



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

DIPARTIMENTO DI FISICA E ASTRONOMIA

CORSO DI LAUREA IN ASTRONOMIA

I PIANETI EXTRASOLARI E LA RICERCA DELLA VITA NELLO SPAZIO

Tesi di laurea in Astronomia

Relatore

Prof. Roberto Orosei

Presentata da

Jacopo De Stefano

Sessione I, Luglio 2026

Anno Accademico 2025/2026

Dediche e ringraziamenti

In memoria a mio nonno Arturo Nivello e nonna Marisa. A mia mamma Patrizia Nivello che mi ha sempre sostenuto e un particolare ringraziamento all'illustre Prof. Roberto Orosei che ha creduto in me.

Sommario

Introduzione.....	1
Capitolo 1: Metodi e tecniche di ricerca dei pianeti extrasolari	2
1.1 Metodi di ricerca di esopianeti.....	2
1.2 Gli esopianeti	4
1.3 Abitabilità	7
Fonti del capitolo	8
Capitolo 2: Encelado e Marte	10
2.1 Encelado.....	10
2.2 Marte	15
Fonti del capitolo	19
Capitolo 3: Alcuni pianeti interessanti	20
3.1 Proxima Centauri b	20
3.2 Gliese 3323 b	21
3.3 Kepler-438 b	21
3.4 Trappist-1 d.....	22
Capitolo 4: I progetti	24
4.1 Il progetto Apache	24
4.1.1 Introduzione	24
4.1.2 Progetto Pianeti extrasolari (2022).....	25
4.1.3 Progetto Pianeti extrasolari (2023).....	27
4.1.4 Progetto Pianeti extrasolari (2024).....	27
4.1.5 Progetto Pianeti extrasolari (2025).....	28
4.2 Il progetto SETI	29
Fonti del capitolo	33
Bibliografia.....	34

Introduzione

Siamo soli nell'universo? Da dove veniamo? Come e perché esistiamo? È una delle domande che probabilmente ci siamo sempre posti e ci affascina da sempre vista la grandezza "infinita" dell'universo. Carl Sagan, forse il più grande divulgatore scientifico in ambito spaziale degli ultimi 300 anni, nel suo libro "Cosmos", pubblicato ormai ben 44 anni fa, ci definisce polvere di stelle, così come l'indimenticabile Margherita Hack ci definiva figli delle stelle. Un pensiero, oltre che semplicemente poetico, estremamente vero, poiché gli atomi che ci compongono sono stati creati all'interno di stelle lontanissime da noi, che, finito il loro ciclo di vita, esplodono in quello che è uno dei più grandi spettacoli dell'universo: le supernovae. Nel loro ultimo atto inviano nell'universo tutti gli elementi che hanno fuso nel loro nucleo e che in qualche caso sono arrivati fin qui, sul nostro piccolo pallino azzurro, a contribuire alla nostra esistenza. Ma dagli ultimi decenni, con la scoperta sempre maggiore di pianeti extrasolari, il quesito è diventato di ancor più interesse.

È l'argomento che verrà trattato nella mia tesi e che verrà suddivisa specificando varie tematiche.

Si inizierà parlando dei metodi e delle tecniche di ricerca dei pianeti al di fuori del nostro sistema Solare, che sono fondamentalmente cinque: la tecnica della velocità radiale, il metodo dell'astrometria, il metodo dei transiti, la tecnica del microlensing e infine quella più semplice, ovvero quella definita "imaging" o osservazione diretta.

Proseguendo entreremo più specificatamente nell'argomento, che riguarda la ricerca della vita nello spazio, ovvero la ricerca di pianeti candidati che potrebbero ospitare la vita, perciò i criteri di abitabilità di quest'ultimi rispetto alla loro stella madre.

In particolare, viste le recenti scoperte, nel capitolo 4, mi soffermerò su quattro possibili pianeti candidati ad ospitare la vita, descrivendone le loro caratteristiche, in base all'indice ESI (indice di similarità terrestre, cioè del nostro pianeta Terra): Proxima Centauri b, Gliese 3323 b, Kepler 438 b e Trappist 1 d. Verrà anche dedicata una parte, riguardante una delle lune ghiacciate del Sistema Solare di particolare interesse, ovvero Encelado.

Concluderò soffermandomi sui due principali progetti in corso sull'argomento: il progetto APACHE, in corso presso l'osservatorio astronomico della Val d'Aosta e il progetto SETI riguardante la ricerca di forme di vita intelligenti.

Capitolo 1: Metodi e tecniche di ricerca dei pianeti extrasolari

1.1 Metodi di ricerca di esopianeti

Un pianeta è un corpo celeste che orbita attorno ad una stella, come il Sole e deve soddisfare 3 criteri fondamentali:

1. Orbitare attorno ad una stella
2. Avere una massa sufficiente per assumere una forma sferica o quasi a causa della propria gravità
3. Ripulire la sua orbita da altri corpi celesti, come asteroidi o comete, o essere in grado di attrarli o deviarli.

I pianeti non emettono luce propria, ma riflettono la luce della stella attorno a cui orbitano.

Un pianeta extrasolare o esopianeta è un pianeta non appartenente al sistema solare, orbitante cioè attorno a una stella diversa dal Sole.

Al febbraio 2025 risultano conosciuti 7414 pianeti extrasolari (fonte Wikipedia) in 5086 sistemi planetari differenti (di cui 1035 multipli); inoltre 2376 è il numero di pianeti candidati e altri 149 sono in attesa di conferma o controversi. Gli esopianeti conosciuti appartengono a sistemi planetari che orbitano attorno a una stella. Esistono tuttavia numerose osservazioni non confermate di oggetti di massa planetaria non legati a vincoli gravitazionali con alcuna stella (pianeti interstellari); secondo l'UAI (Unione Astronomica Internazionale), tali corpi celesti non sono definibili come pianeti.

Il primo pianeta extrasolare fu scoperto da Michel Mayor e Didier Queloz, dell'osservatorio di Ginevra, il 5 ottobre 1995; un pianeta di massa paragonabile a quella di Giove attorno alla stella "51 Pegasi", simile al Sole.

Le principali tecniche di scoperta degli esopianeti sono fondamentalmente sei:

1) Metodo delle velocità radiali (o tecnica Doppler): la maggior parte dei recenti e confermati esopianeti sono stati scoperti tramite questa tecnica. Questo metodo rileva il movimento della stella causato dall'attrazione gravitazionale di un pianeta che la orbita. Quando un pianeta orbita una stella, la stella non rimane immobile ma si sposta leggermente (anche se in modo impercettibile). Questo movimento può essere osservato come uno spostamento nella lunghezza d'onda della luce emessa dalla stella, un effetto noto come "spostamento Doppler". Ha due vantaggi:

- Permette di rilevare esopianeti anche molto lontani
- È utile per rilevare pianeti più massicci (come gioviani) o pianeti vicini alla stella.

Utilizzano questa tecnica i telescopi a terra come l'ESO (European Southern Observatory) e l'osservatorio Keck.

2) Metodo del transito: questo è uno dei metodi più comuni per scoprire esopianeti. Funziona osservando la diminuzione temporanea della luminosità di una stella quando un pianeta passa davanti ad essa (ovvero, quando il pianeta transita davanti alla stella dal punto di vista della Terra). La quantità di luce oscurata può fornire informazioni sul raggio del pianeta e, in combinazione con altre misure, alla sua densità e composizione. È altamente efficiente per rilevare esopianeti di dimensioni simili a quella della Terra.

Telescopi spaziali come Kepler e TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite) adottano questa tecnica.

3) Metodo della lente gravitazionale: la lente gravitazionale si verifica quando la gravità di una stella o di un pianeta distorce la luce di una stella più lontana. Questo effetto può ingrandire temporaneamente l'immagine della stella di sfondo, e osservando queste distorsioni è possibile rilevare la presenza di un pianeta. È utilizzato principalmente per indagini su grandi distanze interstellari. Esperimenti di osservazione come OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment) e MOA (Microlensing Observations in Astrophysics) fanno riferimento a questa tecnica

4) Metodo dell'astrometria: l'astrometria misura i piccoli spostamenti di una stella causati dall'influenza gravitazionale di un pianeta che orbita attorno ad essa. Questi spostamenti sono molto piccoli e difficili da rilevare, ma possono essere utilizzati per determinare la posizione e la massa del pianeta. Il metodo dell'astrometria è quello che è più sensibile a pianeti con grandi orbite. È utile per rilevare esopianeti in sistemi molto distanti. Il telescopio spaziale Gaia lanciato nel 2013 svolge questa missione astrometrica.

5) Imaging diretto: in questo caso, si cerca di osservare direttamente il pianeta, scattando fotografie della stella e dei suoi eventuali pianeti. Poiché i pianeti sono molto più deboli della loro stella madre, questa tecnica è molto difficile e può essere utilizzata principalmente per pianeti massicci e lontani dalla stella. Ha il vantaggio di fornire immagini dirette e dettagliate dei pianeti, permettendo di studiarne l'atmosfera e altre caratteristiche mediante osservazioni spettrali. Le immagini sono fatte nell'infrarosso quando il pianeta è più brillante rispetto a lunghezze d'onda nel visibile. Telescopi avanzati come il VLT (Very Large Telescope) e il telescopio spaziale Hubble permettono di adottare questa tecnica.

6) Metodo del timing: il metodo del timing è una tecnica usata per scoprire esopianeti indirettamente, osservando le variazioni temporali di fenomeni astronomici regolari. È meno noto rispetto ai metodi del transito o della velocità radiale, ma è molto potente in certi contesti scientifici.

In sostanza, si basa sull'osservazione di eventi astronomici periodici come:

- Pulsar
- Eclissi in sistemi binari
- Transiti regolari in sistemi multipli

Se c'è un esopianeta che orbita attorno all'oggetto che produce questi eventi, la sua gravità altera il tempo in cui gli impulsi e gli eventi vengono osservati, in anticipo o in ritardo rispetto al previsto. Questo "ballo gravitazionale" permette agli astronomi di dedurre la presenza (e talvolta la massa e l'orbita) di un pianeta. È un metodo molto sensibile capace

di rilevare pianeti, in un sistema stellare, con masse piccole come quella della Terra. Inoltre è molto sensibile a perturbazioni gravitazionali, quindi utile per sistemi complessi.

PSR B1257+12 è il primo sistema planetario scoperto al di fuori del nostro, grazie proprio al metodo del timing delle pulsar: ha tre pianeti, ed è stato un risultato rivoluzionario.

Se si osservano transiti di pianeti attorno ad una stella, e si nota che non sono sempre esattamente puntuali, potrebbe esserci un altro pianeta invisibile che li “disturbi”. È un'estensione del metodo, chiamato TTV (Transit Timing Variation).

1.2 Gli esopianeti

- Le super terre e i mini nettuni: le super terre sono una classe di esopianeti che hanno una massa superiore a quella della Terra, ma inferiore a quella di giganti ghiacciati come Urano e Nettuno. In genere si parla di masse comprese tra circa 1,5 e 10 masse terrestri. Le caratteristiche principali sono:

- Massa e dimensioni: più grandi della Terra ma non abbastanza grandi da trattenere enormi atmosfere d'idrogeno ed elio come i giganti gassosi

- Composizione: possono essere rocciose (come la Terra) oppure avere oceani profondi, atmosfere dense o strati di gas e ghiacci.

Nonostante il nome, non sono necessariamente “super versioni” della Terra. Alcune sono aride e rocciose, altre potrebbero essere mondi d'acqua o pianeti vulcanicamente attivi.

Alcuni esempi famosi di super Terre:

1. Kepler-22b: uno dei primi candidati abitabili scoperti, 2,4 volte il raggio terrestre;
2. LSH 1140b: pianeta roccioso nella zona abitabile, attorno a una nana rossa;
3. TOI-700d: scoperto nella missione TESS, potrebbe avere condizioni simili alla Terra.

I mini nettuni sono chiamati così perché hanno dimensioni intermedie tra quelle della Terra e quelle di Nettuno, ma con atmosfere dense, ricche di gas leggeri come idrogeno ed elio. Hanno dimensioni tipiche tra 1,5 e 4 volte il raggio terrestre. Spesso hanno un nucleo roccioso o ghiacciato, avvolti da uno strato d'acqua liquida ed un'atmosfera spessa e gassosa (H ed He). Non sono considerati molto promettenti per la vita, perché le loro atmosfere sono troppo dense e calde. HD 97658 b ne è un esempio.

- Gioviani caldi: sono esopianeti simili a Giove per massa e composizione (cioè principalmente composti da gas), ma che orbitano molto vicino alla loro stella madre. Spesso anche più vicini di Mercurio al Sole (distanze comprese tra 0,015 e 0,5 unità astronomiche). Sono composti principalmente da H ed He, hanno una temperatura che varia da circa 1000 a 3000 K; possiedono un'atmosfera dinamica caratterizzata da forti venti, shock termici e piogge esotiche. Sono facili da individuare con i metodi del transito e delle velocità radiali.

