



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Evolução Estelar II

Ast-202-3

Aula 9

Buracos negros

Credit: NASA, ESA, P. Oesch (University of Geneva),
and M. Montes (University of New South Wales)

Carlos Alexandre Wuensche
INPE Divisão de Astrofísica
ca.wuensche@inpe.br



Buracos negros

- ☑ Conceito pensado por John Mitchell (1724–1793), padre e astrônomo amador inglês, que considerou que fótons deveriam ser influenciados pela gravidade, com base na teoria corpuscular da luz e na teoria de gravitação de Newton.
- ☑ A derivação Newtoniana para o raio de uma estrela cuja velocidade de escape = c é dado por $R=2GM/c^2$!
- ☑ R. Oppenheimer e H. Snyder descreveram, em 1939, o processo de colapso gravitacional de uma estrela massiva que esgotou sua fonte de energia nuclear.
- ☑ Termo cunhado por J. A. Wheeler (1968)

- ☑ **Raio de Schwarzschild:** raio limite em que a informação física no “interior” do buraco negro não é transferida para “fora”

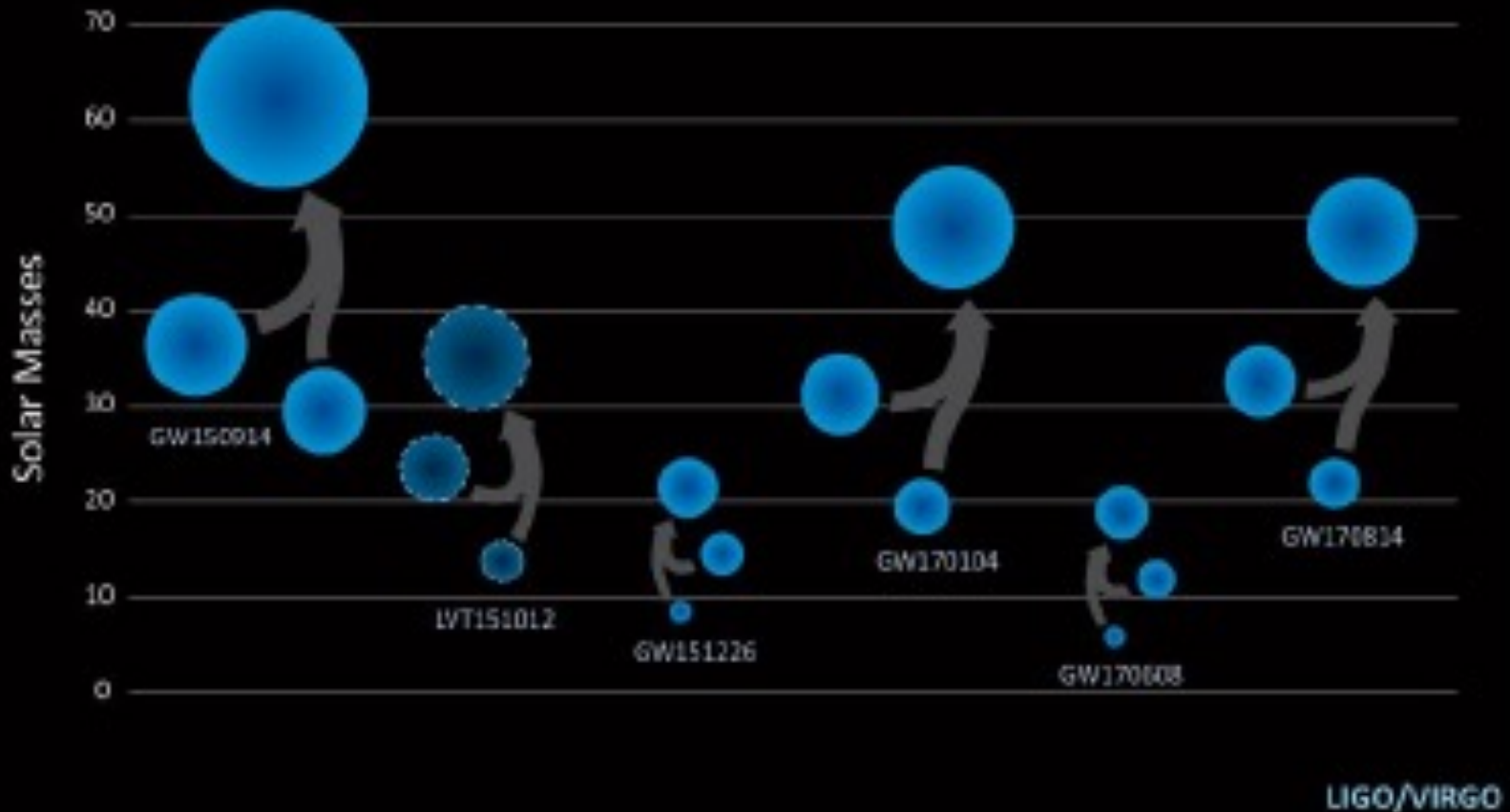
$$R_S = 2GM/c^2$$

- ☑ Coincidentemente, o mesmo valor obtido na derivação Newtoniana
