

Ondas Gravitacionais – Buracos Negros Supermassivos

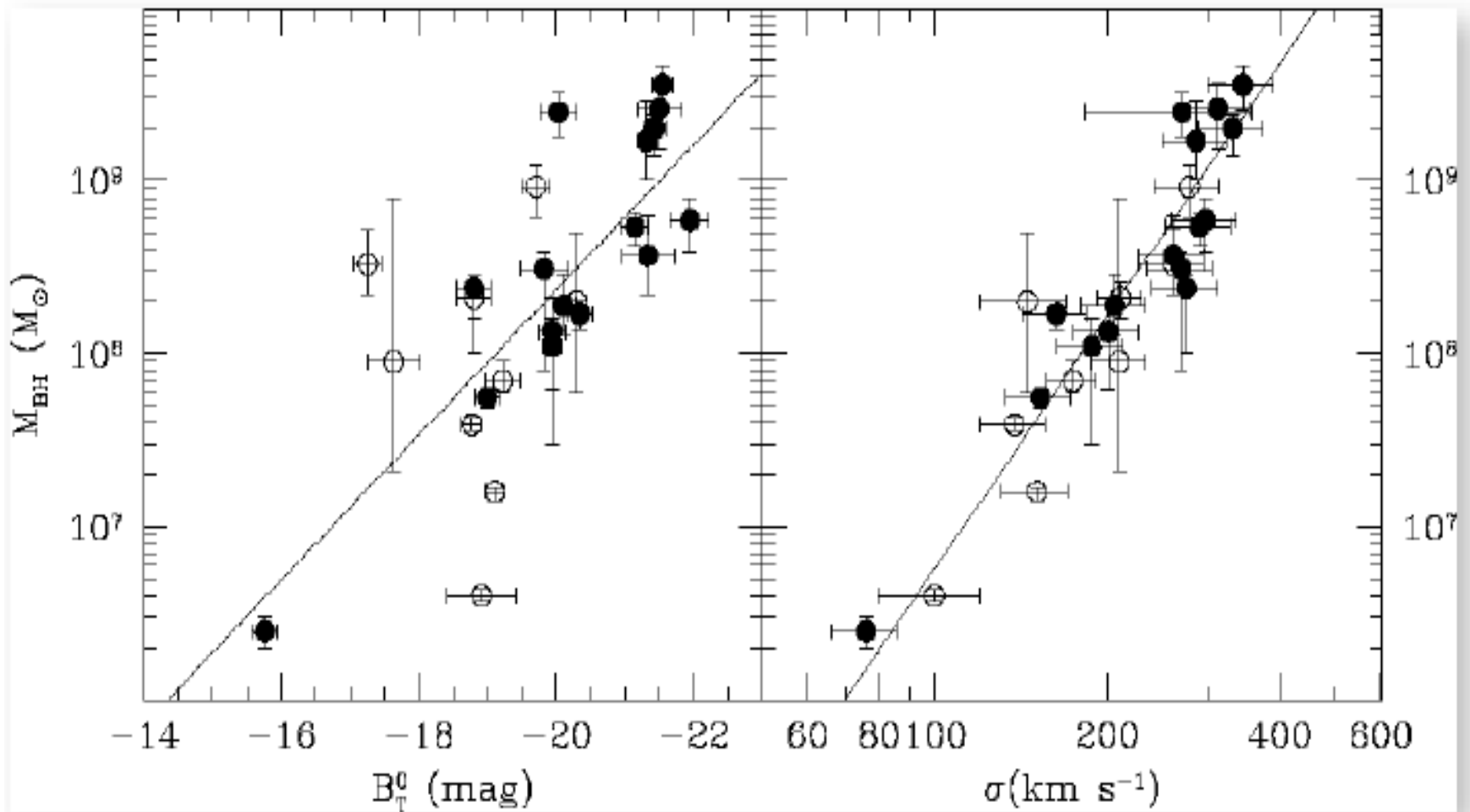
Oswaldo Duarte Miranda
mailto:oswaldo@das.inpe.br



