singolarità* di Schwarzschild, dal momento che tutti noi pensiamo all'orizzonte come ad un confine oltre il quale non si estende il nostro sguardo. Riguardo al nome per definire il vero e proprio buco nero, e non solo la superficie che lo delimita, è curioso notare che vennero effettuate scelte diverse in Occidente ed in Oriente.

I fisici sovietici chiamarono l'oggetto formato dal collasso "stella congelata", dove il termine suggerisce che l'implosione si è bloccata. Questa

scelta rendeva più importante la visione di un osservatore esterno statico, il quale non avrebbe mai visto il formarsi dell'orizzonte degli eventi.

Viceversa, in Occidente venne scelto il nome di "stella collassata", dimostrazione del fatto che si riteneva di maggior interesse il punto di vista dell'osservatore in caduta, il quale sarebbe riuscito ad oltrepassare l'orizzonte degli eventi fino ad arrivare al centro del buco nero, contenente la singolarità fisica vera e propria.

È interessante notare che nessun nome metteva l'accento sull'orizzonte degli eventi. Durante gli anni Sessanta sempre più calcoli stavano dimostrando con chiarezza il peso di questo concetto ed il fisico John Archibald Wheeler (1911 - 2008), che da sempre aveva la premura di dare il giusto nome alle cose, decise di riempire questa lacuna linguistica.

Sperimentò un nuovo nome prima nell'autunno 1967 durante una conferenza sulle pulsar e successivamente a dicembre dello stesso anno in una conferenza dal titolo "Il nostro Universo, il noto e l'ignoto". Senza chiedere a nessuno all'interno della comunità scientifica se fosse in accordo sul nome da lui scelto per descrivere l'orizzonte degli eventi e tutto ciò che cela, Wheeler cominciò ad utilizzarlo come se tutti lo stessero già facendo da tempo, decisamente un'ottima strategia! Qual era il nome da lui adottato, secondo voi? Ve lo lascio intuire attraverso la versione scritta del suo intervento:

"A causa della sua caduta sempre più veloce [la stella che sta implodendo] si allontana dall'osservatore [distante] sempre più rapidamente. La luce si sposta verso il rosso. Diventa più flebile di millisecondo in millisecondo, e in meno di un secondo è troppo oscura per essere vista... [La stella] come il gatto del Cheshire, sparisce alla vista. Uno si lascia dietro solo il sorriso, l'altra l'attrazione gravitazionale. Attrazione gravitazionale, sì; luce no. Nessun'altra particella fuoriesce, più di quanto non faccia la luce. Inoltre, la luce e le particelle provenienti dall'esterno... [e] che scendono giù per il buco nero, non fanno che aggiungersi alla massa e aumentarne l'attrazione gravitazionale" [18]

Per la prima volta, nel 1967, venne adottato il nome "buco nero", un nome diventato oramai così azzeccato da essere utilizzato sia dalla comunità scientifica che dal pubblico, popolare protagonista nel cinema e nella letteratura, con una efficacia descrittiva tale da far intuire subito alcu-

ne delle sue caratteristiche fondamentali. Un nome con una storia ed un'importanza uniche.

Riferimenti bibliografici

[1] G. Lakoff, & M. Johnson, *Metaphors we live by*, University of Chicago Press (1980).

[2] J. Michell, *On the Means of Discovering the Distance, Magnitude, &c. of the Fixed Stars, in Consequence of the Diminution of the Velocity of Their Light, in Case Such a Diminution Should be Found to Take Place in any of Them, and Such Other Data Should be Procured from Observations, as Would be Farther Necessary for That Purpose*, Philosophical Transactions of The Royal Society of London, **74**, 35 (1784).

[3] A. Einstein, *Die Feldgleichungen der Gravitation*, Sitzungsberichte der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Klasse für Mathematik, Physik, und Technik, 25 November 1915 p. 844.

[4] K. Schwarzschild, *Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einsteinschen Theorie*, "Sitzungsberichte der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Klasse für Mathematik, Physik, und Technik", **189** (1916).

[5] A. Einstein, *On a Stationary System with Spherical Symmetry Consisting of Many Gravitating Masses*, Annals of Mathematics, **49**, 992 (1939).

[6] W. Israel, *Dark Stars: The Evolution of an Idea*, in *300 Years of Gravitation*, a cura di S.W. Hawking and W. Israel, Cambridge University Press, Cambridge, Inghilterra (1987) p.199.

[7] J.R. Oppenheimer e R. Serber, *On the Stability of Stellar Neutron Cores*, "Physical Review", **54**, 608 (1938).

[8] J.R. Oppenheimer e G. Volkoff, *On Massive Neutron Cores*, "Physical Review", **54**, 540 (1939).

[9] J.R. Oppenheimer e H. Snyder, *On continued Gravitational Contraction*, "Physical Review", **56**, 455 (1939).

[10] S.A. Colgate e R.H. White, *Dynamics of a Supernova Explosion*, "Bulletin of the American Physical Society", **8**, 306 (1963).

[11] M.M. May e R.H. White, *Hydrodynamic Calculation of General Relativistic Collapse*, Physical Review **141**, 1232 (1966).

[12] S.A. Colgate e R.H. White, *The Hydrodynamics Behavior of a Supernova Explosion*, Astrophysical Journal, **143**, 626 (1966).

[13] V.S. Imshennik e D.K. Nadezhin, *Gas Dynamical Model of a Type II Supernova Outburst*, Astronomicheskii Zhurnal, **41**, 829 (1964). Traduzione inglese in Soviet Astronomy – AJ, **8**, 664 (1965).

[14] M.A. Podurets, *The Collapse of a Star With Pressure Taken Into Account*, Doklady Akademii Nauk, **153**, 300, (1964). Traduzione inglese in Soviet Physics – Doklady **9**, 1 (1964).

[15] Ya. B. Zel'dovich, *The fate of a Star and the Evolution of Gravitational Energy Upon Accretion*, Doklady Akademii Nauk, **155**, 67, (1964). Traduzione inglese in Soviet Physics – Doklady **9**, 195 (1964).

[16] K. Thorne, *Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy*, (Commonwealth Fund Book Program) WW Norton & Company (1995).

[17] D. Finkelstein, *Past - Future Asymmetry of the Gravitational Field of a Point Particle*, Physical Review, **110**, 965 (1958).

[18] J.A. Wheeler, *Our Universe: The known and the Unknown*, The Physics Teacher **7**, 24 (1969).

Questo capitolo ha preso spunto dal libro *Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy* di Kip Thorne, per una migliore comprensione della fisica dei buchi neri e della relatività generale consiglio i seguenti testi: *Gravitation* di Charles W. Misner, Kip S. Thorne, and John Archibald Wheeler, *Spacetime and Gravitation* di Sean M. Carroll ed infine *Gravitation and Cosmology* di Steven Weinberg.



Disegno di Martina Rossi.

La realtà dei fumetti: gli esopianeti

Domitilla Tapinassi

In questo capitolo parleremo di oggetti celesti, che sono stati spesso protagonisti del mondo cinematografico, videoludico e fumettistico: gli *esopianeti*. In generale con esopianeta si indica un pianeta al di fuori dei confini del nostro sistema solare. Al 31 luglio 2023 risultano 5.483 esopianeti *confermati*, 9.770 *candidati* e 4.087 sistemi planetari. Avrete notato l'utilizzo di due diversi aggettivi che possono essere così spiegati: quando un ipotetico esopianeta viene individuato, entra a far parte della lista di possibili candidati e soltanto dopo adeguate verifiche viene confermato come tale.

Prima di vedere come si individua un pianeta, prendiamo in esame le tipologie di quelli conosciuti, partendo da quello a noi più familiare: la Terra. Il nostro pianeta, assieme a Mercurio, Venere e Marte, appartiene al sistema solare interno, ovvero la zona del sistema solare più vicina alla nostra stella madre. È importante sottolineare quanto in fisica ed in particolare in astrofisica le scale possano essere diverse. La nostra Terra è infatti il terzo pianeta rispetto alla distanza dal Sole e dista da esso solo 1AU (unità astronomica) che è pari a $1,49 \cdot 10^{11}$ m, che nello spazio è l'equivalente di una passeggiata per andare a comprare il latte sotto casa. Con un raggio di soli 6.371 km, la nostra Terra ha ribattezzato gli altri pianeti del sistema solare interno come "terrestri", indicando con questo termine pianeti piccoli, composti perlopiù da roccia e metalli (da cui i nomi alternativi di pianeti rocciosi o tellurici).

Allontanandoci dal Sole ed entrando nella zona fredda nota come sistema solare esterno troviamo l'altra tipologia di pianeti ovvero quelli "giganti", rappresentati da Giove, Saturno, Urano e Nettuno, che sono anche denominati pianeti gioviani (da Giove). Giove e Saturno sono composti in gran parte da idrogeno ed elio, e sono chiamati anche pianeti gassosi, perché lo strato più esterno è in tale fase; a profondità adeguate, la pressione dei gas sovrastanti fa condensare i gas a liquidi e poi a solidi. Urano e Nettuno sono detti giganti "ghiacciati", perché hanno una composizione diversa, con molto meno idrogeno e presenza di sostanze più dense come l'acqua. Le condizioni di temperatura sono tali che queste sostanze non sono in forma di gas (alle pressioni di tali pianeti la fisica dello stato condensato è molto diversa da quella terrestre). Giove, il più grande dei

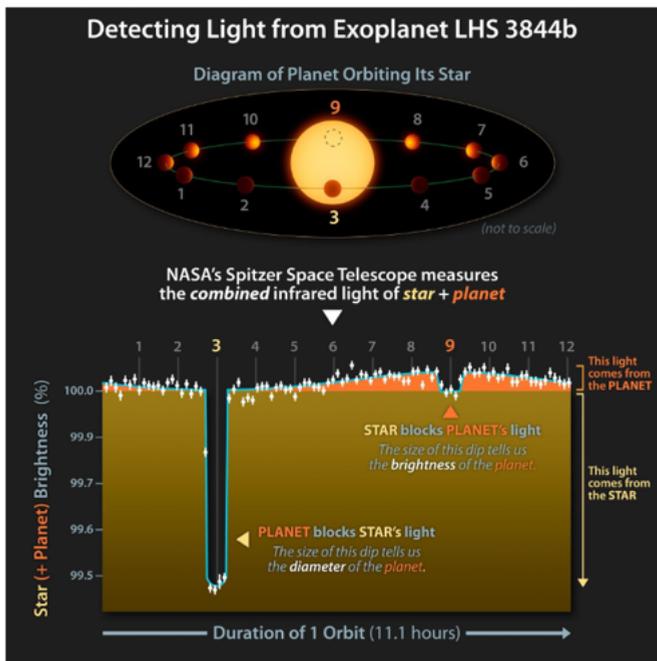


Figura 1: Curva di luce della stella Lhs3844 in seguito al transito del pianeta b. Fonte: NASA/JPL/Caltech.

giganti ma anche del sistema solare stesso, ha un raggio di ben 69.911 km e dista 5,2 AU da Sole. Saturno, l'ultimo pianeta del sistema solare visibile ad occhio nudo, dista dal Sole 9,5 AU e Nettuno, l'ultimo pianeta del sistema solare, ben 30 AU.

Siamo ora pronti a domandarci: come si individua un pianeta?

La ricerca di esopianeti risale alla metà del 20° secolo, ma il primo pianeta extrasolare, individuato attorno a una stella simile al nostro Sole, è stato scoperto solo nel 1995 [1], una scoperta tanto importante da valere il Premio Nobel per la Fisica nel 2019.

I metodi di individuazione di esopianeti sono molteplici: metodo dei transiti, metodo delle osservazioni dirette, metodo delle velocità radiali

ed altri metodi più complessi (microlensing gravitazionale, astrometria ed altro).

Il metodo dei transiti

Il metodo dei transiti si basa sullo studio del passaggio del pianeta candidato davanti alla propria stella, volendo semplificare si tratta dell'analisi di una "eclisse". In altri termini, nel passaggio di uno o più pianeti davanti alla stella, la luce che riceviamo da questa diminuisce a causa dell'effetto di oscuramento e ciò è visibile nella curva di luce stellare. Con questo metodo è possibile ricavare molte informazioni del pianeta, come ad esempio dimensione, tipologia e atmosfera planetaria. Talvolta possiamo trovarci di fronte ad un falso positivo, determinato ad esempio dal passaggio di una macchia solare (che ha una luminosità più bassa del resto della superficie); in questo caso uno degli elementi fondamentali per capire che non siamo in presenza di un esopianeta è la non periodicità dell'evento.

Questo metodo, largamente utilizzato, presenta comunque dei limiti. I pianeti principalmente individuati sono infatti grandi e vicini alla stella, e questo è dovuto ai limiti temporali di un essere umano. Pianeti lontani dalla loro stella hanno infatti periodi orbitali lunghi: se volessimo veder transitare Giove osservando da un pianeta lontano dovremmo attendere 12 anni per poter assistere ad un altro transito e di conseguenza essere certi che non si tratti di un falso positivo. Dal 1995 sono passati 28 anni, neanche tre periodi di Giove, e tre passaggi è il minimo per vedere una regolarità!

Ancora, pianeti di tipo terrestre, quindi più piccoli, come detto in precedenza, producono cali di luce che necessitano di misure molto accurate. La maggior parte dei pianeti scoperti tramite transiti sono infatti Hot-Jupiter, ovvero pianeti di dimensioni simili a Giove ma con periodi orbitali molto più brevi. E se il periodo è breve, deve trovarsi vicino alla stella, quindi riceve più luce e raggiunge una temperatura più alta che se fosse lontano: è, appunto, "hot".

Un esempio di Hot-Jupiter, che ritroveremo più avanti nel testo, è Pegasi 51 con una massa simile a quella di Giove, ma che orbita attorno alla sua stella ogni 4 giorni, un periodo molto più breve di quello di Mercurio, per esempio. Il primo pianeta ad essere stato scoperto grazie al metodo dei transiti è stato, nel 1999, HD209458b.

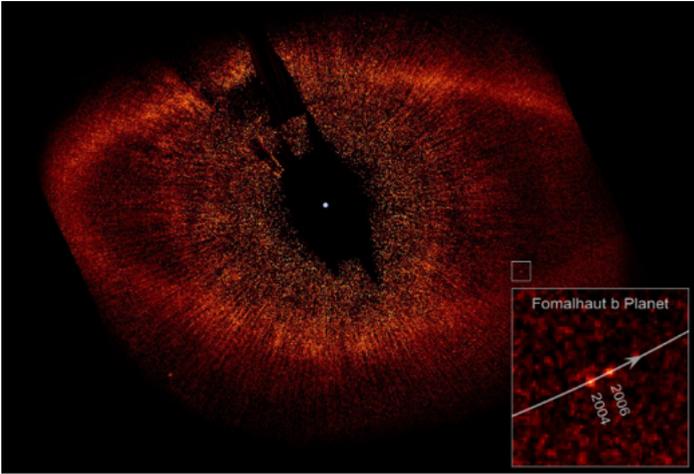


Figura 2: Il disco di Fomalhaut con l'evidenza, nel riquadro, dello spostamento di Fomalhaut-b. Credits: HST.

Il metodo dell'osservazione diretta

Il metodo dell'osservazione diretta (imaging) non necessita di alcuna descrizione, sebbene si debba ricordare che coinvolge soltanto pianeti non troppo vicini alla propria stella e con una luminosità oltre una certa soglia. Inoltre, anche con questo metodo è necessario ripetere molte volte le osservazioni in modo da dare tempo al pianeta di spostarsi.

Questo metodo non si limita ad osservare il pianeta nel visibile, ma utilizza anche altre regioni spettrali come ad esempio l'infrarosso. Sicuramente è un metodo di scoperta molto difficile, che richiede tecnologie e tecniche di calcolo molto raffinate. Fino al 2008 infatti nessun pianeta extra-solare era mai stato confermato. Il primo è stato Fomalhaut b, intorno alla giovanissima e brillantissima stella Fomalhaut nella costellazione del Pesce Australe. Alla fine del 2008 si contavano quattro foto di pianeti attorno alla propria stella, uno intorno a Fomalhaut e tre intorno alla stella HR8799, nella costellazione di Pegaso.

Nel merito del primo pianeta individuato con il metodo dell'imaging è bene puntualizzare che Fomalhaut b è stato per lungo tempo oggetto di discussione. L' insolita luminosità dell'oggetto e la temperatura non ri-

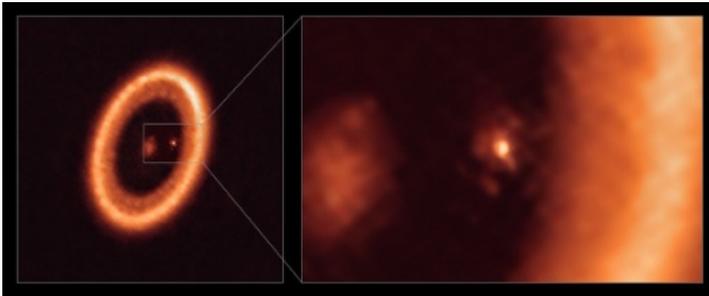


Figura 3: Il disco circumplanetario osservato da ALMA intorno all'esopianeta PDS 70c. Quel puntino a parte si tratta di una luna, che nel contesto degli esopianeti prende il nome di esoluna. Credits: Alma (Eso / Naoj / Nrao) / Benisty et al.

velata negli infrarossi hanno portato alla nascita di diverse ipotesi sulla natura dell'oggetto. Secondo alcune teorie non si tratterebbe di un pianeta quanto piuttosto di una "nube". Da anni al centro del dibattito scientifico, il pianeta "fantasma" è stato intravisto recentemente dal telescopio James Webb.

In breve, possiamo affermare che quello diretto è un metodo di scoperta molto difficile che richiede tecnologie e tecniche di calcolo molto raffinate: il campione di stelle da analizzare deve essere scelto con molta cura, a partire da un ampio database ottenuto con metodi diversi (per esempio, dal confronto dei dati di posizione dei satelliti Hypparcos e Gaia); a tutt'oggi solo una ventina di pianeti sono stati osservati con l'imaging.

Il metodo delle velocità radiali

Il metodo delle velocità radiali si basa sullo studio di piccole variazioni della velocità della stella indotte dalla presenza di un pianeta, dato che entrambi i corpi celesti orbitano intorno al centro di massa comune. La stella, molto più grande del pianeta, compie una piccola orbita intorno al centro di massa, e quindi si sposta molto poco, spostamento che può essere rivelato da una raffinata analisi spettroscopica della luce emessa. Con questa tecnica è addirittura possibile valutare la massa del pianeta.

Il primo esopianeta ad essere stato scoperto, nel 1995, con il metodo delle velocità radiali è stato 51 Pegasi b, che, come si è detto, ha portato gli

autori della scoperta, Michel Mayor e Didier Queloz al Premio Nobel per la Fisica del 2019 (insieme a James Peebles per la cosmologia) .

L'introduzione degli altri metodi potrebbe risultare tediosa; vi basti pensare che il metodo del microlensing gravitazionale mette in gioco la relatività generale, ma indico dei libri interessanti sull'argomento che potrete consultare: "Alla ricerca di una nuova Terra. Esopianeti, esplorazioni spaziali e vita extraterrestre" di Stuart Clark, "La ricerca degli esopianeti" di Bernhard Mackowiak.

Per darvi un'idea però delle percentuali di pianeti scoperti per ogni metodo, vi invito a leggere la seguente statistica:

- 74.8% Transiti
- 19.8% Velocità radiali
- 1.2% Imaging
- 3.7% Microlensing gravitazionale
- altri : 0.46% Transit Timing Variations, 0.31% Eclipse Timing Variations, 0.16% Orbital Brightness Modulation, 0.13% Pulsar Timing, 0.04% Astrometry, 0.04% Pulsation Timing Variations, 0.02% Disk Kinematics.

Vogliamo concludere parlando di esopianeti particolari. Come scritto in precedenza, infatti, i pianeti si suddividono in diverse tipologie a seconda delle loro caratteristiche. Ci sono pianeti terrestri perché simili alla Terra, quindi piccoli e rocciosi; pianeti gioviani, perché simili a Giove e pianeti nettuniani perché simili a Nettuno. Noi però parleremo di una quarta categoria: gli esopianeti fumettistici.

Da sempre l'astrofisica ha attratto l'interesse di Hollywood, basti pensare al numero allarmante di volte in cui in un film una qualche città statunitense è stata aggredita da Lune fuori orbita, Soli o visitatori provenienti da pianeti lontani, appunto esopianeti! Anche il mondo cartaceo è stato coinvolto in questa passione astrofila, tanto che scavando tra le pagine dei fumetti di case editrici come Marvel e DC è facile trovare alieni di esopianeti o pianeti noti.

- Alpha Centauri, nella costellazione del Centuario: Yondu è di questo mondo.

- Arcturus IV, quarto pianeta in orbita attorno alla stella Arcturus, da cui provengono gli Arturiani.
- Astra è un pianeta in Mu Cephei che è la casa degli Astrans.
- Centauri IV, quarto pianeta dei Centauri, è nel sistema di in Proxima Centauri.
- Drez-Lar, pianeta situato nella Grande Nube di Magellano, che fa parte dell'Impero Kree.
- Elanis, pianeta in orbita attorno a Beta Scorpii, nella costellazione dello Scorpione, casa degli Elans.
- Hb'Btt nel sistema stellare Beta Lyrae, nella costellazione della Lira, nella Via Lattea.
- Maklu IV, pianeta situato nella Grande Nube di Magellano, casa dei Makluan.
- Kalanor, pianeta probabilmente situato nella costellazione del Toro, luogo natale di Despero.
- Khundia, pianeta natale dei Khund; ipotizzato essere vicino alla costellazione dell'Orsa Maggiore.

La lista potrebbe andare avanti a lungo, ma a noi ne interessa uno in particolare. Ed è proprio qui che concludiamo il nostro racconto.

Superman, il cui nome kryptoniano è Kal-El, è un personaggio dei fumetti creato da Jerry Siegel e Joe Shuster nel 1933. Nato sul pianeta Krypton, venne inviato, ancora in fasce sulla Terra prima che il suo pianeta natale cessasse di esistere. Il padre, Jor-El aveva fatto alcuni studi sulla nostra stella, il Sole, e aveva scoperto che le particolari radiazioni emesse, potevano rendere Kal-El praticamente invulnerabile e conferirgli numerose abilità sovrumane.

Nel caso di Krypton, in una prima versione il suo sole, Rao, viene individuato in una gigante rossa, mentre nella edizione del settembre 2011 viene per la prima volta identificata come LHS 2520, meglio nota come Gliese 3707, una nana rossa della costellazione del Corvo scelta da Neil deGrasse Tyson astrofisico e divulgatore scientifico statunitense, direttore dell'*Hayden Planetarium dell'American Museum of Natural History*.⁴⁶

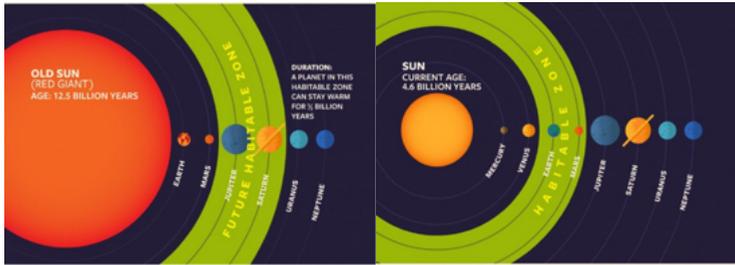


Figura 4: L'immagine descrive la posizione attuale della fascia di abitabilità del nostro Sole e la sua futura posizione quando il Sole evolverà in una gigante rossa Credits: Cornell University.

Iniziamo dal pianeta e poi spostiamoci al suo sistema. Non basta essere parte di un sistema solare per poter dire di “vivere” attorno alla stella, ovvero di essere all’interno di quella che è definita “fascia di abitabilità”. Con questo termine si intende la distanza circumstellare all’interno della quale potrebbe esserci vita, un’idea che risale alla metà degli anni ’60. È bene, prima di proseguire, puntualizzare che questa definizione si riferisce alla presenza di vita sulla superficie del pianeta, infatti, potrebbe esserci vita anche fuori dalla zona abitabile, sotto alla superficie planetaria. Il criterio per definire l’estensione della zona abitabile è la presenza di acqua in fase liquida, requisito essenziale per l’esistenza di forme viventi, almeno come le conosciamo. Oltre all’acqua, la vita deve essere sostenuta anche dalla presenza di materiale organico, fonti di energia ed una protezione dalle radiazioni.

Tornando quindi al nostro Krypton, possiamo affermare che si trova nella fascia di abitabilità di Gliese 3707, per gli amici Rao? Ci viene in aiuto il mondo dei fumetti!

Per osservare la fine di Krypton, nel fumetto, Superman cerca l’aiuto degli scienziati del Planetario Hayden di New York, dove fa ritorno periodicamente ogni 382 giorni. Per fare questo piacere a Superman, gli astronomi chiedono a tutti i telescopi del mondo di osservare Krypton contemporaneamente e di inviare le loro osservazioni al planetario. Quindi, Superman usa la sua mente dotata di straordinarie capacità di calcolo, simili a quelle di un supercomputer, per combinare i dati in un’unica immagine di Krypton che esplode.

Benché nei fumetti non venga esplicitato, possiamo supporre che le osservazioni avvengano nel periodo in cui Krypton si trova al suo apoastro dell'orbita ellittica attorno a Rao, cioè nel punto più distante dalla stella così da ridurre problemi legati alla luminosità. Sapendo che tali visite avvengono ogni 382 giorni possiamo calcolare la distanza tra Rao e Krypton sfruttando la "terza legge di Keplero" (legge dei periodi) ed i dati della stella LHS 2520,

$$T_{\text{Rao}} = 2\pi \sqrt{\frac{d^3}{GM}},$$

dove T_{Rao} indica il periodo orbitale attorno a Rao, d rappresenta la nostra incognita, cioè la distanza Krypton-Rao, $G = 6,64 \cdot 10^{11} \text{ m}^3/\text{kg s}^2$ è la costante di gravitazione universale e $M = 0,49 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ è la massa di LHS 2520. Da qui si ottiene

$$d = \sqrt[3]{\frac{GMT_{\text{Rao}}^2}{4\pi^2}} \text{ UA.}$$

Non volendo tediare il lettore con calcoli matematici, mi limito a dire che il pianeta cade, anche se al limite, nella fascia di abitabilità! Basta questo per dire di poter vivere nel sistema di una nana rossa? Per ora i dati ci hanno dato ragione, ma dobbiamo scavare un po', iniziando proprio dalla stella madre: una nana rossa.

Eccoci davanti ad un nuovo termine: nana rossa, che riguarda la dimensione ed il colore di una stella. Le stelle hanno infatti una scala di colori e dimensioni.

Diversamente dalle aspettative, il nostro Sole non è una stella molto grande, ma ricade nella classe delle nane gialle, ovvero di stelle piccole (da qui nana) e di colore giallo. Il colore della fotosfera di una stella dipende dalla sua temperatura. Senza soffermarsi troppo sui colori delle stelle, mi limiterò a dire che quelle più calde sono quelle blu, con temperature superficiali tra i 30.000 °C ed i 50.000 °C, mentre quelle più fredde sono le rosse con una temperatura superficiali tra i 2.700 °C ed i 3.800 °C (pensate che il punto di fusione più alto dei metalli è quello del tungsteno pari a 3.422 °C). A parità di temperatura, il parametro che differenzia le stelle è il raggio, da cui il nome: gigante e nana.

Le stelle nane, quindi con una caratteristica dimensione più piccola del Sole, hanno vite medie più lunghe rispetto alle compagne giganti, proprio grazie alla loro massa. Più grande è la massa della stella, maggiore è

la pressione del gas necessaria a sostenere la stella e di conseguenza più alta è la velocità media dei protoni, quindi più alto è il numero di reazioni di fusione, e tutto ciò si traduce in un bruciamento più veloce al crescere della massa.

Le nane rosse costituiscono circa il 70% della popolazione stellare della nostra galassia, risultando così il gruppo di stelle più numeroso. Le stelle più piccole del Sole sono poco meno del 90%; quelle come il Sole, un po' meno dell'8%.

Sistemi solari orbitanti attorno a nane rosse sono noti e di interesse per gli astrofisici. Tra gli esempi più famosi di nane rosse abbiamo Proxima Centauri, la stella più vicina al nostro Sole, a 4,2 anni luce dalla Terra; TRAPPIST-1, che si trova a 40 anni luce di distanza, e che ospita un sistema di sette pianeti, e Gliese 581, distante circa 20,3 anni luce.

Come si vive attorno ad una nana rossa?

Beh, è complicato, perché si tratta di una stella piccola e "fredda"! La zona di abitabilità del nostro Sole è compresa tra 0,95 UA e 1,37 UA, una nana rossa, come scritto sopra, è molto più fredda; pertanto la sua zona di abitabilità deve essere molto vicina alla stella. Si stima che in molti casi dovrebbe essere inferiore alla distanza a cui orbita Mercurio rispetto al nostro Sole, ovvero 0,38 UA. Volendo usare uno degli esempi sopra, Proxima b, il pianeta del sistema di Proxima Centauri, orbita in media 8 volte più vicino alla sua stella rispetto a Mercurio.

Una posizione così ravvicinata ad una stella comporta delle conseguenze macroscopiche sul pianeta. Quando un pianeta orbita così vicino alla sua stella, sente molto la "variazione" della forza gravitazionale nelle sue diverse zone (effetto mareale). Si pensa che Mercurio avesse un'alta velocità di rotazione, che lentamente è diminuita, a causa di questo effetto mareale, fino ad arrivare all'attuale valore di 58 giorni circa, rispetto agli 88 giorni del periodo orbitale.

Gli effetti di marea possono essere molto appariscenti: per esempio la Luna è agganciata alla Terra per le forze mareali che la Terra ha esercitato sulla Luna. Le maree generate dalla Luna sulla Terra stanno rallentando la velocità di rotazione della Terra ad un ritmo molto lento; contemporaneamente, Terra e Luna, in conseguenza di ciò, si stanno allontanando, e il processo continuerà fino a quando Luna e Terra volgeranno sempre la stessa faccia l'una all'altra. Molti esopianeti potrebbero tro-

varsi nella situazione di tidal locking rispetto alla loro stella, con la conseguenza che il lato non esposto potrebbe essere completamente congelato, e l'altro tanto caldo che l'acqua potrebbe bollire.

Come ulteriore deterrente, il *tidal locking* influenza anche i campi magnetici generati, che risulterebbero deboli o assenti, privando quindi i pianeti di protezione dalle radiazioni, come accade invece sulla Terra.

Sempre nell'ottica di temperature così diverse sulle due facce, alcuni studi avevano stabilito che la sola possibilità di vita su questi pianeti sarebbe condizionata alla presenza di un'atmosfera sufficientemente spessa da trasferire il calore dalla zona illuminata verso quella buia, rendendo però impossibile il passaggio di luce e quindi la fotosintesi. Tuttavia, recenti studi condotti da Robert Haberle e Manoj Joshi dell'*Ames Research Center* della NASA hanno dimostrato che basterebbe che lo spessore dell'atmosfera di un pianeta orbitante attorno ad una nana rossa fosse solamente il 15% maggiore di quello terrestre per consentire la diffusione di calore tra le due facce. In molti dei loro modelli su una faccia l'acqua resterebbe sempre sotto la temperatura di congelamento (dell'acqua pura), ma ciò di per sé non costituisce un impedimento assoluto. Martin Heath del *Greenwich Community College* ha mostrato infatti che l'acqua salata può ugualmente circolare senza gelare interamente nella parte all'ombra, se gli oceani sono sufficientemente profondi da consentire al liquido di muoversi liberamente sotto lo strato ghiacciato.

Pertanto, un pianeta dotato di tali caratteristiche in orbita attorno ad una nana rossa potrebbe, almeno in teoria, essere un buon candidato per permettere la vita.

Un altro problema che caratterizza sistemi planetari orbitanti attorno a nane rosse sono i *flare*. Con questo termine si intende una violenta eruzione di materia che esplose dalla fotosfera della stella, cioè la zona più esterna, emettendo energia. I *flare* sono misurati e raccolti dai satelliti GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*).

Vediamo quindi un esempio di un *flare* dalle nostre piccole vicine. Il 23 aprile 2014 il satellite della NASA Swift ha rilevato una sequenza di flare 10000 volte più potenti del più grande flare solare mai registrato. Questo "*superflare*" proveniva da una delle stelle di un sistema binario conosciuto come DG Canum Venaticorum (DG CVn), che si trova a circa 60 anni luce dalla Terra.

È possibile, dunque, la vita su questo ipotetico pianeta? Forse, anche se di certo sarebbe una vita molto complicata.

Certo, questi sono solo calcoli e stime, poiché di Krypton è rimasto solo un fantasma cartaceo, ma vogliamo concludere con una piccola chicca. Esistono pianeti senza stelle, allontanati dal sistema dopo la morte violenta della stella: sono chiamati "*rogue planet*" letteralmente "pianeti pirati". Che sia stato un pirata celeste a distruggere Krypton? Oppure la sua stella?

Infine, come non lanciare una sfida a chi ha un telescopio a casa? Vi lascio le coordinate di Rao: ascensione retta: 12 ore, 10 minuti e 5,77 secondi; declinazione: -15 gradi, 4 minuti, 17,9 secondi; moto proprio: 0,76 arco-secondi per anno, 172,92 gradi da direzione nord

Riferimenti bibliografici

[1] M. Mayor and Q. Didier, *A Jupiter-mass companion to a solar-type star*, *Nature* **378**, 355 (1995).

Uno starnuto stellare

Domitilla Tapinassi

Questo capitolo si propone di rispondere a due interessanti quesiti, antichi quanto l'umanità. Il primo è stato oggetto di vere e proprie "Guerre stellari": lo spazio è vuoto? La seconda domanda è meno comune: "è giusto soffrire di allergia nello spazio?"

La risposta non è banale, tantomeno di facile deduzione. Nel 1887, l'esperimento di Michelson-Morley, volto a dimostrare l'esistenza dell'etere luminoso, fu la prima prova dell'indipendenza della velocità della luce rispetto all'ipotetico vento d'etere, dimostrando così la non esistenza di quest'ultimo.

