

BURACOS NEGROS: SEMENTES OU CEMITÉRIOS DE GALÁXIAS?⁺

João E. Steiner

Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas - IAG
Universidade de São Paulo
São Paulo – SP

Resumo

É apresentada uma breve história da ideia de buraco negro, desde a formulação da Teoria da Relatividade Geral até observações recentes. Durante o século XX, a ideia passou de mera especulação teórica até exercer um papel central para explicar os objetos mais luminosos do universo: os quasares. Acredita-se, hoje, que os buracos negros e as galáxias tiveram uma estreita co-evolução e um não poderia existir sem o outro, pelo menos não da forma que os observamos.

Palavras-chave: *Buracos negros; galáxias; estrelas; evolução de galáxias; gravitação.*

Abstract

A brief history of the idea of black hole, since the formulation of the Theory of General Relativity to recent observations, is presented. During the twentieth century the idea evolved from mere theoretical speculation to play a central role to explain the most luminous objects in the universe: the quasars. It is believed, today,

⁺ Black holes: Seeds or cemeteries of galaxies

* *Recebido: outubro de 2010.*
Aceito: outubro de 2010.

that the black holes and galaxies have had close co-evolution and both could not exist without the other, at least not in the way that we observe them.

Keywords: *Black holes; galaxies; stars; galaxy evolution; gravitation.*

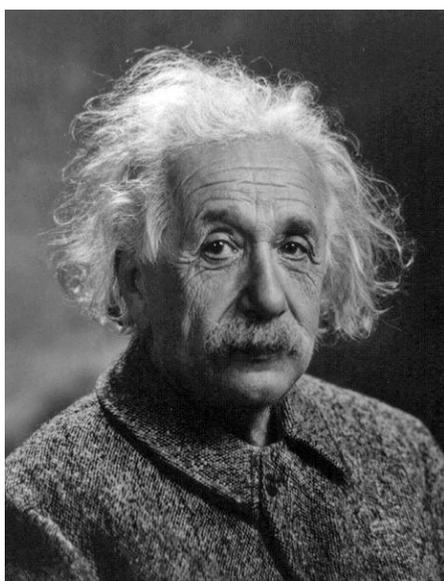
I. Introdução

A ideia de buraco negro se originou a partir da formulação da teoria da Relatividade Geral de Albert Einstein. Em 1905, Einstein publicou seu famoso artigo propondo a teoria da Relatividade Restrita. Nessa teoria ele mostrou que o espaço e o tempo são relativos, isto é, dependem do movimento do observador. Essa teoria, no entanto, só vale para observadores em movimento retilíneo uniforme, sem aceleração. Isso quer dizer que a teoria só vale para referenciais inerciais.

A partir daí Einstein começou a trabalhar na ideia de estender essa teoria para referenciais acelerados (isto é, não-inerciais). Por exemplo, quando você pisa fundo no acelerador de um carro, ele acelera (isto é, aumenta a sua velocidade). Nesse momento você está sentado num referencial acelerado. Quando o carro faz uma curva fechada, mesmo com velocidade aparentemente constante, os objetos tendem a ser jogados “para fora”. Isso ocorre porque há uma aceleração centrífuga. Nesse momento o carro também é um referencial acelerado, mesmo que ele se mova com velocidade aparentemente constante. A força da gravidade também funciona como um referencial acelerado. Imagine (só imagine!) que você esteja em um elevador em queda livre. Ele acelera “para baixo”. Nesse caso, não há experimento que permita ao observador discernir por observações exclusivamente internas ao elevador se a aceleração é devida a um campo gravitacional ou ocorre por outros meios. Com base nessa equivalência, pode-se imaginar que uma teoria da Relatividade que funcionasse para referenciais acelerados também seria uma teoria para a gravitação.

Albert Einstein trabalhou durante cerca de dez anos para conseguir formular a teoria da Relatividade Geral, válida para sistemas não-inerciais. Durante esse tempo discutiu o desenvolvimento das ideias com muitos cientistas, entre os quais o matemático David Hilbert. Einstein apresentou a versão final da sua teoria no dia 25 de novembro de 1915 na Academia de Ciências da Prússia, em Berlim. Hilbert, inspirado por Einstein, obteve as mesmas equações e as apresentou uma semana antes, em 20 de novembro, na Real Academia de Ciências de Göttingen e batizou

as equações de “Equações de Campo de Einstein”, em homenagem ao formulador da teoria.



Albert Einstein (1879-1955)



Karl Schwarzschild (1873-1916)

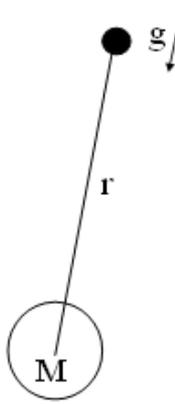
II. A solução de Schwarzschild

Em 1915, a Alemanha estava em guerra (primeira guerra mundial). O astrofísico Karl Schwarzschild havia sido convocado para lutar como oficial do exército alemão no front russo. Tendo adoecido, encontrava-se hospitalizado quando recebeu cópia da edição de 25 de novembro dos Anais da Academia de Ciências da Prússia contendo o trabalho de Einstein. Colocou-se a trabalhar na solução das equações e encontrou uma solução para o caso de simetria esférica. Mandou o manuscrito para Einstein que o apresentou, em nome do autor, na Academia no dia 13 de janeiro de 1916. No dia 19 de junho do mesmo ano, Einstein comunicou à Academia a morte de Schwarzschild.

