

A primeira imagem de um buraco negro

Oscar T. Matsuura

Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, e
Museu de Astronomia e Ciências Afins

Resumo

Considere ao pé-da-letra a expressão “imagem de um buraco negro”, atribuindo a cada palavra o significado usual. Verá que ela não faz muito sentido e, se faz, soa estranha. É que a expressão é científica. Cada palavra adquiriu significado num vasto contexto de conceitos articulados numa teoria; esses conceitos, por sua vez, muitas vezes têm referências empíricas laboratoriais ou observacionais (astronômicas); o desenrolar histórico, normalmente imprevisível de descobertas observacionais ou de criações intelectuais, também adiciona às palavras, não explicações causais, mas meras referências casuais. Considerando a importância da popularização da ciência, como meio de promover a necessária alfabetização e letramento científico do público em geral, resolvi tirar vantagem da empolgação científica já suscitada pela grande mídia, quando anunciou a primeira imagem de um buraco negro. Não era mais preciso interessar as pessoas, pois elas já estavam interessadas no tema. Porém, notas quase telegráficas de jornais e noticiários atingem apenas superficialmente o público. Como teste de uma estratégia de divulgação científica e, também, como experimento de comunicação científica, decidi preparar e oferecer ao público um texto, antes de tudo elucidador do conteúdo científico e da complexa técnica de obtenção da imagem, mas também crítico do modo científico de investigar a natureza e incitador da aplicação da ciência, na medida em que ela possa tornar o mundo melhor e mais humano.

Abstract

Consider literally the expression “image of a black hole”, giving each word its usual meaning. You will see that it does not make much sense and, if it does, it sounds strange. The point is that the expression is scientific. Each word acquired meaning in a vast context of concepts articulated in a theory; these concepts, in turn, often have empirical laboratory or observational (in Astronomy) references; the normally unpredictable historical development of observational discoveries or intellectual creations, also adds to the words, not quite causal explanations, but mere casual references. Considering the importance of popularizing science, as a means of promoting the necessary scientific alphabetization and literacy of the general public, I decided to take advantage of the scientific excitement already aroused by the mainstream media, when it announced the first image of a black hole. There was no need anymore to interest people, as they were already interested in the topic. But notes almost telegraphic from newspapers and news reach the public only superficially. As a test of strategy for scientific outreach and also as an experiment in scientific communication, I decided to prepare and offer the public a text, first of all trying to clarify the scientific content and the complex technique of obtaining the image, but also being critical of the scientific way of investigating nature and inciting the application of science, insofar as it can make the world better and more human.

Palavras-chave: buraco negro, EHT, horizonte de eventos.

Keywords: black hole, EHT, event horizon.

DOI: [10.47083/Cad.Astro.v1n1.31781](https://doi.org/10.47083/Cad.Astro.v1n1.31781)

1 Introdução

A notícia de que os astrônomos obtiveram, pela primeira vez, a imagem de um *buraco negro* foi anunciada em 10 de abril de 2019. Mas muitos de vocês já devem ter visto imagens de buracos negros em livros, revistas ou vídeos de Astrono-

mia anteriores a essa data. Então, porque tanta empolgação?

Todas imagens vistas antes eram meras concepções artísticas de ilustradores tentando representar o buraco negro, após ouvir de cientistas explicações teóricas envolvendo leis físicas e noções matemáticas, ou mesmo descrições observa-

cionais, não propriamente de um buraco negro que é invisível (não só na luz visível, mas em todos os comprimentos de onda do espectro eletromagnético), mas de algum indício em suas vizinhanças, como intensa emissão de raios X por matéria extremamente quente orbitando o buraco negro num *disco de acreção* (disco que alimenta o buraco negro com matéria), ou um *jato* longo e retilíneo de cargas elétricas aceleradas perpendicularmente ao disco de acreção, a velocidades próximas à da luz, ou ainda estrelas orbitando mais longe, porém, com velocidades orbitais estranhamente elevadas, que denunciam uma quantidade excessivamente elevada de matéria, própria de um buraco negro central. Para exemplificar, apresento abaixo (Figura 1) uma concepção artística de um buraco negro baseada em simulações computacionais.

A notícia da primeira imagem (Figura 8) foi oficialmente anunciada ao mundo, através de entrevistas coletivas dadas simultaneamente em Washington, Bruxelas, Santiago, Xangai, Taipé e Tóquio. A colaboração científica internacional *EHT* (Event Horizon Telescope) ou Telescópio Horizonte de Eventos, iniciada em 2009 e envolvendo 347 astrônomos, físicos, matemáticos e engenheiros de 60 instituições de 20 países, tinha conseguido captar pela primeira vez, por meio de um telescópio virtual do tamanho da Terra, formado por 8 radiotelescópios, a imagem do buraco negro supermassivo, com massa equivalente à de 6,5 bilhões de sóis¹ no centro da galáxia M87 (*Messier 87*) ou *Virgo A*, localizada a 53,5 milhões a.l.² de distância na constelação setentrional da *Virgem*. Morfologicamente M87 é uma galáxia elíptica³ super-gigante e ativa, que se destaca por ser a mais massiva do superaglomerado (ver adiante) da *Virgem* e uma das mais massivas em nossas proximidades. Ela exibe um estreito jato violáceo (Figura 2) com pelo menos 5 mil a.l. de comprimento, indicador de que se trata de uma galáxia ativa. O raio do *horizonte de even-*

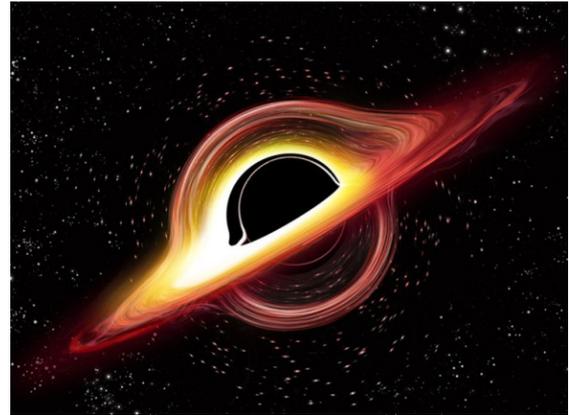


Figura 1: Desenhando o invisível. Ilustração considerada realista de um buraco negro supermassivo, com o disco de acreção posicionado quase de perfil. A parte frontal do disco aparece aqui com essa orientação, mas os fótons da parte traseira, tendo suas trajetórias recurvadas gravitacionalmente para cima, foram lançados na nossa direção. Há também alguns fótons com trajetórias recurvadas para baixo, sendo que uma parte também foi lançada na nossa direção, por isso aparecem na imagem.

*tos*⁴ do buraco negro é de 20 bilhões km (para os padrões astronômicos, uma distância modesta: apenas 0,002 a.l., lembrando que α do Centauro, a estrela mais próxima, se encontra a 4,4 a.l.). Considerando a distância já mencionada, o tamanho angular do horizonte de eventos é de apenas 0,000016" (16 milionésimos de 1"), um objeto deveras compacto.

1.1 Imagem impactante

Poucas imagens astronômicas, como aquela de 1990 do “pálido ponto azul” obtida pela sonda Voyager I (Figura 3), foram capazes de impactar tão profundamente o imaginário popular. A primeira imagem de um buraco negro também é impactante porque nos permitiu ver, pela primeira vez, o vulto de um buraco negro, um objeto do universo que achávamos ser definitivamente desprovido de qualquer visibilidade.

A teoria da relatividade geral, de Einstein, fun-

¹Doravante denotarei a massa do Sol com o símbolo $M_{\odot} = 1$ massa solar ≈ 2 oitilhões (2 seguido de 27 zeros) de toneladas.

²a.l. : abreviação de ano-luz. 1 a.l. corresponde à distância percorrida pela luz no vácuo durante um ano de 365 1/4 dias ou 9,461 trilhões km. É uma unidade de comprimento conveniente para expressar distâncias de estrelas e outras distâncias de escalas galácticas.

³Refere-se a essa forma que é diferente da de nossa Galáxia, que é espiral.

⁴Horizonte de eventos de um buraco negro sem rotação, é uma superfície perfeitamente esférica ao redor do buraco negro, de cujo interior nada pode ser observado por um observador externo pois, de lá, nem mesmo a luz pode escapar, devido à gravidade de extrema intensidade. Para um observador imaginário que adentrasse o horizonte de eventos, esse horizonte é o portal do não retorno. Lá dentro, todos os caminhos levam (e só levam) para o centro, onde toda massa do buraco negro está concentrada. O raio do horizonte de eventos é usado para definir o tamanho de um buraco negro.

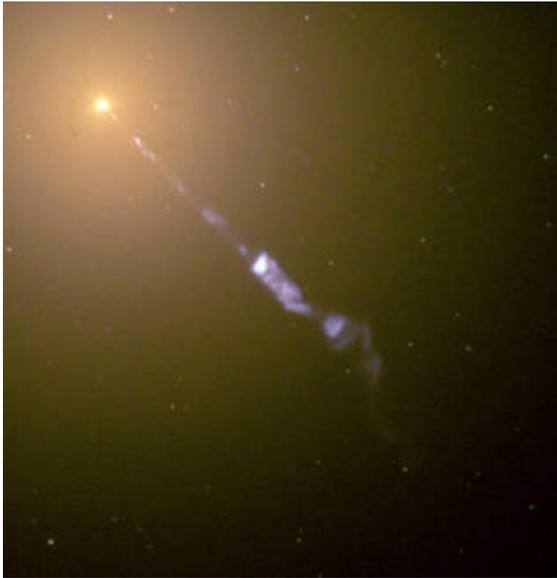


Figura 2: Galáxia M87 (acima e à esquerda) com o jato de partículas relativísticas. O buraco negro supermassivo de que estamos falando está no centro dessa enorme galáxia. Fotocomposição de imagens na luz visível e em infravermelho do Telescópio Espacial Hubble. Crédito: NASA and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA). Fonte: www.nasa.gov/feature/goddard/2017/messier-87.

damentou o conceito de buraco negro. Mas o próprio Einstein achou tal ente físico tão extravagante e monstruoso que, em 1939 pontificou que ele jamais existiria no mundo real. Seria apenas um conceito matemático. No entanto, obtida agora a imagem, pudemos constatar que o bizarro portal de mão única pelo qual só se entra, mas jamais se sai, realmente existe.⁵ Ele lembra a porta do Inferno da “Divina Comédia” com a inscrição: “Ó, vós que entrais, abandonai toda a esperança.”

A imagem nos mostrou como a gravidade e a relatividade geral de Einstein, de fato funcionam,

⁵Aqui um pequeno esclarecimento se impõe. Como um buraco negro não deixa nada escapar (nem luz!), afirma-se que ele só pode, ou manter a massa que já tem, ou ganhar mais massa, mas jamais perder. No entanto, aplicando-se a mecânica quântica (teoria estranha à relatividade geral), descobriu-se que buracos negros podem irradiar e, portanto, perder massa. Não conseguiria elucidar aqui com poucas palavras como isso ocorre, nem considero didático fazer isso neste momento, mas o processo de perda de massa é chamado evaporação do buraco negro. Ela é tanto mais intensa, quanto menor a massa, pois a temperatura do buraco negro é inversamente proporcional à massa. Em buracos negros microscópicos a evaporação é tão rápida que chega a ser explosiva. Já quando a massa é estelar, a radiação é lenta, praticamente imperceptível, demandando um tempo incomparavelmente maior que a idade do universo! Por isso, geralmente a evaporação nem é mencionada.



Figura 3: A Terra, um pálido ponto azul perdido no espaço (no centro do círculo amarelo). Esta imagem nos faz sentir ridículos quando levamos a sério as fronteiras que nos separam. Fonte: photojournal.jpl.nasa.gov/jpegMod/PIA23645_modest.jpg.

mesmo sob as condições de gravidade com intensidades mais extremas. A imagem não mostrou propriamente o buraco negro que, por sua própria natureza, é invisível. Se na natureza os buracos negros existissem isolados, em meio ao nada, seria praticamente impossível flagrá-los. Felizmente, buracos negros reais, via de regra encontram-se num ambiente com matéria e energia visíveis. No caso da imagem de M87* (o asterisco denota o buraco negro supermassivo da galáxia M87), indícios de uma concha envolvendo a *esfera de fótons* (ver adiante) parece constituir a evidência observacional mais contígua ao buraco negro.

Seria natural que o primeiro buraco negro supermassivo da lista de observação do projeto *EHT* fosse *Sagittarius A**, pois encontra-se na região central da nossa própria Galáxia, a 26 mil a.l. Visto daqui da Terra, ele se encontra no céu na constelação do Sagitário, ao norte da ponta da cauda do Escorpião. Em São Paulo, ele passa perto do zênite nas primeiras horas da noite em meados de agosto. Nessa região do céu há um complexo de fontes de ondas de rádio chamado *Sagittarius A*. *Sagittarius A** é uma rádio-fonte intensa e compacta desse complexo, correspondente ao buraco negro supermassivo da nossa Galáxia. O tamanho angular de seu horizonte de eventos visto da Terra é de 0,00002”. Embora muitíssimo mais próximo de nós do que M87, o tamanho angular de *Sagittarius A** é menor, mas

nem tanto, de modo que sob esse ponto de vista são comparáveis. A dificuldade maior para a observação de *Sagittarius A** é, ironicamente, o fato de que moramos no interior da Galáxia. Estamos junto a um dos braços espirais, assim toda a linha de visada para *Sagittarius A** atravessa o plano do disco galáctico onde a concentração de poeira interestelar obscurece a visão. Na luz visível, *Sagittarius A** permanece oculta atrás da poeira interestelar, problema que pode ser contornado, em parte, pela observação em ondas de rádio milimétricas, para as quais as nuvens de poeira são mais transparentes. Mas *Sagittarius A** também é um buraco negro quiescente, portanto a atividade que gera radiação e viabiliza a observação, não só é sempre menos intensa, como também intermitente, podendo deixar esse buraco negro inativo por prolongados períodos de tempo.

M87* era o segundo candidato da lista, que acabou ganhando preferência principalmente por ser, como já vimos, uma galáxia ativa.

1.2 Por que não um buraco negro estelar?

Buracos negros supermassivos têm massas entre milhões e bilhões M_{\odot} . Já buracos negros estelares têm algumas M_{\odot} . Assim, embora possam ser encontrados bem mais perto de nós, são muito menores, com horizonte de eventos tipicamente de algumas dezenas de quilômetros. Se o Sol fosse um buraco negro, ele teria um raio de 3 km. Portanto os buracos negros estelares são pequenos demais para a obtenção de uma imagem direta, mesmo com os maiores telescópios atuais. Imagens obtidas em comprimentos de onda mais favoráveis só nos mostram apêndices com alguma associação física, mas eles encontram-se relativamente afastados do horizonte de eventos. Uma das imagens mais recentes obtidas com o satélite *Chandra*⁶ da NASA mostra um par de lobos emitindo raios X. Esses lobos são diretamente ligados ao buraco negro de $8 M_{\odot}$ do sistema binário⁷ MAXI J1820+070, situado na constelação do Ofiúco a 10 mil a.l. Após atrair matéria da estrela companheira de $0,5 M_{\odot}$, o buraco negro

⁶Homenagem ao astrofísico Subrahmanyan Chandrasekhar, de quem falei mais adiante.

⁷Num sistema binário de estrelas, duas estrelas orbitam ao redor do centro de massa comum. Quando uma dessas estrelas é um buraco negro estelar, a outra estrela geralmente de massa muito menor, orbita ao redor do buraco negro e ainda transfere para ele sua própria matéria através de um disco de acreção.

ejetou em datas diferentes jatos a 80% da velocidade da luz que formaram os lobos de raios X, que também foram observados em ondas de rádio. Mas a imagem em raios X mostra apenas os dois lobos.

Outro buraco negro estelar que também tem imagem com dois lobos em raios X observado pelo satélite *Chandra* é SS 433. Há também imagem dos lobos obtidas com rádio-interferômetros. A radiação X se origina de um plasma aquecido a 50 milhões K . Os lobos de alta velocidade são ejetados pelo sistema binário com buraco negro de $16 M_{\odot}$ e companheira de $2 M_{\odot}$. O sistema encontra-se na constelação da *Águia* a 18 mil a.l.

Recentemente se descobriu que há buracos negros estelares também em aglomerados globulares de estrelas. Tais aglomerados são conjuntos populosos com centenas de milhares a milhões de estrelas, que assumem forma esférica. Nossa Galáxia tem cerca de 150 aglomerados globulares distribuídos mais ou menos homoganeamente por todo o *halo*⁸ galáctico. A descoberta foi reivindicada em 2007 no aglomerado NGC 6397 da nossa Galáxia. Parece que, com o tempo, esses buracos negros se fundem e tendem a se sedimentar na região central do aglomerado dando lugar, talvez, a buracos negros de massa intermediária entre um buraco negro estelar e um buraco negro supermassivo.

2 Rejeição de Einstein aos buracos negros

Começo aqui a elucidar o conceito de buraco negro. Trata-se de uma expressão amplamente popularizada, porém, divulgada e entendida geralmente de forma bem superficial. Particularmente se o objetivo é didático, uma elucidação minimamente significativa só é possível no contexto da Física e da Astronomia, mas esse contexto de objetividades precisa ganhar um enquadramento humano de subjetividades. Por isso mesmo, não deixarei de apresentar também o contexto histórico em que essas ideias surgiram, foram elaboradas, depois colocadas à prova, criti-

⁸As *galáxias espirais* (como a Via Láctea) geralmente têm um *bojo* central mais denso de estrelas, circundado por um *disco* plano com os braços espirais, onde estrelas orbitam ao redor do núcleo galáctico. No disco da maioria das galáxias espirais (inclusive na Via Láctea) costuma haver ainda uma estrutura em forma de *barra* que passa pelo centro. Todo esse conjunto ainda é envolto por um tênue *halo* esférico.

cadadas ou tidas como comprovadas. O contexto histórico revela como nós, humanos, construímos o conhecimento. Com a história aprendemos, por imitação, o pensar e o agir científico e o entendimento adequado dos conceitos científicos. Minha expectativa é que a presente elucidação torne a primeira imagem do buraco negro verdadeiramente significativa para o leitor.

