Universidade de São Paulo

Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas

Departamento de Astronomia

Rafael da Silva Cardoso Pinto

Zonas Habitáveis em Sistemas Extra-solares

Movimentos Próprios no Galactic Bulge Valinhos Observatory Catalog

São Paulo

2014

Rafael da Silva Cardoso Pinto

Zonas Habitáveis em Sistemas Extra-solares

Movimentos Próprios no Galactic Bulge Valinhos Observatory Catalog

Trabalho de conclusão de curso do Bacharelado em Astronomia apresentado ao Departamento de Astronomia do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo.

Área de concentração: Astronomia

Orientadores: Profª Dra. Tatiana A. Michtchenko

Profº Dr. Ramachrisna Teixeira

São Paulo

2014

Agradecimentos

À minha mãe e meu pai, pelo apoio decisivo e pelo investimento que fizeram em mim;

Aos meus orientadores, Tatiana e Ramachrisna, que me ensinaram muito durante a graduação;

Ao CNPq, pelo apoio financeiro durante 2 anos;

Ao IAG e à USP.

“Que maravilhoso e surpreendente esquema temos aqui da magnífica imensidão do universo. Tantos Sóis, tantas Terras...!”

Christian Huygens

“O conhecido é finito, o desconhecido infinito; intelectualmente estamos numa ilha no meio de um oceano ilimitado de inexplicabilidade. O nosso dever a cada geração é recuperar um pouco mais de terra.”

Thomas Henry Huxley

Resumo

Neste trabalho foram calculados os parâmetros relacionados às zonas habitáveis circumestelares, com um modelo baseado em Kasting et al. (1993), para um conjunto de 14 sistemas planetários de estrelas isoladas, admitindo hipóteses otimistas para os limites interno (impossibilidade de sustentação de água líquida na superfície, mesmo a grandes pressões) e externo (aumento da concentração de nuvens de CO_2 na atmosfera e diminuição drástica da temperatura abaixo de *273 K*). Desses sistemas, apenas 3 exoplanetas, GJ 667C *c*, *e* e *f*, são candidatos reais a planetas habitáveis, por possuírem massas menores que $5 \cdot M_T$ e estarem permanentemente dentro da zona habitável (ZH) de sua estrela.

No cálculo da ZH perturbada de um sistema binário, foi feita uma aproximação do método descrito em Forgan (2012) para um modelo de temperatura média global como função do tempo. Esta simulação mostrou que o sistema estudado aqui, Alfa Centauri AB, com uma separação mínima de *11 UA* e componentes com luminosidades de $1{,}5 \cdot L_\odot$ e $0{,}7 \cdot L_\odot$, tem zonas habitáveis que oscilam no tempo, com uma amplitude máxima de *4 K* para o caso mais extremo, que se dá no limite interno da ZH de Alfa Cen B.

A segunda parte do trabalho foi direcionada a uma outra área de pesquisa, realizando um projeto relacionado com astrometria. Foram identificados grupos de estrelas angularmente próximas na esfera celeste e com movimentos próprios considerados equivalentes, dentro da amostragem de 11620 objetos do catálogo GBVOC. Isso foi feito a partir de um arquivo de trabalho filtrado do catálogo original, reduzido a 514 estrelas com erros em movimento próprio menores que *30%*. O valor de separação angular, adotado como critério de seleção, foi de 15’, enquanto que o critério de similaridade de movimentos próprios de duas estrelas foi considerar que as duas componentes μ_α e μ_δ deveriam ter diferenças menores que a soma de seus erros. Dessa forma, obteve-se uma lista final com 67 grupos, de 2 a 4 componentes cada e 158 estrelas no total, espalhados pelas 12 janelas de baixa extinção na direção do bojo galáctico desse catálogo.

Abstract

In this work it was calculated the habitable zones (HZ), with a model based on Kasting et al. (1993), for a group of 14 isolated stars, taking optimistic hypothesis for the inner (impossibility of sustainment of liquid water in the surface, even at great pressures) and outer (increased concentration of CO_2 clouds in the atmosphere and drastic decrease in temperature below 273 K) limits of the HZ. From these systems, only 3 exoplanets, GJ 667C *c*, *e* and *f*, are real candidates for habitable exoplanets, for having masses inferior to $5 \cdot M_E$ and for being permanently inside of the HZ.

In a binary system, the disturbed HZ of the two stars were calculated from an approximation of the method described in Forgan (2012) to a model of global mean temperature as a function of time. This simulation showed the system studied here, Alpha Centauri AB, with an minimum separation of 11 AU and components with $1{,}5 \cdot L_\odot$ and $0{,}7 \cdot L_\odot$, has HZ oscillating in time, with a maximum amplitude of *4 K* for the most extreme case (Alpha Cen B disturbing the HZ oh Alpha Cen A).

In the second part of this work, another study was performed by identifing groups of angularly close stars with equivalent proper motions in the sampling of 11620 objects of the GBVOC catalog. This was done from a filtered working file, reduced to 514 stars with errors less than *30%* in proper motion. Here, the angular separation was considered to be 15', while the adopted criteriunm for similarity in proper motion was the difference between the proper motion (in right ascension and declination) of the two stars was less than the sum of its errors. In this way, it was obtained a list of 67 groups, from 2 to 4 components each and 158 stars in total, spread over the 12 low extinction windows in the direction of the Galactic bulge of this catalogue.

Lista de Figuras

1.1.1.1 Zona habitável de uma galáxia espiral 20

1.1.2.1 Zona habitável circum-estelar 21

1.1.2.2 Variação da ZH com a luminosidade 22

1.1.2.3 ZH de Gliese 581 22

1.2.1 Exoplanetas descobertos por ano 23

1.2.2 Imagem direta de exoplaneta 24

1.2.1.1 Sistema de ups Andromedae 24

1.3.1 Exemplo de órbita de sistema binário 26

1.3.2 Projeção da órbita 26

1.3.3 Órbitas tipo S e tipo P 27

1.3.1.1 Sistema Alfa Centauri 27

1.4.1 Velocidades e movimento próprio 29

2.1.1.1 ZH no sistema solar 34

2.1.2.1 ZH de 47 Uma e 55 Cnc 36

2.1.2.2 ZH de 61 Vir e eps Eri 36

2.1.2.3 ZH de HD 3651 e HD 10647 36

2.1.2.4 ZH de HD 147513 e HD 69830 37

2.1.2.5 ZH de ups And e mu Ara 37

2.1.2.6 ZH de Kapteyn`s e GJ 667C 37

2.1.2.7 ZH de Kepler-62 e Kepler-186 37

2.2.1 Relação entre as órbitas no sistema binário 40

2.2.2 Perturbações das ZH 42

2.2.3 Alteração da ZH de Alfa Cen AB 43

2.2.4 Limites de órbitas estáveis 44

2.3.1.1 Janela LA do GBVOC 45

2.3.1.2 Todas as 12 janelas 46

2.3.1.3 Histogramas de movimento próprio e magnitude 47

2.3.1.4 Histogramas de movimento próprio em α e δ 47

2.3.1.5 Razão entre $\Delta\mu$ e μ 47

2.3.1.6 Pares que não passam no filtro 48

Lista de Tabelas

2.1.1.1 ZH no sistema solar 34

2.1.2.1 Massas dos exoplanetas gigantes 38

2.1.2.2 Massas e raios dos exoplanetas terrestres 39

2.2.1 Diferença na ZH de Alfa Centauri AB 43

Sumário

1. Introdução 19

1.1 Zonas Habitáveis 19

1.1.1 Zona Habitável Galáctica (ZHG) 20

1.1.2 Zona habitável circum-estelar (ZH) 21

1.2 Exoplanetas 23

1.2.1 Exoluas 24

1.3 Estrelas Binárias 25

1.3.1 O sistema Alfa Centauri 27

1.4 Movimentos próprios 28

1.5 Galactic Bulge Valinhos Observatory Catalog 29

2. Desenvolvimento 32

2.1 Zonas habitáveis em estrelas isoladas 32

2.1.1 Zona Habitável no sistema solar 32

2.1.2 Zona Habitável em sistemas extra-solares 34

2.2 Zonas habitáveis em estrelas binárias 39

2.3 Movimentos próprios no GBVOC 44

2.3.1 Pares de estrelas com movimentos próprios comuns 44

3. Conclusões e Perspectivas 50

3.1 Zonas Habitáveis em sistemas extra-solares 50

3.2 Movimentos próprios no GBVOC 51

Referências 54

Apêndices

A. Figuras para comparação das ZH de estrelas isoladas 57

B. Figuras das 12 janelas do GBVOC 64

Capítulo 1

Introdução

1.1 Zonas habitáveis

A ideia de que possa haver vida em outros planetas existe há muito tempo. Remonta pelo menos até a Grécia antiga, com as ideias do atomista Epícuro sobre a *"infinidade do universo e dos mundos habitados por seres como os da Terra"* (Epícuro s.d.). Na Itália do século XVI, surgiu novamente a ideia da possibilidade de vida extraterrestre, na época defendida pelo filósofo, astrônomo e frade dominicano Giordano Bruno. Ele acreditava que não apenas existiam de fato outros mundos habitados (Bruno 1584), como também que estes fariam parte de sistemas planetários ao redor de estrelas, da mesma forma que o sistema solar. Sendo que nessa época ainda não existiam observações que mostrassem que, de fato, o Sol é apenas uma dentre incontáveis outras estrelas. Por essas e outras ideias, consideradas proibidas na época, ele foi queimado vivo na fogueira pela Igreja Católica, porém suas ideias não morreram com ele.

Durante os séculos seguintes, as especulações sobre a vida fora da Terra se tornaram cada vez mais intensas e, conforme a tecnologia avançava, novas descobertas eram feitas. Em 1895 o matemático e astrônomo amador estadunidense Percival Lowell relatou ter observado "canais" em Marte, fato que gerou certa polêmica na época (Wallace 1907). Posteriormente, em 1909, observações feitas com telescópios de melhor qualidade e em condições astronômicas mais favoráveis colocaram um fim na hipótese dos "canais" marcianos. Contudo, o episódio serviu para gerar ainda mais discussões a respeito da possibilidade de vida extraterrestre. Com o tempo, cada vez mais os cientistas e filósofos tentaram descobrir se estaríamos sós no universo. Porém, para isso seria preciso primeiro saber onde procurar, pois algumas regiões são mais propícias do que outras para abrigar a vida, como a conhecemos.

As primeiras menções ao que se considera hoje como zona habitável foram feitas apenas na década de 1950. Dois artigos (Strughold 1953 e Shapley 1953) publicados quase simultaneamente nessa época destacam a importância da presença de água líquida na superfície de um planeta para que ele possa sustentar a vida. Pelo menos a vida como a conhecemos, isto é, aquela que é baseada no carbono, utiliza a água líquida como solvente e é codificada em moléculas de DNA e RNA. Há teorias científicas (Sagan & Shklovskii 1977) que afirmam ser possível existir vida baseada em

outras moléculas, como as que teriam por base o silício ou a amônia. Porém, ainda não foi encontrado, nem na Terra nem fora dela, nenhum organismo baseado em uma bioquímica alternativa para comprovar essas teorias.

A definição de zona habitável é ainda um pouco ampla e não muito consensual entre os pesquisadores, pois há uma quantidade muito grande de fatores que podem interferir, de forma nem sempre muito conhecida, no resultado final, que seria a possibilidade ou não de a vida, como a conhecemos, surgir num determinado planeta. Mas, de uma forma geral, a zona habitável pode ser imaginada como uma região do espaço que é favorável ao surgimento e desenvolvimento da vida. Existem basicamente dois tipos de zonas habitáveis, a circum-estelar (ZH) e a galáctica (ZHG), sendo que a região com maior chance de conter algum planeta ou lua com vida seria a intersecção dessas duas zonas.

1.1.1 Zona habitável galáctica (ZHG)

Para um planeta de um sistema estelar de uma galáxia se manter habitável por um período de tempo suficientemente grande para o surgimento e desenvolvimento da vida, é necessário que o sistema gire ao redor do centro da galáxia em uma órbita favorável. Para essa órbita ser propícia à vida ela deve ser tal que não leve o sistema estelar para muito longe nem muito perto do centro galáctico. Assim, essa órbita não pode ser muito excêntrica.

O sistema estelar não pode orbitar muito próximo ao centro da galáxia devido à intensa radiação de alta-frequência dessa região, que destruiria qualquer forma de vida baseada em carbono. Por outro lado, ele também não pode se manter muito afastado do centro galáctico, pois a metalicidade diminui a partir de certa distância e um dos pré-requisitos para a vida é que o sistema contenha planetas rochosos ao redor de estrelas ricas em metais. Uma visão geral de como deveria ser a ZHG segundo essa definição está esquematizada na figura 1.1 a seguir.

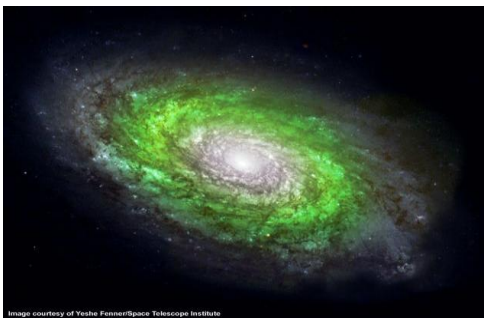


Figura 1.1: Em verde está aproximadamente a ZHG de uma galáxia espiral. (http://www.solstation.com/habitable.htm)

Há também outros critérios para a habitabilidade dentro de uma galáxia, que envolvem a taxa de formação estelar, o sincronismo do movimento orbital do sistema

estelar com a rotação do disco galáctico, a inclinação dessa órbita em relação ao plano da galáxia e o fato de o sistema se encontrar dentro ou fora de um dos braços espirais. Todos esses fatores também são relevantes para se definir uma zona habitável galáctica, mas o principal parece ser mesmo a distância até o centro da galáxia.

1.1.2 Zona habitável circum-estelar (ZH)

Para um planeta ser considerado habitável, ele também deve permanecer em uma órbita estável e favorável ao redor de sua estrela por um período de alguns bilhões de anos, que é o tempo requerido para que a vida surja e se desenvolva. Esta órbita favorável deve estar contida dentro de certos limites, extrapolados a partir do caso conhecido da Terra no sistema solar para outros sistemas estelares.

O principal fator que define a zona habitável ao redor de uma estrela é a distância do planeta até ela. Pois essa distância, entre outros fatores, é o que determina a possibilidade de existir água líquida na superfície deste planeta. Um esquema representativo da ZH do Sol está ilustrado na figura 1.2 a seguir.

Figura 1.2: Representação artística da zona habitável do sistema solar.
(http://en.wikipedia.org/wiki/Circumstellar_habitable_zone)

A distância até a estrela define o fluxo de energia que chega no planeta. Se este estiver perto demais de sua estrela, sua superfície será demasiado quente para poder sustentar água no estado líquido. Se estive muito longe, haverá muito pouca energia chegando no planeta e sua superfície ficaria eternamente congelada. Assim, para que um planeta possa sustentar água líquida em sua superfície, sua órbita deve estar contida numa região tal que o planeta não fique nem muito perto nem muito longe da estrela. Essa região, que é basicamente uma casca esférica centrada na estrela, é chamada zona habitável circum-estelar, ou, simplesmente zona habitável (ZH).

Porém, a definição dos raios interno e externo da ZH pode variar de acordo com o modelo adotado. Existem modelos que utilizam hipóteses mais conservadoras, resultando em uma ZH mais estreita e outros mais otimistas, que calculam uma ZH mais abrangente para a mesma estrela. Uma dessas hipóteses, por exemplo, é a de que para um planeta ser considerado habitável ele deve possuir uma atmosfera não apenas

suficientemente densa, mas também parecida com a da Terra em sua composição (Kasting et al. 1993).

Há também outros fatores que atuam na definição da ZH, como, por exemplo, a atividade estelar. Se a estrela for muito ativa, emitir muita radiação de alta frequência, ou mesmo ser muito instável, provavelmente não será possível a existência de um planeta habitável ao seu redor. Assim, geralmente, costuma-se falar apenas em ZH de estrelas da sequência principal. Apesar de que, planetas, em si, já foram descobertos até mesmo ao redor de pulsares (Wolszczan 1994). Porém, seria difícil imaginar um planeta habitável neste caso, devido ao intenso nível de radiação de alta frequência e ao evento que gera pulsares, isto é, uma supernova.

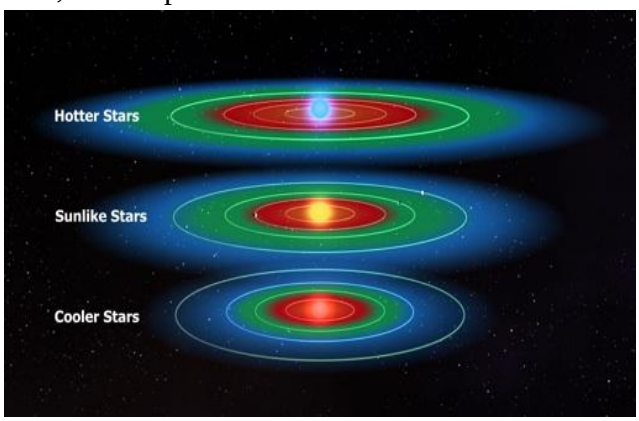


Figura 1.3: Esquema mostrando a variação da ZH (em verde) com a temperatura da estrela, aumentando de baixo para cima. (*NASA/Kepler*)

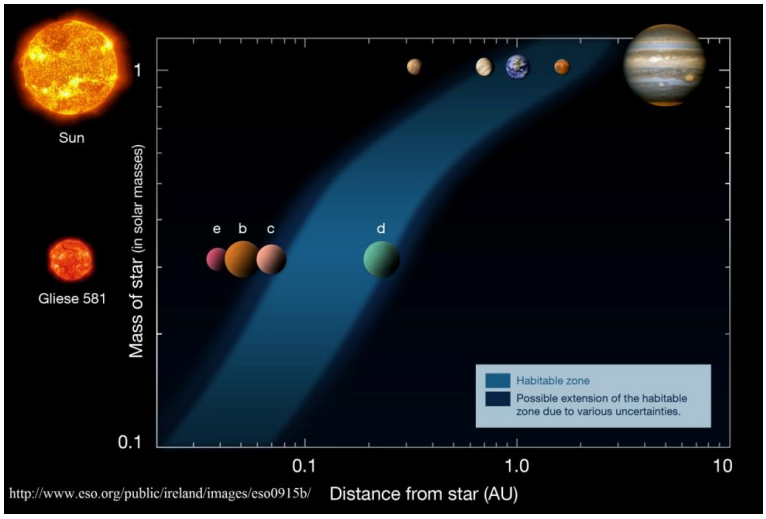


Figura 1.4: Exemplo da ZH do sistema Gliese 581 comparado com o sistema solar.

