

A formação do nosso Sistema Solar e a diversidade planetária da nossa galáxia

Stela Ishitani Silva

NASA Goddard Space Flight Center

Resumo

O Sistema Solar é o único, entre os bilhões de sistemas planetários previstos em nossa Galáxia, que até agora sabemos hospedar vida. Morada do Sol, da Lua, da Terra e de outros sete planetas, sua formação começou há aproximadamente 4,56 bilhões de anos. Este artigo propõe uma recapitulação da formação do Sistema Solar, detalhando os principais passos desse processo, começando com uma nuvem de gás na nossa Galáxia e seguindo para o nascimento do Sol, a formação de planetas como Júpiter e a Terra, e as origens de corpos celestes menores, como luas, asteroides e cometas. As teorias atuais são fundamentadas tanto em observações do nosso próprio Sistema Solar quanto em estudos de outros sistemas planetários com diferentes idades e localizações na Galáxia. A análise do nosso Sistema Solar no contexto de outros sistemas planetários destaca como essas comparações são cruciais para aprofundar nossa compreensão sobre os processos de formação e evolução planetária.

Abstract

The Solar System is the only one, among the billions of planetary systems predicted in our Galaxy, that is currently known to host life. Home to the Sun, the Moon, Earth, and seven other planets, its formation began approximately 4.56 billion years ago. This paper provides a review of the formation of the Solar System, detailing the key steps in the process, from a cloud of gas in our Galaxy to the birth of the Sun, the formation of planets like Jupiter and Earth, and the origins of smaller celestial bodies such as moons, asteroids, and comets. Current theories are based on observations of our own Solar System as well as studies of other planetary systems with varying ages and locations in the Galaxy. Analyzing our Solar System in the context of other planetary systems highlights how these comparisons are crucial for deepening our understanding of planetary formation and evolution processes.

Palavras-chave: Sistema Solar, formação, planetas, exoplanetas

Keywords: solar system, formation, planets, exoplanets

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5n2.46010](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5n2.46010)

1 Introdução

Lar dos astros celestes mais próximos de nós, o nosso Sistema Solar nos oferece inúmeras informações sobre as leis da natureza. E entender sua origem e evolução é parte dos principais objetivos da astrofísica. A formação do nosso Sistema Solar começou há aproximadamente 4,56 bilhões de anos [1], recente quando comparada à nossa Galáxia, que tem idade aproximada de 13 bilhões de anos [2].

O Sistema Solar é apenas um entre os bilhões de sistemas planetários previstos na Via Láctea (veja Figura 1). Missões espaciais como *Voyager 1 e 2*, *Cassini-Huygens*, *Galileo* e *New Horizons* forneceram informações valiosas sobre o

nosso Sistema Solar. Da mesma forma, missões como *Hubble*, *Webb*, *Gaia*, *Kepler* e *TESS* nos proporcionaram uma compreensão de outros sistemas planetários. Com mais de 5 mil exoplanetas¹ já identificados e confirmados [3] e inúmeros estudos do nosso próprio Sistema Solar, entendemos cada vez mais como o Sol e os planetas se formaram, e como eles evoluirão no futuro.

Este artigo tem como objetivo detalhar nosso conhecimento atual sobre a formação do Sistema Solar, fundamentado em sua estrutura atual e nas observações de outros sistemas planetários. O artigo inicia com a introdução dos principais corpos celestes do nosso sistema na Seção 2, seguida pela

¹Planetas fora do Sistema Solar.

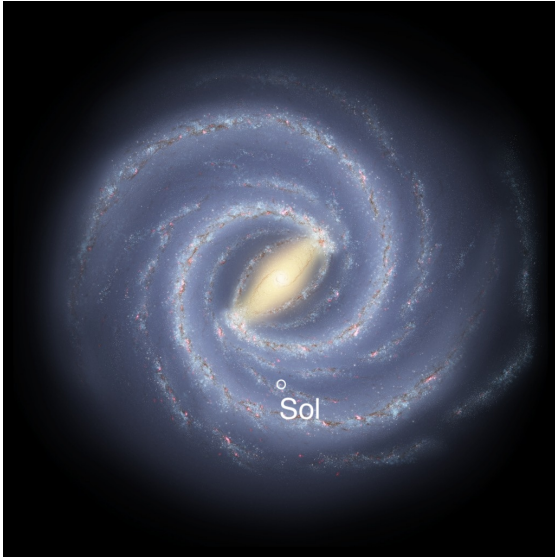


Figura 1: Ilustração artística da Via Láctea, nossa Galáxia, e da localização do nosso Sol. Imagem adaptada de NASA/JPL-Caltech/R. Hurt (SSC/Caltech).

descrição do nascimento do Sol na Seção 3. Em seguida, a Seção 4 oferece uma análise detalhada de dois percursos distintos de formação planetária, exemplificados por Júpiter e pela Terra. As Seções 5 e 6 abordam a origem de corpos menores como satélites naturais, asteroides e cometas. Posteriormente, a Seção 7 discute a comparação entre os planetas do nosso sistema e aqueles encontrados fora dele. Por fim, o artigo é concluído com uma seção de conclusão 8.

2 Nosso Sistema Solar

Dando nome ao nosso sistema planetário, o Sol contém cerca de 99,85% da massa do Sistema Solar, enquanto os oito planetas juntos representam aproximadamente 0,135% da massa total. Os restantes 0,015% estão distribuídos entre corpos menores, como os objetos transnetunianos,² cometas, asteroides e satélites dos planetas [4].

Dos clássicos oito planetas, quatro planetas pequenos e rochosos orbitam próximos ao Sol (Mercúrio, Vênus, Terra e Marte) e, em órbitas mais afastadas, dois gigantes gasosos (Júpiter e Saturno) e dois gigantes de gelo (Urano e Netuno). Com órbitas quase-circulares³ e quase-

²Inclui os planetas anões: Plutão, Éris, Makemake, Gonggong e Haumea.

