

BURACOS NEGROS NA NOSSA GALÁXIA

João Braga

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

C. P. 515, S. J. Campos, SP 12201-970

endereço eletrônico: braga@das.inpe.br

Os Buracos Negros Estelares

A busca pela comprovação da existência dos buracos negros estelares tem sido um dos maiores desafios da astrofísica neste final de século. Nos últimos anos, com o advento de vários experimentos espaciais extremamente sensíveis, surgiram evidências de que vários sistemas galácticos poderiam abrigar estes cadáveres estelares, singularidades do espaço-tempo previstas pela teoria da Relatividade Geral de Einstein.

Um buraco negro estelar é formado quando uma estrela de grande massa esgota seu combustível nuclear e implode sob a ação de sua própria força gravitacional. Quando a matéria, em queda livre e a um quarto da velocidade da luz, atinge densidades superiores às dos núcleos atômicos ($\sim 10^{14}$ g cm⁻³), as partes externas ricocheteiam nesta barreira nuclear e explodem, liberando uma quantidade de energia comparável à luminosidade de uma galáxia inteira (fenômeno conhecido como *supernova*). O caroço que sobra pode se tornar uma estrela de nêutrons ou um buraco negro, dependendo de sua massa ser menor ou maior, respectivamente, à massa-limite para a estabilidade das estrelas de nêutrons, por volta de $2,7 M_{\odot}$. Caso a massa do caroço ultrapasse este limite, nada mais detém o colapso gravitacional. A matéria colapsa inexoravelmente para um ponto de densidade infinita. Em torno deste ponto, forma-se uma região de propriedades físicas bizarras, que desafiam a intuição humana e estão longe de serem conhecidas completamente (veja, por exemplo, o excelente artigo de M. A. Abramowicz – 1993 – sobre o paradoxo da força centrífuga próximo a um buraco negro). A teoria da relatividade geral prevê que, dentro de um raio $R = 2GM/c^2$ (o raio de Schwarzschild), onde G é a constante

da gravitação universal, M é a massa do objeto, e c é a velocidade da luz, nada pode escapar deste objeto, nem mesmo a luz. Há uma perda total de comunicação desta região do espaço-tempo com o resto do universo. Por este motivo, a região esférica interior a este raio foi cunhada de "buraco negro" por John Archibald Wheeler em 1968, e a superfície que a delimita foi chamada de "horizonte de eventos" ou "superfície do buraco negro".

Além dos buracos negros estelares, são considerados em astrofísica os *buracos negros supermassivos* (com massas da ordem de dezenas de milhões a bilhões de massas solares), que estariam presentes nos núcleos das galáxias ativas e teriam sido formados por coalescência de um grande número de estrelas, e os *mini-buracos negros*, que, de acordo com as teorias do físico inglês Stephen Hawking e colaboradores, teriam sido formados por compressão de regiões altamente densas no universo primordial (veja o interessante artigo de S. Hawking - 1977 - sobre as propriedades termodinâmicas dos mini-buracos negros e suas interpretações à luz da mecânica quântica).

Como Caçar um Buraco Negro

Para se detectar um buraco negro, é preciso observar de alguma forma a dinâmica da matéria ao seu redor, já que, uma vez ultrapassado o horizonte de eventos, nenhuma informação em forma de radiação eletromagnética poderá atingir um observador externo.

Num sistema binário com acreção de matéria, uma maneira de inferir a presença de um buraco negro é medir as massas do sistema e verificar se a massa do objeto invisível ultrapassa o limite superior teórico para as estrelas de nêutrons, a última configuração estável da matéria no caminho para o colapso gravitacional total. Caso isto aconteça, e existam evidências de que o objeto seja compacto (como uma forte emissão de raios-X, por exemplo), o objeto só pode ser um buraco negro (se as teorias atuais estiverem corretas, e se, em particular, a teoria da relatividade geral puder ser aplicada a regiões do espaço-tempo de campo gravitacional intenso, o que nunca foi testado).