A solução que Schwarzschild encontrou contém uma característica curiosa. Se pensarmos na fórmula da aceleração da gravidade produzida a uma distância r de um corpo de massa M , ela é facilmente obtida pela fórmula de Newton (ver quadro). No entanto, a solução de Schwarzschild introduz uma correção sobre a

fórmula de Newton. Quando o raio é muito pequeno, essa correção pode ser apreciável. Em caso extremo, o termo de correção pode ter um denominador nulo! Em outras palavras, surge uma singularidade. Para uma dada massa, isso ocorre a um raio chamado de Raio de Schwarzschild. Se uma estrela tivesse um raio menor do que esse valor, não poderíamos vê-la. Os raios de luz por ela emitidos seriam “refletidos” pela aceleração infinita. Para um observador externo, o objeto não pareceria uma estrela, mas um “buraco negro” no espaço. Essa singularidade, por muito tempo, foi considerada uma curiosidade matemática. O próprio Einstein, em artigo publicado em 1939, afirmou que “O resultado essencial dessa investigação é o claro entendimento de porque as “singularidades de Schwarzschild” não ocorrem na realidade física”^[1].

O raio de Schwarzschild



$$g(r) = \frac{GM}{r^2} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{2GM}{rc^2}}}$$

Se $\frac{2GM}{rc^2} = 1$, $r_s = \frac{2GM}{c^2}$

A solução de Schwarzschild fornece a aceleração da gravidade produzida por um objeto de massa M a uma distância r . Para r muito grande ($r \gg r_s$), a fórmula de Schwarzschild se aproxima da de Newton. No entanto, quando $r = r_s$, ocorre uma singularidade. O raio de Schwarzschild, r_s , vale 8.8 milímetros para um objeto com a massa da Terra e 2.9 km para um objeto com a massa do Sol.

III. A morte das estrelas

Para que buracos negros sejam formados, é necessário que a matéria seja muito compacta. Por exemplo, para que o Sol fosse um buraco negro, seu raio de Schwarzschild seria de 2.9 quilômetros. A Terra só poderia ser um buraco negro se sua massa fosse contida numa esfera com raio de 8.8 milímetros. Objetos com tais densidades eram totalmente desconhecidos nas décadas de 1920 e 1930. Não é de espantar que a ideia de buraco negro não tivesse se estabelecida naquela época e a errônea conclusão de Einstein parecia ser verossímil. Mas já havia, então, uma semente que apontava para a existência de estrelas muito mais densas do que o Sol. Sirius é a mais brilhante estrela do céu e dista 8,6 anos-luz de nós. Em 1844, Friedrich William Bessel estudou a posição de Sirius e concluiu que ela é dupla, devendo ter uma companheira formando um sistema binário com período de 50 anos. Essa conclusão foi confirmada em 1862 por Alvan Graham Clark. Em 1915 astrônomos concluíram que se tratava de uma anã branca, a primeira estrela descoberta de uma classe que depois se mostrou bastante numerosa. A natureza dessa estrela permaneceu um mistério até que Subrahmanyan Chandrasekhar (1910-1995) publicou seu famoso trabalho^[2] sobre a máxima massa de uma anã branca, após longa controvérsia, em 1931 (quando ele tinha 21 anos de idade; 52 anos mais tarde receberia o Prêmio Nobel de Física por isso). Segundo ele, a massa de uma anã branca nunca pode ser maior do que 40% acima da massa do Sol. Esse resultado foi confirmado com exatidão por todos os trabalhos teóricos e observacionais que se seguiram, até os dias de hoje.

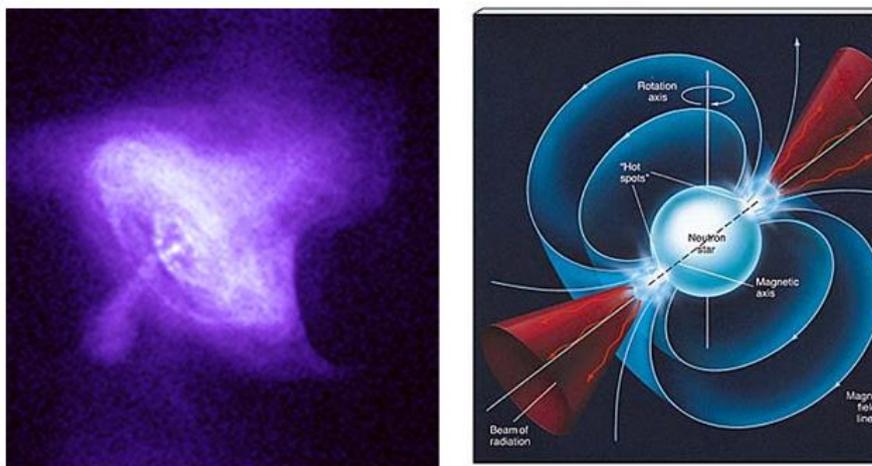
O Sol tem uma densidade média semelhante à densidade da água. Uma anã branca tem uma densidade um milhão de vezes maior. É, portanto, uma estrela cuja natureza é muito distinta das estrelas comuns, como o Sol. São estrelas mortas, isto é, incapazes de gerar energia. Poderia haver estrelas mais densas? O que aconteceria com uma estrela se ela ultrapassasse o limite de Chandrasekhar?

