

楕円軌道超大質量ブラックホールからの 超低周波重力波への制限

熊本大学 D1 喜久永智之介

共同研究者：久野晋之介 隈本宗輝 高橋慶太郎

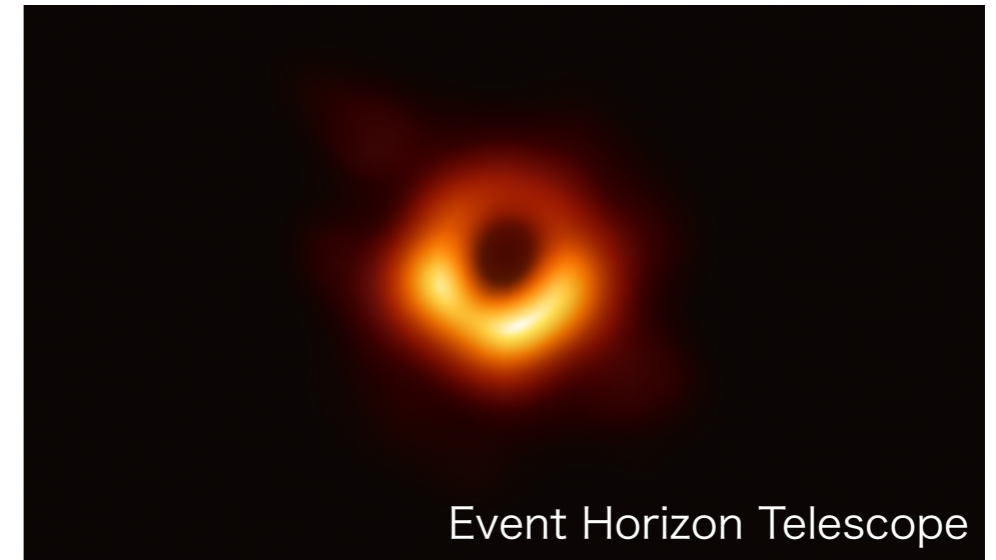
MNRASに投稿中(arXiv:2104.03629)

超大質量ブラックホール (SMBH)

- 太陽の100万倍以上の質量をもつブラックホール
- 銀河中心に存在
- **形成過程が未解明**

銀河衝突モデル

- 銀河合体の過程でSMBHが連星を組む
- エネルギーを失い衝突してSMBHが質量獲得
 - 周囲のガス・星との相互作用、**重力波放射**など
- 宇宙年齢以上の時間がかかる (**final-pc problem**)



Pulsar Timing Array

- 重力波によるパルス到着時刻の変化から重力波検出
- 観測量：**timing residual** (時間残差)
(実際のパルス到着時刻) - (予測された到着時刻)
- 観測周波数：総観測期間 T と観測の頻度 C の逆数に対応
→ **nHz ~ μ Hz** (1ヶ月~十数年周期)
- **SKA時代には重力波検出確実!**
- NANOGrav：北米のPTAチーム