Deve-se levar em consideração, porém, que mesmo para estrelas, ainda existe o fator da evolução estelar, que tem efeitos apenas a longo prazo. Mas o próprio surgimento e desenvolvimento da vida é um processo lento, que pode levar bilhões de anos, então deve-se considerar isso também. Assim, define-se uma zona habitável contínua (ZHC), isto é, uma região ao redor da estrela onde poderia existir vida, mas que não é estática (Morris 1999). Essa região, que também é uma casca esférica

centrada na estrela, muda de tamanho e largura conforme a estrela evolui e tem sua luminosidade alterada.

1.2 Exoplanetas

A busca por vida fora da Terra não se limita aos planetas e luas do sistema solar. Já no século XIX, astrônomos procuravam provar a existência de planetas orbitando outras estrelas, isto é, exoplanetas, ou planetas extra-solares. Em 1855, W. S. Jacob observou o movimento da estrela binária 70 Ophiuchi e deduziu que havia nesse sistema um exoplaneta perturbando seu trajeto no céu. Este, porém, foi um alarme falso (assim como alguns outros que vieram depois), já que não há nenhum planeta nesse sistema, até onde se sabe (Heintz 1988).

O primeiro exoplaneta confirmado foi descoberto por Campbell et al. (1988) ao redor da estrela gamma Cephei. Esta descoberta, porém, foi feita ainda no limite da resolução dos dados observacionais, fazendo com que a comunidade científica se mantivesse cética. Apenas em 2003 este exoplaneta foi finalmente confirmado com dados mais precisos (Campbell et al. 2003). Até o momento em que foi escrito o presente trabalho, já foram confirmados 1853 exoplanetas (The Extrasolar Planets Encyclopaedia 2014), sendo este número constantemente atualizado e crescendo cada vez mais, devido a melhoras constantes nas observações.

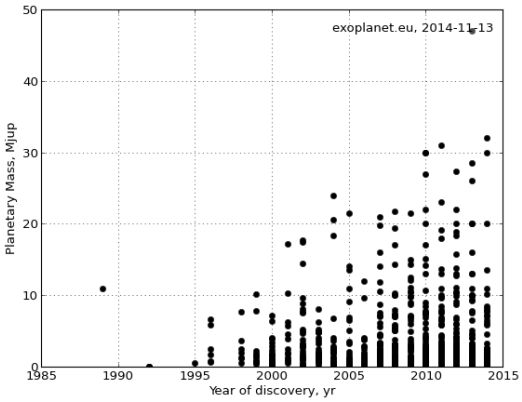


Figura 1.5: Quantidade de exoplanetas descobertos por ano desde 1985 até 2014. (exoplanet.eu, 13/11/2014)

Os métodos de detecção de exoplanetas utilizados atualmente são muitos. Os mais utilizados são os de velocidade radial, no qual a velocidade radial da estrela, a qual é alterada pela presença do planeta, é obtida do efeito Doppler em seu espectro, e o de trânsito, onde é observada a curva de luz da estrela quando o planeta passa na frente durante um eclipse, obtendo-se assim dados como o raio do planeta. O método das velocidades radiais foi o responsável pelo maior número de descobertas até hoje, pois a velocidade radial de uma estrela pode ser facilmente medida com grande precisão e há poucas exceções em que o método não pode ser utilizado. Um caso é quando o plano da órbita da estrela é perpendicular à linha de visada, ou seja, quando não há velocidade

radial. Já o método de trânsito é aplicável a um número menor de sistemas, pois há relativamente poucos casos em que o plano da órbita do exoplaneta fica exatamente na linha de visada entre a estrela e o observador. Entretanto, quando possível, é muito útil pois este é o único meio conhecido de se fazer, por exemplo, a espectroscopia da atmosfera de um exoplaneta (Janson et al. 2010). Alguns poucos exoplanetas foram também detectados com imagem direta, através de observações no infravermelho ou no visível. Contudo, a maioria deles é de gigantes gasosos, portanto, dificilmente habitáveis.

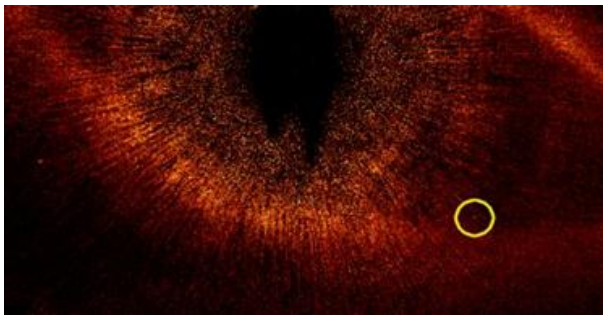


Figura 1.6: Um exoplaneta (assinalado em amarelo) que foi detectado por imagem direta no infravermelho, no disco de poeira da estrela Fomalhaut, subtraída da imagem (Kalas 2008).

1.2.1 Exoluas

A busca por vida fora da Terra, porém, não precisa se limitar a outros planetas ou exoplanetas. Existe a real possibilidade de haver mundos habitáveis orbitando exoplanetas distantes. Exatamente como os planetas gigantes do sistema solar, alguns ou talvez a maioria dos exoplanetas gasosos, ou jupterianos, podem ter exoluas ao seu redor. Estando um desses exoplanetas gigantes dentro da zona habitável de sua estrela e tendo este uma exolua suficientemente grande, capaz de abrigar uma atmosfera considerável, esta então poderia talvez ser habitável.

Figura 1.7: Representação artística de possível sistema de exoluas ao redor ups And d. (http://en.wikipedia.org/wiki/Upsilon_Andromedae_d)

Entretanto, definir a habitabilidade de uma exolua pode ser ainda mais complexo e ousado que fazer o mesmo para um exoplaneta. Neste caso entram em jogo fatores tais como o alinhamento do plano da órbita da exolua com o plano da órbita do exoplaneta,

que definiria o regime de eclipses do sistema planeta-lua, interferindo no fluxo recebido da estrela. Outro fator potencialmente importante a ser considerado seria o efeito de maré, que além de manter uma face da lua sempre virada para o planeta, aumentando assim seu período de rotação ao redor de seu eixo, ainda poderia aquecer o seu interior. Este aquecimento do núcleo da exolua, porém, pode não ser necessariamente desfavorável para o surgimento da vida, podendo ser até o contrário. No caso da lua Europa, de Júpiter, que é coberta por um manto espesso de gelo, o aquecimento de maré em seu núcleo, provocado pelo gigante gasoso, pode ser o responsável pelo surgimento e manutenção de um oceano de água líquida em seu interior, cuja existência atualmente já foi comprovada (Stevenson 2000).

A detecção, porém, dessas possíveis exoluas está ainda longe de ser praticável, mesmo pelos métodos mais sensíveis, devido à suas pequenas influências sobre o exoplaneta gigante. Um método que parece poder ser realizável algum dia consiste em medir as pequenas variações nos tempos de entrada e saída e de duração de trânsitos de exoplanetas (Kipping 2011). Porém, ainda não foram obtidos resultados nesse sentido.

1.3 Estrelas binárias

Atualmente sabe-se que uma grande parte das estrelas conhecidas faz parte de sistemas duplos ou múltiplos. Um sistema duplo, ou estrela dupla, pode ser tanto um sistema binário, que são duas estrelas ligadas gravitacionalmente, quanto uma estrela dupla aparente, que são duas estrelas cujas projeções na esfera celeste estão angularmente próximas, mas que não possuem nenhuma ligação física.

Os sistemas binários são classificados de acordo com a forma com a qual são observados. Podem ser estrelas binárias espectroscópicas, que são detectadas por terem velocidades radiais compatíveis com um sistema ligado, fotométricas, nas quais se observa uma variação periódica nos brilhos das componentes devido a eclipses, ou astrométricas, cujos caminhos percorridos no céu são trajetórias senoidais, isto é, a composição de dois tipos de movimento, os orbitais de cada estrela ao redor do centro de massa e o movimento comum do sistema. Porém, o tipo mais comum observado são as binárias visuais, que são aquelas que podem ser resolvidas diretamente com um telescópio. Sendo que um sistema binário pode ser de apenas um ou também de vários desses tipos ao mesmo tempo.

Nos sistemas binários, as órbitas geralmente são descritas como se a estrela primária ficasse parada na origem e a secundária percorresse uma elipse ao redor desta. Assim, o movimento observado, em coordenadas polares, será a projeção de uma elipse que corresponde à órbita da estrela secundária, como mostram as figuras 1.8 e 1.9 abaixo.

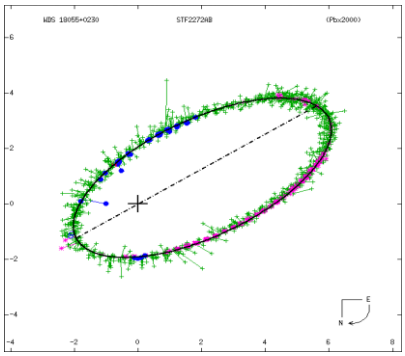


Figura 1.8: Órbita de um sistema binário, com a primária no foco da elípse (Hartkopf 2001).

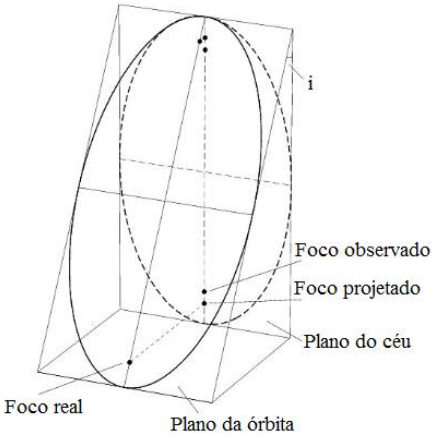


Figura 1.9: Projeção da órbita real da estrela secundária na esfera celeste (Djorgovski 2004).

Cada tipo de binária tem sua importância na astronomia. As binárias espectroscópicas, por exemplo, são úteis na medição das massas mínimas (*M·sen i*) das componentes (Oliveira Filho e Saraiva 2007). Enquanto que para descobrir a inclinação *i* da órbita se usam as curvas de luz provenientes de binárias eclipsantes (ou fotométricas). Assim, se um sistema binário é ao mesmo tempo espectroscópico e fotométrico, então as massas, e portanto também as luminosidades, de suas componentes podem ser medidas com precisão.

As órbitas de exoplanetas em sistema binários podem ser de vários tipos. Porém, as configurações estáveis mais comuns são as órbitas tipo S, onde o planeta orbita diretamente apenas uma estrela, e tipo P com o planeta orbitando as duas estrelas por fora, como mostra a figura 1.10 abaixo.

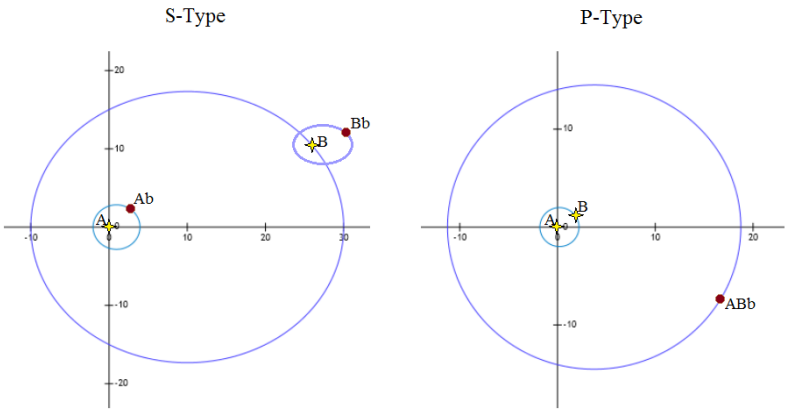


Figura 1.10: Esquemas ilustrativos de órbitas de tipo S e tipo P. As estrelas estão designadas por letras maiúsculas e os planetas por minúsculas.

Neste trabalho foram consideradas apenas binárias tipo S e com separações mínimas (entre as estrelas) grandes, relativamente às órbitas dos exoplanetas. Decidiu-se proceder desta maneira porque assim, o cálculo da zona habitável nos sistemas binários se torna muito mais simplificado e praticável neste âmbito.

1.3.1 O sistema Alfa Centauri

Na parte deste trabalho referente à zona habitável de estrelas binárias, foi estudado o caso do sistema Alfa Centauri. De fato, este sistema possui três estrelas, mas como a terceira componente, Proxima Centauri, tem baixa massa e encontra-se muito distante (Forgan 2012) do par Alfa Centauri AB, ela foi desprezada neste estudo.

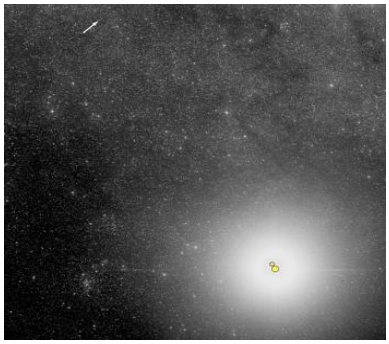


Figura 1.11: Alfa Centauri, com Proxima Cen indicada pela seta.
(http://en.wikipedia.org/wiki/Alpha_Centauri#mediaviewer/File:Alpha_centauri.jpg)

O sistema Alfa Centauri AB é composto por duas estrelas da sequência principal e está a *1,325(7) pc* de nós, sendo, portanto, o sistema estelar mais próximo do Sol. Suas componentes Alfa Cen A e Alfa Cen B possuem, respectivamente, massas de $M_A = 1{,}105(7) \cdot M_{Sol}$ e $M_B = 0{,}934(7) \cdot M_{Sol}$, com tipos espectrais G2V e K1V, portanto, suas luminosidades, calculadas por Nebojsa (2004), são de $L_A = 1{,}49(4) \cdot L_{Sol}$ e $L_B = 0{,}76(2) \cdot L_{Sol}$. O período orbital do sistema é de $P_B = 79{,}91(1)$ *anos*, com uma excentricidade de $e = 0{,}5179(8)$ e uma separação mínima de $a_{mín} = 11{,}41(2)$ *UA* (Forgan 2012). Com essa considerável excentricidade, este é um sistema interessante de

se estudar as zonas habitáveis, pois sistemas com grandes excentricidades e separações mínimas relativamente pequenas são mais susceptíveis a grandes variações nas ZH de suas componentes.

Alfa Cen AB é um sistema interessante de se analisar as ZH também porque suas componentes A e B possuem alta metalicidade (Wyatt et al. 2007), o que aumenta as chances de se encontrar exoplanetas rochosos, potencialmente habitáveis. De fato, até o momento de confecção deste trabalho já foi encontrado um exoplaneta do tipo terrestre orbitando Alfa Cen B, na configuração S-type. Porém, com uma órbita com semieixo maior de aproximadamente *0,04 UA* e uma temperatura estimada em torno de *1500 K*, este não é um candidato a planeta habitável (Dumusque et al. 2012). Entretanto, as buscas prosseguem e este sistema continua sendo de grande interesse, inclusive por ser propício a programas de busca baseados em velocidade radial.

1.4 Movimentos próprios

Ao contrário do que os antigos acreditavam, as estrelas não estão fixas no céu, todas elas se movem em relação às outras. Na Via Láctea, as estrelas que podemos observar possuem um movimento com duas componentes, uma que é o caminho médio da órbita da estrela ao redor do centro da galáxia e outra, de caráter essencialmente aleatório, que é o movimento local das estrelas. Desse movimento, podemos apenas medir a velocidade espacial total em relação ao Sol, sendo esta velocidade separada em uma componente radial v_r e outra tangencial v_t à esfera celeste. A componente radial da velocidade espacial pode ser medida através de espectroscopia Doppler para um grande número de estrelas. Já para se obter a componente tangencial é preciso um período de tempo prolongado de observações, uma vez que a velocidade angular, definida como movimento próprio μ da estrela, é muito baixa para a maioria dos astros, devido às suas grandes distâncias até nós. Para efeito de comparação, o objeto de maior movimento próprio conhecido, a estrela de Barnard, tem um movimento próprio de *10,3''/ano* e são conhecidas apenas cerca de 35 estrelas com μ maior que *3''/ano* (Lima Neto 2011). Considerando que as velocidades espaciais relativas das estrelas da Via Láctea na vizinhança solar são da ordem de *20 km/s* (Lima Neto 2011), isso indica que essas estrelas com grandes movimentos próprios devem estar próximas de nós, como a estrela de Barnard, que está a cerca de *1,8 pc* do Sol e que estrelas muito distantes devem possuir pequenos movimentos próprios.

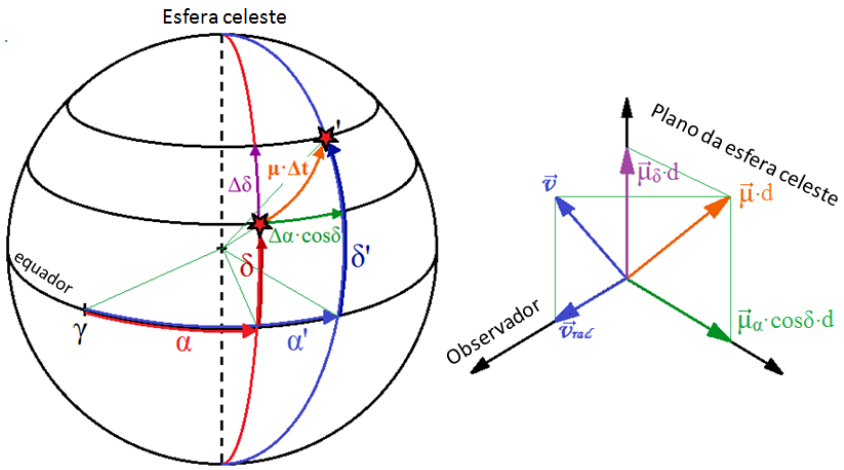


Figura 1.12: Componentes da velocidade espacial *v* e do movimento próprio μ de uma estrela, onde *d* é a distância da estrela até nós.

O movimento próprio de uma estrela geralmente é medido em coordenadas equatoriais, como na figura 1.12, e é definido como sendo a composição das variações angulares em ascensão reta α e declinação δ ao longo do tempo, respectivamente movimento próprio em ascensão reta μ_α e em declinação μ_δ, dado pela expressão a seguir.

$$\mu^2 = \mu_\delta^2 + \mu_\alpha^2 \cdot cos^2\delta \tag{1.4.1}$$

onde foi utilizada uma aproximação para triângulos esféricos pequenos (Boczko 1984), que para o estudo da astrometria estelar não foge muito da realidade.

A busca por estrelas que apresentam movimentos próprios similares é antiga e se mostrou muito interessante desde o momento em que se quis saber se duas estrelas angularmente próximas no céu teriam algum vínculo ou não. Muitos desses pares são certamente sistemas binários, de tal forma que se constituem importantes objetos no estudo da formação e dissolução de sistemas binários e da própria formação estelar. Os sistemas com grandes separações angulares são também interessantes por se tratarem de sistemas físicos onde as componentes têm a mesma idade, a mesma composição química e estão a uma mesma distância, mas que não foram fisicamente alteradas por interações mútuas, como troca de massa entre as estrelas. O próprio estudo da evolução da distribuição da separação de sistemas binários é também de grande importância em astrofísica. Enquanto que a simples detecção desses grupos é também importante nos estudos estatísticos da vizinhança solar onde a completeza da amostra é fundamental.