La fisica del XIX secolo iniziò così a prendere la distanza dalle teorie degli eteri, teorie nate non solo dall'esigenza di allontanarsi dall'idea metafisica dell'"orrore della natura per il vuoto", ma anche per spiegare alcuni fenomeni fisici, per esempio per fornire un "supporto" per la propagazione delle onde elettromagnetiche e quindi della luce. La presenza di tale mezzo però aveva la conseguenza che il moto dei pianeti doveva avvenire attraverso l'etere, e quindi la velocità della luce doveva risentire della velocità del pianeta, cosa appunto confutata dall'esperimento di Michelson-Morley. Non fu però la sola scoperta del XIX secolo riguardo al vuoto cosmico.

Nel 1904 il fisico tedesco Johannes Franz Hartmann scoprì l'esistenza di un materiale collocato nello spazio tra le stelle: il mezzo interstellare. Prima di spiegare cosa sia e che ruolo abbia all'interno di questo capitolo, è utile e importante spiegare come sia stato scoperto.

Hartmann stava studiando lo spettro del sistema binario δ Orion, all'interno della costellazione del cacciatore Orione, nota per la famosa Cintura di Orione. Spendiamo qualche parola per descrivere cosa si intende per spettro di un corpo celeste, oggetto di una branca della fisica detta spettroscopia.

Quando la luce bianca (detta ottica o visibile) attraversa un prisma o un altro mezzo dispersivo, forma una striscia colorata che appare alla vista come un arcobaleno (fenomeno che si presenta in natura proprio dopo pioggia, perché causato dall'attraversamento delle gocce di acqua da par-

te della luce del Sole che emerge dalle nubi). Questa divisione in colori corrisponde alla scomposizione della luce in componenti che hanno una precisa lunghezza d'onda, e che determinano, appunto, lo spettro della sorgente luminosa.

Si può dire quindi che la capacità dell'occhio umano di distinguere i colori costituisca una, seppur grossolana, analisi spettrale.

Nel XIX secolo si cominciò ad analizzare la luce emessa da

diverse sostanze rese incandescenti con una fiamma (si può provare gettando del sale su un fornello di casa). Si scoprì che la luce emessa era caratteristica della sostanza incandescente (gialla per il sodio), e ad estendere l'astronomia non solo allo studio delle immagini del cielo, ma anche allo spettro della luce proveniente dai corpi celesti.

Dall'esigenza di tali analisi nacque lo spettroscopio, uno strumento che consente appunto di separare le varie componenti di un fascio di luce. Applicando questa analisi anche allo spettro della luce proveniente dai corpi celesti si è riusciti a comprendere la composizione atomica dell'oggetto osservato, poiché ogni elemento chimico emette ed assorbe determinate lunghezze d'onda, e questo vale anche per una stella. L'elemento presente negli strati esterni di una stella produce una riga in assorbimento, cioè, assorbe quella lunghezza d'onda della luce proveniente dalla stella, lasciando una riga oscura nel suo spettro.

Ora che abbiamo tutti gli strumenti per comprendere il ragionamento di Hartmann, torniamo alle sue osservazioni. Lo spettro della regione δ Orion aveva una peculiarità, l'assorbimento dalla linea "K" del calcio appariva, riportando le parole di Hartman, "straordinariamente debole, ma quasi perfettamente nitido" e riportava anche il "risultato abbastanza sorprendente che la linea del calcio a 393,4 nm (un nanometro equivale a 10^{-9} m, ovvero un miliardesimo di metro) non condivide gli spostamen-

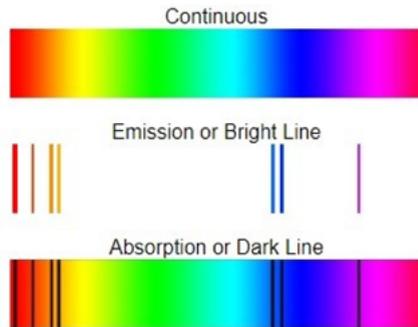


Figura 1: Spettro continuo (prima riga) a confronto con righe di emissione (seconda riga) e righe di assorbimento (terza riga).

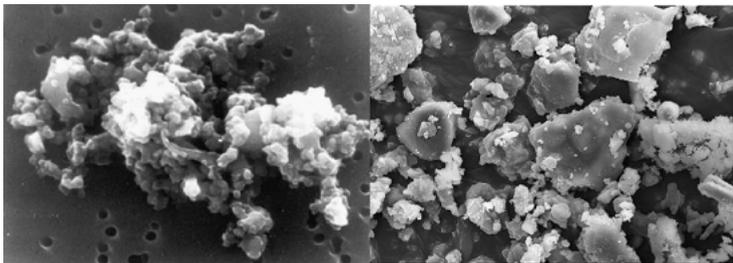


Figura 2: Polvere interstellare (a sinistra) e polvere casalinga (a destra).

ti periodici delle linee causato dal moto orbitale della stella binaria spettroscopica” (questo fenomeno è detto Doppler-Shift).

Hartmann concluse che la stazionarietà della linea del gas responsabile dell’assorbimento non fosse dovuta alla presenza del gas nell’atmosfera della stella; pertanto, questo doveva aver luogo all’interno di una nube isolata di materia che risiedeva da qualche parte lungo la linea di vista della stella (ovvero lungo il cammino tra stella ed osservatore). Ebbe inizio lo studio del mezzo interstellare.

Ora sappiamo che il mezzo interstellare (ISM) occupa la regione di spazio compresa tra le stelle ed è un mezzo in continua evoluzione, che fornisce l’ambiente all’interno del quale si formano le stelle. Il mezzo interstellare si compone prevalentemente di idrogeno e, in minima parte, di elio, entrambi prodotti della nucleosintesi primordiale. Sono inoltre presenti anche carbonio, ossigeno e azoto.

Nello specifico la percentuale degli elementi è pari a 70% idrogeno (H), 28% elio (He) e per il restante 2% da altre sostanze, che in astrofisica si chiamano collettivamente “metalli”, il che porta a pensare che il mezzo interstellare viene via via arricchito dai prodotti della nucleosintesi stellare espulsi dalle stelle durante la loro evoluzione. Poiché l’elio è chimicamente inerte, è consuetudine distinguere le diverse fasi dell’ISM dallo stato chimico dell’idrogeno. Le bolle ionizzate sono chiamate regioni H II, mentre il gas atomico è denominato gas H I. Le regioni H II si osservano meglio osservando le linee dell’idrogeno o le linee degli spettri degli atomi pesanti ionizzati. Le proprietà delle regioni H I sono studiate al meglio attraverso la riga a 21 cm dell’idrogeno, uno studio che fa parte dell’astronomia che si fa con i radiotelescopi. Il materiale di cui si com-



Figura 4: Effetto di estinzione da polvere causata dalla dark nebula LDN 1768 Fonte: ESO

Il mezzo interstellare (ISM) include gas in forma ionizzata, atomica e molecolare ed una componente solida, scoperta ventisei anni dopo Hartmann, nel 1930, dallo svizzero Robert Trumpler: la polvere interstellare.

Gli atomi che compongono l'ISM si presentano principalmente in forma gassosa, in varie combinazioni molecolari, ma anche in forma solida (ghiacci) depositati sui grani di polvere. Ora che abbiamo risposto alla prima domanda, andiamo più a fondo e chiediamoci da dove viene la polvere interstellare, perché sia così importante e quali siano le prove della sua esistenza.

L'importanza della polvere interstellare risiede nella sua origine. Si ritiene, infatti, che questa sia direttamente legata ai venti di supernovae (SN). Al termine del ciclo vitale stellare, la pressione di radiazione proveniente



Figura 5: Confronto della Nebulosa dell'Aquila, nota anche come Pilastri della creazione, vista nel visibile e nell'infrarosso. Fonte: NASA / ESA / Hubble Heritage Team (STScI / AURA)

dal nucleo (core) non riesce più a contrastare la gravità che porta gli strati esterni a cadere verso l'interno, fenomeno detto "collasso gravitazionale". Durante questo collasso ogni strato viene compresso da quelli più esterni, causando una specie di "rimbalzo", così che alla fine la parte più esterna viene espulsa, la fase di supernova. Così facendo i materiali prodotti all'interno della stella, come ad esempio carbonio, azoto, ossigeno, vengono espulsi nell'ambiente esterno. Questo stesso materiale, raggiunto il mezzo interstellare, la cui temperatura tipica si aggira tra 10-100 K (dove "K" indica la scala kelvin, il cui zero corrisponde a $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$), viene raffreddato, condensato e forma infine la polvere interstellare.

Come è possibile però individuare questi granelli di polvere interstellare e perché sono così importanti?

Per rispondere a questa domanda ci viene incontro nuovamente la spettroscopia e parzialmente anche un po' di sana logica. Tutte le immagini osservate attraverso un paio di occhiali impolverati ci appaiono sfocate; allo stesso modo la polvere lungo il cammino tra osservatore e corpo ce-

leste assorbe la luce e causa un fenomeno detto estinzione da polvere, che fu documentata per la prima volta nel 1930 da Robert Julius Trumpler. Tuttavia, i suoi effetti erano stati notati già nel 1847 da Friedrich Georg Wilhelm von Struve.

La polvere assorbe la luce principalmente nel visibile e nell'ultravioletto; così facendo i grani vengono riscaldati, tipicamente alle temperature sopra indicate, e quindi irradiano nuovamente questo calore a lunghezze d'onda infrarosse. Gran parte della luce viola, blu e verde delle stelle è dispersa o assorbita dalla polvere, quindi non raggiunge la Terra. D'altra parte, la luce arancione e rossa, con lunghezze d'onda maggiori, penetra più facilmente nella polvere che si frappone tra osservatore e stella rendendo, all'apparenza, il corpo celeste più rosso. Tale fenomeno è detto *reddening* o *arrossamento*.

In realtà "arrossamento" non è il termine più accurato per questo processo, poiché non viene aggiunto alcun colore rosso; invece, vengono sottratti i blu e i colori correlati. Quindi, dovrebbe essere più propriamente chiamato "scolorimento". Nei casi più estremi, le stelle possono essere così "arrossate" da essere del tutto impercettibili alle lunghezze d'onda visibili e possono essere osservate solo per mezzo di lunghezze d'onda infrarosse.

È il gas interstellare ad arrossare le stelle lontane? Sappiamo già dall'esperienza quotidiana che il gas atomico o molecolare è quasi trasparente. Consideriamo i gas che compongono l'atmosfera terrestre: nonostante la loro altissima densità rispetto a quella del gas interstellare, sono talmente trasparenti da essere praticamente invisibili! Questo perché i gas hanno alcune linee spettrali specifiche di assorbimento, ma così facendo assorbono solo una minuscola frazione della luce che li attraversa. La quantità di gas richiesta per produrre l'assorbimento osservato di luce nello spazio interstellare dovrebbe quindi essere enorme. L'attrazione gravitazionale di una massa di gas così grande influenzerebbe i moti delle stelle in modi facilmente rilevabili. Tali moti non vengono osservati e quindi l'assorbimento interstellare non può essere il risultato di gas.

Dunque, perché ci interessano così tanto questi granelli di polvere, che sembrano quasi voler scherzare con noi nascondendoci le stelle? Perché in essi si cela la chiave per comprendere la formazione delle stelle; e per indagare in tal merito dobbiamo viaggiare verso luoghi freddi e densi, le nubi molecolari.

Le zone più fredde e dense del mezzo interstellare prendono appunto il nome di nubi molecolari. Questi ammassi di gas interstellare e polvere hanno temperature molto basse, di soli 10-30 K, e proprio a causa delle loro basse temperature l'idrogeno è tipicamente molecolare, in formula H_2 (meno dell'1% di tutto l'idrogeno nella Via Lattea è legato alle nubi molecolari).

Le dimensioni di queste nubi possono variare da pochi anni luce (un anno luce corrisponde a quasi 10 miliardi di km), fino a 600 anni luce e la loro massa totale può raggiungere diversi milioni di masse solari. Le nubi molecolari più massive, con dimensioni superiori a circa 15 anni luce, ricadono in una categoria a parte, detta nubi molecolari giganti.

All'interno delle nubi molecolari del mezzo interstellare la polvere nutre stelle in formazione ironicamente portando in sé la storia di stelle ormai morte: alcuni eventi che disturbano l'equilibrio della nube possono infatti condurre ad un collasso della polvere e del gas presente dovuto alla gravità, e di conseguenza portare all'avvio di fenomeni di formazione stellare.

Siamo ancora così inesperti sulla polvere, che non esiste neppure un modello univoco di polvere! Quindi la prossima volta che andrete nello spazio, non dimenticate i fazzoletti!



Disegno di Martina Rossi.

Entrare in orbita lunare è più facile a farsi che a dirsi

Gianmarco Vespia

Il 25 novembre 2022 la NASA ha dichiarato che la capsula Orion della missione Artemis I era entrata in orbita lunare. È stato un grande successo, soprattutto perché c'era grande aspettativa prima del lancio di questa missione, annunciata circa un decennio fa e vittima di continui ritardi.

Artemis è il programma statunitense che ha annunciato il grande ritorno sulla Luna, con astronauti dopo più di 50 anni, e questa volta per rimanere. Fa parte di un disegno più grande, con una stazione spaziale a supporto in orbita attorno alla Luna, accordi internazionali per collaborare in questa grande impresa e programmi collaterali a supporto di attività secondarie.

Artemis I è stata la prima missione di questo programma e ha pienamente raggiunto i suoi obiettivi principali. È stata lanciata con il razzo Space Launch System, SLS, al suo volo inaugurale, e il carico principale era la capsula Orion, un validatore tecnologico di quella che con Artemis II porterà gli astronauti a sorvolare la Luna.

Gli obiettivi erano, appunto, partire, arrivare in prossimità della Luna, inserirsi in orbita, e tornare a Terra. L'orbita scelta era un po' particolare, in gergo si chiama DRO, Distant Retrograde Orbit, e Orion ha viaggiato in questa orbita tra 65.000 km e 85.000 km di distanza dalla superficie lunare. In tutto ha completato mezza orbita DRO durante la sua missione.

In realtà, questi valori dovrebbero già mettere un po' in allarme un appassionato attento. È difficile parlare di orbite quando ci sono più corpi celesti che hanno un'influenza gravitazionale non trascurabile e in questo caso ce ne sono ben tre, il Sole, la Terra e la Luna. Le orbite, quando sono coinvolti più corpi celesti perdono un po' significato, non sono più, a meno di casi particolarissimi, chiuse ed ellittiche e le leggi di Keplero non vengono più rispettate.

Tutto questo da un punto di vista puramente matematico. Da un punto di vista pratico, fisico e di meccanica orbitale, invece, si fanno delle ap-



Figura 1. Presentazione ufficiale NASA della traiettoria di Orion, dove al punto 10 viene esplicitamente detto che la capsula si inserisce in orbita lunare.

prossimazioni e si introducono altri concetti, asserendo che le leggi del fisico tedesco comunque valgono ma ci sono perturbazioni.

Queste assunzioni si possono fare entro un certo limite, che ha formalizzato George William Hill circa 200 anni dopo che Keplero enunciassero le leggi che oggi prendono il suo nome. Il pensiero che ha guidato Hill nella formulazione della sua teoria era abbastanza semplice: se un oggetto orbita abbastanza vicino alla Terra, la formula che descrive la sua traiettoria sarà solamente funzione delle caratteristiche del nostro pianeta, massa e distanza da esso in primis. Se lo stesso oggetto si trova molto lontano, allora più il Sole che la Terra influenzerà maggiormente il suo moto.

In un sistema a due corpi, Hill definì una zona attorno al corpo più piccolo, chiamata appunto sfera di Hill, dentro la quale un terzo oggetto poteva orbitare con delle condizioni di velocità iniziale appropriate.

Ad esempio: attorno alla Terra orbitano tanti satelliti artificiali, la cui traiettoria può essere perturbata solo leggermente dal Sole. La sfera di Hill della Terra nel sistema Terra-Sole ha un raggio di 1,5 milioni di chilometri. Il che vuol dire che un satellite artificiale in orbita bassa, a 400 km dalla superficie, sarà perturbato in maniera impercettibile dalla forza gravitazionale del Sole, a un milione di km subirà delle perturbazioni più

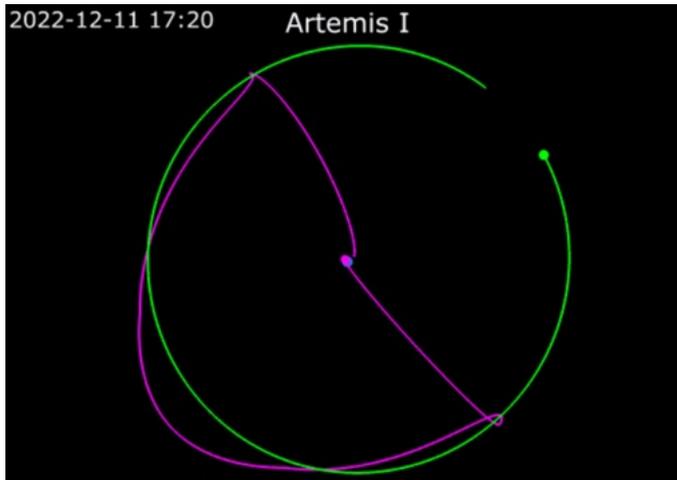


Figura 2: Traiettoria (viola) della capsula Orion della missione Artemis I vista in un sistema di riferimento inerziale solidale con la Terra (blu, al centro). Orion è partita dalla Terra verso la Luna (verde) e dopo il primo incontro si è inserita in un'orbita DRO, mezza ellisse, prima di incontrare nuovamente la Luna ed essere dirottata a Terra.

misurabili, a due milioni di km di distanza non potrà proprio orbitare attorno alla Terra.

La sfera di Hill della Luna nel sistema Terra-Luna, invece, ha un raggio di soli 60.000 km. Un valore inferiore ai dati orbitali citati sopra. In effetti qualcosa non torna. Se volessimo rispondere semplicemente alla domanda se un ipotetico osservatore sulla Luna avrebbe visto o meno Orion girargli intorno, la risposta sarebbe sì. Capire il motivo è un po' più sottile.

Si potrebbe fare un'analogia con due piloti che corrono su un'auto in un circuito circolare, a forma di corona circolare per essere precisi. Supponiamo che il primo pilota sia in mezzo alla pista, tenendo ben saldo il volante girando le ruote e pigiando l'acceleratore quel che basta per mantenersi sempre in mezzo alla pista, guidando veramente al limite. Il secondo pilota, leggermente indietro e sul lato esterno della pista, vuole superarlo aumentando la velocità e tagliando sul cordolo interno. Dopo

la manovra di sorpasso, si ritrova spinto di nuovo sul lato esterno della pista e deve rallentare per non finire fuori, lasciando di nuovo il comando della gara. Il primo pilota, dal canto suo, ha visto semplicemente il secondo pilota girargli intorno: era dietro all'esterno, se l'è ritrovato allineato all'interno, dopo davanti a sé e infine di nuovo dietro all'esterno.

La stessa cosa ha visto l'osservatore sulla Luna con Orion. La capsula di Artemis I e la Luna stanno semplicemente correndo testa a testa nel circuito orbitale attorno alla Terra. La Luna con un andamento più regolare, Orion sbalzando ogni tanto all'esterno o all'interno dell'orbita lunare.

In effetti sarebbe stato più corretto dire che Orion era in orbita attorno alla Terra anziché alla Luna. Il tratto di orbita DRO "lunare" era un arco di ellisse, approssimativamente, attorno alla Terra, ma diverso dalla classica ellisse kepleriana in cui il corpo celeste occupa uno dei fuochi. Difficile definire propriamente questa orbita in modo sintetico.

L'orbita della Luna e di Orion attorno alla Terra hanno caratteristiche simili. In particolare, il periodo è uguale. Sebbene questa situazione sia stata creata artificialmente, in natura esistono casi simili, anche se la denominazione usata è diversa.

Un esempio di questo tipo è 469219 Kamo'oaewa. Si tratta di un asteroide che viene denominato un quasi-satellite della Terra. Kamo'oaewa, infatti, orbita attorno al Sole con un periodo di 365,9 giorni, quasi come il nostro pianeta, in un'orbita leggermente più ellittica di quella terrestre. Dalla Terra lo vediamo quindi orbitare attorno a noi con un periodo di un anno. Il comportamento è esattamente analogo a un'orbita DRO. L'asteroide si trova a circa cinque milioni di chilometri dalla Terra, quindi al di fuori della sfera di Hill terrestre. L'oggetto è di interesse scientifico, per cui è stata pianificata una missione nel 2025 per studiarlo da vicino, Tianwen-2, a cura dell'agenzia spaziale cinese.

La missione Artemis I non è stata la prima sonda artificiale a inserirsi in orbita DRO attorno alla Luna. Il primato appartiene al modulo di servizio della sonda Chang'e 5 [1], una missione dell'agenzia spaziale cinese che ha portato a Terra campioni di superficie lunare e ha proseguito con il solo modulo di servizio nello spazio per raggiungere altri obiettivi secondari. Uno di questi era appunto testare l'orbita DRO per non meglio specificati usi futuri. La sonda si è inserita in orbita DRO a gennaio 2022.

Non è in programma di usare orbite DRO per le future missioni del programma Artemis. Artemis II sarà la prima missione verso la Luna con un equipaggio umano a bordo degli ultimi 50 anni. La precedente infatti è stata Apollo 17 nel 1972, ultima missione del programma Apollo. La capsula con gli astronauti di Artemis II effettuerà soltanto un sorvolo ravvicinato della superficie lunare, a circa 10.000 km di distanza, e rientrerà a Terra, senza sostare in orbita lunare per un periodo prolungato.

La traiettoria di Artemis III è di gran lunga più complicata. La missione è la prima del programma che ha come obiettivo quello di portare astronauti sulla superficie lunare. Non sarà però la capsula Orion ad arrivare in superficie, ma fungerà solamente da taxi per portare gli astronauti dalla superficie terrestre all'orbita lunare, poi un altro mezzo, probabilmente una Starship di SpaceX, li attenderà lì, le due navicelle attraccheranno e gli astronauti trasborderanno. Starship atterrerà sulla superficie, mentre Orion aspetterà in orbita lunare per il percorso di ritorno. Starship quindi decollerà dalla superficie lunare e andrà in orbita ad attraccare con Orion, gli astronauti traslocheranno nuovamente e torneranno a Terra con Orion lasciando Starship sempre in orbita lunare.

A parte i dettagli della missione e l'importanza che questa ha nella storia dell'astronautica moderna, la cosa su cui focalizzare l'attenzione per rimanere in argomento è l'orbita lunare scelta. Anche qui la definizione è un po' impropria. Non è una vera e propria orbita lunare e non è un caso semplice come il precedente. La sua sigla è NRHO, acronimo di *Near-Rectilinear Halo orbit*.

Una descrizione accurata di tale orbita richiede conoscenze un po' avanzate di meccanica orbitale. Prima di darne una descrizione sommaria è necessario fare qualche premessa.

Ci sono due punti particolari della sfera di Hill della Luna che sono chiamati punti lagrangiani. Il primo punto lagrangiano si trova dal lato della Terra e il secondo dalla parte diametralmente opposta. Entrambi sono situati sulla retta congiungente i due corpi celesti. Un satellite artificiale, posto in uno di questi due punti con una velocità opportuna, orbiterebbe in sincronia con Terra e Luna, mantenendo innanzitutto lo stesso periodo di rivoluzione della Luna e soprattutto la stessa posizione relativa ai due corpi.

Pur non essendo esattamente in uno dei due punti lagrangiani, un satellite potrebbe comunque rimanerne stabilmente nei pressi con opportu-

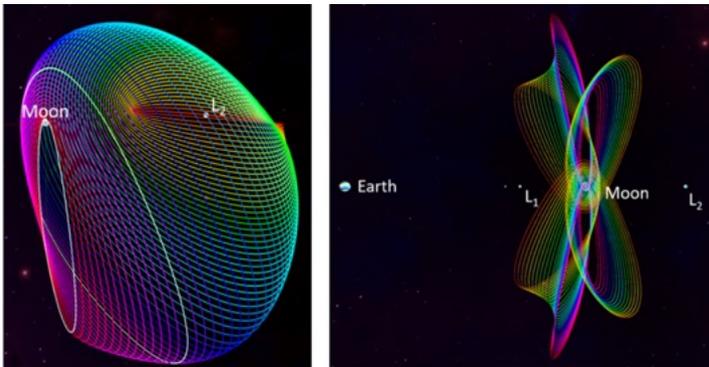


Figura 3: A sinistra un esempio di famiglie di orbite halo, quelle in prossimità del punto L_2 sono molto vicine al piano orbitale lunare, quelle più vicine alla Luna si allontanano dal piano. Sono evidenziate due orbite NRHO. A destra una famiglia di orbite NRHO, sia del primo che del secondo punto lagrangiano. C'è una simmetria planare. Per il Gateway e Artemis III è stata scelta una NRHO L_2 sud.

ne condizioni iniziali di velocità, facendo un moto leggermente caotico in prossimità del punto lagrangiano su cui insiste. Questo moto si chiama orbita di Lissajous e tecnicamente non è proprio un'orbita, in quanto non è una traiettoria chiusa periodica. Di fatto è la composizione di due moti periodici, uno giacente nel piano orbitale della Luna e uno sull'asse ortogonale a questo piano.

Se la traiettoria è abbastanza distante dal punto lagrangiano, esistono delle condizioni iniziali tali che questi due moti periodici abbiano lo stesso periodo, rendendo la traiettoria in un certo senso più ordinata. In questo caso si può nuovamente parlare di orbita, perché la traiettoria risulta chiusa e periodica, e si chiama appunto orbita halo.

Di orbite halo ce ne sono svariate, se ne potrebbe discutere a lungo. Quella scelta per Artemis III è una che in realtà è più vicina alla Luna che al secondo punto lagrangiano, è molto stretta e lunga e ha una grande elongazione all'esterno del piano orbitale della Luna. Vista dalla Terra appare un po' come un'ellisse molto sottile e lunga, con un estremo poco sopra il polo nord lunare e l'altro molto sotto il polo sud. I lati appaiono quasi rettilinei, da cui deriva la sigla citata sopra NRHO. C'è comunque da dire che non è un'orbita planare, ma tridimensionale; quindi, non ha nemmeno molto senso parlare di inclinazione orbitale.

L'orbita NRHO scelta per Artemis III ha il punto più vicino alla Luna a 3.000 km dalla superficie, nei pressi del polo nord, quello più lontano a 70.000 km circa dal polo sud [2]. Anche questa, quindi, non è propriamente un'orbita lunare. Sebbene stia un po' dentro un po' fuori della sfera di Hill della Luna, la sua traiettoria è molto influenzata dalla gravità della Terra.

Un altro fatto poco noto e controintuitivo riguardo le azioni gravitazionali è l'intensità del campo gravitazionale data dai tre corpi principali in un punto di questa orbita halo. Ad esempio, una sonda di una tonnellata a 70.000 km dalla superficie lunare subirà una forza gravitazione di 6 newton da parte del Sole, di poco meno di 3 newton da parte della Terra e di solo 1 newton da parte della Luna.

Al 2023 c'è solo una sonda in orbita NRHO, CAPSTONE [3], della NASA, lanciata nel 2022. Un'altra sonda è in orbita halo nei pressi del punto L_2 Terra-Luna, Queqiao, parte della missione Chang'e 4, lanciata nel 2018. Prima di allora questo tipo di orbita è stato poco utilizzato.

In futuro, anche le missioni Artemis IV e Artemis V useranno questo tipo di orbite, perché probabilmente la capsula Orion attraccherà a un Gateway Lunare attualmente in sviluppo che sarà parcheggiato permanentemente in orbita NRHO.

Ci sono tante altre missioni che utilizzano orbite lunari vere e proprie, completamente dentro la sfera di Hill della Luna, come ad esempio *Lunar Reconnaissance Orbiter*, LRO, della NASA, e Chandrayaan-2, dell'agenzia spaziale indiana, ISRO, che orbitano entrambe a un centinaio di chilometri dalla superficie selenica.

Ci sono anche altri tipi di orbite diverse che sono state considerate per missioni scientifiche, alcune poi scartate o ipotizzate per future missioni scientifiche. Un esempio sono le PCO e FLO, *Polar Circular Orbit* e *Frozen Lunar Orbit*, che hanno la caratteristica di essere molto stabili e di richiedere praticamente zero carburante residuo per il mantenimento in orbita, a differenza delle piccolissime correzioni necessarie per un'orbita NRHO. Sono state considerate inizialmente anche per il Gateway Lunare e il programma Artemis, ma richiedono una quantità di carburante leggermente superiore rispetto all'orbita NRHO per arrivarci dalla Terra e sono state scartate.

Le orbite FLO sono state considerate per il futuro programma di esplorazione cinese con equipaggio, che non prevede una base permanente in orbita, ma una piccola costellazione di satelliti di comunicazione in un'orbita ellittica tra 800 e 8.000 km di distanza dalla superficie lunare, a 40° di inclinazione orbitale, quindi un'orbita lunare propria. La caratteristica principale è appunto di essere molto stabile e di non richiedere nessuna manovra correttiva per anni.

Le orbite lunari hanno anche la caratteristica di essere in generale più instabili di quelle terrestri, per via della bassa gravità che ha reso la Luna meno uniforme della Terra, e ci sono quindi delle concentrazioni di massa sulla Luna che destabilizzano leggermente le orbite troppo basse.^a

Riferimenti bibliografici

[1] G. Vespia, *Aggiornamenti dal sistema solare: febbraio 2022 – AstronautiNEWS*, AstronautiNEWS, 28 February 2022.⁴⁷

[2] AA.VV., *WHY NRHO: THE ARTEMIS ORBIT, ARCHITECTURE CONCEPT REVIEW 2022*, NASA, 22 settembre 2022.⁴⁸

[3] L. Busillo, *CAPSTONE arriva in orbita lunare – AstronautiNEWS*, AstronautiNEWS, 14 novembre 2022.⁴⁹

Vedi anche

AA.VV., *Gateway Destination Orbit Model: A Continuous 15 Year NRHO Reference Trajectory*, NASA, 20 agosto 2019⁵⁰

George William Hill. Wikipedia.⁵¹

V. Remondini et al. *AstronautiCAST 16×06 – Prove su strada: Orion – AstronautiCAST*, AstronautiCAST, ISAA, 25 novembre 2022.⁵²

M. Zambianchi, Marco. *Partita Artemis I, la prima missione del ritorno alla Luna*, AstronautiNEWS, 16 novembre 2022.⁵³

^a Vedere anche la “spigolatura” *Perché non ci sono satelliti in orbita bassa intorno alla Luna? Farebbero comodo per trasmettere a Terra i dati dal lato nascosto..*

Teoria e pratica della difesa planetaria: la missione di deflessione asteroidale DART/LICIACube

Alessandro Rossi

Non succede.... ma se succede, cosa facciamo? Cosa facciamo se un bel giorno scopriamo che un oggetto celeste ha un'alta probabilità di impattare contro la Terra? Il film del 2021 "Don't look up" proponeva una soluzione non proprio geniale: fare finta di niente, non guardare in cielo e sperare (spoiler..... non funziona, va a finire male).

Gli oggetti che potrebbero arrivarci addosso appartengono alla popolazione dei cosiddetti *piccoli corpi* del Sistema Solare. Essa comprende diverse tipologie di oggetti che possiamo, molto schematicamente, dividere in asteroidi e comete, resti della formazione del sistema solare che non si sono aggregati a formare corpi planetari. I primi sono oggetti rocciosi, la maggior parte dei quali si trova in una regione compresa tra le orbite di Marte e di Giove nella cosiddetta fascia asteroidale principale (*Main Asteroid Belt*, MAB), tra poco più di 2 e poco meno di 4 UA dal Sole (UA, Unità Astronomica, ovvero distanza media tra la Terra ed il Sole, circa 150 milioni di km). Al momento sono noti più di 1.300.000 asteroidi nella MAB. Tuttavia, la massa totale contenuta nella MAB è assai ridotta (circa il 3% della massa della Luna) ed è concentrata per lo più nei 4 oggetti maggiori: Cerere (il più grosso, ora classificato come pianeta nano, con un diametro di circa 950 km), Vesta, Pallade ed Hygiea.

Al di là dell'orbita di Nettuno troviamo una popolazione assai più numerosa di oggetti, detti, appunto, trans-nettuniani, che occupano per lo più un disco (chiamata di fascia di Edgeworth-Kuiper) tra circa 30 e 50 UA. Si tratta in questo caso di corpi ghiacciati con una massa totale superiore di circa 100 volte a quella contenuta nella MAB. A questa famiglia di oggetti appartiene Plutone che, per questo motivo (ovvero il non essere un unicum nella sua zona orbitale), è stato declassato a *pianeta nano*.

Molto più lontano da noi, tra 2000 e 200.000 UA, si trova poi la nube di Oort, mai osservata direttamente a causa delle enormi distanze e delle

dimensioni ridotte degli oggetti in essa contenuti, ma che sappiamo essere composta da centinaia di miliardi di oggetti ghiacciati che si palesano a noi sotto forma di comete di lungo periodo quando, a causa di perturbazioni dovute a maree galattiche o a stelle in transito ai margini del sistema solare, vengono immessi in orbite che li portano verso il Sole.

Per completezza occorre poi menzionare oggetti “ibridi” che troviamo su orbite, per lo più instabili, che incrociano quelle dei pianeti esterni. Si tratta dei cosiddetti “centauri” che, analogamente agli esseri mitologici metà uomo e metà cavallo, presentano caratteristiche fisiche proprie sia delle comete (ghiacci volatili) che degli asteroidi (materiale roccioso).

Come detto sopra, la “maggior parte” degli asteroidi si trova nella MAB. Tuttavia, alcuni asteroidi vengono rimossi dalla MAB grazie a meccanismi dinamici complessi che coinvolgono perturbazioni gravitazionali, dovute principalmente all’influenza di Giove e Saturno, e non-gravitazionali, dovute alla radiazione solare, e vengono immessi nel sistema solare interno. Qui vengono “catturati” dai pianeti interni (Mercurio, Venere, Terra e Marte) che li portano su orbite tra circa 0.98 e 1.3 UA. Questi oggetti formano la popolazione dei cosiddetti *Near Earth Objects* (NEO) o oggetti incrociatori della Terra.