As leis de Kepler mostram que, num sistema estelar binário, pode-se determinar uma "função de massa" a partir de parâmetros pura-

mente observacionais:

$$f(M_1) = \frac{(M_1 \sin i)^3}{(M_1 + M_2)^2} = \frac{K^3 P (1 - e^2)^{3/2}}{2\pi G}$$

onde M_1 e M_2 são as massas dos objetos, i é o ângulo de inclinação da órbita binária em relação à linha de visada, P é o período orbital, K é a semi-amplitude da curva de velocidade radial da estrela companheira (objeto 2), e é a excentricidade da órbita. Os parâmetros do lado direito da equação acima podem ser medidos diretamente através de uma observação direta da estrela companheira. É fácil mostrar por esta equação que a função de massa é um limite inferior extremamente rígido para a massa do objeto compacto, ou seja, mesmo que não se faça *nenhuma* hipótese sobre a massa da companheira (mesmo que ela seja, por exemplo, uma pequena nuvem tênue de matéria) e sobre a orientação do sistema binário com respeito à linha de visada, a massa do objeto compacto tem que ser superior ao valor medido da função de massa. Como vamos ver, isto é um forte argumento para a existência de um buraco negro em pelo menos três sistemas binários galácticos.

A função de massa é um dos principais parâmetros a se considerar na caça aos buracos negros estelares em sistema binários, mas não o único. Uma das mais importantes assinaturas dos chamados "candidatos" a buraco negro é o perfil de seu espectro de raios-X. Em sistemas binários cerrados contendo um objeto colapsado, espera-se que haja a formação de um disco de matéria em torno do objeto compacto. Este disco é formado quando a estrela companheira preenche seu *lobo de Roche* (a superfície equipotencial que toca o chamado *ponto interno de Lagrange*, no qual as atrações gravitacionais dos dois astros se igualam) e despeja matéria sobre a estrela primária. Esta matéria, devido ao seu momento angular, não cai diretamente sobre o objeto compacto, mas espirala lentamente em torno dele formando um disco. A temperatura pode se elevar bastante nas partes internas do disco, o que faz com que ele emita na faixa de raios-X do espectro eletromagnético. A observação de raios-X é, portanto, em geral, uma indicação da presença de um objeto compacto num sistema binário.

Todos os sistemas que contém candidatos a buraco negro mostram, além de uma intensa emissão em raios-X moles, uma cauda espectral

extendo-se para a faixa de raios-X duros e até mesmo raios- γ de baixa energia. Embora não exista ainda uma teoria bem estabelecida que explique porque o disco de acreção que se forma em torno de um buraco negro deva emitir nessas energias e o mesmo não possa ocorrer com uma estrela de nêutrons, esta cauda espectral em raios-X duros aparece em todos os bons candidatos, e passou a ser considerada como uma de suas importantes características. Uma idéia seria a de que as regiões mais internas do disco, onde a temperatura é maior (e portanto emitiriam em energias maiores), não seriam termalizadas por fótons térmicos (~ 1 keV para o caso de estrelas de nêutrons) vindos da superfície da estrela, já que os buracos negros não possuem superfície sólida de onde estes fótons pudessem ser emitidos.

No caso de estrelas de nêutrons, existem várias particularidades na emissão de raios-X que podem ser facilmente identificáveis. Uma pulsação periódica em raios-X indica, por exemplo, que provavelmente existe um forte campo magnético, aproximadamente dipolar, desalinhado com o eixo de rotação do objeto, que afunila a matéria em acreção, de forma que ela passa a cair preferencialmente sobre as calotas polares da estrela. Isto faz com que se observem pulsos de raios-X vindos do objeto cada vez que um dos pólos magnéticos passa pela linha de visada. Isto não pode ocorrer em buracos negros, pois estes não podem possuir campo magnético (isto é uma consequência de um teorema da física dos buracos negros que diz que "buracos negros não têm cabelos"). Ocasionalmente, as fontes de raios-X galácticas apresentam súbitos aumentos de intensidade ("bursts"), que são indicativos de material caindo e explodindo sobre a superfície de uma estrela de nêutrons. Novamente, isto não pode ocorrer em buracos negros, uma vez que esses não têm uma superfície sólida onde o material possa cair; uma vez ultrapassado o horizonte de eventos, o material desaparece para sempre. Portanto, existem vários modos de descartar candidatos a buracos negros com base nas características observacionais do sistema binário hospedeiro.

