

Ocultações estelares: os 10 anos da descoberta dos anéis de Chariklo e os avanços no estudo do Sistema Solar

Felipe Braga Ribas

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Resumo

Há cerca de 10 anos anunciamos a descoberta do primeiro sistema de anéis ao redor de um pequeno corpo do Sistema Solar. A técnica de ocultações estelares, que permitiu o feito, vem sendo largamente utilizada para caracterizar objetos do Sistema Solar. Seu alto poder de resolução espacial tem permitido que dimensões e formas venham sendo obtidas, com grande precisão, para muitos objetos, desde aqueles próximos à Terra, até aqueles mais distantes do Sol. Além dos anéis de Chariklo descobertos em 2013, anéis já foram identificados ao redor do planeta-anão Haumea e do objeto transnetuniano Quaoar. Isto mostra que anéis podem ser comuns no Sistema Solar Exterior, já que limites previamente imaginados, como o Limite de Roche, não se aplicam à estes anéis. Os pesquisadores brasileiros e astrônomos cidadãos tem tido papel fundamental nesta pesquisa, a qual, graças ao *LSST*, deve expandir consideravelmente nos próximos anos.

Abstract

About 10 years ago, we announced the discovery of the first ring system around a Small Solar System Object. The feat was possible thanks to the use of the stellar occultation technique, which has been widely used to characterize objects in the Solar System. Its high spatial resolution allows determining the dimensions and shapes with great precision for many objects, from those close to Earth to those farthest from the Sun. In addition to the Chariklo rings discovered in 2013, rings have been identified around the dwarf planet Haumea and the trans-Neptunian object Quaoar. This shows that rings may be common in the Outer Solar System since previously imagined limits, such as the Roche Limit, do not apply to these rings. Brazilian researchers and citizen astronomers have played a fundamental role in this research, which, thanks to the LSST, may expand considerably in the coming years.

Palavras-chave: ocultações estelares, anéis, pequenos corpos do Sistema Solar, ciência cidadã

Keywords: stellar occultations, rings, small solar system objects, citizen science

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5n2.45931](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5n2.45931)

1 Introdução

Há pouco mais de 10 anos, no dia 26 de abril de 2014, anunciou-se a descoberta de uma nova estrutura no Sistema Solar! Pela primeira vez astrônomos observaram a presença de anéis ao redor de um pequeno corpo do Sistema Solar. A publicação na prestigiada revista Nature [1] foi liderada pelo brasileiro Prof. Dr. Felipe Braga Ribas (autor deste texto), com a participação de outros 11 pesquisadores brasileiros e mais 52 co-autores de instituições estrangeiras.

O primeiro pequeno corpo do Sistema Solar a ter anéis descobertos em seu entorno foi o objeto Centauro (10199) Chariklo. Um objeto com cerca de 250 km de diâmetro, que orbita o Sol entre

as órbitas de Saturno e Urano, a 18 unidades astronômicas (ua).¹ Dois anéis foram descobertos a distâncias de 385 e 400 km do centro de Chariklo (figura 1). Receberam a designação C1R e C2R, ou, no linguajar popular, “Oiapoque” e “Chui”. Tidos como anéis densos e confinados, com larguras de aproximadamente 7 e 3,5 km respectivamente, apresentam entre eles uma falha com cerca de 14 km de largura.

A descoberta se deu no contexto de uma co-

¹Uma unidade astronômica (ua) é a distância média da Terra ao Sol, o que equivale a 149.597.870,7 quilômetros. A partir do Sol, Júpiter encontra-se a cerca de 5,2 ua. Já Netuno está a aproximadamente 30 ua. O objeto do Sistema Solar, observado hoje em dia à maior distância do Sol, é o planeta-anão Éris, a 95 ua.

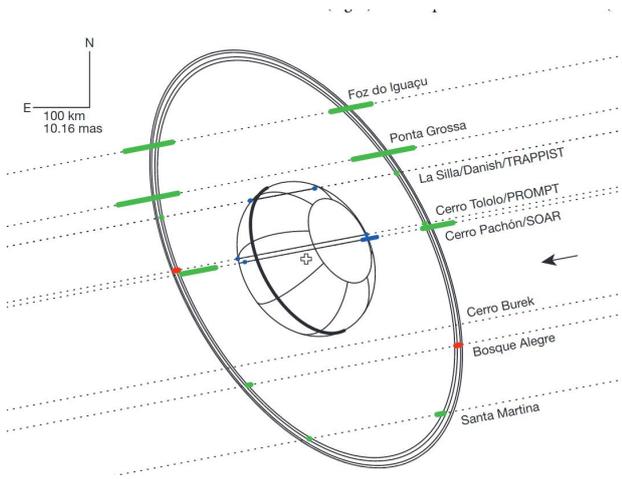


Figura 1: Gráfico apresentando em segmentos verdes as detecções dos anéis de Chariklo em 2013 [1]. Os nomes dos locais aonde as observações foram realizadas e as cordas em linhas pontilhadas são mostrados à direita. O corpo é representado pela elipse central.

laboração internacional entre pesquisadores do Brasil, França e Espanha, hoje conhecida como *Lucky Star*.² Este projeto usa a técnica de ocultações estelares (Seção 2) para medir as propriedades físicas dos pequenos objetos do Sistema Solar Exterior.³ Nesta região encontramos: os objetos Troianos, que seguem em órbitas nos pontos de Lagrange de Júpiter; depois por entre as órbitas dos planetas gigantes, encontramos os Centauros; por fim, em distâncias além da órbita de Netuno, encontram-se os Objetos Transnetunianos (TNOs).