³Com exceção de Mercúrio, as excentricidades são me-

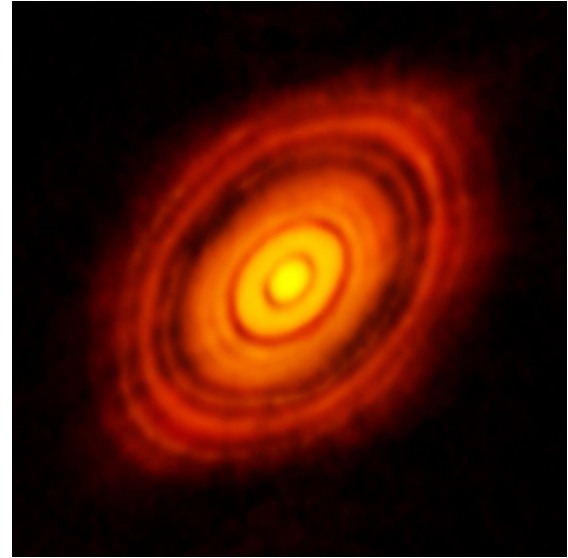


Figura 2: Disco protoplanetário ao redor da jovem estrela HL Tauri, mostrando subestruturas dentro do disco e até mesmo as possíveis posições de planetas se formando nas manchas escuras dentro do sistema. Crédito: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO).

coplanares,⁴ suas configurações sugerem que os planetas tiveram formação em um disco ao redor de um Sol jovem [5]. Veja Tabela 1 com características dos oito planetas.

3 Nasce uma estrela: o Sol

Atualmente, acredita-se que o nosso Sol não se formou de forma isolada, mas como parte de um aglomerado com cerca de $10^3 - 10^4$ estrelas em formação [7] que após alguns milhões de anos se dispersaram pela Galáxia. O ambiente em que o Sol se formou é teorizado baseado em característica do nosso Sistema Solar, como a presença de Alumínio-26 nos meteoritos e a ausência de sinais de desestabilização tanto no Cinturão de Kuiper quanto nas órbitas de Urano, Netuno [5, 7].⁵

nores que 10%.

⁴Suas inclinações orbitais são menores que alguns graus.

⁵O Alumínio-26, encontrado em meteoritos, é produzido durante supernovas de estrelas massivas. Como estrelas massivas são raras (uma para cada algumas centenas de estrelas de baixa massa), o aglomerado de nascimento do Sol deve ter contido pelo menos 10^3 estrelas. Por outro lado, a ausência de desestabilização nas órbitas indica um limite superior de 10^4 estrelas no aglomerado original, já que uma quantidade maior de estrelas implicariam em mais instabilidades orbitais [5].

Tabela 1: Características dos planetas do Sistema Solar. A Unidade Astronômica (UA) refere-se à distância entre a Terra e o Sol, que corresponde a cerca de 150 milhões de quilômetros. Um ano corresponde ao intervalo de tempo necessário para que o planeta complete uma revolução completa ao redor do Sol. Adaptado de [6].

Planeta	Semi-eixo Maior (UA)	Excentricidade	Inclinação Orbital (°)	Massa (10^{24} kg)	Raio (km)	Temperatura (°C)	Ano (dias)	Luas
Mercúrio	0,387	0,206	7,0	0,330	4.879	167	88,0	0
Vênus	0,723	0,007	3,4	4,87	12.104	464	224,7	0
Terra	1,000	0,017	0,0	5,97	12.756	15	365,2	1
Marte	1,52	0,094	1,8	0,642	6.792	-65	687,0	2
Júpiter	5,20	0,049	1,3	1.898	142.984	-110	4.331	95
Saturno	9,57	0,052	2,5	568	120.536	-140	10.747	146
Urano	19,17	0,047	0,8	86,8	51.118	-195	30.589	28
Netuno	30,18	0,010	1,8	102	49.528	-200	59.800	16

Nove bilhões de anos após o Big Bang, uma nuvem gigante de gás orbitava a Via Láctea [5]. Composta principalmente de hidrogênio e hélio [8], suas moléculas somavam a massa de milhares de sóis. Dentro dessa nuvem, milhares de nós de gás começaram a colapsar sob sua própria gravidade [5].

No centro de um desses nós, formou-se um protossol [8], uma pré-estrela. Com a maior parte da massa concentrada no protossol, o restante desse nó se achatou em um disco de gás e poeira formando o disco protoplanetário (veja Figuras 2 e 3), em que se manteve rotação devido à conservação do momento angular [8]. No protossol, a pressão gerada pelas altas densidades deram então início à fusão nuclear, marcando o nascimento do Sol.

No processo subsequente de evolução do disco protoplanetário, surgiram planetas, luas, asteroides e cometas, que caracterizam o Sistema Solar. Imagens de telescópios como a do Telescópio Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA, veja Figura 2) ou *Telescópio Hubble*⁶ (veja Figura 3) que mostram discos ao redor de estrelas jovens são evidências de que planetas se formam em discos protoplanetários ao redor de uma estrela jovem.

4 Formação dos planetas

O processo de formação planetária envolve diversas etapas, incluindo a formação inicial dos

⁶Observatórios espaciais são indicados em itálico, enquanto observatórios em terra são escritos em formato regular.

planetesimais, seu crescimento em embriões através de diferentes tipos de acreção (de seixos e/ou planetesimais), migração orbital, acreção de gás para formar protoplanetas gigantes, grandes impactos e, finalmente, a acreção tardia [5]. Por questões didáticas é possível simplificar a formação dos planetas em duas principais trajetórias representadas pela formação de Júpiter e pela formação da Terra como esquematizado na Figura 4.

Tabela 2: Tamanho característico de objetos que descrevem a formação dos planetas [5].

Objeto	Tamanho típico
Seixos	1mm - 10cm
Planetesimais	10km - 100km
Embriões de planetas rochosos	~ Lua - Marte
Embriões de planetas gigantes	~ 5-20x Terra

4.1 Planetesimais

Planetesimais são corpos sólidos fundamentais na formação dos planetas que atuam como pequenos blocos de construção (veja Tabela 2 para os principais objetos presente na formação de planetas). Pequenos em escala astronômica, eles têm o diâmetro típico variando de 10 a 100 km [5]. Os asteroides e cometas que conhecemos são na maioria das vezes remanescentes ou fragmentos desses planetesimais que não se transformaram em planetas. Evidências geoquímicas e astronômicas, como medições de meteoritos, indicam que o Sistema Solar se formou a partir de dois reservatórios distintos de planetesimais [10].

A formação de planetesimais começa com a coagulação de grãos de poeira, que são fortemente acoplados ao gás no disco protoplanetário por for-



Figura 3: Diversos discos protoplanetários na Nebulosa de Órion, descobertos pelo *Telescópio Hubble*. Crédito: NASA, ESA e L. Ricci (ESO) [9].

ças de arrasto. Teorias recentes, como a instabilidade de fluxo, sugerem que as interações aerodinâmicas entre esses grãos e o gás do disco podem levar à formação de aglomerados densos. Esses aglomerados podem eventualmente colapsar sob sua própria gravidade, formando planetesimais [5, 11]. Esse passo na formação dos planetas é representado pela cor verde na Figura 4.

