

AMEDEO BALBI

La ricerca di vita nell'universo

Dalla speculazione alla scienza

Turres - Short monographs

ELEMENTI

1

AMEDEO BALBI

La ricerca di vita nell'universo

Dalla speculazione alla scienza



La versione digitale dell'opera è disponibile in modalità Open Access sul sito web tvupress.uniroma2.it, secondo i termini della licenza internazionale Attribution-ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0).

DOI 10.35948/TVUP/979-12-82347-06-8

ISBN 979-12-82347-06-8

Copyright © 2025 Amedeo Balbi

Copyright © 2025 Tor Vergata University Press

Università degli Studi di Roma Tor Vergata

Via Cracovia, 50 - 00133 Roma

tvupress.uniroma2.it

Realizzazione editoriale di Edimill Srl | www.edimill.it

Indice

1.	Introduzione	7
2.	Aspetti storici	11
1.	Il pensiero greco	11
2.	Il cristianesimo medievale	13
3.	Il copernicanesimo	14
4.	Il newtonianesimo	17
5.	Il darwinismo	18
6.	La vita extraterrestre nella letteratura e nelle arti	20
7.	Il XX secolo	22
8.	Caso o necessità?	23
3.	Aspetti scientifici	27
1.	Il paradosso di Fermi	32
2.	Il problema dell'inferenza statistica	34
3.	L'origine della vita: un problema ancora aperto	36
4.	Cercare la vita nell'universo: da dove iniziare?	37
5.	Venere: un inferno climatico	39
6.	Il caso di Marte	40
7.	Vita in ambienti estremi	45
8.	I pianeti extrasolari	48
9.	La ricerca di firme biologiche	52
10.	Vita intelligente extraterrestre	56
4.	Conclusione: uscire dalla nostra prospettiva	63

1. Introduzione

L’obiettivo di questo saggio è esplorare il vasto tema della ricerca della vita nell’universo, una questione che ha sempre suscitato profonda curiosità e continua ad alimentare un interesse crescente. Pur occupando oggi un posto rilevante nel dibattito scientifico, si tratta di un interrogativo dalle radici antiche, che affondano in secoli di riflessione filosofica, culturale e religiosa. L’intento è duplice: da un lato, offrire un quadro aggiornato delle attuali conoscenze scientifiche in materia; dall’altro, inserirle in una più ampia prospettiva storica e culturale, che ne metta in luce l’evoluzione. La domanda se siamo soli nell’universo, infatti, accompagna da sempre il pensiero umano, ben prima della nascita della scienza moderna.

Il saggio si articola in due parti principali. La prima offre una panoramica storica, ricostruendo l’evoluzione del pensiero e delle idee legate alla possibilità di vita nell’universo. Verranno esaminati i momenti chiave – filosofici, culturali e scientifici – che hanno segnato il nostro cammino nella comprensione del cosmo e nell’elaborazione dell’ipotesi che la vita possa esistere

* Il testo qui pubblicato è basato sulla lezione tenuta il 20 febbraio 2020 presso il Gran Sasso Science Institute.

altrove. La seconda parte sarà invece dedicata agli sviluppi scientifici più recenti, con particolare attenzione ai progressi dell'astrobiologia¹.

Questa disciplina, che studia l'origine, l'evoluzione e la possibilità di vita al di fuori della Terra, non si limita a cercare segnali biologici su altri pianeti. Mira anche a comprendere le profonde connessioni tra la vita terrestre e l'universo che la ospita. Si tratta di un punto cruciale: indagare la vita extraterrestre significa, inevitabilmente, interrogarsi anche sulle condizioni che hanno reso possibile la comparsa della vita sul nostro pianeta.

Un aspetto fondamentale da tenere presente quando si affronta il tema della ricerca della vita nell'universo è il suo legame profondo con due grandi rivoluzioni scientifiche e culturali che hanno trasformato il nostro modo di pensare negli ultimi secoli. La prima è la rivoluzione copernicana, che ha avuto conseguenze decisive non solo per l'astronomia e l'astrofisica, ma anche per la cultura in generale e per la visione che l'umanità ha di sé stessa. Questo cambiamento ha scardinato una concezione del mondo ritenuta valida per secoli, sia sul piano scientifico che filosofico. Per dirla in termini semplici, si è passati dall'idea che la Terra fosse il centro dell'universo, a quella che vede il nostro pianeta come uno dei tanti nel cosmo.

Ma la vera portata di questa rivoluzione non risiede soltanto nello spostamento della Terra dal centro fisico dell'universo. Ciò che è davvero cruciale è che essa ha privato il nostro pianeta di ogni posizione privilegiata. In altre parole, la Terra è diventata un corpo celeste come tanti altri, senza alcun ruolo speciale nell'ordine cosmico. Questo è l'aspetto fondamentale

¹ Per approfondire gli aspetti storici, si consiglia il testo di S. Dick, *Vita nel cosmo. Esistono gli extraterrestri?*, Milano, Raffaello Cortina Editore, 2002. Per un quadro aggiornato degli aspetti tecnici e scientifici, si veda M. Lingam, A. Balbi, *From Stars to Life: A Quantitative Approach to Astrobiology*, Cambridge, Cambridge University Press, 2025.

da comprendere per cogliere fino in fondo le implicazioni della rivoluzione copernicana: ha aperto la strada all'idea che, se la nostra posizione non è unica, forse nemmeno la vita lo è.

La seconda grande rivoluzione che ha profondamente influenzato la nostra visione della vita nell'universo è quella darwiniana, che riguarda non l'astrofisica, ma la biologia. Con la teoria dell'evoluzione per selezione naturale, Charles Darwin ha mostrato che la specie umana – come tutte le altre – è il frutto di un lungo processo evolutivo privo di una direzione predefinita. L'evoluzione, infatti, non segue un fine, ma procede attraverso mutazioni casuali, selezionate nel tempo in base alla loro capacità di adattamento all'ambiente. Con Darwin, l'umanità ha cessato di essere vista come una specie privilegiata: è diventata una tra le tante, parte di una rete complessa di relazioni biologiche in cui il caso gioca un ruolo fondamentale. Anche questa rivoluzione, come quella copernicana, ha avuto un impatto radicale sulla concezione dell'uomo e sul suo posto nella natura.

Le rivoluzioni copernicana e darwiniana sono ormai riconosciute come due pilastri fondamentali della nostra comprensione del cosmo e della vita sulla Terra. Insieme, esse hanno trasformato radicalmente la visione che l'umanità ha di sé stessa e del proprio posto nell'universo. Su queste basi si innesta oggi una possibile terza rivoluzione: quella che l'astrobiologia sta tentando di avviare, ovvero la ricerca della vita oltre il nostro pianeta. Se la rivoluzione copernicana ha rimosso la Terra da una posizione centrale e privilegiata nel cosmo, e quella darwiniana ha ridimensionato il ruolo dell'uomo, rendendolo una specie tra le tante, l'astrobiologia si propone di compiere un ulteriore passo: comprendere se la vita, nelle sue diverse forme, possa essere un fenomeno diffuso nell'universo.

Come suggerisce il nome, l'astrobiologia nasce dall'incontro tra astrofisica e biologia. È intrinsecamente inter-

disciplinare e cerca di far dialogare due campi del sapere tradizionalmente distanti: da un lato, lo studio del contesto planetario e cosmologico in cui ci troviamo; dall'altro, la comprensione dei processi biologici che regolano la vita sulla Terra e la sua interazione con l'ambiente. L'astrobiologia si interroga su una questione fondamentale: la presenza della vita sulla Terra è un'eccezione irripetibile o un caso tra molti? È proprio questa domanda – ancora senza risposta – che costituisce il nucleo centrale della disciplina.

Non a caso, si parla sempre più spesso della ricerca astrobiologica come di una “terza rivoluzione” scientifica, potenzialmente paragonabile, per portata culturale e concettuale, a quelle di Copernico e Darwin. La scoperta di forme di vita su altri mondi potrebbe avere conseguenze dirompenti sulla nostra visione del mondo e su molte discipline, dalla scienza alla filosofia. Tuttavia, a differenza delle due rivoluzioni precedenti, l'astrobiologia si trova ancora in una fase esplorativa. Non sappiamo se – e quando – riusciremo a rispondere in modo definitivo alla domanda sull'esistenza di vita extraterrestre. Ed è proprio in questa incertezza che risiede, oggi, uno dei grandi interrogativi della scienza contemporanea.

2. Aspetti storici

Vale ora la pena soffermarsi su come l’umanità abbia affrontato nel tempo il tema dell’esistenza di vita oltre la Terra. Quando ha cominciato a porsi questa domanda? E quali risposte ha elaborato nel corso della storia? Per affrontare tali questioni, è utile partire da un riferimento lontano ma significativo: la filosofia greca. Sebbene si possano immaginare intuizioni più antiche, è con l’avvento della riflessione filosofica che il problema acquista una forma sistematica e razionale.

1. Il pensiero greco

Un punto di partenza fondamentale è rappresentato dall’atomismo greco, una corrente di pensiero che cercò di interpretare la realtà naturale in termini puramente razionali, rifiutando spiegazioni mitologiche o teologiche. Secondo questa concezione, tutto ciò che esiste è composto da

atomi – particelle indivisibili e invisibili – che si muovono nel vuoto e, scontrandosi tra loro, danno origine alla varietà dei fenomeni osservabili. L'ordine che vediamo nel cosmo è dunque il risultato emergente di processi casuali e senza una direzione prestabilita.

Da questa visione deriva un'idea rivoluzionaria per l'epoca: se esistono infiniti atomi e un vuoto illimitato, allora non c'è alcuna ragione per pensare che il nostro mondo sia l'unico. È logico supporre che vi siano infiniti mondi, generati dallo stesso meccanismo naturale. Gli atomisti non si limitano ad ammettere la possibilità di altri mondi: ne affermano la plausibilità. Uno dei più efficaci divulgatori di queste idee fu Lucrezio, che nel suo poema *De rerum natura* espresse in modo esplicito e potente la visione atomista, inclusa la convinzione dell'esistenza di una molteplicità di mondi abitati.

Questa prospettiva si contrapponeva radicalmente alla visione aristotelica, che avrebbe dominato il pensiero occidentale per secoli. Aristotele concepiva un universo ordinato e finito, costituito da un unico mondo al cuore del cosmo. La sua fisica si fondeva su quattro elementi – terra, aria, fuoco e acqua – ciascuno dei quali si muoveva secondo una “tendenza naturale”, in funzione della posizione centrale della Terra. In questo schema, la centralità del nostro pianeta non era solo geografica, ma ontologica: tutto era organizzato in riferimento ad esso.

L'idea di mondi molteplici era dunque incompatibile con la fisica aristotelica. Se fossero esistiti altri mondi, gli elementi non avrebbero saputo più in quale direzione muoversi “naturalmente”, e sarebbe venuto meno l'ordine stesso dell'universo così come concepito da Aristotele. Per questo motivo, la concezione aristotelica rendeva impensabile l'esistenza di altri mondi, e con essa l'ipotesi della vita extraterrestre risultava di fatto esclusa.

2. Il cristianesimo medievale

La questione ha avuto implicazioni profonde anche per il cristianesimo, in particolare per quello medievale, che si è sviluppato all'interno del contesto della scolastica. In quell'epoca, il pensiero aristotelico rappresentava il fondamento della visione del mondo condivisa dalla filosofia e dalla teologia. La concezione di Aristotele, secondo cui la Terra era l'unico mondo e occupava il cuore dell'universo, fu accolta e integrata dalla teologia cristiana, dando forma a una cosmologia che vedeva il nostro pianeta come il fulcro della creazione.

All'interno di questa visione, immaginare l'esistenza di altri mondi abitati appariva difficile, se non addirittura eretico. L'introduzione del concetto di azione divina complicò ulteriormente la questione. Nella fisica aristotelica, la divinità aveva un ruolo marginale: era il "motore immobile", causa prima del movimento cosmico, ma non interveniva direttamente nei fenomeni naturali. Inoltre, Aristotele riteneva che nemmeno Dio potesse fare tutto ciò che voleva – ad esempio, non avrebbe potuto creare più mondi, poiché questo avrebbe infranto la coerenza e l'ordine dell'universo da lui stesso concepito.

Nel cristianesimo medievale, invece, l'onnipotenza divina era un principio cardine, e proprio a partire da questo si sviluppò un dibattito teologico sull'esistenza di altri mondi. Alcuni pensatori, come Tommaso d'Aquino, sostenevano che Dio, pur essendo onnipotente, avesse scelto liberamente di creare un solo mondo, e che questa scelta non limitasse in alcun modo la sua potenza. Un solo mondo sarebbe stato sufficiente a manifestare pienamente la gloria e la razionalità della creazione.

Altri teologi, invece, sostennero che nulla impediva a Dio di creare più mondi: la sua onnipotenza non era

vincolata dalle leggi aristoteliche, e dunque non si poteva escludere la possibilità di una pluralità di mondi. Questo dibattito, spesso semplificato come uno scontro tra religione e scienza, è in realtà più articolato: si trattava di una discussione interna al pensiero cristiano scolastico, che ruotava attorno alla conciliazione tra filosofia naturale e teologia.

