

Vita extraterrestre sugli esopianeti nella Via Lattea

Maria Cristina De Liso

Liceo Cantonale di Locarno
2014-2015

Professori responsabili: Gianni Boffa e Christian Ferrari

Indice

1	Premessa	4
2	Introduzione	4
3	Origine dell'astronomia	5
4	Verso il Sistema Solare e oltre	7
4.1	Il Sistema Solare	8
4.2	Le leggi di Keplero	10
4.3	Le comete	13
4.3.1	Origine	14
4.3.2	Classificazione e traiettoria orbitale	15
4.3.3	Breve storia delle scoperte	16
4.3.4	Vita proveniente da molto lontano: la panspermia	18
4.3.5	La missione Rosetta	19
4.4	I meteoriti	21
4.4.1	Le basi della vita provenienti dai meteoriti: gli amminoacidi	24
4.5	La scoperta di pianeti extrasolari	25
4.6	Sistemi planetari alieni e loro formazione	27
4.7	Pianeti particolari di una certa importanza	28
4.7.1	Alfa Centauri	29
4.7.2	51 Pegasi B: il primo pianeta extrasolare	33
4.7.3	Gliese 581 C: il primo pianeta extrasolare in una zona abitabile	35
4.8	L'occhio di CHEOPS	36
5	Metodi matematici e algoritmi per la determinazione di nuovi pianeti di tipo terrestre ...	37
5.1	Rilevamento diretto	39
5.2	Rilevamento indiretto	41
5.2.1	Metodo astrometrico	42
5.2.2	Metodo delle velocità radiali	44
5.2.3	Pulsar timing	47
5.2.4	Transito	49
5.2.5	Microlensing gravitazionale	50
5.2.6	Dischi circumstellari e protoplanetari	52
6	Astrobiologia	54
6.1	Vita extraterrestre	55

6.2	Condizioni per la vita intelligente.....	57
6.3	L'equazione di Drake	61
6.4	Lo straordinario caso della Terra	64
6.4.1	Rarità della Terra.....	66
6.4.2	Principio di mediocrità	67
6.4.3	L'ipotesi di Gaia	68
6.5	Contatto	69
6.5.1	Il SETI	70
6.5.2	Il Messaggio di Arecibo e i cerchi nel grano	71
7	Conclusioni	77
8	Glossario	79
9	Riferimenti bibliografici.....	87

Ringraziamenti

Ringrazio innanzitutto il professor Christian Ferrari per avermi dato la possibilità di scegliere un argomento di fisica per il mio Lavoro di Maturità e avermi lasciato approfondire tematiche riguardanti non solo il campo dell'astronomia ma anche quello dell'astrobiologia. Vorrei inoltre ringraziare il professor Gianni Boffa: senza il suo supporto e la sua guida sapiente questo lavoro non esisterebbe. Infine ringrazio mio padre, Giuseppe De Liso, per avermi ogni giorno incoraggiata ad andare avanti e aver dimostrato grande pazienza e disponibilità nell'aiutarmi e correggermi.

1 Premessa

Prima di intraprendere questo lungo e impegnativo lavoro, sono stata confrontata con una decisione molto importante: scegliere l'argomento. Un lavoro di maturità non è una cosa da poco, quindi era fondamentale che facessi la scelta giusta in quel fatidico mese di novembre. Come spesso accade in questi casi, l'indecisione gioca un ruolo rilevante, ma alla fine la mia prima intuizione è stata anche quella che ho seguito. Sono contenta di questa scelta.

L'astronomia in particolare mi ha sempre affascinato, forse anche per il fatto che sin da piccola mio padre mi rendeva partecipe della sua grande passione, facendomi conoscere le miliardi di stelle, pianeti e galassie che popolano l'Universo. Devo a lui tutto il mio interesse e la mia curiosità verso la materia in questione. Forse ciò che mi ha spinto ad interessarmi così tanto per la prima volta è stata la scoperta di Alfa Centauri: l'idea che fosse il sistema planetario extraterrestre più vicino alla Terra dopo il Sole mi ha conquistata immediatamente.

Gli obiettivi che mi sono posta all'inizio e durante lo svolgimento di questo lavoro sono molteplici. Innanzitutto illustrare allo stato attuale delle conoscenze la genesi degli esopianeti: riuscire quindi a capire come quest'ultimi si siano originati dalla nube molecolare ed evoluti fino a diventare veri e propri pianeti. Altrettanto fondamentale è comprendere quanti di questi sono rocciosi (con una massa simile a quella terrestre) e allo stesso tempo orbitano nella zona di abitabilità della loro stella. Ma la domanda più grande e più difficile è sicuramente l'ultima: esiste un pianeta extrasolare in grado di ospitare la vita così come la conosciamo noi oggi sulla Terra? Quanti di questi esistono davvero nell'Universo?

2 Introduzione

In questo lavoro mi propongo ad esplorare, studiare e analizzare più a fondo quello che forse è l'argomento più discusso degli ultimi tempi: gli esopianeti e la possibilità di individuarne uno adatto alla vita come la conosciamo noi oggi. Perciò ho deciso di dividere il mio lavoro in due parti: una incentrata sull'astronomia, mentre l'altra indirizzata maggiormente verso l'astrobiologia. Nella prima parte gli argomenti principali riguardano il nostro Sistema Solare (inizialmente una breve descrizione di quest'ultimo e in seguito approfondimenti sulle comete e gli asteroidi), ma non solo: approfondirò inoltre anche la scoperta dei pianeti extrasolari e i sistemi planetari alieni (in particolare in quest'ultimo esporrò le caratteristiche principali di tre sistemi stellari e dei loro esopianeti più importanti, ovvero Alfa Centauri, 51 Pegasi e Gliese 581). Un altro argomento molto importante approfondito in questa prima parte è relativo ai metodi (alcuni matematici, altri piuttosto visivi) utilizzati per la determinazione di nuovi pianeti di tipo terrestre: attraverso un'iniziale divisione tra rilevamenti diretti e indiretti, presenterò metodi famosi come il metodo delle velocità radiali, quello del transito e quello del microlensing gravitazionale, nonché molti altri ancora. Nella seconda parte del mio lavoro invece descriverò la vita extraterrestre dal punto di vista di vari astronomi e analizzerò i fattori necessari affinché possa svilupparsi su un pianeta. Particolare

attenzione dedicherò all'equazione di Drake e al caso della Terra, visto come qualcosa di straordinario ed unico o piuttosto come assolutamente comune nell'Universo (oltre a queste presenterò anche l'ipotesi di Gaia, totalmente diversa dalle precedenti due). Nella parte finale descriverò l'organizzazione del SETI e del messaggio di Arecibo del 1974.

3 Origine dell'astronomia

“La storia dell'astronomia è una storia di orizzonti sempre più lontani.”
(Edwin Hubble, 1889-1953)

L'**astronomia** può essere definita come la Madre delle Scienze per la sua antichità: oggi giorno quest'ultima rappresenta uno dei campi di ricerca più seguiti e avanzati, ma ha origini ben più remote. Fin dalle sue origini, l'Uomo è sempre stato affascinato dalla volta celeste, cercando in essa possibili connessioni e spiegazioni tra la vita quotidiana e i fenomeni cosmici.

Nella parte occidentale della Scozia e dell'Inghilterra vi sono numerosi siti megalitici, come le famose strutture architettoniche preistoriche di Stonehenge (la cui costruzione fu conclusa attorno al 1600 a.C.) e Woodhenge (risalente invece agli inizi dell'età del bronzo), quest'ultima distante solo tre chilometri dalla prima. Molti studiosi sostengono che i due siti (simili fra loro per molti aspetti) rappresentino il più antico osservatorio astronomico del mondo, ma la questione è ancora molto dibattuta. Viene inoltre ipotizzato un uso più pratico, e cioè il tentativo da parte dell'Uomo di raggruppare le stelle in costellazioni.¹



Figura 1: A sinistra, Stonehenge visto di profilo al tramonto (a circa 13 chilometri a nord-ovest di Salisbury, in Inghilterra).

A destra, Woodhenge nel Wiltshire.

¹ Wikipedia Contributors. “Stonehenge”. *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Web.

Wikipedia Contributors. “Woodhenge”. *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Web.

In realtà le stelle di una costellazione non hanno una connessione l'una con l'altra: possono sembrare apparentemente alla stessa distanza e direzione da noi, ma il più delle volte si trovano ben più lontane e se osservate da un altro punto di vista il loro disegno cambia completamente. Tuttavia il loro raggruppamento in costellazioni cambia radicalmente a seconda delle tradizioni che consideriamo: pensiamo ad esempio a quella greco-latina, sumero-babilonese o cinese. Le costellazioni che conosciamo noi oggi ci furono tramandate dalla tradizione greca, ma è anche plausibile che siano in realtà ancora più antiche, originarie della Mesopotamia, e quindi appartenenti alla tradizione sumero-babilonese. I testi scoperti fino a oggi (anche se talvolta incompleti e difficili da tradurre affidabilmente) sembrano mostrarci un quadro generale sulle concezioni riguardanti l'osservazione del cielo di sumeri e babilonesi. In generale si distinguevano le costellazioni secondo due tipi di tradizioni (sviluppatasi nel medesimo periodo ma con due differenti propositi): la tradizione "divina", che identificava in esse animali nobili e figure divine per motivi religiosi (pensiamo ad esempio allo zodiaco, le cui stelle erano usate come punto di riferimento per registrare la posizione del Sole, della Luna e dei pianeti), e la tradizione del calendario agreste, che identificava invece nel cielo le figure di contadini e animali allo scopo di fornire un calendario annuale. Molte costellazioni appartengono ad entrambe le tradizioni, ma solo quelle zodiacali (e quelle ad esse collegate) furono in seguito esportate in Europa.

Attorno al 750 a.C. i babilonesi iniziarono a tenere precise cronache degli avvenimenti storici e astronomici, e in particolare ad effettuare misure precise delle posizioni planetarie relative alle costellazioni zodiacali: la suddivisione dello zodiaco in 12 segni (in modo tale da contenere al loro interno i punti cardinali) risale infatti a questo periodo. Dopo la conquista di Babilonia (331 a.C. circa) da parte di Alessandro Magno (356-323 a.C.), l'astrometria e l'astrologia continuarono a svilupparsi e grazie alla dominazione araba furono tramandate le costellazioni divine (gli arabi introdussero inoltre l'uso degli astrolabi, affinché si ci potesse orientare in mare aperto grazie alla posizione delle stelle).

In seguito, nel 500 a.C. circa, la cultura babilonese entra in contatto con quella greca² e le costellazioni zodiacali (alcune rimaste invariate, altre mescolate a quelle mesopotamiche) vengono esportate in Occidente: è in questo modo che nacquero le nostre mappe del cielo attuali.³

² La tradizione astronomica greca risulta ancora più antica (originatasi attorno al 2800 a.C.), nata principalmente per la navigazione in mare. Con l'Almagesto di Tolomeo (130-160 d.C.), contenete un ricchissimo catalogo stellare, le istruzioni per costruire un globo celeste e la definizione finale delle 48 costellazioni, l'astronomia classica raggiunse la sua vetta più alta.

³ planet.racine.ra.it, "La nascita delle costellazioni antiche". Web.

4 Verso il Sistema Solare e oltre

“La Terra è la culla dell’uomo, ma l’uomo non può vivere per sempre nella sua culla.”

(Konstantin Tsiolkovskij, 1857-1935)

In realtà l’Universo è ben più complesso e contorto di quanto avessimo immaginato in un primo momento. Con il progresso delle scienze fisiche e astronomiche stiamo pian piano cominciando a capire come funziona, quali sono le sue caratteristiche principali e quali meraviglie contiene, ma siamo ancora lungi dal comprenderlo interamente. Siamo riusciti a guardare oltre ciò che riusciamo a vedere, oltre il Sistema Solare e le stelle più vicine, ma ciò non basta ancora: vogliamo arrivare là dove nessun uomo è mai arrivato prima. In tutte le epoche in cui ha vissuto, l’Uomo ha sfidato l’ignoto per ampliare i propri spazi vitali: è riuscito a compiere imprese a dir poco sbalorditive con i pochi mezzi di fortuna che possedeva, guidato unicamente dalla curiosità, dall’instinguibile sete di conoscenza e dalla volontà di scoprire a tutti i costi la verità e le leggi che dominano i suoi spazi. Perciò sembra scontato affermare che la pulsione alla scoperta sia scritta nei suoi geni.

“Noi siamo figli delle stelle”, cantava nel 1977 Alan Sorrenti, e forse è proprio così: la nostra vera casa è l’Universo. Uno dei tanti argomenti che verrà approfondito nel capitolo cinque è proprio questo, e cioè l’ipotesi che la vita sulla Terra sia giunta dallo spazio, trasportata dalle comete e dai meteoriti che si schiantarono tempo addietro sulla sua superficie. La cosiddetta teoria della panspermia fu ulteriormente confermata quando, nel 1960, si scoprirono tracce di molecole organiche nella polvere interstellare appartenente alla cometa di Halley e Wild 2 (vedi i capitoli 4.3 e 4.4, in cui approfondirò comete e meteoriti).

Il primissimo argomento caratterizzato in questo capitolo riguarda il nostro Sistema Solare, di cui si sente spesso parlare ma che il più delle volte è poco conosciuto. Seguirà una generale descrizione sui sistemi planetari alieni e la teoria sulla loro formazione (capitolo 4.6) e verranno inoltre descritti più dettagliatamente tre sistemi stellari di una certa importanza (scelti personalmente): Alfa Centauri, il sistema triplo più vicino alla Terra dopo il Sole, 51 Pegasi (con particolare attenzione a 51 Pegasi B, il primo pianeta extrasolare scoperto nella storia) e infine Gliese 581 (in cui parlerò di Gliese 581 C, conosciuto come il primo esopianeta scoperto nella zona abitabile della sua stella).

Il prossimo capitolo (il 5) sarà interamente dedicato alle tecniche (alcune più moderne, altre con origini ben più remote) utilizzate oggi per l’identificazione di nuovi pianeti extrasolari. Un’accurata descrizione accompagnerà ognuna di esse, approfondendo in particolar modo la storia, l’utilizzo e alcune particolarità interessanti legate ad esse. Verrà inoltre illustrata l’importante divisione tra rilevamento diretto e indiretto.

4.1 Il Sistema Solare

“Quanto vasti devono essere quei Mondi, e quanto insignificante questa Terra, il Teatro nel quale tutti i nostri immensi Progetti, tutte le nostre Navigazioni e tutte le nostre Guerre sono condotte, possiamo comprenderlo soltanto quando la confrontiamo con essi.”

(Christiaan Huygens, 1629-1695)

Il **Sistema Solare** è il sistema planetario a cui appartiene la Terra e altri vari oggetti celesti, mantenuti in orbita grazie alla forza di gravità esercitata dal Sole. Esso è composto da otto pianeti principali, oltre 160 lune e innumerevoli corpi minori tra asteroidi e comete (ma anche frammenti di roccia, polvere cosmica, un'enorme quantità di gas e particelle cariche). Nella regione più interna si trovano il Sole e i quattro pianeti rocciosi (Mercurio, Venere, la Terra e Marte), mentre nella regione più esterna, detta Sistema Solare esterno, i quattro pianeti giganti gassosi, ovvero Giove, Saturno, Urano e Nettuno⁴ (costituiti principalmente da elio e idrogeno). A separare il Sistema Solare interno da quello esterno, esiste una gigantesca barriera ad anello, chiamata fascia principale degli asteroidi, che ospita alcuni tra i più famosi pianeti nani e asteroidi conosciuti (alcuni esempi sono Cerere, Vesta, Pallade e Igea). Oltre l'orbita del pianeta più distante, Nettuno, si estende invece una zona chiamata Fascia di Kuiper (che sfuma nel cosiddetto disco diffuso) in cui si trovano la maggior parte degli asteroidi e dei frammenti rocciosi, e al di là di quest'ultima un gigantesco guscio, la Nube di Oort, avvolge l'intero sistema stellare: in entrambi i casi, gli asteroidi e i corpi ghiacciati si conservano sospesi in equilibrio fino al momento in cui il loro moto non viene perturbato dall'attrazione gravitazionale di un altro corpo e sono sospinti verso il Sole (è in questo modo che si creano le comete, per l'approfondimento vedere il capitolo 4.3). Nel complesso, il nostro sistema planetario occupa una regione più o meno vasta del cosmo, con un diametro di circa 80 UA⁵.

⁴ Plutone, scoperto nel 1930 da Clyde Tombaugh (1906-1997), fu declassato a pianeta nano il 13 settembre 2006, in seguito ad una votazione dell'UAI (Unione Astronomica Internazionale), dal momento che non soddisfaceva tutte le caratteristiche di pianeta: a causa della sua massa relativamente bassa, non è riuscito a ripulire l'orbita dai detriti e corpi minori, come invece hanno fatto tutti gli altri pianeti.

⁵ Dove 1 UA è pari a circa la distanza media tra Terra e Sole, cioè 149'597'870,700 chilometri.

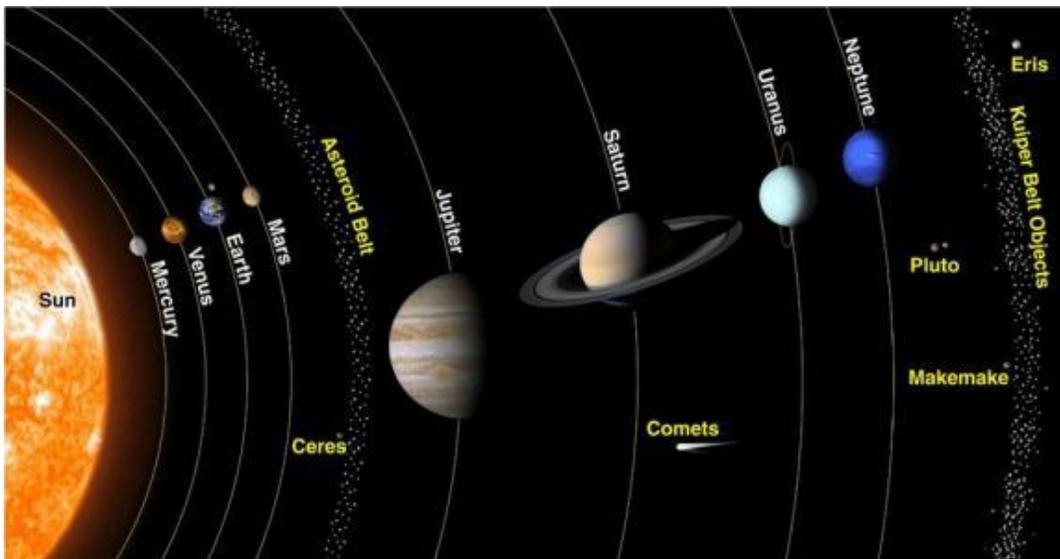


Figura 2: Rappresentazione dei principali pianeti e di alcuni corpi minori e asteroidi del Sistema Solare (distanze non in scala). Sono visibili la fascia principale degli asteroidi (tra Marte e Giove) e la Fascia di Kuiper (oltre Nettuno).

In seguito a questa rapida descrizione generale del Sistema Solare, è necessario aggiungere due parole sulle orbite dei pianeti al suo interno. In generale, un corpo ruota attorno ad un centro comune (la sua stella o il pianeta madre) lungo un'orbita ellittica, ma nel nostro caso la maggior parte delle orbite sono circolari, tranne che per quelle di Mercurio e Plutone, piuttosto di forma ellittica. Tutti i pianeti e quasi tutti gli asteroidi orbitano attorno al Sole nello stesso verso in cui quest'ultimo compie una rotazione completa attorno al proprio asse (in senso antiorario). Il periodo di rivoluzione varia a dipendenza della distanza dal Sole (secondo la Terza Legge di Keplero e la legge di gravitazione universale, vedi capitolo 4.2), ovvero da un minimo di 88 giorni terrestri (per Mercurio) fino ad un massimo di 250 anni terrestri (per Plutone). Oltretutto, i pianeti più lontani dal Sole che percorrono orbite più lunghe hanno anche un moto più lento.⁶

Se dovessimo guardare il nostro sistema dall'esterno e allontanarci sempre di più, scopriremmo che esso si trova in un braccio minore della Via Lattea chiamato il Braccio di Orione, che dista quasi 28'000 anni luce dal Centro Galattico. Esattamente come accade nel Sistema Solare, anche la nostra galassia ruota in maniera differenziale, ovvero i bracci di spirale più vicini al Bulge orbitano molto più velocemente rispetto a quelli più lontani (si ha una velocità di rivoluzione media pari a circa 250 km/s).⁷

Numerose sono state le teorie formulate per cercare di interpretare al meglio la nascita del nostro pianeta e del Sistema Solare. In generale le opinioni seguono due correnti contrastanti: una di tipo

⁶ R. Dinwiddie, D. Hughes, C. Stott, *La famiglia del Sole*, in M. Rees (a cura di), *Grande enciclopedia per ragazzi: Universo*, Roma, Mondadori, 2005.

⁷ astrosurf.com, "Appunti di astronomia: Galassia Via Lattea". Web.

catastrofico e l'altra di tipo evolucionistico. Nel primo caso, la nascita del nostro sistema implica il verificarsi di un qualche evento catastrofico esterno, mentre nel secondo si concepisce l'origine come una diretta conseguenza dell'evoluzione delle caratteristiche del sistema stesso. Ma andiamo con ordine: secondo l'ipotesi catastrofica di Chamberlin-Moulton (proposta da Thomas Chamberlin e Forest Moulton nel 1905) il Sistema Solare si formò in seguito alla fuoriuscita di vari filamenti in successione dal Sole. Questi sarebbero stati la fonte primaria per la creazione del sistema planetario, causati dalla collisione o dal passaggio radente di una stella (le probabilità che si verifichi un evento del genere sono però molto basse). La teoria solitamente più accettata è invece quella evolucionistica, che suppone l'origine dei pianeti e del Sole a partire da una gigantesca nube molecolare. Il collasso di quest'ultima e la sua condensazione avviarono una serie di reazioni di fusione termonucleare che diedero origine, al centro di questa, ad una protostella (l'antenato del nostro Sole). I pianeti si formarono in seguito dall'accrescimento continuo di polveri e frammenti rocciosi, fondendosi tra loro e dando vita prima ai planetesimi, e poi a protopianeti e pianeti veri e propri (la formazione di sistemi planetari e, nel caso specifico, del nostro Sistema Solare verrà approfondita nel capitolo 4.6).

Moltissime ricerche sono attualmente in corso nei laboratori di chimica planetaria, in cui l'analisi di campioni forniti da sonde e missioni spaziali recenti potrebbe permettere la ricostruzione semplificata del modello chimico del nostro sistema. Ciò è fondamentale affinché si possa giustificare la varietà di elementi di composizione del Sistema Solare. Per il momento si presuppone che la condensazione delle varie sostanze sia avvenuta in base alla temperatura esistente in quel preciso punto e istante della nebulosa: in questo modo, allontanandoci dal Sole gli elementi più volatili (e cioè quelli che si sono condensati a temperature più basse, lontano dal centro della nebulosa) aumentano di concentrazione, mentre avvicinandoci aumentano le concentrazioni degli elementi meno volatili, ovvero quelli che si sono condensati a temperature più elevate.⁸

4.2 Le leggi di Keplero

“Mensus eram coelos, nunc terrae metior umbras. Mens coelestis erat, corporis umbra iacet.”⁹
(Johannes von Keplero)

Johannes von Keplero (1571-1630), detto Keplero, è stato un grande matematico, astronomo, e musicista tedesco. Il suo contributo più importante e famoso all'astronomia e alla meccanica sono le **tre leggi che regolano il movimento dei pianeti**, dette, appunto, **leggi di Keplero**.

Formulò le prime due leggi nel trattato astronomico *Astronomia Nova* pubblicato nel 1609. Scoprì invece la terza legge nel 1618, che presentò nell'opera *Harmonices Mundi* un anno dopo.

⁸ digilander.libero.it, “Il Sistema Solare: le origini”. Web.

⁹ Epitaffio composto da lui stesso e iscritto sulla sua lapide nel cimitero di Ratisbona (la tomba si perse a causa della distruzione di quest'ultimo nel 1632 durante la guerra dei trent'anni). La traduzione è la seguente: “Misuravo i cieli, ora fisso le ombre della terra. La mente era nella volta celeste, ora il corpo giace nell'oscurità.”.

Successivamente Isaac Newton (1642-1727) ha accertato la validità della teoria della gravitazione universale servendosi di queste leggi e convinto la comunità scientifica dell'epoca ad accettarle definitivamente (solo verso gli anni 1660).¹⁰

Nella **Prima Legge (Legge delle orbite ellittiche)** Keplero afferma:

“Le orbite dei pianeti sono ellissi di cui il Sole occupa uno dei fuochi”.

In questa sua prima legge, Keplero espone un modello del Sistema Solare eliocentrico, ma soprattutto non descrive più le orbite dei pianeti come circolari (le forme considerate prima perfette), bensì come ellissi. In questo modo i moti dei pianeti avvengono su un piano, chiamato generalmente piano orbitale, mentre per la Terra tale piano è detto eclittica.

Nella **Seconda Legge (Legge delle aree)**:

“La velocità orbitale di un pianeta varia in modo che il raggio vettore Sole-pianeta spazza aree uguali in tempi uguali”.

Da questa legge consegue che la velocità orbitale non è costante lungo tutta l'orbita, ma varia a dipendenza se si trova in prossimità del perielio (punto in cui la distanza della Terra dal Sole è minima) o afelio (punto in cui la distanza della Terra dal Sole è massima). Dato che al perielio il raggio vettore è più corto rispetto all'afelio (e l'arco di ellisse conseguentemente più lungo) e che entrambe le distanze devono essere percorse nello stesso tempo, ne deriva che la velocità orbitale deve essere minima nel primo caso e massima nel secondo.

¹⁰ M. Caspar, L. Rothenfelder, M. List, *Bibliographia Kepleriana. Ein Führer durch das gedruckte Schrifttum von Johannes Kepler*, München, Beck, 1936 (Edizione 1968).

Wikipedia Contributors. “Giovanni Keplero”. *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Web.

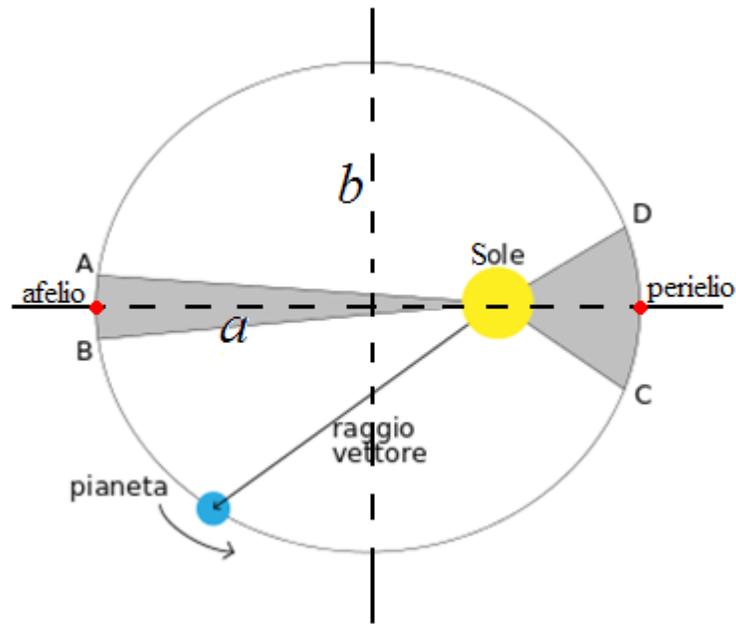


Figura 3: Rappresentazione schematica dell'orbita di un pianeta (ad esempio la Terra) all'interno del Sistema Solare.

Le due aree evidenziate sono uguali e devono quindi essere percorse dal pianeta nello stesso tempo, ma a velocità diverse. Pertanto la velocità orbitale risulterà maggiore all'afelio, mentre minore al perielio.

Nella figura a è il semiasse maggiore dell'orbita mentre b il semiasse minore.

E infine nella **Terza Legge (Legge dei periodi)**:

“I quadrati dei periodi di rivoluzione dei pianeti sono direttamente proporzionali ai cubi dei semiasse maggiori delle loro orbite”.

Questo rapporto è costante per tutti i pianeti e i loro satelliti di un qualsiasi sistema, e può essere espresso in forma matematica nel modo seguente:

$$\frac{T^2}{a^3} = K$$

dove T è il periodo di rivoluzione o orbitale (in secondi), a il semiasse maggiore dell'orbita (in metri) e K la costante (a volte detta di Keplero), che varia a seconda del corpo celeste attorno al quale avviene il moto di rivoluzione¹¹.

¹¹ Nel caso del moto di rivoluzione dei pianeti all'interno del Sistema Solare K equivale a 1, misurando le distanze in UA e il periodo orbitale in anni solari (corrispondente a circa 365,2424 giorni).

Queste tre leggi vennero utilizzate da Newton per verificare la sua legge di gravitazione universale. In base a quest'ultima si trova il significato fisico della costante K :

$$K = \frac{4\pi^2}{G(M_p + M_*)}$$

dove G è la costante di gravitazione ($G = 6,67259 \cdot 10^{-11} \frac{Nm^2}{kg^2}$), M_p la massa del pianeta (in chilogrammi) e M_* la massa della stella (sempre in chilogrammi).

Esistono tuttavia alcuni limiti di validità delle leggi di Keplero. Esse possono dare valori precisi solo se si considerano sistemi in cui la massa del pianeta è trascurabile rispetto a quella della stella e se si trascurano pure le piccole interazioni fra i diversi pianeti, che potrebbero portare a perturbazioni sulla forma delle orbite.¹²

4.3 Le comete

A tutti è successo almeno una volta di riuscire a scorgere un puntino luminoso, simile ad una lucciola, muoversi velocissimo sulla volta celeste e sparire oltre l'orizzonte. A quel punto, con gli occhi chiusi e le dita incrociate, si esprime un desiderio speciale, e chissà: un giorno potrebbe anche avverarsi. L'apparizione di una stella cadente è solitamente associata a un sentimento di lieto stupore, non tanto per aver assistito ad un avvenimento raro (perché non è assolutamente raro), ma piuttosto per l'apparente straordinarietà dell'evento in sé. In realtà quella che viene chiamata comunemente "stella cadente" non ha niente a che fare con una vera e propria stella. Queste scie luminose sono causate da minuscoli frammenti di polvere e roccia (chiamati meteoroidi), che, dopo essersi staccati da asteroidi o comete ed entrati nell'atmosfera terrestre, iniziano a bruciare. A questo punto una meteoroida va incontro a due destini diversi: a dipendenza della sua composizione e provenienza, può essere disintegrata nell'atmosfera prima di raggiungere la superficie terrestre (meteora), oppure arrivare fino a terra e schiantarsi (meteorite). Una **cometa** invece è un corpo celeste piuttosto piccolo, simile ad un asteroide, composto da un nucleo di roccia (che può raggiungere al massimo il diametro di una ventina di chilometri) ricoperto da vari strati di acqua, metano, monossido e biossido di carbonio, ammoniaca e polvere ghiacciati: in breve, sono descritte come "palle di neve sporca". È composta da un nucleo centrale, una chioma e una coda. In realtà, quella che viene definita come coda della cometa è l'effetto del calore e del vento solare sugli elementi ghiacciati: in prossimità del Sistema Solare interno, il vento solare fa sublimare gli strati ghiacciati più esterni della cometa mentre il vento li soffia via, creando così intorno al nucleo

¹² CMSI (Commissione di matematica della Svizzera italiana), *Formulari e tavole: matematica, fisica, chimica*, Bellinzona, Édition G d'Encre, 2011.

Wikipedia Contributors. "Leggi di Keplero". *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Web.

un'atmosfera rarefatta chiamata chioma e dietro di sé la caratteristica scia luminosa¹³, simile ad una coda, rivolta sempre in direzione opposta al Sole.¹⁴

4.3.1 Origine

Per quanto riguarda l'**origine di una cometa**, essa è strettamente legata a quella del Sole e di tutti i pianeti, poiché il materiale di cui è composta è lo stesso da cui in precedenza ebbero origine i corpi minori e maggiori del Sistema Solare. Secondo una teoria, ripresa nel 1950 dall'astronomo olandese Jan Oort (1900-1992), si ipotizza l'esistenza di una gigantesca nube chiamata Nube di Oort che avvolge l'intero Sistema Solare e che lo rifornisce continuamente di nuove comete, per rimpiazzare quelle distrutte: si tratta di una specie di serbatoio che contiene milioni di nuclei cometari stabili che, se perturbati da un altro oggetto (in passato si ipotizzava l'esistenza di una stella, compagna del Sole, chiamata Nemesis o di un Pianeta X), cominciano il loro lungo viaggio intorno al Sole fino alla loro scomparsa¹⁵. Esiste però un altro luogo dove si pensa si originino le comete (in particolare quelle periodiche): la Fascia di Kuiper, dal nome dell'astronomo olandese Gerard Kuiper (1905-1973) che per primo ne ipotizzò l'esistenza. Si tratta di una fascia di asteroidi (di cui fanno parte il pianeta nano Eris, 50000 Quaoar e più di altri 800 oggetti) che si estende da Nettuno fino a 50 UA dal Sole. A differenza della Nube di Oort, la Fascia di Kuiper è stata confermata definitivamente nel 1991, grazie soprattutto all'evidenza diretta degli oggetti presenti in essa.¹⁶

¹³ Al contrario di quanto si possa pensare, non si tratta di oggetti molto luminosi: le comete osservate finora non riflettono più del 4% (cometa di Halley) della luce con cui vengono illuminate (in confronto, il normale asfalto stradale ne riflette il 7%!).

¹⁴ digilander.libero.it, "Come è fatta una cometa". Web.

¹⁵ La morte di una cometa può avere vari scenari: se non viene consumata completamente dal calore e dal vento solare (o se non entra in rotta di collisione con esso), potrebbe distruggersi contro un altro asteroide oppure essere catturata dall'attrazione gravitazionale di un pianeta massiccio (come Giove) e schiantarsi violentemente su di esso.

¹⁶ siderumpulvis.blogspot.ch, "L'origine delle comete". Web.

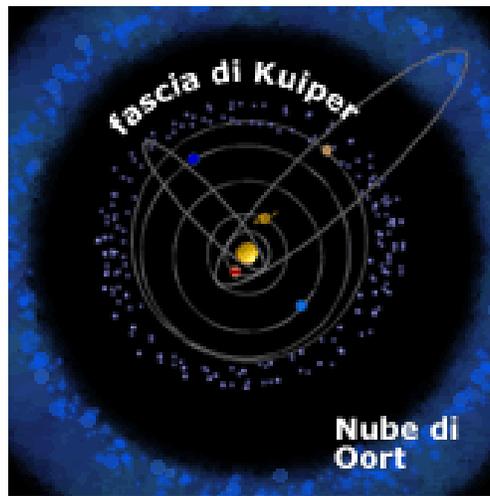


Figura 4: L'immagine mostra la Fascia di Kuiper, all'esterno rispetto alle orbite dei pianeti maggiori, e la Nube di Oort, l'ipotetica nube sferica di comete e asteroidi che avvolge l'intero sistema planetario. Le due orbite estremamente ellittiche rappresentate (possono avere eccentricità anche maggiori di 1) sono rispettivamente le orbite delle comete a corto periodo e a lungo periodo.

