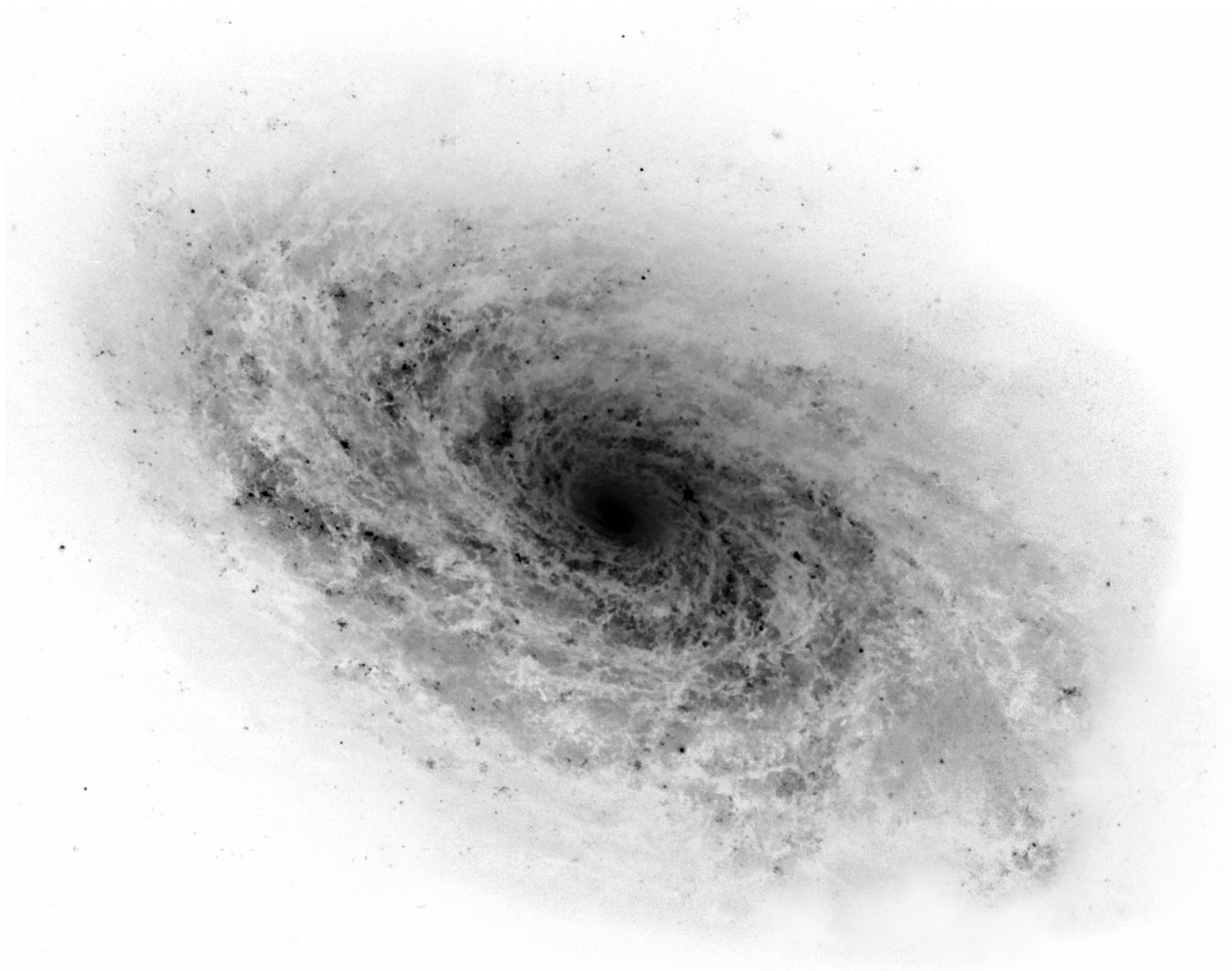


# Estudi de l'habitabilitat dels exoplanetes de la Via Làctia



Daniel Allepuz Requena  
Tutor: Josep Lluís Sal Castro  
2n de Batxillerat  
Escola Garbí

Considerar la Terra l'únic món poblat en un espai infinit és tan absurd com afirmar que en tot un camp sembrat de blat, un sol gra creixerà.

*Metròdor de Quios, segle IV aC*

# Índex

|  |    |
|--|----|
| 1. Introducció .....   | 2  |
| 2. Objectius.....  | 4  |
| 3. Els exoplanetes.....  | 6  |
| 3.1 Breu història.....   | 7  |
| 3.2 Mètodes de detecció.....                                       | 8  |
| 3.2.1 Imatge directe.....  | 8  |
| 3.2.2 Velocitat radial.....  | 8  |
| 3.2.3 Mètode de trànsit.....                                       | 9  |
| 3.2.4 Variacions en la radiació d'un púlsar.....                   | 10 |
| 3.3 Nomenclatura.....  | 11 |
| 4. Buscant vida.....   | 12 |
| 4.1 La zona habitable.....   | 12 |
| 4.2 Excentricitat.....   | 14 |
| 4.3 Massa.....   | 14 |
| 4.4 Període de rotació.....  | 15 |
| 4.5 Composició.....  | 15 |
| 5. Desenvolupament de l'algoritme.....                             | 16 |
| 5.1 Introducció.....   | 16 |
| 5.2 Factor 1: temps a la HZ.....                                   | 17 |
| 5.2.1 Calculant la HZ.....   | 17 |
| 5.2.2 Determinant el segment de l'òrbita que es troba a la HZ..... | 18 |
| 5.2.3 Determinant el temps que l'exoplaneta és dins els la HZ..... | 22 |
| 5.2.4 Resultat.....  | 24 |
| 5.3 Factor 2: temperatura a la superfície del planeta.....         | 25 |
| 5.4 Factor 3: la massa.....  | 26 |
| 6. Desenvolupament de l'aplicació.....                             | 29 |
| 6.1 Característiques.....  | 29 |
| 6.2 Funcionament.....  | 29 |
| 6.3 Distribució.....   | 30 |
| 7. Resultats.....  | 31 |
| 7.1 Principals exoplanetes potencialment habitables.....           | 33 |
| 8. Conclusions.....  | 39 |
| 8.1 L'equació de Drake.....  | 40 |
| 9. Agraïments.....   | 41 |
| 10. Glossari.....  | 42 |
| 11. Referències.....   | 43 |
| 12. Bibliografia.....  | 46 |

# 1. Introducció

Tot aquest treball gira al voltant dels exoplanetes, aquests cossos celestes que acompanyen a la immensa majoria de les estrelles de totes les galàxies, inclosa la nostra. El meu interès personal cap a aquests planetes llunyans va començar quan, l'any 2008, vaig tenir el plaer d'escoltar al Dr. Frank Drake en una conferència al CosmoCaixa de Barcelona. Frank Drake és astrofísic, i és àmpliament conegut per ser un dels pioners en la recerca de vida extraterrestre intel·ligent. És cofundador del SETI\* i autor de l'equació de Drake, la qual permet el càlcul del nombre de civilitzacions intel·ligents a l'Univers. La seva conferència tractava sobre la possible existència d'altres formes de vida intel·ligent fora del planeta Terra i els exoplanetes que podrien suportar-la. En el moment de la seva xerrada es coneixien 333 exoplanetes, avui en dia ja sobrepassen els 1.822 exoplanetes confirmats i hi ha més de 4.000 candidats pendents de confirmació<sup>[1]</sup>.

A partir d'aquest moment el meu interès per la ciència, en especial l'astrofísica, va anar augmentant. L'any 2013 em van acceptar al programa Joves i Ciència, destinat a promoure la vocació científica dels joves. L'estiu d'aquell any vaig desenvolupar un projecte d'astronomia com a part d'aquest programa. En aquest projecte, científics del camp de l'astrofísica em van fer una introducció a aquesta ciència, incloent els exoplanetes. Així doncs, i com a part del compromís establert amb el programa Joves i Ciència, vaig elaborar un article científic tutoritzat pel Dr. Enric Herrero, investigador del CSIC\*\*. En l'article, dissenyava un mètode per avaluar numèricament l'habitabilitat dels exoplanetes.

Aquest article ha estat la llavor per aquest treball de recerca. En aquest treball milloro notablement aquest mètode i faig una recerca de exoplanetes potencialment habitables per tenir una idea de l'habitabilitat de la nostra galàxia. Moltes de les millores introduïdes són fruit de la meva estada al ICE\*\*\*-CSIC durant l'estiu del 2014. Sota la direcció del Dr. Ignasi Ribas i juntament amb una companya del programa Joves i Ciència vaig seleccionar la mostra de 90 estrelles que s'observaran en el projecte CARMENES\*\*\*\*, aquest projecte té com a objectiu trobar exoplanetes

---

\* Search for Extra Terrestrial Intelligence

\*\* Consejo Superior de Investigaciones Científicas

\*\*\* Institut de Ciències de l'Espai

\*\*\*\* Calar Alto high-Resolution search for M dwarfs with Exoearths with Near-infrared and optical Échelle Spectrograph, <https://carmenes.caha.es/>

semblants a la Terra en estrelles de tipus M (nanes vermelles). Fent aquesta selecció vaig aprendre mètodes per tractar grans quantitats de dades, també vaig aprendre sobre les últimes tècniques per calcular els límits de la zona habitable.

Per una altra part aquest treball no hagués estat possible sense certs coneixements de programació informàtica. En no disposar d'un programa que fes els càlculs necessaris, n'he hagut de crear un de propi. Aquesta part no ha estat complicada ja que, per interès personal, ja tenia amplis coneixements de programació en varis llenguatges.

Les matemàtiques han tingut un paper important en aquesta recerca. Durant l'elaboració d'aquest treball he tingut l'oportunitat d'ampliar els meus coneixements sobre matemàtiques. La part sobre la qual he hagut d'investigar més és la geometria de l'el·lipse, és una part de la matemàtica que no es tracta durant el batxillerat, però fonamental en l'estudi de les òrbites dels cossos celestes.

## 2. Objectius

L'objectiu principal d'aquest treball és saber si els exoplanetes habitables són freqüents a la Via Làctia. La hipòtesi que plantejo és la següent:

Els exoplanetes habitables són comuns a la nostra galàxia, és compten per l'ordre de milers de milions o de bilions (de  $10^9$  a  $10^{12}$  ).

Per complir aquest objectiu he separat la recerca en tres parts:

- Dissenyar un algoritme que a partir de característiques físiques d'un exoplaneta valori la seva habitabilitat en forma d'un índex numèric comprès entre el zero i la unitat. Aquesta part comprèn l'apartat 5.
- Dissenyar una aplicació informàtica que em permeti aplicar de forma ràpida i el més automàtica possible aquest algoritme a un conjunt d'exoplanetes tan extens com es vulgui. Aquesta part comprèn l'apartat 6.
- Utilitzant l'aplicació desenvolupada, aplicar l'algoritme al conjunt dels exoplanetes confirmats. Fer una selecció dels exoplanetes més potencialment habitables analitzant el resultat de l'algoritme. Fer extrapolacions dels resultats a nivell galàctic per extreure conclusions de l'habitabilitat de la nostra galàxia. Aquesta part comprèn els apartats 7 i 8.

La metodologia emprada ha estat la següent:

1. Fer recerca bibliogràfica sobre els requeriments perquè un exoplaneta sigui habitable. Seleccionar aquells requeriments que es puguin mesurar quantitativament i que aquestes mesures estiguin disponibles.
2. Definir un índex de potencial d'habitabilitat ( *HPI* ). Dissenyar mètodes per avaluar numèricament els requeriments perquè un planeta sigui habitable.
3. Escollir un llenguatge de programació i elaborar un programa capaç de dur a terme les operacions necessàries. Primer una versió que em permeti continuar ràpidament amb la recerca i després una dirigida al públic en general.
4. Escollir la base o bases de dades d'on extreure les dades de cada exoplaneta. Calcular l' *HPI* per a tots els exoplanetes d'aquesta o aquestes bases de dades. Ordenar els exoplanetes d' *HPI* més alt a més baix i seleccionar els primers.

Fer una recerca d'estudis publicats sobre cada un d'aquests exoplanetes.

5. Sabent la fracció d'exoplanetes potencialment habitables de la mostra analitzada, fer extrapolacions i calcular quants exoplanetes potencialment habitables poden haver a en la nostra galàxia.