In definitiva, la visione dominante nella scolastica medievale restava quella di un universo unico, ordinato e centrato sulla Terra. Ma non mancavano, anche in quel contesto, voci dissonanti che mettevano in discussione l'idea che l'intera creazione si esaurisse nel nostro mondo.

3. Il copernicanesimo

Il passaggio concettuale decisivo avviene con la rivoluzione copernicana. Con l'introduzione del sistema eliocentrico, il modello geocentrico tradizionale – in cui la Terra occupava il centro immobile dell'universo – viene radicalmente superato. Nel nuovo schema, la Terra diventa un pianeta tra gli altri, orbitante attorno al Sole. Una delle implicazioni più immediate e profonde di questa visione è che la Terra perde il suo status privilegiato, e con esso l'idea che debba essere necessariamente unica. Diventa quindi plausibile pensare che altri pianeti possano essere simili alla Terra, forse anche abitati.

Tuttavia, Copernico fu estremamente cauto nel proporre le sue idee. Il suo trattato, *De revolutionibus orbium coelestium*, fu pubblicato solo nel 1543, quando era ormai in punto di morte. Per lui, il sistema eliocentrico costituiva principalmente un modello matematico più coerente ed elegante rispetto a quello tolemaico, utile a descrivere i moti celesti, piuttosto che una presa di posizione filosofica sull'architettura dell'universo. Copernico, infatti, non si pronunciò mai

esplicitamente sulle implicazioni cosmologiche o teologiche del suo sistema.

È invece Giordano Bruno, alla fine del Cinquecento, a spingere il pensiero copernicano verso le sue conseguenze più radicali. Nel 1584, nel dialogo filosofico *De l'infinito, universo e mondi*, Bruno afferma con chiarezza l'esistenza di una pluralità di mondi abitati. Secondo lui, l'universo è infinito, privo di un centro, e popolato da innumerevoli stelle, ognuna potenzialmente circondata da pianeti e forme di vita. Bruno introduce l'idea del "principio di pienezza": se Dio è infinito, allora la sua creazione deve essere altrettanto vasta, ricca, e popolata. Limitare l'universo a un solo mondo significherebbe, per Bruno, porre un limite alla potenza e alla gloria divina.

Queste idee, che anticipano in modo sorprendente intuizioni moderne, resero Bruno una figura controversa. È importante però ricordare che la sua condanna a morte da parte dell'Inquisizione non fu dovuta principalmente alla sua concezione della pluralità dei mondi, bensì a un insieme di dottrine teologiche e filosofiche ritenute eretiche. Bruno era un ex frate domenicano, e la sua visione dell'universo infinito – eterno, dinamico, popolato da infiniti mondi – entrava in rotta di collisione con la cosmologia cristiana ufficiale, fondata su un universo finito, ordinato e gerarchico.

Un altro grande sostenitore del copernicanesimo fu Galileo Galilei, che però non si espresse mai apertamente sull'esistenza di mondi abitati. Tuttavia, nel *Sidereus Nuncius*, Galileo formulò osservazioni significative: paragonando la Luna alla Terra, notò come la sua superficie mostrasse caratteristiche simili alle nostre, come montagne e possibili mari – anche se non era chiaro se questi contenessero acqua o altro. Pur senza affermare che la Luna fosse abitata, l'analisi morfologica suggeriva una parentela con la Terra.

Johannes Kepler, invece, prese una posizione più audace. Nel *Somnium*, pubblicato postumo nel 1634, descrisse un viaggio immaginario sulla Luna e l'incontro con ipotetici abitanti lunari. Questo testo, spesso considerato uno dei primi esempi di fantascienza, riflette l'idea che i corpi celesti potessero essere simili alla Terra e quindi potenzialmente abitati.

Un altro autore, oggi meno noto ma significativo, fu John Wilkins. Nel 1638 pubblicò *Discovery of a World in the Moon*, in cui immaginava una Luna popolata da esseri viventi. Il suo contributo si inserisce nel crescente fermento intorno all'idea della pluralità dei mondi.

In parallelo, prendeva piede l'osservazione che le stelle potessero essere "soli" come il nostro. Un passo importante in questa direzione fu compiuto da Cartesio, che – pur proponendo una cosmologia oggi superata – immaginava l'universo come popolato da vortici di materia attorno a stelle, ciascuna con il proprio sistema planetario. Questa visione alimentò il dibattito sulla possibilità di altri mondi.

Nel 1686, Bernard Le Bovier de Fontenelle pubblicò *Entretiens sur la pluralité des mondes* (*Dialoghi sulla pluralità dei mondi*), un'opera che ebbe un grande successo e contribuì a diffondere presso il pubblico colto l'idea che ogni stella potesse essere un Sole circondato da pianeti. La visione di un universo abitato diventava così parte dell'immaginario condiviso.

A fine secolo, Christian Huygens ribadì queste idee nel *Cosmotheoros* (1698), in cui sosteneva che le stelle fossero effettivamente soli, ciascuno con pianeti forse abitati. Questo insieme di opere contribuì a consolidare l'ipotesi che l'universo potesse ospitare una pluralità di mondi e, con essi, forme di vita.

4. Il newtonianesimo

Con Newton si compie una svolta decisiva nella comprensione dell'universo. Per la prima volta, emergono le cause fisiche reali dei fenomeni naturali: nasce la meccanica classica. Newton spiega perché i pianeti orbitano intorno al Sole, ponendo le basi per una cosmologia fisica. Le sue leggi del moto e della gravitazione universale offrono un quadro coerente che permette di capire come funziona l'universo e perché i corpi si muovono come fanno.

Tuttavia, per Newton l'universo non segue un disegno necessario: la sua evoluzione dipende dalle condizioni iniziali, che possono anche essere contingenti. Le leggi della fisica descrivono *come* il sistema evolve, non *perché* esista o debba essere così com'è. Newton stesso suggerì che fosse Dio ad aver stabilito le condizioni iniziali, lasciando poi che le leggi naturali facessero il loro corso. Da qui nacque una forma di "teologia naturale": un tentativo di conciliare l'ordine del mondo con l'azione divina, ma senza invocare miracoli o interventi soprannaturali. Un esempio emblematico è la corrispondenza tra Newton e Richard Bentley, dove si discute proprio l'idea di un Dio che mette in moto l'universo attraverso leggi razionali.

Quanto alla pluralità dei mondi, Newton e i suoi contemporanei non presero una posizione netta: la scienza non imponeva né escludeva l'idea di altri mondi abitati. Ma la questione divenne presto terreno di dibattito filosofico e teologico. Thomas Paine, in *The Age of Reason* (1794), sostenne che la fede nella redenzione cristiana fosse incompatibile con l'esistenza di molti mondi abitati: se l'uomo è al centro della creazione, allora l'umanità dev'essere unica. Altri, invece, come il teologo Joseph Chalmers, ritenevano che la possibilità di mondi abitati non minasse il significato religioso dell'universo: Dio poteva benissimo aver creato altri esseri razionali.

Un punto interessante emerso in quel periodo, e ancora oggi rilevante, riguarda la possibile somiglianza tra la Terra e gli altri pianeti. Non c'è nulla che obblighi a pensare che gli altri mondi debbano essere come il nostro. Nel 1853, il filosofo e scienziato William Whewell, in un saggio contro l'idea della pluralità dei mondi abitati (*Of the Plurality of Worlds*), rifletteva sul fatto che la presenza umana rappresenta solo un istante nella lunga storia geologica della Terra. Perché dunque supporre che la vita – e in particolare la vita intelligente – debba essere un fenomeno comune? Forse è solo un accidente, una rarità cosmica. Questa intuizione anticipa un tema fondamentale per la scienza moderna: la nostra posizione nell'universo potrebbe non essere privilegiata, ma nemmeno replicata altrove.

5. Il darwinismo

Arriviamo alla seconda grande rivoluzione: il darwinismo. Nel 1859, Charles Darwin pubblica *L'origine delle specie*, un'opera destinata a cambiare radicalmente il modo in cui concepiamo la vita sulla Terra. Al centro della sua teoria ci sono due elementi fondamentali: il tempo e il caso. L'idea è che, nel corso di lunghissimi periodi, si siano verificate numerose variazioni casuali negli organismi viventi – mutazioni – alcune delle quali si sono rivelate vantaggiose per la sopravvivenza e la riproduzione. Queste variazioni sono state quindi selezionate dalla natura, dando origine, nel tempo, alla diversità delle specie, inclusa quella umana.

L'aspetto davvero rivoluzionario della teoria di Darwin è che l'umanità non viene più vista come il culmine di un progetto cosmico o come il fine necessario dell'evoluzione, ma come uno dei tanti rami di un grande albero della vita. Un ramo che si è sviluppato in modo contingente, senza alcun obiettivo prestabilito. Questa visione

ha avuto implicazioni enormi, non solo per la biologia, ma anche per molte altre discipline. Il concetto che il caso, insieme al tempo, possa plasmare sistemi complessi si è infatti esteso anche all'astrofisica.

Fino a quel momento, l'idea dominante in astronomia era che l'universo fosse immutabile, eterno, esistente da sempre e senza storia. La prospettiva darwiniana ha introdotto una nuova sensibilità: l'evoluzione nel tempo non riguarda solo la vita, ma anche l'universo stesso. A partire da questo cambiamento di paradigma, si è cominciato a vedere il cosmo non più come una realtà fissa e ordinata una volta per tutte, ma come un sistema dinamico, in trasformazione, con una storia propria.

Nel frattempo, nello stesso periodo in cui Darwin pubblicava la sua opera, l'astrofisica compiva un passo decisivo con l'introduzione della spettroscopia. Prima di allora, non era possibile ottenere informazioni fisiche dirette su ciò che avveniva oltre l'atmosfera terrestre, e molti ritenevano che studiare l'universo in modo scientifico fosse, nei fatti, impossibile. La spettroscopia cambiò radicalmente questo scenario: analizzando la luce e la radiazione elettromagnetica provenienti da stelle e altre sorgenti celesti, divenne possibile accedere alla composizione chimica degli oggetti astronomici e persino alle condizioni fisiche in cui si trovavano. Questo segnò l'inizio di una nuova era nello studio dell'universo. Nel corso del Novecento, questa tecnica verrà estesa anche all'analisi dell'atmosfera dei pianeti del Sistema Solare, aprendo la strada all'astrochimica e, più tardi, all'astrobiologia.

Questo progresso contribuì anche alla rinascita dell'idea della pluralità dei mondi. Alla fine dell'Ottocento, la possibilità di altri mondi abitati tornò ad affascinare il grande pubblico, anche grazie alla diffusione di opere come *Other Worlds Than Ours* (1870), dell'astronomo inglese Richard Proctor, o *La Pluralité des Mondes Habités* (1862) di Camille

Flammarion, celebre divulgatore scientifico francese. Gli scritti di Flammarion, sebbene spesso più visionari che scientificamente rigorosi, alimentarono l'immaginario di un universo popolato da civiltà extraterrestri. La sua influenza fu significativa: Flammarion contribuì a diffondere l'idea che la Terra potesse non essere l'unico luogo abitato dell'universo, e questa possibilità si fece largo anche nel discorso culturale e filosofico dell'epoca.

È interessante notare che Alfred Russel Wallace, co-scopritore con Darwin del meccanismo della selezione naturale, prese una posizione in controtendenza. Pur essendo un evoluzionista convinto, nel suo libro *Man's Place in the Universe* (1903) arrivò a sostenere che la posizione dell'uomo nell'universo fosse speciale e difficilmente replicabile. A suo avviso, l'emergere dell'intelligenza umana era un evento così improbabile da rendere la nostra esistenza unica, e la possibilità che qualcosa di simile si fosse verificato altrove era estremamente remota. Questo tipo di riflessione anticipa una delle domande centrali dell'astrobiologia contemporanea: i processi che hanno portato alla comparsa della vita sulla Terra e alla sua evoluzione fino a forme intelligenti sono universali o eccezionali? Oggi, non abbiamo ancora risposte definitive. Il problema non è teorico, ma empirico: mancano i dati. Fino a quando non troveremo un'altra forma di vita, anche la più semplice, la questione rimarrà aperta.

6. La vita extraterrestre nella letteratura e nelle arti

Un altro aspetto affascinante riguarda le connessioni tra la ricerca di vita nell'universo e la letteratura, l'arte e l'immaginazione collettiva. Sebbene si tratti di un campo vastissimo, che meriterebbe un'esplorazione a sé, possiamo fare alcune osservazioni significative. Già nel II secolo d.C.,

Luciano di Samosata, nell'opera *Vera Storia*, raccontava un viaggio oltre le Colonne d'Ercole, una spedizione al tempo stesso simbolica e fantastica verso l'ignoto. In una delle sue avventure, i protagonisti approdano sulla Luna e fanno conoscenza con i seleniti, i suoi abitanti. Si tratta di uno dei primi esempi letterari di un incontro con forme di vita extraterrestre, seppur in chiave satirica e parodica.