Também em 1939, o astrônomo Fritz Zwicky proclamava sua teoria de que existiam estrelas muito mais densas, as estrelas de nêutrons^[3]. Elas seriam responsáveis pelos fenômenos mais energéticos conhecidos, as explosões de supernovas, e pela existência de raios cósmicos – teoria elaborada com a colaboração de Walter Baade. Dado o fato de que ele tinha uma personalidade um tanto quanto inamistosa, ninguém o levou muito a sério até que, em 1968, foram descobertos os pulsares^[4] por Antony Hewish e Jocelyn Bell. Logo se percebeu que eram estrelas de nêutrons girando em torno de seu eixo muitas vezes por segundo... e estavam associadas a restos de supernovas – confirmando as duas previsões de Zwicky. Estrelas de nêutrons são muito mais densas do que anãs brancas; sua densidade

média é de 10 trilhões de vezes a densidade da água. Uma estrela de nêutrons tem um raio típico de 10 km e uma massa equivalente à do Sol. Portanto, uma estrela de nêutrons tem um raio apenas 3 vezes maior do que seria o seu raio de Schwarzschild.

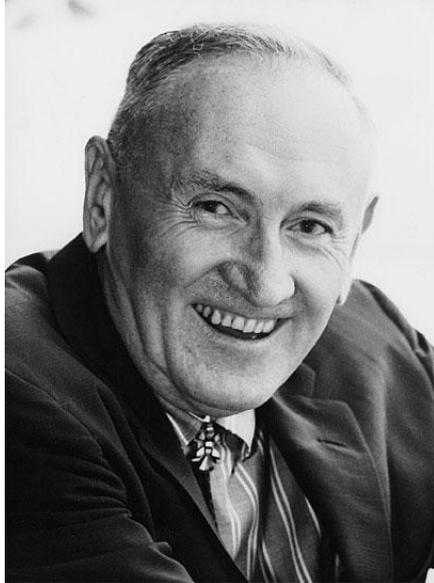


Uma nebulosa planetária, que é a fase em que uma estrela (central) ejeta seu envelope externo ao mesmo tempo em que a estrela se contrai para se transformar em uma anã branca. O Sol passará por esse estágio daqui a 5 bilhões de anos.



A nebulosa do Caranguejo, vista em raios-x, que contém um pulsar; à direita, o modelo de pulsar, contendo uma estrela de nêutrons em rotação.

Descobriu-se, ainda, em 1939, que se estrelas de nêutrons existissem, elas teriam um limite superior para a sua massa^[5]. Assim como o limite de Chandrasekhar é de 1,4 vezes a massa do Sol (massas solares), o limite para estrelas de nêutrons, chamado de limite de Volkoff-Oppenheimer seria por volta de 3 massas solares. Na verdade, levou-se muito tempo para chegar a um consenso sobre esse valor, pois os cálculos mostraram-se muito mais imprecisos do que no caso da anã branca, dado o desconhecimento sobre as propriedades da matéria em densidades tão elevadas. O que aconteceria se uma estrela de nêutrons ultrapassasse o limite de 3 massas solares? Colapsaria, sem dúvida. Mas não poderia colapsar muito, pois logo atingiria o raio de Schwarzschild. A única forma que uma estrela pode adquirir, se sua massa for maior do que o limite de Volkoff-Oppenheimer, é a de um buraco negro.



Fritz Zwicky (1898-1974)

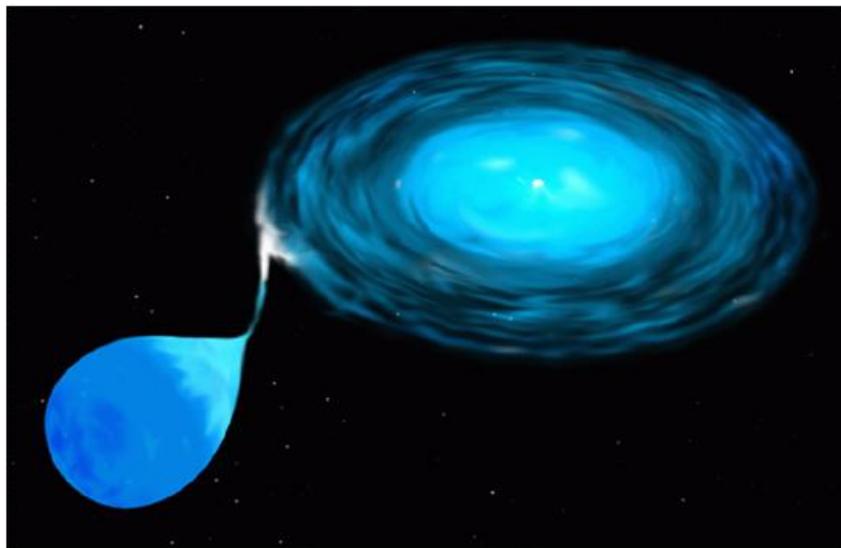


Subrahmanyan Chandrasekhar (1910-1995)

IV. Cygnus X-1 e os buracos negros estelares

Na década de 1960 descobriu-se, de forma inesperada, que existe um grande número de fontes celestes de raios-x. Ao se estudarem essas fontes em detalhe, principalmente nos primeiros anos da década de 1970, verificou-se que boa parte dessas fontes estão associadas a estrelas de nêutrons em sistemas binários. Mas em alguns casos a estrela tinha massa maior do que o permitido teoricamente pelo limite de Volkoff-Oppenheimer. A primeira fonte de raios-x para o qual se verificou isso foi a fonte de número um, descoberta na constelação do Cisne, Cygnus x-1. Essa fonte de raios-x era muito compacta e tinha massa maior do que 3 vezes a massa do Sol^[6]. Logo surgiu a hipótese de que seria um buraco negro. Foi o primeiro “candidato oficial”.