Acredita-se que durante a evolução do nosso disco protoplanetário, a linha de neve⁷ migrou primeiro para fora e depois para dentro, criando duas populações distintas de planetesimais [10]. A composição dos planetesimais reflete a dos grãos de que são formados: próximo ao Sol, eles são compostos de ferro e rocha, enquanto mais distante, em regiões mais frias, a água se condensa em gelo sólido, resultando em planetesimais compostos por misturas de gelo e rocha [5].

Planetesimais continuam a crescer de duas maneiras: colidindo com outros planetesimais (acrecção de planetesimais) ou por meio de colisões com seixos em deriva (acrecção de seixos) [5, 12]. À medida que crescem, eles podem evoluir para em-

⁷Fronteira entre as regiões com vapor d'água e gelo sólido.

briões planetários, que têm o potencial de se tornar planetas.

4.2 Embriões planetários

Embriões planetários, também chamados de protoplanetas, são corpos celestes presentes durante a formação do Sistema Solar que ainda não evoluíram para planetas completos. Eles são maiores que os planetesimais e ainda não adquiriram uma forma completamente esférica nem uma órbita estabilizada.

O caminho evolutivo do protoplaneta que deu origem à Terra foi diferente do caminho seguido pelo protoplaneta que formou Júpiter. Essas diferenças são atribuídas à massa desses corpos e ao ambiente em que se formaram (além ou dentro da linha de neve). Na Figura 4, é apresentado um esquema representando a evolução dos embriões de planetas rochosos em amarelo e dos embriões de planetas gigantes em azul.

4.2.1 Embriões de planetas rochosos

Os embriões que evoluem para planetas rochosos têm tipicamente massas entre as da Lua e

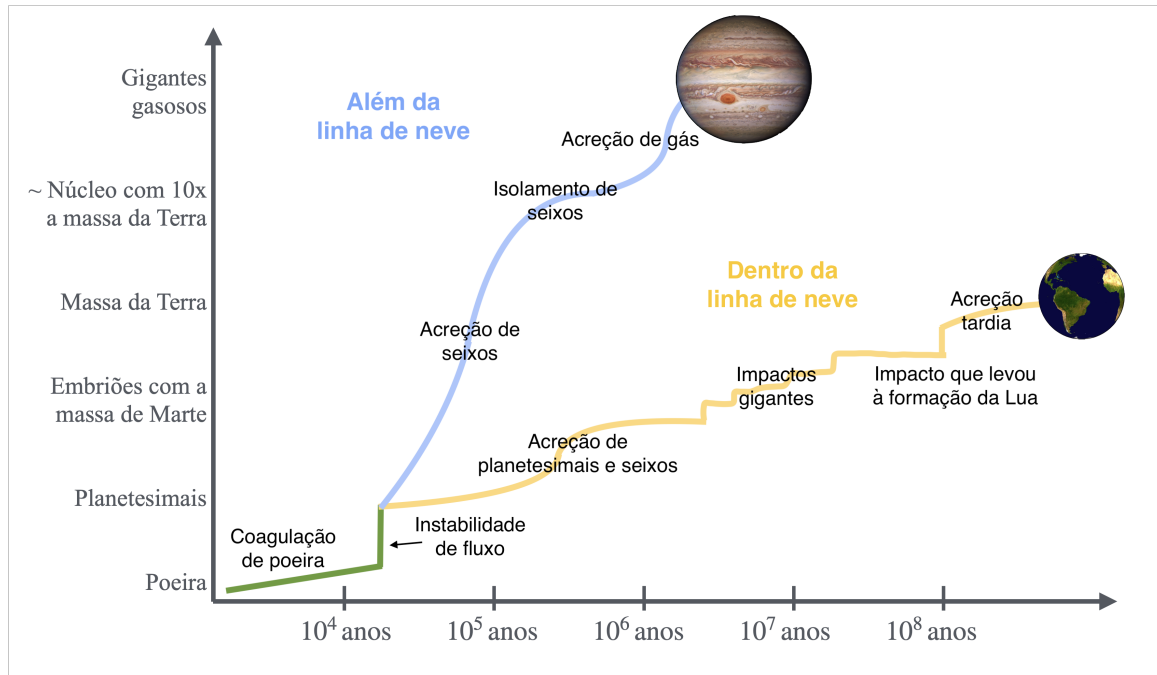


Figura 4: Esquema dos principais processos durante uma formação planetária, ilustrados pelas trajetórias de formação de Júpiter (azul) e da Terra (amarelo). Em verde, o processo inicial em comum de suas trajetórias. Gráfico adaptado de [5]. Imagem de Júpiter: NASA/ESA/NOIRLab/NSF/AURA/M.H. Wong and I. de Pater (UC Berkeley) et al. Imagem da Terra: NASA MODIS/ NASA GSFC/NOAA.

Marte e crescem eficientemente através da acreção de planetesimais em algumas centenas de milhares de anos [5]. Quando sua massa aproxima da de Ceres ou da Lua, a acreção de seixos, mesmo que lenta, se torna o principal mecanismo de crescimento [12]. A trajetória de formação dos planetas rochosos é representada de amarelo na Figura 4.

4.2.2 Embriões de planetas gigantes

A acreção de seixos foi o principal processo na formação de embriões de planetas gigantes do nosso Sistema Solar (veja a trajetória azul na Figura 4). Esse tipo de acreção é particularmente eficiente para embriões que se encontram além da linha de neve, onde os seixos são maiores devido à presença de gelo. Em contraste, a acreção de seixos nas regiões mais próximas ao Sol é consideravelmente mais lenta, pois a evaporação do gelo reduz o tamanho dos grãos de poeira [5].

Nota-se que a acreção de planetesimais não é eficaz para formar grandes embriões planetários, porque a gravidade dos núcleos em crescimento tende a dispersar os planetesimais. Enquanto a acreção de seixos permite que planetesimais maiores cresçam para embriões com 10 massas terres-

tres em menos de um milhão de anos. Esse crescimento rápido é crucial para explicar a formação de planetas gasosos, uma vez que os discos proto-planetários gasosos duram apenas alguns milhões de anos antes de se dissiparem [5, 13].