2.1 Teoria da relatividade geral

A relatividade geral, publicada por Einstein em novembro de 1915, consistiu numa reformulação da teoria universal da gravitação de Newton, de 1687. Segundo Newton, cada corpo exercia uma força de atração sobre outro corpo segundo a lei que todos aprendemos de cor: matéria atrai matéria... Essa atração - gravidade - era exercida instantaneamente, sem nenhum retardo temporal. Também era exercida a distância, sem nenhum contato físico direto. Newton jamais explicou no quê consistia essa força. Entretanto, quando a usava nas equações, estas descreviam com precisão os fenômenos observados, tais como os movimentos planetários, as marés etc.

Einstein, partiu de pressupostos diferentes. Para começar, enquanto o tempo e o espaço de Newton eram independentes e cada um deles era absoluto (isto é, suas medidas independiam do observador), para Einstein a medição do tempo e do espaço dependia do estado de movimento do observador (daí se falar em contração do espaço e dilatação do tempo). Ele criou uma nova entidade, uma estrutura contínua permeando todo o universo denominada *espaço-tempo*, entrelaçando tempo e espaço. O espaço-tempo tinha quatro dimensões, pois associava as três dimensões do espaço à dimensão única do tempo. O espaço-tempo não era relativo, mas absoluto. Na relatividade geral, Einstein ainda facultou que o espaço-tempo pudesse ser deformado, ou encurvado, à semelhança da rede de uma cama elástica sob o peso de um ginasta. Explicando a relatividade geral de forma gráfica, o físico teórico norte-americano John A. Wheeler (1911-2008) dizia que a matéria ditava como o espaço-tempo devia se curvar, enquanto o espaço-tempo determinava como a matéria devia se movimentar. Podemos visualizar isso se considerarmos as trajetórias de uma bolinha de gude atirada ao redor de uma bola de boliche que tenha deformado a rede de uma cama elástica. Esta atuação da gravidade

segundo a relatividade geral é completamente diferente daquela segundo a gravitação universal de Newton.

A grande vantagem e superioridade da relatividade geral é que ela explica todos os movimentos, em todos os campos gravitacionais. A teoria de Newton só se aplica aos movimentos com baixas velocidades e em campos gravitacionais estáticos e fracos. Altas velocidades são aquelas que se aproximam da velocidade da luz, cerca de 300 mil km/s. Campos gravitacionais intensos são, por exemplo, aqueles encontrados na superfície de estrelas extremamente densas como as chamadas *estrelas de nêutrons*, com 100 milhões de toneladas por centímetro cúbico (a densidade média do Sol é apenas 1,4 g/cc). A teoria de Newton só se aplica a corpos que têm massa, enquanto a relatividade geral se aplica também à luz, constituída de fótons que são desprovidos de massa.

2.2 A solução de Schwarzschild

Quando publicou a relatividade geral, Einstein apresentou o resultado de dez anos de estudos consubstanciado nas chamadas equações de campo para as quais, sendo altamente complexas, ele apresentou apenas soluções aproximadas. Mas o talentoso astrônomo alemão tanto em problemas teóricos, quanto práticos, Karl Schwarzschild (1873-1916), estava a par da nova teoria de Einstein e foi um dos primeiros a reconhecer sua importância. Ele já tinha sido diretor de dois observatórios. Sendo também um patriota, ao eclodir a I Guerra Mundial se alistou no exército alemão. Depois de ter servido nas frentes belga e francesa, quando estava na frente russa, apesar das condições adversas, foi o primeiro a procurar uma solução exata para as equações de campo. Para isso concebeu a situação simplificada de uma estrela sem rotação, esféricamente simétrica, com massa não muito grande, nem muito concentrada no centro. Longe da estrela, sua solução para a geometria do espaço-tempo equivalia ao campo gravitacional predito pela teoria de Newton. Mais perto da estrela, onde o campo gravitacional era mais intenso, surgiram diferenças que, todavia, não chegavam a ser chocantes.⁹ Schwarzschild comunicou sua solução, hoje conhecida como solução de Schwarzschild, a Einstein que ficou muito

⁹Uma dessas diferenças é um avanço adicional do perélio do planeta Mercúrio, inexplicável pela teoria de Newton, mas explicada pela teoria de Einstein.

admirado, pois ele não acreditava que alguém pudesse obter uma solução exata em tão pouco tempo.

Mas, semanas depois, ainda antes do Natal de 1915, Schwarzschild retornou a Einstein alertando-o de que a solução exata implicava um horizonte de eventos e, no seu centro, residia uma *singularidade* esdrúxula e inquietante em que a massa poderia se concentrar infinitamente tornando a gravidade e o encurvamento do espaço-tempo infinitos. Nascia o conceito moderno de buraco negro.

O horizonte de eventos era esférico e tinha um raio, hoje chamado *raio de Schwarzschild*, $R_S = 2GM/c^2$. Notar que esse raio é proporcional à massa M da estrela, já que G e c são constantes físicas (respectivamente a constante gravitacional e a velocidade da luz no vácuo). Na superfície do horizonte de eventos a velocidade de escape era igual à velocidade da luz. Fora dela, a velocidade de escape era menor que a velocidade da luz, mas dentro dela ela era maior. Como nada se move mais velozmente que a luz, do interior do horizonte de eventos nada poderia escapar, nem mesmo a luz. Tanto a luz como qualquer coisa poderia ingressar através do horizonte de eventos, mas, jamais sair. Esse horizonte seria absolutamente escuro. Nós, daqui de fora, nada poderíamos ver, nem saber do que ocorresse além do horizonte de eventos, o que justifica o nome. Nesse sentido o horizonte de eventos desconectava causalmente o seu interior do resto do universo. Por outro lado, tudo o que ingressasse através do horizonte de eventos seria inelutavelmente sequestrado pela singularidade, o poço sem fundo de gravidade infinita.

Embora toda a matéria esteja concentrada no centro, o raio do que hoje denominamos buraco negro é definido como sendo R_S , o raio de Schwarzschild. Qualquer quantidade de massa, mesmo modesta, uma vez comprimida numa esfera igual ou menor que o horizonte de eventos, formaria no centro da esfera uma singularidade e se tornaria um buraco negro. O Sol, por exemplo, poderia se tornar um buraco negro: mantida a sua massa, o seu raio atual de 700 mil km deveria ser reduzido a apenas 3 km. Da mesma forma a Terra se tornaria buraco negro com 9 mm e a Lua, com 0,1 mm.

Em suma, a singularidade central envolta numa esfera chamada horizonte de eventos constitui a

estrutura geométrica do espaço-tempo para a situação simplificada de um buraco negro sem rotação.

Até mesmo Einstein, de mente aberta, considerou a solução envolvendo uma singularidade, um resultado meramente matemático, sem correspondência com nenhuma entidade do mundo real. Afinal, densidade infinita é algo imensurável, portanto fisicamente inacessível e, portanto, sem direito a existir. Mas, de qualquer forma, usando premissas da relatividade geral, Schwarzschild já tinha colocado uma situação hipotética que se tornaria um dos testes mais severos da relatividade geral: poderia a singularidade se materializar? Os que não conseguiam se livrar da dúvida passaram a indagar se haveria na natureza algum mecanismo físico capaz de produzir uma singularidade. Como, na época, nenhum mecanismo era conhecido, por um bom tempo essa questão permaneceu no limbo.

Na frente russa Schwarzschild já tinha contraído uma doença autoimune rara e grave. Mesmo assim, em fevereiro de 1916 apresentou uma segunda solução para as equações de campo de Einstein, supondo desta vez uma estrela esférica sem rotação, com densidade de matéria constante. Por ser esta uma distribuição de matéria irrealística, essa solução não recebeu atenção. Em março de 1916 Schwarzschild voltou da Guerra para se tratar em casa. Mas acabou falecendo em maio desse mesmo ano.

Mais de duas décadas depois, em 1939, Einstein ainda se deu ao trabalho de publicar seus estudos tentando demonstrar que os buracos negros com a singularidade de Schwarzschild não poderiam existir. Para isso usou sua própria relatividade geral, o que é considerado irônico porque essa mesma teoria é usada atualmente para argumentar que os buracos negros não apenas são possíveis, senão também necessários para explicar vários objetos astronômicos. Einstein argumentou que as leis físicas deveriam interditar a existência dos buracos negros, possivelmente pela ameaça que eles lhe pareciam representar a princípios bem estabelecidos, por exemplo, como ficaria a conservação da matéria e da energia se tudo que cai no horizonte de eventos é perdido definitivamente? A argumentação era engenhosa, porém falha na medida em que Einstein invariavelmente pressupunha a atuação de algum agente

físico que impedia o *colapso gravitacional*,¹⁰ ao invés de admitir uma contração gravitacional totalmente desimpedida, que sobrepujasse quaisquer outras forças, causando uma verdadeira implosão catastrófica (colapso gravitacional) capaz de dar origem a um buraco negro. Uma verdadeira “conversão mental” ainda se fazia necessária para que a formação de buracos negros não fosse interdita pelas leis físicas. Todavia, ainda hoje não é consensual a aceitação dos buracos negros como entidades do mundo real [1].

3 Buracos negros estelares

Já desde 1935 os astrofísicos que estudavam a estrutura e evolução das estrelas vislumbravam a possibilidade de um real colapso gravitacional depois que uma estrela suficientemente massiva (estimativamente com mais de $8 M_{\odot}$) exaurisse seu *combustível nuclear*.¹¹ Não sendo uma estrela suficientemente massiva, após o esgotamento do combustível nuclear seu interior se esfriaria, mas a contração gravitacional seria freada para dar lugar a uma densa *anã branca* ou a uma *estrela de nêutrons* ainda mais densa. No caso de anãs brancas a contração seria freada pela pressão de um gás de elétrons fortemente compactado (efeito bizarro previsto pela mecânica quântica) e, no caso de estrelas de nêutrons, pela pressão de um gás de nêutrons fortemente compactado. Mas numa estrela com maior massa, não existindo na natureza nenhum outro tipo de matéria capaz de se contrapor à contração gravitacional, toda matéria fluiria através do horizonte de eventos. Então

¹⁰Estrelas em condições de equilíbrio, que não estejam nem colapsando, nem explodindo, encontram-se em equilíbrio hidrostático. A matéria de que são formadas se sedimenta pela ação da gravidade, mas o colapso gravitacional é impedido porque uma força igual, atuando no sentido oposto, cancela localmente a gravidade estabelecendo o equilíbrio hidrostático. A força que se opõe à gravidade se origina da pressão da própria matéria estelar. De forma análoga se estabelece o equilíbrio hidrostático da atmosfera da Terra. Mas, em situações em que a natureza se torna incapaz de oferecer qualquer força que se oponha à gravidade, o colapso gravitacional é inexorável.

¹¹Designação popular dada aos elementos químicos que geram energia nas estrelas através de reações de fusão nuclear. A energia que o Sol irradia provém de reações de fusão em que 4 núcleos de hidrogênio se fundem em um núcleo de hélio. Nesse caso o hidrogênio é o combustível, mas esse nome não é adequado na medida em que é tradicionalmente usado para reações químicas, mas nas estrelas as reações são nucleares.

a gravidade imperaria absoluta sem que o colapso gravitacional pudesse ser sustado, tornando compulsório o surgimento da singularidade. Pela importância que tiveram nestes estudos, não posso deixar de mencionar aqui o astrofísico indiano Subrahmanyan Chandrasekhar (1910-1995), o físico norte-americano Robert Oppenheimer (1904-1967) e o físico russo George M. Volkoff (1914-2000) pelas contribuições que deram início à lenta conversão mental que ainda teria que esperar a chegada da década de 1960.

Nessa década os físicos teóricos ingleses, Stephen Hawking (1942-2018) e Roger Penrose (1931-) demonstraram matematicamente (diria, axiomáticamente) que as singularidades, longe de serem raras, seriam objetos cósmicos ordinários, resultantes da evolução natural de estrelas massivas depois de esgotarem seu combustível nuclear. Mas singularidade ainda hoje é um conceito controverso. Não poucos afirmam que trata-se de um ente de razão sem contrapartida no mundo real. Nesse sentido, o colapso gravitacional parece ser real mas, talvez não o desfecho final numa singularidade. Não entrarei nesta discussão.

O citado Wheeler, quando ouviu falar de colapso de estrelas em 1939, achou essa ideia ridícula. No entanto, quando ele próprio aplicou a relatividade geral a estrelas “terminais”,¹² chegou também à conclusão de que o colapso gravitacional de estrelas com massa superior a um certo valor crítico até a singularidade seria inevitável. Por volta de 1967, para facilitar as palestras que dava, ele cunhou a expressão *buraco negro* que, não só “pegou” entre os cientistas, mas também se popularizou. Com efeito, o horizonte de eventos é realmente negro, pois dele nada sai, nem mesmo a luz; e trata-se, de fato, de um buraco no sentido de que ali tudo cai num abismo infinito, mas nada sai.

Buracos negros estelares, isto é, com massa típica de uma estrela, devem se formar quando estrelas solitárias com mais de cerca de $8 M_{\odot}$, após o término das reações de fusão nuclear, têm seu interior resfriado e, assim, perde autossustentação e colapsa indefinidamente, até que se concentre num ponto com densidade infinita. Surge tecnicamente uma *singularidade*. Buracos negros de 5 a algumas dezenas de M_{\odot} ¹³ devem se for-

¹²Expressão utilizada para designar estrelas que esgotam seu combustível nuclear, pois tornam-se incapazes de irradiar luz própria.

¹³Observações recentes de emissão de ondas gravitacio-

mar na etapa terminal de estrelas solitárias, em que o colapso é acompanhado de uma violentíssima explosão estelar conhecida como *supernova*. Mais recentemente o colapso tem sido observado também por meio de satélites que detectam as chamadas *erupções de raios gama*.

Mas, *buracos negros estelares* também podem se formar em sistemas binários com duas estrelas bem próximas orbitando o centro de gravidade comum, em que uma gigante ou super-gigante “estufada” (pouco densa) transfere parte de sua massa para a companheira mais densa, por exemplo, uma anã branca – estrela com massa aproximadamente igual à do Sol, mas compactada ao tamanho da Terra, portanto com densidade média próxima de 1 ton/cc. Ao adicionar massa nessa companheira além do valor crítico de 1,4 vezes a massa do Sol (*limite de Chandrasekhar*), essa estrela colapsa gravitacionalmente, isto é, desaba sobre si mesma, ocasionando também uma súbita explosão de supernova.

Mas o produto final do colapso pode também ser uma estrela de nêutrons, na qual a alta compressão “funde” prótons e elétrons em nêutrons, os quais ainda são capazes de frear o colapso e sustentar uma estrela, desde que não exceda cerca de $2 M_{\odot}$ contidas numa esfera com raio de poucas dezenas de quilômetros. A densidade média atinge o espantoso valor de cerca de 500 milhões ton/cc. Se, porém, o limite de massa acima for ultrapassado, o produto final será um buraco negro com massa superior a cerca de $5 M_{\odot}$.

3.1 Descoberta

Na década de 1960, admitindo que buracos negros estelares deveriam existir, físicos e astrônomos começaram a se perguntar como poderiam procurar evidências deles no céu. Várias ideias surgiram. Uma ideia promissora foi proposta em 1964 pelo físico soviético Yakov Zeldovich (1914-1987) e, independentemente, também pelo astrofísico da Universidade Cornell, Edwin Salpeter (1924-2008): observar sistemas estelares binários em que uma das estrelas fosse um buraco negro e a outra, uma estrela normal, por exemplo, uma gigante ou super-gigante. O buraco negro obviamente não seria observado, mas a companheira seria visível e sua matéria estaria sendo transfe-

nais, outro fenômeno previsto pela relatividade geral, revelaram a existência de buracos negros estelares com massa de até 25-30 M_{\odot} .

rida para o buraco negro. Ao redor do buraco negro e fora do seu horizonte de eventos deveria haver um disco de acreção, um rodamoinho plano de gás e poeira, através do qual matéria da estrela companheira seria transferida para o buraco negro. No disco de acreção, a matéria espiralaria com diferentes velocidades rotacionais próximas à da luz que, com o atrito, atingiria temperaturas tão elevadas que emitiria raios X. Assim o buraco negro invisível seria denunciado pelos raios X emitidos pelo disco de acreção e pela luz visível da estrela companheira orbitando com velocidade anormalmente elevada, mas compatível com uma grande massa de um buraco negro. A acreção de matéria era o ingrediente importante para a detecção do buraco negro.

Entretanto, um sistema binário com uma estrela de nêutrons no lugar de um buraco negro, poderia também ter um disco de acreção emitindo raios X e uma estrela visível. Mas essa ambiguidade podia ser eliminada determinando-se a massa do candidato a buraco negro, que deveria ser maior que $2 M_{\odot}$. Em princípio essa massa pode ser determinada ou, ao menos, estimada analisando-se os efeitos gravitacionais do objeto compacto na estrela visível.