Proprio per via dei meccanismi responsabili del loro trasporto, si tratta di oggetti di dimensioni generalmente ridotte; il più grosso NEO è Ganimede, di circa 37 km di diametro. Al momento sono noti oltre 35.000 NEO, di cui solo circa 900 di dimensioni maggiori di 1 km. A causa dei ripetuti incontri con i pianeti sopra menzionati le orbite dei NEO sono instabili e il loro destino finale è principalmente di finire contro il Sole o, in minima parte, contro uno dei pianeti interni, inclusa la Terra. I NEO di dimensioni maggiori di circa 140 m e che hanno un’orbita che li può portare a meno di 0.05 UA dalla Terra vengono classificati come *Potentially Hazardous Asteroids* (PHAs), asteroidi potenzialmente pericolosi. Al momento più di 2200 NEO sono classificati come PHAs ma nessuno di loro pone un rischio reale per il nostro pianeta.

I pianeti interni, e chiaramente la nostra Luna, mostrano segni evidenti degli impatti avvenuti da miliardi di anni a questa parte. Anche la Terra ha subito (e subisce) costantemente un bombardamento da parte di oggetti naturali di varie dimensioni. Per nostra fortuna, l’atmosfera ci scherma da impatti contro corpi di dimensioni ridotte (al di sotto di un paio di decine di metri). Senza bisogno di scomodare il gigantesco impac-

to avvenuto circa 60 milioni di anni fa, in cui un asteroide di circa 10 km di diametro è caduto al largo dello Yucatan causando una catastrofe globale probabilmente corresponsabile dell'estinzione dei dinosauri, esistono comunque migliaia di NEO di taglia sufficientemente grande per penetrare lo schermo atmosferico.

In epoche storiche più recenti ricordiamo l'evento di Tunguska in Siberia, in cui un oggetto di circa 50-60 metri è entrato in atmosfera a circa 27 km/s esplodendo ad un'altezza di 5-10 km. Venne allora liberata un'energia di circa 20 megaton, abbattendo 80 milioni di alberi su di un'area forestale (fortunatamente non abitata) di 2.150 km². Su scala più ridotta, nel 2013, un cosiddetto superbolide di circa 18 m è entrato in atmosfera a 19 km/s sopra la città di Chelyabinsk, negli Urali meridionali, esplodendo a circa 30 km di altezza. L'evento ha liberato un'energia di 400-500 kiloton, ovvero circa 30 volte la bomba di Hiroshima ed ha provocato danni limitati al suolo (grazie all'elevata altezza dell'evento), provocando alcuni feriti lievi a causa per lo più dell'esplosione delle finestre per l'onda d'urto. Statisticamente, eventi del primo tipo (*dinosaur-killer*) avvengono una volta ogni qualche centinaio di milioni di anni, eventi tipo Tunguska ogni migliaia di anni e tipo Chelyabinsk ogni circa 10 anni.

Visto il rischio che i NEO rappresentano per il nostro pianeta essi vengono costantemente monitorati da un'estesa rete di telescopi. Il *Minor Planet Center* a Washington DC raccoglie tutte queste osservazioni, calcola le orbite e mantiene il catalogo di tutti gli oggetti rilevati. A valle di questo, due centri dedicati, uno facente capo all'Agenzia Spaziale Europea (ESA) a Frascati in Italia ed uno all'Agenzia Spaziale Statunitense (NASA) al Jet Propulsion Laboratory in California, calcolano il rischio di impatto collegato a tutti i NEO catalogati per alcuni decenni nel futuro.

Cosa fare quindi se uno di questi asteroidi rivela un rischio di impatto elevato col nostro pianeta?

La figura 1 mostra le misure di mitigazione possibili qualora si individuasse un asteroide in rotta di collisione con la terra. In ascissa abbiamo il *warning time*, ovvero quanto tempo ci separa dal possibile impatto ed in ordinata abbiamo il diametro dell'oggetto. I diversi colori indicano zone, dai confini abbastanza vaghi, in cui una determinata misura deve essere adottata. Il colore blu (*civil defense*) si riferisce a misure di protezione civile da effettuarsi a terra. Come si può notare abbiamo due situazioni opposte: nel caso della fascia parallela all'asse delle ascisse siamo di

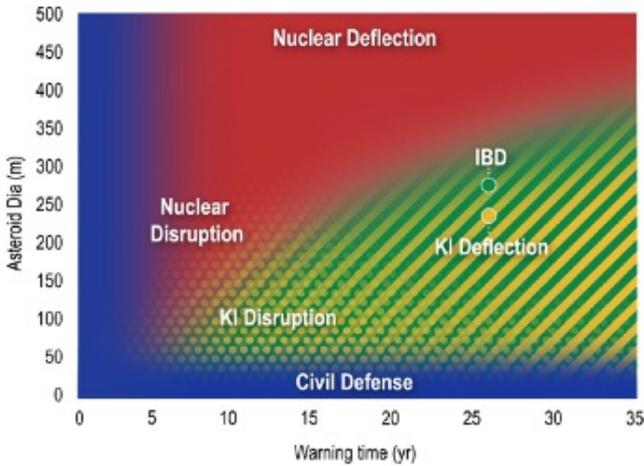


Figura 1. Possibili misure di difesa da un impatto asteroidale in funzione delle dimensioni dell'asteroide e del tempo di preavviso. Fonte dell'immagine: *National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2022. Origins, Worlds, and Life: A Decadal Strategy for Planetary Science and Astrobiology 2023-2032. Washington, DC: The National Academies Press.*⁵⁴

fronte a impatti con oggetti piccoli che, a prescindere dal *warning time*, non possono causare danni su vasta scala e quindi non richiedono interventi nello spazio ma azioni locali come, per esempio, interruzione del traffico aereo, inviti alla popolazione a entrare in rifugi attrezzati o, in casi più gravi, evacuazione di un'area della superficie terrestre. All'estremo opposto, la fascia blu parallela all'asse delle ordinate si riferisce a casi in cui un oggetto massiccio viene scoperto troppo tardi perché sia possibile intraprendere una qualsivoglia misura di difesa spaziale. In questo caso l'unica azione possibile è cercare di limitare i danni a terra, nuovamente con azioni di protezione civile.

Dopodiché, la maggior parte del grafico è occupato da casi in cui si possono applicare tecniche di deflessione o, in casi estremi, di distruzione dell'asteroide. Ricordiamo che quando parliamo di possibile impatto asteroidale, come quelli considerati in questa figura, per lo più non dobbiamo pensare a una roccia che ci viene lanciata addosso con una traiettoria rettilinea diretta verso di noi. I NEA orbitano intorno al Sole, come la Terra, e quindi il possibile impatto avviene, anzitutto, quando le orbite

della Terra e dell'asteroide si incrociano e, in particolare, quando vi è una coincidenza temporale, ovvero quando il nostro pianeta e l'asteroide si trovano contemporaneamente nei pressi del punto di incrocio orbitale. Pertanto, per deflettere un asteroide, è sufficiente sfasare questa coincidenza temporale rallentando o accelerando di pochissimo il suo moto orbitale in modo che esso passi al punto di incrocio appena dopo o appena prima del passaggio della Terra (tipicamente è necessario anticipare o ritardare l'arrivo dell'asteroide al punto di incrocio orbitale di circa 10 minuti per essere certi di evitare l'impatto, tenendo conto delle inevitabili incertezze e dell'effetto di focalizzazione gravitazionale della Terra che ne aumenta la sezione d'urto efficace).

Un'analogia possibile è quella in cui due auto si avvicinano ad un incrocio: in questo caso uno dei due autisti rallenta o accelera in modo da evitare di impegnare l'incrocio contemporaneamente all'altra vettura (ovviamente nel caso planetario l'unica "vettura" che può cambiare la sua velocità è l'asteroide, dal momento che non è possibile modificare l'orbita del nostro pianeta). Quanto prima una delle due vetture inizierà a rallentare, tanto meno brusca sarà la frenata necessaria.

Tornando alla Figura 1, la zona gialla e verde si riferisce a casi in cui il warning time è sufficientemente lungo e la dimensione degli asteroidi relativamente ridotta (da decine a poche centinaia di metri). In questi casi è possibile cercare di deflettere l'asteroide dalla traiettoria di impatto con metodi dinamici. L'acronimo IBD indica la tecnica dell'*Ion Beam Deflection*: l'asteroide viene deviato dalla sua traiettoria originaria grazie ad una sonda che lo affianca, lo segue per lungo periodo e lo colpisce con gli ioni espulsi dal suo motore. Questo genera una lieve spinta che, se prodotta per un tempo sufficientemente lungo, è in grado di deviare leggermente l'asteroide.

L'altra tecnica di deflessione considerata in questi casi è quella dell'impattatore cinetico (KI, *Kinetic Impactor*): una sonda spaziale viene lanciata ad alta velocità contro l'asteroide e grazie all'impulso trasmesso con l'urto ne cambia leggermente la traiettoria. Se effettuata sufficientemente in anticipo, questa deviazione minima della traiettoria si accumula nel tempo ed al momento dell'incrocio orbitale l'asteroide sarà sufficientemente sfasato da evitare l'impatto. In caso di oggetti abbastanza piccoli e con warning time ridotti viene presa in considerazione anche la possibilità di distruggere l'asteroide con un impatto altamente energetico. Si tratta anche qui di una situazione estrema in genere non desidera-

bile perché subentra poi il problema dell'indeterminatezza delle dimensioni e dell'orbita successiva dei frammenti post-impatto.

Infine, abbiamo la zona rossa: l'arma nucleare. Qualora l'asteroide sia troppo grosso o il warning time troppo ridotto per utilizzare le tecniche appena descritte, l'ipotesi è di lanciare un potente ordigno nucleare nello spazio. Nel caso di oggetti relativamente piccoli (ma non così piccoli da poter essere mitigati a terra) e con brevi warning time si ipotizza di distruggere l'asteroide tramite l'esplosione nucleare. Negli altri casi relativi alla zona rossa invece l'idea è, ancora una volta, di deviare l'asteroide. Ciò però non avviene tramite l'onda d'urto dell'esplosione. La bomba verrebbe fatta esplodere in prossimità della superficie del corpo. I neutroni energetici e le radiazioni ionizzanti rilasciate vaporizzano il materiale dell'asteroide che viene quindi eiettato, ad alta velocità, dalla superficie. Questo materiale espulso trasmette, grazie alla terza legge di Newton, un momento in direzione opposta al suo moto, modificando così la traiettoria dell'asteroide, comportandosi come un razzo posizionato sulla superficie dell'asteroide.

Quanto detto sopra rappresenta il risultato di calcoli teorici e simulazioni. Come accennavamo sopra, nell'immagine i contorni che separano le diverse regioni colorate sono volutamente vaghi. Molte sono le incertezze nel quadro delineato dalla nostra figura.

Consideriamo, per esempio, il caso di una deflessione. Un'incognita fondamentale si riferisce a quella che potrebbe essere la risposta di un corpo roccioso, come un tipico NEA, ad un impatto ad altissima velocità contro una sonda. Da terra, tramite tecniche spettroscopiche, è possibile conoscere la composizione superficiale di un asteroide ma è molto difficile inferire con certezza il suo stato fisico. In generale, sappiamo che il livello di coesione del materiale roccioso che compone un asteroide è estremamente basso. In particolare, per una roccia terrestre possiamo avere valori della coesione dell'ordine dei chilo-pascal (il pascal, Pa, è l'unità di misura della pressione ed è equivalente ad un newton su metro quadro).

Da osservazioni teoriche sulle velocità di rotazione intorno al loro asse e per i pochi asteroidi di cui abbiamo evidenza diretta, i valori della coesione sono di diversi ordini di grandezza inferiori e possono variare da circa 1 Pa a poche decine di Pa. Questo significa che siamo di fronte ad aggregati di rocce sostanzialmente tenuti insieme dall'attrazione gravitazionale reciproca (in inglese vengono chiamati "*rubble piles*"). Un cor-

po di questo tipo appoggiato sulla superficie terrestre e sottoposto alla nostra gravità si sfalderebbe. Esistono quindi alcuni test di impatti ad ipervelocità effettuati a terra e simulazioni con complessi codici di calcolo che cercano di imitare le condizioni limite di un piccolo corpo celeste ma (fino a pochi mesi fa) mancava un esperimento su scala reale che mettesse un punto fermo su cui calibrare le simulazioni e gli esperimenti di laboratorio.

Per ovviare a questa mancanza, all'inizio degli anni 2000, Andrea Milani (1948–2018), un matematico dell'Università di Pisa, ideò una missione spaziale per effettuare il primo test di deviazione di un asteroide. La missione si chiamava *Don Quijote* e consisteva in due sonde collaborative. Una, Don Quijote, che doveva essere lanciata contro un NEO (quindi con la tecnica dell'impattatore cinetico) così come il temerario e incosciente cavaliere della Mancha si lanciava contro i mulini a vento. L'altra, chiamata Sancho Panza, doveva viaggiare ad una distanza di sicurezza e, come il saggio scudiero, osservare le gesta gloriose del cavaliere. Ovvero, in questo caso, riprendere immagini dell'impatto e fornire misure accurate della posizione dell'asteroide in seguito all'evento.

Sulla scia di questi studi preliminari, l'ESA e la NASA conclusero un accordo per una missione congiunta, chiamata AIDA (*Asteroid Impact and Deflection Assessment*) che vedeva in campo due missioni. Una a guida NASA, con l'impattatore cinetico e l'altra a guida ESA con la sonda per la ricognizione e la misura dell'evento. Purtroppo, la genesi di una missione spaziale è sempre travagliata e spesso i problemi economici e politici sono altrettanto difficili da risolvere di quelli tecnici. La missione europea non venne finanziata e gli americani decisero quindi di procedere da soli con la missione da impatto.

Ma a questo punto veniva a mancare un pezzo fondamentale del disegno di Milani. Il compito di Sancho era non solo quello di osservare ma anche quello di permettere una misura estremamente accurata della posizione dell'asteroide deviato (ricordiamoci che la deflessione è veramente minima e si accumula poi nel tempo). Era ovviamente possibile sfruttare le osservazioni da terra per determinare la nuova posizione dell'asteroide deviato ma si correva il rischio di non avere misure sufficientemente accurate e significative per molto tempo post-impatto. A questo punto Andy Cheng, uno scienziato statunitense degli Applied Physics Laboratories della John Hopkins University (APL-JHU), propose una brillante soluzione a questo problema.

La missione DART: Double Asteroid Redirection Test

L'impatto non sarebbe stato contro un asteroide *singolo*, bensì contro la luna di un sistema asteroidale binario. Anche gli asteroidi, così come i pianeti, possono avere dei satelliti, ovvero oggetti più piccoli che orbitano intorno ad un asteroide centrale più grosso. Qual era il vantaggio di questo disegno di missione?

Occorre fare una breve digressione sulla dinamica orbitale e, in particolare, sulle fondamentali leggi enunciate dall'astronomo tedesco Johannes Kepler. Ne l'*Harmonice Mundi* (1619) Kepler enuncia la sua terza legge che regola il moto di due corpi orbitanti: "I quadrati dei periodi orbitali stanno tra loro come il cubo delle distanze medie". Come ci aiuta questo nella nostra misura della deflessione asteroidale?

Osservando da Terra il sistema binario è possibile determinare con grande accuratezza il periodo orbitale del satellite tramite telescopi ottici, sfruttando le eclissi mutue tra i due corpi (con la tecnica delle curve di luce) o con l'utilizzo di potenti radar planetari. L'impatto della sonda contro il piccolo satellite avrebbe poi cambiato l'orbita dello stesso intorno all'asteroide centrale. Misurando successivamente, post impatto, il nuovo periodo orbitale del satellite, grazie alla terza legge di Kepler, siamo in grado di calcolare di quanto è variata la distanza media del satellite dal corpo centrale. Dal momento che la velocità orbitale è inversamente proporzionale alla (radice quadrata della) distanza orbitale dal corpo centrale, questo ci fornisce una misura della variazione di velocità del satellite a seguito dell'impatto, ovvero la quantità che andiamo cercando nel nostro esperimento (torneremo su questo punto più avanti).

Come bersaglio della missione è stato scelto il sistema binario composto dall'asteroide primario Didymos di circa 765 metri di diametro e dal satellite Dimorphos di circa 160 metri di diametro. Didymos gira intorno al Sole su di un'orbita allungata (con eccentricità di 0,38385) ad una distanza media di 1.6442 UA. La luna Dimorphos ruotava, prima dell'impatto, intorno a Didymos su un'orbita circolare di circa 1,2 km di raggio ed un periodo di circa 11,921 ore (la Figura 4 mostra i due asteroidi come ripresi dalla sonda americana in fase di avvicinamento). È bene sottolineare che la scelta di questo specifico asteroide è stata motivata anche dal fatto che il sistema di Didymos non presentava alcun rischio di impatto contro la Terra né prima né, come evidenziato da tutte le simu-



Figura 2. A sinistra, uno schema della sonda DART con evidenziati la telecamera DRACO, utilizzata per la ripresa delle immagini e per il puntamento, il sistema SMART NAV utilizzato per la guida autonoma, il motore a propulsione ionica NEXT-C e la sonda italiana LICIACube, alloggiata all'interno di DART fino all'arrivo a Didymos. A destra, un'immagine di DART in fase di assemblaggio agli APL-JHU. Sul lato frontale della sonda si può notare in alto a destra la scatola in cui è stata riposta LICIACube per la fase di crociera (Immagini: NASA/John Hopkins APL).

lazioni, dopo l'impatto. Era nata la missione DART (*Double Asteroid Redirection Test*) [1].

Restava però il problema dell'altro compito di Sancho: osservare, riprendere immagini dell'impatto, essenziali per capire a fondo la fisica dell'evento. Per questo l'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) si offrì di collaborare mettendo a disposizione una piccolissima sonda (un cosiddetto Cubesat) che doveva rimanere all'interno della sonda madre DART fino a pochi giorni prima dell'impatto, per essere poi rilasciata e viaggiare a distanza di sicurezza riprendendo decine di immagini dell'evento. Sulla base di un accordo bilaterale NASA-ASI è stata quindi sviluppata, dalla società Argotec, la sonda LICIACube (*Light Italian Cubesat for Imaging of Asteroids*). La parte scientifica della missione LICIACube è stata poi affidata ad un numeroso gruppo di università ed enti di ricerca italiani sotto la guida dell'Istituto Nazionale di Astrofisica (INAF). A questo punto la missione era pronta per il lancio.

Con i tempi prolungati della politica e della diplomazia, anche scientifica, alla fine l'ESA ha approvato e dato il via alla sua parte della collaborazione AIDA. La missione Hera partirà nel 2024 alla volta del sistema astero-

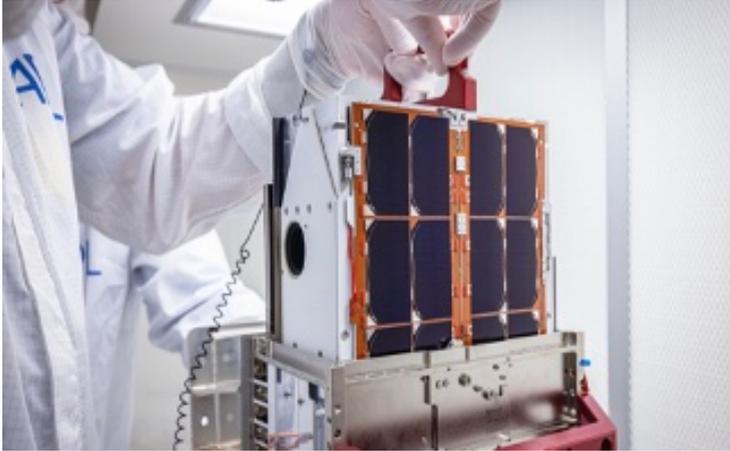


Figura 3: la sonda LICIACube, parzialmente estratta dall'alloggiamento per la fase di crociera, con i pannelli solari riposti per il lancio (Immagine: ASI/NASA/APL).

ideale di Didymos, che raggiungerà nel 2026 per fermarsi in orbita intorno ad esso e completare il successo di DART fornendo una serie di dati fondamentali per capire appieno cosa è avvenuto a seguito dell'impatto. Come DART con LICIACube, Hera trasporterà al suo interno due cubesat. Uno di questi due minisatelliti è stato rinominato "Milani" in onore del grande meccanico celeste pisano, padre intellettuale dell'esperimento di deflessione.

Lancio e impatto

La Figura 2 mostra la sonda DART in fase di preparazione per il lancio. Si trattava di una sonda relativamente semplice dal momento che il suo compito principale era di schiantarsi contro Dimorphos. Tuttavia, conteneva alcune componenti sperimentali, ad altissima tecnologia. Nel pannello di sinistra in particolare notiamo la camera DRACO utilizzata per la navigazione e per l'acquisizione di immagini scientifiche. Il sistema di guida SMART-NAV era in grado di individuare autonomamente il bersaglio all'interno del campo stellare osservato, puntare verso il sistema binario, discriminare Dimorphos da Didymos e, infine, centrare il primo con grandissima accuratezza. Da notare anche gli innovativi pannelli so-

lari srotolabili ed il motore sperimentale a propulsione ionica NEXT-C, di fatto non utilizzato sia per l'eccezionale accuratezza nel puntamento ottenuta con le manovre tradizionali sia per un temuto malfunzionamento che avrebbe potuto compromettere la missione.

La sonda italiana LICIAcube era alloggiata in un "cassetto" sul lato di DART, da cui è stata espulsa 15 giorni prima dell'impatto. La Figura 3 ci mostra LICIAcube mentre viene inserita nel suo alloggiamento. Si tratta di un mini-satellite di dimensioni $10\text{ cm} \times 20\text{ cm} \times 30\text{ cm}$, equipaggiato con due telecamere, una a largo campo (LUKE) ed una campo ristretto (LEIA), dotato di un apparato propulsivo, unito ad un sistema di puntamento autonomo in grado di mantenere il bersaglio nel campo di vista delle camere.

DART è stata lanciata il 24 novembre 2021 con un razzo Falcon 9 dal poligono di Vandenberg, in California. Viaggiando su un'orbita interplanetaria, che non si è mai discostata troppo da quella della Terra, ha impattato Dimorphos alle 23:14:24 UTC del 26 settembre 2022 quando il sistema asteroidale si trovava vicino alla distanza minima dalla Terra, a circa 11 milioni di km. Questa configurazione orbitale al momento dell'impatto era stata studiata di proposito per sfruttare la minore distanza al fine di ottenere immagini e misurazioni telescopiche più accurate.

LICIAcube è stata rilasciata 291 giorni dopo il lancio ed ha seguito, guidata da Terra, una traiettoria simile a DART che l'ha portata ad un passaggio ravvicinato (*fly-by*) con Dimorphos 168 secondi dopo l'impatto, alla distanza minima (*closest approach*) di circa 58 km. A partire da 29 secondi dopo l'impatto, LICIA ha cominciato ad acquisire immagini dell'evento, da diverse angolazioni, mentre sorpassava ad alta velocità il sistema asteroidale. Sono state scaricate a Terra oltre 420 immagini [2,3]. Oltre alla sonda italiana, una vastissima rete di telescopi terrestri e spaziali (Hubble Space Telescope e James Web Telescope) hanno osservato l'evento.

L'impatto, guidato dal sistema di navigazione autonoma di DART, è avvenuto a 25 m dal centro della figura ellissoidale dell'asteroide, alla velocità di circa 6.1 km/s. La massa della sonda al momento dell'impatto era di 579 kg. Si è scelto di avere un impatto frontale, cioè di urtare Dimorphos in direzione opposta al suo moto orbitale. Il motivo non era quello di sfruttare la velocità orbitale di Dimorphos per aumentare l'e-

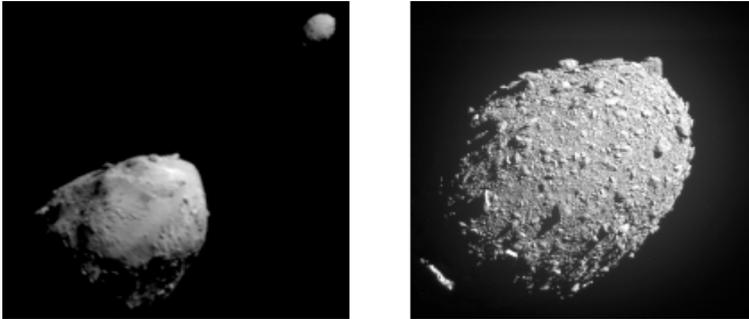


Figura 4. A sinistra: il sistema asteroidale binario con Didymos in primo piano e la luna Dimorphos in alto a destra. Immagine presa dalla telecamera DRACO di DART in fase di avvicinamento. A destra: l'asteroide Dimorphos ripreso da DRACO 11 secondi prima dell'impatto. Si può notare la struttura tipica dell'aggregato di rocce (rubble pile) descritto nel testo. (Immagini: NASA/John Hopkins APL).

nergia (le velocità si sommano vettorialmente per cui un urto frontale comporta una maggiore energia cinetica).

Infatti, data l'esiguità delle masse coinvolte, Dimorphos ruota intorno a Didymos con una bassissima velocità orbitale di circa 17.42 cm/s (per riferimento, ricordiamo che la velocità media della Luna intorno alla terra è di 1.022 km/s). La scelta dell'urto frontale è stata dettata dalla volontà di avere come effetto finale un aumento del periodo orbitale di Dimorphos. Come abbiamo ricordato precedentemente, il periodo pre-impatto era di circa 11.921 ore. Il rischio era che, in un impatto retrogrado, il periodo post-impatto si avvicinasse troppo alle 12 ore. Un fenomeno astronomico con una tale periodicità esatta è più problematico da osservare perché si rischia di andare a vedere il sistema sempre nella stessa configurazione relativa (per come sono strutturate le osservazioni astronomiche) e quindi perdendo informazione.

Giova ricordare che la gravità genera un apparente paradosso nella dinamica orbitale. Il nostro urto frontale toglie energia al sistema. Come abbiamo detto precedentemente questo comporta una diminuzione del semiasse maggiore dell'orbita e quindi, per la terza legge di Kepler, una riduzione del periodo orbitale. Ciò vuol dire che Dimorphos ora ruota più

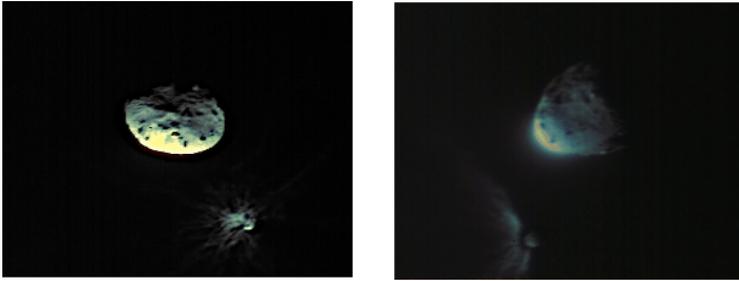


Figura 5: Due immagini riprese dalla telecamera LUKE di LICIAcube. La foto a sinistra è relativa a circa 3 minuti dopo l'impatto, 8 secondi prima del *closest-approach*, da una distanza di 76 km. In basso a destra è visibile Dimorphos con l'insieme delle particelle espulse dall'impatto vista quasi frontalmente rispetto alla posizione della sonda. Nell'immagine a destra, ripresa da un'altra angolazione, 7 secondi dopo il *closest approach*, si nota invece la forma a cono della nube delle particelle espulse. Si può notare anche una fascia scura che separa il corpo di Dimorphos dal cono delle particelle, dovuta all'ombra del cono stesso proiettata sulla superficie dell'asteroide (Immagini: ASI/NASA).

vicino al corpo centrale, in un tempo minore e con una maggiore velocità orbitale.

L'impatto ha causato una diminuzione istantanea della componente della velocità lungo l'orbita di circa 2.5 mm/s portando ad una diminuzione del periodo orbitale di Dimorphos di circa 33 minuti.

Questi valori, misurati post-impatto grazie ai telescopi ed ai radar terrestri, ci permettono di calcolare quello che è il principale risultato atteso dalla missione DART, dal punto di vista della difesa planetaria: il cosiddetto fattore Beta (β). Come si vede dalla figura 5, l'impatto ha prodotto un enorme cono di particelle espulse in direzione contraria rispetto alla sonda incidente (detti *ejecta*).

Come accennato precedentemente, queste particelle espulse a velocità che possono andare da qualche km/s, per gli oggetti più piccoli, a pochi cm/s trasportano un momento (mv , dove m è la massa della particella e v è la sua velocità vettoriale) che spinge l'asteroide, in base al principio di azione e reazione, analogamente a quanto accade con il gas che esce dall'ugello di un razzo. Il fattore β ci dice di quanto questo momento tra-

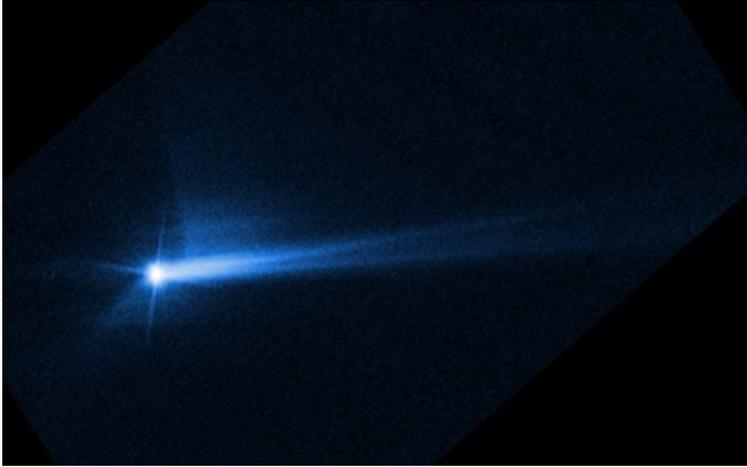


Figura 6: La coda generata dall'impatto di DART, composta da particelle di polvere e detriti di dimensioni variabili da pochi micron ad alcuni cm spinte dalla pressione di radiazione, osservata dall'Hubble Space Telescope, 12 giorni dopo l'impatto. (Immagine: NASA/ESA/STScI/Hubble).

sportato dagli *ejecta* va ad aumentare l'effetto del semplice urto anelastico dovuto allo schianto della sonda. Un valore di $\beta = 1$ corrisponde ad un caso in cui non si generano degli *ejecta* mentre, per es., $\beta = 2$ significa che l'effetto degli *ejecta* ha sostanzialmente raddoppiato la spinta dovuta all'urto. Il fattore β viene definito tramite l'equazione della conservazione della quantità di moto (ricordiamo che nel caso di un urto anelastico la quantità conservata non è l'energia cinetica, in quanto abbiamo trasformazione di energia cinetica in calore dovuta alla deformazione e frammentazione del proiettile), data da:

$$M\Delta\mathbf{v} = m\mathbf{U} + m(\beta - 1)(\hat{\mathbf{E}} \cdot \mathbf{U})\hat{\mathbf{E}}$$

Dove M è la massa di Dimorphos, $\Delta\mathbf{v}$ è il cambiamento di velocità orbitale dell'asteroide a seguito dell'impatto, m è la massa di DART, \mathbf{U} è la velocità di DART relativa a Dimorphos al momento dell'impatto e $\hat{\mathbf{E}}$ è la direzione del vettore momento della quantità di moto degli *ejecta*. Quindi $M\Delta\mathbf{v}$ è il momento trasferito a Dimorphos, $m\mathbf{U}$ è il momento incidente di DART e il termine finale nell'equazione è il momento netto degli *ejecta* scritto in termini del momento incidente della sonda.

A parte β , tutte le quantità presenti nell'equazione sono o note (per es., la massa della sonda al momento dell'impatto) o deducibili e misurabili dai dati della missione (per es., il cambiamento di velocità o il vettore velocità incidente della sonda), ovviamente con alcune incertezze su cui non è possibile ora soffermarsi. È stato quindi possibile calcolare β che è risultato essere compreso tra 2.3. e 4.9. Il suo valore esatto dipende dalla massa del corpo impattato. Dalle misure effettuabili con la missione DART non è stato possibile determinare la massa di Dimorphos.

Una stima di questa quantità è ricavabile dal suo volume (misurato grazie alle immagini) dato un valore plausibile della sua densità. Si assume che Dimorphos abbia la stessa densità di Didymos (la cui massa invece si può determinare con relativa accuratezza), ovvero $2,4 \text{ g/cm}^3$. Con questa assunzione fondamentale, i calcoli danno un valore di $\beta \approx 3,61$ [4]. La conferma esatta di questo risultato si avrà solo quando la missione Hera avrà raggiunto il sistema e sarà in grado di misurare con elevata accuratezza la massa di entrambi i componenti del sistema binario.

Parte del materiale espulso dall'impatto, polvere e rocce di dimensioni variabili da pochi micron ad alcuni centimetri, spinte dalla pressione di radiazione, sono andate a formare una coda, simile a quella delle comete, lunga alcune decine di migliaia di km (Figura 6) [5]. La coda persiste anche al momento della scrittura di questo testo, testimoniando della presenza di un meccanismo di produzione continuativa di polvere causato probabilmente da particelle inizialmente intrappolate all'interno del sistema binario e ad urti secondari, contro una delle due componenti, di rocce emesse dall'impatto originario e rimaste legate gravitazionalmente all'interno del sistema.

La missione DART/LICIACube ha fornito una prima prova della capacità dell'umanità di difendersi dal rischio posto dai NEO. Grazie anche alle immagini ottenute da LICIACube, ha fornito inoltre una serie di informazioni di altissimo interesse scientifico per lo studio dei corpi minori del Sistema Solare. Il successo della piccola sonda italiana ha poi aperto una nuova via all'esplorazione planetaria mostrando le enormi potenzialità dei cubesat in questo ambito.

Riferimenti bibliografici

- [1] A.S. Rivkin, A.F. Cheng, *Planetary defense with the Double Asteroid Redirection Test (DART) mission and prospects*, Nat. Commun. **14**, 1003 (2023).⁵⁵
- [2] E. Dotto, A. Zinzi, *Impact observations of asteroid Dimorphos via Light Italian CubeSat for imaging of asteroids (LICIAcube)*, Nat. Commun. **14**, 3055 (2023).⁵⁶
- [3] E. Dotto, J.D.P. Deshapriya, I. Gai, P.H. Hasselmann, E. Mazzotta Epifani, G. Poggiali, A. Rossi *et al.*, *The Dimorphos ejecta plume properties revealed by LICIAcube*, in corso di revisione (2023).
- [4] A.F. Cheng, H.F. Agrusa, B.W. Barbee *et al.*, *Momentum transfer from the DART mission kinetic impact on asteroid Dimorphos*, Nature **616**, 457 (2023).⁵⁷
- [5] J.Y. Li, M. Hirabayashi, T.L. Farnham, *et al.*, *Ejecta from the DART-produced active asteroid Dimorphos*, Nature **616**, 452 (2023).⁵⁸

Tanto tempo fa... In una galassia nana, non troppo lontana!

