

# Como o Sistema Solar se formou: A Busca pelo Planeta Desconhecido

RODNEY GOMES\*

Observatório Nacional

Rua General José Cristino 77, CEP 20921-400, Rio de Janeiro, Brazil

## Abstract

*Apresento uma síntese dos processos de formação e evolução dinâmica primordial do Sistema Solar desde o colapso da nebulosa primordial até a formação dos planetas. A seguir, descrevo os processos de migração planetária que se seguiram à formação planetária. Em seguida, apresento um histórico da busca por planetas desconhecidos do Sistema Solar, passando pela descoberta de Netuno e Plutão. Finalmente, apresento as recentes evidências que apontam para a possibilidade da existência de um planeta ainda não descoberto nos confins do Sistema Solar.*

Palavras-chave: Sistema Solar, planeta 9

## 1 Introdução

Estima-se a idade do Sistema Solar em 4.5 bilhões de anos. Durante a maior parte do tempo (digamos os últimos 4 bilhões de anos) a configuração orbital dos objetos do Sistema Solar não se modificou significativamente. No entanto, nos seus primórdios, o Sistema Solar evoluiu muito rapidamente e as órbitas dos seus objetos, inclusive seus maiores componentes, os planetas, diferiam muito das órbitas que hoje conhecemos. No capítulo 2, vou discorrer sobre este processo rápido de evolução do Sistema Solar nos seus primórdios, desde um disco de gás e poeira até a formação dos planetas. No capítulo 3, discorrerei sobre os processos de migração planetária que mudaram significativamente a distribuição das órbitas dos planetas (e outros objetos do Sistema Solar). No capítulo 4 apresentarei um histórico sobre a busca de um planeta desconhecido e discorrerei sobre porque a possibilidade de haver ainda um planeta desconhecido nos confins do Sistema Solar ganhou novo impulso recentemente.

## 2 A formação do Sistema Solar

A nebulosa primordial que dá origem a um sistema planetário e, em particular, a nebulosa que deu origem ao Sistema Solar, é formada em sua maior parte por hidrogênio, que é o gás mais abundante no

---

\*rodney@on.br

universo e alguma fração de hélio e outros gases. A parte sólida compreende o que podemos chamar de gelo, principalmente de água, metano e amônia, e de silicatos (material rochoso) e, por fim, metais. Uma vez formada a estrela pela contração da nuvem, descrito logo abaixo, haverá uma distância à mesma, chamada de linha de gelo, dentro da qual o material tipo gelo da nebulosa se sublimará em gás. Como a fração de gelo é bem maior que a fração de silicatos e metais originalmente na nebulosa, a partir da linha de gelo, a densidade de sólidos será muito maior do que interiormente a esta linha. Este conceito é importante para entendermos a formação planetária no Sistema Solar que gerou os planetas terrestres e os planetas gigantes.

A formação do Sistema Solar está intimamente ligada à formação de sua estrela, o Sol. Estrelas nascem da contração gravitacional de uma nuvem de gás, chamada nebulosa. Nessas nuvens, o gás tende a se expandir e a auto gravidade tende a contrair a nebulosa. Muitas vezes a contração é desencadeada pela contaminação da nuvem por elementos pesados vindos da explosão de uma supernova. Durante a contração da nebulosa, a conservação do momento angular gera um achatamento da mesma, dando origem a um corpo central que virá a ser a estrela e um disco de gás e poeira (material sólido) circundando a mesma.

A contração gravitacional de uma nebulosa pode dar origem a mais de uma estrela e este é o processo mais provável pelo qual sistemas binários e múltiplos de estrelas são formados. O Sol é uma estrela sem companheira, o que na verdade é mais excepcional do que estrelas com uma ou mais companheiras. Na formação de sistemas binários (mesmo raciocínio para sistemas múltiplos), uma das estrelas será maior, naturalmente. A menor estrela poderá ser tão pequena quanto uma anã marrom ou mesmo um super planeta. Cogitou-se por algum tempo que Júpiter e, eventualmente, Saturno pudessem ter sido formados juntos com o Sol durante o processo de contração da nebulosa solar. No entanto, hoje é praticamente unânime a ideia de que todos os planetas, incluindo os maiores, Júpiter e Saturno, foram formados a partir do disco primordial de gás e poeira que circundava o Sol. As duas razões principais seriam a dificuldade de se formar companheiras solares planetárias tão "pequenas" quanto Júpiter (e Saturno) e, principalmente, o fato de que todos os planetas têm suas órbitas aproximadamente no mesmo plano, o que é de se esperar se os planetas tiveram sua origem a partir do disco primordial de gás e poeira.