Em 1961, premidos pela corrida nuclear com os soviéticos, os americanos decidiram que deveriam ser capazes de fazer no espaço medições de raios X, raios gama e partículas de alta energia produzidos por explosões nucleares e, assim, monitorar os testes das futuras bombas soviéticas. Nesse contexto a Força Aérea dos Estados Unidos implantou um programa intensivo, no qual várias medições foram ensaiadas com sucesso a bordo de foguetes e satélites. Daí resultou a construção de um sensível detector de raios X para uso astronômico, que voou em 1962 a bordo de um foguete para medir experimentalmente raios X da Lua. Surpreendentemente os raios X detectados eram muito mais intensos do que os esperados e provinham não da Lua, mas da direção da constelação do Escorpião. Dois meses depois, os autores do experimento anunciaram a detecção da primeira fonte celeste de raios X,¹⁴ 5 mil vezes mais intensa do que os astrofísicos tinham predito. Posteriormente essa fonte foi denominada *Sco X-1* (*Sco* é abreviação de Escorpião em latim e X-1 denota a fonte mais brilhante de raios X localizada nessa constelação). Mas, para confirmar se *Sco X-1* e

¹⁴Claro, raios X solares já tinham sido detectados antes.

outras fontes de raios X que viriam a ser descobertas, eram sistemas binários com buracos negros ou estrelas de nêutrons, os detectores ainda tinham que ser aprimorados, principalmente para fornecer a posição das fontes no céu com maior precisão. Vários experimentos ainda foram feitos em voos de foguetes que culminaram no primeiro satélite para a astronomia de raios X denominado *Uhuru* (“Liberdade” em suaíli), lançado no Quênia no final de 1970 e que gerou um catálogo com 339 fontes. Num voo de foguete de 1964, a fonte *Cyg X-1* foi descoberta na constelação do *Cisne*, sendo uma das mais intensas no céu. Ela faz parte do sistema binário que se encontra na nossa Galáxia, a cerca de 6 mil a.l. Um dos objetos mais estudados de sua classe, observado em raios X e na luz visível, estima-se que o objeto compacto e invisível tenha uma massa de $15 M_{\odot}$, gire 800 vezes por segundo e que o raio do horizonte de eventos não ultrapasse 300 km. Por isso, desde a década de 1970 o objeto compacto tem sido amplamente aceito como um buraco negro estelar. A estrela companheira é uma super-gigante azul de cerca de $9 M_{\odot}$, denominada HDE 226868 que orbita o buraco negro com período de 5,6 dias, a uma distância de cerca de 0,2 u.a..¹⁵

Há outros buracos negros estelares pertencentes a sistemas binários que emitem raios X, mas ainda não passam de poucas dezenas. Na maioria são da nossa Galáxia, mas há alguns extragalácticos. Os buracos negros estelares, na sua maioria, devem ser solitários, mas estes são de difícil detecção. Assim, os pertencentes a sistemas binários, embora constituam minoria, podem ser detectados mais facilmente. Quanto a *Sco X-1* concluiu-se que se trata de um sistema binário cujo objeto compacto não é um buraco negro, mas uma estrela de nêutrons com cerca de $1,4 M_{\odot}$ e a estrela companheira tem apenas $0,42 M_{\odot}$.

Se discos de acreção de buracos negros podem ser observados através de raios X, portanto, através de ondas eletromagnéticas, a fusão de buracos negros passou a ser observada recentemente através de *ondas gravitacionais*¹⁶ captadas por *interferômetros de ondas gravitacionais*. Esta é uma técnica observacional baseada na relatividade

geral, que já vinha sendo ensaiada há décadas, mas só mostrou resultados concretos recentemente. Não caberia me estender aqui sobre essa técnica, mas ela é promissora para ajudar a esclarecer como os buracos negros podem colidir, fundir e crescer, talvez formando até mesmo os buracos negros supermassivos, processo esse que pode desempenhar um papel vital na formação e evolução do universo.

3.2 Estrela congelada

Na década de 1960 os buracos negros estelares eram chamados *estrelas congeladas* na União Soviética. Isso não denotava baixas temperaturas, mas a paralisação dos movimentos. Essa denominação não “pegou”, mas tem um valor didático que pode ser explorado. Caso o buraco negro não tenha rotação, a singularidade encontra-se envolta numa superfície perfeitamente esférica chamada horizonte de eventos. Qualquer objeto no interior do horizonte está fadado a colapsar na singularidade e não poderá jamais escapar para fora do horizonte. Mas, observando esse horizonte do lado de fora e de longe, como nós fazemos, pelo fato de que lá a gravidade é muito intensa, o tempo para um corpo que ali cai sofre dilatação em relação ao nosso tempo, ou seja, vemos os relógios lá marcharem mais devagar. O fator de dilatação cresce quanto mais se aproxima do horizonte, onde a dilatação torna-se infinita. Do nosso ponto de vista, a radiação lá passa a vibrar mais lentamente (a frequência diminui), os movimentos ficam quase parados e, por essa razão, os físicos soviéticos chamavam os buracos negros de *estrelas congeladas*. O congelamento total ocorreria no *horizonte de eventos*. Mas, na prática não chegaríamos a ver essa situação porque a radiação, à medida que vibra cada vez mais devagar, vai ficando sem energia e, então, as *estrelas congeladas* apagariam. Talvez por isso a expressão “não pegou”.

4 Buracos negros supermassivos

Se os buracos negros estelares resultam do colapso gravitacional de estrelas e, por isso mesmo, têm tipicamente algumas M_{\odot} , já os buracos negros supermassivos têm milhões até dezenas de bilhões de M_{\odot} . Eles se encontram no centro de galáxias.

¹⁵ u.a.: unidade astronômica = distância média da Terra ao Sol = 150 milhões km

¹⁶ Tais ondas, causadas por fenômenos gravitacionais violentos, como a colisão entre dois buracos negros, deformam a estrutura flexível e elástica do espaço-tempo e se propagam por todo o universo.

Vimos que R_S é diretamente proporcional à massa do buraco negro e que para $1 M_\odot$ esse raio mede 3 km. Dividindo $1 M_\odot$ pelo volume de uma esfera com raio de 3 km, obtemos a incrível densidade de 10 bilhões ton/cc para um buraco negro estelar. Para um buraco negro supermassivo de 1 milhão ou 10 bilhões de M_\odot , R_S é, respectivamente, 3 milhões de km (pouco mais que 2 diâmetros solares) ou 30 bilhões de km (5 vezes a distância de Plutão ao Sol). Notar que, astronomicamente, não são distâncias grandes. A densidade para os buracos negros supermassivos é surpreendentemente baixa, respectivamente, 17,5 kg/cc e 0,0002 g/cc (para comparação, a densidade da água é 1 g/cc), o que mostra que alta densidade da matéria não é característica fundamental dos buracos negros.

4.1 Galáxias

Mas se os buracos negros supermassivos encontram-se, em geral, no interior de galáxias, o que são galáxias? Galáxias são vastos conjuntos de milhões a trilhões de estrelas que se mantêm unidas pela gravidade. O espaço que fica entre as estrelas, chamado meio interestelar, não é totalmente vazio, mas contém nuvens com gases e diminutos grãos de poeira, campo magnético, além de ser atravessado por intenso fluxo de raios cósmicos, partículas subatômicas que se movem com velocidades próximas à da luz.

Atualmente se acredita que praticamente todas as galáxias abrigam um buraco negro supermassivo em seu interior. Mas essa ideia só se impôs nas últimas décadas do final do século passado, já de posse de evidências sólidas de que a nossa própria Galáxia, a Via Láctea, abrigava *Sagittarius A** com 4,3 milhões M_\odot .

Observando fundo o universo, estimamos que nele podem ser observados uns 2 trilhões de galáxias, a distâncias que vão até cerca de 46 bilhões a.l. O leitor poderá estranhar tal distância, considerando que a idade do universo é estimada em 13,8 bilhões de anos e a luz não pode ter viajado mais que esse tempo, mas é preciso levar em conta que o universo está em expansão, portanto a distância de galáxias distantes deve incluir o afastamento adicional devido à expansão ocorrida desde que essas galáxias passaram a existir.

Mais de 2/3 de todas as galáxias são espirais, como a Via Láctea. Sua matéria luminosa (estrelas, gás e poeira) se distribui em braços espirais

como num rodaminho. Mas há também *galáxias elípticas* com formato de esfera com variados graus de achatamento, ou de alongamento, como de um charuto, além de *galáxias lenticulares* (com forma de lente, entre espiral e elíptica) ou com morfologia irregular (exemplo, as Nuvens de Magalhães). As maiores galáxias são elípticas, chamadas *galáxias elípticas gigantes* ou *super-gigantes*. Podem ter até um trilhão de estrelas e medir 2 milhões a.l. Mas elas também podem ser pequenas. Nesse caso são chamadas *galáxias elípticas anãs*. As galáxias elípticas abrigam muitas estrelas velhas, pouco gás e poeira. Consequentemente, nelas são poucas as estrelas jovens.

Devemos entender as galáxias como unidades básicas constituintes do universo. Elas são como os tijolos da estrutura do universo.

4.2 Aglomerados e superaglomerados de galáxias

Embora galáxias sejam, em si, estruturas gravitacionalmente ligadas, geralmente elas fazem parte de associações maiores denominadas grupos, aglomerados e superaglomerados. Através da atração da gravidade atuando em escalas cada vez maiores, as galáxias formam estruturas hierarquicamente maiores. Os superaglomerados formam filamentos e paredes. Estas últimas se encontram separadas umas das outras deixando imensos vazios, dando lugar à estrutura de espuma. A partir dos superaglomerados a ligação gravitacional se enfraquece e a expansão do universo se torna aparente.

Nossa Via Láctea, com diâmetro visível de 150 mil a.l., na companhia de algumas dezenas de outras galáxias vizinhas (Nuvens de Magalhães e Andrômeda, por exemplo), forma o *Grupo Local* com cerca de 10 milhões a.l. Mas o Grupo Local, na companhia do vizinho *Aglomerado da Virgem* (assim chamado porque, daqui da Terra é visto na constelação da *Virgem*), faz parte do *Superaglomerado da Virgem* com cerca de 100 milhões a.l.

Estudos mais recentes numa amostra de 8 mil galáxias, analisando o movimento de cada uma delas com o objetivo adicional de determinar a distribuição espacial da *matéria escura* (ver adiante), mostraram o fluxo coletivo dessas galáxias e que o Superaglomerado da Virgem não passa, na verdade, de uma estrutura periférica pertencendo

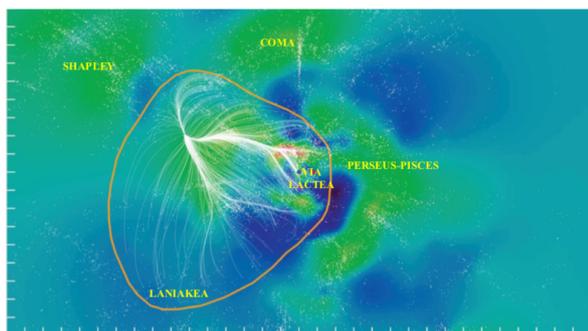


Figura 4: Laniakea, nosso superaglomerado local e seus superaglomerados vizinhos. Este mapa cobre uma extensão de cerca de meio bilhão a.l. A bolinha azul indica a posição da Via Láctea num “subúrbio” de Laniakea. Verde indica alta concentração de galáxias e azul, baixa concentração. Em branco, o fluxo de galáxias para a região de alta concentração. Figura legendada pelo autor. Fonte: www.nsf.gov/news/mmg/mmg_disp.jsp?med_id=78240.

cente a um superaglomerado ainda maior, de 100 mil galáxias e com mais de meio bilhão a.l. que foi chamado *Laniakea*, “céus incomensuráveis” em havaiano (Figura 4). A matéria escura promoveu uma revisão teórica nos modelos de estruturação do universo e uma revisão observacional no mapeamento dos aglomerados e superaglomerados de galáxias. Em seu constante movimento coletivo, como numa dança, as galáxias têm oportunidade de interagir gravitacionalmente com a matéria escura, denunciando assim como esta, que é invisível, se distribui no espaço. Grandes aproximações entre galáxias, com fortes interações gravitacionais entre elas (efeito de maré) têm sido observadas e revelam que não são tão infrequentes. Quando ocorrem, causam deformação nas galáxias, induzem formação explosiva de novas estrelas e até mesmo rupturas com intercâmbio de matéria ou fusão.

4.3 Matéria escura e formação de galáxias

A matéria escura foi mencionada acima e segue aqui um breve esclarecimento. Nas últimas décadas do século passado se deu conta de que a matéria ordinária,¹⁷ esta que forma o nosso corpo, assim como os planetas, estrelas etc., contribui com apenas 5% na composição do universo, enquanto 24% consistem em matéria escura e 71% em energia escura. As duas últimas componentes escuras são assim chamadas por serem invisíveis. Da matéria escura apenas se tem evidência

¹⁷Designação geral para a matéria feita de átomos, constituída majoritariamente de prótons e nêutrons.

de sua existência analisando-se, por exemplo, o movimento de galáxias em seus aglomerados ou no contexto da expansão do universo, ou o movimento orbital de estrelas em galáxias. Sabemos assim que a matéria escura existe, mas não sabemos qual é a sua natureza.

Mas os cosmólogos já especulam que a matéria escura rapidamente teria formado andaimes cósmicos no universo primordial. Por sua vez a matéria ordinária, atraída pela gravidade onde o ajuntamento da matéria escura era maior, pôde se acumular e formar as primeiras galáxias quando o universo tinha cerca de 400 milhões de anos. Mas ainda não se sabe ao certo como as primeiras galáxias se formaram, se já nasceram como um ajuntamento de um grande número de estrelas, ou crescendo progressivamente pelo ajuntamento de pequenos aglomerados de estrelas.

4.4 Descoberta de buracos negros supermassivos

Diferentemente dos buracos negros estelares, nenhum teórico predisse a existência de buracos negros supermassivos. É que não existe objeto com tamanha massa que possa colapsar gravitacionalmente de uma vez só. Assim, era mesmo de se esperar que a descoberta de buracos negros supermassivos fosse fortuita.

4.5 Saggiarius A*, o buraco negro supermassivo da nossa Galáxia

Assim como a descoberta dos buracos negros estelares esteve ligada ao início da astronomia de raios X, a descoberta dos buracos negros supermassivos esteve ligada ao início da radioastronomia. O engenheiro Karl Jansky (1905-1950) trabalhava na Bell Telephone Laboratories em Holmdel, NJ. Em 1932 ele foi encarregado de estudar um ruído que prejudicava as comunicações telefônicas com a Europa que eram, então, transmitidas por ondas de rádio.

Com uma antena construída especialmente para essa finalidade (Figura 5), Jansky descobriu que uma parte do ruído estático era gerada por descargas elétricas de tempestades. Mas, mesmo quando não havia tempestades, restava um ruído residual que em 1935 Jansky reconheceu vir da região central da Via Láctea. Assim, de forma inopinada, foi feita a primeira observação de uma fonte cósmica em ondas de rádio. A frequência

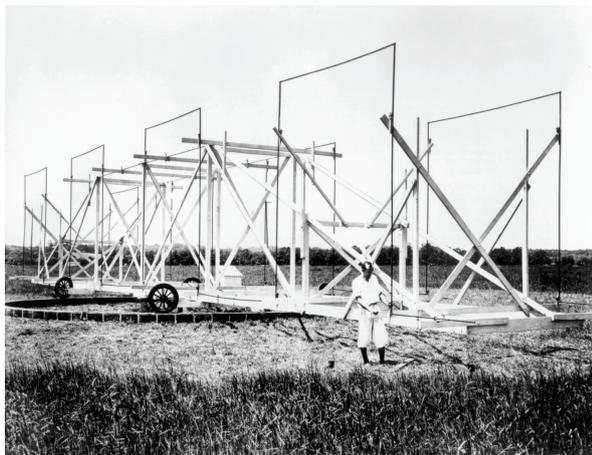


Figura 5: Com o “Carrossel de Jansky” – apelido que recebeu sua antena, o “pai da radioastronomia” presente na foto descobriu em 1933 que ondas de rádio em 20,5 MHz vinham do centro da nossa Galáxia. Crédito: NRAO/AUI/NSF. Fonte: public.nrao.edu/gallery/karl-jansky-and-his-merrygoround/.

era de 20,5 MHz. Apesar da publicidade dada pela Bell, mesmo astrônomos foram pouquíssimos que deram atenção ao fato. Incrivelmente a maioria deles permaneceu calada no seu conservadorismo, pois as teorias da época não previam mecanismos de rádio-emissão na Via Láctea. O próprio Jansky chegou a projetar um radiotelescópio parabólico de 30 m para melhor estudar esses sinais cósmicos, mas os superiores da Bell, mal impressionados com a esquivia dos astrônomos, o desencorajaram e ele abandonou o projeto. Hoje vemos em retrospecto que o rádio-sinal cósmico inaugural vinha exatamente da região da Galáxia que, hoje sabemos, abriga o buraco negro supermassivo *Sagittarius A**!

4.6 *Cyg A*, a primeira rádio-galáxia

Quem acabou se interessando pela descoberta radioastronômica de Jansky foi o radioamador e astrônomo amador Grote Reber (1911-2002) de Wheaton, IL. Usando suas habilidades manuais e seus recursos pessoais, construiu no jardim de sua mãe uma antena de 9 m que operou em 160 MHz (Figura 6). Com ela elaborou em 1939 um rádio-mapa do céu que indicava, além da fonte do centro da nossa Galáxia, a rádio-fonte hoje conhecida como *Cyg A* (A, a primeira letra do alfabeto denota a rádio-fonte mais intensa da constelação do *Cisne*). Mas Reber, descrito como pessoa extremamente retraída, trabalhou sozinho como radio-astrônomo amador na elaboração do rádio-mapa,



Figura 6: O radiotelescópio de 9 m de Grote Reber em 1937. Fonte: NRAO/AUI, www.flickr.com/photos/itu-pictures/16660555401.

embora tivesse recebido convite de universidade.