Nel corso del Medioevo e della prima età moderna, l'idea di mondi abitati continua a riemergere in opere dal tono più filosofico che scientifico. Nel già citato *Somnium*, Johannes Kepler immagina un viaggio sulla Luna come pretesto per esplorare il punto di vista di un osservatore extraterrestre; in *Micromégas* (1752), Voltaire costruisce una brillante satira in cui esseri provenienti da altri mondi osservano la Terra con sguardo critico, mettendo in discussione le certezze antropocentriche della cultura europea. In questi casi, più che ipotizzare davvero l'esistenza di vita aliena, si utilizza l'espediente dell'"altro mondo" per riflettere su quello umano.

È però nel XIX secolo che la questione degli extraterrestri assume una nuova dimensione, sospinta dai progressi della scienza e in particolare dell'astrofisica. Le scoperte astronomiche, unite alla possibilità di indagare fisicamente l'universo tramite la spettroscopia e l'osservazione telescopica, alimentano un'immaginazione più concreta. Opere di divulgazione scientifica come quelle, già citate, di Camille Flammarion, e romanzi di narrativa speculativa come *La Guerra dei Mondi* (1898) di H.G. Wells iniziano a trattare il tema della vita su altri mondi in modo più strutturato, mescolando dati scientifici e proiezioni creative. La linea di confine tra scienza e fantascienza diventa sempre più sottile, dando forma a un immaginario moderno che continua ad accompagnarci ancora oggi.

7. Il XX secolo

Nel XX secolo, la maturazione del genere fantascientifico coincide con l'inizio dell'era spaziale, un periodo in cui l'esplorazione dello spazio passa da sogno a progetto concreto. Nei primi anni Sessanta, un protagonista della scienza come Joshua Lederberg, premio Nobel per la medicina, solleva la questione della possibile contaminazione biologica nello spazio, ponendo l'attenzione sulla necessità di considerare la vita extraterrestre anche da un punto di vista microbiologico. Le sue preoccupazioni vengono prese seriamente dalla Nasa, che inizia a sviluppare una nuova disciplina, inizialmente chiamata "esobiologia", e in seguito ribattezzata "astrobiologia", dedicata allo studio dell'origine, evoluzione e diffusione della vita nell'universo.

Nello stesso periodo nasce anche il progetto SETI (Search for Extraterrestrial Intelligence), volto a individuare possibili segnali radio provenienti da civiltà aliene. L'iniziativa prende avvio nel 1959 con un articolo pionieristico dei fisici Giuseppe Cocconi e Philip Morrison, pubblicato sulla rivista «Nature», che proponevano di utilizzare i radiotelescopi per captare segnali intelligenti dallo spazio. Non molto tempo dopo, nel 1960, il radioastronomo Frank Drake dà concretamente inizio alla ricerca con il progetto Ozma, puntando un radiotelescopio verso due stelle vicine, Tau Ceti e Epsilon Eridani, alla ricerca di trasmissioni artificiali.

Il SETI conosce un periodo di grande entusiasmo e sviluppo negli anni Sessanta e Settanta, anche se successivamente l'interesse si affievolisce per mancanza di risultati. Tuttavia, quel periodo rappresenta un momento di intensa sinergia tra scienza e immaginazione, in cui la fantascienza e la ricerca scientifica si alimentano reciprocamente. L'idea

di non essere soli nell'universo cessa di essere soltanto un tema letterario e diventa una questione scientifica, affrontata con strumenti teorici e tecnologici sempre più sofisticati.

8. Caso o necessità?

Un aspetto particolarmente interessante riguarda l'approfondimento delle riflessioni storiche sull'astrobiologia e sul posto dell'uomo nell'universo. Come abbiamo visto, l'umanità ha a lungo meditato su questi temi, producendo un'enorme quantità di speculazioni, sia filosofiche che scientifiche. Un elemento spesso trascurato, tuttavia, è la tensione latente tra due grandi rivoluzioni del pensiero moderno: quella copernicana e quella darwiniana.

Pur essendo entrambe rivoluzioni che ridimensionano il ruolo centrale dell'uomo nell'universo, esse portano con sé implicazioni profondamente diverse. La rivoluzione copernicana ha inaugurato l'idea della non-centralità della Terra: il nostro pianeta non è al centro del cosmo, né è in alcun modo speciale. Questa prospettiva suggerisce che l'universo sia uniforme, governato da leggi fisiche valide ovunque, e quindi potenzialmente popolato da altri mondi simili al nostro, forse anche abitati. È il cosiddetto "principio di mediocrità": ciò che vale per noi potrebbe valere anche altrove.

La rivoluzione darwiniana, invece, pur decentrando l'essere umano rispetto a un disegno finalista, introduce un elemento di forte discontinuità. Darwin ci mostra che la vita, e in particolare l'intelligenza umana, non sono il frutto di un progetto, ma l'esito imprevedibile di una lunga catena di eventi naturali, governati da mutazioni casuali e dalla selezione naturale. Questo rende l'emergere della vita – e a maggior ragione di una forma di vita complessa

e autocosciente – un processo altamente contingente, forse irripetibile.

Qui si apre un paradosso: da un lato, la prospettiva copernicana ci spinge a ritenere la vita diffusa e comune nell'universo; dall'altro, la prospettiva darwiniana ci ricorda quanto improbabile sia stato, sulla Terra, il percorso che ha portato dalla materia inanimata agli organismi viventi. L'universo può essere colmo di pianeti, ma quanti di essi hanno attraversato – o stanno attraversando – una traiettoria simile alla nostra? La vita, dunque, potrebbe essere al tempo stesso un fenomeno naturale e tuttavia straordinariamente raro.

Questa riflessione è espressa in modo lucido da Jacques Monod, uno dei principali biologi molecolari del Novecento, nel suo celebre libro *Il caso e la necessità* (1970). Monod sostiene che l'essere umano è il prodotto di una serie di eventi estremamente improbabili, una sorta di “lotteria biologica”, e che la nostra esistenza dipende da una combinazione fortuita di condizioni contingenti. A suo avviso, proprio per l'elevato grado di casualità che caratterizza i processi biologici, non possiamo dare per scontato che la vita – e in particolare la vita complessa – si sia sviluppata anche altrove nell'universo.

Su questo punto emergono differenze significative tra le prospettive di astrofisici e biologi. Gli astrofisici, mossi da una visione erede della rivoluzione copernicana, tendono a considerare la vita come una conseguenza naturale delle leggi universali della fisica e della chimica: se i pianeti si formano ovunque e se le condizioni sono simili, allora è ragionevole pensare che la vita possa emergere anche altrove. I biologi, invece, conoscono in profondità la complessità e l'imprevedibilità dei meccanismi evolutivi, e sono quindi più cauti: la vita, secondo questa visione, potrebbe essere un evento eccezionale, difficile da riprodurre in altri contesti, anche se simili.

Nonostante queste divergenze, è opinione condivisa che solo l'indagine empirica potrà fornire risposte credibili alla domanda su un'eventuale pluralità della vita nel cosmo. Come accennato in precedenza, non bastano riflessioni teoriche, per quanto raffinate: solo l'osservazione scientifica potrà dirci se siamo davvero soli o se, da qualche parte tra le stelle, esistano altre forme di vita. Le speculazioni filosofiche hanno avuto un ruolo fondamentale nel plasmare la nostra visione del mondo; ma oggi, più che mai, è la scienza a dover raccogliere il testimone, cercando prove concrete per affrontare una delle domande più profonde dell'esistenza umana.

3. Aspetti scientifici

Affrontare scientificamente la questione della vita nell'universo significa confrontarsi con una sfida complessa, che richiede l'integrazione di due dimensioni fondamentali: quella astrofisica e quella biologica. Per capire davvero dove e come potrebbe emergere la vita, è necessario combinare due grandi storie che la scienza ha costruito, soprattutto negli ultimi cinquant'anni.

La prima è la storia dell'evoluzione dell'universo. Come già accennato, oggi sappiamo che l'universo non è statico: ha avuto un inizio – il Big Bang – e da allora si è espanso, raffreddato e trasformato, attraversando fasi fisiche molto diverse tra loro. Nei suoi primi istanti era incredibilmente caldo e denso, ma col passare del tempo si è raffreddato, permettendo alla materia di organizzarsi: prima in atomi, poi in stelle e galassie. In questa prospettiva, il tempo non è uno sfondo neutro, ma un ingrediente attivo e fondamentale. Nulla di ciò che vediamo sarebbe possibile senza l'evoluzione cosmica.

Questa è una considerazione cruciale. L'origine della vita va compresa all'interno di questo scenario evolutivo. Senza tener conto della storia fisica del cosmo, si rischia di affrontare la questione in modo parziale. Per lungo tempo, la biologia si è occupata della vita sulla Terra senza considerare appieno il contesto cosmico in cui essa è emersa. Ma se allarghiamo lo sguardo, la posta in gioco cambia radicalmente.

Immaginiamo, per contrasto, un universo eterno e immutabile, sia nello spazio che nel tempo – una visione che estende la lezione copernicana ben oltre la semplice dezentratura della Terra. In un universo del genere, con tempo infinito a disposizione, potrebbe sembrare naturale che prima o poi, dal caos, emerga una qualche forma di ordine. Un'idea che potrebbe sembrare improbabile, ma che, data l'eternità del tempo, finisce per diventare quasi inevitabile.

Tuttavia, oggi sappiamo che l'universo ha circa 13,8 miliardi di anni. E soprattutto, sappiamo che questi miliardi di anni non sono stati tutti uguali. Ci sono stati momenti in cui esistevano solo particelle elementari, fasi in cui non c'erano ancora stelle, e periodi in cui le condizioni si sono fatte più favorevoli alla formazione di sistemi planetari. In questa lunga catena di trasformazioni, la comparsa della vita diventa un fenomeno sempre più complesso, da interpretare non semplicemente come il risultato del caso, ma come l'esito possibile – forse persino probabile – di un processo evolutivo guidato da leggi fisiche e chimiche.

La vera domanda, allora, è la seguente: la vita è solo un prodotto accidentale del cosmo, oppure esistono forze, vincoli o regolarità che ne aumentano la probabilità di emergere? È possibile che, date le giuste condizioni, la vita sia una conseguenza quasi inevitabile dell'evoluzione dell'universo?

Questa è, in definitiva, la grande sfida scientifica del nostro tempo. La biologia, per spiegare l'origine della vita, deve

confrontarsi con la cosmologia. La vita non è un fenomeno isolato, da studiare solo in laboratorio o nel passato geologico della Terra, ma va compresa come parte di un processo più ampio, che ha preso forma con la nascita e l’evoluzione dell’universo stesso. È un approccio più ambizioso, ma anche più completo, che ci avvicina a comprendere davvero da dove veniamo – e se potremmo trovare la vita, o qualcosa di simile, anche altrove.

La seconda grande storia da considerare è quella della vita sulla Terra. Negli ultimi decenni, la biologia ha compiuto enormi progressi nel ricostruire questo racconto, grazie alla paleontologia, alla genetica e alle moderne tecnologie di analisi. Sappiamo oggi che la vita si è evoluta nel corso di miliardi di anni, dando origine a una straordinaria varietà di forme, attraverso un processo continuo di differenziazione. Ma questa evoluzione non è avvenuta in isolamento: è sempre stata in dialogo con l’ambiente planetario.

La vita e la Terra si sono co-evolute. Cambiamenti climatici, eventi geologici, impatti cosmici e alterazioni della composizione atmosferica hanno influenzato profondamente il corso dell’evoluzione biologica. Allo stesso tempo, gli organismi viventi hanno modificato a loro volta il pianeta, dando origine a una vera e propria “biosfera”: un sistema complesso in cui la vita non è solo un prodotto delle condizioni ambientali, ma anche una forza che contribuisce attivamente a modellarle.

Collegare questa storia a quella dell’universo significa riconoscere che la vita sulla Terra non è un fenomeno isolato, ma parte di un processo evolutivo più ampio, che coinvolge il cosmo intero. In alcuni casi le connessioni sono evidenti – ad esempio, gli impatti avvenuti nelle fasi iniziali della formazione del Sistema Solare, che hanno influenzato in modo decisivo le condizioni ambientali del nostro pianeta. In altri casi, i legami sono più sottili, ma non meno significativi.

Una delle ipotesi oggi allo studio è che i mattoni fondamentali della vita – le molecole prebiotiche – possano avere origini extraterrestri. Alcuni studi suggeriscono che possano essere state portate sulla Terra da meteoriti o comete, contribuendo all'avvio dei processi chimici che hanno portato alla comparsa degli organismi viventi. Anche l'acqua, elemento indispensabile per la vita come la conosciamo, potrebbe essere in parte giunta attraverso impatti cosmici.

Ma la relazione tra vita e pianeta non è unidirezionale. Esistono meccanismi di retroazione, o *feedback*, in cui la vita stessa trasforma l'ambiente. Un esempio cruciale è l'aumento dell'ossigeno atmosferico, avvenuto circa 2,2 miliardi di anni fa. Questo evento, noto come la "Grande Ossidazione", fu innescato dalla diffusione degli organismi fotosintetici, capaci di utilizzare la luce solare per produrre energia e, nel processo, liberare ossigeno. Prima di allora, l'atmosfera terrestre conteneva quantità trascurabili di ossigeno libero. La sua comparsa non solo ha trasformato radicalmente la chimica dell'atmosfera e degli oceani, ma ha avuto effetti profondi sull'evoluzione biologica, portando all'estinzione di molte forme di vita anaerobiche, incapaci di sopravvivere in presenza di ossigeno.