## **2.1 De poeira a pedregulhos**

A formação de planetas (e outros corpos menores do Sistema Solar) a partir de um disco de gás e poeira envolve três ou quatro estágios, e em todos eles a ideia é basicamente a mesma: a aglutinação dos sólidos em corpos cada vez maiores. Primeiramente, focalizaremos a primeira fase de formação planetária, de grãos micrométricos existentes na nebulosa primordial até objetos de alguns centímetros de diâmetro, que poderíamos chamar de pedras ou pedregulhos. A aglutinação dos sólidos nesta primeira fase se dá através de forças do tipo Wan der Wals, que são resultantes da polaridade química (mesmo que fraca) das moléculas formadoras dos sólidos. Para que isto aconteça é necessário que estes grãos primordiais colidam mutuamente com velocidades baixas. A ação do gás é importante nesta fase já que este mantém as órbitas dos grãos bastante circulares, o que implica em velocidades muito uniformes para grãos a uma mesma distância do Sol (que são os que vão se colidir). Esta aglutinação inicial de grãos depende também da densidade de sólidos no disco. Uma alta densidade de sólidos é conseguida na medida em que os grãos

primordiais se acumulam em um fino disco dentro do disco de gás mais espesso. Essa contração do disco sólido é causada pelo arrasto do gás que amortece o movimento vertical de pequenos grãos inicialmente em órbitas fora do plano central do disco.

## 2.2 De pedregulhos até planetesimais

A partir de alguns centímetros a aglutinação dos sólidos torna-se pouco eficiente. Para entendermos esta falta de eficiência é importante ressaltarmos duas questões importantes na formação primordial do Sistema Solar. Primeiro, o gás do disco só permanece neste por um período que é avaliado entre 1 e 10 milhões de anos <sup>1</sup>. Os planetas gigantes, principalmente Júpiter e Saturno, possuem uma fração importante de gás em sua composição o que mostra que eles foram formados em no máximo 10 milhões de anos, ou seja, enquanto persistia o gás no disco. Por outro lado, corpos da ordem do metro dentro do disco de gás vão sofrer o que chamamos de arrasto do gás. Este é causado pelo fato de que os objetos sólidos tendem a girar em torno do Sol com velocidade kepleriana ao passo que o gás, devido a sua pressão interna, se move com velocidade sub-kepleriana. Esta diferença de velocidades gera uma força de arrasto em sólidos do disco primordial. Esta força é direcionada opostamente à velocidade do corpo, causando uma perda de energia e momento angular deste, o que, por sua vez, leva o corpo a eventualmente colidir com o Sol. Esta força de arrasto depende do tamanho do objeto, sendo máxima para corpos da ordem do metro de diâmetro. Nesta faixa de tamanho, um objeto colide com o Sol a partir de uma distância de 1 au <sup>2</sup> em cerca de 100 anos, portanto muito rápido para poderem seguir se aglutinando para formarem corpos maiores. Esta dificuldade é denominada de barreira do metro, o que se traduz pela impossibilidade de pedras centimétricas continuarem se aglutinando para formarem corpos maiores num intervalo de tempo compatível com a escala de tempo de sobrevivência do disco de gás. Uma possível solução para este impasse é descrita a seguir.

Uma ideia proposta para se transpor a barreira do metro é acumular muitos corpos do tamanho de pedregulhos diretamente para formar objetos de vários quilômetros de diâmetro. Uma das teorias mais aceitas supõe que aleatoriamente em alguma região do disco a densidade de sólidos vai ser maior. Isso faz com que esse aglomerado mais denso de partículas faça o gás girar mais rápido na vizinhança do aglomerado (arrasto dos sólidos no gás). Isso, por sua vez, causa um arrasto menor nesse aglomerado de partículas e portanto um deslocamento radial mais lento do que partículas individuais. Estas, deslocando-se mais rapidamente radialmente, acabam por encontrar o aglomerado e aumentar o seu tamanho continuamente até eventualmente formar um planetesimal de centenas quilômetros de diâmetro.

## 2.3 De planetesimais até embriões planetários

Planetesimais de 100 km de diâmetro ou maiores se atraem gravitacionalmente de forma a promover colisões mútuas. Nesta fase, as velocidades relativas entre planetesimais próximos ainda é pequena implicando em colisões construtivas. A partir daí, os planetesimais vão começar a crescer de maneira mais ou menos uniforme, mas por questões puramente aleatórias alguns vão começar a crescer mais que outros.

---

<sup>1</sup>o gás é expulso quando a estrela passa por uma fase de sua evolução, chamada T-Tauri

<sup>2</sup>1 ua (uma unidade astronômica) é a distância média entre o Sol e a Terra

Acontece que quanto maior o planetesimal, maior a atração que este exerce sobre seus vizinhos. Daí se gerar o que chamamos de "runaway growth", cuja melhor tradução seria crescimento desenfreado. No final dessa fase, vão se formar alguns corpos maiores que podemos chamar de embriões planetários que terão um espaçamento mais ou menos uniforme entre si. Ainda restarão planetesimais entre os embriões, formando um sistema de embriões e planetesimais. A partir daí, é didático dividirmos a formação do Sistema Solar entre o externo e o interno.