- ☑ Nesse caso, a luz “é congelada”. Fazendo $ds=0$ na expressão da métrica de Schwarzschild, podemos calcular a velocidade de um fóton viajando nesse sistema de coordenadas:

$$ds^2 = (cdt\sqrt{1 - 2GM/rc^2})^2 - \left(\frac{dr}{\sqrt{1 - 2GM/rc^2}}\right)^2 - (rd\theta)^2 - (r\sin\theta d\phi)^2$$

$$\frac{dr}{dt} = c\left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right) = c\left(1 - \frac{R_S}{r}\right)$$

Black Holes of Known Mass



Credito: LIGO/NSF/Caltech/SSU Aurore Simmonet.



- ☑ **Estelares:** provenientes de colapso de estrelas massivas ($3 < M < 15$). Processos típicos de evolução estelar
- ☑ **Massa intermediária (IMBH, em inglês):** evidências a partir de observações de fontes de raios X ultraluminosas, vistas pelos satélites Chandra e XMM. Provavelmente formados no interior (centro?) de aglomerados globulares e galáxias anãs, por fusão. $100 < M < 10^3 - 10^4$
- ☑ **Supermassivos:** presentes no centro da maioria das galáxias ($10^5 < M < 10^9$). Processo de formação desconhecido, associado a várias das propriedades “macro” das galáxias observadas
- ☑ **Primordiais:** *acredita-se* que podem ter sido formados nos primeiros instantes do Universo ($10^{-8} \text{ kg} < M < 10^5$)