Questo esempio mostra con chiarezza quanto la vita sia interconnessa con il contesto fisico e chimico in cui si sviluppa. Non possiamo capire l'origine e l'evoluzione della vita senza considerare l'ambiente cosmico e planetario. Allo stesso modo, studiare questi ambienti – sulla Terra e altrove – significa anche cercare di capire dove e come la vita possa emergere.

Questi cambiamenti, dunque, non sono soltanto il frutto di un'evoluzione geologica, ma anche il risultato di un processo biologico. I due fattori – geologia e biologia – si influenzano a vicenda in modo continuo. La vita sulla Terra non si è sviluppata in un ambiente passivo e immutabile, ma ha contribuito attivamente a trasformarlo, generando

un contesto che, a sua volta, ha plasmato l’evoluzione degli organismi viventi. Si tratta di una dinamica complessa, in cui cause ed effetti si intrecciano profondamente.

Un aspetto particolarmente rilevante è la sorprendente rapidità con cui la vita è comparsa sulla Terra. Le prime evidenze empiriche di organismi viventi risalgono a circa 3,8 miliardi di anni fa. Alcuni studiosi ipotizzano che la vita possa essersi originata anche prima, forse intorno ai 4 miliardi di anni fa, ma la scarsità di rocce così antiche rende difficile confermare questa ipotesi. Le rocce più antiche che possiamo analizzare risalgono proprio a 3,8 miliardi di anni fa, e già in esse troviamo tracce chimiche e strutturali riconducibili alla presenza di vita.

Questo dato è significativo: la vita non solo è apparsa molto presto nella storia del pianeta, ma lo ha fatto in un tempo relativamente breve. Il passaggio da semplici molecole prebiotiche ai primi organismi unicellulari sembra essere avvenuto nell’arco di qualche centinaio di milioni di anni. Considerando che la Terra ha un’età di circa 4,5 miliardi di anni, si tratta di un intervallo sorprendentemente breve.

La rapidità con cui la vita è comparsa sulla Terra solleva una domanda affascinante: che cosa implica questo dato riguardo alla possibilità che la vita esista anche altrove nell’universo? La risposta non è affatto semplice. Da un lato, si potrebbe pensare che la comparsa precoce della vita sul nostro pianeta indichi una certa “facilità” del fenomeno: forse, quando le condizioni ambientali sono favorevoli, la vita tende a emergere spontaneamente, rendendola un evento potenzialmente comune nel cosmo. Bastano pochi ingredienti e il giusto contesto, e qualcosa comincia a vivere.

Dall’altro lato, però, alcune analisi statistiche mettono in discussione questa interpretazione ottimistica. Il fatto che la vita sia apparsa rapidamente sulla Terra non basta, da solo, a giustificare generalizzazioni. Potrebbe trattarsi di un caso eccezionale, e finché non disporremo di dati

provenienti da altri pianeti, ogni inferenza rimane fragile. Come sempre, sarà solo l'indagine empirica – fondata su osservazioni, esperimenti e dati concreti – a portarci più vicino a una risposta reale.

1. Il paradosso di Fermi

Questa riflessione ci conduce inevitabilmente a un'altra grande domanda: perché, nonostante decenni di ricerche, non abbiamo ancora rilevato alcuna traccia di vita extraterrestre? Insomma, per dirla in una battuta: «Dove sono tutti quanti?».

La domanda, attribuita al fisico Enrico Fermi, sarebbe emersa durante una conversazione conviviale che coinvolse lo stesso Fermi e alcuni colleghi, e che ebbe luogo nel 1950, nella mensa dei laboratori di Los Alamos. Lo spunto di partenza fu una vignetta pubblicata sulla rivista «The New Yorker», che, con umorismo sottile, metteva in relazione gli avvistamenti di oggetti volanti non identificati (UFO) e la curiosa sparizione di bidoni della spazzatura a New York: il vignettista suggeriva, in modo ironico, che potessero essere stati gli alieni a rubarli. In quegli anni, in effetti, l'opinione pubblica era affascinata (e in parte inquietata) da un'ondata di segnalazioni di Ufo. Molti di questi avvistamenti potevano essere spiegati come test militari segreti o semplici illusioni ottiche, ma l'idea di possibili contatti con civiltà extraterrestri iniziava a farsi strada, anche nella cultura popolare.

Discutendo con i colleghi la possibilità che esistesse davvero vita intelligente extraterrestre, Fermi avrebbe a un certo punto posto una domanda tanto semplice quanto destabilizzante: «Dove sono tutti quanti?». Fermi era famoso per la sua capacità di ragionare per ordini di grandezza, ed era solito proporre ai suoi studenti esercizi apparentemente assurdi, come stimare il numero di accordatori di pianoforti

presenti a Chicago. Per rispondere, bisognava fare ipotesi ragionevoli sulla popolazione, sul numero medio di pianoforti per famiglia, sulla frequenza dell'accordatura e così via. Questo metodo, fondato su stime progressive e ragionamenti quantitativi, è diventato noto come "problema di Fermi". È dunque possibile che, applicando lo stesso approccio all'ipotesi di civiltà extraterrestri, Fermi avesse fatto un rapido calcolo mentale e avesse concluso che la loro esistenza fosse molto probabile. La nostra galassia, infatti, contiene centinaia di miliardi di stelle, molte delle quali sono miliardi di anni più vecchie del Sole. In linea di principio, se forme di vita intelligenti fossero apparse su altri pianeti molto prima che sulla Terra, esse avrebbero avuto tutto il tempo necessario per creare tecnologie avanzate, magari capaci di comunicare a distanza o addirittura di esplorare o colonizzare la galassia. Ma allora, chiedeva provocatoriamente Fermi, perché non ne vediamo traccia?

Questo è ciò che oggi chiamiamo "paradosso di Fermi": un'apparente contraddizione tra l'elevata probabilità che esistano altre civiltà nell'universo e l'assenza totale di prove della loro esistenza. Un silenzio cosmico che continua a sfidarci. Le possibili risposte al paradosso sono numerose, spesso speculative e nessuna è supportata da dati definitivi. L'ipotesi più semplice – ma anche la più inquietante – è che siamo soli. Altre spiegazioni immaginano invece che le civiltà extraterrestri esistano, ma scelgano di non manifestarsi; oppure che non siano interessate a colonizzare la galassia, o che stiano osservando l'umanità senza interferire. Una teoria molto popolare negli anni Settanta, in un'epoca segnata dalla paura della guerra nucleare, proponeva che le civiltà tecnologiche tendano ad autodistruggersi prima di raggiungere la capacità di esplorare lo spazio su larga scala.

Qualunque sia la risposta, la questione rimane aperta. Il vero valore del paradosso di Fermi, forse, non è tanto nella risposta quanto nella domanda. Ci costringe a confrontarci

con le difficoltà di ragionare su scale temporali e spaziali immensamente più grandi di quelle a cui siamo abituati. È facile, e spesso rassicurante, pensare che “là fuori” debba esserci qualcun altro, semplicemente perché l'universo è enorme. Ma la vastità dello spazio non garantisce nulla. Come ci insegna il paradosso, non basta che qualcosa sia *possibile* perché sia anche *probabile*, e non basta che sia *probabile* perché sia *accertato*. In assenza di prove, dobbiamo convivere con l'incertezza – ed è proprio questo che rende il paradosso di Fermi così affascinante.

2. Il problema dell'inferenza statistica

Uno degli argomenti più diffusi a favore dell'idea che la vita sia comune nell'universo è di tipo statistico: considerando l'enorme numero di stelle e pianeti nella galassia, sembra improbabile che la Terra sia l'unico pianeta abitato. Tuttavia, questo ragionamento presenta un problema fondamentale. Per capirlo, possiamo ricorrere a un esperimento mentale che mette in luce i limiti dell'inferenza basata su un singolo caso osservato.

Immaginate di partecipare a un gioco. Venite fatti entrare in una stanza. Davanti a voi c'è un'urna gigantesca contenente cento miliardi di palline, un numero paragonabile a quello delle stelle della Via Lattea. Le palline possono essere bianche o azzurre, ma non conoscete la loro proporzione. Vi viene chiesto di estrarre una. La pescate e scoprite che è azzurra. A questo punto, quale conclusione potete trarre? Una possibilità è ipotizzare che ci siano molte palline azzurre nell'urna, probabilmente metà, forse la maggior parte, o addirittura tutte. Questo è, in fondo, lo stesso tipo di ragionamento che si applica all'universo: esiste un numero straordinariamente grande di pianeti nella nostra galassia (e ancora di più nell'intero universo), noi ci

troviamo su un pianeta abitato, dunque la vita dev'essere comune. Sembra improbabile, si pensa, che proprio noi si sia capitati sull'unico pianeta vivo tra miliardi.

Ma ora introduciamo un elemento in più. Dopo aver estratto la pallina azzurra, vi viene spiegato che prima di voi un numero imprecisato di altre persone è entrato nella stessa stanza e ha partecipato allo stesso gioco. Tuttavia, il gioco ha una regola che finora non conoscevate: chi estrae una pallina bianca viene vaporizzato all'istante, senza lasciare traccia, mentre solo chi pesca una pallina azzurra sopravvive. A questo punto, è chiaro che non potete usare il fatto di aver estratto una pallina azzurra per trarre conclusioni sulla composizione dell'urna. Il vostro punto di vista è inevitabilmente condizionato dalla vostra stessa sopravvivenza: se non aveste pescato una pallina azzurra, non esistereste più. Inoltre, non sapendo quante persone abbiano partecipato al gioco prima di voi, non potete sapere se pescare una pallina azzurra fosse molto probabile o se siate stati incredibilmente fortunati.

Torniamo allora alla questione della vita nell'universo. Noi osserviamo di trovarci su un pianeta abitato, ma questa osservazione è inevitabile: non potremmo mai esistere su un pianeta privo di vita. Anche se la Terra fosse l'unico pianeta abitato in tutto l'universo, avremmo comunque il 100% di probabilità di fare questa osservazione, perché è l'unico contesto in cui la nostra esistenza è possibile. Questo mette in evidenza un aspetto cruciale, noto in filosofia della scienza come *bias del sopravvissuto* o *selezione antropica*. La nostra esistenza come osservatori coscienti ci garantisce che ci troviamo su un pianeta in cui la vita è possibile. Ma proprio per questo non possiamo usare la nostra presenza come prova che la vita sia comune nell'universo. In altre parole, il fatto che "noi siamo qui" non è un'informazione neutra, e l'effetto di selezione condiziona profondamente il modo in cui dobbiamo interpretarla. A differenza di altre osservazioni

scientifiche, in cui possiamo raccogliere dati indipendenti e non influenzati dall'osservatore, qui la nostra stessa esistenza limita il tipo di osservazioni che possiamo fare.

Per capire se la vita è comune o rara nell'universo, non possiamo semplicemente basarci sul fatto che siamo vivi e presenti su un pianeta abitato. Dobbiamo invece cercare altri "campioni": altri pianeti con tracce di vita, e studiare quale sia la loro reale frequenza. Solo ampliando il nostro campione di osservazioni potremo rispondere con maggiore certezza a questa domanda.

Ed è proprio questo l'obiettivo della ricerca astrobiologica contemporanea: scoprire se la Terra è un caso unico o se la vita è un fenomeno diffuso nell'universo.

3. L'origine della vita: un problema ancora aperto

Charles Darwin, pur avendo rivoluzionato la biologia con la teoria dell'evoluzione per selezione naturale, evitò accuratamente di pronunciarsi sull'origine della vita. Era consapevole della complessità del problema e si limitò a descrivere come la vita si fosse diversificata nel tempo, non come fosse iniziata. In una lettera scrisse che speculare sull'origine della vita era, in sostanza, un esercizio sterile. Solo più tardi ipotizzò, in via del tutto congetturale, che in un "piccolo stagno caldo", ricco di composti chimici e attraversato da scariche elettriche, potesse essere avvenuto qualcosa di significativo.

Questa suggestione ha ispirato molte ricerche nel corso del Novecento, a partire dal lavoro dello scienziato russo Aleksandr Oparin, tra i primi a proporre un modello di chimica prebiotica. Su questa linea si inserisce il celebre esperimento di Miller-Urey degli anni Cinquanta, in cui una miscela di gas venne sottoposta a scariche elettriche per simulare le condizioni dell'atmosfera terrestre primordiale. Il

risultato fu la formazione spontanea di alcuni amminoacidi, i mattoni fondamentali delle proteine.

Tuttavia, l'esperimento presentava due limiti importanti. Anzitutto, si basava su un'ipotesi di atmosfera primitiva che oggi sappiamo essere probabilmente inesatta. Inoltre, non portò alla formazione della vita, ma solo di alcune sue componenti elementari. Il salto da molecole organiche semplici a un sistema vivente, capace di replicarsi ed evolvere, resta un'enorme sfida scientifica, ancora priva di una soluzione convincente.