Non è ancora chiaro al 100% come si formano, ma ci sono due principali ipotesi:

- 1) MIGRAZIONE: si formano in zone fredde e lontane e poi migrano verso l'interno.

2) FORMAZIONE IN SITU: si sono formati direttamente vicino alla stella.

La teoria più accettata è la migrazione planetaria. 51 pegasi b, scoperto nel 1995, è il primo gioviano caldo scoperto e dista circa a 50 anni luce da noi.

- Pianeti oceanici: questi pianeti consistono in primis di un nucleo roccioso circondato d'acqua (circa 25% da roccia e circa 75% d'acqua) ricoperto da un sottile involucro di gas come idrogeno ed elio (circa 0,05%). Possono nascere oltre la linea del ghiaccio (dove l'acqua è solida), oppure si formano da dischi ricchi d'acqua con poca attività geologica in superficie. Hanno condizioni potenzialmente abitabili e possono aiutarci a capire quanto sia comune l'acqua liquida nell'universo, Gliese 1214 b è il più conosciuto come pianeta oceanico; ha una probabile atmosfera densa ed è priva di caratteristiche nell'intervallo di lunghezze d'onda comprese tra 750 e 1000 nm.

- Altri tipi di esopianeti: un "elio pianeta" è un pianeta con un'atmosfera dominata da elio. Questo è in contrasto con i giganti gassosi come Giove e Saturno, le cui atmosfere consistono, come prima d'idrogeno e elio come seconda componente. Gliese 436 b è l'esopianeta candidato come "elio pianeta".

Un super gioviano è un oggetto astronomico più massiccio rispetto al pianeta Giove. Sono composti principalmente da idrogeno ed elio, ma con nuclei rocciosi o metallici più grandi. Possono avere atmosfere molto dense e ricche di metano, acqua e ammoniaca e in alcuni casi nubi metalliche o silicee. Un esempio è HD 2562 b; è circa 30 masse gioviane, a metà strada tra un super giovie e una nana bruna.

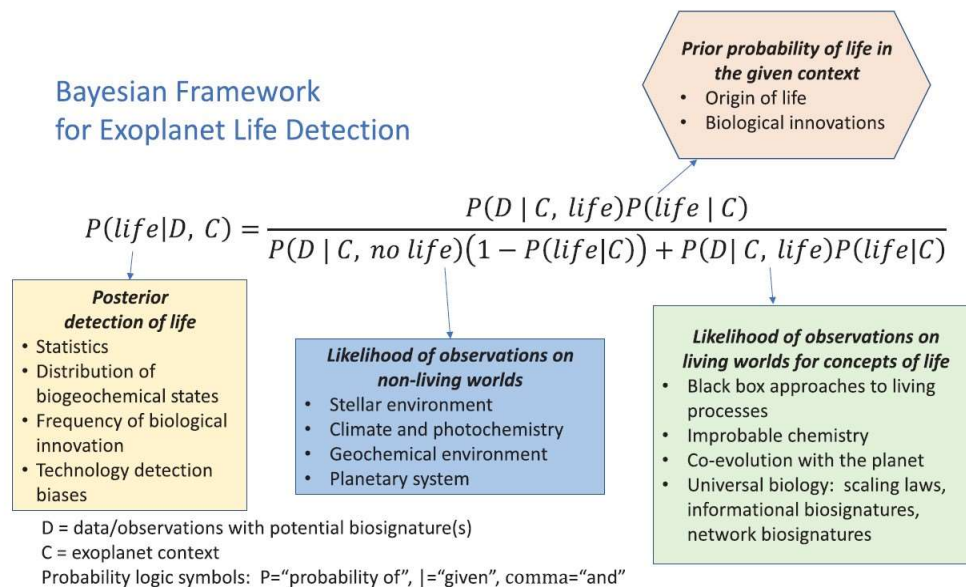
Le atmosfere degli esopianeti forniscono un mezzo diretto per studiare la diversità delle composizioni esoplanetarie, dei processi atmosferici ed interni, nonché delle loro storie di formazione. Negli ultimi dieci anni, e in particolare negli ultimi cinque, sono stati compiuti enormi progressi nel rilevamento delle firme atmosferiche degli esopianeti attraverso metodi fotometrici e spettroscopici, utilizzando una varietà di strutture osservative spaziali e terrestri. Le osservazioni stanno iniziando a fornire importanti vincoli su un'ampia gamma di proprietà atmosferiche, tra cui i profili pressione-temperatura, le composizioni chimiche, la circolazione dell'energia, la presenza di nubi e i processi di non equilibrio. Le atmosfere planetarie possono essere classificate in primaria e secondaria. Atmosfere primarie sono quelle che sono alimentate direttamente dalla "nuvola" e sono dominate da gas d'idrogeno ed elio. Le atmosfere secondarie sono quelle costituite da gas volatili rilasciati dall'interno del pianeta. Pianeti da 1-15 masse terrestri posseggono atmosfere che possono essere sia primarie sia secondarie o miste.

Composizioni atmosferiche di esopianeti: Nel 2001 è stato rilevato sodio nell'atmosfera di HD 209458 b (pianeta extrasolare che orbita intorno alla stella HD 209458, una nana gialla simile al Sole nella costellazione di Pegaso, che dista circa 150 anni luce dal sistema solare).

- Nel 2008 sono stati rilevati acqua, monossido di carbonio, anidride carbonica e metano nell'atmosfera di HD 189733 b (gioviano caldo situato a circa 64,5 anni luce dalla Terra nella costellazione della Volpetta).

- Nel 2013 è stata rilevata acqua nelle atmosfere di HD 209458 b, XO-1b (536 anni luce), WASP-12b (gioviano caldo), WASP-17b (gioviano caldo, distante a circa 1300 anni luce dalla Terra nella costellazione dello Scorpione) e WASP-19b (gioviano caldo in orbita attorno alla nana gialla WASP-19, visibile nella costellazione delle Vele).

- Nel luglio 2014, la NASA ha annunciato di aver trovato atmosfere asciutte su tre esopianeti (HD 189733b, HD 209458b, WASP-12b) in orbita attorno a stelle simili al Sole.
- Nel settembre 2014, la NASA ha riferito che HAT-P-11b (123 anni luce) è il primo esopianeta di dimensioni simili a Nettuno noto per avere un'atmosfera relativamente priva di nubi e, inoltre, la prima volta in cui sono state trovate molecole di qualsiasi tipo — in particolare vapore acqueo — su un esopianeta relativamente piccolo.
- La prima analisi dell'atmosfera di una super-Terra è stata pubblicata all'inizio del 2016.
- Utilizzando i dati del Telescopio Spaziale Hubble, è stato scoperto che l'esopianeta 55 Cancri e ha un'atmosfera secca senza alcuna traccia di vapore acqueo, composta principalmente da idrogeno ed elio.



I processi della vita producono una miscela di sostanze chimiche che non si trovano in equilibrio chimico; tuttavia esistono anche processi abiotici che generano condizioni di disequilibrio che devono essere presi in considerazione. La “biofirma” atmosferica più robusta è spesso considerata l’ossigeno molecolare (O₂) e il suo sottoprodotto fotochimico, l’ozono (O₃). La fotolisi dell’acqua (H₂O) da parte dei raggi UV, seguita dalla fuga idrodinamica dell’idrogeno, può portare a un accumulo di ossigeno nei pianeti vicini alla propria stella che stanno subendo un effetto serra incontrollato (runaway greenhouse effect). Per i pianeti situati nella zona abitabile, si riteneva che la fotolisi dell’acqua fosse fortemente limitata dall’intrappolamento a freddo (cold-trapping) del vapore acqueo nella bassa atmosfera. Tuttavia, l’entità del “cold-trapping” dell’H₂O dipende molto dalla quantità di gas non condensabili presenti nell’atmosfera come l’azoto (N₂) e l’argon. In assenza di tali gas, la probabilità di accumulo di ossigeno dipende anche dalla storia dello sviluppo del pianeta, dalla chimica interna, dalle dinamiche atmosferiche e dall’orbita.

Concludiamo questa parte definendo the “Earth Similarity Index” (ESI) come il parametro che misura appunto la similarità di pianeti solari o extrasolari rispetto alla Terra. Esso è un numero tra 0 (nessuna similarità) e 1 (identico alla Terra). L’ESI non è una misura diretta di abitabilità ma un confronto, utilizzando distanze metriche, tra un set selezionato di proprietà planetarie di un pianeta e la Terra. In sostanza la ricerca di pianeti simili alla Terra è sinonimo di ricerca di pianeti con valori ESI vicino a uno. Qualsiasi esopianeta con un valore ESI di circa 0,8 può essere considerato simile alla Terra, il che significa che ha una dimensione e composizione simile alla Terra con un’atmosfera temperata che può potenzialmente supportare forme di vita terrestri. La scala ESI è in funzione del raggio, densità, velocità di fuga e temperatura superficiale di un esopianeta.

1.3 Abitabilità

L’abitabilità continua di un pianeta è la capacità di un corpo planetario di sostenere condizioni abitabili in alcune aree sulla sua superficie o al suo interno su tempi scala geologici.

“Un habitat e la locazione fisica di un organismo” (Odinn,1971)

“Un habitat è un set di fattori fisici che le specie viventi richiedono per la loro sopravvivenza e riproduzione” (Block e Brennan, 1993).

Ad un’istante di tempo e in un particolare luogo, può essere identificata una categoria di requisiti per tutti gli organismi viventi conosciuti:

- 1) un solvente
- 2) condizioni appropriate di temperatura e altre condizioni chimico-fisiche
- 3) sufficiente energia
- 4) elementi maggiori richiesti per la vita conosciuta (CHNOPS)
- 5) altri elementi richiesti da un specifico organismo

Queste richieste possono essere associate a un dato ambiente o corpo planetario.

L’acqua liquida è il solvente richiesto affinché le reazioni biochimiche accadano. È l’unica componente conosciuta utilizzata per la vita; ci sono speculazioni circa l’uso di ammoniaca liquida, solventi organici (come metano ed etano) e acido solforico come solventi di vita.

Il limite inferiore per attività metabolica in microbioti si pensa essere a -25°C . Non c’è evidenza di riproduzione al di sotto di -15°C . Il limite superiore per la crescita microbica è 122°C . Il grado di reazioni chimiche cresce esponenzialmente con la temperatura in accordo con l’equazione di Arrhenius. L’acqua liquida può esistere al massimo di 300°C a pressioni che eccedono i 10 MPa. Il crescere della vita è stata trovata in ambienti estremi con differenti “stress” fisici e chimici, come radiazione UV e ionizzata, pressione, PH, salinità, aridità e metalli tossici. I limiti assoluti per alcuni di questi “stress” non sono pienamente conosciuti.

Di tutti gli elementi della tavola periodica, sei sono presenti nelle macromolecole della vita conosciuta: C, H, N, O, P e S. Il carbonio è l'elemento principale di una vasta varietà di macromolecole; l'idrogeno è legato al carbonio e ad altri atomi nelle macromolecole; similmente l'azoto si trova in proteine e nelle coppie basi del DNA; l'ossigeno è usato in alcoli, zuccheri e in varietà di molecole; il fosforo forma parti di DNA ed è utilizzato in molecole come le ATP; infine lo zolfo è usato in ponti proteici. Una varietà di altri elementi, come il magnesio e il tungsteno sono utilizzati da diversi organismi per diverse funzioni. Le loro concentrazioni sono determinate dalle condizioni planetarie.

La distribuzione dell'acqua liquida può essere usata per distinguere due tipi di corpo planetari. Il primo tipo è un pianeta con acqua liquida sulla sua superficie così come al suo interno. Il liquido è sostenuto da una combinazione di calore interno ed energia stellare: un esempio è proprio la Terra. Il secondo tipo di corpo planetario è quello dove la radiazione stellare non è sufficiente a mantenere l'acqua liquida sulla sua superficie ma dove l'acqua liquida esiste al suo interno. Questo tipo di corpi planetari includono le lune ghiacciate con oceani sotto la superficie (Encelado, Europa e Ganimede) e alcuni pianeti terrestri di tipo roccioso dove il flusso stellare da solo non è sufficiente a mantenere l'acqua liquida sulla superficie, ma sorgenti interne d'energia mantengono l'acqua liquida. Se l'esistenza d'organismi multicellulari o intelligenti è legata alla presenza di alte concentrazioni d'ossigeno dovute alla fotosintesi, solo i mondi caratterizzati da acqua liquida sulla superficie sono gli unici in grado di produrre le condizioni per abitabilità planetarie richieste da organismi intelligenti. Al contrario, i mondi con acqua liquida al loro interno possono avere condizioni d'abitabilità per un range di metabolismo ma non condizioni per la fotosintesi.