4.3.2 Classificazione e traiettoria orbitale

Una cometa viene abitualmente classificata in base alla lunghezza del periodo orbitale: le comete di corto periodo¹⁷ (con un periodo orbitale inferiore ai 200 anni) percorrono solitamente un'orbita in prossimità dell'eclittica, nello stesso verso di percorrenza dei pianeti; le comete di lungo periodo invece (con un periodo orbitale superiore ai 200 anni) percorrono orbite ancora più ellittiche di quelle di corto periodo; le comete extrasolari escono definitivamente dal Sistema Solare una volta che sono arrivate in prossimità del Sole, percorrendo un'orbita parabolica o iperbolica; infine le comete radenti percorrono un'orbita talmente vicina alla superficie del Sole che l'elevata radiazione solare le fa evaporare e scomparire del tutto. Si ritiene che le comete di corto periodo provengano dalla Fascia di Kuiper, mentre quelle a lungo periodo dalla Nube di Oort.¹⁸

Come già osservato prima, generalmente si osservano delle traiettorie paraboliche (e in alcuni casi anche iperboliche), ma la maggior parte delle comete presenta una propria traiettoria ellittica: non è stato infatti possibile trovare alcuna analogia per quanto riguarda la forma e i parametri orbitali di nessuna di queste. Tuttavia si muovono secondo le Leggi di Keplero (già approfondite nel capitolo 4.2.) e la legge di gravitazione universale.

¹⁷ Sono anche chiamate comete periodiche, come la cometa di Halley e quella di Encke.

¹⁸ Wikipedia Contributors. "Cometa: caratteristiche orbitali". *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Web.

4.3.3 Breve storia delle scoperte

Prima che Edmond Halley (1656-1742) diventasse famoso e scoprisse la periodicità della cometa di Halley (XVII secolo)¹⁹, non si sapeva ancora che cosa esattamente fosse una cometa: se un particolare fenomeno atmosferico o un oggetto interplanetario. La questione rimase a lungo irrisolta. La seconda cometa riconosciuta come periodica fu la cometa di Encke nel 1821, scoperta da Johann Encke (1791-1865). Fu la cometa con il periodo orbitale più breve mai conosciuto (circa 3,3 anni) e di conseguenza di cui si registrarono maggiori apparizioni. Altre comete degne di nota sono la cometa Hyakutake, apparsa nel 1996 e che permise di scoprire un'emissione di raggi X (mai prima d'ora notata su un corpo cometario), seguita dalla cometa Hale-Bopp, scoperta nel 1995 e apparsa nel 1997 più luminosa che mai guadagnandosi il titolo di *Grande Cometa del 1997* (fu probabilmente anche la cometa più osservata del XX secolo), e infine la cometa più luminosa degli ultimi 2000 anni: la cometa Ikeya-Seki, scoperta nel 1965 e appartenente al gruppo di Kreutz (un gruppo di comete originatesi da una cometa più grande che si frantumò nel 1106). Una delle comete più recenti e che ho avuto la fortuna di osservare con i miei occhi è la cometa ISON, scoperta il 21 settembre del 2012 da due astronomi russi. Quando il 25 novembre 2013 fu annunciato che quest'ultima, alla fine di dicembre, si sarebbe trovata nel punto dell'orbita più vicino al Sole (al perielio) e che lo avrebbe sfiorato di soli 1'100'000 chilometri, ormai era quasi certo che non sarebbe sopravvissuta al passaggio radente. Infatti il 28 dicembre, subito dopo il perielio, è stato registrato un calo progressivo della sua luminosità: la cometa ISON si è probabilmente disintegrata completamente.²⁰ Anche se si è rivelata un'enorme delusione per chi la voleva nominare "cometa del secolo", ISON si è rivelata al contrario molto interessante dal punto di vista scientifico e astronomico, perché è stato possibile studiare più nei dettagli i processi che l'hanno portata alla disintegrazione in prossimità del Sole. Inoltre questa è la prima volta che si osserva una cometa radente proveniente dalla Nube di Oort.²¹

¹⁹ Ci riuscì grazie a studi effettuati precedentemente, in quanto si rese conto che in realtà le comete osservate nel 1456, 1531, 1607 e 1682 erano la stessa (con un periodo orbitale di circa 75,3 anni). In seguito predisse il ritorno di questa nel 1758.

²⁰ cieloascuola.oato.inaf.it, "Spettacolare passaggio di due super comete nel 2013". Web.

scienza.panorama.it, "Bye bye Ison! La cometa del secolo non c'è più". Web.

²¹ lescienze.it, "Morte di una cometa: che cosa ci ha insegnato il passaggio di ISON". Web.



Figura 5: La cometa ISON fotografata dal Giappone il 16 novembre 2013.
La montagna sullo sfondo è il Monte Fuji.

Allo scopo di indagare meglio le comete e soprattutto il loro nucleo interno, sono state create moltissime **missioni spaziali**: ne sono un esempio le sonde Giotto e Stardust, lanciate rispettivamente nel 1986 e nel 1999 e con il compito di fotografare il nucleo e raccogliere frammenti della cometa di Halley e Wild 2;²² un compito simile lo ebbe anche la sonda Deep Space 1, lanciata nel 1998 e diretta verso la cometa Borrelly;²³ e infine la sonda spaziale Deep Impact della NASA, che raggiunse con successo la cometa Tempel 1 nel 2005. Quest'ultima sonda in particolare è stata una delle più importanti missioni spaziali mai effettuate, poiché è stata la prima ad esaminare il nucleo interno di una cometa (al contrario delle precedenti missioni spaziali che si limitavano a fotografare la superficie e a raccogliere frammenti della cometa).²⁴ In questo modo è possibile comprendere la formazione della Terra e l'evoluzione del Sistema Solare (come già accennato in precedenza, il materiale di cui le comete sono fatte è lo stesso che ha contribuito alla formazione del nostro sistema planetario).

²² digilander.iol.it, "Giotto vede la prima cometa". Web.

focus.it, "La fine della sonda Stardust". Web.

²³ lescienze.it, "Addio alla sonda Deep Space 1". Web.

²⁴ astronautinews.it, "Si conclude la missione di Deep Impact, cacciatrice di comete". Web.

4.3.4 Vita proveniente da molto lontano: la panspermia

La vita sulla Terra così come la conosciamo noi oggi si è evoluta nel corso di miliardi di anni, ma potrebbe essere giunta sin qui da molto lontano, ad esempio dalla Nube di Oort a bordo di una cometa.

Ad una distanza compresa fra 30'000 UA e un anno luce (o forse anche più) una gigantesca nube, simile ad un'enorme bolla, avvolge la nostra Terra e l'intero Sistema Solare. Si pensa che all'interno di essa tutti i frammenti e i nuclei cometari stabili siano i resti della formazione del Sole e di tutti i pianeti nel suo sistema. Ciò equivale a dire che, in un passato molto remoto, le comete provenienti dalla nube abbiano assistito alla nascita del Sistema Solare. Infatti è poco plausibile che tali frammenti si siano formati ad una così grande distanza dal Sole: alcuni di essi furono catturati dall'attrazione gravitazionale dei pianeti più grandi (diventando dei piccoli satelliti o andando ad accrescerne la massa); altri vennero spinti nel Sistema Solare esterno, continuando comunque ad essere attratti, seppur debolmente, dal Sole; altri ancora invece furono scacciati via definitivamente dal sistema. Così, ogni tanto, fa capolino una piccola cometa dalla nube, che ripercorre al contrario la strada che 5 miliardi di anni prima aveva fatto per arrivare sin lì.²⁵

A questo punto è d'obbligo chiedersi se la vita, almeno in parte, non sia davvero venuta dai luoghi più remoti del nostro sistema. È stato soprattutto grazie ad una scoperta che quest'idea, negli ultimi tempi, è diventata più credibile.

“Una volta che tutti i nostri tentativi di ottenere materia vivente da materia inanimata risultino vani, a me pare rientri in una procedura scientifica pienamente corretta il domandarsi se la vita abbia in realtà mai avuto un'origine, se non sia vecchia quanto la materia stessa, e se le spore non possano essere state trasportate da un pianeta all'altro ed abbiano attecchito laddove abbiano trovato terreno fertile.” (Hermann von Helmholtz)²⁶

La **panspermia** esprime proprio questo concetto, e cioè che la vita non ha avuto origine sulla Terra, ma che, sparsa per l'universo, è stata “seminata” dall'impatto di comete e asteroidi. Si tratta di una teoria molto antica, concepita nel 450 a.C. circa da Anassagora (496 a.C.-428 a.C.), un filosofo greco. In seguito fu ripresa da Lord William Thomson (1824-1907) e il fisico Hermann von Helmholtz (1821-1894) nell'Ottocento e dallo svedese Svante Arrhenius (1859-1927) agli inizi del Novecento, mentre verso la fine del XX secolo fu ripresa dagli astronomi Fred Hoyle (1915-2001) e Chandra Wickramasinghe (20 gennaio 1939). Questi ultimi due in particolare, quando scoprirono tracce organiche nella polvere interstellare (prelevata dalla cometa di Halley e Wild 2), erano impegnati in tutt'altro: identificare la composizione della polvere analizzando lo spettro della luce proveniente da essa (1960). Scoprirono così che la polvere cometaria, oltre a metano, acqua e ammoniacca, conteneva pure dei polimeri organici complessi, come la poliformaldeide e la porfirina (entrambe strettamente legate alla cellulosa) e le ammine. Inoltre scoprirono, cosa ancora più

²⁵ siderumpulvis.blogspot.ch, “L'origine delle comete”. Web.

²⁶ Wikipedia Contributors. “Panspermia”. *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Web.

sorprendente, che i granelli di polvere costituenti le comete e le nubi interstellari potevano effettivamente contenere batteri essiccati e congelati, in vari stadi di degradazione (risultato ottenuto grazie ad una corrispondenza praticamente perfetta durante delle simulazioni fatte nel 1979 sul progetto originale). Questa conclusione potrebbe essere giustificata dal fatto che sulla Terra, nelle condizioni in cui anticamente si formò, qualsiasi molecola complessa di vita non sarebbe mai riuscita a sopravvivere. Perciò deve essere per forza venuta dall'esterno in un secondo momento, quando le condizioni sulla Terra sono diventate più favorevoli. Tuttavia la loro conclusione permane tutt'oggi molto criticata.²⁷

Una scoperta più recente ha rilevato invece tracce di un amminoacido, la glicina, nei campioni della cometa Wild 2 riportati a terra dalla sonda Stardust il 15 gennaio 2006. Anche se per molti non si è trattato di una scoperta notevole, non bisogna dimenticare che gli amminoacidi sono molto importanti per la vita: tutte le proteine infatti vengono sintetizzate a partire da 20 amminoacidi diversi, con un'infinità di combinazioni. Essi si formano dal momento in cui una miscela di composti organici disciolti in acqua viene esposta a una fonte di energia (come i fotoni o una scarica elettrica), che può avvenire sia sulla Terra che in qualsiasi altro luogo dello spazio. Tempo addietro erano già stati trovati amminoacidi in alcuni meteoriti, ma questa è la prima volta che vengono isolati da una cometa.²⁸

4.3.5 La missione Rosetta

Un ulteriore passo avanti è stato compiuto lo scorso 12 novembre, quando **Philae**, il lander della **sonda Rosetta** dell'ESA, è atterrato per la prima volta sulla superficie di una cometa.²⁹ Lo scopo principale della missione era quello di orbitare intorno alla cometa 46P/Wirtanen e rilasciare in seguito una sonda secondaria destinata ad atterrare su di essa³⁰. Tuttavia una serie di incidenti del programma Ariane 5 (il vettore scelto per lanciare Rosetta) ha fermato la missione: il lancio fu rimandato di oltre un anno (fino al 2 marzo 2004), e perciò è stato necessario scegliere un altro soggetto. La scelta della cometa doveva essere ben ponderata e presentare caratteristiche particolari: sufficientemente grande per atterrarci sopra e sufficientemente vicina alla Terra per poterla raggiungere. Alla fine gli scienziati hanno scelto la cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko, un gigante irregolare³¹ largo 4,02 chilometri, ma con un grosso inconveniente: la sua orbita è al limite della distanza percorribile da Rosetta. Per raggiungerla la sonda sarebbe dovuta arrivare a più di 800

²⁷ unastellaperamica.wordpress.com, "La panspermia, le comete, la vita e il ghiaccio". Web.

²⁸ A. Conti, novembre-dicembre 2009, "Astronotiziario: aminoacidi cometari", in: *Meridiana*.

²⁹ wired.it, "La missione Rosetta è pronta a sbarcare su una cometa". Web.

³⁰ Originariamente la missione aveva come scopo l'inseguimento del nucleo della cometa e il trasporto di alcuni frammenti a terra, ma in seguito, a causa di problemi legati a costo, tempo e tecnologia, lo scopo finale della missione è stato modificato.

³¹ 67P possiede infatti una particolare conformazione doppia, nota in astronomia con il nome di binaria a contatto.

milioni di chilometri dal Sole, dove nessuna navicella a energia solare si era mai spinta prima. Ad una tale distanza, il pannello solare di cui è dotata, anche se si tratta di uno dei più grandi mai inviati nello spazio, non è in grado di darle energia sufficiente.³² A questo proposito, per risparmiare energia, la sonda è stata messa in ibernazione. Dopo più di due anni (luglio 2011 – gennaio 2014) senza alcuna notizia su Rosetta, finalmente il 20 gennaio 2014 si riprende il contatto. In seguito all'avvicinamento della sonda alla cometa, è stato necessario mappare l'intera superficie per scegliere il punto di atterraggio migliore.

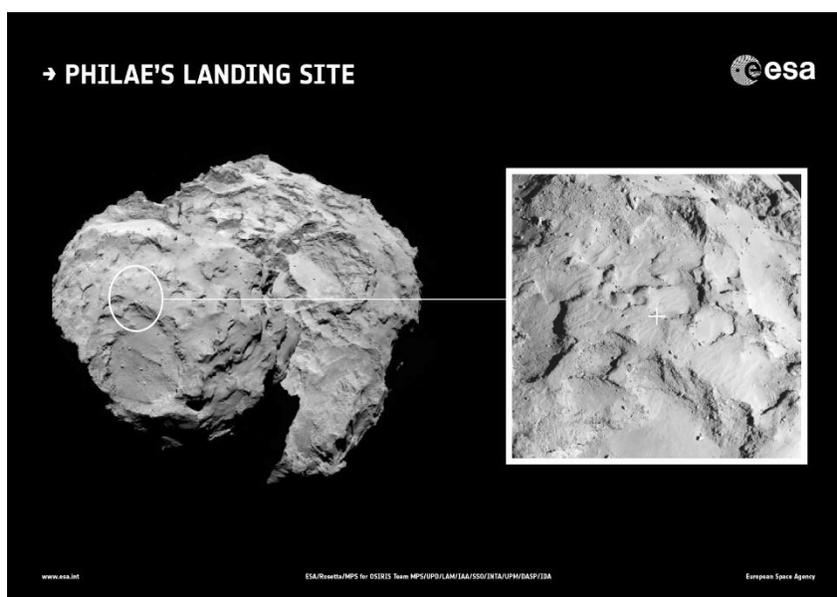


Figura 6: Il Sito “J” è la zona selezionata dall'ESA per tentare l'atterraggio del lander Philae. Esso è scelto in modo da minimizzare i rischi e al contempo fornire una posizione idonea al lander per svolgere gli esperimenti scientifici e comunicare con la sonda madre.

Finalmente arriva il giorno che tutti stavano aspettando: il 12 novembre 2014, dopo sette lunghe ore di discesa, Philae tocca la superficie, rimbalza due volte e si ferma a circa un chilometro dal sito J. Nonostante ciò, il successo della missione è stato enorme.³³

La manovra compiuta è risultata molto più difficile e pericolosa di quanto si pensasse: occorre innanzitutto che Rosetta viaggiasse alla stessa velocità della cometa (100'000 km/h, circa quaranta volte più veloce di un proiettile sparato da un fucile!) e poi, per via della debolissima forza gravitazionale (circa 100 mila volte meno di quella della Terra) dovuta alle sue dimensioni ridotte, che il lander fosse equipaggiato con trivelle e arpioni in modo da potersi ancorare alla superficie e non rimbalzare via. Inoltre si è dovuto far fronte a problemi come eventuali eruzioni di getti di gas

³² L'intensità della luce corrisponde ad appena il 4% di quella che arriva sulla Terra.

³³ themoodpost.it, “L'atterraggio di Philae, il lander spaziale”. Web.

(ovvero quelle che andranno poi a formare la chioma della cometa) e alle incognite sul luogo dell'atterraggio (la superficie della cometa infatti risulta tutt'altro che regolare!).³⁴

Al momento il lander Philae è entrato in modalità stand by in quanto la batteria principale si è esaurita completamente e i pannelli solari non hanno permesso di ricaricarla (il luogo dell'atterraggio risulta infatti poco illuminato dal Sole). È riuscito comunque a perforare la superficie e a prelevare alcuni campioni: attualmente sono ancora in corso le analisi.³⁵

La missione rappresenta un'opportunità unica per trovare risposte alle domande dell'umanità: di cosa sono fatte le comete? Qual è stato il loro ruolo nell'evoluzione del Sistema Solare? E cosa più importante: contengono gli elementi essenziali della vita?

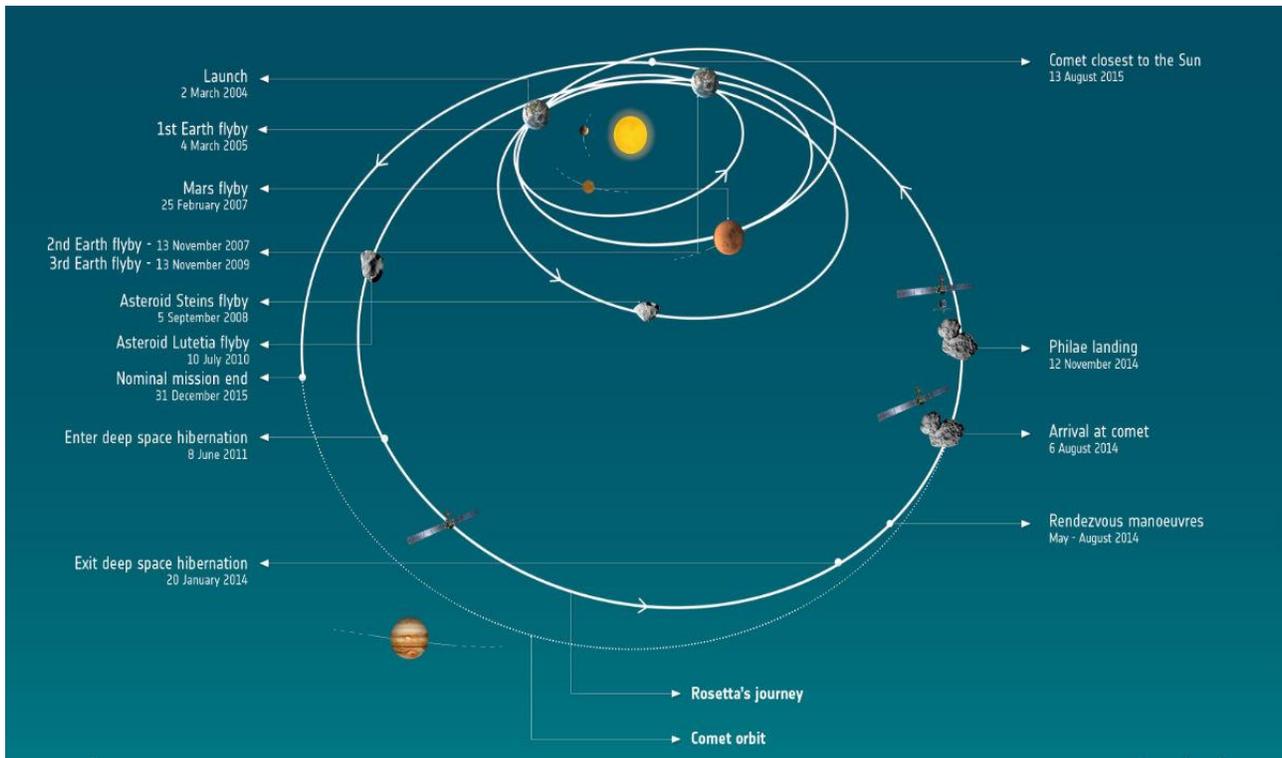


Figura 7: Genesi della missione spaziale Rosetta dal suo lancio nel marzo 2004 all'atterraggio sulla cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko nel novembre 2014.

4.4 I meteoriti

Prima di entrare nei dettagli e descrivere i meteoriti è necessario segnare alcune differenze, che spesso portano a malintesi e una gran confusione: un asteroide (chiamato anche pianetino o pianetoide) è un corpo roccioso dalla forma irregolare e generalmente con un diametro non più

³⁴ panorama.it, "Missione Rosetta: la diretta dello sbarco sulla cometa". Web.

³⁵ repubblica.it, "Philae si è assopito sulla cometa. L'ESA: 'Ma i dati raccolti sono straordinari'". Web.

grande di un chilometro (ne esistono alcuni più maestosi nella fascia principale³⁶), mentre asteroidi più piccoli (in genere frammenti delle dimensioni di un sasso o anche meno) sono conosciuti come meteoroidi. Un asteroide composto da ghiaccio e altri materiali (anziché soltanto da roccia) diventa invece una cometa (vedi capitolo 4.3). Altra importante differenza da sottolineare è quella di meteora: un meteoroido viene chiamato meteora dal momento in cui entra nell'atmosfera terrestre e s'incendia³⁷. Quest'ultima è più comunemente conosciuta come stella cadente.

Arriviamo dunque all'argomento centrale di questo capitolo: i meteoriti. Viene definito **meteorite** un meteoroido (quindi un piccolo asteroide) di natura extraterrestre³⁸ che è entrato in collisione con la Terra e ha subito un'erosione superficiale, prima di schiantarsi al suolo. In poche parole, alla fine della sua corsa attraverso l'atmosfera, il meteoroido (se è ancora rimasto qualcosa di esso) viene distinto in meteorite.

Prima del XIX secolo la maggior parte degli studiosi non conosceva i meteoriti né la loro origine. Certo, questi meravigliosi spettacoli erano senz'altro già noti alle popolazioni dell'antichità, narrati da scrittori e poeti di ogni epoca, come Tito Livio (59 a.C. – 17 d.C.) o Plinio il Vecchio (23 d.C. – 79 d.C.), ma le ipotesi sulla loro provenienza erano sempre state incerte e confuse. Come se non bastasse, a causa di false superstizioni, moltissimi meteoriti furono nascosti o distrutti, poiché si credeva che fossero opera del diavolo, e altri ancora invece fusi e lavorati dalle popolazioni più primitive per ricavare il ferro utilizzato nella fabbricazione di lance e coltelli. Per questi motivi, gli studi sui meteoriti furono per lungo tempo frenati. Tra le molteplici ipotesi espresse, quella esatta fu formulata da Ernst Chladni (1756-1827) nel 1794: anche se Pierre-Simon Laplace credeva che avessero origine nei vulcani lunari attivi, Chladni era convinto che questo tipo di rocce (molto diverse da quelle terrestri) giungessero sulla Terra dagli spazi interplanetari. La sua ipotesi fu accettata ufficialmente solo nel 1803, con la pioggia meteorica a L'Aigle (in Francia), quando l'analisi di campioni provenienti da ritrovamenti diversi rivelarono l'uniformità dei materiali di quest'ultimi e ne confermarono a tutti gli effetti la provenienza extraterrestre.³⁹

Tipicamente le meteoriti vengono classificate per composizione in tre grandi categorie: rocciose, ferrose e ferrose-rocciose. Le meteoriti rocciose, composte principalmente da silicati, sono quelle più comuni (circa il 93,3% di tutte quelle cadute) e vengono suddivise a loro volta in condriti e acondriti; quelle ferrose sono costituite soprattutto da una lega di ferro-nichel (con piccole quantità di altri minerali) e rappresentano il 5,4% di tutte quelle cadute (possono essere suddivise a loro volta in atassiti, ottaedriti e esaedriti); infine quelle ferrose-rocciose, quelle più rare (solo 1,3%), sono un misto di roccia e ferro-nichel, molto simile alla composizione dei pianeti rocciosi (anche

³⁶ La fascia principale degli asteroidi è una regione del Sistema Solare situata tra le orbite di Marte e Giove principalmente costituita da asteroidi, corpi minori e alcuni tra i più famosi e grandi asteroidi, come Cerere, Vesta, Pallade e Igea.

³⁷ In realtà l'enorme pressione dinamica esercitata dal meteoroido sull'aria circostante induce quest'ultima a surriscaldarsi vertiginosamente, che di conseguenza riscalda anche il meteoroido fino a farlo prendere fuoco.

³⁸ È necessario fare questa piccola puntualizzazione in quanto relitti spaziali precipitati o altri corpi di natura artificiale non sono considerati dei meteoriti.

³⁹ fossili.it, "Storia delle meteoriti". Web.

quest'ultime possono essere suddivise in pallasiti e mesosideriti). Altre classificazioni sono ad esempio la classificazione moderna, che le suddivide in meteoriti primitive e differenziate.

La maggior parte dei meteoroidi che entrano nell'atmosfera terrestre non riescono a schiantarsi al suolo, poiché si disintegrano prima di arrivarci: si stima che soltanto 500 meteoriti (delle dimensioni di una palla da baseball o più) all'anno giungano sulla Terra, di cui solo 5 o 6 vengono in seguito ritrovate⁴⁰ (le possibilità che cadano negli oceani, o comunque in luoghi in cui è difficile accedervi o scorgerele, sono più elevate).⁴¹ Se il corpo invece possiede una massa compresa fra 30 chili e 10'000 tonnellate (ed è composto per lo più da materiale ferroso, più resistente della roccia), allora l'atmosfera ne distrugge solo la superficie esterna, rallentandolo fino alla velocità di caduta libera, ovvero in media 50 km/s (a dipendenza della velocità della Terra, della direzione e della provenienza): alla fine della sua caduta, il nucleo superstite colpisce il suolo con una forza proporzionale alla sua dimensione, composizione e all'angolo d'impatto.⁴²

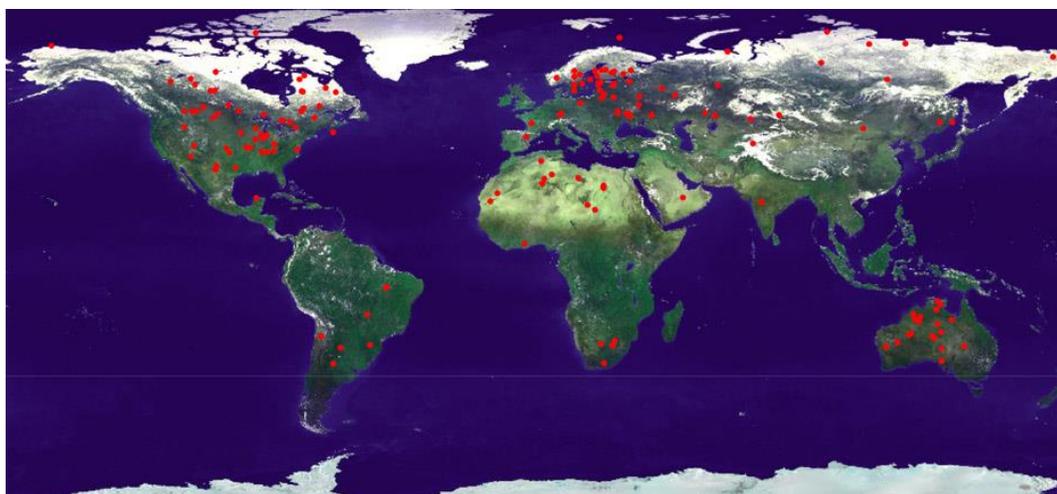


Figura 8: Sulla cartina sono evidenziati (con dei puntini rossi) i siti d'impatto dei meteoriti conosciuti.

Il più grande e pesante meteorite che sia mai stato rinvenuto sulla Terra è il meteorite Hoba, scoperto vicino alla fattoria Hoba West in Namibia agli inizi del XX secolo (si ritiene però che sia precipitato più di 80'000 anni fa).⁴³ Mentre il cratere meteoritico più famoso è senz'altro il Meteor

⁴⁰ Uno dei luoghi dove il ritrovamento di meteoriti è sicuramente più facilitato è l'Antartide. Non perché in questi luoghi estremi la frequenza degli impatti è maggiore (poiché quest'ultima è esattamente la stessa sull'intera superficie terrestre), bensì perché la calotta antartica, grande ben 12 milioni di chilometri quadrati e spesso 2,5 chilometri, riesce a conservare meglio le rocce e le rende più facilmente visibili.

⁴¹ Wikipedia Contributors. "Meteorite: impatto con la superficie terrestre". *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Web.

⁴² R. Dinwiddie, D. Hughes, C. Stott, *Meteorite e meteoriti*, in M. Rees (a cura di), *Grande enciclopedia per ragazzi: Universo*, Roma, Mondadori, 2005.

⁴³ castfv.it, "La meteorite precipitata presso Hoba West". Web.

Crater in Arizona, dove furono ritrovati moltissimi frammenti (chiamati collettivamente Canyon Diablo) appartenenti ad un meteorite che colpì la Terra 50'000 anni fa.⁴⁴



Figura 9: A sinistra, un gruppo di geologi tedeschi vicino al meteorite Hoba (fotografia scattata nel 1929).
A destra, una fotografia del Meteor Crater in Arizona, Stati Uniti. Il cratere è largo 1'200 metri e profondo ben 170.

A questo punto una domanda sorge spontanea: potrebbero rappresentare un pericolo reale? Se si dovessero limitare ad innocue palle da baseball di certo non potrebbero causare danni molto gravi. Fino a oggi i casi registrati comprendono danni a automobili, tetti, vetri e alcuni casi di persone ferite superficialmente. Questi banali casi potrebbero sembrare inoffensivi, ma non dimentichiamoci che i dinosauri si estinsero proprio a causa di un enorme meteorite⁴⁵. Alcune stime mostrano che crateri da impatto con diametri superiori a 20 chilometri vengono provocati da meteoriti ogni 500'000 anni.

4.4.1 Le basi della vita provenienti dai meteoriti: gli amminoacidi

La teoria secondo la quale la vita è giunta sulla Terra sugli asteroidi attraversando lo spazio, nota come “panspermia” (vedi capitolo 4.3.4), è ormai storia antica, per di più non accettata completamente da tutta la comunità scientifica. È comunque chiaro che almeno una parte dei composti organici necessari alla vita sia davvero arrivata dal cosmo.

I meteoriti ritrovati oggi sulla superficie terrestre sono prevalentemente frammenti di asteroidi precipitati dallo spazio, benché in alcuni rarissimi casi provengano da Marte e dalla Luna. Taluni

⁴⁴ geoenv.it, “The Meteor Crater”. Web.

⁴⁵ Oltre a quest'ultimo, almeno altri 9 disastri simili si sono succeduti sulla Terra nell'ultimo mezzo miliardo di anni.

invece sono formati dallo stesso materiale da cui in precedenza si erano formati i pianeti rocciosi, e per questo motivo gettano un po' di luce sulle origini del Sistema Solare. Recenti risultati hanno però dimostrato che i meteoriti potrebbero aver contribuito alla vita sulla Terra più di quanto si ha immaginato finora: analizzando infatti due tipi diversi di meteoriti, è stata trovata una quantità di amminoacidi fino a dieci volte superiore a quella prevista. Anche se gli amminoacidi da soli non rappresentano la vita vera e propria, sono gli elementi fondamentali alla creazione delle proteine, e la formazione di quest'ultime è considerata uno dei primi passi verso l'origine della vita.

Il lavoro di Dave Harper e dei suoi collaboratori dell'Università di Copenhagen suggerisce che il legame fra i meteoriti e la vita sulla Terra sia ben più profondo e antico, precisamente di 470 milioni di anni: nel periodo Ordoviciano ci fu una particolare perturbazione che interessò la fascia principale degli asteroidi e inviò migliaia di pianetini verso le regioni più interne del Sistema Solare. Ciò ebbe come conseguenza una pioggia di meteoriti (dal diametro di un chilometro circa) che si riversò sulla Terra, durante un periodo che va dai 490 ai 440 milioni di anni fa. Normalmente gli impatti di meteoriti sono considerati sinonimo di distruzione, ma in questo caso i paleontologi credono che la vita non solo non si estinse, ma crebbe ancora più rigogliosa di prima.⁴⁶

4.5 La scoperta di pianeti extrasolari

Prima di passare alla scoperta di pianeti extrasolari, è necessario spiegare cosa si intende esattamente con pianeta extrasolare: un **pianeta extrasolare** (o **esopianeta**) è un pianeta non appartenente al Sistema Solare, orbitante cioè attorno a una stella diversa dal Sole.

Anche se l'**esistenza di pianeti extrasolari** è stata pienamente confermata solo nel 1995, si è sempre ritenuto plausibile la loro esistenza: speculazioni scientifiche di questo tipo infatti risalgono fino all'inizio del XVIII secolo (se non addirittura ancora più antecedente)! La prima ipotesi a riguardo fu formulata da Isaac Newton nel 1713⁴⁷.

Ora però, queste sono solo ipotesi, e, dato che le tecniche di osservazione dell'epoca non erano sufficientemente accurate e tecnologicamente avanzate, furono confermate con sicurezza solo moltissimo tempo dopo (nell'ottobre del 1995, dagli astronomi svizzeri Michel Mayor e Didier Queloz come tratterò nel capitolo 4.7.2 con la scoperta di 51 Pegasi B).

Al 12 marzo 2014 erano conosciuti 1783 pianeti extrasolari in 1105 sistemi planetari diversi e 195 altri pianeti in attesa di conferma⁴⁸. A causa dei limiti delle tecniche di osservazione attuali, la maggior parte dei pianeti individuati sono giganti gassosi come Giove, mentre solo in parte minore pianeti rocciosi massivi del tipo Super Terra (con una massa compresa tra 1,9–5 e 10 masse terrestri). Inoltre la maggior parte sono stati scoperti grazie a tecniche d'individuazione indirette, come l'astrometria, il metodo delle velocità radiali, il transito, e altri ancora che affronterò nel

⁴⁶ A. Conti, maggio-giugno 2008, "Astronotiziario: meteoriti vitali", in: *Meridiana*.

⁴⁷ glossario.oa-cagliari.inaf.it, "L'ABC dell'Universo – P come... Pianeti extrasolari". Web.

⁴⁸ Wikipedia Contributors. "Lista dei pianeti extrasolari confermati". *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Web.

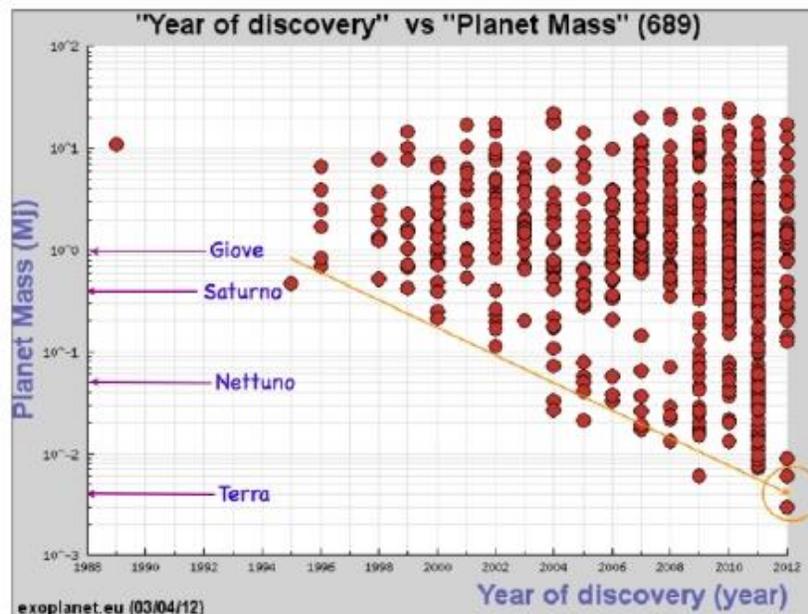
capitolo 5.2, mentre solo pochi grazie alle tecniche di rilevamento diretto (argomento del capitolo 5.1).