Para que as descobertas radioastronômicas começassem a fazer sentido e contribuíssem para ampliar o conhecimento do universo, era necessário estabelecer alguma correspondência entre as rádio-fontes e os objetos observados na luz visível. Os astrônomos, em geral, estavam habituados a determinar a posição dos astros com boa precisão, pois dispunham de bons telescópios ópticos (que operavam na luz visível). Desde 1908 o Observatório Monte Wilson ao norte de Los Angeles abrigou o Telescópio de 1,5 m e, a partir de 1917, o de 2,5 m e o Observatório Palomar, bem ao sul de Los Angeles, abrigou o Telescópio de 5,1 m a partir de 1949, ou seja, esse complexo constituía a meca da observação astronômica na luz visível. Mas a posição das rádio-fontes no céu eram determinadas com margem de incerteza muito grande. No jargão astronômico, a caixa de erro das rádio-fontes era muito grande: a rádio-fonte poderia estar em qualquer ponto dentro de um grande quadrado desenhado no mapa do céu. Isso demandava dos radiotelescópios uma melhor capacidade de definir a posição das fontes no céu ou uma caixa de erro menor. Era preciso melhorar a resolução angular dos radiotelescópios.

A resolução angular melhora quando ela diminui, pois com resolução angular menor localizamos os astros com maior precisão no céu, detectamos melhor os detalhes.

O tempo passou e até a II Guerra já tinha terminado. Muitos físicos experimentais que tinham trabalhado com radares no esforço de guerra, tinham ganho experiência que, agora, não poderia ter melhor campo de aplicação do que o desenvolvimento da radioastronomia. Grupos dedicados a esse novo campo de pesquisa surgiram na Inglaterra e Austrália, não nos Estados Unidos. A prioridade era óbvia: melhorar a resolução angular dos radiotelescópios. Mas já em 1949 esse problema estava resolvido. Foi pela invenção de rádio-interferômetros.

A resolução angular de um radiotelescópio é proporcional ao comprimento de onda da radiação observada, dividido pelo diâmetro do coletor da radiação (o paraboloide no caso de um radiotelescópio; o espelho (ou lente) da objetiva no caso de um telescópio óptico). Por que é assim? Uma explicação mais detalhada será dada mais adiante, pois ela é fundamental para entendermos como a imagem do buraco negro foi obtida. Mas já podemos entender que, com um radiotelescópio do mesmo tamanho de um telescópio óptico obtemos uma resolução angular maior (portanto, pior) que a do telescópio óptico porque o comprimento das ondas de rádio é vários milhões de vezes maior que o de ondas da luz visível. Todavia, do ponto de vista prático, geralmente é mais factível e barato aumentar o tamanho de uma antena do que de um espelho.

Podemos, então, melhorar (quer dizer, diminuir) a resolução angular de um radiotelescópio aumentando o diâmetro do paraboloide. Mas, em vez de aumentar o diâmetro, o que pode se tornar proibitivo acima de um “tamanho crítico”, podemos recorrer ao princípio da interferometria. Esse é o “pulo do gato”: em vez de uma antena, por exemplo, com 1 km de diâmetro, podemos usar duas antenas bem menores, digamos com 1 m de diâmetro, distantes 1 km entre si, obviamente conectadas eletronicamente. O conjunto de duas antenas menores operando coordenadamente é chamado interferômetro. Esse interferômetro tem a mesma resolução angular que a antena com 1 km de diâmetro. Não tem a mesma sensibilidade para captar sinais, pois a área coletora da radiação é significativamente menor, e

isso tem um preço a ser pago. No entanto isso pode deixar de ser importante quando o sinal estudado é suficientemente intenso.

Em 1949 o grupo australiano conseguiu reduzir a largura da caixa de erro para $10'$ (10 minutos de arco sendo $1' = 1^\circ/60$). Então os astrônomos observadores na luz visível sentiram-se encorajados a esquadrihar a caixa de erro de α Cyg A mas, mesmo assim, não encontraram nada brilhante digno de nota. Na caixa de erro, de fato, apareceu uma enormidade de pontos, uns mais outros menos luminosos. Teria aparecido também uma galáxia sabidamente distante - e esse era o objeto associado - mas, na época, era difícil que algum astrônomo achasse razoável que os fortes sinais de rádio viessem de tão longe. Portanto era mais seguro apostar que esses sinais viessem de um daqueles inumeráveis pontos de fraco brilho que estivessem bem próximos, na nossa própria Galáxia (aposta equivocada).

Em 1951 um grupo inglês de Cambridge conseguiu reduzir ainda mais a caixa de erro de *Cyg A*, desta vez para $1'$. Na luz visível essa caixa de erro continha cerca de uma centena de pontos brilhantes e ela foi fotografada com o novo Telescópio de 5 m do Palomar. Desta vez a fotografia mostrou na caixa de erro uma galáxia que enganosamente parecia duas galáxias colidindo. Posteriormente se constatou que uma faixa escura (de fato, um disco com poeira visto de perfil), fez a galáxia única parecer dividida em duas e em colisão.

Em 1953, o outro grupo inglês do Observatório Jodrell Bank, da Universidade de Manchester, observou *Cyg A* com seu novo rádio-interferômetro e constatou que a rádio-emissão provinha de dois gigantescos lobos. Sobrepondo esses lobos a uma fotografia da galáxia na luz visível, cada um dos lobos se localizou dos lados opostos da galáxia e o conjunto todo foi classificado como uma rádio-galáxia, pois tratava-se de uma galáxia elíptica gigante a 500 milhões a.l., mas ela emitia intensa radiação em ondas de rádio. Essas ondas provinham de imensas regiões do par de lobos afastados mais de 250 mil a.l. do núcleo da galáxia. Relativamente aos lobos, a galáxia era proporcionalmente diminuta. No entanto seria nela que se inferiria posteriormente a existência de um buraco negro supermassivo.

Até meados do século 20 ainda era difícil explicar o mecanismo gerador das intensas ondas cósmicas de rádio. O que então era concebível,

era o mecanismo térmico em que a fonte deveria ter matéria aquecida a alta temperatura. Mas foi então quando o mecanismo síncrotron começou a ser considerado capaz de produzir tais ondas de rádio. Quando um feixe de elétrons com velocidade próxima à da luz é lançado num campo magnético, por serem cargas elétricas (negativas) os elétrons passam a espiralar em torno das linhas de força do campo magnético. Sendo o espiralamento uma aceleração centrípeta sofrida pelos elétrons, estes passam a emitir radiação eletromagnética em ondas de rádio. Os elétrons emitem essa radiação perdendo energia cinética. O mecanismo síncrotron não é de natureza térmica porque a energia dos elétrons não se origina do aquecimento, nem eles colidem frequentemente entre si.

Um cálculo simples revelou que a energia (cinética dos elétrons e magnética do campo) contida nos lobos era colossal e, considerando a equivalência de Einstein entre massa e energia, $E = Mc^2$, ela equivalia a 10 milhões de sóis. A origem não podia ser química, pois requeria a massa de 100 mil Vias Lácteas; poderia ser nuclear requerendo 1 milhão M_{\odot} , mas isso era improvável; poderia ser 5 milhões M_{\odot} de antimatéria sendo aniquiladas por igual quantidade de matéria ordinária, mas de onde viria tanta antimatéria? Todavia a energia de origem gravitacional, a mesma que forma os buracos negros estelares, originária do colapso gravitacional de cerca de 100 milhões M_{\odot} foi considerada plausível já em 1963. Foi quando a ideia de buracos negros supermassivos em rádio-galáxias, assim como em quasares, como veremos adiante, começou a ser teorizada.

Com novos rádio-interferômetros cada vez maiores, mais sensíveis e com melhor resolução angular, por volta de 1971 já se sabia que a rádio-emissão provinha não só do par de lobos, mas também de um pequeno núcleo da galáxia central, o que sugeriu que esse núcleo poderia ser a fonte de energia de toda emissão da rádio-galáxia, inclusive ejetando jatos de gás a enormes velocidades que formavam os lobos. Essa hipótese foi confirmada pelos novos interferômetros com resolução angular de $1''$. A Figura 7 mostra a rádio-galáxia *Cyg A* observada mais recentemente com o rádio-interferômetro VLA instalado no condado de Socorro, no Novo México, que conta com 27 antenas parabólicas dispostas na configuração da letra Y.

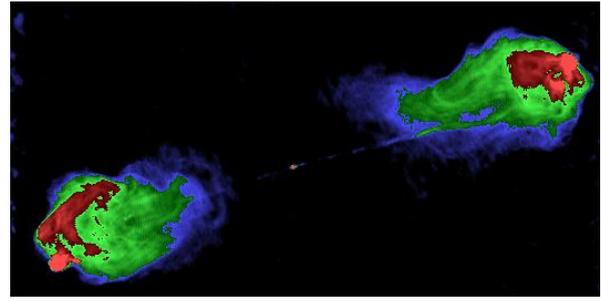


Figura 7: Imagem da rádio-galáxia *Cyg A* obtida em 4,9 GHz com resolução de $0,4''$ com o interferômetro VLA. Os dois rádio-lóbulos estão ligados por finos jatos relativísticos ejetados pelo buraco negro supermassivo no centro da imagem. Fonte: en.wikipedia.org/wiki/Cygnus_A.

Os jatos seguem retilíneos por milhões a.l. e, se a pequena fonte que os emite gira, a direção da ejeção (a mesma do eixo de rotação da fonte) deve se manter estável por milhões de anos, já que os jatos não podem avançar com velocidade maior que a da luz. Essa estabilidade direcional da fonte é porque ela atua como um giroscópio. Uma fonte que fosse compacta, de um mês-luz¹⁸ no máximo (ver adiante), com capacidade de emitir jatos tão poderosos e que atuasse como um giroscópio com extrema estabilidade direcional só poderia ser um buraco negro supermassivo. O estudo de buracos negros dotados de rotação rápida (Schwarzschild estudou buracos negros sem rotação) mostrou que o espaço¹⁹ no plano de rotação (plano equatorial) e imediatamente fora do horizonte de eventos, é arrastado pela rotação do buraco negro e passa a girar como um rodaminho (imagine um tornado do espaço!). Mesmo que a matéria distante capturada pelo buraco negro se aproxime dele num disco de acreção que pode estar orientado num plano qualquer, perto do horizonte de eventos o disco de acreção ajusta sua orientação segundo o plano equatorial do buraco negro. Dessa forma o buraco negro mantém firmemente a orientação de sua rotação como um giroscópio.

Os jatos são ejetados perpendicularmente ao equador do buraco negro porque no pequeno volume (astronomicamente falando) onde o disco de acreção quase toca o horizonte de eventos, o gás está incrivelmente aquecido, portanto fortemente

¹⁸Distância percorrida pela luz em um mês, cerca de 1 a.l./12.

¹⁹Que o espaço se deixe deformar sob a ação da gravidade é algo com que começamos a nos acostumar ouvindo falar da deflexão da luz de uma estrela distante, ao passar perto do Sol, sendo observada no eclipse total do Sol ocorrido em 29 de maio de 1919 em Sobral, CE.

pressionado para se expandir. Mas se o gás está altamente aquecido, também está ionizado. Sofrendo violentas colisões nessas altas temperaturas, átomos perdem elétrons que se tornam livres e, os átomos, com excesso de prótons (ou de carga positiva), já não são mais átomos, mas íons. O gás resultante é formado de íons e elétrons. Tecnicamente é chamado plasma. O plasma não é mais eletricamente neutro (como, grosso modo, é o ar que respiramos), mas eletricamente condutor (capaz de conduzir correntes elétricas). Um gás ionizado tem a capacidade de se acoplar ao campo magnético. As linhas de força do campo magnético ancoradas no disco de acreção, justamente porque estão acopladas à matéria ionizada, são forçadas a girar com o disco, de sorte que elas literalmente se enrolam dando origem a espirais magnéticas em lados opostos do disco de acreção. O eixo das espirais coincide com o eixo de rotação do buraco negro. Por intermédio do campo magnético os jatos ganham energia rotacional do buraco negro. O gás ejetado pelos tubos magnéticos, que há pouco escapou de cair no buraco negro, flui a altas velocidades formando os jatos.

Lembremos que a rádio-emissão observada é produto do mecanismo síncrotron em que elétrons a alta velocidade interagem com o campo magnético. A fonte de energia dos jatos e da sua rádio-emissão é a energia de rotação do buraco negro. Isso pode soar fisicamente impossível, pois energia estaria sendo retirada do buraco negro. No entanto, neste caso isso é possível porque supostamente a matéria do disco de acreção, ao cruzar o horizonte de eventos transporta consigo o campo magnético, assegurando a continuidade das linhas de força através do horizonte de eventos. Desta forma, o campo magnético intervém fisicamente na extração da energia de rotação do buraco negro para a formação dos jatos.

4.7 Quasares

Agora uma rádio-fonte, *Cyg A*, mostrava uma intrigante relação com uma galáxia óptica e esse fato tirou os astrônomos ópticos da indiferença inicial. Mas, embora a radioastronomia tenha nascido nos Estados Unidos, os americanos estavam sendo meros expectadores das notáveis descobertas que estavam sendo feitas em rádio-observatórios ingleses e australianos. Isso sacudiu os brios americanos e a National Science Foundation, em Washington, DC, lançou o projeto re-

lâmpago de criação do National Radio Astronomy Observatory em Greenbank, WV, e o Instituto Tecnológico da Califórnia (Caltech) em Pasadena (perto de Los Angeles), sede administrativa dos Observatórios Monte Wilson e Palomar, se lançou na construção do rádio-interferômetro da Caltech em Owens Valley, no sudeste do Parque Nacional de Yosemite.

Uma nova surpresa veio em 1960 de Jodrell Bank. Uma rádio-fonte denominada 3C48 (48ª fonte da 3ª versão de um catálogo de Cambridge) tinha sido descoberta. Ela era tão pequena, que seu diâmetro angular não chegava a 1". O interferômetro de Jodrell Bank não foi capaz de dar a posição dessa compacta fonte com caixa de erro decente. Foi a oportunidade para que a equipe de Owens Valley, com seu novo rádio-interferômetro, determinasse a posição com uma caixa de erro de 5", que foi repassada para os colegas ópticos do Observatório Palomar. Na fotografia astronômica centrada na caixa de erro, apareceu para surpresa geral, não a imagem de uma galáxia, mas apenas um ponto azul com aparência de estrela. Por isso mesmo, objetos deste tipo que continuariam seriam descobertos, foram coletivamente denominados quasares (forma abreviada de quasi-stellar objects). Nos dois anos seguintes, cerca de meia dúzia de novos quasares foram descobertos e continuaram intrigando. Na tentativa de conhecer sua natureza os astrônomos ópticos, além de fotografarem, também obtinham o *espectro*.²⁰

O espectro do quasar 3C273 era muito estranho, bastante diferente do espectro que era observado nas estrelas. Demorou muito para que astrônomos experientes se dessem conta de que um conjunto de linhas espectrais desse quasar, eram as costumeiras linhas devidas ao hidrogênio vistas inúmeras vezes e habitualmente reconhecidas, mas que estavam anormalmente deslocadas para o vermelho, isto é, para comprimentos de onda mais longos. Descobriu-se então que 3C273 tinha hidrogênio e estava se afastando a cerca de 16% da velocidade da luz, uma velocidade muito maior do que qualquer astrônomo tinha visto até

²⁰O espectro é a distribuição contínua de cores, como num arco-íris, da luz de um astro. O espectro pode ser obtido dispersando-se a luz original, por exemplo, fazendo-a passar através de um prisma, de modo a decompô-la em seus vários comprimentos de onda. Analisando o espectro da luz os astrônomos determinam a composição química, as condições físicas dos astros e a velocidade de seus movimentos na direção da linha de visada do astro.

então em estrelas.

Já o espectro de 3C48 não mostrava as linhas do hidrogênio, mas do magnésio, oxigênio e neônio, que indicavam um afastamento mais veloz, de 37% da velocidade da luz. Com velocidades tão grandes de afastamento, os quasares definitivamente não poderiam ser estrelas da nossa Galáxia. Deveriam ser astros muito distantes, participando da expansão do universo. Na expansão do universo a velocidade de afastamento é tanto maior, quanto mais distante ele se encontra. De acordo com essa lei 3C273 estaria a 2 bilhões a.l. e 3C48 a 4,5 bilhões a.l. Distância tão grande teria uma consequência importante: para serem vistos com o brilho que tinham no telescópio de 5 m, teriam que irradiar 100 vezes mais que as mais luminosas galáxias!

3C273 era, na verdade, tão brilhante que mesmo telescópios de tamanho modesto já o tinham fotografado milhares de vezes desde 1895. Foi feita uma busca dessas fotografias e, com base nelas, se concluiu que o brilho variava. As flutuações eram tipicamente mensais. Dessa simples informação os astrônomos tiraram uma importante conclusão: a fonte emissora da radiação deveria ter estimativamente um tamanho correspondente à distância percorrida pela luz em um mês. Pois, se fosse maior, não haveria um agente físico viajando com velocidade igual ou menor que a da luz, capaz de fazer a fonte aumentar ou diminuir a radiação, em uníssono, no intervalo de um mês. Assim aprendíamos que a rádio-fonte efetiva do quasar 3C273 era compacta. Para formarmos uma ideia, ela teria mais ou menos o tamanho da parte interna da *Nuvem de Oort*, estrutura com forma de concha que deve abrigar centenas de bilhões de cometas do Sistema Solar. Essa “pequenez” (em escala cósmica) da rádio-fonte já sugeria sua conexão com um buraco negro supermassivo, mas os astrônomos demorariam ainda uma década até chegarem definitivamente a essa conclusão.

4.8 Montando o quebra-cabeça

Seguindo a cronologia histórica, descrevi as primeiras manifestações dos objetos que viriam a ser chamados buracos negros supermassivos: *Sagittarius A** no núcleo da Via Láctea, a rádio-galáxia *Cyg A* e os quasares 3C48 e 3C273. O denominador comum desses objetos é que cada um deles é, na verdade, uma galáxia com um buraco negro

supermassivo alojado no seu interior.