### **2.3.1 Formação do Sistema Solar interno**

Os embriões planetários do Sistema Solar interno devem ter tido tamanhos entre a Lua e Marte. Após o crescimento dos planetesimais até embriões forma-se um sistema mais ou menos estável gravitacionalmente. Acontece que o Sistema Solar externo se forma mais rapidamente por ter uma concentração de sólidos maior (ver subseção seguinte). A formação do gigante Júpiter provoca uma perturbação forte na parte externa do sistema de embriões, onde se encontra hoje o cinturão de asteroides. As órbitas dos embriões começam a se tornar excêntricas (não circulares) provocando a colisão entre planetesimais e embriões e destes entre si. Esta vem a ser a última fase de formação do Sistema Solar interno. Os embriões colidem entre si formando corpos cada vez maiores até gerar o Sistema Solar interno formado pelos quatro planetas que conhecemos. A Lua em particular teria sido formada a partir da última colisão de um embrião (chamado de Theia) com a proto-Terra. Esta colisão se deu tangencialmente descolando material rochoso da Terra que posteriormente se aglutinou para formar a Lua, que tem uma densidade menor que a da Terra. A Lua não tem uma componente importante de metais como a Terra, o que é uma evidência deste cenário para a formação da Lua.

Este último processo de formação dos planetas terrestres pode ser simulado através de integradores numéricos de objetos que se movem em torno de um corpo central mais massivo (Sol). Muitos artigos científicos foram produzidos nos últimos vinte anos baseados nessas simulações que têm produzido planetas terrestres cada vez mais semelhantes aos atuais (massa e órbita). Estima-se a formação final do Sistema Solar interno em cerca de 100 milhões de anos. Um resultado importante desta última fase de formação do Sistema Solar interno é o aparecimento do cinturão de asteroides. Ele seria formado por planetesimais que sobraram da região primordial de embriões e planetesimais. A forte perturbação de Júpiter não permitiu que embriões crescessem construtivamente na região asteroidal e sobraram só alguns planetesimais com órbitas excêntricas e inclinadas, muitos deles na verdade não originais, mas pedaços resultantes de colisões entre os próprios planetesimais originais. A formação do cinturão de asteroides é talvez um assunto mais intrigante do que a dos próprios planetas, já que ele apresenta características muito peculiares tanto na distribuição de suas órbitas como nas suas variadas composições químicas em todo o cinturão. Estas propriedades dos asteroides fornecem vários vínculos importantes para constranger a forma correta como o Sistema Solar inicial foi formado.

### **2.3.2 Formação do Sistema Solar externo**

Embora a quantidade de material sólido do Sistema Solar externo seja bem maior que o interno por incluir gelo de água, metano, etc., material muito mais abundante do que rochas e metais, este material sólido no sistema externo se distribuía por regiões bem mais amplas do que no Sistema Solar interno.

Além disso o sistema externo deveria-se formar em no máximo 10 milhões de anos, tempo máximo de persistência do gás no disco primordial. Estes fatores puseram obstáculos difíceis de se transpor quando se simulava a formação do Sistema Solar externo através da aglutinação de embriões por atração gravitacional, como feito com sucesso para o Sistema Solar interno. Mesmo que se formasse algo semelhante ao sistema real, isso nunca era conseguido em menos de 10 milhões de anos mas em tempos bem maiores passando dos 100 milhões de anos previstos para o sistema interno. Estudos promissores tem sido propostos mais recentemente através de uma abordagem diferente da simples aglutinação de embriões por colisões mútuas. O novo conceito vai fazer uso dos pedregulhos citados na seção 2.2. Na verdade, quando se diz que as pedras crescem até planetesimais e estes até embriões não significa que todos estes corpos de diversos tamanhos não possam coexistir durante a maior parte da fase de formação do Sistema Solar. Usa-se, então, o conceito de arrasto do gás nos pedregulhos que fazem estes espiralarem em direção ao Sol mas, no caminho, encontram e colidem com planetesimais. Da mesma forma como os pedregulhos se perderiam rapidamente por colisão com o Sol se não houvesse nenhum obstáculo no caminho, eles se aglutinam rapidamente nos planetesimais, formando corpos de tamanhos planetários e sub-planetários muito rapidamente. Existem duas vertentes nessa última teoria, uma que diz que os planetesimais crescem diretamente até o tamanho de planetas e outra que diz que eles crescem até o tamanho de embriões<sup>3</sup> e, no final, colisões entre esses embriões formam finalmente os planetas. Este último cenário tem a vantagem de dar uma boa explicação para os eixos de rotação dos planetas externos, que são bem inclinados em relação ao plano invariante do Sistema Solar.

