

---

# A DESCOBERTA DE UM BURACO NEGRO SUPERMASSIVO NO CENTRO DA NOSSA GALÁXIA

---

AS ASTROCIENTISTAS



Andrea Ghez

UCLA Galactic Center Group, Physics and Astronomy Department, UCLA  
Los Angeles, CA 90095-1547, USA

## RESUMO

Este texto foi gerado<sup>1</sup> a partir da transcrição das principais partes do seminário da Prof. Dr. Andrea Ghez na conferência *As Astrocientistas: I Encontro Brasileiro de Meninas e Mulheres da Astrofísica, Cosmologia e Gravitação*, proferida virtualmente em inglês no dia 11/02/2021. A Prof. Dr. Andrea Ghez é professora do Departamento de Física e Astronomia da Universidade da Califórnia em Los Angeles (UCLA). Ela compartilhou o Prêmio Nobel de Física em 2020 com Reinhard Genzel e Roger Penrose pela sua contribuição no estudo de objetos compactos e supermassivos. Sua pesquisa abre novos caminhos para questões fundamentais sobre a estrutura e formação destes gigantes astronômicos e também para um melhor entendimento das teorias de gravitação em limites extremos.

**Palavras-chave** buracos negros supermassivos, astrofísica, ótica adaptativa

## 1 Introdução

Buracos negros são famosos hoje em dia. Difícil encontrar alguém que nunca tenho ouvido falar destes objetos. Mas a história era um pouco diferente há 26 anos atrás, quando entrei para o corpo docente da Universidade da Califórnia em Los Angeles, a UCLA. Na época, eu estava interessada em utilizar o Observatório Keck, localizado no Havaí e gerido pela Associação da Califórnia para Pesquisas Astronômicas (*California Association for Research in Astronomy*), de uma forma diferente. Em particular, buscava obter imagens mais nítidas do centro da nossa galáxia e averiguar a possibilidade da existência de um buraco negro supermassivo lá. Até então, esta dúvida era meramente especulativa. Nesses últimos 26 anos, conseguimos mudar o status da ideia de buracos negros supermassivos de uma possibilidade para uma certeza.

Este é projeto que apresento a vocês aqui. Quando comecei, imaginava que seria uma pesquisa de três anos de duração. Não poderia imaginar, naquela época, que estaria continuando esta pesquisa um quarto de século mais tarde. Este foi um projeto que se beneficiou tremendamente do desenvolvimento e avanço tecnológicos, possibilitando uma melhoria nas técnicas de observação e revelando uma riqueza de possibilidades científicas que nos ajudam a compreender melhor tanto os buracos negros supermassivos e suas gravidades, quanto seu papel astrofísico na formação e evolução das galáxias.

Dada a relevância do tema, a primeira pergunta que gosto de abordar ao iniciar conversas como esta é,

*Como se observa algo que não se pode ver?*

Essa é uma questão essencial para quem quiser encontrar e estudar buracos negros.

## 2 Buracos negros

Buracos negros são regiões do espaço onde a força da gravidade é tão intensa que nada pode escapar, nem mesmo a luz. Por isso, não podemos vê-los diretamente. Eles também podem ser entendidos como regiões onde a gravidade superou todas as outras forças conhecidas, o que causa uma contração contínua do objeto até que ele se torna infinitesimalmente pequeno. Os buracos negros

---

<sup>1</sup>Transcrito e traduzido por Rodrigo von Marttens, editado por Carla Rodrigues Almeida.

são previstos pela teoria da relatividade geral de Einstein, mas também representam um ponto de nossa compreensão física onde as leis conhecidas se quebram. Uma grande dificuldade para o entendimento dos buracos negros é a falta de uma teoria que unifica as teorias de gravitação – como é a relatividade geral – e as teorias quânticas. Esperamos que, quando soubermos como estas duas teorias se encaixam, seremos capazes de entender a fundo o que é um buraco negro.

Vamos tomar como exemplo um buraco negro sem carga e sem rotação para aprofundarmos o conceito. Existe um raio abstrato, chamado raio de Schwarzschild, que delimita o buraco negro e, por isso, é importante de ser compreendido (ilustrado na Fig. 1). O raio de Schwarzschild marca o ponto da região de onde a luz consegue escapar da atração gravitacional do buraco negro, ou seja, de onde ainda podemos fazer observações. Quem está de fora não consegue fazer nenhuma medição dentro deste raio. Mais do que isso, se um objeto qualquer se comprimir até a escala de seu raio de Schwarzschild, então a gravidade deste objeto superará todas as outras forças conhecidas e este se tornará um buraco negro. O raio de Schwarzschild de cada objeto é proporcional a sua massa. Logo, quanto mais massivo um objeto, maior é seu raio de Schwarzschild.