A acreção de seixos, no entanto, tem um limite e é interrompida quando o embrião, agora também chamado de núcleo, atinge cerca de 10 massas terrestres [13], conhecido como a massa de isolamento de seixos. Nesse ponto, o núcleo cria uma barreira de pressão que restringe a acumulação de mais material e inicia a contração da envoltória gasosa [5]. No modelo de acreção de seixos, os planetas gigantes podem experimentar mudanças significativas em suas posições iniciais, migrando seu semi-eixo orbital maior à medida que crescem. [13].

4.3 Acreção de gás e migração orbital de planetas gigantes

A acreção de gás e a migração orbital são processos cruciais na fase final de formação dos planetas gigantes, contribuindo para a explicação de suas massas, composições e posições orbitais.

Quando um embrião atinge a massa crítica

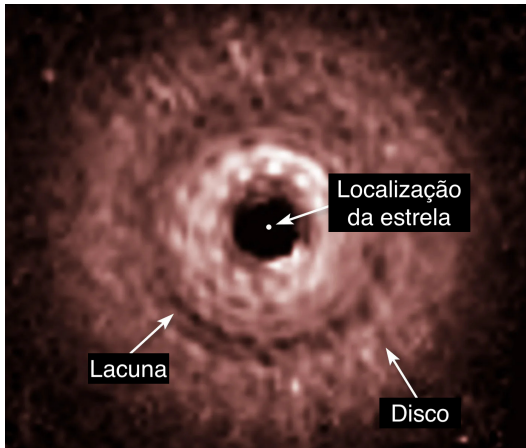


Figura 5: Essa imagem do *Telescópio Espacial Hubble* mostra uma lacuna em um disco protoplanetário de poeira e gás que orbita a estrela anã vermelha TW Hydrae. A lacuna provavelmente é causada pelos efeitos de um planeta em formação, ainda não detectado, que está gravitacionalmente atraindo material e esculpindo uma faixa no disco. Para revelar a estrutura do disco, os astrônomos usaram um dispositivo de mascaramento na câmera do *Hubble*, bloqueando a intensa luz da estrela localizada no centro da imagem. Crédito: NASA, ESA, J. Debes (STScI), H. Jang-Condell (Universidade de Wyoming), A. Weinberger (Instituição Carnegie de Washington), A. Roberge (Centro de Voos Espaciais Goddard), G. Schneider (Universidade do Arizona/Observatório Steward) e A. Feild (STScI/AURA).

(massa de isolamento de seixos) o processo de acreção de gás acelera, desencadeando um crescimento rápido desse protoplaneta [11, 14]. À medida que esse protoplaneta cresce, uma lacuna no disco de gás se abre (veja Figura 5), restringindo a quantidade de material disponível para acreção [5].

Os planetas gigantes gasosos e os gigantes de gelo possuem núcleos semelhantes, mas diferem na quantidade de gás acumulado. Júpiter e Saturno, os gigantes gasosos, têm a maior parte de sua massa composta por gás, enquanto os gigantes de gelo têm apenas uma fina camada de gás sobre um núcleo sólido. Essa diferença é resultado da velocidade de crescimento dos núcleos: núcleos que cresceram mais rapidamente acumularam grandes quantidades de gás, enquanto aqueles com crescimento mais lento capturaram menos gás antes da dissipação do disco gasoso [5].

Ao perturbar a densidade do disco gasoso ao seu redor, tanto dentro quanto fora de sua órbita [15], os protoplanetas recebem um torque em sua órbita, o que pode resultar em dois cenários

possíveis: o protoplaneta pode ganhar energia orbital e expandir sua órbita, ou, mais comumente, perder energia orbital e reduzir sua órbita [5]. Esse fenômeno é conhecido como migração orbital. Em geral, acredita-se que planetas gigantes migram para dentro durante sua formação.

4.4 Instabilidade, impactos e acreção tardia

A instabilidade dinâmica dos protoplanetas pode ser extremamente violenta. Com o tempo, a dispersão desses corpos pode levar a órbitas que se cruzam, resultando tanto em colisões quanto em mudanças significativas em suas órbitas [5]. Um exemplo notável desse tipo de colisão foi o impacto gigante onde um corpo do tamanho de Marte colidiu com a Terra, levando à formação da Lua [5, 11, 16, 17].

Além de colisões, as instabilidades podem causar alterações na órbita de um planeta, fazendo com que ele seja ejetado do sistema estelar. Uma vez ejetado, o planeta pode não retornar, pois não há força gravitacional suficiente para atraí-lo de volta. Esse fenômeno está associado à presença de planetas errantes, que são planetas que não orbitam nenhuma estrela (veja Subseção 7.3).

Após a fase dos grandes impactos, a fase final de acreção dos planetas terrestres, conhecida como acreção tardia, continua com a agregação de planetesimais e embriões. Estima-se que cerca de 0,5% da massa da Terra tenha sido acumulada durante a acreção tardia de planetesimais após o grande impacto que formou a Lua [18, 19]. A acreção tardia marca o último passo na formação da Terra.

5 Origem da Lua

A formação do satélite natural mais próximo de nós, a nossa Lua, ainda é debatida. O modelo mais aceito propõe que ela se formou após um impacto gigante entre a Terra e um embrião planetário do tamanho de Marte [5, 11, 16, 17]. Esse impacto lançou detritos que rapidamente se resfriaram e se consolidaram, formando a Lua [11, 20]. Essa explicação é corroborada pelo fato de que a Lua tem uma composição muito semelhante ao manto terrestre [5, 19] e possui cerca de um quarto do tamanho e 1/80 da massa da Terra [5].

A origem da Lua é apenas uma das maneiras de formação de satélites naturais. Alguns satélites se formam simultaneamente na mesma região do disco protoplanetário que gerou seu planeta, enquanto outros são asteroides capturados e possivelmente fragmentados.

6 Asteroides e cometas

Tanto os asteroides quanto os cometas são remanescentes da formação do Sistema Solar, formados a partir do material que não se incorporou a corpos maiores. A principal distinção entre eles está em suas órbitas. Asteroides geralmente orbitam na parte interna do Sistema Solar, enquanto os cometas, ao entrarem nessa região, estão apenas de passagem [5].

A maioria dos asteroides é encontrada no Cinturão de Asteroides, uma região entre Marte e Júpiter. Estima-se que esse cinturão abrigue mais de um milhão de asteroides com diâmetro superior a 1 km [21, 22]. Apesar dessa grande quantidade, a massa total dos asteroides é inferior a um milésimo da massa da Terra [5].

