

## "Cosa vedrebbe un astronauta ... ?"

### Parte seconda: escursioni termiche e pianeti in orbita intorno alle nane rosse.

L'ultimo mio post "*Cosa vedrebbe un astronauta sbarcato su un pianeta di un sistema binario?*" - pubblicato la scorsa settimana sul mio profilo e su diversi gruppi FB - ha riscosso un discreto successo.

Ho trovato davvero interessanti alcune tra le domande che mi sono state rivolte nei commenti, così da fornirmi spunti per la stesura di questo nuovo post cui scopo è fare ulteriore chiarezza su fenomeni descritti nel primo.

#### a) Temperatura media di un pianeta ed escursione termica in presenza di eclissi di uno dei due astri.

In molti commenti si mette in dubbio il dato relativo alla drastica diminuzione di temperatura (-21°C) che si registrerebbe durante l'eclissi di una delle due stelle (viene a mancare il 50% del flusso di calore ricevuto), adducendo il motivo che l'atmosfera mitigherebbe tale sbalzo termico.

L'obiezione è valida, tuttavia il valore indicato - ricavato da Phil Plait da uno studio sull'argomento - ha un significato che vado a chiarire.

- Sappiamo che, in mancanza di atmosfera, un corpo come la nostra Luna (1) presenta temperature che variano tra -247 °C (rilevata in un cratere in ombra perenne presso il polo nord lunare) e 127 °C (rilevata in un luogo esposto ai raggi solari perpendicolari nei pressi dell'equatore), là dove la sua temperatura media risulta pari a -23°C.
- La presenza rilevante di gas serra in atmosfera può trasformare un pianeta come Venere (che un tempo - si presume - avesse acqua liquida in superficie) in una fornace con una temperatura alla superficie in grado di fondere il piombo.
- La sua scarsità, al contrario, può portare ad un clima molto rigido, come quello che si sperimenta su Marte.

L'atmosfera - e la sua composizione - può quindi influire decisamente sui valori della temperatura in quanto agisce redistribuendo il calore tra zone fredde e zone calde grazie all'azione di correnti e venti.

La temperatura media di un pianeta dipende quindi da molti fattori, oltre che la distanza dalla propria stella e la temperatura di quest'ultima:

- bisogna tener conto dell'**albedo**, e cioè il potere riflettente del pianeta stesso **(2)** che può alterare significativamente la temperatura superficiale;
- della presenza o meno di attività vulcanica;
- della presenza o meno di un'atmosfera e soprattutto della sua composizione (che determina l'intensità dell'effetto serra).

Se trascurassimo tutto ciò la Terra risulterebbe avere una temperatura inferiore al punto di congelamento dell'acqua, dunque esser al di fuori della cosiddetta **fascia abitabile** della nostra stella **(3)** mentre risulterebbe dotata di miti temperature il pianeta Venere.

Ho già trattato in alcuni miei precedenti post **(4)** quali siano i limiti della definizione di "fascia abitabile" di una stella, e come questa scelta arbitraria di escludere altri fattori nella stima della temperatura media di un pianeta rischi di farci "*cercare la vita nel posto sbagliato*".

Veniamo ora al valore relativo all'escursione termica indicato nel mio precedente post, un delta pari a -

21°C.

Esso è stato ricavato utilizzando il *metodo usato nel calcolo della fascia abitabile*:

(temperatura media ricavata da irradiazione dei due soli) – (temperatura media ricavata da irradiazione di un unico sole).

Non si tiene dunque conto di un possibile correttivo dovuto all'albedo, e neppure di effetti a livello locale della cui importanza avevo comunque fatto cenno in nota 4 del precedente post ("*... In realtà non sarebbe un effetto così drammatico per il fatto che aria, terreno ed acqua non si raffreddano/riscaldano con la stessa velocità. In zone in cui l'aria è umida, come i tropici, vicino a specchi d'acqua i cambiamenti risulterebbero meno bruschi ...*").

