

GIOVANNI COVONE

LO STATO DELL'ARTE NELLA RICERCA DEI PIANETI EXTRASOLARI

DI TIPO TERRESTRE

1. Introduzione
2. Le prime scoperte
3. I metodi di ricerca
4. Dalla scoperta alla caratterizzazione
5. Conclusioni: dall'astrofisica alla biologia

ABSTRACT: STATE OF THE ART IN THE SEARCH FOR EXTRASOLAR PLANETS

In the last three decades, the study of exoplanets has evolved from a marginal field into a vital area of research with significant implications for other sciences and philosophy. In this article, we review the recent discoveries in the study of Earth-like planets and the prospects of searching for life through astronomical means

1. Introduzione

Secondo il NASA Exoplanet Archive¹, al momento della chiusura di questo numero di S&F sono stati scoperti e confermati

5566 pianeti extrasolari e più di altri settemila candidati attendono di essere validati. Le osservazioni astronomiche stanno rivelando una popolazione di mondi varia e inattesa e sembrano contenere la promessa di trovare mondi abitabili. Siamo la prima generazione nella specie umana che ha la possibilità di affrontare in modo empirico un dilemma antico quanto la speculazione filosofica: siamo soli nell'Universo?



¹ Pagina web: <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/> (ultimo accesso: 3-12-2023).

La nostra conoscenza della popolazione dei pianeti extrasolari è ben lungi dall'essere completa. Il NASA Exoplanet Archive elenca undici metodi diversi usati finora per cercare pianeti extrasolari. Ognuno di essi adopera tecnologie diverse ed è caratterizzato da limiti e sensibilità diverse, ma neppure l'insieme di tali tecniche ci fornisce una visione completa sul panorama (largamente inesplorato) dei pianeti extrasolari. Nonostante la grande espansione della nostra conoscenza, la nostra visione dei sistemi planetari e la conoscenza della loro formazione ed evoluzione è ancora incerta.

In figura sono rappresentati i pianeti conosciuti in funzione del raggio e periodo orbitale. Regioni meno popolate del digramma corrispondono probabilmente a deficit della nostra indagine. È interessante notare che al momento sono pochi i mondi simili a quelli nel nostro Sistema Solare. In particolare, non siamo ancora in grado di rivelare pianeti simili alla Terra in termini di raggio e distanza dalla stella madre.

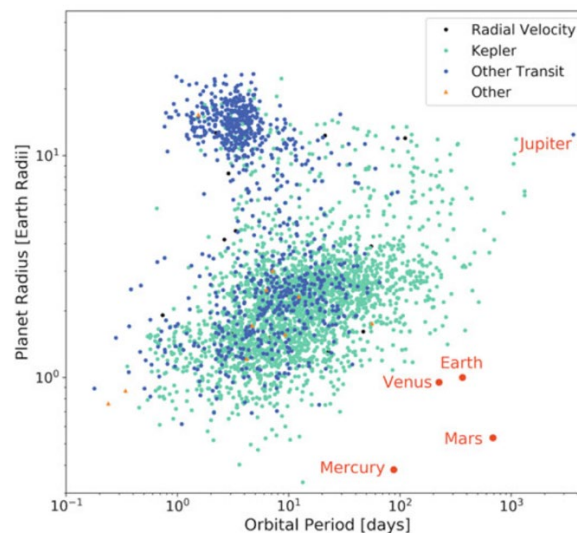


Figura 1. La distribuzione dei pianeti confermati in funzione del raggio e del periodo. Il colore indica il metodo di rivelazione. Fonte: B.S. Gaudi et al., *The Demographics of Exoplanets*, in «arxiv», 2011.04703, 2020.