De 2009 para cá, cerca de 150 objetos já foram estudados com esta técnica [2]. Destacam-se a descoberta das brilhantes superfícies de Éris e Makemake [3,4], o monitoramento das atmosferas de Plutão e Tritão [5,6], determinação da forma de Quaoar, Chiron, Echeclus, entre outros [7,8], a descoberta de grandes depressões nas superfícies dos TNOs 2003 AZ₈₄ e 2002 MS₄ [9,10], a caracterização de satélites de TNOs como Vanth, Weywot, Hi'iaka, Actea e Huya/1 [11–14], além, é claro, das descobertas de anéis, como será detalhado na seção 3.

²Website: <https://lesia.obspm.fr/lucky-star/>

³Chama-se de Sistema Solar Exterior a vasta região que se estende a distâncias superiores àquela da órbita de Júpiter, isto é $\gtrsim 5$ ua.

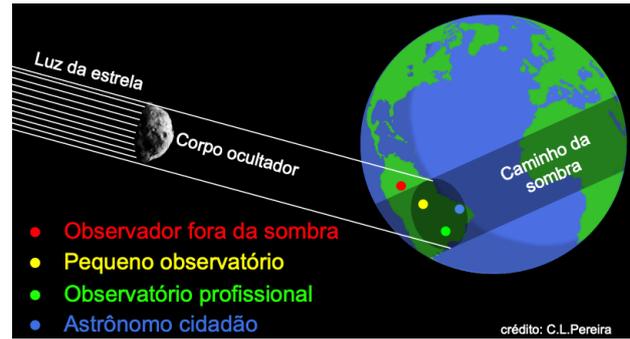


Figura 2: Esquema mostrando os raios de luz da estrela sendo bloqueados pelo corpo ocultador, com sua sombra sendo projetada na Terra. Cada observador cobre uma parte da sombra, medindo diferentes porções do perfil do objeto. Cada ponto representa um observador, que podem ser desde os mais avançados telescópios profissionais, até um pequeno telescópio amador. Créditos: Chrystian L. Pereira.

2 Ocultação Estelar

Uma ocultação estelar ocorre quando um objeto do Sistema Solar atravessa a linha de visada entre um observador e uma estrela. Similar a um eclipse solar, mas envolvendo uma estrela distante quase pontual. Sendo um objeto com órbita conhecida, a sua velocidade aparente (v_o) também o é. Assim mede-se quanto tempo ele demora para passar na frente da estrela (Δt) e, com a equação básica de movimento ($\Delta S = \Delta t \cdot v_o$) temos o tamanho do objeto. Isto é possível porque, sendo uma estrela distante, a sombra do objeto projetada sobre a Terra, terá exatamente o tamanho do objeto (figura 2). Assim, podemos distribuir vários observadores ao longo da sombra e cada um medirá um tamanho dela, o que chamamos de *corda*. Juntando as várias cordas temos o perfil do objeto, que poderá ser determinado com precisões na ordem do quilômetro. Isto, aliado a outras informações, como por exemplo curva de luz de rotação ou mesmo outras ocultações, nos permite determinar a sua forma tridimensional.

Para prever quando e onde um evento de ocultação estelar poderá ser observado, compara-se o seu movimento no céu (efeméride) com a posição das estrelas de fundo. Quando isto é feito considerando a Terra, geram-se *mapas de predição* que contêm informações relevantes para a observação e indicam visualmente onde o evento poderá ser detectado (figura 3).

Páginas web como o site Lucky Star, o LIneA-

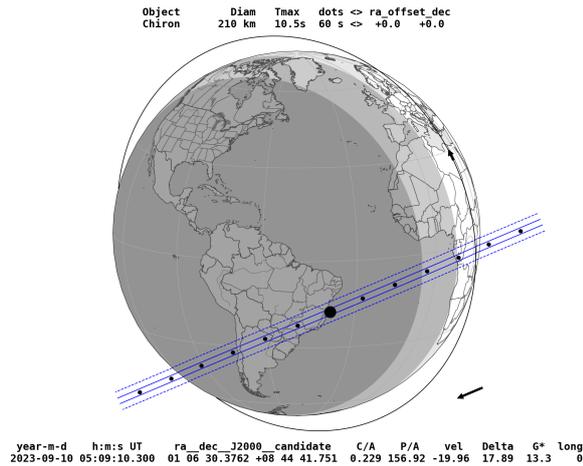


Figura 3: Exemplo de mapa de previsão de ocultação. Acima e abaixo do globo terrestre figuram informações sobre o evento e sobre a estrela ocultada. As linhas azuis delimitam a região onde a passagem da sombra será visível. Os pontos em preto são espaçados em intervalos de um minuto, e a direção de deslocamento da sombra é apresentada pela seta à direita e abaixo. Vemos também a representação da órbita de um telescópio espacial, que poderia observar o evento do espaço.