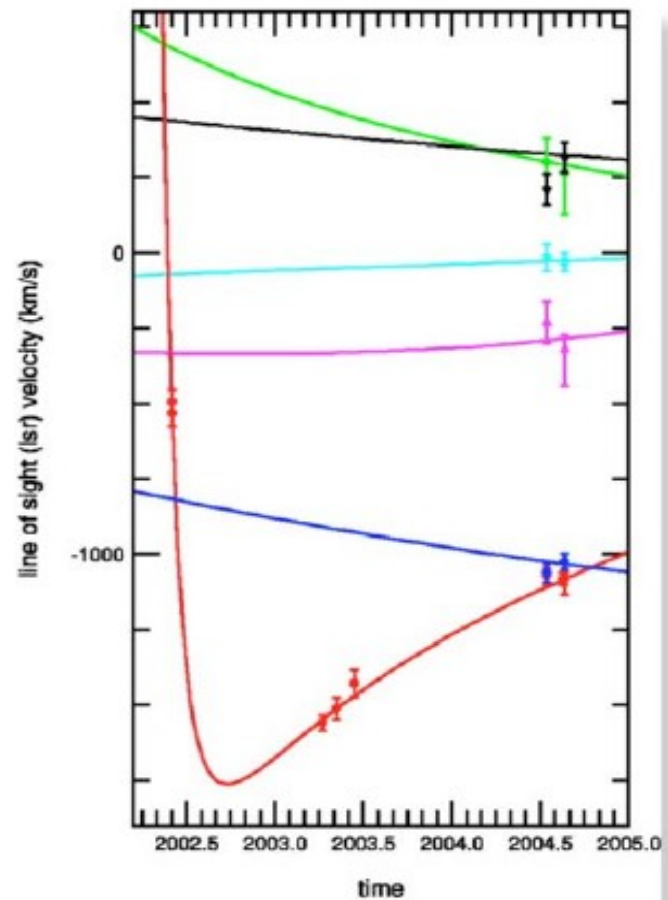
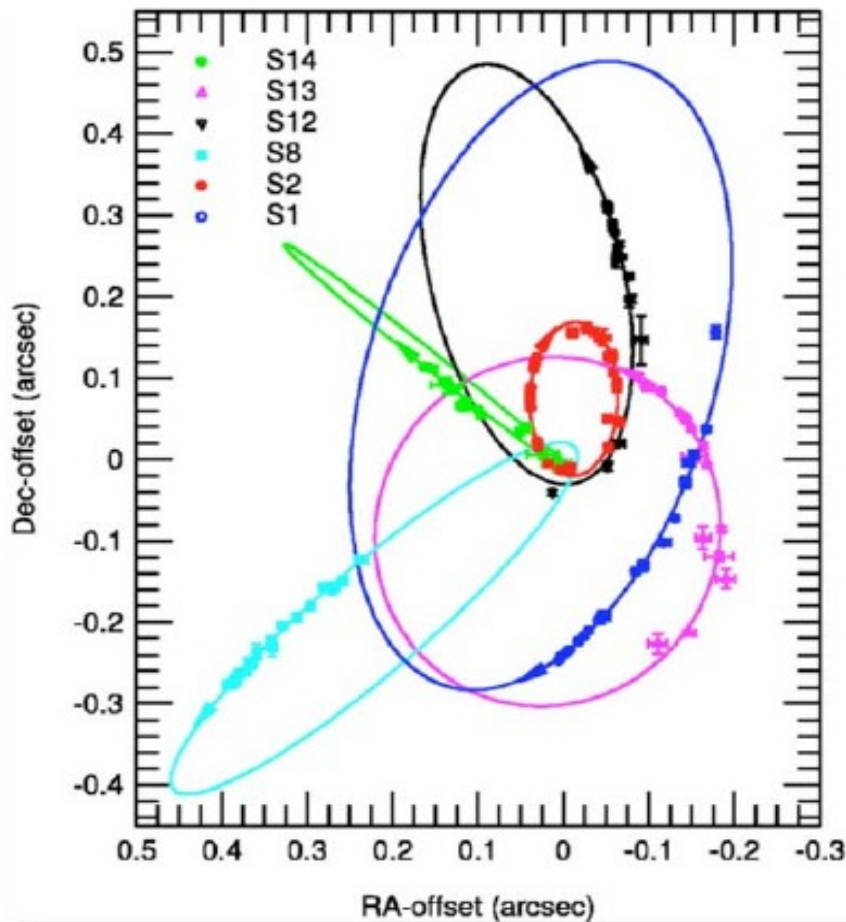
Campos do Jordão – 09 de fevereiro de 2009