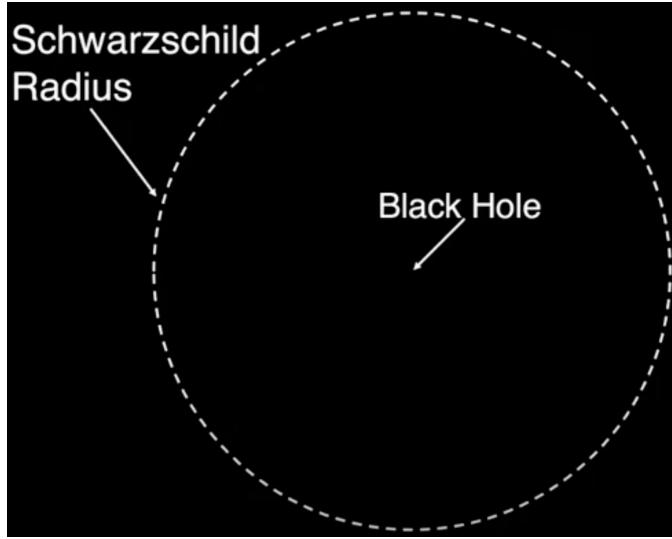


Figura 1: Esquema ilustrativo de um buraco negro com o raio de Schwarzschild.

Em astrofísica falamos sobre dois tipos de buracos negros: os de massa estelar e os supermassivos. No caso dos buracos negros de massa estelar, primeiros eles foram pensados de um ponto de vista teórico e depois descobertos observacionalmente. Em particular, as recentes detecções do LIGO fornecem uma verificação fabulosa para a existência destes buracos negros. Em geral, eles se formam com mais de 30 vezes a massa do Sol e evaporam até se tornarem pequenos buracos negros de aproximadamente 10 vezes a massa do Sol. Já a história dos buracos negros supermassivos, de um milhão a um bilhão de massas solares, começou com a observação de galáxias conhecidas como galáxias de núcleo ativo (AGN). A teoria veio posteriormente.

Estas galáxias AGN produzem uma tremenda quantidade de energia em seus centros, seus núcleos. A Fig. 2 é uma imagem clássica que foi obtida em comprimentos de onda de rádio, onde é possível ver dois fenômenos associados a este caso particular de AGN. Primeiro e mais importante, os jatos de matéria e radiação que estão saindo do centro da galáxia. É possível ver seus movimentos no plano do céu, bem como ao longo da linha de visão. Medindo a energia cinética destes jatos, é possível concluir que há um mecanismo central tremendo poderoso que está conduzindo esse fenômeno. O segundo fenômeno é a emissão de rádio vinda do centro desta galáxia que é muito diferente de qualquer coisa emitida por qualquer estrela, gás ou poeira e que tendem a variar em escalas de tempo muito curtas. Por causa destes fenômenos, foi postulado que há um buraco negro supermassivo no centro dessas galáxias, que estão acumulando matéria através do raio de Schwarzschild e do horizonte de eventos, num processo que gera esses jatos de emissão.

Foi assim que se pensou na possibilidade de buracos negros supermassivos. Mas observe que este é um argumento indireto e as AGN são apenas 10% de todas as galáxias, aproximadamente. Mesmo assim, a ideia para esse mecanismo de criação de muita matéria levou as pessoas a teorizarem que talvez todas as galáxias abriguem buracos negros supermassivos em seus centros, não apenas as AGN. Os casos em que o buraco negro está aparentemente inativo no centro da galáxia ocorriam simplesmente porque não há matéria caindo através do horizonte de eventos. Buracos negros supermassivos sendo uma componente chave para a formação de galáxias é uma ideia que surgiu em meados da década de 60, início da década de 70.

Para estudar os buracos negros supermassivos, nossa galáxia é certamente o melhor lugar para observarmos. O centro dela está bem próximo de nós, comparado ao da galáxia mais próxima, que está cerca de cem vezes mais longe. Se pudéssemos sair da Via Láctea e olhar para trás, veríamos uma estrutura achatada em forma de disco e com lindos braços espirais. Nossa sistema

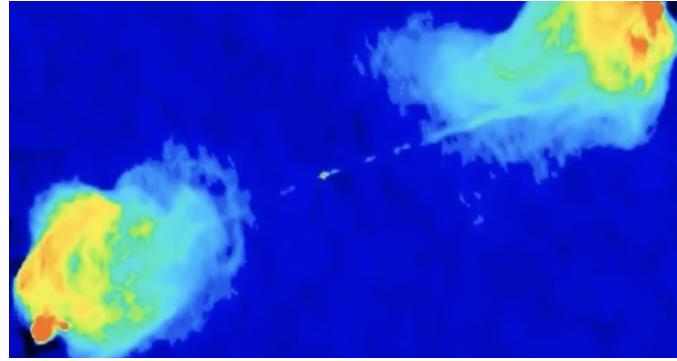


Figura 2: Imagem de duas AGNs na faixa de ondas de rádio.