C'è da dire, a difesa della stima di Plait, che un'escursione di 21°C in tempi relativamente brevi non è per nulla straordinaria, ed è anzi sperimentabile anche qui sulla Terra: ogni 12 ore circa si verifica nei deserti ed in zone dove il clima è molto secco.

Se la Terra venisse improvvisamente spostata sull'orbita di Marte, sperimentando così una diminuzione del flusso di calore pari a quello che investirebbe il nostro ipotetico pianeta durante un'eclissi di uno dei suoi due soli, non è inverosimile prevedere una brusca diminuzione della temperatura media del pianeta nell'ordine della grandezza indicata.

## **b) Luminosità fornita da una nana rossa.**

Un'altra domanda interessante che mi è stata posta riguarda gli effetti sulla luminosità riscontrabili su un pianeta in orbita di tipo "S" laddove la stella secondaria sia una nana rossa".



Le **nane rosse (stelle M V)** sono il tipo di stella più comune nell'universo: nella via Lattea si stima rappresentino tra il 67 e l'80% di tutte le stelle presenti.

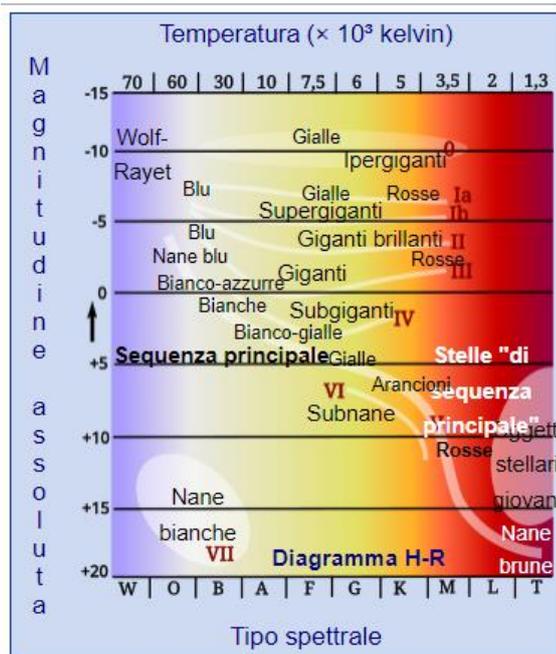
Di dimensioni molto contenute, sono dotate di una temperatura superficiale pari circa alla metà di quella del nostro Sole.

Per dare una risposta a questa domanda prendiamo in esame il caso più semplice: un sistema formato da una nana rossa con

la sua corte di pianeti, ed indaghiamo quale possa essere la sua luminosità diffusa nell'atmosfera di un pianeta le cui dimensioni e caratteristiche siano simili a quelle della nostra Terra **(5)**.

L'esistenza di pianeti intorno a nane rosse (un tempo ritenuta impossibile) è stata dimostrata nel 2016, anno in cui è stato individuato un pianeta potenzialmente dotato di acqua liquida in superficie nella fascia abitabile che circonda la stella a noi più vicina, Proxima Centauri.

Proxima Centauri è una nana rossa di classe spettrale M5 Ve che si trova "nei nostri pressi", a soli 4,2 AL (anni luce) di distanza.



Nonostante la sua vicinanza, è visibile soltanto se si dispone di un telescopio a causa della luminosità molto ridotta (è stata infatti scoperta solo nel 1915). Il suo raggio è pari ad 1/7 di quello del Sole, la sua massa a circa 1/8, mentre la sua densità risulta 40 volte superiore a quella del nostro astro.