1.5 Galactic Bulge Valinhos Observatory Catalog

O "Galactic Bulge Valinhos Observatory Catalog" (GBVOC) contém em torno de 12000 estrelas, com magnitude limite de V_{lim} = *15 mag*, na direção de 12 janelas de baixa extinção do bojo galáctico (Dominici et al. 1999). Cada janela tem dimensão

aproximada de 5^m em ascensão reta por *14'* em declinação (Teixeira et al. 2011, 2013). Trata-se de um catálogo extremamente denso, com aproximadamente 3500 estrelas por *1° x 1°*, fornecendo posições e movimentos próprios com precisões externas médias de *22 mas* e *4 mas/ano*, respectivamente. A precisão interna média dos movimentos próprios é de *2 mas/ano.*

Este catálogo baseia-se exclusivamente em observações realizadas com o círculo meridiano CCD do Observatório Abrahão de Moraes – IAG/USP – Valinhos ao longo de 15 anos (1996-2010). Os movimentos próprios foram medidos somente para estrelas com um mínimo de 3 observações por época e de 6 épocas distintas distribuídas em uma base de tempo de pelo menos 10 anos. As posições e movimentos próprios referem-se ao ICRF como no catálogo Tycho2 (Hog et al. 2000).

O trabalho artesanal nele realizado, em contraste com os trabalhos completamente automáticos dos grandes catálogos astrométricos, permite o controle total do processo de redução, dos filtros impostos e da qualidade das observações meridianas CCD, assegurando um altíssimo grau de homogeneidade, qualidade e confiabilidade a essas medidas. Certamente, até esse limite de magnitude essa é a melhor fonte de posições e movimentos próprios existente até este momento nesta região do céu.

Capítulo 2

Desenvolvimento

2.1 Zonas habitáveis em estrelas isoladas

2.1.1 Zona Habitável no sistema solar

Neste trabalho, a princípio, foi utilizada a definição de Zona Habitável de uma estrela considerada da forma mais simples possível. O principal fator que define a possibilidade da existência de água líquida na superfície de um planeta é a taxa de radiação luminosa por unidade de área que chega até ele, isto é, o fluxo estelar que chega no planeta. O fluxo recebido é uma função da luminosidade da estrela e da distância desta até o planeta de acordo com a seguinte equação:

$$F(r) = \frac{L}{4\pi \cdot r^2} \qquad (2.1.1.1)$$

onde r é a distância e L é a luminosidade. Dessa forma, são definidos os limites interno e externo da ZH da estrela de acordo com os fluxos máximo e mínimo, respectivamente, que o planeta deve receber para poder sustentar água líquida em sua superfície.

$$r_i = \sqrt{\frac{L}{k_{int}}} \quad ; \quad r_e = \sqrt{\frac{L}{k_{ext}}} \qquad (2.1.1.2)$$

Aqui temos que r_i e r_e são os raios da ZH, que nesta primeira aproximação é uma casca esférica centrada na estrela, e k_{int} e k_{ext} são, respectivamente, as constantes de fluxo que correspondem ao fluxo de energia que chega em um planeta nos limites interno e externo da ZH. Nas equações 2.1.1.2, utilizando a luminosidade da estrela em luminosidades solares L_{Sol} e a distância em unidades astronômicas *UA*, temos que as constantes de fluxo terão unidade de L_{Sol}/UA. Assim, um $k = 1$ representaria o exato equivalente ao fluxo que a Terra recebe do Sol.

O modelo utilizado como base nesta parte do trabalho (Kasting et al. 1993) abrange várias possibilidades e hipóteses diferentes para os valores de k_{int} e k_{ext} que definiriam os limites da ZH de uma estrela. Neste modelo, a principal ideia, que também foi seguida aqui, é a de que um exoplaneta, dentro dessa ZH, para ser considerado apto a abrigar a água líquida em sua superfície, deve possuir uma atmosfera com uma composição química semelhante à da Terra.

Outro fator importante que foi levado em consideração foi o tamanho e a massa do exoplaneta. Para que se possa falar em habitabilidade, ou sustentação da vida como a conhecemos, foi considerado que o exoplaneta deve ser do tipo rochoso e não muito mais que a Terra. Nessa definição, cabem ainda os do tipo Super-Terra, pois, além de terem uma superfície sólida, capaz de abrigar oceanos e lagos (caso estejam dentro da ZH), podem também possuir uma atmosfera relativamente parecida com a da Terra, mesmo que com pressões muito maiores, se tiverem captado grandes quantidades de gás durante sua formação. As hipóteses consideradas no presente trabalho, com base nas que são levantadas em Kasting et al. (1993), foram feitas de forma bastante otimista para o caso do limite interno da ZH e de maneira consideravelmente mais plausível para o limite externo.

Para a borda interna da ZH, foi considerado que o fluxo efetivo k_{int} da estrela em r_i deve ter um valor máximo tal que a temperatura de uma porção de água líquida na superfície do planeta não exceda *647K*, que é a temperatura do ponto crítico da água, a partir do qual a água não pode mais se manter líquida sob qualquer pressão. Deve-se levar em consideração, entretanto, que para um planeta manter água líquida a essa temperatura em sua superfície, ele deve ter uma atmosfera com uma pressão de aproximadamente *218 atm*. É importante salientar, entretanto, que ainda não se conhece formas de vida que se mantenham sob tais condições tão extremas. Os valores adotados para definir r_{int} nesse caso se referem apenas à condição de presença da água na forma líquida.

No cálculo do limite externo da ZH, considerou-se apenas uma das hipóteses citadas em Kasting et al. (1993). Esta diz que a distância r_e é a maior possível para que o exoplaneta ainda consiga manter seu albedo suficientemente pequeno, para evitar uma queda muito brusca na temperatura global. Neste modelo isso é considerado necessário porque quanto mais longe o exoplaneta está de sua estrela, menos radiação ele recebe e, conforme sua temperatura diminui, como o planeta em questão deve ter uma atmosfera composta basicamente de CO_2, H_2O e N_2, devido ao ciclo Carbonato-Silicato, começam a se formar nuvens de CO_2, que aumentam muito rapidamente o albedo planetário. Com um albedo maior, mais energia é refletida e menos é absorvida, diminuindo ainda mais a temperatura na superfície. Assim, devido a essa dependência muito forte da temperatura planetária com albedo da atmosfera, o fluxo efetivo na borda externa da ZH foi tomado de modo que tenha seu valor mínimo em relação à pressão parcial de CO_2 a uma temperatura de 273K, que é o ponto abaixo do qual a água congela.

Os valores obtidos dessa maneira para as constantes de fluxo, a partir de extrapolações de gráficos apresentados em Kasting et al. (1993), foram calculados em k_{int} = 1,4 e $k_{ext} = 0{,}36$, em unidade de L_{Sol}/UA. Isto é o equivalente a dizer que se tais exoplanetas fossem posicionados no sistema solar às distâncias correspondentes do Sol,

suas superfícies receberiam, respectivamente *140%* e *36%* do fluxo solar que chega na Terra. Em comparação com o método adotado no modelo original, onde os valores são de k_{int} = 1,1 e k_{ext} = *0,53* para os fluxos efetivos, uma estimativa muito mais otimista. Calculando-se dessa maneira os limites da ZH do Sol, foram obtidos, consequentemente, valores mais otimistas, resultando em uma zona habitável maior, como mostra a tabela 2.1.

Zona Habitável do Sol			
Kasting et al, 1993		Este trabalho	
k_{int}	k_{ext}	k_{int}	k_{ext}
1,1	0,53	1,4	0,36
r_i (UA)	r_e (UA)	r_i (UA)	r_e (UA)
0,95	**1,37**	**0,85**	**1,67**

Tabela 2.1: ZH no sistema solar em uma visão conservadora e na versão deste trabalho.

Para se ter uma ideia melhor do que isso realmente significou, foi feita uma representação gráfica realista das órbitas dos planetas internos do sistema solar, considerando-se todos os seus elementos orbitais, obtidos em Williams (2005). O resultado é mostrado na figura 2.1, onde a ZH está representada em cada caso.

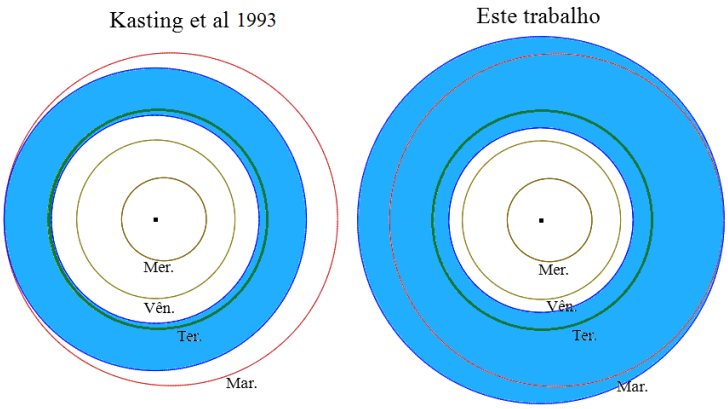


Figura 2.1: Comparação ilustrativa da ZH do Sol no modelo original e neste trabalho.

Com esta figura pode-se ver que, para a hipótese feita para o limite externo da ZH, dentro do sistema solar haveria mais um planeta, além da Terra, potencialmente habitável, Marte. Porém, Marte não segue a hipótese de planeta com atmosfera semelhante à da Terra em composição e nem mesmo em termos de pressão. Entretanto, este resultado sugere que se a Terra estivesse na órbita de Marte, talvez ainda fosse habitável.

2.1.2 Zona Habitável em sistemas extra-solares

O mesmo método desenvolvido na seção 2.1.1 para o cálculo da ZH do Sol foi aplicado então para um conjunto de estrelas com exoplanetas já detectados e confirmados. Foram escolhidos dois grupos de estrelas, um de quatro sistemas obtidos

diretamente do catálogo de exoplanetas confirmados do Extrasolar Planets Encyclopaedia (2014) com base na lista de exoplanetas potencialmente habitáveis do Planetary Habitability Laboratory (2014) e outro com dez estrelas selecionadas da lista de alvos do projeto Nearby earth astrometric telescope (2012).

Para o primeiro grupo, foram escolhidos os sistemas GJ 667C, Kepler-186, Kepler-62 e Kapteyn`s por se tratarem de sistemas com exoplanetas cujas posições em relação à ZH já haviam sido indicadas por outros estudos (EOC 2014). Os exoplanetas dos dois sistemas observados pela missão Kepler (NASA) não possuíam dados de excentricidade disponíveis na fonte utilizada neste trabalho (The Extrasolar Planets Encyclopaedia 2014), e esses valores foram considerados nulos para esses casos. As quatro estrelas deste grupo possuem mais de um exoplaneta cada, sendo o sistema GJ 667C o mais populoso, com seis planetas já detectados. Kepler-186 e Kepler-62 possuem cinco cada um e o sistema Kapteyn`s contém dois exoplanetas já detectados até o momento de confecção deste trabalho. No total, apenas estes quatro sistemas juntos possuem 12 exoplanetas com massas estimadas em até $5 \cdot M_T$ (superterras) e, com base em estimativas de massa a partir do raio medido e da hipótese de planetas rochosos, pelo menos 5 com massas de aproximadamente $1 \cdot M_T$, sendo portanto, considerados planetas do tipo terrestre.

Os sistemas planetários do segundo grupo, retirados da lista do projeto NEAT, cuja definição até o ano de 2012 era de que esta seria composta das 200 estrelas F, G e K mais próximas do Sol e que já possuíssem exoplanetas conhecidos, mesmo que fossem apenas gigantes gasosos. Foram então escolhidos 10 desses sistemas para se calcular a zona habitável circum-estelar de acordo com os critérios definidos na secção 2.1.1. Estas foram as estrelas 47 UMa, 55 Cnc, 61 Vir, eps Eri, HD 10647, HD 147513, HD 3651, HD 69830, mu Ara e ups And, sendo que todas possuem exoplanetas gigantes ao seu redor. Destes, sete são sistemas múltiplos, com até cinco exoplanetas confirmados, como é o caso de 55 Cnc.

Para se calcular os limites da ZH de uma estrela com este método (equação 2.1.1.2), foi necessário conhecer o valor da luminosidade das estrelas em questão. Porém, a fonte utilizada para os dados das estrelas (The Extrasolar Planets Encyclopaedia 2014) não fornece estimativas da luminosidade, apenas a massa e o tipo espectral das estrelas. Assim, foi preciso utilizar a relação massa-luminosidade para estrelas da sequência principal (Nebojsa 2004) de acordo com as seguintes expressões:

$$\frac{L}{L_\odot} = \left(\frac{M}{M_\odot}\right)^4 \quad \text{, para } M > 0{,}43 \cdot M_\odot \qquad (2.1.2.1)$$

$$\frac{L}{L_\odot} = 2{,}23 \cdot \left(\frac{M}{M_\odot}\right)^{2{,}3} \quad \text{, para } M < 0{,}43 \cdot M_\odot \qquad (2.1.2.2)$$

onde as luminosidades e massas estelares são dadas em unidades solares. Assim, juntamente com os dados de semi-eixo maior *a* e excentricidade *e* dos exoplanetas, foi possível calcular as zonas habitáveis dessas estrelas e relacioná-las com as órbitas de seus respectivos planetas. O resultado é apresentado nas figuras 2.2 a 2.8, onde as ZHs estão em azul claro, seus erros, devidos às incertezas nos valores da massa das estrelas, estão em azul escuro e as órbitas dos exoplanetas estão indicadas pelas respectivas letras de seus nomes de acordo com a classificação das estrelas.

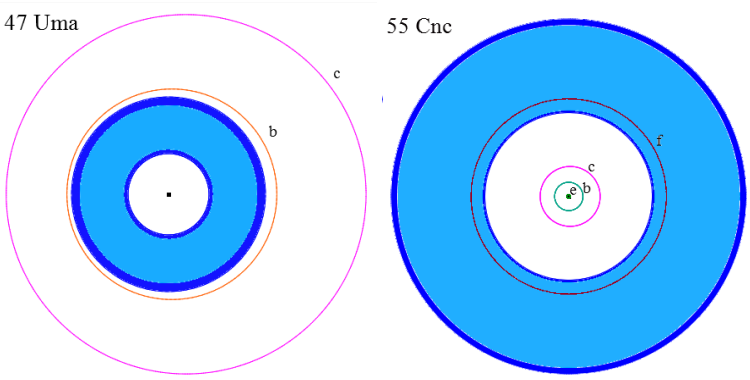


Figura 2.2: ZH e órbitas dos exoplanetas dos sistemas 47 Uma e 55 Cnc.

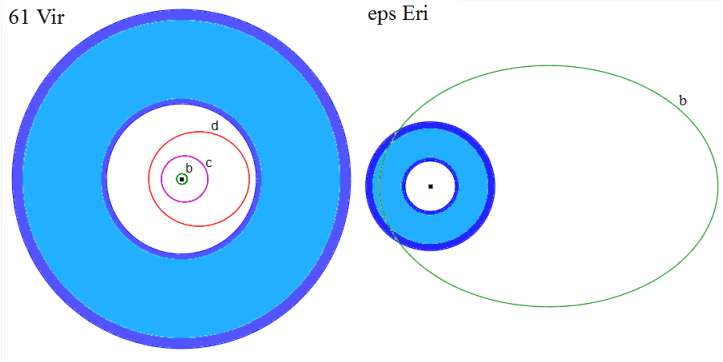


Figura 2.3: ZH e órbitas dos exoplanetas dos sistemas 61 Vir e eps Eri.

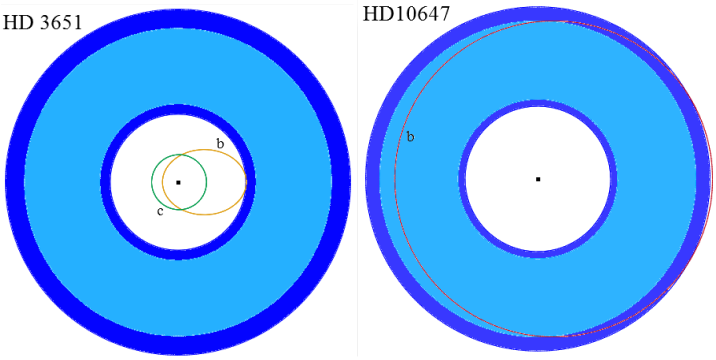


Figura 2.4: ZH e órbitas dos exoplanetas dos sistemas HD 3651 e HD 10647.

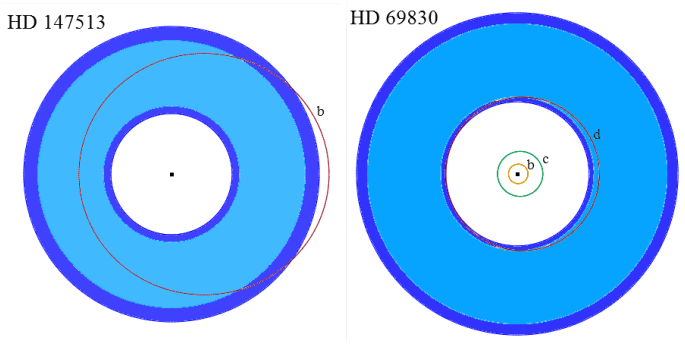


Figura 2.5: ZH e órbitas dos exoplanetas dos sistemas HD 147513 e HD 69830.

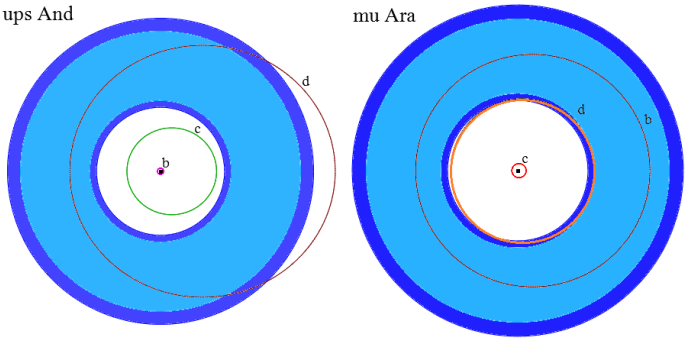


Figura 2.6: ZH e órbitas dos exoplanetas dos sistemas ups And e mu Ara.

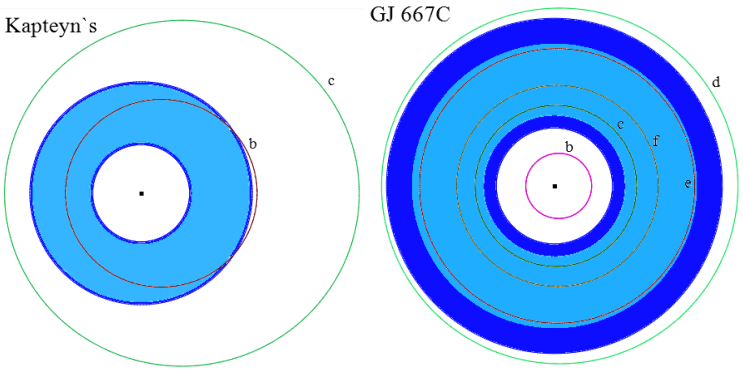


Figura 2.7: ZH e órbitas dos exoplanetas dos sistemas Kapteyn`s e GJ 667C.

