

26- Na contração da Nebulosa Solar Primitiva, o Sol formou-se no centro da nuvem. Os planetas e seus satélites foram formados a partir da matéria do disco circunsolar (J.K.Beathy, 1981).

maram perto do Sol, uma região quente em que predominava a composição química típica dos rochosos.

Os planetas gasosos podem ter se formado por processo diferente, denominado instabilidade de disco. Ele se parece mais com o processo de formação das estrelas. Essa instabilidade gravitacional no disco de matéria provoca o surgimento de grandes bolhas de gás, que acumulam matéria com muita rapidez. Este processo pode ser mil vezes mais rápido que o de acreção. A região onde se formaram os planetas gigantes era mais fria e composta predominantemente por gases. Júpiter e Saturno são compostos essencialmente de hidrogênio e hélio, como o Sol. Como grandes massas implicam em campos gravitacionais intensos, estes planetas acumularam muitos satélites.

A matéria que não foi acrescentada aos planetas e satélites ficou concentrada nos asteroides e cometas. A maior parte dos asteroides permaneceu no cinturão principal de asteroides.

A região diante de Netuno concentra a maior parte da sobra de material. Os planetesímos que não se agregaram aos planetas permaneceram nessa região como objetos transnetunianos, alguns concentrados no Cinturão de Edgeworth-Kuiper, outros espalhados pela região em órbitas muito alongadas (alta excentricidade) e outros, ainda, na Nuvem de Oort. Os cometas de curto e médio período foram formados nessa região e lá permaneceram em órbitas quase coplanares com a eclíptica. Já os cometas de longo período teriam se formado nas imediações dos planetas gigantes, mais próximos do Sol, e lançados para os confins do Sistema Solar por consequência de interações gravitacionais. Assim teria se formado a Nuvem de Oort, com sua configuração esférica.

5.10 SISTEMAS PLANETÁRIOS EXTERNOS (EXOPLANETAS OU PLANETAS EXTRASSOLARES)

5.10.1 INTRODUÇÃO

A possibilidade de existência de outros locais que pudessem abrigar vida, planetas girando em torno de outros "sóis", tem sido questionado há séculos. No século V a.C. os gregos Leucipo de Mileto e, posteriormente, seu discípulo Demócrito de Abdera desenvolveram uma teoria sobre a constituição da natureza, chamada "atomismo". Segundo ela, o todo, isto é, a realidade, se compõe de partículas indivisíveis de natureza idêntica, os "átomos", e de vácuo. Leucipo dizia: "Assim surgem os mundos.

Corpos de todos os tamanhos e formas movem-se do infinito em um grande vácuo; lá eles juntam-se, rodopiam e formam um único vórtice, uns colidindo com outros, revolvendo de todas as maneiras, e começam a separar-se uns dos outros”.

Na história mais recente, em meados do século 18, o filósofo alemão Emmanuel Kant (1724-1804) considerava como provável que alguns daqueles objetos difusos, na época identificados por “nebulosas”, como Andrômeda, seriam grandes concentrações de estrelas. Ele as via como outros universos e as denominou “universos-ilhas”.

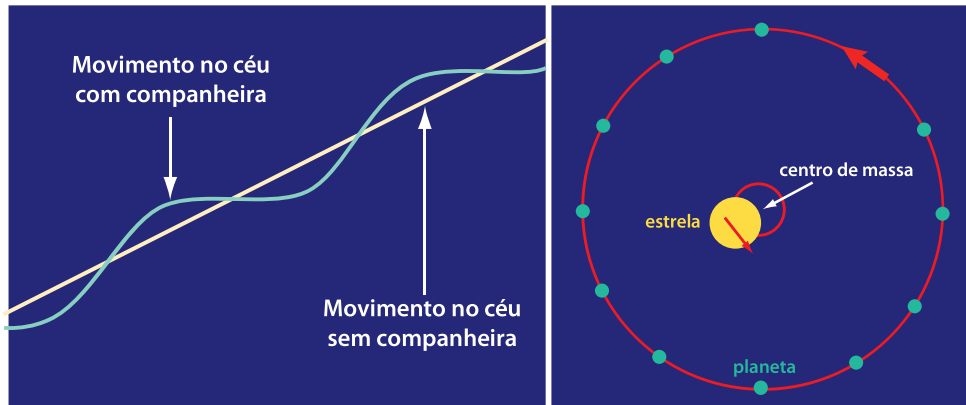
Porém, somente após a década de 1920, com a discussão do tamanho da Via Láctea, é que nos conscientizamos das dimensões reais do Universo. Ele é bem maior do que pensávamos até então e estava povoado de galáxias repletas de estrelas, possivelmente rodeadas por planetas. Despontava, assim, a possibilidade de o Universo ser povoado de planetas.