Existem duas principais hipóteses sobre a origem do Cinturão de Asteroides: uma sugere uma grande população inicial de asteroides que foi gradualmente reduzida, enquanto outra propõe uma introdução tardia dos asteroides nessa região, que foram redirecionados pelo campo gravitacional de planetas gigantes [5, 23]. De qualquer forma, os asteroides se originaram durante a formação do Sistema Solar, a partir dos materiais disponíveis no disco protoplanetário, sendo uma mistura de objetos resultantes da coagulação de poeira e fragmentos de outros corpos.

Os cometas são corpos menores que se formaram além da "linha de neve", originando-se em duas regiões principais: o Cinturão de Kuiper e a Nuvem de Oort [5, 24] (veja Figura 6). O Cinturão de Kuiper é a principal fonte de cometas que orbitam próximos ao plano da eclíptica, enquanto a Nuvem de Oort é responsável pelos cometas de longo período, que possuem uma ampla variedade de inclinações orbitais [5, 24].

O Cinturão de Kuiper é uma região⁸ que se estende desde Netuno, a aproximadamente 30 UA,⁹

⁸Plutão, o planeta-anão, está localizado nessa região.

⁹UA é a sigla para "unidade astronômica". É uma uni-

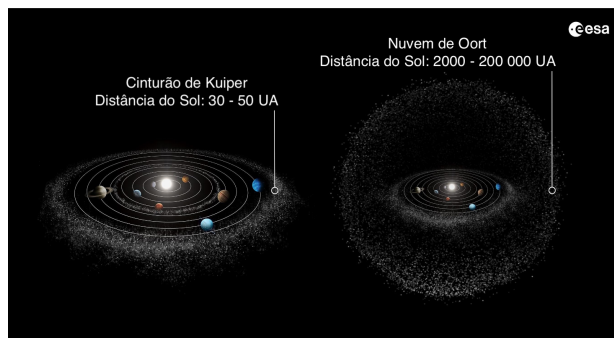


Figura 6: Ilustração mostrando os dois principais reservatórios de cometas no Sistema Solar: o Cinturão de Kuiper, a uma distância de 30–50 unidades astronômicas (UA: a distância Terra–Sol) do Sol, e a Nuvem de Oort, que pode se estender até 2 000–200 000 UA do Sol. Crédito: ESA.

até 50 UA do Sol, sendo uma coleção de relíquias de centenas de milhares de planetesimais formados em um processo de instabilidade [25]. Ele é mais largo e mais denso que o Cinturão de Asteroides, e sua massa total é estimada em aproximadamente 6% da massa da Terra [26]. Já a Nuvem de Oort é descrita como uma vasta esfera que encapsula todo o nosso sistema planetário, situada entre 2000 e 200000 UA do Sol [27]. Considerada a região mais distante do Sistema Solar, é onde a luz do Sol leva aproximadamente um ano terrestre para chegar. Embora as estimativas ainda não sejam precisas, acredita-se que a Nuvem de Oort contenha aproximadamente um trilhão de objetos, com uma massa total em torno de 5 vezes a massa da Terra [28, 29].

Embora mais distante, a Nuvem de Oort foi a primeira a ser teorizada como a origem dos cometas [24, 27]. Posteriormente, propôs-se a existência de uma segunda região, em formato de toroide,¹⁰ correspondente ao Cinturão de Kuiper [24]. Durante a instabilidade planetária, muitos pequenos corpos foram ejetados do Sistema Solar, mas alguns sobreviveram em nichos quase estáveis. Modelos indicam que a Nuvem de Oort e o Cinturão de Kuiper abrigam a maioria dos planetesimais e fragmentos remanescentes da formação do nosso Sistema Solar [24].

dade de comprimento equivalente à distância aproximada da Terra ao Sol, que corresponde a cerca de 150 milhões de quilômetros.

¹⁰Formato semelhante ao de um donut ou pneu.

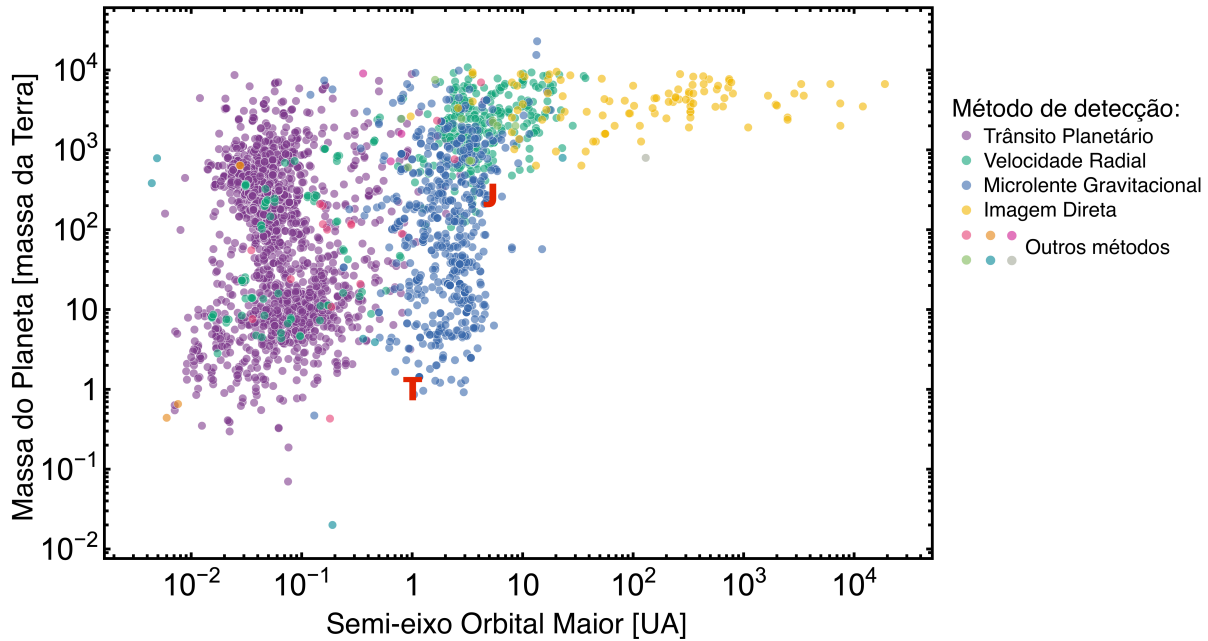


Figura 7: Distribuição de todos os exoplanetas detectados até 18 de agosto de 2024, com dados do NASA Exoplanet Archive [3]. A Terra (T) e Júpiter (J) foram incluídos para comparação. Se o nosso Sol fosse observado de outro sistema planetário com a tecnologia atual, provavelmente apenas Júpiter teria sido detectado. Esse cenário, no entanto, promete mudar com o telescópio *Roman*.