In totale, qualche centinaio di pianeti ha un raggio inferiore a due raggi terrestri: si tratta quindi potenzialmente di pianeti

dalla struttura rocciosa. Lo studio dei pianeti di tipo terrestre riveste un'importanza fondamentale in astrobiologia. Sappiamo ben poco della vita come fenomeno naturale e non è da escludere che pianeti molto diversi dalla Terra possano avere le condizioni giuste per la vita. Conosciamo una sola istanza del "fenomeno vita" ed è arduo per noi comprenderne le leggi universali nel contesto cosmico a partire da questa limitata esperienza diretta. È arduo discriminare fra caso e necessità. Per questo motivo, la ricerca di tracce di vita al di là del Sistema Solare si basa in primo luogo sulla ricerca e lo studio di pianeti extrasolari di tipo terrestre. In questo breve articolo passeremo in rassegna lo stato dell'arte delle conoscenze sui pianeti extrasolari simili alla Terra e le prospettive sulla ricerca di tracce di vita per via astronomica, oltre i confini del Sistema Solare. Per comprendere meglio lo stato attuale e le prospettive future è utile ripercorrere le scoperte dei primi mondi extrasolari, sistemi non previsti dai modelli teorici di formazione dei sistemi planetari, scoperte avvenute dopo una lunga storia costellata di errori, previsioni teoriche smentite e falsi allarmi².

2. Le prime scoperte

La scienza degli esopianeti è una scienza giovane, nata nei primi anni Novanta. Nel luglio del 1991 la prestigiosa rivista *Nature* riportava sulla copertina l'annuncio della scoperta del primo pianeta intorno a un'altra stella³. La notizia era clamorosa perché si sarebbe trattato della prima prova empirica dell'esistenza di altri pianeti intorno ad altre stelle, oltre due millenni dopo le speculazioni dei primi filosofi pluralisti e circa quattrocento

² Per dettagli sulla storia della ricerca dei pianeti extrasolari, cfr. K. Croswell, *Planet Quest: The epic discovery of alien solar systems*, Free MacMillan Press, Londra 1997; G. Covone, *Altre Terre. Viaggio alla scoperta dei pianeti extrasolari*, HarperCollins, Milano 2023.

³ M. Bailes, A.G. Lyne, S.L. Shemar, *A planet orbiting the neutron star PSR1829-10*, in «Nature», 352, 1991, pp. 311-313, qui p. 311.

anni dopo la pubblicazione del *De l'Infinito Universo e Mondi* di Giordano Bruno. Con grande sorpresa, il primo esopianeta non orbitava attorno a una stella di tipo solare, ma a una *pulsar*, la densa stella di neutroni che rimane dopo l'esplosione di una supernova. Stelle della massa di almeno dieci Soli terminano la loro breve esistenza con un'esplosione che supera in energia l'intera Galassia, e a cui segue un rapido collasso, lasciando un nucleo di *materia degenerata*⁴, con poche decine di chilometri di raggio e dotato di un potente campo magnetico. Nessun modello teorico aveva previsto la possibilità di pianeti sopravvissuti a un evento di supernova.

Pochi mesi dopo, arrivò la smentita: si era trattato di un falso allarme, l'ennesimo nella lunga storia nella ricerca degli "infiniti mondi". Dalla metà dell'Ottocento, la ricerca astronomica di pianeti extrasolari era stata segnata da una serie ininterrotta di annunci clamorosi poi smentiti, di segnali strumentali fraintesi come mondi lontani reali. Il caso dello strano pianeta intorno a una pulsar non sembrava un'eccezione. Ma un colpo di scena arrivò alla fine dello stesso anno: i radioastronomi Alex Wolszczan e Dale Frail avevano trovato due piccoli pianeti intorno a un'altra pulsar⁵. Questa volta le verifiche non lasciavano dubbi. La scoperta fu confermata, ma a oggi la natura fisica di tali corpi celesti è misteriosa.