Trattiamo infine la zona abitabile circumstellare.

Stelle calde, come le stelle F, possiedono condizioni limite per l'acqua liquida sulla superficie più lontane rispetto a stelle come il nostro Sole (stella G). Stelle meno massicce e più fredde hanno condizioni limite più interne come stelle K e M. Il limite esterno della zona abitabile potrebbe essere notevolmente esteso su pianeti con forti gas serra come l'idrogeno, il quale teoricamente potrebbe espandere il limite esterno fino a 10 UA. In casi estremi, pianeti fluttuanti liberi, non legati gravitazionalmente ad una stella, possono persino ospitare condizioni abitabili sulla superficie. In sistemi stellari binari, la presenza di una seconda stella può influenzare i limiti della zona abitabile. A seconda della dinamica del sistema, i confini possono variare nel tempo a causa delle interazioni gravitazionali tra le due stelle oppure una seconda stella può far sì che i confini siano più lontani rispetto a quelli che si avrebbero in un sistema con una sola stella.

Come la luminosità di una stella cambia nel tempo, generalmente cresce (conseguenza della combustione dell'idrogeno nella sequenza principale), la zona abitabile si sposta verso l'esterno. Un pianeta rimane nella zona abitabile per un dato periodo di tempo, conosciuto come "tempo di vita abitabile". Il tempo di vita dipende dalla massa stellare, ma le proprietà fisiche del pianeta e la sua atmosfera giocano un ruolo importante.

Fonti del capitolo

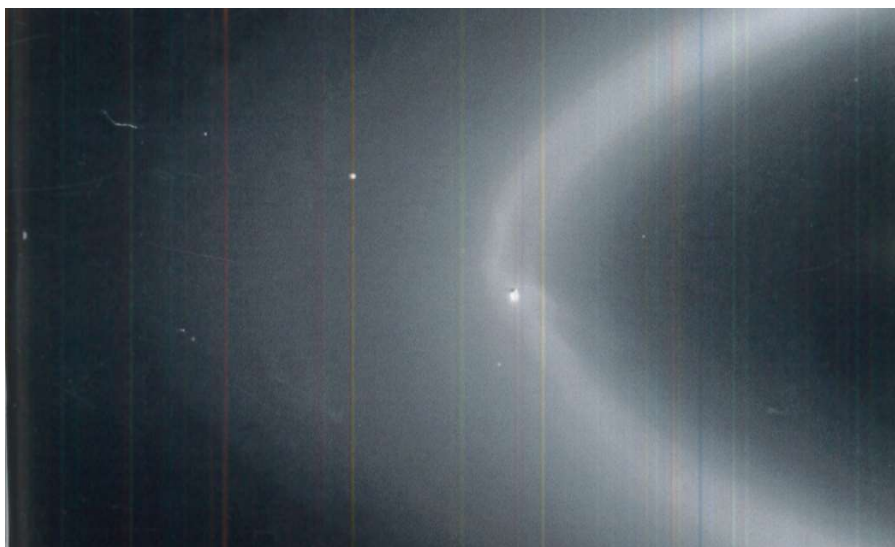
Docente modulo: R.Orosei. INAF-IRA; <https://unibo.it/sitoweb/roberto.oroisei>

Chapter 15 of the book "Astrobiology-A multidisciplinary Approach" by Jonathan I. Lunine, Addison Wesley, 2005

C.S. Cockell et al. Habitability. A Review. Astrobiology, Volume 16, Number 1, pp. 89-117, 2016 con materiale preso da <https://en.wikipedia.org/wiki/Planetary-habitability>

Capitolo 2: Encelado e Marte

2.1 Encelado



Encelado è una piccola Luna di Saturno e fu scoperta il 28 agosto 1798 dall'astronomo tedesco naturalizzato britannico William Herschel, che qualche anno prima, scoprì accidentalmente Urano convinto di aver scoperto una cometa. Ha il diametro di poco più di 500 chilometri, poco meno della distanza che separa Torino da Trieste; completa il suo periodo orbitale in 32,9 ore e, per effetto della rotazione sincrona, mostra sempre la stessa faccia a Saturno.

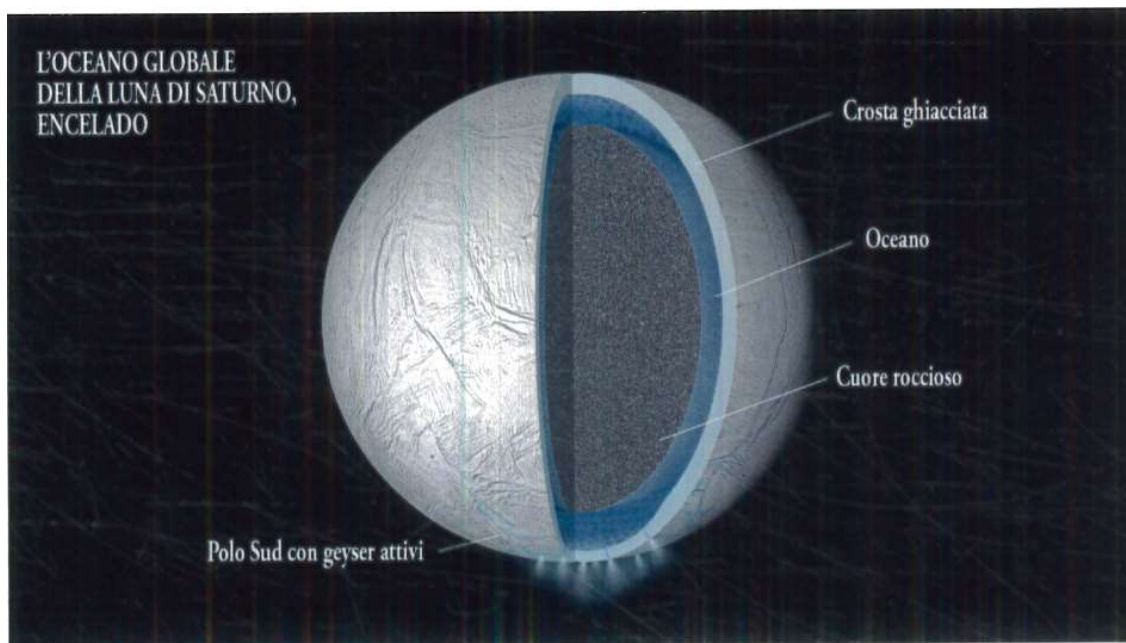
La sua superficie è la più bianca e riflettente del Sistema solare e ci appare come un puntino luminosissimo: ghiacciata, riflette quasi interamente i raggi solari che lo raggiungono. Per dirla più scientificamente, l'albedo- la frazione di luce e radiazione solare riflessa in tutte le direzioni- nel caso di Encelado è 0,99: un dato molto elevato se si considera che la scala va da 0 a 1, dove 0 indica che una superficie assorbe tutta la luce senza rifletterne e 1 che la riflette tutta senza assorbirne. La temperatura media superficiale può raggiungere i -200° Celsius durante il giorno dovuto al fatto che la sua atmosfera è sottilissima e la gravità piuttosto scarsa: circa l'1% di quella terrestre.

I primi dati e le prime immagini, pervengono nell'agosto del 1981 grazie alla missione della Nasa "Voyager 2". Nel 2005, "Cassini" scoprì che particelle di acqua ghiacciata e gas sgorgano in superficie a circa 400 metri al secondo. L'importanza di Encelado risiede nel fatto che nasconde sotto la superficie un vero e proprio oceano di acqua liquida.

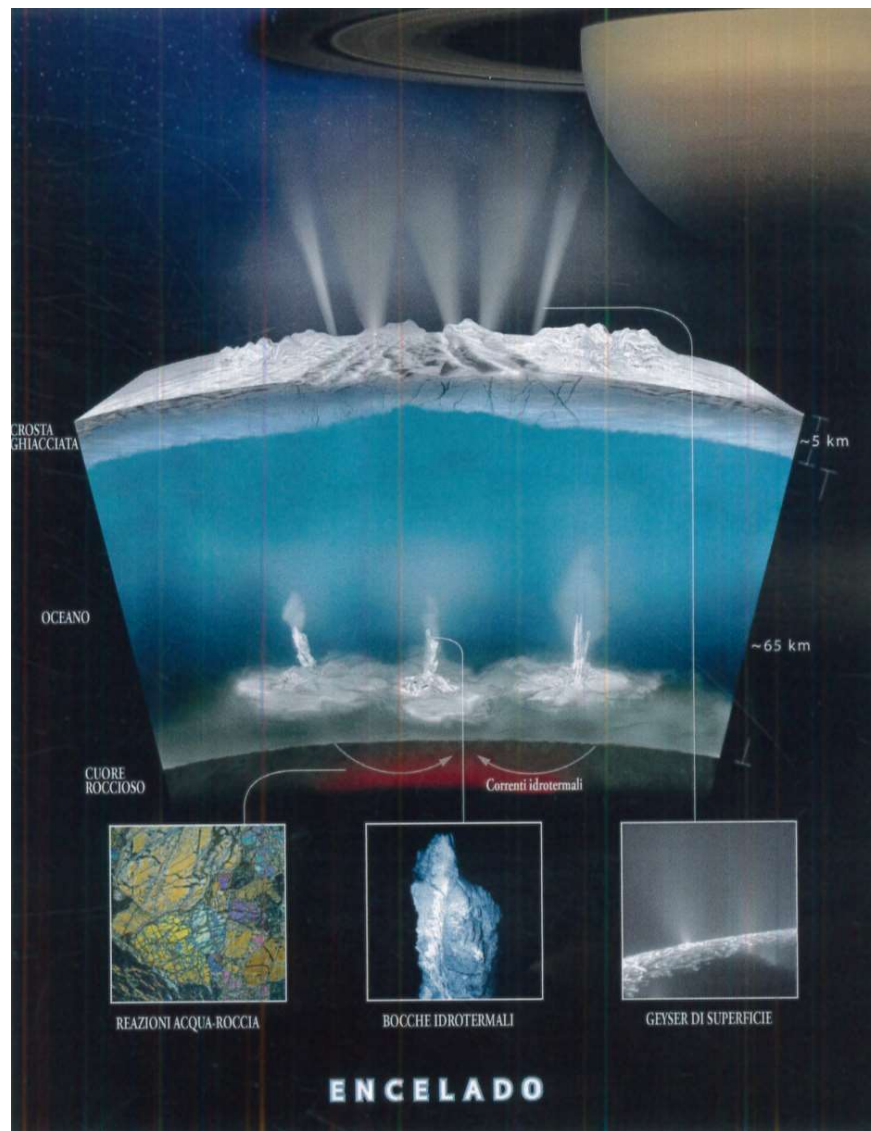
Com'è possibile che su una luna ghiacciata molto distante dalla nostra stella, di sicuro ben oltre la fascia di abitabilità, possono esserci acqua liquida e fonti di calore che sostengano la possibilità di vita? Encelado orbita attorno a Saturno due volte ogni orbita di Dione, una luna più grande. La gravità di Dione deforma l'orbita di Encelado facendole formare un'ellisse e

portando il satellite in esame a volte più vicino altre più lontano da Saturno, in un processo che riscalda le maree al suo interno: le forze mareali esercitate da Saturno allargano e restringono Encelado, ne scaldano l'interno e, conseguentemente, stimolano fonti di calore naturali che generano i geysers, forse capaci di creare le condizioni adatte a sostenere forme di vita.

I suoi geysers sono a tutti gli effetti getti d'acqua (in inglese plume, pennacchi) e provengono da fratture relativamente calde nella crosta amichevolmente dette tiger stripes, strisce o graffi di tigre, poiché ricordano il mantello ma anche l'impronta lasciata da una zampata del felino.



Le tiger stripes sono prese d'aria idrotermali, analoghe a quelle terrestri, che buttano all'esterno acqua calda ricca di minerali provenienti dal sottosuolo oceanico: condotti naturali verso la superficie della luna. Perciò, la zona più attiva, e interessante da un punto di vista scientifico, è al Polo Sud e qui i ricercatori pensano che il guscio di ghiaccio possa essere sottile da 1 a 5 chilometri e dunque più facilmente studiabile. In altre zone lo spessore globale medio del ghiaccio misura dai 20 ai 25 chilometri e studiare l'oceano sottostante sarebbe di sicuro più complicato, proprio come su Europa. Nessun altro corpo a noi noto possiede strisce simili.



Perché Encelado ne è dotato? Perché le strisce hanno una forma così regolare, in lunghezza e in distanziamento reciproco? Perché sono presenti soltanto al Polo Sud e non altrove? Perché si mantengono inalterate nel tempo?