Stefano Ciabattini, Stefania Salvadori

“Siamo soli nell’Universo?” Probabilmente, no.

Eppure, per averne la certezza dobbiamo trovare mondi abitabili e le tracce della vita oltre la Terra e il Sistema Solare, attorno ad altre stelle appartenenti alla nostra Galassia, la Via Lattea. In questo modo sono implicitamente escluse tutte le forme di vita esistite nel passato e in altre galassie, e che sono ormai estinte. Dobbiamo infatti tenere conto che la vita sulla Terra è apparsa poco dopo la formazione del nostro pianeta e del Sole, avvenuta 4 miliardi e mezzo di anni fa quando la Via Lattea esisteva già da circa 8 miliardi di anni.

La nostra Galassia infatti è molto antica, e il sistema solare potrebbe non essere stato il primo sistema planetario a formarsi in condizioni favorevoli alla nascita e allo sviluppo della vita. Estendendo ulteriormente l’orizzonte, nell’Universo si osservano miliardi di galassie, alcune relativamente vicine e addirittura più antiche della nostra. Non possiamo quindi escludere l’ipotesi che la Via Lattea non sia stata la prima galassia a diventare abitabile.

Poniamoci, dunque, la seguente domanda: quali galassie hanno raggiunto, per prime, le condizioni necessarie per la nascita e lo sviluppo della vita? Chiameremo tali galassie le “prime galassie abitabili”.

La ricerca di altri mondi abitabili

Iniziamo inquadrando il problema della ricerca di altre forme di vita nella nostra Galassia.

La Via Lattea contiene circa 400 miliardi di stelle, e si pensa che molte di queste possano essere dotate di pianeti. Infatti, si osservano sempre più stelle attorno a cui viene rivelata la presenza di un sistema planetario. Il primo esopianeta, ovvero un pianeta attorno a una stella diversa dal Sole, fu scoperto⁵⁹ nel 1995 da Michel Mayor e Didier Queloz; ad oggi⁶⁰ se ne conoscono ben 5504, distribuiti in 4063 sistemi planetari di cui 877 multipli, ovvero con più pianeti attorno alla stella ospite.

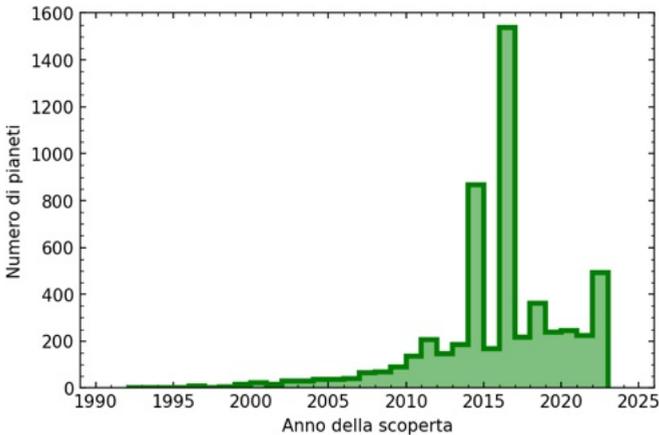


Figura 1: Numero di esopianeti rivelati e confermati in funzione dell'anno della scoperta. Da notare il progressivo aumento del numero di esopianeti noti, e in particolare i due picchi attorno all'anno 2015, frutto della missione Kepler della NASA. Il grafico è stato realizzato dagli autori, utilizzando i dati aggiornati a Settembre 2023 e disponibili online.⁶¹

In Figura 1 viene mostrato il numero di esopianeti scoperti di anno in anno fino ad oggi. Come vediamo, nell'ultimo decennio sono stati confermati circa 200 pianeti ogni anno. In particolare, attorno all'anno 2015, c'è stato un enorme contributo da parte della missione Kepler della NASA, appositamente dedicata a questo scopo. Questi dati osservativi suggeriscono che la formazione di pianeti attorno a una stella sia un fenomeno alquanto comune.

Considerando inoltre che circa il 20% dei sistemi planetari noti sono sistemi multipli, il numero totale di pianeti nella nostra Galassia potrebbe essere pari, se non addirittura superiore, al numero totale di stelle: oltre 400 miliardi. Tuttavia, la vita per come la conosciamo noi sulla Terra richiede una stella ospite con caratteristiche simili a quelle del nostro Sole, in particolare la sua massa⁶².

Tali stelle vengono appunto dette "di tipo Sole", hanno una massa compresa tra metà e una volta e mezza quella solare, e rappresentano circa il 20% delle stelle della Galassia. Si stima che tra esse, una su cinque potrebbe ospitare un pianeta simile alla Terra [1]. Inoltre, risulta che

almeno una su dieci tra queste "Terre gemelle" potrebbe effettivamente trovarsi nelle condizioni favorevoli allo sviluppo della vita [2]. Da tali stime parrebbe dunque che la Via Lattea possa ospitare fino a 1,5 miliardi di mondi abitabili (e abitati), dove potrebbe essere comparsa la vita. Un numero decisamente grande.

D'altra parte, la vita sul nostro pianeta sembra essere il risultato di un lungo processo di evoluzione, reso possibile dalla combinazione di particolari condizioni. Innanzitutto, la Terra si trova all'interno della cosiddetta zona abitabile, ovvero la regione orbitale in cui la temperatura alla superficie di un pianeta permette la presenza di acqua liquida. Dopo di che, per mantenere l'acqua stabile allo stato liquido, c'è bisogno di una atmosfera sottile e non troppo rarefatta che generi pressione alla superficie, così da poter formare gli oceani. L'acqua è l'ingrediente fondamentale per la vita: i primi processi biologici hanno avuto luogo proprio in virtù del fatto che le molecole reagenti erano immerse in acqua, il solvente per eccellenza.

Oltre alla presenza dell'atmosfera, anche la sua composizione gioca un ruolo importante. Infatti, per lo sviluppo della vita è necessaria una protezione contro la radiazione ultravioletta proveniente dalla stella ospite. Nel caso terrestre tale protezione è data dallo strato atmosferico di ozono (O_3), molecola che si forma a partire da quella di ossigeno (O_2). Quest'ultima può andare incontro a diverse reazioni chimiche con le altre molecole. Quindi, in assenza di un meccanismo su scala planetaria che rifornisca l'atmosfera di ossigeno, la sua abbondanza si esaurirebbe in tempi molto brevi.

Di conseguenza la protezione fornita dallo strato di ozono verrebbe meno, esponendo così le forme di vita sulla superficie a quantità letali di radiazione ultravioletta. La presenza della biosfera terrestre, cioè l'insieme degli ambienti su scala planetaria in cui è presente la vita, fornisce all'atmosfera il rifornimento di ossigeno necessario attraverso la fotosintesi clorofilliana delle piante. Queste, infatti, utilizzano l'energia luminosa del Sole per convertire le molecole di acqua (H_2O) e di anidride carbonica (CO_2) in sostanze organiche nutrienti (glucosio), producendo molecole di ossigeno (O_2) e rilasciandole in atmosfera.

Giunti a questo punto ci troviamo di fronte a un apparente paradosso. Da una parte, la presenza dello strato di ozono permette la formazione di una biosfera, proteggendola dalla radiazione ultravioletta del Sole; dal-

l'altra, è proprio la biosfera a produrre ossigeno, e quindi ozono, da accumulare in atmosfera. È il classico problema: "è nato prima l'uovo o la gallina?" Il paradosso svanisce se teniamo conto della presenza di grandi quantità di acqua sul nostro pianeta.

Non solo, quindi, l'acqua ha agito da catalizzatore per le reazioni chimiche alla base dei processi biologici, ma nelle profondità degli oceani le forme di vita hanno trovato una naturale protezione dalla luce ultravioletta del Sole. Lentamente, la vita ha saturato di ossigeno gli oceani, dai quali è stato poi emesso in atmosfera, reagendo con le rocce delle terre emerse fino alla loro completa saturazione. A questo punto la concentrazione atmosferica di ossigeno è aumentata, formando così lo strato di ozono e permettendo lo sviluppo della biosfera terrestre.

Questo intero processo deve essere stato estremamente lento. Le più antiche forme di vita di cui si hanno tracce risalgono infatti a circa 4 miliardi di anni fa, mentre sappiamo che l'abbondanza atmosferica di ossigeno ha raggiunto i valori odierni solo negli ultimi 500 milioni di anni [3]. Il tempo necessario per il completo sviluppo della biosfera sarebbe, dunque, dell'ordine di 4 miliardi di anni, e affinché esso giunga a compimento è necessario che durante tale lasso di tempo non si verificano eventi astrofisici in grado di ridurre l'abbondanza di ozono in atmosfera. Questo potrebbe esporre la biosfera alla radiazione ultravioletta della stella ospite, rendendo il pianeta definitivamente sterile.

Per tutti questi motivi, è possibile che la formazione di una biosfera su mondi abitabili sia un fenomeno estremamente raro, nonostante il numero enorme di stelle nella nostra Galassia. Eppure, non avendo ancora trovato tracce della vita fuori del Sistema Solare, siamo costretti ad utilizzare la Terra come modello unico (il cosiddetto principio antropico), senza poter stabilire su base osservativa quanto sia effettivamente frequente la formazione di biosfere nella Galassia.

L'abitabilità su scala galattica

Negli ultimi due decenni, in attesa di trovare un altro mondo dove sia presente una biosfera, alcuni lavori teorici pionieristici hanno formulato un metodo per individuare le regioni della Via Lattea più promettenti per quanto riguarda la ricerca di mondi abitabili: la teoria dell'Abitabilità Galattica [4,5]. Alla base vi è l'idea che, conoscendo la storia evolutiva di una galassia, sia possibile capire dove e quando si siano verificate le

condizioni per la formazione di mondi come la Terra. Con questo approccio si può stimare, ad esempio, la probabilità che in diverse regioni della Via Lattea, e al variare del tempo, possano essersi formate stelle i cui pianeti si trovino in condizioni favorevoli allo sviluppo di una biosfera.

La prima condizione è che una stella, quando nasce, possa formare anche il suo sistema planetario. I pianeti, in particolare quelli simili alla Terra, sono per lo più fatti di *metalli*, termine con cui in Astrofisica si intendono tutti gli elementi più pesanti dell'elio. È quindi necessario che il gas, da cui i pianeti (e la stella) si formano, contenga una quantità minima di metalli. Come vedremo più avanti, i metalli vengono forgiati all'interno delle stelle e diffusi nel gas circostante alla fine della loro vita.

La seconda condizione da considerare è che, durante i 4 miliardi di anni necessari allo sviluppo di una biosfera, l'incidenza di tutti i fenomeni astrofisici che possono contribuire alla sua distruzione sia bassa. L'esempio tipico è rappresentato dalle *supernovae*, violente esplosioni associate alla morte di stelle massicce. Queste stelle, infatti, devono produrre molta energia per controbilanciare la loro intensa gravità, esaurendo così la riserva di carburante nucleare (idrogeno ed elio) nel giro, al più, di poche decine di milioni di anni.

Quando non sono più in grado di produrre energia collassano su sé stesse, generando tremende esplosioni stellari. L'immagine in Figura 2 mostra il resto di una di queste esplosioni, situato nella Grande Nube di Magellano. La regione più chiara non è altro che l'onda d'urto, generata dall'esplosione, che si propaga nello spazio. Una volta che il materiale espulso si è raffreddato a sufficienza, esso può mescolarsi con il gas circostante, arricchendo in metalli le vicine regioni di formazione stellare.

Durante questo tipo di eventi, oltre ad essere rilasciata una enorme quantità di luce e ad essere diffusi nel cosmo i metalli prodotti all'interno della stella, vengono anche accelerate particelle con energie elevatissime. Queste particelle, nel caso che investano l'atmosfera di un pianeta in orbita attorno ad una stella vicina, sono in grado di distruggere le molecole che lo schermano dalla radiazione ultravioletta della stella ospite, esponendone improvvisamente la superficie.

Dunque, nel caso in cui l'esplosione di una supernova avvenga entro una distanza minima di "sicurezza" dal pianeta, è possibile che il danno subito dall'atmosfera sia tale da causare una estinzione totale della vita, di-



Figura 2: Resto di supernova N 63A, situato nella Grande Nube di Magellano. L'esplosione di supernova diffonde i metalli, forgiati all'interno della stella, nel mezzo interstellare circostante. Entro qualche decina di migliaia di anni il gas espulso si raffredda e si mescola al mezzo interstellare, arricchendo di metalli le regioni di formazione stellare circostanti.⁶³

struggendo così l'intera biosfera. Durante la storia della Terra, sembra che alcune estinzioni di massa, se pur parziali, possano essere state innescate da supernovae esplose nelle vicinanze del Sole [6,7].

Abitabilità di galassie nane vicine

A questo punto applichiamo la teoria dell'abitabilità galattica ad altre galassie.

L'astrofisica e la cosmologia ci dicono che le prime galassie a essersi formate nella storia dell'Universo sono le galassie nane, ovvero galassie con masse stellari molto inferiori a quella della Via Lattea, la quale ha una massa in stelle dell'ordine di dieci miliardi di Soli.

Molte delle galassie nane che inizialmente si sono formate sarebbero successivamente andate incontro a processi di fusione con altre galassie,

venendo così distrutte. Si ritiene che in passato le galassie nane fossero incredibilmente numerose, rappresentando la popolazione dominante in tutto l'Universo.

Nel gruppo di galassie di cui fa parte la Via Lattea, il Gruppo Locale, si osservano ad oggi oltre 70 galassie nane, con masse stellari (e luminosità) che vanno da un miliardesimo a un centesimo di quella della Via Lattea [8]. Dalle osservazioni delle loro stelle, è stato possibile stabilire che queste galassie sono molto antiche, con stelle più vecchie di dieci miliardi di anni [9,10]. Per questo, si pensa che le nane del Gruppo Locale siano le superstiti dei processi di fusione tra galassie avvenuti durante l'evoluzione del Gruppo Locale] [11].

Una parte delle galassie nane che osserviamo oggi sono di forma sferica, non hanno gas e dunque non stanno più formando stelle. Queste vengono classificate sulla base della loro luminosità: le Galassie Nane sferoidali classiche, almeno centomila volte più luminose del Sole, e le Galassie Nane Ultra-Deboli, che hanno una luminosità inferiore [12]. Quest'ultime rappresentano le galassie più deboli, antiche e povere di metalli mai scoperte finora. Molte delle galassie nane ultra-deboli sembrano aver formato stelle unicamente nel primo miliardo di anni di vita dell'Universo, trascorrendo i successivi 12 miliardi di anni fino ad oggi in quiescenza, conservando così le tracce fossili dell'evoluzione primordiale dell'Universo [13].

Possiamo dunque chiederci: è possibile che in alcune di queste galassie nane vicine si siano verificate le condizioni per la formazione di mondi abitabili e che su alcuni di essi sia davvero apparsa la vita?

Questa domanda ci ha spinti a studiare l'abitabilità galattica delle galassie nane vicine, sfruttando i dati e le informazioni disponibili per un campione di cinque di esse (due sferoidali classiche e tre ultra-deboli), che orbitano come satelliti della Via Lattea. Per ogni galassia nel campione, abbiamo considerato le cosiddette storie di formazione stellare, ovvero quanto gas viene via via trasformato in stelle durante l'evoluzione di queste galassie. A partire da questa informazione abbiamo calcolato il tasso con cui avvengono gli eventi distruttivi, come ad esempio le supernovae. Quando questo diventa inferiore a un determinato valore di soglia, la galassia entra in una fase durante la quale diventa possibile lo sviluppo di una biosfera.

Dalla nostra analisi risulta che le galassie nane ultra-deboli raggiungono rapidamente tale condizione, dato che cessano la loro attività di supernovae dopo soltanto 1-2 miliardi di anni dal Big Bang. Abbiamo quindi stimato quante delle stelle nate in queste galassie sono anche in grado di formare pianeti.

Secondo le teorie attuali, i pianeti si formano a partire dalla polvere, grani microscopici composti da elementi come il carbonio, il silicio e l'ossigeno. La polvere raccoglie particelle dal gas, incrementando progressivamente le proprie dimensioni a partire da un millesimo di millimetro fino alle decine di chilometri, diventando così il nucleo roccioso di un pianeta. Dunque, al momento della nascita della stella ospite, il gas da cui essa si forma deve essere già arricchito in metalli, di cui la polvere è costituita.

Sulla base delle osservazioni ad oggi disponibili, abbiamo quindi assunto che attorno a stelle con un'abbondanza di metalli pari ad almeno tre millesimi di quella del Sole (che chiameremo "metallicità critica"), si possano formare dei pianeti. Nonostante le galassie nane ultra-deboli siano tra le galassie più povere di metalli, in ognuna delle galassie nel nostro campione sono presenti stelle con un'abbondanza di metalli superiore alla metallicità critica. Dunque, queste galassie potrebbero aver ospitato i primi pianeti.

In definitiva, dalla nostra analisi risulta che le galassie nane ultra-deboli sono i migliori candidati per essere le prime galassie abitabili.

Il caso della galassia nana ultra-debole Boötes I

A questo punto ci possiamo domandare: qual è la probabilità che in una galassia nana ultra-debole si siano effettivamente formate stelle in condizioni tali da permettere lo sviluppo di biosfere?

Per rispondere abbiamo scelto la galassia nana ultra-debole più studiata e con più dati osservativi a disposizione, chiamata Boötes I. Questa galassia è un satellite della Via Lattea, ed è relativamente vicina con una distanza di poco più di 200 mila anni luce⁶⁴ (ovvero 2 miliardi di miliardi di chilometri). Per confronto, si pensi che la galassia di Andromeda, che è la più vicina galassia simile alla nostra, è circa dieci volte più lontana.

Per studiare l'abitabilità di Boötes I abbiamo quindi costruito un modello fisico dettagliato, che ricostruisse la sua storia evolutiva a partire dalla

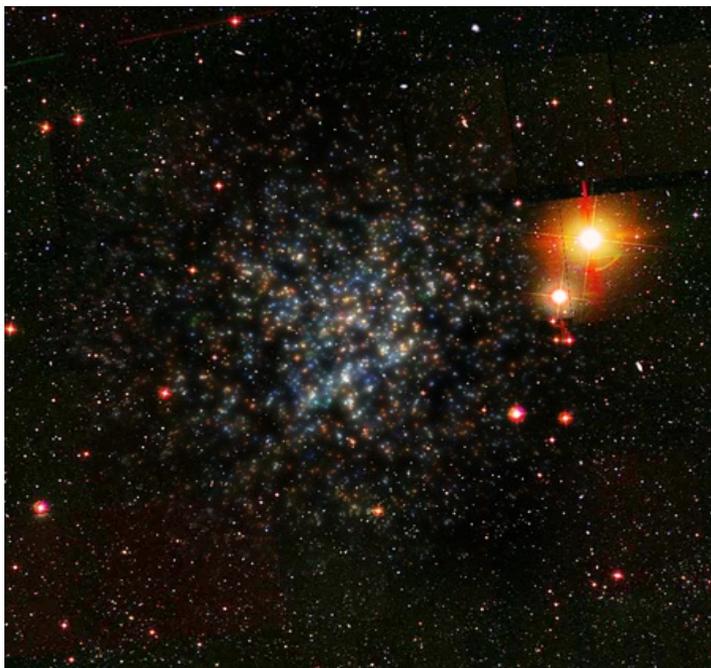


Figura 3: Immagine della galassia nana ultra-debole Boötes I (al centro). Data la luminosità estremamente bassa di questa galassia, le stelle di Boötes I sono state evidenziate artificialmente in luminosità. Fonte:Wikipedia.

formazione, avvenuta circa 500 milioni di anni dopo il Big Bang, fino ad oggi, ovvero per un tempo complessivo di circa 13,3 miliardi di anni. Il nostro modello è anche in grado di seguire la storia di arricchimento chimico di Boötes I, ovvero l'evoluzione nel tempo delle abbondanze degli elementi chimici prodotti all'interno delle stelle e diffusi nel gas attraverso le esplosioni di supernova.

Dal nostro modello risulta che Boötes I ha definitivamente cessato di formare stelle 100 milioni di anni dopo la sua formazione, raggiungendo un livello di eventi distruttivi inferiore al valore di soglia (si veda il paragrafo precedente) poche decine di milioni di anni più tardi, quando l'Universo aveva soltanto 700 milioni di anni!

Risulta inoltre che circa l'1% delle stelle di Boötes I si sono formate in condizioni favorevoli allo sviluppo di una biosfera sulla superficie di un loro pianeta. Questo significa che qualche centinaio di stelle in Boötes I potrebbero ospitare (o aver ospitato) mondi abitabili. Inoltre, facciamo notare che circa un terzo di queste stelle hanno una vita maggiore dell'età dell'Universo: di conseguenza esistono ancora oggi e sono teoricamente osservabili. La relativa vicinanza di queste galassie nane, che orbitano come satelliti attorno alla Via Lattea, le rende infatti le uniche galassie diverse dalla nostra nelle quali sia possibile osservare le singole stelle e studiarne le proprietà.

Tuttavia, è bene notare che ad oggi si riescono ad osservare solo poche decine di stelle in Boötes I, così come nelle altre nane ultra-deboli. Tipicamente queste galassie distano da noi più di 70 mila anni luce (ovvero oltre 660 milioni di miliardi di chilometri) dalla Terra. Purtroppo, a tali distanze non è ancora possibile rivelare la presenza di un pianeta. Nuove opportunità potrebbero presentarsi con i telescopi e con gli strumenti di nuova generazione, come l'*Extremely Large Telescope* (ELT e lo spettrografo ANDES), che con il suo specchio di 39 metri sarà in grado di osservare più lontano e con maggior dettaglio rispetto agli attuali strumenti.

Inoltre, ci sono numerose evidenze [14] che alcune stelle che ad oggi fanno parte della componente stellare diffusa della Via Lattea, l'alone stellare, provengano in realtà da galassie nane che si sono "distrutte" durante il processo di fusione in galassie più grandi. Chissà, dunque, se qualche analogo terrestre nato in antiche galassie nane ultra-deboli non sia entrato, seguendo la sua stella ospite, a fare parte della nostra Galassia?

È questa la nuova domanda che vogliamo affrontare adesso per trovare un riscontro osservativo a quanto abbiamo dimostrato. Ovvero che le galassie nane ultra-deboli potrebbero essere state le prime galassie a diventare abitabili, e dunque che la vita, potenzialmente comparsa nell'Universo primordiale oltre 12 miliardi di anni fa, potrebbe rivelarsi un fenomeno estremamente diffuso non solo nello spazio, ma anche nel tempo.

Riferimenti bibliografici

[1] M. Kunimoto, J.M. Matthews, *Searching the entirety of Kepler data. II. Occurrence rate estimates for FGK stars*, The Astronomical Journal **159**, 248 (2020).

- [2] C.H. Lineweaver, T.M. Davis, *Does the rapid appearance of life on Earth suggest that life is common in the universe?*, *Astrobiology* **2**, 293(2002).
- [3] D.H. Holland Holland, *The oxygenation of the atmosphere and oceans*, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* **361**, 903 (2006).
- [4] G. Ward Gonzalez, D. Brownlee, P. Ward *The galactic habitable zone: galactic chemical evolution*, *Icarus* **152**, 185 (2001).
- [5] C.H. Lineweaver, Y. Fenner, B.K. Gibson, *The galactic habitable zone and the age distribution of complex life in the Milky Way*, *Science* **303**, 59 (2004).
- [6] Fields B., et al., 2020, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117, 21008 D.B. Fields *et al.*, *Supernova triggers for end-Devonian extinctions*, *Proceedings of the National Academy of Sciences* **117**, 21008 (2020).
- [7] A.L. Melott *et al.*, *Did a gamma-ray burst initiate the late Ordovician mass extinction?*, *International Journal of Astrobiology* **3**, 55 (2004).
- [8] E. Tolstoy, V. Hill, M. Tosi. *Star-formation histories, abundances, and kinematics of dwarf galaxies in the Local Group*, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **47**, 371 (2009).
- [9] T.J.L De Boer *et al.*, *The star formation and chemical evolution history of the sculptor dwarf spheroidal galaxy*, *Astronomy & Astrophysics* **539**, A103 (2012).
- [10] M.T. Brown *et al.*, *The quenching of the ultra-faint dwarf galaxies in the reionization era*, *The Astrophysical Journal* **796**, 91 (2014).
- [11] C. Evoli, S. Stefania, A. Ferrara, *The puzzling origin of the 6Li plateau*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters* **390**, L14 (2008).
- [12] D.J. Simon, *The faintest dwarf galaxies*, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **57**, 375 (2019).
- [13] S. Salvadori, Á. Skúladóttir, E. Tolstoy, *Carbon-enhanced metal-poor stars in dwarf galaxies*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **454**, 1320 (2015).



Disegno di Martina Rossi.

Il ciclo del carbonio e il clima di Venere, Terra e Marte

Aldo Piombino

Più di 4 miliardi di anni fa, all'inizio della storia del Sistema Solare Venere, Terra e Marte condividevano la presenza di acqua liquida in superficie e un'atmosfera formata da almeno il 95% di CO₂. Venere e Marte presentano ancora atmosfere dalla composizione simile, ma se quella di Venere è ancora estremamente densa, l'atmosfera marziana è diventata molto tenue e non è ancora chiaro quanto sia stata pesante all'inizio della storia del pianeta. L'atmosfera terrestre attuale è molto diversa, ma chiare prove stratigrafiche e geochimiche indicano che anche questa fosse composta, fino a 2 miliardi e 400 milioni di anni fa, al 95% di CO₂, priva di ossigeno, e con una pressione inferiore a quella odierna [1]. La vita sulla Terra è iniziata almeno 3.8 miliardi di anni fa, e si è evoluta quindi per oltre un miliardo di anni in queste condizioni anossiche.

Anche l'interno dei tre pianeti doveva essere simile e tutti e tre avevano una tettonica globale di qualche forma, probabilmente una tettonica a "coperchio stagnante" (*Stagnant lid*), in cui i movimenti convettivi del mantello non erano in grado di produrre anche i movimenti orizzontali della litosfera tipici della tettonica a placche, che si è poi sviluppata solo sulla Terra.

Le traiettorie delle temperature atmosferiche nei tre pianeti si sono successivamente diversificate, e non di poco: Venere si è riscaldato terribilmente, Marte si è raffreddato ed entrambi hanno perso la loro acqua superficiale. Soltanto la Terra è stata in grado di mantenere temperature tali da consentire la presenza di acqua liquida in superficie, con conseguenze importanti per la sua storia biologica ma anche per quella geologica, che si sono svolte in parallelo, influenzandosi vicendevolmente.

Perché i tre pianeti le cui atmosfere iniziali erano così simili hanno seguito traiettorie termiche, ambientali e chimiche così diverse? E quali sono le conseguenze sulla potenzialità di ospitare forme di vita di questi diversi percorsi?

Dalle analisi e dai modelli sono emersi indizi secondo i quali il motivo fondamentale a lungo termine alla base di queste storie differenti è la

dinamica di un solo elemento, il carbonio, capace di influenzare massivamente le temperature planetarie: a parità di insolazione troppo carbonio nell'atmosfera può rendere il pianeta troppo caldo per poter avere acqua liquida sulla sua superficie, come troppo poco carbonio può rendere il pianeta una palla di ghiaccio: solo il giusto mix fra carbonio atmosferico e insolazione è in grado di mantenere queste condizioni ideali. Se questo succede per un lungo periodo, allora è possibile l'insorgenza della vita sulla superficie e la sua evoluzione.

Acqua liquida nei sistemi stellari

Con il termine "*Zona Goldilocks*" gli astrobiologi individuano la fascia intorno ad una stella nella quale è possibile sulla superficie di un eventuale pianeta la presenza di acqua liquida, considerata generalmente la *conditio sine qua non* per la vita. Il termine deriva da una favola dello scrittore inglese Robert Southey "*Goldilocks and the three bears*": Goldilocks è una bambina che arriva in una casa nel bosco e vi entra, trovando una tavola apparecchiata con 3 piatti pieni di zuppa di orzo. La casa è abitata da tre orsi che volevano fare colazione, ma visto che la zuppa era troppo calda, Papà Orso aveva proposto di fare una passeggiata aspettando che si raffreddasse. Quando Goldilocks è arrivata i tre orsi non erano ancora tornati a casa.

La bambina aveva fame, ma la zuppa nella ciotola grossa (quella di Babbo Orso) era troppo calda, quella della ciotola media (quella di Mamma Orsa) era troppo fredda, quella della ciotola piccola (quella dell'orsetto) andava bene e se la mangiò tutta (tralasciamo il resto della favola che non ci interessa).

La *zona Goldilocks* è appunto la fascia di un sistema stellare dove è possibile che un pianeta ospiti in superficie acqua liquida: corrisponde alla zuppa del piccolo orso, quella ad una temperatura mangiabile; la zuppa di babbo orso corrisponde alla troppo calda fascia interna rispetto alla zona di Goldilocks, mentre quella di mamma orsa alla fascia troppo fredda dal lato opposto.

Dunque quando ne viene scoperto uno dai nostri moderni telescopi in caccia di pianeti in orbita intorno ad altre stelle, un esopianeta viene preliminarmente giudicato potenzialmente abitabile se la sua orbita rientra in questa zona del proprio sistema stellare. Ovviamente la zona Goldilocks varia in base alle dimensioni e alla energia emessa dalla stella: nei

sistemi con al centro stelle più calde del Sole questa zona è più lontana, mentre è più vicina in quelle più fredde.

Questa attribuzione è solo preliminare, perché non tiene conto di due altri fattori di non trascurabile importanza:

1. Noi vediamo quel determinato sistema stellare in questo momento, ma come per il Sole la zona Goldilocks può variare durante la storia del sistema stellare: agli albori della storia del sistema solare la nostra stella era più fioca ed emetteva circa il 25% in meno di energia termica di oggi e in futuro ne emetterà molta di più. Lo stesso accade a tutte le stelle della "sequenza principale".
2. In base alla composizione l'atmosfera di un pianeta può essere più o meno in grado di intrappolare il calore

Nel caso del sistema solare questi due fattori, determinando cambiamenti anche significativi nella capacità di intrappolare o no il calore inviato dalla propria stella, si sono appunto combinati per disegnare traiettorie climatiche molto diverse nel tempo fra Venere, Terra e Marte. Si deve notare che già alla fine del XIX secolo Svante Arrhenius calcolò approssimativamente il valore dell'effetto - serra [2].

Venere ed il suo gigantesco effetto serra

Venere oggi è un pianeta estremamente caldo e secco con una densa e soffocante atmosfera composta per il 96% da CO₂, 3,5% da Azoto e per il resto da poco significative quantità di SO₂, vapore d'acqua e Argon, mentre all'inizio della storia del sistema solare, grazie al Sole molto più debole di oggi, il pianeta era ben posizionato nella zona Goldilocks; inoltre è abbastanza grande perché si possa essere instaurata anche una tettonica (probabilmente sempre del tipo a *coperchio stagnante*).

Non è chiaro per quanto tempo Venere abbia ospitato acqua liquida sulla superficie, perché il suo ambiente ostile è un ostacolo quasi insuperabile per le osservazioni dirette: le temperature oltrepassano i 460 °C, e la pressione è di 92 bar, corrispondente a quella che si trova nei mari terrestri ad oltre 900 metri di profondità (quella terrestre è di circa 1 bar); per questo le poche missioni, tutte dell'era sovietica, che hanno raggiunto la superficie di Venere sono sopravvissute solo pochi minuti al caldo e all'atmosfera tossica ma, prima di andare fuori uso, sono riuscite comunque a scattare ed inviare a Terra alcune foto che rivelarono una su-



Figura 1: fotografia della superficie di Venere presa dalla sonda russa Venera 13, che resistette 127 minuti alle terribili condizioni sulla superficie del pianeta. Fonte: NASA.

perficie rocciosa arida e senza vita. Ci sono varie linee di evidenza indicanti una perdita di acqua superficiale relativamente precoce, prima di 3 miliardi di anni fa.

La troppa vicinanza al Sole si è fatta sentire quando a causa dell'aumento del suo irraggiamento, il pianeta si è venuto a trovare sempre più vicino al limite interno della zona Goldilocks. Oltre all'aumento della radiazione, il vento solare è ovviamente più intenso nella parte superiore dell'atmosfera di Venere, rispetto a quanto accade sulla Terra.

Nella sua prima parte di storia, Venere oltre a vapore acqueo nell'alta atmosfera, come la Terra aveva acqua nella bassa atmosfera e sulla sua superficie, dove gli oceani stoccavano parte del CO₂ che continuava ad essere emesso dalla attività vulcanica; attività ancora presente anche oggi sia pure in misura molto ridotta: confrontando le immagini radar di diverse orbite di Magellano negli anni '90 del XX secolo, sono state individuate due immagini radar della stessa regione scattate a otto mesi di distanza l'una dall'altra evidenzianti dei cambiamenti nella superficie tali da non essere attribuibili a fenomeni diversi da una eruzione. Invece

per quanto riguarda il carbonio, oggi su Venere mancano quegli importanti processi che asportano il CO₂ dall'atmosfera terrestre.

In queste condizioni una combinazione di venti solari sempre più forti, indebolimento del campo magnetico e umidità dell'alta atmosfera hanno fatto sì che l'acqua venisse letteralmente spazzata via dal pianeta: man mano che il vapore acqueo veniva perso verso lo spazio, più acqua evaporava dagli oceani venusiani per sostituirla, solo per essere nuovamente portata via dai venti solari [3]. Alla fine, continuando questo processo, il pianeta perdeva umidità e gli oceani diminuivano il loro volume e - di conseguenza - la loro capacità di sequestrare CO₂ atmosferico, che continuava ad essere emesso dal vulcanismo. Quando è stato raggiunto il punto di non ritorno, Venere è diventato il pianeta caldo, secco e senza vita che vediamo oggi.

Per quanto Marte è stato un pianeta umido?

Fra gli strumenti a bordo del lander *InSight* della NASA, attivo su Marte tra il 2019 e il 2022, c'era un termometro che come previsto ha segnalato massime diurne i cui valori più alti sono arrivati a -7°C (freddino, ma sulla Terra temperature simili si raggiungono normalmente in diverse aree); invece la notte il termometro scendeva sotto i - 100 °C (decisamente molto freddo!) [4]. Inoltre, l'atmosfera marziana odierna è piuttosto rarefatta, con una pressione pari a circa 1/100 di quella terrestre.