Tre anni dopo, il gruppo di Michel Mayor, astronomo dell'Osservatorio di Ginevra, il cui obiettivo principale era non la ricerca dei pianeti, ma lo studio di stelle di piccola massa, annunciò di aver osservato la traccia di un pianeta di grande massa intorno a una stella simile al Sole. Ancora una volta, il nuovo

⁴ In astrofisica, *materia degenerata* è il termine che descrive uno stato fisico della materia non sperimentato nei nostri laboratori, in cui la forte pressione esercitata dal campo gravitazionale schiaccia i nuclei atomici fra loro portando a contatto le particelle subatomiche. Elettroni e protoni si fondono, trasformandosi in neutroni.

⁵ A. Wolszczan, D.A. Frail, *A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12*, in «Nature», 355, 1992, pp. 145-147.

sistema fu una sorpresa. Il nuovo pianeta aveva la massa di Giove ma era posto su un'orbita molto stretta intorno alla sua stella, 51 Pegasi, impiegando solo quattro giorni e mezzo per completare un'intera rivoluzione. Nel nostro sistema solare, Mercurio, il pianeta più vicino al Sole, impiega circa 88 giorni per completare un'intera orbita. Anche questa volta era stato scoperto un corpo celeste non previsto dai modelli teorici. Secondo i modelli teorici della genesi dei sistemi solari, i pianeti giganti, composti principalmente di gas, si formano nelle regioni lontane del disco protoplanetario, oltre la cosiddetta "linea della neve"⁶, dove grandi quantità di gas e ghiaccio vengono catturati dal nucleo roccioso dei protopianeti.

Ci sono alcuni elementi interessanti in questa breve ricostruzione storica dell'inizio della scienza degli esopianeti. Prima di tutto, nessuno dei gruppi qui citati aveva la ricerca dei pianeti extrasolari come obiettivo principale dei propri programmi di osservazione. I gruppi di Lyne e Wolzscan erano interessati allo studio della fisica delle pulsar, il gruppo di Mayor aveva come obiettivo le stelle nane brune, corpi celesti di piccola massa previsti dalla teoria ma fino ad allora non osservati. Ma tutti erano pronti a riconoscere fenomeni inaspettati nei loro dati, gli eventuali doni della Natura.

Un altro elemento importante è la sorprendente complessità e diversità dei pianeti extrasolari. Il sistema planetario delle pulsar fu accolto da gran parte della comunità astronomica solo come un curioso fenomeno anomalo, non come il segno che la concezione di pianeta andasse rivista. Gli esopianeti intorno alla pulsar furono invece solo la prima di una lunga serie di sorprese

⁶ La linea della neve identifica la particolare distanza dalla giovane stella centrale all'interno di una nebulosa protoplanetaria in cui la temperatura è sufficientemente bassa da permettere all'acqua di raggiungere lo stato solido. A seconda della densità, la temperatura si attesta su valori prossimi a 150 gradi Kelvin. La sua posizione in un determinato sistema planetario è funzione della luminosità della stella.

e un'ulteriore prova che la Natura è molto più complessa di quanto le nostre teorie possano prevedere.

Nel 2019, proprio Michel Mayor e il suo collaboratore Didier Queloz hanno ricevuto il Premio Nobel per la scoperta del «primo pianeta intorno ad una stella simile al Sole», come recita il testo ufficiale dell'assegnazione del premio. Il comitato per il premio Nobel decise di assegnare il premio a coloro che scoprirono un pianeta extrasolare attorno a una stella "normale", trascurando la lezione che era venuta dalla scoperta dei pianeti intorno alle stelle di neutroni. Forse sarebbe stato più appropriato riconoscere la stranezza del cosmo premiando anche Wolszczan e Frail.

Con il senno di poi, non è sorprendente che i modelli teorici sviluppati dalle osservazioni del Sistema Solare (l'unico sistema planetario noto) avessero un successo predittivo molto limitato. Il nostro sistema solare, con le sue orbite planetarie sullo stesso piano, ben distanziate, stabili e poco lontane dalla forma circolare, è stato per molti decenni il solo banco di prova dei modelli teorici di formazione ed evoluzione planetaria. Allo stesso modo, dovremo essere consapevoli che quanto conosciamo della vita sulla Terra è una guida necessaria, tuttavia incompleta per la ricerca della vita nel Cosmo.