OPD⁴ e OWC,⁵ dedicam-se a fornecer estas previsões, as quais estão sujeitas a incertezas inerentes à qualidade da órbita do objeto e da posição das estrelas envolvidas.

Para registrar uma ocultação, toma-se uma sequência de imagens da estrela a ser ocultada durante um intervalo de tempo. O brilho (ou fluxo) da estrela em cada uma das imagens é medido e comparado com outras estrelas no campo. Enquanto o objeto atravessa a linha de visada do observador, o brilho da estrela será bloqueado. Portanto, poderemos medir qual o instante em que a estrela foi ocultada e também quando deixou de ser ocultada. Esta técnica é conhecida como fotometria diferencial de abertura, e nos fornece uma *curva de luz de ocultação*, ou seja, a variação do fluxo do alvo ao longo do tempo (figura 4).

A duração de um evento de ocultação varia de alguns décimos de segundo a alguns minutos, a depender, é claro, do tamanho e velocidade do objeto e qual a região da sombra o observador se encontrava. Para poder determinar o tamanho e a forma do objeto, é necessário conhecer a posição geográfica de cada observador. Também

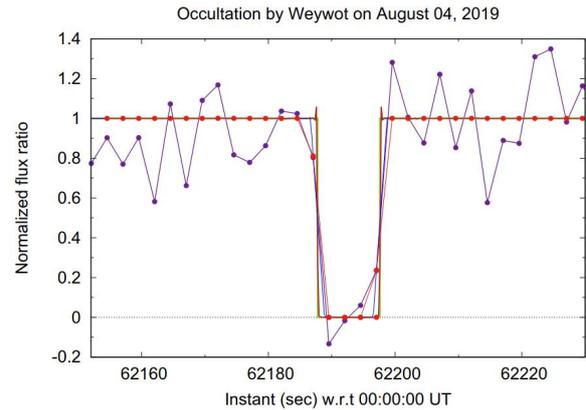


Figura 4: Exemplo de uma curva de luz de ocultação. Os pontos e linha em roxo representam o fluxo da estrela em cada imagem obtida pelo observador. Em vermelho temos a curva e luz modelada com a qual determinam-se os instantes de ingresso e egresso da estrela, isto é, início e fim da ocultação.

é fundamental que todos registrem o tempo de cada imagem sob a mesma *referência de tempo*, preferencialmente ao tempo fornecido por satélites GPS. Por estas razões, câmeras astronômicas de alta sensibilidade,⁶ com capacidade de obter várias imagens por segundo e ligadas a antenas GPS são geralmente utilizadas para registrar estes eventos.

A análise é feita com o uso de programas de fotometria [15] e de modelagem da curva de luz, para obter os instantes de início e fim do evento, e para determinar a posição da corda de cada observador, como o *SORA*⁷ [16].

2.1 Ciência Cidadã

Os eventos de ocultação são observados em campanhas observacionais organizadas por diferentes grupos de pesquisa. Estes grupos tem propósitos distintos, como estudar alvos de missões espaciais (*Lucy*), descoberta de satélites de asteroídes (*Gaia Moons*), caracterização de objetos cruzadores da órbita da Terra (*ACROSS*), ou estudar o Sistema Solar Exterior (*Lucky Star*). Um ponto em comum entre estes diferentes projetos é a *fundamental participação de astrônomos amadores* e pequenos observatórios em diferentes regiões do globo, capazes de monitorar estes eventos.

⁴LIneA Occultation Prediction Database

⁵Occult Watcher Cloud

⁶Exemplos: QHY174M-GPS ou ASTRID.

⁷Stellar Occultation Reduction and Analysis

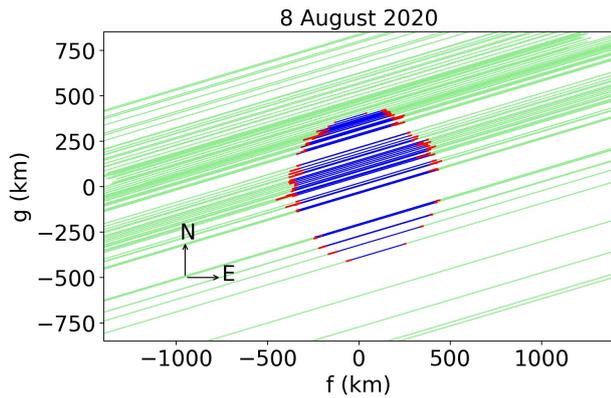


Figura 5: Exemplo de uma ocultação com muitos observadores (linhas verdes). Em azul temos as cordas de detecção da sombra. Pode-se ver claramente o perfil do objeto no momento do evento. Graças ao elevado número de detecções, foi possível descobrir uma depressão na porção nordeste do objeto [10].

Considerando que, quanto maior o número de observadores em um evento de ocultação, mais informações poderemos obter (figura 5), e que a técnica é relativamente simples, eventos de ocultações estelares são ideais para o desenvolvimento da *Ciência Cidadã*. Associações como a *International Occultation Timing Association*⁸ ou a Rede *Unistellar*,⁹ promovem e organizam mundialmente a observação de ocultações estelares pela comunidade amadora, composta por mais de dois mil membros.