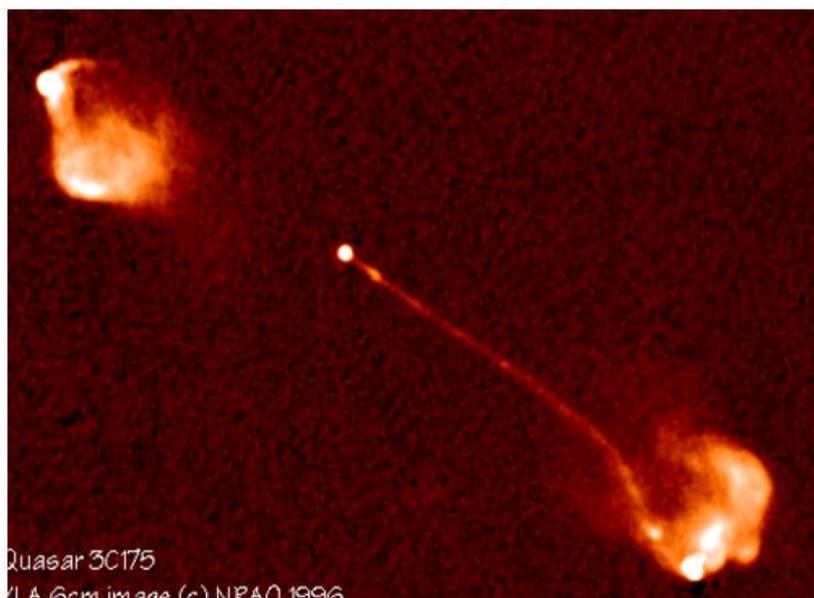
Mas, afinal, se um buraco negro não pode emitir nenhum tipo de energia, como ele pode emitir raios-x? Cygnus x-1 forma um sistema binário com uma estrela normal de 33 massas solares. Como estão muito próximas, parte da estrela normal acaba sendo sugada para o campo gravitacional do buraco negro e espirala em sua direção, formando um disco relativamente fino. Esse disco de gás gira cada vez mais rápido, à medida que se aproxima do centro, onde está o buraco negro.



Concepção artística de um sistema binário contendo um buraco negro estelar, localizado no centro do disco.

Com isso, a energia potencial gravitacional do gás vai se transformando em energia cinética. Mas as órbitas com diferentes velocidades acabam produzindo atrito e, com isso, calor, que aquece muito o disco. Como o poço gravitacional do buraco negro é muito profundo e íngreme, as temperaturas do gás atingem as cifras de 100 milhões a um bilhão de graus. Gás com essa temperatura emite raios-x que escapam do disco antes que o gás se aproxime do raio de Schwarzschild, como demonstraram claramente os astrofísicos soviéticos Shakura e Sunyaev^[7].

Quando Cygnus x-1 foi identificado, estabeleceu-se uma certa euforia entre os pesquisadores que trabalhavam na área. E muito ceticismo entre a maioria dos outros. Começou, então, a caça a mais candidatos; no entanto, quase todas as fontes de raios-x que foram estudadas em detalhe acabaram mostrando pulsações e, portanto, deveriam ser estrelas de nêutrons, já que buracos negros não podem ter campos magnéticos. Até hoje o número de buracos negros estelares conhecidos não passa de duas dúzias, apesar de que se espera que haja alguns milhões, apenas na Via Láctea, sendo que a grande maioria não emite radiação mensurável.

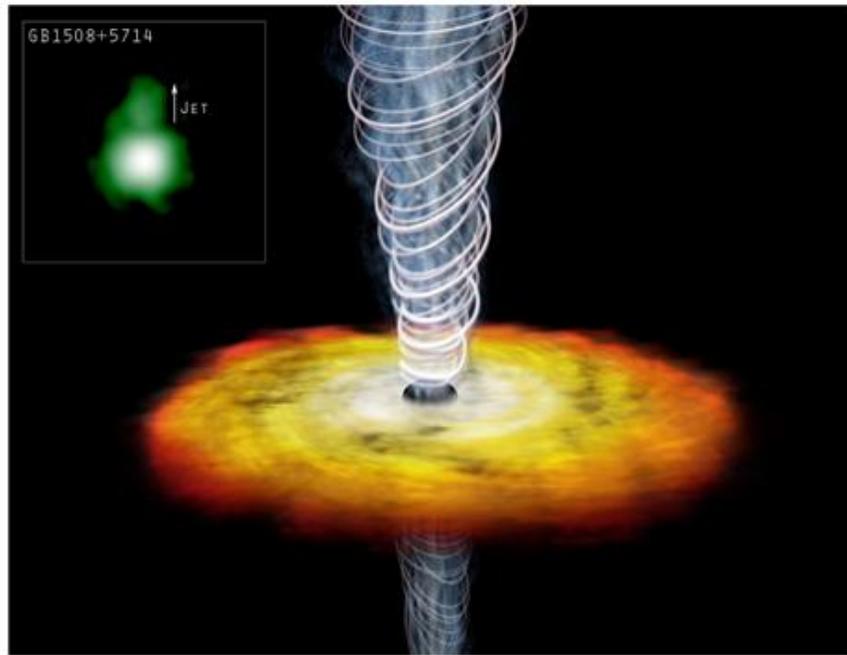


O quasar emissor de rádio 3C175; jatos colimados (neste caso, só vemos um) saem do núcleo e formam lobos distantes, muito maiores do que o tamanho de uma galáxia.