À medida que as observações e os estudos foram avançando, um novo conceito astronômico foi se firmando, o de núcleo ativo de galáxia. Tal núcleo designa o pequeno objeto (pequeno, para os padrões astronômicos) que, além de abrigar o buraco negro supermassivo, emite de seus arredores uma quantidade prodigiosa de energia na forma de ondas de rádio, luz visível, raios X e gama, além de jatos de partículas com velocidades relativísticas.²¹ Essa energia é de natureza bem diferente daquela emitida pelas estrelas de uma galáxia. Galáxias que têm núcleos ativos são classificadas como galáxias ativas. Fisicamente, o que torna o núcleo ativo é a acreção de matéria no buraco negro através de um disco de acreção. Com isso a massa do buraco negro está aumentando. A presença de jato é reveladora de que o núcleo da galáxia é ativo, pois o jato é um subproduto da acreção.

Da pequena lista histórica, a rádio-galáxia *Cyg A* (assim como todas as rádio-galáxias) e os quasares 3C48 e 3C273 (assim como todos os quasares) são galáxias ativas. Ficou de fora *Sagittarius A** porque a nossa Galáxia não emite aquela quantidade prodigiosa de energia na forma de radiação e de partículas. Além disso, o grosso de sua energia é de origem estelar. Mas sobre *Sagittarius A** voltarei a falar mais adiante. Antes quero responder à pergunta: se rádio-galáxias e quasares são energizados quase da mesma forma por buracos negros, o que os faz parecerem tão diferentes? Na luz visível, rádio-galáxias parecem conjuntos de estrelas como a Via Láctea, com cerca de 100 mil a.l., enquanto quasares são extremamente luminosos, têm aparência estelar e cerca de 1 mês-luz. Apesar dessas diferenças, o buraco negro central dos quasares também é circundado por uma galáxia de 100 mil a.l. só que, sendo alimentado de matéria pelo disco de acreção numa taxa muito maior, o disco teria um brilho muito maior. Isso ofuscaria as estrelas da galáxia e daria aparência estelar aos quasares. Nas rádio-galáxias a taxa de alimentação de matéria pelo disco de acreção seria menor. O disco seria menos brilhante, o que permitiria observar as estrelas da galáxia, contudo a atuação conjunta do disco de acreção, do buraco negro com rotação

²¹Esses jatos com milhares a.l. de comprimento são os maiores aceleradores naturais de partículas. O túnel circular do famoso Grande Colisor de Hádrons, na fronteira franco-suíça perto de Genebra, tem 27 km.

e das linhas de força do campo magnético enraizadas no buraco negro continuaria produzindo os jatos e os lobos de rádio-emissão.

Voltando a *Sagittarius A**, já em 1970 havia sido notado que o movimento orbital de estrelas próximas ao núcleo de galáxias espirais só podia ser explicado pela concentração de uma imensa massa no núcleo, massa essa maior que pudesse ser explicada por estrelas ordinárias. A solução para esse dilema era um buraco negro supermassivo. A hipótese de que o centro da Via Láctea abrigaria um buraco negro supermassivo é de 1971 e já em 1974 a existência desse buraco negro foi evidenciada pela detecção da compacta rádio-fonte de radiação síncrotron que recebeu o nome *Sagittarius A**.

Evidências acumuladas na década de 1980 sugeriram que buracos negros supermassivos encontram-se não só no núcleo de quasares e rádio-galáxias, mas também de galáxias normais (isto é, não ativas) elípticas ou espirais e mesmo galáxias menores. Nesse caso os buracos negros seriam desprovidos de discos de acreção, teriam apenas um disco tênue e seriam quiescentes. A evidência de um buraco negro com 4,3 milhões M_{\odot} no centro da nossa Galáxia veio da análise do movimento de nuvens de gás, observáveis em infravermelho que o orbitam, e da rádio-emissão de uma fonte não maior que o Sistema Solar associada ao buraco negro. Em se tratando de galáxias normais, podemos pensar que toda sua luminosidade corresponde à soma da emissão de todas as suas estrelas. Portanto a nossa Galáxia é considerada sem núcleo ativo, mas com núcleo quiescente, o que não exclui a possibilidade de que ele já tenha sido ativo, ou venha a ser temporariamente.

4.9 Origem dos buracos negros supermassivos

Vimos como se formam os buracos negros estelares. É pelo colapso gravitacional de estrelas. Mas a origem dos buracos negros supermassivos ainda é obscura. Porém, uma coisa parece certa: eles não nascem já com toda a massa. Devendo crescer, cada buraco negro supermassivo poderia iniciar com uma estrela progenitora muito massiva (estimativamente com mais de centenas de M_{\odot}) que, após sua evolução daria lugar a um buraco negro estelar supermassivo que, por sua vez, ao longo do tempo, através da fusão com ou-

tros buracos negros estelares, se tornaria suficientemente massivo para dar origem a um buraco negro supermassivo.

Uma teoria bastante popular alega que no início do universo, cerca de 100 milhões de anos após o Big Bang, estrelas supermassivas puderam se formar a partir de nuvens interestelares de galáxias primordiais. Isso era possível, mas não mais atualmente, porque a matéria interestelar ainda era formada quase que exclusivamente de hidrogênio e hélio. O teor de elementos pesados (ou metais, segundo o jargão dos astrofísicos) como o carbono e o oxigênio foi aumentando com o tempo, na medida em que esses elementos foram produzidos no interior das estrelas por reações de fusão nuclear. Sabemos que os elementos pesados irradiam eficientemente e promovem rápido esfriamento da matéria interestelar. Nessas condições, o objeto que colapsa sofre fragmentação, o que impede a reunião de toda a massa num único corpo. Supostamente tal fragmentação não ocorreria no universo primordial, o que possibilitaria a formação de buracos negros supermassivos.

Mas essa explicação esbarra num problema: o universo observável tem estimativamente 100 bilhões de galáxias e supostamente todos eles têm um buraco negro supermassivo no seu interior. Segundo estudos, o colapso gravitacional direto da matéria interestelar primordial não seria capaz de produzir estrelas progenitoras supermassivas em quantidade suficiente para explicar o grande número de buracos negros supermassivos observados hoje. Para contornar esse problema, considera-se que mesmo as nuvens interestelares já contaminadas com metais pesados tenham sido capazes de formar estrelas progenitoras supermassivas incluindo, porém, além do colapso gravitacional do gás interestelar, o canibalismo de buracos negros menores que seriam arrastados pelos gases fluindo na direção das estrelas supermassivas. Mas, por enquanto, isso é apenas uma hipótese.

5 Análise da primeira imagem

A primeira imagem é apresentada abaixo (Figura 8). Não é por má qualidade da reprodução, mas a imagem original já é meio desfocada porque a resolução angular era insuficiente.

As cores da imagem são falsas, pois a observação não foi feita na luz visível, mas em ondas

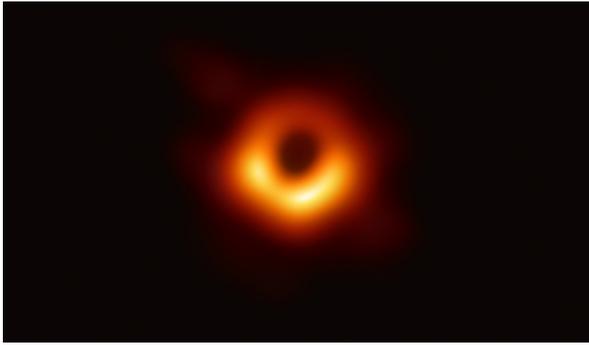


Figura 8: No centro escuro, um buraco negro supermassivo: uma besta-fera voraz no centro da galáxia M87. O N é para cima e o L para a esquerda. Crédito: EHT Collaboration. Fonte: www.eso.org/public/images/eso1907a/.

de rádio de 1,3 mm (230 GHz). As cores codificam temperaturas entre 1 e 10 bilhões K, as mais claras sendo as mais elevadas.

5.1 O anel luminoso

Logo que foi dada publicidade à imagem, nela foi destacado um *anel luminoso* que circundava um *disco escuro*. O anel brilhante e o disco escuro eram as principais estruturas observacionais da imagem. Segundo os analistas do projeto *EHT*, o diâmetro externo da porção mais brilhante do anel luminoso tinha 0,000043". A maior parte do brilho desse anel provém da matéria do disco de acreção, superaquecida a dezenas de milhões K e turbilhonando ao redor do buraco negro a velocidades relativísticas. Matéria que estava em vias de cair no buraco negro e desaparecer para sempre, teria enviado as ondas de rádio que recebemos em abril de 2017.

Na imagem, a parte inferior do anel tinha um brilho mais intenso, que foi explicado como sendo devido à colimação da radiação quando as partículas que irradiam (elétrons) se deslocam a velocidades próximas à da luz. Nessa situação, a radiação em vez de ser emitida igualmente em todas as direções, ela passa a ser emitida por um cone estreito, aberto na direção para a qual a partícula se move.

Na Figura 2, vemos na parte superior à esquerda um objeto extenso e brilhante que é a rádio-galáxia em cujo centro se encontra o buraco negro da Figura 8. Vê-se também um dos jatos lançado na direção entre 4 e 5 horas do ponteiro do relógio. Daí se inferiu a orientação do eixo de rotação do buraco negro, supostamente a mesma do jato. Como o disco de acreção é perpendicular

ao eixo de rotação, esse disco teria sido visto por nós, na imagem, quase frontalmente. Esse “quase” é um desvio de 17° entre o plano do disco de acreção no espaço e o plano em que a imagem está projetada (plano do papel). *Grosso modo*, na parte superior da imagem o disco de acreção estaria abaixo do plano do papel e, na parte inferior, acima. Concluiu-se também que o turbilhonamento da matéria no disco é no sentido horário (dos ponteiros do relógio), completando uma volta a cada 2 dias.

Já antecipo que a esse anel brilhante associado ao disco de acreção, se sobrepõe um anel de brilho menos intenso, formado por fótons que se aproximaram do buraco negro vindo de todas as direções do universo distante, todavia escaparam de cair nele, mas sofreram deflexões gravitacionais. Alguns desses fótons orbitaram temporariamente ao redor dele, nas proximidades da esfera de fótons (ver logo adiante) e, finalmente, conseguiram escapar para o infinito, alguns vindo na nossa direção, em que a imagem foi obtida.

Bem na parte central do disco escuro da imagem encontra-se o horizonte de eventos (objeto intrinsecamente escuro), uma esfera com $1 R_S$. Qualquer fóton que incida nessa superfície é capturado e desaparece para sempre. Por outro lado, o raio interno do disco de acreção deve ser da ordem de $3 R_S$, uma vez que essa é a menor órbita estável para a matéria. Portanto, há entre eles um bom espaço para o tráfego de fótons sobreviventes que chamarei fótons perambulantes, entendendo que suas trajetórias, nessa região de forte campo gravitacional, sofrem fortes desvios.

Sabemos que a menor órbita em que um fóton pode descrever um círculo em torno de um buraco negro tem raio igual a $1,5 R_S$. Esse círculo é chamado *anel de fótons* e tem uma propriedade pitoresca: se pudéssemos estar nele olhando para a frente, veríamos a nossa própria nuca! Como os fótons podem orbitar esse círculo em qualquer direção, o que existe na verdade não é apenas um anel, mas uma superfície esférica envolvendo o buraco negro, na qual os fótons poderão permanecer aprisionados por um certo tempo, formando a chamada esfera de fótons. Mas muitos fótons perambulantes poderão também orbitar um número menor de vezes em torno do buraco negro em órbita um pouco menor, ou maior que a esfera de fótons, de modo que uma concha esférica envolvendo a esfera de fótons pode ser imaginada como

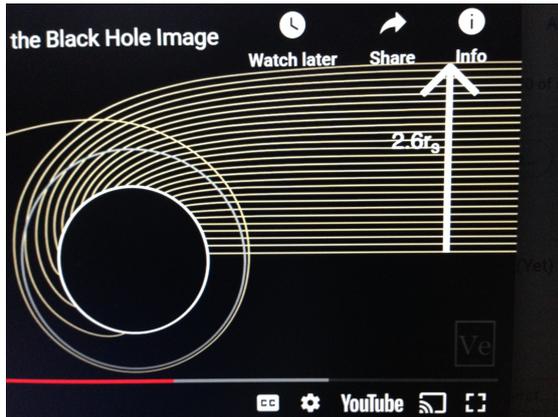


Figura 9: Fótons vêm de longe, à direita, e suas trajetórias sofrem deflexão conforme se aproximam do buraco negro. O círculo interno, completamente negro, representa o horizonte de eventos (raio = $1 R_S$); o círculo externo representa a esfera de fótons (raio = $1,5 R_S$). A seta vertical à direita mede o parâmetro de impacto dos fótons. Parâmetro de impacto é a distância perpendicular entre a trajetória do fóton e o centro do buraco negro. Fótons que se aproximam do buraco negro com parâmetro de impacto menor ou igual a $2,6 R_S$, incidem na superfície do horizonte de eventos e desaparecem. Mas quando o parâmetro de impacto é pouco maior que $2,6 R_S$, o fóton orbita o buraco negro nas proximidades da esfera de fótons e pode escapar para o infinito à esquerda. Agora tiro vantagem do fato de que o fóton que escapa para o infinito à esquerda pode ser imaginado viajando no sentido oposto e que nós, como observadores da imagem, estamos longe, à direita. O anel brilhante formado por esses fótons terá na imagem um raio interno igual a $2,6 R_S$. Imagem retirada pelo autor do vídeo www.youtube.com/watch?v=zUyH3XhpLTo.

uma armadilha temporária de fótons. Ao mesmo tempo essa armadilha é também uma plataforma de lançamento de fótons, já que eles podem escapar para todas as direções do universo. Os fótons que vierem na nossa direção poderão contribuir na formação do anel brilhante da imagem. Não é muito difícil mostrar que o raio interno desse anel na imagem mede $2,6 R_S$ (Figura 9). Essa Figura mostra que a parte interna do anel é escura porque seus fótons teriam que vir do horizonte de eventos, o que é impossível. Só fótons rasantes ao horizonte de eventos podem ser vistos formando a imagem. O aumento do raio do horizonte de eventos de $1,5 R_S$ para $2,6 R_S$ na imagem pode ser interpretado como um efeito de lente gravitacional.

Segundo simulações, os fótons perambulantes devem formar na imagem um anel de brilho difuso com raio interno de $2,6 R_S$ e externo de $3,0 R_S$, que praticamente se encaixa no interior do brilhante disco de acreção.

Pelo que foi dito, o disco escuro não é bem uma sombra, nem silhueta como ouvimos muitas vezes, mas um *vulto*²² do horizonte de eventos, visível graças à aura luminosa formada pelos fótons perambulantes que acabaram vindo na nossa direção. O termo “sombra” pode ser enganador porque, de fato, não há uma fonte distante, ao fundo, que esteja sendo eclipsada por um objeto opaco no caminho. Além disso, esse termo nos induz a pensar na propagação retilínea da luz, sendo que nas proximidades de um buraco negro a deflexão da trajetória da luz é o fenômeno dominante.

Na imagem, é difícil definir o diâmetro do disco central escuro pela presença de muitos tons de cinza. Seu bordo seria o limite observacional de aproximação máxima ao horizonte de evento. Mas, associando esse tamanho angular a alguns R_S , a massa do buraco negro apresenta um valor concordante com a teoria vigente.

6 Técnica VLBI (Very-long-baseline interferometry)

Esta é a parte final do texto. Nela pretendo apresentar algumas noções básicas sobre a técnica utilizada para a obtenção da imagem do buraco negro. Mas isso precisa ser precedido por uma breve discussão sobre a natureza da luz.

6.1 Natureza da luz: onda ou partícula?

A luz, assim como qualquer radiação eletromagnética (raios gama, raios X, raios ultravioletas, luz visível, radiação infravermelha e ondas de rádio) apresenta um comportamento estranho: dependendo do experimento, ela se comporta como partícula (fóton) ou como onda. Mas, investigando mais profundamente, se concluiu que qualquer radiação eletromagnética deve ser entendida como uma entidade de natureza dupla denominada onda-partícula. Portanto, não é mais que a radiação se comporta ora como onda, ora como partícula. A dualidade onda-partícula significa que a radiação é, ao mesmo tempo, onda e partícula, algo incompreensível e até mesmo contraditório na física clássica, cujos conceitos ainda dialogam com a nossa linguagem coloquial. Mas a dualidade onda-partícula é um conceito da mecânica quântica que se aplica a fótons, assim como a

²²Prefiro o termo “vulto” por achar que ele sugere algo indistinto, indefinido.

partículas elementares (componentes fundamentais da matéria), átomos e moléculas. A dualidade foi criada justamente para remediar a incapacidade do conceito clássico só de onda, ou só de partícula, de descrever satisfatoriamente os fenômenos do mundo microscópico.

Não irei tão longe a ponto de explicar quantitativamente a formação da imagem do buraco negro, pois seria complicar as coisas desnecessariamente. Mas, ao explicar a obtenção da imagem, consideraremos o tempo todo os sinais de rádio captados pelo *EHT* como onda.