No Brasil, a participação de astrônomos amadores ainda é muito tímida, mas, com o aumento do acesso a telescópios robotizados e o barateamento de câmeras rápidas, o número de astrônomos cidadãos, clubes de astronomia, universidades e mesmo escolas participando destas campanhas vêm aumentando gradualmente.

3 Anéis ao redor de pequenos corpos

Os quatro planetas gigantes do Sistema Solar possuem anéis. Diferente dos majestosos anéis de Saturno, os demais planetas possuem anéis tênues, que só foram descobertos com o avanço da tecnologia. Os anéis de Júpiter foram descobertos pela missão espacial Voyager I, já os anéis de Urano e Netuno foram descobertos à partir da

observação de ocultações estelares e, posteriormente, fotografados pela sonda Voyager II.

Anéis ao redor de pequenos corpos só passaram a ser estudados após a descoberta dos anéis de Chariklo em 2013 [17]. A partir de então, investigar a presença de anéis ao redor dos pequenos corpos passou a ser tão relevante quanto saber a sua composição, variação de brilho, forma e densidade, ou seja, é mais uma das propriedades físicas que justificam as pesquisas no tema.

Esta investigação tem rendido frutos, com a descoberta de novos anéis ao redor de (136108) Haumea, em 2017 [18], de (50000) Quaoar, em 2023 [8, 19], e, ainda sob análise [20], os possíveis anéis de (2060) Chiron.

3.1 Anéis de (10199) Chariklo

Chariklo é o maior dos objetos Centauros, que são uma classe de pequenos corpos com órbitas dinamicamente instáveis, que permeiam as órbitas dos planetas gigantes. Isto já era motivo suficiente para estudá-lo, por isto monitoramos a ocultação prevista para o dia 03 de junho de 2013, usando telescópios no Brasil, Argentina, Uruguai e Chile. Três telescópios detectaram a ocultação pelo corpo central. Surpreendentemente, junto com outros quatro telescópios, eventos secundários também foram detectados.

A curva de luz obtida com o telescópio Dina-marquês de 1,5 m em La Silla/Chile (figura 6) mostrou, claramente, os eventos secundários, simetricamente espaçados. Apoiados pelos eventos secundários detectados nos outros observatórios, não restaram dúvidas sobre a descoberta dos anéis (figura 1).

Observações realizadas nos anos seguintes revelaram muitos detalhes sobre a propriedades físicas, tanto dos anéis, quanto do próprio Chariklo [21, 22]. Por exemplo, a partir do trabalho liderado pelo brasileiro Prof. Dr. Bruno Morgado, sabe-se que os dois anéis possuem importante variação na quantidade de material ao longo das suas larguras, sendo que o mais interno e denso, o C1R, possui uma estrutura em W. Também sabe-se que Chariklo é um objeto triaxial com semi-eixos 144 x 125 x 110 km. Recentemente, até o JWST¹⁰ foi utilizado para observar uma ocultação pelos anéis de Chariklo [23].

⁸IOTA

⁹Unistellar Network

¹⁰James Webb Space Telescope

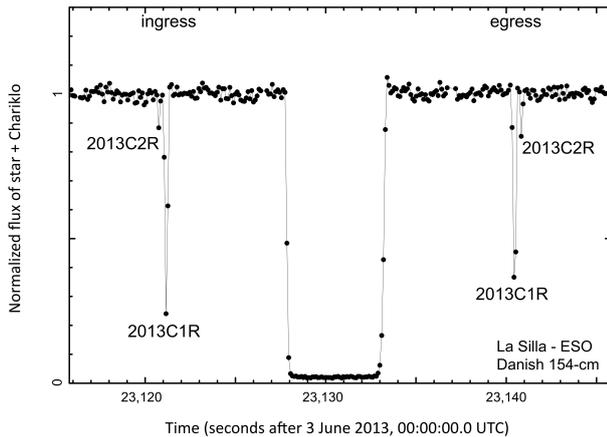


Figura 6: Curva de luz da ocultação de Chariklo obtida com o telescópio Dinamarquês em La Silla/Chile. As detecções secundárias, que permitiram a descoberta dos anéis, estão marcadas por 2013C1R e 2013C2R. No centro vemos a ocultação por Chariklo [17].

3.2 Anel de (136108) Haumea

O planeta-anão (136108) Haumea, com cerca de 1595 km de diâmetro, é um dos objetos mais intrigantes do Sistema Solar. Seu formato lembra o de uma bola de *rugby*, consequência da sua rápida rotação, com um período de apenas 3,91 horas. Possui uma mancha avermelhada em sua superfície e ao menos dois satélites: Hi'iaka com 370 km e Namaka com 170 km. Ele orbita o Sol na região transnetuniana, a mais de 51 ua de distância (bem mais distante do que Plutão, que está a ~ 34 ua).

Até hoje, apenas uma única ocultação estelar por Haumea foi observada, já que ele encontra-se em uma região do céu com poucas estrelas. O evento ocorreu em 21 de janeiro de 2017 e contou com a participação de 12 observatórios. Além de revelar semi-eixos do Haumea (1161 x 852 x 513 km) com grande precisão, a ocultação também revelou a presença de um anel confinado, com cerca de 70 km de largura, com um raio de de 2287 km [18] (figura 7).