Al contrario della Terra odierna, coperta per poco meno del 70% da oceani profondi mediamente 4000 metri (e che probabilmente la ricoprivano completamente fino a 4 miliardi di anni fa), sulla superficie marziana di acqua oggi ce n'è davvero poca, anche se le prove sulla sua possibile presenza inviate dai satelliti che vi ruotano intorno sono ampie e circostanziate: forme simili a letti di fiumi asciutti e minerali che avrebbero potuto formarsi solo in presenza di acqua. Ciò suggerisce che un tempo l'atmosfera marziana fosse molto più densa di quanto lo sia oggi; da questo a ipotizzare la presenza di qualche forma di vita miliardi di anni fa il passo mentale è breve.

Parte dell'acqua si trova ancora sul pianeta: i satelliti in orbita, oltre a ghiaccio nelle zone polari, hanno osservato delle aree le cui caratteristiche lasciano presagire la presenza nei primi strati del terreno di acqua, che occasionalmente risale in superficie. Purtroppo, l'acqua non può restare a lungo liquida, date le temperature gelide e, soprattutto a causa

dell'atmosfera secca e sottile, il ghiaccio passa direttamente dallo stato solido a quello gassoso. Alcune tracce di flussi liquidi stagionali come quelle osservate nel 2019 potrebbero essere invece dovute a delle brine salate [5]. La presenza nel sottosuolo di falde acquifere salmastre è stata certificata dai dati presentati da Orosei et al [6].

A causa della sua posizione nel sistema solare, l'acqua su Marte era già inizialmente meno abbondante rispetto alla Terra (e probabilmente anche rispetto a Venere); si stima comunque per il Noachiano (4.1 ÷ 3.5 miliardi di anni fa) un quantitativo, in tutte le sue forme, almeno 6,5 volte superiore a quello odierna [7]; diciamo che le acque potevano coprire circa il 20% della superficie ma con profondità non particolarmente elevate.

Tale quantità è rapidamente scesa a 2 volte quella presente oggi, quando esistevano gli ultimi grandi corpi di acqua liquida superficiale in alcuni dei grandi crateri da impatto nella regione equatoriale, e cioè fino alla fine dell'Esperiano (il periodo della storia marziana compreso tra 3.5 e 3.0 miliardi di anni fa). Da quel momento inizia l'Amazzoniano, che arriva fino ai nostri tempi e nel quale l'acqua ha continuato a diminuire, probabilmente in modo continuo.

Proprio per esplorare uno di questi crateri che sembrano aver ospitato laghi durante l'Esperiano, il rover *Curiosity* è atterrato nel cratere Gale, con l'obiettivo di verificare una possibile "storia umida" del suo fondo. La realtà è stata pari alle aspettative (solo la scoperta di forme di vita nei sedimenti avrebbe dato risultati più clamorosi di quelli sperati!): *Curiosity* ha trovato e campionato strati di sedimenti, confermandone il contenuto in minerali argillosi che si formano solo in presenza di acqua liquida. Non solo ma si deve addirittura notare come le immagini scattate dal rover siano praticamente indistinguibili da immagini scattate in qualche ambiente terrestre ora arido e privo di vegetali, ma un tempo molto umido. *Curiosity* ha anche portato alla luce prove di massicci eventi di inondazioni, forse il risultato di impatti meteoritici o cometari su una superficie all'epoca per lo più ghiacciata che hanno rilasciato calore e innescato un rapido scioglimento del ghiaccio superficiale [8].

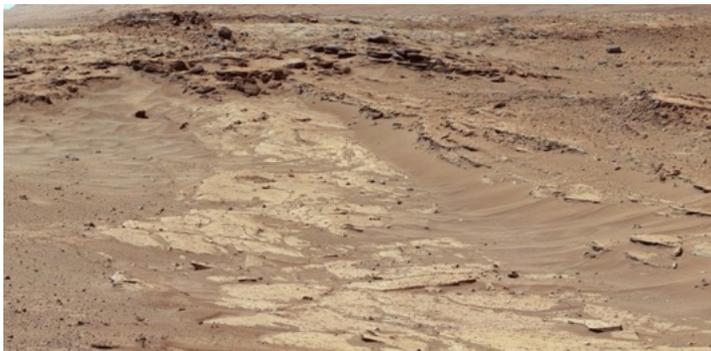


Figura 2: difficile pensare che questa fotografia di rocce sedimentarie non sia stata scattata in una zona desertica della Terra ma sulla superficie marziana nel fondo del cratere Gale dal rover della NASA Curiosity. Fonte: NASA.

Insomma, almeno in alcune fasi, il cratere Gale è stato caratterizzato da condizioni umide, e quindi non si può escludere a priori la presenza di una qualche forma di vita simile a quella che conosciamo sulla Terra.

Ma perché Marte ha perso quasi tutta la sua acqua? La questione è molto complessa ed ancora aperta. Una prima osservazione da fare è che la Terra, con la sua tettonica a placche attiva e un nucleo metallico genera un campo magnetico che a sua volta genera una ionosfera protettiva; invece, il campo magnetico marziano e la ionosfera che ne deriva sono deboli e dimostrano che oggi la sua tettonica è molto debole, nonostante la presenza dell'Olympus Mons, il vulcano più alto del sistema solare. Lo conferma anche un altro strumento montato su *InSight*, un sismografo, il quale ha rilevato una attività sismica estremamente bassa, con pochi terremoti alla settimana e di bassa Magnitudo. Si tratta di una sismicità superiore a quella della Luna ma sempre inferiore di parecchi ordini di grandezza a quella, già scarsa, nei contesti terrestri all'interno delle placche dove, a parte qualche rilevante eccezione, è molto inferiore rispetto a quella lungo i limiti delle placche.

Alcuni terremoti marziani registrati da *InSight* sono avvenuti a profondità comprese tra 15 e 36 km e la geometria delle faglie lungo le quali si sono generati è compatibile con quella delle fratture osservate sulla superficie; pertanto, ne è chiara l'origine tettonica [9]. Si suppone che tale attività derivi dalla riattivazione di faglie e fratture precedenti, inizial-

mente formate durante la propagazione verso l'alto di dicchi magmatici provenienti dal mantello. Altri eventi invece sono innescati dalla contrazione termica planetaria.

La bassa attività sismica ha caratterizzato il pianeta per gran parte della sua storia, e non ricorda certo una tettonica a placche di tipo terrestre. Gli enormi vulcani probabilmente rilasciano semplicemente il calore interno accumulato in massicci singoli eventi eruttivi piuttosto che in continue eruzioni più piccole.

Per capire come sono andate le cose, la domanda iniziale da porsi è se Marte all'inizio della sua storia fosse un pianeta caldo e umido oppure se la presenza di abbondante acqua superficiale si sia limitata ad alcuni sporadici episodi. Purtroppo, per farlo bisognerebbe conoscere la composizione dell'atmosfera di quel periodo, ricordandosi inoltre, tanto per trovare un ulteriore ostacolo, che la radiazione solare era sicuramente inferiore a quella attuale. All'inizio della sua vita, Marte aveva una attività tettonica sufficiente per rifornire di CO₂ l'atmosfera attraverso il vulcanismo e assicurare con il suo campo magnetico protezione dal vento solare e dalla radiazione ultravioletta. Però, a causa delle ridotte dimensioni del pianeta, l'attività tettonica si è attenuata molto presto. Per quanto riguarda il passato recente, ci sono tracce di vulcanismo negli ultimi 115 milioni di anni ma sono abbastanza sporadiche.

Questi fattori hanno determinato una fine precoce di una eventuale fase acquatica: a cascata l'indebolimento dell'attività tettonica indebolì il campo magnetico, favorendo indirettamente la fuga di vapore acqueo e CO₂, che già per la gravità molto minore di quella venusiana e terrestre Marte aveva difficoltà di suo a trattenere. Inoltre, la diminuzione dell'attività vulcanica non riusciva a fornirne un quantitativo pari a quello sfuggito nello spazio. La diminuzione del CO₂ atmosferico indebolì a sua volta l'effetto-serra, raffreddando ulteriormente la superficie del pianeta.

Pertanto, tra vento solare, bassa forza di gravità e diminuzione del campo magnetico, buona parte dell'atmosfera a base di CO₂ e vapor acqueo che si formò durante la solidificazione dell'oceano di magma marziano potrebbe essere andata perduta nel giro di pochi milioni di anni. Se questo scenario fosse quello reale, allora l'atmosfera marziana non sarebbe stata densa neanche durante i suoi primi 400 milioni di anni; gli episodi umidi quindi potrebbero essere avvenuti solo durante eventi di forte degassamento vulcanico [10], sul tipo delle *Grandi Province Magmatiche*

terrestri, che sono immensi volumi di magmi, dell'ordine delle centinaia di migliaia (se non milioni) di km cubi, eruttati in poche migliaia di anni e che nell'immediato hanno sempre innalzato, e non di poco, il tenore di CO₂ dell'atmosfera terrestre. In queste condizioni il CO₂ emesso dal vulcanismo sarebbe stato sufficiente per fornire la pressione (e con l'effetto-serra la temperatura) per consentire la temporanea presenza di acqua liquida. Poi però, la fuga del CO₂ nello spazio e il suo sequestro nel terreno avrebbero ripristinato rapidamente le condizioni preesistenti.

Per altri Autori la presenza di acqua abbondante in superficie è stata salutaria anche nella storia più antica di Marte e ne addebitano la temporanea presenza ad impatti cometari che ne hanno rilasciati importanti volumi.

In conclusione, la comunità scientifica ha dimostrato come Marte all'inizio della sua esistenza avesse ambienti superficiali abitabili, dove erano a disposizione acqua, fonti di energia, elementi come carbonio, idrogeno, azoto, ossigeno, fosforo e zolfo, nonché altri metalli fondamentali per le reazioni di catalisi delle proteine. Tutte sostanze associate alla vita come la conosciamo. Tuttavia, non è noto per quanto tempo tali condizioni siano perdurate, né quanto fossero estesi scenari di questo tipo, tantomeno se quel potenziale abbia stimolato davvero la nascita della vita su Marte.

La Terra: il pianeta azzurro e il suo ciclo del carbonio

La storia del nostro pianeta è stata quasi sempre contraddistinta da temperature che hanno consentito la presenza di acqua liquida sulla sua superficie; quasi, perché in alcune fasi tutta la superficie, mari compresi, era quasi totalmente ghiacciata, i cosiddetti episodi di *"Snowball Earth"* (*"Terra Palla di Neve"*). I parametri orbitali, la copertura nuvolosa, la posizione dei continenti e la rete delle correnti marine hanno una influenza nel determinare le temperature globali, ma il carbonio è il più importante sistema di regolazione delle temperature insieme all'irraggiamento solare. Anche qui sulla Terra quindi il segreto sta nel ciclo del carbonio e nelle sue capacità termostatiche.

Il Sole è una stella della sequenza principale, la cui radiazione aumenta con il tempo. Nel 1972 Sagan e Mullen evidenziarono come con l'atmosfera attuale a causa della radiazione stellare più debole, la Terra sarebbe rimasta irrimediabilmente ricoperta dai ghiacci fino a circa 1,5 miliardi di anni fa. È il cosiddetto *"paradosso del Sole debole"* (figura 3) [11].

Invece la vita era già presente almeno 3,8 miliardi di anni fa, quando certamente gli oceani liquidi esistevano da centinaia di milioni di anni. Solo un'atmosfera caratterizzata da un alto contenuto di gas serra (oltre il 95% di CO₂) avrebbe consentito la presenza di acqua liquida sulla Terra in questo primo periodo.

Ma dove è finito tutto quel CO₂? È forse volato via nello spazio? No, perché gravità e campo magnetico terrestre ne hanno impedito la fuga a causa del vento solare. In realtà il suo tenore atmosferico inferiore allo 0,05% dimostra che il "*Sistema-Terra*" richiede più CO₂ di quello che viene continuamente emesso in atmosfera di CO₂ dalla attività vulcanica; per cui il suo tenore atmosferico tende inevitabilmente a diminuire.

I meccanismi che consumano CO₂

Il CO₂ dell'atmosfera primitiva terrestre proveniva, come adesso, essenzialmente dall'attività vulcanica. I meccanismi più antichi di sequestro del CO₂ da parte del Sistema-Terra sono l'assorbimento da parte degli oceani, direttamente nelle acque e nei sedimenti marini.

In seguito con l'avvento della tettonica a placche insorsero altri processi che lo sequestrano. Ancora non c'è concordanza fra i vari Autori, ma è possibile che i primi fenomeni di questo tipo siano iniziati già a partire da 4 miliardi di anni fa [12]. Con la tettonica a placche nelle aree lungo le dorsali oceaniche, dove le placche divergono, si produce sempre nuova crosta oceanica, mentre dove le placche convergono, lungo le zone di subduzione la vecchia crosta oceanica si immerge nel mantello. Quindi da un lato si depositano sempre nuovi sedimenti nei quali viene sequestrato ulteriore CO₂, mentre del CO₂ dei sedimenti subdotti insieme alla crosta oceanica risale in superficie solo soltanto quella parte che viene coinvolta nella formazione e nella risalita di magmi mantellici [13]

L'inizio della tettonica a placche ha avuto fra le conseguenze la nascita di altri due altri meccanismi di assorbimento del CO₂:

1. Nelle aree di convergenza fra placche nasce la crosta continentale, in cui sono preponderanti magmi con alto tenore di silicio che, rispetto a quelli a minor contenuto di silicio diffusi precedentemente, richiedono molta più CO₂ per la loro alterazione.

2. Si formano le piattaforme continentali, in cui si depositano sedimenti carbonatici (calcarei, dolomie e marmi contengono CO₂ in abbondanti quantità).

Poi nasce la vita, e da questo momento gli esseri viventi iniziano a influenzare pesantemente il ciclo del carbonio: gli organismi più antichi finora conosciuti sono degli archeobatteri nei sedimenti di circa 3 miliardi e mezzo di anni nell'Australia occidentale [14]. Comunemente noti come *Archea*, vivono oggi in una vasta gamma di ambienti e presentano diversi metabolismi. Quelli dell'epoca probabilmente metabolizzavano zolfo ed emettevano metano. Il metano era stabile nell'atmosfera riducente dell'epoca e in qualche modo provvidenziale, perché contribuì all'effetto-serra che mantenne acqua liquida sulla Terra durante quel periodo in cui il Sole era debole.

Il successivo step fondamentale nella storia del ciclo del carbonio terrestre (ma non solo, anche in quelle della vita e dell'atmosfera), è stata la comparsa della fotosintesi clorofilliana: un organismo da cui si sono poi evoluti i cianobatteri, ha iniziato a metabolizzare CO₂, emettendo come prodotto di scarto ossigeno molecolare. Non è ancora chiara la data esatta di questo evento, ma probabilmente è collocabile tra 2.8 e 2.7 miliardi di anni fa.

Con la fotosintesi è stato introdotto un formidabile processo di sequestro del CO₂ atmosferico e anche grazie ad essa la richiesta di CO₂ da parte del sistema-Terra ha superato il quantitativo del composto immesso ogni anno dai vulcani. Intanto l'ossigeno prodotto dalla fotosintesi non rimaneva nell'atmosfera, che era ancora riducente, ma andava ad alterare (ossidare) le rocce e le acque. L'ossidazione comunque procedeva e ad un certo punto la fotosintesi ha prodotto più ossigeno di quello richiesto dal sistema-Terra: l'atmosfera è così diventata ossidante, come parte delle acque oceaniche: è il *Grande Evento Ossidativo* di 2.4 miliardi di anni fa.

Dal punto di vista climatico nell'atmosfera la diminuzione del tenore di CO₂ e la scomparsa del metano (che nelle nuove condizioni ossidanti non poteva certo rimanere stabile), hanno portato ad una drastica diminuzione dell'effetto serra, e la Terra fu interessata per diverse centinaia di milioni di anni da una glaciazione globale, la *glaciazione huroniana*, che si interruppe solo quando il Sole un po' più energetico e un aumento del CO₂ atmosferico riportarono un po' di calore.

Segue un periodo apparentemente tranquillo (il cosiddetto *Boring Billion*) che precede la seconda diminuzione del CO₂, avvenuta circa 700 milioni di anni fa, accompagnata da due (o tre) glaciazioni globali lunghe poche decine di milioni di anni ciascuna (gli episodi di *Terra palla di neve* dello *Sturtiano* e del *Marinoano* a cui ne è forse seguito un terzo), durante un periodo significativamente noto come *Criogeniano*.

Intanto la comparsa della materia organica aveva originato un altro processo di sequestro del CO₂: la biosfera. In genere alla morte un corpo viene distrutto, ossidandosi, oppure viene mangiato. In alcuni casi invece la materia organica viene seppellita: succede sulla terraferma originando torbe, carboni e idrocarburi) oppure sul fondo di bacini marini chiusi dove non c'è ossigeno, formando i depositi all'origine di importanti giacimenti di petrolio e gas, sottraendo al sistema-Terra una importante fetta di CO₂.

Ed è questo il carbonio che noi ora stiamo tragicamente reimmettendo in atmosfera.

Insomma, anche sulla Terra senza tutti questi processi che sequestrano il carbonio il tenore atmosferico di CO₂ sarebbe troppo elevato non solo per la vita come la conosciamo, ma addirittura è possibile che già oggi l'aumentato calore solare potrebbe aver provocato l'evaporazione totale delle acque oceaniche, che con questa atmosfera avverrà invece fra diverse centinaia di milioni di anni, quando la radiazione solare sarà di circa il 10% più potente di quella attuale

Da ultimo, vediamo le conseguenze sulle temperature globali delle variazioni del ciclo del carbonio negli ultimi 400 milioni di anni, cioè da quando le piante terrestri hanno iniziato ad espandersi all'interno dei continenti [15], popolando terreni precedentemente desolati, visibile nella figura 4.

Il sistema-Terra continua ad assorbire più carbonio di quanto ne viene emesso dai vulcani, per cui la tendenza generale è quella di una diminuzione del tenore atmosferico di CO₂, che viene bruscamente innalzato solo quando si mettono in posto le *Large Igneous Provinces* (Grandi Province Magmatiche, LIP): immense eruzioni basaltiche che in poche migliaia di anni eruttano centinaia di migliaia di chilometri cubi di lave ed emettono incredibili quantità di CO₂: di fatto la messa in posto di una LIP corrisponde ad un brusco innalzamento temporaneo del tenore atmosferico di CO₂ ed SO₂ e anche delle temperature; in genere le improvvise modifi-

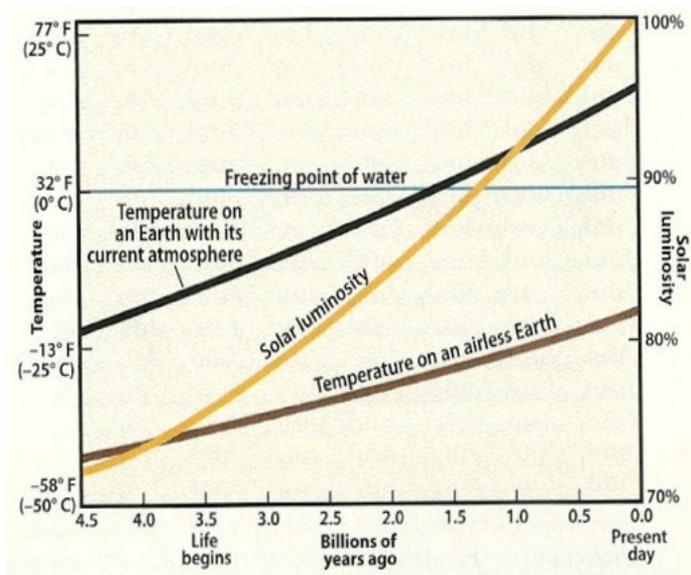


Figura 3. Il paradosso del Sole debole: l'aumento della luminosità solare e le curve delle temperature della Terra senza atmosfera e con l'atmosfera uguale a quella attuale. Come si vede senza l'effetto serra dell'atmosfera la Terra sarebbe ancora una "palla di neve" e senza l'effetto serra dovuto ad un tenore atmosferico di CO₂ molto più elevato di quello odierno lo sarebbe stata fino a oltre 1,5 miliardi di anni fa.

cazioni ambientali creano le condizioni adatte anche per l'innesco di una estinzione di massa.

Nel Devoniano il fabbisogno di CO₂ dovuto alla espansione all'interno dei continenti delle piante terrestri, i cui antenati avevano inglobato dei cianobatteri nelle cellule, trasformati nei cloroplasti, ha provocato un crollo del suo tenore atmosferico, crollo che si arresta temporaneamente alla fine del Devoniano perché si mettono in posto a pochi milioni di anni di distanza due importanti LIP (di cui la prima, quella della Yacuzia, provoca una delle più severe estinzioni di massa della storia) immettono una importante quantità di CO₂ in atmosfera. Esaurita la scorta di CO₂ proveniente da quelle due LIP, la diminuzione riprende e nel Carbonifero si aggiungono due altri processi importanti:

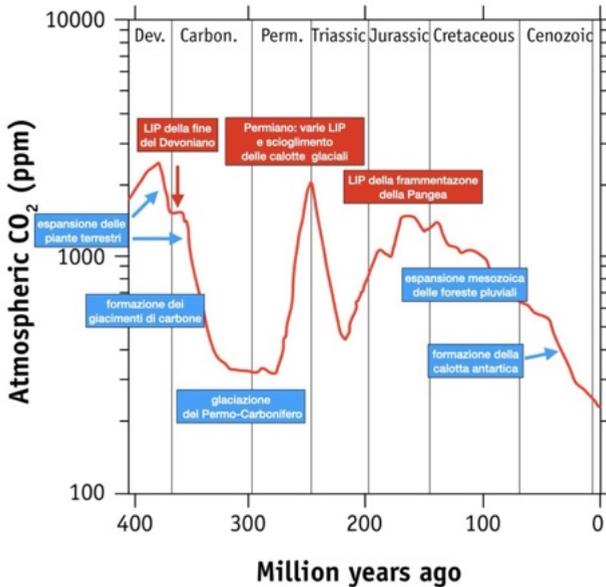


Figura 4. Livelli di CO_2 atmosferico degli ultimi 400 milioni di anni dove si vede l'importanza delle Large Igneous Provinces nel rifornire l'atmosfera di CO_2 . Modificato da Ref. [15].

1. la formazione dei principali depositi di carbone nelle aree all'epoca poste nella fascia tropicale
2. l'arrivo del centro del Gondwana al polo sud, che innesca le glaciazioni del Permo-Carbonifero con relativo stoccaggio di CO_2 nelle calotte (ecco un altro importante processo di stoccaggio di CO_2 , particolarmente importante nell'ultimo milione di anni).

In seguito il tenore di CO_2 inizia a risalire a causa delle emissioni delle diverse LIP che si sono messe in posto nel Carbonifero superiore e nel Permiano e perché l'associato riscaldamento globale fa diminuire il volume delle calotte glaciali, fino alla tragica parte conclusiva del Permiano, quando l'accoppiata di due LIP come Emeishan e Siberia provoca due estinzioni di massa micidiali a meno di 10 milioni di anni l'una dall'altra (quella della fine del Permiano può essere definita come la *madre di tutte*

le estinzioni, in cui scompare oltre il 90% dei generi di animali, in mare e in terra).

A causa delle emissioni di CO₂ dei Trappi della Siberia l'inizio del Triassico è tremendo: le zone equatoriali diventano inabitabili per il clima caldo e secco [16].

Durante il Triassico CO₂ e temperature diminuiscono, ad eccezione di quando si mette in posto la LIP di Wrangellia a metà del periodo. Da quel momento il CO₂ torna a risalire perché dalla fine del Triassico, per tutto il Giurassico e il Cretaceo la frammentazione della Pangea è accompagnata da imponenti LIP, a partire da quella dell'Atlantico centrale al passaggio Triassico-Giurassico. Seguiranno intorno all'Africa le LIP di Karoo-Ferrar, Paranà-Etendelka, Caraibi e Madagascar, mentre nell'Oceano Pacifico si mettono in posto i plateau basaltici di Shatzky rise, Kerguelen, Ontong-Java / Manihiki / Hikurangi.

Il nuovo massimo del tenore atmosferico di CO₂ (e, non casualmente, delle temperature) si colloca 94 milioni di anni fa, in corrispondenza del limite Cenomaniano-Turoniano e in sincronia con la messa in posto di due LIP (Caraibi e Madagascar). Da quel momento la fase parossistica di formazione di LIP rallenta e le temperature si abbassano con momentanee interruzioni della diminuzione in corrispondenza di picchi nelle emissioni vulcaniche di CO₂: alla fine del Cretaceo con i Trappi del Deccan, e al passaggio Paleocene - Eocene con la provincia magmatica dell'Atlantico centrale [17]. Oggi non ci sono dubbi che anche il massimo del Miocene corrisponda al massimo dell'attività dell'ultima (e minore come volumi) *Large Igneous Province*, i basalti del Columbia River [18].

Prima dei basalti del Columbia River la diminuzione del tenore atmosferico di CO₂ ha proceduto a ritmi estremamente elevati nell'Oligocene, durante la formazione della calotta antartica, che ne ha assorbito una quantità elevata. Quando si conclude questo processo perché la calotta raggiunge dimensioni simili a quelle attuali, la diminuzione rallenta la sua velocità, ma continua perché la richiesta di CO₂ da parte del sistema-Terra rimane sempre maggiore di quella emessa dalla normale attività vulcanica.

Il Quaternario

Il caso delle glaciazioni del paleozoico e del terziario dell'Antartide dimostrano come la formazione delle calotte sottragga all'atmosfera un enorme quantitativo di CO₂ [19].

Per questo può sembrare che negli ultimi 800.000 anni il tenore di CO₂ abbia talvolta rincorso le temperature: l'aumento delle temperature ha sciolto dei ghiacci immettendo in atmosfera il CO₂ che vi era contenuto

Insomma, la deglaciazione provoca di suo un aumento del CO₂ atmosferico, facendo da ulteriore volano per l'aumento delle temperature della fase di riscaldamento dopo un massimo glaciale. Al contrario succede quando abbiamo un crollo delle temperature.

Conclusioni

Come abbiamo visto, un aspetto unico del nostro pianeta è che il suo termostato al carbonio è stato quasi sempre posizionato tra il punto di congelamento e il punto di ebollizione dell'acqua, cosa che non è successa su Venere e Marte, partiti da condizioni iniziali abbastanza simili.

Sulla Terra il *paradosso del Sole debole* evidenzia un effetto – serra molto maggiore di quello attuale nel lontano passato, che ha impedito all'inizio della sua storia temperature abbondantemente al di sotto dello zero: in quel periodo, quindi, il carbonio ha compensato lo scarso calore solare.

Poi, a mano a mano che il Sole aumentava la sua potenza radiativa, l'atmosfera iniziò a perdere parte del suo carbonio, providenzialmente consumato dal sistema-Terra, risparmiando al pianeta un effetto-serra più importante che avrebbe impedito la prosecuzione dei processi biologici.

La conclusione fondamentale è che il termostato del carbonio della Terra ha funzionato efficacemente per miliardi di anni e che i fattori di compensazione continuano ancora oggi ad apportare al sistema-Terra il giusto mix fra radiazione solare e capacità-serra dell'atmosfera, mentre l'atmosfera di Venere di carbonio ne ha avuto troppo e quella di Marte ne ha avuto troppo poco.

Quindi anche se Venere e Marte avessero avuto tutte le condizioni adatte per ospitare la vita, già miliardi di anni fa la direzione dell'evoluzione dei loro termostati a carbonio non è stata quella che è riuscita a mantenere

queste condizioni sulla Terra. C'è da chiedersi se su Venere le cose sarebbero andate diversamente se fosse esistita una biosfera che utilizzava CO₂.

Da tutto questo discende un appunto fondamentale per la ricerca della vita su altri mondi: non bastano la posizione all'interno della *zona Goldilocks*, un'atmosfera "interessante" e la presenza di una serie di elementi chimici. Ma occorre un termostato a carbonio capace di mantenere temperature adatte alla presenza di acqua liquida per un tempo sufficientemente lungo.

Riferimenti bibliografici

[1] S.M. Som *et al.*, *Earth's air pressure 2.7 billion years ago constrained to less than half of modern levels*, *Nature Geoscience* **9**, 448 (2016).

[2] S. Arrhenius, *On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground*, *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* **41**, 237 (1896).

[3] A.P. Ingersoll, *The runaway greenhouse: A history of water on Venus*, *Journal of Atmospheric Sciences* **26**, 1191 (1969).

[4] D. Banfield *et al.*, "The atmosphere of Mars as observed by InSight." *Nature Geoscience* **13.3** (2020): 190-198.

[5] V.F. Chevrier, E.G. Rivera-Valentin. *Formation of recurring slope lineae by liquid brines on present-day Mars*, *Geophysical Research Letters* **39.21** (2012).

[6] Orosei, Roberto *et al.*, *Radar evidence of subglacial liquid water on Mars*, *Science* **361.6401** (2018): 490-493.

[7] Jakosky, Bruce M. *et al.*, *The Mars atmosphere and volatile evolution (MAVEN) mission*. *Space Science Reviews* **195** (2015): 3-48.

[8] H. Rickman *et al.*, *Water in the history of Mars: An assessment*, *Planetary and Space Science* **166** (2019): 70-89. H. Rickman *et al.*, *Water in the history of Mars: An assessment*, *Planetary and Space Science* **166**, 70 (2019).

[9] A. Jacob *et al.*, *Seismic sources of InSight marsquakes and seismotectonic context of Elysium Planitia, Mars*, *Tectonophysics* **837**, 229434 (2022).

- [10] M. Scherf, H. Lammer, *Did Mars possess a dense atmosphere during the first ~400 million years?*, *Space Science Reviews* **217**, 2 (2021).
- [11] C. Sagan, G. Mullen, *Earth and Mars: Evolution of atmospheres and surface temperatures*, *Science* **177**, 52 (1972).
- [12] G. Chen *et al.*, *Hadean tectonics: Insights from machine learning*, *Geology* (2023).
- [13] C. Chen *et al.*, *Carbonate-rich crust subduction drives the deep carbon and chlorine cycles*, *Nature* **1** (2023).
- [14] J.W. Schopf, *Microfossils of the Early Archean Apex chert: new evidence of the antiquity of life*, *Science* **260**, 640 (1993).
- [15] A. Piombino, *The heavy links between geological events and vascular plants evolution: a brief outline*, *International Journal of Evolutionary Biology* (2016).
- [16] Y. Sun, Yadong *et al.*, *Lethally hot temperatures during the Early Triassic greenhouse*, *Science* **338**, 366 (2012).
- [17] J.C. Zachos *et al.*, *Extreme warming of mid-latitude coastal ocean during the Paleocene-Eocene Thermal Maximum: Inferences from TEX86 and isotope data*, *Geology* **34**, 737(2006).
- [18] J. Kasbohm, B. Schoene, *Rapid eruption of the Columbia River flood basalt and correlation with the mid-Miocene climate optimum*, *Science Advances* **4**, eaat8223 (2018).
- [19] B. Stauffer, W. Berner, *CO₂ in natural ice*, *Journal of Glaciology* **21**, 291 (1978).

Vedi anche

C.T. Russell, B.M. Jakosky, *Preface: The Mars atmosphere and volatile evolution (MAVEN) mission*, *Space Science Reviews* **195**,1 (2015).

Pensando alla celebra rubrica della Settimana Enigmistica "Spigolature"

(ed anche a "Forse non tutti sanno che..."), ho compilato un elenco di argomenti "astro*" che mi hanno stimolato. All'inizio volevo passarle a qualche esperto, ma poi ho pensato che nessuno

«ASTROSpigolature»

Franco Bagnoli

avrebbe avuto il tempo di rispondere a così tanti quesiti. Quindi mi sono messo a cerca-

re in rete le risposte più plausibili, spesso prendendo degli abbagli che per fortuna in molti casi mi sono stati segnalati. Per il resto, gli errori sono tutti dovuti alla mia imperizia

Quali lingue si pensava sarebbero state le prime parlate nello spazio nel 1968?

Usiamo come riferimento il classico film di Stanley Kubrick "2001 Odissea nello spazio".



Figura 1: Le lingue parlate nella Stazione Spaziale Internazionale secondo Stanley Kubrick. Fonte: 2001 Odissea nello spazio.

Quando Heywood Floyd, presidente del Comitato Nazionale Americano per l'Astronautica, fa scalo sulla Stazione Spaziale V in orbita intorno alla Terra (che è anche un hotel gestito da Hilton), viene selezionata la sua lingua preferita, e c'è una veloce inquadratura che mostra quelle disponibili: inglese, olandese, russo, francese, italiano e giapponese.

Dopotutto l'Italia è stata la quarta nazione (nel 1964) a lanciare un satellite, dopo URSS, USA e UK. Nel 1965 è la volta della Francia e del Canada, nel 1967 dell'Australia, nel 1969 della Germania Ovest (ma niente tedesco in 2001), nel 1970 del Giappone e della Cina (ma niente cinese).

L'Olanda arriva solo nel 1976, dopo l'India...⁶⁵

Perché Cooper non si è "spaghetificato" quando è caduto nel buco nero in Interstellar?

La "spaghetificazione",⁶⁶ ovvero il fatto che la gravità può "strizzare" un corpo fino a farlo diventare uno spaghetti, è dovuto allo stesso effetto che causa le maree sulla Terra. Il fatto è che la forza di gravità dipende dall'inverso del quadrato della distanza; quindi varia con questa in maniera non-lineare.

Nel caso della Terra e della Luna, entrambe stanno girando intorno al cen-

tro di gravità comune (che è all'interno della Terra), e, approssimando le orbite con dei cerchi e i corpi con delle sfere radialmente simmetriche, restano in orbita perché la forza di gravità compensa esattamente la forza centrifuga nel loro centro.



Figura 2: Il buco nero “Gargantua” come rappresentato in *Interstellar*.

Ma la forza centrifuga aumenta linearmente con la distanza, mentre la forza di gravità diminuisce con l'inverso della distanza, quindi queste due forze non possono essere uguali in ogni punto, e in effetti il campo residuo tende a “spaghetificare” la Terra.