Se dovessimo cercare un ambiente cosmico adatto alla vita così come la conosciamo, dovremmo concentrarci su pianeti di tipo roccioso, dotati di atmosfere ricche di ossigeno molecolare, con dimensioni comprese fra circa 0.5 e 2 raggi terrestri. Pianeti più piccoli potrebbero non avere un campo gravitazionale sufficiente per trattenere l'atmosfera, mentre pianeti più massivi potrebbero diventare giganti gassosi come Nettuno, con una densa atmosfera di idrogeno. Se cerchiamo un pianeta con acqua superficiale allo stato liquido, dovremmo considerare pianeti in un ristretto intervallo di

distanze dalla propria stella madre, una regione circumstellare nota come “zona abitabile”⁷.

Inoltre, bisognerebbe porre attenzione anche alle caratteristiche della stella centrale. Stelle di massa superiore al Sole vivono meno di pochi miliardi di anni⁸, forse un tempo troppo breve per permettere all’evoluzione di giungere a forme di vita pluricellulare, se il caso terrestre è una situazione tipica. Stelle di massa minore come le nane rosse sono longeve ma instabili, con frequenti eruzioni di radiazione X ed UV in grado di strappare le atmosfere dai pianeti vicini e sterilizzarne la superficie. La ricerca di ambienti simili alla Terra sembra quindi limitata a stelle di classe spettrale K e G⁹.

3. I metodi di ricerca

La ricerca dei pianeti extrasolari simili alla Terra costituisce tuttora una sfida complessa dal punto di vista tecnologico. Tutti i pianeti analoghi alla Terra sono stati rivelati in modo indiretto, attraverso le perturbazioni indotte dalla loro presenza sul moto o sulla luce della stella madre. Al momento non siamo in grado di ottenere immagini dirette (nel visibile o nell’infrarosso) di tali pianeti intorno a stelle vicine. I pianeti (in particolare quelli di dimensioni minori) sono sorgenti luminose molto deboli¹⁰ e troppo vicini alle proprie stelle per poter essere visti direttamente con gli attuali telescopi, tranne rare eccezioni. Le eccezioni sono costituite da pianeti giganti, su orbite a grande distanza dalla

⁷ Nel seguito preferiremo il termine “zona circumstellare temperata”, termine meno ambiguo e più corretto di “zona abitabile”.

⁸ Stelle del tipo spettrale F ed A hanno temperature superficiali medie di xxx e durate di circa... Il Sole appartiene alla classe spettrale G ed ha una temperatura superficiale di circa 5800 gradi Kelvin.

⁹ Cfr. anche G. Covone *et al.*, *Efficiency of the oxygenic photosynthesis on Earth-like planets in the habitable zone*, in «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society», 505, 3, 2021, pp. 3329-3335, qui p. 3329.

¹⁰ La maggior parte dei pianeti non emettono radiazione elettromagnetica, ma semplicemente riflettono quella della propria stella madre. Generalmente, i pianeti sono da milioni a miliardi di volte meno luminosi delle loro stelle madri.

stella madre e nelle prime fasi della loro evoluzione, quando l'elevata temperatura dell'atmosfera li rende sorgenti molto luminose nell'infrarosso, riducendo in parte il contrasto tra stella e pianeta.

Al momento, le tecniche di maggior successo sono basate sulla misura delle velocità radiali e dei transiti fotometrici. Un pianeta non orbita esattamente intorno al centro della sua stella. Stella e pianeta orbitano (su traiettorie di diversa ampiezza) intorno al comune centro di massa, in conseguenza della reciproca attrazione gravitazionale. L'osservazione del moto di una stella potrebbe quindi permettere di rivelare la presenza di compagni planetari non visibili direttamente. Usando uno spettroscopio, le variazioni di velocità della stella lungo la linea di vista verso l'osservatore si rivelano attraverso l'effetto Doppler (spostamento di righe spettrali verso il rosso o verso il blu, quando la sorgente si allontana o si avvicina all'osservatore). Questa tecnica permette di ottenere informazioni sulla massa del pianeta, ma una misura diretta della massa è possibile solo nel caso in cui l'inclinazione del piano orbitale sia nota.