7 Discussão: outros sistemas planetários

Analisar outros sistemas planetários é extremamente importante para ampliar nossa compreensão da formação e evolução do nosso próprio Sistema Solar. É importante notar que, embora alguns experimentos possam ser realizados em laboratórios, criar – no sentido literal – diversos sistemas planetários para testar hipóteses não é possível para nós. Portanto, os dados observacionais de outros sistemas planetários cumprem parcialmente esse papel.

Comparar sistemas planetários a diferentes distâncias e localizações na galáxia nos permite identificar processos comuns na formação planetária e destacar variações decorrentes dos diferentes ambientes de formação. Essa análise também oferece uma valiosa perspectiva temporal, permitindo a observação de sistemas com diferentes idades. Como a evolução dos astros ocorre em escalas de tempo muito longas para serem observadas diretamente, esses dados ajudam a preencher lacunas na nossa compreensão da formação e evolução planetária ao longo do tempo. Além disso, essas descobertas possibilitam investigar a habitabilidade em outros mundos e entender melhor a singularidade do planeta Terra.

7.1 Detecção de exoplanetas

A descoberta de planetas fora do nosso Sistema Solar, conhecidos como exoplanetas, é uma das mais significativas conquistas científicas do nosso tempo. Os primeiros exoplanetas foram descobertos na década de 1990 [30, 31], e sua importância foi reconhecida com o Prêmio Nobel de Física em 2019 [32]. Em apenas três décadas, milhares de exoplanetas foram detectados por diversos métodos. Mais de 98% das detecções de exoplanetas já feitas foram realizadas através dos seguintes métodos:

- **Trânsito Planetário:** Quando alinhado ao campo de visão do observador, um exoplaneta que passa na frente de sua estrela hospedeira pode causar uma diminuição detectável no brilho de sua estrela. [33].
- **Velocidade Radial:** A presença de um planeta pode causar variações na velocidade da estrela hospedeira, fazendo com que ela se aproxime ou se afaste de nós periodicamente. Esse movimento provoca alterações na cor da luz da estrela, esse fenômeno é chamado de efeito Doppler [34].
- **Microlente Gravitacional:** Um sistema pla-

netário pode atuar como uma lente gravitacional, amplificando a luz de uma outra estrela ao fundo. A análise de como o brilho dessa outra estrela aumenta para o observador fornece informações sobre os componentes da lente que causou esse efeito [35].

- **Imagem Direta:** Em alguns casos, é possível observar diretamente os exoplanetas. Astrônomos frequentemente utilizam dispositivos para bloquear a luz da estrela hospedeira, o que pode revelar exoplanetas [36].

Apesar dos vieses observacionais, uma enorme diversidade de sistemas planetários já foi identificada (veja Figura 7). A descoberta de exoplanetas mostrou que sistemas planetários semelhantes ao nosso — com planetas rochosos internos e gigantes gasosos externos — são relativamente raros, representando apenas cerca de 1% dos sistemas conhecidos [5]. É importante notar que, se o nosso Sol fosse observado de outro sistema solar, com a tecnologia atual, provavelmente apenas Júpiter teria sido detectado. Isso não significa necessariamente que outros sistemas planetários como o nosso não existam, mas que a tecnologia atual ainda não permitiu uma detecção completa dos exoplanetas.

7.2 Demografia dos exoplanetas

Embora a maioria dos exoplanetas conhecidos tenha sido detectada por trânsitos, essa técnica se torna menos eficaz com o aumento da separação orbital entre a estrela e o planeta [33] (veja Figura 7). Em contraste, a detecção por microlentes é especialmente valiosa devido à sua sensibilidade a planetas de baixa massa e mais frios [37, 38], com distâncias orbitais geralmente entre 0,5 e 10 UA. Esse intervalo é fundamental para entender a teoria de acreção dos núcleos e, por conseguinte, a formação e evolução planetária [39–42].

A combinação das técnicas de trânsito e microlente permite a detecção de exoplanetas em uma ampla gama de razões entre massas de planetas e estrelas, bem como separações orbitais. Por essa razão, a NASA selecionou esses dois métodos para medir a demografia dos sistemas planetários, resultando em duas missões espaciais principais: *Kepler*,¹¹ focada na detecção de trânsitos

¹¹Lançado em 2009, o telescópio espacial *Kepler* foi apo-

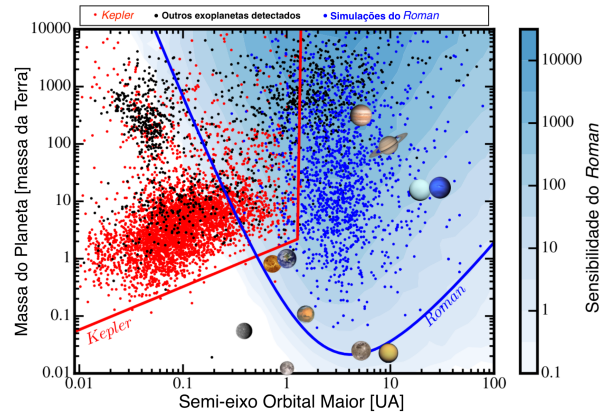


Figura 8: Comparação entre os exoplanetas detectados por trânsito pelo *Kepler* (pontos vermelhos) e outros exoplanetas conhecidos até 2019 (pontos pretos) com as detecções simuladas de microlentes gravitacionais para o *Roman* (pontos azuis). Também são mostrados os planetas do Sistema Solar, juntamente com a Lua, Titã e Ganimedes, para referência. As altas concentrações de detecções de planetas próximos à sua estrela hospedeira têm razões históricas, indicando um forte efeito de seleção devido à técnica empregada. Imagem adaptada de [43].

planetários, e a futura missão *Nancy Grace Roman* (*Roman*),¹² que tem como um dos objetivos principais a busca por exoplanetas através do método de microlente gravitacional. Essas missões fornecerão dados abrangentes sobre a frequência de planetas de diferentes massas em várias separações orbitais, oferecendo a base sólida mais completa para testar teorias de formação planetária [43] (veja Figura 8).