A questo punto, un'altra domanda che dobbiamo porci è la seguente: perché? Perché spendere un'intera esistenza a frugare in un Universo immenso per cercare delle prove che forse non esistono neanche?

L'Universo, le stelle, le galassie e tutto ciò che concerne la volta stellata hanno sempre affascinato l'Uomo, sin dai primordi della sua lunga vita sulla Terra. Ad oggi quest'interesse non si è affievolito neanche un po', anzi è cresciuto sempre di più, grazie alle nuove scoperte e conquiste fatte che hanno a loro volta sollevato altre domande e quesiti. Così scopriamo che in realtà non sappiamo nulla sulla vastità dell'Universo e che forse le risposte alle domande che stiamo cercando rappresentano solo un lontano e sbiadito miraggio.

Ma non dobbiamo arrenderci! Gli astronomi e scienziati moderni stanno ancora cercando di scoprire i segreti dell'Universo e di rispondere a tantissime domande, e lo faranno anche in futuro, in quanto un eventuale ostacolo rappresenta proprio ciò che permetterà di andare avanti e di sperare ancora, aumentando la curiosità e la determinazione.

La ricerca di esopianeti ha sicuramente dato il via a una nuova e lunga corsa allo spazio, alla scoperta di un altro pianeta Terra. Ma tutti gli sforzi e l'impegno spesi per cercare e sperare di



trovare qualcosa che forse neanche esiste potrebbero sembrare strani e ingiustificati. Quindi perché l'Uomo lo fa? Arso dal desiderio di sconfinare in nuovi mondi e sorprendenti realtà, brama di raggiungere qualcosa di sconosciuto e sfamare la sua sete di conoscenza, sicuro di ricavarne soddisfazione e appagamento.

Figura 10: Grafico che mostra il numero di scoperte di esopianeti per anno dal 1995 (scoperta e conferma del primo esopianeta, 51 Pegasi B) al 2012. Inoltre si può vedere come le scoperte di esopianeti con massa terrestre si intensifichino man mano che le tecnologie utilizzate diventano più sofisticate. Il pianeta scoperto nel 1989 è noto come HD 114762b, che tuttavia ha perso il primato di primo pianeta extrasolare individuato in quanto è stato confermato solo nel 1996.

4.6 Sistemi planetari alieni e loro formazione

Un esempio di sistema planetario è sicuramente il nostro: il Sistema Solare. Quindi possiamo definire un **sistema planetario alieno o extrasolare** come un sistema comprendente diversi oggetti di natura non stellare (come pianeti, satelliti, asteroidi, meteoroidi, comete e polvere interstellare) in orbita attorno ad una stella. Se invece consideriamo una o più stelle (che orbitano intorno al comune centro di massa) con i rispettivi sistemi planetari, allora parliamo di sistema stellare.

La **formazione di un sistema planetario** permane tutt'oggi ancora uno dei più grandi quesiti dell'astrofisica e della scienza in generale. Non sappiamo esattamente come il nostro Sistema Solare si sia formato, possiamo solo formulare delle teorie e indovinarlo, osservando intorno a noi come si comportano gli altri oggetti celesti nell'Universo e supporre quindi uno scenario simile per noi. Anche se nel tempo sono stati proposti modelli di formazione diversi, si ritiene che la formazione di sistemi planetari orbitanti attorno a stelle simili al Sole sia affine agli stessi processi che portano alla formazione stellare. In poche parole, si può concludere che essa ripercorra un po' l'antica ipotesi della nebulosa solare di Kant e Laplace⁴⁹. Precedentemente invece si teorizzava che il passaggio ravvicinato di una stella in prossimità di un'altra (come ad esempio il Sole) provocasse emissione di materiale incandescente che si sarebbe poi collocato su un'orbita intorno a quest'ultima. Tuttavia è altamente improbabile che eventi simili si verificino, proprio a causa delle enormi distanze che intercorrono fra una stella e un'altra. Questo modello risulta pertanto poco plausibile.

Ma torniamo alla teoria inizialmente menzionata. La formazione stellare ha inizio con il collasso di una nube molecolare: una gigantesca nube di gas e polveri con una massa molte volte superiore all'attuale massa del Sole che, nel caso della formazione del nostro Sistema Solare, è chiamata nebulosa solare. Si tratta di un processo di condensazione molto complesso e lungo (si svolge nel corso di milioni di anni) che comincia a densità molto basse e si completa quando si hanno raggiunto condizioni fisiche tali da innescare reazioni di fusione termonucleare. Nessuno sa con certezza che cosa abbia innescato il collasso della nebulosa solare, ma è certo che la forza di gravità è diventata per qualche motivo più intensa delle forze legate alla pressione del gas. È per questo motivo che la nebulosa, collassando su se stessa, si è appiattita, assumendo la forma di un disco con un rigonfiamento al centro. In seguito, esattamente come una pattinatrice che aumenta la propria velocità di rotazione avvicinando le braccia al busto, il disco cominciò a ruotare sempre più velocemente, e di conseguenza a scaldarsi e ad addensarsi sempre più nella regione centrale. Il prodotto è quella che viene definita una protostella (o protosole) e il disco che ne aveva permesso l'accrescimento diviene protoplanetario. Successivamente i piccoli granelli di polvere costituiti da roccia, metalli e ghiaccio situati lungo tutta la superficie del disco, si fondono tra loro per formare i planetesimi (piccoli corpi rocciosi con diametri di qualche chilometro). A loro volta (in un tempo astronomicamente breve, circa 100 000–300 000 anni) i planetesimi possono fondersi tra loro, grazie ad un'attrazione gravitazionale sufficientemente potente, in un processo di accrescimento continuo, e infine dar luogo a embrioni planetari, i protopianeti, che infine permetteranno la

⁴⁹ L'ipotesi fu formulata per la prima volta da Emanuel Swedenborg nel 1734 e solo successivamente ripresa e riadattata da Immanuel Kant e Pierre-Simon Laplace nel 1755.

formazione di veri e propri pianeti terrestri . È importante differenziare i pianeti rocciosi interni al Sistema Solare da quelli più esterni: infatti i primi, trovandosi nelle regioni più interne e quindi più calde e dense del disco protoplanetario, sono costituiti unicamente da roccia e metalli, in quanto i materiali ghiacciati come acqua, ammoniaca e metano sono stati vaporizzati dalla regione centrale calda del disco al momento della loro formazione. È così che si sono formati Mercurio, Venere, la Terra e Marte. Mentre i pianeti più esterni, situati in regioni più lontane e quindi più fredde e meno dense del disco, hanno subito sì processi simili, ma, a differenza di quelli interni, hanno conservato nel loro nucleo materiali ghiacciati oltre a quelli rocciosi: è il caso dei pianeti giganti gassosi Giove, Saturno, Urano e Nettuno. Inoltre si pensa che molti planetesimi residui siano divenuti comete e asteroidi, mentre Plutone si sarebbe originato da materiale “inutilizzato” dai giganti gassosi o potrebbe essere stato catturato successivamente dal Sistema Solare.⁵⁰

Non tutti i sistemi planetari sono però simili al Sistema Solare. Anzi, la stragrande maggioranza sono estremamente diversi, come ad esempio è stato possibile individuare casi di configurazioni compatte⁵¹ e altri che si sono formati intorno a delle pulsar (approfondimento al capitolo 5.2.3). Dato che quest’ultime si originano a seguito del collasso di una stella come supernova II, i pianeti preesistenti quasi sempre evaporano o sfuggono all’attrazione gravitazionale della stella. Esistono però teorie in cui si sostiene che i nuovi pianeti potrebbero essere i residui di quelli esistiti in precedenza, quasi completamente evaporati durante l’esplosione, altre invece sostengono che i pianeti potrebbero essersi formati in un qualche modo nel disco di accrescimento che circonda le pulsar.

4.7 Pianeti particolari di una certa importanza

In questo capitolo presenterò alcuni pianeti che più di tutti mi hanno, per una loro particolare caratteristica o proprietà, appassionata e sempre affascinata. La loro scelta risulta quindi puramente soggettiva e personale. Qui di seguito spiegherò i vari motivi che mi hanno portata alla loro scelta e collocazione all’interno del mio lavoro.

Come primo oggetto ho scelto di descrivere il sistema di Alfa Centauri. Sin da piccola questo sistema apparentemente ordinario ha sempre attirato il mio interesse: fu mio padre a inculcarmi l’interesse per le stelle, i pianeti e l’Universo, e m’insegnò ad apprezzarne la loro osservazione e a comprenderne le caratteristiche più misteriose e inspiegabili. Ad oggi questo mio interesse non ha fatto che crescere ed ingrandire la mia immaginazione ed il mio sapere oltre qualsiasi orizzonte. Ma, dopo aver scoperto nuove stelle lontane, nuovi sistemi strani e intriganti, Alfa Centauri è

⁵⁰ R. Dinwiddie, D. Hughes, C. Stott, *La storia del Sistema Solare*, in M. Rees (a cura di), *Grande enciclopedia per ragazzi: Universo*, Roma, Mondadori, 2005.

⁵¹ A differenza del Sistema Solare dove i pianeti giganti gassosi (come Giove o Saturno) orbitano a grande distanza rispetto al Sole, qui si intende la situazione contraria, ovvero quando essi orbitano molto vicini alla loro stella (come nell’esempio di 51 Pegasi B, di cui parlerò nel capitolo 4.7.2). La loro esistenza può essere spiegata con il modello dei Giovi Saltellanti.

rimasto comunque nei miei ricordi più vivi e belli della mia infanzia, nonché uno degli oggetti celesti che preferisco. Ad affascinarci tanto è stata la sua caratteristica più importante: dista dalla Terra (solo) 4,3 anni luce, ed è quindi il sistema più vicino a noi dopo il Sole. Molto probabilmente, in un futuro più o meno lontano con l'ausilio di tecnologie più o meno all'avanguardia, sarà il primo sistema che l'uomo raggiungerà e studierà dopo aver percorso in lungo e in largo il Sistema Solare.

Altro oggetto importante è 51 Pegasi B. Ho scelto di approfondire questo secondo oggetto non per un suo valore affettivo personale, come era il caso di Alfa Centauri, ma piuttosto per la sua importanza a livello scientifico: si tratta infatti del primo pianeta extrasolare mai scoperto (1995, dagli astronomi svizzeri Michel Mayor e Didier Queloz).

Come terzo e ultimo oggetto di una certa importanza ho prediletto Gliese 581 C. Fu una scoperta straordinaria a quei tempi (2007) nel campo della scienza ma soprattutto dell'astronomia e dell'astrobiologia, perché venne considerato il primo esopianeta ad orbitare nella zona abitabile del suo sistema planetario. Fu ritenuto quindi simile alla Terra, con una temperatura superficiale adatta a mantenere l'acqua allo stato liquido e potenzialmente abitabile da forme di vita molto semplici e primitive. Anche se in seguito questa possibilità fu esclusa, in quanto il pianeta in realtà si colloca ben più all'interno rispetto alla zona di abitabilità inizialmente stimata, la scoperta non ha perso di importanza: ha insegnato infatti all'uomo che non è solo un lontano miraggio la possibilità di scoprire altri pianeti simili alla Terra.

4.7.1 Alfa Centauri

Alfa Centauri (conosciuta anche come Rigel Kentaurus) è una stella tripla situata nella costellazione australe del Centauro (una delle più estese di tutto il cielo, in quanto visibile per intero dall'emisfero sud e dalle basse latitudini settentrionali.), da cui prende il suo nome. A occhio nudo si aggiudica il terzo posto come stella più luminosa di tutto il cielo notturno (dopo Sirio e Canopo), ma la sua caratteristica più importante è senz'altro un'altra: si tratta del sistema stellare più vicino alla Terra, in quanto dista solo (per modo di dire) 4,365 anni luce dal nostro pianeta!⁵²

Il sistema stellare di Alfa Centauri, come già accennato sopra, è un sistema triplo composto da α Centauri A, α Centauri B e α Centauri C (anche nota come Proxima Centauri). Le prime due componenti appartengono alla sequenza principale e sono rispettivamente una nana gialla e una nana arancione (di simile luminosità). Esse percorrono le loro orbite ellittiche attorno a un baricentro comune: il centro di massa del sistema. Essendo molto vicine fra loro, a occhio nudo (o con un piccolo binocolo) possono essere facilmente scambiate per un'unica stella. La terza invece è una nana rossa, molto più distante e meno luminosa rispetto alle precedenti due: compie infatti un'orbita notevolmente più ampia attorno alla coppia principale, tanto che si potrebbe pensare che non sia legata gravitazionalmente ad esse e che si muova quindi lungo una traiettoria iperbolica, ma analizziamo innanzitutto quest'ultimo elemento: la distanza media di due stelle non legate gravitazionalmente nei dintorni del Sole corrisponde a circa 490.000 UA (la distanza media Terra-

⁵² In particolare è Proxima Centauri (una delle tre stelle che compongono il sistema) a essere in assoluto, dopo il Sole, la stella più vicina alla Terra.

Sole), e quella invece che separa Proxima Centauri da α Centauri A e α Centauri B è soltanto di 13.300 UA. Quindi sembrerebbe altamente improbabile che Proxima si trovi così vicino al sistema per puro caso. Esistono tuttavia argomenti di altra natura dai quali si potrebbe supporre l'indipendenza di Proxima. Infatti, se fosse un membro del sistema, dovrebbe essere nata allo stesso tempo e mostrare quindi la stessa età, dato che le stelle di un sistema binario o multiplo si formano dentro la stessa nube molecolare. È invece una delle caratteristiche più importanti di Proxima quella di essere una stella soggetta a flare o brillamenti⁵³, e quindi proprio per questa sua caratteristica sappiamo per certo che si trova nelle prime fasi della sua vita (la sua età non dovrebbe superare i 400 milioni di anni), mentre per α Centauri A e α Centauri B si stima un valore di circa 3 miliardi di anni. Affascinante come invece, se Proxima fosse il terzo componente del sistema, ruotando allora in un'orbita completa, si alternerebbe ad α Centauri A nel ruolo di “Stella più vicina al Sole”! In teoria, secondo alcuni studiosi, Proxima potrebbe lasciare il sistema fra alcuni milioni di anni.

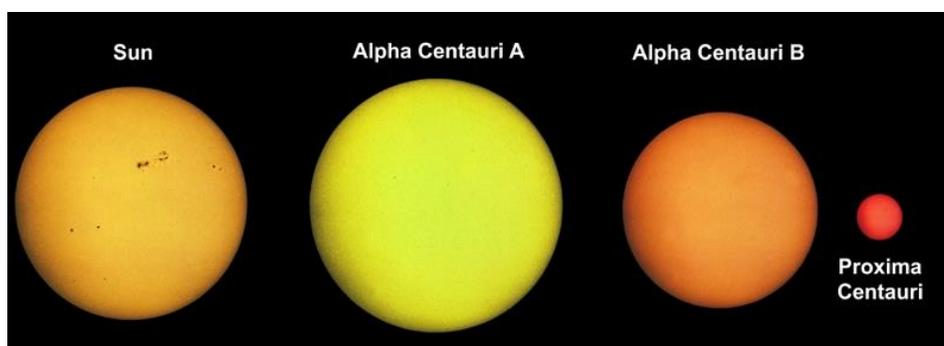


Figura 11: Confronto di dimensioni tra il Sole, α Centauri A, α Centauri B e Proxima Centauri. Il colore indica la classe spettrale di appartenenza, rispettivamente G, G, K e M.

Alfa Centauri (all'epoca ancora ritenuto un sistema binario) fu scoperto nel 1689 da Padre Richaud dalla città indiana di Pondicherry, durante l'osservazione di una cometa. Soltanto nel 1832, da misure effettuate (tramite la **misura trigonometrica della parallasse** [1]) al Capo di Buona Speranza dall'astronomo scozzese Thomas James Henderson (1798-1844), si scoprì che il sistema stellare è anche quello più vicino alla Terra e che dista da noi appena 4,35 anni luce. Si trattava della stella più vicina che allora si conoscesse! La terza stella, Proxima Centauri, fu invece scoperta solo nel 1915 da Robert Innes (1861-1933) in Sudafrica, durante uno studio sul moto delle stelle α Centauri A e α Centauri B. Fu così riconosciuta come la stella più vicina a noi in assoluto, trovandosi ad una distanza di 4,22 anni luce⁵⁴.

⁵³ Violenta eruzione di materia che esplose dalla superficie di una stella, pari alla potenza di varie decine di milioni di bombe atomiche. Questo fenomeno è tipico delle stelle variabili.

⁵⁴ digilander.libero.it, “Stelle e oggetti celesti: Alfa Centauri”. Web.

Il fatto che Alfa Centauri sia il sistema più vicino non vuole comunque dire che sia anche raggiungibile dall'Uomo. Nel raggio di 20 anni luce si contano 106 stelle in 79 sistemi stellari.⁵⁵

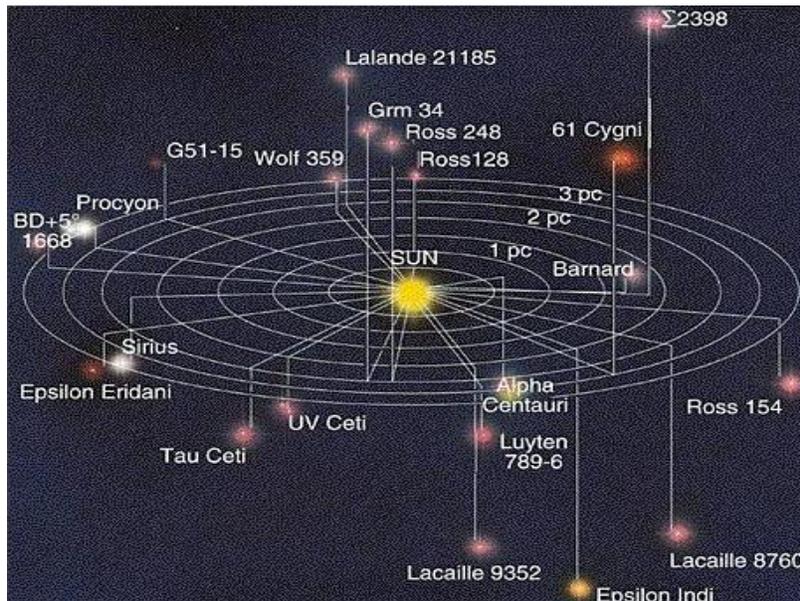


Figura 12: L'immagine rappresenta una cartina approssimativa delle stelle più vicine alla Terra.

Queste distanze possono sembrare apparentemente vicine alla Terra, ma in realtà l'attuale stato di sviluppo tecnologico dell'uomo non consente ancora di realizzare viaggi interstellari. Il progresso tecnologico è ancora troppo lontano dal riuscire a costruire un vettore spaziale in grado di avvicinarsi anche solo lontanamente alla velocità della luce. In futuro però, molto probabilmente, Alfa Centauri sarà uno dei primi sistemi stellari ad essere raggiunto da sonde spaziali o dai primi viaggi interstellari dell'Uomo. È interessante notare quello che ha dichiarato il direttore della NASA Daniel S. Goldin nel 1992:

“Immaginiamo se le analisi spettroscopiche rivelassero l'esistenza di un pianeta blu con un'atmosfera di ossigeno a soli 4 anni luce di distanza, in orbita intorno ad Alfa Centauri. La richiesta per costruire un'astronave interstellare sarebbe immediata!”⁵⁶

Per il momento tutto questo resta un sogno e una grande speranza.

Arriviamo dunque alla grande domanda: potrebbe esistere un pianeta simile alla Terra in orbita attorno a una delle componenti del sistema? La risposta è sì: recentemente (la scoperta risale

⁵⁵ Dopo Alfa Centauri possiamo individuare ancora (in base alla relativa distanza dalla Terra, in un raggio di 10 anni luce): la Stella di Barnard (costellazione di Ofioco, 5,96 anni luce), Wolf 359 (costellazione del Leone, 7,78 anni luce), Lalande 21185 (costellazione dell'Orsa Maggiore, 8,29 anni luce), Sirio (costellazione del Cane Maggiore, 8,58 anni luce), Luyten 726-8 (costellazione della Balena, 8,72 anni luce) e Ross 154 (costellazione del Sagittario, 9,68 anni luce).

⁵⁶ K. Croswell, 1991, "Does Alpha Centauri have intelligent life?", in: *Astronomy Magazine*.

all'ottobre del 2012, quando è stata pubblicata sulla rivista *Nature*⁵⁷ e sul *Corriere della Sera*) gli astronomi dell'università di Ginevra (UNIGE) hanno individuato un altro pianeta simile alla Terra che potrebbe essere in grado di ospitare la vita in orbita attorno ad α Centauri B⁵⁸. Il gruppo ha monitorato per quattro anni α Centauri B (da febbraio 2008 a luglio 2011) usando lo spettrografo HARPS installato sul telescopio di 3,6 metri di diametro dell'*European Southern Observatory* (ESO) all'Osservatorio di La Silla, in Cile. Anche se il pianeta (denominato α Centauri Bb) ruota attorno a una stella poco meno luminosa del Sole e ha una massa comparabile a quella della Terra, Stéphane Udry, direttore dell'osservatorio astronomico di UNIGE, ritiene che sia poco probabile che ospiti delle forme di vita: il pianeta infatti compie un'orbita ogni tre giorni. Ciò significa che è molto vicino alla sua stella e quasi probabilmente la sua superficie è incandescente. Nonostante ciò “la scoperta rappresenta una pietra miliare in campo astronomico” racconta Udry “proprio per il fatto che la maggior parte dei pianeti con una massa relativamente bassa si trovano in sistemi stellari di due, da tre a sei fino addirittura a sette pianeti, fuori dalla zona di abitabilità. Perciò apre buone prospettive per il rilevamento di pianeti nella zona abitabile di sistemi vicini a noi”.⁵⁹

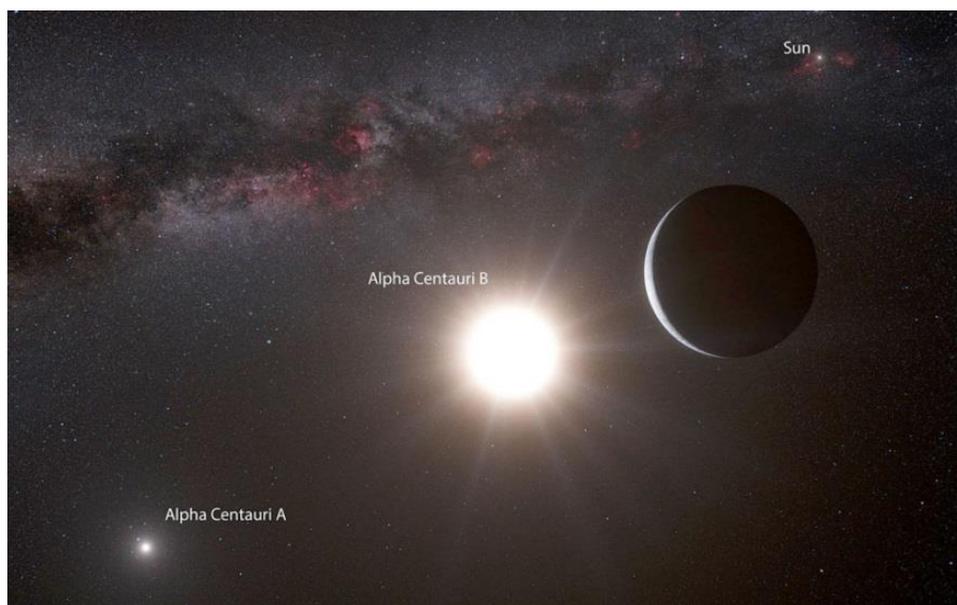


Figura 13: Rappresentazione artistica del pianeta appena scoperto in orbita intorno ad α Centauri B.

⁵⁷ X. Dumusque, F. Pepe ... [et al.], 2012, “An Earth-mass planet orbiting α Centauri B”, in: *Nature - International weekly journal of science*.

⁵⁸ eso.org, “Planet Found in Nearest Star System to Earth”. Web.

⁵⁹ space.com, “Night Sky: Visible Planets, Moon Phases & Events, June 2014”. Web.

4.7.2 51 Pegasi B: il primo pianeta extrasolare

Nell'ottobre del 1995 gli astronomi svizzeri Michel Mayor e Didier Queloz⁶⁰, durante un'osservazione di routine eseguita nella costellazione di Pegaso (nell'emisfero celeste boreale), si accorsero di una stella che non brillava in modo uniforme. Ne misurarono la velocità radiale, grazie all'ausilio di un sensibile spettroscopio (il telescopio dell'Osservatorio di Haute-Provence in Francia), e rilevarono dei piccolissimi cambiamenti di regolarità nella velocità delle linee spettrali (in seguito spiegherò più in dettaglio in cosa consiste il metodo utilizzato per scoprirlo, nel capitolo 5.2.2). Fu così che annunciarono la scoperta forse più importante dalla rivoluzione copernicana: avevano scoperto il primo pianeta extrasolare!

“Quando annunciammo 51 Pegasi B, forse soltanto il 10% delle persone credeva che avevamo trovato un pianeta.” (Didier Queloz)⁶¹

Questi impercettibili cambiamenti sono infatti causati dall'attrazione gravitazionale del pianeta vicino, che si trova ad appena 7 milioni di chilometri dalla stella madre: **51 Pegasi B**, soprannominato Bellerophon (Bellerofonte in italiano), dal nome dell'eroe greco che domò il cavallo alato Pegaso.

Si tratta di un sistema distante 50 anni luce dal Sole, composto da due oggetti principali così vicini tra loro da essere legati dalla reciproca interazione gravitazionale: una stella (come il nostro Sole) e un pianeta che gli orbita attorno⁶². 51 Pegasi è una stella appartenente alla sequenza principale del diagramma H-R⁶³: si trova perciò in uno stato di equilibrio⁶⁴ e, attraverso fenomeni di fusione termonucleare (fusione dell'idrogeno in elio nel nucleo), la stella genera energia. È molto simile al nostro Sole, infatti possiede un raggio pari a 1,266 raggi solari e una massa di 1,11 masse solari

⁶⁰ Michel G.E. Mayor (12 gennaio 1942) e Didier Queloz (23 febbraio 1966) sono entrambi astronomi svizzeri. Il primo è professore al Dipartimento di Astronomia dell'Università di Ginevra, e il secondo (suo allievo) si è laureato in fisica all'Università di Ginevra nel 1990.

⁶¹ Wikipedia Contributors. “51 Pegasi b”. *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Web.

⁶² In generale esistono due tipi di stelle binarie: le binarie visuali (scoperte per osservazione diretta) e le binarie spettroscopiche (scoperte grazie ai cambiamenti periodici nelle righe spettrali per effetto doppler).

⁶³ Il diagramma H-R (di Hertzsprung-Russell, dal nome dei due astronomi Ejnar Hertzsprung e Henry Norris Russell che verso il 1910 lo idearono indipendentemente) è un diagramma teorico che mette in relazione la temperatura effettiva (riportata in ascissa) e la luminosità (riportata in ordinata) delle stelle. Queste ultime due infatti sono quantità fisiche che dipendono strettamente dalle caratteristiche proprie della stella (massa, età, composizione chimica). Esso viene utilizzato per comprendere l'evoluzione e le caratteristiche fisiche di singole stelle e ammassi stellari (ad esempio è possibile confrontare le predizioni teoriche dei modelli di evoluzione stellare con le osservazioni fatte per verificarne l'accuratezza, determinare età, composizione chimica e distanza di una popolazione stellare, derivare la storia della formazione stellare di un agglomerato di stelle).

⁶⁴ La pressione termica (che punta verso l'esterno della stella) contrasta il naturale collasso gravitazionale degli strati della stella (che punta verso l'interno). Si crea perciò un equilibrio.

(quindi solo 0,11 volte maggiore)! A sua differenza però presenta una maggior quantità di elementi pesanti, ossia di elementi diversi da idrogeno ed elio (in generale in astronomia questa caratteristica di un determinato pianeta o stella prende il nome di **metallicità** [2]).

Questa scoperta ha rappresentato una vera e propria pietra miliare nella ricerca astronomica, perché gli astronomi si resero conto che nel cielo non c'erano solo stelle, ma anche pianeti. Ma la cosa più curiosa era che, a differenza del Sistema Solare, potevano esistere anche pianeti di tipo gioviano (giganti gassosi) a piccola distanza dalla stella madre in sistemi planetari extrasolari⁶⁵. Questi sono chiamati pianeti gioviani caldi (o giganti rossi).

In 51 Pegasi, Bellerofonte ne è stata una prova certa, e da allora ne furono scoperti talmente tanti altri simili (come 55 Cancri⁶⁶ e Tau Boötis⁶⁷), che gli astronomi furono obbligati a rivedere le proprie teorie fino a quel momento considerate vere. In particolar modo, dovettero riformulare le teorie sulla formazione planetaria, dato che non ammettevano che un pianeta gigante gassoso potesse orbitare così vicino alla propria stella⁶⁸. Una possibile spiegazione potrebbe riguardare i metodi odierni di ricerca: quest'ultimi infatti potrebbero favorire l'individuazione di questo tipo di sistemi a scapito di altri. Facciamo un esempio: un grande pianeta posto a piccola distanza amplifica le oscillazioni della stella, ed esse sono quindi facilmente visibili come effetto Doppler, mentre un pianeta più piccolo a distanza più grande provoca oscillazioni molto più piccole e difficili da vedere. Un'altra spiegazione considerata valida è che i pianeti si siano formati a distanze maggiori, per poi muoversi verso l'interno a causa delle reciproche interazioni gravitazionali. Tale modello è stato chiamato **modello dei Giovi Saltellanti** [3].

Ultimamente sono stati pure scoperti (soprattutto grazie alla missione Kepler⁶⁹) pianeti più piccoli del tipo Super Terra, ossia corpi rocciosi massivi come la Terra ma con una massa da 2 a 20 volte superiore.

⁶⁵ Circa il 60% di quelli scoperti fino ad ora si trova a meno di 1UA dalla stella madre. Interessante notare la grossa differenza con quanto avviene nel Sistema Solare: Giove orbita a circa 5UA dal Sole!

⁶⁶ 55 Cancri è una stella doppia distante 40,9 anni luce dal Sistema Solare (nella costellazione del Cancro). Essa è composta da 55 Cancri A (le cui dimensioni sono appena inferiori a quelle del nostro Sole) e 55 Cancri B (una nana rossa), le quali distano tra loro oltre 1000UA. A sua volta orbitano 5 pianeti gassosi attorno a 55 Cancri A. Importante notare come 55 Cancri Af (l'ultimo scoperto, nel novembre 2007) si trova nella cosiddetta zona abitabile. Si tratta di un pianeta extrasolare orbitante a sole 0,781UA dalla propria stella madre.

⁶⁷ Tau Boötis è un sistema stellare binario composto da Tau Boötis A e Tau Boötis B nella costellazione del Boote a 51 anni luce dalla Terra. Nel 1996 è stato scoperto un pianeta extrasolare attorno alla componente primaria: Tau Boötis Ab. Il pianeta ha una massa di almeno 4 volte quella di Giove e orbita molto vicino alla stella, solo 0,0481UA. Sono stati rivelati alcuni elementi a favore dell'esistenza di un altro possibile pianeta, più esterno, in orbita a Tau Boötis A, ma al momento non c'è stata nessuna conferma.

⁶⁸ Questo non è possibile perché così non avrebbe sufficiente massa a disposizione nel disco protoplanetario e la temperatura sarebbe troppo alta per consentire la formazione di planetesimi ghiacciati o rocciosi.

⁶⁹ La missione Kepler è una missione spaziale della NASA che ha come scopo la ricerca e la conferma di pianeti extrasolari tramite l'utilizzo del telescopio spaziale Kepler. Il veicolo spaziale (chiamato in onore dell'astronomo tedesco del XVII secolo Johannes Kepler) è stato lanciato con successo il 7 marzo 2009.

4.7.3 Gliese 581 C: il primo pianeta extrasolare in una zona abitabile

Gliese 581 C è un pianeta extrasolare distante circa 20,5 anni luce dal Sole e orbitante attorno alla sua stella madre Gliese 581⁷⁰, una debole nana rossa visibile nella costellazione della bilancia. Si tratta del secondo pianeta scoperto attorno alla stella (il primo fu Gliese 581 B nel 2005) e del terzo in ordine di distanza da essa. È stato classificato tra le super Terre, possedendo una massa minima di circa 5,6 volte la massa terrestre (M_{\oplus} ⁷¹).

La sua scoperta fu annunciata nel 24 aprile 2007 dal gruppo di Stéphane Udry dell'Università di Ginevra.⁷² L'individuazione è stata resa possibile utilizzando lo strumento HARPS montato sul telescopio da 3,6 m dell'ESO in Cile e sfruttando la tecnica dell'analisi della velocità radiale (vedi il capitolo 5.2.2).

Ma ciò che più di tutto suscitò l'interesse degli astronomi fu che Gliese 581 C venne considerato il primo esopianeta simile alla Terra ad orbitare nella zona abitabile del suo sistema planetario. Perciò, esattamente come nel caso della Terra all'interno del Sistema Solare, avrebbe avuto una temperatura superficiale idonea a mantenere l'acqua allo stato liquido, caratteristica che lo avrebbe reso potenzialmente abitabile da forme di vita molto semplici e primitive, affini a quelle estremofile presenti attualmente sul nostro pianeta.

“L'obiettivo è quello di trovare la vita su un pianeta come la Terra attorno ad una stella come il Sole. Questa scoperta rappresenta un grande passo verso il raggiungimento di quest'ultimo. E ogni volta che si compie un passo avanti, la nostra determinazione aumenta.”

(Stéphane Udry)⁷³

Tuttavia, studi successivi hanno escluso questa possibilità, dal momento che il pianeta ricade ben più internamente della zona abitabile⁷⁴. Inoltre, stando ai modelli climatici precedentemente sviluppati per i pianeti rocciosi conosciuti, sembrerebbe che Gliese 581 C sia soggetto ad un effetto serra addirittura superiore a quello di Venere. Pertanto le temperature del pianeta sarebbero di gran lunga più elevate (fino a ~500 °C), l'acqua non esisterebbe (già da lungo tempo evaporata) e l'atmosfera sarebbe quasi priva di ossigeno: un luogo davvero inospitale per qualsiasi forma di vita immaginabile.

⁷⁰ Tanto per dare un'idea, questo sistema costituisce l'87-esimo sistema stellare più vicino alla Terra in quanto dista circa 20,3 anni luce.

⁷¹ È il simbolo convenzionale usato per indicare la massa terrestre, che equivale a circa $5,9736 \cdot 10^{24}$ kg.

⁷² In concomitanza si è avuta anche la scoperta di Gliese 581 D.

⁷³ space.com, “Major Discovery: New Planet Could Harbor Water and Life”. Web.

⁷⁴ Gliese 581 C compie un'orbita completa attorno alla sua stella in poco meno di 13 giorni!



Figura 14: Impressione artistica del sistema planetario attorno a Gliese 581.

4.8 L'occhio di CHEOPS

Si tratta di una missione spaziale destinata allo studio di pianeti extrasolari. Fu approvata per la prima volta il 19 ottobre 2012 dall'European Space Agency (ESA), in collaborazione con la Svizzera e la partecipazione dell'Italia (attraverso l'Istituto Nazionale di Astrofisica, INAF, e l'Agenzia Spaziale Italiana, ASI), Austria, Belgio, Francia, Germania, Ungheria, Portogallo, Svezia e Regno Unito. Il **satellite CHEOPS** (acronimo che sta per "CHaracterising ExOPlanets Satellite") verrà lanciato nel 2017 e il viaggio durerà circa 5 anni: si tratta della prima di una nuova serie di missioni a breve durata (chiamate "S-class missions") nel programma scientifico, cui i grossi vantaggi sono il basso costo e la fattibilità in breve tempo, al fine di offrire una maggiore flessibilità in risposta a nuove idee della comunità scientifica.⁷⁵

Il suo compito principale sarà quello di fare osservazioni molto precise di stelle attorno alle quali è già nota la presenza di pianeti o è ancora da confermare: quindi il suo lavoro consisterà non tanto nello scoprire nuovi esopianeti, ma piuttosto di caratterizzare meglio quelli già individuati. In particolare si interesserà dello studio di una classe specifica: le super Terre^{76,77}.