Evidências de BNSMs em Núcleos Galácticos

- Foram primeiro propostos nos anos 60 (Salpeter 1964; Zel'Dovich & Novikov 1964) para explicar a luminosidade dos recém descobertos quasares.
- “Refinamentos” dessa proposta tornaram-se a explicação geralmente aceita para explicar as emissões dos núcleos ativos (AGN; Krolik 1999).
- Discos gasosos ao redor de BN em galáxias ativas têm luminosidades próximas do limite de Eddington (Cohen et al 2006).
- Observatório de raios-X Chandra detectou $\sim 10^4$ núcleos ativos em cada grau quadrado do céu (Brandt & Hasinger 2005).



- Correlação entre a massa do BN e a luminosidade da galáxia hospedeira (esq.) e entre M_{BH} e a velocidade de dispersão do bojo da hospedeira (Ferrarese & Ford 2005).
- Símbolos cheios – elípticas ; símbolos vazios – espirais e lenticulares.



- As órbitas no céu e velocidades radiais medidas para 6 estrelas próximas do centro da Via-Láctea.
- Nos seus periastros, estrelas S2 e S14 passam dentro de 100 UA ou $\sim 1300xR_s$ do BNSM
- $M_{\text{BH}} = 4 \times 10^6 M_{\text{sun}}$ (Eisenhauer et al. 2005).

- Através da cinemática de gás e estrelas nos núcleos de galáxias próximas é possível estimar a densidade espacial de BNs locais. Isso resulta em (Tundo et al. 2006):

$$\rho_{\bullet} = 2.5 \times 10^5 M_{\odot} \text{ Mpc}^{-3}$$

- Soltan (1982) sugeriu que se a densidade de radiação total emitida por uma AGN fôsse produzida por acreção de matéria então haveria um incremento da densidade de massa de BNSMs dado por:

$$\Delta\rho_{\bullet} \approx 3.5 \times 10^5 \epsilon_{0.1}^{-1} M_{\odot} \text{ Mpc}^{-3}$$

- A correlação (mostrada no slide 3) entre a massa do BN no núcleo de galáxias e a dispersão de velocidades (que mede a profundidade do seu poço de potencial) mostram que através da “história cósmica”, o crescimento de galáxias e seus BNs tem sido fortemente acoplada (Tremaine et al. 2002).

- Acrescência de matéria, captura estelar, fusões são eventos na galáxia que “definem” as taxas de crescimento de BNs.
- Por outro lado, jatos e radiação gerados a partir do disco de acreção de um BN podem remover o gás da galáxia alterando a sua formação estelar.