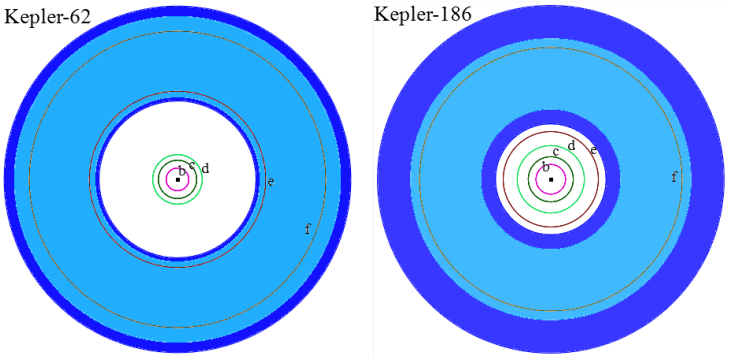


Figura 2.8: ZH e órbitas dos exoplanetas dos sistemas Kepler-62 e Kepler-186.

A partir das figuras 2.2 até 2.6 pode-se notar que, dentre todos os exoplanetas dos sistemas do segundo grupo (do projeto NEAT), um total de 8 se encontram dentro, ou parcialmente dentro, da ZH de suas respectivas estrelas. Desses, porém, apenas 4 ficam constantemente dentro dos limites da ZH. Entretanto, todos os exoplanetas deste segundo grupo são planetas gigantes, provavelmente gasosos, como mostra a tabela 2.2, onde são indicadas as massas desses 8 que ficam, pelo menos por algum tempo de sua translação, dentro da ZH de sua estrela.

Exoplaneta	M (M_J)	M (M_T)	Exoplaneta	M (M_J)	M (M_T)
55 Cnc f	0,144 (4)	46 (1)	HD 69830 d	0,058	18
eps Eri b	1,6 (2)	509 (64)	mu Ara b	1,676	533
HD 10647 b	0,9 (2)	286 (64)	mu Ara d	0,522	166
HD 147513 b	1,21	385	ups And d	10,19	3239

Tabela 2.2: Massas dos exoplanetas gigantes do segundo grupo.

Assim, devido as suas grandes massas em comparação com a da Terra, pode-se afirmar que esses exoplanetas em questão não poderiam ser habitáveis, especialmente se forem gasosos, pois neste caso então nem haveria uma superfície para abrigar água líquida para o surgimento da vida. Entretanto, exatamente como os planetas gigantes gasosos do sistema solar, estes poderiam também possuir luas, ou neste caso exoluas. Uma vez que estes planetas, ou pelo menos os quatro que ficam efetivamente dentro da ZH de suas estrelas, 55 Cnc f, HD 10647 b, HD 69830 d e mu Ara b, estão dentro dos limites em que um corpo semelhante à Terra poderia abrigar grandes quantidades de água líquida em sua superfície, se eles possuírem exoluas parecidas com a Terra, estas então poderiam ser habitáveis. Isto, porém, é apenas um dos fatores que influenciariam na habitabilidade de uma exolua - necessário, mas não suficiente. Outros fatores importantes, como o alinhamento dos três corpos (lua, planeta e estrela), o efeito de maré do exoplaneta sobre a exolua ou a interação desta com o campo magnético do planeta gigante devem ser levados em consideração para se definir precisamente os critérios necessários. Porém, os pontos mais cruciais são que a exolua, assim como seu exoplaneta, esteja dentro da zona habitável circum-estelar e que possua uma atmosfera capaz de, nessas condições, manter grandes porções de água líquida na superfície da lua. Garantidos estes dois fatores, ou outros serviriam para ajudar a filtrar e deixar cada vez mais realista um modelo de habitabilidade de exoluas.

Quanto aos quatro sistemas planetários do primeiro grupo, pelas figuras 2.7 e 2.8 pode-se ver que apenas aqui existem sete exoplanetas totalmente ou parcialmente dentro da ZH de suas estrelas, sendo que desses, seis estão completamente dentro. Além disso, nos sistemas desse grupo a maioria dos planetas é de baixa massa, sendo 12 deles considerados como superterras. Este fato pode ser melhor visualizado na tabela 2.3, onde estão indicados os casos de exoplanetas com massas de até $5 \cdot M_T$ e raios de até $2 \cdot R_T$ que, ao mesmo tempo, estão pelo menos parcialmente dentro da ZH de suas estrelas.

Exoplaneta	M (M_T)	R (R_T)	Tempo dentro da ZH
GJ 667C c	4	-	100%
GJ 667C e	3 (2)	-	100%
GJ 667C f	3 (1)	-	100%
Kepler-62 e	-	1,61	100%
Kepler-62 f	-	1,41	100%
Kepler-186 f	-	1,11	100%
Kapteyn`s b	5 (1)	-	83%

Tabela 2.3: Massas e raios dos exoplanetas "terrestres" do primeiro grupo.

Aqui vemos então que no total das 14 estrelas consideradas nesta parte do trabalho, foram já detectados até o momento, pelo menos 6 exoplanetas potencialmente habitáveis. É preciso, entretanto, que se enfatize o caráter especulativo desta afirmação. Esses seis primeiros exoplanetas da tabela 2.3, que estão constantemente dentro da ZH e que, ao mesmo tempo, possuem uma massa ou um raio equivalente ao de uma superterra, são de fato fortes candidatos a planetas habitáveis, devido a estas características. Porém, ainda seria necessário analisar outros fatores para se determinar melhor sua habitabilidade, como, por exemplo, se possuem uma atmosfera e, se sim, sua composição química e tamanho. Mesmo ainda sem levar isto em consideração, para o caso dos exoplanetas dos sistemas Kepler-62 e Kepler-186 um parâmetro crucial que ainda não foi medido até este momento é a excentricidade das órbitas. Isto pode afetar radicalmente a habitabilidade de um planeta, pois se apenas seu semi-eixo maior indica uma posição favorável dentro da ZH, se sua excentricidade for muito grande, este planeta passaria muito tempo fora dessa zona de temperaturas favoráveis, sendo assim potencialmente não habitável. Dessa forma, na Tabela 2.3 verifica-se que os melhores candidatos a exoplanetas habitáveis desta presente lista, seriam os planetas *c*, *e* e *f* do sistema GJ 667C.

2.2 Zonas habitáveis em estrelas binárias

Para o cálculo das zonas habitáveis em sistemas binários do tipo S, como na figura 1.10, foi considerado que cada componente estelar teria sua própria ZH, como calculada na Secção 2.1.1, mas que esta seria periodicamente perturbada pela presença da outra estrela do par. Dessa forma, os limites da ZH da estrela primária foram calculados com valores de constantes de fluxo de $k_{int} = 1,1$, como em Kasting et at. (1993), (decidiu-se utilizar para o limite interno da ZH nesta parte um valor mais conservador) e $k_{ext} = 0,36$ como na Secção 2.1, porém, desta vez, considerando-se o fluxo total, devido às duas estrelas, que chega na superfície de um exoplaneta orbitando a primária dentro de sua ZH. O método utilizado aqui para calcular a perturbação que uma estrela causa na ZH da outra foi um Global Radiative Balance Model (GRBM), uma simplificação do 1D Latitudinal Energy Balance Model (LEBM) apresentado em Forgan (2012). Decidiu-se trabalhar aqui apenas com uma simplificação do LEBM devido ao tempo envolvido para o término deste trabalho.

O princípio do método utilizado neste trabalho foi considerar que o exoplaneta - que além de ser semelhante à Terra quanto à composição química de sua atmosfera, deveria ter também a mesma proporção entre oceanos e continentes em sua superfície – estaria em uma órbita circular ao redor da estrela para a qual se está calculando a ZH. Um esquema representativo desta situação, que foi utilizada igualmente para as duas componentes do sistema binário, é ilustrado na figura 2.9, onde $a_{mín}$ é a separação mínima entre as duas estrelas, a é o semi-eixo maior da órbita da secundária B ao redor da primária A, definida com uma elipse em que um dos focos é ocupado pela primária estacionária. O exoplaneta é representado pela letra p e sua distância r_A até a primária é constante (da hipótese de órbita circular), enquanto que sua distância r_B até a secundária varia com o tempo, uma vez que r_A é considerável (se $a_{mín}$ não for muito grande) e a excentricidade do sistema nem sempre pode ser considerada nula.

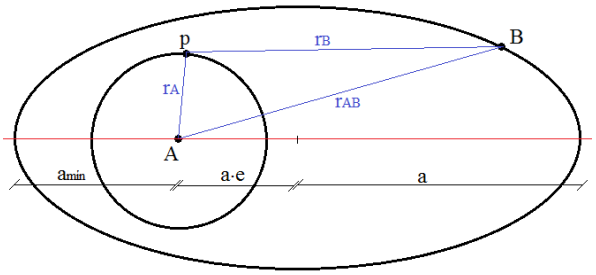


Figura 2.9: Relação entre as órbitas de um sistema binário.

Uma das características deste modelo é a de que a atmosfera do exoplaneta foi considerada como tendo uma única temperatura global, sem variação com a latitude, o que não representa totalmente a realidade, mas que serve como uma primeira aproximação do problema real. Dessa forma, o método basicamente consistiu em resolver a seguinte equação que dá a temperatura média global da atmosfera do exoplaneta em função do tempo:

$$C \cdot \frac{dT}{dt} = S(t) \cdot \big(1 - A(T)\big) - I(T) \tag{2.1.1}$$

onde $T = T(t)$ é a temperatura em função do tempo, $S(t)$ é o fluxo somado das duas estrelas que chega no exoplaneta, $A(T)$ é o albedo planetário, $I(T)$ é a função de resfriamento no infravermelho e C é a capacidade térmica efetiva da atmosfera. Tanto o albedo planetário como o resfriamento no infravermelho são funções da temperatura T, enquanto que o fluxo somado das duas estrelas é uma função do tempo, através da distância r_B, que varia no tempo, como é mostrado nas fórmulas a seguir.

$$C = 0{,}3 \cdot C_{terra} + 0{,}7 \cdot C_{oceano} \tag{2.1.2}$$

$$C_{terra} = 5{,}25 \cdot 10^6 \frac{J}{m^2 \cdot K} \;\; ; \; C_{oceano} = 40 \cdot C_{terra} \tag{2.1.3}$$

$$A(T) = 0{,}525 - 0{,}245 \cdot \tanh\left(\frac{T-268}{5}\right) \tag{2.1.4}$$

$$I(T) = \frac{\sigma \cdot T^4}{\left(1+0{,}593\cdot\left(\frac{T}{273}\right)^3\right)} \tag{2.1.5}$$

$$S(t) = S_A + S_B = 1360 \cdot \left(\left(\frac{M_A}{M_\odot}\right)^4 \cdot \left(\frac{UA}{r_A}\right)^2 + \left(\frac{M_B}{M_\odot}\right)^4 \cdot \left(\frac{UA}{r_B}\right)^2\right) \tag{2.1.6}$$

Nessas expressões, $\sigma = 5{,}67\cdot 10^{-8}\ W\ m^{-2}\ K^{-4}$ é a constante de Stefan-Boltzmann, C_{terra} e C_{oceano} são, respectivamente, as capacidades térmicas estimadas para as porções de continentes e de oceanos na superfície do exoplaneta, com valores obtidos de médias observadas no planeta Terra, a temperatura T é dada em K e M_A e M_B são as massas das estrelas. Pode-se notar na equação 2.1.6 que a relação massa-luminosidade utilizada aqui foi a mesma que a da expressão 2.1.2.1 para estrelas com massas maiores que $0{,}43\cdot M_\odot$, como é o caso tanto de Alfa Cen A como Alfa Cen B, que possuem massas de $M_A = 1{,}105(7)\cdot M_{Sol}$ e $M_B = 0{,}934(7)\cdot M_{Sol}$.

Para o caso em que a separação mínima entre as estrelas fosse muito maior que as órbitas planetárias mais externas para as zonas habitáveis isoladas de cada estrela, e considerando-se apenas órbitas planetárias circulares, a temperatura T seria uma constante. Porém, quando as estrelas estão relativamente próximas, mesmo que a excentricidade da órbita da secundária fosse nula, a temperatura do planeta ainda oscilaria devido à presença da secundária, já que as velocidades angulares deles seriam diferentes. Entretanto, neste trabalho foi estudado o caso do sistema Alfa Centauri AB, que possui uma separação mínima de $a_{mín} = 11{,}41(2)\ UA$, que não é muito maior que os limites externos das ZH individuais dessas estrelas, calculadas considerando-as isoladas, além de ter uma excentricidade de $e = 0{,}5179(8)$, que é razoavelmente grande. Assim, foi preciso resolver a equação 2.1.1 considerando-se as distâncias envolvidas, como na figura 2.9, sem essas aproximações.

Para resolver essa equação diferencial, foi então aplicado um algoritmo de Runge-Kutta com passo $h = 0{,}1\ ano$, para se obter uma boa resolução, dado que o período da secundária ao redor da primária é de $P_B = 79{,}91(1)\ anos$, e com o tempo t indo de 0 a $5\cdot P_B$. O valor inicial de temperatura colocado para as órbitas interna e externa foram de $T = 363\ K$ e $T = 283\ K$. Para a ZH de cada uma das estrelas do par foi feita uma iteração para cada uma das duas órbitas limites, nos extremos interior e exterior, calculados com base no caso das estrelas isoladas. Os valores obtidos para os primeiros *50 anos* de iteração foram ignorados, pois até então o algoritmo ainda estava se estabilizando e, a partir de $t = 400\ anos$ não se observou nenhuma alteração no padrão de oscilação da temperatura. Dessa forma, os resultados obtidos são apresentados na figura 2.10, com o tempo variando de *50* até *400 anos*.

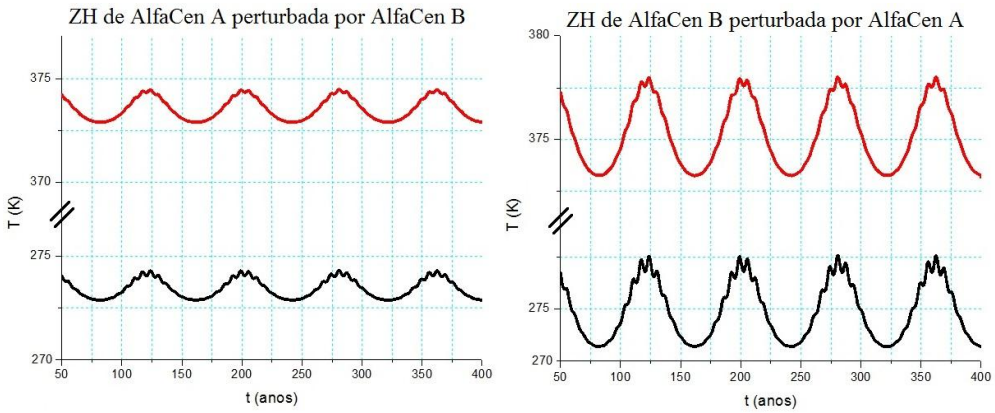


Figura 2.10: Perturbações causadas pela estrela secundária na ZH da primária. As órbitas internas correspondem às curvas em vermelho e as externas às em preto.

A partir dos gráficos de temperatura em função do tempo, obtidos dessa maneira, para exoplanetas nas quatro órbitas limites desse sistema binário pode-se distinguir duas oscilações distintas, porém acopladas em todos os casos. A de menor amplitude e período, provavelmente, é devida à variação da distância r_B do planeta até a estrela secundária enquanto este orbita a primária, pois o período da órbita do planeta ao redor de sua estrela é muito menor que o período da secundária ao redor da primária e é praticamente igual ao período dessa oscilação. Uma aproximação desta situação seria o caso de considerar que a estrela secundária ficaria praticamente parada em relação à primária durante algumas poucas oscilações deste ao redor da primária. Entretanto, como a órbita da secundária nesse sistema tem uma excentricidade grande, a amplitude dessa oscilação de segunda ordem também varia com o tempo, tendo seus máximos coincidindo com os momentos de separação mínima entre as duas estrelas e seus mínimos equivalendo às maiores separações. Enquanto que a oscilação de maior amplitude e período deve estar relacionada com a órbita da estrela secundária ao redor da primária, pois seus picos, assim como no caso da oscilação de menor amplitude, são compatíveis com as aproximações máximas entre as estrelas.

Esta simulação mostrou também que para o caso específico do sistema binário Alfa Centauri AB as zonas habitáveis de cada estrela são afetadas com intensidades diferentes. Na figura 2.10 pode-se ver que a perturbação que Alfa Cen A causa na ZH de Alfa Cen B é cerca de 2 vezes maior que a perturbação que B causa na ZH de A. No primeiro caso, a maior variação de temperatura que se observou, decorrente da aproximação máxima das duas estrelas a cada órbita do sistema binário, foi de cerca de 4,5 K para as duas órbitas limites da ZH de Alfa Cen B. No segundo caso, onde Alfa Cen B perturba a ZH de A, essa variação máxima de temperatura foi de 1,5 K, também para as duas órbitas limites da ZH de Alfa Cen A. Essa diferença é devida ao fato de que a luminosidade absoluta de Alfa Cen A é quase o dobro da de Alfa Cen B.

Uma consequência dessas variações de temperatura causadas pela presença da estrela secundária é que a ZH da primária, como calculada neste trabalho, é efetivamente diminuída, para as duas estrelas. Como as temperaturas oscilam acima de

um patamar mínimo de *373 K* para as órbitas internas e de *273 K* para as órbitas externas, o limite interior da ZH é recuado, pois periodicamente a temperatura ultrapassa o limite de *373 K* (para a órbita limite interna), mas o limite exterior não sofreria alteração efetiva, pois só seria expandido temporariamente (enquanto a secundária estivesse próxima da separação mínima). Assim, apenas o limite inferior da ZH seria efetivamente afetado, aumentando de valor. Um esquema representativo dessa alteração do tamanho da zona habitável efetiva de uma estrela devido à presença da companheira é ilustrado na figura 2.11, onde os tamanhos das ZH e a separação mínima do sistema estão na mesma escala. A título de ilustração, apenas, foi também representado o único exoplaneta já detectado nesse sistema, o Alfa Cen B b, de massa aproximadamente terrestre, mas totalmente fora da ZH de Alfa Cen B, com um semi-eixo maior de *0,04 UA* e, portanto, muito quente para abrigar água líquida.