V. Quasares, os monstros cósmicos

Ainda nos anos de 1960 foi feita uma outra descoberta desconcertante: a dos quasares. Quando, em 1960, Alan Sandage e Thomas Mathews procuravam identificar a contrapartida óptica de rádio-fontes, recém localizadas com precisão através da técnica de ocultação lunar, perceberam que se tratava de objetos com aparência estelar, ou quase-estelar. Em 1963, Maarten Schmidt ^[8] mostrou que os espectros dos quasares podem ser entendidos se eles estiverem a velocidades altíssimas, deslocando suas raias espectrais para o vermelho, por causa do efeito Doppler. No entanto, objetos que se movem a grandes velocidades estão a distâncias enormes, de forma que as luminosidades correspondentes deveriam ser gigantescas. Alguns casos chegariam a ser mil vezes mais luminosos do que uma galáxia inteira. O mistério aumentou mais ainda quando se percebeu que esses objetos apresentam variabilidade no fluxo de luz, o que significa que eles são muito compactos (dimensões menores do que um mês-luz). Dois astrofísicos teóricos, Edwin

Salpeter^[9] e Yakov Zel'dovich^[10] sugeriram, nos anos seguintes e de forma independente, que essa energia toda poderia ser produzida por um processo de captura de gás por buracos negros de grande massa. Em 1969, Donald Lynden-Bell mostrou que tais objetos poderiam explicar várias características observadas em núcleos de galáxias^[11]. Havia, no entanto, certa resistência entre os astrofísicos em aceitar essa teoria. Ao longo das décadas seguintes, vários modelos alternativos, que não envolviam buracos negros, foram propostos e descartados, um a um.



Concepção artística de um disco de gás em captura por um buraco negro. As partes centrais do disco são muito quentes e emitem muita luz que escapa antes que o gás seja capturado pelo buraco negro. Na parte central do disco, próximo ao buraco negro, a densidade de energia é tão elevada que se formam jatos colimados de matéria, que é expulsa para regiões muito distantes. Como o disco tem simetria e dois lados, os jatos sempre aparecem aos pares.

VI. As Galáxias de Seyfert, as Rádio-galáxias e os LINERs

Aos poucos foi se percebendo que os quasares se pareciam, em quase tudo, com as galáxias de Seyfert. Essas são galáxias que apresentam um núcleo brilhante e linhas de emissão muito alargadas e foram identificadas, inicialmente, como um grupo de 6 objetos por Karl Seyfert em 1943^[12]. O núcleo das galáxias de Seyfert são bem menos luminosos do que os quasares. Ao passo que os quasares possuem luminosidades que chegam a 1000 vezes a luminosidade de uma galáxia inteira, os núcleos das galáxias de Seyfert apresentam luminosidades semelhantes às galáxias. Outra diferença é que os quasares parecem ser bem menos comuns, considerando um certo volume de universo, do que as galáxias de Seyfert. Um recenseamento detalhado mostra que existe apenas um quasar luminoso para cada 100 mil galáxias, ao passo que cerca de 2% das galáxias possuem núcleos do tipo Seyfert.

Outro grupo de objetos intrigantes é o das rádio-galáxias. Muitas delas apresentam estruturas colimadas em forma de jatos; essas estruturas terminam, em geral, em lobos extensos. A origem dessas estruturas são núcleos de galáxias, cuja aparência no óptico se parece muito com galáxias de Seyfert (que também emitem ondas de rádio, porém com menos intensidade). Por outro lado, alguns quasares também apresentam estruturas muito semelhantes.

Em 1980, Tim Heckman^[13] identificou outra categoria de núcleos que se diferenciam das galáxias de Seyfert de três formas: Os núcleos de Seyfert e quasares apresentam radiação de alta ionização (exemplo: oxigênio duas vezes ionizado) ao passo que os LINERs apresentam baixa ionização (oxigênio neutro). Além disso, esses núcleos são, ainda, bem menos luminosos do que os núcleos de Seyfert sendo, às vezes, difíceis de serem identificados. Por fim eles são cerca de 20 vezes mais comuns do que as galáxias de Seyfert. Em especial, galáxias de massa elevada têm mais probabilidade de ter um LINER do que não ter^[14].

Acredita-se, hoje, que todas essas manifestações de atividade nuclear em galáxias são distintas manifestações de um fenômeno que, basicamente, pode ser entendido como um buraco negro supermassivo no centro de uma galáxia.

VII. O núcleo da Via Láctea – um monstro em casa!

Se muitas galáxias têm buracos negros supermassivos, qual é a situação da nossa galáxia, a Via Láctea? Por muito tempo se especulou que a rádio-fonte Sagittarius A* poderia estar associada a um buraco negro desse tipo. Essa rádio-fonte não é das mais luminosas, mas adquire um caráter especial quando se sabe que

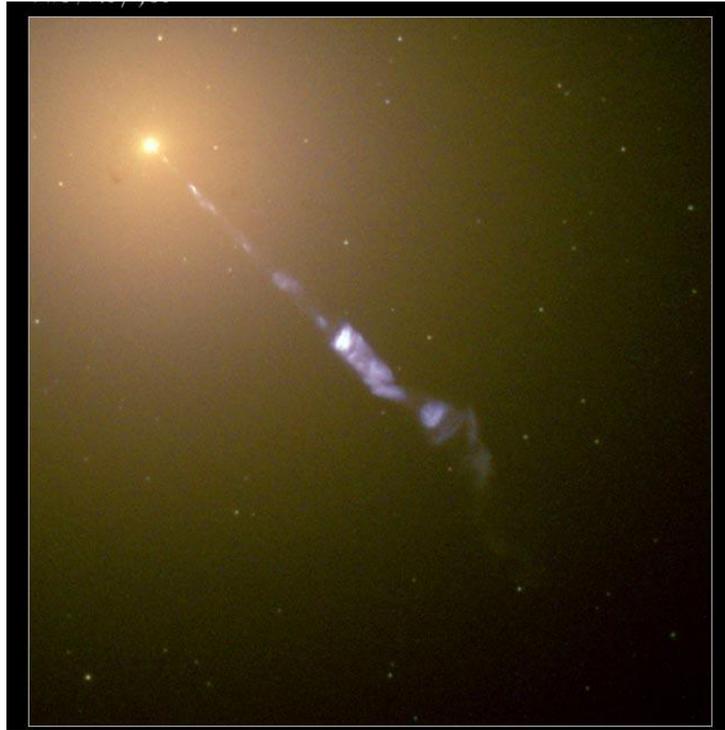
toda a Via Láctea gira em torno desse ponto. Esse ponto define, portanto, o núcleo da Via Láctea – o que ele teria de tão especial?



