

Missão Espacial Gaia

Ramachrisna Teixeira

Universidade de São Paulo

Resumo

Com observações cuidadosas e sistemáticas do céu, há muito tempo o ser humano vem construindo e refinando o seu conhecimento a respeito do Universo e de si mesmo. As grandezas observacionais sobre as quais repousa a astronomia estão sendo, finalmente, abundantemente medidas e com precisões inimagináveis graças à Missão Espacial Gaia da Agência Espacial Europeia. Com seus três *data releases* (2016, 2018 e 2020/22), temos, hoje, em nossas mãos, dados observacionais em quantidade e com qualidade com as quais até bem pouco tempo nem sonhávamos. Entre eles, a grandeza mais importante de toda a astronomia: a distância de mais de um 1,5 bilhão de estrelas que nos permite dizer onde se encontram, como são e como “dançam”, iniciando assim, uma nova era no estudo da Galáxia e do Universo. Esses dados, disponibilizados para o mundo todo ao mesmo tempo, representam uma alteração radical na base do conhecimento astronômico e impactam tremendamente a astronomia no sentido mais amplo do termo, por muitos e muitos anos. Colegas de todas as partes do mundo estão mergulhados nesse oceano de posições, movimentos, brilhos, cores, etc, confirmando, revendo e refinando o que sabemos e prestes a enfrentarem, uma vez mais na história, *o novo*.

Abstract

With careful and systematic observations of the sky, human beings have been building and refining their knowledge about the Universe and about themselves for a long time. The observational magnitudes on which astronomy rests are finally being measured abundantly and with unimaginable precision thanks to the Gaia Space Mission of the European Space Agency. With its three *data releases* (2016, 2018 and 2020/22), we have, today, in our hands, observational data in quantity and quality that until very recently we did not even dream of. Among them, the most important greatness of all astronomy: the distance of more than 1.5 billion stars that allows us to say where they are, what they look like and how they “dance”, thus starting a new era in the study of the Galaxy and the Universe. Universe. This data, made available to the entire world at the same time, represents a radical shift in the astronomical knowledge base and will tremendously impact astronomy in the broadest sense of the term, for many, many years to come. Colleagues from all over the world are immersed in this ocean of positions, movements, brightness, colors, etc., confirming, reviewing and refining what we know and about to face, once again in history, *the new*.

Palavras-chave: Missão Espacial Gaia, telescópios espaciais, Via Láctea, galáxias, astrometria.

Keywords: Gaia Space Mission, space telescopes, Milk Way, galaxies, astrometry.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v3n2.38511](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v3n2.38511)

1 Introdução

Como sabemos, de longa data, a astronomia é uma ciência observacional. Isso significa que ela depende essencialmente das observações dos astros. Essa dependência é tão forte que poderíamos, sem exagero, dizer que a astronomia é a ciência que estuda a luz dos astros. São as observações que nos instigam, que nos ensinam e que fortalecem ou enfraquecem o conhecimento estabelecido.

Ao observarmos um astro qualquer, coletamos sua luz e medimos duas grandezas, apenas duas, não mais do que isso. A intensidade e a direção

de onde vem a luz. Em outras palavras, o brilho aparente, que pode ser medido com diferentes filtros e a posição do astro na esfera celeste, ou seja, a direção onde o vemos em relação a uma direção “fixa” tomada como referência.

Naturalmente, as próprias observações nos levaram, em um passado bem distante, a perceber que tanto uma quanto a outra grandeza podiam variar ao longo do tempo, e bem mais tarde, que a intensidade em particular, podia ser decomposta fornecendo um espectro de frequências.

No passado, as observações dessas diferentes grandezas praticamente impuseram uma divisão

da astronomia em três grandes áreas observacionais: astrometria, fotometria e espectroscopia. Assim, mesmo que, em geral, obtidas separadamente e por estratégias diferentes, em conjunto formaram a base do conhecimento. Já hoje, sobretudo com as observações digitais, é possível medir essas quantidades em uma mesma observação e com um único equipamento.

De uma forma ou de outra, o que podemos realizar com essas medidas depende substancialmente das precisões das observações e da abundância de dados. É justamente nesse aspecto que a Missão Espacial Gaia [1–3] da Agência Espacial Europeia é revolucionária. Tanto as grandezas observacionais quanto aquelas delas derivadas são abundantes e precisamente medidas e determinadas. Temos hoje em nossas mãos milhões de vezes mais dados do que tínhamos há alguns anos e com precisões extremas [4].

Com dados astrométricos, fotométricos e espectroscópicos para aproximadamente dois bilhões de estrelas o objetivo primeiro dessa empreitada é contar a história da Via Láctea de maneira muito mais realística e com um nível de detalhamento sem precedentes.

Dentre todas as grandezas com as quais trabalhamos, sem dúvida a distância é a mais importante. É ela que nos permite transformar o que observamos que é, portanto, aparente em absoluto. A determinação das distâncias dos astros não é simples e baseia-se em várias estratégias, cujos alcances são limitados.

A calibração da escala de distância do Universo repousa na medida de paralaxes estelares, ou seja, na medida da variação da posição aparente de uma estrela vista da Terra devido ao movimento orbital do nosso planeta. Não é à toa que essa grandeza astrométrica, medida de forma absoluta graças ao arranjo dos telescópios Gaia e com precisões da ordem de microssegundos de grau, é o foco principal dessa missão espacial. Também neste caso, o satélite Gaia é único.

2 Missão Espacial Gaia

A astronomia como um todo muito se beneficiou e se beneficia das observações a partir do espaço que nos livra da grande barreira imposta pela atmosfera terrestre quando das observações a partir do solo. Do espaço podemos observar e descobrir o céu em diferentes frequências normal-

mente filtradas pela atmosfera e com muito mais qualidade. Podemos penetrar regiões encobertas por nuvens de gás e poeira, observar novos fenômenos e produzir um conhecimento complementar àquele construído ao longo de muitos séculos de observações realizadas a partir do solo no visível.

Assim, livre de uma série de distorções e perturbações atmosféricas observamos com maior resolução, maior precisão e, portanto, realizamos medidas mais confiáveis. A astrometria, extremamente sensível à precisão, ganhou muito com as observações espaciais, em particular, com a possibilidade de determinar paralaxes absolutas, construir e materializar um sistema de referência homogêneo, rígido, acessível, mais próximo de um inercial do que jamais e com um único instrumento.