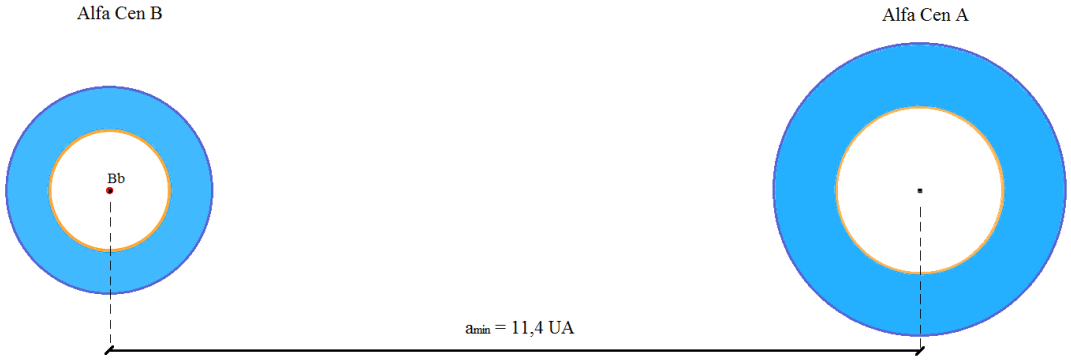


Figura 2.11: Esquema ilustrando a alteração na ZH devido à outra estrela. A região excluída está em laranja.

Na figura feita em escala, nesse tamanho, fica difícil ver a diferença, pois uma variação máxima de 4,5 K é muito pequena relativamente à variação total dentro da ZH que, como calculado aqui, seria de 100 K. Porém, na tabela a seguir são mostrados os valores calculados para os limites das ZH dessas estrelas das duas formas: isoladamente e com a correção feita para sistemas binários. Esses valores podem ser comparados com outros trabalhos (Forgan 2012), que vão de *0,666 UA* a *0,545 UA* para o limite interno e de 1,*24 UA* a *1,31 UA* para o limite externo da ZH de Alfa Cen B.

Estrela	ZH isolada		ZH efetiva	
	r_{int} (UA)	r_{ext} (UA)	r_{int} (UA)	r_{ext} (UA)
alf Cen A	1,16 (1)	2,04 (3)	1,18 (1)	2,04 (3)
alf Cen B	0,83 (1)	1,45 (2)	0,87 (1)	1,45 (2)

Tabela 2.4: Diferença nas bordas internas das ZH no sistema binário alfa Cen.

Ainda que essa diferença não altere consideravelmente o tamanho da ZH no caso desse sistema binário, da forma como esta foi calculada aqui, se fossem levados em consideração outros fatores, como em Forgan (2012), que utiliza um modelo 1D LEBM, então nesse caso mesmo uma pequena diferença máxima de *4,5 K* na temperatura média global do exoplaneta teria grande influência sobre a habitabilidade no sistema. Naquele

trabalho é considerada a variação da temperatura em função da latitude do planeta, o que leva a uma equação de difusão muito mais complexa que a expressão 2.1.1. Dessa forma, pode haver variações de habitabilidade não apenas com relação às distâncias dos exoplanetas às estrelas, mas também em cada exoplaneta, como planetas com somente uma fração de sua superfície habitável. Outra situação que poderia ocorrer nesse caso seria um mesmo exoplaneta possuir regiões apenas temporariamente habitáveis e outras capazes de manter água líquida na superfície indefinidamente. Contudo, além desses efeitos os possíveis habitantes de um planeta nesse sistema ainda sofreriam influência de um ciclo, descrito em Forgan (2012), de aproximadamente *80 anos* terrestres, fora o ciclo de seu próprio ano, devido à órbita da estrela secundária ao redor da primária.

Outro fator que deve ser considerado ao se avaliar a habitabilidade em um sistema binário, como descrito em Wiegert & Holman (1997) e Quintana et al. (2002, 2007), é a estabilidade das possíveis órbitas planetária do tipo S. Neste presente trabalho foi considerado, como em Forgan (2012), que nesse sistema as órbitas deveriam ter no máximo um semi-eixo maior de aproximadamente *2 UA*, como é ilustrado (linhas pontilhadas) na figura a seguir.

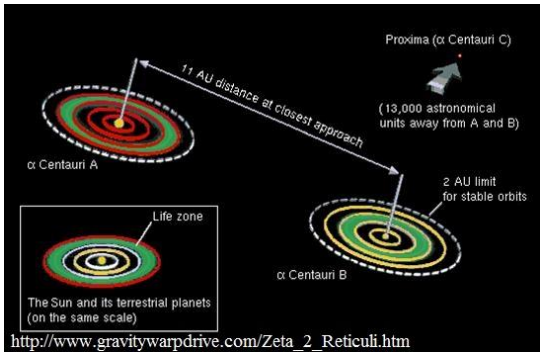


Figura 2.12: Limites de órbitas estáveis para o sistema Alfa Centauri.

2.3 Movimentos próprios no GBVOC

2.3.1 Pares de estrelas com movimentos próprios comuns

Nesta parte do trabalho, referente ao segundo semestre de 2014, foi feito inicialmente um estudo do catálogo astrométrico GBVOC. Este catálogo contém dados de ascensão reta (em *h:m:s*) e declinação J2000 (em *d:m:s*), movimento próprio em ascensão reta e declinação (ambos em *mas/ano*), magnitudes (em V_{mag}) e temperatura efetiva (em *K*), assim como seus respectivos erros medidos, para 11620 estrelas na direção do bojo galáctico. O objetivo deste trabalho foi primeiramente criar filtros que eliminassem do catálogo os dados de movimentos próprios com erros grandes e organizá-lo em ordem crescente de ascensão reta. Em seguida, então, foi feita a seleção dos grupos de estrelas com uma separação angular menor que dado valor limite e, ao mesmo tempo, com movimentos próprios semelhantes, estando todas essas etapas contidas no mesmo código escrito em Fortran.

O primeiro passo necessário realizado foi criar uma sub-rotina para ler o catálogo original e associar suas colunas de dados a matrizes de variáveis para serem trabalhadas dentro do programa. Em seguida, foram calculados os movimentos próprios totais, de acordo com a equação 1.4.1, de todas as estrelas, assim como seus respectivos erros propagados.

Para se determinar o valor limite dos erros relativos em μ_α e μ_δ a serem trabalhados em seguida, foram feitos três testes com, respectivamente, *50%*, *40%* e *30%* de erro máximo permitido, obtendo-se um total de 1579, 1014 e 514 estrelas para esses casos. Assim, decidiu-se trabalhar com um erro máximo em μ_α e μ_δ de *30%*, pois 514 objetos ainda era uma quantidade razoável para ser trabalhada nesta etapa, enquanto que para erros menores esse número ficaria escasso. Foi criado então um arquivo separado com essas 514 estrelas com erros relativos em μ_α e μ_δ menores que *30%*, sendo este então o arquivo utilizado até o final deste trabalho. Em seguida, a partir desses 514 objetos foi elaborado outro filtro, desta vez para selecionar as estrelas com movimento próprio total μ maiores que *100 mas/ano*, obtendo-se 17 estrelas com grande movimentos próprios neste catálogo.

Para colocar todos os dados do arquivo de trabalho (com as 514 estrelas já selecionadas) em ordem crescente de ascensão reta, foi preciso antes mudar o formato e trocar as unidades dos valores de α e δ, assim como seus respectivos erros, de *h:m:s*, *º:':''* e *mas* para graus, de forma também a deixar o arquivo mais organizado e padronizado. Após isso então foi possível organizá-lo em ordem crescente de α, para que o passo seguinte fosse facilitado. A partir desses dados foram então feitas representações gráficas dos movimentos próprios totais dessas 514 estrelas em função de suas posições na esfera celeste, abrangendo as 12 janelas de baixa extinção do catálogo, sendo uma delas mostrada na Figura 2.13 como exemplo. As demais figuras das janelas são apresentadas no Apêndice B..

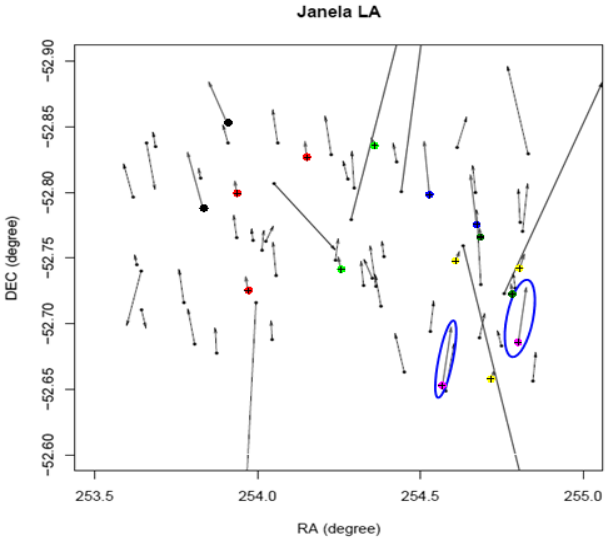


Figura 2.13: Uma das janelas do catálogo com os movimentos próprios representados por setas, com alguns exemplos de pares (em cores) e um deles circulado (em azul).

Em seguida então foi preciso definir dois critérios para a seleção dos pares, um para a separação angular máxima e outro para a similaridade entre os movimentos próprios. No primeiro caso, considerou-se como apropriado para uma primeira aproximação um valor de *15'* para a separação máxima entre estrelas do mesmo par, uma vez que já foram estudados casos de *12'* de separação (Teixeira et al 2008). Enquanto que, para avaliar se duas estrelas partilham o mesmo movimento próprio, foi considerado um critério inicial, que será aperfeiçoado no futuro, que impõe que o módulo da diferença entre os movimentos próprios em ascensão reta e em declinação fosse menor ou igual à soma dos módulos de seus respectivos erros. Da mesma forma, também é necessário que esses movimentos próprios tenham sinais iguais, para poderem ser compatíveis.

Com esses critérios então, foi produzido um arquivo final com 67 grupos contendo um total de 158 estrelas, que poderá ser utilizado numa possível continuação deste trabalho. Dentre estes grupos, a maioria é de duplas e trios, apesar de haver também grupos maiores, com até 4 estrelas. Alguns exemplos desses grupos são mostrados na figura 2.13 para uma das janelas do catálogo.

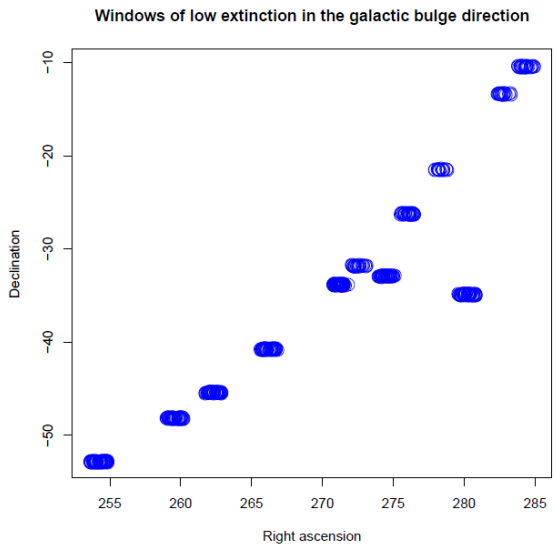


Figura 2.14: Todas as 12 janelas do catálogo, com as 514 estrelas do arquivo de trabalho.

Foram também feitos histogramas das distribuições de diferenças em μ, μ_α, μ_δ e V_{mag} dentro de cada grupo, afim de se visualizar as características cinemáticas e astrofísicas desses sistemas. Esses quatro histogramas são apresentados nas figuras a seguir, onde se pode ver que a distribuição de diferenças em magnitudes V_{mag} entre estrelas de um mesmo grupo tem um pico em *0,71(1) mag* para um ajuste gaussiano. Enquanto que para as diferenças em movimento próprio dentro dos grupos, esses picos ficaram em *1,61(8) mas/ano* para μ, *1,36(3) mas/ano* para μ_α e *1,64(6) mas/ano* para μ_δ. Isso mostra que para a maioria dos grupos a diferença em magnitude aparente de suas componentes é pequena, e pela figura 2.17 se vê que os picos das distribuições de

diferença em movimentos próprios são relativamente pequenos, se comparados com movimentos próprios de cada componente.

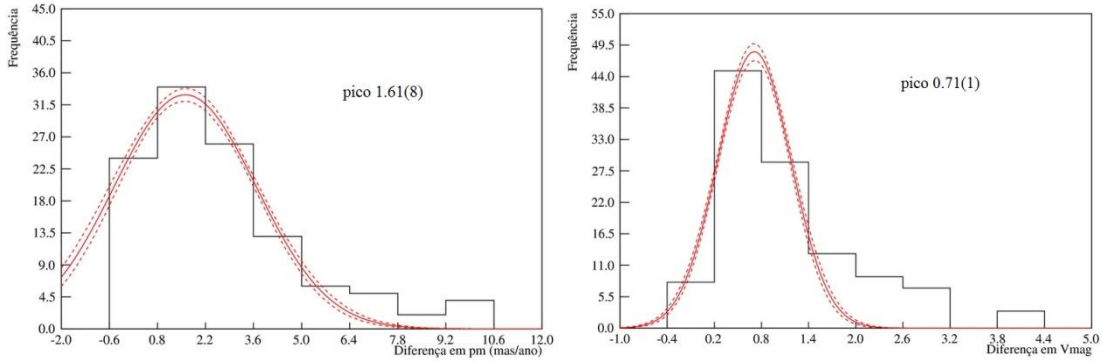


Figura 2.15: Histogramas de movimento próprio total e magnitudes para os 67 grupos.

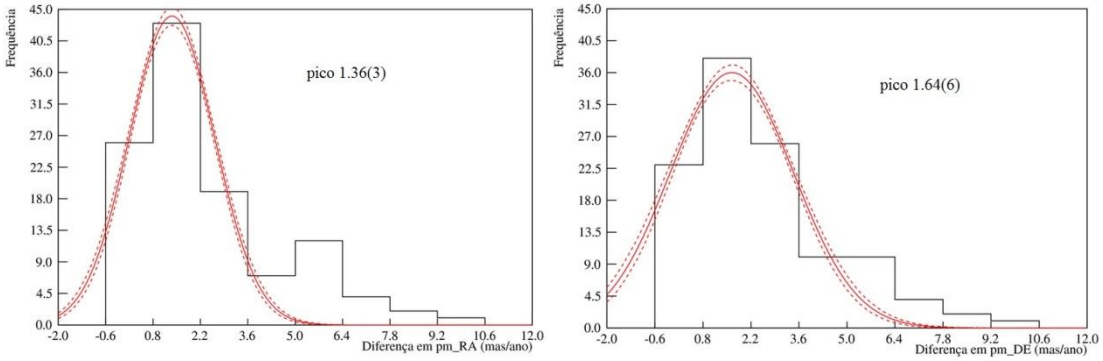


Figura 2.16: Histogramas de movimento próprio em α e δ para os 67 grupos.

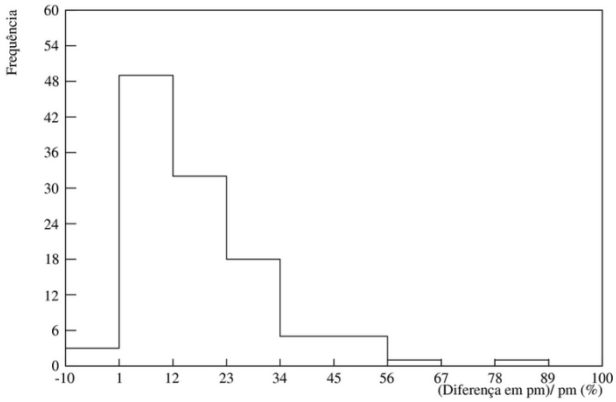


Figura 2.17: Relação entre as diferenças em movimento próprio total Δμ e μ para os grupos.

Dos histogramas de diferenças em movimentos próprios, podemos ver que as distribuições são semelhantes para componentes μ_α e μ_δ e para o o movimento próprio total μ. Isso indica que nessa amostra não há uma direção preferencial para essa velocidade e que, como seus picos são próximos de zero (para a maior parte dos grupos), em relação aos valores de cada estrela, existe uma possibilidade de se tratar de estrelas ligadas. Como essas diferenças são próximas de zero para a maioria dos grupos, então para estes, os movimentos próprios são realmente similares, enquanto que no

outros casos os erros são grandes o suficiente para permitir que essas diferenças grandes passem no filtro. Entretanto, como a quantidade de grupos com grandes diferenças é pequena em relação aos grupos com movimentos próprios similares, a maioria desses movimentos próprios tem erros pequenos.

Após uma análise detalhada dos dados e do próprio código do programa, observou-se que esses 67 grupos, porém, poderiam não ser os únicos possíveis de se encontrar neste arquivo de 514 estrelas. Este fato é devido ao critério utilizado aqui para a compatibilidade dos movimentos próprios. Este código selecionou apenas os pares de estrelas cujas diferenças entre as respectivas componentes μ_α e μ_δ de uma estrela com as da outra fossem menores que as somas de seus erros. Porém, pode haver um caso em que μ_α ou μ_δ das duas estrelas sejam muito próximos, mas por terem erros muito pequenos, não são selecionadas por este código. Isso pode ser melhor visualizado na figura a seguir, que mostra um caso hipotético em que um mesmo par de estrelas é analisado com dois erros diferentes, passando nesse filtro em apenas um caso.

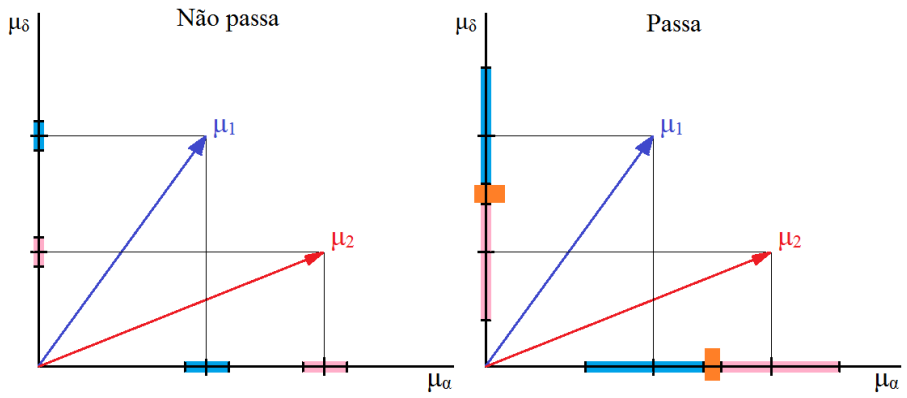


Figura 2.18: Com esse critério, um mesmo par de estrelas pode ser identificado ou não, dependendo do tamanho de seus erros em cada componente (em laranja está a intersecção).

Este fato mostra que o critério utilizado aqui ainda requer aperfeiçoamentos para resultar em um método mais abrangente para identificação de pares. Porém, mesmo que isso tivesse sido levado em consideração neste trabalho, ainda assim não se poderia afirmar que esses grupos de estrelas estão fisicamente ligados, pois aqui foi analisado apenas o movimento próprio (figura 1.4.1) desses objetos. Para se poder concluir se esses pares constituem sistemas binários gravitacionalmente ligados, seria preciso analisar também seus dados de velocidade radial, para se compor então a velocidade espacial total dessas estrelas. Dessa forma, a lista final produzida neste trabalho, contendo os 67 grupos de estrelas identificados poderá ser aprimorada e complementada no futuro com outras análises possíveis de serem feitas, como a de velocidades radiais, a fim de se determinar se estes seriam sistemas fisicamente ligados.