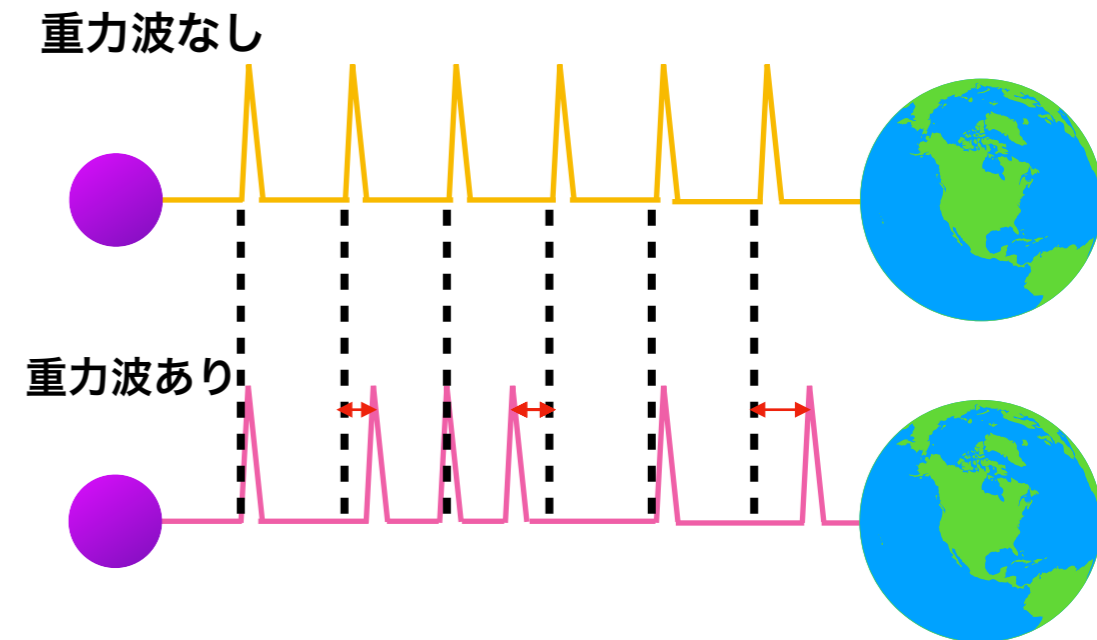
45個のパルサーを11年観測したデータを公開

(Arzoumanian Z. et al. 2018)