La tecnica è sensibile in particolare a pianeti giganti su orbite strette intorno alla propria stella, come il gioviano caldo 51 Pegasi b. Un pianeta come Giove intorno a una stella come il Sole produrrebbe variazioni periodiche di velocità di ampiezza pari a circa 13 metri al secondo su una stella come il Sole. Un pianeta come la Terra produce una perturbazione di circa dieci cm/s sulla velocità del Sole. Gli attuali strumenti non sono in grado di raggiungere questo limite. Con l'attuale generazione di telescopi, questa tecnica è limitata sia dalla precisione che dalla stabilità delle misure di velocità. Le misure attuali hanno spinto il limite fino a una precisione di circa 20 cm/s mantenuta per diversi anni. Gli spettrografi ultra-stabili che saranno disponibili sull'Extremely Large Telescope (ELT, il telescopio gigante di 39 metri di diametro, in costruzione dai paesi europei nel deserto di

Atacama in Cile) raggiungeranno il limite di un centimetro al secondo, su periodi di anni, un risultato tecnologico essenziale per caratterizzare gli esopianeti rocciosi intorno a stelle vicine. L'altra tecnica di grande successo nella rivelazione di pianeti di piccole dimensioni è quella dei transiti fotometrici. Quando un pianeta passa davanti alla sua stella madre, il suo disco blocca temporaneamente una frazione della luce stellare. I transiti sono rilevabili dai nostri strumenti, fornendo informazioni preziose sulla dimensione e l'orbita del pianeta. Ad oggi, è la tecnica di maggior successo, ma si è dovuto attendere il lancio della missione spaziale europea Corot (2005) e poi Kepler (NASA) nel 2009 per una sua efficace applicazione. Infatti, dato che la probabilità di un transito è molto bassa, è necessario monitorare contemporaneamente decine di migliaia di stelle.

Anche questa tecnica è più sensibile a pianeti di grandi dimensioni su orbite di breve periodo, in particolare intorno a stelle di piccole dimensioni. Infatti, la diminuzione di luminosità durante i transiti è proporzionale al quadrato del rapporto del raggio del pianeta rispetto al raggio della stella. Il telescopio spaziale statunitense TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite, lanciato nel 2018) ha scoperto 414 pianeti utilizzando tale tecnica. TESS concentra la sua ricerca intorno a stelle di piccola massa dato che in questo caso i pianeti nella zona temperata circumstellare hanno periodi orbitali di poche decine di giorni, rendendo più agevole l'osservazione di più transiti consecutivi e quindi la conferma della scoperta. Il vantaggio principale della survey condotta da TESS è che molti dei pianeti scoperti si trovano intorno a stelle relativamente vicine, nel raggio di qualche decina di anni luce, quindi alla portata degli strumenti del James Webb Space Telescope (JWST) per una successiva rivelazione e caratterizzazione dell'atmosfera.

Per scoprire pianeti di tipo terrestre intorno a stelle come il Sole, sarà necessario attendere la missione europea PLATO (PLANetary

Transits and Oscillations of stars), il cui lancio è previsto nel 2026. PLATO avrà come obiettivo il monitoraggio di stelle più simili al Sole, per un periodo sufficiente a osservare almeno due transiti di eventuali pianeti nella loro zona temperata circumstellare.