### 2.3.3 Júpiter e Saturno

Júpiter e Saturno são chamados de gigantes de gás ao passo que Urano e Netuno são chamados de gigantes de gelo. Supõe-se que os quatro planetas tenham um núcleo sólido em torno de 10 a 20 massas da Terra e o restante formado por gás. Desta forma, Júpiter que tem em torno de 300 massas da Terra e Saturno que tem em torno de 100 massas da Terra são chamados com razão de gigantes de gás, já que possuem em torno de 90% de gás em sua composição. Os conceitos expostos nas seções anteriores descrevem apenas o crescimento da parte sólida dos planetas. A parte gasosa é atraída para o planeta de forma bem rápida quando a parte sólida chega a 10 a 20 massas da Terra. Desta forma, Urano e Netuno são chamados de planetas de gelo porque não puderam atrair para si uma quantidade significativa de gás<sup>4</sup>. Admite-se que o gás do disco se dissipou no começo do processo de atração do gás pelos núcleos de Urano e Netuno.

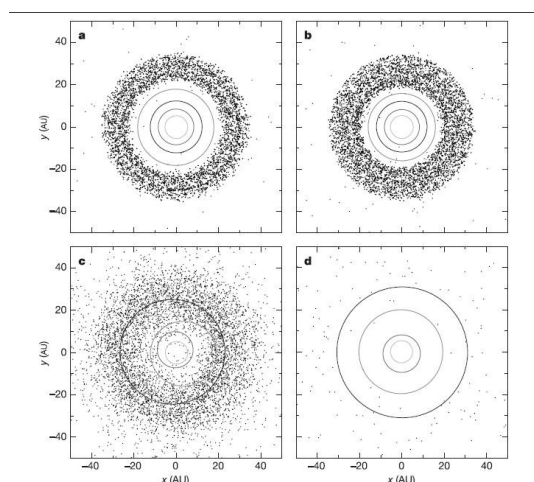
## 3 Migração planetária

As distâncias médias que os planetas se encontravam do Sol originalmente não eram as mesmas em que eles estão atualmente. Na verdade, embora as órbitas dos planetas mudem ao longo do tempo, sistemas planetários estáveis são caracterizados pela não variação das distâncias médias destes à estrela. Mas os

---

<sup>3</sup>no sistema externo, diferentemente do interno, esses embriões têm tamanhos de três a seis massas da Terra

<sup>4</sup>a massa de cada um deles é semelhante e em torno de 15 massas da Terra



**Figure 1:** *Órbitas dos grandes planetas e posições (no plano) de planetesimais em quatro fases, desde antes até depois da instabilidade gerada pelos encontros próximos entre os planetas*

primórdios do Sistema Solar, como de todo sistema planetário, teria sido muito mais instável. Migrações planetárias devem ter ocorrido em duas fases distintas da evolução do Sistema Solar. Na primeira fase, planetas migram pela interação gravitacional destes com o disco de gás primordial. Um disco com simetria radial vai ocasionar apenas uma componente radial da força gravitacional total deste no planeta. Já um disco não simétrico radialmente vai produzir uma força não radial aplicada ao planeta, gerando um torque e, conseqüentemente, uma variação na energia do planeta que se traduz por uma variação na sua distância média ao Sol. A variação dessa distância ao Sol, ou em termos de órbita, do semieixo maior da órbita planetária chamamos de migração planetária. Esta migração se dá porque o próprio planeta induz no disco uma distribuição não uniforme de massa, ou seja, quebra a simetria radial do disco. O estudo desse fenômeno envolve hidrodinâmica e seus detalhes vão além do escopo desse artigo, mas basta salientarmos que o disco externo ao planeta causa uma migração do planeta para dentro (em direção ao Sol) ao passo que o disco interno induz uma migração para fora. Dependendo das condições do disco e do planeta, o torque total aplicado ao mesmo pode induzir uma migração para fora ou para dentro. Em geral planetas gigantes sofrem uma migração para dentro. Esta conclusão já tinha sido avançada por teóricos antes da descoberta do primeiro planeta extrasolar, em 1995. Os primeiros planetas descobertos fora do Sistema Solar, até por causa do viés observacional, eram muito grandes e próximos da estrela, os chamados Júpiteres quentes (hot Jupiters). Apesar da surpresa dessas descobertas, foi inevitável associar a proximidade dos Júpiteres quentes às estrelas à teoria de migração planetária num disco de gás.

Os sistemas extrasolares se mostraram um ótimo laboratório para se estudar a migração planetária num disco de gás. Mas quanto ao Sistema Solar, por que Júpiter não migrou para mais perto do Sol? A resposta está na formação de Saturno. Se este se forma num tempo adequado depois de Júpiter, na região entre os dois gigantes, o disco de gás se dissipa pelo grande efeito gravitacional dos dois gigantes. Desta forma, os dois planetas vão migrar juntos em ressonância (mantendo uma razão constante entre suas distâncias ao Sol), como resultado do torque total vindo do disco interno à Júpiter e do disco externo a Saturno. Acontece que, por ser Saturno menos massivo que Júpiter, ele induz uma assimetria menor