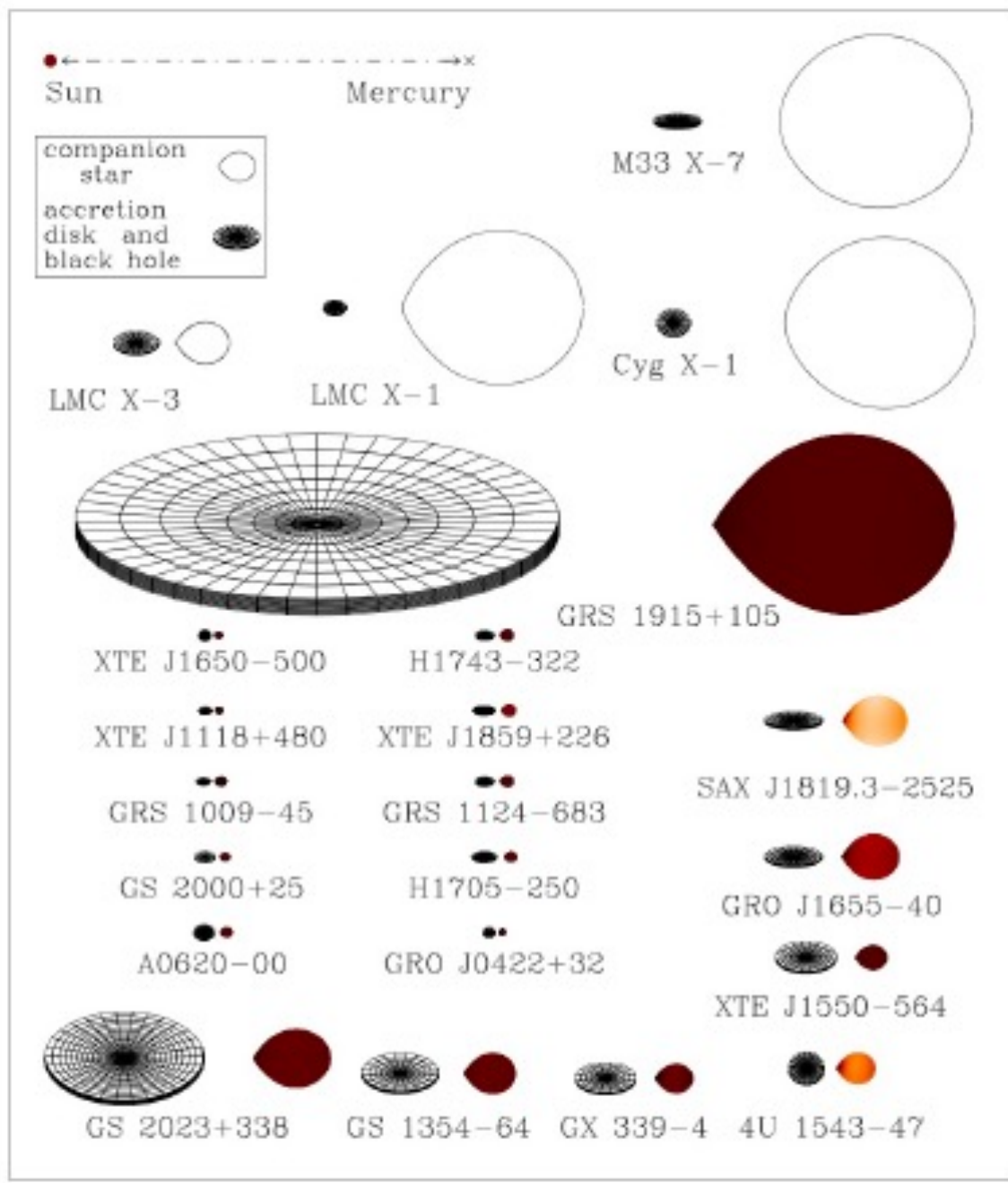
- ✓ A emissão de ondas gravitacionais durante o colapso final “suaviza” as assimetrias e irregularidades da estrutura interna da progenitora, de forma que o buraco negro é sempre esfericamente simétrico
- ✓ Descrição das propriedades de um buraco negro em função das propriedades “finais”: carga elétrica q , massa M e momento angular L
- ✓ Limite superior para o momento angular L

$$L_{max} = \frac{GM}{c^2}$$

- ✓ Caso o momento angular excedesse este valor, não haveria horizonte de eventos e poderíamos ver uma singularidade nua, violando a chamada “Lei da Censura Cósmica”

☑ Os candidatos estelares

- ✓ A melhor e mais confiável forma de estimar a presença é através das propriedades de sistemas binários
- ✓ Produção de raios-X em sistemas binários próximos é uma boa pista...
- ✓ “Candidatos famosos”: Cignus X-1, LMC X-3, V616 Mon (X A 0620-00), V404 Cygni





- ☑ O horizonte de eventos de um buraco negro nunca decresce, exceto...
- ☑ Por produção de pares (partículas virtuais) na borda do horizonte de eventos faz com que a massa total do BN seja reduzida por m_x , em que m_x é a massa de repouso da partícula.
- ☑ Efeito "observável" – emissão de radiação pelo BN, visto por um observador distante => energia gravitacional transformada em radiação => partícula de um par XX'
- ☑ Idéia de S. Hawking (1974) => "evaporação de BN"

- ✓ Tempo de “evaporação”:

$$t_{evap} = 2560\pi^2 \left(\frac{2GM}{c^2}\right)^2 \left(\frac{M}{h}\right)$$
$$\approx 2 \times 10^{67} \left(\frac{M}{M_{\odot}}\right)^3 \text{ anos}$$

- ✓ Para buracos negros estelares esse tempo é irrelevante, mas para BN primordiais (massas da ordem de 10^{11} kg) o tempo de evaporação seria ~ 13 bilhões de anos...
- ✓ O decaimento de um BN dessa ordem produziria raios gama de ~ 100 MeV e uma cascata de partículas elementares que, em seguida, também decairiam em mais radiação de alta energia.
- ✓ Eventos como esse são aleatórios e ainda não foram observados, mas certamente seriam vistos caso ocorressem na linha de visada dos satélites astrofísicos operando hoje.
- ✓ Resultados negativos tem como consequência que não deve haver mais do que 200 BN primordiais com a massa $\sim 10^{11}$ kg/(a.l.)³



FIM DA AULA 9