O trabalho, que contou com a colaboração de 8 brasileiros, foi liderado pelo espanhol Dr. José-Luis Ortiz e foi publicado na revista *Nature*, em 2017. Revelou não só os anéis, mas também que estas estruturas são mais comuns do que pensávamos, e que elas podem existir em diferentes tipos de objetos, mesmo a grandes distâncias do Sol.

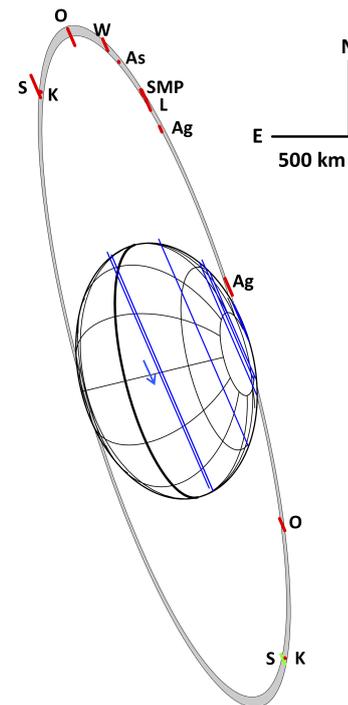


Figura 7: Gráfico da ocultação por Haumea. Os segmentos vermelhos mostram as detecções secundárias, evidenciando a presença do anel. Em azul vemos as detecções do corpo principal. A seta mostra a direção de deslocamento da sombra [18].

3.3 Anéis de (50000) Quaoar

Outro grande objeto transnetuniano, o (50000) Quaoar, teve suas dimensões determinadas em uma ocultação ocorrida em 2011 [17], mostrando um diâmetro de 1110 km. Este corpo orbita o Sol a uma distância de 42 ua (também mais distante do que Plutão) e possui uma lua de 170 km, chamada de Weywot. A fim de melhor caracterizá-lo, ocultações estelares promovidas por ele continuaram a ser observadas. Foi em 2021 que o Prof. Morgado percebeu que dados obtidos com o telescópio espacial CHEOPS,¹¹ com o Gran Telescópio Canárias (GTC) e dados obtidos por amadores, quando analisados em conjunto, revelavam a presença de um anel ao redor do corpo. Um anel dito não homogêneo, por ser denso em algumas partes e muito tênue em outras, com larguras de 336 a 5 km, e um raio 4050 km. Os resultados foram publicados em 2023 [19] (exatamente 10 anos após a primeira observação dos anéis de Chariklo), também na revista *Nature* e liderados pelo

¹¹CHaracterising ExOPlanet Satellite

Prof. Morgado, com a participação de outros 12 brasileiros.

No dia 08 de agosto de 2022, foi previsto que Quaoar ocultaria uma estrela brilhante no infravermelho, cruzando os observatórios do Havaí/EUA. Realizou-se, então, uma campanha observacional nos Estados Unidos e México, envolvendo 29 locais. Apenas 9 observatórios puderam obter dados (não foram afetados pelo clima). Dentre eles, os telescópios Gemini Norte e o CFHT (*Canada France Hawaiian Telescope*), os mais potentes observatórios envolvidos. O trabalho, liderado pelo brasileiro Dr. Chrystian Luciano Pereira, publicado em 2023 e envolvendo outros 10 brasileiros, revelou não somente detalhes sobre a estrutura do anel de Quaoar (Q1R), como também a presença de um segundo anel (Q2R), mais interno e tênue, com largura de 10 km e um raio de 2520 km [8].

Diferente de todos os anéis conhecidos até então, os anéis de Quaoar estão muito *além do Limite de Roche*¹² (figura 8). Mostrou-se que, com um maior coeficiente de restituição na colisão elástica entre as partículas de gelo, sua velocidade de repulsão é maior que a velocidade de escape, explicando, assim, porque elas não se aglutinam, mesmo além do Limite de Roche. Este surpreendente resultado expandiu novamente os limites previamente imaginados para a presença de anéis no Sistema Solar.

3.4 Anéis em (2060) Chiron?

O objeto Centauro (2060) Chiron, descoberto em 1977, já foi chamado de cometa (95P/Chiron) quando, em 1988, desenvolveu uma coma. É um corpo alongado com semi-eixos 126 x 109 x 68 km, determinados a partir de uma ocultação estelar em 2019 [7]. Observações de ocultações estelares em 1993 e 1994 mostraram a presença de material confinado no seu entorno, na época interpretados como jatos de poeira. Uma ocultação em 2011 detectou eventos secundários, aparentemente si-

¹²Em 1848, Édouard Roche publicou sua teoria, puramente gravitacional, demonstrando que objetos em órbita seriam quebrados em pedaços a distâncias inferiores a, aproximadamente, 2,5 vezes o raio do corpo central, dependendo da sua densidade. Por outro lado, caso um disco de material atingisse distâncias superiores a $\sim 2,5$ raios do corpo central, ele deixaria de existir, formando um satélite.