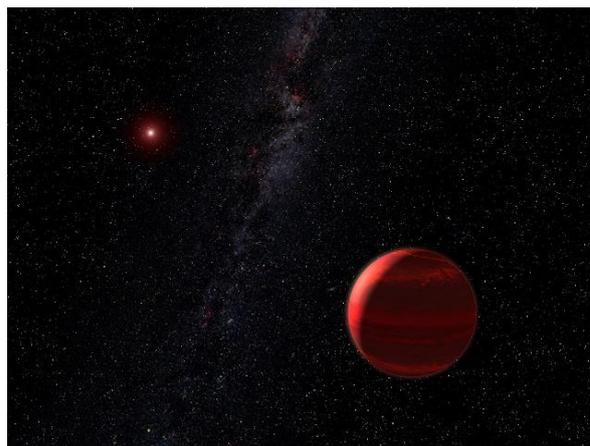
Nonostante la bassa luminosità essa è soggetta ad improvvisi e casuali brillamenti causati dalla sua intensa attività magnetica: tale caratteristica rende improbabile si sia sviluppata la vita su qualcuno dei pianeti che la circondano (6)

Gioca contro tale ipotesi anche il fatto che la sua zona abitabile si trovi tra 3.5 e 7 milioni di Km dalla superficie dell'astro: i pianeti a questa distanza avrebbero un periodo di rivoluzione molto breve, e le forze di marea della stella ne bloccherebbero la rotazione sul proprio asse.

Come succede infatti con Mercurio (il pianeta più vicino al Sole), i pianeti della zona abitabile intorno a Proxima presenterebbe sempre la stessa faccia rivolta verso la stella.

Nonostante l'eventuale presenza di un'atmosfera - in grado di redistribuire l'energia ricevuta dalla faccia esposta a quella sempre in ombra - solo una stretta fascia della sua superficie, quella immediatamente intorno al **terminatore** (la linea che divide la zona illuminata da quella buia), potrebbe risultare adatta alla vita (7)

Nella tabella allegata i dati relativi a 3 pianeti che orbitano intorno a Proxima Centauri (l'esistenza del 3° è ancora dubbia) rilevati dai nostri strumenti: tra di essi solo **Proxima-b** può fregiarsi del titolo di "pianeta terrestre" (secondo la definizione indicata in nota 5).



#### Prospetto del sistema Proxima Centauri

Pianeta	Tipo	Massa	Periodo orb.	Sem. maggiore	Eccentricità	Scoperta
d	Sub Terra	0,26 ± 0,05 M <sub>⊕</sub>	5,122 giorni	0,02865 au	0,04	2020
b	Pianeta terrestre	1,173 ± 0,086 M <sub>⊕</sub>	11,184 giorni	0,05 au	0,1	2016
c*	Super Terra	7 ± 1 M <sub>⊕</sub>	5,23 anni	1,48 au	0,04	2019

#### Prospetto del sistema TRAPPIST-1

Pianeta	Massa	Raggio	Densità	Periodo orb.	Sem. maggiore	Incl. orbita
b	1,374 ± 0,069 M <sub>⊕</sub>	1,116 r <sub>⊕</sub>	5,425 g/cm <sup>3</sup>	1,51 giorni	0,01154 UA	89,56 ± 0,23°
c	1,308 ± 0,056 M <sub>⊕</sub>	1,097 r <sub>⊕</sub>	5,447 g/cm <sup>3</sup>	2,42 giorni	0,0158 UA	89,7 ± 0,18°
d	0,368 ± 0,012 M <sub>⊕</sub>	0,778 r <sub>⊕</sub>	4,354 g/cm <sup>3</sup>	4,05 giorni	0,0223 UA	89,87 ± 0,1°
e	0,692 ± 0,022 M <sub>⊕</sub>	0,920 r <sub>⊕</sub>	4,885 g/cm <sup>3</sup>	6,10 giorni	0,029 UA	89,736°
f	1,039 ± 0,031 M <sub>⊕</sub>	1,045 r <sub>⊕</sub>	5,009 g/cm <sup>3</sup>	9,21 giorni	0,039 UA	89,719°
g	1,321 ± 0,038 M <sub>⊕</sub>	1,129 r <sub>⊕</sub>	5,042 g/cm <sup>3</sup>	12,35 giorni	0,047 UA	89,721°
h	0,326 ± 0,020 M <sub>⊕</sub>	0,775 r <sub>⊕</sub>	4,147 g/cm <sup>3</sup>	18,77 giorni	0,062 UA	89,796°

Allargando il raggio della ricerca di esopianeti intorno a nane rosse sino ad una distanza pari a 10 volte quella che ci separa da Proxima Centauri troviamo un altro candidato che sembra più adatto ad ospitare forme di vita.

