

第34回理論懇シンポジウム「挑戦的アイデアで広げる宇宙物理の可能性」

AT, Yoshida, Kinugawa, Trani, Hosokawa, Susa, Omukai (2021, arXiv:2110.10846, ApJ accepted) AT, Susa, Yoshida, Trani, Kinugawa (2021, ApJ, 910, 30) AT, Kinugawa, Yoshida, Hijikawa, Umeda (2021, MNRAS, 505, 2170) AT, Yoshida, Kinugawa, Takahashi, Umeda (2020, MNRAS, 495, 4170) 共同研究者(敬称略, 50音順):梅田秀之,大向一行,衣川智弥,須佐元,高橋亘, アレッサンドロ・トラニ,聖川昂太郎,細川隆史,吉田敬



重力波による連星BHの発見

- ・ 連星BH発見数の急速な増加
 - 2015年: 連星BH初発見 (Abbott et al. 2016)
 - 2021年現在: 連星BH発見数 ~ 80 (Abbott et al. 2021)
- ・ 観測されているBH質量
 - X線連星:~10M_☉
 - ・連星BH: ~ 30M_☉
- ・起源の違い?
 - ・ 低金属量の孤立連星,高密度星団, 銀河中心,原始ブラックホール...





孤立連星説と星団説



Belczynski et al.; Eldridge et al.; Giacobbo et al.; Kinugawa et al.; Kruckow et al.; Stevenson et al.; Tanikawa et al.;



et al.)AGN disk (Tagawa et al.)





金属量の重要性

・ IMFが $Z/Z_{\odot} \sim 10^{-5}$ でtop-heavy とtop-lightに分岐 (Bromm, Larson 2004; Omukai et al. 2005;

Schneider et al. 2006; Maio et al. 2010)

・ 低金属量→恒星風弱→BH重
 (Heger et al. 2003; Mapelli et al. 2009; Belczynski et al. 2010; Spera et al. 2015)





Pair instability (PI) 質量ギャップ

 $m_{\circ} [\mathrm{M}_{\sim}]$

- ・GW190521:85M₀BHと66M₀BHの合体
 - 65 130M_☉はPISNなどにより85M_☉BHはできな いはず (Heger et al. 2003; Belczynski et al. 2016; Spera, Mapelli 2017; Woosley 2017; 2019; Giacobbo et al. 2018)
- ・ GW190521の形成に関する議論
 - ・ > $130M_{\odot}$ BHと < $65M_{\odot}$ BHの合体 (Fishbach, Holz 2020; Nitz, Capano 2021; Estelles et al. 2021)
 - ・そもそも連星BHでない (Shibata et al. 2021)
 - ・ 星団系で形成 (Rodriguez et al. 2019; Di Carlo et al. 2020; Tagawa et al. 2021)
 - PI質量ギャップの不定性 (Farmer et al. 2020; Costa et al. 2021)
 - 初代星や超低金属量星なら可能 (Kinugawa et al. 2020; Tanikawa et al. 2021, MNRAS, 505, 2170)



本研究

- ・ 世界初のPop I, II, III, Extremely metal-poor (EMP)星を扱った連星BH形成
 - Pop I/IIのみ: BSE (Hurley et al. 2002); binary_c (Izzard et al. 2009); SeBa (Toonen et al. 2012); BPASS (Eldridge, Stanway 2016); MOBSE (Giacobbo et al. 2018); COSMIC (Breivik et al. 2020); COMPAS (Team COMAS et al. 2021)
 - Pop I/II/III: BSE+Pop III (Kinugawa et al. 2020); StarTrack (Belczynski 2002; 2017, but see Inayoshi et al. 2017)
 - Pop I: $Z/Z_{\odot} > 0.16$, Pop II: $10^{-3} < Z/Z_{\odot} \le 0.16$, EMP: $0 < Z/Z_{\odot} \le 10^{-3}$, Pop III: $Z/Z_{\odot} = 0$
- ・ 連星BHの合体率と質量分布を再現できるモデルを構築
- 将来的の重力波観測による検証方法の提案
- Pop IIIによる寄与の調査

連星種族合成計算



単星進化モデル



連星進化モデル

- ・ 恒星風降着,潮汐相互作用,質量輸送,共通外層進化,磁気制動,重力波による軌道収縮 (Hurley et al.
 2002)
- ヘルツシュプラング・ギャップフェイズにおける共通外層進化の禁止 (Ivanova, Taam 2004; Dominik et al. 2012; Giacobbo et al. 2018)
- 輻射外層時の潮汐相互作用 (Yoon et al. 2010; Qin et al. 2018; Kinugawa et al. 2020)

連星の初期条件

- ・ 連星率: 50% (all Z)
- Chon's IMF
 - $f(m)dm \propto m^{-2.3}dm (Z/Z_{\odot} > 10^{-2})$
 - $f(m)dm \propto m^{-1}dm \ (Z/Z_{\odot} \le 10^{-6})$
 - ・ 混合 $(10^{-6} < Z/Z_{\odot} \le 10^{-2})$
- ・ 連星の質量比,軌道周期,離
 心率分布 (Sana et al. 2012)



Sugimura et al. (2020)



og n [cm⁻³]

Chon et al. (2021)

星形成史の設定

- Pop I, Pop II, EMP星
 - 星形成密度 (Madau, Fragos 2017)
 - 平均金属量 (Madau, Fragos 2017)
 - ・ 金属量分布: 対数正規分布 (分 散0.35)
- Pop III星
 - Skinner & Wise (2020)
 - ・ 金属量分布: デルタ関数



連星BH合体率と質量分布

- ・ 局所宇宙での合体率を再現
 - ・ 低赤方偏移でPop I/II (Z/Z_☉ ≥ 10⁻²)
 - 高赤方偏移でEMP+Pop III (Z/Z_o < 10⁻²)
- ・ 局所宇宙での質量分布を再現
 - $5 20M_{\odot}$: Pop I
 - $20 50M_{\odot}$: Pop II
 - $50 100M_{\odot}$: EMP+Pop III
 - EMPとPop IIIの寄与は半々
- 全ての金属量にそれぞれの役割



孤立連星説以外との違い

- ・ 孤立連星は $m_1 = 100 130 M_{\odot}$ を作れず
 - $m_1 \leq 100 M_{\odot}$: PISN以下
 - $m_1 \gtrsim 130 M_{\odot}$: PISN以上
- それ以外はm₁ = 100 130M₀を作れる
- ・ 孤立連星が支配的なら $m_1 = 100 - 130 M_{\odot}$ の合体率に穴が空く
- ・いずれ $m_1 > 100 M_{\odot}$ の合体率が制限
 - O2からO3で上限値が3倍減少
 (Abbott et al. 2021, arXiv:2105.15120)



質量分布の赤方偏移進化



まとめ

- ・ 全金属量の孤立連星に対する連星種族合成計算を用い,連星BHを精査
- ・ 重力波観測によって示唆されている連星BHの合体率や質量分布を再現
- 100 130M_oの連星BHの合体率がその周りに比べ極端に低いと予想 (LIGO, Virgo, KAGRAによる2020年代の重力波観測による検証可能)
- ・我々のモデルが正しければ、 $\geq 65M_{\odot}$ の連星BHは初代星のプローブ