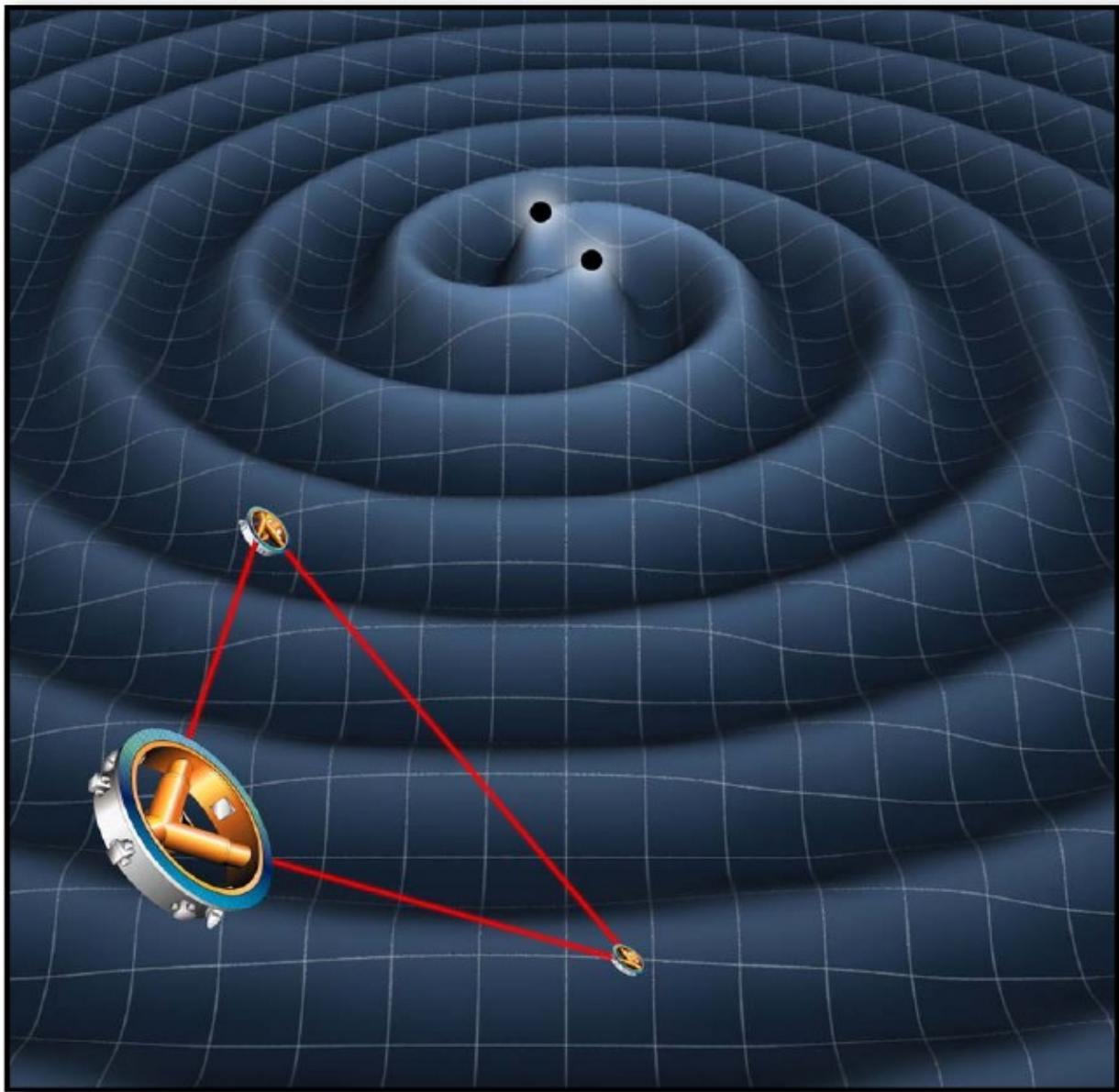
Instantâneos de uma simulação de colisão de duas galáxias espirais (“tipo” Via-Láctea) contendo BNs sementes de $10^4 M_{\text{sun}}$ nos seus centros.

As imagens mostram apenas o gás das galáxias.