Un team di ricerca californiano, per rispondere, ha evidenziato come le forze mareali esercitate da Saturno causino il riscaldamento e il raffreddamento del satellite in modo significativamente più intenso ai poli. Quando l'acqua liquida si solidifica in ghiaccio sotto il guscio esterno di ghiaccio, il volume si espande ed esercita una pressione sulla crosta ghiacciata fino a romperla, come accade al Polo Sud.

Tuttavia, poiché la temperatura superficiale è di circa -200°C , una crepa nel ghiaccio si chiude rapidamente in un repentino congelamento; cosa che non successe alle tiger stripes, che rimangono aperte nel tempo, non solo in superficie ma nella profondità della crosta ghiacciata, al livello dell'oceano liquido sottostante. Secondo gli autori della ricerca, l'acqua liquida all'interno delle fessure, mossa dalle forze mareali, rilascia costantemente energia sotto forma di calore, impedendo il congelamento e la chiusura della crepa. Il rilascio di

pressione delle fessure, a sua volta, impedisce la formazione di nuove crepe altrove sulla luna, per esempio al Polo Nord.

Allo stesso tempo, l'acqua fuoriuscita dalla fessura vi ricade come ghiaccio, andando così a formare dei bordi che irrobustiscono la fessura stessa, il cui maggior peso fa flettere la calotta glaciale quanto basta per provocare la creazione di una fessura parallela a circa 30 chilometri di distanza. Ecco spiegato perché le tiger stripes rimangono costantemente aperte e appaiono così regolari.

Encelado è il primo oggetto del Sistema solare, oltre ovviamente alla Terra, per il quale abbiamo dati e osservazioni sulla composizione dell'oceano (sotterraneo) e del cuore roccioso. A tale proposito, la sonda Cassini ha raccolto campioni e trasmesso l'analisi spettroscopica dei pennacchi di vapore.

La spettroscopia studia la radiazione elettromagnetica emessa o assorbita dalla materia e individua la composizione chimica del corpo che la emette. La luce emessa da un corpo, ad esempio una stella, è l'ambasciatrice della materia nell'Universo e ne porta le tracce fino a noi.

I dati raccolti da Cassini nei pennacchi testimoniano la presenza di un oceano in contatto con un cuore roccioso e sotto posto ad attività idrotermale: condizioni analoghe a quelle che rendono sulla Terra le aree idrotermali un ambiente abitabile.

A tale riguardo, uno studio ha evidenziato, a partire dai dati di Cassini, che nei pennacchi vi è una quantità di metano particolarmente elevata e per certi versi inaspettata. Tutto ciò che cosa potrebbe significare?

Le ipotesi sono due. Da un lato il metano potrebbe essere prodotto da microbi metanogeni, che "mangiano" la molecola di idrogeno. Questi microbi che prosperano sulla Terra potrebbero trovarsi anche nei pressi delle bocche idrotermali di Encelado? Dall'altro, potrebbero essere attivi processi naturali che nulla hanno a che vedere con forme di vita, e per questo sono detti abiotici. Qualora il metano non fosse dovuto a organismi viventi, la sua produzione su Encelado non potrebbe essere la stessa in atto sulla Terra. Saremmo quindi di fronte a un fenomeno per ora ignoto.

La sonda Cassini, nell'ormai lontano 2009, sorvolò il Polo Sud per studiare la composizione dei pennacchi passandoci attraverso, tenendosi a una distanza di 200 chilometri dalla superficie e consentendo agli scienziati di determinare che l'acqua e l'altro materiale fuoriescono dal sottosuolo a oltre 1300 chilometri orari.

Cassini aveva due spettrometri: uno Ion and Neutral Mass Spectrometer (Inms) e un Cosmic Dust Analyzer (Cda). Il Cda ha rilevato particelle di polvere del raggio di un millesimo di millimetro, quanto le particelle di fumo, e altre di un milionesimo di millimetro, ovvero più piccole di un virus. Quando una particella di polvere entrava nel Cda, lo spettrometro ne determinava carica, velocità, dimensioni e direzione.

Lo Inms ha rilevato che il pennacchio a quell'altezza conteneva vapore acqueo per oltre il 96%, anidride carbonica, monossido di carbonio e altri materiali organici, tra i quali il più abbondante era il metano; ma c'erano anche tracce di carbonio.

La materia nei pennacchi è presente allo stato gassoso, a quello solido e sotto forma di ioni, ovvero entità molecolari elettricamente cariche. Il gas ha una velocità di fuga ben più elevata

delle particelle solide e che lo spara nello spazio, mentre le particelle solide finiscono in gran parte al suolo e in parte minore contribuiscono a formare l'anello E di Saturno: in altri termini, l'anello E esiste perché c'è Encelado ad alimentarlo. La componente ionica della materia viene invece catturata dalla magnetosfera di Saturno sfuggendo alla gravità di Encelado, peraltro piuttosto bassa: è circa l'1 % di quella terrestre. Si stima inoltre che l'anello E abbia uno spessore superiore ai 2000 chilometri che aumenti allontanandosi da Encelado.

I pennacchi non buttano nello spazio sempre la stessa quantità di materiale: sono centinaia e hanno una certa variabilità, dai giorni agli anni, dovuta principalmente alla posizione del satellite rispetto a Saturno. La sua orbita non è perfettamente circolare; la distanza tra Encelado e Saturno e la velocità orbitale sono soggette a oscillazioni che mutano l'effetto mareale al Polo Sud alterando così le eruzioni.

Esiste un acronimo inglese, CHNOPS, che indica gli elementi chimici alla base dello sviluppo e dell'origine della vita così come la conosciamo. I dati raccolti dalla sonda Cassini con lo Inms hanno mostrato la presenza di idrogeno, anidride carbonica, azoto sotto forma di ammoniaca, sodio e altri tipi di Sali e composti organici.

Le caratteristiche fisiche di Encelado, con il suo oceano potenzialmente abitabile sotto una spessa crosta ghiacciata, ci spingono ad immaginare che, qualora la vita esiste, abbia avuto un'origine interna derivante dalle interazioni, tra acqua, roccia e correnti idrotermali, quindi un'ipotesi della generazione endogena della vita. Gli eventuali esseri viventi che si trovasse a "nuotare" su Encelado dovrebbero essere sostenuti dalle calde correnti idrotermali provocate dall'energia mareale e la fotosintesi sarebbe di fatto sostituita dalla chemiosintesi, il processo che sfrutta l'energia liberata da reazioni inorganiche per produrre sostanze organiche.

Il tempo è uno degli indicatori fondamentali per stimare l'origine della vita e la sua possibilità di nascere e svilupparsi: e l'oceano di Encelado sembra avere l'età giusta per favorire condizioni ottimali per la vita, come ha annunciato Marc Neveu, ricercatore presso il Goddard Space Flight Center della Nasa, il 24 giugno 2019, durante una conferenza alla Astrobiology Science Conference. L'oceano è stimato avere un miliardo di anni, ideale perché la vita si sia potuta evolvere. In un oceano troppo giovane non ci sarebbe stato abbastanza tempo per mescolare elementi diversi, mentre in uno troppo vecchio i processi chimici potrebbero essersi già fermati e le reazioni per sostenere la vita non avrebbero più luogo. Da tenere conto anche che l'oceano "Enceladesco" ha profondità inimmaginabili sulla Terra che possono arrivare a 30 chilometri o anche più, nelle quali presumibilmente ci sono sbalzi enormi di temperatura e di pressione tra il fondo e il confine con la calotta ghiacciata e pertanto improbabile che tutto l'oceano possa essere popolato in modo omogeneo.

Per quanto riguarda il futuro dell'esplorazione su Encelado, l'Ocean Worlds Exploration Program della Nasa, il programma dedicato all'esplorazione dei mondi oceanici del Sistema solare ha già in programma la missione Europa Clipper, alla volta di Titano ed Europa, escludendo Encelado da ogni pianificazione. Anche l'Esa sembra particolarmente interessata a studiare Europa con la missione Juice, il cui lancio è avvenuto il 14 aprile dell'anno scorso: anche per gli europei, Encelado al momento è destinato a rimanere ai margini.

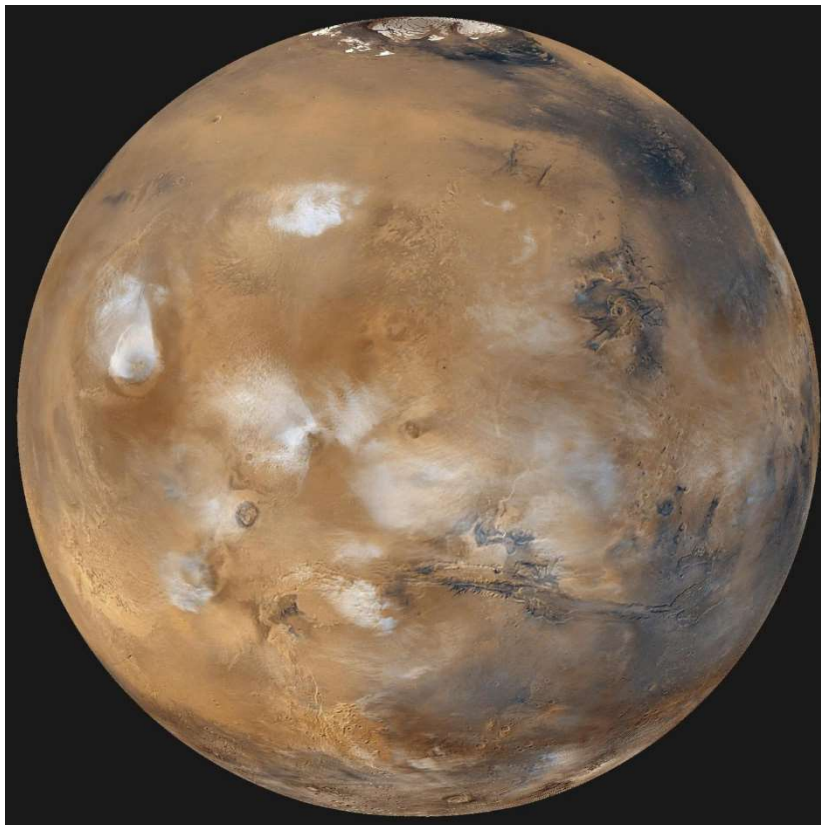
Nel 2015 fu proposta alla Nasa la missione Enceladus Life Findere (Elf) con l'obiettivo che una sonda orbitante cercasse una conferma positiva riguardo l'abitabilità dell'oceano

studiando le molecole presenti nei pennacchi al fine di individuare eventuali amminoacidi e per determinare se il metano nei pennacchi sia prodotto da organismi viventi.

Enceladus Life Signatures and Habitability (Elsah) è una missione proposta dalla Nasa nel 2017 per verificarne l'abitabilità campionandone i pennacchi. Come Elf è stata accantonata pure avendo ricevuto fondi per lo sviluppo tecnologico e per la preparazione di una realizzazione.

Infine Life Investigation for Enceladus (Life), proposta nel 2014 e poi stoppata, avrebbe dovuto catturare e campionare particelle ghiacciate dai pennacchi da studiare e analizzare sulla Terra.

2.2 Marte



Marte è il primo pianeta oltre la Terra sospettato di ospitare la vita. La ricerca della vita su Marte è il modello per simili ricerche attraverso il Sistema Solare.

Marte è approssimativamente la metà della Terra in diametro; è meno denso rispetto ad esso, avendo circa il 15% del volume terrestre e l'11% della sua massa, il che porta a circa il 38% della gravità superficiale terrestre. Il suo aspetto rosso-arancio è dovuto all'ossido di ferro sulla sua superficie.

La distanza media dal Sole è circa 230 milioni di chilometri e il suo periodo orbitale è di 687 giorni terrestri. Un giorno solare su Marte è leggermente più lungo ad un giorno terrestre: 24 ore, 39 minuti e 35,244 secondi. Un anno marziale è uguale a 1,8809 anni terrestri, ovvero 1 anno, 320 giorni e 18,2 ore. L'obliquità di Marte è 25,19 gradi rispetto al suo piano orbitale, che è simile all'obliquità della Terra; Marte possiede un'eccentricità orbitale di circa 0,09.

Marte è suddiviso in un denso nucleo metallico sovrapposto da materiali meno densi. La regione del nucleo ha un raggio di circa 1.794 più o meno 65 chilometri, consistendo principalmente di ferro e nichel con circa il 16/17% di zolfo. Il nucleo è circondato da un mantello silicato che ha formato molte delle caratteristiche tettoniche e vulcaniche del pianeta, ma che ora sembra essere inattivo. Gli elementi più abbondanti nella crosta marziana sono ferro, magnesio, alluminio, calcio e potassio; lo spessore della crosta è di circa 50 km, con uno spessore massimo di 125 km. Per quanto riguarda la composizione superficiale, Marte è un pianeta terrestre che consiste in minerali contenenti silicio e ossigeno, metalli e altri elementi tipici delle rocce. La superficie è principalmente composta da basalto tholeitico e la maggior parte di essa è completamente ricoperta da granelli di ossido di ferro.