È un progetto assai significativo, sia dal punto di vista scientifico che tecnologico, e a tale proposito Isabella Pagano, dell'Osservatorio Astrofisico di Catania (una dei tre membri del team italiano

⁷⁵ sci.esa.it, "CHEOPS". Web.

⁷⁶ Si tratta di mondi promettenti per lo sviluppo di forme di vita, in quanto potenzialmente in grado di avere un'atmosfera stabile, attività tettonica e acqua allo stato liquido, proprio come il nostro pianeta (questo argomento verrà in seguito approfondito nel capitolo 6 dedicato all'astrobiologia).

⁷⁷ H.A.Smith, 3 dicembre 2012, "Siamo soli nell'universo?", in: *Le Scienze*.

proponente la missione), ne spiega il motivo: “CHEOPS sarà in grado di misurare, in quella frazione di sistemi extrasolari dove i pianeti transitano davanti alla loro stella madre, la loro dimensione con grande accuratezza” racconta. “Questo parametro è molto importante perché ci permetterà di risalire alla densità di quei pianeti e quindi alla loro struttura interna. Un’informazione decisiva per capire come i pianeti si siano formati e più in generale come siano fatti i sistemi planetari al di fuori del nostro”.⁷⁸ CHEOPS utilizzerà pertanto il metodo dei transiti per rilevare gli esopianeti (vedi capitolo 5.2.4), dei quali si presterà particolare attenzione per l’identificazione di ambienti significativi e il loro studio futuro con telescopi della prossima generazione, come l’European Extremely Large Telescope (E-ELT) a terra o il James Webb Space Telescope (JWST) in orbita.

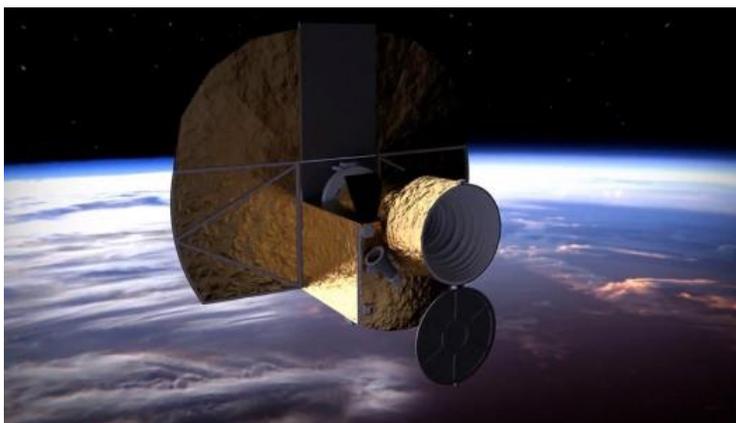


Figura 15: Impressione artistica del satellite CHEOPS.

5 Metodi matematici e algoritmi per la determinazione di nuovi pianeti di tipo terrestre

L’Uomo ha cominciato a studiare pianeti extrasolari principalmente per due motivazioni scientifiche: prima di tutto per verificare i modelli di formazione ed evoluzione di sistemi planetari in un grandissimo numero di sistemi extrasolari (poiché il Sistema Solare potrebbe non essere rappresentativo dei sistemi planetari), e poi per quantificare a grandi linee la frequenza di pianeti con condizioni fisiche atte a sostenere la vita. “Per capire l’origine della Terra, abbiamo bisogno di capire l’origine dei pianeti in generale”, ha detto Lynne Hillenbrand, un professore di astronomia presso l’Istituto di Tecnologia della California. “Come si formano, come si evolvono? Come funziona il nostro Sistema Solare rispetto ai giganti gassosi e ai piccoli pianeti rocciosi degli altri sistemi? Queste sono domande molto importanti per l’umanità”.⁷⁹

⁷⁸ asi.it, “CHEOPS, una missione per svelare i segreti degli esopianeti”. Web.

⁷⁹ nemsisprojectresearch.blogspot.ch, “Nuova Tecnica Per Osservare I Pianeti Extrasolari Direttamente”. Web.

La ricerca di esopianeti sta acquistando sempre più l'interesse di scienziati, astronomi e biologi, ma è più di ogni altra cosa l'idea di un altro pianeta Terra a far sognare l'Uomo: colmo di vita vegetale e animale, acqua, cibo, gravità e una temperatura mite, ma soprattutto con l'obiettivo di scovare una seconda casa per la nostra civiltà. Sono previste numerose missioni spaziali tra il 2013 e il 2022 dedicate a tale scopo, o in ogni caso capaci di fornire importanti contributi ed informazioni per raggiungerlo. La scoperta di un nuovo pianeta abitabile dall'Uomo, identificato spesso con Pandora, il lussureggiante pianeta immaginario dove è ambientato il film *Avatar* (2009), avrebbe sull'opinione pubblica e sulla comunità scientifica lo stesso effetto esplosivo che ebbe lo sbarco sulla Luna nel 1969, capace di alimentare ancora una volta lo stesso interesse per l'esplorazione dello Spazio avuto in passato.

Anche se fino ad oggi i pianeti extrasolari conosciuti non si assomigliano più di tanto alla nostra amata Terra, ma piuttosto ai giganti gassosi del Sistema Solare (come Giove e Saturno), le tecniche osservative utilizzate migliorano sempre più, raggiungendo un livello di precisione e sensibilità mai visto prima d'ora. Nel prossimo grande capitolo introdurrò i principali metodi di rivelazione dei pianeti extrasolari, che, grazie al vertiginoso progresso tecnologico e alla conoscenza sempre più approfondita di questi oggetti, si sono perfezionati nel corso degli ultimi decenni. Fondamentalmente esistono due tipi di rilevamento: quello diretto e quello indiretto (vedi capitoli 5.1 e 5.2). A sua volta il rilevamento indiretto vanta numerose tecniche per osservare indirettamente un esopianeta, cioè attraverso gli effetti che quest'ultimo induce sulla sua stella: alcuni esempi sono il metodo astrometrico, delle velocità radiali, del transito e delle microlenti gravitazionali, mentre moltissimi altri ancora verranno approfonditi nei prossimi capitoli (dal 5.2.1 al 5.2.6).

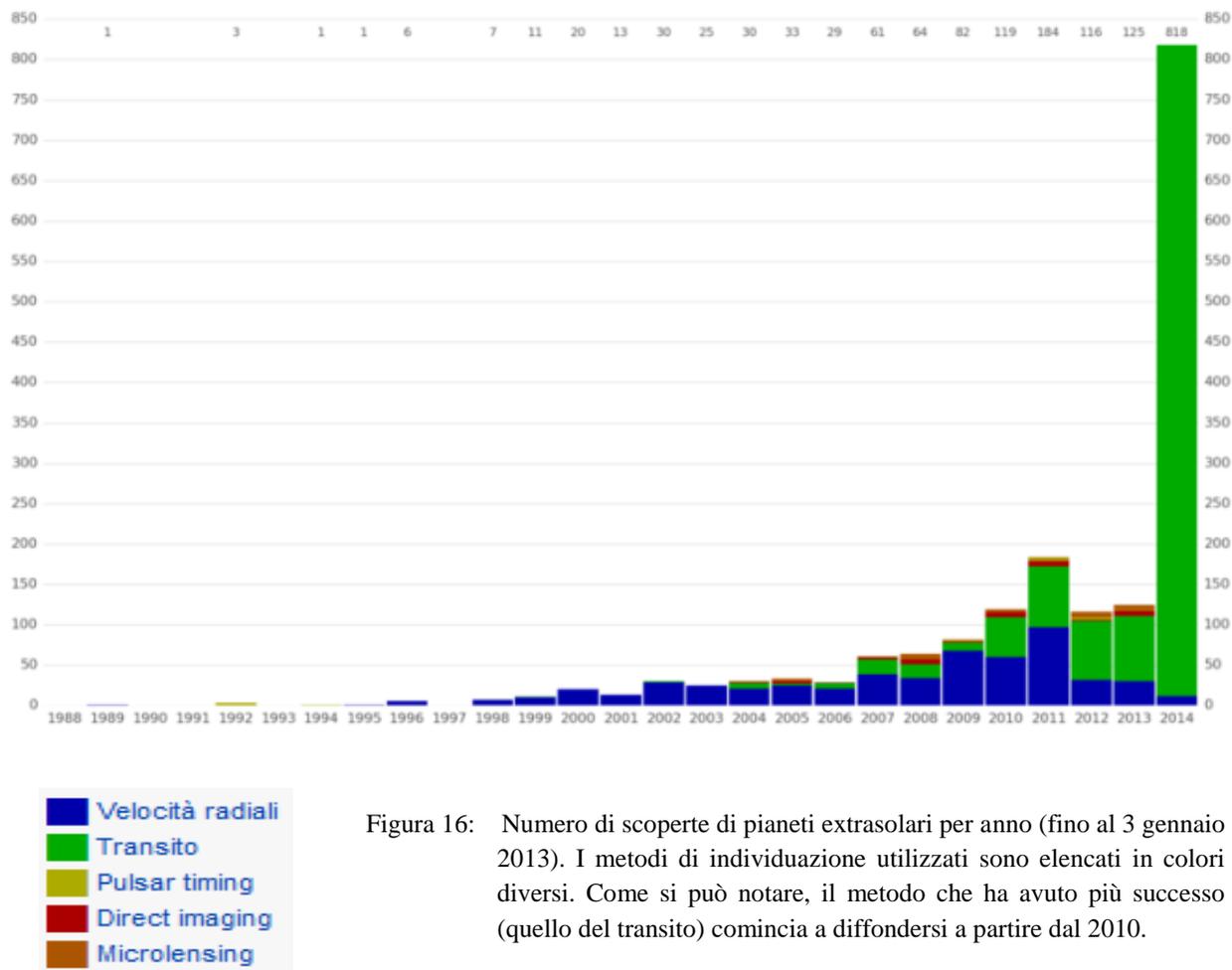


Figura 16: Numero di scoperte di pianeti extrasolari per anno (fino al 3 gennaio 2013). I metodi di individuazione utilizzati sono elencati in colori diversi. Come si può notare, il metodo che ha avuto più successo (quello del transito) comincia a diffondersi a partire dal 2010.

5.1 Rilevamento diretto

L'individuazione di esopianeti mediante il **rilevamento diretto (o *imaging* diretto)** è resa particolarmente difficile proprio perché la maggior parte delle volte l'osservazione del pianeta è disturbata dalla luminosità della stella madre, molto più potente di quella riflessa dal pianeta, e dalla piccolissima separazione angolare fra i due. L'operazione risulta però facilitata nel caso in cui si trattasse di un pianeta molto massivo (addirittura più grande di Giove), con un'orbita lontana e possibilmente molto caldo, in modo tale da emettere radiazione infrarossa e ridurre il contrasto: in questo modo il pianeta risulta più luminoso nell'infrarosso che nello spettro della luce visibile.⁸⁰

⁸⁰ strangenewworlds.jimdo.com, "Metodi di detezone". Web.

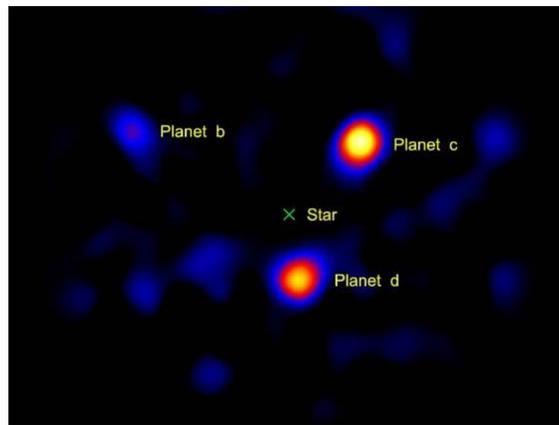


Figura 17: Fotografia infrarossa dei tre pianeti conosciuti attorno alla stella HR 8799, scattata dal telescopio Hale. La luce della stella è bloccata dal Vector Vortex Coronagraph.

“Siamo accecati dalla luce stellare”, disse precedentemente Robert Oppenheimer (1904-1967). “Una volta che possiamo realmente vedere questi pianeti extrasolari, possiamo determinare i colori che emettono, le composizioni chimiche delle loro atmosfere e anche le caratteristiche fisiche delle loro superfici. In ultima analisi, le misurazioni dirette, se condotte dallo spazio, possono essere utilizzate per comprendere meglio l'origine della Terra e per cercare segni di vita in altri mondi”.⁸¹ Fino al 2010 i più potenti telescopi del mondo, come il Gemini e l'ESO, riuscivano a fotografare pianeti extrasolari solamente sotto queste particolari condizioni, ma grazie al successo del *Vortex Coronagraph*, oggi anche i telescopi minori possono avere una possibilità: infatti, l'utilizzo di coronografi a vortice (anche chiamati *occulter* o *starshade*, a dipendenza se sono montati all'interno o all'esterno al telescopio) per l'osservazione diretta di esopianeti permette di oscurare la luce proveniente dalla stella madre e di lasciar passare quella emessa dal pianeta, rendendo così le individuazioni molto più semplici⁸². Questa nuova tecnica permetterebbe effettivamente non solo di riuscire ad osservare pianeti di massa terrestre, con orbite anche molto strette, ma soprattutto di vedere ancora più lontano rispetto al nostro Sistema Solare.

Altra tecnica è quella dell'interferometria, inizialmente sviluppata da Antoine Labeyrie (12 maggio 1943) a partire dal 1970. Essa consiste nell'utilizzo di un gruppo di efficienti telescopi di piccole dimensioni per ottenere immagini ad alta risoluzione. In questo modo non è più necessario costruire un unico enorme telescopio con una grandissima apertura (dal costo molto elevato), ma è sufficienti un gruppo ristretto di telescopi relativamente piccoli distribuiti sul terreno secondo uno schema. In seguito tutte le informazioni provenienti da ognuno di essi verranno combinate coerentemente al fine di aumentare la risoluzione spaziale. Si tratta di una tecnica particolarmente utilizzata nel campo della radioastronomia, basata sul principio di interferenza delle onde elettromagnetiche.

⁸¹ nemsisprojectresearch.blogspot.ch, “Nuova Tecnica Per Osservare I Pianeti Extrasolari Direttamente”. Web.

⁸² newworlds.colorado.edu, “Coronagraphs and Occulters”. Web.

Oltre che per lo studio di pianeti extrasolari, viene anche utilizzata per misurare le distanze di sistemi stellari binari o multipli stretti.⁸³

Il primo pianeta⁸⁴ extrasolare scoperto con il rilevamento diretto è stato 2M1207 b, compagno della nana bruna 2M1207 a 170 anni luce di distanza. Famoso anche per essere il primo esopianeta scoperto in orbita attorno a una nana bruna, fu individuato solo 10 anni fa, nel 2004, da un gruppo di astronomi dell'ESO con il telescopio VLT (Very Large Telescope) all'Osservatorio del Paranal, in Cile.⁸⁵

Altro esopianeta degno di nota è β Pictoris b, con una massa dalle 4 alle 11 volte quella di Giove a circa 63 anni luce dalla Terra. Fu scoperto nel 2009 grazie ad un nuovissimo strumento ottico ad alto contrasto chiamato GPI (Gemini Planet Observer) montato sul telescopio Gemini South in Cile^{86,87}. Il 30 aprile 2014 gli astronomi del VLT annunciarono la sua velocità di rotazione record: da osservazioni fatte all'ESO, sembrerebbe che il pianeta percorra la sua orbita in sole 8 ore, con una velocità di 100'000 chilometri orari (contro i 47'000 di Giove)!⁸⁸

5.2 Rilevamento indiretto

È estremamente difficile osservare direttamente un pianeta extrasolare, in quanto riflette molta meno luce (circa un milione di volte in meno) rispetto a quella che emette la stella attorno a cui orbita e la maggior parte delle volte la poca luce riflessa viene coperta da quella stellare. Inoltre, a distanze interstellari, sarebbe come cercare di vedere una candela vicino a un faro da una distanza di 1000 km! Per fortuna però gli astri inviano continuamente nello spazio un'enorme quantità di messaggi sotto forma di radiazione elettromagnetica che, se opportunamente rivelati e decodificati, possono essere di grande aiuto per capire di cosa sono fatti i corpi celesti, come si sviluppano e qual è il loro ruolo nell'Universo. Di questa radiazione emessa gran parte è luce, mentre una piccola parte è materia. E della parte luminosa solo una minima frazione è visibile ai nostri occhi tramite i telescopi: la maggior parte dei messaggi che arrivano sulla Terra sono invisibili.

⁸³ Wikipedia Contributors. "Interferometria astronomica". *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Web.

⁸⁴ È ancora oggetto di dibattito la sua classificazione: può essere considerato una sub-nana bruna in quanto la sua massa è minore della massa minima consentita per una nana bruna, un pianeta (perché la sua massa è insufficiente ad innescare le reazioni di fusione del deuterio, come una vera e propria nana bruna), e un planemo, dato che ha una massa maggiore di un pianeta di forma irregolare ma non quanto quella di una stella con reazioni di fusione nucleare.

⁸⁵ space.com, "Likely First Photo of Planet Beyond the Solar System". Web.

⁸⁶ Già nel 1989 si osservò un disco circumstellare attorno alla stella (vedi capitolo 5.2.6), facendo intuire la presenza di altri pianeti.

⁸⁷ focus.it, "Gli 'occhiali' del telescopio Gemini South per osservare gli esopianeti". Web.

⁸⁸ solstation.com, "Beta Pictoris", di: Sol Company. Web.

Per questa ragione sono state sviluppate delle **tecniche di rilevamento indiretto**: anziché osservare un esopianeta direttamente tramite un enorme telescopio, si osserva la perturbazione gravitazionale del moto della stella madre indotta dal campo gravitazionale di quest'ultimo e se ne deduce quindi la sua presenza.

Per confermare con sicurezza la presenza di un pianeta si dovrà ricorrere a più di una tecnica. Nei prossimi capitoli 5.2.1 fino a 5.2.6 presenterò e descriverò le principali tecniche di rilevamento indiretto utilizzate oggi, alcune più efficaci di altre. In generale si possono suddividere in due grandi gruppi, a dipendenza degli effetti che il pianeta causa sulla sua stella: perturbazioni gravitazionali del moto stellare e variazioni di luminosità stellare. Appartengono al primo gruppo il metodo astrometrico e l'osservazione dei dischi circumstellari e protoplanetari, mentre al secondo i metodi delle velocità radiali, del transito, del microlensing gravitazionale e il pulsar timing. Al momento il metodo che ha fruttato più scoperte è stato quello delle velocità radiali, che ha fornito 203 nuovi pianeti sui 500 circa conosciuti⁸⁹, e quello del transito. Come si può vedere anche dalla figura 16, il primo metodo era già abbastanza diffuso a partire dal XXI secolo, mentre il secondo inizia a diffondersi solo dieci anni dopo (dal 2010).

Introdurrò inoltre celebri personaggi come Friedrich Bessel, che con il metodo astrometrico riuscì a scoprire Sirio B, Jocelyn Bell e Antony Hewish, che scoprirono la prima pulsar nel 1967, Bohdan Paczyński, che, grazie alla sua stravagante idea di lente per osservare la materia oscura, riuscì a perfezionare un nuovo metodo per l'individuazione di pianeti extrasolari, e spiegherò l'importanza di missioni spaziali come CoRoT e Kepler e di vari altri progetti, quali OGLE, MOA e PLANET.

Con questi metodi principalmente sono stati scoperti pianeti giganti gassosi, simili o addirittura più grandi di Giove, ma anche in alcuni casi pianeti un po' più grandi della Terra, come le Super Terre; molti di questi orbitano ad una distanza piccolissima dalla stella madre, rendendoli un luogo davvero infuocato, altri invece possiedono orbite talmente eccentriche, che è solo possibile immaginare cosa succeda d'estate e d'inverno. Unicamente il progredire delle tecnologie e delle strumentazioni all'avanguardia potrà dirci cos'altro ci aspetta là fuori, nell'immenso Universo.

5.2.1 Metodo astrometrico

Con il **metodo astrometrico** si procede alla misurazione precisa della posizione di una stella nel cielo e all'osservazione di eventuali modifiche del moto apparente di quest'ultima, dovute all'interazione gravitazionale con un altro corpo celeste invisibile, affinché si possa confermare la presenza di un altro pianeta nel sistema.⁹⁰ Si tratta del primo metodo utilizzato per individuare pianeti extrasolari (i primi tentativi risalgono al 1943).

⁸⁹ Wikipedia Contributors. "Metodi di individuazione di pianeti extrasolari". *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Web.

⁹⁰ Il moto apparente di una stella vicina non è rettilineo se intorno ad essa è presente un pianeta.

Sapendo che il moto della stella è una curva sinusoidale, si applica la seguente formula per ricavare l'angolo θ (in arcsec), come illustrato nella figura 17:

$$\theta = \frac{M_p}{M_*} \cdot \frac{a}{d}$$

dove M_p è la massa del pianeta, M_* la massa della stella, a il semiasse maggiore dell'orbita (in UA) e d la distanza (in pc). Se la stella è molto lontana, l'angolo θ risulta estremamente piccolo (fino addirittura a meno di 0,001 arcsec!).

Grazie ad esso furono individuati molti candidati, ma nessuno fu mai confermato come pianeta: è stato quindi necessario confermare l'osservazione con altri metodi. Di conseguenza il suo uso fu limitato, a favore di altri metodi più precisi e affidabili (introdurrò questi metodi nei capitoli successivi, da 5.2.2 fino a 5.2.6). La difficoltà sta nel fatto che richiede una misura molto accurata del moto proprio di una stella: se quest'ultima dovesse avere un pianeta (extrasolare) in orbita, ad esempio, il suo moto presenterebbe piccole oscillazioni periodiche, ma sfortunatamente queste sono talmente impercettibili che persino i migliori telescopi esistenti non riescono a scorgerele. L'unica soluzione, affinché le misure siano rese più facili e attendibili, sarebbe quella di osservare le orbite dei pianeti in modo perpendicolare rispetto alla Terra (la nostra linea di vista)⁹¹, ma ciò è solo raramente possibile, dato che per la maggior parte dei casi la condizione non viene rispettata. Inoltre il segnale astrometrico risulta più sensibile se la massa del pianeta in orbita è molto grande e la sua distanza dalla stella relativamente piccola.⁹² Il metodo viene pertanto applicato unicamente su stelle abbastanza vicine alla Terra (poste entro un raggio di 10 parsec).

Una delle stelle più famose scoperte con questo metodo fu Sirio B, la compagna invisibile della stella più brillante di tutto il cielo notturno (nella costellazione del Cane Maggiore). Fu l'astronomo tedesco Friedrich Bessel (1784-1846) che nel 1844 ipotizzò, studiando le oscillazioni periodiche del moto proprio della stella, che Sirio potesse avere una compagna. Fu poi osservata per la prima volta nel 1862 da Alvan Clark (1832-1897), che la denominò anche così. Le due stelle furono definite binarie astrometriche, perché appunto scoperte con il metodo astrometrico.

Un progetto futuro finalizzato a rivelare un grande numero di pianeti extrasolari è la missione GAIA dell'ESA. Con il viaggio di questo satellite infatti, già lanciato il 19 dicembre 2013, si spera di riuscire a rivelare, attraverso l'effettuazione di misure astrometriche di altissima precisione, alcune decine di migliaia di pianeti extrasolari e ad effettuare una vera e propria mappa tridimensionale della porzione di Galassia vicina a noi. La missione durerà all'incirca 5 anni.⁹³

⁹¹ Si intende osservare le orbite dei pianeti di "faccia" e non di "taglio".

⁹² wwwuser.oats.inaf.it, "Metodi indiretti di rivelazione di esopianeti: Il metodo astrometrico". Web.

⁹³ nasaspaceflight.com, "Soyuz ST-B successfully launches Gaia space observatory". Web.

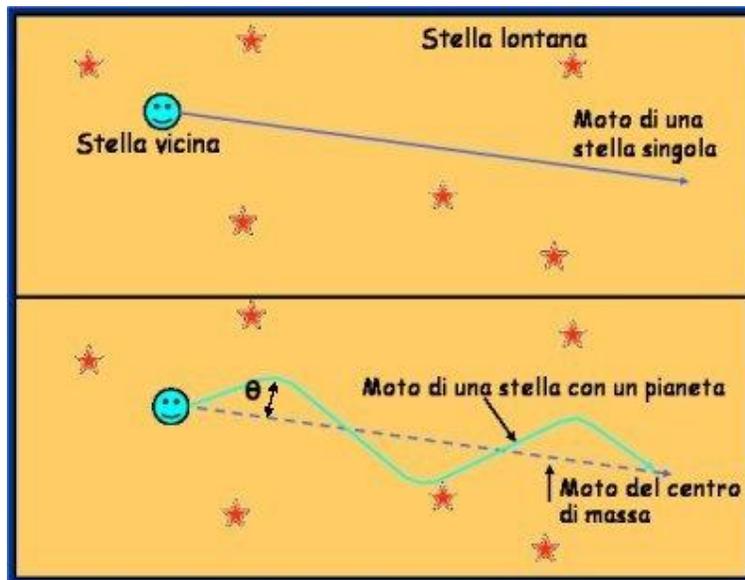


Figura 18: L'immagine mostra come la presenza di un secondo corpo nel sistema (ad esempio un pianeta extrasolare) possa cambiare, anche se in modo impercettibile, il moto apparente della sua stella. Perciò esso non risulterà rettilineo, bensì una curva sinusoidale.

5.2.2 Metodo delle velocità radiali

Il **metodo delle velocità radiali** (anche detto **spettroscopia Doppler**) è stato quello che ha avuto maggior successo durante la prima fase delle ricerche (già a partire dal 1989, ma con maggiori risultati solo 10 anni dopo). L'analisi spettrografica della luce proveniente da una stella all'interno di un sistema binario permette di misurarne la variazione di **velocità radiale** [4] (causata dall'attrazione gravitazionale di un altro pianeta apparentemente invisibile) tramite il cosiddetto **effetto Doppler** [5], che consente quindi di stabilire inequivocabilmente la presenza o meno di un secondo corpo nel sistema. Inoltre è possibile stimarne il periodo orbitale e la massa minima⁹⁴.

⁹⁴ Quest'ultima è possibile calcolarla attraverso la III legge di Keplero (vedi capitolo 4.2).

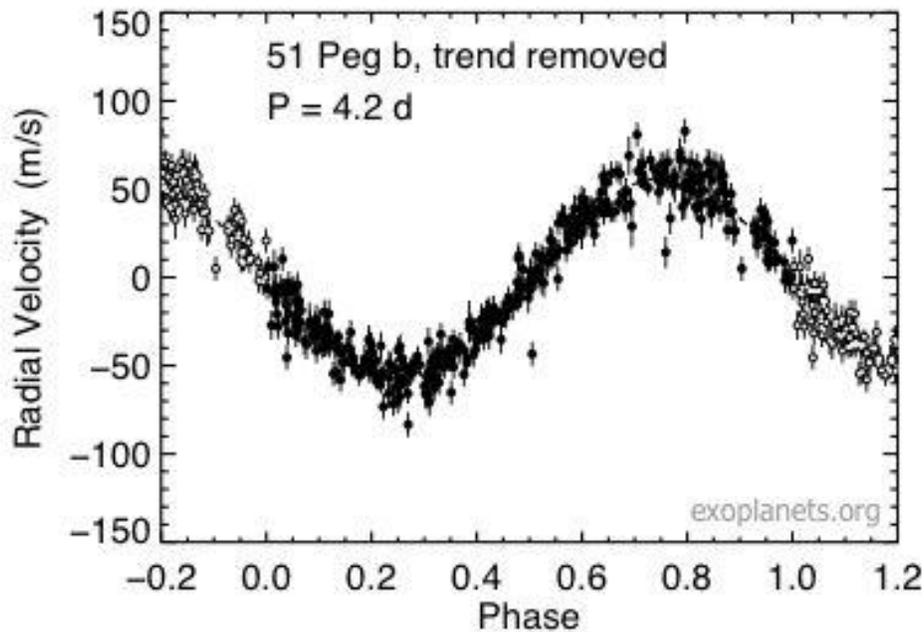


Figura 19: Grafico che raffigura la curva di velocità radiale di 51 Pegasi B (con andamento sinusoidale). Sono poste la velocità radiale della stella visibile sull'asse delle ordinate e il tempo (fasi orbitali del pianeta) su quello delle ascisse.

La velocità radiale V_r si può esprimere con la formula:

$$V_r = \frac{\omega a \sin i}{\sqrt{1 - e^2}} \cdot (e \cos \beta + \cos \alpha)^{95}$$

dove ω è il movimento angolare medio, a il semiasse maggiore dell'orbita ellittica descritta dal pianeta (dove $|\vec{\omega} \times \vec{a}| = \omega a \cdot \sin i$), e l'eccentricità dell'orbita, i l'inclinazione del piano dell'orbita rispetto all'eclittica terrestre, e α l'angolo che il raggio vettore forma in ogni istante con la linea dei nodi.⁹⁶

⁹⁵ ($e \cos \beta$) è possibile trascurarlo.

⁹⁶ scienzaatscuola.it, "Pianeti Extrasolari: Velocità Radiali". Web.

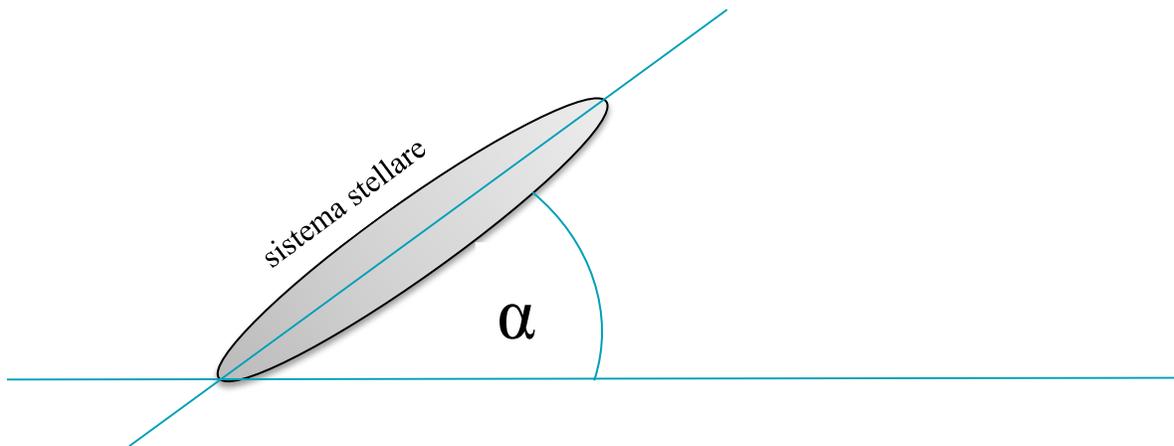


Figura 20: A dipendenza della nostra linea di vista, l'angolo α tra il sistema stellare e il piano orizzontale varia: se $\alpha = 90^\circ$, allora $\cos \alpha = 0$, mentre se $\alpha = 0^\circ$, allora $\cos \alpha = 1$.

Mentre l'ampiezza della velocità radiale V_r è data dalla formula:

$$V_r = \left(\frac{2\pi G}{P} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{M_p \sin i}{(M_p + M_*)^{\frac{2}{3}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - e^2}}$$

dove M_* è la massa della stella, M_p la massa del pianeta (trascurabile), P il suo periodo orbitale, e la sua eccentricità, G la costante di gravitazione universale equivalente a $6,67259 \cdot 10^{-11} \frac{Nm^2}{kg^2}$.

Fu nel 1952 che Otto Struve (1897-1963) fece per la prima volta l'uso di potenti spettrografi al fine di rilevare pianeti distanti. Egli predisse che i piccoli cambiamenti della luce emessa da una stella (misurati con l'effetto Doppler) erano il risultato delle continue variazioni della sua velocità radiale, e che era possibile rilevarle dalla maggior parte degli spettrografi sensibili esistenti a quell'epoca. C'era comunque una possibilità d'errore molto grande, e di conseguenza le misure si dimostrarono inutili per il rilevamento di pianeti extrasolari (solitamente i cambiamenti attesi nella velocità radiale sono molto piccoli).

La tecnica si dimostra ristretta unicamente alle stelle più brillanti, in modo tale che le piccole variazioni della velocità radiale sono più facilmente visibili. Inoltre è più semplice individuare pianeti in orbita relativamente vicini alla loro stella madre, mentre per osservare pianeti di lungo periodo (come ad esempio Urano o Nettuno) con un raggio orbitale maggiore di 10 UA sono necessarie osservazioni che coprano più anni per poter osservare un intero periodo orbitale⁹⁷. Ulteriori difficoltà potrebbero incorrere anche a causa degli effetti Doppler dovuti a fenomeni di attività stellare, che maschererebbero quello indotto dal pianeta, come ad esempio pulsazioni

⁹⁷ È forse una delle più grandi limitazioni che riguardano questa tecnica (presente anche nel metodo astrometrico).

intrinseche stellari⁹⁸ o la variabilità magnetica (che genera quei fenomeni che conosciamo come macchie solari e flare).

Con questa tecnica furono scoperti i pianeti 51 Pegasi B (nel 1995, da Michel Mayor e Didier Queloz), α Centauri Bb (nel 2012, da un gruppo di astronomi dell'università di Ginevra), Gliese 581 C (nel 2007, dal gruppo di Stéphane Udry dell'Università di Ginevra) e moltissimi altri.

5.2.3 Pulsar timing

Una pulsar (nome che sta per sorgente radio pulsante, dall'inglese *pulsating star*) è una stella di neutroni⁹⁹ altamente magnetizzata e che emette un fascio regolare di radiazioni elettromagnetiche (onde radio) ogni pochi secondi ruotando molto velocemente su se stessa. Sono oggetti estremamente piccoli (con un raggio pari a circa una decina di chilometri) ma con una densità enorme: la massa è solitamente comparabile a quella del Sole. La loro formazione avviene in seguito al collasso di una stella come supernova di tipo II¹⁰⁰. La scoperta risale al 1967 da parte di Jocelyn Bell (15 luglio 1943) e Antony Hewish (11 maggio 1924), mentre quella delle pulsar millisecondo (ancora più veloci delle pulsar ordinarie) risale agli anni 1970-1980.¹⁰¹

Proprio per il fatto che le pulsar possiedono un'estrema regolarità temporale negli impulsi emessi, esse si dimostrano uno strumento molto utile per l'identificazione indiretta di pianeti extrasolari orbitanti attorno ad esse. È possibile infatti dedurre la presenza di un altro pianeta nel sistema grazie al passaggio di quest'ultimo davanti al fascio di luce emesso dalla pulsar, in quanto provocherà piccole variazioni degli intervalli di emissione.