### 3. Els exoplanetes

Un exoplaneta (o planeta extrasolar) és un cos que orbita una estrella (o més) que no és el Sol. Aquest cos compleix els dos últims requeriments de la definició següent:

«Un planeta és un cos celeste que (a) orbita al voltant del Sol, (b) té suficient massa perquè la seva pròpia força superi les forces de cos rígid i assumeixi un equilibri hidrostàtic (forma esfèrica) i (c) ha netejat de planetesimals les rodalies de la seva òrbita.»<sup>[2]</sup>

Aquesta és la definició de planeta feta per la Unió Astronòmica Internacional (IAU) l'any 2006. Canviant l'enunciat (a) per *orbita al voltant d'una estrella* obtenim una bona definició d'exoplaneta. Tot i això, la definició que la IAU i la comunitat científica accepta és la següent:

«Els *planetes* són objectes amb masses reals per sota del límit de massa per a la fusió termonuclear del deuteri (13 masses de Júpiter per a objectes de metal·licitat solar) que orbiten estrelles o restes estel·lars. La massa/mida mínima requerida per a un objecte extrasolar (és a dir, exoplaneta) per ser considerat un planeta ha de ser la mateixa utilitzada en el nostre sistema solar.

Objectes subestel·lars amb masses reals per sobre de la massa límit per a la fusió termonuclear del deuteri són *nanes marrons*, no importa com es van formar ni on es trobin.

Objectes que suren lliurement en cúmuls estel·lars joves amb masses per sota de la massa límit per a la fusió termonuclear del deuteri no són *planetes*, però són *sub-nanes marrons* (o qualsevol nom que sigui més apropiat).»<sup>[3]</sup>

Aquesta definició va ser creada el 2001 i modificada el 2003.



### 3.1 Breu història

La idea de planetes fora del sistema solar es remunta al segle XVI. Giordano Bruno, astrònom italià i defensor de l'heliocentrisme, deia el següent:

«En aquest espai que declarem infinit hi ha una infinitat de mons semblants al nostre.»

Al segle XVIII Isaac Newton concloïa en el seu *Principia*:

«I si les estrelles fixes són centres de sistemes semblants, totes estaran construïdes amb un disseny semblant [...]»<sup>[4]</sup>

La tecnologia necessària per fer deteccions d'exoplanetes es va començar a obtenir a finals del segle XX. Després de varis descobriments falsos durant els anys seixanta i setanta, l'any 1988 es va fer la primera detecció d'un exoplaneta que acabaria sent confirmat<sup>[5]</sup>. Es tractava d'un cos de massa similar a Júpiter que orbitava l'estrella Gamma Cephei. Durant els anys noranta es van descobrir varis exoplanetes, incloent exoplanetes orbitant púlsars<sup>[6]</sup>.

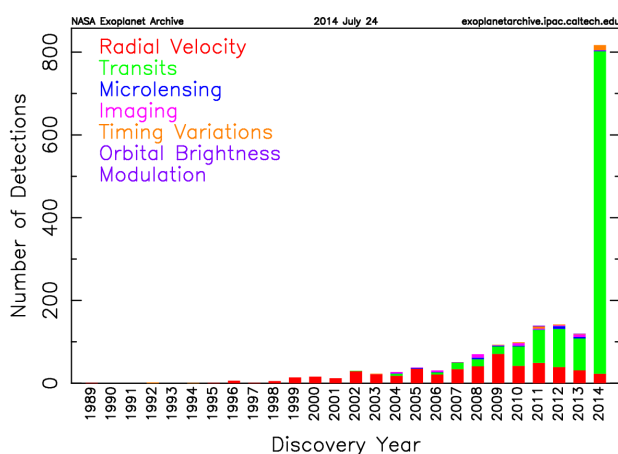


Figura 1: Descobriments d'exoplanetes fets des de l'any 1989. Mostren el mètode emprat per a la detecció.

Amb la millora de la instrumentació i el llançament de telescopis espacials com la missió *Kepler*, el ritme de descobriments d'exoplanetes creix de manera exponencial. A data d'avui (12 de setembre del 2014), s'han confirmat 1.822 exoplanetes (que formen part de 1137 sistemes planetaris diferents)<sup>[1]</sup>. La missió Kepler té 4.229 candidats pendents de confirmació<sup>[7]</sup>.

## 3.2 Mètodes de detecció

En aquest apartat es recullen quatre mètodes de detecció d'exoplanetes, no són els únics existents si no els més utilitzats i amb més èxit. El primer és un mètode de detecció directa, és a dir, es mesura directament l'exoplaneta, els altres són mètodes indirectes ja que es mesura l'efecte que l'exoplaneta produeix a la seva estrella.

### 3.2.1 Imatge directe

Es tracta de captar directament la llum que emet l'exoplaneta mitjançant un telescopi. La llum emesa en l'espectre visible per l'exoplaneta és negligible comparada amb la llum emesa per l'estrella, per tant és impossible detectar un exoplaneta amb un telescopi normal. S'han descobert 51 exoplanetes utilitzant aquest mètode<sup>[1]</sup>, en la majoria dels casos s'han obtingut observant imatges en l'espectre de l'infraroig.

### 3.2.2 Velocitat radial

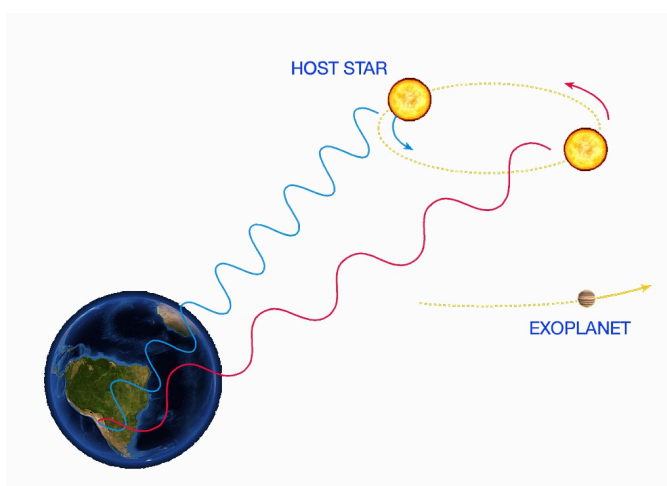


Figura 2: efectes d'un exoplaneta a la llum d'una estrella

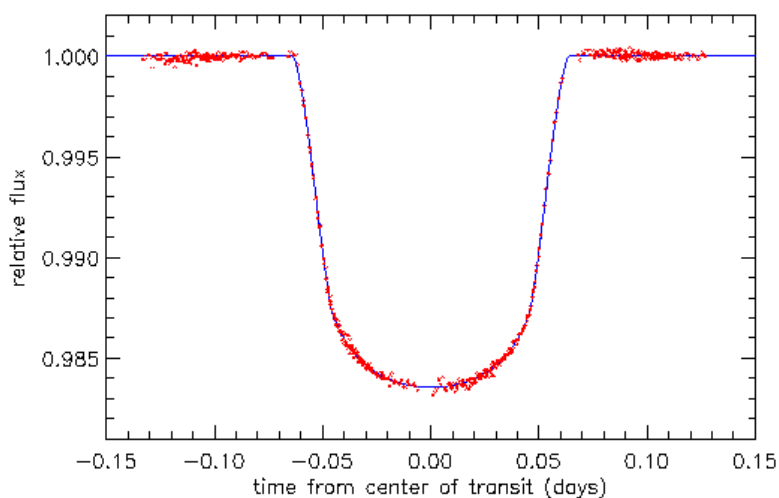
Una estrella amb planeta es mourà seguint una petita òrbita al voltant del centre de masses del sistema. La seva velocitat respecte la Terra canviarà constantment (s'apropa i s'allunya). La llum, per tant el seu espectre, que ens arriba de l'estrella es veurà afectada per aquesta velocitat, per l'anomenat efecte Doppler. Quan l'estrella s'apropi a nosaltres el seu espectre quedarà desplaçat cap al blau (freqüència observada > freqüència real) i quan l'estrella s'allunyi l'espectre es desplaçarà al vermell (freqüència observada < freqüència real).

Sabent la velocitat amb que es mou l'estrella es pot calcular la massa mínima de l'exoplaneta, el període orbital, el semieix major i l'excentricitat de la seva òrbita.

Només amb aquest mètode de detecció no podem aproximar la massa real de l'exoplaneta ja que no coneixem l'angle format entre la nostra línia de visió i el pla de l'òrbita.

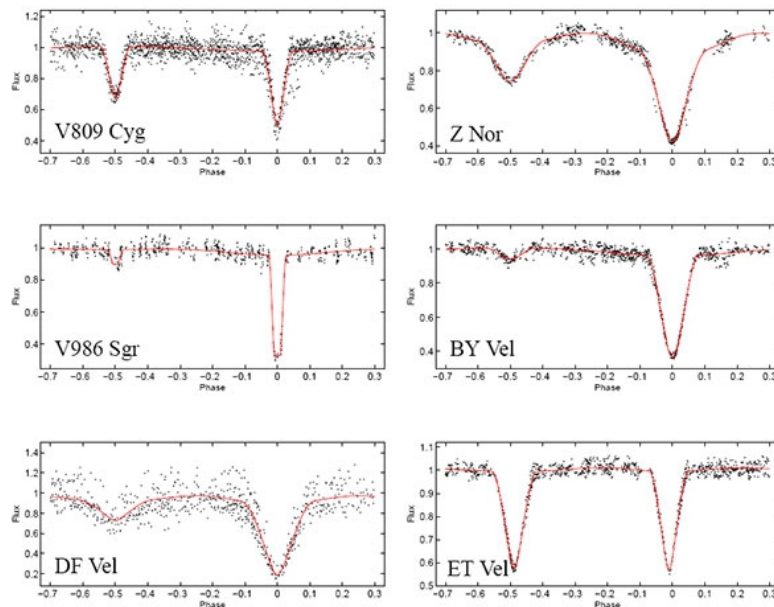
Aquest mètode l'utilitzen espectroscopis d'alta precisió en grans telescopis situats a la Terra, com el HARPS (Observatori de La Silla, Xile) o en un futur el CARMENES (Observatori de Calar Alto, Espanya).

### 3.2.3 Mètode de trànsit



*Figura 3: Corba de llum d'un trànsit a l'estrella HD 209458. En l'eix horitzontal trobem el temps i en el vertical el flux relatiu.*

El mètode del trànsit es basa en un concepte més simple: quan, des de la nostra línia de visió, un planeta passa per davant de l'estrella que orbita la quantitat de llum que ens arriba de l'estrella es redueix. Els telescopis mesuren la magnitud de l'estrella (brillantor aparent) durant cert període de temps i construeixen una corba de llum. El terme corba de llum es refereix a gràfiques on la variable independent és el temps i la variable dependent la brillantor (o el flux de llum).



*Figura 4: Corbes de llum de varies estrelles binàries eclipsants. S'aprecia a simple vista la similitud amb la corba de llum d'un exoplaneta (Figura 3).*

Aquest mètode de detecció presenta varis problemes, entre ells dos importants. El primer es que només es poden detectar exoplanetes que orbiten en el pla de la nostra línia de visió. El segon és una gran quantitat de falsos positius, que poden ser originats per una estrella binària eclipsant. Una binària eclipsant és un sistema de dues estrelles que orbiten entre sí i, quan s'alineen, ens arriba menys llum ja que una estrella bloqueja la llum de l'altra. Tot i aquest problemes, aproximadament el 60% dels exoplanetes s'han detectat amb aquest mètode. Això es degut a que és un mètode ràpid i requereix instrumentació més simple que la majoria de mètodes.

### 3.2.4 Variacions en la radiació d'un púlsar

Els púlsars són estrelles de neutrons que roten sobre sí mateixes a velocitats altíssimes. Els púlsars emeten grans quantitats d'ones de radio molt regularment (degut a que el període de rotació és molt regular). Es pot utilitzar aquesta radiació electromagnètica per mesurar el moviment del púlsar. Tal i com fan les estrelles normals, els púlsars també es mouen en una petita òrbita si hi ha presència d'exoplanetes. L'efecte Doppler es mesura directament de les ones de ràdiosense utilitzar espectròmetres i s'obtenen mesures molt precises. Aquest mètode és el més precís de tots i es pot arribar a detectar planetes 10 cops menys massius que la Terra.