Il lander Phoenix ha mostrato che il suolo marziano è leggermente alcalino e contiene elementi come magnesio, sodio, potassio e cloro. Questi elementi si trovano nei giardini della Terra e sono necessari per la crescita delle piante; il suolo marziano ha un pH basico di 7,7.

Sulla superficie di Marte sono presenti numerosi bacini d'impatto circolari. Il più grande è il bacino Hellas, situato nell'emisfero meridionale. Gli altri due grandi bacini d'impatto del pianeta sono i bacini Argyre e Isidis; tutti i grandi bacini su Marte sono estremamente antichi.

Vicino all'equatore, nell'emisfero occidentale, si trova un immenso sistema di canyon e valli interconnessi, noti collettivamente come "Valles Marineris". Il sistema di canyon si estende verso est da Tharsis per una lunghezza di oltre 4000 km, quasi un quarto della circonferenza del pianeta. I canyon equatoriali marziali hanno origine tettonica, infatti si sono formati principalmente a causa di fratture nella crosta.

Le calotte stagionali (quelle visibili al telescopio che crescono e decrescono stagionalmente) sono composte da anidride carbonica, ghiaccio che si condensa nell'atmosfera quando la temperatura scende a 148 K, il punto di congelamento dell'anidride carbonica, durante l'inverno polare. Al nord, il ghiaccio di anidride carbonica sublima completamente d'estate, lasciando dietro di sé una calotta residua di ghiaccio d'acqua; al polo sud, una piccola calotta residua di ghiaccio di anidride carbonica permane durante l'estate. A nord, i depositi stratificati formano una struttura alta 3 km e del diametro di 1000 km chiamata Planum Boreum; similmente a sud esiste la Planum Australe. I depositi stratificati probabilmente rappresentano cicli alternati di deposizione di polveri e ghiaccio causati dai cambiamenti climatici relativi alle variazioni dei parametri orbitali del pianeta nel tempo (cicli di Milankovitch). I depositi stratificati polari sono alcune delle unità geologiche più giovani di Marte.

L'atmosfera di Marte è tenue (l'1% di quella terrestre) ed è composta principalmente da anidride carbonica. La pressione atmosferica sulla sua superficie oggi varia da un minimo di 30 Pa (0,030 KPa) sul monte Olympus a oltre 1.155 Pa (1,155 KPa) nella pianura Hellas, con una pressione media a livello del suolo di 600 Pa. L'altezza dell'atmosfera è di circa 10,8 Km, che è più alta di quella della Terra (6 Km) poiché la gravità superficiale marziana

è solo il 38% di quella terrestre. È composta da circa il 96% di anidride carbonica, 1,93% di argon e 1,89% di azoto, insieme a tracce di ossigeno e acqua.

Sono state trovate incise nel terreno del suolo marziano, valli risalenti all'età Noachiana (approssimativamente quattro miliardi di anni fa); le singole valli sono tipicamente larghe meno di 5 Km, sebbene possano estendersi per centinaia o addirittura migliaia di chilometri sulla superficie. Alcuni ricercatori hanno sostenuto che le proprietà di queste reti di valli hanno richiesto che un ciclo idrologico sia stato attivo nel Marte antico.

I crateri a barriera mostrano un margine esterno lobato, come se il materiale si fosse mosso lungo la superficie, invece di volare su e giù in una traiettoria balistica. È generalmente accettato che i crateri siano una prova della presenza di ghiaccio o acqua liquida sotto la superficie: l'impatto fonde o fa bollire l'acqua nel sottosuolo producendo un tipico schema di materiale che circonda il cratere.

Continuiamo, trattando l'esistenza di un lago sotterraneo, situato sotto la calotta polare sud del pianeta. Questa scoperta è stata effettuata grazie ai dati radar raccolti da MARSIS (Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding), a bordo della sonda Mars Express dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA). Le osservazioni hanno rivelato una zona di riflessione radar particolarmente intensa, indicativa della presenza di acqua allo stato liquido situata a circa 1,5 Km di profondità nel Planum Australe. Tale lago misura 20x30 Km circa ed è circondato da diversi laghi più piccoli. L'acqua è probabilmente salata, contenente perclorati di calcio e magnesio, che abbassano il punto di congelamento e permettono all'acqua di rimanere liquida anche a temperature estremamente basse. La temperatura della zona è di circa -63°C, condizioni che renderebbero impossibile la presenza di acqua liquida senza la presenza di sali disciolti. La presenza di acqua liquida sotto la superficie di Marte è di grande interesse per gli scienziati, poiché potrebbe offrire un ambiente favorevole alla vita microbica, simile ai laghi subglaciali della Terra, come il lago Vostok in Antartide; inoltre la scoperta di questo lago sotterraneo fornisce nuove informazioni sulla geologia e sulla storia climatica marziana, suggerendo che il pianeta potrebbe aver avuto condizioni più favorevoli alla vita in passato. Sebbene questa scoperta sia significativa, non sono previste missioni immediate per esplorare direttamente il lago suddetto; tuttavia future missioni potrebbero mirare a raccogliere dati più dettagliati e, eventualmente, perforare la superficie per analizzare direttamente l'acqua in questione.

Per concludere, da quanto emerso da un recente articolo della "Repubblica.it" del 22 aprile 2026, dal sottosuolo di Marte emergono alcune piccole risposte, nuove tracce di una chimica sorprendentemente sofisticata. Il rover Curiosity dell'agenzia spaziale statunitense ha infatti individuato molecole organiche che ricordano da vicino i precursori del Dna, cioè quei "mattoni" chimici alla base dei processi biologici sulla Terra. Non è di certo la prova che su Marte ci sia stata vita ma è un indizio sempre più consistente che il pianeta rosso, in passato, abbia quantomeno avuto un ambiente capace di ospitare le reazioni necessarie a generarla.

Curiosity è il cuore della missione Mars Science Laboratory della Nasa lanciata il 26 novembre 2011 e atterrata su Marte nell'agosto 2012 all'interno del cratere Gale. Grande quanto un'automobile e alimentato da un generatore nucleare, Curiosity ha il compito di studiare la geologia e il clima del pianeta, analizzare campioni di rocce e suolo come sta facendo con successo e appunto tentare di verificare se in passato Marte abbia avuto condizioni favorevoli alla vita microbica. Grazie a un laboratorio chimico a bordo il rover perfora le rocce, riscalda i campioni e ne analizza i gas per identificare molecole organiche e tracce di ambienti abitabili. Di recente, da questo lavoro, ci è arrivata la novità-

documentata in uno studio su “Nature Communications” - che risale però a una perforazione effettuata sei anni fa nel 2020.

Proprio nel cratere Gale gli strumenti del *rover* hanno rilevato composti organici complessi, tra cui molecole contenenti carbonio e azoto, elementi chiave per la chimica della vita. Si tratta di sostanze che sulla Terra sono coinvolte nella formazione degli acidi nucleici, cioè le strutture fondamentali di DNA e RNA. Come sottolineano i ricercatori, il dato più rilevante non è solo la presenza di queste molecole ma la loro complessità. Delle 21 molecole contenenti carbonio identificate nel campione, sette sono state rilevate per la prima volta su Marte.

Gli scienziati non hanno naturalmente ancora modo di stabilire se queste molecole organiche siano state generate da processi biologici o puramente geologici, e d'altronde entrambe le ipotesi restano sul tavolo. La loro scoperta rafforza però l'idea che il Marte antico possedesse una chimica compatibile con la vita. Inoltre questi composti si aggiungono, a una lista sempre più ampia di molecole capaci di conservarsi nelle rocce per miliardi di anni, nonostante l'esposizione alla radiazione marziana, che poi nel tempo tende a degradarle.

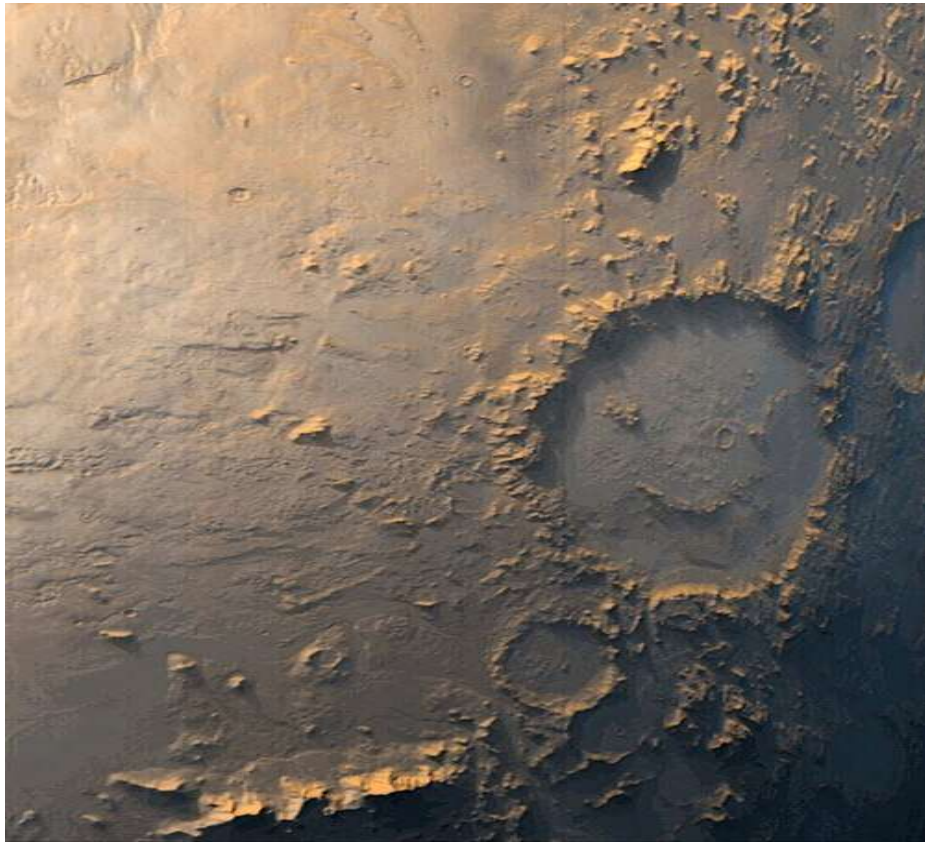
Ma da dove arrivava il campione in questione? Il sample di roccia, ribattezzato “Mary Anning 3” in onore della collezionista di fossili e paleontologa inglese, venne raccolto in una zona del Monte Sharp che miliardi di anni fa era attraversata da laghi e corsi d'acqua. Questo ambiente, un tempo simile a un'oasi, si è espanso e prosciugato più volte nel passato remoto del pianeta. Processi lunghissimi che hanno arricchito progressivamente l'area di minerali argillosi, particolarmente efficaci nel preservare i composti organici.

La Nasa ha spiegato in particolare che le molecole appena identificate c'è anche un eterociclo contenente azoto, cioè un anello di atomi di carbonio e azoto. “Questo tipo di struttura molecolare è considerato un precursore di Rna e Dna, gli acidi nucleici fondamentali per l'informazione genetica” ha spiegato l'autrice principale dello studio, Amy Williams dell'Università della Florida a Gainesville. Un'altra scoperta è stata quella del benzotiofene, una molecola contenente carbonio e zolfo già individuata in molti meteoriti. Non un caso: “Proprio questi meteoriti-spiega la nota ufficiale dell'agenzia statunitense-insieme alle molecole organiche che trasportano, secondo alcuni scienziati avrebbero contribuito a innescare la chimica prebiotica nel Sistema Solare primordiale.

Il nuovo studio è in realtà un pezzo di un percorso molto lungo. Va per esempio a completare e arricchire risultati dello scorso anno, quando su Marte erano state individuate le molecole organiche più grandi mai osservate: idrocarburi alcani lineari saturi come decano (10 atomi di carbonio), undecano (11C) e dodecano (12C). Entrambe le scoperte sono state possibili grazie al laboratorio SAM a bordo di Curiosity, che analizza campioni di roccia polverizzati e riscaldati per identificarne i gas e la composizione. In alcuni casi utilizza anche la “chimica umida”, impiegando solventi speciali, come il TMAH, usato per la prima volta proprio sul campione Mary Anning 3, per scomporre molecole più grandi e renderle rilevabili. Test di verifica condotti sulla Terra con il meteorite Murchison hanno mostrato l'affidabilità di queste procedure, mostrando che possono frammentare composti molto complessi in molecole simili a quelle su Marte.