solar está localizado aproximadamente a meio caminho em uma dessas estruturas semelhantes a braços espirais. Nossa ponto de vista está no meio desta galáxia, então quando olhamos para o céu durante a noite, em particular durante o verão, vemos o plano da Via Láctea com toda a luz das estrelas. Especialmente se você estiver longe das luzes da cidade (certamente não em um lugar como Los Angeles!). A Fig. 3 mostra uma foto que foi tirada no Havaí, na grande ilha. É possível notar que há uma faixa mais escura cortando o meio do plano. Esta é devida à poeira, que aparece em tremendas quantidades em nossa galáxia. Ela é eficiente em bloquear a luz ótica em particular – a luz cujo comprimento de onda é efetivamente o tamanho destas partículas de poeira ou menores são bloqueadas por essas partículas.



Figura 3: Foto da Via Láctea vista do Havaí.

No espectro ótico, nosso olho detecta apenas um a cada 10 bilhões de fótons que chegam do centro da galáxia até nós, mas se formos para o infravermelho – em particular o infravermelho próximo, comprimento de onda  $2 \mu\text{m}$ , que é um pouco mais longo do que o que o seu olho detecta – um em cada 10 fótons chega até nós. O desenvolvimento da astronomia infravermelha foi, então, essencial para o estudo do centro da galáxia. Essa tecnologia moderna que é usada para estudar o centro da galáxia tem também um propósito militar, porque óculos de visão noturna são exemplos de tecnologia de infravermelho. E hoje em dia usamos para estudar a nossa galáxia. Através do infravermelho, tentamos mapear o movimento de estrelas no centro da galáxia buscando por indícios de um buraco negro supermassivo lá – olhando para a influência gravitacional do que quer que esteja no coração da galáxia.

### 3 Os telescópios Keck

Pelas leis de Kepler, sabemos que a órbita das estrelas é ditada pela quantidade de massa no centro da sua órbita. Então, através do movimento estelar no centro da galáxia, procuramos mostrar que estas estrelas orbitam um objeto com muita massa concentrada num pequeno volume. Quanto mais próxima as estrelas estiverem do centro da galáxia, melhor. Essa seria uma prova mais contundente da existência de um buraco negro supermassivo e o motivo pelo qual eu estava tão interessada em ter acesso aos Telescópios Keck.

Os telescópios Keck foram inaugurados em meados dos anos 90, que foi também quando comecei meu trabalho como professora. Eles são os maiores telescópios ótico e infravermelho no mundo. A forma como caracterizamos estes telescópios é pelo diâmetro do espelho coletor primário e os diâmetros de cada um dos telescópios, são dois no total, é de 10 metros. Essa é a efetivamente

largura de uma quadra de tênis, para dar uma escala. Na época, a tecnologia usada para a construção de um telescópio deste tamanho era de ponta. Cada espelho é composto de 36 segmentos hexagonais e houve uma discussão longa sobre a possibilidade de segmentá-los. Desde então, muitos outros telescópios adotaram este desenho. Por exemplo, o telescópio espacial James Webb, que está prestes a ser lançado.<sup>2</sup> Tem essa mesma arquitetura de espelho, assim como toda a próxima geração de telescópios.

A razão pela qual ter acesso a um grande telescópio é tão essencial para este experimento onde você quer ver as estrelas no coração da galáxia é que, a princípio, quanto maior o seu telescópio, menor sua resolução angular. Em outras palavras, seu limite de difração corresponde a um ângulo muito pequeno, que diminui à medida que o diâmetro aumenta, de acordo com a expectativa teórica para esses telescópios.

## 4 Óptica adaptativa

Um problema para telescópios baseados na Terra é a distorção da luz pela atmosfera terrestre. A atmosfera é o que nos permite sobreviver na Terra, mas é uma dor de cabeça para fazer astronomia e astrofísica do solo. A luz do centro da galáxia viaja até nós há 26.000 anos, imperturbável, e nos últimos 30 microssegundos de sua rota atinge o topo da atmosfera e fica completamente distorcida. Por isso gosto de dizer que são como pequenos padrões de insetos esmagados.

Passei parte da minha carreira trabalhando em técnicas para superar os efeitos de distorção da atmosfera terrestre, para encontrar uma solução teórica para a observação destes grandes telescópios terrestres. Os maiores telescópios que temos estão em terra, então tentar entender como lidar com a distorção da luz pela atmosfera é uma área na qual a tecnologia e metodologias de observação evoluíram tremendamente ao longo deste trabalho. Começamos com técnicas muito simples – simples com respeito ao hardware, mas computacionalmente complexos. Em outras palavras, o trabalho maior era feito no pós-processamento de imagens. Essa técnica foi chamada de *speckle imaging* e a utilizamos nos primeiros 10 anos da investigação. Este procedimento permitiu que 3% da luz fosse captada em uma difração limitada; o resto se tornou ruído no experimento. No entanto, esse foi apenas o primeiro passo.