Para que este raciocínio tivesse fundamento era necessário saber se a formação de planetas era um evento comum, decorrente do processo de formação de uma estrela. Como vimos, a primeira proposta teórica de formação de planetas foi formulada pelo próprio Emmanuel Kant. Os detalhes desse processo só foram revelados mais recentemente, pelas pesquisas em formação estelar.

Uma característica importante desse processo é a possibilidade de formação de sistemas planetários com configurações bem diferentes do Sistema Solar. Na realidade, a configuração do sistema planetário solar é uma das inúmeras possibilidades. Sistemas com planetas bem maiores que Júpiter bem mais próximos de suas estrelas parecem comuns.

A primeira procura sistemática de exoplanetas foi feita por Christian Huygens (1629-1695), documentada no final do século 17. Porém, pode-se dizer que o início das pesquisas mais consistentes deu-se apenas no começo do século passado.

Em 1916, o astrônomo americano Edward Emerson Barnard descobriu que uma estrela pequena e avermelhada da constelação do Ofiúco, visível com auxílio de telescópio e distante de nós cerca de 6 a.l., bamboleava em torno de uma determinada posição. Essa estrela ficou conhecida como “estrela de Barnard”. Esse é o comportamento que se espera quando a estrela tem ao seu redor um ou mais corpos de massa significativa. A interação gravitacional entre os corpos força-os a girar em torno do baricentro (centro de massa) desse sistema. O Sol também apresenta um bamboleio por conta da presença dos demais corpos do Sistema Solar.



27- O movimento da estrela no espaço (à esquerda) e o corrigido.

A história desta estrela começa a ser desvendada cerca de quatro décadas mais tarde, quando o astrônomo holandês Peter van de Kamp (1901-1995) concluiu a análise das quase duas mil placas fotográficas da estrela de Barnard. Seus cálculos sugeriam a presença de um planeta, com massa equivalente a 1,6 a massa de Júpiter ($1,6M_J$), girando em órbita elíptica. O refinamento desses cálculos durante décadas levaram van de Kamp a concluir em 1982 que havia dois planetas, com massas de $0,7 M_J$ e $0,5 M_J$. Esses planetas jamais foram confirmados. Observações astrométricas posteriores, feitas com instrumentação mais potente, não confirmaram o bamboleio. De qualquer forma esse caso continua sob investigação.

A primeira confirmação de um exoplaneta ocorreu em 1995, ano em que van de Kamp morreu. Esse planeta foi encontrado junto à estrela 51 da constelação Pégaso. Desde então, as técnicas de observação e os instrumentos evoluíram muito. Atualmente as observações são feitas com instrumentação diversificada, variando de pequenos telescópios até satélites espaciais.