Des del punt de vista de l'astrobiologia els exoplanetes que orbiten púlsars no són molt interessants, ja que la vida tal i com la coneixem no es podria desenvolupar amb la radiació provinent d'un púlsar.

### 3.3 Nomenclatura

Tots els exoplanetes segueixen una normativa a l'hora de ser anomenats. El nom d'un exoplaneta conté dues parts, la primera és el nom de l'estrella i la segona una lletra en minúscula. Aquesta lletra pot ser qualsevol de l'abecedari menys la *a*. El planeta més proper a l'estrella acostuma a ser *b* i es va avançant en l'abecedari segons els planetes estan més lluny. No sempre es compleix aquest fet, en els casos en que no tots els exoplanetes d'un mateix sistema s'han descobert alhora les lletres s'adjudiquen per ordre de descobriment. Hi ha sistemes planetaris que compten amb més d'una estrella, per diferenciar-les, se'ls adjudica una lletra majúscula.

Exemples:

- Només hi ha un planeta orbitant Kepler-93, aquest exoplaneta rep el nom de Kepler-93 b
- Al voltant de l'estrella Kepler-9 orbiten tres planetes, el més proper a l'estrella és Kepler-9 b, el segon Kepler-9 c i el més allunyat Kepler-9 d.
- Gliese 676 és un sistema binari, és a dir, es tracta de dues estrelles que orbiten entre elles. Aquestes dues estrelles reben el nom de Gliese 676A i Gliese 676B. Al voltant de l'estrella A orbiten quatre planetes, anomenats: Gliese 676A b, Gliese 676A c, Gliese 676A d i Gliese 676A e.

## 4. Buscant vida

L'estudi dels exoplanetes ens pot portar a contestar una de les grans preguntes que la humanitat sempre s'ha fet: estem sols a l'univers? Amb aproximadament cent mil milions d'exoplanetes en la nostra galàxia el més probable és que no estiguem sols.

La recerca de vida fora del sistema solar comença abans del primer descobriment d'un exoplaneta. Com explico a la introducció, el pioner de la recerca científica de vida extraterrestre és l'astrònom Frank Drake, cofundador (a la dècada dels seixanta) del programa SETI (*Search for ExtraTerrestrial Intelligence*). El programa SETI consisteix en escanejar ones electromagnètiques provinents de l'espai amb l'ús de grans radiotelescopis. El SETI espera trobar ones de ràdio que transportin informació i que demostrin l'existència de éssers intel·ligents. El SETI té un inconvenient, que es centra en les ones de ràdio. Això vol dir que només podem detectar formes de vida intel·ligents suficientment avançades tecnològicament i que hagin triat l'espectre de les ones de ràdio per a les seves telecomunicacions.

Els avenços en l'estudi dels exoplanetes ens permeten conèixer bastants detalls sobre la seva composició, però seguim sense poder assegurar l'existència de vida en un planeta concret. El que sí que podem fer és comprovar si un planeta té les característiques necessàries per contenir vida. Però, quines són aquestes característiques? Actualment només coneixem unes condicions que permetin la vida: les de la Terra. El més probable és que hi hagi moltes condicions diferents que permetin formes de vida, però no tenim cap idea de com podrien ser.

A un exoplaneta que compleix aquestes condicions l'anomenarem *habitable*. Un planeta habitable no necessàriament té vida. Un planeta habitable és aquell on una forma de vida terrestre (com nosaltres) podria sobreviure. En els següents apartats es recullen les condicions fisicoquímiques que ha de tenir un planeta habitable.

### 4.1 La zona habitable

La zona habitable (d'ara en endavant HZ) és la regió al voltant d'una estrella on un planeta amb la suficient pressió atmosfèrica pot contenir aigua líquida a la superfície. La zona habitable està definida per dues distàncies: l'interior i l'exterior. Aquestes distàncies estan en funció de les característiques de l'estrella. Hi ha varis mètodes per calcular la zona habitable, un dels moderns i el que farà servir en aquest treball és el

descriu per Kopparapu et al. L'any 2014<sup>[8]</sup>. Per calcular el radi interior i exterior es fan servir les dues expressions següents:

$$HZ_{in} = (HZ_{in\odot} + a_{in} T_{\star} + b_{in} T_{\star}^2) \left( \frac{L_{\star}}{L_{\odot}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$HZ_{out} = (HZ_{out\odot} + a_{out} T_{\star} + b_{out} T_{\star}^2) \left( \frac{L_{\star}}{L_{\odot}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$HZ_{in\odot}$  i  $HZ_{out\odot}$  són els límits interior i exterior de la zona habitable en el sistema solar ( $HZ_{in\odot} = 0,95 \text{ AU}$ ;  $HZ_{out\odot} = 1,67 \text{ AU}$ ). A  $HZ_{in\odot}$  i  $HZ_{out\odot}$  se'ls sumen unes constants per a corregir els efectes de diferents masses planetàries, aquestes constants valen:

$$a_{in} = 2,7619 \times 10^{-5} \text{ AU}; b_{in} = 3,8095 \times 10^{-9} \text{ AU}; a_{out} = 1,3786 \times 10^{-4} \text{ AU}; b_{out} = 1,4286 \times 10^{-9} \text{ AU}$$

. Aquí  $HZ_{in}$  i  $HZ_{out}$  estan en Unitats Astronòmiques i  $T_{\star}$  està en graus Kelvin.  $T_{\star} = T_{eff} - 5777 \text{ K}$  on  $T_{eff}$  és la temperatura efectiva de l'estrella. Aquesta expressió surt dels models climàtics que es van utilitzar, les constants són petites correccions per a extrapolar els límits de la zona habitable del sistema solar.

Que un planeta estigui dins els límits de la zona habitable no implica que sigui habitable ni que sigui un bon candidat a ser habitable. Podria ser un gegant gasós (com Júpiter) que és clarament inhabitable. Però si un planeta de massa semblant a la Terra està a la zona habitable és bon candidat a ser habitable.

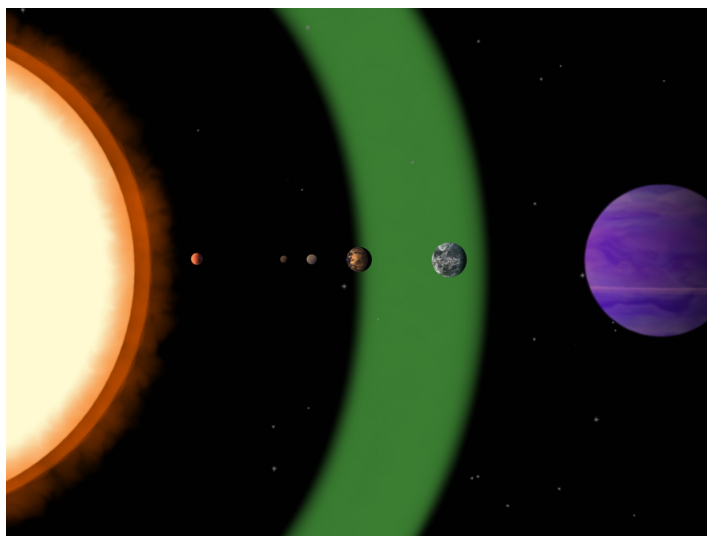


Figura 5: Representació artística d'un hipotètic sistema planetari. L'anell verd és la zona habitable.

## 4.2 Excentricitat de l'òrbita

L'excentricitat és una propietat de les el·lipses, per tant de les òrbites. L'excentricitat ve donada per la següent expressió:

$$e = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2}}$$

(3)

On  $a$  és el semieix major i  $b$  el semieix menor. Es podria dir que l'excentricitat és el factor que ens indica quan de diferent és una el·lipse respecte una circumferència. Per exemple, una excentricitat igual a 0 vol dir que el semieix major i el semieix menor són iguals, per tant és una circumferència. Si fixem  $a$  a un valor constant i anem augmentant l'excentricitat,  $b$  anirà disminuint i l'el·lipse anirà aplanant-se.

Quines conseqüències té una òrbita excèntrica sobre un exoplaneta? Un planeta que aparentment es troba en la zona habitable podria abandonar-la durant certs períodes de temps degut a la seva excentricitat. Si aquestes sortides de la HZ duren el suficient temps, podrien causar canvis climàtics cíclics molt forts. Aquestes diferències de temperatures podrien no permetre la supervivència d'una forma de vida.

El planeta habitable ideal té una excentricitat que el permet romandre a la HZ durant tot el període orbital.

## 4.3 Massa

La massa que ha de tenir un exoplaneta per ser habitable ha de ser una que permeti una atmosfera semblant a la de la Terra. La massa d'un planeta té tres efectes que ens interessin per determinar si un exoplaneta és habitable o no: la presència d'atmosfera, l'activitat geològica i el camp magnètic. La massa ha de ser la suficient per mantenir una atmosfera com la de la Terra (en masses baixes les molècules dels gasos assoleixen la velocitat d'escapament). El planetes amb masses semblants a Mercuri acostumen a estar inactius geològicament. La tectònica de plaques i la presència de volcans afavoreixen la formació de compostos orgànics complexos a la superfície, per tant, interessa el rang de masses on és possible l'activitat geològica. El camp magnètic de la Terra ens protegeix de radiacions nocives provinents del Sol (tot i que aquestes radiacions també afavoreixen l'evolució), per tant, ens interessin exoplanetes prou massius per generar un camp magnètic.



Això ens deixa amb un rang de masses de 1 vegada la Terra fins a 10 vegades la Terra. Els científics anomenen aquest grup de planetes rocosos *super-terres*. Per sobre del límit, al voltant de 15 masses terrestres, acostumen a ser *mini-neptuns*. Més enllà de 15 masses terrestres ja són planetes gasosos.

#### **4.4 Període de rotació**

El període de rotació d'un exoplaneta també afecta a la seva possible habitabilitat. Si un planeta rota lentament sobre ell mateix, afavoreix temperatures extremes. Un planeta en rotació síncrona té una cara sempre mirant a l'estrella i una altre on sempre es de nit. A la cara dirigida a l'estrella les temperatures són molt altes, ja que sempre hi incideix la radiació estel·lar. A la cara fosca les temperatures són molt baixes ja que no hi arriba llum. Entre aquestes dues cares hi ha una franja on la temperatura podria ser temperada

#### **4.5 Composició**

Un exoplaneta pot estar a HZ i tenir una massa semblant a la de la Terra, però això no vol dir que sigui habitable. Per ser habitable necessita que certes substàncies siguin presents a l'atmosfera i a la superfície del planeta. La primera de totes és l'aigua. La presència d'aigua és essencial. Costa molt detectar la presència d'aigua en un exoplaneta de la mida de la Terra, només s'ha pogut determinar la presència de la molècula d'aigua en 9 exoplanetes. D'aquests 9 exoplanetes el més petit té un radi 4 vegades més gran que la Terra i és 23 cops més pesant.

A part d'aigua, també és necessària la presència de certs elements, com l'oxigen, el nitrogen i el carboni. Aquests elements són els que formen els compostos orgànics necessaris per a la vida (sobretot el aminoàcids).

## 5. Desenvolupament de l'algoritme

### 5.1 Introducció

Per tal de poder estudiar objectivament l'habitabilitat dels exoplanetes descoberts he desenvolupat un nou algoritme per calcular l'índex de potencial d'habitabilitat. Abans de tot, s'ha de conèixer que és un exoplaneta potencialment habitable:

«Un exoplaneta potencialment habitable és aquell que es troba a la HZ i té una superfície sòlida o líquida. No tots els exoplanetes amb un semieix major dins la HZ són potencialment habitables, ja que poden tenir excentricitats altes o tenir una superfície gasosa.»<sup>[3]</sup>

L'índex de potencial d'habitabilitat és una puntuació en una escala del 0 al 1, on 1 és un planeta potencialment habitable. Aquesta puntuació s'obté multiplicant  $n$  factors:

$$HPI = \prod_{i=1}^n F_i = F_1 \cdot F_2 \cdot F_3 \cdot \dots \cdot F_n \quad (4)$$

El valor de  $F_i$  està comprès entre 0 i 1.

En aquest treball es descriuen tres factors que avaluen tres requeriments per ser potencialment habitable:

- $F_1$  : El temps que l'exoplaneta està a la zona habitable.
- $F_2$  : La variació de la temperatura superficial de l'exoplaneta durant el període orbital.
- $F_3$  : La massa/radi de l'exoplaneta.