A complicare ulteriormente le cose c'è il fatto che non esiste una definizione universalmente accettata di "vita". Ogni tentativo di darne una si scontra con eccezioni e ambiguità. La NASA, per esempio, ha proposto una definizione operativa: la vita è un sistema chimico autosufficiente capace di evoluzione darwiniana. Ma anche questa formulazione è controversa: ci sono sistemi non viventi che soddisfano alcuni criteri (come i cristalli che crescono o i virus informatici che si replicano), e organismi viventi che, in certe fasi, non li rispettano pienamente.

In definitiva, sappiamo ancora troppo poco su come la vita abbia avuto origine e su quanto sia diffusa nell'universo. La strategia più efficace è continuare a esplorare, cercare pianeti con i giusti ingredienti e verificare, con pazienza e rigore, se e come la vita possa essersi sviluppata altrove.

4. Cercare la vita nell'universo: da dove iniziare?

Un'obiezione frequente nella ricerca della vita extraterrestre è che potremmo non riconoscerla se fosse radicalmente diversa da quella terrestre. È una possibilità reale, ma la scienza procede per passi progressivi, partendo da ciò che conosce. Per questo motivo, la strategia più sensata è cominciare con un approccio prudente: cercare forme di

vita basate sugli stessi presupposti biochimici della nostra.

Negli ultimi decenni, gli scienziati hanno individuato tre condizioni fondamentali ritenute essenziali per la vita come la conosciamo:

- *Molecole organiche complesse* – Basate sul carbonio, sono il fondamento della chimica della vita, dal DNA alle proteine. Queste molecole sono sorprendentemente diffuse nell'universo: sono state trovate su comete, meteoriti, e persino nelle nubi interstellari.

- *Una fonte di energia* – Qualunque forma di vita conosciuta ha bisogno di energia per sostenere reazioni chimiche e mantenere l'omeostasi. Sulla Terra, l'energia solare è dominante, ma esistono anche ecosistemi che sfruttano l'energia chimica, ad esempio nelle profondità oceaniche.

- *Acqua liquida* – È forse il criterio più restrittivo. L'acqua è una molecola comune, ma trovare ambienti dove rimanga liquida per tempi sufficientemente lunghi da permettere lo sviluppo della vita è molto più raro.

A questi requisiti fondamentali dovrebbe aggiungersi un ulteriore fattore cruciale: il tempo. La semplice presenza dei tre ingredienti ritenuti necessari – acqua, fonti di energia e molecole complesse – non garantisce di per sé la comparsa della vita. È ragionevole supporre che serva anche un intervallo temporale sufficientemente lungo (che oggi non siamo in grado di quantificare), durante il quale si verifichino condizioni ambientali particolari in grado di attivare meccanismi – anch'essi ancora in gran parte sconosciuti – capaci di trasformare la materia inanimata in sistemi viventi.

In ogni caso, per iniziare la ricerca di questi ambienti potenzialmente favorevoli, la strategia più immediata è concentrarsi su quella che, con un termine non del tutto preciso, viene definita *zona abitabile*. Si tratta di una fascia attorno a qualunque stella nella quale, almeno in linea di principio, potrebbe esistere acqua allo stato liquido sulla superficie di un pianeta. La posizione e l'estensione di

questa zona dipendono dalle caratteristiche della stella: se è molto luminosa, la zona abitabile sarà più distante e ampia; se è più debole, sarà più vicina e più stretta.

Ma è importante sottolineare che la zona abitabile è un concetto puramente astrofisico, che non garantisce affatto che un pianeta sia realmente abitabile, né tanto meno abitato. Essa indica semplicemente l'intervallo di distanze in cui un pianeta, se avesse un'atmosfera simile a quella terrestre e contenesse acqua, potrebbe mantenere quest'ultima allo stato liquido. Sono ipotesi tutt'altro che scontate, eppure spesso vengono date per implicite.

Per chiarire il limite di questo approccio, possiamo ribaltare la prospettiva. Immaginiamo un astronomo alieno che osservi il nostro Sistema Solare da lontano. Calcolando la zona abitabile attorno al Sole, potrebbe concludere che almeno tre pianeti rocciosi – Venere, Terra e Marte – si trovano al suo interno. A quel punto, forse annuncerebbe la scoperta di “tre mondi potenzialmente abitabili”.

Noi, però, sappiamo che la realtà è molto diversa: di questi tre, solo la Terra ospita acqua liquida in modo stabile e sostenibile. Questo esempio mostra bene come il concetto di zona abitabile sia solo un primo filtro, una guida per selezionare candidati promettenti per la ricerca di vita extraterrestre, non una garanzia. La vera abitabilità dipende da molte altre condizioni, chimiche, atmosferiche e geologiche, che vanno ben oltre la semplice distanza dalla stella.

5. Venere: un inferno climatico

Venere è un esempio emblematico del fatto che trovarsi nella zona abitabile non significa affatto essere *abitabile*. A prima vista, potrebbe sembrare il gemello della Terra: ha dimensioni simili e orbita appena oltre il limite interno della zona abitabile del Sole. Eppure, la sua evoluzione

climatica ha seguito una traiettoria completamente diversa. Oggi Venere presenta una temperatura superficiale media superiore ai 460 °C – abbastanza da fondere il piombo –, una pressione atmosferica circa 90 volte quella terrestre (paragonabile a quella che si sperimenta a oltre un chilometro e mezzo di profondità negli oceani) e un'atmosfera composta quasi interamente da anidride carbonica, con nubi cariche di acido solforico.

Queste condizioni rendono Venere del tutto inospitale. Ma non è solo la sua vicinanza al Sole a spiegare l'inferno che osserviamo oggi. Se Venere avesse avuto un'atmosfera simile a quella terrestre, la temperatura superficiale sarebbe rimasta relativamente mite. Non a caso, fino alla metà del Novecento, alcuni scienziati ipotizzavano che sotto la sua spessa coltre di nubi potesse celarsi un clima tropicale, con piogge e foreste lussureggianti. Una visione oggi completamente superata.

Il punto cruciale è l'effetto serra fuori controllo: l'atmosfera ha trattenuto progressivamente sempre più calore, portando all'evaporazione degli eventuali oceani primitivi. Il vapore acqueo, a sua volta, ha amplificato l'effetto serra, innescando un circolo vizioso che ha trasformato Venere in un forno rovente. Questo scenario ci ricorda che la vera abitabilità di un pianeta dipende da un delicato equilibrio tra molti fattori, e che piccole differenze iniziali possono portare a destini planetari completamente diversi.

6. Il caso di Marte

Il clima di un pianeta è sempre il risultato di processi estremamente complessi, ma in alcuni casi, come quello di Venere, è evidente che si siano verificati eventi catastrofici. Marte è un altro esempio lampante: la sua evoluzione ha seguito un percorso molto diverso da quello favorevole della Terra. A prima vista, alcune immagini della superficie mar-

ziana possono ricordare certi deserti terrestri, ma la realtà è ben diversa. Anche i luoghi più aridi del nostro pianeta sono ambienti infinitamente più ospitali rispetto a Marte.

Nonostante alcune somiglianze superficiali – come la durata del giorno, simile a quello terrestre, e il fatto che un anno marziano equivale a circa due anni terrestri – le condizioni ambientali sono drasticamente differenti. La temperatura media è di molte decine di gradi sotto lo zero, con minime che possono raggiungere i -180° C. La pressione atmosferica, inoltre, è estremamente bassa: un contrasto netto rispetto al caso di Venere.

L'assenza di un significativo effetto serra rende Marte molto più freddo di quanto sarebbe se possedesse un'atmosfera simile a quella terrestre. La perdita dell'atmosfera è in parte legata alla mancanza di un campo magnetico globale, a sua volta dovuta probabilmente alle ridotte dimensioni del pianeta. Queste hanno favorito un rapido raffreddamento del nucleo metallico, riducendo la circolazione di cariche elettriche necessaria per mantenere attiva la dinamo interna. L'arresto di questo meccanismo ha fatto sì che Marte perdesse la protezione magnetica, rimanendo esposto all'azione delle particelle cariche del vento solare. Il bombardamento continuo ha progressivamente eroso l'atmosfera primordiale, rendendo il pianeta sempre più inospitale per la vita, almeno nelle sue condizioni attuali.

Un altro aspetto spesso sottovalutato è l'intensa radiazione che raggiunge la superficie marziana. Rispetto alla Terra, Marte riceve una quantità molto maggiore di radiazioni ionizzanti, sia ultraviolette che cosmiche. Per fare un paragone: un essere umano esposto sulla superficie di Marte per cinque giorni assorbirebbe una dose di radiazioni pari a quella che sulla Terra si accumula in un anno. È un fattore cruciale da considerare prima di avanzare proclami ottimistici sulla possibile colonizzazione del pianeta rosso.

Nonostante le sue condizioni estreme, Marte è stato a lungo il principale candidato per ospitare forme di vita extraterrestre. Nel corso del Novecento, la parola “marziano” è diventata sinonimo di essere alieno, alimentata da una ricca tradizione di racconti fantascientifici. In particolare, *La guerra dei mondi* di H.G. Wells ha contribuito a fissare questa immagine nell’immaginario collettivo. Ma l’idea di un Marte abitato non nasce dalla fantasia: affonda le sue radici nelle osservazioni astronomiche condotte tra la fine dell’Ottocento e l’inizio del Novecento.

Un episodio emblematico è quello legato alle mappe di Marte tracciate in quell’epoca. Se oggi possiamo contare su telescopi spaziali e sonde robotiche, allora gli astronomi osservavano il pianeta attraverso telescopi ottici, disegnando a mano ciò che riuscivano a distinguere. Alcuni notarono delle strutture lineari sulla superficie, che interpretarono come “canali”. Giovanni Schiaparelli, astronomo italiano, fu tra i primi a riportare queste osservazioni, usando il termine *canali* per indicare, con ogni probabilità, formazioni naturali.

L’interpretazione cambiò radicalmente con Percival Lowell, ricco appassionato di astronomia che fondò un proprio osservatorio per studiare Marte. Lowell era convinto che quei canali fossero opere artificiali, costruite da una civiltà marziana avanzata per distribuire acqua su un pianeta in via di desertificazione. Pur priva di solide basi scientifiche, questa ipotesi affascinò il pubblico e fu ripresa con entusiasmo dai giornali dell’epoca, incluso il «New York Times», che riportava senza esitazioni l’esistenza di una civiltà intelligente su Marte. Alcuni articoli affermavano persino che i marziani stessero scavando nuovi canali.

Questa narrazione influenzò profondamente la cultura popolare e la fantascienza del tempo. Oggi sappiamo che i “canali” erano illusioni ottiche, generate dalla bassa risoluzione dei telescopi e da suggestioni percettive. Osservazioni successive dimostrarono che non esistevano strutture lineari

sulla superficie di Marte. Ma la vicenda resta un esempio istruttivo di come l'interpretazione scientifica possa essere condizionata dalle aspettative e dai preconcetti dell'osservatore. La storia dei canali marziani ci ricorda l'importanza della prudenza nel valutare i dati, e dimostra come anche un errore scientifico possa lasciare un'impronta duratura sulla cultura e sull'immaginario collettivo.

Un esempio più recente aiuta a comprendere quanto certe idee possano ripresentarsi nel tempo. Negli anni Cinquanta del XX secolo, William M. Sinton, un astronomo dell'università di Harvard, applicò la spettroscopia per studiare a distanza, dalla Terra, la superficie marziana. La spettroscopia è una tecnica fondamentale in astrofisica: permette di determinare la composizione chimica degli oggetti celesti analizzando la luce che emettono o riflettono. Sinton, utilizzando questa tecnica, osservò segnali spettrali che interpretò come compatibili con la clorofilla terrestre: in sostanza, si convinse di aver scoperto la presenza di vegetazione su Marte. La sua ipotesi si basava su due elementi: da un lato, le variazioni stagionali dell'aspetto della superficie marziana; dall'altro, la presunta presenza di righe spettrali simili a quelle prodotte dalla vegetazione sulla Terra.

Gli articoli di Sinton, che oggi sappiamo essere frutto di interpretazioni errate, furono pubblicati su riviste prestigiose come «The Astrophysical Journal» e «Science». Non risalgono a quattro secoli fa, ma solo a pochi decenni fa, all'alba dell'era spaziale, quando si cominciava a progettare l'esplorazione del Sistema Solare. Negli anni Sessanta, le prime missioni a ottenere immagini ravvicinate di Marte – le sonde *Mariner* – mostrarono immagini ravvicate di un paesaggio arido e desolato, in aperto contrasto con l'idea di un mondo abitato da organismi complessi. Ma restava ancora la possibilità che Marte ospitasse forme di vita microscopiche.