Durante una campagna di mappatura della volta celeste nella regione degli infrarossi, nel 1999 si scoprì l'esistenza di **Trappist-1**, una nana rossa a soli 40 AL di distanza da noi.

Tale stella possiede una luminosità pari allo 0,05% di quella del nostro Sole, quasi tutta nella banda dell'infrarosso **(8)**.

Se mettessimo Trappist-1 al posto del nostro Sole, dalla Terra ci apparirebbe come un minuscolo cerchietto dotato di una luminosità confrontabile con quella della Luna piena.

Il suo diametro è di poco superiore a quello di Giove, pari al 12% di quello del nostro Sole.

Facciamo qualche esempio per renderci conto di cosa possa significare una tale dimensione e luminosità.

Visto da Saturno, cioè circa da una distanza di un miliardo e mezzo di km, il nostro Sole brilla con una luminosità pari 3500 volte quella della Luna piena: significa che, guardandolo fisso senza adottare protezioni, sarebbe ancora in grado di farci lacrimare gli occhi.

Dalla stessa distanza, **Trappist-1** brillerebbe con una luminosità di poco superiore a quella del pianeta Venere visto dalla Terra: una stella rosso vermiglio un poco più luminosa delle altre. Nessuno dei suoi pianeti sarebbe distinguibile perché troppo vicini alla propria stella.

Per vedere Trappist-1 con lo stesso diametro apparente del nostro Sole bisogna avvicinarsi a 16 milioni di Km, poco più di 1/3 della distanza che separa Mercurio dal Sole: osservata da questa distanza, la luminosità di Trappist-1 risulterebbe pari a 100 volte quella della Luna piena.

Nel maggio 2016 e nel febbraio 2017 è stata annunciata la scoperta, utilizzando il **metodo dei transiti (9)**, di sette esopianeti in orbita intorno a Trappist, di dimensioni comparabili a quelle della Terra **(10)**, cui è stata assegnata, a seconda della distanza dal proprio sole, una lettera progressiva da "b" ad "h", da aggiungere dopo il nome di quest'ultimo (vedi tabella allegata in figura).

Il pianeta più esterno presente in questo sistema, **Trappist-1h**, si trova a 58 milioni di km di distanza dalla sua stella (il 26% in più rispetto alla distanza Mercurio-Sole), mentre quello più interno, **Trappist-1b**, si trova ad appena 1,6 milioni di km, circa 4 volte la distanza Terra-Luna (più o meno quella a cui opera il James Webb Space Telescope).

Un pianeta che si trovasse a questa distanza dal nostro Sole sarebbe destinato ad evaporare, seppur in un tempo lunghissimo.

Questo non è il destino di Trappist-1b in quanto la temperatura superficiale della sua stella è meno della metà di quella del Sole **(11)**, pertanto l'energia che riceve è pari ad appena 4 volte quella che ci investe ogni giorno **(12)**.

All'opposto **Trappist-1h**, pur distando dalla sua stella poco più di Mercurio rispetto al Sole, è probabilmente ricoperto dai ghiacci risultando dotato di una temperatura media di -100°C **(13)**

La **zona abitabile** intorno a Trappist-1, pur essendo di dimensioni molto ridotte, risulta occupata da 3 pianeti: **Trappist-1e**, **Trappist-1f** e **Trappist-1g**.

E' stato possibile stimare alcuni dati importanti di questi corpi:

- le loro dimensioni, utilizzando il metodo dei transiti;
- la loro massa e velocità, utilizzando il metodo della velocità radiale.
- Il rapporto dimensioni/massa ci restituisce la densità, e, grazie a questa, possiamo sapere se si tratti di un pianeta gassoso oppure costituito da rocce e metalli.

Nel caso dei 3 esopianeti in esame la densità risulta simile a quella della Terra (i due più esterni hanno una densità leggermente inferiore che farebbe pensare alla presenza di vasti oceani).