Il passo successivo sarà capire se queste molecole siano diffuse o localizzate e, soprattutto, se presentino firme chimiche compatibili con processi biologici. Per farlo serviranno nuovi strumenti e, probabilmente, il rientro di campioni marziani sulla Terra. Nel frattempo, il

lavoro di Curiosity continua a ridefinire il confine tra geologia e biologia su un pianeta che sempre meno, appare completamente sterile.



Fotografia del cratere Gale

Fonti del capitolo

www.repubblica.it

<https://www.unibo.it/sitoweb/roberto.oroisei>

Capitolo 3: Alcuni pianeti interessanti

3.1 Proxima Centauri b

Proxima Centauri b è un esopianeta che orbita nella zona abitabile della nana rossa Proxima Centauri, situata a circa 4,2 anni luce dalla Terra nella costellazione del Centauro. Orbita attorno alla stella a una distanza di circa 0,05 UA (7,500,000 Km) con un periodo orbitale di circa 11,2 giorni terrestri ed è stato scoperto utilizzando il metodo della velocità radiale. Dal momento che l'inclinazione della sua orbita non è conosciuta, non è possibile determinare con precisione la massa di Proxima Centauri b. Se la sua orbita fosse vista in "edge-on" (in ambito astronomico, edge-on significa che il piano orbitale quasi di profilo rispetto alla nostra linea di vista) avrebbe una massa di $1,27 (+0.19/-0.17)$ masse terrestri, anche se il 90% dell'orientamento suggerisce una massa inferiore a 2,77 masse terrestri. Ricordando che l'esopianeta orbita nella zona abitabile di Proxima Centauri, con le giuste condizioni planetarie e proprietà atmosferiche, potrebbe esistere acqua liquida sulla superficie del pianeta. Proxima Centauri è una stella variabile che subisce occasionali aumenti di luminosità ed emissioni ad alta energia a causa dell'attività magnetica, che può generare forti tempeste stellari. Appunto, il pianeta è soggetto a pressioni del vento stellare superiori a 2000 volte rispetto a quelle sperimentate sulla Terra. Questa radiazione e il vento stellare annullerebbero via qualsiasi atmosfera, lasciando la superficie sottostante come l'unica area abitabile su quel pianeta. L'esopianeta in questione è abbastanza vicino per il fenomeno "tidally locked": questo fenomeno avviene quando un pianeta ruota al proprio asse esattamente nello stesso tempo in cui orbita attorno alla sua stella.



Rappresentazione artistica di Proxima Centauri b

3.2 Gliese 3323 b

Gliese 3323 b è un pianeta extrasolare che ruota alla stella nana rossa Gliese 3323, distante 17,4 anni luce dalla Terra ed è stato scoperto con il metodo della velocità radiale nel marzo del 2017 (N.Astudillo-Defru et al.) tramite lo spettrografo HARPS dell'Osservatorio di La Silla, in Cile. Al momento della scoperta secondo il Planetary Habitability Laboratory dell'Università di Porto Rico ad Arecibo, il pianeta era più simile alla Terra assieme a K2-72 e (nella costellazione dell'Acquario), con un indice di similarità terrestre di 0,90, e si pensava fosse situato all'interno della zona abitabile. Tuttavia in seguito lo stesso portale lo aveva escluso dai pianeti potenzialmente abitabili, in quanto troppo vicino alla sua stella, per poter sostenere acqua liquida sulla sua superficie.

Il pianeta orbita attorno alla sua stella in poco più di 5 giorni, ad appena 5 milioni di chilometri dalla stella ruotando attorno ad essa su un'orbita altamente eccentrica (0.23 ± 0.11) e il semiasse maggiore orbitale è di $89,86^\circ$. La massa del pianeta è circa il doppio di quella terrestre ($2,02 \pm 0,25 M_\oplus$). Riceve una radiazione 2,5 volte superiore rispetto a quella che la Terra riceve dal Sole. Il raggio del pianeta è 1,23 volte rispetto a quello terrestre.

3.3 Kepler-438 b

Kepler-438 b è un esopianeta roccioso situato a circa 472 anni luce dalla Terra, nella costellazione della Lira. Scoperto grazie alla missione Kepler della NASA, col metodo del transito, orbita nella zona abitabile della sua stella. Ha dimensioni simili alla Terra ed è stato a lungo considerato uno degli esopianeti più simili al nostro ($ESI=0,88$).

Kepler-438 b orbita attorno a una nana rossa, una tipologia di stella più piccola e più fredda del Sole. Sebbene il pianeta si trovi nella in cui l'acqua liquida potrebbe teoricamente esistere sulla superficie, la sua "abitabilità" è ostacolata dall'attività della sua stella. Le nane rosse sono soggette a violenti brillamenti (flare) che rilasciano radiazioni in grado di spogliare l'atmosfera del pianeta.

Caratteristiche principali:

- Raggio: circa il 12% più grande del raggio terrestre (7135,5 Km)
- Massa: circa 1,46 volte quella terrestre
- Distanza dalla stella: 0,166 UA
- Periodo orbitale: completa un'orbita in circa 35,2 giorni
- Eccentricità: $e > 0,03$
- Inclinazione orbitale: $89,86^\circ$
- Raggio del pianeta (rispetto a quello di Giove): 0,10

3.4 Trappist-1 d

Trappist 1-d è un pianeta extrasolare che orbita attorno alla stella TRAPPIST-1, una nana rossa situata a circa 40 anni luce dalla Terra, nella costellazione dell'Acquario. Scoperto da Michaël Gillon nel 2016, grazie al telescopio Kepler (col metodo del transito), quando vennero annunciati 3 pianeti attorno alla stella, nel febbraio 2017 ne sono state ricalcolate le caratteristiche e effettuati nuovi studi hanno portato alla scoperta di altri quattro pianeti attorno a TRAPPIST-1. Meno massiccio e un po' più piccolo della Terra, si presume che sia di natura rocciosa, e che sia situato nella zona abitabile della stella.

Secondo il Planetary Habitability Laboratory (PHL) dell'Università di Porto Rico ad Arecibo, il suo indice di similarità terrestre è di 0.91, il più alto tra tutti gli esopianeti al tempo della scoperta, e il terzo più alto nel 2022. Attualmente nella classifica aggiornata è il quinto; la classifica ESI è dominata da "Teegarden b" (ESI=0.97) nella costellazione dell'Ariete a 12,5 anni luce dal Sistema Solare.

Sempre il PHL stima che la sua temperatura di equilibrio planetaria, che non tiene conto dell'atmosfera e dell'eventuale effetto serra che essa potrebbe innescare sia di 296 K (17°C), assumendo che abbia un albedo simile a quello della Terra (0,3). Considerando che riceve un flusso radiante leggermente superiore di quello che riceve la Terra dal Sole, è possibile che durante la formazione possano essere fotoevaporati (processo mediante il quale gli atomi o le molecole di un gas vengono strappati via da un accumulo, sia esso un'atmosfera planetaria, un disco circumstellare o una nebulosa, da parte dei fotoni ad alta energia e dal resto della radiazione emessa da una stella), parte degli oceani eventualmente presenti; tuttavia a differenza dei pianeti più interni, nel caso di TRAPPIST-1 d la perdita d'acqua potrebbe essere stata nettamente minore, e potrebbe aver conservato le condizioni di acqua liquida sulla superficie.

Studi del 2018 hanno stimato una massa minore che al momento della scoperta, circa il 30% di quella terrestre, con un raggio del 77% (quindi una densità minore di quella terrestre), potrebbe indicare la presenza di grosse quantità di acqua allo stato liquido sotto forma di oceani. Lo stesso studio suggerisce che il pianeta abbia una quantità relativa di acqua 250 volte quella della Terra.

Osservazioni spettroscopiche effettuate nel 2025 hanno scemato i primi entusiasmi di TRAPPIST-1 come gemella terrestre. Analizzandone l'atmosfera, con lo spettrometro nel vicino infrarosso (NIRSpec) del JWST, gli astronomi non hanno trovato prove della presenza di acqua, metano o anidride carbonica, elementi comuni nell'atmosfera terrestre agenti come gas serra naturali-

Caratteristiche principali:

- Raggio: 4994,9 Km
- Massa: $0,388 \pm 0.012 M_{\oplus}$
- Densità: 4,37 (+0,15, -0,17) g/cm³
- Periodo orbitale: 97 ore
- R_p (RJup): 0,0703 (+0,0012, -0,0011)

- M_p (MJup): $0,00122 \pm 0.00004$
- i (deg): $89,909 (+0,068, -0,07)$
- $e = 0,00837$
- Temperatura superficiale: 303 K (min), 336 K (media), 370 K (max)
- Semiasse maggiore orbitale: 0.0223 ± 0.0003 UA

Capitolo 4: I progetti

4.1 Il progetto Apache

4.1.1 Introduzione

L'Osservatorio Astronomico della Regione Autonoma Valle d' Aosta (indicato anche con la sigla OAVdA) e il planetario di Lignan sorgono in un comprensorio di piccole frazioni chiamato Saint-Barthélemy, nel comune di Nus, a oltre 1600 metri di altitudine e a circa 16 km a nord dal borgo di Nus.

Entrambi sono gestiti dalla Fondazione Clément Fillietroz-ONLUS (FCF), finanziata da contributi della Regione Autonoma Valle d'Aosta (RAVA), del comune di Nus e dell'Unité des Communes Valdotaines Mont-Emilius, Soci fondatori della Fondazione, oltre che dai proventi delle attività proprie, che da statuto sono principalmente tre: ricerca scientifica, incluso il sostegno a tesi di laurea, dottorati di ricerca e post doc; didattica, cioè il supporto all'insegnamento delle scienze astronomiche per le scuole; divulgazione di astronomia e astrofisica per il grande pubblico. Per garantire il funzionamento della Fondazione, queste attività vengono integrate da consulenze tecnico-scientifiche e da partecipazioni a bandi per il trasferimento tecnologico. In questi anni inoltre la Fondazione ha beneficiato, per specifiche iniziative o per il sostegno alle attività istituzionali, di finanziamenti da fondazioni bancarie, come la Fondazione CRT-Cassa di Risparmio di Torino, che sostiene la FCF dal 2008, e da enti regionali come il BIM, ovvero il Consorzio dei Comuni della Valle d'Aosta – Bacino Imbrifero Montano.



L'Osservatorio di Saint- Barthelemy (OAVdA)

4.1.2 Progetto Pianeti extrasolari (2022)

Tra tutti i progetti di ricerca istituzionali, si tratta di un progetto ramificato che abbraccia l'ambito sperimentale delle osservazioni, quello teorico dell'interpretazione dei dati e perfino quello epistemologico e storico.

Il fulcro del Progetto Pianeti Extrasolari è rappresentato dal PROGETTO APACHE (A Pathway toward the Characterization of Habitable Earths). Sviluppato fin dalle fasi iniziali della sua concezione, quasi 19 anni fa, da un gruppo congiunto di lavoro tra INAF-OATo e OAVdA, ha previsto un programma osservativo di lunga durata (altrimenti chiamato "Survey"), finalizzato allo studio di una selezione di stelle nane rosse, tecnicamente dette nane M, nelle vicinanze (in senso astronomico) del Sole, per indagarne le caratteristiche fotometriche e verificare se attorno a loro orbitano pianeti extrasolari, utilizzando il metodo del transito.

La survey del progetto APACHE ha richiesto l'installazione a Saint-Barthélemy di una schiera di cinque telescopi da 400 mm, l'ultimo dei quali montato tra la fine del 2012 e l'inizio del 2013, ottenuti grazie a fondi Inaf e contributi della Fondazione CRT-Cassa di risparmio di Torino. L'hardware per la gestione delle osservazioni e dei dati raccolti è stato acquisito dall'OAVdA grazie anche ai contributi regionali. Invece il software di controllo del sistema informatico è stato realizzato in modo originale dal gruppo di lavoro di Saint-Barthélemy.

Le osservazioni sono state avviate nel 2012, giungendo a termine nel 2018, compreso un anno di follow-up degli astri individuati più interessanti dopo i cinque anni nominali di durata della survey.

La schiera di telescopi robotizzati ha studiato anche stelle non appartenenti al campione di nane rosse individuato per il Progetto APACHE. L'esempio più importante in tal senso è il contributo valdostano alla scoperta di due esopianeti attorno alla stella XO-2S (presente nella costellazione della Lince, che dista a 486 anni luce ed appartiene ad un sistema binario), realizzata in collaborazione con il programma italiano GAPS (Global Architecture of Planetary Systems). Il sistema XO-2 è stato il primo caso noto di stella binaria per la quale sono stati individuati pianeti in orbita ravvicinata attorno a ciascuna delle due componenti della coppia (S indica la stella a sud, mentre N è quella a nord nel campo di vista) e non attorno alle due stelle contemporaneamente, con un raggio orbitale molto più ampio. La scoperta è stata oggetto di un'importante pubblicazione su *Astronomy and Astrophysics* a luglio 2014.