A galáxia NGC 1068, a mais clássica das galáxias de Seyfert. Seu núcleo brilhante mostra linhas atômicas em emissão muito alargadas – característica definidora dos núcleos ativos de galáxias.

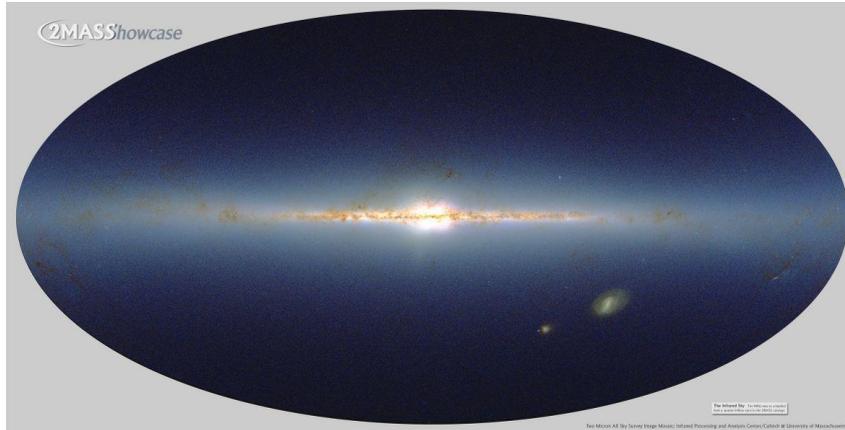
A questão não é de fácil solução. A primeira razão é que, no visível, o núcleo da Via Láctea é totalmente obscurecido pela poeira interestelar que existe no plano da galáxia. Mas mesmo em faixas do espectro eletromagnético nas quais a radiação não sofre espalhamento por poeira como em raios-x, infravermelho ou rádio, o núcleo emite muito pouco. A situação modificou-se nos anos de 1990, quando entraram em operação os telescópios de 8 a 10 metros de abertura que, combinados com novas técnicas de detectores no infravermelho, e, principalmente, da óptica adaptativa, permitiram mapear o movimento de estrelas individuais em grande detalhe. Foi assim que se descobriu que uma das estrelas mais próximas de Sgr A*, conhecida como S2 tem um período de 15 anos e uma órbita elíptica. A

fonte rádio Sgr A* ocupa um dos focos dessa elipse. Dessa forma, utilizando apenas as leis de Kepler e a gravitação de Newton, é possível medir a massa desse objeto com bastante precisão: 4 milhões de massas solares^[15].



Núcleo da galáxia M87; este LINER, que também é uma rádio-galáxia, emite um jato, visível também no óptico. O buraco negro central é um dos mais massivos que se conhece: 3.6 bilhões de massas solares.

Por outro lado, convém lembrar que esse objeto praticamente não emite radiação, sendo basicamente escuro. O que poderia explicar um objeto de massa tão elevada e escura? Existe um consenso entre os astrofísicos de que essa constatação é uma demonstração convincente da existência de buracos negros. Não existe outra configuração possível, com a física que conhecemos, que possa explicar esse objeto.



O mapa-mundi do céu, visto no infravermelho. A Via Láctea é claramente visível, mostrando o seu disco e o bojo central. O núcleo da galáxia está no centro do bojo.

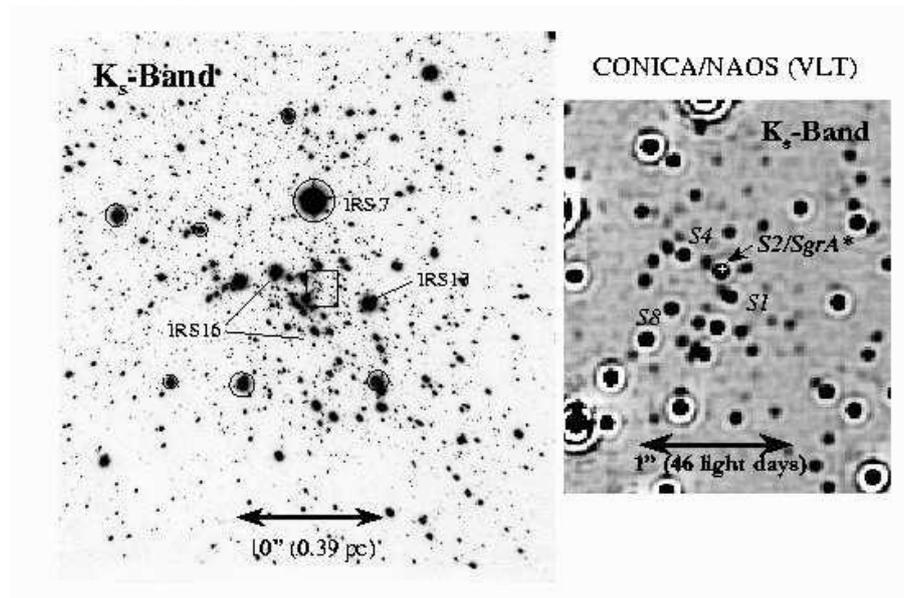
VIII. Sementes ou cemitérios de galáxias?