Nesse contexto, surgiu a Missão Espacial Gaia que se constituiu em um dos projetos mais ambicioso, ousado e espetacular da astronomia dos últimos tempos. As observações realizadas com o satélite Gaia alteraram radicalmente e vão alterar ainda mais, a base de dados sobre a qual repousa a astronomia e está nos conduzindo a avanços sem precedentes no conhecimento da Via Láctea e do Universo como um todo.

O foco principal da missão Gaia são as estrelas da nossa galáxia e de galáxias vizinhas para as quais são medidos precisamente posições, brilhos e espectros. De posse dessas grandezas determina-se as distâncias, cores e movimentos a partir dos quais pode-se obter luminosidades, temperaturas, dimensões, tipos espectrais, massas e idades.

Embora a missão tenha sido concebida pensando nas estrelas são observados também milhões de quasares e objetos extensos como corpos do Sistema Solar e galáxias compactas. Esses objetos recebem tratamentos específicos no seio do Gaia-DPAC (Data Processing and Analysis Consortium) a partir dos quais são extraídas informações científicas que permitem explorá-los. Além disso, o satélite Gaia tem detectado milhares de exoplanetas.

A Missão Espacial Gaia começou, de certa forma, a ser pensada e construída após o lançamento do primeiro satélite astrométrico HIPPARCOS (High Precision Parallax Collecting Satellite - ESA 1997) em agosto de 1989. Naturalmente, foram muitas idas e vindas e finalmente

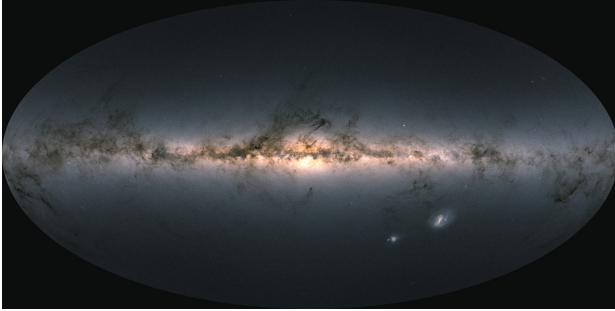


Figura 1: Mapa da Via Láctea construído com dados do Gaia DR3. Cada pixel da imagem representa a “soma” dos fluxos de milhares de estrelas observadas pelo satélite. Diferentemente de uma foto, esses pontos não são anônimos: sabemos onde estão, como são, de onde vieram e para onde irão. Crédito: ESA/Gaia/DPAC

foi totalmente encampada pela ESA em 2006. O lançamento do satélite ocorreu em dezembro de 2013 e as observações científicas se iniciaram em julho de 2014.

Originalmente as observações estavam previstas para 60 meses. Com o sucesso inicial foi prolongada por mais 24 meses e, provavelmente, ganhará ainda mais 36 meses, perfazendo um total de 10 anos de observações. Com esse volume de observações as precisões irão melhorar ainda mais sobretudo em movimento próprio.

Os dados do Gaia são publicados em *data releases* a cada 2 anos aproximadamente e são disponibilizados para o mundo todo ao mesmo tempo. O primeiro, Gaia DR1, foi em setembro de 2016 [2] com resultados baseados em 14 meses de observação. O segundo em abril de 2018, Gaia DR2, relativo a 22 meses de observação [4, 5] e o terceiro, relativo a 34 meses de observação, foi dividido em duas partes: a primeira, Gaia EDR3, em dezembro de 2020 [6] e a segunda parte, Gaia DR3 [7–11] em 13 de junho de 2022. Deveremos ter um quarto *release* em 2025 contendo os resultados dos 60 meses de observação previstos originalmente e de mais 6 meses da extensão da missão. O restante será provavelmente publicado em um único *release* sem data definida, mas pensada para 2030.

Na Figura 1 a seguir, temos uma imagem icônica da Missão Espacial Gaia, neste caso construída a partir dos dados do terceiro *data release*. Não se trata de uma foto ou concepção artística. Trata-se do mapa mais rico e preciso da Via Láctea construído até hoje.

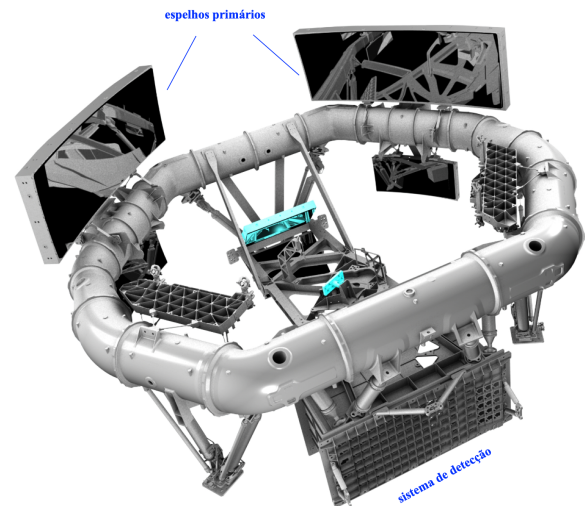


Figura 2: Telescópios Gaia: arranjo de espelhos e sistema de detecção. Crédito: ESA/Gaia/DPAC - EADS Astrium.

3 Observações Gaia

As observações com o satélite Gaia apresentam várias particularidades que o tornam único. Por um lado, são realizadas através de dois telescópios com um plano focal comum. Os espelhos primários desses telescópios são retangulares, $0,50\text{ m} \times 1,45\text{ m}$ ($0,6^\circ \times 1,7^\circ$ no céu) e são estrategicamente montados de tal forma que simultaneamente apontam para direções separadas por um ângulo, extremamente estável e bem conhecido, de $106,5^\circ$: ângulo básico.

A luz assim coletada é conduzida por 35 metros, até alcançar o plano focal comum, por uma sequência de 10 espelhos menores e diferentes entre si.

Essa estratégia de observação, já adotada no primeiro satélite astrométrico HIPPARCOS [12], permite a realização de uma astrometria de grandes ângulos e, conseqüentemente, a determinação de paralaxes absolutas, ou seja, sem necessidade da hipótese de paralaxes nulas para as estrelas de fundo.

Desse ponto de vista, idealmente, o ângulo básico seria 90° o que zeraria o fator paralático, mas por razões de engenharia ficou em $106,5^\circ$ que nos dá ainda uma minimização do mesmo mais do que suficiente para considerar a paralaxe como sendo absoluta.