Candidatos a Buracos Negros

A seguir é feito um levantamento dos principais candidatos a buracos negros na nossa Galáxia e são apresentados os principais argumentos que os qualificam como *bons* ou *não-tão-bons* candidatos.

V404 Cygni

Este objeto foi descoberto pelo satélite japonês GINGA em 1989 como uma fonte transiente de raios-X (denominada GS 2023+338). As linhas espectrais em absorção na região da linha H α do espectro da contrapartida óptica (medido em estado quiescente) foi identificado como sendo característico de uma anã G9 (exceto pela presença de uma linha do Li), e o período orbital medido foi de 5,7 horas. A função de massa medida a partir destas observações é igual a $6 M_{\odot}$. Este valor é pelo menos o dobro do maior valor aceito para uma estrela de nêutrons estável. Logo, mesmo que a companheira seja de massa muito menor do que o valor estimado pelas observações ópticas, o objeto compacto tem que ser um buraco negro, o que faz com que este objeto seja considerado por muitos como o melhor candidato a buraco negro já encontrado. O valor da massa do buraco negro deve ser, na verdade, entre 8 e $15 M_{\odot}$, dependendo do ângulo de inclinação do sistema, e levando-se em conta a massa da estrela companheira G9V ($\sim 1 M_{\odot}$). Um ponto fraco na candidatura de V404 Cyg a buraco negro está no fato de que a identificação óptica não é absolutamente certa, e existem controvérsias quanto ao verdadeiro período orbital.

A0620-00

Esta nova de raios-X, descoberta pelos astrônomos americanos Ronald Remillard e Jeffrey McClintock, é um dos melhores candidatos, pois, além de possuir uma função de massa de $3,2 M_{\odot}$, a identificação da secundária é inequívoca, pois ambos os objetos (primário e secundário) apresentaram "outbursts" simultâneos em raios-X e no óptico, respectivamente. A estrela visível, uma anã K5 ($M \sim 0,7 M_{\odot}$), possui uma velocidade radial máxima de 454 km/s, e o período orbital do sistema é de 7,8 horas. A ausência de eclipses no sistema impõe uma restrição

ao ângulo de inclinação tal que $i < 50^\circ$. Estes parâmetros indicam uma massa $\gtrsim 7,3 M_\odot$ para o buraco negro. A única desvantagem deste candidato em relação a V404 Cyg é o valor da função de massa, mas o fato do objeto visível ser muito melhor conhecido, combinado com a identificação óptica inequívoca, faz com que A0620-00 seja o buraco negro favorito de muitos astrofísicos.

Cygnus X-1

Cyg X-1 foi durante muito tempo o principal candidato a buraco negro, tendo inclusive aparecido em letra de música de rock. Trata-se de uma binária de raios-X de alta massa, e é um dos dois objetos mais brilhantes do céu em raios-X duros (o outro é a nebulosa do Caranguejo com seu pulsar de 33 ms). O objeto visível é uma estrela supergigante O9.7 I (HDE 226868), de $33 M_\odot$ e magnitude $V = 9$. A curva de velocidade radial mostra claramente uma semiamplitude de 75,2 km/s e um período de 5,6 dias, o que produz uma função de massa de $0,25 M_\odot$. A ausência de eclipses no sistema impõe que $i \lesssim 65^\circ$. Outros métodos fornecem $i \sim 33^\circ$, o que acarreta uma massa de $\sim 16 M_\odot$ para o objeto compacto. Embora esta massa seja bastante superior ao limite para estrelas de nêutrons, existem vários problemas na candidatura de Cyg X-1 a buraco negro. A identificação óptica, ao contrário do caso de A0620-00, é meramente posicional, não existindo nenhuma medida de eventos simultâneos que a confirme. A função de massa, por si só, não garante que o objeto compacto seja nem mesmo uma estrela de nêutrons. Além disso, a massa da estrela secundária pode ser menor por um fator 2 ou 3 do que o indicado pela sua temperatura e luminosidade, como parece acontecer na maioria das binárias de raios-X massivas e é previsto em alguns modelos de evolução estelar em sistemas binários. Cyg X-1, portanto, embora ainda considerado como um bom candidato a buraco negro, vai ficando para trás na medida em objetos mais conspícuos vão tomando seu lugar.