**Trappist-1e** ha densità identica a quella del nostro pianeta, un'accelerazione di gravità pari al 93% di quella terrestre e riceve dalla sua stella circa il 60% dell'energia che noi riceviamo dal Sole; se fosse dotato di un'atmosfera basterebbe la presenza di una percentuale di CO2 leggermente superiore a quella riscontrabile nella nostra per ottenere temperature simili a quelle terrestri **(14)**

I pianeti di questo sistema stellare sono molto vicini gli uni agli altri, cosa che rende importanti gli effetti mareali che lo rendono **geologicamente attivo (15)**

Alla vista di un improbabile astronauta che si trovi nelle vicinanze, le calotte polari appaiono rosse (il ghiaccio riflette la luce della stella) mentre eventuali oceani appaiono scurissimi (l'acqua riflette male la luce rossa).

E' molto probabile che la rotazione di tutti i pianeti intorno a Trappist-1 sia sincrona con il loro moto orbitale.

Nel caso di pianeti rocciosi privi di atmosfera ci sarà una differenza di temperatura drammatica tra il lato illuminato e quello sempre in oscurità.

Qualora invece esista un'atmosfera, l'aria scaldata dalla stella si alza e si espande fluendo verso l'emisfero al buio, la cui aria fredda scorre vicino alla superficie del pianeta dirigendosi verso la zona illuminata: questa circolazione contribuisce a temperare le differenze di temperatura tra le due parti del pianeta.

Le **forze di Coriolis** tuttavia complicano le cose.

Non sappiamo la velocità di rotazione dei pianeti, ma grazie al metodo dei transiti conosciamo i periodi orbitali; nel caso di Trappist-1e "un anno locale" è pari a 146 ore; poiché la rotazione dovrebbe essere sincrona con il periodo orbitale, il pianeta compie un giro su sé stesso in 6,1 giorni terrestri.

Sta a dire, in presenza di un'atmosfera, venti costanti, forti ma non troppo impetuosi.

La similitudine di massa, dimensioni e densità con il nostro pianeta porta a supporre che possieda una conformazione analoga a quella terrestre, nucleo in ferro e spesso mantello ricco di silice.

La superficie della Terra è ricoperta per il 70% da oceani, ma l'acqua intrappolata in minerali cristallini all'interno del mantello si stima sia 3 volte quella "libera" sulla crosta.

Qualora davvero la composizione di Trappist-1e risultasse simile a quella terrestre - e il pianeta fosse dotato di atmosfera - non è detto che presenti una superficie simile a quella del nostro pianeta; potrebbe infatti essere un **mondo acquatico** (la superficie essere ricoperta completamente di acqua cosa che determinerebbe un effetto serra rilevante) oppure come un **mondo quasi desertico** (quasi tutta l'acqua sarebbe intrappolata nel mantello in minerali cristallini).

Dal lato perennemente buio di Trappist-1e i pianeti esterni (Trappist-1g e Trappist-1h) appaiono come dischi argentati abbastanza vicini l'uno all'altro - uno delle dimensioni pari alla metà della nostra Luna, l'altro poco più di una stella.

Il nostro Sole risulterebbe una stella fioca, appena visibile nel cielo notturno.

Vista dal lato illuminato del pianeta, la nana rossa - a 5 milioni di Km di distanza dalla sua superficie - appare 4 volte più grande del Sole nei nostri cieli, e si potrebbero persino distinguere le macchie solari sulla sua superficie.

Anche se il pianeta fosse dotato di un'atmosfera simile a quella terrestre, il cielo nella parte illuminata risulterebbe rosso scuro, venendo a mancare la componente blu nella luce emessa dalla stella.

**Si è cercato di dare una spiegazione al fatto che tutti i pianeti intorno a Trappist-1 stiano su orbite relativamente vicine così da influenzarsi reciprocamente.**

Durante la **fase di accrescimento** della stella, nel piccolo disco che circonda quella che sarà la nana rossa, i pianeti in fase di formazione vengono attirati verso l'astro dalle interazioni con il disco stesso che, oltre ad "alimentarne la crescita", contribuisce a frenarne la corsa (perdendo così energia e spostandosi su orbite più ristrette).