Uma outra particularidade das observações com o satélite Gaia é que, diferentemente da grande maioria, não se trata de um telescópio a ser apontado para alvos pré-definidos por pesqui-

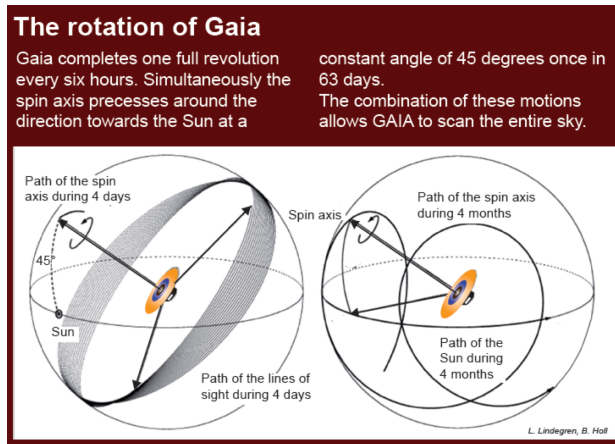


Figura 3: Esboço da varredura do satélite. Crédito: L. Lindegren and B. Holl.

sadores com interesses científicos específicos.

O satélite Gaia encontra-se “varrendo” o céu todo e medindo as posições, brilhos, cores, fotoespectro para todos os objetos até $V \sim 21$ magnitudes. Esse limite de detecção pode ser e tem sido ligeiramente alterado ao longo da missão. Além disso, observa o espectro daqueles objetos mais brilhantes que $V \sim 17$ magnitudes visando a determinação de suas velocidades radiais e características astrofísicas.

O satélite possui um movimento de rotação com período de 6 horas cujo momento angular é perpendicular ao plano contendo as duas linhas de visada e a 45° da direção do Sol, como se pode ver na Figura 3. Dessa forma, um astro transita pelo campo do telescópio por, aproximadamente, 10 segundos [1]. O seu eixo de rotação por sua vez, precessiona ao redor do Sol com um período de 63 dias, alterando lentamente a direção da rotação do satélite. À medida que o Sol se desloca na eclíptica o eixo de rotação do satélite executa lentamente *loopings* em torno da direção do Sol de tal forma a completar uma varredura do céu em aproximadamente 3 meses [3].

No plano focal dos telescópios temos um mosaico de 106 *charge-coupled devices* (CCD), 4 deles voltados para controles técnicos, e os demais organizados, como mostrado na Figura 4, de tal forma a perfazer as observações, astrométricas, fotométricas, foto-espectrométricas e espectroscópicas. Desses, 14 CCDs compõem o *sky mapper* (SM), 62 o *astrometric field* (AF), 7 o fotoespectrômetro azul BP e 7 o fotoespectrômetro vermelho RP. Os 12 restantes compõem o mosaico espectroscópico para a medida da veloci-

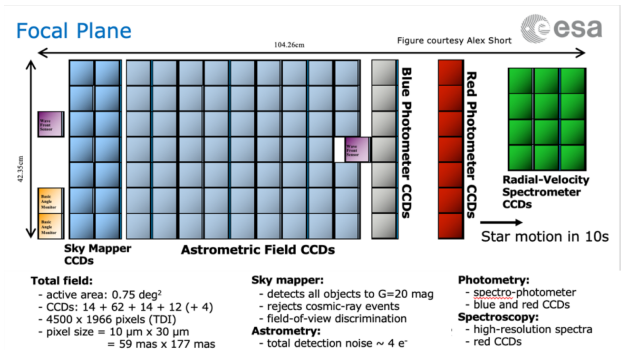


Figura 4: Sistema de detecção no plano focal comum aos dois telescópios onde se vê a repartição dos “chips-CCDs” em suas diversas funções. Crédito: ESA/Gaia/DPAC.

dade radial: *radial-velocity spectrometer* (RVS). São aproximadamente 1 bilhão de pixels retangulares com tamanhos de $10\ \mu\text{m}$ na direção do trânsito *along-scan* (AL) e $30\ \mu\text{m}$ na direção perpendicular *across-scan* (AC) correspondendo em milissegundos de arco a $58,9\ \text{mas} \times 176,8\ \text{mas}$ ($\text{mas} = \text{milliarcsecond}$).

Antes da observação propriamente dita, o objeto é avaliado por um sistema de detecção no *sky mapper* que irá “decidir” se deve ou não ser observado, ou seja, se os dados desse objeto serão ou não enviados para a Terra. O satélite não envia imagens para a Terra, apenas códigos numéricos contendo a informação em pequenas janelas ao redor do objeto suficiente para a extração dos dados observacionais para fazer ciência. Essa tarefa de extração da informação científica cabe, como dito, a mais ou menos 400 pesquisadores, engenheiros e técnicos que compõem o Gaia-DPAC, dividido em várias unidades de coordenação que podem apresentar subdivisões, cada uma voltada para uma temática específica: estrelas variáveis, velocidades radiais, corpos do Sistema Solar, quasares, galáxias, etc.

No *astrometric field*, Figura 4, ocorrem as observações astrométricas, instantes de trânsito de cada objeto, e fotométricas na banda G: “luz branca” não filtrada no intervalo de 330 a 1.050 nm. Após transitar pelo *astrometric field* os objetos passam por dois conjuntos, prismas dispersores + CCDs, que compõem os fotoespectrômetros: BP na banda de 330-680 nm e RP na banda de 640-1.050 nm fornecendo assim uma fotometria multicor para todas as estrelas e um espectro de baixa resolução. Finalmente, os objetos mais brilhantes que $V \sim 17$ magnitudes serão espectroscopicamente observa-

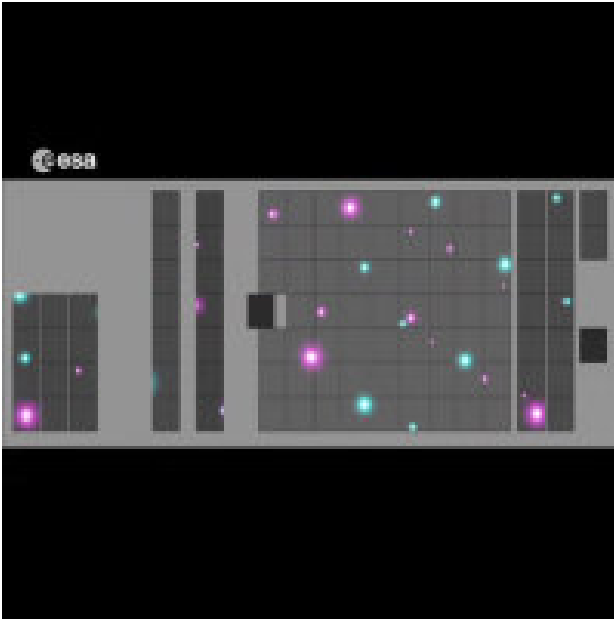


Figura 5: - Ilustração da observação no modo TDI onde vemos o trânsito de vários objetos pelo plano focal comum dos telescópios Gaia. Crédito: ESA/Gaia/DPAC.

dos no intervalo de 847-874 nm (triplete do cálcio) com o espectrômetro RVS de média resolução ($\lambda/\Delta\lambda = 11.700$) destinado às medidas de velocidades radiais e de características físicas dessas estrelas.