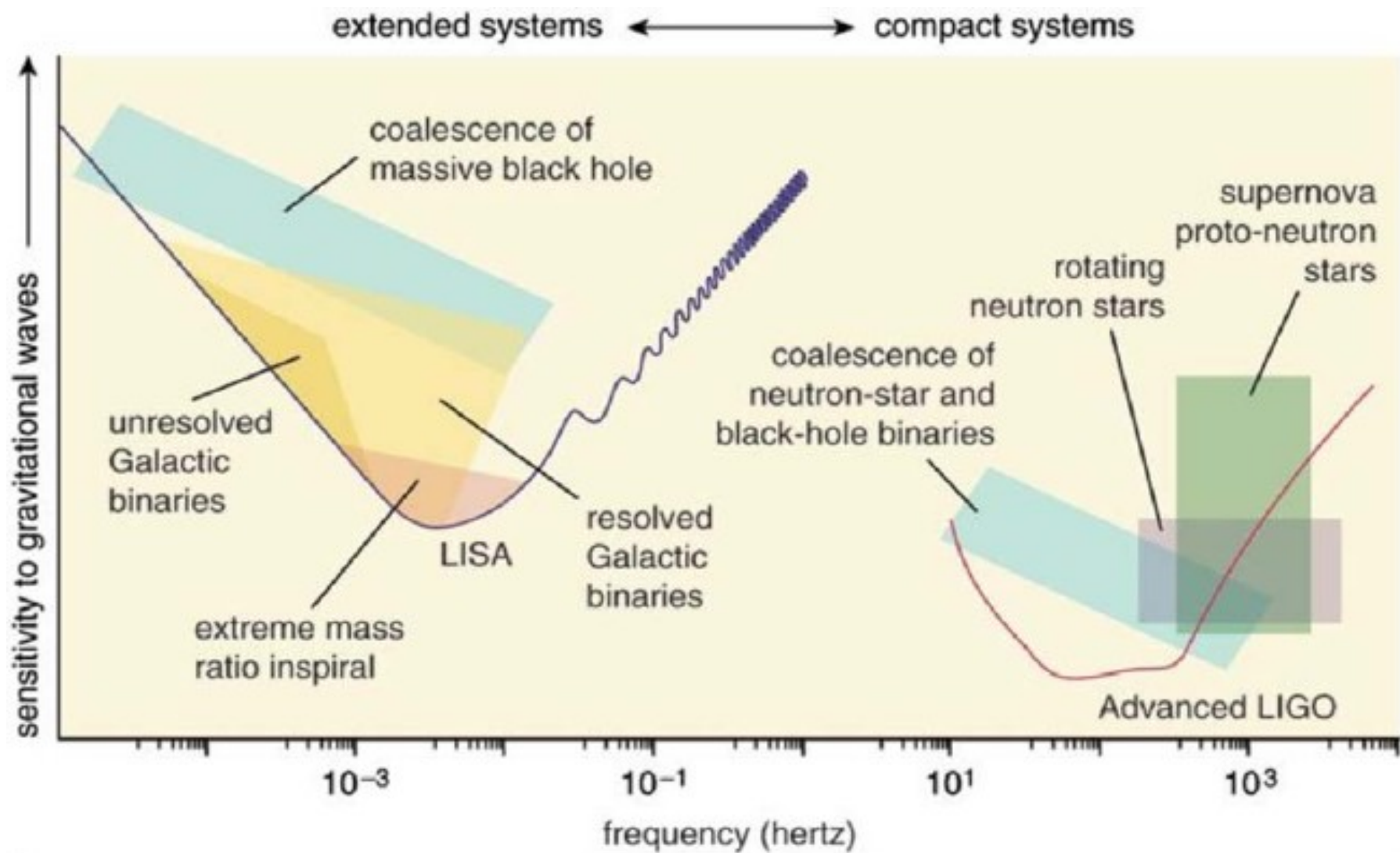
A colisão impele tanto a formação estelar quanto a acrescência de gás pelos BNs.

O resultado final é uma galáxia pobre em gás com um BNSM no centro (Di Matteo et al. 2005).

Particularmente: Fusões de BNs e acrescência de BNSM estão entre os principais objetos que podem ser estudados pelo “Interferômetro Espacial LISA”.