Dopo l'allunaggio, uno degli obiettivi principali della NASA fu proprio la ricerca di vita su Marte. Per questo motivo vennero inviate le sonde *Viking*, che scesero sulla superficie marziana tra il 1976 e il 1977. Le *Viking* permisero per la prima volta di condurre esperimenti diretti sulla composizione del suolo, per individuare la presenza di microorganismi. Grazie a un braccio meccanico dotato di paletta, le sonde prelevarono campioni di terreno per analisi biologiche. Tuttavia, i risultati non mostrarono alcuna evidenza conclusiva di vita.

Questa mancata scoperta, che arrivò proprio nel momento di massimo entusiasmo per la colonizzazione dello spazio e la ricerca di vita extraterrestre, segnò una battuta d'arresto nelle speranze di trovare tracce di vita marziana. Ma la questione non venne chiusa definitivamente. Va considerato che una missione spaziale richiede decenni di preparazione. Gli esperimenti a bordo delle *Viking* erano stati ideati molti anni prima del lancio, con tecnologie e conoscenze che, nel frattempo, erano già invecchiate. Oggi sappiamo che quegli esperimenti, pur pionieristici, probabilmente non erano ottimizzati per rilevare le forme di vita che, se esistono, potrebbero essere molto diverse da quelle terrestri.

Dopo le *Viking*, per oltre quarant'anni, nessuna missione ha avuto come obiettivo esplicito la ricerca di vita su Marte. Le esplorazioni successive si sono concentrate sulla comprensione della geologia e della storia climatica del pianeta. Nel frattempo, però, sono emerse nuove evidenze. Oggi sappiamo che, miliardi di anni fa, Marte era un pianeta più caldo e umido, con un'atmosfera più densa. Secondo le ricostruzioni basate sui dati delle sonde robotiche, se avessimo potuto osservare Marte quattro miliardi di anni fa, avremmo visto un mondo solcato da fiumi e punteggiato di laghi.

Questo solleva una domanda affascinante: se sulla Terra la vita stava già emergendo in quel periodo, è possibile che anche Marte fosse abitabile? E se la vita fosse effet-

tivamente nata anche lì, si è poi estinta del tutto oppure potrebbe ancora sopravvivere in nicchie protette? Negli ultimi anni, nuove scoperte hanno rafforzato questa ipotesi. Nel 2018, un'analisi dei dati raccolti dal radar Marsis, a bordo della sonda *Mars Express*, ha rilevato segnali compatibili con la presenza di laghi sotterranei nei pressi del polo sud marziano. Studi successivi hanno continuato a indagare questa possibilità, suggerendo che acqua salata possa ancora esistere in forma liquida sotto la superficie. Se confermata, questa scoperta aprirebbe scenari sorprendenti: ambienti dove la vita microbica potrebbe essersi adattata e sopravvivere ancora oggi, al riparo dalle radiazioni e dalle temperature estreme della superficie.

Per questo motivo, la missione *ExoMars*, il cui lancio è stato posticipato a causa di motivi tecnici e geopolitici, mantiene l'obiettivo di trivellare fino a due metri di profondità per analizzare campioni di terreno, alla ricerca di tracce di vita passata o presente. Nel frattempo, anche la missione Nasa *Perseverance*, scesa su Marte nel 2021, sta esplorando antichi ambienti abitabili e raccogliendo campioni per future analisi. Questi progetti rappresentano un rinnovato impegno internazionale nella ricerca di forme di vita marziane, sfruttando tecnologie avanzate e approcci complementari.

7. Vita in ambienti estremi

Un altro elemento che ha mantenuto vivo l'interesse per la ricerca di vita extraterrestre è la scoperta, sulla Terra, di organismi capaci di adattarsi a condizioni un tempo ritenute del tutto ostili alla vita. Per esempio, esistono microorganismi che sopravvivono all'interno di rocce antartiche, in assenza di acqua liquida e luce solare. Altri prosperano nei fondali oceanici, in prossimità delle bocche idrotermali note come *black smokers*. Da queste fenditure fuoriescono sostanze chimiche

ed energia, in condizioni di oscurità totale e alta pressione, a chilometri di profondità. Un tempo si credeva che questi ambienti fossero completamente inospitali, ma dagli anni Settanta si è scoperto che ospitano interi ecosistemi basati su batteri autotrofi, capaci di sintetizzare composti organici senza bisogno di luce solare. Attorno a questi batteri si sviluppano catene alimentari più complesse, con molluschi e altri invertebrati.

Queste scoperte hanno cambiato la nostra concezione della vita, suggerendo che condizioni simili potrebbero esistere anche altrove nel Sistema Solare. In particolare, hanno suscitato grande interesse le lune ghiacciate di alcuni pianeti gassosi, come Europa (satellite di Giove) ed Encelado (satellite di Saturno), che potrebbero nascondere ambienti abitabili.

Europa è ricoperta da uno spesso strato di ghiaccio, ma sotto la superficie si trova probabilmente un vasto oceano di acqua liquida. I modelli attuali indicano che potrebbe contenere più acqua degli oceani terrestri messi insieme. Inoltre, ci sono crescenti indizi di attività geotermica, che fornirebbe una fonte di energia utile alla vita.

Anche Encelado è un caso affascinante: la sonda *Cassini* ha osservato geyser che espellono vapore d'acqua dallo strato ghiacciato verso lo spazio. Analizzando i pennacchi, si sono trovate tracce di idrogeno molecolare, un possibile segnale di reazioni chimiche simili a quelle che avvengono nelle bocche idrotermali terrestri. Alcuni studi indicano che anche Europa potrebbe avere geyser, ma le prove finora non sono definitive.

L'esplorazione di queste lune è oggi una delle priorità dell'astrobiologia. Nell'aprile 2023 è partita la missione europea *Juice* (JUpiter ICy moons Explorer), che raggiungerà il sistema di Giove nel 2031 per studiare da vicino le lune ghiacciate, in particolare Ganimede, ma anche Europa e Callisto. A ottobre 2024 è stata lanciata la mis-

sione NASA *Europa Clipper*, con arrivo previsto sulla luna gioviana nel 2030: la sonda effettuerà decine di sorvoli ravvicinati della luna per analizzare la composizione del ghiaccio, cercare eventuali pennacchi e mappare il sottosuolo tramite radar. Se i geyser di Encelado ed Europa contengono materiale proveniente dagli oceani interni, in futuro potrebbe essere possibile raccoglierlo e studiarlo senza dover perforare il ghiaccio, semplificando enormemente la ricerca di tracce biologiche.

Se si dovesse indicare il luogo del Sistema Solare con le condizioni più promettenti per la vita – cioè la presenza di acqua liquida, molecole organiche e una fonte di energia – le lune ghiacciate sarebbero dunque la scommessa migliore. Anche se non ci aspettiamo di trovare forme di vita complesse o “marziani” nel senso classico, la scoperta di semplici organismi unicellulari sarebbe comunque una rivoluzione scientifica di enorme portata – una prova che la vita può emergere anche altrove, in ambienti molto diversi dal nostro.

Il discorso sulla possibilità di forme di vita ancora più esotiche – come quelle ipotizzate per mondi come Titano, un altro satellite di Saturno – viene spesso tralasciato nelle trattazioni più orientate all’evidenza. Su Titano esistono laghi formati non da acqua, ma da idrocarburi liquidi come metano ed etano, e sono stati ipotizzati scenari biochimici alternativi in cui l’acqua è sostituita da altre sostanze. Si tratta tuttavia di un territorio ancora altamente speculativo, e per questo motivo l’attenzione si concentra di solito su ciò che è meglio compreso: la vita così come la conosciamo, basata sull’acqua, su molecole organiche e su fonti di energia accessibili. Questo non esclude la possibilità di alternative, almeno dal punto di vista della chimica organica. Titano rappresenta comunque un laboratorio naturale affascinante per studiare la chimica prebiotica in condizioni molto diverse da quelle terrestri. Proprio per questo, la NASA sta preparando

una missione chiamata *Dragonfly*, che invierà un drone a elica sulla superficie di Titano per esplorare direttamente questo ambiente unico. Il lancio è previsto per il 2028, con arrivo stimato attorno alla metà degli anni Trenta.

8. I pianeti extrasolari

Ma passiamo all'altra grande frontiera della ricerca astrobiologica: i mondi al di fuori del Sistema solare. Questo è stato il vero campo rivoluzionario degli ultimi decenni, grazie alla scoperta di migliaia di esopianeti. Il primo pianeta in orbita attorno a una stella simile al Sole è stato identificato nel 1995, una scoperta che ha valso il premio Nobel per la fisica a Michel Mayor e Didier Queloz. Da allora, siamo passati dal non conoscere alcun pianeta extrasolare al catalogarne diverse migliaia. Non siamo ancora arrivati ai miliardi di mondi che riteniamo esistano nella nostra galassia, ma disponiamo ormai di un campione statisticamente significativo. Questo ha permesso di compiere un salto concettuale fondamentale: per la prima volta, il nostro Sistema Solare non è più l'unico termine di paragone, ma uno tra tanti. E il confronto con questa sorprendente varietà di altri sistemi planetari ci sta già insegnando moltissimo.

Abbiamo scoperto pianeti molto diversi dalla Terra, con caratteristiche inedite, e sistemi planetari con architetture che non somigliano affatto alla nostra. Tuttavia, tra questi mondi esotici, sono emersi anche molti pianeti piccoli e rocciosi, alcuni dei quali si trovano nella cosiddetta zona abitabile, dove le condizioni potrebbero consentire la presenza di acqua liquida. Oggi siamo in grado di stimare con maggiore precisione quanti di questi pianeti potenzialmente abitabili orbitino attorno a stelle simili al Sole o ad altre classi stellari.

Ma come abbiamo fatto a scoprirli? I metodi principali per individuare pianeti extrasolari sono due. Il primo metodo, che ha portato alla scoperta storica del primo esopianeta attorno a una stella simile al Sole, si basa sul movimento della stella attorno al centro di massa comune con il pianeta. Anche se il pianeta ha una massa molto inferiore, la stella subisce comunque una lieve oscillazione a causa della reciproca attrazione gravitazionale. Analizzando la sua luce, possiamo osservare lo spostamento periodico delle righe spettrali dovuto all'effetto Doppler, che ci consente di misurare la velocità della stella lungo la direzione di osservazione (detta anche velocità radiale). Questo movimento, invisibile a occhio nudo, tradisce la presenza di uno o più pianeti. Il metodo permette anche di stimare la massa minima del pianeta, poiché l'ampiezza dell'oscillazione dipende dalla sua massa e distanza orbitale.

Il secondo metodo si basa sul transito del pianeta davanti alla stella. Quando un pianeta passa esattamente tra la stella e l'osservatore, provoca un lieve calo di luminosità della stella, che può essere misurato con strumenti molto sensibili. L'effetto è minuscolo – per un pianeta come la Terra, l'oscuramento è inferiore all'1% – ma riconoscibile. Un'analogia spesso citata è quella dell'ombra di un insetto che attraversa il fascio di un faro a chilometri di distanza. Questo metodo richiede che l'orbita del pianeta sia ben allineata rispetto alla Terra, il che accade solo in una piccola percentuale dei sistemi osservabili. Per questo è necessario monitorare moltissime stelle, come ha fatto la missione *Kepler* della NASA, che ha permesso di scoprire migliaia di esopianeti, soprattutto piccoli e rocciosi, usando questa tecnica.

I pianeti terrestri sono difficili da rilevare con il metodo delle velocità radiali, perché la loro massa è troppo piccola per esercitare un'influenza significativa sulla stella. Il metodo del transito, invece, è sensibile alle dimensioni del

pianeta, non alla massa, e si è rivelato molto più efficace per individuarli. In questi anni, missioni come *TESS* (Transiting Exoplanet Survey Satellite) stanno continuando il lavoro di *Kepler*, ma con una strategia diversa: invece di puntare a un singolo campo di vista, *Tess* scandaglia l'intero cielo per cercare pianeti in orbita attorno a stelle vicine, più facili da studiare in dettaglio. Nel frattempo, a Terra si stanno costruendo spettrografi di nuova generazione, come *Espresso* sul *Very Large Telescope* (VLT) in Cile o il futuro *Andes* per l'*Extremely Large Telescope* (ELT), che puntano a misurare velocità radiali con una precisione mai raggiunta prima, sufficiente a rilevare pianeti simili alla Terra attorno a stelle simili al Sole.

L'evoluzione della ricerca ha portato a una crescita esponenziale nel numero di esopianeti scoperti. Le due tecniche principali, le velocità radiali e il metodo del transito, hanno arricchito il catalogo degli esopianeti noti, permettendoci di classificarli in base alle loro caratteristiche fisiche. Sulla base delle statistiche raccolte finora, possiamo stimare che nella nostra galassia esistano miliardi di pianeti potenzialmente abitabili: con dimensioni compatibili con quelle terrestri e temperature tali da non escludere la presenza di acqua liquida. Tuttavia, con gli strumenti attuali possiamo rilevare solo una piccola frazione di questi mondi, limitandoci a una regione di spazio relativamente vicina – circa un migliaio di anni luce attorno al Sole. Le missioni future, come *Plato* dell'Agenzia Spaziale Europea e il telescopio spaziale *Roman* della NASA, ci permetteranno di allargare ulteriormente questo orizzonte e migliorare le nostre stime sulla frequenza di pianeti abitabili nella galassia.