Con questo metodo, chiamato **metodo delle variazioni degli intervalli di emissione di una pulsar** (o semplicemente dall'inglese *pulsar timing*), nel 1992 l'astronomo polacco Aleksander Wolszczan (29 aprile 1946) insieme a Dale Frail scoprirono il primo sistema multiplo ad orbitare attorno ad una pulsar (anche prima della scoperta di 51 Pegasi B!). PSR B1257+12 B e C (i due esopianeti scoperti) furono anche i primi mai confermati davvero. È possibile che siano sopravvissuti e divenuti dei nuclei rocciosi (in precedenza giganti gassosi) in seguito all'esplosione della stella madre in supernova di tipo II, che ha spazzato via l'atmosfera e causato il rientro della loro orbita. Una seconda ipotesi presume invece che i pianeti si siano formati in seguito all'esplosione grazie ai detriti lasciati dalla supernova.¹⁰² Tuttavia questi oggetti non possono essere considerati dei veri e

⁹⁸ Moti convettivi tra la superficie e l'interno della stella che nel Sole equivalgono ad emissioni di massa coronale. Possono divenire rilevanti nel caso di una stella di diametro maggiore (le cosiddette stelle variabili reali).

⁹⁹ Chiamata così in quanto contiene 20 volte più neutroni che protoni.

¹⁰⁰ A sua volta essa si forma dal collasso interno e dalla conseguente violenta esplosione di una stella massiccia (con una massa superiore a 9 volte quella del Sole).

¹⁰¹ Wikipedia Contributors. "Pulsar". *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Web.

¹⁰² Wikipedia Contributors. "PSR B1257+12". *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Web.

propri esopianeti, poiché sono resti della supernova da cui è nata la pulsar e hanno avuto una formazione del tutto diversa dai pianeti extrasolari convenzionali: intorno alle pulsar non esiste una “zona di abitabilità”.¹⁰³

Questo metodo è unicamente applicabile a stelle che mostrano fenomeni assai periodici, come appunto le pulsar, ma benché sia molto preciso, non è estremamente utile in quanto permette di individuare esopianeti solo attorno a stelle ormai morte. In compenso però risulta più semplice individuare pianeti di massa terrestre e sistemi multipli.

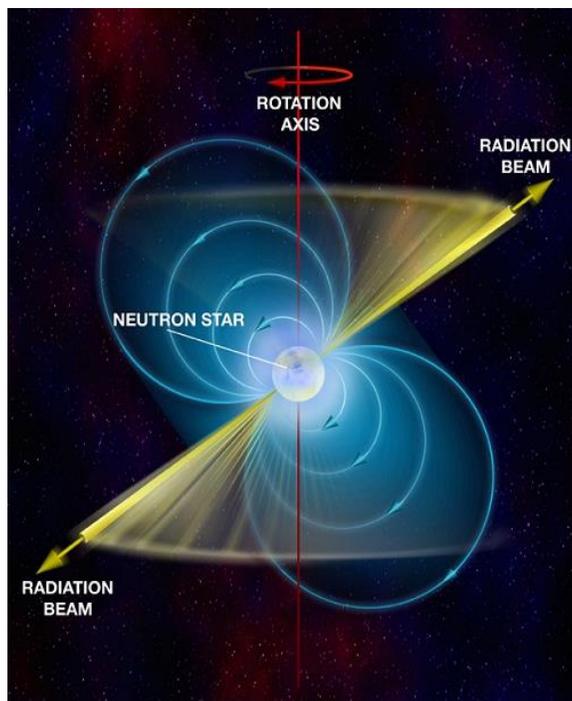


Figura 21: Rappresentazione schematica di una pulsar. I poli magnetici fungono da getto sopra e sotto la stella, dai quali essa espelle particelle cariche che verranno in seguito intrappolate nell'enorme campo magnetico. Vista dalla Terra e ruotando molto velocemente, i getti di particelle cariche assomigliano a pulsazioni continue, da cui il suo nome.

M. Konacki, A. Wolszczan ... [et al.], 2003, "Masses and Orbital Inclinations of Planets in the PSR 1257+12 System", in: *The Astrophysical Journal*.

¹⁰³ amastrofili.org, "Pianeti extrasolari e la vita nell'universo. 3. Come osservare i pianeti extrasolari? Pianeti e pulsar". Web.

5.2.4 Transito

Se l'orbita del pianeta attorno ad una stella è allineata con la linea di vista della Terra, è possibile rilevare la sua presenza tramite il **metodo del transito (o dell'eclissi)**. Sapendo che ogni qual volta il pianeta transita davanti alla sua stella la luminosità di quest'ultima diminuisce, si ricostruisce facilmente la curva di luce della stella in modo da rivelare la presenza di uno o più pianeti nel sistema. La diminuzione di luminosità nella curva di luce dipende dalla dimensione relativa della stella madre, da quella del pianeta e dalla sua orbita.

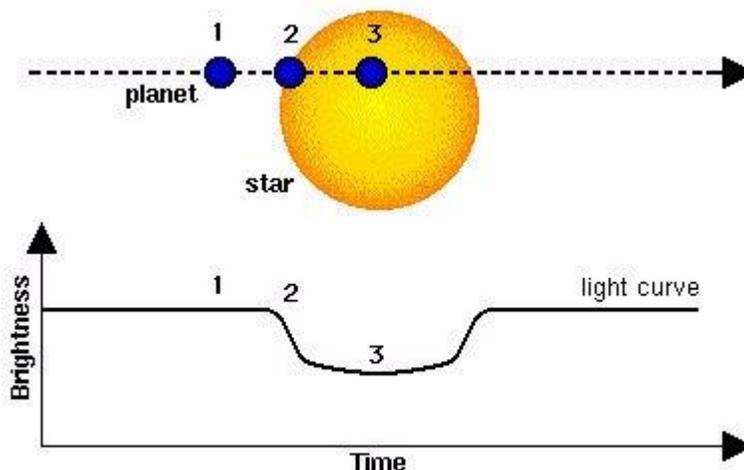


Figura 22: La figura rappresentata mostra come il transito di un pianeta attorno alla sua stella madre provochi una diminuzione della luminosità di quest'ultima nel tempo, che viene messa in evidenza nella curva di luce.

Si tratta di un metodo fotometrico, utilizzabile fino a grandi distanze (oggetti situati a distanze maggiori di 5-10 UA sono estremamente difficili da individuare) ma solo se i sistemi si trovano, come già detto in precedenza, allineati rispetto al punto di vista della Terra (considerazioni probabilistiche limitano i casi fortunati a circa 1 su 100)¹⁰⁴. Come si può vedere bene dalla figura 16, è il metodo più promettente e usato nell'epoca attuale, nonché quello più recente.

Il satellite francese CoRot dell'ESA (lanciato nel 2006 e dismesso il 24 giugno 2013 a causa dell'interruzione dei contatti di quest'ultimo con la Terra nel novembre 2012¹⁰⁵) e quello della NASA, Kepler (lanciato nel 2009¹⁰⁶), sono entrambi responsabili di osservazioni e identificazioni di questo tipo. È chiaro che sono più facilmente individuabili pianeti grandi con un periodo orbitale relativamente breve (come ad esempio i gioviani caldi), ma è anche possibile osservare pianeti di

¹⁰⁴ D. Goldsmith, settembre 2009, "Trovare pianeti non basta", in: *Le Scienze*.

¹⁰⁵ skyandtelescope.com, "COROT Mission Ends", di: C. M. Carlisle. Web.

¹⁰⁶ Anch'esso ha cessato di svolgere le sue funzioni nell'agosto 2013 a causa di un guasto.

dimensioni simili alla Terra. L'importante è non perdere l'evento del transito, e per ovviare a ciò sono necessarie osservazioni a lungo termine con una copertura del cielo continua: un esempio di collaborazione internazionale è la SuperWASP (Wide Angle Search for Planets), che già conta più di 100 esopianeti scoperti, in seconda posizione rispetto alle scoperte fatte dalla missione Kepler.¹⁰⁷ L'unico problema che sembra esserci con l'utilizzo di questa tecnica riguarda i falsi positivi, ovvero quei candidati planetari che in realtà sono, ad esempio, delle stelle binarie ad eclissi (oppure semplicemente due oggetti che si trovano nel cielo a distanze diverse ma nella stessa traiettoria) e non degli esopianeti, in quanto non è possibile discriminare a cosa è dovuto il segnale di transito. Queste stelle, in particolari occasioni, possono mimare perfettamente la stessa impronta del segnale, per questo motivo vengono utilizzati altri metodi per verificare le curve di luce.¹⁰⁸

5.2.5 Microlensing gravitazionale

Come nel metodo del transito, anche in questo caso si studia una curva di luce, ma con un'essenziale differenza: deve essere infatti di una stella di fondo rispetto alla stella osservata, che apparentemente non centra nulla. Il **metodo del microlensing gravitazionale** si basa sull'effetto lente gravitazionale: una stella (con un eventuale pianeta) che passa casualmente davanti alla visuale di un'altra di fondo molto lontana si comporta proprio come una lente d'ingrandimento, in quanto amplifica la luce emessa dalla stella dietro di essa. In realtà è il suo campo gravitazionale a creare quest'effetto, perché deflette la luce proveniente dalla stella di fondo e la focalizza, amplificandone il segnale. Il temporaneo episodio di aumento di luminosità della stella di fondo è facilmente visibile sulla curva di luce di quest'ultima con caratteristici picchi. Inoltre l'eventuale pianeta che orbita intorno alla stella che fa da lente amplificherà a sua volta l'immagine della stella di fondo, attraverso la comparsa di un secondo picco luminoso.

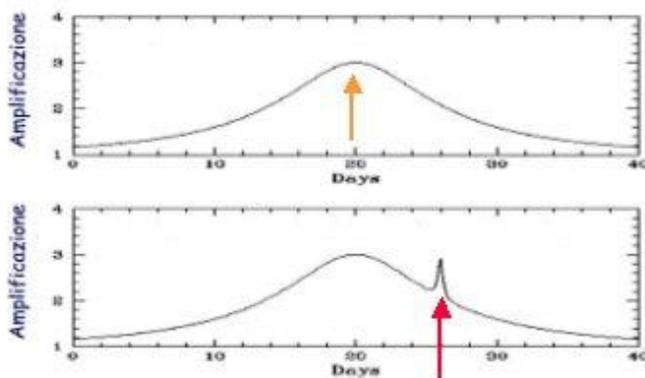


Figura 23: I due grafici mostrano i caratteristici picchi di luminosità nella curva di luce della stella di fondo quando è una sola stella a fare da lente (nel primo caso, in alto) oppure quando quest'ultima possiede un pianeta (nel secondo caso, in basso).

¹⁰⁷ wwwuser.oats.inaf.it, "Metodi indiretti di rivelazione di esopianeti: Il metodo dei transiti". Web.

¹⁰⁸ link2universe.net, "Astronomi al lavoro su nuovi metodi per svelare i falsi positivi nei dati di Kepler. Web.

Questo metodo è sensibile a pianeti di piccola massa (vale a dire simile a quella terrestre)¹⁰⁹ anche se si trovano a grandi distanze e si utilizzano tecnologie oggi disponibili, inoltre il grande vantaggio è poter osservare sistemi planetari multipli in un solo colpo. Si tratta tuttavia di un evento unico (quindi non ripetibile) e impossibile da predire, in quanto dipendente dalla configurazione geometrica della stella “lente”. Esistono però dei programmi di ricerca che studiano campi affollati di stelle, con una probabilità più alta di trovare eventi di microlensing. Perciò si confrontano varie immagini di porzioni di cielo in tempi diversi per un’osservazione continua. Collaborazioni internazionali di questo tipo sono ad esempio l’esperimento OGLE¹¹⁰ (Optical Gravitational Lensing Experiment), finanziato dalla NASA e dalla NSF (National Science Foundation) e con la collaborazione degli osservatori dell’emisfero sud, nel quale viene studiato il Bulge (il rigonfiamento centrale della nostra Galassia, detto anche Centro Galattico), e simili i progetti MOA (Microlensing Observations in Astrophysics) e PLANET (Probing Lensing Anomalies Network), fusi nel 2009 con MicroFUN (Microlensing Follow-Up Network).¹¹¹

Come si può anche vedere dalla figura 16, gli eventi di microlente sono molto rari (in una decina di anni si sono registrati in tutto circa un migliaio di eventi) e una volta che si ha osservato un candidato non si può contare su conferme di altro genere, in quanto non è possibile ripetere l’osservazione (a causa dell’impossibilità di ricreare l’allineamento originale) e per l’elevata distanza a cui solitamente si trova (gli altri metodi non funzionano a distanze tanto grandi). Pertanto le scoperte con questo metodo sono fortuite: un esempio sono gli esopianeti OGLE-2005-BLG-390Lb, scoperto nel 2006, e OGLE-2003-BLG-235Lb (oppure MOA-2003-BLG-53Lb), scoperto nel 2003 da entrambi i progetti OGLE e MOA.¹¹²

L’idea della microlente gravitazionale fu presentata per la prima volta da Einstein nel 1936 e in seguito sviluppata da Sjur Refsdal (1935-2009) trent’anni dopo. A quei tempi però, con la tecnologia di allora, era molto difficile riuscire ad osservare eventi di microlensing: finalmente nel 1986 Bohdan Paczyński (1940-2007) propone per la prima volta di impiegare la lente per tentare d’individuare la famosa e misteriosa materia oscura. In seguito (nel 1991) suggerì di utilizzare lo stesso metodo anche per l’individuazione di pianeti extrasolari, di cui i risultati si ebbero solo undici anni dopo: finalmente nel 2002, nell’ambito del progetto OGLE, furono osservati diversi candidati

¹⁰⁹ A differenza di altri metodi (come quello del transito), questo non dipende dalla massa del pianeta! Fino al 2006 è stato l’unico metodo in grado di scovare esopianeti di piccola taglia in orbita attorno a stelle di sequenza principale.

¹¹⁰ Originariamente questo progetto era stato pensato per scoprire eventi di microlensing dovuti alla presenza di materia oscura lungo la visuale.

¹¹¹ strangeworlds.jimdo.com, “Metodi di detezione”. Web.

¹¹² amastrofili.org, “Pianeti extrasolari e la vita nell’universo. 5. Lo studio degli effetti fotometrici: il metodo delle lenti gravitazionali”. Web.

nell'arco di un solo mese.¹¹³ Mentre nel 2006 Akihiko Tago (Okayama, 1932) è stato il primo astronomo ad osservare eventi di microlente gravitazionale al di fuori del Centro Galattico¹¹⁴.

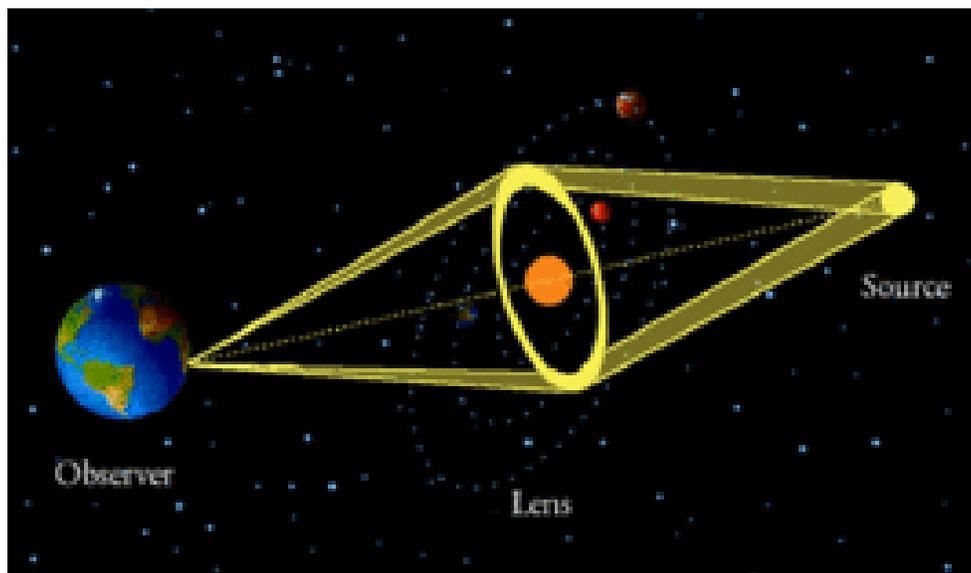


Figura 24: Schematizzazione del metodo delle microlenti gravitazionali.

5.2.6 Dischi circumstellari e protoplanetari

Attraverso lo studio di nubi di polvere che circondano le stelle, è possibile individuare indizi che suggeriscono la presenza di pianeti extrasolari.

In generale un **disco circumstellare** è una struttura ad anello (o anche a disco) che circonda una stella ed è composta da gas, polveri, planetesimi, asteroidi e frammenti di comete e collisioni di altri oggetti. Se questo disco circonda una stella relativamente giovane (una protostella), allora viene chiamato **disco protoplanetario**, da cui si formeranno in seguito i planetesimi.

¹¹³ A. Fukui, F. Abe ... [et. al.], 2008, "Observation of the first gravitational microlensing event in a sparse stellar field: the Tago event". Web.

¹¹⁴ Il fenomeno è stato scoperto grazie all'eccezionale variazione di luminosità della stella GSC 3656-1328 nella costellazione di Cassiopeia.

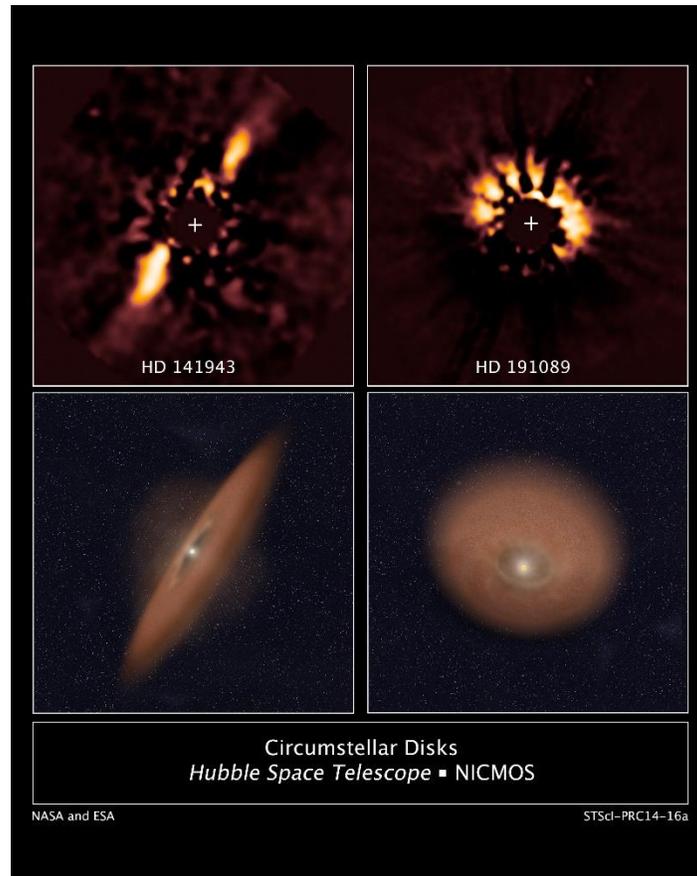


Figura 25: Sopra, due immagini dei dischi circumstellari attorno alle stelle HD 141943 e HD 191089, scattate dall'HST con la telecamera a infrarossi NICMOS. Sotto, un'illustrazione artistica degli stessi.

È possibile rilevare questi dischi dal modo in cui assorbono parte della radiazione emessa dalla stella e la riemettono sotto forma di radiazione infrarossa. La pressione della radiazione elettromagnetica (detta pressione di radiazione) esercitata dalla stella sul disco circumstellare o protoplanetario spingerebbe le particelle di polvere lontano da quest'ultima, ma dato che la rilevazione di polvere è continua, ciò dimostra che vi è un'incessante rimpiazzamento di polveri da parte di nuove collisioni, che attesta indirettamente la presenza di piccole comete e asteroidi orbitanti attorno alla stella madre. Due ulteriori prove della presenza di esopianeti sono le seguenti caratteristiche nel disco: la presenza di una cavità centrale e l'osservazione di un ammasso di polveri o di un'asimmetria. Nel primo caso infatti la cavità (cioè l'assenza di polveri) dimostra che l'eventuale pianeta ha ripulito la sua orbita da tutti i detriti e corpi minori; mentre nel secondo caso ciò vuol dire che il disco è gravitazionalmente perturbato dalla presenza di uno o più pianeti non ancora osservati.¹¹⁵ Entrambe le caratteristiche sono state osservate sul disco circumstellare di ϵ

¹¹⁵ orbiterchspaceneews.blogspot.it, "Astronomical Forensics Uncover Planetary Disks in NASA's Hubble Archive". Web.

Eridani, una stella visibile nella costellazione di Eridano a 10,5 anni luce dal Sistema Solare, e che suggeriscono quindi la presenza di un esopianeta in orbita.

Dato che l'atmosfera terrestre assorbe la maggior parte della radiazione infrarossa, è necessario effettuare osservazioni dallo spazio con l'ausilio di telescopi come l'HST (Hubble Space Telescope), con la telecamera a infrarossi NICMOS (Near Infrared Camera and Multi-Object Spectrometer), e l'SST (Spitzer Space Telescope), progettato appositamente per osservazioni di questo tipo e più potente rispetto al primo.

6 Astrobiologia

L'**astrobiologia** (o esobiologia) è quella branca della biologia che si occupa dello studio dell'origine, dell'evoluzione e della distribuzione di vita extraterrestre nell'Universo. È una scienza multidisciplinare che raggruppa più discipline diverse, come la biologia, la chimica, la geologia, l'astrofisica e la genetica.¹¹⁶

Oltre a ricercare la vita nell'Universo, questa scienza si occupa anche di ricostruire la storia della vita sulla Terra: quando e come esattamente ha avuto origine; come sia riuscita ad evolversi e a sopravvivere per più di 4 miliardi di anni; cosa rende il pianeta Terra così favorevole alla vita e per quale motivo. Sono tutte domande a cui ancora non si riesce a dare una risposta precisa, ma che sono fondamentali per il futuro della nostra specie, soprattutto per svelare l'esistenza di altri pianeti abitabili simili alla Terra. Viene inoltre ricercata la vita in ambienti estremi, dove lo studio di organismi estremofili potrebbe offrire la possibilità di individuare la vita anche laddove le condizioni risultano più fragili e ostili. Un famoso esempio è sicuramente quello di Marte, di cui oggi si hanno parecchie evidenze della presenza in passato di acqua liquida sulla sua superficie. Questo importante dettaglio potrebbe rivelarci la presenza di luoghi abitabili nel sottosuolo di quest'ultimo e renderci maggiormente attenti nelle scoperte future.¹¹⁷

In questo secondo grande capitolo, dopo quello dedicato al Sistema Solare e agli altri oggetti celesti del cosmo (come comete, meteoriti e pianeti extrasolari), l'argomento principale, ovvero la vita extraterrestre nell'Universo, verrà analizzato e trattato con particolare e scrupolosa attenzione: vedremo come in ipotesi del tutto contrastanti si possa trovare un punto in comune; se siamo davvero soli nell'Universo oppure se è soltanto una nostra impressione troppo presuntuosa; per quale motivo l'essere umano è così convinto dell'esistenza degli ETI (*Extra-Terrestrial Intelligence*); quali condizioni speciali un pianeta deve soddisfare affinché possa ospitare vita complessa ed intelligente e lo specifico caso della Terra (capitoli 6.2 e 6.4); il significato e l'utilizzo dell'equazione di Drake (capitolo 6.3); l'organizzazione scientifica privata del SETI Institute, con particolare considerazione del Messaggio di Arecibo e del Codice di Chilbolton (vedi i capitoli 6.5.1 e 6.5.2); verranno inoltre approfondite verso la fine (vedi capitoli 6.4.1, 6.4.2 e 6.4.3) alcune

¹¹⁶ arcetri.astro.it, "Osservatorio Astrofisico di Arcetri: Planetologia e astrobiologia". Web.

¹¹⁷ bigea.unibo.it, "Ambiti di ricerca: Astrobiologia". Web.

teorie riguardanti la rarità del pianeta Terra (Ipotesi della rarità della Terra), la sua abbondanza (Principio di mediocrità, ovvero l'ipotesi contraria) e la comparazione della Terra, Gaia, ad un organismo vivente (la famosa ipotesi di Gaia).

6.1 Vita extraterrestre

“Osiamo sperare che verrà il giorno in cui mezzi sconosciuti alla nostra scienza attuale ci daranno testimonianze dirette circa l'esistenza di abitanti di altri mondi.”

(Camille Flammarion, 1842-1925)

Siamo soli nell'Universo? La domanda delle domande, quella che tutti gli astronomi e astrofisici si pongono costantemente in cerca di una risposta più o meno probabile. Ma forse quella risposta potrebbe trovarsi proprio davanti ai nostri occhi, in una manciata di molecole di ossigeno e idrogeno.

Secondo la convinzione tradizionale dell'astronomo statunitense Percival Lowell (1855-1916), famoso per aver sostenuto l'esistenza dei canali di Marte¹¹⁸, gli esseri viventi intelligenti sarebbero un prodotto inevitabile della vita e dell'evoluzione: “Da tutto ciò che abbiamo appreso sulla sua costituzione da un lato e sulla sua distribuzione dall'altro, sappiamo che la vita è una fase dell'evoluzione planetaria non meno inevitabile del quarzo o del feldspato o dei suoli ricchi di azoto. Si tratta semplicemente, in tutti questi casi, di manifestazioni dell'affinità chimica.” (in *Mars as the Abode of Life*, 1908). Oggi sappiamo che i canali artificiali di Marte erano solo una mera fantasia non sostenuta da nessuna prova. Donald Goldsmith (24 febbraio 1943) e Tobias Owen (1965) invece, nel volume *The Search for Life in the Universe* scritto nel 1993, presentarono una concezione della vita nell'Universo un po' più modernizzata: “Prevediamo che tutti i sistemi planetari abbiano una serie di pianeti rocciosi prossimi alla loro stella, con un'atmosfera risultante da fenomeni di emissione di gas endogeni, di alterazione delle rocce e di fuga dei gas leggeri, per gli stessi motivi per cui nel Sistema Solare ci sono pianeti rocciosi vicini al Sole e dotati di atmosfera. A giudicare dall'esempio che abbiamo sotto gli occhi sembra che ci siano buone probabilità che uno di questi pianeti interni orbiti intorno alla propria stella alla 'giusta' distanza... Per essere prudenti, diciamo uno su due.” (qui si sottintende il concetto di zona di abitabilità, che verrà approfondito nel capitolo 6.2). Ma oggi anche questa visione rimane un po' limitata: con le recenti scoperte riguardo la grandissima varietà di pianeti e sistemi planetari esistenti, sono stati individuati appena oltre 50 probabili pianeti di dimensioni simili alla Terra, mentre i pianeti di tipo terrestre con la probabilità di avere acqua allo stato liquido e un'atmosfera adatta alla vita, restano ancora fuori dalla portata dei nostri telescopi.

¹¹⁸ Lowell asserì che questi canali erano stati creati artificialmente dai marziani, ma in seguito le sue ipotesi si rivelarono unicamente delle invenzioni: in realtà i presunti canali erano frutto di giochi di ombre, un'illusione ottica. Ciò venne confermato nel 1965 dalla sonda Mariner 4 e nel 1971 dalla Mariner 9.

Seppure le evidenze che negano l'esistenza di vita extraterrestre siano molte, un Universo infinito comporta tantissime possibilità diverse: l'espansione dell'Universo infatti implica l'allontanamento delle galassie da noi ad una velocità che aumenta con l'accrescere della loro distanza. Purtroppo, per quanto l'idea di non essere soli nell'Universo possa essere affascinante dal punto di vista filosofico, non lo è dal punto di vista pratico: non possiamo comunicare con qualcosa che si trova chissà dove sperduto nella vastità dell'Universo, anche perché, come già accennato poco prima, più aspettiamo, più l'Universo si allontana e le distanze aumentano (e questo anche se l'Universo dovesse durare per sempre). Inoltre è necessario fare un'importante precisazione: ciò che conta davvero è l'esistenza di forme di vita intelligenti, in quanto se dovessimo scoprire forme di vita primitive (e questo non è da escludere), ci aiuterebbero sì a ricostruire l'evoluzione della vita sulla Terra, ma resteremmo comunque soli. Per vita intelligente s'intende una specie in grado di comunicare a distanze interstellari, dotata quindi di una tecnologia radio simile alla nostra.

Da un punto di vista scientifico sappiamo cosa comporterebbe una scoperta del genere, ma da un punto di vista sociale? Cosa ne pensa il pubblico dei pianeti extrasolari e della possibilità che alcuni possano ospitare forme di vita, e persino esseri intelligenti? Una cosa è certa: se si dovesse dimostrare che non siamo soli nell'Universo, la scoperta cambierebbe radicalmente il modo in cui l'umanità vede se stessa. In generale la popolazione si dichiara convinta dell'esistenza di altre forme di vita nell'Universo. Sembrerebbe quasi che desidereremo crederci, per la semplice convinzione che provengano da una società perfetta senza guerra, morte, malattie, né tutti gli altri problemi che tormentano invece la nostra società, e che quindi siano in grado di aiutarci a risolverli.

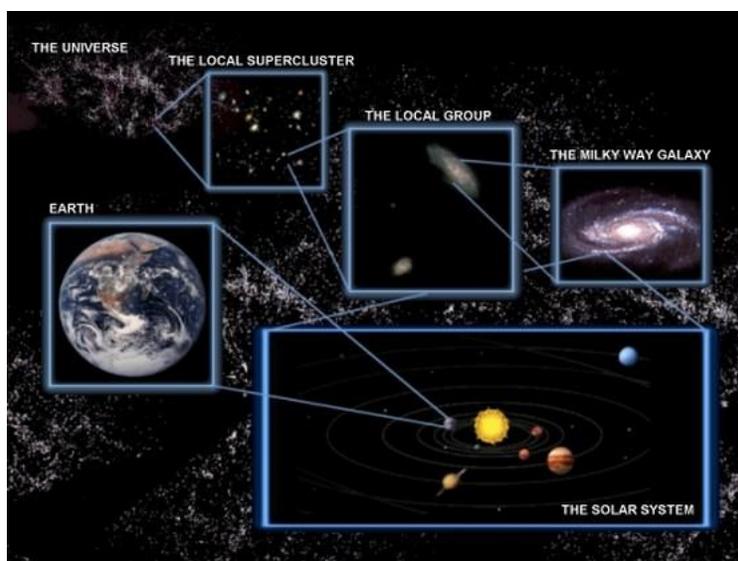


Figura 26: L'immagine mostra come l'immensità dell'Universo possa essere facilmente sottovalutata: attraverso un ingrandimento sempre maggiore, viene indicata la nostra posizione nell'Universo. In ordine si vede l'Universo, il Superammasso Locale, il Gruppo Locale, la Via Lattea, il Sistema Solare, ed infine la nostra Terra.

Se invece fossimo davvero soli nell'Universo? Il catalogo dei pianeti extrasolari è sempre più grande, e non è detto che se i pianeti sono comuni, allora anche la vita debba esserlo: i dati ottenuti finora infatti indicano che sia molto improbabile l'esistenza di civiltà aliene sufficientemente vicine alla Terra da avere qualche rilevanza.¹¹⁹

La ricerca di altre civiltà evolute ha risvegliato gli interessi dell'Uomo e ha introdotto novità che prima d'ora non era neanche possibile immaginare: ha permesso la nascita di moltissimi nuovi programmi spaziali, la costruzione di sonde e apparecchi ultramoderni, l'esplorazione di nuove e più grandi porzioni di cielo, il perfezionamento delle tecniche di ricerca dei pianeti extrasolari, la scoperta di nuovi potenziali pianeti terrestri abitabili. Tuttavia anche con le tecnologie odierne più all'avanguardia, la scoperta di un nuovo esopianeta non ci permetterebbe comunque di rispondere alla nostra più grande domanda: è effettivamente abitato da forme di vita? Inoltre la comunicazione, come già visto, non è proprio il nostro forte. Perciò perché sforzarsi tanto? Per quale motivo l'Uomo continua a cercare un gemello della Terra? Neppure gli scienziati trarrebbero alcun particolare vantaggio dalla scoperta di un altro pianeta Terra: anche se ci dovessero riuscire, come riuscirebbero a raggiungerlo o a comunicare con gli abitanti, dato che probabilmente si trova a migliaia di anni luce di distanza? È necessario quindi ridurre il carattere fantascientifico di questi sogni improbabili e degli innumerevoli film visti alla televisione: la cosa più importante in questo momento è capire meglio come ha avuto origine il nostro Sistema Solare, così da scoprire se il caso della Terra è stato solo un evento estremamente fortunato e raro, oppure se si tratta di una situazione abbastanza comune nella nostra galassia (il caso della Terra verrà discusso in seguito nel capitolo 6.4). Inevitabilmente, con il progredire della tecnologia, delle scoperte e delle conoscenze, raccoglieremo abbastanza prove per far luce sulla situazione, ma fino ad allora dovremo aspettare, con una buona dose di pazienza e soprattutto di tempo. Come ha scritto T. S. Eliot (1888-1965): "Non dobbiamo mai smettere di esplorare. E alla fine di tutto il nostro esplorare arriveremo là dove abbiamo cominciato e conosceremo quel luogo per la prima volta".

Anche se probabilmente non riusciremo mai a confermare con certezza l'esistenza di vita nell'Universo (o almeno, non troppo presto), l'importante è non arrendersi e cercare in continuazione le risposte alle nostre innumerevoli domande. D'altronde però l'Universo è un luogo tremendamente immenso, molto più grande di qualunque cosa la mente umana abbia mai concepito con la fantasia. Perciò, se l'Uomo fosse davvero unico nel suo genere nell'Universo, non sarebbe forse un enorme spreco di spazio?¹²⁰

6.2 Condizioni per la vita intelligente

Se mai ci dovesse essere una qualche forma di vita nell'Universo, è logico pensare di trovarla in luoghi simili alla nostra Terra: pianeti rocciosi, pieni di acqua allo stato liquido e un'atmosfera respirabile.

¹¹⁹ H.A.Smith, 3 dicembre 2012, "Siamo soli nell'universo?", in: *Le Scienze*.

¹²⁰ aforismi.meglio.it, "Frase del film Contact". Web.

I primissimi pianeti extrasolari scoperti furono anche quelli più facili da trovare, in quanto o per le grandi dimensioni, più facilmente avvistabili con i telescopi, o per i periodi orbitali relativamente brevi (osservabili in pochi anni), i risultati potevano essere riconfermati usando altri metodi identificativi. Tuttavia il tempo di osservazione non è ancora stato sufficiente per riuscire ad individuare pianeti di dimensioni simili alla Terra. L'ipotesi delle *Terre Rare* mostra di fatto come i pianeti di tipo terrestre adatti allo sviluppo di vita intelligente siano piuttosto rari. Ma cosa in particolare è necessario affinché la scintilla della vita possa scattare? Una decina d'anni fa (nel 2000) sono state elencate una serie di **condizioni che un pianeta deve soddisfare affinché possa preservare forme di vita intelligente**, grazie al lavoro del paleontologo Peter Ward (1949) e dell'astrofisico Donald Brownlee (21 dicembre 1943) all'Università di Washington. Queste condizioni riguardano quattro punti essenziali: stabilità, abitabilità e acqua, massa planetaria e composizione planetaria. Qui di seguito verranno approfondite ciascuna di esse.

Per prima cosa è fondamentale il concetto di stabilità, e cioè il pianeta deve orbitare attorno ad una stella di sequenza principale con un'emissione di radiazioni costante nei miliardi di anni necessari all'evoluzione della vita. Inoltre anche la dimensione di quest'ultima gioca un ruolo non indifferente: nel caso in cui la stella dovesse avere dimensioni troppo piccole, potrebbe essere difficile per il pianeta orbitante evolvere organismi viventi, dal momento che la stella sarebbe anche troppo fredda e la sua zona di abitabilità molto vicina all'astro¹²¹; al contrario invece, se la stella dovesse essere troppo massiccia, essa brucerebbe in poco tempo il suo idrogeno e avrebbe quindi un'esistenza troppo breve per consentire l'evoluzione della vita, oltre a ciò, alla fine della sua esistenza, esploderebbe catastroficamente distruggendo qualsiasi cosa si trovasse nel suo raggio d'azione. In conclusione, la nostra stella deve avere dimensioni intermedie (a partire da circa 0,5 fino a 2 masse solari) e un'età adeguata (né troppo giovane, né troppo anziana¹²²), tenendo presente che la maggior parte delle stelle di tipo solare fanno parte di un sistema binario o multiplo e che quindi l'effetto gravitazionale della stella compagna potrebbe modificare l'equilibrio dell'orbita del pianeta.