Se a radiação proveniente de um astro distante passar por uma abertura (fenda) com dimensão sensivelmente maior que o comprimento de onda da radiação, numa tela adiante veremos uma imagem luminosa replicando nitidamente a silhueta da abertura. Mas, se a largura da fenda é diminuída, já não é mais isso que se observa. Para termos uma noção das dimensões com que estamos lidando, tenhamos em mente que o diâmetro de um fio de nosso cabelo é centenas de vezes maior que o comprimento de onda médio da luz visível. Um experimento simples para observarmos o comportamento da luz numa fenda estreita é olhar para uma fonte luminosa através do vão que se forma quando aproximamos os dedos estendidos de uma das mãos. O vão pode ser milimétrico, mas nele já poderemos perceber franjas escuras ao longo do vão. Elas resultam da interferência destrutiva (explico adiante) da luz, que já não passa pela abertura em linha reta. Os bordos da abertura espalham a luz para outras direções, por isso ela interfere destrutivamente. A imagem luminosa que se forma do outro lado da abertura já não é uma silhueta nítida da abertura, mas algo espalhado angularmente e difuso. São efeitos ópticos do fenômeno da difração (Figura 10). A difração é explicada pela natureza ondulatória da luz. O fato de a difração não ser vista quando o tamanho da abertura cresce é mais uma questão de percepção. A difração continua ocorrendo, porém ela se torna cada vez menos perceptível.

6.2 Resolução angular

Já me referi várias vezes à resolução angular. Mas aqui vou associá-la à natureza ondulatória da radiação eletromagnética, o que a tornará perfeitamente compreensível. Essa compreensão é importante porque a espinha dorsal do projeto *EHT* consiste, no fundo, em levar o conceito de

resolução angular até as últimas consequências.

No julgamento do desempenho de um telescópio, muitas vezes as pessoas se equivocam pensando que o mais importante é o aumento, a capacidade de aumentar o tamanho da imagem. Na prática, uma vez obtida a imagem com uma objetiva de um determinado diâmetro, o aumento pode ser feito indefinidamente trocando-se uma lente secundária (ocular). Como a luz coletada com a objetiva é a mesma, o resultado é uma imagem cada vez maior, porém, com brilho cada vez mais diluído. A mesma quantidade de luz está sendo distribuída sobre uma imagem mais extensa.

Suponhamos um telescópio que nos mostre uma imagem em que duas estrelas se encontram angularmente tão próximas, que aparentam estarem fundidas num único objeto. Nessa situação, se o interesse é obter uma imagem melhor, o telescópio deve ser capaz de separar (ou discriminar) as estrelas. O aumento oferecerá apenas a ampliação de uma imagem, na qual as duas estrelas jamais aparecerão nitidamente separadas, senão sempre confundidas numa única mancha difusa.

Por isso, na escolha de um telescópio é importante saber se ele é capaz de discriminar dois objetos separados no céu por uma pequena distância angular, distância essa que pode ser estipulada segundo a exigência do interessado. O telescópio terá essa capacidade se sua resolução angular for, pelo menos, igual a essa distância angular. Detalhes ainda menores não serão discriminados, mas o telescópio já atenderá o desejo do interessado.

Para exemplificar, comecemos com o nosso olho. Ele funciona como um instrumento óptico. Ele tem uma lente interna cuja abertura é controlada pela pupila. No escuro da noite, quando fazemos observações astronômicas, o diâmetro da nossa pupila atinge cerca de 7 mm e a resolução angular média do olho (olho nu, sem óculos ou outro instrumento) é de cerca de 1'. Para discriminar detalhes menores, teremos que recorrer a uma lupa ou luneta que nos proporcione uma resolução angular menor que 1'. Se continuarmos observando no mesmo comprimento de onda, deveremos aumentar o diâmetro da abertura que capta a radiação, já que a resolução angular decresce (melhora) segundo o inverso do diâmetro da abertura.

Se nosso olho e se os telescópios funcionassem idealmente, de uma fonte distante de luz com as-

pecto pontual (como uma estrela noturna), eles deveriam produzir uma imagem fielmente pontual. Mas, não é isso que acontece na prática. Se isso acontecesse, a resolução angular do olho e dos telescópios seria igual a zero!

Se fotografarmos uma estrela com um telescópio, a imagem não será pontual, mas um disco difuso com um certo diâmetro. Esse diâmetro é pequeno, porém, não nulo. O disco não é a imagem da estrela, embora saibamos que esta seja sensivelmente esférica. Claro, parte da difusão da imagem pode ser devida a outros fatores como focalização imperfeita, falhas na curvatura da lente, impurezas no vidro da lente, sujeira na superfície da lente, cintilação²³ da estrela etc. Mas, mesmo que todos esses problemas sejam eliminados, um disco residual difuso continuará sendo visto porque é decorrente da natureza da luz, e isso é algo que não pode deixar de existir. O diâmetro desse disco residual é igual à resolução angular do telescópio utilizado. Se a estrela fotografada estivesse ao lado de outra, a uma distância angular menor que a resolução angular, ambas apareceriam confundidas num único disco difuso.

6.3 Difração

Consideremos um experimento de óptica (Figura 10) com uma fonte luminosa pontual simulando uma estrela distante à esquerda. Na Figura, três setas pretas indicam raios de luz paralelos que chegam na abertura de largura d . Em vermelho, até chegarem na abertura, as ondas se propagam na direção indicada pelos raios. O comprimento de onda, medido entre dois máximos consecutivos da amplitude da onda, está representado pela letra grega λ . As ondas estão em fase, isto é, todas elas oscilam em uníssono. Os traços verticais em vermelho representam uma frente de onda, ou seja, a propagação coletiva das ondas que, como já disse, estão em fase.

A difração começa quando a frente de onda atinge os bordos da abertura mostrados na Figura 10. Segundo a teoria ondulatória, esses bordos assim como quaisquer obstáculos, atuam como novas fontes de ondas. Conseqüentemente a luz se propaga para a região que sombra seria, caso a luz se comportasse como um feixe de partículas.

²³A cintilação de uma estrela consiste em rápidas variações de seu brilho e posição, causadas pela turbulência da nossa atmosfera. Esse efeito é facilmente perceptível quando vemos luzes distantes à noite perto do horizonte.

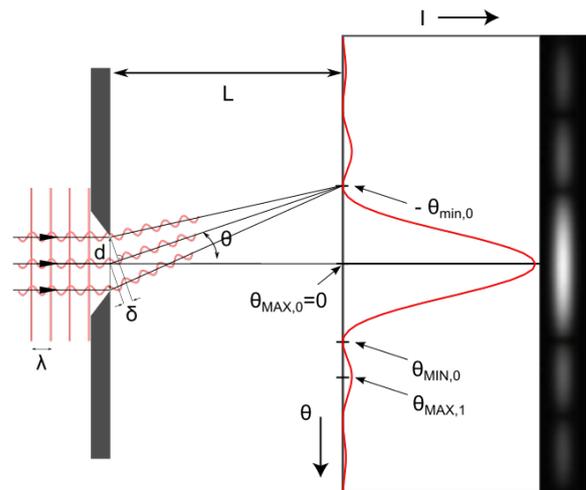


Figura 10: Difração da luz de uma fonte pontual distante à esquerda, ao atravessar uma abertura de largura d . Fonte: en.wikipedia.org/wiki/Diffraction (Autor: jkrieger - File:Beugungsspalt fuer schlitzenblende2.svg, CC BY-SA 3.0, commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=18705795).

Cada um dos dois bordos passa a emitir ondas que também estarão em fase, pois ambas foram excitadas em fase. Embora não esteja representado na Figura, cada bordo emite sucessivas ondas circulares, pois a velocidade de propagação é supostamente a mesma em todas as direções. A representação gráfica seria de círculos concêntricos ao redor de cada bordo, sendo que o espaçamento entre os sucessivos círculos seria igual ao dos traços vermelhos verticais à esquerda, pois o comprimento da onda continua sendo o mesmo. Isso ficará mais claro num experimento virtual que indicarei adiante.

Bem à direita, a Figura 10 mostra em preto e branco, não a projeção iluminada da abertura, mas uma sequência de franjas claras e escuras se alternando. Um traçado em vermelho indica a intensidade que é máxima na direção original dos raios. Em outras direções a intensidade da luz oscila, atingindo valores mínimos nos pontos indicados com setas pretas.

A formação de sucessivas franjas brilhantes e escuras decorre da *interferência*²⁴ da luz. Isso

²⁴Falava de difração. Agora, no meio da explicação surge um novo fenômeno óptico chamado interferência. É que a difração da luz por uma fenda envolve necessariamente a interferência. Embora a fenda seja única, ela tem dois bordos, cada um funcionando como uma nova fonte de luz. Isso torna possível a interferência da luz proveniente de duas fontes.

pode ser melhor visualizado em ondas na superfície da água. Afinal, o comportamento ondulatório é o mesmo nas ondas da superfície da água, nos fenômenos acústicos (ondas sonoras) e eletromagnéticos (luz visível, ondas de rádio etc.). Ondas na superfície da água se manifestam pela oscilação vertical da água acima e abaixo do nível de repouso. No som, elas causam variação cíclica da pressão atmosférica que é percebida pelos nossos ouvidos. Ondas eletromagnéticas causam variações periódicas do campo elétrico e magnético e as antenas captam as variações do campo elétrico.

Em aulas experimentais de física, ondas são geradas numa cuba de água acionando-se um oscilador que vibra verticalmente numa frequência fixa. O oscilador é colocado na superfície da água, onde atua como uma fonte pontual de ondas. A cada vibração do oscilador, uma onda é gerada. Dada a constância da velocidade de propagação para todas as direções, a onda assume a forma de um círculo crescente. A repetição das oscilações gera sucessivos círculos, todos concêntricos à fonte. Aparecerão círculos onde a água está mais elevada (crista), alternados com círculos em que a água está mais baixa (vale). A distância entre duas cristas sucessivas (ou entre dois vales sucessivos) é o *comprimento de onda*. Em todos os pontos que compõem o círculo concêntrico a onda está em fase, isto é, a etapa do desenvolvimento cíclico da onda é comum. Duas ondas concêntricas geradas em dois pontos distintos também poderão estar em fase, desde que oscilem em uníssono.

A produção de ondas por uma fonte pode ser visualizada no experimento interativo disponível em: www.edumedia-sciences.com/en/media/749-water-wave-interference. Ajuste para zero o valor de *Source separation* e *Phase difference*.

Neste experimento fixamos a frequência de oscilação num valor único. Como a velocidade de propagação da onda na superfície da água é constante, o comprimento de onda também tem um valor único. Por definição, uma onda é denominada monocromática quando sua frequência ou comprimento de onda tem um valor único. Mas essa é uma definição teórica. Na prática não há onda monocromática porque sua energia seria nula. No caso de ondas luminosas como a luz do Sol, temos ao mesmo tempo muitos comprimentos de onda, ou seja, luz de várias cores

que podem ser vistas no arco íris. Nesse caso, para haver interferência é preciso “monocromatizar” a luz, mas isso na prática significa filtrar juntamente com a luz do comprimento de onda que nos interessa, a luz com comprimentos de onda vizinhos. Quanto mais estreita a faixa de comprimentos de onda vizinhos, mais monocromática é a luz, mas a largura dessa faixa deve ser finita, não nula. Por isso é mais apropriado falar em luz quase-monocromática.

Demos agora mais um passo para o entendimento da interferência. Retomemos o experimento didático www.edumedia-sciences.com/en/media/749-water-wave-interference e, desta vez, trabalhemos com duas fontes para vermos como as ondas geradas por elas interagem. Escolha para *Source separation* uma distância que fará o papel da largura da fenda. Mantenha zero para *Phase difference*. Assim as duas fontes emitirão, em fase, ondas da mesma frequência. Elas farão o papel dos dois bordos da abertura da Figura 10, pois eles atuam como novas fontes de ondas oscilando em fase.

Na superfície da água veremos que as ondas de uma fonte se encontrarão com as de outra. Haverá lugares em que a crista de uma onda encontrará a crista da outra. Aí resultará momentaneamente a adição das duas cristas (interferência construtiva). Onde um vale encontrar outro vale, haverá a adição dos dois vales, o que também é interferência construtiva. A interferência entre duas ondas é construtiva quando elas estiverem em fase. Mas, haverá também lugares em que a crista de uma onda encontrará o vale de outra. Nesse caso as duas ondas estarão em oposição de fase e o resultado é o cancelamento momentâneo da oscilação (interferência destrutiva). Tendo em vista a simetria das ondas concêntricas produzidas pelas duas fontes, o lugar das interferências construtivas ou destrutivas também apresentará simetria que pode ser vista no experimento.

O lugar das interferências construtivas ou destrutivas pode ser expresso por uma equação e calculado, pois, são pontos cuja distância a uma das fontes difere da distância à outra fonte, respectivamente, de um múltiplo inteiro do comprimento de onda, ou de um múltiplo inteiro de meio comprimento de onda. Assim a localização de franjas brilhantes ou escuras na tela pode ser predita em função da direção θ (Figura 10).

Na Figura 10 foi considerada a situação simples

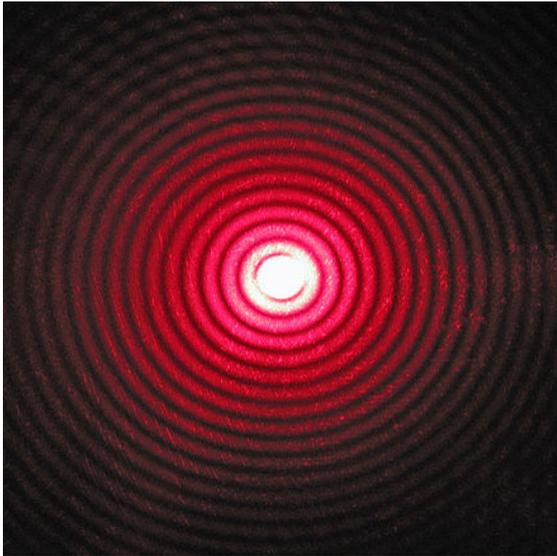


Figura 11: Padrão de difração produzido numa tela por um feixe de laser vermelho que passa por uma pequena abertura circular. Fonte: en.wikipedia.org/wiki/Diffraction.

de uma fenda de largura d , cujas ondas se propagam numa superfície plana. Mais complexa é a situação de uma abertura circular de diâmetro d , produzindo ondas que se propagam num meio $3D$ (com três dimensões). Na cuba de água as ondas teriam que ser geradas no interior líquido. Mas, mesmo sem fazer isso, podemos prever o resultado, simplesmente considerando que a abertura circular pode ser simulada fazendo-se a fenda linear girar. Então, a rotação daquela sequência linear de franjas da Figura 10 gerará um disco central brilhante circundado por uma sequência de anéis escuros e claros (Figura 11).

O disco central da Figura 11 contém cerca de 84%, portanto, da maior parte da luz que incidiu na abertura. Esse disco é a imagem da fonte pontual formada através dessa abertura. Em termos do ângulo θ da Figura 10, esse disco tem diâmetro angular aproximadamente igual ao comprimento de onda da radiação dividido pelo diâmetro da abertura, que foi como quantifiquei anteriormente a resolução angular da abertura.

Ora, se o objetivo do projeto *EHT* era obter a imagem de um buraco negro cujo horizonte de eventos tem um diâmetro angular de $0,000016''$, esse telescópio deveria ter, no mínimo, uma resolução angular equivalente a esse ângulo (veremos que a resolução angular do *EHT* foi de $0,000025''$). Uma alternativa prática para melhorar a resolução angular seria observar numa radiação com menor comprimento de onda; outra seria aumen-

tar o diâmetro do telescópio, ou ainda combinar essas alternativas.

O comprimento de onda poderia ser diminuído observando-se em raios X, cuja emissão é intensa no disco de acreção. Mas observações astronômicas em raios X só podem ser feitas acima da atmosfera, não do solo. O observatório espacial de raios X Chandra tem resolução angular de $0,5''$, cerca de 30 mil vezes maior que o diâmetro de M87*. Mantendo o mesmo comprimento de onda, a abertura atual de 1,2 m precisaria ser aumentada 30 mil vezes, algo inviável no espaço no momento atual.

Usando luz visível, o telescópio deveria ter um diâmetro de cerca de 8 km, também inviável agora. Espelhos grandes tornam-se rapidamente mais pesados, portanto mais sujeitos a deformações e causadores de desalinhamento nos suportes e na montagem, dificultando um desempenho óptico satisfatório. Além disso, na luz visível os buracos negros supermassivos, que se encontram no centro de galáxias, são obscurecidos por nuvens de poeira, um obstáculo verdadeiramente desencorajador.

No fim foram escolhidos comprimentos de onda milimétricos (ondas de rádio) que são 2 mil vezes mais longos que os da luz visível. Com esses comprimentos de onda, a resolução necessária seria alcançada se o diâmetro do telescópio fosse da ordem do diâmetro do nosso Planeta. Obviamente não seria construído um radiotelescópio com essas dimensões, mas um interferômetro. Essa alternativa foi escolhida, tendo em vista vários fatores que conspiraram favoravelmente. Para as ondas milimétricas, mesmo as nuvens de poeira são relativamente transparentes e, assim, oferecem condições favoráveis para a observação de buracos negros e de seu entorno próximo. A *linha de base*²⁵ do interferômetro teria praticamente o tamanho do Planeta, mas o interferômetro seria integralmente instalado no solo. A interferência das ondas de rádio requer que as ondas recebidas simultaneamente em diferentes pontos da Terra, mantenham a fase (oscilações em uníssono). Isso é razoavelmente bem atendido pelas ondas milimétricas, mas não seria pela luz visível cuja propagação é suscetível a distorções severas e caóticas causadas pela turbulência atmosférica. Por fim, um fator quase decisivo foi a existência de vários

²⁵ Linha de base é a distância de separação entre as antenas que compõem um rádio-interferômetro.

radiotelescópios de tamanho adequado, já instalados em sítios escolhidos com severos critérios técnicos e geograficamente bem distribuídos no globo. A radioastronomia já tem alcançado resoluções angulares incríveis, muitas ordens de grandeza inferiores às dos maiores telescópios ópticos! Assim foi que oito rádio-observatórios formaram uma rede que foi articulada especificamente para a grande missão de obter a imagem de um buraco negro supermassivo. Essa rede *EHT* alcançou a resolução angular necessária, sem cobrir um hemisfério da Terra com uma antena.