Al momento, le informazioni che abbiamo sugli esopianeti derivano quasi esclusivamente dai metodi del transito e delle velocità radiali. Queste tecniche ci permettono di determinare parametri fondamentali come la distanza del pianeta dalla stella, la sua massa e, in molti casi, il suo rag-

gio. Quando conosciamo sia massa che raggio, possiamo stimarne la densità e ipotizzare se si tratti di un pianeta roccioso oppure gassoso. Tuttavia, per la maggior parte dei casi, non conosciamo ancora le caratteristiche delle loro atmosfere, rendendo difficile valutare le condizioni climatiche reali.

Anche se i titoli dei giornali parlano spesso di "gemelli della Terra", è importante mantenere la cautela: le informazioni disponibili sono ancora limitate, e l'abitabilità rimane una questione aperta. Il passo successivo sarà proprio quello di analizzare direttamente la composizione atmosferica di questi mondi. In questa direzione si muovono sia osservatori terrestri all'avanguardia, come l'ELT in costruzione in Cile, sia strumenti spaziali come il telescopio *James Webb*, che ha già iniziato a studiare l'atmosfera di alcuni esopianeti, anche se non ancora di pianeti terrestri nella zona abitabile.

Un esempio interessante è Proxima b, un pianeta nella zona abitabile della stella più vicina al Sole, Proxima Centauri, distante solo quattro anni luce. Poiché Proxima Centauri è una nana rossa, la sua zona abitabile è molto vicina alla stella, e infatti Proxima b orbita a una distanza molto più ridotta rispetto a quella della Terra dal Sole. Ad ogni modo, non sappiamo ancora se abbia davvero acqua liquida in superficie o un'atmosfera compatibile con la vita.

Un altro sistema molto studiato è Trappist-1, che ospita sette pianeti rocciosi simili alla Terra, almeno tre dei quali si trovano nella zona abitabile. Anche in questo caso la stella centrale è una nana rossa, e l'intero sistema è estremamente compatto: tutti i pianeti orbitano a distanze inferiori a quella di Mercurio dal Sole. Il sistema assomiglia più a un insieme di lune attorno a un pianeta gigante che a un sistema planetario come il nostro.

Proxima b e il sistema planetario di Trappist-1 sono probabilmente i due casi più discussi degli ultimi anni, non perché abbiamo già accertato la presenza di vita, ma perché

sono relativamente vicini: Trappist-1 dista circa 40 anni luce, mentre Proxima b è a soli 4 anni luce. Una tale vicinanza, in termini astronomici, ci offre l'opportunità concreta di studiarli con sempre maggiore dettaglio nei prossimi anni. Anche solo confermare l'esistenza di un'atmosfera stabile oppure ottenere le prime misure della sua composizione rappresenterebbe un passo decisivo nella ricerca di mondi abitabili.

9. La ricerca di firme biologiche

Arriviamo quindi alla domanda cruciale: cosa faremo con tutti i dati che stiamo raccogliendo e che raccoglieremo in futuro dai mondi che stiamo scoprendo? L'obiettivo finale è chiaro: capire se qualcuno di questi pianeti ospiti forme di vita – e, nel caso, imparare a riconoscerle.

Se guardiamo ai pianeti del Sistema solare – Terra, Venere e Marte – vediamo che le loro atmosfere sono molto diverse tra loro. Questo perché la Terra ospita la vita, ha acqua liquida e un sistema climatico complesso e dinamico. La grande domanda è: riusciremo a trovare un altro pianeta con caratteristiche simili? La risposta, per ora, è ancora un mistero, ma la strada per scoprirlo è appena iniziata.

Un esempio illuminante risale agli anni Novanta, quando un articolo pubblicato su «Nature» descriveva un esperimento condotto con la sonda *Galileo*, progettata per esplorare il Sistema Solare. Durante uno dei suoi sorvoli ravvicinati della Terra, la sonda venne utilizzata per osservare il nostro pianeta dall'orbita, con lo scopo di testare se i suoi strumenti sarebbero stati in grado di rilevare la presenza di vita a distanza. Il titolo dell'articolo era significativo: *A Search for Life on Earth from the Galileo Spacecraft*. Probabilmente lo studio meno sorprendente della storia della scienza – eppure pubblicato su «Nature». Il punto non era,

ovviamente, scoprire se c'è vita sulla Terra, ma verificare se un'eventuale sonda aliena, passando vicino al nostro pianeta, potrebbe accorgersene.

Il risultato fu positivo: sì, la vita sulla Terra è rilevabile dallo spazio. Questo ci conduce a un concetto fondamentale nella ricerca di vita extraterrestre: alcuni elementi chimici presenti nell'atmosfera possono fungere da tracce di attività biologica. L'ossigeno, ad esempio, è un gas estremamente reattivo, che tende a legarsi con altri elementi. Se lo troviamo in alte concentrazioni in un'atmosfera, è probabile che ci sia una sorgente che lo rinnova costantemente – e, sulla Terra, quella sorgente è la fotosintesi. Tuttavia, per evitare falsi positivi dovuti a processi geologici, è importante cercare combinazioni specifiche: ad esempio, la presenza simultanea di ossigeno e metano. Entrambi possono derivare da attività biologica, e la loro coesistenza stabile nel tempo è difficilmente spiegabile senza una continua produzione da parte di organismi viventi.

È in questa direzione che si muoveranno le prossime missioni e osservazioni: cercare firme atmosferiche di possibile attività biologica su pianeti extrasolari. Non sapremo subito se ci sono forme di vita là fuori, ma inizieremo a leggere, per la prima volta, i segnali chimici di mondi lontani – e a chiederci se, da qualche parte, ci sia davvero qualcuno che respira.

Ma come possiamo rilevare questi gas nelle atmosfere di pianeti così lontani? La risposta sta, ancora una volta, nella spettroscopia. Quando un esopianeta transita davanti alla sua stella, una parte della luce stellare filtra attraverso la sua atmosfera e viene assorbita o diffusa dalle molecole che la compongono, prima di arrivare ai nostri telescopi. Analizzando lo spettro di questa luce, possiamo identificare le “impronte chimiche” dei gas presenti nell’atmosfera del pianeta. Sulla carta sembra semplice, ma nella realtà è una sfida enorme, che richiede strumenti di altissima

precisione e che solo ora iniziamo a padroneggiare, soprattutto per pianeti simili alla Terra, che hanno un'atmosfera molto sottile – come la buccia di una mela rispetto al frutto stesso.

Tuttavia, queste tecniche sono state già applicate con successo ai giganti gassosi, e a pianeti con un'atmosfera più densa di quella terrestre. Un caso recente che ha attirato l'attenzione è quello di K2-18b, un pianeta circa otto volte più grande della Terra, situato nella zona abitabile di una nana rossa a circa 120 anni luce da noi. Non si tratta di un pianeta roccioso, ma di un mondo probabilmente circondato da un'atmosfera ricca di idrogeno e forse con un oceano liquido sotto di essa. Le osservazioni del telescopio spaziale James Webb hanno rilevato la possibile presenza di molecole come il metano e l'anidride carbonica, e perfino tracce di dimetilsolfuro (DMS), una molecola che sulla Terra è associata ad attività biologica. È ancora troppo presto per trarre conclusioni, ma casi come questo mostrano quanto ci stiamo avvicinando alla possibilità di indagare davvero le condizioni fisiche e chimiche di mondi lontani.

Un'altra curiosità riguarda il motivo per cui la maggior parte degli esopianeti scoperti orbita attorno a nane rosse e non a stelle simili al Sole. Le nane rosse sono più piccole e meno luminose, rendendo più evidente l'abbassamento di luce causato dal transito di un pianeta. Inoltre, la loro zona abitabile si trova molto più vicino alla stella rispetto a quella di un astro di tipo solare, per cui un pianeta in quella zona completa un'orbita in tempi molto brevi e transita più frequentemente, facilitandone la rilevazione.

Al contrario, se vogliamo trovare un pianeta simile alla Terra attorno a una stella come il Sole, dobbiamo attendere anni perché il pianeta completi più orbite, e servono quindi osservazioni di lunga durata. Kepler, ad esempio, ha funzionato per circa quattro anni e ha individuato candidati interessanti come Kepler-452b, spesso definito “gemello

della Terra". In realtà, l'unico vero elemento in comune con il nostro pianeta è la sua posizione nella zona abitabile di una stella simile al Sole, e una dimensione analoga.

Insomma, trovare pianeti potenzialmente abitabili rimane una sfida complessa, ma la tecnologia e le missioni spaziali stanno rapidamente evolvendo per affrontarla. Diverse missioni future sono progettate proprio per studiare con precisione le atmosfere degli esopianeti, andando oltre la semplice rilevazione e misurazione di massa e raggio, per cercare firme spettrali che possano indicare la presenza di vita o condizioni favorevoli ad essa.

Tra queste, il già citato telescopio spaziale James Webb, operativo dal 2022, rappresenta una svolta fondamentale grazie alla sua capacità di analizzare la composizione atmosferica di pianeti lontani, in particolare quelli che orbitano attorno a stelle nane rosse. Questo strumento può rilevare molecole come acqua, metano, anidride carbonica e ossigeno, elementi chiave per identificare potenziali biosignature.

Altre missioni future includono il progetto ARIEL (Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey), dell'Agenzia Spaziale Europea, dedicato proprio allo studio sistematico delle atmosfere di centinaia di esopianeti. ARIEL analizzerà l'energia emessa e riflessa dai pianeti per capire composizione, temperature e possibili processi chimici in atto. In parallelo, nuovi telescopi terrestri di ultima generazione, come il già menzionato ELT, in costruzione in Cile, offriranno capacità di spettroscopia ad altissima risoluzione, aumentando la sensibilità nella ricerca di tracce di vita anche su pianeti più piccoli e più lontani.

Questi strumenti, uniti a metodi sempre più sofisticati di modellazione atmosferica e climatica, ci avvicinano all'obiettivo di capire non solo se un pianeta sia abitabile, ma se effettivamente ospiti condizioni che permettano alla vita di emergere o persistere. In questo senso, il prossimo decennio

promette di essere un'epoca d'oro per l'astrobiologia e lo studio degli esopianeti.

È bene però tenere a mente che non scopriremo la vita su un altro pianeta dall'oggi al domani. Non ci sveglieremo una mattina e leggeremo su un giornale che non siamo soli nell'universo. La scienza non funziona così. Se ad esempio dovessimo trovare un'iniziale evidenza di ossigeno libero nell'atmosfera di un esopianeta (cosa che, come abbiamo visto, sarebbe un potenziale indizio di attività biologica), saranno comunque necessarie osservazioni ripetute con strumenti diversi, e ci saranno dibattiti e controversie. Alcuni diranno: «Non abbiamo davvero visto ossigeno, era qualcos'altro». Anche se la scoperta fosse confermata, potremmo non essere sicuri che l'ossigeno sia davvero di origine biologica.

Pensiamo a Marte, che è letteralmente dietro l'angolo rispetto agli esopianeti: da anni rileviamo metano nella sua atmosfera, con variazioni stagionali, e ancora oggi non sappiamo se sia di origine geologica o biologica. Future indagini dovranno cercare di rispondere a questa domanda. Se non riusciamo a capirlo per Marte, possiamo immaginare quanto sia complicato farlo per un pianeta attorno a un'altra stella.

Insomma, bisogna sempre mantenere una sana dose di cautela e scetticismo. In passato si credeva di vedere canali su Marte e perfino vegetazione. La scienza procede lentamente, con attenzione e rigore. È sempre bene difidare di chi fa affermazioni troppo entusiastiche senza solide prove.

10. Vita intelligente extraterrestre

Un discorso analogo riguarda un ambito che merita almeno una breve menzione, se non altro per l'interesse che con-

tinua a suscitare: la ricerca di vita intelligente attraverso segnali elettromagnetici, captati a distanza. È un settore che, dopo anni di relativa stasi, sta lentamente riprendendo slancio. Negli ultimi tempi, parte della ricerca astrobiologica si è concentrata sulla possibilità di individuare, tra i dati sempre più numerosi sugli esopianeti, non solo indizi di attività biologica, ma anche segni di tecnologia. Per analogia con le cosiddette biofirme, si parla in questo caso di tecnofirme (*technosignatures*), cioè di tracce osservabili a distanza che potrebbero indicare la presenza di una civiltà tecnologicamente avanzata su un altro pianeta.

Ora, anche in questo caso vale lo stesso discorso: non pensiamo che sia facile capire subito se abbiamo davvero captato qualcosa. Non è così semplice. Si potrebbero ipotizzare tre scenari di contatto con intelligenze extraterrestri, prendendo spunto da quello che ha immaginato la fantascienza.