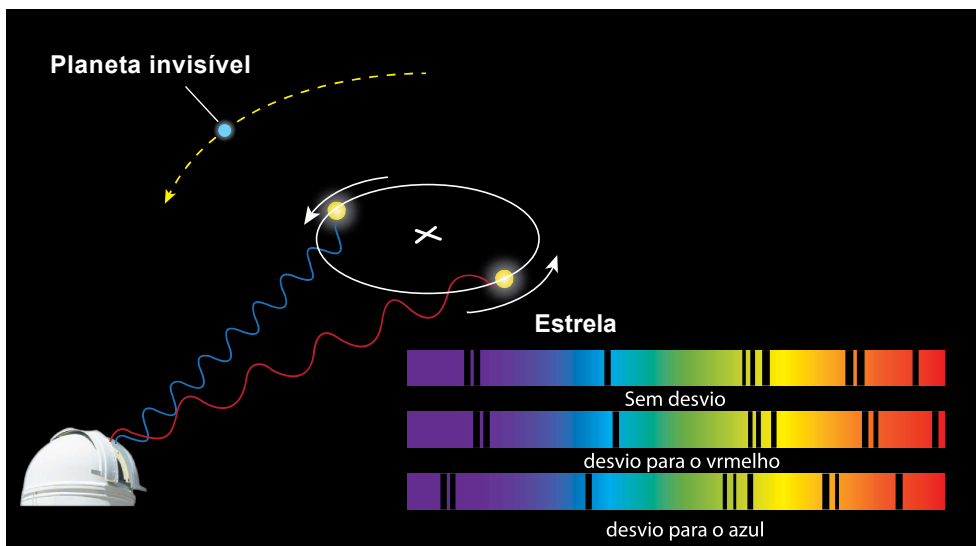
5.10.2 AS TÉCNICAS DE OBSERVAÇÃO E OS EXOPLANETAS CONHECIDOS

As técnicas de observação para a busca de exoplanetas são indiretas. Na realidade, procura-se pelos efeitos que esses planetas causam em suas estrelas. As principais técnicas são astrometria, velocidade radial, fotometria e imageamento.

Pela Lei da Gravitação Universal de Newton, a força gravitacional entre estrela e planeta é proporcional ao produto das massas dos dois objetos e inversamente proporcional à distância ao quadrado do planeta à estrela. Isto significa que estrela e planeta descrevem órbitas em torno do centro de gravidade comum desse sistema, com um mesmo período. Quanto maior a massa do planeta, ou menor a distância entre os dois corpos, maior será a força de atração gravitacional e o efeito produzido no movimento da estrela. Esse movimento da estrela afeta principalmente a posição aparente da estrela e sua velocidade radial (velocidade aparente na direção da linha de visada).

• Técnica Astrométrica

Esta técnica avalia as alterações nas posições aparentes das estrelas, decorrentes da presença de planetas em seu entorno. Esse movimento aparente pode ser mensurado depois de se descontar os movimentos da Terra e da própria estrela pelo no espaço. Geralmente a posição aparente da estrela



28- Desvio espectral decorrente do movimento da estrela em torno do centro de massa, provocado pela presença de um planeta.

descreve uma pequena elipse em torno do centro de gravidade do sistema. Quanto mais distante estiver o sistema planetário, mais difícil será a percepção do movimento da estrela.

O movimento elíptico da estrela é, então, analisado com base na teoria da gravitação. As equações envolvem as massas da estrela e do(s) planeta(s) e permitem obter o período do movimento. Quanto mais planetas existirem em torno da estrela, mais complicada é a análise.

• *Técnica da Velocidade radial*

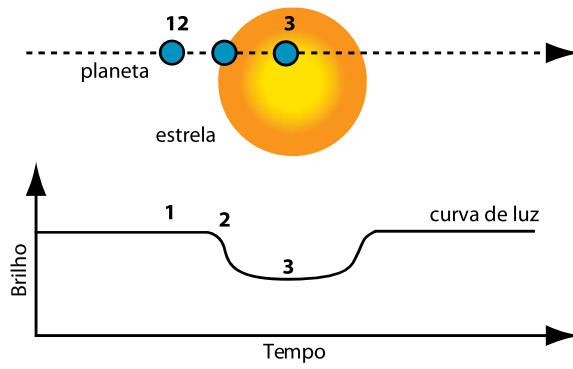
Esta técnica permite medir variações na velocidade radial. Velocidade radial é a rapidez com que a estrela move-se ao longo da linha de visada (linha imaginária que une observador e estrela). Na realidade a estrela move-se pelo espaço em uma direção determinada. Uma componente desse movimento é vista no plano do céu como deslocamento de posição aparente. A outra parte manifesta-se na direção da linha de visada e provoca alteração no comprimento de onda da luz da estrela, fenômeno conhecido como efeito Doppler. Quando o objeto se afasta do observador, sua luz torna-se avermelhada (por conta de um aumento no comprimento de onda). No caso oposto, a luz torna-se azulada (diminui o comprimento de onda). Esse efeito é sutil, mas mensurável. A medida se faz através do espectro de luz do objeto. O movimento da estrela em torno do centro de gravidade provoca efeito Doppler, porque ora a estrela move-se na direção oposta a do observador, ora na direção deste. A velocidade assim determinada e as leis de dinâmica de Newton permitem estimar as massas dos planetas, o tamanho das órbitas e os períodos.