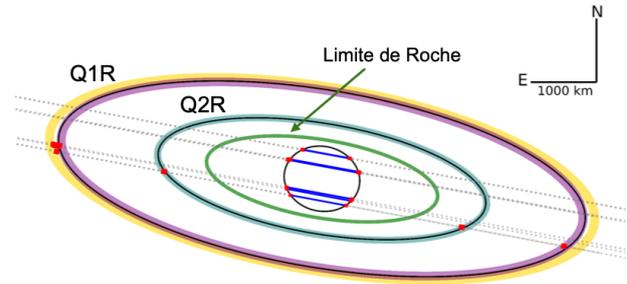


Figura 8: Gráfico mostrando as detecções de Quaoar, e seus anéis, no evento de 8 de agosto de 2022 [8]. A posição do Limite de Roche é indicada, evidenciando que os anéis encontram-se à distâncias muito superiores ao que se supunha como limite.

métricos em distância em relação ao centro de Chiron. Estes eventos foram interpretados por diferentes pesquisadores como anéis similares aos de Chariklo [24], como jatos ou como uma casca de poeira [25].

Uma nova ocultação observada em dezembro de 2022, ocorrida após um súbito aumento de brilho de Chiron, detectou novamente eventos secundários, mais profundos do que aqueles observados anteriormente [20]. Em setembro de 2023, observamos um novo evento, desta vez no Brasil. Os dados, ainda em análise, obtidos no Observatório do Pico dos Dias (OPD),¹³ mostram que há bastante material ao redor de Chiron e podem confirmar a presença de anel. Mas, sobretudo, mostram que Chiron tem um ambiente em transformação ao seu redor.

3.5 Questões em aberto

Não restam muitas dúvidas de que anéis ao redor de pequenos corpos são uma característica comum no Sistema Solar Exterior. Eles já foram encontrados ao redor de corpos de 100 a 1500 km, em Centauros, planeta-anão e TNO, distantes de 15 a 51 ua. No entanto, ainda não se sabe o que mantém estes anéis confinados. É necessário descobrir qual o mecanismo físico capaz de manter as partículas onde são encontradas, contrabalaneando a dissipação de energia causada pela colisão entre as partículas e a pressão de radiação provocada pelo Sol.

¹³O OPD pertence ao Laboratório Nacional de Astrofísica (LNA) e abriga, no sul de Minas Gerais, o maior telescópio em solo nacional, cujo diâmetro do espelho principal é de 1,6 m.

A principal pista parece estar ligada à localização dos anéis em relação ao corpo central. Os principais anéis estão a uma distância próxima à ressonância spin-órbita 1:3.¹⁴ Nela, enquanto o corpo realiza três rotações, as partículas do anel completam uma órbita ao redor do corpo. Já o anel mais interno de Quaoar está próximo à ressonância 5:7. Trabalhos têm estudado como a forma do objeto, ou uma anomalia de massa no corpo, podem interagir com as partículas dos anéis, provocando este confinamento [26]. Simulações computacionais de N-corpos também mostraram que a presença de pequenos satélites,¹⁵ próximos aos anéis, poderiam manter os anéis de Chariklo [25].

Várias hipóteses já foram colocadas em relação à origem, mas todas recaem na formação de um disco de material, que pouco a pouco é confinado na região atual. Talvez, a origem de tal disco seja diferente para cada um dos sistemas, podendo ser: i) primordial, ou seja, da época da formação do corpo central; ii) originado após um evento de colisão no corpo principal; iii) ou a partir de uma ejeção de material da superfície do objeto.

Todas estas dúvidas são assuntos de pesquisa em andamento por diferentes grupos no mundo. Certamente novas observações trarão elementos para avançarmos nestes estudos. Isto mostra como o assunto é abrangente e com potencial de trazer novas informações para compreendermos melhor a formação do Sistema Solar.

4 Perspectivas futuras

Nos últimos 10 anos, depois de descobrir que pequenos corpos do Sistema Solar podem possuir anéis, entendemos que estas estruturas são bastante complexas, encontradas em diferentes ambientes, distâncias e formas, e que suas origens podem ser diversas.

O uso da técnica de ocultações estelares para estudar o Sistema Solar tornou-se essencial em

diversos aspectos, dando suporte a missões espaciais, caracterizando diferentes classes de objetos ou descobrindo novas estruturas. As ferramentas para análise dos dados de ocultações estelares avançaram muito neste período, permitindo não só a caracterização de anéis, mas também a análise de uma grande quantidade de dados. Mais de 25 corpos do Sistema Solar Exterior já tiveram trabalhos publicados, com caracterização precisa de seus tamanhos, formas, volume e ambiente ao seu redor (anéis, detritos ou atmosferas) ou, até mesmo, descobertas características topográficas em seus limbos. O novo desafio é a observação de satélites destes corpos. Amadores têm descoberto satélites de asteroides usando ocultações. Já os pesquisadores têm usado imagens de alta resolução, para determinar as órbitas de satélites de TNOs, permitindo a previsão de eventos de ocultação [12].