Para “varrer” o céu os detectores CCDs funcionam de uma maneira pouco usual que podemos dizer de “varredura síncrona”, em inglês *drift-scanning* ou “*time delayed integration* (TDI). Esse tipo de observação foi bastante utilizado em solo nos anos 90 em instrumentos como, por exemplo, os círculos meridianos do Observatório Abrahão de Moraes (IAG/USP-Valinhos) e do Observatório de Bordeaux - França [13]. Trata-se de instrumentos de trânsito, concebidos para a determinação precisa de posições relativas e/ou absolutas. Ao serem automatizados com a instalação de câmeras CCDs, as mesmas, obrigatoriamente, tinham que operar no modo TDI, uma vez que esses telescópios se movimentam apenas ao longo do meridiano. Com isso, eles perderam sua capacidade de determinar posições de forma absoluta, mas ganharam a medida fotométrica associada àquela da posição mais precisa de um fator 2-3. Além disso, rotineiramente, passou-se a observar, em vez de apenas algumas dezenas, dezenas de milhares de objetos por noite.

Tanto no caso dos círculos meridianos quanto do satélite Gaia, a observação de um objeto implica que as cargas geradas nos pixels devido a

incidência de luz sejam deslocadas de um “pixel” ao seguinte com a mesma velocidade com que o astro desfila no campo devido ao movimento de rotação da Terra ou da rotação do satélite. Não é o instrumento que acompanha o astro, mas sim as cargas na câmera CCD de maneira que de um “pixel” a outro elas vão se adicionando.

As observações astrométricas do Gaia, como também era no caso dos círculos meridianos, consistem no registro do instante da passagem do astro por uma referência fixa no plano focal e da posição na direção perpendicular à rotação (ao trânsito). A partir do instante registrado obtém-se as pequenas separações angulares entre as várias estrelas do mesmo campo e em uma escala maior entre aquelas de um campo com o outro [14].

A grande precisão alcançada pelo Gaia se deve a vários fatores como por exemplo às dimensões dos telescópios, à repetição de observações de um mesmo objeto (em média 140/objeto ao final dos 10 anos de missão), à sensibilidade dos detectores e à estabilidade do instrumento.

4 Gaia data releases

As divulgações dos dados observacionais do satélite Gaia têm sido realizadas a, aproximadamente, cada 2 anos para aqueles objetos com uma boa solução astrométrica. A filosofia da divulgação é disponibilizar esses dados para o mundo todo ao mesmo tempo. Não existem grupos privilegiados que possam acessá-los antecipadamente para fazer ciência, a menos de raríssimas exceções como em observações de ocultações de estrelas por corpos do Sistema Solar. Esses dados são manipulados antes da divulgação somente pelos membros do DPAC no sentido da extração da informação científica a partir dos dados brutos transmitidos ao solo e da validação desse trabalho. Justamente, cada *release* é acompanhado de vários artigos do DPAC apresentando os resultados, metodologia de geração dos mesmos, análise de validação e algumas “sugestões” de exploração científica

Em setembro de 2016 foi publicada a primeira leva de dados Gaia DR1 [1,2] baseado em apenas 14 meses de observações. Os dados publicados nesse primeiro *release* são superficialmente resumidos a seguir.

- Posições e magnitudes na banda G para pouco mais de 1 bilhão de fontes até um li-

mite $G \sim 20.7$ magnitudes, respectivamente com precisões de 10mas e de 0,001 a 0,030 mag.

- Astrometria completa (posições, paralaxes e movimentos próprios) para 2 milhões de estrelas brilhantes comuns com os catálogos HIPPARCOS [12] e Tycho-2 [15], igualmente baseados em observações espaciais. Dessa combinação resultou o catálogo Tycho-Gaia Astrometric Solution - TGAS [16], com precisões típicas em posições e paralaxes de 0,3 mas e de 1 mas/ano em movimento próprio. Para 94 mil estrelas HIPPARCOS as precisões nos movimentos próprios alcançaram 0,06 mas/ano. Essa combinação não estava prevista, mas foi oportuna pois colocou nas mãos da comunidade, dados essenciais com qualidade superior ao que existia.
- Curvas de luz para 3 mil cefeidas e RR Lyrae.

O segundo *release*, baseado em 22 meses de observação, ocorreu em abril de 2018 e, “instantaneamente”, devido à abundância e qualidade alterou radicalmente a base de dados sobre a qual repousa a astronomia e, portanto, marcou uma nova era dessa ciência. Entre tantos outros, como mostrado a seguir, foram mais de 1 bilhão de paralaxes estelares, permitindo finalmente dizer onde estão, como são e como dançam as estrelas da nossa e das galáxias vizinhas.

No Gaia DR2 já tínhamos uma imagem como a da Figura 1, com um pouco menos objetos. Como dito, essa imagem simboliza a grandeza e o alcance dessas observações.

O conteúdo do segundo data release Gaia-DR2 é resumido a seguir:

- Posições e brilhos aparentes de aproximadamente 1,7 bilhão de estrelas com precisões, respectivamente, de 1 milissegundo a 40 microsegundos de grau e 20 a 1 milimag;
- Brilhos aparentes no azul e no vermelho, paralaxes e movimentos próprios de 1,3 bilhão dessas estrelas;
- Classificação de 500 mil estrelas variáveis com caracterização das curvas de luz;
- Velocidades radiais de mais de 7 milhões de estrelas com precisões de 200 a 2.000 m/s;
- Temperaturas efetivas de aproximadamente 160 milhões de estrelas;

- Cor, raio e luminosidade de aproximadamente 80 milhões de estrelas;
- Posições, brilhos e órbitas de pouco mais de 14 mil asteroides conhecidos;
- Posições e magnitudes de mais de 500 mil quasares.