Ancora nell'ambito del Progetto Pianeti Extrasolari, i ricercatori Dott. Davide Cenadelli, Phd, e Dott. Andrea Bernagozzi, Phd, sono stati impegnati nell'ultimo lustro, oltre che nel Progetto APACHE, anche in una ricerca originale a cavallo tra storia della scienza e epistemologia, dedicata all'analisi della dinamica della scoperta 51 Pegasi b, il primo pianeta trovato intorno a una stella simile al Sole.

Il paper scientifico prodotto dai due ricercatori in questo ambito, pubblicato nel 2015 su *European Physical Journal H*, è stato così bene accolto dalla comunità di studiosi che la stessa prestigiosa rivista internazionale ha commissionato a Davide Cenadelli un dettagliato lavoro di "storia orale", volto ad approfondire alcuni aspetti scientifici e metodologici, realizzato insieme con il Prof. Michel Mayor, astronomo svizzero co-autore della scoperta. Questo articolo successivo è stato pubblicato nel 2018.

Non solo: Andrea Bernagozzi e Davide Cenadelli sono stati invitati a scrivere un articolo per il prestigioso Handbook of Exoplanets, testo enciclopedico di riferimento in materia per gli anni a venire, pubblicato dalla casa editrice Springer, dello stesso gruppo Nature. La monumentale opera (in versione cartacea è un tomo composto da quattro volumi per un totale di circa 3500 pagine, con 1200 illustrazioni). L'articolo è stato pubblicato nel 2018. La seconda versione cartacea della monumentale opera uscirà a luglio 2026.

I due ricercatori e tutto lo staff della FCF hanno quindi accolto con comprensibile soddisfazione l'assegnazione del Premio Nobel per la fisica nell'ottobre del 2019, proprio a Michel Mayor e Didier Queloz, allora dottorando del primo e oggi rinomato astronomo, per la loro scoperta di 51 Pegasi b. Oltre alla contentezza per un così prestigioso riconoscimento assegnato all'astronomia e in particolare a un campo in cui l'OAVdA è impegnato, c'è stata anche l'emozione per aver lavorato e anche co-firmato un lavoro scientifico con i due scienziati premiati. Michel Mayor è amico del nostro Osservatorio Astronomico, che visitò nel 2010 per un seminario scientifico e un evento pubblico proprio nel 15esimo anniversario dell'annuncio della scoperta.



Una fotografia di me e il Prof Michel Mayor

Sempre nel 2022 è proseguito il lavoro per i legacy paper del Progetto APACHE, cioè gli articoli che ne presentano i principali risultati. Sono stati individuati tre filoni. Il primo paper, che riguarda l'analisi dei dati raccolti durante la fase di survey per lo studio delle rotazioni di 107 nane M osservate a Saint-Barthélemy, è stato pubblicato nel 2020 da Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. I due articoli restanti riguardano uno l'analisi statistica generale di altre caratteristiche astrofisiche delle stelle del campione e l'altro lo studio puntuale di un particolare sistema stellare multiplo, che potrebbe rivelarsi di riferimento per la misura accurata delle masse delle stelle che lo compongono, permettendo così di mettere alla prova alcuni aspetti delle teorie sulla formazione stellare.

Nel mese di settembre 2022 è stato chiesto alla FCF di far parte di una collaborazione tra diversi telescopi europei per acquisire in simultanea curve di luce dell'esopianeta KELT-18 b. I transiti sono stati osservati dal Telescopio Nazionale Galileo (TNG) per i dati spettroscopici e, in contemporanea, da telescopi italiani come quelli dell'Osservatorio Astronomico Regionale Parco Antola Comune di Fascia (OARPAF) del Dipartimento di fisica dell'Università di Genova, dell'osservatorio Polifunzionale del Chianti (OPC), della stazione osservativa di Asiago e dell'OAVdA, nonché almeno due telescopi francesi. Il target è un esopianeta a bassa densità, selezionato per la sua altezza atmosferica (stimata al

3,3%) considerata elevata rispetto al raggio del corpo celeste. Le osservazioni a bassa risoluzione con lo spettrografo DOLoRes (Device Optimized for the LOw RESolution) a TNG permettono di definire il profilo T-P (temperatura-pressione) e livello del continuo di riferimento dell'esopianeta.

Osservando due transiti primari, la collaborazione si pone i seguenti obiettivi scientifici: misurare per la prima volta la sua altezza di scala atmosferica; rivelare la presenza di specie atomiche come Na, K, Li, H; rivelare, se presente, lo scattering di Rayleigh, identificando le dimensioni delle particelle che producono le nubi atmosferiche su quel mondo alieno. Inoltre, la collaborazione vuole verificare quanto e come il rumore fotometrico possa essere minimizzato applicando una particolare strategia osservativa tra diversi telescopi che operano contemporaneamente.

4.1.3 Progetto Pianeti extrasolari (2023)

Nel 2023 è proseguito il lavoro per i legacy paper del Progetto APACHE, cioè gli articoli che ne presentano i principali risultati, tenendo conto anche dell'integrazione con i dati man mano messi a disposizione da altri progetti che studiano gli esopianeti dalla superficie terrestre e dallo spazio, come la missione TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite) dell'agenzia spaziale degli Stati Uniti, NASA, lanciata nel 2018. Il riferimento per questa attività è il direttore dell'osservatorio Vda dott. Jean Marc Christille.

Nelle serate del 27 febbraio e 22 marzo 2023 il personale FCF ha acquisito in contemporanea con altri telescopi italiano ed europei tra cui il Telescopio Nazionale Galileo (TNG), L'OARPAF del Dipartimento di fisica dell'Università di Genova, l'OPC della stazione osservativa di Asiago, due telescopi francesi e altri ancora le curve di luce dell'esopianeta KELT-18b, un gioviano caldo che dista a 1058 anni luce, nella costellazione dell'Orsa maggiore. I dati sono stati condivisi all'interno di una collaborazione guidata e organizzata dall'INAF-Osservatorio Astronomico di Padova che ha coinvolto ricercatrici e ricercatori dagli atenei di Genova, Firenze e Bologna e dalle sedi INAF di Padova e Brera, a Milano. Per l'OAVdA è stato utilizzato il Telescopio Principale, il quale lo staff composto dal Dott. Christille, il Prof. Calabrese e il tecnologo Sartor contribuiranno all'analisi e interpretazione dei dati raccolti, in vista della pubblicazione scientifica.

4.1.4 Progetto Pianeti extrasolari (2024)

Nel 2024, è proseguita la complessa analisi dei dati sul campione di nane M (nane rosse), raccolti con continuità tra il 2012 e il 2018 per la stesura dei cosiddetti legacy paper, cioè gli articoli che presentano alla comunità scientifica i principali risultati raggiunti.

La chiusura della survey, infatti, non rappresenta la conclusione del Progetto APACHE: lo studio della mole ingente di dati raccolti, di per sé impegnativo, procede anche considerando nuove informazioni sulle stelle del campione o comunque del medesimo tipo spettrale, provenienti da altre campagne osservative, come la missione TESS.

4.1.5 Progetto Pianeti extrasolari (2025)

Nel 2025, è proseguita l'analisi dei dati sul campione di nane M.

Attualmente il Progetto APACHE è terminato. Rivolgendo infine uno sguardo al futuro, non si esclude, se si instaureranno le opportune condizioni operative, di intraprendere nuove sessioni osservative per lo studio di target stellari applicando il metodo del transito fotometrico in collaborazione con INAF o altri enti. L'eventuale nuova ricerca potrà infatti giovare delle accresciute potenzialità della schiera APACHE in termini di prestazioni dopo il complesso lavoro di aggiornamento software e firmware condotto negli anni passati dal tecnologo della FCF, il dott. Stefano Sartor.



il telescopio principale all'interno della cupola dell'OAVdA



Uno dei telescopi utilizzati per il progetto APACHE

4.2 Il progetto SETI

Tutto comincia col progetto Ozma di Frank Drake utilizzando il radiotelescopio “Green Bank” nel 1960, che consisteva nell’osservazione di due stelle simili al Sole per qualche centinaio di ore ad una frequenza precisa alla quale atomi d’idrogeno neutro emettevano radiazione, ma non furono trovati segnali d’origine extraterrestre.

Drake creò un’equazione riguardo la probabilità di trovare forme di vita extraterrestre intelligenti:

$$N = R^* \times f_p \times n_e \times f_l \times f_i \times f_c \times L$$

- R^* è il rate medio di formazione stellare nella nostra galassia
- f_p è la frazione di queste stelle di avere pianeti
- n_e è il numero di pianeti abitabili per stelle che hanno pianeti
- f_l è la frazione di questi che sviluppano vita ad un certo punto
- f_i è la frazione di pianeti che sviluppano specie di vita intelligenti
- f_c è la frazione di specie intelligenti che sviluppano civiltà con tecnologie in grado di comunicare attraverso distanze interstellari
- L è la durata di una civiltà con una capacità di comunicazione

Una variante dell’equazione usa la connessione tra il numero di stelle nella galassia di adesso e il tasso di formazione stellare $N^* = \int R^*(t) dt$, integrato nell’età della galassia T_g , e assumendo un tasso di formazione stellare costante, ottenendo:

$$N = N^* \times f_p \times n_e \times f_l \times f_i \times f_c \times L/T_g$$

L’equazione di Drake incorpora fattori che includono astronomia, scienze planetarie, biologia e sociologia.

Ritornando al progetto SETI esistono delle complicazioni: i ricercatori riconoscono che l’attuale ricerca riguarda la tecnologia, non l’intelligenza: si tratta di una ricerca di un particolare set di tecnologie, che possediamo ora, ma che non avevamo in passato e che potremmo non usare in futuro. L’astrobiologia si sta orientando verso la ricerca di biomarcatori negli spettri dei pianeti abitabili e poiché l’alterazione globale dell’atmosfera di un pianeta potrebbe indicare la presenza di una civiltà intelligente, la distanza tra SETI e l’astrobiologia convenzionale si sta riducendo.

SETI Vs astrobiologia: l’astrobiologia si occupa dell’abitabilità, dell’abbondanza naturale del cosmo e della rilevabilità di luoghi che potrebbero ospitare forme di vita di qualsiasi tipo. Le ricerche di pianeti extrasolari abitabili sono per lo più limitate a distanze che vanno da alcune decine a qualche centinaio di anni luce. Il SETI riconosce la potenziale scarsità di interlocutori e mira a sviluppare tecniche in grado di coprire una frazione significativa del diametro della Via Lattea, pari a circa 100000 anni luce. Questi tentativi di comunicazione sono mirati: la comunicazione involontaria o passiva è inefficiente; la dispersione delle onde

radio terrestri nello spazio scende al di sotto delle fluttuazioni di rumore nella radiazione cosmica di fondo già ai margini del Sistema Solare.

La ricerca di pianeti extrasolari e il programma SETI si sono generalmente concentrate su stelle simili al Sole: le stelle con più di 1,5 masse solari sono escluse, basandosi sul requisito di una durata di vita di almeno un miliardo di anni necessaria per lo sviluppo della vita complessa.

La formazione stellare nella via Lattea non è stata costante nel tempo e la storia di 11 miliardi di anni ha visto un accumulo progressivo nell'abbondanza degli elementi biogenici. L'equazione di Drake è influenzata anche dal gradiente di metallicità nel disco galattico e dal minore arricchimento dell'alone; la scarsità di elementi pesanti nella periferia, combinata con l'elevato tasso di supernovae e le altre densità stellari nel disco centrale, hanno portato al concetto di zona abitabile galattica.