A partir de então, a história é fascinante. Enquanto os astrônomos estavam a caminho do desenvolvimento de uma ótica adaptativa, um esforço paralelo estava em andamento nas forças armadas. Os militares, claro, também se preocupam em observar através da atmosfera, seja de baixo para cima ou de cima para baixo. E eles, os militares, têm muito mais dinheiro e recursos do que a comunidade de astronomia jamais verá. Logo, a pesquisa militar estava muito mais avançada e eles tinham em mãos uma tecnologia com solução de hardware. Porém, era tudo confidencial. Em algum momento, houve a decisão de tornar essa tecnologia pública, pois os astrônomos estavam alcançando os mesmos resultados em pesquisas científicas públicas. Ou seja, porque investir dinheiro federal para esse desenvolvimento da comunidade de astronomia quando, na verdade, a tecnologia já está muito bem desenvolvida?

Depois que esta tecnologia foi adaptada para fins astronômicos, as pesquisas deram um grande salto a partir do final da década de 90. A Fig. 4 é uma demonstração da diferença entre antes e depois de aplicarmos esta técnica nas observações. O quadro esquerdo da Fig. 4 mostra a visualização de cinco estrelas brilhantes obtida com exposições muito curtas, que lhe permitem congelar os efeitos interferentes da atmosfera da Terra, pois se fizermos uma exposição longa a imagem se tornará uma bolha difusa. O quadro direito da Fig. 4 mostra o resultado da mesma imagem com aplicação da ótica adaptativa, onde é possível realmente ver as estrelas. Dentro da caixa em destaque, no meio da imagem, é onde achamos que o buraco negro pode residir. Há uma fonte de rádio fraca – não brilhante como nos núcleos galáticos ativos – mas com um espectro que era semelhante. Logo surgiu a hipótese de que este poderia ser equivalente a um núcleo galático ativo fraco. Por isso, focamos a busca neste ponto.

Uma parte fundamental dessa tecnologia para ótica adaptativa usa lasers. Os lasers são necessários para dizer como mover a peça óptica chave para o hardware, para permitir desfazer o efeito da atmosfera. Este procedimento tira vantagem de um acaso da natureza: o fato de que a atmosfera basicamente retém os átomos de sódio que são depositados pelos meteoritos. Meteoritos que caem na Terra se desintegram e os átomos de sódio ficam presos nesta camada de aproximadamente quatro quilômetros. Então, usamos um laser para criar um brilho de estrela artificial, sintonizando-os a uma transição eletrônica no átomo de sódio. Com isso, podemos ajustar o elemento-chave do sistema de ótica adaptativa que neutraliza ou corrige as distorções introduzidas na frente de onda atmosférica.

Fizemos isso por mais 15 anos, observando o centro da galáxia. Assim que a ótica adaptativa ficou disponível na internet, pudemos pela primeira vez obter espectros e imagens em mais de um comprimento de onda, mais do que apenas  $2\mu\text{m}$ . Do ponto de vista astrofísico, é possível aprender bastante utilizando esta técnica.<sup>3</sup> Quando propus este experimento pela primeira vez, por volta de 1994, ele foi recusado, porque ninguém acreditava que a *speckle imaging* funcionaria no telescópio Keck, por este ser segmentado. Argumentaram que seria provável que não pudéssemos observar nenhuma estrela e, mesmo que a observação fosse possível, não as veríamos se mover. Na época, esperávamos encontrar movimentos retilíneos, nem estávamos pensando em

<sup>2</sup>O telescópio espacial James Webb foi lançado no dia 25 de dezembro de 2021.

<sup>3</sup>Um vídeo apresentando a animação com a dinâmica dos movimentos das estrelas em um quarto do espaço da caixa em destaque na Fig. 4 pode ser encontrado aos 23min10s da gravação da palestra da Prof.<sup>a</sup> Andrea Ghez, disponível no YouTube no canal do ComoUFES.