Como Cyg X-1 permaneceu como o único candidato sério a buraco negro por mais de uma década, muitas de suas propriedades peculiares passaram a ser consideradas como assinaturas de buracos negros, tais como: espectro de raios-X ultra-mole com cauda em raios-X duros; variabilidade rápida "flickering" (~ 1 s) em raios-X; e estados

alto/baixo de fluxo de raios-X com características espectrais diferentes. Embora a presença destas características não possa ser interpretada como uma garantia da presença de um buraco negro, ela é sugestiva, já que a maioria dos outros candidatos apresentam muitas delas.

LMCX-3

LMCX-3, a terceira fonte de raios-X descoberta na Grande Nuvem de Magalhães, é também uma binária de raios-X massiva, formada por uma estrela anã B3 ($V=17$), de $6 M_{\odot}$, e um objeto compacto que gira ao seu redor a cada 1,7 dias. A semi-amplitude de sua curva de velocidade radial (235 km/s), fornece uma função de massa de $2,3 M_{\odot}$ para o sistema. A identificação do objeto visível com a fonte de raios-X é bem estabelecida pela posição precisa obtida pelo *Observatório Einstein*. A ausência de eclipses indica que $i \leq 70^{\circ}$, e portanto a massa do objeto compacto deve ser $> 9 M_{\odot}$. Alguns modelos que consideram as particularidades do espectro de raios-X produzido pelo disco de acreção em torno do objeto compacto (cuja borda interna, para um buraco negro, tem que estar situada num raio no mínimo 3 vezes maior do que o raio de Schwarzschild) fornecem uma massa de $5 M_{\odot}$ para LMCX-1, e mostram que a componente ultra-mole do espectro é consistente com um disco de acreção espesso em torno de um buraco negro.

1E1740.7-2942

Este objeto, até então uma obscura fonte de raios-X do catálogo do Observatório *Einstein* (descoberta por Paul Hertz e Jonathan Grindlay em 1984), próxima ao Centro Galáctico (CG), ganhou súbita notoriedade quando os primeiros imageadores de radiação de altas energias revelaram que este era, de longe, o objeto mais brilhante em raios-X duros na região do CG. Além disso, o telescópio imageador SIGMA, a bordo do satélite russo GRANAT, mediu uma intensa linha de raios- γ vinda deste objeto, centrada na energia de 511 mil elétron-volts (keV), que corresponde à energia de repouso do elétron. Esta linha é produzida quando um elétron e sua antipartícula, o pósitron, aniquilam-se mutuamente e dão origem a dois fótons de 511 keV. Esta

emissão tinha sido observada algumas vezes na década de 70, vinda da região do CG, e reapareceu em 1988. A identificação da fonte da linha de 511 keV com 1E1740.7–2942 fez com que este objeto fosse apelidado de “O Grande Aniquilador”. Além desta linha, o espectro de raios-X de 1E1740.7–2942 assemelha-se fortemente ao de Cyg X-1, apresentando emissão intensa até várias centenas de keV e diferentes estados espectrais. A inexistência, até o momento, de uma contrapartida óptica, apesar da grande procura, indica que o objeto deve ser isolado. Portanto, não existem estimativas da massa do possível buraco negro, já que ainda não foi possível obter a função de massa. Em rádio, 1E1740.7–2942 aparece como uma fonte pontual variável com dois jatos simétricos, estendendo-se até ~ 1 pc de distância, o que lhe dá a aparência de um quasar em miniatura.