• *Técnica Fotométrica*

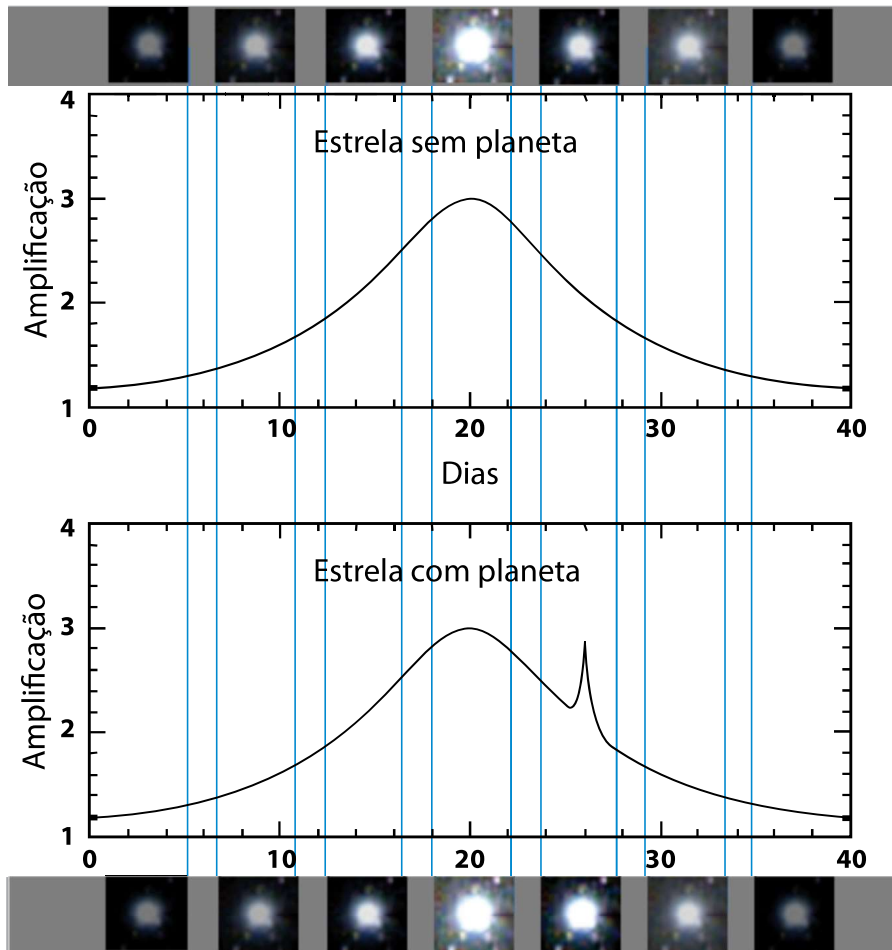
Esta técnica permite medir variações sutis de brilho da estrela, absolutamente imperceptíveis ao olho humano, provocadas pela presença dos planetas. Basicamente, há dois métodos para esta técnica: trânsito e microlente.

• *Método de Trânsito*

Quando um planeta transita na frente da estrela ele bloqueia uma pequena parcela de sua luz. Se o plano orbital do planeta estiver quase paralelo à linha de visada, isto é, se estiver sendo visto de perfil, o planeta se interpõe entre a estrela e a Terra, bloqueando parte da luz da estrela. Repetidos

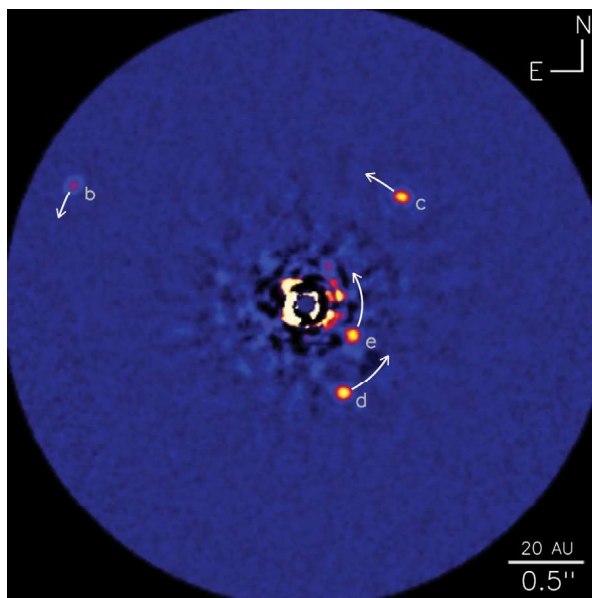


29- Durante o trânsito, o planeta bloqueia parte da luz e o brilho da estrela decai.



30- A curva de amplificação da luz de uma estrela com planeta apresenta um pico quando o planeta transita a estrela.