6.4 Teoria de Fourier

Parece digressão, mas achei didaticamente conveniente, antes de abordar a rádio-interferometria, apresentar a Teoria de Fourier. Ela é assim chamada porque foi introduzida pelo matemático francês, também egiptólogo e administrador público Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768-1830). Ele desenvolveu as séries de Fourier enquanto solucionava o problema da condução do calor em placas metálicas, e estabeleceu que qualquer função periódica²⁶ com período P (que, obviamente, atenda certas condições matemáticas que não precisam ser destacadas aqui) pode ser representada por uma soma de senos e cossenos cujo ângulo cresce como múltiplo inteiro de $1/P$ ²⁷ e cuja amplitude, que quantifica a contribuição de cada termo na soma, deve ser calculada a fim de que a representação resulte satisfatória. Matematicamente a soma inclui infinitos termos, mas uma soma com número finito (muitas vezes baixo) de termos já fornece um resultado satisfatório na prática.

Uma função não necessariamente periódica do tempo (ou da posição numa direção do espaço), pode ser representada através da transformada de Fourier na forma de superposição de senos e cossenos de cada frequência temporal (o inverso de um intervalo fixo de tempo) ou espacial (o inverso de uma distância fixa). Na transformada todas as frequências são levadas em conta (não

²⁶Uma função é periódica quando ela se repete da mesma forma a cada período P . Se a função representa uma variação no tempo (t), o período é um intervalo fixo de tempo; se a função representa uma variação numa direção do espaço (x), o período é um intervalo fixo de comprimento.

²⁷O número de frequências ($1/P, 2/P, 3/P...$) é infinito, mesmo assim muitas frequências intermediárias não são levadas em conta.

só as frequências múltiplas e inteiras da frequência fundamental). Até frequências negativas são consideradas, mas estas não têm significado físico. São utilizadas por conveniência matemática.

Assim se estabelece uma equivalência entre uma função não periódica do tempo (ou de uma direção do espaço) e sua transformada de Fourier (doravante direi apenas transformada), pois são duas representações da mesma realidade. O que diferencia as duas representações é que a função opera no domínio do tempo (t) ou do espaço (x), enquanto a transformada opera no domínio das frequências, respectivamente, temporais ou espaciais.

A imagem de um astro visto no céu pode ser representada como a distribuição do brilho num plano $2D$ com coordenadas angulares x e y que representam distâncias angulares no céu. Essa é a representação no domínio do espaço. Sua transformada será representada também num plano $2D$, mas com coordenadas u e v , medidas em termos do comprimento de onda das estruturas que compõem a imagem. Esta é a representação no domínio das frequências espaciais.

Para ajudar a fixar as ideias, darei alguns exemplos. Para uma imagem no espaço real, formada por linhas ou barras escuras paralelas, a transformada consistirá em dois pontos em lados opostos do centro (dois pontos porque a frequência espacial é lida a partir do centro, ou seja, da frequência espacial nula). Esses pontos estarão mais perto do centro se a frequência espacial (inverso da distância de separação das linhas) for menor e vice-versa.

Se a imagem no espaço real for um fundo de brilho uniforme, a transformada consistirá num pequeníssimo ponto extremamente intenso no centro. Ele representa a contribuição de todos os pontos da imagem na frequência espacial nula (comprimento de onda infinito). Essa transformada é chamada delta de Dirac.

A imagem de um disco brilhante no centro de um fundo escuro terá como transformada um disco central também brilhante circundado por inúmero anéis concêntricos cujo brilho decresce conforme se afasta do centro, alternando-se com anéis escuros. É exatamente o diagrama de difração da luz que passa por um orifício redondo mostrado na Figura 11.

A Figura 12 é para mostrar visualmente como a imagem se altera aplicando-se filtros que re-

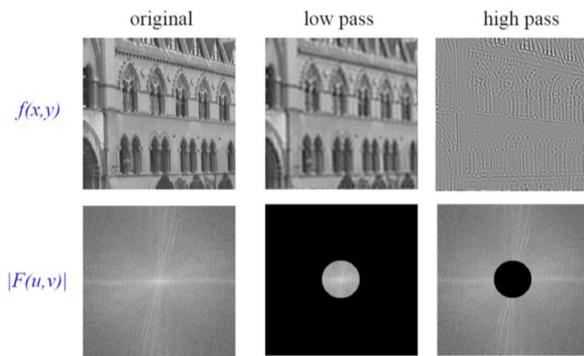


Figura 12: Em cima, da esquerda para a direita: imagem original; imagem filtrada para transmitir baixas frequências espaciais; imagem filtrada para transmitir altas frequências espaciais. Em baixo, as respectivas transformadas. A imagem filtrada no espaço real pode ser resgatada calculando-se a transformada da imagem no plano das frequências espaciais, feito o corte abaixo ou acima da frequência de corte. Mas, programas comuns de tratamento de imagens fazem filtragem na própria imagem: passa-baixo para desfocar ou embaçar e passa-alto para realçar detalhes. Crédito: A. Zisserman, Michaelmas 2014. Fonte: www.robots.ox.ac.uk/~az/lectures/ia/lect2.pdf.

movem as frequências espaciais mais altas ou mais baixas (olhos treinados percebem isso facilmente), e como isso se reflete na transformada da imagem.

6.5 Interferometria

O prelúdio sobre a Teoria de Fourier me permite apresentar agora a radio-interferometria como a técnica observacional de obtenção da função de visibilidade das franjas de interferência, que é a transformada da imagem do astro no domínio das frequências espaciais (u, v) . Aplicando depois a transformação de Fourier na transformada da imagem, conseguimos resgatar a função de distribuição da intensidade no plano (x, y) , ou seja, a desejada imagem do astro no céu. Simples assim!

Calcular a transformada de Fourier é uma tarefa laboriosa, mas hoje em dia isso ficou extremamente facilitado, graças à disponibilidade de programas e supercomputadores de alto desempenho.

O conceito central da rádio-interferometria é, portanto, que a transformada de Fourier da visibilidade das franjas permite reconstituir a distribuição de brilho do objeto observado na coordenada celeste paralela à linha de base. Mas esta afirmação só se sustenta se as ondas submetidas à interferência forem coerentes (manti-

verem a fase), ainda que parcialmente. Considerando que a emissão da radiação de um astro normalmente envolve um enorme número de partículas microscópicas independentes, dificilmente poderíamos esperar a recepção na Terra de ondas coerentes. Uma exceção seriam os masers astrofísicos, encontrados em nuvens densas do meio interestelar, que emitem em micro-ondas radiação coerente, como fazem os lasers na luz visível. Mas foi demonstrado um importante teorema que assegura que, mesmo que as ondas de astros reais sejam incoerentes, quando observadas de muito, muito longe elas nos aparentam serem coerentes. Então, sigamos adiante!

6.6 Interferômetros

Relembremos o diagrama de difração da Figura 10, produzido por uma única fenda de largura d . Na Figura 13, abaixo, ela está reproduzida na curva pontilhada em vermelho. Mas, neste novo experimento, a difração será causada não por uma fenda, mas por um par de fendas iguais de largura d , separadas por uma distância b (b , de linha de base). As novas fendas introduziram um maior número de novas fontes de ondas, o que tornou a interação entre as ondas mais complexa. Mas isso não impede que os lugares de interferência construtiva e destrutiva possam ser calculados e que a intensidade do brilho continue podendo ser predita para diferentes direções. O resultado é o padrão mostrado na Figura 13 pela curva contínua em vermelho.

Mantido o mesmo comprimento de onda, a largura da franja central para a dupla fenda é d/b vezes mais estreita que a da fenda única. Isso mostra que podemos obter a mesma resolução angular de uma fenda de largura b , mesmo com apenas duas pequenas aberturas separadas pela distância b .

Transpondo isso para telescópios, podemos obter a mesma resolução angular de um telescópio com espelho (ou lente) de diâmetro b , usando dois pequenos telescópios de diâmetro d separados pela distância b . Esse par de telescópios, obviamente conectados eletronicamente, forma o interferômetro. A vantagem prática do interferômetro é explorada pelos radioastrônomos na técnica *VLBI*, especialmente quando a linha de base cresce para milhares de quilômetros. Mas, atenção! A melhoria da resolução angular é na direção da reta que une os telescópios em operação,

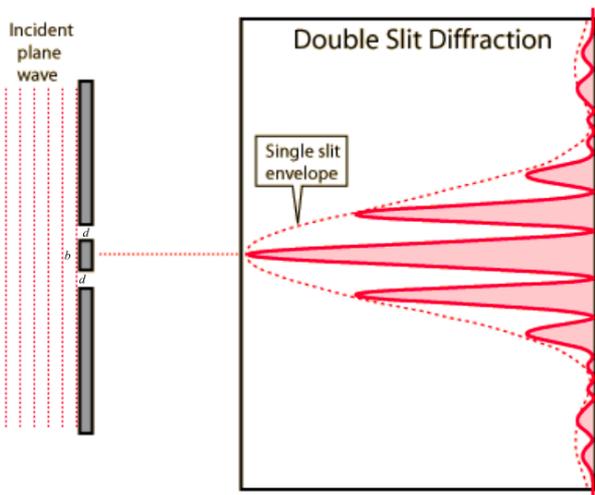


Figura 13: Difração com dupla fenda. O padrão da difração é formado por estreitas franjas luminosas alternadas por estreitas franjas escuras. Notar que o padrão da fenda única, com franja mais larga, é o envoltório do novo padrão. Ilustração adaptada pelo autor. Crédito: R. Nave. Fonte: hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/dslit.html.

ou seja, na direção da linha de base. No exemplo da Figura 13, na direção perpendicular à linha de base, a resolução angular continua sendo a mesma da fenda única.

6.7 Rádio-interferômetros

Num interferômetro de luz visível (óptico), as ondas produzidas pelas duas fendas sofrem interferência e se projetam numa tela produzindo, de uma só vez, o padrão de interferência com franjas brilhantes e escuras que se alternam. Num rádio-interferômetro de duas antenas a obtenção do padrão de interferência é mais trabalhosa. Em cada antena o campo elétrico da onda que chega através do espaço é captado por um dipolo, representado como uma cruz no foco da antena parabólica (Figura 14). Esse campo oscila na sua frequência, induz uma tensão alternada no dipolo que é transmitida através de um cabo coaxial.

Suponhamos que as duas antenas do interferômetro estejam fixamente apontadas para o zênite (Figura 14). Uma rádio-fonte pontual distante dará volta no plano do papel ao redor do interferômetro. Na Figura, a rádio-fonte encontra-se numa direção que faz o ângulo θ em relação ao zênite. A frente de onda proveniente da rádio-fonte pontual atingirá primeiro a antena da direita, depois a da esquerda. O atraso é porque o sinal da esquerda precisa percorrer uma distância maior.

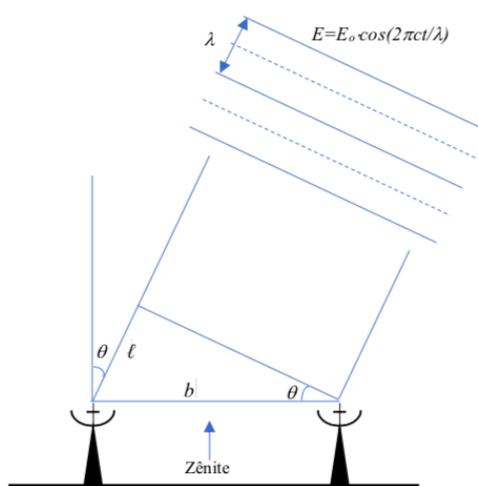


Figura 14: Um rádio-interferômetro com duas antenas fixas apontadas para o zênite (vertical do observador). As antenas aqui representadas são parabólicas, muito usuais, mas poderiam ser de outro tipo, por exemplo, espinha de peixe, simples cabos estendidos entre mastros etc. A linha de base é b . Ilustração do autor.

A diferença de trajeto é $l = b \sin\theta$, logo o atraso é $b \sin\theta/c$ já que a onda caminha com a velocidade da luz, c . Esse atraso pode ser expresso como uma diferença de fase igual a $2\pi b \sin\theta/\lambda$. Notar que a variável da diferença de fase é θ (a direção da fonte no céu), já que tudo o mais é constante.

Mas, se a rádio-fonte pontual estiver no zênite, $\theta = 0$, esse atraso será nulo, o que quer dizer que a frente de onda atinge as duas antenas ao mesmo tempo. Isso é verdade porque, nesse caso, a frente de onda será horizontal. A onda estará em fase nos dois dipolos, não havendo diferença de fase.

Para construir um rádio-interferograma é necessário que observemos a rádio-fonte pontual em diferentes direções θ . Uma vez fixada a direção θ , o sinal de cada dipolo convertido em voltagem segue através de dois cabos independentes para uma unidade eletrônica de correlação²⁸ na qual são multiplicados. Do sinal resultante é tirada uma média no tempo. Como produto final, a correlação fornece o seguinte par de dados: a medida da intensidade do sinal e o respectivo ângulo θ . Enquanto no interferômetro da luz visível, todas

²⁸Correlação é uma operação matemática usada na análise estatística de sinais. Consiste basicamente em comparar a semelhança entre dois sinais e detectar as diferenças que são quantificadas pelo coeficiente de correlação. Esse coeficiente varia entre -1 e +1. O sinal positivo (ou negativo) indica que quando um sinal cresce, o outro cresce (ou decresce). O valor unitário indica similaridade total, zero indica nenhuma relação discernível e, entre eles, temos todos os valores intermediários.

as franjas são produzidas de uma só vez pela própria luz incidindo na direção θ (como mostrado na Figura 10), no rádio-interferômetro o diagrama de interferência é construído através da obtenção de vários pares dos dados acima citados, variando-se θ .

Quando $\theta = 0$, como vimos, a onda estará em fase nos dois dipolos e ocorrerá interferência construtiva. O sinal será o mais intenso. Aumentando-se o valor de θ a intensidade flutuará periodicamente para valores decrescentes, dando lugar às franjas de interferência.

O diagrama de interferência de uma fonte pontual observada por um rádio-interferômetro também é chamado padrão de radiação desse rádio-interferômetro porque vale, tanto quando a radiação de uma fonte pontual distante é recebida, como também quando esse mesmo rádio-interferômetro estiver irradiando para o espaço. A direcionalidade com que uma antena recebe a radiação de uma fonte pontual distante, é a mesma com que ela transmite. Na prática, em radioastronomia o diagrama de radiação de um rádio-interferômetro pode ser levantado com as duas antenas apontadas fixamente para o zênite (como na Figura 14) observando-se a *passagem meridiana*²⁹ de uma rádio-fonte pontual distante. Como o diagrama de interferência vale na direção na linha de base, o rádio-interferômetro deve ter as duas antenas na direção $L - O$ para observar a passagem meridiana.

6.8 Fontes não pontuais

Afastemo-nos agora da ideia de rádio-fonte pontual e consideremos uma rádio-fonte com extensão angular, com estruturas e distribuição variada de brilho, como é o buraco negro supermassivo em pauta. A presença de “fontes adicionais” muda o diagrama de interferência aumentando a intensidade da radiação para as direções no céu onde haja estruturas brilhantes.

É fácil entender que a situação agora é mais complexa do que o padrão de interferência para uma fonte pontual. As “fontes adicionais” estarão em posições quaisquer e terão intensidades quaisquer. Com isso as franjas se deslocarão no eixo horizontal da diferença de fase, o que fará tam-

bém com que o valor mínimo das franjas deixe de ser nulo, o que implica em ambiguidade de informação sobre a intensidade e posição das duas fontes. Mas a correlação, neste caso, extrai das franjas de interferência a função de visibilidade (termo importantíssimo nesta discussão), onde visibilidade é a porcentagem da franja em que os sinais dos dois radiotelescópios na extremidade da linha de base mantêm coerência de fase. Seu valor máximo é 1, o que ocorre quando quando o valor mínimo é nulo; e seu valor é nulo quando o máximo e o mínimo se igualam. Entre esses extremos temos todos os valores intermediários.

A função de visibilidade pode ser expressa em função de $b \sin\theta/\lambda$ que é a linha de base do interferômetro projetada perpendicularmente à linha de visada, medida em número de comprimentos de onda da radiação. A função de visibilidade fornece, portanto, a distribuição da intensidade da fonte no céu, na direção da linha de base do par interferométrico, em termos da frequência espacial das suas componentes.

6.9 Síntese de abertura

A solução prática para a obtenção de imagem de um buraco negro supermassivo em ondas de rádio não consiste em construir antenas parabólicas cada vez maiores. Os maiores radiotelescópios direcionáveis para fontes celestes em diferentes posições do céu, já há muitas décadas não ultrapassam cerca de 100 m de diâmetro. A solução para alcançar alta resolução angular consiste em explorar os princípios da rádio-interferometria acima descritos, para se fazer a síntese de uma gigantesca abertura virtual (de vários milhares de km), sem preencher totalmente a abertura com uma gigantesca antena, mas usando apenas vários pares de antenas operando como rádio-interferômetros de dois elementos com linhas de base que podem chegar até a milhares de km.