La seconda condizione ribadisce ancora una volta l'importanza della presenza di acqua allo stato liquido sulla superficie del pianeta, per questo motivo deve trovarsi necessariamente nella cosiddetta **zona abitabile** [6] della sua stella (o, eventualmente, disporre di un altro meccanismo in grado di mantenere l'acqua allo stato liquido). Anche l'orbita del pianeta deve essere stabile: l'ideale sarebbe il più possibile circolare (con un valore di eccentricità che si aggira intorno a 1)¹²³ o

¹²¹ Come conseguenza, un'orbita così stretta influirebbe sul pianeta facendogli assumere una rotazione sincrona, che lo porterebbe a rivolgere sempre la stessa faccia alla stella. Il risultato finale sarebbe quello di metà pianeta irraggiato costantemente, mentre l'altra metà in perenne gelo e buio totale: l'ambiente risulterebbe davvero estremo e sarebbe quindi improbabile che qualsiasi forma di vita riesca a svilupparsi.

¹²² Ricordando che le stelle più anziane (appartenenti alla I generazione di stelle galattiche), e quindi anche i pianeti originatisi da esse, non conterrebbero sufficienti quantità di carbonio, azoto, ossigeno, zolfo, fosforo, e ferro necessari per la formazione di composti biochimici.

¹²³ L'eccentricità dell'orbita planetaria è un fattore abbastanza critico, poiché esprime la differenza tra la distanza minima e massima del pianeta dalla sua stella e ne determina quindi le variazioni annuali della radiazione stellare

per lo meno immutabile, per evitare che l'ambiente (riferito in particolare a temperatura e illuminazione) muti improvvisamente facendo scomparire la vita. Un altro importante parametro legato al precedente è l'inclinazione assiale, e cioè l'angolo d'inclinazione dell'asse di rotazione del pianeta rispetto alla perpendicolare al suo piano orbitale. Nel caso della Terra l'angolo corrisponde a 23,27 gradi: un valore ideale perché garantisce nel corso dell'anno un clima mite costante adeguato alla vita, mentre non sarebbe così se solo l'angolo aumentasse fino a 90 gradi. A differenza di tutti gli altri pianeti del Sistema Solare, la Terra è l'unico a possedere un'inclinazione assiale tanto stabile e favorevole.

La terza condizione elencata è la massa: un pianeta ideale per ospitare la vita dovrebbe essere abbastanza massiccio in modo da poter conservare un'atmosfera stabile (per la protezione contro la radiazione ultravioletta), ma non troppo da inibire il fenomeno della tettonica a placche, essenziale affinché il riciclo degli elementi (correlato soprattutto al ciclo del carbonio) sia garantito e quindi anche la regolazione della temperatura. Inoltre, se la massa risultasse troppo grande, come nel caso di Giove, l'eccesso di idrogeno distruggerebbe le molecole biochimiche. Secondo le conoscenze attuali e le varie stime, un pianeta con una massa inferiore a 0,4 masse terrestri è inadatto a mantenere un'atmosfera per un lungo periodo, mentre uno con una massa maggiore a 4 masse terrestri non è in grado di alimentare la tettonica a placche (la gravità risulterebbe troppo elevata). Anche in questo caso, come abbiamo potuto constatare più volte in precedenza, è necessaria una via di mezzo.

Infine, ma non per questo meno importante, arriviamo alla quarta condizione: la composizione planetaria. Per garantire l'esistenza di una qualsiasi forma di vita, è necessario che il pianeta possieda gli elementi chimici adatti, soprattutto per quanto riguarda la sintesi di molecole complesse. Nel nostro specifico caso, la vita terrestre è indissolubilmente legata alla chimica del carbonio, ma non è detto che sia l'unico tipo di vita possibile. Non dobbiamo infatti escludere la possibilità che nell'Universo i processi fisici siano basati su altri elementi, come il silicio o il ferro, essenziali per consentire i fenomeni tettonici e per garantire la protezione dai venti di particelle cariche della stella grazie ad un campo magnetico¹²⁴. Tuttavia ciò risulta difficile da immaginare, dato che l'unico esempio di vita che conosciamo è la nostra. Chiaramente le abbondanze relative degli elementi non sono costanti in tutta la galassia, e ciò implica che non dappertutto ci siano pianeti in grado di ospitare forme di vita intelligente.

ricevuta. Anche se l'orbita dovesse essere estremamente ellittica, ciò non impedisce l'esistenza di acqua liquida sulla superficie, ma potrebbe comunque contrastare lo sviluppo di vita intelligente.

¹²⁴ La presenza di un campo magnetico abbastanza intenso da schermare il pianeta dal vento solare è molto importante per la sopravvivenza di sistemi biologici su di esso.

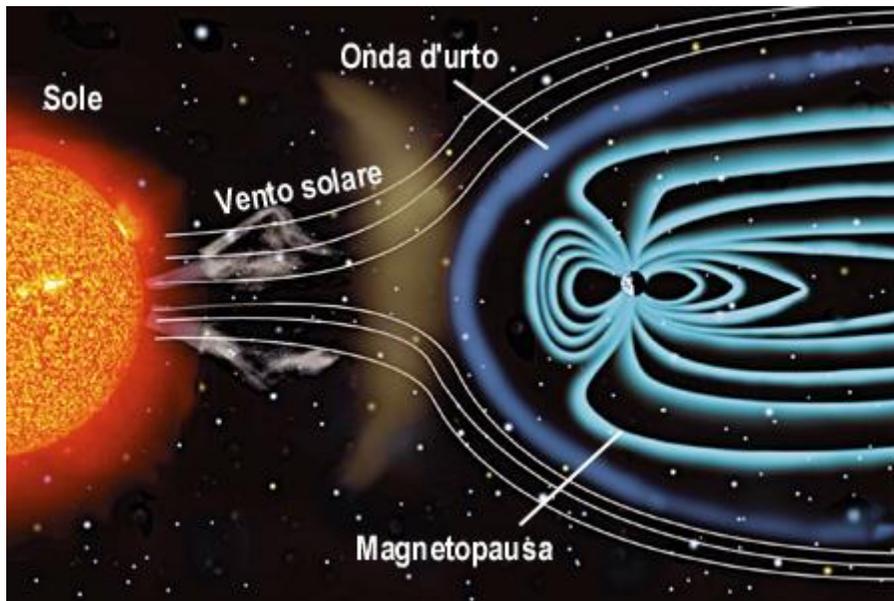


Figura 27: Con una velocità variabile compresa fra 200 km/s e 900km/s, il vento solare (ovvero il flusso di particelle cariche emesso dall'alta atmosfera del Sole) interagisce con il campo magnetico terrestre e lo deforma, facendogli assumere una forma allungata.

Anche se tutte e quattro le condizioni sopraelencate dovessero essere rispettate, non è detto che il pianeta ospiti forme di vita. Nell'esempio di Marte, la distanza dalla Sole è quella giusta, ma non ospita nessuna civiltà aliena intelligente. Sulla Terra invece, affinché si formassero i primissimi organismi viventi, ci sono voluti miliardi di anni, e altrettanti affinché da essi si evolvesse l'Uomo. Questo ci fa capire come non possediamo alcuna prova del fatto che un potenziale sviluppo avvenga rapidamente, anzi: la vita sulla Terra potrebbe anche essersi sviluppata sin troppo velocemente per quanto ne sappiamo... Sembra che lo sviluppo di esseri viventi intelligenti richieda qualcosa di più che un pianeta ed un sistema stellare adatti.¹²⁵

¹²⁵ H.A.Smith, 3 dicembre 2012, "Siamo soli nell'universo?", in: *Le Scienze*.

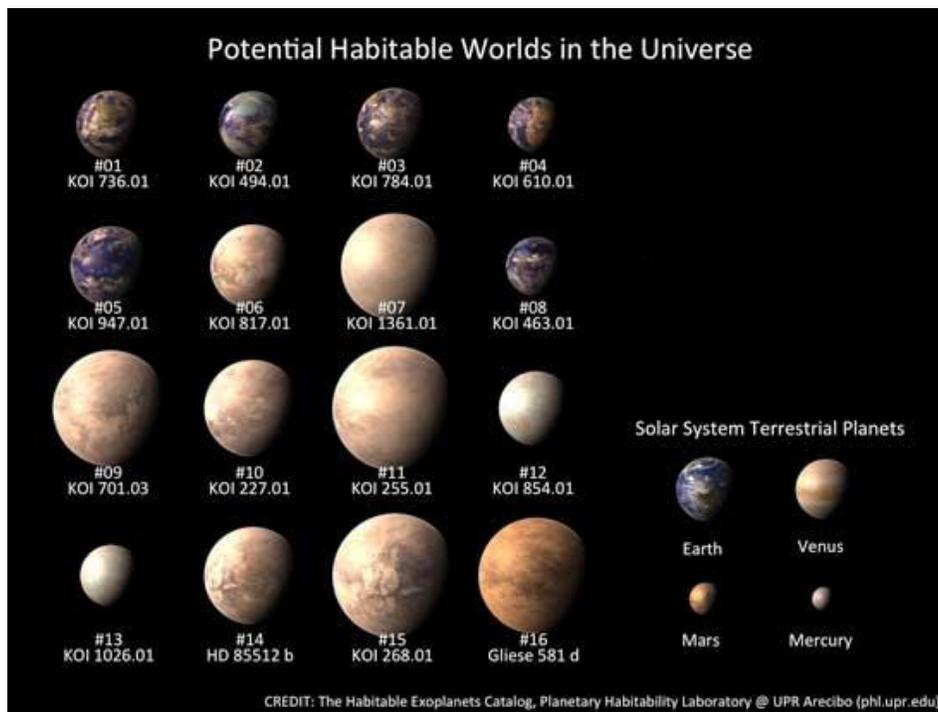


Figura 28: L'immagine mostra un elenco dei pianeti potenzialmente abitabili nell'Universo. Ai primi posti abbiamo quelli più favorevoli, come KOI 736.01 e KOI 494.01 (KOI sta per "Kepler Object of Interest"). La maggior parte sono stati scoperti dalla missione Kepler.

6.3 L'equazione di Drake

Sappiamo molto bene che nulla nell'Universo resta immutabile: quando la nostra Terra si è formata 4,57 miliardi di anni fa, aveva un'atmosfera ben diversa da quella attuale. Se dovessimo trovare un'altra Terra, quante sarebbero le probabilità di incontrare una civiltà aliena con la quale saremmo in grado di comunicare? Qual è il numero di civiltà intelligenti che potrebbero esistere sugli altri pianeti terrestri dell'Universo? Quali variabili dobbiamo considerare per fare un simile calcolo? Quante stelle esistono lassù? E quante di queste hanno dei pianeti che gli orbitano attorno? Quanti di questi pianeti possono conservare acqua liquida sulla loro superficie? E così via... È un problema che gli astronomi Carl Sagan (1934-1996) e Frank Drake (28 maggio 1930) affrontano già da qualche decennio.

Nel 1961 Drake propose un'equazione secondo la quale, soltanto nella Via Lattea, potrebbero esistere fino a un milione di civiltà aliene. Essa è tutt'oggi usata, con qualche modifica, in campi come l'esobiologia e nella ricerca di vita extraterrestre intelligente (come ad esempio al SETI Institute, vedi capitolo 6.5.1). **L'equazione di Drake** è quella serie di numeri che dovrebbe darci modo di effettuare una stima abbastanza affidabile del numero di civiltà extraterrestri intelligenti in grado di comunicare presenti oggi nella Via Lattea (N). Non è una formulazione di uno specifico processo fisico, e per questo motivo ogni ricercatore la modifica in modi diversi, ma il risultato finale è comunque sempre lo stesso. Si tratta di un metodo per calcolare le probabilità, attraverso la

moltiplicazione di sette condizioni ritenute necessarie per arrivare alla vita intelligente. L'equazione è la seguente:

$$N = R^* \cdot f_p \cdot n_e \cdot f_l \cdot f_i \cdot f_c \cdot L = 10 \cdot 0,5 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 0,01 \cdot 0,01 \cdot 10'000 = 10$$

dove R^* è il tasso medio annuo di formazione stellare nella Via Lattea, f_p è la frazione di tali stelle che possiede dei pianeti, n_e è il numero medio di pianeti (o satelliti) per sistema stellare che presentano condizioni potenzialmente compatibili con la vita, f_l è la frazione dei pianeti n_e su cui si è effettivamente sviluppata la vita, f_i è la frazione dei pianeti f_l su cui si è evoluta vita intelligente, f_c è la frazione di civiltà extraterrestri in grado di comunicare a distanze interstellari, e infine L è la durata tipica di queste civiltà evolute rispetto all'esistenza della sua stella.¹²⁶ Tra tutte le variabili che Drake e i suoi colleghi scelsero, l'unica ragionevolmente stimata da prove fisiche è il numero di stelle adatte, ovvero f_p , mentre tutte le altre restano piuttosto misteriose e devono essere stimate a partire da un unico esempio, che è appunto la vita sulla Terra: a dipendenza del pensiero ottimistico o pessimistico, il risultato N può variare da 600'000 fino anche a 0,0000001!

Ovviamente, a causa dei valori utilizzati da Drake nella sua equazione, ci furono moltissime contestazioni. In particolare Peter Ward, professore di biologia e geologia all'Università di Washington a Seattle, ed il suo coautore Donald Brownlee ritengono che l'equazione sovrastimi enormemente il numero di civiltà avanzate che esisterebbero oggi nell'Universo: d'altronde nel cosmo le forme complesse di vita come animali e esseri umani potrebbero essere una rarità. Sarebbe troppo semplicista credere che siano coinvolte più variabili nell'equazione, perciò Ward cita una serie di fattori che secondo lui ridimensionano totalmente le stime di Drake. Prima di tutto la tettonica a placche, vale a dire la deriva dei continenti. Qualcuno potrebbe domandarsi che cosa c'entri con la diffusione di forme di vita. Ebbene, la tettonica a placche produce anche il riciclo di elementi, e questo fenomeno ha due conseguenze fondamentali: la prima, la più importante, che è un regolatore di temperatura; la seconda, che una civiltà intelligente necessita di metalli. Altro elemento importante è avere nella parte più esterna del sistema stellare un pianeta gigante gassoso (come Giove nel nostro) che protegge i pianeti più interni, grazie alla sua attrazione gravitazionale, dai frequenti impatti di comete e asteroidi potenzialmente catastrofici¹²⁷. Infine, oltre al concetto di zona abitabile (vedi capitolo 6.2), Ward e il suo collega ritengono altrettanto fondamentale la posizione del pianeta all'interno della galassia, ossia la zona galattica abitabile (illustrata anch'essa nel capitolo 6.2, in particolar modo nella nota [6] del glossario, capitolo 8).

¹²⁶ Wikipedia Contributors. "Equazione di Drake". *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Web.

¹²⁷ Una situazione del genere si è già presentata 65,7 milioni di anni fa, quando un asteroide del diametro di 10 chilometri si schiantò sulla Terra, estinguendo più del 70% delle specie esistenti. In questo specifico caso, Giove non aveva svolto appieno il suo compito, provocando un'estinzione di massa.

L'equazione elaborata da Ward e Brownlee, anche chiamata *Rare Earth equation* (sostenuta dalla *Rare Earth Hypothesis*, vedi capitolo 6.4.1), è la risposta all'equazione di Drake, ed è il risultato della moltiplicazione di undici elementi complessi:

$$\begin{aligned}
 N &= N^* \cdot n_e \cdot f_g \cdot f_p \cdot f_{pm} \cdot f_i \cdot f_c \cdot f_l \cdot f_m \cdot f_j \cdot f_{me} = \\
 &= 100'000'000'000 \cdot 0,75 \cdot 0,1 \cdot 0,4 \cdot 0,6 \cdot 0,9 \cdot 0,25 \cdot 0,1 \cdot 0,1 \cdot 0,25 \cdot 0,5 \\
 &= 506'250
 \end{aligned}$$

dove N^* è il numero delle stelle nella Via Lattea (si stimano tra le 100 e le 500 miliardi di stelle), n_e è il numero medio dei pianeti presenti nella zona abitabile di una stella (circa tra 0,75 e 0,8), f_g è la frazione di stelle che si trovano nella zona galattica abitabile (Ward, Brownlee e Gonzalez stimarono un valore di 0,1), f_p è la frazione di stelle che possiedono dei pianeti (diciamo 0,4), f_{pm} è la frazione dei pianeti rocciosi (da 0,6 a 0,7 al massimo), f_i è la frazione di pianeti abitabili dove effettivamente si sviluppano forme di vita semplici come i microrganismi (si suppone che il valore del coefficiente non sia affatto piccolo, circa 0,9), f_c è la frazione dei pianeti dove evolvono forme di vita complessa (in questo caso invece si suppone un valore molto piccolo, supponiamo 0,25), f_l è la frazione dell'intervallo di esistenza di un pianeta che ospita vita complessa (dato che quest'ultima richiede moltissimi anni per evolversi, il valore del coefficiente non può essere elevato, quindi diciamo 0,1-0,15), f_m è la frazione dei pianeti abitabili che possiedono un grande satellite (anche in questo caso la frazione ha un valore relativamente piccolo, forse 0,1-0,2, in quanto, come per la formazione della nostra Luna, l'impatto con un simile asteroide è assai raro), f_j è la frazione dei sistemi planetari dove sono presenti pianeti giganti gassosi come Giove (potrebbe trattarsi di un valore abbastanza elevato, 0,25-0,75), e infine f_{me} è la frazione dei pianeti sui quali si sono abbattute poche estinzioni (si ritiene che il coefficiente sia un valore piccolo, circa 0,5-0,9, prendendo ovviamente in considerazione l'esempio della Terra).¹²⁸

Quest'equazione, a differenza di quella elaborata da Drake, non considera la probabilità che la vita complessa si evolva in vita intelligente e scopra la tecnologia, ma è anche vero che le conclusioni ottimistiche della seconda non sembrano reggere alla luce delle scoperte fatte negli ultimi decenni: l'equazione di Drake è stato un concetto fantastico, ma ora come ora è troppo datato. Oggi ne sappiamo molto di più: possediamo conoscenze che all'epoca erano del tutto ignote, e questo ci permette di avere una maggiore precisione e di ridurre drasticamente quelle stime. Allo stato attuale delle nostre conoscenze non è realistico parlare di milioni di civiltà: ma allora quante altre ne potrebbero esistere nella nostra Via Lattea? Sicuramente più di una, questo è sicuro, ma molte meno di un milione...

¹²⁸ Wikipedia Contributors. "Rare Earth hypothesis". *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Web.

6.4 Lo straordinario caso della Terra

Così come la vediamo noi, la Terra è la nostra casa: un luogo piacevole e bellissimo, sempre ricco di sorprese e cose inspiegabili. Ma qualcosa ci spinge a volgere lo sguardo alle stelle, per cercare di comprendere perché ci troviamo qui e il motivo per il quale la nostra specie, in tutti questi anni, non si è ancora estinta: cosa rende la Terra così straordinariamente ideale per la vita? Perché proprio la Terra? Attendiamo risposte alle domande più remote dell'umanità, e allo stesso tempo continuiamo a setacciare l'Universo alla ricerca di nuove conoscenze e altre fondamentali domande da porci.

Agli albori della **storia della Terra**, essa si formò insieme a tutti gli altri pianeti del Sistema Solare 4,57 miliardi di anni fa. In seguito al collasso della nebulosa solare, il disco di polveri e gas subì una graduale evoluzione: si condensò, a mano a mano che gli atomi di idrogeno ed elio venivano attratti verso il centro della nube dalla forza di gravità, aumentò di temperatura, grazie soprattutto alle reazioni termonucleari che scaturivano dallo scontro fra atomi di idrogeno, e cominciò a vorticare su se stesso in modo sempre più veloce, originando al centro di esso una protostella. Dalla polvere e dai gas tutt'intorno si originarono i planetesimi che, prima ammassandosi casualmente, poi divenendo sempre più grandi grazie all'attrazione gravitazionale, divennero a loro volta dei protopianeti e infine i pianeti che conosciamo oggi (per una descrizione più accurata della nascita del Sistema Solare e, più in generale, di un sistema stellare, si veda il capitolo 4.6).

La Luna ebbe origine subito dopo, quando un protopianeta (conosciuto come Theia) delle dimensioni di Marte e una massa quanto il 10% della Terra stessa si schiantò su di essa. Durante l'impatto fra i due, una parte della massa si unì alla Terra, mentre ciò che rimaneva (in parte anche espulso nello spazio) andò a formare il nostro satellite. Quest'evento, per quanto accidentale, si è rivelato in realtà fondamentale, in quanto la collisione ha fatto sì che l'asse terrestre si inclinasse in misura sufficiente a generare un clima congeniale e l'esistenza delle stagioni. Anche la Luna in sé ha una funzione molto importante per la Terra: essa genera le maree e stabilizza le oscillazioni dell'asse terrestre grazie alla sua attrazione gravitazionale.

Il campo magnetico terrestre (chiamato campo geomagnetico) è molto importante per l'esistenza della vita sulla Terra: esso infatti crea una sorta di "scudo" elettromagnetico intorno alla Terra che devia i raggi cosmici e le particelle cariche del vento solare. È generato dai movimenti del nucleo liquido, provocati a loro volta dalla rotazione della Terra e dai moti convettivi interni¹²⁹.¹³⁰

A differenza dell'idrogeno e dell'elio che, non essendo trattenuti dalla debole forza di gravità, si dispersero rapidamente nello spazio, l'estesa attività vulcanica produsse la cosiddetta atmosfera primordiale (per la maggior parte composta da biossido di carbonio) e il vapore acqueo prodotto andò a formare gli oceani, che oggi occupano il 71% dell'intera superficie. Grazie allo sviluppo

¹²⁹ Questi si creano a causa del decadimento degli isotopi radioattivi presenti nelle rocce acide della crosta terrestre che contengono uranio, torio e potassio. Gli elementi radioattivi determinano inoltre la fusione dei metalli (in particolare del ferro) che provocano un ulteriore innalzamento della temperatura per via del loro spostamento.

¹³⁰ erickbaldi.altervista.org, "Il campo magnetico terrestre". Web.

itisfondi.it, "La teoria della tettonica delle placche". Web.

della fotosintesi, alcune tra le primissime forme di vita fotosintetiche cominciarono a produrre ossigeno in grandi quantità, che a sua volta, accumulandosi nell'atmosfera, creò un sottile strato di ozono, tutt'oggi vitale per garantire la protezione contro i dannosi raggi ultravioletti: dalle cellule più piccole e primitive si svilupparono quelle via via più complesse, le cellule eucariote. Ma ancora prima di esse, è stata basilare la presenza di semplici molecole organiche (come ad esempio amminoacidi e nucleotidi) per la nascita della vita a partire da esse. È quasi chiaro che i cosiddetti “mattoni della vita” siano apparsi sulla Terra grazie agli impatti di asteroidi e meteoriti (vedi i capitoli 4.3 e 4.4 riguardanti comete e meteoriti) e che in seguito a reazioni chimiche spontanee abbiano dato origine a forme di vita sempre più complesse. Un'altra teoria accreditata (verificata verso la metà del XX secolo) è chiamata *teoria dell'evoluzione chimica* e fu elaborata da A. I. Oparin (1894-1980) nel 1922. Essa spiega come la presenza dei quattro elementi chimici (idrogeno, carbonio, ossigeno e azoto) nell'atmosfera primordiale e di molta energia (sotto forma di calore, radioattività, scariche elettriche e radiazioni provenienti dal Sole) siano riusciti a creare precise condizioni affinché dai gas si sarebbero formati le molecole complesse. In seguito, sempre più numerose e raccolte negli oceani e mari del pianeta (il cosiddetto “brodo primordiale”), le molecole complesse si sarebbero combinate dando origine ad aggregati (sistemi primitivi chiamati *coacervati*): a questo punto il processo prende il nome di *evoluzione prebiologica*, da cui si sarebbe sviluppato tutto il mondo vivente.¹³¹

Successivamente le microplacche continentali andarono a plasmare la terraferma e gli oceani: da un unico supercontinente si formarono diversi continenti più piccoli, che rimasero più o meno invariati fino ad oggi (circa 180 milioni di anni). Anche le ere glaciali tra i 750 e i 580 milioni di anni fa facilitarono l'esplosione della vita pluricellulare complessa del Cambriano: in breve tempo essa (che può essere considerata il diretto antenato della vita complessa attuale) si moltiplicò e diversificò sorprendentemente.

La vita sulla Terra ha subito circa 15 estinzioni di massa, di cui sei catastrofiche, prima dell'arrivo dell'Uomo.¹³² Fra di esse ricordiamo quella avvenuta 65,7 milioni di anni fa causata dall'impatto di un piccolo asteroide (e dai conseguenti insostenibili mutamenti climatici), che provocò l'estinzione dei dinosauri e di altri animali (tra cui le ammoniti) ma risparmiò i mammiferi più piccoli: furono quest'ultimi che negli anni seguenti dominarono il pianeta. All'incirca 23 milioni di anni fa anche le prime scimmie antropomorfe ebbero successo, da alcune delle quali si svilupparono i primi ominidi: l'evoluzione fece sì che una di queste specie guadagnasse l'abilità di mantenere una posizione eretta, l'utilizzo di utensili e lo incoraggiò alla comunicazione. Nel corso di milioni di anni (dall'*Homo australopithecus*, all'*Homo erectus*, all'*Homo sapiens*), l'essere umano è migrato dall'Africa in Europa, e poi in tutto il mondo, sino a diventare ciò che è oggi.

Dopo questa brevissima sintesi dell'evoluzione della vita sulla Terra, durata quasi 4,6 miliardi di anni, arriviamo alla domanda più importante di questo capitolo: perché proprio la Terra? Esistono

¹³¹ ebook.scuola.zanichelli.it, “Invito alla biologia.blu: Secondo Oparin la comparsa delle cellule è stata preceduta da un'evoluzione prebiologica”. Web.

¹³² Questo dato sottolinea come l'evoluzione dell'Uomo sia stata lunga e complessa, ma soprattutto piena di pericoli e difficoltà.

moltissime condizioni che hanno fatto sì che sulla Terra potesse prosperare la vita, come ad esempio il fatto che l'acqua è essenziale e che se non ci trovassimo alla giusta distanza dal Sole (nella sua zona di abitabilità), non potrebbe esistere in tutti e tre gli stati in cui si trova oggi: basti solo pensare che se gli oceani coprissero una frazione più ampia della superficie terrestre, i continenti e la terraferma non sarebbero stati sufficienti per permettere la migrazione dei pesci e la loro evoluzione in esseri capaci di usare strumenti. Inoltre, come già accennato in precedenza, è necessario che il pianeta terrestre presenti attività geologica e vulcanica (la deriva dei continenti) e che possieda un Giove "buono" e un satellite naturale abbastanza grande come la Luna. Il ruolo del Sole (massa, età, tipologia) è altrettanto fondamentale, così come la sua posizione all'interno della galassia (nella zona galattica abitabile).¹³³

Dopo aver riflettuto su quest'ultimo aspetto, arriviamo a due plausibili seppur diverse conclusioni: o siamo davvero soli nell'Universo e l'evoluzione della vita sulla Terra è stata solo una fortunata casualità che non potrebbe ripetersi una seconda volta, oppure là fuori esistono milioni di mondi abitati come la Terra. Nei seguenti due capitoli 6.4.1 e 6.4.2 verranno espone entrambe le possibilità, conosciute come l'Ipotesi della rarità della Terra e il Principio di mediocrità.



Figura 29: Foto satellitare della Terra vista di notte (NASA).

6.4.1 Rarità della Terra

“Se l’Universo brulica di alieni... dove sono tutti quanti?”

(Enrico Fermi, 1901-1954)

Come abbiamo già visto, non può esistere una civiltà se la sua stella è troppo grande o troppo piccola, se l’orbita o l’inclinazione assiale del pianeta è sbagliata, se la sua grandezza e la

¹³³ Per avere una descrizione delle condizioni ideali allo sviluppo di vita complessa intelligente vedere il capitolo 6.2.

composizione chimica sono inappropriate o se i processi chimici necessari per generare le prime forme di vita sono troppo complicati e lenti. Esistono tantissime condizioni per le quali si spiega lo sviluppo della vita intelligente sul nostro pianeta, e tutte le prove fanno pensare che la Terra sia davvero unica nel suo genere.

A questo proposito, l'**Ipotesi della rarità della Terra** (*Rare Earth Hypothesis*) fa proprio al caso nostro: si tratta di un'ipotesi formulata nel 2000 e sostenuta da Peter Ward e Donald Brownlee, che spiega il motivo per il quale fino ad ora non siamo ancora riusciti a scoprire un'altra civiltà extraterrestre nell'Universo. La vita così come la conosciamo noi sulla Terra ha richiesto un intreccio estremamente improbabile di condizioni ed eventi; così improbabile, che la vita complessa potrebbe essere definita un fenomeno raro nell'Universo.

Ma se la Terra è davvero l'unica che conosciamo dove la vita intelligente è riuscita a svilupparsi, ciò non significa che quest'ultima sia necessariamente come noi la conosciamo, e cioè basata sulla chimica del carbonio: è assolutamente plausibile che esistano altri pianeti totalmente diversi dalla Terra dove la vita si è sviluppata a partire da altre molecole organiche. Il fisico teorico Sara Seager (1971) del Massachusetts Institute of Technology ha proposto qualcosa di simile in un articolo pubblicato sulla rivista *Science*: "L'acqua e la vita possono trovarsi anche su Super-Terre che orbitano la loro stella fuori dalla zona abitabile, a distanze dieci volte superiori di quella Terra-Sole, a patto che le atmosfere di questi mondi contengano idrogeno gassoso a sufficienza, e quindi un effetto serra potente, capace di mantenere il calore all'interno dell'atmosfera e creare un clima mite nonostante le poche radiazioni ricevute in superficie. Allo stesso modo, anche pianeti aridi e più vicini alle proprie stelle madri potrebbero avere bisogno di una quantità minore di acqua per creare la vita, vista l'alta umidità atmosferica. E la vita potrebbe esserci addirittura sui pianeti vagabondi che viaggiano per l'universo liberi da vincoli orbitali, in caso abbiano avuto la fortuna di sviluppare calore da processi radioattivi o del nucleo e di avere i giusti gas nell'atmosfera".¹³⁴

Se in effetti fossimo soli, questo potrebbe farci apprezzare maggiormente la nostra fortuna e indurci ad agire in modo più responsabile nei confronti dei nostri simili e soprattutto del fragile ambiente: la vita sulla Terra è preziosa e merita il più assoluto rispetto, ma come spesso accade, ci si accorge dell'importanza di qualcosa quando ormai è troppo tardi.

6.4.2 Principio di mediocrità

L'Ipotesi della rarità della Terra è opposta al cosiddetto **Principio di mediocrità**, tra cui abbiamo Frank Drake e Carl Sagan tra i maggiori sostenitori. Si tratta di un principio che afferma l'assoluta banalità dell'esistenza del nostro pianeta.

Specialmente in conseguenza all'enorme risultato ottenuto dall'equazione di Drake (per approfondimenti vedi capitolo 6.3), si pensa che nella Terra e nell'umanità non ci sia niente di speciale: si tratta quindi di un tipico pianeta roccioso che si trova in un normalissimo sistema planetario, che a sua volta è situato in una regione qualunque di una comune galassia spirale nello

¹³⁴ media.inaf.it, "Dove dobbiamo cercare la vita extra-terrestre?". Web.

spazio. A sostegno di tale principio esistono varie evidenze: prima di tutto il concetto di vastità dell'Universo (sviluppato soprattutto a seguito delle ultime scoperte fatte), in quanto non è neanche lontanamente immaginabile quanto sia grande e quante galassie contenga (si stima un valore compreso tra 300 e 500 miliardi di galassie!¹³⁵); data l'esistenza di altri sistemi planetari, e in particolare le numerose scoperte di pianeti extrasolari, è abbastanza probabile che esistano altri pianeti del tutto simili alla Terra; e infine, tra astrofisici e scienziati si è soliti pensare all'evoluzione della vita come un processo naturale e inevitabile dell'evoluzione planetaria, che si verifica ogni qual volta le condizioni chimico-fisiche di un pianeta soddisfano quelle adatte alla vita.

In entrambi i casi (cioè sia se la Terra dovesse essere straordinariamente rara, sia se invece è comunissima) dobbiamo preservarne i tesori e gli ambienti, poiché anche se dovesse esistere un altro pianeta Terra, non sarebbe comunque facilmente (e in breve tempo) raggiungibile dall'umanità, nel caso in cui il nostro pianeta dovesse divenire improvvisamente ostile alla vita.

6.4.3 L'ipotesi di Gaia

“Se il pianeta è un organismo, quale è il ruolo dell'essere umano?”

(James Lovelock, 26 luglio 1919)

Se la Terra stessa fosse un essere vivente e la vita non si fosse mai spenta grazie ad essa? Se fosse l'ambiente ad adattarsi alle esigenze dei suoi esseri viventi e non viceversa? In questo modo ogni individuo¹³⁶, pianta o animale, sarebbe responsabile (anche se inconsciamente) della regolazione e dell'organizzazione di un sistema fisiologico più grande: l'intero pianeta. Quest'ipotesi, chiamata Gaia (dal termine greco *gea* che significa terra), potrebbe risolvere moltissimi dubbi riguardanti lo straordinario equilibrio della Terra nei confronti degli esseri viventi che la popolano. È proprio così che lo scienziato britannico James Lovelock spiega la nascita della vita sulla Terra ed in particolare la sua evoluzione verso forme sempre più complesse. La formulò verso la fine degli anni Settanta, in seguito a varie ricerche condotte sulla possibilità di vita nel Sistema Solare (particolarmente incentrate su Marte).

Il nome deriva dall'antica mitologia greca, dove Gaia (detta anche Gea) era la dea primordiale della Terra. Secondo l'**ipotesi di Gaia** di Lovelock gli organismi viventi non si adattano passivamente all'ambiente, bensì interagiscono in modo attivo al fine di mantenere un equilibrio tra le condizioni fisiche e chimiche della biosfera. La Terra viene considerata come un unico macrosistema che è in grado di autoregolarsi a seconda delle circostanze: esiste un sottile equilibrio che, se dovesse

¹³⁵ danielegasparri.blogspot.ch, “Astronomia per tutti: Quante galassie ci sono nell'universo? Ce lo dice l'Hubble Ultra Deep Field”. Web.

¹³⁶ L'essere umano, insieme a tutte le sue attività e costruzioni, rappresenta in realtà un fattore inquinante per Gaia, in quanto anche se non facente parte del sistema, interagisce considerevolmente con esso, modificando fattori come temperatura, atmosfera, composti chimici, e altri.

improvvisamente rompersi (ad esempio in seguito a catastrofi naturali, come terremoti, eruzioni vulcaniche o uragani), cercherebbe di ripristinarsi subito, proprio come se la Terra e la vita su di essa fossero un'unica entità.¹³⁷



Figura 30: Bassorilievo raffigurante la dea Gaia (conosciuta dai romani come dea Tellure) seduta su un trono con una corona. I due bambini in grembo sono simbolo di vita e creazione (i frutti della Madre Terra). L'opera è custodita nel museo dell'Ara Pacis a Roma.