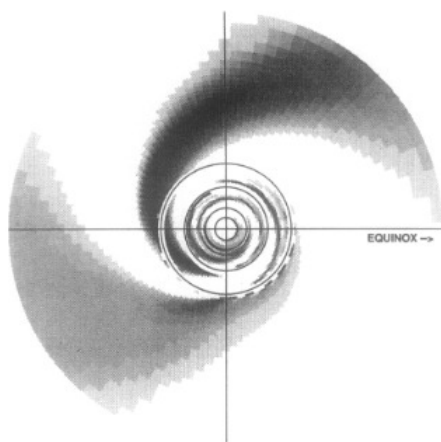
no disco externo, causando um torque externo menor do que se provocado por Júpiter. Desta forma, o torque vindo do disco interno tende a se igualar ao torque vindo do disco externo e os dois planetas não têm uma migração significativa que poderia levar Júpiter para muito perto do Sol. É interessante que, no caso do Sistema Solar, temos poucas evidências de como se processou esta migração primordial dos planetas. Em grande parte isso se deve ao fato de que uma segunda migração posterior ao desaparecimento do gás se processou e os sinais dessa última migração é que criaram as últimas impressões no Sistema Solar, "apagando" as primeiras. Ainda assim, cogita-se que Júpiter pode ter migrado em direção ao Sol durante algum tempo até Saturno se formar e reverter essa migração levando os dois gigantes para fora. Nesta incursão primordial, Júpiter poderia ter invadido a região onde hoje se encontra o cinturão de asteroides. Este cenário ofereceria uma boa explicação para a mistura de vários tipos de asteroides em diferentes distâncias destes ao Sol. Ao mesmo tempo, esvaziaria a região de excesso de planetesimais que, normalmente, nas simulações descritas na seção 2.3, induziriam a formação do planeta Marte grande demais. O espalhamento de planetesimais provocado pelo Júpiter invasor permitiria a formação de Marte próximo do seu tamanho atual.

### 3.1 Migração em um disco de planetesimais

Uma vez dissipado o gás do disco (o que deve ocorrer nos primeiros 10 milhões de anos), sobram os planetas já formados e um disco de planetesimais, ou seja, corpos menores que não conseguiram se aglutinar para formar planetas. Este disco estaria localizado na parte mais externa do Sistema Solar, depois do planeta mais distante formado. O disco de gás permitia uma estabilidade dos planetesimais, ou seja, suas órbitas eram bastante circulares. Uma vez dissipado o gás, a perturbação gravitacional do planeta mais externo sobre a porção mais interna do disco acaba por excitar as órbitas dos planetesimais. Estes começam a sofrer encontros próximos com o planeta mais externo, que acaba por espalhar o planetesimal para fora ou para dentro do Sistema Solar. Neste último caso, os planetesimais começam a ter encontros próximos também com os outros planetas. Assim é disparado o segundo processo de migração planetária, agora num disco de planetesimais. Desta feita, a migração se dá pela troca de energia e momento angular entre os planetas e os planetesimais que se encontram. A consequência é que os planetas migram para fora, exceto Júpiter, que migra para dentro (algo em torno de 0.2 a 0.5 au). Neste processo, os planetesimais são espalhados para fora e para dentro do sistemas solar, podendo colidir com os planetas, inclusive os terrestres <sup>5</sup> ou formarem as populações de objetos mais longínquos do Sistema solar, os trans-netunianos e a nuvem de Oort. A forma como se deu essa migração também é controversa entre os astrônomos teóricos. Alguns propõem uma migração mais suave em que os planetesimais e planetas têm encontros próximos mas não os planetas entre si. O outro modelo de migração, conhecido como modelo de Nice (ver Figura 1), propõe que os planetas mesmos também sofreram encontros próximos. Nas últimas versões desta teoria, teria havido um quinto planeta gigante que durante a fase de encontros próximos teria sido expulso para fora do Sistema Solar.

---

<sup>5</sup>esta seria uma explicação para o disparo do chamado "Bombardeamento Pesado Tardio", que teria-se estendido até 400 My após a formação do Sistema Solar



**Figure 2:** *probabilidade de se encontrar o planeta X. As partes mais escuras denotam a região onde seria mais provável encontrar o planeta X. Tirado da tese de doutorado do autor*

## 4 A Busca pelo planeta desconhecido

Desde a antiguidade, se conhecem cinco planetas que podem ser vistos a olho nu: Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno. Com o advento das teorias heliocêntricas, a Terra também começou a ser vista como planeta. A olho nu, um planeta basicamente não se distingue de uma estrela. A sua peculiaridade, conhecida desde a antiguidade, é que os planetas se movem em relação às estrelas, por isso o nome planeta que vem da palavra grega que significa errante. Com o advento dos telescópios, não demorou muito para se descobrir Urano. A magnitude aparente de Urano, em torno de 6, o coloca no limite da visibilidade, ou seja, alguém com uma boa acuidade visual pode vê-lo numa noite escura e sem nuvens (nem poluição). Desta forma, a descoberta de Urano significa que ele foi pela primeira vez identificado como planeta, mas ele já teria sido observado antes, porém sem se perceber seu movimento entre as estrelas.