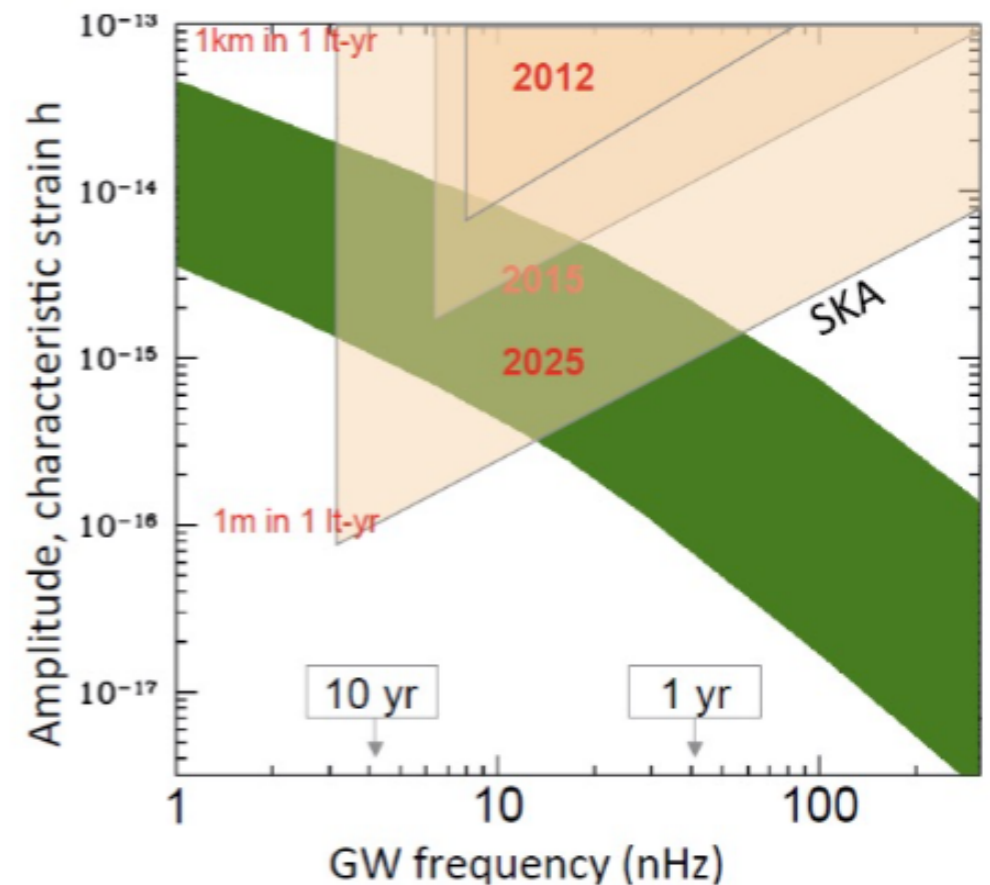


<https://public.nrao.edu/telescopes/gbt/>

<https://www.ucf.edu/news/ucf-marks-1st-year-arecibo-observatory-puerto-rico/>



M. Kramerスライド



本研究の目的

単一波源のSMBH連星から放射される重力波から質量や軌道半径の情報を引き出し
final-pc problem解決の布石を作る

■ PTAによるfinal-pc problem解決における問題点

1. 観測周波数

軌道が停滞する半径：数pc程度

→nHz以下(100年～1000年周期)の**超低周波重力波**を放射

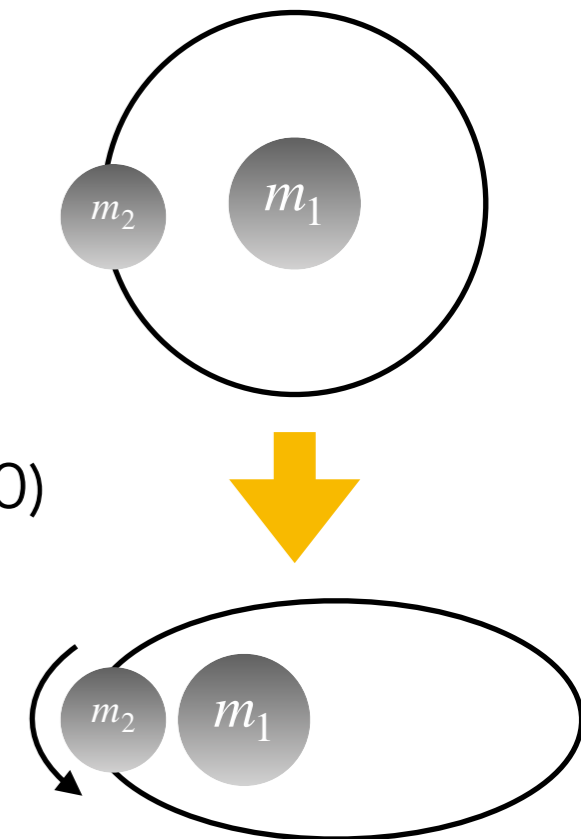
→PTAの観測周波数帯よりも低い

2. 軌道離心率の上昇

周囲の星・ガスとの相互作用により離心率が増加(Sesana. et al. 2010)