Novas ferramentas, como o LIneA OPD, SORA [16] e o Occultation Portal¹⁶ [27] têm permitido a análise massiva de ocultações estelares. Isto será fundamental na era do *LSST*,¹⁷ quando o número de predições e, portanto, observações de ocultações poderá ser multiplicado por um fator dez, a depender somente dos observadores estarem prontos para o registro.

Esta nova era é uma oportunidade para desenvolvermos a rede nacional de observadores de ocultações estelares, quando astrônomos amadores, clubes de astronomia ou estudantes terão a chance de usar seus telescópios para coletar dados científicos e tornarem-se cientistas cidadãos, ou, eventualmente, construir suas carreiras como pesquisadores na área. Certamente, novos anéis, discos de poeira, atmosferas, satélites ou objetos duplos serão descobertos. Os pesquisadores brasileiros estão entre os principais pesquisadores mundiais na área, sendo responsáveis pela descoberta de dois dos três sistemas de anéis confirmados e diretamente envolvidos nos demais sistemas

¹⁴Uma ressonância orbital ocorre quando dois objetos exercem uma força gravitacional um sobre o outro, em períodos regulares. Isto ocasiona uma troca de energia entre os corpos, alterando as suas órbitas. Em alguns casos, pode provocar a estabilização de órbitas em razões inteiras. Como exemplo temos a ressonância 2:3 entre Plutão e Netuno, onde, enquanto o planeta realiza três órbitas ao redor do Sol, o planeta-anão realiza exatamente 2.

¹⁵Satélites com poucos quilômetros de diâmetro, ainda desconhecidos.

¹⁶O *Occultation Portal* é de uma plataforma, usada pelo Lucky Star e outros projetos, para organização de campanhas observacionais e coleta de dados de ocultações.

¹⁷O *Lagacy Survey of Space and Time*, que começará ainda este ano as operações no Observatório Vera Rubin, no Chile, irá descobrir dezenas de milhares novos pequenos corpos do Sistema Solar Exterior. Cada um deles será observado várias vezes por ano, permitindo que conheçamos muito bem suas efemérides e, portanto, tenhamos ótimas predições de ocultações.

propostos. Agora é hora da comunidade brasileira aproveitar nosso imenso território e contribuir de maneira expressiva para aumentar o número de ocultações estelares observadas no Brasil.

Agradecimentos

A maior parte dos trabalhos citados aqui são frutos do *Grupo do Rio*. Um grupo que nasceu com pesquisadores do Observatório Nacional e Observatório do Valongo (liderados pelo Dr. Roberto Vieira Martins) e ganhou este carinhoso nome dos colaboradores internacionais, quando se referem aos organizadores das campanhas observacionais para o registro de ocultações estelares no mundo todo, ou às descobertas de anéis e estudo de propriedades físicas de objetos do Sistema Solar Exterior. Trabalho este realizado em colaboração com pesquisadores do Observatório de Paris-Meudon (liderados pelo Dr. Bruno Sicardy), na França, e do Instituto de Astrofísica de Andaluzia (liderados pelo Dr. José Luis Ortiz), na Espanha. Hoje, o Grupo do Rio conta com pesquisadores do Observatório Nacional (ON/MCTI), Observatório do Valongo (OV/UFRJ), Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR-Curitiba), Universidade Federal de Uberlândia (IF/UFU), Universidade Estadual de São Paulo, Guaratinguetá (UNESP-FEG) e do Laboratório Interinstitucional de e-Astronomia (LIneA). Por isto, deixo aqui o meu agradecimento aos Doutores Roberto Vieira Martins, Bruno Sicardy, José Luis Ortiz, Marcelo Assafin, Julio Camargo, Josselin Desmars, Frederic Vachier, Bruno Morgado, Altair Ramos Gomes Jr., Gustavo Rossi, Rodrigo Bouffleur, Rafael Sfair, Yücel Kiliç, Flavia Rommel e Chrystian Pereira, aos meus orientandos Giuliano Margoti e Eros Gradovski, bem com aos demais estudantes do grupo. O autor agradece ao apoio financeiro da CNPq (316604/2023-2) e suporte do LIneA.

Sobre o autor

Felipe Braga Ribas (fribas@utfpr.edu.br) é especialista em caracterização física de pequenos corpos com o uso de ocultações estelares. É pesquisador bolsista produtividade do CNPq. Ga-

nhou o Grande prêmio de Tese da CAPES em 2014 e teve seu nome dado ao asteroide (10999) Braga-Ribas. É Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR-Curitiba) desde 2015, docente permanente do Programa de Pós-graduação em Física e Astronomia da UTFPR e do Programa de Pós-graduação em Astronomia do Observatório Nacional, e membro do BPG-LSST (*Brazilian Participation Group*).