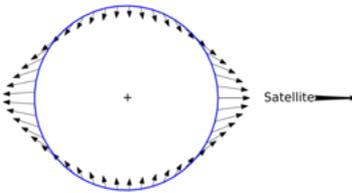


Figura 3: Il campo gravitazionale differenziale di un corpo (ovvero: sottraendo la componente del centro di massa);

Ovviamente la superficie della Terra è poco influenzata da queste forze, mentre l'acqua, che è mobile, cerca di adattarsi alla situazione dando origine alle maree. Sulla Luna le “maree” causate dalla Terra deformano molto di più la superficie. Una volta la Luna ruotava con un periodo diverso da quello di

rivoluzione (ed era molto più vicina alla Terra).

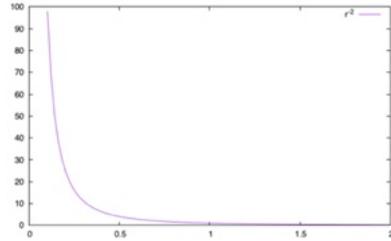


Figura 4: Il campo gravitazionale (forza) in funzione della distanza dalla sorgente.

Queste “maree di Terra” hanno causato il rallentamento della sua rotazione, così che oggi la Luna guarda sempre con la stessa faccia alla Terra, è molto più lontana (le maree causano una specie di effetto fionda) e la sua distribuzione di massa non è uniforme, ma è spostata dalla parte della Terra⁶⁷, anche se la forma esterna della Luna è schiacciata, perché si è raffreddata quando ancora stava ruotando.⁶⁸

Quindi l'effetto “spaghetti” non dipende dall'intensità della forza di gravità, ma dalla sua variazione sulle dimensioni dell'oggetto in questione.

Questo fa sì che ci sia un limite (di Roche) per cui un satellite viene distrutto da queste forze se si avvicina troppo al pianeta intorno a cui orbita,⁶⁹ ma fa anche sì che le maree “di Sole” sulla Terra siano molto più piccole di quelle causate dalla Luna, non perché la forza del Sole sia minore (Terra e Luna girano essenzialmente attorno a Sole, e solo in secondo ordine attorno al loro centro di massa

comune) ma perché è così lontano che il suo campo è quasi lineare.

Perciò, la “spaghetizzazione” di un astronauta può avvenire solo molto vicino al “centro” della forza, ma questo punto può essere all’interno dell’orizzonte degli eventi, e quindi non osservabile.

Ci vuole quindi un buco nero piccolo (dell’ordine di poche masse solari), o, anche meglio, una stella di neutroni o una nana bianca, certamente non può accadere per un buco nero tipo Gargantua (quello di *Interstellar*) che è un buco nero supermassiccio. In *Interstellar* giustamente Cooper può attraversare l’orizzonte degli eventi senza subire effettivamente forze di marea.

Che possa poi uscirne invece non è per nulla plausibile.

Cosa c’è di fisicamente sbagliato nella Morte Nera di *Star Wars*?

La prima morte nera, conosciuta ufficialmente come Stazione Orbitale da Battaglia DS-1, che è l’unica che è stata completata prima di venire distrutta, è una sfera di oltre $D = 160$ km di diametro e massa $M = 5 \cdot 10^{17}$ kg.⁷⁰

L’arma principale di cui dispone è un enorme cannone laser alimentato da un reattore a ipermateria che, utilizzando 8 cristalli kyber, è in grado di distruggere un pianeta delle dimensioni della Terra in pochi secondi; ma richiede molto tempo per essere ricaricato.

Per fortuna abbiamo a disposizione il *Death Star Technical Companion*⁷¹ che ci permette di capire come funziona il superlaser, dato che dalle immagini del film sembrerebbe che gli otto laser sparati dai cristalli kyber si uniscano da soli quando si incontrano, una cosa che è ovviamente impossibile, dato che i fotoni non interagiscono tra loro e quindi i raggi laser si attraverserebbero senza fare un plissé, come del resto dovrebbero fare le spade laser della saga.

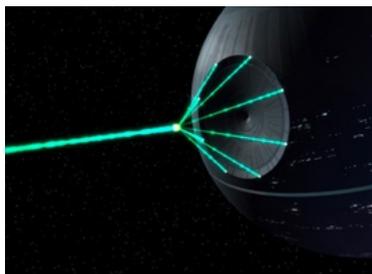


Figura 5: Il superlaser della morte nera in azione.

Ma a pagina 65 del manuale si scopre che la convergenza è dovuta ad un cristallo di amplificazione, posto però nel centro dell’“occhio”, invece che nel fulcro di amplificazione.

Peccato che anche così non vada bene (per la fisica)... Non esistono “cristalli” che possano deviare i fotoni a distanza. Forse il sistema potrebbe funzionare se il cristallo fosse messo nel punto di convergenza dei laser.

Un altro problemuccio comune a tutte le navi da battaglia è il raggio traente. A pagina 40 del manuale si legge che la Morte nera ha 24 raggi trattori pesanti, che possono concentrarsi per crea-

re una “bolla di energia” e catturare le navi.

Per sfuggire, *“la nave deve fornire una spinta maggiore della forza della bolla”*. Però non è così che funzionano le leggi di Newton.

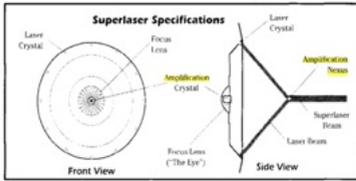


Figura 6: Specifiche del superlaser.

Assimiliamo il raggio traente a una attrazione magnetica o anche ad una semplice corda. Dato che non abbiamo facilmente a disposizione navi spaziali, possiamo pensare a due navi “standard” che galleggiano sull’acqua, una delle quali aggancia la seconda, come fanno i rimorchiatori.

Che succede quando il rimorchiatore aziona il motore che riavvolge la corda? Se non ha i motori accesi, e se è agganciato ad una nave di massa comparabile (o maggiore) della sua, è il rimorchiatore a spostarsi. Quello che conta è il rapporto tra le masse.

Dato che la Morte Nera è piuttosto massiccia, si può assumere che sia la nave catturata ad avvicinarsi. Ma cosa succede se adesso la nave catturata accende i motori?

È quello che fanno i rimorchiatori. Anche se sono piccoli, piano piano riescono ad accelerare la grossa nave agganciata, a meno che non si rompa la corda.

Supponiamo che la corda, come il raggio traente, abbia una forza massima di rottura F e che non abbia massa. La forza accelera la Morte Nera, $F = Ma$, e trattiene il rimorchiatore (di massa m).

Chiamando f la forza esercitata dal rimorchiatore, abbiamo $f - F = ma$ (l’accelerazione del rimorchiatore e della Morte Nera è la stessa). Quindi la forza richiesta al rimorchiatore, ad accelerazione nulla, è

$$f = \frac{M+m}{M} F,$$

uguale ad F solo quando $m \ll M$.

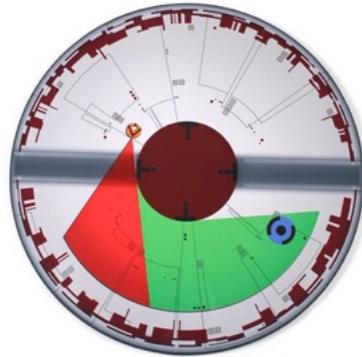


Figura 7: Spazio di tiro della Morte nera (setto rosso), e zona irraggiungibile (setto verde) attorno al pianeta Yavin (disco blu). Dall’immagine si vede che Morte Nera avrebbe fatto prima a girare in senso opposto.⁷²

Quindi il manuale tecnico è corretto (*“per sfuggire, la nave deve fornire una spinta maggiore della forza della bolla”*) solo se la massa della nave catturata è piccola rispetto a quella della

Morte Nera o comunque della nave "traente".

Ma il problema principale è quello dell'energia. La Morte Nera è alimentata da un reattore centrale (che secondo Wikipedia funziona a "ipermateria"), che ha "piccoli canali di ventilazione che portano direttamente al core centrale", quelli sfruttati dai ribelli per distruggerla.

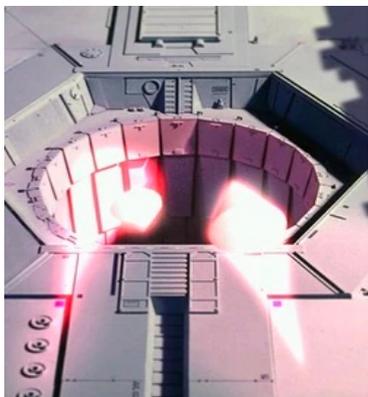


Figura 8: "Siluri ai protoni".⁷³

Nel film *Episodio IV - Una nuova speranza*, Luke Skywalker distrugge la prima Morte Nera infilando un "siluro ai protoni" nel condotto di scarico che porta direttamente al reattore centrale (figura 8).

Dato che Luke dice "Io a casa sparavo ai ratti womp dal mio T-16 e li colpivo. Sono poco più grandi di due metri",⁷⁴ possiamo supporre che questo condotto sia un cilindro di raggio $r = 1$ m.

La Morte Nera sta girando intorno al pianeta Yavin (e sta ruotando) per inquadrare la quarta luna, base dei ribelli (figura 7).

Nel film si vede Luke che spara delle cose luminose che girano ad angolo retto per infilarsi nel tubo, una cosa assolutamente impossibile, sia per la velocità che hanno, sia perché se avesse avuto a disposizione dei razzi a ricerca automatica non ci sarebbe stato nessun bisogno di mirare.

Se invece il proiettile non è "intelligente", quello che avrebbe dovuto fare Luke è rallentare, in modo da raggiungere la velocità tangenziale della Morte Nera, e sparare dentro il tubo, sperando che il proiettile, che viaggia di moto rettilineo uniforme, non sbatta contro le pareti del tubo (che sta ruotando) o che almeno questo non faccia esplodere la carica.

Ma torniamo all'energia. Nel mondo reale, abbiamo dei reattori nucleari che usiamo per produrre energia. Pensiamo, per esempio, a quelli dei sottomarini. I reattori nucleari compatti sono in genere ad acqua pressurizzata, e sfruttano il calore prodotto dalla reazione a catena per alimentare una turbina che poi genera elettricità.

Nello spazio si potrebbe usare la reazione nucleare anche per generare direttamente una spinta⁷⁵, ma non è questo il punto principale. Il fatto è che il rendimento di una macchina termica non è uno, ovvero non converte tutta l'energia in lavoro (in energia elettrica, diciamo). Una parte del calore deve essere smaltita.

Questo è lo stesso problema che si ha sulla Stazione Spaziale Internazionale: nello spazio non è facile dissipare calore perché questo può essere fatto solo per irraggiamento. Quindi la Morte Nera, per funzionare, avrebbe biso-

gno di essere coperta di pannelli irraggianti, come sulla ISS.⁷⁶

Più dettagli (e conti) su [FisicaX](#).⁷⁷



Figura 9: La ISS con i pannelli solari (quelli grandi) e i radiatori (quelli piccoli celesti). Vedere anche [Wikipedia](#).⁷⁸

Ovviamente niente di tutto ciò si vede nel film.

Cosa c'è di scientificamente sbagliato nei viaggi "Lunari" di Giulio Verne?

C'è un libro interessante sulla scienza dei viaggi lunari di Verne⁷⁹ che esamina sia le cose giuste che quelle sbagliate che lo scrittore francese aveva immaginato.

Non sto qui ad esaminare tutti gli aspetti, ma quelli principali sono:

1. Verne sottostima grandemente la tremenda accelerazione a cui sarebbero sottoposti i viaggiatori nel proiettile, più che bastevole ad ucciderli. In maniera simile non si commenta nemmeno lo shock corrispondente alla frenatura del proiettile, diventato simile a un meteorite, quando impatta nell'acqua al suo ritorno.

2. Durante tutto il viaggio i viaggiatori stanno in piedi sul fondo del proiettile (che mantiene sempre lo stesso orientamento) anche se la forza di gravità decresce sempre più. Solo quando arrivano al punto in cui la forza di attrazione della Terra e quella della Luna si equilibrano sono "senza peso", e ne approfittano per versarsi del vino in dei bicchieri "galleggianti" nello spazio. Notare però che Verne fa correttamente notare che il cadavere del cane gettato fuori dal proiettile continua a seguirlo.

3. Si trascura in gran parte la resistenza dell'aria alla partenza, dicendo che si sarebbe attraversato rapidamente questo sottile strato e aumentando un po' la quantità di detonante. Ma si dice correttamente che la sua velocità al rientro sarà uguale a quella alla partenza, e al rientro il proiettile è incandescente, come un bolide. Dovrebbe essere lo stesso alla partenza.

4. Attribuisce i crateri lunari a dei fenomeni vulcanici, invece che a impatti con "meteore". Eppure, nel capitolo XVIII c'è una discussione in cui Michel Ardan sostiene la teoria dell'impatto

- *Oh caro! rispose Michel Ardan, mi sembra facile spiegare l'origine di questi raggi.*

- *Veramente? chiese Barbicane.*

- *Davvero, riprese Michel. Basti pensare che si tratta di un'immensa esplosione di stelle, simile a quella*

prodotta dall'urto di una palla o di un sasso su una lastra di vetro!

- Bene! rispose Barbicane sorridendo. E quale mano sarebbe stata abbastanza forte da scagliare il sasso che provocò un tale shock?

- La mano non è necessaria, rispose Michel, che non si smontò, e, quanto alla pietra, supponiamo che sia una cometa.

- Ah! le comete! esclamò Barbicane, ne stiamo abusando! Mio coraggioso Michel, la tua spiegazione non è male, ma la tua cometa è inutile. Lo shock che ha prodotto questa rottura potrebbe provenire dall'interno della stella. Una violenta contrazione della crosta lunare, sotto il ritiro del raffreddamento, sarebbe potuta bastare per stampare questa gigantesca frattura stellata.

- Vada per una contrazione, qualcosa come una colica lunare, rispose Michel Ardan.

- Del resto, aggiunse Barbicane, questa opinione è di uno studioso inglese, Nasmyth, e mi sembra spieghi a sufficienza lo splendore di queste montagne.

- Questo Nasmyth non è uno sciocco! rispose Michel.

5. Non prevede un sistema di camera di equilibrio per gettare qualcosa fuori dalla capsula, si limita a dire che, agendo in fretta, quasi nessuna molecola di aria sarebbe uscita, quando per esempio gettano fuori il cadavere del cane.

6. Sottostima la spinta necessaria per allunare senza sfraccellarsi, nel caso in cui ci fossero riusciti, confidando nella spinta di alcuni razzi.

Anzi, a questo proposito devo dire che mi sembra che Verne abbia "più ragione" di Andrew May. Il fatto è il seguente: nei piani originali il cannone avrebbe dovuto spararli direttamente sulla Luna, e avrebbero dovuto usare dei razzi per rallentare la loro caduta. Durante il viaggio però incontrano un bolide che li devia con la sua attrazione gravitazionale, facendo loro mancare la Luna.

A questo punto i tre astronauti pensano che la traiettoria sia diventata una ellisse attorno alla Luna, ma questo è impossibile: a meno di non avere qualche dissipazione di energia o di correggere la rotta con dei razzi, non è possibile "entrare" in una traiettoria chiusa venendo dall'esterno, perché la conservazione dell'energia lo vieta.

I tre poi usano i razzi per cercare di "cadere" sulla Luna, ma non riescono neppure ad evitare di rientrare sulla Terra. E qui giustamente Verne dice *"La fisica imponeva che, nella sua orbita ellittica, [il proiettile] passasse attraverso tutti i punti attraverso i quali era già passato."*

Questo non è esatto, perché il sistema Terra-Luna-satellite è il problema dei tre corpi ristretto, che prevede comunque orbite chiuse a forma di otto o più complesse (a meno di non orbitare molto lontano dai due corpi più massivi,⁸⁰ ma comunque è giusto che se un corpo inerte proviene dalla Ter-

ra, con una velocità simile a quella di fuga, o scappa via o torna indietro a causa della deviazione della Luna, ma certamente non può entrare in orbita attorno a questa.

Il testo francese e italiano è disponibile online.⁸¹

Se un astronauta facesse la fine di Frank Poole, l'astronauta ucciso da HAL in *2001 Odissea nello Spazio*, e non venisse recuperato, che succederebbe al suo cadavere?

Dipende da quale è la causa della morte. Se è un trauma e la tuta spaziale rimane integra (incluso il sistema di riscaldamento/condizionamento), probabilmente il destino del cadavere sarebbe simile a quello che avrebbe sulla Terra e andrebbe incontro alla decomposizione.

Se la tuta viene rotta o c'è una perdita, come accade a Frank Poole, allora il cadavere potrebbe iniziare la decomposizione, però rapidamente tutta l'aria verrebbe risucchiata fuori, e i liquidi del corpo inizierebbero a bollire.⁸²

Se non ci fosse riscaldamento, l'acqua contenuta nei tessuti potrebbe congelare (soprattutto se si è lontani dal Sole come in 2001), anche se il raffreddamento per irraggiamento è un processo lento, salvo poi sublimare.

Quindi alla fine si dovrebbe avere una tuta pressoché intatta contenente una specie di mummia.

Perché nell'elenco dei finanziamenti nel libro *De la Terre à la Lune, trajet direct en 97 heures 20 minutes* ("Dalla terra alla Luna") di Giulio Verne, tutte le cifre versate dai vari stati sono tradotti in franchi francesi, tranne che per le lire italiane e i franchi svizzeri e belgi?



Figura 10: Raccolta fondi al Gun Club

Effettivamente, nel capitolo XII "Urbi et orbi", si riportano le cifre offerte dai vari stati o privati (nel caso del Messico e degli Stati Uniti) al Gun Club di Baltimora, e per l'Italia si dice:

Sebbene molto imbarazzata, l'Italia trovò duecentomila lire nelle tasche de' suoi figli, ma rovistandovi bene.

Se avesse avuto la Venezia, avrebbe fatto di più, ma insomma la Venezia non l'aveva.

Questo è il resoconto dei fondi ottenuti dal comitato per costruire il cannone e il proiettile

Paese	Importo	In franchi francesi
Stati Uniti (privati)	4.000.000 dollari	21000000
Russia	368733 rubli	1475000
Francia	1253930 franchi	1253930
Austria	216000 fiorini	520000
Svezia e Norvegia	52000 risdalleri	294320
Prussia	250.000 talleri	937500
Turchia	1.372.640 piastre	343160
Belgio	513.000 franchi	513000
Olanda	11.000 fiorini	235400
Danimarca	9.000 ducati fini	117414
Confederazione Germanica	34.285 fiorini	72000
Italia	200.000 lire	200000
Stato della chiesa	7.040 scudi romani	38016
Portogallo	30.000 cruzades	116200
Messico (privati)	86 grandi piastre	1727
Svizzera	257 franchi	257
Spagna	110 reali	59
Inghilterra	0 sterline	0
America del Sud (Perù, Cile, Brasile, province della Plata, Colombia)	300.000 dollari	1626000

totale	5.446.675 dollari	29.520.983
--------	-------------------	------------

Le cifre in grassetto non hanno la traduzione in franchi francesi, mentre tutte le altre sì (anche se a me il totale in franchi non viene uguale).

Ho rivolto la domanda a Marco Cappelli, di Storia d'Italia⁸³ che mi ha dato la risposta: si tratta dell'unione monetaria latina (che non conoscevo). Come dice Wikipedia:⁸⁴

L'unione monetaria latina è stato un sistema monetario, durato dal 1865 al 1927 (de facto non più operativo dal 1914), che permetteva la libera circolazione di più valute europee all'interno degli stati membri.

Con una convenzione datata 23 dicembre 1865 Francia, Belgio, Italia e Svizzera formarono l'unione e si accordarono a scambiare le loro monete nazionali su uno standard di 4,5 g di argento o 0,290322 grammi di oro (un rapporto di 15,5 ad 1) e di rendere queste monete intercambiabili liberamente. L'accordo entrò in vigore dal 1° agosto 1866.

Ma il romanzo di Verne è proprio del 1865! Come ha fatto ad anticipare la decisione? La risposta si trova poche righe sotto:

Napoleone I aveva tentato di esportare, con la Rivoluzione, il sistema del franco germinale in Europa con la forza, ma, nonostante tutto, il sistema fu comunque adottato in seguito, per libera scelta, dal Belgio nel 1830, dalla Svizzera e dall'Italia nel 1860 (il Ducato di Parma ed il Regno di Sardegna l'avevano già adottato dopo il 1815).

C'è il pericolo che un portellone spaziale rimanga bloccato in posizione aperta e non si possa più chiudere?

È successo il 3 giugno del 1965. L'astronauta Ed White aveva svolto la prima passeggiata nello spazio per gli USA, a bordo del Gemini IV. Al suo rientro l'equipaggio del Gemini IV dovette affrontare un problema non previsto: il portello non si chiudeva. Dopo molta fatica riuscirono a chiudere il portello a forza e tutto andò per il meglio.

Cosa aveva provocato il blocco del portello?

Gli ingegneri della NASA scoprirono che la causa del problema era la saldatura a freddo: se nello spazio due metalli vengono a contatto tra di loro, è possibile che questi si fondano assieme senza che sia necessario usare del calore per effettuare la saldatura.

In realtà lo spazio non c'entra nulla, il fenomeno si può replicare anche sulla Terra. Se si uniscono due superfici complementari (per esempio piane) dello stesso materiale, gli atomi delle due parti si uniscono a formare un materiale unico, dato che non "sanno" da che parte dovrebbero stare.

Nella vita d'ogni giorno però non si può riattaccare un bicchiere rotto semplicemente avvicinando le parti (che sono sicuramente complementa-

ri) perché le superfici esposte all'aria si coprono immediatamente di una patina di ossido se metalli, o comunque di atomi adesi (l'acciaio inossidabile e l'alluminio si ossidano immediatamente, ma diversamente da quello che succede al ferro, l'ossido si attacca così fortemente che protegge il resto del metallo). Nel vuoto però si può fare.

Le parti metalliche di una capsula spaziale sono in genere esposte all'aria prima di partire; quindi si coprono di una patina di ossido. Ma l'attrito nella cerniera può essere sufficiente a rimuovere la patina, e perciò i metalli si possono saldare in qualche punto. I metalli sono i più soggetti all'effetto, perché si uniscono volentieri anche se sono un po' diversi.

Il fenomeno si è presentato anche nella sonda Galileo,⁸⁵ che non è riuscita ad aprire completamente l'antenna ad alto guadagno (a forma di ombrello) per problemi di saldatura a freddo delle "stecche" dell'ombrello stesso.

L'effetto di saldatura a freddo è sfruttato per saldare tra loro alcuni tipi di nanotubi. Altri link sono disponibili online.⁸⁶

La seconda legge di Newton dice che forza e accelerazione sono sempre proporzionali. Tutti i moti che non sono rettilinei ed uniformi sono accelerati. Nel sistema di riferimento terrestre vediamo le stelle girare intorno a noi. Quale forza fa fare loro questo moto circolare?

Questa è una domanda molto interessante, la cui spiegazione ha però bisogno di un paio di formule.



Figura 11. Il moto "apparente" delle stelle.

Quanto vale la forza necessaria? Se una stella di massa m sta a distanza r dalla Terra, e gira con velocità angolare ω (giri al secondo diviso per 2π , ovvero circa $730 \cdot 10^{-7}$ radianti al secondo), la sua accelerazione è $a = \omega^2 r$ e quindi la forza necessaria per tenerla sul cerchio è $f = ma = m\omega^2 r$.

Data l'enorme grandezza di m e r , ovviamente non si può certo pensare che sia la forza gravitazionale, anche perché quella che cerchiamo è una forza che dobbiamo introdurre solo quando usiamo un sistema di riferimento ruotante, quello della Terra.



Figura 12: una giostra delle catene, o “calcinculo”.

In un sistema non inerziale bisogna introdurre le forze di inerzia (o “apparenti”), ovvero, per il nostro sistema rotante, quella centrifuga e quella di Coriolis.

Come sappiamo quando facciamo girare una fionda o saliamo sui calci in culo, in un moto circolare c’è sempre una forza centrifuga che ci spinge verso l’esterno, e che vale $f_n = m\omega^2 r$, dove m è la (nostra) massa, ω la velocità angolare e r la distanza dall’asse di rotazione.

Quindi la “forza” che fa girare le stelle deve non solo farle girare, appunto, ma anche vincere la forza centrifuga. La faccenda si fa sempre più complicata.

Manca però l’altra forza “apparente” f_c , detta di Coriolis, che è perpendicolare sia alla velocità v (rispetto al sistema accelerato) che all’asse di rotazione, e vale $f_c = 2m\omega v$. La sua direzione è data dalla regola della mano destra: se si orienta il pollice lungo l’asse di rotazione e l’indice nella direzione della velocità dell’oggetto, la forza è diretta in verso opposto al medio (tenuto perpendicolare rispetto a

pollice e indice). La velocità v è appunto quella “misurata” nel sistema accelerato, nei calcinculo, per esempio, la velocità delle seggioline rispetto al sistema della giostra è zero.

Ora, le stelle hanno una velocità apparente $v = \omega r$, in senso antiorario se guardiamo verso la stella polare. La forza di Coriolis è quindi diretta verso il centro della circonferenza. Se sostituiamo il valore di v nella formula per f_c otteniamo $f_c = 2m\omega^2 r$. Come si vede il fattore 2 è essenziale: metà forza di Coriolis neutralizza la forza centrifuga f_n e il pezzo restante è esattamente la forza $f = m\omega^2 r$ necessaria, nella direzione giusta.

Nell’universo tutti i pianeti girano intorno a qualche stella o buco nero, o ci sono anche pianeti “orfani” tipo la Luna in Spazio 1999?

Nella fantascienza non c’è solo la Luna che viaggia da sola nel cosmo, anche la Terra “può” farlo: nel racconto “Un secchio d’aria”⁸⁷ si parla della Terra catturata da una “stella oscura” che passa vicino al nostro pianeta catturandolo e portandolo via. Altri esempi sono raccolti sulla pagina “pianeta interstellare” di Wikipedia.⁸⁸

Un pianeta vero e proprio dovrebbe prima formarsi attorno ad una stella, e poi essere espulso. Questo non può accadere se si considera solo il sistema del pianeta e della stella, perché valgono le leggi di Keplero e le traiettorie dei pianeti sono delle ellissi.

Le cose cambiano se ci sono almeno tre corpi, per esempio un pianeta attorno ad un sistema stellare doppio o anche, per restare in casa, un pianeta sottoposto all'attrazione del Sole e di Giove.

Dato che il problema dei tre corpi⁸⁹ prevede soluzioni caotiche, è possibile che un pianeta venga espulso.

Il problema è però "vedere" questi ipotetici pianeti. Se questi sono veri pianeti sono relativamente freddi, e quindi non emettono luce ma solo microonde, e troppo piccoli per dare effetti gravitazionali osservabili, ma, se espulsi poco dopo la loro formazione, potrebbero essere ancora abbastanza caldi, come PSO J318.5-22.⁹⁰ Del resto, un pianeta come la Terra ci metterebbe abbastanza tempo a raffreddarsi, anche senza il Sole.

Finora sono osservati degli oggetti abbastanza freddi da emettere nell'infrarosso che però potrebbero essere semplicemente delle stelle che hanno già esaurito il loro ciclo e che sono arrivati ad essere delle nane brune. Se una stella ha una massa abbastanza piccola, non riesce ad accendere la fusione dell'idrogeno e si limita a quella del deuterio, che dura abbastanza poco tempo.



Figura 13: L'effetto microlensing gravitazionale. Fonte: NASA.⁹¹

Ci potrebbero essere anche degli oggetti più piccoli (sub-nane brune) che

non hanno innescato alcuna reazione nucleare e che quindi sarebbero dei pianeti a tutti gli effetti.

In realtà, osservazioni recenti sembrano suggerire che i pianeti "orfani" potrebbero essere molti di più: uno studio della NASA e dell'Università di Osaka, utilizzando il fenomeno del microlensing (ovvero del disturbo della luce di una stella quando un pianeta, passando tra una stella e il telescopio, disturba gravitazionalmente la luce) stima che il numero di pianeti di dimensioni terrestri potrebbe superare di 20 volte il numero delle stelle.

La Luna presenta sempre la stessa faccia alla Terra. È un fenomeno comune? Ci sono situazioni più complicate?

Come spiegato bene su *Astronomia.com*⁹², la "risonanza spin-orbita 1:1" della Luna è dovuta alla sua parziale "spaghetizzazione", che ha la stessa origine (a causa dell'attrazione terrestre) delle maree di acqua sulla Terra dovute all'attrazione lunare.

Anche assumendo che la Luna sia quasi perfettamente sferica, dato che la forza di gravità non dipende linearmente dalla distanza (e non è costante), il punto (centro di gravità) in cui si potrebbe concentrare tutta la massa della Luna per avere la stessa forza di attrazione non coincide con il suo centro di massa (dove può essere applicata la forza centrifuga, che invece è lineare nella distanza) ma è circa 2 km più vicina alla Terra.

Questo fa sì che, nel sistema di riferimento della Luna, la combinazione tra forza di gravità e forza centrifuga tenda appunto a “stirare la Luna”.

In realtà la Luna non ha la forma di pallone da rugby ma è quasi sferica (con una protuberanza), e si può assimilare a un uovo,⁹³ perché da una parte si è raffreddata prima di bloccarsi nella risonanza, e poi è soggetta a impatti che la modificano e possono farla fondere localmente, ma comunque l'effetto delle forze di marea è quello di deformarla, e questo è essenziale.

Se la Luna fosse un oggetto completamente rigido, l'energia si conserverebbe. In un sistema completamente conservativo non ci sono “attrattori”, ovvero non si può avere una convergenza verso un moto (quello sincronizzato) indipendente dalle condizioni iniziali; quindi la Luna dovrebbe continuare a “agitarsi” e “rigirarsi” [contributo di Lapo Casetti].

Viceversa, se si assume che la Luna sia deformabile, per esempio composta da masse collegate da molle smorzate, le forze di marea causano una deformazione (a meno di non partire con una distribuzione estremamente simmetrica), e lo smorzamento fa sì che, se la Luna gira con un periodo diverso da quello di rivoluzione, questa protuberanza sia in “anticipo” o in “ritardo” (a seconda se gira più o meno velocemente della rivoluzione) rispetto alla congiungente Terra-Luna, così come le maree terrestri sono in ritardo rispetto alla Luna.

Se l'elongazione è inclinata rispetto alla congiungente, l'effetto della coppia di forze è quello di sincronizzare ro-

tazione e rivoluzione, e la differenza tra le forze ha l'effetto di accoppiare la rotazione e la rivoluzione, ovvero di agire come fionda se la rotazione è più veloce della rivoluzione.

L'effetto è più facile da analizzare usando il concetto di conservazione del momento angolare.

Considerando solo forze interne al sistema, la somma del momento angolare orbitale (velocità angolare dell'orbita per massa per raggio al quadrato) più quello intrinseco (momento di inerzia per velocità angolare) si conserva.

Questo fa sì che la sincronizzazione della rotazione della Luna con la sua rivoluzione abbia portato ad un allontanamento della Luna dalla Terra. Dato che il meccanismo è all'opera anche sulla Terra, anche il nostro pianeta sta rallentando e la Luna si sta ulteriormente allontanando.

Tutto ciò funziona per orbite abbastanza circolari. Se l'orbita è sufficientemente ellittica, abbiamo che la velocità lungo la traiettoria varia (la seconda legge di Keplero), e quindi l'inerzia rotazionale del corpo tende a farlo andare fuori sincronia.

Sembra che in questo caso la risonanza più probabile sia quella 3:2, ovvero quella di Mercurio.⁹⁴

I russi non hanno una grande reputazione tecnologica, eppure l'astronauta della NASA Nick Hague dice che le Soyuz sono quasi perfette. Perché?

Tutti i razzi sono ovviamente delle meraviglie tecnologiche, ma quelli che sono da più lungo tempo in servizio hanno dalla loro parte anche l'affidabilità.

La filosofia russa è sempre stata quella che, se una cosa funziona, non si cambia, e i razzi Soyuz (che è il nome sia del razzo che della capsula, ma qui parliamo del razzo) hanno una storia di affidabilità impressionante: più di 1900 lanci con un tasso di successi del 98%.



Figura 14: Nick Hague e Aleksey Ovchinin. Fonte: NASA.⁹⁵

Ma per un astronauta è forse più importante sapere che nel caso in cui ci sia un problema c'è una altissima probabilità di sopravvivere, e Nick Hague l'ha sperimentato di persona.

Nel 2018 Nick stava decollando con il collega russo Aleksey Ovchinin, sulla Soyuz MS-10, quando uno dei quattro booster laterali collise con il corpo principale durante la fase di separazione. Il sistema di salvataggio entrò in

azione e i due astronauti si salvarono anche se dovettero sopportare una fase di alta accelerazione.

Nick è poi risalito sulla Soyuz MS-12 nel 2019, questa volta raggiungendo con successo la Stazione Spaziale Internazionale.

A quali danni fisici sono soggetti gli astronauti, senza considerare le emergenze?

Lo spazio non è un posto accogliente, anche se stiamo dentro una stazione spaziale. Il primo problema è dovuto all'assenza di peso, che ha delle conseguenze sul sistema circolatorio (ecco perché gli astronauti hanno in genere il viso gonfio, provate a stare a testa in giù) e, nel giro di qualche mese, sulle ossa che si decalcificano e sui muscoli che si atrofizzano, come in un malato allettato.

Altri problemi sorgono a livello di sistema cardiovascolare con la diminuzione di globuli rossi e la possibile formazione di trombi. Anche il sistema vestibolare ovviamente ne risente, provocando vari disturbi, in particolare riguardo al sonno. Tra gli effetti meno conosciuti dell'assenza di peso c'è anche l'eccessiva flatulenza.

A questi problemi si aggiungono i danni da radiazioni, che a livello della Stazione Spaziale Internazionale sono ridotti dalle fasce di Van Allen, ma che sarebbero parecchio serie per un insediamento lunare o per un viaggio su Marte. Uno degli effetti più evidenti delle radiazioni sono la visione di lampi di luce quando una particella

attraversa la retina e la formazione di cataratta. L'esperimento sui gemelli Kelly⁹⁶ ha mostrato che, nonostante molti danni siano stati recuperati velocemente, altri hanno avuto conseguenze permanenti come i danni al DNA e quelli sul cervello.