Como se pode ver, este *release* é muito mais rico que o anterior. O número de observação de cada objeto é maior permitindo assim melhorar a precisão das medidas, refinar a identificação dos objetos rápidos e resolver objetos muito cerrados. Além disso, os releases são enriquecidos com novos objetos e novas categorias de objetos.

Assim, com o terceiro *release* publicado em duas etapas, EDR3 em dezembro de 2020 e DR3 em 13 de junho de 2022, tivemos mais um salto gigantesco e radical na base de dados sobre a qual repousa o conhecimento astronômico. É como se tivéssemos passado a viver uma realidade com a qual ainda nem tínhamos sonhado.

Nesse *release* aparecem, pela primeira vez, parâmetros morfológicos de galáxias e de galáxias hospedeiras de quasares, solução de sistemas estelares múltiplos não resolvidos, espectros e classificação espectral, *redshifts* e muitos outros dados observacionais e derivados. O Gaia DR3 baseia-se em 34 meses de observações, realizadas de 25/07/2014 a 28/05/2017.

O conteúdo estelar presente no terceiro *release* de dados compreende posições e magnitudes G para 1,8 bilhão de estrelas com limite superior em torno de 21 magnitudes e inferior em torno de 3 magnitudes. Para 1,5 bilhão desses objetos temos a astrometria completa (posição, paralaxe e movimento próprio) e a cor. Entre esses, 813 mil sistemas binários, cerca de 40 vezes mais do que era conhecido até então, com posições, distâncias, órbitas e massas.

Parâmetros astrofísicos (luminosidade, raio, temperatura, composição química e metalicidade) a partir dos espectros de baixa resolução BP/RP são fornecidos para 470 milhões de estrelas e a partir dos espectros de média resolução (RVS) para 5,6 milhões. Temos o tipo espectral para 217 milhões de estrelas e para 57 mil delas com linhas de emissão. Além disso, parâmetros espectroscópicos para 2,3 milhões de estrelas quentes e 94 mil ultrafrias.

A componente radial do movimento estelar foi medida para 33 milhões de estrelas mais brilha-

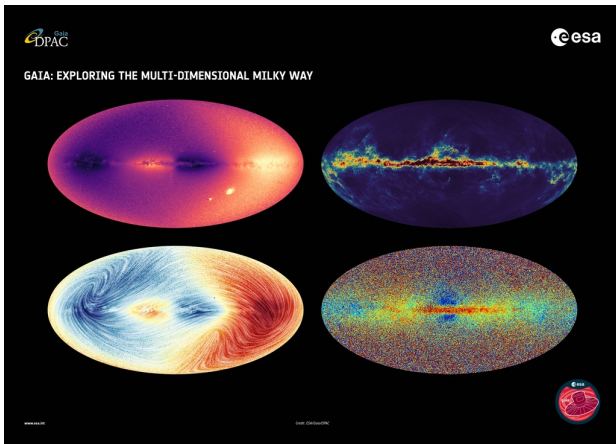


Figura 6: Figura icônica da Via Láctea do Gaia DR3: as várias dimensões da Via Láctea. Crédito: ESA/Gaia/DPAC.

tes que G 14 magnitudes e temperaturas efetivas entre 2.1000 a 14.500 K. Para 3,5 milhões delas com $G < 12$ magnitudes temos também, as velocidades de rotação. Esse número é em torno de 150-200 vezes mais do que aquilo que existia antes da era Gaia.

É fornecida também, a análise dos dados de variabilidade para 10,5 milhões de estrelas distribuídas em 24 diferentes categorias, entre elas 15 mil Cefeidas e 270 mil RR Lyraes.

Na Figura 6, a seguir, vemos uma projeção do céu em coordenadas galácticas: no topo à esquerda a distribuição de velocidades radiais: nas regiões mais escuras as estrelas em média estão se aproximando de nós e nas regiões mais claras elas estão se afastando. No topo à direita, temos um mapa de extinção: as regiões azuladas significam baixa extinção, ou seja, baixa densidade de gás e poeira. Já nas regiões amarelas e negras (plano galáctico) alta densidade de gás e poeira e, portanto, alta extinção.

Na imagem, abaixo e à esquerda, novamente temos as regiões em azul onde o movimento médio das estrelas é de aproximação de nós e nas regiões avermelhadas ou mais claras é de afastamento. As linhas não são trajetórias, simplesmente uma justaposição dos movimentos das estrelas no céu, ou seja, um fluxo dos movimentos próprios das estrelas. Abaixo à direita temos o mapa que mostra como milhões de estrelas estão quimicamente distribuídas pelo céu. Podemos ver que muitas delas, em azul, são constituídas da matéria primordial (H e He) enquanto que as vermelhas, a exemplo do Sol, se formaram de material enriquecido pelas gerações anteriores de estrelas e dessa

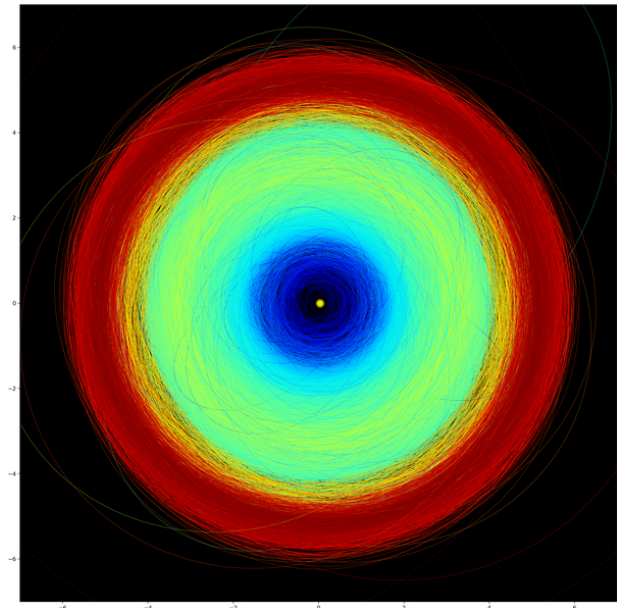


Figura 7: Órbitas dos asteroides observados pelo Gaia ao redor do Sol. A cor azul simboliza aqueles com periélios mais próximos do Sol e em vermelho aqueles com periélios mais distantes. Crédito: ESA/Gaia/DPAC.

forma são ricas em metal, lembrando que em astronomia tudo que é mais “pesado” que H e He é chamado de metal.