Il primo scenario è quello della fantascienza classica, come nel film *Ultimatum alla Terra*. È il contatto più diretto: arriva un'astronave e, a differenza di quello che succede di solito – quando si parla di Ufo, presunti avvistamenti e simili – in questo caso gli alieni scendono davvero sulla Terra. Cioè atterrano, escono dall'astronave e dicono: «Portatemi dal vostro capo, voglio parlare». Questo sarebbe probabilmente l'unico caso in cui saremmo sicuri al cento per cento di avere avuto un contatto. È inequivocabile, ed avrebbe sicuramente un impatto sulla società. Però è anche estremamente improbabile. Una cosa del genere probabilmente non succederà mai, se non nella fantascienza.

Un secondo scenario, leggermente più realistico, è quello immaginato da Carl Sagan nel romanzo *Contact*, da cui è stato tratto anche un film diretto da Robert Zemeckis. In questo caso, l'umanità riceve un segnale proveniente dallo spazio e ne riconosce chiaramente l'origine artificiale: si tratta di una trasmissione intenzionale, non confondibile

con un fenomeno naturale. Il messaggio, inoltre, contiene un contenuto informativo, che va interpretato e decodificato.

A questo proposito, capita talvolta di sentir citare i cosiddetti *fast radio bursts* (FRB): brevi impulsi di onde radio, della durata di pochi millisecondi, che provengono da direzioni diverse del cielo e che, per ora, non hanno una spiegazione definitiva. La comunità scientifica tende tuttavia ad attribuirli a fenomeni astrofisici di origine naturale, come magnetar o collisioni tra oggetti compatti, e non a segnali inviati intenzionalmente da civiltà aliene. Ciononostante, capita che notizie su questi eventi vengano rilanciate con titoli sensazionalistici del tipo: «Potrebbero essere gli alieni?». Si tratta di speculazioni infondate. Un segnale realmente artificiale dovrebbe mostrare caratteristiche molto diverse, come una struttura complessa e un contenuto informativo decodificabile.

In *Contact*, il messaggio trasmesso contiene effettivamente istruzioni dettagliate, e la sua decodifica ha profonde conseguenze culturali e sociali. È uno scenario più credibile rispetto a quello dell'astronave che atterra sulla Terra, ma implica comunque una serie di ipotesi ottimistiche: sia sulla possibilità concreta di ricevere un messaggio da un'altra civiltà, sia sulla nostra capacità di riconoscerlo come tale e interpretarlo correttamente.

Un terzo scenario, molto meno discusso, è stato immaginato dallo scrittore polacco Stanisław Lem, celebre per il romanzo *Solaris*, in un altro suo libro meno noto ma estremamente denso: *La voce del padrone*. Il romanzo esplora un'ipotesi affascinante e inquietante allo stesso tempo: l'arrivo di un messaggio dallo spazio che sembra, ma non è certo, di origine artificiale. Il segnale presenta caratteristiche compatibili con una produzione intenzionale, ma potrebbe anche essere frutto di un processo naturale sconosciuto.

Nel racconto, viene costituito un gruppo di ricerca composto da alcuni dei massimi esperti scientifici – matematici,

fisici, linguisti – con l’obiettivo di interpretare il messaggio. Nonostante l’impegno e l’intelligenza collettiva, il tentativo fallisce: non si riesce a stabilire con certezza se si tratti davvero di una comunicazione, né tanto meno a comprenderne il contenuto.

Il romanzo si trasforma così in una riflessione profonda sulla natura stessa del linguaggio, della comunicazione e dell’intelligenza. Lem sottolinea come il linguaggio sia modellato dall’evoluzione biologica e culturale di chi lo utilizza. Se risulta già estremamente difficile decifrare i sistemi comunicativi di specie evolutivamente vicine alla nostra, come delfini o primati, quanto più arduo sarebbe comprendere un eventuale messaggio proveniente da una civiltà aliena, il cui percorso evolutivo potrebbe essere del tutto incomparabile con il nostro?

Per quanto improbabile, questo scenario appare tra i più realistici: presuppone che un messaggio venga effettivamente ricevuto, ma che il vero limite sia la nostra capacità di attribuirgli un significato. In fondo, il problema non sarebbe solo ricevere un messaggio – ma anche capire che lo è.

Un precedente istruttivo è quello dei geroglifici egizi: per secoli sono rimasti indecifrabili. Solo grazie alla Stele di Rosetta, un testo bilingue, è stato possibile comprenderli. Pensare che un messaggio ben concepito sia automaticamente comprensibile da qualunque essere intelligente è un’illusione.

In molti congressi sul tema della vita intelligente extraterrestre, partecipano studiosi che si occupano di comunicazione animale. Le loro ricerche mostrano quanto sia complesso comprendere davvero una forma di comunicazione non umana, anche quando si tratta di specie con cui condividiamo l’ambiente e parte dell’evoluzione. I delfini, ad esempio, emettono suoni strutturati che gli esperti analizzano con tecniche sofisticate, ma resta incerto se quei segnali trasmettano un contenuto informativo paragonabile

al linguaggio. Lo stesso vale per casi celebri come quello di Alex, il pappagallo grigio africano: le sue interazioni sembrano comunicative, ma non è chiaro quanto siano autentiche e quanto frutto di schemi appresi.

E questo accade con esseri viventi del nostro pianeta. Quanto più arduo sarebbe, allora, interpretare un segnale proveniente da una forma di vita evolutasi in un ambiente completamente alieno, con percezioni, biologia e strutture mentali forse inconciliabili con le nostre? È il nodo centrale del film *Arrival*, che ha avuto il merito di riportare l'attenzione su questo aspetto cruciale.

Lo stesso vale nella direzione opposta, nei pochi tentativi che abbiamo fatto per comunicare la nostra esistenza verso l'esterno. Il più celebre è il messaggio di Arecibo, trasmesso nel 1974: un gesto più simbolico che realmente comunicativo. Il messaggio era costruito secondo codifiche che noi troviamo intuitive – ma che sono intuitive solo per noi. In alcuni esperimenti, anche dottorandi in discipline scientifiche non sono riusciti a interpretarlo correttamente. Eppure erano esseri umani, con il nostro stesso patrimonio culturale e biologico. Se davvero una civiltà aliena lo ricevesse, potrebbe trovarsi costretta a mobilitare risorse immense – una sorta di Progetto Manhattan per la decifrazione – senza alcuna certezza di successo.

Ma anche ammesso che si riceva un segnale – ammesso persino che si riesca a dimostrare la sua origine artificiale – resta una domanda fondamentale: che impatto avrebbe una scoperta del genere? Quali sarebbero le conseguenze?

È difficile dirlo con certezza. Si tende a pensare che una conferma dell'esistenza di un'intelligenza extraterrestre provocherebbe uno sconvolgimento radicale nelle nostre società, ma la realtà potrebbe essere molto diversa. In effetti, chi lavora nel campo della ricerca di segnali extraterrestri, come il programma SETI (Search for Extraterrestrial

Intelligence), ha preso in considerazione da tempo anche l'aspetto comunicativo. Esiste un organismo, il *Permanent Committee* del SETI, che ha sviluppato linee guida e protocolli per affrontare l'eventualità di un messaggio rilevato: un processo che prevede verifiche incrociate, comunicazioni ufficiali e un coinvolgimento progressivo delle istituzioni scientifiche e politiche.

Una delle preoccupazioni principali è come informare l'opinione pubblica. Tradizionalmente, si teme una reazione di panico. Ma è possibile che la vera difficoltà stia altrove: convincere la popolazione che *non* siamo riusciti a interpretare il messaggio ricevuto, o che potrebbe non essere affatto un messaggio, ma qualcosa di ambiguo, incomprensibile, forse naturale. In un certo senso, l'annuncio di un contatto chiaro e comprensibile sarebbe più facile da gestire rispetto all'ammissione di un'ignoranza profonda.

Questo perché, culturalmente, esiste una forte predisposizione ad accettare l'idea che non siamo soli nell'universo. È una convinzione diffusa, radicata, quasi un'intuizione collettiva. Molti – anche tra persone razionali – partono già da questo presupposto. Ed è proprio questo che rende più complicato far accettare l'incertezza, il dubbio, o la possibilità che il “segnale” non abbia nulla a che fare con una civiltà aliena.

4. Conclusione: uscire dalla nostra prospettiva

In definitiva, ciò che conta davvero è lo sforzo di comprendere come stanno le cose, senza cedere alle scorciatoie dell'intuizione o del senso comune. È essenziale riconoscere il limite prospettico in cui ci troviamo: disponiamo di un solo esempio di pianeta abitato, il nostro, e da questo tendiamo a generalizzare. Ma un approccio scientifico richiede di andare oltre: di fondare le nostre ipotesi su osservazioni, dati, verifiche – e non solo su speculazioni o desideri.

La scienza contemporanea esplora sempre più ambiti lontani dall'esperienza quotidiana: l'evoluzione dell'universo su scale temporali di miliardi di anni, l'organizzazione della materia subatomica, la complessità dei sistemi biologici microscopici. È un movimento costante di allontanamento dall'antropocentrismo, e in molti casi questo processo ha prodotto risultati straordinari. Ma è importante che tale distacco sia autentico, e non solo apparente.

Anche nelle ipotesi più audaci, spesso sopravvive un residuo di antropocentrismo. Per esempio, l'idea che qualunque intelligenza debba essere, in fondo, simile alla nostra. Che debba pensare come noi, comunicare come noi, costruire messaggi che seguano le nostre stesse logiche. Questo pregiudizio è particolarmente evidente nel campo della

ricerca di intelligenze extraterrestri, dove la verità è che non sappiamo nemmeno con esattezza cosa stiamo cercando.

Proprio la difficoltà del compito rende però affascinante il tentativo. Perché ci costringe a confrontarci con i nostri limiti, a riflettere su ciò che possiamo realmente conoscere. E a distinguere, con lucidità, tra ciò che è improbabile e ciò che è impossibile.

La mente umana è portata a trovare senso anche nel caso. Ma confondere l'improbabile con l'impossibile è un errore logico frequente. Vedere una targa con una combinazione precisa di lettere e numeri è estremamente improbabile, ma accade regolarmente. Il fatto che qualcosa accada non implica che fosse probabile *prima*. Le probabilità non vanno valutate *a posteriori*.

Su questi temi, rischiamo a volte di regredire rispetto alla lezione di Galileo: invece di basarci sull'osservazione oggettiva, proiettiamo aspettative e desideri su ciò che vediamo. Alcuni fenomeni – presunti avvistamenti, racconti aneddotici, episodi non verificati – vengono presi per prove. Ma finché non superano il vaglio del metodo scientifico, restano racconti, non evidenze.

Ed è qui che la scienza mostra il suo valore più profondo: ci obbliga a uscire dalle nostre gabbie mentali, dai pregiudizi, dalle proiezioni. Ci invita a guardare le cose per ciò che sono, non per come vorremmo che fossero.

L'ipotesi che la vita possa esistere oltre la Terra non è più soltanto materia di speculazione filosofica o narrativa fantascientifica: è divenuta oggetto di un'indagine scientifica sistematica, fondata su osservazioni e modelli sempre più raffinati, che integra astronomia, chimica, biologia e riflessione epistemologica. Questo saggio ripercorre le principali linee di ricerca contemporanee: dallo studio di ambienti potenzialmente abitabili all'interno del Sistema solare, come Marte e le lune ghiacciate dei pianeti esterni, fino alla scoperta di migliaia di pianeti extrasolari, alcuni dei quali situati in zone in cui l'acqua liquida potrebbe esistere in superficie. Viene affrontata la questione della vita non solo nelle sue forme biologiche più semplici, ma anche nelle sue eventuali manifestazioni intelligenti e tecnologiche, mettendo in luce i limiti conoscitivi e comunicativi di una simile indagine.

L'intento è mostrare come il tentativo di rispondere alla domanda "siamo soli nell'universo?" metta alla prova non soltanto i nostri strumenti scientifici, ma anche le nostre categorie mentali, spesso ancora condizionate da una prospettiva antropocentrica. Il tema della vita nel cosmo si rivela così un'occasione privilegiata per interrogarsi sui confini della conoscenza, sul ruolo dell'immaginazione scientifica e sulla necessità di un cambiamento di sguardo nell'interpretazione del reale.

Amedeo Balbi è professore associato di Astronomia e Astrofisica presso il Dipartimento di Fisica dell'Università degli Studi di Roma Tor Vergata, dove insegna Astrobiologia e Storia dell'Astronomia. Autore di oltre cento pubblicazioni scientifiche e del libro di testo universitario *From Stars to Life: A Quantitative Approach to Astrobiology* (Cambridge, 2025), ha dato contributi rilevanti in diversi ambiti dell'astrofisica teorica, tra cui la fisica dell'universo primordiale, lo studio della materia e dell'energia oscura, e la ricerca di vita nel cosmo. Accanto all'attività accademica, è impegnato nella divulgazione scientifica. I suoi libri, destinati al grande pubblico, hanno ottenuto ampio successo. Cura da anni una rubrica per il mensile «Le Scienze», ha collaborato con varie testate giornalistiche e con programmi radiofonici e televisivi. Il suo lavoro di comunicazione della scienza gli è valso numerosi riconoscimenti, tra cui il Premio Nazionale di Divulgazione Scientifica (2015), il Premio Asimov (2021), il Premio Galileo (2023) e il Premio Lacchini (2024).