Mano a mano che viene a mancare il materiale con cui interagire il pianeta smette di avvicinarsi e talvolta sfugge alla caduta nell'astro.

Appena la stella "si accende" il disco viene spazzato via ed ecco la possibilità che il pianeta si trovi su un'orbita molto ravvicinata al suo sole.

Nel caso dei pianeti di Trappist-1, è probabile che i pianeti oltre ad interagire con il disco di materia si trovano ad interagire tra di loro, date le distanze ridotte, e venga così a crearsi una risonanza analoga a quella che ritroviamo tra le lune di Saturno.

Quando la risonanza diventa stabile si arriva ad una sorta di equilibrio in cui la gravità di ogni pianeta garantisce che quelli adiacenti mantengano la loro posizione.

Ecco così che i pianeti di Trappist-1 formano una catena di risonanze ruotando intorno alla stella con periodi legati tra di loro da rapporti quasi esatti tra numeri interi **(16)**

L'anno del pianeta più interno dura 1,5 giorni terrestri, quello del pianeta più esterno dura invece 19 giorni terrestri.

Essendo relativamente vicini, nei cieli di uno di questi pianeti gli altri appaiono abbastanza grandi (anche se la grandezza apparente varia velocemente a causa della brevità del periodo orbitale) ed è possibile distinguerne le fasi (che si alternano come quelle della nostra Luna).

Quando ad esempio Trappist-1b doppia Trappist-1c la loro distanza è di soli 640.000 km; visto dalla superficie di Trappist-1b l'altro pianeta apparirebbe con un diametro doppio rispetto a quello della nostra Luna.

In fase di "luna nuova" il pianeta si interporrebbe tra l'osservatore e la stella: si assisterebbe ad un transito ma mai ad una eclissi totale.

E' improbabile che questi pianeti possiedano lune; sono troppo vicini e le lune per avere un'orbita stabile dovrebbero esser vicinissime al proprio pianeta; tale vicinanza farebbe sì che rilievi anche modesti sul pianeta determinino effetti mareali che perturbano l'orbita della luna, rendendola instabile.

... ma ... chissà?

Quante volte abbiamo pensato che qualcosa fosse impossibile (ad esempio che le nane rosse potessero avere pianeti) e poco dopo la natura ci ha contraddetti!

L'universo ha avuto quasi 14 miliardi di anni per provare innumerevoli configurazioni e trovare stabilità là dove noi non immaginiamo neppure!

**Note:**

**(1)** La Luna riceve dal Sole un flusso di calore pari a quello che investirebbe un pianeta in orbita intorno a due soli con le stesse caratteristiche del nostro, posto ad una distanza pressappoco eguale a quella che separa Marte dal Sole.

**(2)** Quanto maggiore è il potere riflettente di un corpo celeste, tanto più risulterà inferiore la temperatura rispetto al calcolo basato solo su distanza dalla stella e calore irradiato (pensiamo alla Terra durante le ere glaciali: abbiamo evitato di finire nel punto di equilibrio "palla di neve" soltanto grazie all'attività vulcanica che, rilasciando grandi quantità di gas in atmosfera, ha contribuito ad aumentare l'effetto serra).

Viceversa, qualora la superficie di un pianeta sia dominata da colori scuri il calore tende ad esser assorbito e la temperatura risulterà più elevata.

**(3)** La Terra presenta una temperatura media pari a 15.6°C a causa dei gas serra che impediscono la dispersione di calore al di fuori dell'atmosfera.

Con Fascia Abitabile si intende una zona intorno ad una stella delimitata da una distanza minima ed una massima dall'astro stesso, all'interno della quale la temperatura media (calcolata tenendo conto della temperatura della stella e della distanza del pianeta) l'acqua possa esser presente in forma liquida.