A existência de buracos negros supermassivos no centro das galáxias nos leva à pergunta óbvia: o que veio primeiro, a galáxia ou o buraco negro? Se o buraco negro veio primeiro, teria sido a semente da galáxia? Se a galáxia veio primeiro, o buraco negro funcionaria como cemitério? De uma certa maneira, a questão lembra o velho dilema do que veio primeiro, o ovo ou a galinha?

Uma pista veio com a descoberta de que a massa do buraco negro é proporcional à massa da galáxia. Estatisticamente, as massas dos buracos negros são, em geral, aproximadamente um milésimo das massas das galáxias. Como se pode entender uma correlação tão nítida? Aparentemente, a evolução da galáxia e a evolução do buraco negro estão relacionados. Um não evolui sem o outro. Em outras palavras, por primeiro não veio nem o ovo nem a galinha; para entender ambos, devemos interpretá-los em termos da evolução. Da mesma forma sem co-evolução entre galáxias e buracos negros, não poderíamos compreender a evolução de ambos.

O que se imagina é que os primeiros buracos negros se formaram a partir da evolução e do colapso de estrelas de grande massa. Esses buracos negros foram aumentando sua massa por dois processos: fusão sucessiva de distintos buracos negros e captura de gás da sua vizinhança. Durante as fases em que o buraco negro

captura gás, ele torna-se luminoso e pode ser observado a grandes distâncias. Quanto mais gás ele captura, maior sua luminosidade. Dependendo dessa luminosidade, nós o classificamos como um quasar, galáxia de Seyfert ou LINER. Quando ele para de capturar matéria, ele não tem mais brilho nenhum, como é o caso da Via Láctea. São os “quasares mortos”. Esses, no entanto, não são mortos para sempre. Poderá, sempre, surgir uma fonte de gás (explosão de uma estrela na vizinhança, por exemplo) e o objeto voltará a brilhar. Isso, naturalmente, poderá voltar a acontecer no caso da Via Láctea.



O aglomerado central de estrelas, IRS 16, no centro do bojo da Via Láctea, localizado na constelação do Sagitário. O retângulo central está ampliado à direita. Aqui a estrela S2 coincide com a fonte rádio Sgr A, considerada o centro cinemático da Via Láctea.*

IX. Massa e momento angular

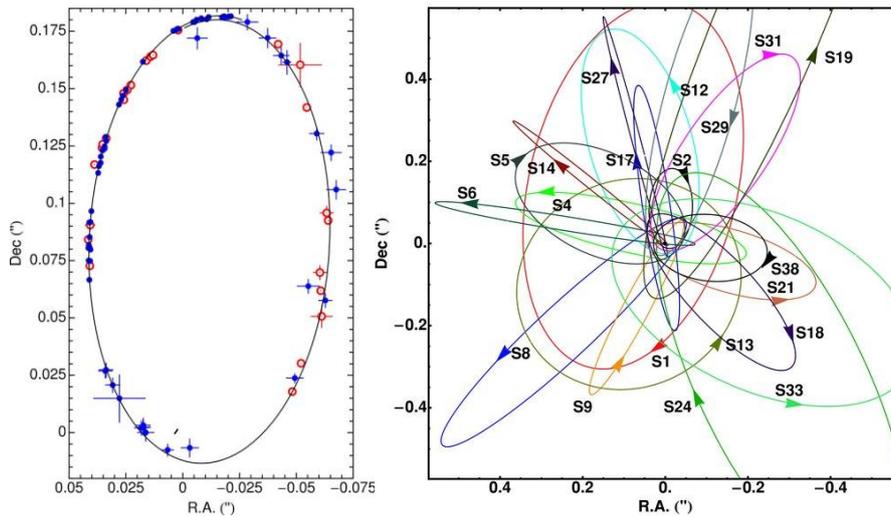
Afinal, quantos tipos de buracos negros existem na natureza? Vimos que conhecemos dois tipos, com base em observações astronômicas: os buracos negros estelares, frutos da evolução das estrelas de grande massa, e os buracos negros supermassivos, residentes nos núcleos das galáxias. Entre os 20 primeiros objetos descobertos em sistemas binários de estrelas, o de menor massa tem 3,8 vezes a

massa do Sol e o maior tem 15 vezes esse valor^[16]. Entre os 50 primeiros buracos negros supermassivos que tiveram suas massas medidas, a de menor valor foi de 1,7 milhões e o de maior valor, 3,9 bilhões de massas solares^[17]. Especula-se sobre a existência de buracos negros de massa intermediária, isto é, com massa entre mil e cem mil massas solares. Esses objetos provavelmente existem, porém sua detecção é bastante difícil por razões tecnológicas. É bastante difícil fazer um recenseamento preciso dos buracos negros, tanto dos estelares quanto os supermassivos, porque boa parte deles não emite nenhuma luz.

Com buracos negros tão massivos no centro das galáxias, poder-se-ia perguntar se eles não oferecem risco à Terra, já que sua gravidade é tão poderosa. A resposta é não. A gravidade de um buraco negro só é muito intensa na vizinhança muito próxima, a curtas distâncias. Na Terra, a força da gravidade exercida pelo Sol é 600 bilhões de vezes maior do que a exercida por qualquer buraco negro conhecido. Portanto, com relação a buracos negros, vivemos uma situação de risco zero. Durante algum tempo se especulou sobre a existência de microburacos negros, de massa muito pequena. Steven Hawking formulou uma teoria de radiação segundo a qual esse tipo de buracos negros emitiriam radiação e partículas^[18]. Trata-se de algo semelhante ao efeito túnel que produz a radioatividade nuclear. Mas isso só acontece em situação em que a escala é tão pequena que o princípio da incerteza de Heisenberg poderia determinar a saída de partículas de dentro do buraco negro. Isso faria o microburaco negro evaporar, com emissão de radiação e de partículas que poderiam ser detectadas. Essa detecção não ocorreu, mesmo com tecnologia disponível para isso. Portanto microburacos negros provavelmente não existem ou são extremamente raros. A “radiação de Hawking” também é prevista em buracos negros mais massivos, porém com intensidade tão baixa que provavelmente jamais a detectaremos.