No que diz respeito ao Sistema Solar, temos a solução orbital para mais 150 mil corpos, incluindo as várias classes de asteroides e objetos transnetunianos [11]. Além disso, 31 satélites planetários e reflectância para mais de 60 mil objetos [9].

Na Figura 7, a seguir, podemos ver as órbitas desses corpos ao redor do Sol. O código de cores baseia-se na distância periélica, ou seja, a distância mínima que o asteroide se aproxima do Sol durante seu movimento: em azul temos aqueles cujos periélios são mais próximos do Sol e em vermelho os mais distantes.

Finalmente, uma outra grande novidade é o conteúdo extra-galáctico desse release. São 1,9 milhão de quasares com *redshifts* e brilhos sendo que para 60 mil deles foram detectadas as galáxias hospedeiras e para 15 mil delas foram determinadas características morfológicas. Além disso, foram observadas 2,9 milhões de galáxias e para 800 mil delas pudemos obter uma boa solução para o perfil de brilho e parâmetros morfológicos.

As posições dos quasares observados são essenciais na materialização do International Celestial Reference System [5] que antes das observações Gaia era materializado por apenas, pouco mais

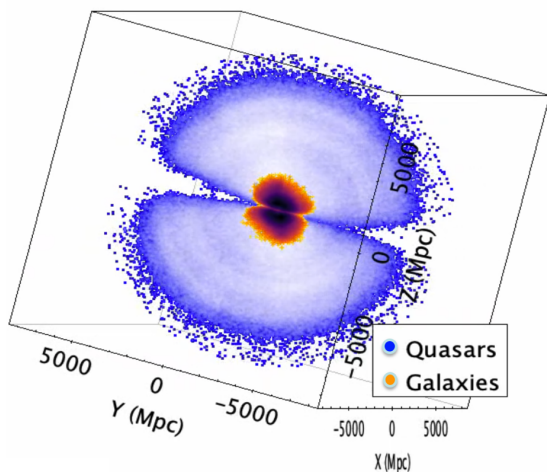


Figura 8: Distribuição espacial do conteúdo extragaláctico observado pelo satélite Gaia e analisado no âmbito da unidade Extended Object do DPAC. Naturalmente, a observação dos quasares vai muito mais longe devido à intensidade de seus brilhos. Crédito: C. Ducourant.

de 200 quasares observados em rádio. Esse referencial era então, estendido por referenciais secundários mais densos de base estelar no visível. Certamente, essa solução estava longe da materialização de um referencial ideal. Agora, temos um referencial primário com 1,6 milhões de quasares, observados no visível, onde se faz a maior parte da astronomia, com uma extensão de 1,8 bilhão de estrelas, igualmente no visível, observadas com o mesmo instrumento, a partir do espaço e com precisões extremas.

5 Parâmetros morfológicos de galáxias

A Missão Espacial Gaia foi concebida com foco principal na observação astrométrica precisa de objetos pontuais, essencialmente estrelas e quasares. Entretanto, além disso, como vimos, o satélite perfaz igualmente observações fotométricas e espectroscópica e também, observações de objetos não pontuais como asteroides e satélites do Sistema Solar, galáxias compactas e estrelas múltiplas não resolvidas. Devido às características “extravagantes” desses objetos eles se tornaram alvos de tratamentos específicos no âmbito do Gaia DPAC.

Os objetos extensos necessitam de um tratamento específico e foi nesse contexto que surgiu, a exemplo de outros, o grupo Extended Object (EO) - DU470 (Development Unit 470 - CU4)

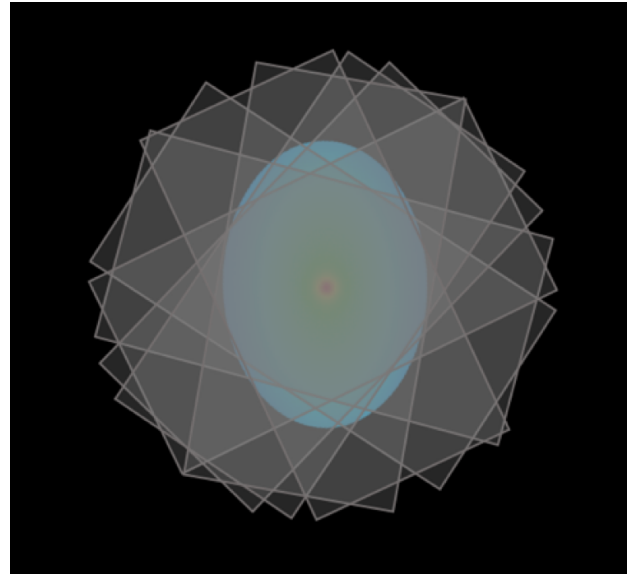


Figura 9: Ilustração dos diversos trânsitos observados de uma galáxia qualquer, nesta figura uma galáxia sintética.

visando o aproveitamento das observações de galáxias e de galáxias hospedeiras de quasares para extrair informações a respeito de suas morfologias. Em particular, a origem desse grupo reside na tese de doutorado do Dr. Alberto Krone Martins em co-tutela entre o IAG-USP e o Laboratoire d’Astrophysique de Bordeaux: “Ampliando os horizontes da Missão Espacial Gaia através das observações de galáxias” [17, 18].

Esse aspecto da missão espacial Gaia será abordado, ainda que grosseiramente, aqui pois por um lado, o conteúdo extragaláctico do Gaia é uma das grandes novidades do terceiro *release* e por outro, porque esse conteúdo é fruto dos esforços de uma colaboração brasileira, de longa data, com colegas de Bordeaux e de Nice. É justamente no trabalho desse grupo que reside a participação brasileira relevante no âmbito do projeto Gaia.

Os parâmetros morfológicos de um grande número de galáxias e de galáxias hospedeiras de quasares distribuídas por todo o céu constitui uma importante contribuição no estudo de suas formações e evoluções, do papel dos *merges*, da evolução cosmológica, da distribuição de massa no universo, da matéria escura, da relação buraco-negro supermassivo e galáxia hospedeira entre muitos outros tópicos.