He triat aquest factors ja que són característiques quantitatives d'un exoplaneta. La composició geoquímica és molt important, però és una característica qualitativa. A l'hora de triar els factors també he tingut en compte la disponibilitat de les mesures. En els següents apartats descriuré el procediment per calcular cada un d'aquests tres valors.

## 5.2 Factor 1: temps a la HZ

El factor 1 o  $F_1$  és la proporció de temps que el planeta està a la HZ:

$$F_1 = \frac{T_{HZ}}{T} \quad (5)$$

Aquí,  $T_{HZ}$  és el temps que l'exoplaneta es troba dins els límits de la HZ.  $T$  és el període orbital. Per trobar  $T_{HZ}$  he desenvolupat un mètode basat en la geometria de l'el·lipse i les lleis de Kepler. El primer pas és trobar els límits de la HZ, després trobar el segment de l'el·lipse que forma l'òrbita que es troba dins la HZ (definit per dos angles  $\varphi_{in}$  i  $\varphi_{out}$ ). Un cop coneguts aquests angles, el segon pas és calcular la longitud de l'arc comprès entre els dos angles i fer una aproximació del temps que trigaria a completar-lo un exoplaneta.

### 5.2.1 Calculant la HZ

El factor 1 ( $F_1$ ) avalua el temps que el planeta es troba dins dels límits de la HZ. Com he dit a l'apartat 4.1, la zona habitable està definida per dos radis interior ( $HZ_{in}$ ) i un exterior ( $HZ_{out}$ ). Les fórmules per calcular-los són:

$$HZ_{in} = \left( 0,95 + 2,7619 \times 10^{-5} \cdot (T_{eff} - 5777) + 3,8095 \times 10^{-9} \cdot (T_{eff} - 5777)^2 \right) (L_{\star})^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$HZ_{out} = \left( 1,67 + 1,3786 \times 10^{-4} \cdot (T_{eff} - 5777) + 1,4286 \times 10^{-9} \cdot (T_{eff} - 5777)^2 \right) (L_{\star})^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

Les equacions (6) i (7) són les equacions (1) i (2) amb les constants substituïdes. Per a determinar la HZ hem de conèixer la temperatura efectiva de l'estrella ( $T_{eff}[K]$ ) i la seva lluminositat en unitats de lluminositats solars ( $L_{\star}[L_{\odot}]$ ). La lluminositat no es pot mesurar de forma directa, s'ha de calcular a partir d'altres valors. La lluminositat és proporcional al radi i a la temperatura efectiva:

$$\frac{L_{\star}}{L_{\odot}} = \left( \frac{R_{\star}}{R_{\odot}} \right)^2 \left( \frac{T_{eff}}{T_{\odot}} \right)^4 \quad (8)$$

On  $T_{\odot} = 5777 K$ .

En el cas de no conèixer el radi de l'estrella (  $R_{\star}$  ), però sabent la massa de l'estrella, es pot fer servir aquest seguit d'equacions<sup>[9][10]</sup>:

$$\frac{L_{\star}}{L_{\odot}} \approx 2,3 \left( \frac{M_{\star}}{M_{\odot}} \right)^{2,3} \quad (M_{\star} < 0,43 M_{\odot}) \quad (9)$$

$$\frac{L_{\star}}{L_{\odot}} = \left( \frac{M_{\star}}{M_{\odot}} \right)^4 \quad (0,43 M_{\odot} < M_{\star} < 2 M_{\odot}) \quad (10)$$

$$\frac{L_{\star}}{L_{\odot}} \approx 1,5 \left( \frac{M_{\star}}{M_{\odot}} \right)^{3,5} \quad (2 M_{\odot} < M_{\star} < 20 M_{\odot}) \quad (11)$$

$$\frac{L_{\star}}{L_{\odot}} \approx 3200 \left( \frac{M_{\star}}{M_{\odot}} \right) \quad (M_{\star} > 20 M_{\odot}) \quad (12)$$

En cas de no conèixer cap d'aquestes mesures, es pot calcular la lluminositat a partir de la brillantor (magnitud) aparent (  $m_v$  ) de la estrella i de la distància entre l'estrella i nosaltres (  $d_{\star}$  ):

$$\frac{L_{\star}}{L_{\odot}} = \frac{10^{(m_v + 26,74)/(-2,5)}}{(d_{\odot}/d_{\star})^2} \quad (13)$$

Si no existeix una mesura directe de la temperatura efectiva de l'estrella es pot utilitzar la relació que existeix entre el tipus espectral i la temperatura efectiva.

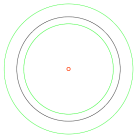
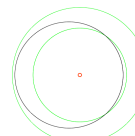
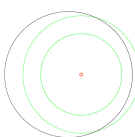
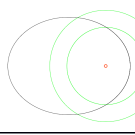
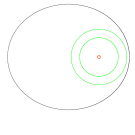
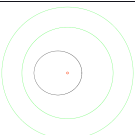
### 5.2.2 Determinant el segment de l'òrbita que es troba a la HZ

Per calcular el temps que passa un exoplaneta a la HZ és necessari saber quin segment de l'òrbita es troba a la HZ. Per fer-ho he dividit les òrbites en 4 espècies diferents. Les òrbites de primera espècie es troben totalment dins de la HZ, acostumen a tenir excentricitats baixes. Les òrbites de segona espècie tenen un segment de l'òrbita fora de la HZ, ja sigui perquè s'apropen massa a l'estrella o perquè s'allunyen massa. Les de tercera espècie són les més excèntriques i estan majoritàriament fora de la HZ. Les de quarta espècie estan totalment fora de la HZ. A la taula 1 hi ha una representació de cada una de les espècies. La espècie (  $K$  ) està en funció del periàpside (  $Per$  ) i l'apoàpside (  $Ap$  ). El periàpside és el punt on el planeta es troba més a prop de l'estrella i l'apoàpside el punt on es troba més lluny.

$$Per = (1-e)a \quad (14)$$

$$Ap = (1+e)a \quad (15)$$

$$K = \begin{cases} 1 & si (Per \geq HZ_{in}) \wedge (Ap \leq HZ_{out}) \\ 2 & si (Per < HZ_{in}) \wedge (HZ_{in} \leq Ap \leq HZ_{out}) \\ 2 & si (HZ_{out} \geq Per \geq HZ_{in}) \wedge (Ap > HZ_{out}) \\ 3 & si (Per < HZ_{in}) \wedge (Ap > HZ_{out}) \\ 4 & si (Per > HZ_{out}) \wedge (Ap > HZ_{out}) \\ 4 & si (Per < HZ_{in}) \wedge (Ap < HZ_{in}) \end{cases} \quad (16)$$

|       |   |   |
|-------|---|---|
| $K=1$ | $(Per < HZ_{in}) \wedge (HZ_{in} \leq Ap \leq HZ_{out})$  |    |
| $K=2$ | $(Per < HZ_{in}) \wedge (HZ_{in} \leq Ap \leq HZ_{out})$  |    |
|       | $(HZ_{out} \geq Per \geq HZ_{in}) \wedge (Ap > HZ_{out})$ |    |
| $K=3$ | $(Per < HZ_{in}) \wedge (Ap > HZ_{out})$                  |    |
| $K=4$ | $(Per > HZ_{out}) \wedge (Ap > HZ_{out})$                 |  |
|       | $(Per < HZ_{in}) \wedge (Ap < HZ_{in})$                   |  |

*Taula 1: Exemples d'òrbites de les diferents espècies. En les il·lustracions de l'última columna: l'el·lipse negra és l'òrbita, les dues circumferències verdes delimiten la zona habitable i el cercle vermell és l'estrella*

Els exoplanetes de la primera espècie es passen tot el període orbital a la HZ i els de quarta no hi entren mai, per aquestes dues espècies no fa falta fer més càlculs. Per a la segona i la tercera sí.

El mètode que he dissenyat per trobar el segment d'òrbita a la HZ és utilitzar l'equació polar de l'el·lipse (equació 17) respecte el focus (és a dir que el focus està situat al punt  $(0,0)$ ) per trobar els punts on l'exoplaneta entra i surt de la HZ.

$$r(\theta) = \frac{a \cdot (1 - e^2)}{1 + e \cdot \cos(\theta)} \quad (17)$$

On

$r$  és la la distància respecte el focus (en aquest cas l'estrella).

$a$  és el semieix major.

$e$  és l'excentricitat

$\theta$  és l'argument

La mateixa equació reorganitzada per trobar l'argument en funció de la distància:

$$P_{\theta}(r) = \theta(r) = \cos^{-1} \left[ \left( \frac{a \cdot (1 - e^2)}{r} - 1 \right) \cdot \frac{1}{e} \right] \quad (18)$$

L'expressió del punt on el planeta entra a la HZ ( $P_{in}$ ), expressat en coordenades cartesianes, canvia segons l'espècie d'òrbita:

$$P_{in} = \begin{cases} (HZ_{in} \cdot \cos(P_{\theta}(HZ_{in})), HZ_{in} \cdot \sin(P_{\theta}(HZ_{in}))) & \text{si } K=2 \wedge Ap < HZ_{out} \\ (HZ_{out} \cdot \cos(P_{\theta}(HZ_{out})), HZ_{out} \cdot \sin(P_{\theta}(HZ_{out}))) & \text{si } K=2 \wedge Ap > HZ_{out} \\ (HZ_{in} \cdot \cos(P_{\theta}(HZ_{in})), HZ_{in} \cdot \sin(P_{\theta}(HZ_{in}))) & \text{si } K=3 \end{cases}$$

(19)

L'expressió del punt on el planeta surt de la HZ ( $P_{out}$ ) també depèn de l'espècie d'òrbita:

$$P_{out} = \begin{cases} (HZ_{in} \cdot \cos(2\pi - P_{\theta}(HZ_{in})), HZ_{in} \cdot \sin(2\pi - P_{\theta}(HZ_{in}))) & \text{si } K=2 \wedge Ap < HZ_{out} \\ (HZ_{out} \cdot \cos(2\pi - P_{\theta}(HZ_{out})), HZ_{out} \cdot \sin(2\pi - P_{\theta}(HZ_{out}))) & \text{si } K=2 \wedge Ap > HZ_{out} \\ (HZ_{out} \cdot \cos(P_{\theta}(HZ_{out})), HZ_{out} \cdot \sin(P_{\theta}(HZ_{out}))) & \text{si } K=3 \end{cases}$$

(20)

Per poder continuar amb els càlculs s'ha de fer un canvi d'origen. Fins ara l'origen estava en el focus de l'el·lipse (posició de l'estrella). A partir d'ara l'origen serà el centre de l'el·lipse. Per convertir els punts al nou sistema s'han de desplaçar la distància entre el centre de l'el·lipse i el focus de l'el·lipse, que és el producte del semieix major i l'excentricitat. Els nous punts s'anomenaran  $P'_{in}$  i  $P'_{out}$ :

$$P'_{in} = P_{in} + (a \cdot e, 0) \quad (21)$$

$$P'_{out} = P_{out} + (a \cdot e, 0) \quad (22)$$

Els arguments dels vectors que van del centre de l'el·lipse als punts  $P'_{in}$  i  $P'_{out}$  són els angles  $\varphi_{in}$  i  $\varphi_{out}$ .

### 5.2.3 Determinant el temps que l'exoplaneta és dins els límits de la HZ

Per fer més clar el procés de determinar  $T_{HZ}$  he separat els càlculs en tres funcions diferents:

$s(\varphi_0, \varphi_1, a, e)$ : longitud de l'arc entre  $\varphi_0$  i  $\varphi_1$  d'una el·lipse amb semieix major  $a$  i excentricitat  $e$ .

$v(\varphi, a, e, T)$ : velocitat orbital de l'exoplaneta en un punt donat per l'angle  $\varphi$

$t(\varphi_0, \varphi_1, a, e, T)$ : temps que un exoplaneta triga a anar de  $\varphi_0$  a  $\varphi_1$ .