7.3 Planetas errantes

Pesquisas recentes estimam que existem trilhões de planetas errantes¹³ na nossa Galáxia [44], o que corrobora a teoria de que planetas podem ser expelidos de seus sistemas devido a instabilidades (visto na Subseção 4.4). Esses planetas errantes foram detectados por métodos de microlente [45] e também por imagens diretas [46]. Recentemente, foram observados pares de objetos com massa similar à de Júpiter (veja Figura 9). Essas descobertas oferecem novas perspectivas e confirmações sobre a diversidade e a dinâmica de formação de sistemas planetários.

sentado em 2018.

¹²O telescópio *Roman* é atualmente a missão espacial carro-chefe da NASA, com previsão de lançamento até maio de 2027.

¹³Planetas que não orbitam nenhuma estrela.



Figura 9: Subseção de uma imagem composta colorida de comprimento de onda curto do NIRcam do *Webb* apontando para a Nebulosa de Órion. A imagem tem o norte (N) para a esquerda e o leste (E) para baixo. Cinco objetos binários com massa próxima de Júpiter (JuMBOs) estão destacados. Crédito: JWST/NIRcam/Pearson & McCaughrean 2023 [46].

8 Conclusão

A formação do Sistema Solar ocorreu predominantemente durante os milhões de anos de vida do disco protoplanetário gasoso, definindo uma janela temporal limitada para a formação planetária. Os principais corpos do nosso sistema planetário incluem o Sol e seus oito planetas (Mercúrio, Vênus, Terra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano e Netuno), além de corpos menores como asteroides, cometas e satélites planetários, todos originados do material de uma nuvem de gás na Via Láctea. Apesar do extenso conhecimento que possuímos sobre o nosso Sistema Solar, ainda há muitos aspectos a serem explorados e teorias a serem confirmadas ou refutadas.

Quando olhamos para fora, o Sistema Solar representa apenas cerca de 1% dos sistemas planetários conhecidos até agora, sugerindo que sua configuração é relativamente incomum. Isso nos desafia a tentar compreender quais são os fatores com maior impacto na definição das características dos sistemas durante o período de formação.

Essa raridade do Sistema Solar também influencia a busca por mundos habitáveis, pois implica que há uma probabilidade menor de se encontrar planetas semelhantes à Terra exatamente em sistemas parecidos com o nosso. Isso nos leva a reconsiderar onde procurar por vida fora da Terra e repensar se os sistemas planetários mais promissores de hospedar vida podem não replicar exatamente a configuração do Sistema Solar. Isso abre o questionamento de quais seriam as características essenciais que deveríamos analisar para identificar ambientes capazes de sustentar a vida.

Além de destacar a singularidade do Sistema Solar, a diversidade observada em outros sistemas planetários reflete a ampla gama de configurações possíveis em nossa Galáxia, oferecendo perspectivas valiosas sobre a formação e evolução planetária. Esse conhecimento enriquece nosso entendimento sobre a origem e o futuro da Terra e do Sistema Solar. Embora o campo de descobertas de exoplanetas ainda seja recente e apresente certos vieses, futuros telescópios como o *Roman* prometem desvendar novos mundos, talvez com características mais próximas das nossas.

Por fim, atualmente, os objetos no nosso Sistema Solar são os únicos que podemos explorar diretamente com equipamentos humanos. Por-

tanto, assim como usamos dados de exoplanetas para complementar nosso entendimento do Sistema Solar, o conhecimento do nosso sistema também nos ajuda a aprofundar a compreensão das estrelas e planetas em nossa Galáxia. Este conhecimento é crucial para obter uma visão abrangente dos objetos que compõem o nosso Universo.

Agradecimentos

Agradeço a minha mãe, Liana Ishitani Silva, pelos seus valiosos comentários sobre este manuscrito. A pesquisa de Stela Ishitani Silva é conduzida no site NASA Goddard Space Flight Center e apoiada pela fellowship concedida pelo NASA Postdoctoral Program e administrada pela Oak Ridge Associated Universities sob contrato com a NASA.

Sobre a autora

Stela Ishitani Silva (stela.ishitanisilva@nasa.gov) é *postdoctoral fellow* na NASA GSFC. Obteve seu Bacharelado em Física pela Universidade Federal de Minas Gerais e seu Mestrado e Doutorado em Física pela Catholic University of America nos Estados Unidos. É co-autora da descoberta de mais de 30 exoplanetas utilizando a técnica de microlente gravitacional e de mais de 180 candidatos a trânsito planetário. Durante o seu doutorado, liderou a descoberta do exoplaneta MOA-2020-BLG-135Lb e foi também agraciada com o John Mather Nobel Scholar Award. Atualmente conduz implementação de aprendizado de máquina para a detecção de variabilidades estelares e faz parte da colaboração Microlensing Observations in Astrophysics e da equipe responsável pelo levantamento de exoplanetas que serão descobertos com o Roman Space Telescope.

Referências

- [1] S. Pfalzner et al., *The formation of the solar system*, *Physica Scripta* **90**(6), 068001 (2015).
- [2] M. Xiang e H.-W. Rix, *A time-resolved picture of our Milky Way's early formation history*, *Nature* **603**(7902), 599 (2022).