31- Três planetas são vistos em torno da estrela HR 8799 (disco escuro). A imagem obtida na luz infravermelha foi devidamente tratada para evidenciar os planetas (Observatório Gemini - <http://www.gemini.edu/node/11151>).



trânsitos provocam variação periódica da luz dessa estrela. Os períodos entre os picos de máximo ou de mínimo de luz representam o período orbital do planeta.

· *Método de microlente gravitacional*

O efeito de microlente gravitacional, previsto por Einstein, ocorre quando duas estrelas se alinham na mesma direção. Neste caso, a estrela mais próxima atua como uma lente aumentando o brilho da estrela mais distante. É um evento raro, mas quando acontece o alinhamento pode durar dias ou semanas. Além disso, esse evento não é repetitivo.

Se a estrela mais próxima tiver planeta, o campo gravitacional desse planeta vai intensificar a variação de brilho da estrela de fundo.

· *Imageamento*

Ainda não dispomos de instrumentação potente o suficiente para fotografar planetas em torno de estrelas, na luz visível. Isto porque a luz refletida pelo planeta é pelo menos um bilhão de vezes mais fraca que a luz emitida pela estrela, além do que, pela distância, ele aparece muito próximo da estrela. Este problema pode ser minimizado quando o imageamento é feito na luz infravermelha. A diferença de brilho entre estrela e planeta diminui porque o planeta brilha muito mais nessa faixa do espectro e a estrela bem menos.

A primeira fotografia surgiu em 2004, mostrando um objeto aproximadamente cinco vezes mais maciço que Júpiter, em torno de uma anã-marrrom. A distância do planeta à estrela é quase a mesma de Plutão ao Sol.

Em outubro de 2007, foi liberada a primeira imagem de uma estrela e seu sistema planetário, onde se veem três planetas (figura 31). A estrela HR 8799 é mais jovem que o Sol, tem cerca de uma vez e meia sua massa do Sol e luminosidade cinco vezes maior que a solar. Os planetas têm massas entre sete e dez vezes maior que a de Júpiter e orbitam a estrela a 25, 40 e 70 UA. Comparando com o Sistema Solar, o planeta mais distante estaria no cinturão de Edgeworth-Kuiper. Os planetas e a estrela se formaram há 60 milhões de anos.

5.10.3 EXOPLANETAS CONHECIDOS

As descobertas de novos exoplanetas crescem rapidamente, tornando impossível manter atualizada

PLANETA			ESTRELA	
Massa (M_J)	Tamanho (R_J)	Distância da estrela (UA)	Massa (M_S)	Idade comparada à do Sol
1% < 1		4% < 0,4	4% < 1	
1% \approx 1	24% menores	10% \approx 1	8% \approx 1	21% mais jovens
10% de 9,1 a 10,4	33% da ordem	14% < 3	61% de 1 a 3	23% idade solar
20% de 10,5 a 11,7	43% maiores	31% de 3 a 9	21% de 3 a 4	56% mais velhas
50% de 11,7 a 13		55% > 9	5% de 4 a 4,5	

Tabela 13- Parâmetros físicos de exoplanetas, com massa de até vezes a de Júpiter, e suas estrelas. M_J e R_J são, respectivamente, massa e raio de Júpiter, e M_S é massa do Sol. Estatística baseada nos exoplanetas conhecidos até dezembro de 2010.

qualquer tabela impressa. Neste caso, a melhor opção é consultar diretamente a página da Enciclopédia de Planetas Extrassolares (<http://exoplanet.eu/index.php>).

Até janeiro de 2010, eram conhecidos 429 planetas, distribuídos em 363 sistemas planetários, dos quais, 45 são sistemas múltiplos (têm mais de um exoplaneta). Na amostragem da Enciclopédia de Planetas Extrassolares são incluídos objetos com massa superior a 13 vezes maior que a de Júpiter, limite de massa de um megaplaneta. Considerando essa divisão, da amostragem de exoplanetas conhecidos, 410 são exoplanetas e 19 são objetos com massa entre 13 e 25 vezes maior que Júpiter, conhecidos como anãs-marrons.

A grande maioria dos exoplanetas foi descoberta por técnica astrométrica ou de velocidade radial. Todos os exoplanetas são maiores que a Terra, a maioria é maior que Júpiter. A maioria deles está a distâncias que equivalem à região entre Marte e Saturno do Sistema Solar.