- 質量比が極端な系($m_2/m_1 \sim 10^{-3}$)では $e \sim 0.9$ まで上昇しやすい

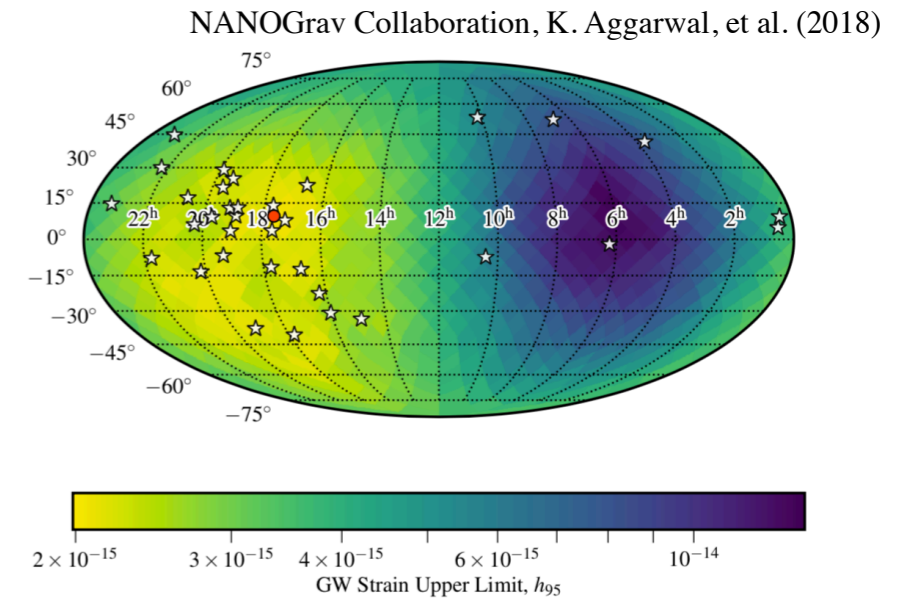
→重力波に高次モードが含まれ、取り扱いが難しい



楕円軌道のSMBH連星からの**超低周波重力波**に対して制限を与える手法の開発

先行研究(C. J. Moore. et al. 2015) : PTAによる重力波への制限の性質を調べた

- 重力波への制限を超低周波領域へ拡張
- timing residualの重力波と縮退しない項から制限
- 円軌道のSMBH連星を仮定



本研究の手法

- **楕円軌道のSMBH連星に一般化**して制限をかける
- NANOGravによる8nHzの重力波への制限を利用
→現在の観測と合わせた制限を構築

楕円軌道SMBH連星からの重力波への制限

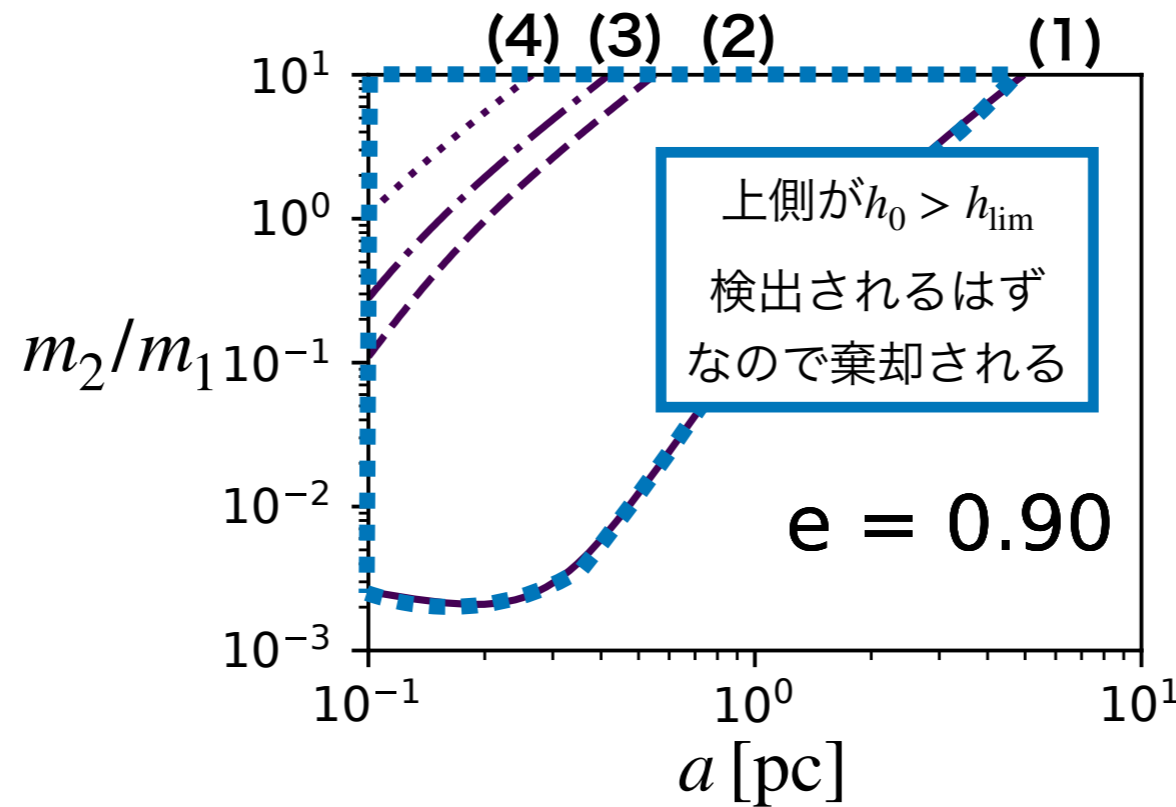