Projeto LISA – Laser Interferometer Space Antenna – lançamento previsto para 2018



O Formalismo Press-Schechter – Modelo Hierárquico para Formação das Estruturas do Universo

- Essência do “modelo hierárquico” aparece no trabalho de Neyman, Scott & Shane (1952): “Galáxias formam em aglomerados. A distribuição das galáxias num aglomerado pode ser descrita por uma função probabilística”. Os centros dos aglomerados são correlacionados”.
- Substituindo “aglomerados” por “halos” tem-se uma razoável descrição qualitativa do chamado “modelo hierárquico” onde halos são formados como resultado do crescimento e evolução não linear de perturbações de densidade produzidas no Universo primordial.
- Press & Schechter derivaram heurísticamente a função de massa de objetos virializados em 1974:

- Halos são concentrações de massa que deixam o regime linear quando o limiar $\bar{\delta}_c$ é atingido.
- Dado o espectro de potência e a função janela é direto calcular a função de massa dos halos como uma função da massa e do redshift.
- A exata definição da “função de massa” - integrada versus forma diferencial; contagem versus densidade numérica varia largamente na literatura.
- Para caracterizar diferentes fits, foi introduzida a função $f(\sigma, z)$ (Jenkins et al. 2001) definida como “a fração da massa total que é incorporada em halos”:

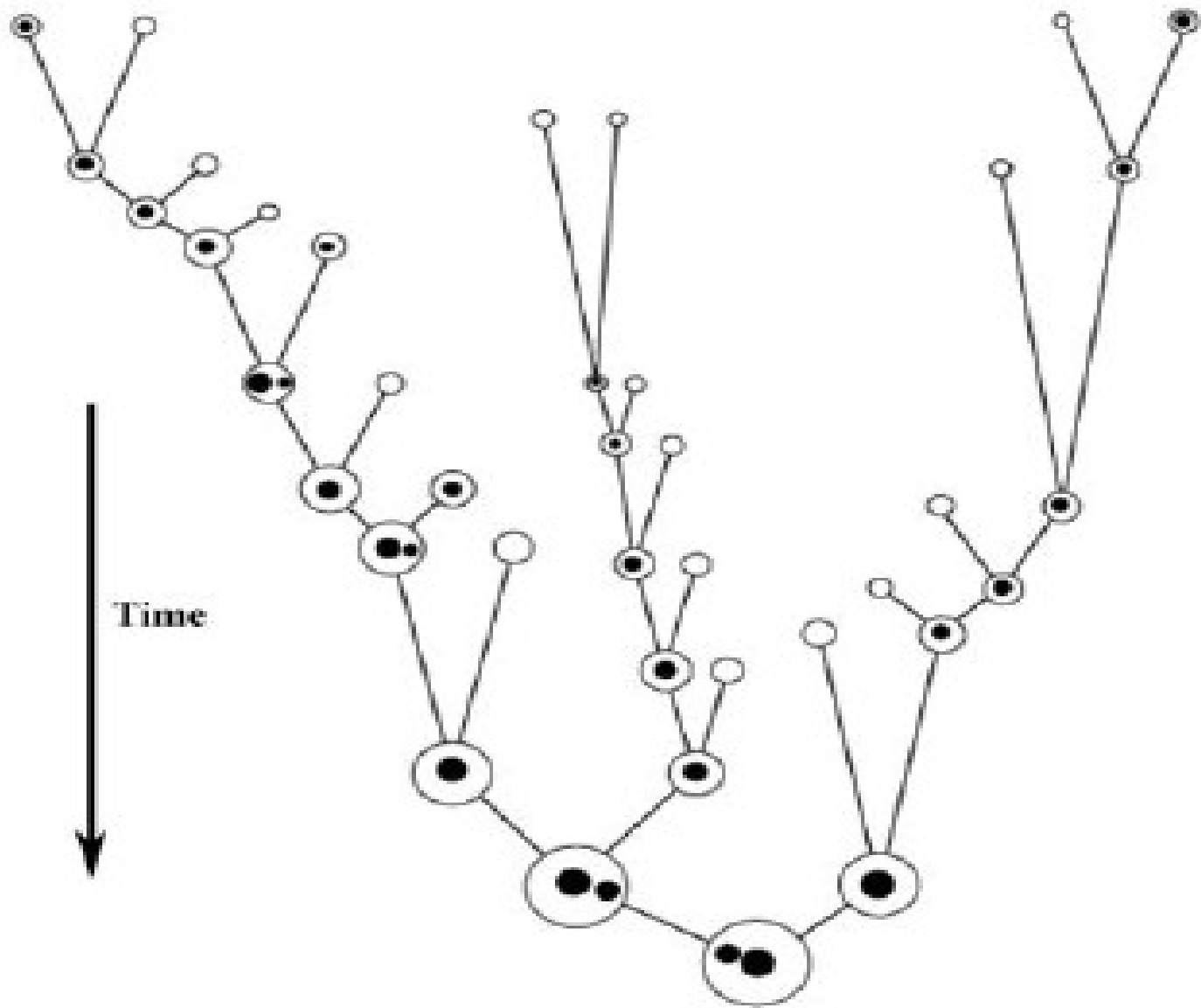
$$f(\sigma, z) \equiv \frac{d\rho/\rho_b}{d \ln \sigma^{-1}} = \frac{M}{\rho_b(z)} \frac{dn(M, z)}{d \ln[\sigma^{-1}(M, z)]}.$$