Referências

- [1] F. Braga-Ribas et al., *A ring system detected around the Centaur (10199) Chariklo*, *Nature* **508**(7494), 72 (2014). [ArXiv:1409.7259](#).
- [2] F. Braga-Ribas et al., *Database on detected stellar occultations by small outer Solar System objects*, *Journal of Physics: Conference Series* **1365**(1), 012024 (2019).
- [3] B. Sicardy et al., *Constraints on Charon's Orbital Elements from the Double Stellar Occultation of 2008 June 22*, *The Astronomical Journal* **141**(2), 67 (2011).
- [4] J. L. Ortiz et al., *Albedo and atmospheric constraints of dwarf planet Makemake from a stellar occultation*, *Nature* **491**(7425), 566 (2012).
- [5] E. Meza et al., *Lower atmosphere and pressure evolution on Pluto from ground-based stellar occultations, 1988-2016*, *Astronomy & Astrophysics* **625**, A42 (2019). [ArXiv:1903.02315](#).
- [6] J. Marques Oliveira et al., *Constraints on the structure and seasonal variations of Triton's atmosphere from the 5 October 2017 stellar occultation and previous observations*, *Astronomy & Astrophysics* **659**, A136 (2022). [ArXiv:2201.10450](#).
- [7] F. Braga-Ribas et al., *Constraints on (2060) Chiron's size, shape, and surrounding material from the November 2018 and September 2019 stellar occultations*, *Astronomy & Astrophysics* **676**, A72 (2023). [ArXiv:2308.10042](#).

- [8] C. L. Pereira et al., *The two rings of (50000) Quaoar*, *Astronomy & Astrophysics* **673**, L4 (2023). [ArXiv:2304.09237](#).
- [9] A. Dias-Oliveira et al., *Study of the Plutino Object (208996) 2003 AZ₈₄ from Stellar Occultations: Size, Shape, and Topographic Features*, *The Astronomical Journal* **154**(1), 22 (2017). [ArXiv:1705.10895](#).
- [10] F. L. Rommel et al., *A large topographic feature on the surface of the trans-Neptunian object (307261) 2002 MS₄ measured from stellar occultations*, *Astronomy & Astrophysics* **678**, A167 (2023). [ArXiv:2308.08062](#).
- [11] A. A. Sickafoose et al., *A stellar occultation by Vanth, a satellite of (90482) Orcus*, *Icarus* **319**, 657 (2019). [ArXiv:1810.08977](#).
- [12] F. Braga-Ribas et al., *Present and Future of Stellar Occultation by Transneptunian Satellites and Binaries and their use to update the orbits of Vanth and Weywot* (2024), submetido ao Philosophical Transactions A.
- [13] E. Fernández-Valenzuela et al., *Physical properties of Hi'iaka from stellar occultation data* **53**(7) (2021). Disponível em <https://baas.aas.org/pub/2021n7i503p05>, acesso em set. 2024.
- [14] F. L. Rommel et al., *Physical properties of (38628) Huya and its satellite from stellar occultations* (2024), submetido ao Planetary and Space Journal.
- [15] M. Assafin, *Differential aperture photometry and digital coronagraphy with PRAIA*, *Planetary and Space Science* **239**, 105816 (2023). [ArXiv:2311.14152](#).
- [16] A. R. Gomes-Júnior et al., *SORA: Stellar Occultation Reduction and Analysis*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* (2022). [ArXiv:2201.01799](#).
- [17] F. Braga-Ribas et al., *The Size, Shape, Albedo, Density, and Atmospheric Limit of Transneptunian Object (50000) Quaoar from Multi-chord Stellar Occultations*, *The Astrophysical Journal* **773**(1), 26 (2013).
- [18] J. L. Ortiz et al., *The size, shape, density and ring of the dwarf planet Haumea from a stellar occultation*, *Nature* **550**(7675), 219 (2017). [ArXiv:2006.03113](#).
- [19] B. E. Morgado et al., *A dense ring of the trans-Neptunian object Quaoar outside its Roche limit*, *Nature* **614**(7947), 239 (2023).
- [20] J. L. Ortiz et al., *Changing material around (2060) Chiron revealed by an occultation on December 15, 2022*, *Astronomy & Astrophysics* **676**, L12 (2023). [ArXiv:2308.03458](#).
- [21] D. Bérard et al., *The Structure of Chariklo's Rings from Stellar Occultations*, *The Astronomical Journal* **154**(4), 144 (2017). [ArXiv:1706.00207](#).
- [22] B. E. Morgado et al., *Refined physical parameters for Chariklo's body and rings from stellar occultations observed between 2013 and 2020*, *Astronomy & Astrophysics* **652**, A141 (2021). [ArXiv:2107.07904](#).
- [23] P. Santos-Sanz et al., *The rings of Centaur Chariklo revealed by a stellar occultation observed by JWST*, *Bulletin of the AAS* **55**(8) (2023). Disponível em <https://baas.aas.org/pub/2023n8i301p07>, acesso em set. 2024.
- [24] J. L. Ortiz et al., *Possible ring material around centaur (2060) Chiron*, *Astronomy & Astrophysics* **576**, A18 (2015). [ArXiv:1501.05911](#).
- [25] A. A. Sickafoose et al., *Material Around the Centaur (2060) Chiron from the 2018 November 28 UT Stellar Occultation* (2023). [ArXiv:2310.16205](#).
- [26] B. Sicardy et al., *Ring dynamics around non-axisymmetric bodies with application to Chariklo and Haumea*, *Nature Astronomy* **3**, 146 (2019). [ArXiv:1811.09437](#).
- [27] Y. Kilic et al., *Occultation portal: A web-based platform for data collection and analysis of stellar occultations*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **515**(1), 1346 (2022). [ArXiv:2206.09615](#).