Vários autores têm proposto que a produção de pósitrons em quantidades compatíveis com o fluxo observado da linha de aniquilação, supondo que a fonte esteja no CG (~ 8 kpc de distância), requer a presença de um buraco negro de pequena massa ($\sim 1 - 1000 M_{\odot}$), que estaria capturando matéria de uma nuvem molecular vizinha. Além disso, a similaridade do espectro de 1E1740.7–2942 com Cyg X-1 e a sua aparência de micro-quasar sugerem fortemente que este objeto pertença a uma nova classe: a dos buracos negros estelares isolados. Outros objetos com características semelhantes têm sido propostos como membros desta classe.

Nova Musca 1991

Em janeiro de 1991, o satélite japonês GINGA e o detector de raios-X WATCH no satélite GRANAT descobriram uma forte emissão de raios-X e raios- γ vinda de um objeto na constelação de MUSCA (fonte GINGA GS 1124-68). Este objeto permaneceu como uma das mais brilhantes fontes de raios-X do céu por várias semanas. Seu espectro apresentava uma emissão extremamente intensa em raios-X moles e uma cauda espectral em raios-X duros. Observada posteriormente pelo imageador SIGMA, Nova Musca 1991 apresentou uma linha espectral em ~ 500 keV, tornando-a o primeiro transiente de raios-X moles a apresentar uma linha de raios- γ . Estas características espectrais, interpretando a linha como sendo devida à aniquilação de pósitrons, já

fariam de Nova Musca 1991 um forte candidato a buraco negro com base no que foi discutido para 1E 1740.7–2942. No entanto, assim como no caso de A0620-00, a nova de raios-X ocorreu simultaneamente a uma nova óptica de magnitude $V \sim 13$, fazendo com que a identificação óptica seja inequívoca. Medidas feitas pelos astrofísicos Ronald Remillard (MIT), Jeffrey McClintock (Harvard) e Charles Bailyn (Yale), usando o telescópio de 4 m de Cerro Tololo (Chile) 15 meses depois da ocorrência dos “outbursts”, identificaram o objeto com uma estrela anã do tipo K (entre K0V e K4V) e mediram a função de massa, a partir de uma curva de velocidade radial de semi-amplitude 409 km/s e período de 10.4 horas. O valor encontrado foi de $3.1 M_{\odot}$, mostrando que o limite inferior para a massa do objeto compacto está acima do limite máximo para estrelas de nêutrons. Portanto, Nova Musca 1991 é um dos mais fortes candidatos atuais a buraco negro, visto que apresenta todas as propriedades consideradas até o momento como assinaturas da presença de um buraco negro num sistema binário.

Conclusão

Vemos que, apesar dos buracos negros, por definição, não poderem ser observados diretamente, existem diversas evidências de que eles realmente existem na Galáxia. Outros candidatos, além dos discutidos acima, poderiam ser mencionados: as binárias de raios-X LMCX-1 (massiva) e GX 339-4 (baixa massa), que apresentam caudas espectrais em raios-X duros e variações quase-periódicas (QPOs) em raios-X (GX 339-4 também apresenta “flickering”), mas cujas identificações ópticas são duvidosas e não têm período orbital medido; a fonte GRS 1758-258 no Centro Galáctico, descoberta pelo GRANAT, que tem características semelhantes à 1E 1740.7–2942 e portanto pertenceria à classe dos buracos negros isolados; e CAL 87 \equiv 0547-71, uma fonte na direção da Grande Nuvem de Magalhães, para a qual observações ópticas do disco de acreção em torno do objeto compacto sugerem uma massa $\gtrsim 4 M_{\odot}$ para o buraco negro.

Todos estes objetos necessitam de mais observações para que fiquem realmente estabelecidos como bons candidatos a buracos negros