**Definició de  $s(\varphi_0, \varphi_1, a, e)$ :**

Per trobar la longitud de l'arc d'una el·lipse s'ha de fer servir la integral el·líptica incompleta de segona espècie:

$$E(\varphi, k) = \int_0^{\varphi} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi} \cdot d\varphi \quad (23)$$

On:

$$k^2 = e^2 \quad (24)$$

Si anomenem  $l$  la longitud de l'arc format entre 0 i  $\varphi$ :

$$l = a \cdot E(\varphi, k) \quad (25)$$

Ara ja es pot definir la funció  $s(\varphi_0, \varphi_1, a, e)$  com:

$$s(\varphi_0, \varphi_1, a, e) = a \cdot E(\varphi_1, k) - a \cdot E(\varphi_0, k) \quad (26)$$

**Definició de  $v(\varphi, a, e, T)$ :**

El proper pas és definir  $v(\varphi, a, e, T)$ , on  $T$  és el període orbital. La velocitat orbital d'un cos orbitant un altre es pot calcular utilitzant l'equació Vis-Viva:



$$v = \sqrt{\mu \cdot \left( \frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)} \quad (27)$$

On:

$v$  és la velocitat orbital,  $\mu$  és el paràmetre gravitacional estàndard i  $r$  és la distància entre els dos cossos (en aquest cas la distància exoplaneta-estrella).

El paràmetre gravitacional estàndard es pot trobar amb la següent expressió (només quan la massa del cos orbitant és negligible respecte la massa del cos central):

$$\mu = \frac{4\pi^2 a^3}{T^2} \quad (28)$$

Per trobar  $r$  calculo el mòdul del vector entre el focus i el punt corresponent a l'angle  $\varphi$ . Aquest punt el trobo utilitzant l'equació paramètrica de l'el·lipse:

$$\begin{cases} x = a \cdot \cos \varphi \\ y = a \cdot \sqrt{1 - e^2} \cdot \sin \varphi \end{cases} \quad (29)$$

El mòdul de vector entre el focus i aquest punt és  $r$ :

$$r = \sqrt{(a \cdot (\cos \varphi - e))^2 + (a \cdot \sqrt{1 - e^2} \cdot \sin \varphi)^2} = a \sqrt{(\cos \varphi - e)^2 + (1 - e^2) \cdot \sin^2 \varphi} \quad (30)$$

Substituint les equacions 28 i 30 a l'equació 27 definim  $v(\varphi, a, e, T)$ :

$$v(\varphi, a, e, T) = \sqrt{\frac{4 \cdot \pi^2 \cdot a^3}{T^2} \cdot \left( \frac{2}{\sqrt{(\cos \varphi - e)^2 + (1 - e^2) \cdot \sin^2 \varphi}} - 1 \right)} \quad (31)$$

**Definició de  $t(\varphi_0, \varphi_1, a, e, T)$ :**

Per definir aquesta última funció assumeixo que l'acceleració de l'exoplaneta entre  $\varphi_0$  i  $\varphi_1$  és constant. Per això utilitzo l'equació del moviment uniformement accelerat (reorganitzada per trobar el temps ( $t$ ) en funció de l'espai ( $s$ ) i la velocitat ( $v$ )):

$$t = \frac{2 \cdot s}{v_0 + v_1} \quad (32)$$

Per definir la funció  $t(\varphi_0, \varphi_1, a, e, T)$  substitueixo la funció  $v(\varphi, a, e, T)$  i la funció  $s(\varphi_0, \varphi_1, a, e)$  a l'equació 32:

$$t(\varphi_0, \varphi_1, a, e, T) = \frac{2 \cdot s(\varphi_0, \varphi_1, a, e)}{v(\varphi_0, a, e, T) + v(\varphi_1, a, e, T)} \quad (33)$$

Amb aquesta funció ja podria calcular  $T_{HZ}$ , introduint els angles  $\varphi_{in}$  i  $\varphi_{out}$ , però el resultat seria molt imprecís, ja que assumeixo una acceleració constant. Per solucionar aquest problema divideixo l'interval que va de  $\varphi_{in}$  a  $\varphi_{out}$  en  $m$  intervals més petits.  $T_{HZ}$  Serà el sumatori del temps que triga a recórrer cada un dels  $m$  intervals.

$$T_{HZ} = \sum_{i=1}^m t\left(\varphi_{in} + \frac{i-1}{m} \cdot (\varphi_{out} - \varphi_{in}), \varphi_{in} + \frac{i}{m} \cdot (\varphi_{out} - \varphi_{in}), a, e, T\right) \quad (34)$$

## 5.2.4 Resultat

El resultat numèric d'avaluar el temps depèn de l'espècie d'òrbita ( $K$ ):

$$F_1 = \begin{cases} 1 & \text{si } K=1 \\ \frac{T_{HZ}}{T} & \text{si } K=2 \wedge Ap < HZ_{out} \\ \frac{T - T_{HZ}}{T} & \text{si } K=2 \wedge Ap > HZ_{out} \\ \frac{2 \cdot T_{HZ}}{T} & \text{si } K=3 \\ 0 & \text{si } K=4 \end{cases} \quad (35)$$

En el cas  $k=2 \wedge Ap > HZ_{out}$  el temps a la HZ que es troba utilitzant aquest mètode és en realitat el temps que s'està fora de la HZ, per tant el restem al període orbital. En el cas  $k=3$  es troba el temps d'una de les dues incursions que l'exoplaneta fa a la zona habitable, per tant s'ha de multiplicar per dos.

## 5.3 Factor 2: temperatura a la superfície del planeta

El factor 2 ( $F_2$ ) avalua la variació de la temperatura a la superfície de l'exoplaneta durant el període orbital. La diferència entre la temperatura superficial mínima i màxima de l'exoplaneta és proporcional a l'excentricitat de l'exoplaneta. Per trobar com estan relacionades haurem de fer servir la llei d'Stefan-Boltzmann<sup>[11][12]</sup>. La potència d'una estrella és la següent:

$$E_{\star} = 4\pi R_{\star}^2 \sigma T_{\star}^4 \quad (36)$$

A un exoplaneta, l'energia està passant per una esfera de radi  $r$  (la distància entre l'exoplaneta i l'estrella). La potència que passa per metre quadrat a aquesta distància és:

$$E_r = \frac{E_{\star}}{4\pi r^2} \quad (37)$$

Si l'exoplaneta té un radi  $R_E$  té una secció transversal de  $\pi R_E^2$ . La potència absorbida per l'exoplaneta ve donada per:

$$E_{\text{abs}} = E_r \cdot \pi R_E^2 \quad (38)$$

L'energia emesa ha de ser igual a la energia absorbida, per tant:

$$\begin{aligned} E_E &= E_{\text{abs}} \\ 4\pi R_E^2 \sigma T_E^4 &= E_r \cdot \pi R_E^2 \\ 4\pi R_E^2 \sigma T_E^4 &= \frac{4\pi R_{\star}^2 \sigma T_{\star}^4}{4\pi r^2} \cdot \pi R_E^2 \end{aligned} \quad (39)$$

Ara es pot aïllar la temperatura de l'exoplaneta:

$$T_E = T_{\star} \cdot \sqrt{\frac{R_{\star}}{2r}} \quad (40)$$

Havent arribat a aquesta expressió podem dir que la temperatura és proporcional al radi elevat a menys un mig:

$$T_E \propto r^{-0.5} \quad (41)$$

La diferència entre la temperatura mínima i màxima és la diferència de temperatures al periàpside i l'apoàpside. El periàpside i l'apoàpside són proporcionals a  $(1-e)$  i a  $(1+e)$ , per tant:

$$\Delta T_E \propto (1-e)^{-0.5} - (1+e)^{-0.5} \quad (42)$$

A partir d'aquesta proporció defineixo  $F_2$  com :

$$F_2 = \begin{cases} 1 - [(1-e)^{-0.5} - (1+e)^{-0.5}] & \text{si } e \leq \sqrt{2\sqrt{3}-3} \\ 0 & \text{si } e > \sqrt{2\sqrt{3}-3} \end{cases} \quad (43)$$

## 5.4 Factor 3: la massa

Com s'ha discutit en l'apartat 4.3, el rang de masses habitable és de  $1M_\oplus$  a  $10M_\oplus$  ( $M_\oplus$  és la massa de la Terra). Per obtenir  $F_3$  faig servir l'expressió següent on  $M_E$  és la massa de l'exoplaneta ( $\exp(x)=e^x$ ):

$$F_3 = \begin{cases} \exp\left(\frac{-(M_E-1)^2}{2C_A^2}\right) & \text{si } M_E < 1 \\ 1 & \text{si } 1 \leq M_E \leq 10 \\ \exp\left(\frac{-(M_E-10)^2}{2C_B^2}\right) & \text{si } M_E > 10 \end{cases} \quad (44)$$

Si  $M_E$  és fora de l'interval habitable,  $F_3$  ve donat per una funció gaussiana. Les constants  $C_A$  i  $C_B$  valen 0.25 i 1 respectivament i han estat fixades per a complir els requisits.

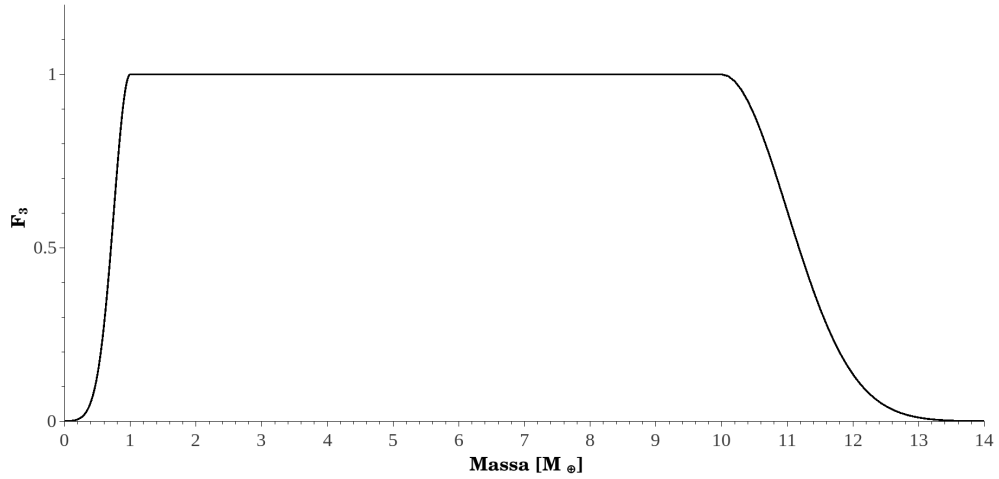


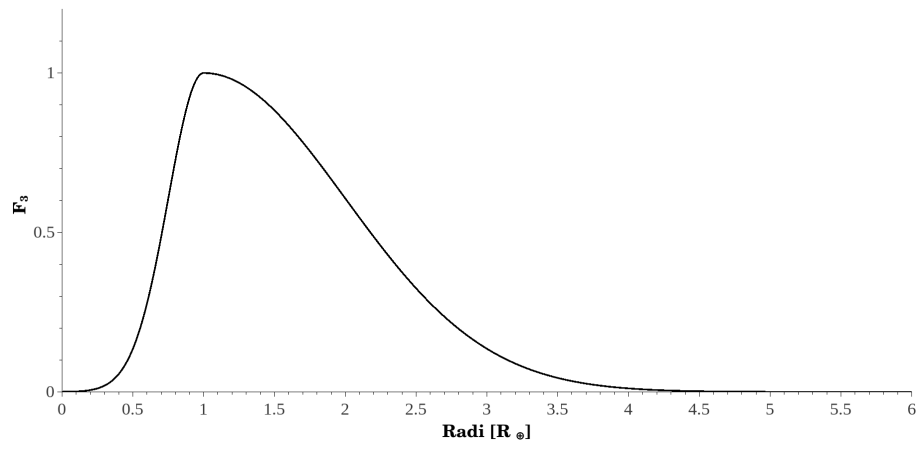
Figura 6: En aquest gràfic es mostra la variació de  $F_3$  en funció de la massa de l'exoplaneta.

Hi ha exoplanetes dels quals no en sabem la massa. Aquests acostumen a ser exoplanetes descoberts amb el mètode de trànsit que encara no s'han estudiat utilitzant altres mètodes capaços de determinar la massa. Encara no s'ha desenvolupat un model que permeti relacionar la massa i el radi i poder calcular la massa a partir del radi (sense conèixer la densitat). Per definir  $F_3$  en funció del radi del planeta  $R_E [R_\oplus]$  faig servir una funció gaussiana asimètrica:

$$F_3 = \begin{cases} \exp\left(\frac{-(R_E - 1)^2}{2C_A^2}\right) & \text{si } R_E \leq 1 \\ \exp\left(\frac{-(R_E - 1)^2}{2C_B^2}\right) & \text{si } R_E > 1 \end{cases}$$

(45)

Les constants tenen els mateixos valors que en la fórmula 44.