4. Dalla scoperta alla caratterizzazione

Attualmente sono noti 63 pianeti di tipo terrestre, ossia sistemi con una massa inferiore a 10 masse terrestri o con raggio minore di 2.5 raggi terrestri, in orbita attorno a stelle di classe spettrale G, K o M¹¹. Alcuni di essi potrebbero ospitare la vita, ma la nostra conoscenza delle loro caratteristiche fisiche è ancora limitata, anche per valutare in prima approssimazione la loro abitabilità. Il primo passo per comprendere se si tratta di pianeti in grado di ospitare la vita così come la conosciamo passa attraverso lo studio delle atmosfere.

La caratterizzazione dell'atmosfera degli esopianeti è forse il principale obiettivo della scienza degli esopianeti nel prossimo decennio. Durante il transito, la luce proveniente dalla stella ospite attraversa l'atmosfera del pianeta. Confrontando gli spettri della stella ospite durante e senza il transito, è possibile rivelare l'assorbimento dovuto ai composti molecolari presenti nell'atmosfera del pianeta. Inoltre, le variazioni del segnale dell'atmosfera tra i diversi cicli di transito possono gettare luce anche sul clima degli esopianeti.

Alcuni di questi pianeti sono alla portata del JWST. Utilizzando la spettroscopia di trasmissione, JWST potrebbe caratterizzare in parte l'atmosfera di alcuni pianeti analoghi alla Terra intorno a stelle nane rosse, data la loro vicinanza. Tuttavia, anche per questi sistemi, il segnale atteso è debole, appena di circa dieci parti per milione rispetto alla luminosità della stella ospite.

¹¹ M.L. Hill *et al.*, *A Catalog of Habitable Zone Exoplanets*, Accepted for publication in *Astronomical Journal* (2023).

I primi risultati dalle osservazioni del noto sistema planetario Trappist-1¹² sono stati purtroppo in linea con le previsioni teoriche. Le osservazioni spettroscopiche nell'infrarosso con il JWST hanno rivelato che il pianeta roccioso più interno nel sistema planetario, Trappist-1b, è privo di una densa atmosfera. Il risultato non era inatteso: probabilmente si tratta di una conseguenza della vicinanza alla stella che ne ha eroso l'atmosfera in seguito agli intensi brillamenti. Osservazioni successive del JWST hanno mostrato lo stesso scenario per Trappist-1c, il secondo pianeta in ordine di distanza dalla stella: Trappist-1 c non possiede un'atmosfera, o se ce l'ha, è estremamente sottile¹³

5. Conclusioni: dall'astrofisica alla biologia

Lo studio degli esopianeti di tipo terrestre ci offre la possibilità di cercare altre istanze della vita nell'Universo e di scoprire se l'esperimento evolutivo della Terra è un risultato contingente, unico per questo pianeta oppure un fenomeno universale, una sorta di imperativo cosmico. Nei secoli scorsi, le osservazioni astronomiche hanno permesso di comprendere che la fisica e la chimica (scienze sviluppate nei laboratori terrestri) sono scienze universali. Oggi sappiamo che le leggi della fisica e della chimica sono universali. Ancora non possiamo dire se le leggi della nostra biologia, che ha avuto come oggetto di studio il solo caso terrestre, siano anch'esse universali. Questo è uno dei compiti dell'astrobiologia nei prossimi decenni.

Il modo più efficace per cercare una biotraccia è cercare evidenze di gas prodotti dalla vita. Un candidato naturale è l'ossigeno molecolare, abbondante sulla Terra grazie alla fotosintesi.

¹² Trappist-1 è una piccola stella rossa a circa 40 anni luce da noi, con un sistema planetario di sette pianeti rocciosi, di cui ben tre nella zona temperata circumstellare. Rif: M. Gillon et al., "Seven temperate terrestrial planets around the nearby ultracool dwarf star TRAPPIST-1", *Nature*, vol. 542, 2017, p. 456

¹³ S. Zieba et al., *No thick carbon dioxide atmosphere on the rocky exoplanet TRAPPIST-1 c*, in «*Nature*», 620, 2023, pp. 746-749, qui p. 746.