$$\sigma^2(M, z) = \frac{D^2(z)}{2\pi^2} \int_0^\infty k^2 P(k) W^2(k, M) dk,$$

$$W(k, M) = \frac{3}{(kR)^3} [\sin(kR) - kR \cos(kR)].$$

$$f_{\text{ST}}(\sigma) = 0.3222 \sqrt{\frac{2a}{\pi} \frac{\delta_c}{\sigma}} \exp\left(-\frac{a\delta_c^2}{2\sigma^2}\right) \left[1 + \left(\frac{\sigma^2}{a\delta_c^2}\right)^p\right],$$

- Em seguida “segue-se a risca” a descrição apresentada por Lacey & Cole em 1993 (MNRAS 262, 627-649) para se determinar as razões de fusão de halos.
- Considera-se que cada halo, uma vez formado, “produziu rapidamente um Buraco Negro semente com $M_{\text{BH}} = 1000 M_{\text{sun}}$ ”.
- Por sucessivas fusões os halos vão crescendo e as massas dos BNs também!



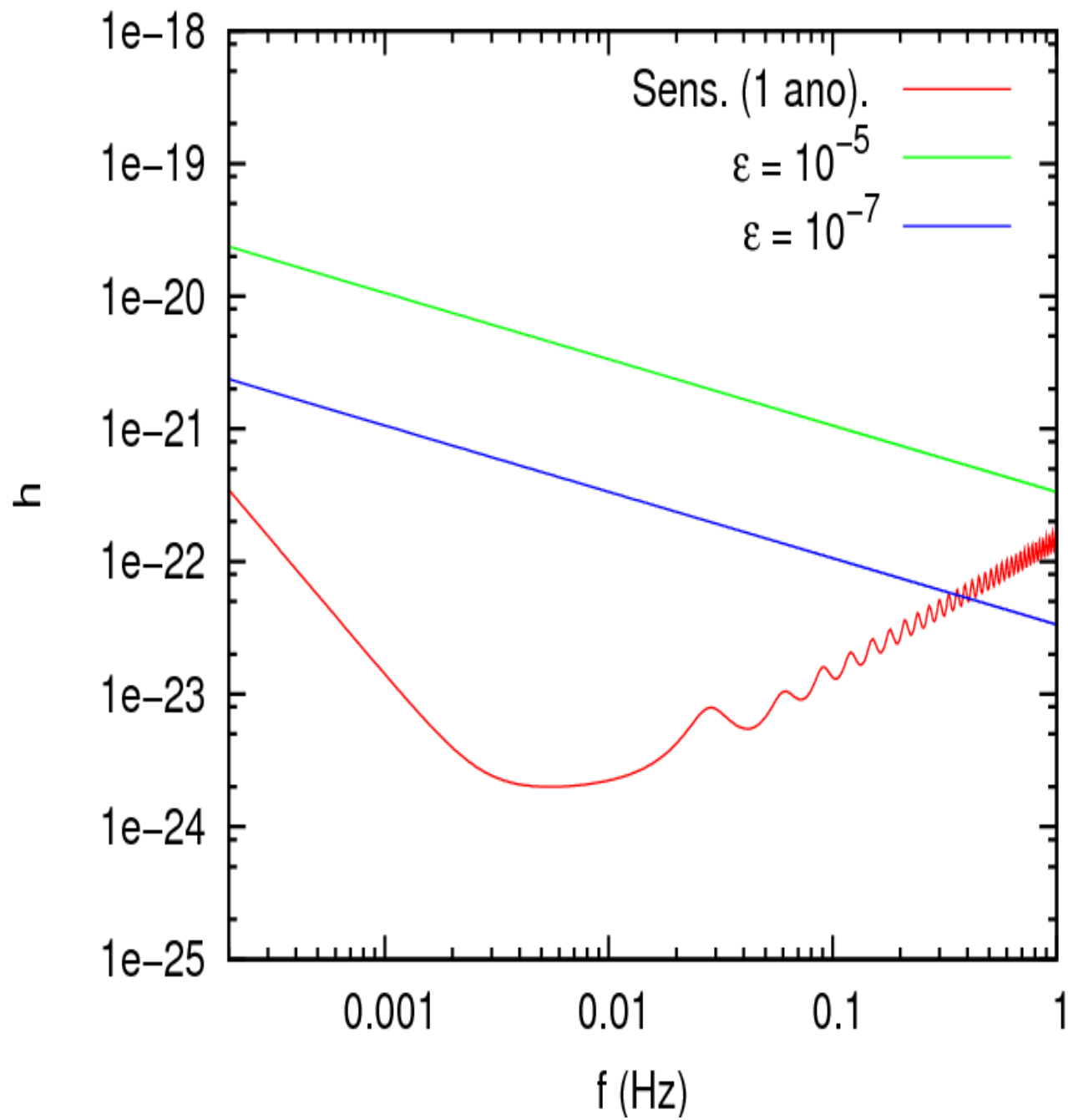
Fundo Estocástico em Ondas Gravitacionais Gerados pelos BNs

- Numa série de trabalhos do grupo de ondas gravitacionais do INPE é discutida a geração de fundos estocásticos por BNs e a sua detecção (Phys. Rev. D 2000, 2005; ApJ 2001; MNRAS 2002, 2004; Class. Quant. Grav. 2002, 2004a,b).

$$F_{\nu}(\nu_{\text{obs}}) = \int \frac{1}{4\pi d_L^2} \frac{dE_{\text{GW}}}{d\nu} \frac{d\nu}{d\nu_{\text{obs}}} dR_{\text{BH}}.$$