6.5 Contatto

Come cercare vita intelligente in un immenso universo? Il metodo più diretto oggi è quello di captare i segnali (onde radio) emessi da una civiltà aliena sconosciuta dotata di qualcosa di simile alla tecnologia radio. Ecco dunque nascere il progetto SETI con l'obiettivo sia di captare altri segnali, che trasmetterne nello spazio. Ma anche con le tecnologie odierne più avanzate, permangono due importanti problemi che concernono le grandi distanze interstellari (e la limitatezza della velocità della luce che obbliga qualsiasi onda elettromagnetica a propagarsi al massimo a 300'000 chilometri al secondo) e dove cercare: anche limitandoci ad inviare il nostro segnale alle stelle più vicine, ci sono talmente tante stelle che saremmo comunque obbligati a scegliere tra migliaia e migliaia di direzioni diverse! Per questo motivo sono necessarie un'organizzazione di ricerca ben strutturata, molto tempo, finanziamenti adeguati, e soprattutto moltissima fortuna.

In questo breve capitolo riguardante il contatto con civiltà extraterrestri intelligenti verrà approfondito prima di tutto l'organizzazione scientifica del SETI (in cosa consiste, da chi fu fondata, di cosa si occupa, previsioni future, ecc.). In seguito descriverò più in dettaglio la vicenda del Messaggio di Arecibo, trasmesso nello spazio dagli astronomi del SETI nel 1974, e della possibile risposta ricevuta nel 2001, soprannominata il Codice di Chilbolton.

¹³⁷ giovannidelponte.com, "L'ipotesi Gaia: la Terra come organismo vivente!". Web.

6.5.1 Il SETI

Proprio come nel film *Contact* (1997) in cui Jodie Foster interpreta la parte di un'astronoma determinata ad intercettare a tutti i costi un messaggio di origine extraterrestre, anche nella realtà esistono scienziati e astronomi che svolgono questo lavoro ogni giorno. Il personaggio interpretato dalla Foster è infatti ispirato a Jill Tarter, direttrice del centro per le ricerche del **SETI Institute** (Serach for Extra-Terrestrial Intelligence). Si tratta di un'organizzazione scientifica privata che ha come scopo principale non tanto cercare gli alieni su ipotetici pianeti simili alla Terra (come lo è la ricerca di pianeti extrasolari), ma piuttosto riuscire ad identificarli captando trasmissioni radio inviate nello spazio.

“The mission of the SETI Institute is to explore, understand and explain the origin, nature and prevalence of life in the universe. We believe we are conducting the most profound search in human history, to know our beginnings and our place among the stars.” (SETI Institute)¹³⁸

Oltre che a intercettare segnali radio dallo spazio, il programma SETI si occupa anche di inviare segnali ad eventuali altre civiltà in grado di captarle (come il Messaggio di Arecibo trasmesso nello spazio il 16 novembre 1974, che approfondirò nel capitolo 6.5.2). A questo scopo le principali tecnologie usate sono i radiotelescopi, specializzati nel rilevare le onde radio emesse da varie radiosorgenti disseminate nell'Universo.

Il SETI Institute è stato fondato da Frank Drake¹³⁹ insieme a Carl Sagan nel 1974 a Mountain View, in California. La sua idea è partita inizialmente nel 1960 con il Progetto Ozma, quando puntò per la prima volta il radiotelescopio di Green Bank, in West Virginia, verso due stelle simili al Sole relativamente vicine a noi: τ Ceti e ϵ Eridani. Anche se non vi trovò nessun alieno, la sua idea aprì la strada a nuove importanti ricerche.

È un progetto molto ambizioso e soprattutto arduo: la nostra galassia, la Via Lattea, ha un diametro di 100'000 anni luce e contiene oltre trecento miliardi di stelle! È un po' come se si cercasse di captare un segnale radio senza avere la minima idea di dove puntare l'antenna e a quale frequenza sintonizzarsi. Per convenzione sia Drake sia i suoi successori hanno scelto di sintonizzarsi sulla frequenza caratteristica a cui emette un atomo di idrogeno neutro (1'420 megahertz), che è anche l'elemento più diffuso in natura e di cui sono fatte le stelle.

Per molti ciò che il SETI Institute si propone di affrontare rappresenta la proverbiale ricerca di un ago in un pagliaio, ma permette di avere un enorme vantaggio: dato che non è così facile organizzare un viaggio interstellare alla velocità della luce, restare sulla Terra e utilizzare ricevitori molto sensibili per captare segnali radio provenienti dallo spazio rappresenta un'alternativa molto più semplice.

¹³⁸ seti.org, “SETI Institute: Our Mission”. Web.

¹³⁹ Frank Drake è anche famoso per aver scritto la formula matematica meglio conosciuta come equazione di Drake (vedi capitolo 6.3) e per aver ideato insieme a Carl Sagan il Messaggio di Arecibo (vedi capitolo 6.5.2).

Malgrado tutte le ricerche svolte e gli sforzi dedicati in questo progetto, fino ad oggi non è stato possibile rilevare nessun segnale di sicura origine aliena proveniente dallo spazio. Molti astronomi ritengono che si tratti unicamente di un problema di tempo, e di vastità dell'Universo, e si sente spesso dire fra ricercatori del SETI:

“L'assenza di prove non è una prova dell'assenza.” (Carl Sagan)

Recenti previsioni ci informano che “L'intelligenza aliena potrebbe essere individuata entro il 2040”. Si tratta di un'aspettativa piuttosto ambiziosa proveniente da Seth Shostak (20 luglio 1943) del SETI. Secondo lo scienziato infatti entro 25 anni gli astronomi avranno perlustrato talmente tante stelle in cerca di vita extraterrestre intelligente, che le probabilità di svelare un segnale elettromagnetico alieno saranno molto grandi. Tanta speranza deriva soprattutto dalle osservazioni compiute dal telescopio Kepler che hanno dato prova di quanti mondi potenzialmente in grado di sostenere la vita potrebbero esistere: una stella ogni cinque possiede almeno un pianeta sul quale potrebbe svilupparsi la vita, e considerando che nella Via Lattea ci sono più di trecento miliardi di stelle, ne risulta davvero una grossa cifra...¹⁴⁰



Figura 31: Fotografia dei radiotelescopi del SETI Institute, in California.

6.5.2 Il Messaggio di Arecibo e i cerchi nel grano

Considerando la vastità dell'Universo e che la velocità della luce è finita, la maggior parte delle stelle della Via Lattea e i loro miliardi di pianeti distano dalla Terra centinaia di migliaia di anni luce. Pertanto dovranno trascorrere centinaia di migliaia di anni prima che un'eventuale civiltà extraterrestre intelligente possa captare i segnali della Terra e altrettanti perché la loro risposta ci

¹⁴⁰ AaVv, 11 febbraio 2014, “Ho visto cose...”, in: *La Regione Ticino*.

possa giungere. A questo punto esistono due conclusioni: o siamo davvero soli nell'Universo, oppure dovremo sopporlo fino al momento in cui non ci giungerà una risposta (se ci giungerà mai). In entrambi i casi dovrà trascorrere un'eternità!¹⁴¹

Negli anni '70 gli astronomi erano già a conoscenza di questa realtà, ma comunque non si sono tirati indietro: il 16 novembre del 1974 fu trasmesso nello spazio dal radiotelescopio di Arecibo, a Porto Rico, un messaggio indirizzato a possibili extraterrestri nell'ammasso globulare di Ercole¹⁴², a 25'000 anni luce dalla Terra. Questo famoso messaggio radio (trasmesso ad una frequenza di 2'380 megahertz per tre minuti) è meglio conosciuto come **Messaggio di Arecibo**, il quale fu ideato da Frank Drake con l'aiuto di Carl Sagan e altri. Anche se così può sembrare, in realtà il messaggio non è stato trasmesso affinché fosse ricevuto da una razza aliena (anche perché impiegherebbe 25'000 anni solo per arrivare a destinazione), ma piuttosto come dimostrazione delle conquiste tecnologiche raggiunte dall'Uomo (e per l'inaugurazione dell'ampliamento del telescopio di Arecibo).

Il messaggio è composto da 1'679 cifre binarie (volutamente scelto in quanto è il prodotto di due numeri primi, 23 e 73, e quindi facilmente intuibile da qualsiasi essere intelligente) che, se sistemate in 73 righe e 23 colonne (una matrice 23×73), formano un'immagine nella quale si possono riconoscere varie informazioni (leggendolo da sinistra a destra e dall'alto al basso): i numeri da 1 a 10, i numeri atomici degli elementi più diffusi sulla Terra (idrogeno, carbonio, azoto, ossigeno e fosforo), la rappresentazione grafica della composizione chimica del DNA umano (formule chimiche per le basi e i nucleotidi) e la relativa doppia elica della molecola, la figura stilizzata di un essere umano (con l'altezza media) e il numero della popolazione della Terra (circa 4 miliardi, relativa a quell'anno), la nostra posizione nel Sistema Solare, e infine un rappresentazione schematica del radiotelescopio di Arecibo e la lunghezza del suo diametro.¹⁴³

L'efficacia di questo messaggio è stata a lungo dibattuta, ma dato che la risposta non ci sarebbe giunta entro 50'000 anni, l'esperimento fu archiviato come una sorta di spot pubblicitario. Inoltre fu anche oggetto di molte polemiche: molti non trovarono giusto che un ristretto gruppo di persone si attribuisse il diritto di parlare a nome di tutta la popolazione terrestre, per di più regalare tutte quelle informazioni sul genere umano ad una razza aliena sconosciuta (che potrebbe anche non avere intenzioni troppo pacifiche verso di noi), è stata definita una pericolosa divulgazione di dati.¹⁴⁴

¹⁴¹ H.A.Smith, 3 dicembre 2012, "Siamo soli nell'universo?", in: *Le Scienze*.

¹⁴² L'ammasso globulare di Ercole è conosciuto anche come M13, secondo il catalogo di Messier (il primo catalogo astronomico di oggetti celesti diversi dalle stelle, compilato da Charles Messier nel 1774), oppure come NGC 6205, secondo il New General Catalogue, il più famoso catalogo di oggetti del cielo profondo (si tratta anche di quello più completo, in quanto non si specializza solo in galassie ma contiene tutti i tipi di oggetti). Quest'ultimo fu compilato da John Dreyer (1852-1926) nel 1880 e successivamente espanso e corretto.

¹⁴³ ufoonline.it, "Tutti i messaggi interstellari che abbiamo inviato verso altri mondi". Web.

¹⁴⁴ Wikipedia Contributors. "Messaggio di Arecibo". *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Web.

How to decypher the message

Original 1974 message

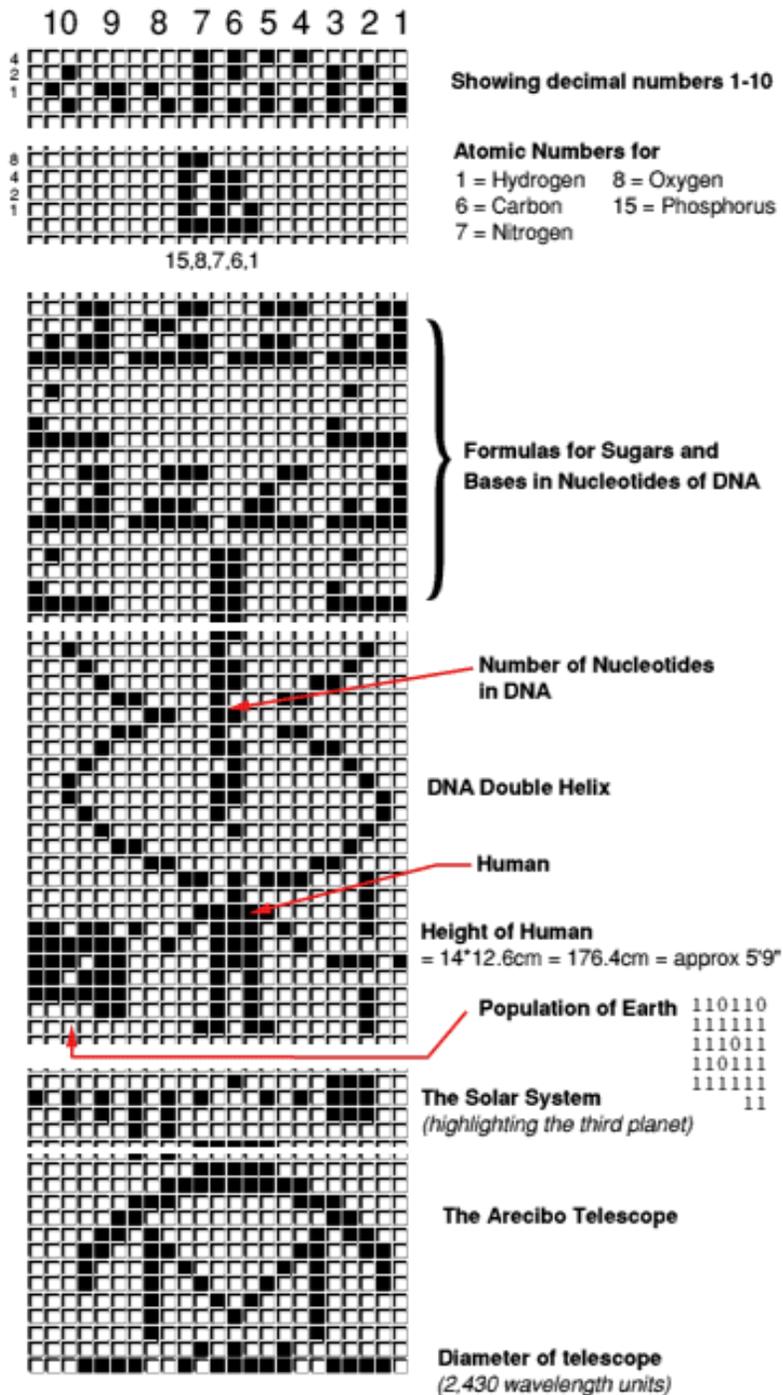


Figura 32: A prima vista si tratta di un mucchio di 1 e 0, ma in realtà, guardando meglio, ci si accorge che gli 1 formano un disegno ben distinto. Una volta decodificato il Messaggio di Arecibo si ottengono moltissime informazioni sul genere umano.

Il 19 agosto del 2001 apparve invece un interessante ed enigmatico pittogramma in un campo nei pressi del radiotelescopio di Chilbolton, in Inghilterra. Si tratta dei famosi **cerchi nel grano (o il Codice di Chilbolton)** che vennero interpretati, anche se la comunità scientifica non prese l'evento in seria considerazione, come una possibile risposta al Messaggio di Arecibo da parte di una civiltà extraterrestre. Dalla decodificazione del messaggio (interpretato nello stesso modo in cui venne composto il Messaggio di Arecibo), alcune informazioni risultarono esattamente uguali (come ad esempio i numeri da 1 a 10 o la rappresentazione dei nucleotidi costituenti il DNA alieno), mentre altre mostrarono evidenze di una civiltà extraterrestre (il silicio al posto del carbonio tra gli elementi necessari alla vita, un DNA alieno leggermente diverso da quello terrestre con il doppio dei nucleotidi, una popolazione di 9 miliardi di individui, una figura umanoide macrocefala e un sistema planetario composto anch'esso da nove pianeti di cui però tre abitati).¹⁴⁵ Certo, il fatto che gli alieni ci somiglino così tanto potrebbe essere solo una coincidenza, ma sembra estremamente improbabile che un qualsiasi sistema planetario abbia già ricevuto il Messaggio di Arecibo (figuriamoci una civiltà a 25'000 anni luce).¹⁴⁶ Inoltre perché scrivere nel grano quando avrebbero benissimo potuto comunicare via radio più velocemente come il messaggio originale? D'altro canto però risulta difficile pensare ad uno scherzo, in quanto gli autori dovrebbero per forza conoscere il linguaggio binario ed essere quindi matematici e biologi. È stato addirittura ipotizzato che il sistema planetario alieno composto da nove pianeti sia in realtà il nostro Sistema Solare e che quindi i pianeti abitati siano la Terra, Marte e Giove con le sue lune (specialmente Europa, Io, Ganimede e Callisto).¹⁴⁷

¹⁴⁵ croponline.org, "Messaggi dal cosmo: 2001, l'anno del contatto". Web.

¹⁴⁶ cicap.org, "Disegni nel grano a Chilbolton: l'opinione del SETI". Web.

¹⁴⁷ web.ticino.com, "Crop Circles di Chilbolton". Web.

Changes in the crop formation

(Applying a 30 pixel radius, 300% contrast boost unsharpen mask filter)

(Photo © Lucy Pringle)

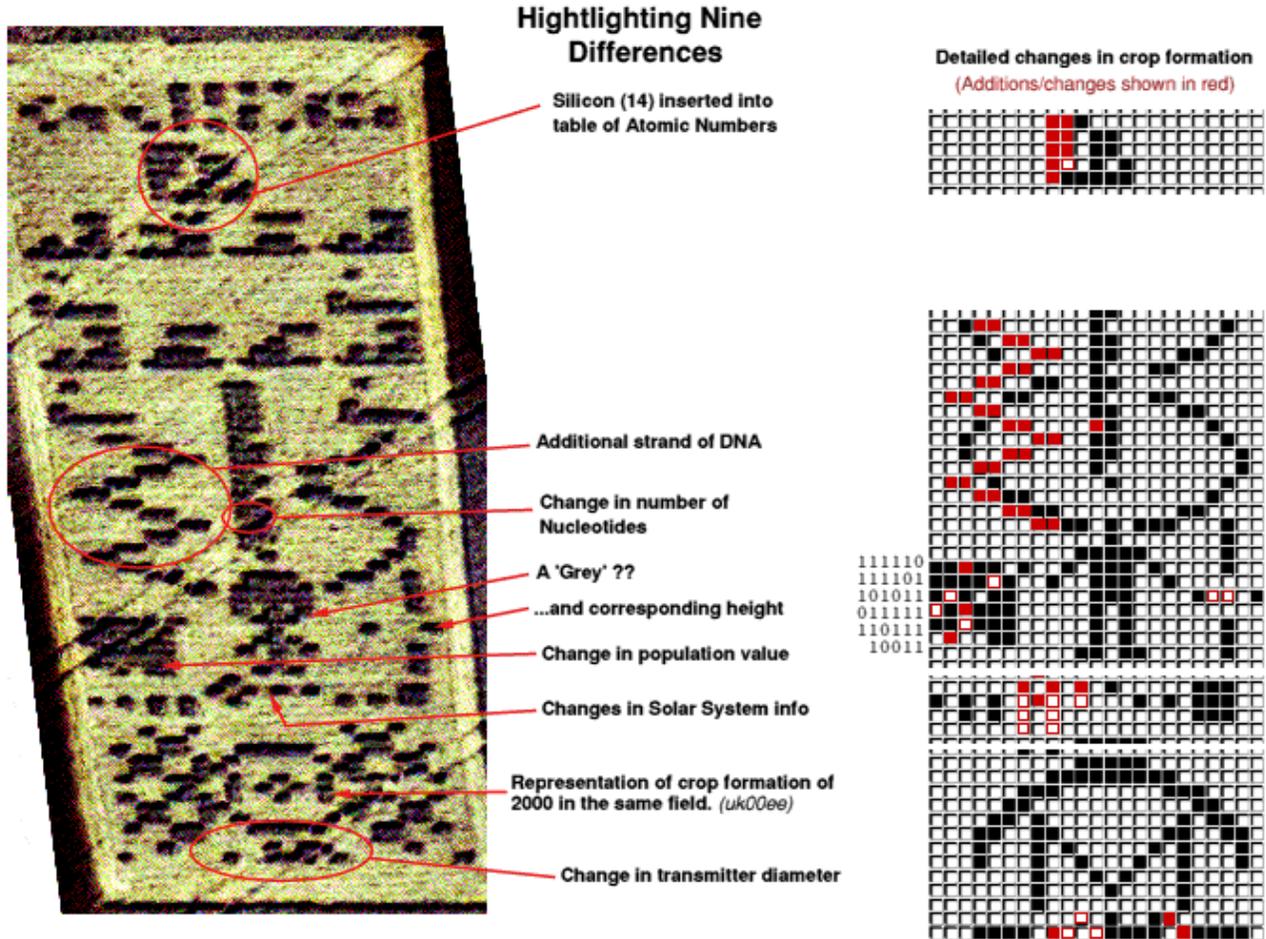


Figura 33: Nell'immagine a sinistra una foto dei cerchi nel grano, mentre a destra il Codice di Chilbolton confrontato con il Messaggio di Arecibo. Tra le tante differenze esistono però anche molte equivalenze.

7 Conclusioni

Cosa ci spinge a cercare mondi sui quali forse non metteremo mai piede? L'Universo è talmente grande che, anche sapendo dove cercare, si tratterebbe comunque di una ricerca infinita. Ma è proprio per questo che ci crediamo fermamente: in uno spazio immenso con 100 miliardi di galassie, ognuna con 100 miliardi di stelle, deve esistere un pianeta simile al nostro. E se almeno non completamente simile, perché la vita non dovrebbe potersi sviluppare sotto altre condizioni? Troppo spesso definiamo le forme di vita extraterrestre simili a noi, come se fossero le uniche possibili. Per fortuna però la natura ha più fantasia di noi.

Per il momento non è stata scoperta nessun'altra forma di vita, né si dispone di prove sicure che facciano presupporre qualcosa di simile, ma nonostante ciò la ricerca continua inarrestabile. A livello personale sono convinta dell'esistenza di forme di vita su altri pianeti, e forse un giorno o l'altro disporremo di una tecnologia sufficientemente avanzata da permetterci di raggiungere i nostri obiettivi. Perciò per il momento la grande domanda rimane in sospeso: la vita può svilupparsi unicamente quando le condizioni ottimali sono soddisfatte oppure è apparsa una sola volta nell'Universo?

8 Glossario

[1] Con la **misura trigonometrica della parallasse** è possibile misurare con molta accuratezza distanze stellari, attraverso appunto calcoli trigonometrici. Fu Friedrich Bessel (1784-1846), uno dei più rappresentativi astronomi del XIX secolo, ad osservare la prima parallasse stellare: nel 1838, grazie all'introduzione dell'eliometro di Joseph Von Fraunhofer (1787-1826), riuscì a determinare la parallasse della stella 61 Cygni (che determinava una distanza di 10,7 anni luce), con una precisione ammirabile anche ai nostri giorni. Si tratta di un metodo molto antico ma affidabile, anche se ancora oggi è applicabile solo ad oggetti relativamente vicini: a causa dei minuscoli spostamenti parallattici infatti, le osservazioni dalla Terra forniscono misure affidabili per distanze stellari non più grandi di circa 325 anni luce (più una stella è lontana, più la sua parallasse è piccola e difficile da misurare accuratamente).

Per meglio visualizzare la situazione, è necessario osservare la figura 34.

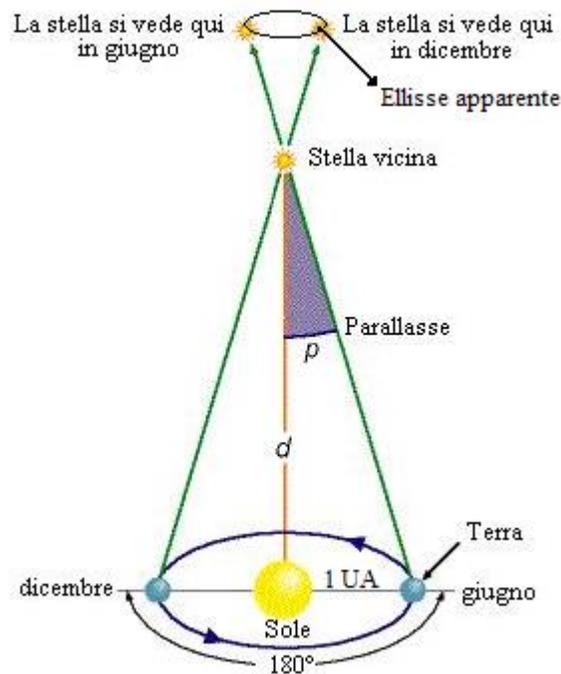


Figura 34: Rappresentazione schematica della parallasse.

Si definisce parallasse (trigonometrica) di una stella lo spostamento angolare apparente di un oggetto quando viene osservato da due punti di vista diversi. Si misura in unità di secondo d'arco (simbolo: arcsec oppure ").

In questo caso la stella viene osservata dalla Terra nei mesi di giugno e dicembre (rispettivamente i solstizi d'estate e d'inverno, i periodi in cui il moto apparente del Sole lungo l'eclittica raggiunge il punto di declinazione massimo e minimo), alla distanza quindi di 6 mesi. Sembrerebbe che la stella si sposti, ma si tratta unicamente di un

movimento apparente, in quanto è causato dalla diversa inclinazione dell'asse di rotazione terrestre rispetto al piano dell'eclittica.

Pertanto, per calcolare la distanza della stella d (in parsec), si applica la seguente formula:

$$d = \frac{1}{p}$$

dove p è la misura di parallasse (in arcsec) della stella.

Questa tecnica ha introdotto nel calcolo di distanze stellari una nuova unità di misura, oggi preferibilmente usata rispetto all'anno luce: il *parsec* (pc). Un parsec (che significa “*par*allasse di un *sec*ondo d'arco”) corrisponde alla distanza a cui si trova una stella ideale che ha una parallasse di, appunto, un secondo d'arco (1”), equivalente a circa 3,26 anni luce o $3,086 \cdot 10^{16}$ metri.

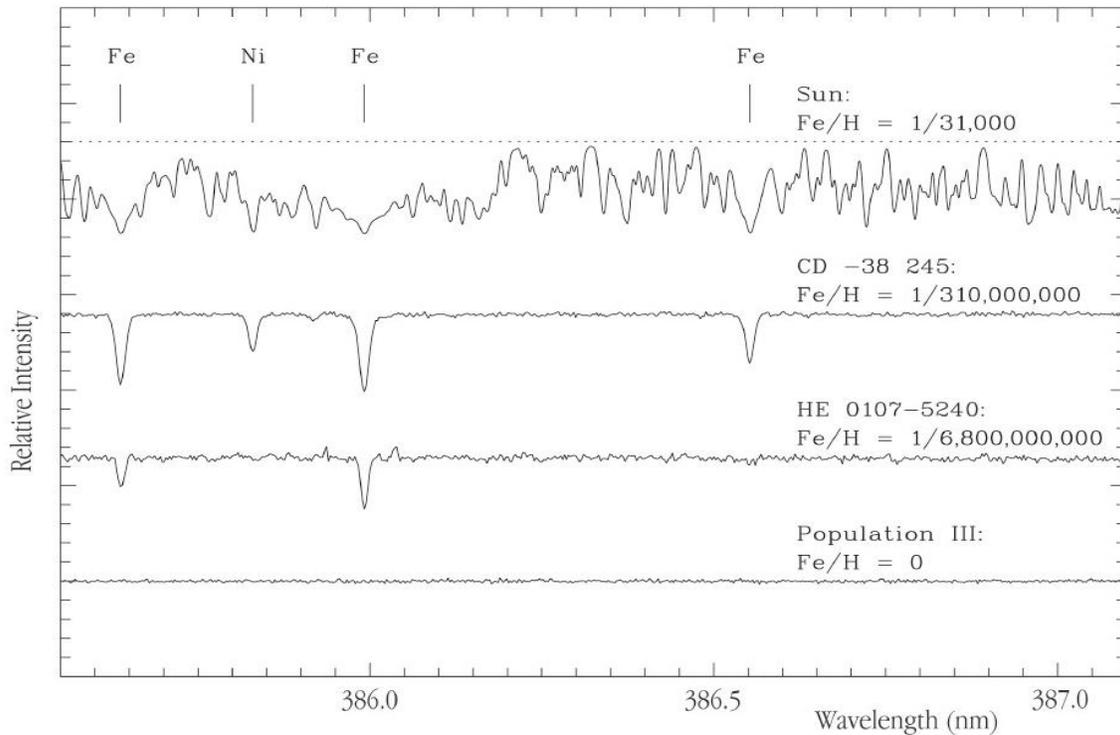
Facciamo un esempio: la stella a noi più vicina, Proxima Centauri, presenta una parallasse di 0,750” (arcsec). Per calcolare la sua distanza dalla Terra, si avrà:

$$d = \frac{1}{0,750} = 1,33[pc] = 4,3[al]$$

che corrisponde al valore approssimato della distanza di Proxima Centauri!¹⁴⁸

- [2] Come già detto, la **metallicità** di un determinato pianeta è la frazione in massa di elementi diversi da idrogeno o elio (tutti gli elementi più pesanti in astronomia sono definiti metalli). Si prende come riferimento la metallicità del Sole (che è circa l'1.6% della massa): viene espressa come [Fe/H], cioè il logaritmo del rapporto dell'abbondanza di ferro della stella rispetto a quella del Sole. È possibile misurare la metallicità di una stella dallo spettro di assorbimento degli elementi contenuti nell'atmosfera stellare. È inoltre risaputo che la metallicità di un oggetto può fornire indicazioni sulla sua età: infatti (secondo le attuali teorie cosmologiche) quando l'Universo si formò, era composto quasi completamente da idrogeno ed elio (in parte minore anche da carbonio, magnesio e calcio) e solo crescendo di età, è cresciuto anche il contenuto di metalli (a causa della nucleosintesi stellare e dell'arricchimento di metalli). Quindi le stelle più vecchie (cosiddette di popolazione II/III) hanno una metallicità molto bassa, praticamente nulla, e si sono formate dalla condensazione di idrogeno, elio e litio (i soli elementi presenti subito dopo il Big Bang).

¹⁴⁸ oilproject.org, “Definizione di stella e metodi per misurarne la distanza”. Web.



Spectra of Stars with Different Metal Content

Figura 35: Esempio raffigurante la comparazione di una regione dello spettro del Sole (in alto) con quelle delle stelle CD -38 245 (seconda riga dall'alto), HE 0107-5240 (terza dall'alto), entrambi povere di ferro, e, per finire, di un'ipotetica stella di Popolazione III, consistente soltanto di elementi prodotti nel Big Bang (cioè idrogeno ed elio, con tracce di litio). Come si può vedere, le righe spettrali di assorbimento divengono progressivamente più deboli con il decrescere del contenuto di elementi pesanti. I due spettri centrali dimostrano che HE 0107-5240 è davvero molto più povera di metalli rispetto a CD -38 245: le righe del ferro (Fe) nello spettro di HE 0107-5240 sono più sottili (o assenti) e la riga del Nickel (Ni) è del tutto invisibile.

- [3] Il **modello dei Giovi Saltellanti** è basato sul fenomeno della migrazione orbitale dei pianeti. Si tratta di un'alterazione significativa dei parametri orbitali di un pianeta o di un satellite naturale rispetto ai valori iniziali che aveva al momento della sua formazione. Questo è causato dall'interazione con il disco di gas e polveri: spostandosi, il pianeta solleva onde di densità nel disco, e la sua orbita forma una spirale. Nella maggior parte dei casi, questa spirale è verso l'interno (il risultato sono infatti i pianeti gioviani caldi), mentre più raramente verso l'esterno¹⁴⁹.

¹⁴⁹ I. Shigern, L. Dacheng, 2005, "Toward a Deterministic Model of Planetary Formation", in: *The Astrophysical Journal*.

[4] La **velocità radiale** corrisponde alla velocità relativa di un astro o corpo celeste lungo la linea di vista osservatore-oggetto¹⁵⁰. Dato che nell'Universo non esiste un punto fermo al quale riferire le velocità assolute, spesso si considera ferma la Terra (o il Sole)¹⁵¹ e si calcola la velocità radiale di un astro rispetto ad essa. Pertanto la velocità radiale corrisponde all'avvicinamento o all'allontanamento dalla Terra di un qualsiasi oggetto celeste. La si può determinare con precisione esaminando lo spostamento che le righe dello spettro subiscono per effetto Doppler.

Le maggiori velocità radiali misurate sono di 400 km/s, ma nella maggior parte delle stelle non si osserva una velocità superiore ai 60 km/s.

La **velocità assoluta** delle stelle della nostra galassia (rispetto alle galassie esterne) varia, in genere, a seconda della loro distanza dal centro della galassia. Quella del Sole è di circa 230 km/s, mentre per le altre stelle è inferiore per quelle più vicine al centro della galassia e va crescendo fino a quelle che distano circa 15000 anni luce: da questa fascia la velocità decresce lentamente.¹⁵²

[5] L'**effetto Doppler** è la variazione apparente della frequenza o lunghezza d'onda emessa da una stella in movimento rispetto all'osservatore.¹⁵³ Questa stella può "oscillare" in due direzioni diverse: verso di noi o nella direzione opposta. Quindi, a dipendenza se essa è in avvicinamento o allontanamento, le linee spettrali osservate nello spettro appaiono spostate verso il blu o verso il rosso. Questi due fenomeni sono noti rispettivamente come *blueshift* (o spostamento verso il blu, quindi verso frequenze maggiori) e *redshift* (o spostamento verso il rosso, quindi verso frequenze minori).

La formula generale della frequenza (apparente) v_{app} è data da:

$$v_{app} = v_{reale} \frac{v_{onda} + v_{oss}}{v_{onda} - v_{sorgente}}$$

dove v_{reale} è la frequenza reale, v_{oss} la velocità dell'osservatore ($v_{oss} > 0$ quando l'osservatore si muove verso la sorgente), $v_{sorgente}$ la velocità della sorgente ($v_{sorgente} > 0$ quando la sorgente si muove verso l'osservatore), v_{onda} la velocità delle onde nel mezzo.

¹⁵⁰ Non è possibile misurare la velocità reale o orbitale.

¹⁵¹ Talora invece si considera relativamente fermo un gruppo di galassie esterne e si calcola la velocità assoluta (relativa a tali galassie) delle stelle entro la nostra galassia.

¹⁵² R. Zambelli, *8.2 Movimenti delle stelle*, in R. Zambelli (a cura di), *Proemio di astronomia, geofisica, geologia, antropologia*, Bergamo, Grafedit s.p.a. Azzano S.Paolo, 1978 (Edizione 1981).

¹⁵³ Quindi la frequenza della radiazione ricevuta dall'osservatore differisce dalla frequenza della sorgente.

Questo effetto in astronomia è fondamentale in quanto permette di misurare la velocità con cui stelle e galassie si stanno avvicinando o allontanando da noi (da cui la teoria pressoché indiscussa sull'espansione dell'Universo) oppure di scoprire che una stella apparentemente singola è, in realtà, una stella binaria con componenti molto vicine fra loro (metodo delle velocità radiali, capitolo 5.2.2).

L'effetto fu analizzato per la prima volta da Christian Andreas Doppler nel 1845.