Capítulo 3

Conclusões e Perspectivas

3.1 Zonas Habitáveis em sistemas extra-solares

Na primeira parte deste trabalho foi utilizado um conceito de zona habitável circum-estelar já conhecido (Kasting et al. 1993), com base no fluxo de energia da estrela que chega até o exoplaneta, para sistemas extra-solares, porém com condições de contorno diferentes. A princípio, para o caso de estrelas isoladas, utilizou-se um critério que define o limite interior da ZH como a distância antes da qual não poderia haver água líquida na superfície do planeta em nenhuma situação, e o limite exterior como o ponto em que a partir do qual começaria a aumentar muito rapidamente a concentração de CO_2 na atmosfera, aumentando o albedo planetário e, assim, diminuindo drasticamente a temperatura global para abaixo do ponto de congelamento da água. Aplicando esse método para o próprio sistema solar, observou-se que também Marte, além da Terra, estaria contido na ZH do Sol. Fez-se então o mesmo para um conjunto de 14 estrelas escolhidas com base em listas previamente selecionadas do PHL e do NEAT. Com isso, observou-se que, desses sistemas, os exoplanetas que ficam parcial ou totalmente dentro da ZH de suas estrelas se dividem em dois grupos, um com 8 gigantes gasosos e outro com 7 superterras. Do primeiro grupo, como são todos planetas gasosos, sem uma superfície para abrigar água líquida, não são candidatos a planetas habitáveis. Porém, como estão dentro da ZH da estrela, se eles possuírem exoluas com atmosferas semelhantes à da Terra, essas luas poderiam então ser habitáveis. Enquanto que do segundo grupo, 6 exoplanetas estão completamente dentro de suas ZH e, ao mesmo tempo, possuem massa menor que $4 \cdot M_T$ ou raio menor que $2 \cdot r_T$, o que os caracterizariam como potencialmente habitáveis. Porém, desses 6, apenas 3 já possuem dados de excentricidade, tendo suas órbitas, portanto, conhecidas em relação à ZH. Estes três exoplanetas, que inclusive fazem parte do mesmo sistema GJ 667C *c*, *e* e *f*, são portanto os melhores candidatos a exoplanetas potencialmente habitáveis dessa lista.

Para a determinação da ZH em sistemas binários, foi utilizado um método semelhante ao descrito em Forgan (2012), que avalia as perturbações que uma estrela do par causa nos limites da ZH da outra. Aqui porém, foi feita uma aproximação para um modelo de temperatura global da atmosfera do exoplaneta como uma função tempo em uma órbita circular do tipo S deste ao redor da estrela primária, enquanto a secundária também orbita a primeira. Desta vez, porém, o critério escolhido para o limite interno da

ZH, que a estrela teria se estivesse isolada, foi adotado como em Kasting et al. (1993), de maneira mais conservadora e o método foi aplicado para o sistema binário Alfa Centauri AB. Dessa forma, observou-se que aparecem nas soluções duas oscilações distintas, uma com grande período e amplitude, e outra com período curto e amplitude pequena. A de maior duração foi identificada como sendo devida à aproximação secular da estrela companheira em relação à primária, aumentando gradativamente a temperatura média do planeta à medida que o sistema se aproxima da separação mínima, e depois diminuindo enquanto a secundária se afasta, tendo um período compatível com o período do sistema binário. Enquanto que a oscilação de menor magnitude se deve à variação da distância entre o planeta e a secundária no intervalo de uma órbita planetária ao redor da primária. Para esse sistema, a maior variação de temperatura observada na simulação foi de cerca de *4 K*, indicando que esse efeito talvez não fosse muito crítico nesse caso. Porém, como descrito em Forgan (2012), mesmo para essas pequenas variações de temperatura média global, se for considerado no modelo que a temperatura da atmosfera varia com a latitude do planeta, então surgem efeitos mais complexo, como a dependência no tempo da fração habitável da superfície de um mesmo exoplaneta. Nesse caso, esses efeitos criam diferentes classes de planetas habitáveis dentro de um único sistema binário.

3.2 Movimentos próprios no GBVOC

Nesta parte do trabalho, foram identificados grupos de estrelas angularmente próximas na esfera celeste e com movimentos próprios considerados equivalentes, dentro da amostragem de 11620 objetos do catálogo GBVOC. Para isso, foram primeiramente criados filtros que retirassem do catálogo os movimentos próprios com erros muito grandes, porém de modo que ainda restasse uma amostra razoável de candidatas para serem avaliadas. O arquivo de trabalho resultante continha 514 estrelas, para as quais foram então calculados os movimentos próprios totais e seus respectivos erros. A partir desse arquivo, foram definidos critérios iniciais para o que seria uma separação angular e uma similaridade em movimentos próprios compatíveis com um sistema potencialmente ligado. O valor de separação angular foi então definido em 15’, enquanto que se considerou que para duas estrelas possuírem movimentos próprios compatíveis, as duas componentes μ_α e μ_δ deveriam ter diferenças menores que a soma de seus erros, de uma estrela para a outra. Dessa forma, obteve-se uma lista final com 67 grupos, de 2 a 4 componentes cada e 158 estrelas no total, distribuídos entre as 12 janelas do catálogo.

Analisando as distribuições das diferenças em movimento próprio e em suas componentes para as estrelas nesses 67 grupos, observou-se que não havia nenhuma direção preferencial para essas diferenças, o que já era esperado, e que para a maioria dos casos, essas diferenças se aproximam de zero, indicando que talvez sejam pares físicos. Outro fato observado nesses histogramas é que para uma minoria dos casos, em

que as diferenças em movimentos próprios são grandes, os erros foram grandes o bastante para deixar passar pelo filtro essas grandes diferenças.

Também se percebeu que alguns pares de estrelas podem não ter sido selecionados pelo código pelo fato de terem erros muito pequenos, apesar de terem movimentos próprios muito parecidos. De acordo com este método, se a soma dos erros for menor que a diferença entre os movimentos próprios, o par não passa no filtro. Dessa forma, para se ter um método mais abrangente na identificação de pares, esse critério deve ser aprimorado em uma futura continuação deste trabalho. Porém, mesmo que o código considere esses casos no filtro, ainda seriam necessárias outras análises, como acrescentar as medidas de velocidade radial e distância, para determinar se um grupo está ou não fisicamente ligado.

Referências Bibliográficas

Boczko, R., Conceitos de astronomia, 1984

Bruno, G. , On the Infinite Universe and Worlds, 1584

Campbell et al, A search for substellar companions to solar-type stars, 1988

Campbell et al., A planetary companion to gamma Cephei A., 2003

Djorgovski, G., Kepler's Laws, Binaries, and Stellar Masses, 2004

Dominici T., Teixeira R., Horvath J. E., Medina-Tanco G. And Benevides-Soares P., 1999, A&AS, 136, 261.

Dumusque, X. et al., An Earth-mass planet orbiting α Centauri B, 2012

EOC, Exoplanet Orbital Catalog, 2014, from Planetary Habitability Laboratory

Epicuro, s. d., http://www.epicurus.net/en/herodotus.html

Fenner, Y. s. d., http://www.solstation.com/habitable.htm

Oliveira Filho, K. de S. O. e Saraiva, M. de F. O., Astronomia e Astrofísica, 2007

Forgan, D., Oscillations in the Habitable Zone around alpha Centauri B, 2012

Heintz, W.D., The Binary Star 70 Ophiuchi Revisited, 1988

Hog et al., The Tycho-2 catalogue of the 2.5 million brightest stars , 2000

Janson,M., Bergfors, C., Goto, M., Brandner,W. e Lafreniere, D., Spatially resolved spectroscopy of the exoplanet HR 8799 c, 2010

Kalas, P. et al., Optical Images of an Exosolar Planet 25 Light-Years from Earth, 2008

Kasting, J. F., Whitmire D. P. e Reynolds, R. T., Habitable Zone around Main Sequence Stars, 1993

Hartkopf et al., 2001, AJ 122, 3472

Kipping, D. M., The Transits of Extrasolar Planets with Moons, 2011

NASA/Kepler Mission, Berry D., 2009

Morris, T. E., Astronomical Circumstances, 1999

Nebojsa, D., Advanced astrophysics, 2004, Cambridge University Press

Nearby Earth Astrometric Telescope (NEAT), Malbet, F. et al, 2012

Lima Neto, G. B., Astronomia de posição, Notas de aula, 2011

Planetary Habitability Laboratory, 2014, http://phl.upr.edu/

Quintana E. V., Adams F. C., Lissauer J. J., Chambers J. E., 2007, ApJ, 660, 807

Quintana E. V., Lissauer J. J., Chambers J. E., Duncan M. J., 2002, ApJ, 576, 982

Sagan, C. e Shklovskii, I.S., Intelligent Life in the Universe, 1977, Picador, p. 229.

Shapley, H., Liquid Water Belt, 1953

Stevenson, D., Europa's Ocean--the Case Strengthens, 2000

Strughold, H., The Green and the Red Planet: A Physiological Study of the possibility of Life on Mars, 1953

Teixeira, R., Ducourant, C., Chauvin, G., Krone-Martins, A., Song, I. e Zuckerman, B. 2008, A&A, 489, 825–827

Teixeira, R., Galli, P.A.B., Benevides-Soares, P. et al., 2011, A&A, 534, A91

Teixeira, R., Galli, P.A.B., Le Camion, J.F. et al., 2013, RevMexAA (Serie de Conferência), 43

The Extrasolar Planets Encyclopaedia, December 8, 2014, from http://exoplanet.eu/

Wallace, A. R., Is Mars habitable?, London, Macmillan and co., 1907

Wiegert P. A., Holman M. J., 1997, The Astronomical Journal, 113, 1445

Williams, D. R., Planetary Fact Sheets, 2005, NASA

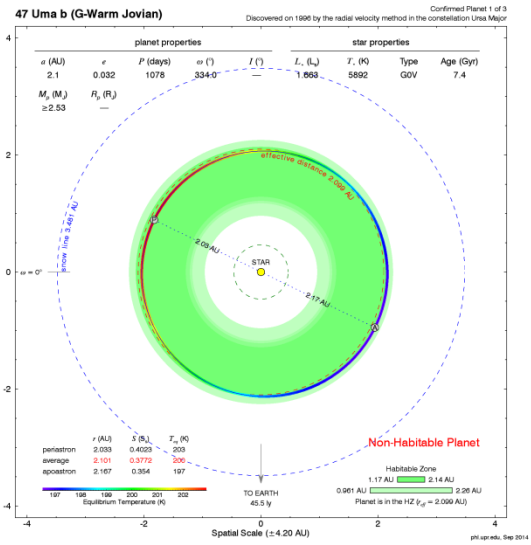
Wolszczan, A., Confirmation of Earth-Mass Planets Orbiting the Millisecond Pulsar PSR B1257 + 12, 1994

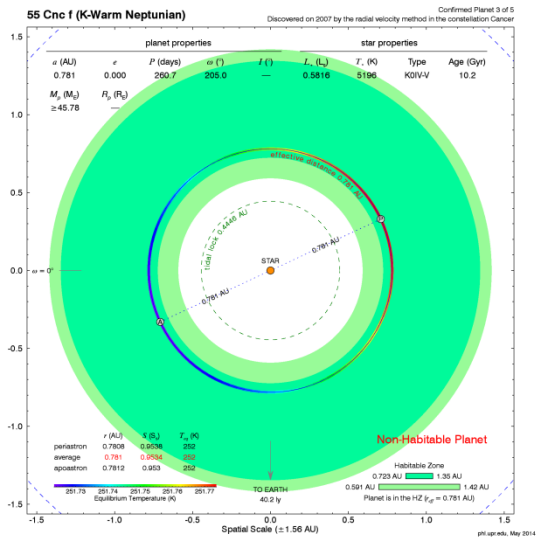
Wyatt M. C., Clarke C. J., Greaves J. S., 2007, MNRAS, 380, 1737

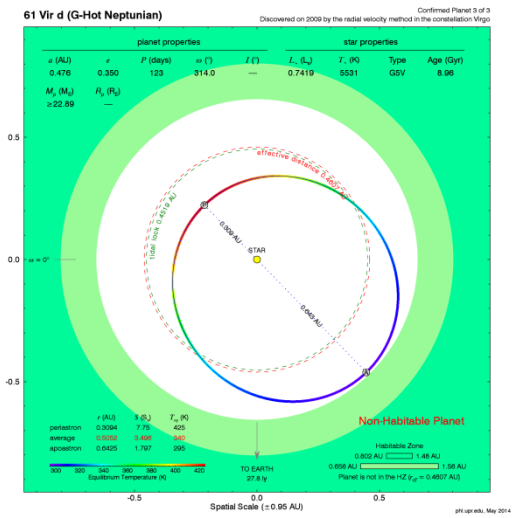
Apêndice A

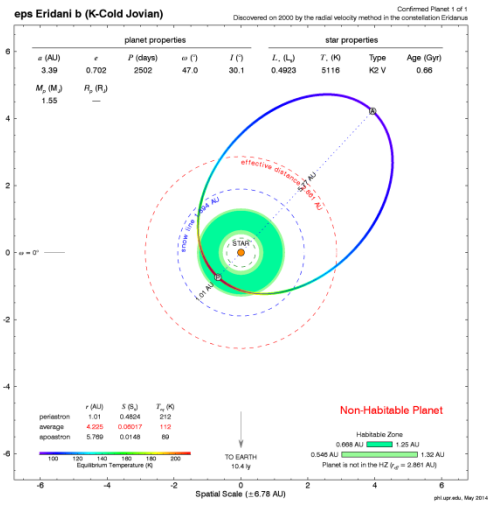
Figuras para comparação das ZH de estrelas isoladas

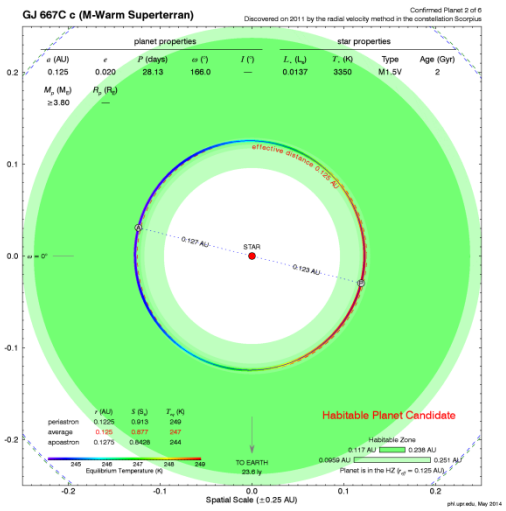
As figuras a seguir representam as zonas habitáveis das estrelas estudadas neste presente trabalho e foram retiradas do Planetary Habitability Laboratory (2014).

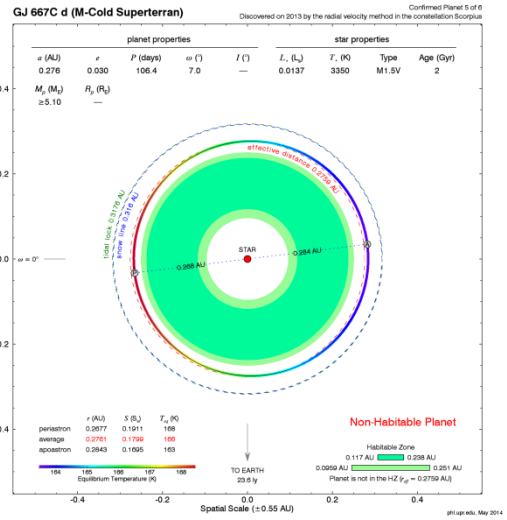


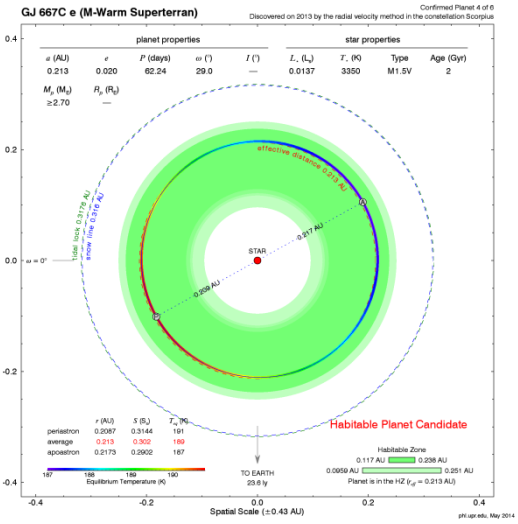


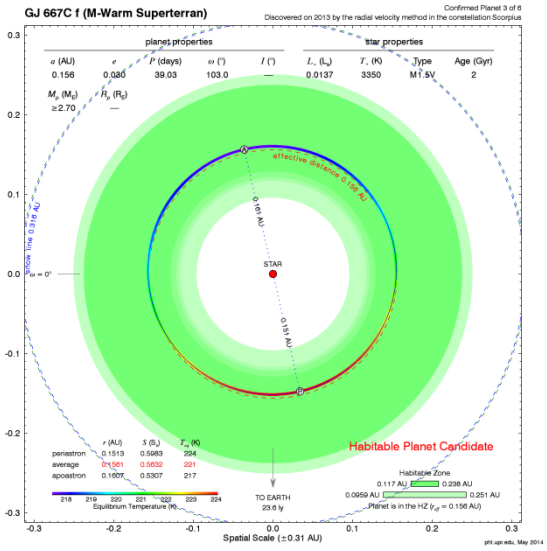


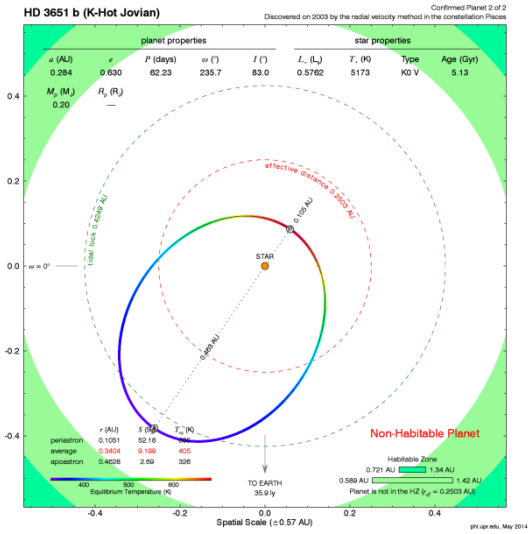


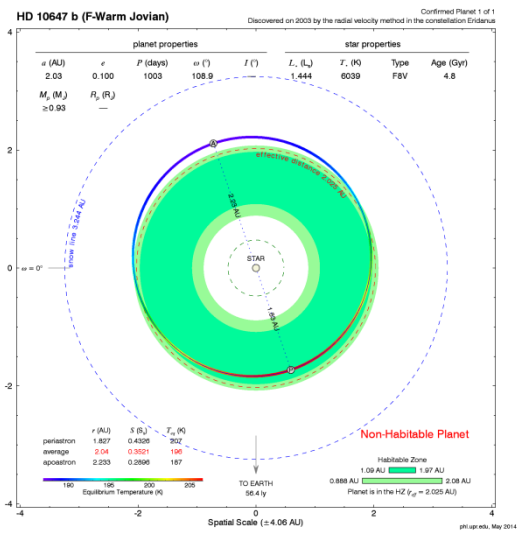

GJ 667C c (M-Warm Superterran)
Confirmed Planet 2 of 6
Discovered on 2011 by the radial velocity method in the constellation Scorpius
planet properties
star properties
a (AU) e P (days) ω (°) I (°) L* (L☉) T* (K) Type Age (Gyr)
0.125 0.020 28.13 166.0 — 0.0137 3350 M1.5V 2
Mp (M⊕) Rp (R⊕)
≥3.80 —
effective distance 0.125 AU
0.127 AU
0.123 AU
STAR
ω = 0°
r (AU) S (S⊕) Teq (K)
periastron 0.1325 0.913 249
average 0.125 0.877 247
apoastron 0.1175 0.8428 244
Equilibrium Temperature (K)
TO EARTH
23.6 ly
Habitable Planet Candidate
Habitable Zone
0.117 AU 0.238 AU
0.0959 AU 0.251 AU
Planet is in the HZ (rp,eff = 0.125 AU)
Spatial Scale (±0.25 AU)
phl.upr.edu, May 2014