Tuttavia, l'ossigeno molecolare può derivare anche da altri processi: ad esempio, la luce stellare potrebbe scomporre l'acqua nell'atmosfera del pianeta, producendo ossigeno. Questa ambiguità nell'interpretazione tra origine biotica o abiotica non riguarda solo l'ossigeno molecolare. La maggior parte dei gas che gli esseri viventi producono possono nascere anche in assenza di vita. Invece di trattare i singoli gas come biosegnali a sé stanti, è necessario considerarli nel loro contesto. Ad esempio, scoprire tracce di metano e ossigeno molecolare insieme, oppure metano insieme alla giusta quantità di altri gas, come l'anidride carbonica, sarebbe estremamente indicativo di fenomeni biotici.

Difficilmente questo potrà accadere nei prossimi pochi anni, con le osservazioni di pianeti di tipo terrestre intorno alle instabili stelle nane rosse. Possiamo attenderci importanti passi in avanti nell'identificazione della chimica dell'atmosfera e del clima degli esopianeti rocciosi, ma la comunità è scettica sulla presenza di vita su questi pianeti. Sarà probabilmente necessario prima scoprire pianeti di tipo terrestre intorno a stelle di tipo K o G, più simili al Sole, con la vicina missione Plato, per poi studiarne le atmosfere con ELT o il JWST.

Oppure la Natura ci sorprenderà ancora, rivelando tracce di vita in luoghi inattesi, come il pianeta gassoso K2-18b, un pianeta delle dimensioni di Nettuno a circa 120 anni luce dalla Terra. Le prime osservazioni avevano mostrato qualche evidenza per un mondo oceanico avvolto in un'atmosfera di idrogeno. Le più recenti osservazioni spettroscopiche con il JWST hanno mostrato tracce di metano, anidride carbonica e (a un livello minore di confidenza) la possibile presenza di solfuro di dimetile, una molecola che sul nostro pianeta è prodotta perlopiù dalle alghe¹⁴.

¹⁴ N. Madhusudhan *et al.*, *Carbon-bearing Molecules in a Possible Hycean Atmosphere*, in «Astrophysical Journal Letters», 956, L13, 2023, pp. 1-16.

Se osservazioni successive confermeranno questo debole segnale, avremmo un forte indizio che la vita possa farsi strada anche su mondi molto diversi dagli analoghi terrestri.

La scienza degli esopianeti ha registrato enormi progressi nei suoi primi tre decenni grazie al lavoro di una comunità in crescita e alla collaborazione internazionale. Come ricorda Gordon Walker, uno dei primi pionieri in questo campo di ricerca, «è molto difficile oggi apprezzare l'atmosfera di scetticismo e di indifferenza nei confronti delle proposte di ricerca di pianeti extrasolari che regnava negli anni Ottanta. C'era chi pensava che un'impresa del genere non appartenesse nemmeno al regno dell'astronomia»¹⁵.

I prossimi trent'anni saranno ancora più entusiasmanti. Nel giro di pochi anni, potremmo essere in grado di rispondere alla domanda se c'è vita intorno ad altre stelle. Sarà difficile trarre conclusioni circa l'universalità delle leggi della biologia e della biochimica terrestri dalle prime incerte tracce. Se invece (dopo decenni di ricerche) non troveremo tracce di vita su nessun esopianeta, potremmo avanzare l'ipotesi che il nostro angolo nella Galassia sia un deserto cosmico privo di altre forme di vita. Avremo dimostrato che l'emergere del processo di evoluzione biologica in sé è un evento raro e non un fenomeno conseguenza inevitabile della presenza di condizioni abitabili. Anche questo risultato negativo costituirebbe un importante passo in avanti nella comprensione del fenomeno vita nel contesto cosmico.

GIOVANNI COVONE insegna Astrofisica e Cosmologia presso l'Università degli Studi di Napoli Federico II

giovanni.covone@unina.it

¹⁵ K. Croswell, *op. cit.*, p. 216.