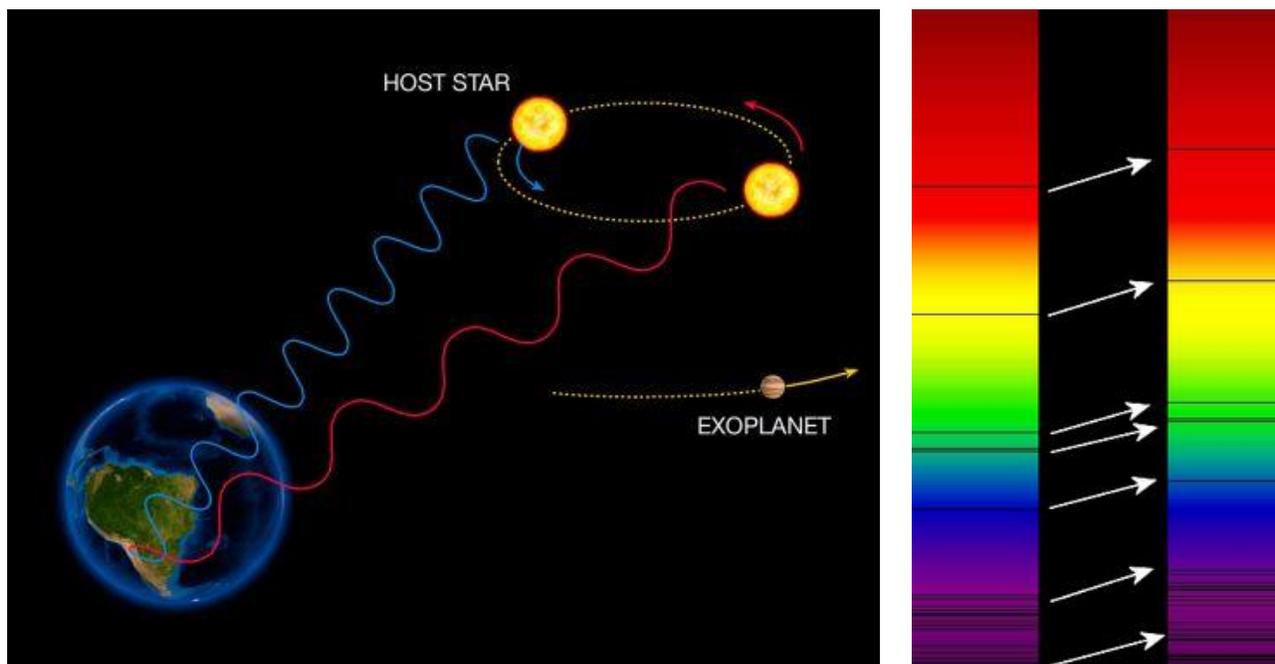


Figura 36: A sinistra, una rappresentazione schematica dell'effetto Doppler. A causa del suo effetto, la radiazione emessa da una sorgente in movimento (stella ospite) rispetto ad un osservatore (Terra) risulta spostata verso il blu o il rosso a dipendenza se essa si sta avvicinando o allontanando. Con osservazioni spettroscopiche è poi possibile ricavare la sua velocità relativa (velocità radiale).

A destra, un esempio di redshift.

[6] La **zona di abitabilità**¹⁵⁴, o liquid-water Habitable Zone (HZ), di una stella è definita come quell'area intorno ad essa che è situata ad una distanza tale da permettere la presenza di acqua liquida. Se in quest'area, simile ad una corona circolare, dovesse orbitare un ipotetico pianeta, la temperatura sarebbe ideale per mantenere sulla sua superficie acqua allo stato liquido. Tuttavia questo concetto è basato sulle condizioni favorevoli per la vita sulla Terra, dove l'acqua è fondamentale per la vita. Si dà quindi per scontato che un

¹⁵⁴ Viene anche chiamata zona circumstellare abitabile.

pianeta situato nella zona abitabile (con probabile presenza di acqua) sia più propenso ad ospitare vita extraterrestre.¹⁵⁵

La zona abitabile è determinata in base alla luminosità e alla dimensione della stella nel sistema stellare: sarà più distanziata se quest'ultima è di classe O (molto calda), mentre più vicina se è di classe M (più fredda). Inoltre non è escluso che possa cambiare nel tempo: le stelle non sono immutabili (anche la nostra confortevole zona abitabile sulla Terra cambierà tra qualche milione di anni quando il Sole diventerà molto più grande e caldo).

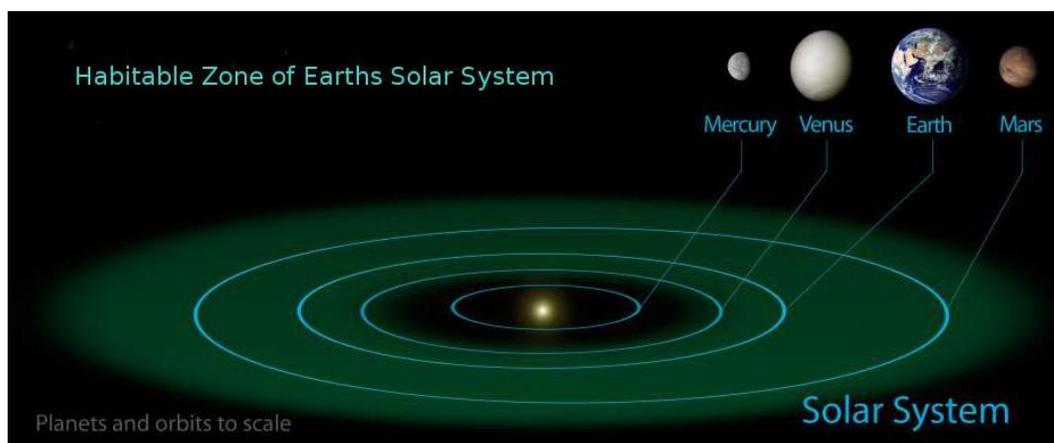


Figura 37: L'immagine mostra la zona abitabile del Sistema Solare.

In generale la distanza da una stella alla quale un pianeta presenta sulla sua superficie acqua liquida (e quindi possibili forme di vita) può essere calcolata conoscendo la dimensione e la luminosità della stella stessa:

$$d = \sqrt{\frac{L_*}{L_{\odot}}}$$

dove d è il raggio della zona abitabile espresso in UA, L_* è la luminosità della stella e L_{\odot} è la luminosità del Sole.¹⁵⁶

Come già accennato in precedenza, la zona abitabile può variare nel tempo, poiché le stelle si evolvono, cambiando la loro luminosità e temperatura. Il nostro Sistema Solare, secondo varie stime e modelli scientifici, ha una zona abitabile compresa tra 0,73 e 3,0 UA. Anche se Venere, l'orbita della Luna, Marte e il pianeta nano Cerere sono all'interno della zona

¹⁵⁵ Si tratta unicamente di supposizioni ragionevoli attuate dalla mente umana, non conoscendo nessun altro tipo di forma di vita, ma non è detto che l'acqua sia l'unico elemento possibile su cui si baserebbe la vita.

¹⁵⁶ Wikipedia Contributors. "Zona abitabile". *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Web.

abitabile, non sono comunque assolutamente abitabili, a causa delle pressioni atmosferiche assai diverse.

Il concetto di zona abitabile è possibile anche applicarlo in un campo molto più grande, che non riguarda più solo il sistema stellare, ma l'intera galassia. In questo caso è chiamata **zona galattica abitabile** (GHZ, Galactic Habitable Zone), anch'essa fondamentale per quanto riguarda lo sviluppo della vita. La teoria fu sviluppata per la prima volta nel 1995 da Guillermo Gonzalez (1963) e afferma che un sistema stellare, per essere favorevole alla vita, deve trovarsi abbastanza vicino al centro galattico, poiché vi sono concentrazioni maggiori di elementi pesanti ed è più facile che i pianeti rocciosi si originino. Inoltre elementi pesanti come il ferro o lo iodio sono essenziali per la formazione di moltissime molecole organiche complesse: pensiamo solo al ruolo essenziale del ferro nella formazione dell'emoglobina. D'altro canto però sarebbe più sicuro stare lontani dal centro galattico, considerato che nella zona più interna della galassia la maggior parte delle stelle sono vecchie, instabili e pressoché morenti, per non parlare dei frequenti impatti dovuti a comete e asteroidi. Nel centro della galassia si trova anche un massiccio buco nero, che risucchia stelle e interi pianeti, e numerosi pianeti giovani caldi che potrebbero impedire ai pianeti di orbitare in modo stabile attorno alla propria stella (a causa delle attrazioni gravitazionali esercitate da essi). Al momento è molto difficile stabilire con precisione la zona galattica abitabile della Via Lattea: alcune stime fanno intuire che si estenda ad una distanza di 25'000 anni luce dal centro galattico (che conta per la maggior parte stelle di età compresa tra 4 e 8 miliardi di anni).

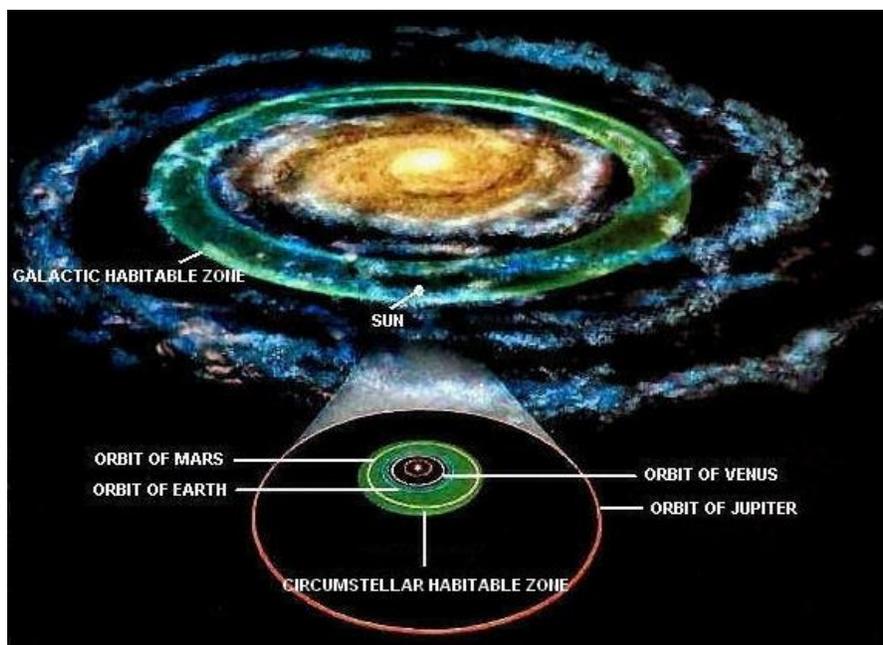


Figura 38: Schematizzazione della zona galattica abitabile della nostra galassia.

9 Riferimenti bibliografici

Libri

- A. Conti, maggio-giugno 2008, “Astronotiziario: meteoriti vitali”, in: *Meridiana*, n. 195, pp. 9-10.
- A. Conti, novembre-dicembre 2009, “Astronotiziario: aminoacidi cometari”, in: *Meridiana*, n. 204, pp. 9-10.
- AaVv, 11 febbraio 2014, “Ho visto cose...”, in: *La Regione Ticino*, p. 32.
- CMSI (Commissione di matematica della Svizzera italiana), *Formulari e tavole: matematica, fisica, chimica*, Bellinzona, Édition G d’Encre, 2011; tr. it.: pp. 192-193.
- D. Goldsmith, settembre 2009, “Trovare pianeti non basta”, in: *Le Scienze*, n. 493, p. 47.
- H.A. Smith, 3 dicembre 2012, "Siamo soli nell'universo?", in: *Le Scienze*, n. 532, pp. 58-65.
- M. Caspar, L. Rothenfelder, M. List, *Bibliographia Kepleriana. Ein Führer durch das gedruckte Schrifttum von Johannes Kepler*, München, Beck, 1936 (Edizione 1968).
- R. Dinwiddie, D. Hughes, C. Stott, *La famiglia del Sole* (pp. 18-19), *La storia del Sistema Solare* (pp. 16-17), *Meteorite e meteoriti* (pp. 134-135), in M. Rees (a cura di), *Grande enciclopedia per ragazzi: Universo*, Roma, Mondadori, 2005; tr. it.: vol II.

Siti Internet

- Wikipedia Contributors. “Stonehenge”. *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, 15 settembre 2014.
< <http://it.wikipedia.org/wiki/Stonehenge> > 20 settembre 2014
- Wikipedia Contributors. “Woodhenge”. *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, 7 novembre 2013.
< <http://it.wikipedia.org/wiki/Woodhenge> > 20 settembre 2014
- planet.racine.ra.it, “La nascita delle costellazioni antiche”, di: Agostino Galegati. Maggio 2001.
< <http://planet.racine.ra.it/testi/costel.htm> > 20 settembre 2014
- digilander.libero.it, “Il Sistema Solare: le origini”, di: AaVv. 2 marzo 2003.
< <http://digilander.libero.it/andromedda/Sistema%20Solare%20-%20Origine.htm> > 1 settembre 2014

- digilander.libero.it, “Come è fatta una cometa”, di: G. Milani. 9 febbraio 2001.
< <http://digilander.libero.it/andromedda/Come%20osservare%20la%20comete%20-%20Come%20e%20fatta%20una%20cometa.htm> > 3 agosto 2014
- siderumpulvis.blogspot.ch, “L’origine delle comete”, di: E. Ricci. 25 agosto 2008.
< <http://siderumpulvis.blogspot.ch/2008/08/lorigine-delle-comete.html> > 3 agosto 2014
- Wikipedia Contributors. “Cometa: caratteristiche orbitali”. *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, 27 giugno 2014.
< <http://it.wikipedia.org/wiki/Cometa> > 3 agosto 2014
- cieloascuola.oato.inaf.it, “Spettacolare passaggio di due super comete nel 2013”, di: M. Aprile. 30 novembre 2012.
< <http://cieloascuola.oato.inaf.it/?p=1714> > 4 agosto 2014
- scienza.panorama.it, “Bye bye Ison! La cometa del secolo non c’è più”, di: A. Piemontese. 2 dicembre 2013.
< <http://scienza.panorama.it/spazio/Bye-bye-Ison!-La-cometa-del-secolo-non-c-e-piu> > 4 agosto 2014
- lescienze.it, “Morte di una cometa: che cosa ci ha insegnato il passaggio di ISON”, di: K. Moskowitz. 24 dicembre 2013.
< http://www.lescienze.it/news/2013/12/23/news/morte_cometa_ison_nuovi_dati-1940670/ > 4 agosto 2014
- digilander.iol.it, “Giotto vede la prima cometa”, di: AaVv. 28 giugno 2004.
< <http://digilander.iol.it/comete/giotto.htm> > 4 agosto 2014
- focus.it, “La fine della sonda Stardust”, di: M. Di Martino. 25 marzo 2011.
< <http://www.focus.it/scienza/spazio/la-fine-della-sonda-stardust> > 4 agosto 2014
- lescienze.it, “Addio alla sonda Deep Space 1”, di: AaVv. 20 dicembre 2001.
< http://www.lescienze.it/news/2001/12/20/news/addio_alla_sonda_deep_space_1-590160/ > 4 agosto 2014
- astronautinews.it, “Si conclude la missione di Deep Impact, cacciatrice di comete”, di: M. Carpentieri. 23 settembre 2013.
< <http://www.astronautinews.it/2013/09/23/si-conclude-la-missione-di-deep-impact-cacciatrice-di-comete/> > 4 agosto 2014
- Wikipedia Contributors. “Panspermia”. *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, 11 marzo 2014.
< <http://it.wikipedia.org/wiki/Panspermia> > 5 agosto 2014

- unastellaperamica.wordpress.com, “La panspermia, le comete, la vita e il ghiaccio”, di: AaVv. 22 giugno 2014.
< <http://unastellaperamica.wordpress.com/2014/06/22/la-panspermia-le-comete-la-vita-e-il-ghiaccio/> > 8 novembre 2014
- fossili.it, “Storia delle meteoriti”, di: AaVv. 16 gennaio 2010.
< <http://www.fossili.it/storiamete.html> > 30 agosto 2014
- Wikipedia Contributors. “Meteorite: impatto con la superficie terrestre”. *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, 15 agosto 2014.
< <http://it.wikipedia.org/wiki/Meteorite> > 30 agosto 2014
- castfvg.it, “La meteorite precipitata presso Hoba West”, di: L. Furlanetto. 21 dicembre 2007.
< http://www.castfvg.it/articoli/meteoriti/hoba_001.htm > 30 agosto 2014
- geoenv.it, “The Meteor Crater”, di: AaVv. s.d.
< <http://www.geoenv.it/turismo/USA/meteor.htm> > 30 agosto 2014
- glossario.oa-cagliari.inaf.it, “L’ABC dell’Universo – P come... Pianeti extrasolari”, di: AaVv. 6 novembre 2012.
< http://glossario.oa-cagliari.inaf.it/Pianeti_extrasol.html > 7 giugno 2014
- Wikipedia Contributors. “Lista dei pianeti extrasolari confermati”. *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, 21 aprile 2014.
< http://it.wikipedia.org/wiki/Lista_dei_pianeti_extrasolari_confermati > 5 giugno 2014
- digilander.libero.it, “Stelle e oggetti celesti: Alfa Centauri”, di: AaVv. 2 marzo 2003.
< <http://digilander.libero.it/andromedda/Stelle%20e%20Costellazioni%20-%20Alfa%20Centauri.htm> > 7 giugno 2014
- K. Croswell, 1991, "Does Alpha Centauri have intelligent life?", in: *Astronomy Magazine*, n. 19.
< <http://astrolink.mclink.it/topics/stelle/alfacen.htm> > 5 giugno 2014
- X. Dumusque, F. Pepe ... [et al.], 2012, “An Earth-mass planet orbiting α Centauri B”, in: *Nature - International weekly journal of science*, n. 491, pp. 207-211.
< <http://www.nature.com/nature/journal/v491/n7423/full/nature11572.html#author-information> > 5 giugno 2014
doi: 10.1038/nature11572
- eso.org, “Planet Found in Nearest Star System to Earth” di: X. Dumusque, D. Queloz, S. Udry... [et al.]. 16 ottobre 2012.
< <http://www.eso.org/public/news/eso1241/> > 6 giugno 2014

- space.com, “Night Sky: Visible Planets, Moon Phases & Events, June 2014” di: M. Wall. 2 giugno 2014.
< <http://www.space.com/18089-earth-size-alien-planet-alpha-centauri.html> > 5 giugno 2014
- K. Crowell, 1991, "Does Alpha Centauri have intelligent life?", in: *Astronomy Magazine*, n. 19.
< <http://astrolink.mclink.it/topics/stelle/alfacen.htm> > 5 giugno 2014
- Wikipedia Contributors. “51 Pegasi b”. *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, 11 luglio 2014.
< http://it.wikipedia.org/wiki/51_Pegasi_b#cite_ref-Alienplanets_2-1 > 17 luglio 2014
- space.com, “Major Discovery: New Planet Could Harbor Water and Life”, di: Ker Than. 24 aprile 2007.
< <http://www.space.com/3728-major-discovery-planet-harbor-water-life.html> > 9 giugno 2014
- sci.esa.it, “CHEOPS”, di: ESA. 8 luglio 2014.
< <http://sci.esa.int/cosmic-vision/49469-cheops/> > 17 luglio 2014
- asi.it, “CHEOPS, una missione per svelare i segreti degli esopianeti”, di: ASI. 23 ottobre 2012.
<http://www.asi.it/it/press_room/comunicati_stampa/cheops_una_missione_per_svelare_i_segreti_degli_esopianeti > 17 luglio 2014
- nemsisprojectresearch.blogspot.ch, “Nuova Tecnica Per Osservare I Pianeti Extrasolari Direttamente”, di: A. Mcpaul. 8 luglio 2012.
< <http://nemsisprojectresearch.blogspot.ch/2012/07/nuova-tecnica-per-osservare-i-pianeti.html> > 1 agosto 2014
- strangenewworlds.jimdo.com, “Metodi di deteazione”, di: S.Tosi. s.d.
< <http://strangenewworlds.jimdo.com/pianeti-extrasolari/metodi-di-deteazione/> > 30 luglio 2014
- newworlds.colorado.edu, “Coronographs and Occulters”, di: AaVv. 4 giugno 2008.
< <http://newworlds.colorado.edu/starshade/occulter.htm> > 30 luglio 2014
- Wikipedia Contributors. “Interferometria astronomica”. *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, 10 marzo 2014.
< <http://it.wikipedia.org/wiki/Interferometria> > 30 luglio 2014
- space.com, “Likely First Photo of Planet Beynd the Solar System”, di: R.R.Britt. 10 settembre 2004.
< <http://www.space.com/326-photo-planet-solar-system.html> > 30 luglio 2014
- focus.it, “Gli ‘occhiali’ del telescopio Gemini South per osservare gli esopianeti”, di: E. Intini. 29 maggio 2014.
< <http://www.focus.it/scienza/spazio/gli-occhiali-del-telescopio-gemini-south-per-osservare-gli-esopianeti> > 31 luglio 2014

- solstation.com, “Beta Pictoris”, di: Sol Company. 2 maggio 2014.
< <http://www.solstation.com/stars2/beta-pic.htm> > 31 luglio 2014
- Wikipedia Contributors. “Metodi di individuazione di pianeti extrasolari”. *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, 30 giugno 2014.
< http://it.wikipedia.org/wiki/Metodi_di_individuazione_di_pianeti_extrasolari > 29 luglio 2014
- wwwuser.oats.inaf.it, “Metodi indiretti di rivelazione di esopianeti: Il metodo astrometrico”, di: AaVv. 26 marzo 2014.
< <http://wwwuser.oats.inaf.it/vladilo/PianetiAstrobiologia/exoplan2.pdf> > 10 luglio 2014
- nasaspaceflight.com, “Soyuz ST-B successfully launches Gaia space observatory”, di: C. Bergin e W. Graham. 18 dicembre 2013.
< <http://www.nasaspaceflight.com/2013/12/soyuz-stb-launch-gaia-space-observatory/> > 10 luglio 2014
- Wikipedia Contributors. “Pulsar”. *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, 18 luglio 2014.
< http://en.wikipedia.org/wiki/Pulsar#cite_note-1 > 20 luglio 2014
- Wikipedia Contributors. “PSR B1257+12”. *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, 24 aprile 2014.
< http://en.wikipedia.org/wiki/PSR_B1257+12 > 20 luglio 2014
- M. Konacki, A. Wolszczan ... [et al.], 2003, “Masses and Orbital Inclinations of Planets in the PSR 1257+12 System”, in: *The Astrophysical Journal*, n. 591, vol. 2, pp. 147-150.
< <http://iopscience.iop.org/1538-4357/591/2/L147/fulltext/> > 20 luglio 2014
doi:10.1086/377093
- amastrofili.org, “Pianeti extrasolari e la vita nell’universo. 3. Come osservare i pianeti extrasolari? Pianeti e pulsar”, di: G. Cutispoto. 2006.
< <http://www.amastrofili.org/Doc/Articoli/2006/pianetiextrasolari03.htm> > 28 luglio 2014
- skyandtelescope.com, “COROT Mission Ends”, di: C. M. Carlisle. 25 giugno 2013.
< <http://www.skyandtelescope.com/astronomy-news/corot-mission-ends/> > 23 luglio 2014
- wwwuser.oats.inaf.it, “Metodi indiretti di rivelazione di esopianeti: Il metodo dei transiti”, di: AaVv. 26 marzo 2014.
< <http://wwwuser.oats.inaf.it/vladilo/PianetiAstrobiologia/exoplan2.pdf> > 24 luglio 2014
- link2universe.net, “Astronomi al lavoro su nuovi metodi per svelare i falsi positivi nei dati di Kepler”, di: AaVv. 18 marzo 2013.
< <http://www.link2universe.net/2013-03-18/astronomi-al-lavoro-su-nuovi-metodi-per-svelare-i-falsi-positivi-nei-dati-di-kepler/> > 24 luglio 2014
- strangeneworlds.jimdo.com, “Metodi di detezione”, di: S.Tosi. s.d.
< <http://strangeneworlds.jimdo.com/pianeti-extrasolari/metodi-di-detezione/> > 27 luglio 2014

- amastrofili.org, “Pianeti extrasolari e la vita nell’universo. 5. Lo studio degli effetti fotometrici: il metodo delle lenti gravitazionali”, di: G. Cutispoto. 2006.
< <http://www.amastrofili.org/Doc/Articoli/2006/pianetiextrasolari05.htm> > 27 luglio 2014
- A. Fukui, F. Abe ... [et. al.], 2008, “Observation of the first gravitational microlensing event in a sparse stellar field: the Tago event”.
< http://arxiv.org/PS_cache/arxiv/pdf/0708/0708.1066v3.pdf > 27 luglio 2014
- orbiterchspacenews.blogspot.it, “Astronomical Forensics Uncover Planetary Disks in NASA’s Hubble Archive”, di: AaVv. 24 aprile 2014.
< <http://orbiterchspacenews.blogspot.it/2014/04/astronomical-forensics-uncover.html?spref=fb> > 28 luglio 2014
- Wikipedia Contributors. “Giovanni Keplero”. *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, 20 maggio 2014.
< http://it.wikipedia.org/wiki/Johannes_Kepler > 15 luglio 2014
- Wikipedia Contributors. “Leggi di Keplero”. *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, 29 giugno 2014.
< http://it.wikipedia.org/wiki/Leggi_di_Keplero > 16 luglio 2014
- arcetri.astro.it, “Osservatorio Astrofisico di Arcetri: Planetologia e astrobiologia”, di: J. R. Brucato, G. P. Tozzi, ... [et al.]. s.d.
< <http://www.arcetri.astro.it/ricerca/planetologia-e-astrobiologia> > 29 agosto 2014
- bigea.unibo.it, “Ambiti di ricerca: Astrobiologia”, di: R. Barbieri e B. Cavalazzi. s.d.
< <http://www.bigea.unibo.it/it/ricerca/ambiti-di-ricerca/astrobiologia> > 29 agosto 2014
- aforismi.meglio.it, “Frase del film Contact”, di: AaVv. s.d.
< <http://aforismi.meglio.it/frasi-film.htm?n=Contact> > 17 agosto 2014
- Wikipedia Contributors. “Equazione di Drake”. *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, 12 agosto 2014.
< http://it.wikipedia.org/wiki/Equazione_di_Drake > 22 agosto 2014
- Wikipedia Contributors. “Rare Earth hypothesis”. *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, 20 agosto 2014.
< http://en.wikipedia.org/wiki/Rare_Earth_hypothesis#Rare_Earth_equation > 22 agosto 2014
- ebook.scuola.zanichelli.it, “Invito alla biologia.blu: Secondo Oparin la comparsa delle cellule è stata preceduta da un’evoluzione prebiologica”, di: H. Curtis, N. Sue Bames, ... [et al.]. s.d.
< <http://ebook.scuola.zanichelli.it/curtisinvitoblu/dagli-organismi-alle-cellule/origine-della-vita-e-teorie-evolutive/l-origine-della-vita-sulla-terra#458> > 26 agosto 2014

- media.inaf.it, “Dove dobbiamo cercare la vita extra-terrestre?”, di: M. De Giuli. 5 febbraio 2014.
< <http://www.media.inaf.it/2014/02/05/dove-dobbiamo-cercare-la-vita-extra-terrestre/> > 27 agosto 2014
- danielegasparri.blogspot.ch, “Astronomia per tutti: Quante galassie ci sono nell’universo? Ce lo dice l’Hubble Ultra Deep Field”, di: D. Gasparri. 3 febbraio 2012.
< <http://danielegasparri.blogspot.ch/2012/02/quante-galassie-ci-sono-nelluniverso-ce.html> > 27 agosto 2014
- giovannidelponte.com, “L’ipotesi Gaia: la Terra come organismo vivente!”, di: G. Del Ponte. s.d.
< <http://www.giovannidelponte.com/it/lenigma-di-gaia/approfondimento/lipotesi-gaia-la-terra-come-organismo-vivente> > 28 agosto 2014
- seti.org, “SETI Institute: Our Mission”, di: SETI Institute. s.d.
< <http://www.seti.org/about-us> > 7 agosto 2014
- Wikipedia Contributors. “Messaggio di Arecibo”. *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, 7 luglio 2014.
< http://it.wikipedia.org/wiki/Messaggio_di_Arecibo > 8 agosto 2014
- ufoonline.it, “Tutti i messaggi interstellari che abbiamo inviato verso altri mondi”, di: AaVv. s.d.
< <http://www.ufoonline.it/2012/07/29/tutti-i-messaggi-interstellari-che-abbiamo-inviato-verso-altri-mondi/> > 8 agosto 2014
- croponline.org, “Messaggi dal cosmo: 2001, l’anno del contatto”, di: G. Pastore. 11 novembre 2010.
< <http://www.croponline.org/messaggicosmo.htm> > 8 agosto 2014
- cicap.org, “Disegni nel grano a Chilbolton: l’opinione del SETI”, di: M. Marocutti. 14 giugno 2005.
< <http://www.cicap.org/new/articolo.php?id=273163> > 8 agosto 2014
- web.ticino.com, “Crop Circles di Chilbolton”, di: M. Monti. 14 agosto 2010.
< <http://web.ticino.com/cusi/Redaz/Speciali/scheda16.htm> > 8 agosto 2014
- astrosurf.com, “Appunti di astronomia: Galassia Via Lattea”, di: Filippo Bisognano. s.d.
< <http://www.astrosurf.com/cosmoweb/galassie/vialattea.html> > 8 novembre 2014
- wired.it, “La missione Rosetta è pronta a sbarcare su una cometa”, di: A.L. Bonfranceschi. 7 novembre 2014.
< <http://www.wired.it/scienza/spazio/2014/11/07/rosetta-sbarco-cometa/> > 8 novembre 2014

- erickbaldi.altervista.org, “Il campo magnetico terrestre”, di: E. Baldi. s.d.
< http://erickbaldi.altervista.org/tesina_liceo/Scienze/CampoMagn_Terra.htm > 9 novembre 2014
- itisfondi.it, “La teoria della tettonica delle placche”, di: R. Moresi. s.d.
< <http://www.itisfondi.it/2010/studenti/materialediattico/Scienze-Moresi/tettonica%20delle%20placche.pdf> > 9 novembre 2014
- scienzaatscuola.it, “Pianeti Extrasolari: Velocità Radiali”, di: AaVv. 20 dicembre 2009.
< <http://www.scienzaatscuola.it/exoplanet/pianeti/approfondo/radiali.htm> > 9 novembre 2014
- panorama.it, “Missione Rosetta: la diretta dello sbarco sulla cometa”, di: A. Piemontese. 10 novembre 2014.
< <http://www.panorama.it/scienza/spazio/missione-rosetta-12-novembre-sbarco-storia-cometa/> > 16 novembre 2014
- repubblica.it, “Philae si è assopito sulla cometa. L’ESA: ‘Ma i dati raccolti sono straordinari’”, di: AaVv. 15 novembre 2014.
< http://www.repubblica.it/scienze/2014/11/15/news/philae_si_assopito_sulla_cometa_1_esa_ma_i_dati_raccolti_sono_straordinari-100598332/ > 16 novembre 2014
- themoodpost.it, “L’atterraggio di Philae, il lander spaziale”, di: AaVv. 23 novembre 2014.
< <http://www.themoodpost.it/moods/smart/atterraggio-di-philae-lander-spaziale/16631/> > 23 novembre 2014

Immagini

- Immagine di copertina: < http://it.wikipedia.org/wiki/Pleiadi_%28astronomia%29#mediaviewer/File:Pleiades_large.jpg > 28 ottobre 2014
- Figura 1: < <http://blog.esky.bg/2014/08/10-култови-селфи-дестинации/Стоунхендж/> > 21 settembre 2014
< http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Woodhenge_Wiltshire_cropped.jpg > 21 settembre 2014
- Figura 2: < <http://www.astrologiarchetipica.it/pianeta/il-sistema-solare> > 31 agosto 2014
- Figura 3: < http://it.wikipedia.org/wiki/Leggi_di_Keplero > 16 luglio 2014
- Figura 4: < <http://www.astrosurf.com/cosmoweb/sistemasolare/comete/> > 3 agosto 2014

- Figura 5: < <http://astronomiadominicana.blogspot.ch/2013/11/nuevas-fotos-de-ison-mas-brillante.html> > 4 agosto 2014
- Figura 6: < <http://newsspazio.blogspot.ch/2014/09/rosetta-selezionato-il-sito-j-per.html> > 16 novembre 2014
- Figura 7: < http://images.wired.it.s3-website-us-east-1.amazonaws.com/wp-content/uploads/2014/11/1415206834_Rosetta_s_journey.jpg > 8 novembre 2014
- Figura 8: < http://www.lpi.usra.edu/science/kring/epo_web/impact_cratering/World_Craters_web/intromap.html > 30 agosto 2014
- Figura 9: < <http://giantcrystals.strahlen.org/africa/hoba.htm> > 31 agosto 2014
< <http://www.geoenv.it/turismo/USA/meteor.htm> > 30 agosto 2014
- Figura 10: < <http://blogs.scientificamerican.com/life-unbounded/2012/01/20/an-abundance-of-exoplanets-changes-our-universe/> > 24 luglio 2014
- Figura 11: < <http://curiositydigital.wordpress.com/2013/01/03/alfa-centauri-bb-el-reflejo-distorsionado-de-la-tierra/alfa-centauri-tamac3b1o/#main> > 8 maggio 2014
- Figura 12: < <http://www.auto-ticino.net/curiosita/la-stella-piu-vicina.php> > 4 maggio 2014
- Figura 13: < <http://www.memospazio.it/1-esopianeta-della-porta-accanto#.U2KRR41S6tg> > 1 maggio 2014
- Figura 14: < <http://www.space.com/3728-major-discovery-planet-harbor-water-life.html> > 9 giugno 2014
- Figura 15: < <http://www.gizmag.com/cheops-esa-space-mission/24649/> > 17 luglio 2014
- Figura 16: < http://it.wikipedia.org/wiki/Pianeta_extrasolare > 3 marzo 2014
- Figura 17: < <http://strangeneworlds.jimdo.com/pianeti-extrasolari/metodi-di-detezione/> > 31 luglio 2014
- Figura 18: < <http://www.amastrofili.org/Doc/Articoli/2006/pianetiextrasolari04.htm> > 13 luglio 2014
- Figura 19: < http://en.wikipedia.org/wiki/Doppler_spectroscopy > 13 luglio 2014
- Figura 21: < <http://www.centauri-dreams.org/?p=28030> > 20 luglio 2014

- Figura 22: < <http://www.amastrofili.org/Doc/Articoli/2006/pianetiextrasolari05.htm> > 24 luglio 2014
- Figura 23: < <http://www.amastrofili.org/Doc/Articoli/2006/pianetiextrasolari05.htm> > 27 luglio 2014
- Figura 24: < http://www.danielegasparri.com/Italiano/articoli/astrofisica/extrasolari_rilevazione.pdf > 27 luglio 2014
- Figura 25: < <http://www.link2universe.net/2014-04-25/hubble-astronomi-scoprono-spettacolari-dischi-protoplanetari-in-foto-darchivio/#more-22679> > 28 luglio 2014
- Figura 26: < http://misteridelcosmo.altervista.org/nella_tela_del_cosmo.html > 17 agosto 2014
- Figura 27: < <http://www.olidarex.altervista.org/mondocurioso/origine-aurore-polari.html> > 15 novembre 2014
- Figura 28: < <http://pasini-lescienze.blogautore.espresso.repubblica.it/2013/05/14/esopianeti-abitabili-ce-lo-dice-il-loro-clima/> > 1 agosto 2014
- Figura 29: < <http://attualissimo.it/la-nasa-pubblica-foto-della-terra-come-non-labbiamo-mai-vista/nasa-3/> > 26 agosto 2014
- Figura 30: < <https://www.flickr.com/photos/isawnyu/4924745114/> > 28 agosto 2014
- Figura 31: < <http://legendavadasz.hu/hirek/setihome-az-otthoni-program-a-foldonkivul-kutatas-erdekeben> > 27 agosto 2014
- Figura 32 e 33: < <http://www.cropcirclesearch.com/articles/arecibo.html> > 8 agosto 2014
- Figura 34: < <http://www.matematicamente.it/storia-della-scienza/66-fisica-per-le-superiori/1216-parallasse> > 8 novembre 2014
- Figura 35: < <http://www.eso.org/public/images/eso0228b/> > 9 marzo 2014
- Figura 36: < http://it.wikipedia.org/wiki/Effetto_Doppler > 10 luglio 2014
< <http://www.eniscuola.net/mediateca/metodo-velocita-radiale/> > 10 luglio 2014
- Figura 37: < <http://www.knowledgeorb.com/2013/07/gliese-667c-exciting-life/> > 8 novembre 2014
- Figura 38: < <http://strangeneworlds.jimdo.com/acqua-e-vita/zona-di-abitabilit%C3%A0/> > 21 agosto 2014