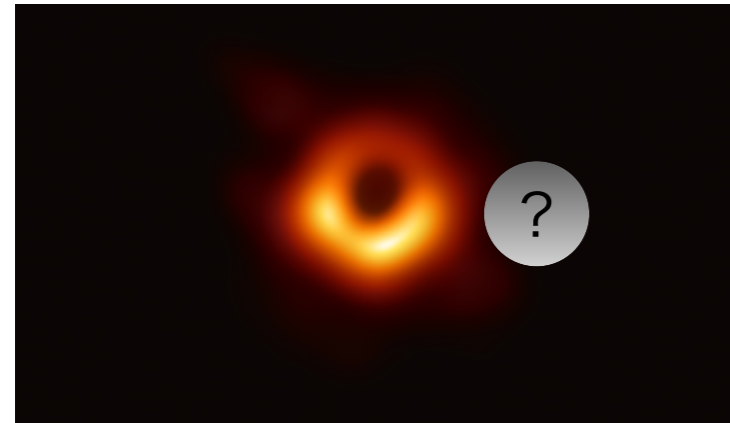
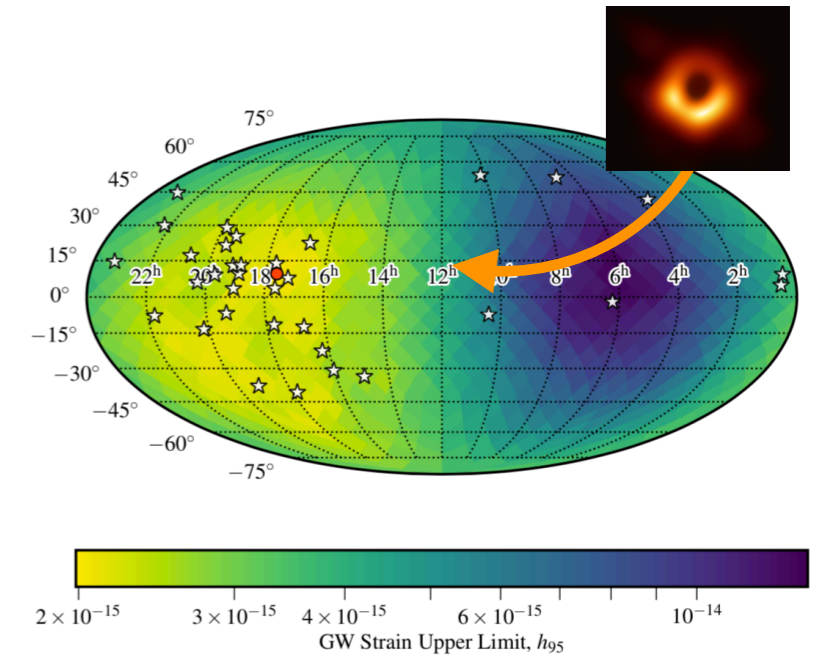
$$h_{\text{lim}} = \underbrace{h_{\text{lim}}^{\text{NANOGrav}} \left(f_{\text{gw}} = 8 \text{ nHz}, \hat{\Omega} \right)}_{\text{NANOGravによる制限}} \times \underbrace{\left[\left(\frac{8 \text{ nHz}}{2f} \right)^2 (\xi_+ + \xi_x)^{-1} + \left(\frac{2f}{8 \text{ nHz}} \right) (\eta_+ + \eta_x)^{-1} \right]}_{\text{軌道要素を与えて計算}}$$