La zona abitabile galattica è la regione di una galassia in cui è più probabile che si sviluppi la vita. Per identificare una posizione nella galassia come parte della zona abitabile galattica, è necessario tenere conto di diversi fattori, come:

- La distribuzione delle stelle e delle braccia a spirale
- La presenza o l'assenza di un nucleo galattico attivo
- La frequenza di supernovae vicine che possono minacciare l'esistenza della vita
- La metallicità di quella posizione

La metallicità del sottile disco galattico è molto più elevata rispetto a quella dell'alone galattico esterno. Uno dei requisiti fondamentali per l'esistenza della vita attorno a una stella è la capacità della stessa di produrre un pianeta terrestre di massa sufficiente a sostenerla; elementi come ferro, magnesio, titanio, carbonio, ossigeno, silicio e altri sono necessari per produrre pianeti abitabili, e la concentrazione e i rapporti di questi elementi variano all'interno della galassia. Oltre a quantità specifiche dei vari elementi stabili che compongono la massa di un pianeta terrestre, è necessaria un'abbondanza di radionuclidi (isotopi) come il ^{40}K , ^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th per riscaldare l'interno del pianeta e alimentare processi vitali come la tettonica a placche, il vulcanismo e una dinamo geomagnetica. Sono inoltre necessarie varie molecole prebiotiche per la formazione della vita: di conseguenza, la distribuzione di queste molecole nella galassia è importante per determinare la zona galattica abitabile. Sebbene un'elevata metallicità favorisca la creazione di pianeti extrasolari terrestri, un eccesso può essere dannoso per la vita: un'alta metallicità può portare alla formazione di un gran numero di giganti gassosi in un dato sistema, che possono successivamente migrare oltre la linea del gelo del sistema e diventare Giovi caldi, disturbando i pianeti che altrimenti si troverebbero nella zona abitabile circumstellare del sistema.

Una stella deve evitare un numero eccessivo di eventi cosmici catastrofici con il potenziale di danneggiare la vita sui suoi pianeti altrimenti abitabili; se troppo frequenti, tali esplosioni catastrofiche possono sterilizzare un'intera regione della galassia per miliardi di anni. Il nucleo galattico, ad esempio, ha sperimentato un'ondata iniziale di formazione stellare estremamente rapida, innescando una cascata di supernovae che, per cinque miliardi di anni, ha reso quell'area quasi completamente incapace di sviluppare vita; oltre alle supernovae, si è proposto che i lampi di raggi gamma, quantità eccessive di radiazioni, perturbazioni gravitazionali e altri vari eventi influenzano la distribuzione della vita all'interno della galassia. Tra queste vi sono, anche quelle di "maree galattiche" con il potenziale di indurre

impatti cometari o persino corpi freddi di materia oscura che attraversano gli organismi inducendo mutazioni genetiche; tuttavia l'impatto di molti di questi eventi potrebbe essere difficile da quantificare.

Diverse caratteristiche morfologiche delle galassie possono influenzare il loro potenziale di abitabilità: le braccia a spirale, ad esempio, sono luoghi di formazione stellare, ma contengono numerose nubi molecolari giganti e un'alta densità di stelle che possono perturbare la nube di Oort di una stella, inviando valanghe di comete e asteroidi verso eventuali pianeti più interni; inoltre, l'elevata densità stellare e il tasso di formazione di stelle massive possono esporre le stelle che orbitano all'interno delle braccia a spirale troppo a lungo alle esplosioni di supernova, riducendo la loro possibilità di sopravvivenza e di sviluppo della vita. Considerando questi fattori, il Sole si trova in una posizione vantaggiosa all'interno della Via Lattea poiché, oltre a trovarsi al di fuori di un braccio a spirale, orbita vicino al raggio di co-rotazione, massimizzando l'intervallo tra i passaggi attraverso il braccio a spirale.

Una barra galattica ha anche il potenziale di influenzare le dimensioni della zona abitabile galattica. Si ritiene che le barre galattiche crescano nel tempo, raggiungendo infine il raggio di co-rotazione della galassia e perturbando le orbite delle stelle che si trovano in quella zona. Le stelle ad alta metallicità, come il nostro Sole, ad esempio, situate in una posizione intermedia tra l'alone galattico a bassa metallicità e il centro galattico ad alta radiazione, potrebbero essere disperse in tutta la galassia, influenzando la definizione della zona abitabile galattica; è stato suggerito che per questo motivo, potrebbe essere impossibile definire correttamente una zona abitabile galattica.

La zona abitabile galattica è spesso vista come un anello compreso tra 4 e 10 Kpc dal centro galattico, anche se recenti ricerche hanno messo in discussione questa visione. Le prime ricerche si limitavano ad affermare che la zona era un anello che comprendeva una regione della galassia arricchita di metalli e risparmiata da un'eccessiva radiazione, e che l'abitabilità sarebbe stata più probabile nel disco sottile della galassia. Un'analisi dell'evoluzione della zona abitabile galattica nel tempo ha rilevato che le stelle vicine al bulge galattico dovevano formarsi entro una finestra temporale di circa due miliardi di anni per poter avere pianeti abitabili. Prima di quella finestra, le stelle del bulge galattico sarebbero state impedito dallo sviluppare pianeti in grado di sostenere la vita a causa dei frequenti eventi di supernova.

Sulla base dei risultati di simulazioni Monte Carlo, su un modello semplificato della Via Lattea, uno studio ha scoperto che il numero di pianeti tende ad aumentare nel tempo, anche se non secondo un andamento perfettamente lineare: uno studio. Uno studio sulla frequenza di pianeti che sopravvivono alle supernovae in funzione della loro distanza dal centro galattico, della loro altezza rispetto al piano galattico e della loro età, ha concluso che circa lo 0,3% delle stelle nella galassia potrebbe oggi supportare vita complessa: L'idea della zona abitabile galattica è stata criticata in quanto i parametri per definirla sono impossibili da stabilire, anche solo approssimativamente, e quindi tale zona potrebbe essere semplicemente una visione concettuale utile per comprendere meglio la distribuzione della vita, piuttosto che un fine in sé. Inoltre le stelle che "viaggiano" lungo le braccia a spirale della galassia possono spostarsi di decine di migliaia di anni luce dalle loro orbite originarie, a sostegno dell'ipotesi che non esista una zona abitabile galattica ben definita; una recente simulazione Monte Carlo rafforza questa idea, suggerendo appunto che non esista una zona abitabile galattica solidamente delimitata.

Ma torniamo a trattare l'equazione di Drake. Alla riunione di Green Bank nel 1961, Frank Drake e i suoi colleghi si accordarono su valori di $R^*=10$, $f_p=0.5$, $n_e=2$, $f_l=1$, $f_i=0.01$, $f_c=0.01$ e $L=10000$, con il risultato di $N=10$. I prodotti dei decadimenti delle supernovae forniscono un'indicazione indiretta sulla formazione delle stelle massive, suggerendo $R^*=10$, ma un censimento più diretto degli oggetti stellari giovani ci dà $R^*=1$. I dati di Kepler implicano che il prodotto $f_p \times n_e=0.13$, è più basso rispetto alla stima di Drake, ma non di molto e le lune abitabili sono completamente escluse da queste stime.

Le abbondanze degli elementi pesanti si sono accumulate abbastanza rapidamente da permettere l'esistenza di pianeti abitabili: tutto dipende quindi dal prodotto $f_l \times f_i \times f_c \times L$. Sfortunatamente, non ci sono dati concreti su nessuno di questi fattori dell'equazione di Drake. La comparsa relativamente rapida della vita sulla Terra e l'ampia adattabilità degli estremofili sono stati usati per sostenere che la biologia sulla Terra fosse inevitabile; argomenti analoghi sono stati proposti per l'inevitabilità evolutiva del cervello e dell'intelligenza. Tutti questi ragionamenti, però, sono influenzati da un pregiudizio antropico; in ogni caso, il crescente censimento di mondi abitabili fornisce una forte motivazione per il SETI.

Ma il SETI cosa sta cercando di preciso? La risposta è segnali. Il rapporto Cyclops suggeriva queste proprietà come portatori di segnali informativi:

1. L'energia dovrebbe essere minimizzata, a parità di altre condizioni
2. La velocità dovrebbe essere la più alta possibile
3. Le particelle dovrebbero essere facili da generare, lanciare e catturare
4. Le particelle non dovrebbero essere sensibilmente assorbite o deviate dal mezzo interstellare

Se il segnale è trasmesso deliberatamente, potrebbe avere caratteristiche che la natura non è in grado di produrre. Le ricerche radio si sono concentrate sulla compressione in frequenza (segnali continui o pulsati a banda stretta); le ricerche ottiche si basano invece sulla compressione temporale (breve impulsi nell'ordine dei nanosecondi). È anche possibile che un segnale trasmesso intenzionalmente possa essere costruito in modo da sembrare "quasi" un'emissione astrofisica e un segnale del genere verrebbe quindi rilevato da uno strumento astronomico. Esempi potrebbero includere una pulsar che cambia regolarmente il proprio periodo tra due valori, una stella variabile Cefeide il cui periodo preciso viene modificato oppure un oggetto molto grande con orbita non circolare attorno ad una stella.

A metà degli anni '70 gli astronomi dell'Università della California a Berkeley decisero di utilizzare il radiotelescopio dell'università, con un'antenna di 85 piedi, per osservazioni commensali. Uno spettrometro a 100 canali venne programmato per cercare segnali a banda stretta, dando così origine al programma SERENDIP; questo fu poi sostituito da SERENDIP II, III, IV e oggi, nella versione V.v, operativa presso il più grande radiotelescopio al mondo ad Arecibo in Porto Rico. L'hardware per l'elaborazione dei segnali di SERENDIP si è evoluto fino a poter gestire contemporaneamente centinaia di milioni di canali spettrali. Tuttavia, l'algoritmo di rilevamento utilizzato è rimasto piuttosto semplice ed è insensibile a segnali che si accendono e spengono oppure che cambiano rapidamente frequenza nel tempo (il risultato dell'accelerazione tra trasmettitore e ricevitore, come ad esempio la rotazione della Terra).

Nel 1999, il team Seti di Berkeley decise di registrare una piccola porzione dello spettro di frequenze osservato da SERENDIP e poi creare piccoli pacchetti di dati che potevano essere

scaricati da volontari, i quali mettevano a disposizione i cicli inutilizzati CPU dei loro computer per analizzare i dati in modo più approfondito; SETI@home divenne un successo globale e immediato.

All'inizio del ventunesimo secolo, il gruppo OSETI (Optical SETI) di Harvard si rese conto che circa il 25% dei fotoni che entravano nel telescopio Wyeth presso l'osservatorio di Oak Ridge non riuscivano a passare attraverso la fessura dello spettrometro digitale utilizzato per la rilevazione di esopianeti e quindi andavano sprecati: per catturare quei fotoni sprecati costruirono un rivelatore OSETI. Questo sistema osservò le stelle oggetto di studio per la ricerca di esopianeti per più di cinque anni; fu affiancato dal telescopio ristrutturato Fitz-Randolph, situato nel campus dell'università di Princeton e da un rivelatore duplicato. Programmi OSETI che osservano migliaia di stelle sono stati (o sono attualmente) condotti anche presso l'osservatorio Leuschner dell'UC Berkeley, l'osservatorio Lick dell'UC Santa Cruz e l'osservatorio Campbelltown, nel nuovo Galles del sud.

I ricercatori del SETI dispongono di un catalogo di circa 250000 stelle selezionate come potenzialmente adatte a ospitare pianeti abitabili e tecnologie; questo catalogo dovrebbe aumentare notevolmente con il completamento della missione Gaia proposta dall'ESA, che mira a misurare le distanze precise di un miliardo o più stelle vicine. L'obiettivo del SETI è osservare queste stelle nell'intervallo di frequenze compreso tra 1 e 10 GHz dove il rumore naturale proveniente da tutte le sorgenti astrofisiche di emissione è minimo. Oltre al catalogo, nella Via Lattea ci sono più di 100 miliardi di stelle: un approccio consiste nell'esaminare l'area del cielo che contiene il maggior numero di stelle nel minor numero di gradi quadrati, vicino al centro della galassia; anche se queste stelle sono troppo lontane per essere catalogate singolarmente, è possibile effettuare una ricerca sistematica su un numero compreso tra 4 e 10 miliardi di stelle esaminando una fascia di 20 gradi quadrati lungo il piano galattico, che circonda il centro galattico.

Fonti del capitolo

<http://www.oavda.it>

Bibliografia

C.S.Cockell et al. Habitability. A Review. *Astrobiology*, Volume 16, Number 1, pp.89117, 2016 con materiale preso da <https://en.wikipedia.org/wiki/Planetary-habitability>

“C’è vita nel Sistema Solare?”, (2021), Editore: “Scienza Express”.

Chapter 12 of the book “Astrobiology-A Multidisciplinary Approach”, by Jonathan I. Lunine, Addison Wesley, 2005.

Chapter 14 “Frontiers of Astrobiology” C. Impey, J. Lunine, J. Funes (eds.), Cambridge University Press, 2012.

Chapter 15 of the book “Astrobiology-A Multidisciplinary Approach”, by Jonathan I. Lunine, Addison Wesley, 2005

Docente modulo: R.Orosei. INAF-IRA; <https://unibo.it/sitoweb/roberto.oroisei>

<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>

science.nasa.gov/exoplanet-catalog/gj-3323-b/

science.nasa.gov/exoplanet-catalog/kepler-438-b

science.nasa.gov/exoplanet-catalog/trappist-1-d

www.oavda.it

www.wikipedia.it