Ovviamente ci sono anche i danni psicologici, legati all'isolamento, allo stress e alla perdita della propriocezione.⁹⁷

Infine, c'è un aspetto poco considerato legato all'uso della tuta pressurizzata per gli esperimenti extra-veicolari: la rigidità e l'ambiente umido e caldo dei guanti causano facilmente emorragie subungueali con perdita delle unghie, che possono anche strapparsi via dal dito durante le manipolazioni.⁹⁸

Per andare sulla Luna bisogna arrivare ad una velocità di almeno 40.000 km/h. La Luna è a 384.000 km, quindi si dovrebbe arrivare a destinazione in 10 ore. Perché invece gli astronauti delle missioni Apollo ci mettevano tre giorni?

La velocità di 40.000 km/h (ovvero 11,2 km/s) è quella che dovrebbe avere un proiettile lanciato dalla superficie terrestre per uscire dall'attrazione terrestre (velocità di fuga o seconda velocità cosmica), che è più o meno la velocità con cui i razzi Apollo effettuavano la *trans-lunar injection*⁹⁹ [segnalato da Gianmarco Vespia].

Però tale velocità dipende dalla distanza dal centro della Terra a cui si parte, più si va in alto, meno velocità iniziale serve o, detta in altra maniera, si può decelerare, cosa che avviene naturalmente se la spinta avviene tutta insieme, come per un sasso lanciato verso l'alto [segnalato da Gianmarco Vespia].

Per andare sulla Luna non si usa un proiettile (come nel romanzo di Verne) ma un razzo, che ha il vantaggio di non richiedere accelerazioni mortali come per un proiettile (nel senso che può raggiungere la velocità richiesta in più tempo) e anche di viaggiare più lentamente mentre l'aria è ancora abbastanza densa, ma ha lo svantaggio di dover accelerare non solo il carico utile, ma anche tutto il carburante residuo (e le strutture per contenerlo), per questo si usano razzi a più stadi.

In ogni caso, conviene bruciare il combustibile necessario nel minor tempo possibile, ovvero con la maggiore accelerazione sopportabile. E conviene anche usare la minor quantità di combustibile possibile. Queste considerazioni valgono per i razzi a combustibile, altre tipologie di spinta come per esempio i motori ionici hanno il limite della massima spinta possibile, per cui in questi casi è giocoforza tenerli accesi per tempi lunghi.

Bisogna anche considerare che non solo bisogna raggiungere l'orbita lunare, ma anche arrivare con la stessa velocità della Luna attorno alla Terra (a meno di non volersi semplicemente schiantare sulla Luna, come il proiettile di Verne in fondo).

Esistono traiettorie che permettono di risparmiare molto carburante rispetto ad un viaggio diretto¹⁰⁰ e paradossalmente queste traiettorie passano periodi di tempo lunghi molto oltre l'orbita lunare, come per esempio quella di *CAPSTONE*¹⁰¹ e di *Danuri*¹⁰², che ci hanno messo più di un anno ad arrivare [segnalato da Gianmarco Vespia].

Più si vuole fare in fretta, più carburante si consuma, in genere. Nel caso di missioni umane si cerca di far rimanere gli astronauti il minor tempo possibile nello spazio, perché è pericoloso e anche per diminuire la quantità di materiale necessario per la loro sopravvivenza (cibo, acqua, ossigeno, ecc.).

Per le missioni Apollo il compromesso fu appunto di far durare il viaggio circa tre giorni.¹⁰³

Batteri, funghi, piante e animali possono vivere (o sopravvivere) nello spazio?

La risposta è no, al momento non ci sono informazioni di forme di vita nello spazio tranne quelle che l'uomo ha usato o portato nelle missioni spaziali.



Figura 15: Il moscerino della frutta *Drosophila melanogaster*,

Sicuramente gli animali sono stati i primi astronauti nella storia dei viaggi spaziali. Nelle prime missioni gli animali usati per la loro praticità e per la loro somiglianza genetica, in particolare nei geni alterati in caso di patologia, con l'uomo sono stati i cosiddetti "moscerini della frutta", *Drosophila melanogaster*, un insetto ampiamente usato in laboratorio come modello animale.

Il 20 febbraio 1947, l'umile moscerino della frutta andò coraggiosamente dove nessuna creatura terrestre era mai arrivata prima. Lo storico viaggio è stato effettuato su un razzo originariamente progettato dai nazisti, il razzo V-2.¹⁰⁴

A partire dal 1946, i militari hanno lanciato una serie di campioni biologici nello spazio su razzi V-2. Semi di mais, la segale e altre piante furono mandate verso il cielo, spesso raggiungendo altezze di 80 miglia (130 chilometri) o più dal suolo. La maggior parte, ma non tutti, sono stati recuperati dopo il lancio ed esaminati a fondo da scienziati che lavorano con la Marina degli Stati Uniti.

Secondo l'Ufficio di ricerca navale, il *White Sands Missile Range* non riuscì a mandare animali nello spazio fino al 1947. Il 20 febbraio di quell'anno, un V-2 carico di moscerini della frutta ha viaggiato in aria per 67 miglia.

La NASA attualmente riconosce l'altitudine di 66 miglia (100 chilometri) come il punto in cui inizia ufficialmente lo spazio. Perciò, quegli insetti sono considerati i primi animali a visitare l'ultima frontiera.¹⁰⁵

Lo studio di questi animali ha avuto e continua ad avere l'obiettivo di capire come possa essere alterato lo sviluppo di un organismo vivente in condizioni di microgravità e come possa reagire a radiazioni. Mentre per le piante la domanda è se possano essere organismi utili da coltivare e edibili per un soggiorno spaziale.

Per quanto possa sembrare strano, ci sono organismi che riescono a sopravvivere per vario tempo al vuoto, alle temperature estreme dello spazio e ai notevoli livelli di radiazione.

Già sul nostro pianeta gli organismi più resistenti in habitat estremi sono quelli unicellulari come i batteri, che possono sopravvivere in forma di spora e probabilmente anche affrontare viaggi interspaziali, magari protetti dentro un grano di polvere.

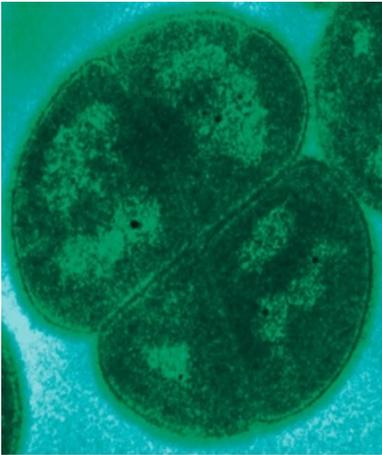


Figura 16: *Deinococcus radiodurans*.¹⁰⁶

Il *Deinococcus radiodurans*,¹⁰⁷ come vedremo è un batterio incredibilmen-

te resistente, capace di sopravvivere alla disidratazione, al freddo intenso, agli acidi e anche alle radiazioni gamma.

Il *Deinococcus radiodurans* è un microscopico esserino dalla forma sferica, scoperto quasi cinquanta anni fa all'interno di cibi in scatola.

Ma non un batterio qualsiasi. Dra, come lo chiamano gli addetti ai lavori, dalle iniziali del genere e della specie, è un campione di resistenza alle radiazioni, tanto da comparire nel libro dei Guinness World Records come "*The Most radiation-resistant lifeform*" – la "forma di vita più resistente alle radiazioni".

Nel 2015, Dra è stato l'oggetto di un esperimento condotto a bordo della Stazione spaziale internazionale (Iss) chiamato Tanpopo.¹⁰⁸

L'idea era quella di esporre fuori della stazione orbitante pannelli contenenti piastre batteriche per testarne la sopravvivenza in questo ambiente estremo. In particolare, la sopravvivenza alla radiazione con una lunghezza d'onda maggiore ai 200 nm (una lunghezza d'onda inferiore a questa comporterebbe, infatti, danni anche per il microorganismo).

Ma perché questa configurazione dell'esperimento? La risposta sta nel fatto che l'atmosfera marziana assorbe la radiazione Uv-C (che va da 100 a 280 nm) al di sotto dei 190–200 nm.

Questo vuol dire che, qualora riuscisse a sopravvivere all'esperimento, Dra e specie affini altrettanto resistenti potrebbero potenzialmente sopravvivere

re anche su Marte. Non solo: tali estremofili potrebbero migrare tra i pianeti e distribuire la vita nell'universo: un concetto alla base dell'ipotesi della panspermia, o del trasferimento interplanetario della vita.¹⁰⁹

Tornando all'esperimento, i pannelli contenenti le cellule della specie batterica il 15 aprile 2015 sono stati portati sulla Iss a bordo della navicella SpaceX Dragon, lanciata da Cape Canaveral (Usa) da un razzo Falcon-9 di Space-X. Giunti a destinazione, i pannelli sono stati fissati a una struttura della Jaxa - l'Exham (*Experiment Handrail Attachment Mechanism*) - che consente ai ricercatori di condurre esperimenti esposti nello spazio.¹¹⁰

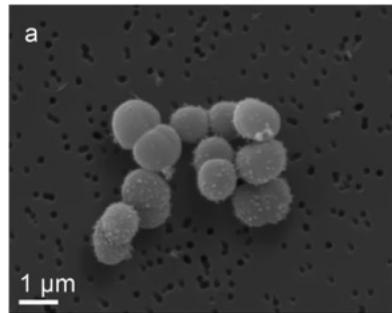
Il 26 maggio 2015, l'Exham è stato fissato al braccio robotico Kibo (*Japanese Experiment Module Remote Manipulator System Small Fine Arm*), che ha esposto l'esperimento nello spazio a livello della *Exposed Facility del Japanese Experiment Module*.¹¹¹

Dopo un anno trascorso in questa condizione, protette dalla luce UV inferiore a 190 nm da un involucro di diossido di silicio, il 26 agosto 2016 le cellule sono infine tornate a terra a bordo dello *SpaceX Dragon C11*.

Il prezioso carico biologico è stato quindi recuperato e analizzato presso i laboratori della Tokyo University of Pharmacy and Life Science (Giappone), del *German Aerospace Center* (Dlr, Colonia), del *Vienna Metabolomics Center* (ViMe) dell'Università di Vienna e del *Center for Microbiome Research* presso la *Medical University Graz*.

I risultati, pubblicati ora sulla rivista *Microbiome*, mostrano la capacità del batterio di sopravvivere nelle condizioni sperimentali. In particolare, quando osservate al microscopio, le cellule non presentavano alcun danno morfologico. Erano evidenti solo numerose vescicole, piccoli bozzoli che emergevano dalla membrana esterna (uno degli involucri protettivi del batterio) prodotte come meccanismo di difesa.¹¹²

L'analisi delle proteine espresse e dei trascritti - sequenze di Rna prodotte dalla lettura del Dna, che una volta tradotte sfornano proteine - ha rivelato che i livelli di queste macromolecole erano molto più elevati rispetto alle cellule controllo poste qui sulla Terra.



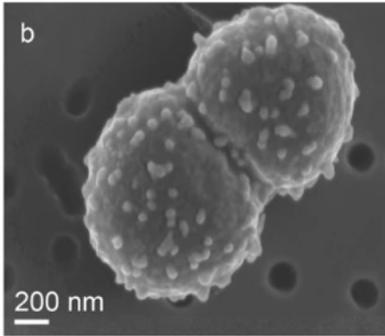


Figura 17: Immagini in microscopia elettronica a scansione di *Deinococcus radiodurans* dopo un anno trascorso fuori dalla Iss. Crediti: Emanuel Ott et al., *Microbiome* 2020.

Ma non proteine e trascritti qualsiasi, bensì quelli coinvolti nella risposta protettiva allo stress ossidativo (come la putrescina e altre capaci di eliminare le specie reattive dell'ossigeno) e nella risposta ai danni al Dna prodotto da radiazioni: un meccanismo, quest'ultimo, di cui per fortuna anche noi umani siamo dotati.

Si tratta di un meccanismo capace di rimuovere il piccolo pezzo di filamento di Dna che contiene i nucleotidi danneggiati (i mattoncini di cui sono costituiti i due filamenti della macromolecola) e rimpiazzarlo con uno nuovo di zecca.

Oltre a esibire una notevole resistenza alle radiazioni, poi, nel corso dell'esperimento all'esterno della Iss *Deinococcus radiodurans* è risultato capace di resistere anche al vuoto estremo, alle fluttuazioni di temperatura, all'essiccazione, al congelamento e alla microgravità. Se è soprannominato "Conan il batterio"¹¹³ un motivo c'è.

"Queste indagini ci aiutano a comprendere i meccanismi e i processi attraverso i quali la vita può esistere oltre la Terra, ampliando le nostre conoscenze su come sopravvivere e adattarsi all'ambiente ostile dello spazio esterno", dice Tetyana Milojevic, a capo del gruppo di biochimica spaziale presso l'Università di Vienna e co-autrice dello studio. *"I risultati suggeriscono che, grazie al suo efficiente sistema di risposta molecolare, la sopravvivenza di D. radiodurans nell'orbita terrestre bassa per un periodo anche più lungo sia possibile, e indicano che viaggi ancora più lunghi e più lontani siano affrontabili da organismi con tali capacità".*¹¹⁴

Uno dei maggiori problemi per gli astronauti sicuramente però è che tutto prima della missione debba essere sterilizzato per evitare possibili contaminazioni patogene per gli astronauti stessi ma anche per evitare di trasportare alieni in altri sistemi che non conoscono ancora.

Nel 1998, sulla stazione spaziale russa Mir, gli astronauti decisero di far pulizia e censire batteri e microorganismi che potevano essersi annidati sulle superfici del veicolo spaziale. Dietro a un pannello trovarono diverse bolle d'acqua popolate di batteri e funghi, una persino delle dimensioni di un pallone.

Portiamo addosso quotidianamente i batteri che incontriamo o quelli che già popolano il nostro corpo, per cui può capitare che diventino ospiti indesiderati, a volte innocui, a volte rischiosi, anche delle missioni spaziali.

In altri casi, invece, siamo stati noi stessi a decidere di portarli in orbita,

in totale sicurezza. A quale scopo? Per compiere esperimenti, per esempio, per comprendere meglio i meccanismi di selezione e adattamento dei microbi, tramite mutazioni, a condizioni estreme come la microgravità. L'idea è, se possibile, tornare a Terra sapendo qualcosa in più.

Quasi tre decenni prima della vicenda della Mir, nel 1970, l'astronauta americano Fred Haise, impegnato a bordo della missione Apollo 13, si era ammalato a causa di un agente patogeno col quale era entrato in contatto in orbita, il bacillo *Pseudomonas aeruginosa*, e che gli costò un'infezione ai reni per fortuna senza conseguenze permanenti. La presenza di batteri a bordo può in effetti rappresentare un rischio per la salute dell'equipaggio e per la buona riuscita di una missione, soprattutto perché in condizioni di microgravità il sistema immunitario è più debole.

Curiosamente, proprio quel bacillo, assieme al batterio della salmonella, è diventato più tardi protagonista di una ricerca a bordo della Stazione spaziale internazionale.



Figura 18: *Pseudomonas aeruginosa*.¹¹⁵

I primi esperimenti sono cominciati nel 2006, nell'ambito di una collaborazione tra astronauti a bordo e scienziati sulla Terra. I microrganismi sono stati fatti crescere in ambiente controllato, per osservarne le reazioni alla microgravità, e le conclusioni degli studi sono state poi pubblicate nel 2011 sulla rivista *Applied and environmental microbiology*.¹¹⁶

In entrambi i tipi di batteri, la microgravità modificava alcuni regolatori genici molecolari, che rendevano l'agente patogeno più virulento e dunque anche più rischioso per gli "inquilini" della Stazione spaziale.

Studiare i batteri in orbita non è fondamentale soltanto per tutelare la salute dei cosmonauti durante le missioni.

Come spiegato anche dagli scienziati del gruppo di ricerca coinvolto, le condizioni cui gli agenti patogeni erano sottoposti durante gli esperimenti erano simili a quelle che essi incontrano nel nostro corpo, in particolare nel sistema respiratorio, in quello gastrointestinale e nel tratto urinario.

Questi studi possono quindi aiutarci a comprendere come si sviluppano le infezioni da essi causate.

Come studiare le mutazioni del DNA?

Non tutti i batteri studiati sulla ISS, sono dannosi. Con l'esperimento MVP Cell-02 della Nasa, gli scienziati hanno scelto di osservare il *Bacillus subtilis*, non nocivo per l'essere umano e noto per essere un batterio estremofilo, capace cioè di resistere a condizioni di

vita estreme, e con un genoma già completamente sequenziato.

Per studiare il bacillo, i ricercatori ne hanno portato in orbita 84 colture: 42 sono state sottoposte a condizioni di microgravità, mentre 42 erano sottoposte a condizioni di controllo a gravità terrestre. Altre 42 colture sono invece rimaste sulla Terra.

Il protocollo sperimentale è durato 60 giorni, nel corso dei quali si sono originate migliaia di generazioni batteriche. I *Bacillus subtilis* sono stati infine congelati e spediti sulla Terra per continuare le ricerche.

Gli obiettivi dell'esperimento erano due: capire, in previsione di lunghi viaggi spaziali, come mutino nel tempo i batteri che possono far parte della nutrita schiera di ospiti non patogenetici dell'ISS, e comprendere, in linea generale, i loro processi evolutivi. Batteri nell'ignoto spazio profondo. Sono in corso anche esperimenti in cui i batteri sono sottoposti a condizioni di vita estreme: quelle dello spazio cosmico.

Da uno studio del 2012 condotto dall'*Institute of Aerospace Medicine* di Colonia e l'*Institute of Flight Medicine* di Aquisgrana, in Germania, i cui risultati sono stati pubblicati sulla rivista *Astrobiology*, il *Bacillus subtilis* (più precisamente le sue spore) sembra potersi conservare fino a 559 giorni in condizioni simili a quelle della superficie di Marte. Secondo i risultati di uno studio giapponese pubblicati nel 2020 sulla rivista *Frontiers in microbiology*, il *Deinococcus radiodurans* ha però battuto questo record, resistendo alle condizioni dello spazio cosmi-

co – e in particolare in tre pannelli situati all'esterno della Stazione spaziale internazionale, esposti al vuoto e alle radiazioni – per ben tre anni.

Trascorso questo tempo, e dopo che un braccio robotico ha recuperato le colture di batteri, i risultati sono stati sorprendenti: i *Deinococcus radiodurans* che si trovavano nella fascia più esterna delle colonie erano morti, ma avevano protetto il centro della coltura dai danni al DNA, garantendo così la sopravvivenza dei batteri.

Possono quindi i batteri viaggiare nello spazio? Studi di questo tipo ci conducono dritti anche a domande sull'origine della vita sul pianeta Terra.¹¹⁷

Ma sono solo gli organismi unicellulari ad essere capaci di viaggiare nello spazio senza tuta. Anche i tardigradi possono farlo,¹¹⁸ e sono molto più carini dei batteri.

Uno studio pubblicato su *Astrobiology* ha valutato la capacità di resistere a impatti a velocità fino a 825 m/s. Condotto da due ricercatori dell'Università del Kent, lo scopo dello studio è stato quello di valutare le implicazioni per la panspermia di questa loro resistenza.



Figura 19: Un tardigrado.

I tardigradi, nome composto dalle parole latine *tardus*, 'lento', e *gradi*, 'camminare' sono minuscole creature invertebrate a otto zampe campioni di sopravvivenza, sono un phylum di invertebrati protostomi celomati.¹¹⁹

Basse temperature, vuoto, radiazioni, esposizione allo spazio cosmico, digiuno prolungato di anni e anni... non c'è condizione estrema alla quale non siano stati sottoposti e dalla quale non ne siano usciti "illesi". Doti fuori dal comune che hanno spinto gli scienziati a ipotizzare che possano esserci anche loro fra i fantomatici "semi" che, secondo la teoria della panspermia, avrebbero permesso il trasferimento interplanetario della vita.¹²⁰

Ed proprio per sondare questa possibilità - in particolare l'ipotesi della litopanspermia, ovvero il trasferimento di forme di vita da una superficie planetaria all'altra all'interno di rocce espulse nello spazio da impatti astronomici - che Alejandra Traspas, ricercatrice presso l'Università del Kent (Regno Unito), e Mark Burchell, professore nello stesso ateneo, hanno studiato la capacità di questi minuscoli esseri di sopravvivere agli shock da impatto - la cui entità, in termini di velocità e pressioni d'urto risultanti, è il fattore limitante della teoria.

Per farlo hanno letteralmente sparato individui di *Hypsibius dujardini*, una specie di tardigrado, a velocità considerevoli, facendoli impattare contro una superficie sabbiosa.

Nell'esperimento, gli animaletti sono stati prima caricati in un proiettile, che è stato successivamente congelato per 48 ore in modo da indurre negli in-

dividui uno stato di criptobiosi, una sorta di letargo metabolico in cui i tardigradi entrano in risposta a condizioni ambientali avverse - uno dei motivi per cui sono anche chiamati "orsi d'acqua" (*waterbears*, in inglese).

Una volta indotto lo stato di quiescenza, i proiettili sono stati inseriti in una speciale "pistola" a gas a due stadi, dalla quale sono stati sparati sei colpi contro bersagli di sabbia a velocità comprese tra i 2000 e i 3600 km/h.

Dopo ogni colpo, il bersaglio è stato versato in una colonna d'acqua per separare la sabbia da altri materiali e isolare così i tardigradi. Gli individui recuperati sono stati infine osservati nel tempo per valutarne la sopravvivenza dopo l'impatto. Come controllo, 20 tardigradi sono stati congelati e scongelati senza che venissero sparati con la pistola.

Il risultato? Questi tenacissimi esserini sono sopravvissuti a impatti fino a 2.970 km/h, corrispondenti nel loro caso a una pressione d'urto di circa 1.01 gigapascal.

Recentemente, inoltre, gli astronauti russi che stavano ripulendo l'esterno della ISS hanno trovato del plancton marino, che non si sa come abbia fatto ad arrivare lassù.¹²¹

Perché la traiettoria della Stazione Spaziale Internazionale sembra così complicata quando viene visualizzata sulla mappa della Terra?

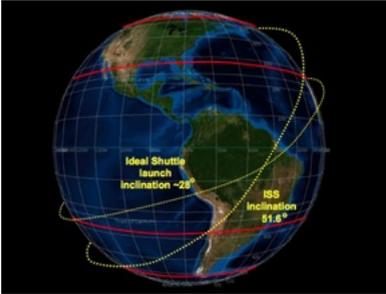


Figura 20: Traiettorie dello shuttle e della ISS.

La traiettoria della Stazione Spaziale Internazionale è quasi circolare, ma inclinata di circa 52 gradi rispetto all'equatore. Ci sono varie ragioni per questa inclinazione, che rende i lanci dagli Stati Uniti più costosi.

La ragione principale è la Russia è un partner importante della stazione. I lanci russi da Baikonur partono con questa inclinazione, a sua volta dovuta al fatto che così si evita che un lancio fallito vada a cascare in Cina.

Però questa inclinazione ha anche dei vantaggi, perché, dato che la Terra ruota su se stessa, in questa maniera prima o poi la ISS sorvola quasi tutta la superficie del nostro pianeta.

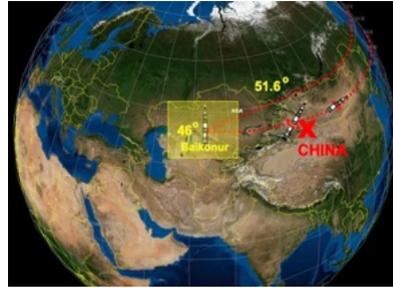


Figura 21: Traiettorie dopo i lanci da Baikonur.



Figura 22: Copertura della ISS.

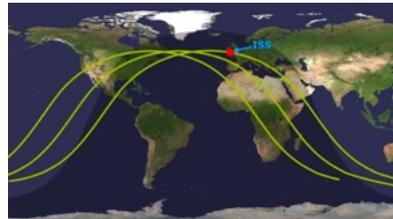


Figura 23: Traiettorie della ISS rispetto alla Terra.

Quando si riporta la traiettoria su una mappa terrestre, vediamo delle curve che vanno su e giù tipo delle sinusoidi.

È possibile vedere gli astronauti che lavorano sulla Stazione Spaziale Internazionale, attraverso un telescopio?

Dal punto di vista fisico si può fare.

Matematicamente, con un telescopio da 2 metri e mezzo, si potrebbe vedere un dettaglio di circa 25 cm alla distanza della ISS,¹²² anche se in realtà, senza ottiche adattive (che compensano la turbolenza atmosferica) normalmente i telescopi possono arrivare ad una risoluzione (ovvero a distinguere chiaramente due punti) di 1 secondo di arco, che, se non ho sbagliato i conti, corrispondono a circa 1 metro e settanta alla distanza di 400 km.

Il problema pratico è se ciò può essere fatto con un telescopio amatoriale, visto che gli osservatori hanno altro da fare.

Dalle foto visibili qui,¹²³ qualcuno ci è effettivamente riuscito, ovviamente gli astronauti sono poco più grandi di un pixel, e si identificano solo confrontandoli con le foto scattate a bordo della ISS o lì vicino.

Se lo spazio è a tre gradi kelvin, perché gli astronauti nella stazione spaziale internazionale non si congelano? Come viene scaldata la ISS?

In realtà il problema della ISS non è tanto il riscaldamento, quanto il suo

raffreddamento (oltre alla distribuzione del calore nelle varie parti). I vari apparati della ISS generano calore, oltre a quello ricevuto dal Sole e anche dalla Terra. Nel vuoto l'unica maniera per dissipare il calore è per irraggiamento, verso lo spazio esterno a tre gradi kelvin. La potenza irradiata dipende dalla superficie, dal colore del radiatore, dalla differenza tra la quarta potenza della temperatura e dalla costante di Stefan-Boltzmann $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^2\text{K}^4$.

Con una superficie di 1 m², alla temperatura dei radiatori di 300 K (28 gradi), si irraggia una potenza di circa 600 W. Si tenga conto che il Sole, alla nostra distanza, ci "spara" circa il doppio, e quindi la ISS deve essere ben coibentata. Quindi, ovviamente se si entrasse in una stazione rimasta spenta a lungo come nel film Soyuz 7, la si trova tutta ghiacciata, ma normalmente il problema è come smaltire il calore.¹²⁴

Sulla Stazione Spaziale Internazionale c'è Internet? E il Wi-Fi?

Sì, come raccontato su *Is there WiFi in space? Seven interesting facts – Rocket-Net Fibre Internet*,¹²⁵ il primo access point è stato installato nel 2008, e aggiornato nel 2012. Il wifi viene usato internamente, per connettersi ai vari strumenti e anche con gli astronauti quando indossano le tute spaziali.

Nel 2016 è stato installato anche un access point fuori dalla ISS, a cui si collegano anche delle telecamere. Il

collegamento con Internet, comunque, passa da un modem che passa i pacchetti al collegamento radio, con una banda di 600 mbit/s in download e 30 mbit/s in upload, ma con una latenza di 500ms, ovvero mezzo secondo data la distanza e i vari passaggi.

Quindi possono facilmente scaricare la posta elettronica e postare sui social, mentre per le interazioni "live" si usa un collegamento da radioamatore.¹²⁶

Come funziona il fuoco nello spazio?

Per fortuna non ci sono stati molti incendi nelle missioni spaziali, l'unico fu l'incendio del generatore chimico di ossigeno della MIR nel 1997,¹²⁷ risolto in poco tempo.

Comunque, furono fatti esperimenti di incendio in navette destinate alla distruzione¹²⁸ e a bordo.

Quello che si è scoperto è che il fuoco in microgravità si comporta in maniera imprevedibile, data la mancanza della convezione, per cui può stagnare a lunghi tratti e poi ripartire.

Non è neanche facile soffocarlo diminuendo la percentuale di ossigeno, dato che non è facile controllare la diffusione in assenza del moto "ordinato" dei fluidi dato dalla convezione.¹²⁹

È possibile lanciarsi dalla Stazione Spaziale Internazionale con un paracadute e arrivare a Terra?

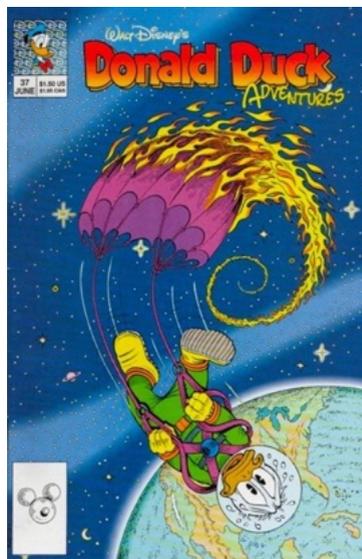


Figura 24: Copertina di Don Rosa.

Cioè, fare come Paperino nel Fumetto di Don Rosa del 1991 "Il papero che cadde sulla terra"?¹³⁰

In questa storia il prof. Mollicule ha inventato un sistema economico per andare nello spazio: un carburante che brucia lentamente senza ossigeno così che si possa salire a 50 miglia orarie... l'unica cosa fisicamente sbagliata nella storia.



Figura 25: Come funziona il motore del prof. Mollicule.

Il professore ha applicato questi motori a un vecchio turbopiano, comprato da Paperone in un'asta di residuati.

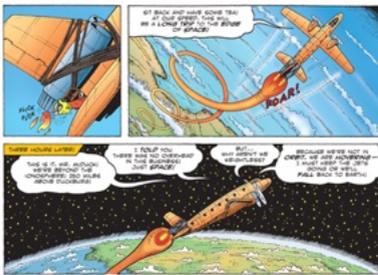


Figura 26: Nello spazio.

Arrivati ad una certa altezza accendono i motori, e li tengono accesi per rimanere fermi (non sono in orbita).



Figura 27: In caduta.

Paperone, deluso dal fatto che non possono così acchiappare al volo i vecchi satelliti (che, essendo in orbita, viaggiano a circa 10.000 km/h), spegne i motori e così l'aereo (e Paperino che è stato sbalzato fuori) cominciano a cadere verso la Terra.

Per fortuna, Paperino riesce ad afferrare un paracadute e lo apre... ma ovviamente senza aria non serve a nulla.



Figura 28: Paracadute.

E quando raggiunge l'atmosfera (con una velocità non indifferente), l'attrito brucia il paracadute (ma non lui...).

Saltando giù dalla Stazione Spaziale Internazionale però procederemmo con la sua stessa velocità, quindi in prima approssimazione si resterebbe alla stessa distanza.

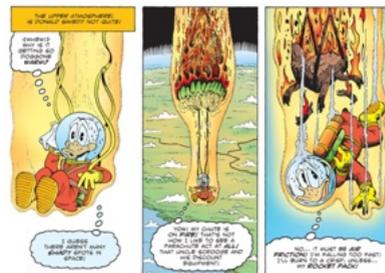


Figura 29: Rientro in atmosfera.

Questo è quello che accade a vari oggetti persi o gettati (durante le EVA) dalla stazione. Questi oggetti (come anche la ISS) sono frenati dall'aria residua, e quindi pian piano scendono verso la Terra (la ISS viene però periodicamente rispinta in alto), **aumentando** la loro velocità (per via della conservazione dell'energia), finché non incontrano l'atmosfera e bruciano, come descritto.

In effetti, è il destino dei cubesat rilasciati dalla ISS, a volte addirittura a mano.



Figura 30: Samantha Cristoforetti che si prepara a rilasciare uno dei CubeSat Russi. Fonte: NASA TV.

Il problema è che molti cubesat rimangono in orbita più del tempo previsto (qualche mese), quindi prima di bruciare nell'atmosfera ho paura che si perirebbe di consunzione...¹³¹

Cosa indica una bussola sulla Stazione Spaziale Internazionale?

La Stazione Spaziale Internazionale viaggia molto vicina alla Terra (circa 400 km di distanza) per cui il campo magnetico (come quello gravitazionale) è quasi lo stesso.

Una bussola indica il nord (magnetico) anche sulla ISS.

Il tempo rallenta andando velocemente, ma anche in un campo gravitazionale. Sulla Stazione Spaziale Internazionale si rimane più giovani o si invecchia più rapidamente di un gemello che rimane a terra?

Dipende se si intende il tempo "fisico" o quello "biologico".

Per il tempo fisico, per un orologio in un satellite in orbita ci sono due contributi di segno diverso, rispetto ad un orologio sulla Terra.

Il primo è il rallentamento dovuto alla velocità del satellite, il secondo è invece il rallentamento di quello a Terra dovuto alla maggiore intensità del campo gravitazionale, quindi una "accelerazione" per quello in orbita.

Dalla pagina di Wikipedia¹³² si vede che l'effetto è quello di accelerare l'orologio per i satelliti GPS, mentre per le orbite dello Shuttle (che sono più o meno quelle della ISS) l'effetto è quello di rallentarlo (il grafico vale per le orbite; quindi, alla distanza corrispondente alla superficie della Terra il rallentamento degli orologi dovuto alla velocità non è zero, perché si suppone che orbitino a poca distanza dalla superficie).

Quindi l'astronauta sulla ISS dovrebbe invecchiare un po' meno di un suo eventuale gemello, grazie ad Einstein,

anche se in questo articolo *Einstein's 'Time Dilation' Spread Age Gap for Astronaut Scott Kelly & His Twin*¹³³ si dice il contrario.

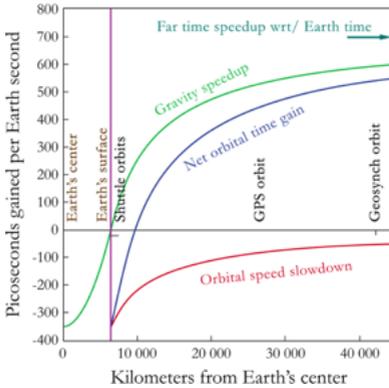


Figura 31: Dilatazione del tempo dovuta alla gravità e alla velocità orbitale.

In effetti, l'esperimento è stato fatto con due gemelli, anche se lo scopo era quello di determinare piuttosto quali conseguenze fisiologiche e genetiche avessero i viaggi spaziali.¹³⁴



Figura 32: I gemelli Kelly.

I risultati mostrano che il corpo umano recupera molto bene dopo una lunga permanenza (1 anno) nello spazio.

Che vuol dire "microgravità"?

Alla quota della ISS ($h \approx 400$ km), l'accelerazione di gravità g' è quasi uguale a quella sulla superficie terrestre: $g = GM/R^2 \approx 9,8$ m/s², con G costante di gravità universale, M massa della Terra e $R = 6000$ km raggio terrestre. Da qui otteniamo che alla quota della stazione spaziale,

$$\begin{aligned} g' &= \frac{GM}{(R+h)^2} \\ &\approx \frac{GM}{R^2(1+2h/R)} \\ &\approx \frac{GM}{R^2}(1-2h/R) \\ &= g(1-2h/R), \end{aligned}$$

circa il 10% meno.