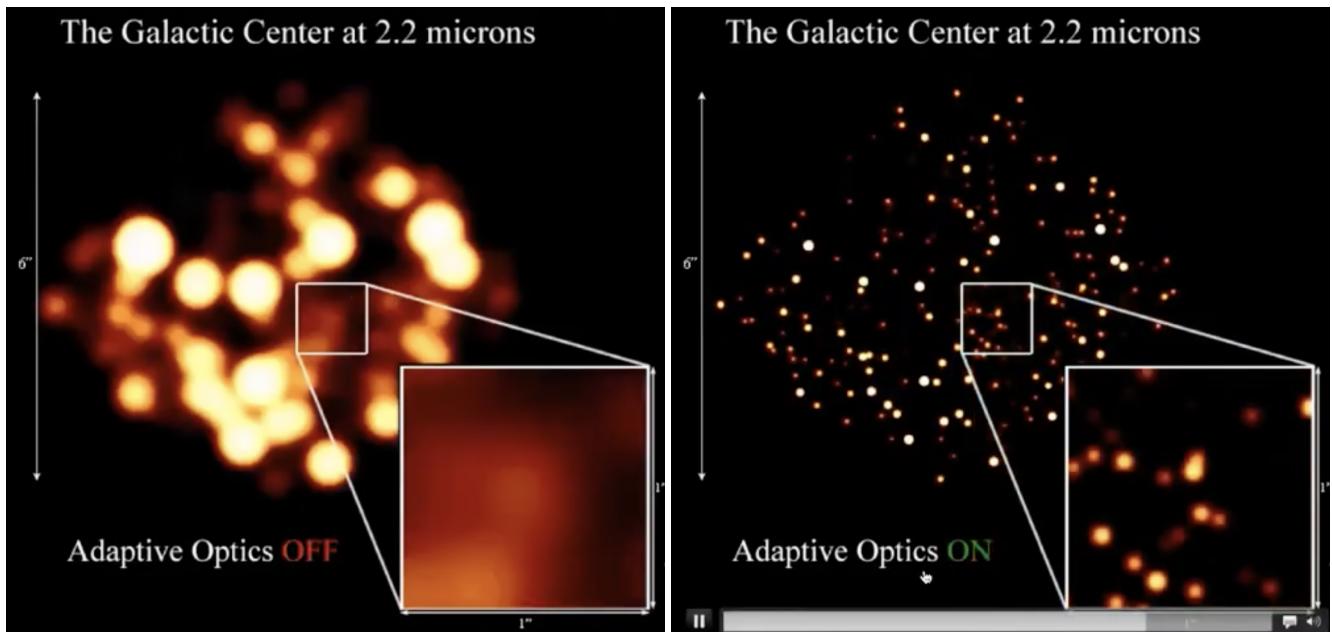


Figura 4: Ilustração do funcionamento da óptica adaptativa. *Quadro esquerdo:* Imagem sem utilização de óptica adaptativa. *Quadro direito:* Imagem com utilização de óptica adaptativa.

órbitas. Não sabíamos ainda como a técnica iria funcionar e qualquer tentativa era controversa. Hoje, há estrelas que podemos ver não porque ficaram mais brilhantes, mas porque nossa tecnologia melhorou. Uma vez que foi possível medir estas estrelas por espectroscopia, pudemos estimar suas órbitas, tal como mostrado na Fig. 5.

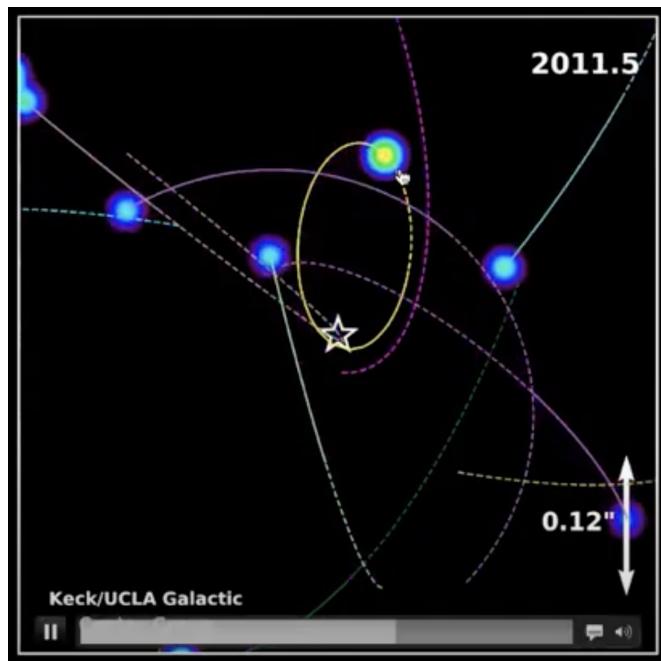


Figura 5: Simulação de órbita de estrelas em torno do buraco negro supermassivo no centro da galáxia.

A espectroscopia é importante por uma série de razões. Em primeiro lugar, ela permite se obtenha a velocidade ao longo da linha de visada através do efeito doppler. Também, pela primeira vez foi possível realmente perguntar que tipo de estrelas são essas e não tratá-las apenas como partículas teste que estão se movendo em um campo gravitacional. Estes são, na verdade, objetos astrofísicos reais. E isso abre uma gama de novas possibilidades e questões realmente empolgantes!

## 5 Buraco negro supermassivo

Mas então, existe um buraco negro supermassivo no centro de nossa galáxia?