### 4.1 A Descoberta de Netuno

Por outro lado, a magnitude aparente de Netuno em torno de 8, não permite a sua visualização a olho nu, sob qualquer hipótese. A descoberta de Netuno foi bem mais interessante que a de Urano. Em 1846, quando Netuno foi descoberto, não só as técnicas observacionais tinham avançado em relação à época do descobrimento de Urano, como também a física newtoniana tinha-se desenvolvido matematicamente naquilo que chamamos de mecânica celeste. As leis de Newton de movimento e da gravitação são suficientes para prever com grande precisão o movimento dos corpos do Sistema Solar (imprecisões surgem no caso de planetas mais próximos do Sol, em especial Mercúrio, que necessita de uma abordagem relativística). Mas uma coisa são as equações serem corretas, outra é resolver as equações diferenciais providas das leis de Newton para se prever, na prática, a posição dos objetos do Sistema Solar. Solução analítica sem aproximações só para o problema de dois corpos. Para um sistema de vários corpos, em particular um sistema planetário, com um corpo bem mais massivo e vários outros girando ao redor



daquele (estrela), um desenvolvimento matemático importante precisou se estabelecer. Nomes como Laplace, Lagrange e outros foram expoentes da mecânica celeste que se desenvolveu durante os séculos XVIII e XIX. Neste contexto, em meados do século XIX, a mecânica celeste estava madura para resolver um problema prático que aparecia. Quando se comparavam as observações de Urano com a sua localização prevista pela mecânica celeste, observava-se uma discrepância crescente. A explicação disso poderia ser alguma imprecisão na teoria de Newton, mas parecia bem mais razoável se supor que o inventário de planetas do Sistema Solar ainda não estivesse completo. Um desses matemáticos da época, Le Verrier, se dispôs a determinar os melhores parâmetros de um planeta desconhecido além de Urano que pudesse estar ocasionando as discrepâncias entre o observado e o previsto pela mecânica celeste. Uma vez determinado os parâmetros do tal planeta, Le Verrier enviou a informação a um observador, Johan Galle, que descobriu Netuno muito perto do previsto por Le Verrier na noite do mesmo dia em que Galle recebeu as previsões.

## **4.2 A Descoberta de Plutão**

A descoberta de Netuno foi um grande marco da ciência da época e uma confirmação da teoria de Newton. Já no século XX, depois de vários anos de observações de Netuno e com um maior arco de observação de Urano, começou-se a se especular se não haveria ainda um nono planeta além de Netuno. A coincidência entre as observações dos dois planetas mais exteriores e suas teorias não era perfeita, embora a discrepância, neste caso, estivesse próxima da magnitude dos erros aleatórios intrínsecos às observações. Ainda assim, o astrônomo Percival Lowell desenvolveu uma previsão de onde poderia estar o nono planeta em função dos erros que ele tomava como além de simplesmente intrínsecos às observações. Desta forma, tal como Le Verrier, Lowell também determinou uma região do céu onde poderia estar o planeta desconhecido. Clyde Tombaugh foi um jovem astrônomo que se dedicou a tentar descobrir o nono planeta a partir das previsões de Lowell. Muito mais demorada que a descoberta de Netuno, Tombaugh, ainda assim, descobriu um planeta, quase um ano depois de começar sua busca, cerca de 6° longe do centro da previsão.

### **4.2.1 A Decadência de Plutão**

No começo, a descoberta de Plutão foi considerada um feito semelhante à descoberta de Netuno. Porém, na medida em que o tempo passava, a maior parte das discrepâncias usadas para se determinar a posição de Plutão foi-se revelando como simples erros aleatórios intrínsecos às observações. Desta forma, a massa de Plutão necessária para explicar as discrepâncias foi também diminuindo. Em 1978, descobriu-se Caronte, o maior satélite de Plutão, que permitiu, através da terceira Lei de Kepler, se calcular a massa de Plutão. Descobriu-se, então, que essa massa era bem menor ainda que as previsões mais recentes na época, baseadas na perturbação de Plutão sobre Urano e Netuno. Em 2006, em uma reunião da União Astronômica Internacional, decidiu-se destituir Plutão do status de planeta. Plutão passou a ser denominado de planeta anão, como vários outros objetos do Sistema Solar, particularmente os trans-netunianos, como o próprio Plutão. Um planeta anão é definido como um objeto grande o suficiente para tomar a forma esférica pela sua auto gravidade mas não grande o suficiente para limpar de pequenos corpos, através da sua ação gravitacional, a região em torno de sua órbita.