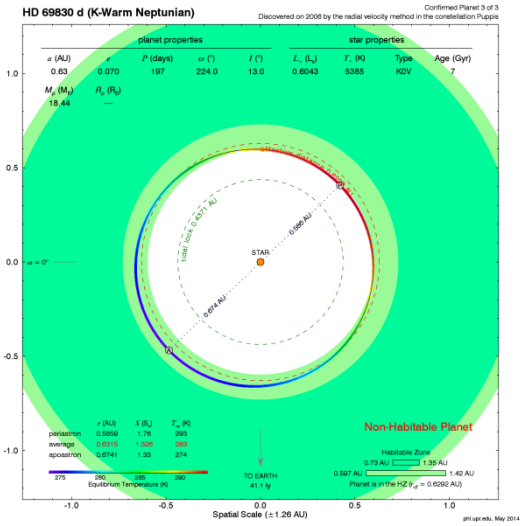

GJ 667C d (M-Cold Superterran)
Confirmed Planet 5 of 6
Discovered on 2013 by the radial velocity method in the constellation Scorpius
planet properties
star properties
a (AU) e P (days) ω (°) I (°) L* (L☉) T* (K) Type Age (Gyr)
0.276 0.030 106.4 7.0 — 0.0137 3350 M1.5V 2
Mp (M⊕) Rp (R⊕)
≥5.10 —
effective distance 0.2759 AU
frost line 0.3178 AU
snow line 0.316 AU
0.266 AU
0.284 AU
STAR
ω = 0°
r (AU) S (S⊕) Teq (K)
periastron 0.2677 0.1911 168
average 0.2761 0.1799 166
apoastron 0.2843 0.1695 163
Equilibrium Temperature (K)
TO EARTH
23.6 ly
Non-Habitable Planet
Habitable Zone
0.117 AU 0.238 AU
0.0959 AU 0.251 AU
Planet is not in the HZ (rp,eff = 0.2759 AU)
Spatial Scale (±0.55 AU)
phl.upr.edu, May 2014

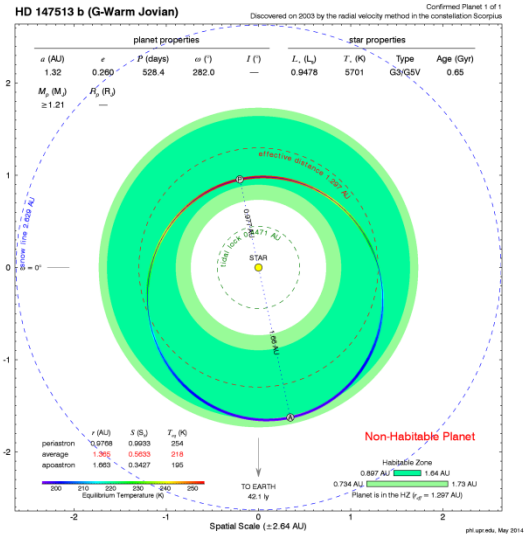

GJ 667C e (M-Warm Superterran)
Confirmed Planet 4 of 6
Discovered on 2013 by the radial velocity method in the constellation Scorpius
planet properties
star properties
a (AU) e P (days) ω (°) I (°) L* (L☉) T* (K) Type Age (Gyr)
0.213 0.020 62.24 29.0 — 0.0137 3350 M1.5V 2
Mp (M⊕) Rp (R⊕)
≥2.70 —
effective distance 0.213 AU
frost line 0.3178 AU
snow line 0.316 AU
0.217 AU
0.209 AU
STAR
ω = 0°
r (AU) S (S⊕) Teq (K)
periastron 0.2087 0.3144 191
average 0.213 0.302 189
apoastron 0.2173 0.2902 187
Equilibrium Temperature (K)
TO EARTH
23.6 ly
Habitable Planet Candidate
Habitable Zone
0.117 AU 0.238 AU
0.0959 AU 0.251 AU
Planet is in the HZ (rp,eff = 0.213 AU)
Spatial Scale (±0.43 AU)
phl.upr.edu, May 2014

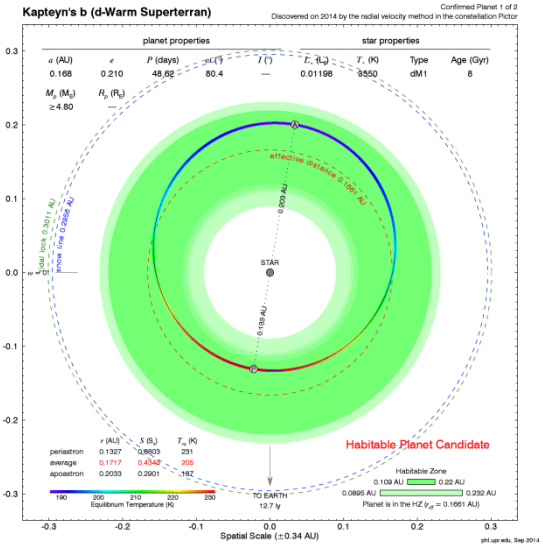

GJ 667C f (M-Warm Superterran)
Confirmed Planet 3 of 6
Discovered on 2013 by the radial velocity method in the constellation Scorpius
planet properties
star properties
a (AU) e P (days) ω (°) I (°) L* (L☉) T* (K) Type Age (Gyr)
0.156 0.030 39.03 103.0 — 0.0137 3350 M1.5V 2
Mp (M⊕) Rp (R⊕)
≥2.70 —
effective distance 0.156 AU
snow line 0.316 AU
0.161 AU
0.151 AU
STAR
ω = 0°
r (AU) S (S⊕) Teq (K)
periastron 0.1513 0.5983 224
average 0.1561 0.5632 221
apoastron 0.1607 0.5307 217
Equilibrium Temperature (K)
TO EARTH
23.6 ly
Habitable Planet Candidate
Habitable Zone
0.117 AU 0.238 AU
0.0959 AU 0.251 AU
Planet is in the HZ (rp,eff = 0.156 AU)
Spatial Scale (±0.31 AU)
phl.upr.edu, May 2014

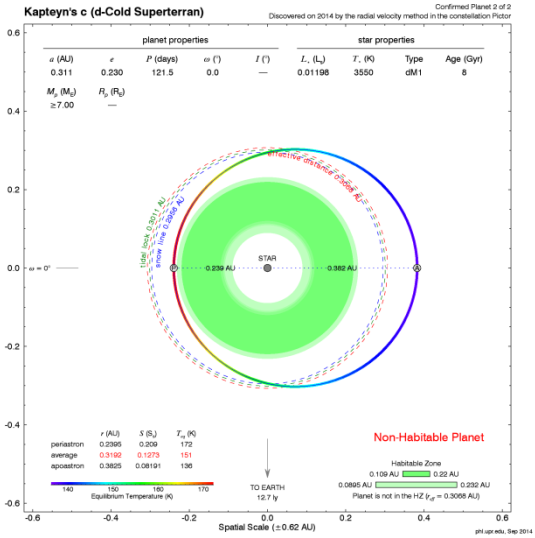

HD 3651 b (K-Hot Jovian)
Confirmed Planet 2 of 2
Discovered on 2003 by the radial velocity method in the constellation Pisces
planet properties
star properties
a (AU) e P (days) ω (°) I (°) L* (L☉) T* (K) Type Age (Gyr)
0.284 0.630 62.23 235.7 83.0 0.5762 5173 K0 V 5.13
Mp (MJ) Rp (RJ)
0.20 —
effective distance 0.2503 AU
total lock 0.0249 AU
0.105 AU
STAR
0.469 AU
ω = 0°
r (AU) S (S⊕) Teq (K)
periastron 0.1051 52.18 505
average 0.3404 9.199 405
apoastron 0.4628 2.69 326
Equilibrium Temperature (K)
TO EARTH
35.9 ly
Non-Habitable Planet
Habitable Zone
0.721 AU 1.34 AU
0.589 AU 1.42 AU
Planet is not in the HZ (rp,p = 0.2503 AU)
Spatial Scale (±0.57 AU)
phl.upr.edu, May 2014

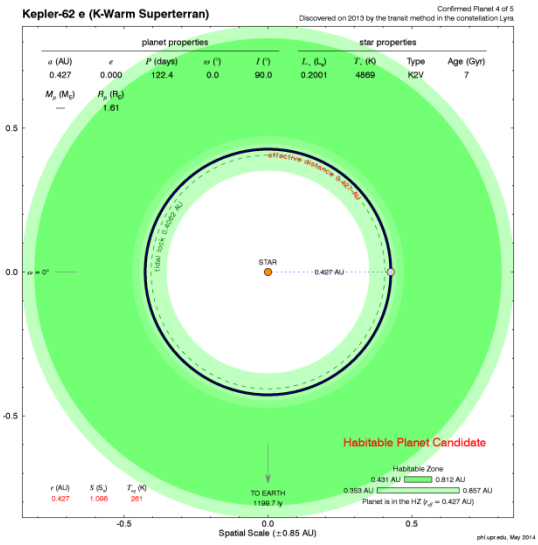

HD 10647 b (F-Warm Jovian)
Confirmed Planet 1 of 1
Discovered on 2003 by the radial velocity method in the constellation Eridanus
planet properties
star properties
a (AU) e P (days) ω (°) I (°) L* (L☉) T* (K) Type Age (Gyr)
2.03 0.100 1003 108.9 — 1.444 6039 F8V 4.8
Mp (MJ) Rp (RJ)
≥0.93 —
effective distance 2.025 AU
snow line 3.244 AU
2.03 AU
STAR
1.49 AU
ω = 0°
r (AU) S (S⊕) Teq (K)
periastron 1.827 0.4326 202
average 2.04 0.3521 196
apoastron 2.233 0.2896 187
Equilibrium Temperature (K)
TO EARTH
56.4 ly
Non-Habitable Planet
Habitable Zone
1.09 AU 1.97 AU
0.888 AU 2.08 AU
Planet is in the HZ (rp,p = 2.025 AU)
Spatial Scale (±4.06 AU)
phl.upr.edu, May 2014

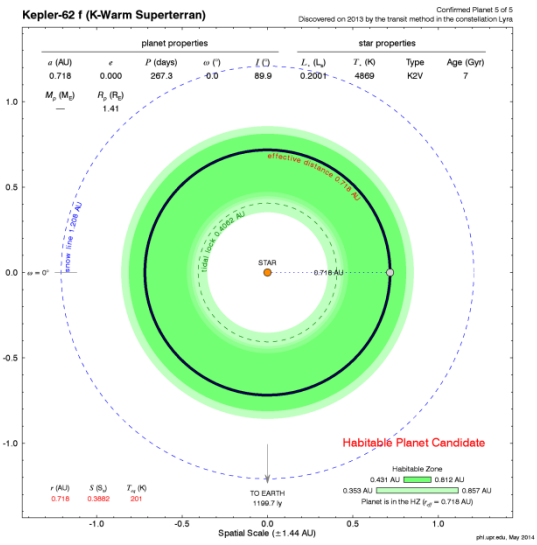

HD 69830 d (K-Warm Neptunian)
Confirmed Planet 3 of 3
Discovered on 2006 by the radial velocity method in the constellation Puppis
planet properties
star properties
a (AU) e P (days) ω (°) I (°) L* (L☉) T* (K) Type Age (Gyr)
0.63 0.070 197 224.0 13.0 0.6043 5385 K0V 7
Mp (M⊕) Rp (R⊕)
18.44 —
effective distance 1.026 AU
total lock 0.0371 AU
0.566 AU
STAR
0.674 AU
ω = 0°
r (AU) S (S⊕) Teq (K)
periastron 0.5859 1.76 293
average 0.6315 1.526 283
apoastron 0.6741 1.33 274
Equilibrium Temperature (K)
TO EARTH
41.1 ly
Non-Habitable Planet
Habitable Zone
0.73 AU 1.35 AU
0.597 AU 1.42 AU
Planet is in the HZ (rp,p = 0.6292 AU)
Spatial Scale (±1.26 AU)
phl.upr.edu, May 2014

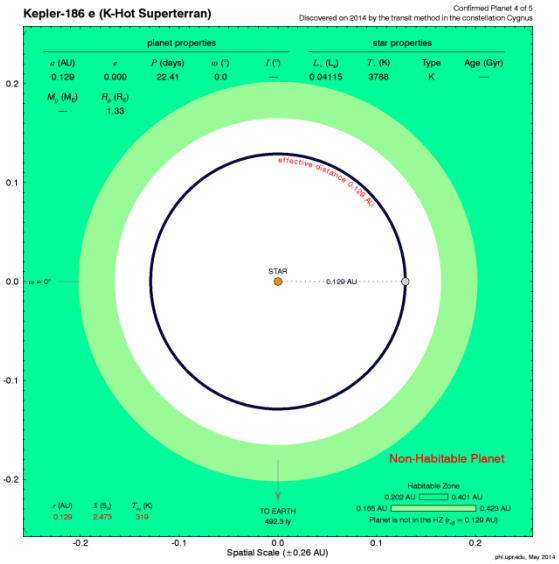

HD 147513 b (G-Warm Jovian)
Confirmed Planet 1 of 1
Discovered on 2003 by the radial velocity method in the constellation Scorpius
planet properties
star properties
a (AU) e P (days) ω (°) I (°) L* (L☉) T* (K) Type Age (Gyr)
1.32 0.260 528.4 282.0 — 0.9478 5701 G3/G5V 0.65
Mp (MJ) Rp (RJ)
≥1.21 —
effective distance 1.297 AU
snow line 2.029 AU
total lock 0.0471 AU
0.471 AU
STAR
0.86 AU
ω = 0°
r (AU) S (S⊕) Teq (K)
periastron 0.9768 0.9933 254
average 1.365 0.5633 218
apoastron 1.653 0.3427 195
Equilibrium Temperature (K)
TO EARTH
42.1 ly
Non-Habitable Planet
Habitable Zone
0.897 AU 1.64 AU
0.734 AU 1.73 AU
Planet is in the HZ (rp,p = 1.297 AU)
Spatial Scale (±2.64 AU)
phl.upr.edu, May 2014

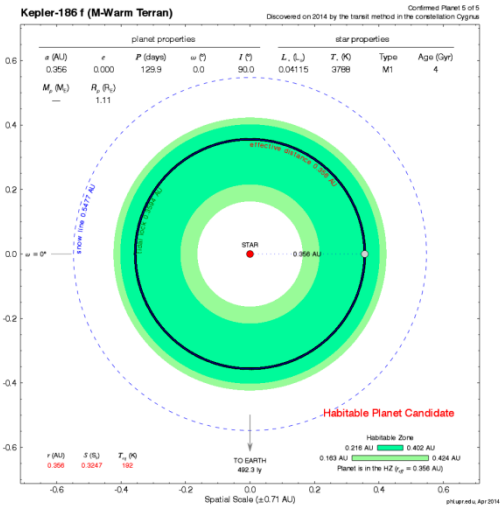

Kapteyn's b (d-Warm Superterran)
Confirmed Planet 1 of 2
Discovered on 2014 by the radial velocity method in the constellation Pictor
planet properties
star properties
a (AU) e P (days) ω (°) I (°) L* (L☉) T* (K) Type Age (Gyr)
0.168 0.210 48.62 80.4 — 0.01198 3550 dM1 8
Mp (M⊕) Rp (R⊕)
≥4.80 —
effective distance 0.1661 AU
tidal lock 0.0211 AU
snow line 0.2068 AU
0.203 AU
0.133 AU
STAR
r (AU) S (S⊕) Teq (K)
periastron 0.1327 0.8803 231
average 0.1717 0.4342 205
apoastron 0.2033 0.2901 187
Habitable Planet Candidate
Habitable Zone
0.109 AU 0.22 AU
0.0895 AU 0.232 AU
Planet is in the HZ (rcir = 0.1661 AU)
Equilibrium Temperature (K)
TO EARTH
12.7 ly
Spatial Scale (±0.34 AU)
phl.upr.edu, Sep 2014

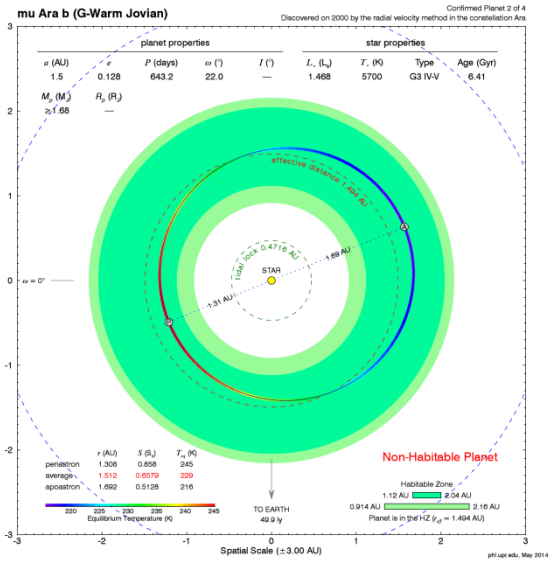

Kapteyn's c (d-Cold Superterran)
Confirmed Planet 2 of 2
Discovered on 2014 by the radial velocity method in the constellation Pictor
planet properties
star properties
a (AU) e P (days) ω (°) I (°) L* (L☉) T* (K) Type Age (Gyr)
0.311 0.230 121.5 0.0 — 0.01198 3550 dM1 8
Mp (M⊕) Rp (R⊕)
≥7.00 —
effective distance 0.3066 AU
tidal lock 0.0211 AU
snow line 0.2068 AU
ω = 0°
0.239 AU
0.382 AU
STAR
r (AU) S (S⊕) Teq (K)
periastron 0.2395 0.209 172
average 0.3192 0.1273 151
apoastron 0.3825 0.08191 136
Non-Habitable Planet
Habitable Zone
0.109 AU 0.22 AU
0.0895 AU 0.232 AU
Planet is not in the HZ (rcir = 0.3066 AU)
Equilibrium Temperature (K)
TO EARTH
12.7 ly
Spatial Scale (±0.62 AU)
phl.upr.edu, Sep 2014