No início deste projeto, sabíamos que lá havia muita massa, mas não era um argumento suficiente para responder a pergunta. A área estudada tinha um raio com ordens de magnitude maiores do que o raio de Schwarzschild para a massa prevista. O que as observações deste projeto fizeram foi comprovar que existe quatro milhões de vezes a massa do Sol dentro do círculo que é mostrado na Fig. 6. Ou seja, quatro milhões de vezes a massa do Sol pode ocupar um volume 10 milhões de vezes menor, o correspondente ao nosso sistema solar. O centro da galáxia tem uma área do tamanho do sistema solar com uma quantidade de matéria equivalente a quatro milhões de Sois. Então a evidência da existência um buraco negro supermassivo lá aumentou bastante.



Figura 6: Círculo que compreende região com quatro milhões de vezes a massa do Sol.

Quando a ideia de um buraco negro supermassivo passou de uma possibilidade para uma certeza, a motivação da pesquisa mudou. Passou de tentar demonstrar a existência destes objetos para usar o centro da nossa galáxia como laboratório para entender tanto a física como a astrofísica dos buracos negros. Atualmente há duas principais frentes na investigação: uma consiste em uma perspectiva astrofísica e outra em uma perspectiva de física das interações fundamentais. Começando com o lado da astrofísica, ao medirmos as velocidades usando dispersões para mostrar que havia uma enorme quantidade de massa ali, surgiu a pergunta, “quem veio primeiro, o buraco negro supermassivo no coração da galáxia ou a galáxia?” Essa é uma pergunta comparada à clássica sobre o ovo e a galinha. Mas, desde então, aprendemos que esta é uma maneira errada de pensar sobre o problema.

A razão pela qual nos movemos nessa direção é porque, com as evidências de que buracos negros supermassivos também surgiram em outras galáxias onde podemos obter a massa, vemos que existe uma correlação muito forte entre a massa do buraco negro supermassivo e a massa da parte central da galáxia, conhecida como bojo. Em geral, a relação entre a massa do buraco negro supermassivo e a massa do bojo da galáxia é de cerca de 0,1%. A escala do bojo é tão maior que é difícil imaginar um cenário em que um se formaria primeiro e depois causaria a formação do outro. Hoje achamos que o que quer que tenha formado a galáxia formou também o buraco negro, de modo que ambos devem ser subprodutos de um único processo. E que deve existir algum mecanismo que mantém o crescimento do buraco negro e da galáxia em sintonia. Neste momento, temos a oportunidade maravilhosa de olhar para o centro da galáxia para tentar entender esses processos físicos que podem estar acontorcendo, talvez um mecanismo que regula o crescimento destes dois entes em sincronia.

Esta parte do projeto foi bastante divertida para mim, porque há muitas previsões sobre o que há no centro da galáxia e quase tudo o que foi previsto para existir ou que deveria ser observado perto do buraco negro supermassivo têm sido inconsistente com as observações. Isso abriu uma série de perguntas e questões muito ricas sobre formação e evolução galática. Vou apresentar três destes problemas ou contradições que surgiram, que impulsionaram novas questões.

O primeiro se trata da descoberta de estrelas jovens naquele local. No final dos anos 80, argumentava-se que a presença de estrelas jovens seria um indício contra a existência de um buraco negro supermassivo no centro da galáxia, pois as forças de maré do buraco negro seriam tão fortes que perturbariam qualquer nuvem molecular frágil e portanto estas não formariam novas estrelas. As estrelas são formadas por grandes bolas de gás e poeira colapsando sob a ação de sua própria gravidade; seria

necessário que elas tivessem densidades muito altas para superar essas forças de maré do buraco negro. Como sabemos que o buraco negro supermassivo está lá e que estamos olhando numa região muito próxima, em que as forças de maré ficam ainda mais fortes, estimamos que seria necessário uma densidade de gás de 10 a 11 vezes maior do que a que vemos hoje para a formação destas estrelas jovens a uma distância de até terceira potência.

Observamos que as estrelas jovens são a parte dominante da população. Eu gosto de chamar isso de paradoxo da juventude: como é possível a formação de uma estrela acontecer num ambiente tão extremo e inóspito? As pistas para responder a esta questão vêm da análise das órbitas. É preciso paciência para observar as órbitas, pois elas ficam mais longas para distâncias maiores (Fig. 7). Com o passar do tempo, a precisão das medições aumenta e isso nos permite ver pequenas curvaturas. Agora que sabemos muito mais sobre as propriedades do buraco negro, podemos também calcular as órbitas e fazer simulações. Percebemos que muitas das estrelas jovens estão situadas em um disco plano e isso sugere um mecanismo de formação parecido com os dos planetas gigantes no nosso próprio sistema solar, por exemplo: a formação se dá por causa de um disco de acreção muito denso no passado. No caso das estrelas jovens, este passado não é muito distante, porque elas têm apenas alguns milhões de anos de vida.