*Figura 7: Variació  $F_3$  en funció del radi de l'exoplaneta.*

## 6. Desenvolupament de l'aplicació

Per aplicar aquest algoritme sobre grans conjunts d'exoplanetes he hagut de desenvolupar una aplicació informàtica que fos capaç d'agafar totes les dades necessàries d'una base de dades d'exoplanetes, fer els càlculs necessaris per obtenir l'índex de potencial d'habitabilitat i guardar els resultats per poder avaluar-los manualment.

### 6.1 Característiques

L'aplicació està escrita en llenguatge C++. He escollit aquest llenguatge de programació per la seva velocitat i per la diversitat de llibreries científiques que s'han escrit en C++. Aquest llenguatge també em permet executar l'aplicació en diferents sistemes operatius tot i haver estat programada en Linux. Per calcular la integral el·líptica de segona espècie he fet servir la llibreria Boost.

Hi ha dues versions d'aquesta aplicació, una destinada a calcular l'índex de potencial d'habitabilitat a un conjunt d'exoplanetes procedents d'una base de dades (la principal i utilitzada per la recerca en aquest treball i que s'executa des de la línia de comandes) i una altra, que disposa d'interfície gràfica, per a calcular l'HPI a partir de

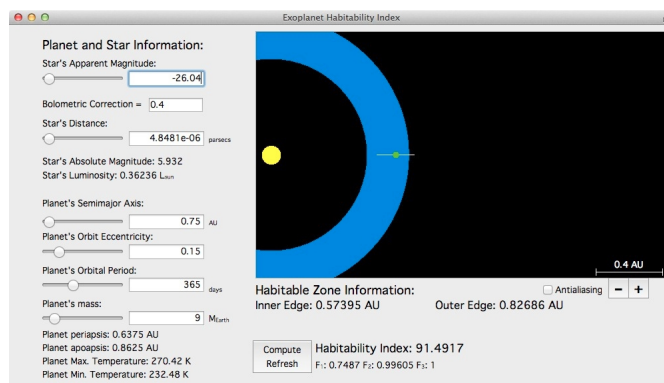


Figura 8: Versió de l'aplicació que disposa d'interfície gràfica

dades introduïdes manualment.

### 6.2 Funcionament

L'aplicació obté la informació de cada un dels exoplanetes des d'un fitxer especificat per l'usuari. Aquest fitxer és un fitxer de text format per tantes línies com exoplanetes hi hagi. L'estructura de cada línia és la següent:

«estrella,exoplaneta,semi-eix major [AU],excentricitat,període orbital [dies],massa del planeta [ $M_{\oplus}$ ], massa del planeta \* sin(i) [ $M_{\oplus}$ ], radi del planeta [ $R_{\oplus}$ ],temperatura efectiva de l'estrella [K], massa de l'estrella [ $M_{\odot}$ ], radi de l'estrella [ $R_{\odot}$ ],distància de l'estrella [parsecs], tipus espectral»

Per exemple, la línia corresponen al planeta Kapteyn b seria la següent:

«Kapteyn,b,0.168,0.21,48.616,,4.8,,3550,0.28,0.29,3.92,8.845,M0 V»

Quan es desconeix un paràmetre és deixa un espai en blanc, el decimal és marca amb un punt.

L'aplicació llegeix aquesta informació i aplica l'algoritme descrit en l'apartat 5. Un cop ho ha fet, guarda els resultats en un fitxer de text amb una estructura semblant a l'anterior fitxer:

«estrella,exoplaneta,HPI,F<sub>1</sub>,F<sub>2</sub>,F<sub>3</sub>,HZ<sub>IN</sub>,HZ<sub>OUT</sub>»

Per a Kapteyn b seria:

«Kapteyn,b,0.784003,1,0.784003,1,0.1087,0.215725»

Aquest format de fitxers pot ser importat i exportat en els programes de fulls de càlcul més comuns, com ara *Microsoft Office Excel* o *LibreOffice Calc*.

L'aplicació segueix un seguit d'estratègies per obtenir les dades necessàries per a l'algoritme a partir de les dades disponibles. Aconseguix aplicar correctament l'algoritme en el 98% dels exoplanetes descoberts.

## 6.3 Distribució

L'aplicació es pot descarregar a <http://allepuzscience.com/exoplanets.html>. El codi font de l'aplicació també està disponible en aquesta plana web. L'objectiu és distribuir lliurement l'aplicació i el codi font, perquè es pugui utilitzar en properes recerques o amb finalitats divulgatives.



## 7. Resultats

Utilitzant l'aplicació descrita a l'apartat anterior he calculat l'HPI per als exoplanetes confirmats per determinar quins d'ells són potencialment habitables. El conjunt d'exoplanetes i les seves característiques l'he extret de dues bases d'exoplanetes diferents. Una és l'arxiu d'exoplanetes de la NASA (*NASA Exoplanet Archive*) que a data dels càlculs (21/8/2014) comptava amb 1.742 exoplanetes<sup>[7]</sup>. L'altre és l'*Extrasolar Planets Encyclopaedia* que comptava amb 1.821 exoplanetes<sup>[1]</sup>. Les dues bases d'exoplanetes contenen tant informació de l'exoplaneta com informació de l'estrella, això evita haver d'accedir a bases de dades d'estrelles.

| Exoplaneta          | HPI          | $F_1$ | $F_2$ | $F_3$ | $HZ_{in}$ | $HZ_{out}$ | $a$   |
|---------------------|--------------|-------|-------|-------|-----------|------------|-------|
| <b>Kepler-186 f</b> | <b>0,994</b> | 1,000 | 1,000 | 0,994 | 0,165     | 0,421      | 0,356 |
| <b>Kepler-62 f</b>  | <b>0,919</b> | 1,000 | 1,000 | 0,919 | 0,366     | 0,886      | 0,718 |
| <b>Kepler-62 e</b>  | <b>0,830</b> | 1,000 | 1,000 | 0,830 | 0,366     | 0,886      | 0,427 |
| <b>Kapteyn b</b>    | <b>0,784</b> | 1,000 | 0,784 | 1,000 | 0,090     | 0,232      | 0,168 |
| <b>Kepler-296 f</b> | <b>0,732</b> | 1,000 | 1,000 | 0,732 | 0,244     | 0,610      | 0,263 |
| <b>Kepler-283 c</b> | <b>0,714</b> | 1,000 | 1,000 | 0,714 | 0,260     | 0,646      | 0,341 |
| <b>HD 40307 g</b>   | <b>0,694</b> | 1,000 | 0,694 | 1,000 | 0,346     | 0,839      | 0,600 |
| <b>GJ 667 C b</b>   | <b>0,646</b> | 0,744 | 0,869 | 1,000 | 0,046     | 0,120      | 0,051 |
| <b>HD 85512 b</b>   | <b>0,617</b> | 0,694 | 0,889 | 1,000 | 0,246     | 0,630      | 0,260 |
| <b>GJ 163 b</b>     | <b>0,539</b> | 1,000 | 0,889 | 0,607 | 0,049     | 0,128      | 0,061 |
| <b>GJ 832 c</b>     | <b>0,532</b> | 0,652 | 0,816 | 1,000 | 0,069     | 0,180      | 0,163 |
| <b>Kepler-174 d</b> | <b>0,493</b> | 1,000 | 1,000 | 0,493 | 0,348     | 0,846      | 0,677 |
| <b>Kepler-22 b</b>  | <b>0,386</b> | 1,000 | 1,000 | 0,386 | 0,681     | 1,617      | 0,849 |
| <b>GJ 163 c</b>     | <b>0,374</b> | 0,406 | 0,920 | 1,000 | 0,049     | 0,128      | 0,130 |
| <b>Kepler-298 d</b> | <b>0,325</b> | 1,000 | 1,000 | 0,325 | 0,277     | 0,686      | 0,305 |
| <b>Kepler-309 c</b> | <b>0,320</b> | 1,000 | 1,000 | 0,320 | 0,380     | 0,930      | 0,401 |
| <b>Kepler-69 c</b>  | <b>0,289</b> | 0,433 | 0,858 | 0,777 | 0,670     | 1,585      | 0,640 |
| <b>Kepler-61 b</b>  | <b>0,269</b> | 0,705 | 0,740 | 0,516 | 0,243     | 0,615      | 0,270 |
| <b>GJ 676 A e</b>   | <b>0,214</b> | 0,877 | 0,751 | 0,325 | 0,148     | 0,378      | 0,187 |
| <b>GJ 674 b</b>     | <b>0,082</b> | 0,187 | 0,795 | 0,552 | 0,046     | 0,118      | 0,039 |

Taula 2

En la taula 2 és recullen els 20 exoplanetes amb HPI més alt del *NASA Exoplanet Archive* i part dels paràmetres que s'han calculat durant l'algoritme. La taula inferior són els 20 exoplanetes amb HPI més alt de l'*Extrasolar Planets Encyclopaedia*.

| Exoplaneta          | $HPI$        | $F_1$ | $F_2$ | $F_3$ | $HZ_{in}$ | $HZ_{out}$ | $a$   |
|---------------------|--------------|-------|-------|-------|-----------|------------|-------|
| <b>Kepler-186 f</b> | <b>0,994</b> | 1,000 | 1,000 | 0,994 | 0,165     | 0,423      | 0,356 |
| <b>GJ 221 d</b>     | <b>0,960</b> | 1,000 | 0,960 | 1,000 | 0,684     | 1,703      | 1,060 |
| <b>Kepler-62 f</b>  | <b>0,919</b> | 1,000 | 1,000 | 0,919 | 0,353     | 0,857      | 0,718 |
| <b>Kepler-62 e</b>  | <b>0,828</b> | 1,000 | 1,000 | 0,828 | 0,353     | 0,857      | 0,427 |
| <b>GJ 163 b</b>     | <b>0,819</b> | 1,000 | 0,989 | 0,828 | 0,050     | 0,129      | 0,061 |
| <b>Kapteyn's b</b>  | <b>0,784</b> | 1,000 | 0,784 | 1,000 | 0,090     | 0,232      | 0,168 |
| <b>Kepler-296 f</b> | <b>0,730</b> | 1,000 | 1,000 | 0,730 | 0,244     | 0,610      | 0,263 |
| <b>Kepler-283 c</b> | <b>0,717</b> | 1,000 | 1,000 | 0,717 | 0,260     | 0,646      | 0,341 |
| <b>HD 85512 b</b>   | <b>0,694</b> | 0,781 | 0,889 | 1,000 | 0,239     | 0,586      | 0,260 |
| <b>HD 40307 g</b>   | <b>0,694</b> | 1,000 | 0,694 | 1,000 | 0,342     | 0,827      | 0,600 |
| <b>GJ 667C b</b>    | <b>0,633</b> | 0,729 | 0,869 | 1,000 | 0,047     | 0,121      | 0,051 |
| <b>GJ 163 c</b>     | <b>0,506</b> | 0,559 | 0,905 | 1,000 | 0,050     | 0,129      | 0,125 |
| <b>Kepler-174 d</b> | <b>0,495</b> | 1,000 | 1,000 | 0,495 | 0,348     | 0,846      | 0,677 |
| <b>Kepler-22 b</b>  | <b>0,400</b> | 1,000 | 1,000 | 0,400 | 0,681     | 1,615      | 0,849 |
| <b>Kepler-298 d</b> | <b>0,325</b> | 1,000 | 1,000 | 0,325 | 0,277     | 0,686      | 0,305 |
| <b>Kepler-309 c</b> | <b>0,319</b> | 1,000 | 1,000 | 0,319 | 0,380     | 0,930      | 0,401 |
| <b>Kepler-69 c</b>  | <b>0,288</b> | 0,433 | 0,858 | 0,774 | 0,670     | 1,585      | 0,640 |
| <b>Kepler-61 b</b>  | <b>0,268</b> | 0,705 | 0,740 | 0,515 | 0,243     | 0,615      | 0,270 |
| <b>GJ 676A e</b>    | <b>0,227</b> | 0,853 | 0,751 | 0,354 | 0,150     | 0,384      | 0,187 |
| <b>KIC5522786b</b>  | <b>0,191</b> | 0,670 | 0,293 | 0,973 | 2,067     | 4,768      | 1,980 |

*Taula 3*

## 7.1 Principals exoplanetes potencialment habitables

Utilitzant els resultats obtinguts calculant l'HPI per a tots els exoplanetes, he fet una selecció dels que, segons el meu criteri, són millors candidats a ser habitables. Estan ordenats de major HPI a menor HPI.