$$F_{\nu}(\nu_{\text{obs}}) = \frac{\pi c^3}{2G} h_{\text{BG}}^2 \nu_{\text{obs}}.$$

$$\nu_{\text{obs}} = \frac{1}{5\pi M_r} \frac{c^3}{G} (1+z)^{-1} \simeq 1.3 \times 10^4 \text{ Hz} \left(\frac{M_{\odot}}{M_r} \right) (1+z)^{-1}.$$



Moral da História

- Estudou-se aqui a geração de um fundo estocástico em ondas gravitacionais resultante da fusão de BNs de alta massa formados em halos a partir de $z \sim 20$.
- Utilizou-se o formalismo Press-Schechter para obter a densidade de halos como função da massa e redshift (usando a função de massa de Sheth & Tormen 1999).
- As massas dos Buracos Negros crescem a partir da fusão dos halos.
- Segue-se o método apresentado por Lacey & Cole (1993) para a fusão de halos. Os BNs sementes possuem massa $1000 M_{\text{sun}}$.
- O sinal do fundo produzido em ondas gravitacionais possui alta razão S/N dentro da banda do LISA, mesmo para baixos valores da eficiência de geração em ondas gravitacionais.
- Por coalescência dos halos obtém-se no presente ($z = 0$), BNs com massas próximas a $10^8 M_{\text{sun}}$.