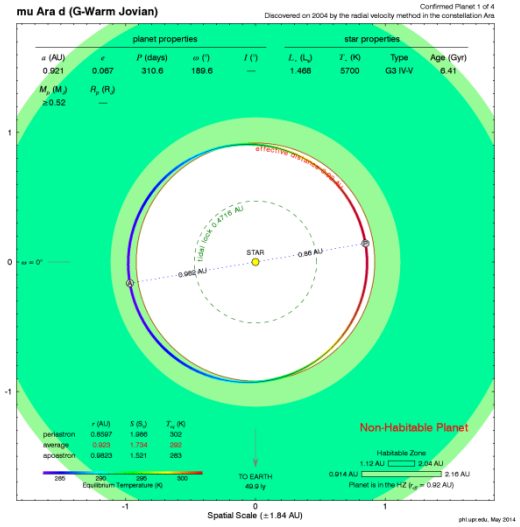

Kepler-62 e (K-Warm Superterran)
Confirmed Planet 4 of 5
Discovered on 2013 by the transit method in the constellation Lyra
planet properties
star properties
a (AU) e P (days) ω (°) I (°) L* (L☉) T* (K) Type Age (Gyr)
0.427 0.000 122.4 0.0 90.0 0.2001 4869 K2V 7
Mp (M⊕) Rp (R⊕)
— 1.61
effective distance 0.427 AU
tidal lock 0.0052 AU
ω = 0°
STAR
0.427 AU
Habitable Planet Candidate
Habitable Zone
0.431 AU 0.812 AU
0.353 AU 0.857 AU
Planet is in the HZ (rcir = 0.427 AU)
r (AU) S (S⊕) Teq (K)
0.427 1.008 261
TO EARTH
1199.7 ly
Spatial Scale (±0.85 AU)
phl.upr.edu, May 2014

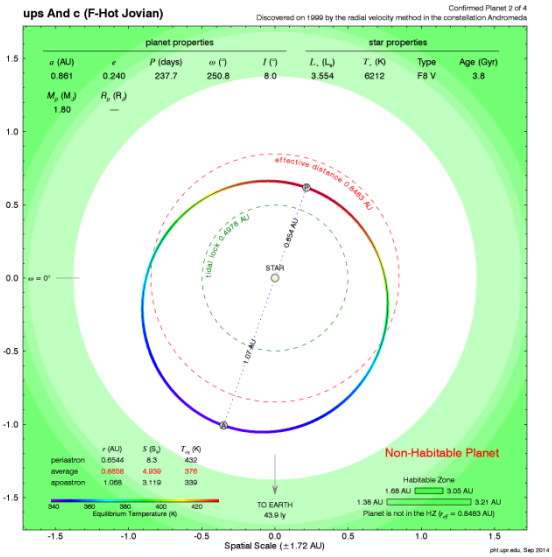

Kepler-62 f (K-Warm Superterran)
Confirmed Planet 5 of 5
Discovered on 2013 by the transit method in the constellation Lyra
planet properties
star properties
a (AU) e P (days) ω (°) I (°) L* (L☉) T* (K) Type Age (Gyr)
0.718 0.000 267.3 0.0 89.9 0.2001 4869 K2V 7
Mp (M⊕) Rp (R⊕)
— 1.41
effective distance 0.718 AU
tidal lock 0.0052 AU
snow line 1.208 AU
ω = 0°
STAR
0.718 AU
Habitable Planet Candidate
Habitable Zone
0.431 AU 0.812 AU
0.353 AU 0.857 AU
Planet is in the HZ (rcir = 0.718 AU)
r (AU) S (S⊕) Teq (K)
0.718 0.3882 201
TO EARTH
1199.7 ly
Spatial Scale (±1.44 AU)
phl.upr.edu, May 2014

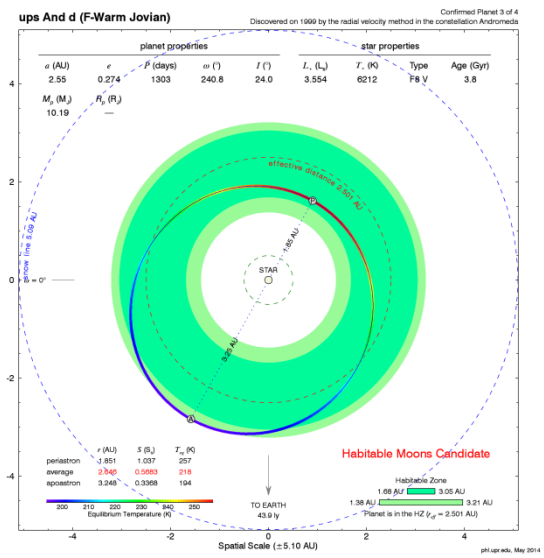

Kepler-186 e (K-Hot Superterran)
Confirmed Planet 4 of 5
Discovered on 2014 by the transit method in the constellation Cygnus
planet properties
star properties
a (AU) e P (days) ω (°) I (°)
0.129 0.000 22.41 0.0 —
L* (L☉) T* (K) Type Age (Gyr)
0.04115 3788 K —
Mp (M⊕) Rp (R⊕)
— 1.33
effective distance 0.129 AU
STAR
0.129 AU
ω = 0°
Non-Habitable Planet
Habitable Zone
0.202 AU 0.401 AU
0.165 AU 0.423 AU
Planet is not in the HZ (rpl = 0.129 AU)
r (AU) S (S⊕) Teq (K)
0.129 2.473 319
TO EARTH
492.3 ly
Spatial Scale (±0.26 AU)
phl.upr.edu, May 2014


Kepler-186 f (M-Warm Terran)
Confirmed Planet 5 of 5
Discovered on 2014 by the transit method in the constellation Cygnus
planet properties
star properties
a (AU) e P (days) ω (°) I (°)
0.356 0.000 129.9 0.0 90.0
L* (L☉) T* (K) Type Age (Gyr)
0.04115 3788 M1 4
Mp (M⊕) Rp (R⊕)
— 1.11
effective distance 0.356 AU
tidal lock 0.1247 AU
snow line 0.4277 AU
STAR
0.356 AU
ω = 0°
Habitable Planet Candidate
Habitable Zone
0.216 AU 0.402 AU
0.163 AU 0.424 AU
Planet is in the HZ (rpl = 0.356 AU)
r (AU) S (S⊕) Teq (K)
0.356 0.3247 192
TO EARTH
492.3 ly
Spatial Scale (±0.71 AU)
phl.upr.edu, Apr 2014


mu Ara b (G-Warm Jovian)
Confirmed Planet 2 of 4
Discovered on 2000 by the radial velocity method in the constellation Ara
planet properties
star properties
a (AU) e P (days) ω (°) I (°)
1.5 0.128 643.2 22.0 —
L* (L☉) T* (K) Type Age (Gyr)
1.468 5700 G3 IV-V 6.41
Mp (M⊕) Rp (R⊕)
≥1.68 —
effective distance 1.494 AU
tidal lock 0.4716 AU
1.69 AU
1.31 AU
STAR
ω = 0°
Non-Habitable Planet
Habitable Zone
1.12 AU 2.04 AU
0.914 AU 2.16 AU
Planet is in the HZ (rpl = 1.494 AU)
r (AU) S (S⊕) Teq (K)
periastron 1.308 0.858 245
average 1.512 0.6579 229
apoastron 1.692 0.5128 216
Equilibrium Temperature (K)
TO EARTH
49.9 ly
Spatial Scale (±3.00 AU)
phl.upr.edu, May 2014


mu Ara d (G-Warm Jovian)
Confirmed Planet 1 of 4
Discovered on 2004 by the radial velocity method in the constellation Ara
planet properties
star properties
a (AU) e P (days) ω (°) I (°)
0.921 0.067 310.6 189.6 —
L* (L☉) T* (K) Type Age (Gyr)
1.468 5700 G3 IV-V 6.41
Mp (M⊕) Rp (R⊕)
≥0.52 —
effective distance 0.92 AU
tidal lock 0.4716 AU
0.86 AU
0.982 AU
STAR
ω = 0°
Non-Habitable Planet
Habitable Zone
1.12 AU 2.04 AU
0.914 AU 2.16 AU
Planet is in the HZ (rpl = 0.92 AU)
r (AU) S (S⊕) Teq (K)
periastron 0.8597 1.966 302
average 0.920 1.734 292
apoastron 0.9823 1.521 283
Equilibrium Temperature (K)
TO EARTH
49.9 ly
Spatial Scale (±1.84 AU)
phl.upr.edu, May 2014

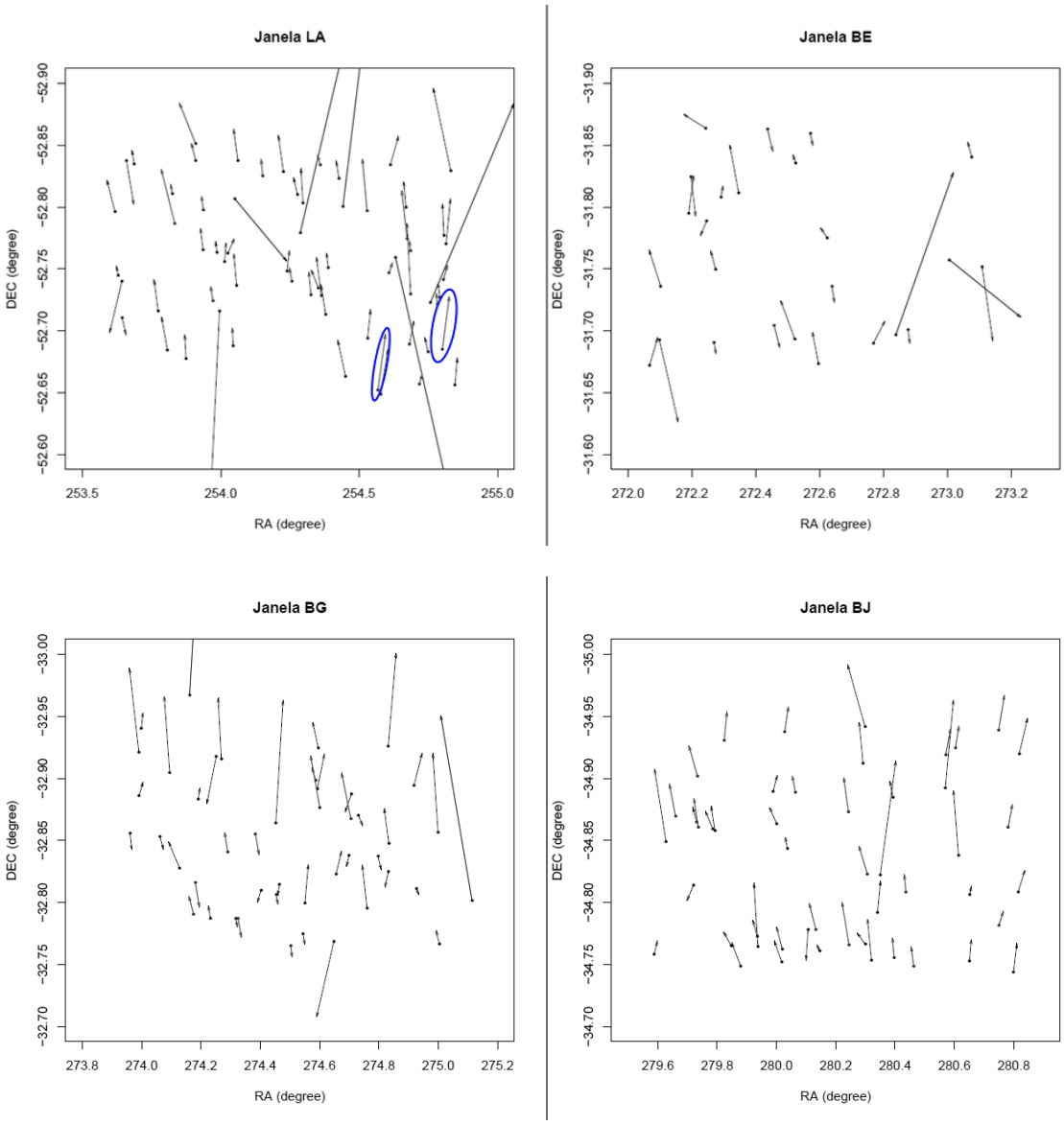

ups And c (F-Hot Jovian)
Confirmed Planet 2 of 4
Discovered on 1999 by the radial velocity method in the constellation Andromeda
planet properties
star properties
a (AU) 0.861
e 0.240
P (days) 237.7
ω (°) 250.8
I (°) 8.0
L* (L☉) 3.554
T* (K) 6212
Type F8 V
Age (Gyr) 3.8
Mp (MJ) 1.80
Rp (RJ) —
effective distance 0.6483 AU
tidal lock = 0.6078 AU
0.654 AU
1.07 AU
STAR
ω = 0°
r (AU) S (S⊕) Teq (K)
periastron 0.6544 8.3 432
average 0.8608 4.930 375
apoastron 1.068 3.119 339
Equilibrium Temperature (K)
Non-Habitable Planet
Habitable Zone
1.68 AU 3.05 AU
1.38 AU 3.21 AU
Planet is not in the HZ (rcrit = 0.6483 AU)
TO EARTH
43.9 ly
Spatial Scale (±1.72 AU)
phl.upr.edu, Sep 2014

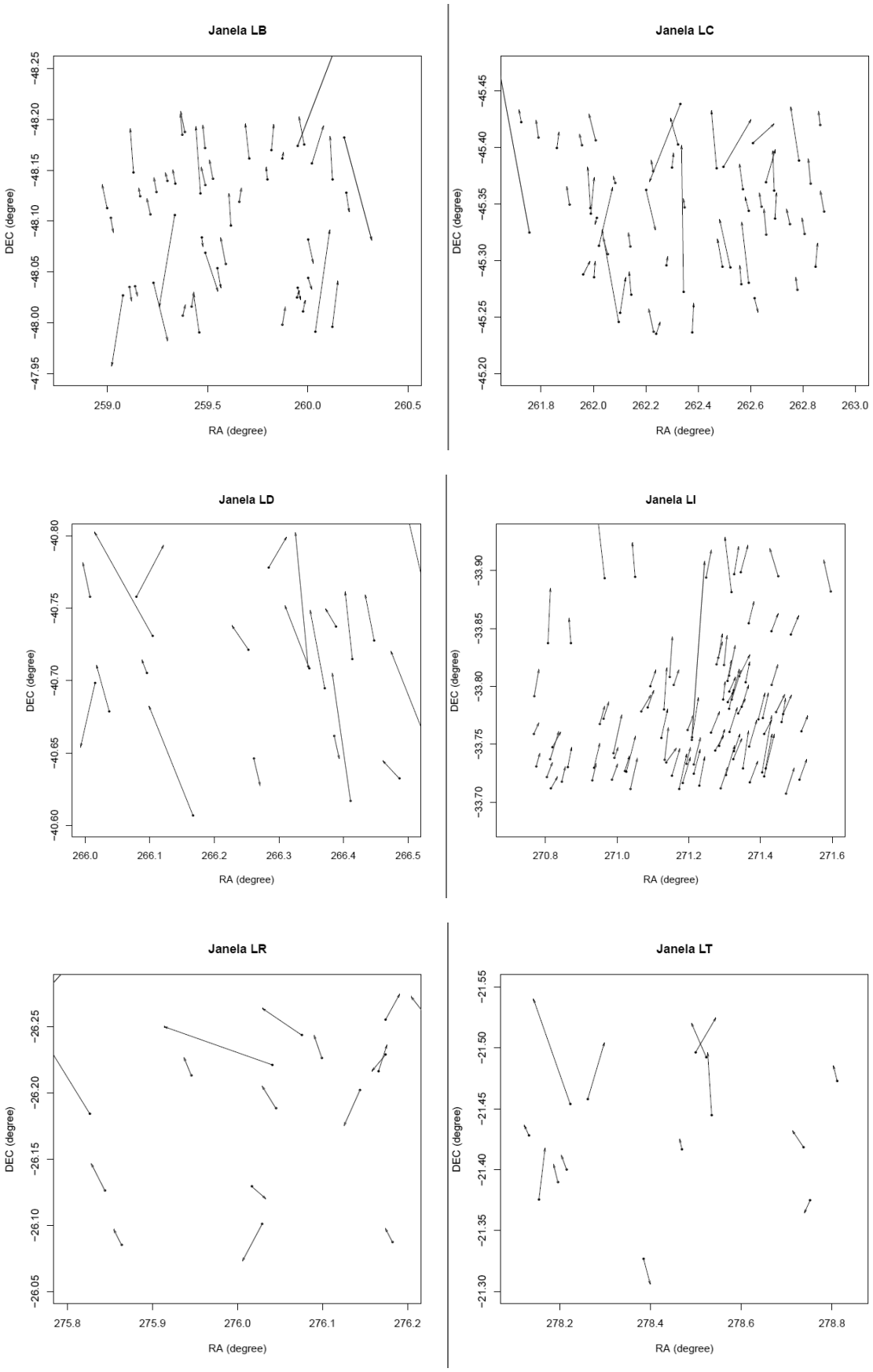

ups And d (F-Warm Jovian)
Confirmed Planet 3 of 4
Discovered on 1999 by the radial velocity method in the constellation Andromeda
planet properties
star properties
a (AU) 2.55
e 0.274
P (days) 1303
ω (°) 240.8
I (°) 24.0
L* (L☉) 3.554
T* (K) 6212
Type F8 V
Age (Gyr) 3.8
Mp (MJ) 10.19
Rp (RJ) —
effective distance 2.501 AU
snow line = 2.69 AU
1.85 AU
3.25 AU
STAR
ω = 0°
r (AU) S (S⊕) Teq (K)
periastron 1.851 1.037 257
average 2.346 0.5563 218
apoastron 3.248 0.3368 194
Equilibrium Temperature (K)
Habitable Moons Candidate
Habitable Zone
1.68 AU 3.05 AU
1.38 AU 3.21 AU
Planet is in the HZ (rcrit = 2.501 AU)
TO EARTH
43.9 ly
Spatial Scale (±5.10 AU)
phl.upr.edu, May 2014

Apêndice B

Figuras das 12 janelas do GBVOC

As figuras a seguir representam todas as 12 janelas do catálogo GBVOC com os movimentos próprios indicados por setas.




Janela LB
DEC (degree)
RA (degree)
Janela LC
DEC (degree)
RA (degree)
Janela LD
DEC (degree)
RA (degree)
Janela LI
DEC (degree)
RA (degree)
Janela LR
DEC (degree)
RA (degree)
Janela LT
DEC (degree)
RA (degree)