**(4)** Mi riferisco ai seguenti post:

- 19 settembre 2023 *"Dove indirizzare la ricerca di vita al di fuori del sistema solare? Non solo esopianeti ma anche stelle nane brune e "verdi" potrebbero avere acqua liquida in superficie".*
- 29 maggio 2023 *"LAWDKI, la ricerca di forme di vita aliena condotta adottando un nuovo paradigma: il finanziamento da parte della NASA all'iniziativa LAB".*
- 20 gennaio 2023 *"La vita al di fuori della Terra: cosa cercare e dove? I limiti della definizione di "fascia abitabile" e l'ipotesi "superterre e tettonica a zolle"*
- 23 settembre 2022 *"Parrocchiale ed Universale: dove potrebbe nascondersi alle nostre ricerche una vita aliena e perché siamo ancora troppo condizionati dal pregiudizio antropico negli attuali progetti in atto".*

**(5)** Pianeti rocciosi con dimensioni e caratteristiche simili a quelle del nostro pianeta vengono definiti pianeti terrestri.

**(6)** Forti espulsioni di massa coronali provocherebbero, ad un pianeta che ne sia eventualmente dotato, una precoce erosione atmosferica; di conseguenza nel lungo periodo eventuali forme di vita che vi si fossero sviluppate si troverebbero ad esser esposte al vuoto.

**(7)** Naturalmente "la vita per come la conosciamo": sulla definizione di "vita" vedi i post precedentemente

indicati in nota (4).

**(8)** Nella banda della luce visibile l'emissione luminosa è insignificante, pari a circa 4 milionesimi (0,0000037) di quella del Sole.

**(9)** Un riferimento a questo metodo lo si ritrova nel nome stesso assegnato alla stella: Trappist sta infatti per **TR**ansiting **P**lanets and **P**lanetesimals **S**mall **T**elescope-south (le ultime due lettere si riferiscono all'osservatorio localizzato nell'emisfero sud, in Cile, protagonista della scoperta). Trappist fa anche riferimento ai monaci trappisti, un ordine monastico belga che produceva l'omonima birra, molto apprezzata dai ricercatori!

**(10)** Trappist-1h ha un diametro di 9.800 km (il 77% di quello terrestre) mentre Trappist-1g di 14.700 km (il 15% in più di quello della Terra).

**(11)** La temperatura superficiale di Trappist-1 è pari a 2300° C contro i 5500° del Sole.

**(12)** Nonostante ciò la temperatura al suolo di Trappist-1b è comunque superiore al punto di ebollizione dell'acqua.

**(13)** Queste considerazioni sulle temperature medie sono fatte tenendo conto esclusivamente della distanza del pianeta e della temperatura della stella; vale quanto affermato nella sezione precedente in relazione ad albedo e presenza di atmosfera più o meno satura di gas serra.

In ogni caso, anche se fosse dotato di atmosfera in grado di redistribuire il calore ricevuto dalla stella, Trappist-1b rimarrebbe sempre troppo caldo per consentire la presenza di acqua liquida.

**(14)** La presenza di un'atmosfera dipende anche dalla presenza di un campo magnetico; nella sua giovinezza una nana rossa presenta un'attività magnetica intensa e produce potenti brillamenti che si alternano a distanza di poche ore.

Un pianeta privo di un campo magnetico non è in grado di deflettere le particelle ad alta energia che via via contribuiscono a spazzarne via l'atmosfera.

**(15)** Un esempio di come gli effetti mareali di un corpo vicino influenzino l'attività geologica di un altro è rappresentato da Io, la luna di Giove, unico luogo nel sistema solare dove si trovano vulcani in attività (oltre che sulla Terra).

**(16)** Il pianeta Trappist-1b compie 8 orbite ogni 5 del pianeta Trappist-1c il quale ne compie 5 ogni 3 del pianeta Trappist-1d, ecc.

Spostandosi invece verso l'esterno i rapporti sono 3:2, 3:2, 4:3, 3:2.

Si tratta di configurazioni abbastanza stabili.