### Kepler-186 f

Kepler-186 f és el cinquè planeta del sistema al voltant de l'estrella Kepler-186, una nana vermella a 492 anys llum, a la constel·lació del Cigne. La seva existència es va comunicar al públic en general el 17 d'Abril de 2014.

Aquest exoplaneta és  $1,11 \pm 0,13$  vegades més gran que la Terra. Si assumíssim una composició igual a la Terra, aquest planeta tindria una massa aproximada d'entre  $0,94 M_{\oplus}$  i  $1,91 M_{\oplus}$ . Té un període orbital de 129,95 dies.

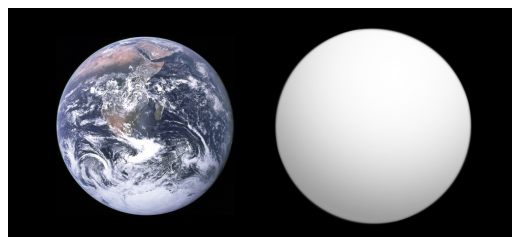


Figura 9: Comparació de la mida entre la Terra (esquerra) i Kepler-186 f (dreta)

Els altres planetes que orbiten aquesta estrella, tot i que tots tenen una mida semblant a la Terra, estan massa a prop de l'estrella com per tenir aigua líquida.

El *SETI Institute* ha estat escoltant les emissions de ràdio provinents d'aquest planeta. No s'ha trobat senyals de vida intel·ligent, en part pot ser culpa de la gran distància entre aquest planeta i la Terra.

Que aquest planeta es trobi a 492 anys llum de la Terra també va frustrar intents de determinar la seva massa o detalls sobre la seva composició mitjançant tècniques de velocitat radial.

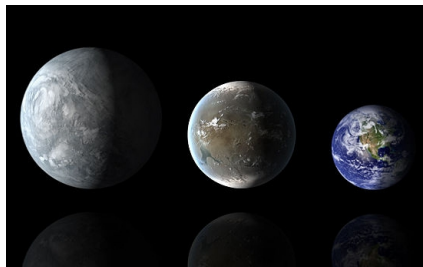
### Gliese 221 d

Gliese 221 (també GJ 221 o BD-061339) és un sistema de tres planetes, el tercer, anomenat Gliese 221 d, s'ha trobat re-analitzant les dades que es van fer servir per trobar els dos primers planetes, mitjançant observacions de la velocitat radial. GJ 221 és una nana taronja que es troba a uns 65 anys llums de la Terra.

Gliese 221 d és, segurament, una super-terra. Té una massa aproximadament 7,3 més gran que al Terra. No hi ha estudis profunds publicats sobre l'habitabilitat d'aquest planeta. Veient l'alt HPI que té aquest planeta crec que s'hauria de profunditzar en l'estudi aquest sistema planetari.

### Kepler-62 e i f

Aquests dos planetes orbiten l'estrella Kepler-62. Aquesta estrella es troba a 1,200 anys llum, a la constel·lació de la Lira i és lleugerament més freda que el Sol (4925K respecte els 5777K solars). Al voltant d'aquesta nana taronja orbiten cinc planetes, dos dels quals (e i f) és troben a la zona habitable. Els planetes es van trobar observant els trànsits, posteriorment s'ha analitzat la velocitat radial de Kepler-62 però, degut a la llunyania de l'estrella, les mesures són imprecises.



*Figura 10: Representació artística a escala dels planetes e i f de Kepler-62 al costat de la Terra.*

D'aquests dos planetes a la HZ el més gran i més proper a l'estrella és Kepler-62 e. Té un radi de  $1,66 R_{\oplus}$  i una massa de  $3,57 M_{\oplus}$ , té un període orbital de 122,39 dies. Es creu que és un planeta rocós i que potser és cobert de gel.

Kepler-62 f és el planeta més exterior del sistema. Lleugerament més petit que el seu predecessor i lleugerament més gran que la Terra, té un radi de  $1,41 R_{\oplus}$  i una massa de  $2,57 M_{\oplus}$ . Una composició geològica semblant a la Terra (que és la que s'espera per aquestes masses planetàries) i presència d'aigua convertirà aquest planeta en un planeta habitable molt semblant a la Terra.

### Gliese 163 b i c

Aquest sistema planetari situat a aproximadament 50 anys llums consta de tres planetes. Els planetes giren al voltant d'una nana roja d'una mica menys la meitat de la mida del Sol. D'aquests tres exoplanetes dos tenen un HPI alt, el dos més pròxims a l'estrella (b i c).

El més proper a l'estrella té una massa de  $10,62 M_{\oplus}$ , és un planeta molt massiu, es podria tractar d'un mini-neptú. Podria tractar-se d'un planeta cobert d'un oceà d'aigua líquida (ja que es troba a la HZ). Tot i tenir un HPI més alt que Gliese 163 c, el segon planeta és potencialment més habitable.

Gliese 163 c és una super-terra de  $7,26 M_{\oplus}$ . Segons els meus càlculs es passa el 55,9% del temps fora de la zona habitable. El planeta creua el límit exterior de la HZ, com que el màxim que s'allunya és  $0,0082 AU$  continua sent un bon candidat a ser habitable.

## **Kapteyn b**

L'estrella de Kapteyn va ser descoberta per l'astrònom holandès Jacobus Kapteyn l'any 1898. És una nana vermella a poc menys de 13 anys llum (una de les nanes vermelles més properes). L'any 2014 es va anunciar l'existència de dos exoplanetes orbitant aquesta estrella<sup>[13]</sup>.

L'exoplaneta més pròxim a Kapteyn, tot i tenir una excentricitat alta (0,21), es troba sempre a la zona habitable. Té una massa de  $4,8 M_{\oplus}$ . S'estima que aquest sistema planetari té onze mil milions d'anys, això faria de Kapteyn b el planeta més vell trobat a la HZ. Podria ser que Kapteyn b s'hagi trobat a la HZ durant milions d'anys i que s'hagi desenvolupat vida complexa.

L'altre company de l'estrella té una massa de  $7 M_{\oplus}$  i es troba fora de la HZ.

## **Kepler-296 f**

Kepler-296 és un sistema binari de dues estrelles de tipus M (nanes vermelles). Quan es van detectar els primers exoplanetes es desconeixia la multiplicitat d'aquest sistema. En un article recent es discuteix com afecta aquest fet a l'habitabilitat dels planetes al voltant d'aquest sistema<sup>[14]</sup>. Utilitzant imatges fetes amb el Telescopi Espacial Hubble, s'ha determinat que Kepler-296 f es troba en la zona habitable d'una de les dues estrelles (la B) i té un radi i una massa de  $1,79 \pm 0,11 R_{\oplus}$  i  $8,4 M_{\oplus}$  respectivament.

## **Kepler-283 c**

Aquest planeta orbita una nana taronja juntament a un altre planeta<sup>[15]</sup>.

Aquest planeta té un radi de  $1,82 \pm 0,12 R_{\oplus}$  i es troba a la zona habitable. Es desconeix

la seva excentricitat ja que només s'ha observat el seu trànsit.

### HD 40307 g

Al voltant de la nana taronja HD 40307 a uns 42 anys llum orbiten sis planetes, el més llunyà HD 40307 g és una super-terra que es troba a la zona habitable. Té una massa de  $7,1 \pm 2,6 M_{\oplus}$  i un període orbital de 197,8 dies. Aquest exoplaneta té una excentricitat alta (0,26), segons un últim estudi està causada per la influència dels altres 5 planetes del sistema<sup>[16]</sup>.

### HD 85512 b

Aquest planeta orbita sol l'estrella HD 85512 també coneguda com a Gliese 370. Aquesta estrella es troba a uns 36 anys llum i és una nana taronja lleugerament més gran que la meitat del Sol.

Segons els meus càlculs, aquest planeta es troba el 78,1% del temps a la zona habitable, el 21,9% restant es troba massa a prop de l'estrella. Tot i aquest fet considero que aquest planeta continua sent molt bon candidat a ser habitable, ja que una atmosfera prou densa pot equilibrar la temperatura superficial. A part, aquesta super-terra té una massa mínima de  $3,5 \pm 0,5 M_{\oplus}$ .

### Gliese 667



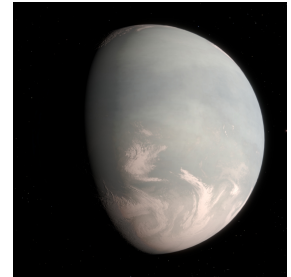
*Figura 11: Il·lustració del paisatge de Gliese 667 C c, assumint una superfície semblant a la Terra*

Aquest sistema triple, és a dir, un sistema format per tres estrelles està situat a uns 22 anys llum. La més gran (GJ 667 A) i la mitjana (GJ 667 B) s'orbiten entre elles. La més petita (GJ 667 C) orbita el conjunt de A i B. A i B són estrelles de tipus K (nanes taronges) i C és de tipus M (nana roja). Els sis exoplanetes que s'han detectat en aquest sistema orbiten l'estrella C. Els dos planetes més propers a l'estrella (b i c) són potencialment habitables. Gliese 667 C b té una massa mínima de  $5,6 \pm 1,4 M_{\oplus}$  i

abandona la zona habitable apropant-se massa a la seva estrella. Segons els meus càlculs Gliese 667 C c no es troba a la HZ però, amb un semi-eix major de  $0,125 AU$  es troba només a  $0,005 AU$  del límit exterior de la HZ. Amb una excentricitat baixa de  $0.012 \pm 0.004$  i una massa mínima d'unes  $3,8 M_{\oplus}$  crec que és millor candidat a ser habitable que el seu company b.

### **Gliese 832 c**

Aquest exoplaneta orbita una estrella de tipus M a poc més de 16 anys llum de la Terra. La seva massa mínima és de  $5,40 \pm 0,95 M_{\oplus}$  i orbita el 65,2% del temps dins la zona habitable. És un bon candidat a ser habitable.



*Figura 12: Representació artística de Gliese 832 c*

### **Kepler-174 d**

Aquest planeta a la HZ té un radi de  $2,19 \pm 0,13 R_{\oplus}$ , és a dir, més del doble que la Terra i una mica més de la meitat que Neptú. Assumint una composició semblant a la Terra, podria tenir una massa d'unes  $10,50 \pm 1,98 M_{\oplus}$ . Podria arribar a ser massa massiu com per ser un planeta rocós. Tot i això continua sent candidat a ser habitable.

### **Kepler-22 b**

Aquest és el primer exoplaneta detectat a la zona habitable d'una estrella semblant al Sol. Kepler-22 és una nana groga, com el Sol, a uns 620 anys llum. És un 3% menys massiva i un 2% més petita. És lleugerament més freda que el Sol, uns 260 graus per sota de la temperatura efectiva solar.

Al voltant de Kepler-22 només s'ha detectat un planeta (Kepler-22 b). Té un radi de  $2,38 \pm 0,13 R_{\oplus}$  i se sap que la massa és inferior a 36 masses terrestres.

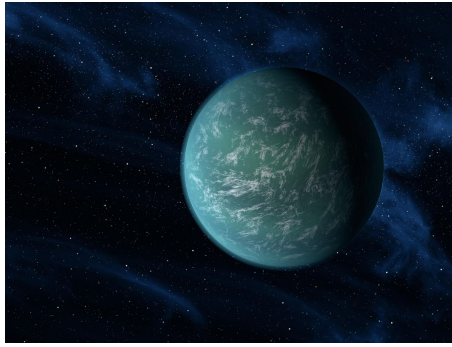


Figura 13: Representació artística de Kepler-22 b

## Kepler-298 d

Aquest planeta és el planeta més gran que considero potencialment habitable, amb un radi de  $2,50 \pm 0,20 R_{\oplus}$  o  $0,64 \pm 0,05 R_{\Psi}$  (Radi de Neptú =  $1 R_{\Psi}$ ). Si fos un planeta rocós de composició terrestre tindria una massa propera a 15 vegades la massa de la Terra.