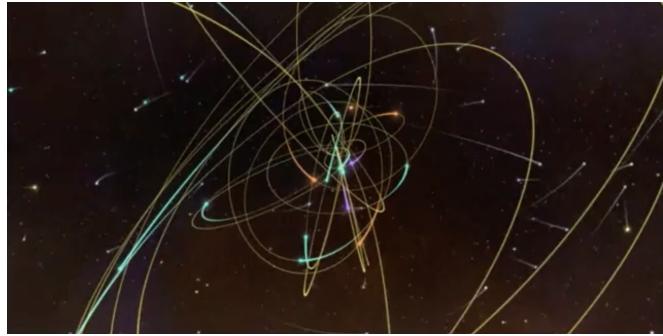


Figura 7: Simulação da órbita de diferentes tipos de estrelas em torno do buraco negro supermassivo no centro da galáxia. Os objetos verdes representam estrelas jovens. Os objetos laranja representam estrelas velhas. Os objetos magenta são possíveis estrelas cujos efeitos de força de maré são bem resolvidos e podem ser observados.

O segundo paradoxo se refere à ausência de estrelas velhas. Ou, melhor dizendo, muito poucas estrelas no centro da galáxia são velhas. Nós esperávamos que as estrelas antigas estariam mais próximas ao buraco negro, já que elas tiveram mais tempo para interagir e essas interações criam o que é conhecido como atrito dinâmico, fazendo com que os objetos gravitem para o objeto mais massivo do sistema, nesse caso, o buraco negro supermassivo. Então a previsão é que haveria mais estrelas velhas nas proximidades do buraco negro supermassivo. Nós, inclusive, usamos esta ideia para detectar a presença de buracos negros em outras galáxias, procurando por essa concentração de luz que é prevista a partir desse processo dinâmico. Porém, quando observamos as estrelas velhas, em vermelho na Fig. 7 vemos que na verdade há uma escassez delas.

O terceiro problema está destacado na Fig. 7 pelos objetos em magenta. Esses objetos magenta são fascinantes! Com eles, podemos observar as camadas externas sendo arrancadas, isto é, podemos ver a cauda de maré bem definida. Essas caudas se desenvolveram a medida que a estrela ou o objeto se aproxima do buraco negro e que se tornam mais compactas à medida que as estrelas emergem. Para que essas interações de maré aconteçam e para que esses objetos sobrevivam, propõe-se que estes objetos em magenta sejam estrelas, mas que são 100 vezes maiores do que qualquer coisa que prevíamos estar nesta região. Hoje, estou bastante interessada na ideia de que estes podem ser o produto de fusões de estrelas binárias. A maioria das estrelas começa sua vida como estrelas binárias e, através de uma interação com o buraco negro supermassivo, se fundem. Quando as estrelas binárias se fundem, elas inflam e ficam por alguns anos neste estado inflado. E é isso que podemos estar vendo nessas interações dos objetos em magenta.

Já do ponto de vista da física das interações fundamentais, é possível usar essas órbitas para traçar o campo gravitacional perto do buraco negro supermassivo. O que é útil, em particular, para observar as previsões da teoria de Einstein sobre a deformação do espaço-tempo à medida que se aproxima do buraco negro. Existem dois testes nos quais estivemos particularmente focados, que requeriam a medição de uma órbita completa para enfim podermos tirar conclusões de como a gravidade funciona. A minha estrela favorita, SO-2, demora 16 anos para completar sua órbita e é minha favorita porque é a única que tem cobertura de fase completa, com medições de imagem e medições espectroscópicas. Por isso, ela nos fornece a melhor observação de potencial central que temos hoje. Com a órbita mapeada, primeiro olhamos para o que é conhecido como desvio para o vermelho relativista, que descreve como a gravidade afeta o comprimento de onda da luz que emerge de um objeto e perde energia à medida que sai do potencial gravitacional e chega ao telescópio. Prevemos que este desvio para o vermelho é dominado pelo que acontece a um certo ponto, então basicamente temos que esperar até que a estrela dê uma volta completa e passe novamente por

este ponto para fazermos a medição. Isso aconteceu em 2018, o que tornou o ano muito emocionante para nós. Os resultados confirmaram a teoria da relatividade geral de Einstein.

Também podemos observar a precessão apsidal, que descreve como o objeto se move no espaço. Após uma volta completa, o objeto não deve voltar ao mesmo lugar que estava quando saiu. Ele deve sofrer uma precessão, ou seja, ultrapassar a posição inicial. Inclusive, a partir de nossas observações, temos uns resultados iniciais nessa direção, mas ainda não está maduro o suficiente para publicar. À primeira vista, parece que o objeto está se movendo na direção oposta! Então, estou particularmente interessada nesta precessão apsidal. Será isso um fenômeno físico ou um acúmulo de pequenos erros ou sistemática de análise? Nós tivemos o cuidado de combinar os 25 ou 26 anos de dados de uma maneira sólida e robusta para não introduzirmos qualquer tipo de mudança sistemática ou rotação, mas não podemos descartar a hipótese.