### 4.3 O Planeta X

Em sendo a massa de Plutão determinada pela descoberta de seu satélite, bem menor do que o calculado para explicar as discrepâncias ainda existentes entre as observações de Urano e Netuno e suas teorias, parecia haver espaço para a existência de um outro planeta além de Plutão. Este planeta hipotético veio a ser conhecido como planeta X, em que o "X" significava não só incógnita mas também o numeral romano dez, referindo-se ao décimo planeta. Durante o década de 80 do século passado, houve uma nova corrida para a determinação da posição do planeta X. A Figura 2 mostra a região no plano onde seria mais provável se encontrar um planeta X (tirado da tese de doutorado do autor). Em 1993, E. Myles Standish, do "Jet Propulsion Laboratory", através da determinação de uma massa mais precisa para Netuno através da sonda Voyager, recalculou as posições de Urano e basicamente colocou em ruído branco as discrepâncias antes percebidas como possível erro sistemático entre as observações e as teorias de Urano e Netuno.

Uma busca semelhante sobre outro objeto de tamanho planetário ao redor do Sol apareceu em função da possibilidade do Sol possuir uma companheira. Esta denominação é dada a estrelas que giram em torno de outra maior, o que é bem comum na nossa Galáxia. A princípio, uma estrela companheira do tipo do Sol, mesmo que menor, foi descartada de imediato, já que seria a estrela mais brilhante observada no nosso céu. Porém, há estrelas menores de brilho mais tênue, como as chamadas anões marrons. Mesmo assim, estas têm uma forte emissão no infravermelho e também seriam hoje detectadas com alguma facilidade, portanto também foram descartadas como possíveis companheiras solares. Mas ainda restaria planetas-companheiras. Estes seriam objetos formados de forma idêntica às estrelas companheiras (ver abaixo seção 4.4.1) mas teriam uma massa planetária ao invés de estelar. Do ponto de vista observacional, é difícil descartar um planeta, mesmo algumas vezes maior que Júpiter, orbitando o Sol nos confins do Sistema Solar. Um planeta deste tipo poderia estar a dezenas ou centenas de milhares de unidades astronômicas distante do Sol, ou seja duas a quatro ordens de grandeza mais distantes do que Netuno.

Deve-se notar que a partir da perda do status de planeta por Plutão, o planeta desconhecido veio a ser denominado preferencialmente de planeta 9, já que o novo inventário de planetas do Sistema Solar passou a ter novamente apenas oito objetos.

### 4.4 Evidências recentes da existência de um nono planeta no Sistema Solar

Em existindo um planeta nos confins do Sistema Solar, como a sua influência seria sentida no Sistema Solar conhecido? A princípio, o que é previsível, essa influência seria sentida nos objetos mais distantes conhecidos do Sistema Solar, os trans-netunianos (TNO's, sigla em inglês para trans-Neptunian objects). Alguns trabalhos têm sido desenvolvidos neste sentido ultimamente. Entre os TNO's existe uma classe com muito poucos representantes chamados Sednoides, que leva o nome do primeiro desses objetos descoberto, Sedna. A peculiaridade deste objeto (e seus semelhantes) é que não só estão bastante distantes do Sol na média de suas órbitas, como todo TNO, mas também têm seu periélio bem além de Netuno. Para o periélio desses objetos se afastarem é necessário um potencial externo, o que um planeta distante poderia gerar. Porém, a mesma hipótese levantada para o afastamento do periélio do planeta 9 (ver na próxima seção) pode ser associada à própria formação dos Sednoides, ou seja, são objetos que teriam sido

espalhados pelos planetas em formação (planetesimais originais) e que tiveram seus periélios aumentados pelo potencial do aglomerado primitivo. Desta forma, a hipótese do aglomerado teve mais aceitação do que a do planeta 9.

Nos últimos três anos, no entanto, com a descoberta de novos TNO's distantes, pode-se verificar um novo sinal em suas órbitas. Órbitas são elipses assentadas num plano específico. Neste caso, podemos definir duas direções nas órbitas. A direção definida pelo eixo maior da elipse e a direção da interseção do plano orbital com um plano de referência (que pode ser por exemplo o plano invariante do Sistema Solar). Essas duas direções variam no tempo, devido à influência gravitacional dos vários objetos do Sistema Solar. A velocidade de precessão dessas duas direções dependem fortemente do semieixo maior das órbitas. Desta forma, num dado instante, órbitas com semieixos maiores (e outros elementos orbitais) distintos vão apresentar as direções acima definidas totalmente aleatórias entre  $0^\circ$  e  $360^\circ$ . O sinal observado nos TNO's distantes é uma aglomeração dessas direções em torno de uma direção preferencial. A probabilidade disso acontecer por acaso é baixíssima (menor que 0.1%) se apenas os objetos conhecidos do Sistema Solar são considerados. Por outro lado, a presença de um planeta distante pode induzir essa aglomeração das direções das órbitas dos TNO's distantes. Embora algumas outras teorias tenham sido apresentadas para possivelmente explicar a tal aglomeração, nenhuma delas tem a mesma capacidade explicativa do que um planeta desconhecido nos confins do Sistema Solar.