## Kepler-61 b

Kepler-61 és una nana taronja on només s'ha trobat un exoplaneta. Kepler-61 b és un planeta de  $2,15 \pm 0,13 R_{\oplus}$  que orbita parcialment a la zona habitable. Aquest sistema planetari està descrit en profunditat en l'article *Exoplanet characterization by proxy: a transiting  $2.15 R_{\oplus}$  planet near the habitable zone of the late K dwarf Kepler-61*<sup>[17]</sup>. En aquest article es conclou que aquest planeta tindria una temperatura d'equilibri de  $273 \pm 13 K$ .

## Gliese 676 e

Gliese 676 és un sistema binari format per dues nanes vermelles que s'orbiten entre elles a unes 800 UA de distància<sup>[18]</sup>. Quatre planetes orbiten una de les estrelles (A), un dels planetes (Gliese 676 A e) orbita parcialment en la HZ i té una massa de  $11,5 \pm 1,5 M_{\oplus}$ , lleugerament superior al límit per ser considerat una super-terra. Aquest és l'únic exoplaneta potencialment habitable.



## 8. Conclusions

Els resultats són que d'un total de 1126 sistemes planetaris estudiats, he identificat 16 amb un o més exoplanetes potencialment habitables. A la nostra galàxia, la Via Làctia, hi ha com a mínim cent-mil milions d'estrelles<sup>[19]</sup>. Si fem una extrapolació dels resultats obtinguts i assumim que cada estrella forma un sistema planetari podem dir que hi ha al voltant de  $1.42 \times 10^9$  exoplanetes potencialment habitables. Aquesta extrapolació em serveix per fixar un mínim, la realitat dista d'aquesta extrapolació per una causa principal: els planetes potencialment habitables són més difícils de detectar. Degut a la seva mida es requereix instrumentació més precisa respecte la necessària per detectar gegants gasosos. En el mètode de transit es necessita mesurar el flux de l'estrella amb molta precisió per tal de detectar les petites variacions causades per un planeta transitant de la mida de la Terra. Per tal de detectar el desplaçament Doppler de la llum d'una estrella causat per un planeta de massa semblant a la Terra es necessiten espectròmetres molt precisos. Actualment s'aconsegueix mesurar la velocitat radial d'una estrella amb  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

L'article *One or more bound planets per Milky Way star from microlensing observations*\* publicat a la revista *Nature* al febrer de 2012 conclouïa que cada estrella té una mitjana de  $1.6^{+0.72}_{-0.89}$  planetes<sup>[20]</sup>. El mateix article conclou que l'abundància dels planetes d'entre  $5 M_{\oplus}$  i  $10 M_{\oplus}$  és del  $62^{+35}_{-37}\%$ . He calculat l'HPI per 77 planetes en aquest rang de masses, 6 d'aquests planetes són potencialment habitables. Si extrapolem aquests resultats, obtenim una abundància de planetes potencialment habitables d'entre  $5 M_{\oplus}$  i  $10 M_{\oplus}$  d'un  $5^{+2}_{-3}\%$ . En total a la nostra galàxia hi hauria  $8^{+3}_{-4} \times 10^9$  super-terres potencialment habitables.

La conclusió final és que els exoplanetes potencialment habitables són freqüents a la nostra galàxia i el número d'aquests és de l'ordre de mil milions. Si assumim que la majoria d'exoplanetes potencialment habitables són realment habitables, la hipòtesi plantejada és correcta.

---

\* *Un o més planetes per cada estrella de la Via Làctia a partir de observacions de lents gravitacionals.*

## 8.1 L'equació de Drake

L'equació de Drake és una fórmula per determinar el nombre de civilitzacions extraterrestres amb les quals ens podríem comunicar mitjançant ones de ràdio. L'equació dona com a resultat un nombre  $N$  de civilitzacions:

$$N = R_* \cdot f_p \cdot n_e \cdot f_l \cdot f_i \cdot f_c \cdot L \quad (46)$$

On:

- $R_*$  és el ritme de formació d'estrelles en la nostra galàxia
- $f_p$  és la fracció d'aquestes estrelles que contenen planetes
- $n_e$  el nombre de planetes per estrella que poden suportar vida
- $f_l$  la fracció d'aquests planetes en que es desenvoluparà vida
- $f_i$  la fracció d'aquests planetes amb vida on es desenvolupi vida intel·ligent
- $f_c$  la fracció de les civilitzacions que desenvoluparà una tecnologia que emeti senyals detectables de la seva existència
- $L$  la quantitat de temps que aquestes civilitzacions emeten senyals detectables de la seva existència

A partir de les conclusions d'aquesta recerca es pot calcular el paràmetre  $n_e$  (el nombre de planetes per estrella que poden suportar vida). El valor que li assignaria seria  $n_e = 0,08^{+0,03}_{-0,04}$ .

## **9. Agraïments**

En primer lloc vull agrair als meus pares per fomentar el meu interès en la ciència, gràcies pel vostre suport incondicional. Al meu germà Guillem pel suport i especialment per la il·lustració de la figura 5.

Al doctor Enrique Herrero que em va fer de tutor en la redacció de l'article científic en què es basa tot aquest treball de recerca i qui em va introduir en l'estudi dels exoplanetes.

Vull agrair també a en Josep Lluís Sal, tutor de recerca, les seves aportacions en la millora d'aquest treball i la seva tasca per incorporar l'astronomia a la nostra escola.

Per últim una menció al Sr. Pajares i la Sra. Arquimbau que, ja sigui com a tutors o com a professors, m'han encoratjat a continuar esforçant-me per assolir els meus objectius.

## 10. Glossari

**Planetesimal:** Cos que orbita una estrella de dimensió reduïda comparat amb un planeta.

**Massa real:** És la massa verdadera que té un cos, no aquella que s'ha calculat a partir de mètodes de detecció com la velocitat radial.

**Metal·licitat:** És la proporció de matèria d'un cos celeste feta d'elements que no són hidrogen o heli.

**Albedo:** Quocient entre la radiació que és reflectida per una superfície i la radiació que hi incideix.

## 11. Referències

- [1] “The Extrasolar Planets Encyclopaedia.” [Online]. Available: <http://exoplanet.eu/>. [Accessed: 12-Sep-2014].
- [2] IAU, “IAU 2006 General Assembly: Result of the IAU Resolution votes,” 2006. [Online]. Available: <http://www.iau.org/news/pressreleases/detail/iau0603/>. [Accessed: 12-Sep-2014].
- [3] Lunar and Planetary Institute, Exoplanets. Tucson : Houston: University of Arizona Press ; In collaboration with Lunar and Planetary Institute, 2010.
- [4] I. Newton, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. London: Royal Society, 1687.
- [5] B. Campbell, G. A. H. Walker, and S. Yang, “A search for substellar companions to solar-type stars,” *The Astrophysical Journal*, vol. 331, p. 902, Aug. 1988.
- [6] A. Wolszczan and D. A. Frail, “A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12,” *Nature*, vol. 355, no. 6356, pp. 145–147, Jan. 1992.
- [7] “NASA Exoplanet Archive.” [Online]. Available: <http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>. [Accessed: 12-Sep-2014].
- [8] R. K. Kopparapu, R. M. Ramirez, J. SchottelKotte, J. F. Kasting, S. Domagal-Goldman, and V. Eymet, “Habitable Zones Around Main-Sequence Stars: Dependence on Planetary Mass,” *The Astrophysical Journal*, vol. 787, no. 2, p. L29, Jun. 2014.
- [9] N. Duric, *Advanced astrophysics*. Cambridge, U.K. ; New York: Cambridge University Press, 2004.
- [10] M. Salaris, *Evolution of stars and stellar populations*. Chichester, West Sussex, England ; Hoboken, NJ, USA: J. Wiley, 2005.
- [11] J. Stefan, “Über die Beziehung zwischen der Wärmestrahlung und der Temperatur,” *Sitzungsberichte der mathematisch-naturwissenschaftlichen Classe der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften*, pp. 391–428, 1879.
- [12] L. Boltzmann, “Ableitung des Stefan’schen Gesetzes, betreffend die Abhängigkeit der Wärmestrahlung von der Temperatur aus der electromagnetischen Lichttheorie,” *Annalen der Physik*, vol. 258, no. 6, pp. 291–294, 1884.
- [13] G. Anglada-Escude, P. Arriagada, M. Tuomi, M. Zechmeister, J. S. Jenkins, A. Ofir, S. Dreizler, E. Gerlach, C. J. Marvin, A. Reiners, S. V. Jeffers, R. P. Butler, S. S. Vogt, P. J. Amado, C. Rodriguez-Lopez, Z. M. Berdinas, J. Morin, J. D. Crane,

- S. A. Shectman, I. B. Thompson, M. Diaz, E. Rivera, L. F. Sarmiento, and H. R. A. Jones, “Two planets around Kapteyn’s star: a cold and a temperate super-Earth orbiting the nearest halo red dwarf,” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, vol. 443, no. 1, pp. L89–L93, Jul. 2014.
- [14] K. M. Star, R. L. Gilliland, J. T. Wright, and D. R. Ciardi, “Revision of Earth-sized Kepler Planet Candidate Properties with High Resolution Imaging by Hubble Space Telescope,” arXiv:1407.1057 [astro-ph], Jul. 2014.
- [15] P. S. Muirhead, K. Hamren, E. Schlawin, B. Rojas-Ayala, K. R. Covey, and J. P. Lloyd, “Characterizing the Cool Kepler Objects of Interests. New Effective Temperatures, Metallicities, Masses, and Radii of Low-mass Kepler Planet-candidate Host Stars,” *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 750, p. L37, May 2012.
- [16] R. Brasser, S. Ida, and E. Kokubo, “A dynamical study on the habitability of terrestrial exoplanets II: The super Earth HD 40307 g,” arXiv:1403.5868 [astro-ph], Mar. 2014.
- [17] S. Ballard, D. Charbonneau, F. Fressin, G. Torres, J. Irwin, J.-M. Desert, E. Newton, A. W. Mann, D. R. Ciardi, J. R. Crepp, C. E. Henze, S. T. Bryson, S. B. Howell, E. P. Horch, M. E. Everett, and A. Shporer, “Exoplanet Characterization by Proxy: A Transiting 2.15 R<sub>⊕</sub> Planet near the Habitable Zone of the Late K Dwarf Kepler-61,” *The Astrophysical Journal*, vol. 773, p. 98, Aug. 2013.
- [18] G. Anglada-Escudé and M. Tuomi, “A planetary system with gas giants and super-Earths around the nearby M dwarf GJ 676A. Optimizing data analysis techniques for the detection of multi-planetary systems,” *Astronomy and Astrophysics*, vol. 548, p. 58, Dec. 2012.
- [19] “NASA - Galaxy,” 12-Apr-2009. [Online]. Available: [http://web.archive.org/web/20090412172631/http://my.nasa.gov/worldbook/galaxy\\_worldbook.html](http://web.archive.org/web/20090412172631/http://my.nasa.gov/worldbook/galaxy_worldbook.html). [Accessed: 12-Sep-2014].
- [20] A. Cassan, D. Kubas, J.-P. Beaulieu, M. Dominik, K. Horne, J. Greenhill, J. Wambsganss, J. Menzies, A. Williams, U. G. Jørgensen, A. Udalski, D. P. Bennett, M. D. Albrow, V. Batista, S. Brilliant, J. A. R. Caldwell, A. Cole, C. Coutures, K. H. Cook, S. Dieters, D. D. Prester, J. Donatowicz, P. Fouqué, K. Hill, N. Kains, S. Kane, J.-B. Marquette, R. Martin, K. R. Pollard, K. C. Sahu, C. Vinter, D. Warren, B. Watson, M. Zub, T. Sumi, M. K. Szymanski, M. Kubiak, R. Poleski, I. Soszynski, K. Ulaczyk, G. Pietrzynski, and L. Wyrzykowski, “One or

more bound planets per Milky Way star from microlensing observations,”  
Nature, vol. 481, pp. 167–169, Jan. 2012.

## 12. Bibliografía

- N. Piskunov and C. Vázquez y Fernández-Victorio, *Cálculo diferencial e integral*. Barcelona: Montaner y Simon, 1970.
- M. Ángel A. García, *C/C++*. Madrid: Anaya Multimedia, 2010.
- Lunar and Planetary Institute, *Exoplanets*. Tucson : Houston: University of Arizona Press ; In collaboration with Lunar and Planetary Institute, 2010.