De maneira bastante superficial a estratégia para se obter as informações sobre a morfologia das galáxias pode ser descrita como a reprodução dos vários trânsitos observados pelo satélite, preservando o ordenamento dos ângulos de varre-

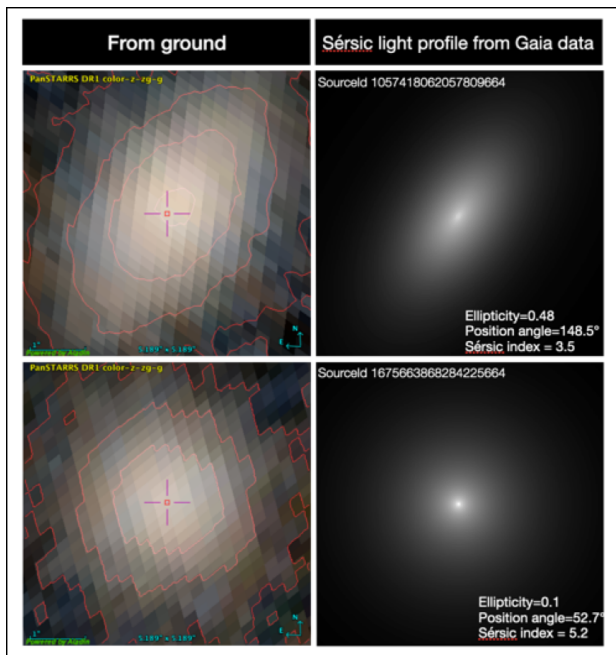


Figura 10: À esquerda galáxia real observada a partir do solo e à direita galáxia sintética construída com os parâmetros obtidos na melhor solução dentro da nossa estratégia. Crédito: C. Ducourant.

dura, sobre milhares de galáxias simuladas (sintéticas). A comparação do arranjo dos trânsitos organizados da galáxia real com aqueles da galáxia sintética fornecerá a melhor solução dos parâmetros morfológicos da galáxia real.

Na Figura 8, vemos as imagens de duas galáxias obtidas a partir do solo à esquerda e das correspondentes galáxias sintéticas ajustadas com os parâmetros resultantes da melhor solução alcançada com nossa estratégia.

Naturalmente, um primeiro passo nessa direção foi a identificação dos alvos, quasares e galáxias, no oceano de detecções Gaia. Para o terceiro *data release* temos uma classificação probabilística das fontes em cinco classes: estrela, galáxia, quasar, estrela binária ou anã branca [8]. No entanto, quando iniciamos o ciclo de processamentos dentro do Gaia DPAC, essa classificação não estava disponível que nos levou a configurar nossas listas de entrada com base no Gaia DR2 e em dados da literatura.

A lista de quasares foi configurada a partir de vários catálogos de quasares e candidatos a quasares resultando em pouco mais de 6 milhões de entradas sendo quase 2 milhões presentes no Gaia DR2. Esses objetos passaram ainda por um filtro astrométrico, paralaxes e movimentos próprios, resultando em uma lista final de aproxima-

damente 1,5 milhão de quasares e candidatos a quasares presentes no Gaia DR3.

A lista de galáxias por nós analisadas foi estabelecida por Krone-Martins et al. [19]. Este catálogo foi compilado usando um método totalmente não supervisionado baseado em um esquema iterativo estocástico especificamente adaptado para o problema de separação estrela-galáxia. Dessa forma, construiu-se um catálogo de fontes extragaláticas extensas contendo 1,7 milhão de objetos com uma correspondência no Gaia DR3.

Confirmando nossas previsões [20] a grande maioria das galáxias detectadas pelo satélite são principalmente as elípticas, mas também espirais abrigoando bojos brilhantes ou núcleos ativos. Os resultados obtidos foram divulgados e publicados juntamente com todo Gaia DR3 no dia 13 de junho de 2022 [7, 10].

No caso dos quasares foram detectadas 64,5 mil galáxias hospedeiras sendo que para 15,9 mil delas obtivemos uma solução robusta. Já para as galáxias, partimos de uma lista de 940,9 mil e obtivemos solução para 914,8 mil delas. Esses números são, sem sombra de dúvidas, bastante expressivos e relevantes.

A detecção de galáxias hospedeiras de quasares a partir do solo pode ser considerada rara, sobretudo no visível em comparação com o que alcançamos aqui. As galáxias analisadas aqui são, em geral, bastante compactas de tal forma que as perturbações atmosféricas em observações a partir do solo têm uma grande interferência em seus perfis de brilho, o que torna esse trabalho mais relevante ainda.

6 Futuro

Como dito, está previsto para 2025 a publicação do quarto Gaia *data release* correspondendo a 66 meses de observações, portanto, quase o dobro das observações que geraram o DR3 agora publicado. O tratamento dessas observações já se iniciou a mais ou menos 1 ano e mais uma vez, deveremos ter um conteúdo bastante enriquecido em categorias de objetos, exoplanetas por exemplo, e em precisão.

As chances de estender a missão por mais 3 anos, perfazendo um total de 10 anos, são muito grandes. Entretanto, independentemente, dessa prorrogação ser decidida positivamente, o satélite, até esse momento, não parou de varrer o céu

o que permitiu acumular em torno de 95 meses de observações. Em outras palavras, uma boa parte dos dados para um quinto *data release* não previsto originalmente, já está assegurada e armazenada em solo. A data para a publicação desse novo *release* não está definida, mas se fala em algo por volta de 2030.

Por outro lado, já se discute, desde o lançamento do satélite Gaia em 2013, um segundo satélite Gaia e, naturalmente, muitas propostas têm surgido.

A proposta que parece mais forte neste momento é a do projeto NIR que consiste em um satélite que guarda os princípios observacionais do Gaia, mas com muitos outros recursos incluindo observações no infravermelho próximo - All-Sky Visible and Near Infrared Space Astrometry - NIR.

Um tal projeto, permitiria, entre outras, acessar regiões escuras da Galáxia, observar 5 vezes mais objetos do que o Gaia atual, ou seja, passar de 2 para 10 bilhões de objetos, alcançar melhores precisões, em movimento próprio por exemplo seria melhorada de um fator 20, detectar padrões até agora invisíveis nos movimentos das estrelas, mapear matéria escura, etc.

Naturalmente, esse novo projeto, caso seja aceito agora, só será realidade dentro de 15 a 20 anos.

7 Considerações

O projeto Gaia foi concebido com o objetivo de produzir uma verdadeira revolução na base de dados sobre a qual repousa a astronomia e conseqüentemente na visão que temos da Galáxia e do Universo como um todo, através de observações astrométricas, fotométricas e espectroscópica extremamente precisas e repetidas ao longo do tempo.