O sinal observado da possível presença do planeta 9 é o que chamamos de efeito secular. É como se fosse o efeito de órbitas sobre órbitas (como se a massa do planeta se distribuísse em torno da órbita do objeto e isso causasse um efeito médio nos outros objetos, ou seja, nas suas órbitas). É um efeito a longo prazo, diferentemente do efeito de Netuno sobre Urano que permitiu a descoberta daquele. Este efeito secular então permite-nos fazer projeções sobre a órbita do planeta 9, mas não sobre sua posição atual na órbita. Um trabalho foi feito neste sentido e a conclusão foi pouco reveladora. Praticamente se descartou a possibilidade do planeta 9 se localizar perto do periélio de sua órbita o que seria naturalmente excluído, pois a magnitude visual do planeta a esta distância do Sol não seria compatível com a sua não detecção até hoje. Programas de observações sistemáticas têm sido iniciados em vários observatórios do mundo para possivelmente detectar o planeta 9 nos próximos anos.

#### **4.4.1 A Origem do Planeta 9**

Podemos supor duas origens diferentes para o planeta 9. Fora de cogitação está a sua formação original onde ele se encontra presentemente. Não existiria densidade de massa suficiente nos confins do Sistema Solar para formar um planeta, muito menos com uma órbita excêntrica e inclinada. Os dois cenários mais aceitos para o implante do planeta 9 na órbita atual fazem uso de um conceito muito provável, qual seja, o de que o Sol nasceu dentro do que chamamos de aglomerado estelar. É como se observam hoje sistemas estelares no seu nascedouro. Desta forma, a formação planetária como descrita na seção acima deve ter ocorrido com o Sol dentro de um aglomerado primordial. Da mesma forma, outras estrelas do aglomerado devem ter passado por um processo semelhante de formação planetária. Nesta fase, em que planetas estão se formando e migrando pela influência do disco de gás é possível que muitos deles tenham encontros

próximos com outros maiores e sejam expulsos do sistema planetário <sup>6</sup>. Desta forma, o aglomerado estelar conterá estrelas, planetas, corpos menores e gás. Um fenômeno que pode acontecer dentro do aglomerado é a captura de estrelas menores por estrelas maiores. Isso acontece através de encontros próximos de três corpos, ou a partir da dissipação do gás do aglomerado. Este é o mecanismo mais aceito para a origem dos sistemas estelares duplos distantes (wide binaries). Os sistemas próximos são formados diretamente no colapso da nuvem que gerou a estrela, como citado acima. Da mesma forma, sistemas duplos distantes em que o menor objeto é um planeta podem ser formados. Isso seria uma das hipóteses para a implantação do planeta 9 em órbita em torno do Sol. Neste caso, o planeta 9 teria uma origem extrasolar.

O cenário mais aceito para o implante do planeta 9 em sua órbita atual também leva em conta o aglomerado primordial onde o Sol teria-se formado. Mas, neste caso, o planeta 9 seria um dos planetas formados no nosso sistema mas que, por encontro próximo com um gigante de gás, teve sua órbita alongada indo em sua máxima distância ao Sol para os confins do Sistema Solar. No entanto, o periélio do planeta continuaria passando perto do planeta gigante que jogou-o para longe. Este processo normalmente teria como fim ou a expulsão final do planeta em uma órbita aberta ou a sua colisão com um dos planetas ou com o Sol. Aí é que entra a influência do aglomerado original. O potencial do aglomerado induz a que o periélio da órbita do planeta no processo de ser jogado para fora aumente e se afaste do planeta que estaria interagindo com ele e, na verdade, de qualquer outro planeta que poderia afetar sua órbita posteriormente. Quando o aglomerado se dissipa, o planeta 9 ficaria então implantado nessa órbita distante e estável nos confins do Sistema Solar, à espera de sua descoberta.

## Agradecimentos

O autor é grato pelo convite feito a ele pelo Programa de Educação Tutorial para apresentar a palestra que originou o presente artigo na XI Semana da Física da Universidade de Brasília.

## References

- [1] Gomes 1987, Análise dos resíduos nas coordenadas de Urano e Netuno: estudo da hipótese do planeta X, tese de doutorado, Observatório Nacional, Rio de Janeiro, Brasil.
- [2] Lissauer 1993, Planet Formation, in *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 31:129-74
- [3] Ward 1997, Protoplanet Migration by Nebula Tides, *Icarus* 126, 261-281.
- [4] Gomes et al. 2005, Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets, *Nature* 435, 466-469.
- [5] Batygin and Brown 2016, Evidence for a Distant Giant Planet in the Solar System, *Astron. J.* 151, article 22.

---

<sup>6</sup>A troca de energia e momento angular entre os dois planetas que se encontram coloca um deles em uma órbita mais distante da estrela, podendo ser aberta, hiperbólica, caso em que o planeta flutuará livre dentro do aglomerado. Embora seja difícil de se observar estes planetas (denominados planetas errantes), existem evidências da observação de alguns poucos deles.