Upper limitsの適用

EHTにより撮像されたSMBH→連星を組んでいると仮定

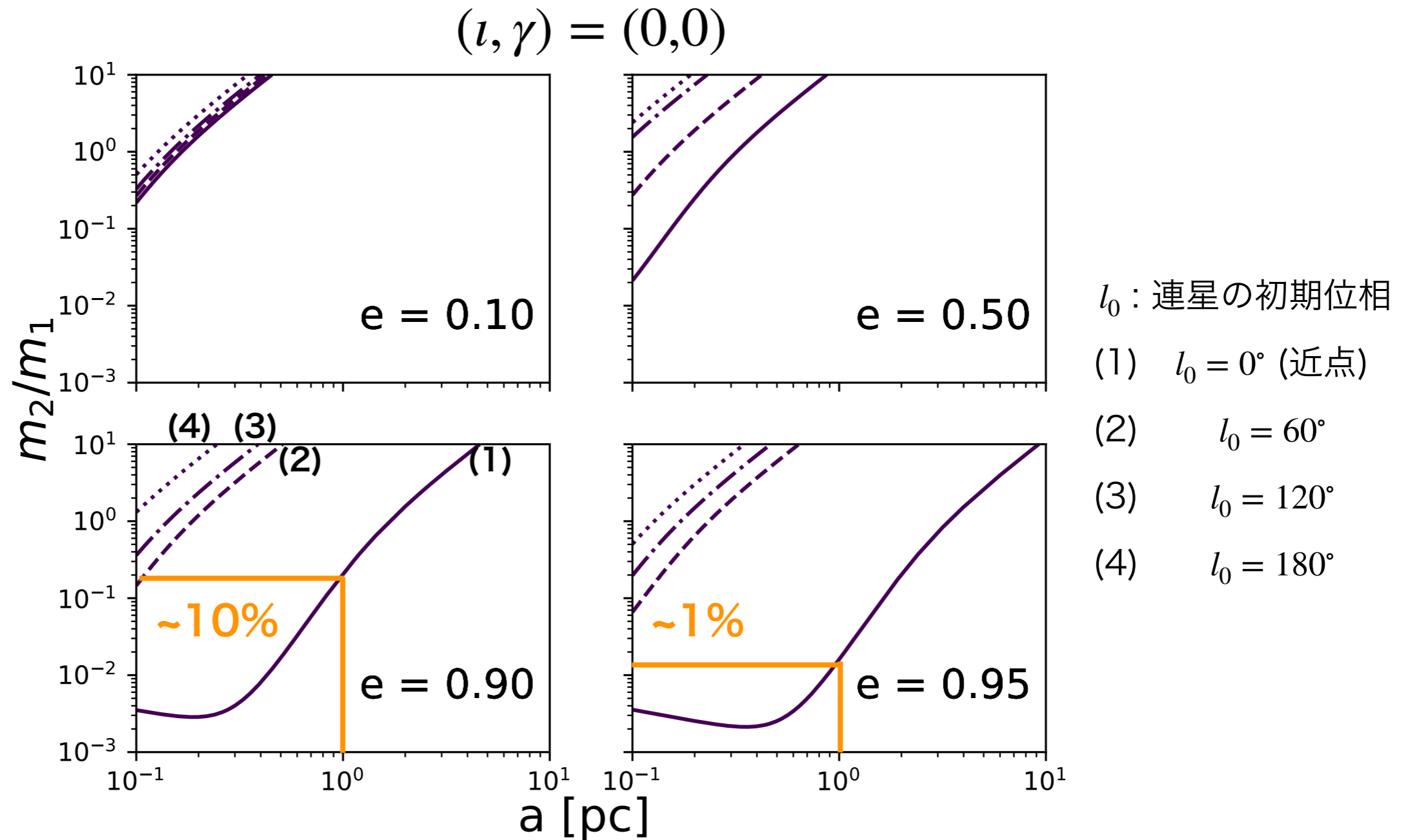
→放射される重力波強度を計算して制限と比較

各曲線は $h_0 = h_{lim}$ を示す



l_0 : 連星の初期位相

- (1) $l_0 = 0^\circ$
- (2) $l_0 = 60^\circ$
- (3) $l_0 = 120^\circ$
- (4) $l_0 = 180^\circ$



e が高く、 l_0 が小さいほど制限が強い→近点で強い重力波が出ている

$a = 1$ pc, $e = 0.9$ で**主SMBHの10%**、 $e = 0.95$ で**1%**まで棄却！

近点以外 ($l_0 > 0^\circ$) でも主SMBHと同程度の質量を棄却

- SMBHの成長過程解明には重力波が鍵を握る
- SKA時代にはPTAによる重力波検出が確実
- 重力波観測でfinal-pc problemを解決するには、PTAの観測周波数では狭く楕円軌道を考慮する必要がある
- 楕円軌道のSMBH連星からの超低周波重力波に対してupper limitsをかけた
- upper limitsと重力波強度を比較してM87中心のSMBH連星の軌道要素へ制限をかけた
 - $a = 1 \text{ pc}, e = 0.9$ で近点を通る伴星SMBHの質量を主SMBHの10%以下まで制限した