Além da massa, o que mais pode caracterizar um buraco negro? Sabemos que ele tem três grandezas apenas: massa, momento angular e carga elétrica. Na prática, a carga elétrica deve ser tão baixa que provavelmente jamais a detectaremos. Essa suposição é baseada no fato de que um buraco negro está envolto em gás ionizado, que é um ótimo condutor de eletricidade. Como a força do campo elétrico é 1042 vezes mais intensa que a força gravitacional, a carga elétrica deve ser desprezível. Já com o momento angular, a história é outra. A massa que um buraco negro captura provém de um disco de acreção. Nesse disco o momento angular do gás é muito elevado e esse momento angular é depositado no buraco negro, aumentando o seu valor total. É, pois, de se esperar valores muito elevados. De fato, diversos buracos negros estelares tiveram seus momentos angulares medidos^[19] e eles são tão elevados que o buraco negro deve girar em torno do seu pró-

prio eixo com uma frequência de 1000 rotações por segundo^[20]. Também buracos negros supermassivos tiveram medidas de momento angular publicados^[21].



À esquerda, a órbita da estrela S2^[22]. Ela tem órbita elíptica, com período de 15 anos; SgrA* está no foco dessa elipse e tem massa de 4 milhões de massas solares^[15]. As observações vermelhas, com círculos abertos foram obtidas com o telescópio Keck, ao passo que os pontos azuis, com círculos fechados, foram obtidos com o VLT. À direita mostramos as órbitas previstas de todas as estrelas observadas na vizinhança do buraco negro central da Via Láctea, com base em extrapolação das observações já realizadas.

X. Conclusão

Parece uma contradição muito grande que os objetos mais luminosos do universo, os quasares, estejam associados a buracos negros que, por definição, são negros; isto é, não emitem radiação. A explicação reside no fato de que buracos negros podem capturar gás da sua vizinhança. Esse gás, ao migrar em direção ao buraco negro central, espirala em forma de disco, transformando sucessivamente sua energia potencial gravitacional em energia cinética, térmica e radioativa. Essa energia radioativa (fótons) escapa do disco antes que o gás atinja o raio de Schwarzschild.

Buracos negros foram, ao longo do século XX, evoluindo desde especulações teóricas até consolidação como objetos reais. Curiosamente, a confirmação definitiva da existência de um buraco negro de 4 milhões de massas solares no centro da Via Láctea só veio à luz no começo do século XXI. Também na primeira década deste século surgiram evidências de que a coevolução entre buracos negros supermassivos e galáxias deve ser a chave para explicar ambos. Eles se transformaram, então, de objetos exóticos em componentes essenciais para se entender a evolução das estrelas e das galáxias.

Referências

- [1] EINSTEIN, A. **Annals of Mathematics**, v. 40, p. 922, 1939.
- [2] CHANDRASEKHAR, S. **Astrophysical Journal**, v. 74, p. 81, 1931.
- [3] ZWICKY, F. **Physical Review**, v. 55, p. 726, 1939.
- [4] HEWISH, A. et al. **Nature**, v. 217, p. 709, 1968.
- [5] OPPENHEIMER, J. R.; VOLKOFF, G. **Physical Review**, v. 54, p. 540, 1939.
- [6] BOLTON, C. T. **Nature Physical Sciences**, v. 240, p. 614, 1972.
- [7] SHAKURA, N. I.; SUNYAEV, R. A. **Astronomy and Astrophysics**, v. 24, p. 337, 1973.
- [8] SCHMIDT, M. **Nature**, v. 197, p. 1040, 1963.
- [9] SALPETER, E. **Astrophysical Journal**, v. 140, p. 796, 1964.
- [10] ZEL'DOVICH, YA. B. **Soviet Physics – Doklady**, v. 9, p. 195, 1964.
- [11] LYNDEN-BELL, D. **Nature**, v. 223, p. 690, 1969.
- [12] SEYFERT, C. K. **Astrophysical Journal**, v. 97, p. 28, 1943.
- [13] HECKMAN, T. M. **Astronomy and Astrophysics**, v. 87, p. 152, 1980.
- [14] HO, L. C. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 46, p. 475, 2008.
- [15] SCHÖDEL, R. et al. **Nature**, v. 419, p. 494, 2002.

- [16] REMILLARD, R. A.; MCCLINTOCK, J. E. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 44, p. 49, 2006.
- [17] GÜLTEKIN, K. et al. **Astrophysical Journal**, v. 698, p. 198, 2009.
- [18] HAWKING, S. W. **Nature**, v. 248, p. 30, 1974.
- [19] MCCLINTOCK, J. E. et al. **AIPC – American Institute of Physics Conference Series**, v. 1248, p. 101, 2010.
- [20] MCCLINTOCK, J. E. et al. **Astrophysical Journal**, v. 652, p. 518, 2006.
- [21] MILLER, J. M. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 45, p. 441, 2007.
- [22] GILLESSEN, S. et al. **Astrophysical Journal**, v. 707, L114, 2009.