Portanto, o que falei para linha de base em uma direção deve ser estendido para outras direções. Para a composição de uma imagem, não só a variedade de direções da linha de base interessa, como também a variedade de tamanhos, pois estes determinam a variedade de resoluções e todas elas são importantes. Quando uso vários telescópios formando o interferômetro, posso formar vários pares de telescópios com suas respectivas linhas de base de diferentes tamanhos e orientações. Se N é o número de radiotelescópios, o número de

²⁹A passagem meridiana ocorre quando um astro, em seu movimento diário de L para O , cruza o meridiano local (círculo da esfera celeste que passa pelos pontos cardeais N e S e pelo zênite do observador).

pares que pode ser formado é $N(N-1)/2$. O *EHT* tinha 8 radiotelescópios e cada um formando par com todos os demais, possibilitava 28 linhas de base. Portanto cada telescópio observando o buraco negro media a visibilidade da franja em 28 frequências espaciais e em 28 orientações da linha de base. A posição geográfica de cada radiotelescópio pode ser mapeada no plano (u, v) das frequências espaciais considerando-se o tamanho e a orientação das linhas de base. Fazendo a observação ao longo do dia, por causa da rotação da Terra os radiotelescópios descreviam as trajetórias elípticas desenhadas na Figura 15, possibilitando assim mudança de orientação das linhas de base.

Se é relativamente trivial fazer a correlação de sinais quando a linha de base é pequena, isso vai se complicando à medida que a distância aumenta. Com duas antenas próximas, os sinais podem ser transmitidos por cabos coaxiais, a diferença de fase é preservada e os sinais são correlacionados junto ao próprio par interferométrico. Se a linha de base é quilométrica, ainda é possível fazer a transmissão dos sinais por rádio-links até uma central onde é feita a correlação em tempo real. Mas, quando a distância chega a centenas de quilômetros, o grande número de estações repetidoras torna a transmissão impraticável.

A sigla *VLBI* corresponde à expressão *Very Long Baseline Interferometry*, Interferometria de Linha de Base Muito Longa. Uma linha de base muito longa tem comprimento de milhares de quilômetros, caso do *EHT*. Nesse caso os sinais já não podem ser transmitidos. Então, num passado ainda recente os dados passaram a ser gravados em fitas magnéticas que eram fisicamente transportadas para a central de correlação. A correlação então não era mais feita em tempo real. Em compensação, cada radiotelescópio precisava operar sob a batuta de um oscilador local de alta precisão. Passaram a ser usados relógios atômicos que tornaram-se comercialmente disponíveis desde os anos 1960 e foram se tornando cada vez mais precisos. Hoje os relógios atômicos mais precisos são controlados por masers do átomo de hidrogênio, cuja oscilação na famosa linha espectral de 21 cm tem estabilidade de frequência com tolerância de desvio menor que 1 s em 100 milhões de anos. Então cada telescópio envolvido na missão observacional, é apontado para o mesmo alvo e coleta os dados simultaneamente, mas os da-

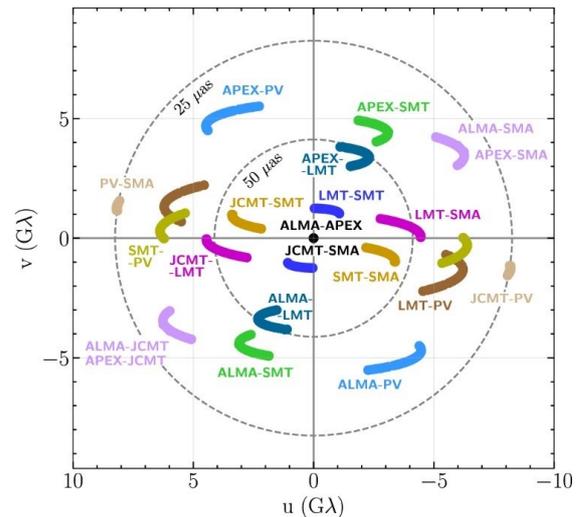


Figura 15: As coordenadas u e v são das frequências espaciais medidas em unidades do comprimento da onda de rádio λ . Na Figura, $G\lambda = 1$ bilhão de comprimentos de onda de 1,3 mm. Isto equivale a milhares de km entre os radiotelescópios dos pares com as maiores linhas de base. Os círculos tracejados mostram que aumentando-se a linha de base, a resolução angular diminui, isto é, melhora (μs : micro arc second = 0,000001"). Os telescópios formando pares foram posicionados no plano (u, v) de modo que, para cada par interferométrico, os telescópios fossem equidistantes ao centro ($u = 0, v = 0$). Assim, podemos ver nesta Figura a síntese de uma abertura de dimensão planetária. As siglas legendadas reaparecem na Figura 16 e designam cada rádio-observatório. Notar que os radiotelescópios ALMA e APEX, assim como JCMT e SMA, formam pares cujos telescópios se encontram próximos, por isso encontram-se praticamente no centro do gráfico. O telescópio SPT utilizado para calibração não aparece aqui. Cada telescópio fazia medições formando par com cada um dos demais telescópios para medir a visibilidade das franjas com diferentes frequências espaciais e diferentes orientações da linha de base. As 28 frequências espaciais estavam confinadas entre $0,000025''$ e $0,000160''$. A Figura mostra a cobertura das medições no plano (u, v) , mas não as medições. Imagem do artigo [2]. Fonte: doi.org/10.3847/2041-8213/ab0ec7.

dos são gravados com a marcação horária de alta precisão (timestamp). A precisão do tempo, importante para o sincronismo dos dados a serem coletados enquanto a Terra gira e, depois, correlacionados, é mantida dentro de $0,000000001$ s (1 ns: 1 nanossegundo). Esse sincronismo assegura a posteriori, isto é, no replay dos dados coletados, o preciso apontamento simultâneo para a fonte observada de todos os telescópios que compõem o interferômetro, como se fosse um único radiotelescópio rígido.

Mesmo hoje, o streaming de dados digitais de banda larga tem taxa de transmissão lenta para a enorme massa de dados que precisa ser trans-

mitida para a correlação. Os dados digitalizados de cada radiotelescópio foram, portanto, gravados em discos rígidos de alta densidade, mantidos à baixa temperatura do hélio líquido (para não introduzir ruído térmico) e transportados fisicamente à central de correlação. Só o transporte físico dos discos rígidos demorou dois anos. Os dados da Antártida, por exemplo, ficavam vários meses inacessíveis no inverno.

6.10 EHT

Com o *EHT*, num ousado programa de colaboração internacional, foi feita a síntese de abertura do tamanho da Terra para a captura da primeira imagem de um buraco negro supermassivo.

O projeto *EHT* foi lançado em 2009, após um longo período de estudos teóricos e instrumentais. Do lado teórico foi estudada a órbita dos fótons nas proximidades de um buraco negro com rotação, e foram feitas as primeiras simulações de como esses fótons sofreriam deflexões pelo campo gravitacional do buraco negro, eventualmente orbitariam ao redor dele antes de viajarem em direção a um observador distante. Isso era necessário para a predição de como *Sagittarius A** deveria aparecer nas imagens que não eram na luz visível, mas em ondas de rádio. Os ensaios instrumentais tinham começado em 2006 com o uso da técnica *VLBI* em comprimentos de onda cada vez mais curtos, e possibilitaram concluir que era viável a obtenção de imagem de alta resolução da região do horizonte de eventos de *Sagittarius A**, assim como do buraco negro supermassivo *Virgo A*.

As observações que produziram a primeira imagem foram feitas em cinco dias de abril de 2017. Por sorte, a equipe pôde contar com céu claro nesses dias em todos os observatórios. As observações geraram 4 PB (petabyte = quatrilhão de bytes³⁰) de dados coletados na velocidade de 128 Gb/s.

Eis os oito radio-observatórios em seis localidades, que ajudaram a compor a rede *EHT* (Figura 16): antena APEX de 12 m de diâmetro e o arranjo ALMA com 54 antenas de 12 m e 12 de 7 m, ambos no deserto de Atacama, no Chile; o radiotelescópio PV de 30 m em Sierra Nevada, na Espanha; a antena de 15 m do Telescópio James C. Maxwell (JCMT) e o Arranjo Submilimétrico de 8 antenas de 6 m (SMA) em Mauna

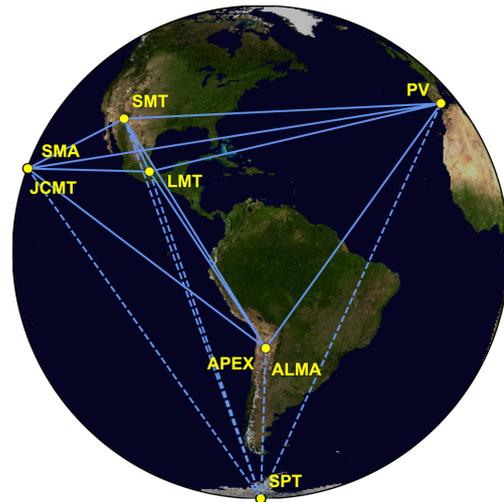


Figura 16: Radiotelescópios da rede *EHT*. Imagem do artigo [2]. Fonte: iopscience.iop.org/article/10.3847/2041-8213/ab0ec7/pdf.

Kea, Havaí; o Grande Telescópio Milimétrico de 50 m (LMT) no vulcão Sierra Negra, no México; o Telescópio Submilimétrico de 10 m no Mount Graham (SMT), no sudeste do Arizona; o radiotelescópio de 10 m (SPT) na Estação Polo Sul, na Antártida. O par de telescópios mais afastados era o da Espanha e Polo Sul com uma linha de base próxima ao diâmetro da Terra. Maior linha de base na superfície da Terra, impossível! No comprimento de onda de 1,3 mm, a resolução angular alcançada foi de 0,000025”.

Os supercomputadores utilizados estavam no Max Planck Institut für Radioastronomie em Bonn, Alemanha, e no MIT Haystack Observatory em Westford, MA (Figura 17). Para correlacionar os sinais foi feito o replay dos dados, em paralelo, de cada antena interferométrica. Mantendo o melhor sincronismo possível, era preciso introduzir a diferença de fase entre os sinais dos dois observatórios que formavam cada par interferométrico.

A matéria-prima bruta das observações do programa *EHT* é a franja de visibilidade de toda a rede de radiotelescópios em função da frequência espacial da distribuição de brilho na fonte. Mas os dados brutos foram submetidos a um primeiro tratamento chamado autocalibração, que utiliza a própria fonte observada para equalizar a resposta das diferentes antenas, para corrigir erros na diferença de fase causados pela propagação na atmosfera terrestre e para ajustar a banda passante de frequências.³¹ A função de visibilidade

³⁰1 byte = 1 unidade de informação (letra, algarismo etc.) representada em geral por 8 dígitos binários (bits).

³¹A banda passante é a faixa de rádio-frequências ao



Figura 17: MIT é o famoso Massachusetts Institute of Technology e o MIT Correlator é um poderoso supercomputador que faz a correlação matemática bilhões de vezes por segundo entre os sinais dos pares de antenas que podem ser formados entre os 8 radiotelescópios do *EHT*. Crédito: Nancy Wolfe Kotary, MIT Haystack Observatory. Fonte: www.forbes.com/sites/tomcoughlin/2019/06/26/black-hole-data-processing-storage/#1d03ff69b5bca.

já feita a autocalibração é mostrada na Figura 18.

A partir da função de visibilidade da Figura 18, uma primeira imagem foi obtida, chamada imagem suja porque ainda inclui ruídos espúrios. O primeiro deles é a recepção de sinal espúrio pelo espaço livre deixado entre as antenas (não preenchimento da abertura). Então fracos sinais de fundo captados por franjas secundárias³² podem se acumular e contribuir com sinal espúrio significativo. Há ainda os ruídos de fontes cósmicas que nada têm a ver com o objeto de estudo, e os de fontes terrestres. Estas podem ser naturais, geradas na atmosfera (por exemplo, relâmpagos) ou antropogênicas (rádio-comunicações). Tem ainda o ruído gerado pelo próprio instrumento! Por isso partes críticas de radiotelescópios são refrigeradas a baixas temperaturas, como a do hélio líquido. Além disso, na medida do possível os radiotelescópios são instalados em locais afastados de grandes centros, hoje invadidos por toda sorte de ruído eletromagnético.

A imagem limpa é obtida submetendo a imagem suja a uma operação chamada deconvolução

redor da frequência nominal de observação. Já disse antes que não há onda de rádio perfeitamente monocromática. Uma dispersão em frequência é inescapável, até porque as ondas chegam em pacotes, isto é, dentro de um intervalo de tempo finito. A frequência só seria única (monocromática) se as ondas chegassem o tempo todo, isto é, num intervalo de tempo infinito.

³²As franjas secundárias encontram-se angularmente distantes do eixo óptico dos telescópios. A Figura 18 mostra que as franjas foram truncadas a partir da terceira. A capacidade das franjas secundárias de captar sinais é fraca, mas sendo muitas, seu efeito cumulativo pode se tornar significativo.

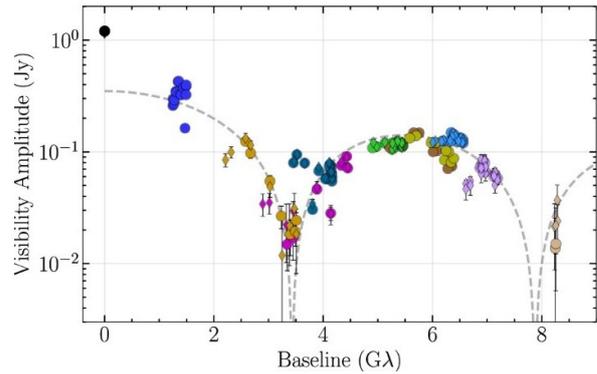


Figura 18: Função de visibilidade do *EHT*, já autocalibrada para o buraco negro supermassivo M87* em função frequência espacial. Os pontos aqui mostrados correspondem só à metade da informação que estava disponível (só para frequências espaciais positivas). A curva tracejada é a transformada de Fourier calculada para um fino anel com diâmetro angular de $0,000046''$ aqui apresentada apenas para comparação. O espalhamento dos pontos no primeiro mínimo se deve a que os pontos correspondem a diferentes orientações da linha de base e também indicam falta de simetria circular na distribuição do brilho da fonte. Imagem do artigo [2]. Fonte: iopscience.iop.org/article/10.3847/2041-8213/ab0ec7/pdf.

que consiste basicamente numa filtragem ou eliminação de estruturas mais extensas (com comprimentos de onda maiores), sob a suposição de que essas estruturas, pelo menos na maioria, são espúrias. A deconvolução é uma operação matemática que tenta restaurar o sinal original eliminando contribuições indesejadas. Para isso, para cada caso é modelada empiricamente uma função chamada Função de Espalhamento do Ponto a ser usada na deconvolução. Considerando a escassez de pontos na abertura sintetizada e os ruídos de toda sorte presentes nos dados, acho que esta é a parte mais dependente de escolhas arbitrárias dos responsáveis pelo tratamento de dados onde, portanto, contribui mais a arte do que a ciência.

Por fim, na tentativa de validar pelo menos as principais estruturas quanto à sua objetividade, quatro equipes processaram todos os dados separada e independentemente, usando diferentes algoritmos e testando-os contra diferentes modelos. Ao final se verificou que as imagens produzidas pelas diferentes equipes tinham similaridade, inclusive com as imagens produzidas antes por simulação, o que sugeriu a robustez das observações e que os resultados mereciam credibilidade. Comparações foram feitas entre imagens obtidas em quatro diferentes datas. A recompensa segundo os pesquisadores envolvidos foi poder con-

firmar na prática e com razoável detalhe, as consequências previstas pela teoria da relatividade geral numa circunstância em que a gravidade tem intensidade extrema.

7 Conclusão

De tudo isso, qual seria a real importância para cada um de nós, cidadãos? Não se trata apenas da aquisição de um novo conhecimento para ampliar nossa erudição, mas da expansão do nosso conhecimento sobre o universo, a casa em que moramos, o lugar que nos deu o privilégio de surgirmos como seres vivos e pertencentes à espécie humana. Sempre estaremos perguntando: de onde viemos? para onde vamos? mas, quanto ao nosso presente, além de quisermos manter nossa permanência neste mundo, nenhuma vocação nos é mais inata do que esquadrihar curiosamente cada cômodo da nossa casa, saber com que tijolos ela foi construída, até onde vai o quintal. Acho que essa eterna curiosidade é que dinamiza nossas principais aptidões e nos torna plenamente humanos, além de legar como subprodutos, conhecimentos e ferramentas para a sobrevivência da espécie a longo prazo (legados da ciência pura).

Não ficaremos necessariamente mais ricos nem poderosos, porém, mais conscientes de onde estamos, mais aptos a interagir não só com o universo paroquial, mas com tudo o que seja vivo ou não, que também faça parte do universo observável.

Afinal, até 46,5 bilhões de anos-luz, tudo é o meio ambiente que nos pertence. Acha pouco?

Agradecimentos

Agradeço a Domingos Soares, professor aposentado do Departamento de Física da UFMG, por me atender pronta e gentilmente quando o

consultei sobre detalhes da participação de Karl Schwarzschild na obtenção da solução exata para as equações de campo de Einstein, utilizada na descrição de buracos negros. Agradeço também ao Sérgio Bisch, diretor do Planetário de Vitória, e Júlio Fabris, professor do Departamento de Física da UFES e editor de Cadernos de Astronomia, do Núcleo de Astrofísica e Cosmologia da UFES, pelo generoso convite para contribuir no número inaugural dessa revista.

Sobre o autor

Oscar T. Matsuura (oscarmatsuura@gmail.com) possui bacharelado em filosofia e em física, mestrado em radioastronomia solar e doutorado em física de cometas. No Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG/USP) liderou o grupo de astrofísica do sistema solar e fez aplicações da magnetohidrodinâmica em estruturas da atmosfera solar e cauda de cometas. Uma vez aposentado, dedicou-se à divulgação da astronomia e estudos em história da astronomia no Brasil.

Referências

- [1] I. D. Soares, *São os buracos negros reais?* (2018), disponível em lilith.fisica.ufmg.br/~dsoares/extn/brcs/bhno-p.pdf (acesso em 13 jul. 2020).
- [2] The Event Horizon Telescope Collaboration et al., *First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole*, *Astrophys. J. Lett.* **875**, L1–L17 (2019).