Ma la stazione spaziale e il suo contenuto sono in caduta libera, quindi in prima approssimazione la forza di gravità è compensata dalla forza di inerzia: $f - ma = mg' - ma = 0$, e poiché, assumendo che segua un moto circolare uniforme, $a = v^2/r$, si vede che per stare in orbita c'è una relazione precisa tra distanza (dal centro della Terra) r e velocità v :

$$\begin{aligned} v^2 &= g'(R+h) \\ \Rightarrow v &= \sqrt{g(R-h)} \\ &\approx 7,8 \text{ km/s} \\ &= 28.000 \text{ km/h.} \end{aligned}$$

Però ci sono delle piccole differenze tra le vari parti della stazione (e anche dei corpi degli astronauti) perché non tutto sta alla stessa quota h .

Questo vuol dire che non tutto viaggia alla velocità necessaria per stare "fermo" (nel sistema di riferimento della stazione).

Se per esempio un corpo viaggia ad una velocità superiore a quella del centro di massa della stazione, oltre ad andare “in avanti”, in realtà sta seguendo un’orbita diversa, leggermente ellittica rispetto a quella supposta circolare della ISS, quindi c’è anche un movimento che appare come una torsione.

Inoltre, la ISS viene continuamente frenata dall’attrito con l’aria residua, frenamento che non avviene per gli oggetti all’interno, che quindi vedono la stazione “accelerare” in senso opposto. Ovviamente, ogni tanto la ISS deve essere “spinta” per non farla rientrare in atmosfera, e in questo caso le forze di inerzia sono ben avvertibili.¹³⁵

La Stazione Spaziale Internazionale proietta un’ombra sulla Terra?

L’ombra è l’area scura proiettata su una superficie da un corpo che, interponendosi tra la superficie stessa e una sorgente luminosa, impedisce il passaggio della luce.

L’ombra è l’area scura proiettata su una superficie da un corpo che, interponendosi tra la superficie stessa e una sorgente luminosa, impedisce il passaggio della luce.

L’ombra è netta se la sorgente luminosa è puntiforme, se non ci sono fenomeni di diffrazione della luce dovuti all’atmosfera e se la lunghezza d’onda della luce è molto più piccola della dimensione del corpo (diffrazione), altrimenti abbiamo l’ombra massima (indebolita dalla diffusione) solo nella

zona centrale, a parte i fenomeni di diffrazione.

Per la ISS la diffrazione non conta, dato che è molto grande e si parla di luce visibile. C’è ovviamente la diffusione ma soprattutto il fatto che il Sole non è puntiforme, dalla Terra appare con un’apertura angolare di circa mezzo grado (come la Luna).

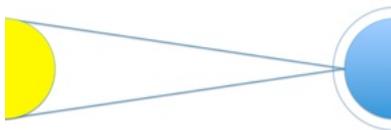


Figura 34: Apertura angolare del Sole visto dalla Terra .

Usando il disegno nella figura 34¹³⁶ si vede che per avere l’ombra bisogna che l’ampiezza angolare della ISS vista dalla Terra sia maggiore di mezzo grado.

Chiamiamo L la dimensione minima di un oggetto che fa ombra sulla Terra. Dato che sta ad una distanza $h \approx 400\text{km}$, la sua apertura angolare è $\alpha = L/h = 0,5 \cdot \pi/180 = 8,7 \cdot 10^{-3}$ radianti (per piccoli angoli la tangente è uguale all’angolo).

Quindi $L = ah \approx 3500\text{ m}$, ma la ISS non è così grande.

Se si usasse come sorgente di luce una stella si potrebbe vedere l’ombra, ovvero, si potrebbe vedere la stella oscurata dalla ISS mentre ci passa davanti.

Ovviamente è possibile “vedere” la ISS sullo sfondo della Luna o del Sole (usando un telescopio), perché in questo caso il sistema di lenti del sistema di osservazione (e dell’occhio) è fatto in

maniera da rendere la destinazione (equivalente alla sorgente, i cammini ottici sono reversibili) puntiforme.



Figura 35: La ISS sullo sfondo del Sole.

Da dove viene l'ossigeno nella Stazione Spaziale Internazionale?

Per molti anni l'ossigeno della Stazione Spaziale Internazionale è stato ottenuto da tre diverse fonti. La principale e la più utilizzata è la produzione di ossigeno a bordo tramite elettrolisi dell'acqua (acque di scarico o condensata dell'umidità): questo è infatti il principio di funzionamento dell'apparecchiatura OGS (*Oxygen Generation System*), che fa parte del sistema di supporto vitale ECLSS (*Environmental Control and Life Support System*).

Nella parte russa della Stazione Spaziale c'è un'apparecchiatura analoga chiamata Elektron, situata nel modulo di servizio *Zvezda*.¹³⁷

Ma in caso di necessità ci sono altre due diverse fonti: la prima è naturalmente il rifornimento da terra.

In caso di emergenza gli astronauti hanno, infine, a disposizione sempre nel modulo *Zvezda* anche delle cosiddette

“candele ad ossigeno”, che sfruttano delle reazioni chimiche per generare ossigeno. Il principio di queste candele è molto simile a quello ipotizzato da Verne nel suo “Dalla Terra alla Luna”. Verne usava il clorato di potassio, sulla ISS si usa invece il clorato di sodio.

Riscaldati a qualche centinaio di gradi centigradi, queste sostanze si decompongono e liberano ossigeno.

Per decomporle Verne usava il gas, mentre nella *Zvezda* si usa la combustione di polvere di ferro. Ovviamente, sia il gas che il ferro consumano parte dell'ossigeno prodotto.

[Segnalato da Gianmarco Vespia] Dal 2018 c'è a bordo della ISS anche un sistema di riciclaggio dell'anidride carbonica che, sfruttando l'idrogeno prodotto dall'elettrolisi dell'acqua (e che prima veniva semplicemente liberato nello spazio), converte parte della CO₂ prodotta in acqua e metano. L'acqua poi viene idrolizzata in ossigeno e idrogeno, e il metano espulso.¹³⁸ Il vantaggio principale del sistema è quello di risparmiare l'uso di acqua, evitando in parte la necessità di rispettarla su da Terra.

È possibile che un satellite o un detrito o un micrometeorite colpiscano la Stazione Spaziale Internazionale?

La Stazione Spaziale Internazionale è posizionata su un'orbita abbastanza bassa così che ci sia ancora un certo

drag dovuto all'aria, e questo fa sì che non incontri tanti detriti.

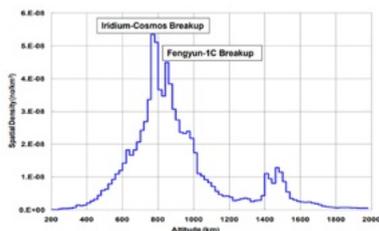


Figura 33: *Densità spaziale dei detriti spaziali LEO in base all'altitudine, secondo un rapporto della NASA del 2011 all'Ufficio delle Nazioni Unite per gli affari dello spazio extra-atmosferico.*

I detriti più grandi ed i satelliti sono costantemente monitorati¹³⁹ e la ISS può effettuare manovre correttive per evitare i possibili incontri. La ISS ha anche degli schermi di protezione contro le collisioni,¹⁴⁰ che comunque accadono regolarmente, in particolare con i micrometeoriti,¹⁴¹ anche la recente perdita di refrigerante sulla navetta Soyuz¹⁴² sembra sia dovuta all'impatto di un micrometeorite.

È possibile allevare dei pesci sulla Stazione Spaziale Internazionale?

Sono stati condotti dei test su dei pesci nella ISS,¹⁴³ e, nonostante si usino delle piscine sulla Terra per simulare gli ambienti a microgravità,¹⁴⁴ sembra che i pesci riportino dei danni allo scheletro ancora più rapidamente degli umani.¹⁴⁵ Ovviamente siamo ancora agli inizi delle sperimentazioni ed osservazioni.

La Cina prevede di inviare il pesce zebra nello spazio per studiare come gli astronauti sperimentano la perdita ossea in condizioni di microgravità. Zhang Wei, assistente comandante in capo cinese del sistema di applicazione spaziale per l'ingegneria spaziale con equipaggio, ha annunciato che il piccolo pesce sarà inviato in orbita dalla stazione spaziale di *Tiangong*, la stazione spaziale cinese, nell'ambito della ricerca relativa all'interazione tra microrganismi e pesci in piccoli ecosistemi chiusi.

Perché il pesce zebra? Gli studi hanno dimostrato che il pesce zebra è perfetto per la ricerca biomedica, motivo per cui è ampiamente utilizzato negli esperimenti.

Secondo un documento del 2019, il loro genoma completamente sequenziato, la facilità di manipolazione genetica, l'elevata fecondità, la capacità di fecondazione esterna, il rapido sviluppo e gli embrioni quasi trasparenti ne fanno il candidato ideale per lo studio dei processi biologici e delle malattie umane in un ambiente di laboratorio.¹⁴⁶

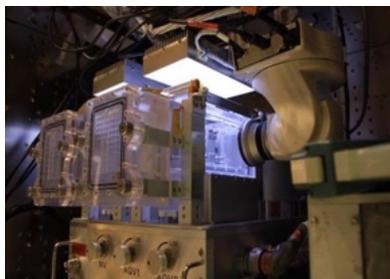


Figura 36: *L'Aquatic Habitat (AQH) - Crediti: NASA.*

L'invio di pesci nello spazio non è un'idea nuova. L'*Aquatic Habitat* (AQH) della NASA è stato inviato alla Stazione Spaziale Internazionale nel 2012. L'AQH è stato specificamente progettato per esplorare gli effetti della microgravità sulla vita marina e ha ospitato un gruppo di *medaka*, un piccolo pesce d'acqua dolce originario del Giappone.¹⁴⁷ Il pesce zebra era stato inviato alla Salyut 5 dell'Unione Sovietica nel 1976 a bordo della missione Soyuz 21.

I cosmonauti hanno condotto esperimenti con il *danio zebra* e hanno scoperto che può modificare alcuni dei suoi comportamenti quando vive in un ambiente con microgravità.

L'indagine *Medaka Osteoclast* si svolge all'interno dell'Habitat Acquatico a bordo della Stazione Spaziale Internazionale. La struttura a griglia sul lato superiore di ogni acquario *Aquatic Habitat* trattiene l'aria, impedendo all'acqua di fuoriuscire. L'aria viene iniettata con una siringa speciale dall'equipaggio.

Lo studio *Medaka* è iniziato il 26 ottobre 2012 ed è continuato fino al 24 dicembre, per una durata totale di 60 giorni in orbita. I pesci conservati chimicamente sono poi tornati sulla Terra per l'analisi post-volo, ma i ricercatori imparano già molto dalle osservazioni video trasmesse a terra.

L'indagine *Zebrafish Muscle* della *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA) ha osservato come gli effetti della microgravità sul pesce zebra, *Danio rerio*, un pesce tropicale d'acqua dolce siano principalmente di atrofia muscolare e di osteoporosi.¹⁴⁸



Figura 37: L'astronauta della JAXA Aki Hoshide prepara il portapacchi multi-uso per un'indagine sui pesci *Medaka* durante la Spedizione 33 a bordo della Stazione Spaziale Internazionale - Credit: NASA.

"Speriamo che questa ricerca ci permetta di capire come la microgravità influisce sulla massa e sulla forza muscolare in termini di geni e molecole e quali tipi di meccanismi molecolari contribuiscono al recupero dei muscoli dopo l'esposizione alla microgravità", ha affermato Sehara-Fujisawa.

"Questa ricerca dovrebbe chiarire se l'esercizio fisico e le reazioni antigravitazionali condividono una regolazione genetica comune. Sarebbe meraviglioso se questa ricerca ci fornisse suggerimenti per migliorare l'atrofia muscolare dovuta all'invecchiamento o alle malattie".¹⁴⁹

L'indagine determinerà se gli osteoclasti cambiano durante questi studi orbitali.

Attualmente gli astronauti cercano di contrastare la perdita di densità ossea attraverso routine di esercizio quotidiano di resistenza ad alta intensità di due ore, nutrizione e integratori di vitamina D.

Prevenire la perdita ossea senza esercizio fisico, tuttavia, potrebbe far risparmiare tempo all'equipaggio e allo stesso tempo migliorare la salute. I ricercatori ritengono che gli studi di ricerca di base con questi pesci potrebbero in definitiva portare benefici agli astronauti, ai pazienti affetti da osteoporosi e alle persone con mobilità ridotta qui sulla Terra.¹⁵⁰

In un recente comunicato di questo Agosto 2023 la Cina ha annunciato che manderà sulla sua stazione spaziale esemplari di *zebrafish*. La notizia è stata riferita ai media cinesi lo scorso 10 luglio da Zhang Wei, assistente del comandante in capo del programma di applicazioni spaziali per l'ingegneria spaziale con equipaggio.

La Cina ha allestito un acquario nella sua stazione spaziale di Tiangong. Contiene un litro d'acqua che può far crescere cinque pesci zebra, alghe e microrganismi. È inoltre dotato di un dispositivo di alimentazione automatico per nutrire gli animali.

La Cina sembra ha iniziato a dedicare attenzioni all'adattamento della vita terrestre in condizioni spaziali.

L'esperimento *China Exoplanet Habitability and Ecosystem Space Experiment* (CHEESE) sulla Stazione Spaziale Cinese (CSS) mira a esplorare ulteriormente questo campo per il programma spaziale con equipaggio.

CHEESE è un ecosistema basato su archaea e estremofili, organismi che hanno avuto la capacità di adattarsi all'inizio della storia della vita sulla Terra e possono potenzialmente abitare in ambienti extraterrestri.

In particolare, l'esperimento studia la sopravvivenza e il potenziale per una crescita sostenuta, la riproduzione e le interazioni dei metanogeni negli ambienti simulati di Marte e della Luna.¹⁵¹

Perché non ci sono satelliti in orbita bassa intorno alla Luna? Farebbero comodo per trasmettere a Terra i dati dal lato nascosto.

In questo momento ci sono 6 satelliti in orbita intorno alla Luna, ma la faccenda non è così facile come sembra, soprattutto a bassa quota.

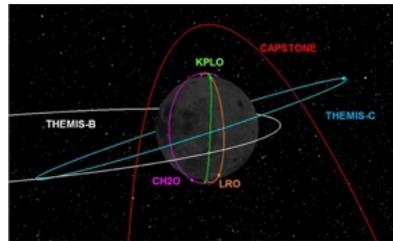


Figura 38: I veicoli spaziali in orbita attorno alla Luna nel 2023.

La Luna infatti è parecchio disomogenea, ci sono delle grosse concentrazioni locali di massa (masscons) per cui il suo campo gravitazionale è tutt'altro che regolare. Se ne accorsero i Russi con Luna 10, che mostrò delle perturbazioni molto maggiori di quanto si attendeva,

A causa di questo, la Luna ha solo 4 orbite stabili sotto i 100 km. Ci si aspettava che il sub-satellite PFS-2, lanciato dall'Apollo 16, sarebbe rimasto

in orbita per almeno 6 mesi, ma impattò con la superficie lunare dopo soli 35 giorni.¹⁵²

Piante ed animali crescono bene sulla Stazione Spaziale Internazionale?

Sono state studiate un bel po' di specie viventi nello spazio.¹⁵³ Le piante crescono in maniera abbastanza normale in microgravità, visto che usano (an-

che) la luce per orientarsi. I maggiori problemi li hanno quando spuntano dal seme, dato che in questi casi usano la gravità per orientarsi.¹⁵⁴

I topi spaziali sembrano molto più attivi del normale. I risultati più strani sono stati visti su dei platelminti (vermi piatti), che hanno mostrato delle caratteristiche di rigenerazione diverse nello spazio rispetto a terra.¹⁵⁵

Note e collegamenti

- 1 <https://www.openlab.unifi.it/>
- 2 www.caffescienza.it
- 3 <https://www.fisica.unifi.it/>
- 4 <https://www.isaa.it/>
- 5 <http://forumastronautico.it/>
- 6 <http://astronautinews.it/>
- 7 <http://astronauticast.it/>
- 8 <https://www.vaticanlibrary.va/>
- 9 <https://www.fstfirenze.it/>
- 10 <http://www.osservatoriochianti.it/>
- 11 NASA Spinoff <https://spinoff.nasa.gov/>
- 12 <https://spinoff.nasa.gov/spinoff2001/er1.html>
- 13 https://en.wikipedia.org/wiki/Polybenzimidazole_fiber
- 14 <https://ntrs.nasa.gov/citations/20020090888>
- 15 <https://www.media.inaf.it/2017/01/23/spinoff-nasa-2017/>
- 16 https://en.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System
- 17 https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/communications/policy/what_is_gps
- 18 https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/communications/policy/GPS_History.html

- ¹⁹ <https://aerospace.org/article/brief-history-gps>
- ²⁰ <https://spinoff.nasa.gov/spinoff2001/er1.html>
- ²¹ <https://spinoff.nasa.gov/spinoff2000/er2.htm>
- ²² https://spinoff.nasa.gov/Spinoff2009/ch_2.html
- ²³ <https://www.ilpost.it/2019/07/14/invenzioni-tecnologie-programma-apollo/>
- ²⁴ <https://ntrs.nasa.gov/citations/20020090888>
- ²⁵ <https://ntrs.nasa.gov/citations/20030005480>
- ²⁶ <https://digi.vatlib.it>
- ²⁷ <https://www.metis-group.com/it>
- ²⁸ <https://digi.vatlib.it/>
- ²⁹ Non c'è spazio in questo lavoro per descrivere nei dettagli il formato FITS, invito il lettore a consultare la documentazione ufficiale disponibile nel sito https://fits.gsfc.nasa.gov/fits_standard.html.
- ³⁰ Salvo casi eccezionali, tutte le immagini astronomiche sono monocromatiche.
- ³¹ <https://archive.stsci.edu/missions-and-data/hst>
- ³² <http://archive.eso.org>
- ³³ La documentazione ufficiale è disponibile qui <https://www.loc.gov/preservation/digital/formats/sustain/sustain.shtml>
- ³⁴ Nel dettaglio, è la sottocommissione UNI CT014/SC01.
- ³⁵ Nella sottocommissione è presente anche Paola Manoni, responsabile del Coordinamento dei Servizi Informatici della Biblioteca,

uno dei principali motori della norma. Ha svolto un ruolo indispensabile nella stesura della norma stessa.

³⁶ <https://store.uni.com/uni-11845-2022>

³⁷ Le mie tesi di laurea e dottorato sono dedicate proprio a lavori di fotometria.

³⁸ Le tecniche di deblending sono le tecniche utilizzate per discriminare il segnale appartenente a stelle diverse che appaia parzialmente sovrapposto nelle immagini, una casistica estremamente comune nelle analisi di zone particolarmente ricche di stelle, come gli ammassi globulari o le galassie nane.

³⁹ <https://brill.com/view/journals/vlr/1/2/vlr.1.issue-2.xml>

⁴⁰ Il lavoro completo è disponibile al seguente link
<https://doi.org/10.1163/27728641-00201006>

⁴¹ <https://brill.com/view/journals/vlr/1/2/vlr.1.issue-2.xml>

⁴² <https://doi.org/10.1163/27728641-00201006>

⁴³ <https://doi.org/10.19272/202108802002>

⁴⁴ <https://web.media.mit.edu/~minsky/papers/AlienIntelligence.html>

⁴⁵ Ringrazio Caterina Cacioli per il consulto sugli aspetti linguistici affrontati nel capitolo.

⁴⁶ https://it.wikipedia.org/wiki/American_Museum_of_Natural_History

⁴⁷ <https://www.astronautinews.it/2022/02/aggiornamenti-dal-sistema-solare-febbraio-2022/>

⁴⁸ https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/acr22-wp-why_nrho-the-artemis-orbit.pdf.

⁴⁹ <https://www.astronautinews.it/2022/11/capstone-arriva-in-orbita-lunare/>

- 50 <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20190030294/downloads/20190030294.pdf>
- 51 https://en.wikipedia.org/wiki/George_William_Hill
- 52 <https://www.astronauticast.it/astronauticast-16x06-prove-su-strada-orion/>
- 53 <https://www.astronautinews.it/2022/11/partita-artemis-i-la-prima-missione-del-ritorno-alla-luna/>
- 54 <https://doi.org/10.17226/26522>.
- 55 <https://doi.org/10.1038/s41467-022-35561-2>
- 56 <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38705-0>
- 57 <https://doi.org/10.1038/s41586-023-05878-z>
- 58 <https://doi.org/10.1038/s41586-023-05811-4>
- 59 Premio Nobel per la Fisica 2019.
- 60 26 Settembre 2023.
- 61 <http://exoplanet.eu/catalog/>
- 62 La massa del Sole è di circa 2×10^{30} kg, ovvero duemila miliardi di miliardi di miliardi di chilogrammi.
- 63 <https://en.wikipedia.org/wiki/Supernova#>
- 64 Un anno luce corrisponde alla distanza percorsa dalla luce in un anno, ovvero circa diecimila miliardi di chilometri.
- 65 https://en.wikipedia.org/wiki/Timeline_of_artificial_satellites_and_space_probes
- 66 <https://en.wikipedia.org/wiki/Spaghettification>
- 67 [https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/rocket/moon.html#:~:text=The%20mass%20of%20the%20Moon%](https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/rocket/moon.html#:~:text=The%20mass%20of%20the%20Moon%20)

[20is%20not%20evenly%20distributed%3B%20mass,for%20spacecraft%20orbiting%20the%20Moon](#)

⁶⁸ <https://www.theverge.com/2014/7/31/5954147/scientists-discover-the-moon-isnt-round-looks-like-lemon>;
<https://www.nature.com/articles/nature13639>

⁶⁹ [https://it.wikipedia.org/wiki/Limite di Roche](https://it.wikipedia.org/wiki/Limite_di_Roche)

⁷⁰ [https://it.wikipedia.org/wiki/Morte Nera](https://it.wikipedia.org/wiki/Morte_Nera);
<https://it.w3ask.com/dimensione-morte-nera-rispetto-morte-nera-2/>

⁷¹ <http://www.starwarstimeline.net/WestEndGames/Death%20Star%20Technical%20Companion%20WEG40008.pdf>

⁷² <https://twitter.com/IPManoux/status/1389690358766850048>

⁷³ [https://starwars.fandom.com/wiki/Proton torpedo](https://starwars.fandom.com/wiki/Proton_torpedo)

⁷⁴ <https://www.nonsonsolofilm.it/star-wars-episodio-iv-una-nuova-speranza-citazioni/>

⁷⁵ [https://it.wikipedia.org/wiki/Razzo termico nucleare](https://it.wikipedia.org/wiki/Razzo_termico_nucleare)

⁷⁶ [https://en.wikipedia.org/wiki/External Active Thermal Control System](https://en.wikipedia.org/wiki/External_Active_Thermal_Control_System)

⁷⁷ <https://fiscax.complexworld.net/blob/una-nuova-speranza>

⁷⁸ [https://en.wikipedia.org/wiki/External Active Thermal Control System](https://en.wikipedia.org/wiki/External_Active_Thermal_Control_System)

⁷⁹ The Science Behind Jules Verne's Moon Novels
<https://www.lulu.com/it/shop/andrew-may/the-science-behind-jules-vernes-moon-novels/ebook/product-1pg94r68.html?page=1&pageSize=4>

⁸⁰ [Three-body problem - Wikipedia](https://en.wikipedia.org/wiki/Three-body_problem)
[https://en.wikipedia.org/wiki/Three-body problem](https://en.wikipedia.org/wiki/Three-body_problem)

- ⁸¹ [https://fr.wikisource.org/wiki/De la Terre %C3%A0 la Lune/Texte entier](https://fr.wikisource.org/wiki/De_la_Terre_%C3%A0_la_Lune/Texte_entier)
[https://it.wikisource.org/wiki/Dalla Terra alla Luna](https://it.wikisource.org/wiki/Dalla_Terra_alla_Luna)
[https://fr.wikisource.org/wiki/Autour de la Lune/Texte entier](https://fr.wikisource.org/wiki/Autour_de_la_Lune/Texte_entier)
<https://www.liberliber.it/online/autori/autori-v/jules-verne/intorno-alla-luna/>
- ⁸² [https://en.wikipedia.org/wiki/Effect of spaceflight on the human body](https://en.wikipedia.org/wiki/Effect_of_spaceflight_on_the_human_body)
- ⁸³ <https://italiastoria.com/>
- ⁸⁴ [https://it.wikipedia.org/wiki/Unione monetaria latina](https://it.wikipedia.org/wiki/Unione_monetaria_latina)
- ⁸⁵ [https://en.wikipedia.org/wiki/Galileo \(spacecraft\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Galileo_(spacecraft))
- ⁸⁶ [https://en.wikipedia.org/wiki/Cold welding](https://en.wikipedia.org/wiki/Cold_welding);
<https://social.airicerca.org/2016/11/14/saldature-nello-spazio/>;
<https://www.youtube.com/watch?v=Y2nQ8isf55s>
- ⁸⁷ A Pail of Air, Galaxy, dic. 1951, ediz. it. in Le grandi storie della fantascienza 13, Bompiani, Milano, 1994
- ⁸⁸ [https://it.wikipedia.org/wiki/Pianeta interstellare](https://it.wikipedia.org/wiki/Pianeta_interstellare)
- ⁸⁹ [https://it.wikipedia.org/wiki/Problema dei tre corpi](https://it.wikipedia.org/wiki/Problema_dei_tre_corpi)
- ⁹⁰ [https://it.wikipedia.org/wiki/PSO J318.5-22](https://it.wikipedia.org/wiki/PSO_J318.5-22)
- ⁹¹ <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2023/new-study-reveals-nasa-s-roman-could-find-400-rogue-earths>
- ⁹² <https://www.astronomia.com/2012/08/06/come-ti-blocco-un-satellite/>
- ⁹³ [https://www.researchgate.net/publication/258497326 Polyaxial Figures of the Moon](https://www.researchgate.net/publication/258497326_Polyaxial_Figures_of_the_Moon)

- ⁹⁴ <https://www.media.inaf.it/2013/10/07/la-strana-risonanza-di-mercurio/>
- ⁹⁵ <https://www.nasa.gov/image-article/expedition-57-crew-members-alexey-ovchinin-nick-hague-pose-front-of-their-soyuz-ms-10-spacecraft-2/>
- ⁹⁶ https://en.wikipedia.org/wiki/ISS_year-long_mission
- ⁹⁷ https://en.wikipedia.org/wiki/Effect_of_spaceflight_on_the_human_body
- ⁹⁸ Il Disinformatico: Storie di Scienza 7: perché i guanti spaziali strappano via le unghie agli astronauti?
<https://attivissimo.blogspot.com/2020/06/storie-di-scienza-perche-i-guanti.html>
- ⁹⁹ https://en.wikipedia.org/wiki/Trans-lunar_injection
- ¹⁰⁰ https://en.wikipedia.org/wiki/Low-energy_transfer
- ¹⁰¹ <https://en.wikipedia.org/wiki/CAPSTONE>
- ¹⁰² <https://en.wikipedia.org/wiki/Danuri>
- ¹⁰³ https://en.wikipedia.org/wiki/Apollo_program
- ¹⁰⁴ [https://it.wikipedia.org/wiki/V2_\(Aggregat_4\)](https://it.wikipedia.org/wiki/V2_(Aggregat_4))
- ¹⁰⁵ <https://it.scienceaq.com/Astronomy/1002023552.html>
- ¹⁰⁶ https://en.wikipedia.org/wiki/Deinococcus_radiodurans#/media/File:Deinococcus_radiodurans.jpg
- ¹⁰⁷ https://en.wikipedia.org/wiki/Deinococcus_radiodurans
- ¹⁰⁸ <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27176813/>
- ¹⁰⁹ <https://it.wikipedia.org/wiki/Panspermia>
- ¹¹⁰ <https://iss.jaxa.jp/en/kiboexp/ef/exham/>

- 111 <https://iss.jaxa.jp/en/kibo/about/kibo/rms/>
- 112 <https://microbiomejournal.biomedcentral.com/articles/10.1186/s40168-020-00927-5>
- 113 <https://www.usuhs.edu/sites/default/files/media/path-deinococcus/pdf/conanarticle.pdf>
- 114 <https://www.media.inaf.it/2020/11/06/deinococcus-radiodurans-iss/>
- 115 <https://www.cdc.gov/hai/organisms/pseudomonas.html>
- 116 <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21169425/>
- 117 <https://wonderwhy.it/perche-studiamo-i-microbi-nello-spazio/>
- 118 ESA - Tiny animals survive exposure to space
[https://www.esa.int/Science Exploration/Human and Robotic Exploration/Research/Tiny animals survive exposure to space](https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/Research/Tiny_animals_survive_exposure_to_space)
- 119 <https://it.wikipedia.org/wiki/Tardigrada>
- 120 <https://www.media.inaf.it/2017/07/14/tardigrado-ultimo-immortale/>
- 121 Astronauts find living organisms clinging to the International Space Station, and aren't sure how they got there
<https://www.extremetech.com/extreme/188479-astronauts-find-living-organisms-clinging-to-the-international-space-station-and-arent-sure-how-they-got-there>
- 122 https://it.wikipedia.org/wiki/Risoluzione_angolare
- 123 È possibile vedere gli astronauti che lavorano sulla Stazione Spaziale Internazionale, attraverso un telescopio? - Quora
<https://it.quora.com/%C3%88-possibile-vedere-gli-astronauti-che-lavorano-sulla-Stazione-Spaziale-Internazionale-attraverso-un-telescopio>
- 124 Staying Cool on the ISS | Science Mission Directorate
<https://science.nasa.gov/science-news/science-at->

[nasa/2001/ast21mar_1](https://ntrs.nasa.gov/citations/19980037427)

Living Together in Space: The Design and Operation of the Life Support Systems on the International Space Station - NASA Technical Reports Server (NTRS)

<https://ntrs.nasa.gov/citations/19980037427>

Se lo spazio è ghiacciato, perché i satelliti o la Stazione Spaziale Internazionale non si congelano? - Quora

<https://it.quora.com/Se-lo-spazio-%C3%A8-ghiacciato-perch%C3%A9-i-satelliti-o-la-Stazione-Spaziale-Internazionale-non-si-congelano>

125 <https://www.rocketnet.co.za/is-there-wifi-in-space-seven-interesting-facts/>

126 <https://www.ariss.org/contact-the-iss.html>

127 [https://it.wikipedia.org/wiki/Mir_\(stazione_spaziale\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Mir_(stazione_spaziale))

128 <https://www.nasa.gov/saffire>

129 <https://www.americanscientist.org/article/fire-in-microgravity>

130 <https://inducks.org/story.php?c=D+90161>

131 <https://spaceflightnow.com/2015/07/30/nasa-tracking-cubesats-is-easy-but-many-stay-in-orbit-too-long/>

132

[https://it.wikipedia.org/wiki/Dilatazione temporale gravitazionale](https://it.wikipedia.org/wiki/Dilatazione_temporale_gravitazionale)

133 <https://www.space.com/33411-astronaut-scott-kelly-relativity-twin-brother-ages.html>

134 NASA's Twins Study Results Published in Science Journal
<https://www.nasa.gov/feature/nasa-s-twins-study-results-published-in-science>

- ¹³⁵ Weightlessness - Wikipedia
<https://en.wikipedia.org/wiki/Weightlessness>
- ¹³⁶ <https://it.quora.com/La-Stazione-Spaziale-Internazionale-proietta-unombra-sulla-Terra> <https://it.quora.com/La-Stazione-Spaziale-Internazionale-proietta-unombra-sulla-Terra>
- ¹³⁷ <https://it.scienceaq.com/Astronomy/1002023739.html>
- ¹³⁸ ESA - Advanced Closed Loop System
[https://www.esa.int/Science_Exploration/Human and Robotic Exploration/Research/Advanced Closed Loop System](https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/Research/Advanced_Closed_Loop_System); [ACLS Advanced Closed Loop System – Kayser Italia](http://www.kayser.it/index.php/acls-advanced-closed-loop-system/)
<http://www.kayser.it/index.php/acls-advanced-closed-loop-system/>
- ¹³⁹ https://www.nasa.gov/mission_pages/station/news/orbital_debris.html
- ¹⁴⁰ https://en.wikipedia.org/wiki/Whipple_shield
- ¹⁴¹ <https://www.space.com/20925-space-station-bullet-hole-photo.html>
- ¹⁴² <https://phys.org/news/2022-12-russian-space-capsule-leak-micrometeorite.html>
- ¹⁴³ NASA - A Fish Friendly Facility for the International Space Station
https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/news/aquatic.html
- ¹⁴⁴ Neutral buoyancy simulation as a training aid - Wikipedia
https://en.wikipedia.org/wiki/Neutral_buoyancy_simulation_as_a_training_aid
- ¹⁴⁵ Fish Don't Do So Well in Space | Smart News
<https://www.smithsonianmag.com/smart-news/fish-dont-do-so-well-space-180961817/>
- ¹⁴⁶ <https://academic.oup.com/af/article/9/3/68/5522877>
- ¹⁴⁷ <https://global.jaxa.jp/>

- 148 https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/news/boone_health.html
- 149 https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/news/zebrafish_muscle
- 150 <https://blogs.nasa.gov/stationreport/2017/12/18/iss-daily-summary-report-12182017/>
- 151 <https://aliveuniverse.today/speciale-missioni/programma-spaziale-cinese/7993-arriva-il-pesce-sulla-tiangong>
<https://www.space.com/china-tiangong-space-station-zebrafish>
- 152 [https://en.wikipedia.org/wiki/Mass_concentration_\(astronomy\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Mass_concentration_(astronomy))
- 153 Teeming Life on the ISS | Science Mission Directorate
<https://science.nasa.gov/science-news/news-articles/teeming-life-on-the-iss>
- 154 Può una pianta crescere nello spazio a gravità zero? - Quora
<https://it.quora.com/Pu%C3%B2-una-pianta-crescere-nello-spazio-a-gravit%C3%A0-zero>
- 155 Quale è stato l'esperimento più strano mai fatto sulla Stazione Spaziale ? - Quora
<https://it.quora.com/Quale-%C3%A8-stato-lesperimento-pi%C3%B9-strano-mai-fatto-sulla-Stazione-Spaziale>