- [3] National Aeronautics and Space Administration, California Institute of Technology e Exoplanet Exploration Program, *NASA Exoplanet Archive*. Disponível em <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/index.html>, acesso em ago. 2024.
- [4] NASA Science Activation program, *Basics of Space Flight - Chapter 1: The Solar System*. Disponível em <https://science.nasa.gov/learn/basics-of-space-flight/chapter1-1/>, acesso em jul. 2024.
- [5] S. N. Raymond, *The Solar System: structural overview, origins and evolution* (2024). [ArXiv:2404.14982](https://arxiv.org/abs/2404.14982).
- [6] D. R. Williams, *NASA: Planetary Fact Sheet - Metric*. Disponível em <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/>, acesso em ago. 2024.
- [7] F. C. Adams, *The birth environment of the solar system*, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **48**(1), 47 (2010).
- [8] M. Marov, *The Formation and Evolution of the Solar System*, *Oxford Research Encyclopedia of Planetary Science* (2018).
- [9] NASA Science, *Finding Planetary Construction Zones*. Disponível em <https://science.nasa.gov/mission/hubble/science/science-highlights/finding-planetary-construction-zones/>, acesso em ago. 2024.
- [10] T. Lichtenberg et al., *Bifurcation of planetary building blocks during Solar System formation*, *Science* **371**(6527), 365 (2021).
- [11] P. J. Armitage, *Astrophysics of Planet Formation* (Cambridge University Press, 2020).
- [12] A. Johansen e M. Lambrechts, *Forming planets via pebble accretion*, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* **45**(1), 359 (2017).
- [13] J. P. Williams e L. A. Cieza, *Protoplanetary disks and their evolution*, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **49**(1), 67 (2011).
- [14] J. B. Pollack et al., *Formation of the giant planets by concurrent accretion of solids and gas*, *Icarus* **124**(1), 62 (1996).
- [15] W. Kley e R. Nelson, *Planet-disk interaction and orbital evolution*, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **50**(1), 211 (2012).
- [16] R. M. Canup, *Simulations of a late lunar-forming impact*, *Icarus* **168**(2), 433 (2004).
- [17] W. Benz, W. Slattery e A. Cameron, *The origin of the Moon and the single-impact hypothesis I*, *Icarus* **66**(3), 515 (1986).
- [18] J. M. D. Day e M. Paquet, *Temporally limited late accretion after core formation in the Moon*, *Meteoritics & Planetary Science* **56**(4), 683 (2021).
- [19] R. J. Walker, *Highly siderophile elements in the Earth, Moon and Mars: update and implications for planetary accretion and differentiation*, *Geochemistry* **69**(2), 101 (2009).
- [20] E. Kokubo, S. Ida e J. Makino, *Evolution of a circumterrestrial disk and formation of a single Moon*, *Icarus* **148**(2), 419 (2000).
- [21] F. DeMeo e B. Carry, *The taxonomic distribution of asteroids from multi-filter all-sky photometric surveys*, *Icarus* **226**(1), 723 (2013).
- [22] F. E. DeMeo et al., *The compositional structure of the asteroid belt*, in *Asteroids IV*, editado por P. Michel, F. E. DeMeo e W. F. Bottke (University of Arizona Press, 2015), 13–42.
- [23] D. Nesvorný et al., *Isotopic trichotomy of main belt asteroids from implantation of outer solar system planetesimals*, *Earth and Planetary Science Letters* **626**, 118521 (2024).
- [24] W. C. Fraser et al., *The Transition from the Kuiper Belt to the Jupiter-Family (Comets)* (2022). [ArXiv:2210.16354](https://arxiv.org/abs/2210.16354).
- [25] A. Morbidelli e D. Nesvorný, *Kuiper belt: formation and evolution*, in *The Trans-Neptunian Solar System*, editado por D. Pralnik, M. A. Barucci e L. A. Young (Elsevier, 2020), 25–59.

- [26] A. Di Ruscio et al., *Analysis of Cassini radio tracking data for the construction of INPOP19a: A new estimate of the Kuiper belt mass*, *Astronomy & Astrophysics* **640**, A7 (2020).
- [27] J. H. Oort, *The structure of the cloud of comets surrounding the Solar System and a hypothesis concerning its origin*, *BAIN* **11**, 91 (1950).
- [28] S. Torres et al., *Galactic tide and local stellar perturbations on the Oort cloud: creation of interstellar comets*, *Astronomy & Astrophysics* **629**, A139 (2019).
- [29] D. Jewitt, *Kuiper Belt and comets: An observational perspective*, in *Trans-Neptunian Objects and Comets*, editado por D. Jewitt, A. Morbidelli e H. Rauer (Springer, 2008), 1–78.
- [30] A. Wolszczan e D. A. Frail, *A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12*, *Nature* **355**(6356), 145 (1992).
- [31] M. Mayor e D. Queloz, *A Jupiter-mass companion to a solar-type star*, *nature* **378**(6555), 355 (1995).
- [32] *The Nobel Prize in Physics 2019*. Disponível em <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2019/summary/>, acesso em ago. 2024.
- [33] J. N. Winn, *Exoplanet transits and occultations*, in *Exoplanets*, editado por S. Seager (University of Arizona Press, 2010), 55–77. [ArXiv:1001.2010](https://arxiv.org/abs/1001.2010).
- [34] C. Lovis e D. Fischer, *Radial velocity techniques for exoplanets*, in *Exoplanets*, editado por S. Seager (University of Arizona Press, 2010), 27–53.
- [35] S. Mao e B. Paczynski, *Gravitational microlensing by double stars and planetary systems*, *The Astrophysical Journal* **374**, L37 (1991).
- [36] G. Chauvin et al., *A giant planet candidate near a young brown dwarf-direct VLT/NACO observations using IR wavefront sensing*, *Astronomy & Astrophysics* **425**(2), L29 (2004).
- [37] D. P. Bennett e S. H. Rhie, *Detecting Earth-mass planets with gravitational microlensing*, *The Astrophysical Journal* **472**(2), 660 (1996).
- [38] A. Gould e A. Loeb, *Discovering Planetary Systems through Gravitational Microlenses*, *The Astrophysical Journal* **396**, 104 (1992).
- [39] J. J. Lissauer, *Planet formation*, *Annual review of astronomy and astrophysics* **31**(1), 129 (1993).
- [40] S. Ida e D. N. Lin, *Toward a deterministic model of planetary formation. I. A desert in the mass and semimajor axis distributions of extrasolar planets*, *The Astrophysical Journal* **604**(1), 388 (2004).
- [41] G. M. Kennedy, S. J. Kenyon e B. C. Bromley, *Planet formation around low-mass stars: the moving snow line and super-Earths*, *The Astrophysical Journal* **650**(2), L139 (2006).
- [42] M. Ali-Dib, A. Cumming e D. N. C. Lin, *The effect of late giant collisions on the atmospheres of protoplanets and the formation of cold sub-Saturns*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **509**(1), 1413 (2022).
- [43] M. T. Penny et al., *Predictions of the WFIRST Microlensing Survey. I. Bound Planet Detection Rates*, *The Astrophysical Journal Supplement Series* **241**(1), 3 (2019). [ArXiv:1808.02490](https://arxiv.org/abs/1808.02490).
- [44] T. Sumi et al., *Free-floating Planet Mass Function from MOA-II 9 yr Survey toward the Galactic Bulge*, *The Astronomical Journal* **166**(3), 108 (2023). [ArXiv:2303.08280](https://arxiv.org/abs/2303.08280).
- [45] N. Koshimoto et al., *Terrestrial- and Neptune-mass Free-Floating Planet Candidates from the MOA-II 9 yr Galactic Bulge Survey*, *The Astronomical Journal* **166**(3), 107 (2023). [ArXiv:2303.08279](https://arxiv.org/abs/2303.08279).
- [46] S. G. Pearson e M. J. McCaughrean, *Jupiter mass binary objects in the Trapezium cluster* (2023). [ArXiv:2310.01231](https://arxiv.org/abs/2310.01231).