Os seguidos *data releases* como este disponibilizado para o mundo inteiro ao mesmo tempo em 13 de junho de 2022 (Gaia DR3), nos permitem de maneira muito mais realística do que antes, descrever e caracterizar o Sistema Solar e sua vizinhança, contar a história e descrever a estrutura de nossa galáxia, detectar exoplanetas, estabelecer um referencial homogêneo, rígido e muito próximo de um inercial, caracterizar o universo extragaláctico próximo e distante com as observações de galáxias, quasares e galáxias hospedeiras

de quasares.

A bordo do satélite Gaia temos dois telescópios especiais com um plano focal comum onde se encontram 3 instrumentos que realizam medidas astrométricas (posição, distância e movimentos) e fotométricas (brilho em luz branca), fotoespectrométricas (brilho, cor e espectro de baixa resolução) e espectroscópicas (velocidades radiais e composição química). Essas observações repetidas ao longo do tempo permitem alcançar precisões até bem pouco tempo inimagináveis. Por exemplo, a grandeza mais importante da astronomia, a paralaxe estelar que fornece a distância e calibra a escala de distância do Universo, é medida com precisões de microssegundos de grau.

Os dados do Gaia são disponibilizados para o mundo todo ao mesmo tempo. Qualquer pessoa pode acessá-los. Esses dados são superabundantes e nos dão a liberdade de, eventualmente, selecionar os melhores entre eles e mesmo assim continuar trabalhando com uma amostra robusta. Tudo que falarmos a respeito do Sistema Solar, da Via Láctea e do Universo, será mais realístico e confiável a partir desses dados que provavelmente sustentarão a astronomia nos próximos 20-30 anos.

São justamente a abundância de dados, a precisão das medidas e a variedade de objetos observados (praticamente todo tipo de corpo celeste existente) que asseguram esse caráter revolucionário das observações Gaia, colocando em nossas mãos, uma vez mais na História da astronomia, a riqueza de informações contida na luz dos astros.

Agradecimentos

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Comité Français d'Évaluation de la Cooperation Universitaire e Scientifique avec le Brésil (COFECUB) e ao Laboratório de Astroinformática do IAG-USP pelo apoio material e logístico à minha participação no Gaia-DPAC.

Sobre o autor

Ramachrisna Teixeira (rama.teixeira@iag.usp.br) é Professor Associado do Departamento de Astronomia do Instituto de Astronomia,

Geofísica e Ciências Espaciais (IAG) da Universidade de São Paulo (USP). Tem Graduação em Física pela USP, Mestrado em Astronomia pelo IAG-USP, Doutorado em Astronomia e Astrofísica pela Universidade de Bordeaux I (França) e Livre Docência pelo IAG-USP. É membro ativo do Gaia Data Processing and Analysis, atuando no grupo Extended Objects - EO - DU470.

Referências

- [1] Gaia Collaboration et al., *The Gaia mission*, *Astronomy & Astrophysics* **595**, A1 (2016). [ArXiv:1609.04153](#).
- [2] Gaia Collaboration et al., *Gaia data release 1 - summary of the astrometric, photometric, and survey properties*, *A&A* **595**, A2 (2016).
- [3] A. G. Brown, *Microarcsecond astrometry: Science highlights from Gaia*, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **59**(1), 59 (2021).
- [4] Gaia Collaboration et al., *Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties*, *Astronomy & Astrophysics* **616**, A1 (2018). [ArXiv:1804.09365](#).
- [5] Gaia Collaboration et al., *Gaia Data Release 2. The celestial reference frame (Gaia-CRF2)*, *Astronomy & Astrophysics* **616**, A14 (2018). [ArXiv:1804.09377](#).
- [6] Gaia Collaboration et al., *Gaia Early Data Release 3. Summary of the contents and survey properties*, *Astronomy & Astrophysics* **649**, A1 (2021). [ArXiv:2012.01533](#).
- [7] Gaia Collaboration et al., *Gaia Data Release 3: The extragalactic content* (2022). [ArXiv:2206.05681](#).
- [8] Gaia Collaboration et al., *Gaia Data Release 3: A golden sample of astrophysical parameters* (2022). [ArXiv:2206.05870](#).
- [9] Gaia Collaboration et al., *Gaia Data Release 3: Reflectance spectra of Solar System small bodies* (2022). [ArXiv:2206.12174](#).
- [10] C. Ducourant et al., *Gaia Data Release 3: Surface brightness profiles of galaxies and host galaxies of quasars* (2022). [ArXiv:2206.14491](#).
- [11] P. Tanga et al., *Data Release 3: the Solar System survey* (2022). [ArXiv:2206.05561](#).
- [12] *The HIPPARCOS and TYCHO catalogues. Astrometric and photometric star catalogues derived from the ESA HIPPARCOS Space Astrometry Mission*, vol. 1200 de *ESA Special Publication* (ESA Publications Division, 1997).
- [13] B. Viateau et al., *The Bordeaux and Valinhos CCD meridian circles*, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **134**, 173 (1999).
- [14] L. Lindegren et al., *Gaia Data Release 1. Astrometry: One billion positions, two million proper motions and parallaxes*, *Astronomy & Astrophysics* **595**, A4 (2016). [ArXiv:1609.04303](#).
- [15] E. Høg et al., *The Tycho-2 catalogue of the 2.5 million brightest stars*, *Astronomy & Astrophysics* **355**, L27 (2000).
- [16] D. Michalik, L. Lindegren e D. Hobbs, *The Tycho-Gaia astrometric solution. How to get 2.5 million parallaxes with less than one year of Gaia data*, *Astronomy & Astrophysics* **574**, A115 (2015). [ArXiv:1412.8770](#).
- [17] A. Krone-Martins, *Ampliando horizontes da Missão Espacial Gaia graças à análise de objetos extensos*, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo e Université de Bordeaux I, São Paulo (2011).
- [18] A. Krone-Martins et al., *Pushing the limits of the Gaia space mission by analyzing galaxy morphology*, *Astronomy & Astrophysics* **556**, A102 (2013). [ArXiv:1307.5732](#).
- [19] A. Krone-Martins et al., *Identification of galaxies from the Gaia DR2 - ALLWISE all-sky catalogues with unsupervised machine-learning*, (a ser publicado).
- [20] R. E. de Souza et al., *Detection of galaxies with Gaia*, *Astronomy & Astrophysics* **568**, A124 (2014). [ArXiv:1404.4521](#).