## 6 Perspectivas futuras e conclusão

Com o avanço da tecnologia, com a ótica adaptativa, podemos com um único laser corrigir 30% dos problemas de captação causados pela atmosfera. Passamos, então, de 3% de captação para 30%. Mas isso significa que ainda podemos melhorar bastante, uma melhoria que não pode ser alcançada com um único laser. Por isso, temos um projeto em colaboração com o Observatório Keck para construir um sistema de ótica adaptativa de última geração que lançaria vários lasers para tentar corrigir de forma mais completa esses efeitos de distorção através de, basicamente, um mapeamento da atmosfera terrestre. O projeto se chama KAPA, sigla para *Keck All-sky Precision Adaptive-optics* e é super importante para levar a ótica adaptativa à próxima geração de telescópios, pois, quanto maior o seu telescópio, mais ineficaz será um único laser. Para exemplificar, se usarmos um único laser num telescópio de 30 metros, não obteremos 30%, mas na verdade estaríamos de volta aos primórdios do *speckle imaging*, com apenas cerca de 3% de captação.

Para suavizar os riscos técnicos, o desenvolvimento desse sistema de ótica adaptativa de próxima geração é certamente uma maneira muito importante de avançarmos. De fato, uma das coisas que eu gosto muito sobre este projeto KAPA é que abaixo dele há a colaboração de todas as equipes que estão construindo essas instalações de próxima geração. Por isso, mesmo que estes possam ser vistos como projetos concorrentes, eles também estão colaborando para o desenvolvimento tecnológico com a geração atual de telescópios. A próxima geração é super promissora. Estes telescópios demoram anos para serem desenvolvidos e construídos. Eu faço parte do projeto de um telescópio de 30 metros há muito tempo, por exemplo. Ainda estava grávida do meu primeiro filho quando entrei no projeto, há 19 anos. Quando pronto, esse telescópio deve ser fenomenal e as perspectivas das imagens do centro da galáxia de um telescópio de 30 metros são empolgantes.

A Fig. 8 ilustra a evolução que esperamos. No quadro esquerdo da Fig. 8, vê-se basicamente como as coisas se parecem atualmente. No quadro central, vemos uma perspectiva da aplicação do sistema óptico adaptável de próxima geração na geração atual do Keck. Finalmente, no quadro direito, vemos como esperamos que seja a aplicação do sistema óptico adaptável de próxima geração no telescópio de 30 metros. Por isso, enfatizamos que o que vemos hoje é apenas a ponta do iceberg. Existem muitas estrelas no centro da galáxia que não podemos ver por causa do que chamamos de confusão – a densidade das estrelas na região é tão alta que não podemos ver as mais fracas e mais populosas.

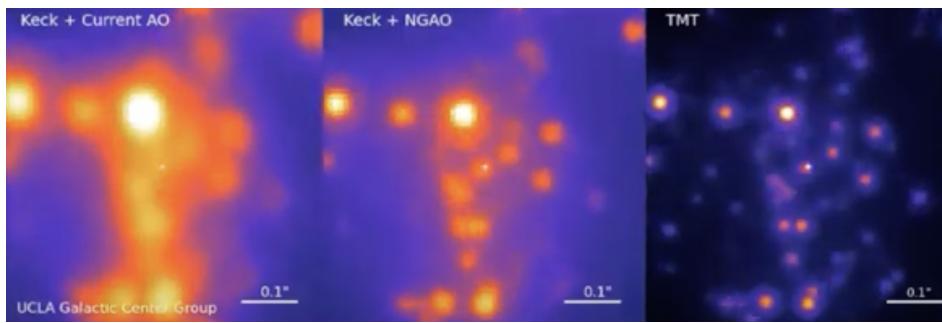


Figura 8: Perspectiva de evolução da qualidade das imagens. *Quadro esquerdo:* paradigma atual de imagens dos telescópios Keck. *Quadro central:* perspectiva da aplicação do sistema óptico adaptável de próxima geração na geração atual do Keck. *Quadro direito:* perspectiva da aplicação do sistema óptico adaptável de próxima geração no telescópio de 30 metros.

Eu gostaria de terminar dando crédito aos meus colaboradores. Começamos tudo com meus colaboradores de longa data, Eric Becklin e Mark Morris, e a minha primeira aluna de pós-graduação, Beth Klein. Depois o grupo se expandiu tremendamente, principalmente porque as oportunidades científicas cresceram bastante, com a coleta de dados que podem ser utilizados para vários projetos. Este projeto em geral se tornou um caso científico chave para o desenvolvimento de instrumentação no Keck e

no telescópio de 30 metros. Hoje somos uma colaboração central de cerca de 30 pessoas e uma rede internacional mais ampla com aproximadamente 100 pessoas.

Concluindo, espero ter convencido a todos de que existe um buraco negro supermassivo no centro da galáxia. E espero que eu tenha compartilhado com vocês um pouco da emoção do que aprendemos ao tentar abordar essa questão específica, mas no final revelando mais perguntas do que respostas.