

Evolution of Axion Clouds in Black Hole Binaries

高橋卓弥 (京都大学 D2)

共同研究者：大宮英俊，田中貴浩

arXiv: 2211.xxxxx

内容

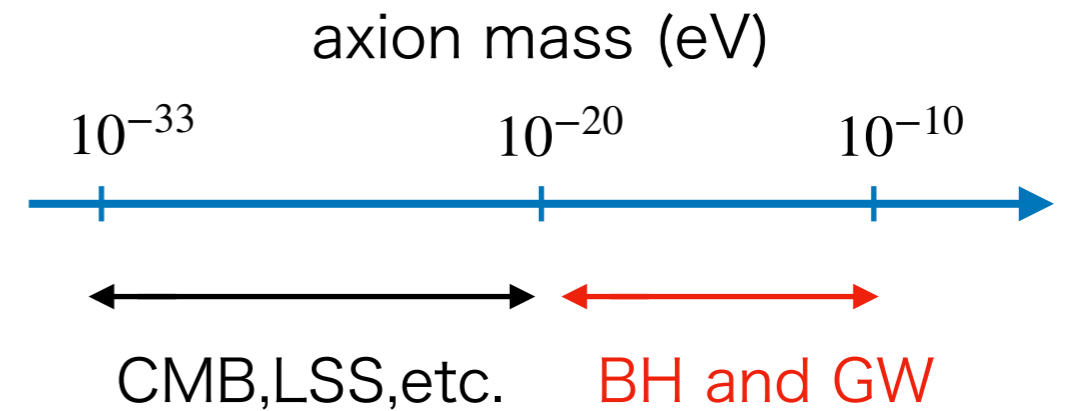
1. イントロダクション
 - Axion Cloudとは
 - 連星インスパイラルにおける共鳴
2. 定式化
3. 結果と観測的兆候への影響
4. まとめ

Axion Clouds around BHs

超軽量ボソン

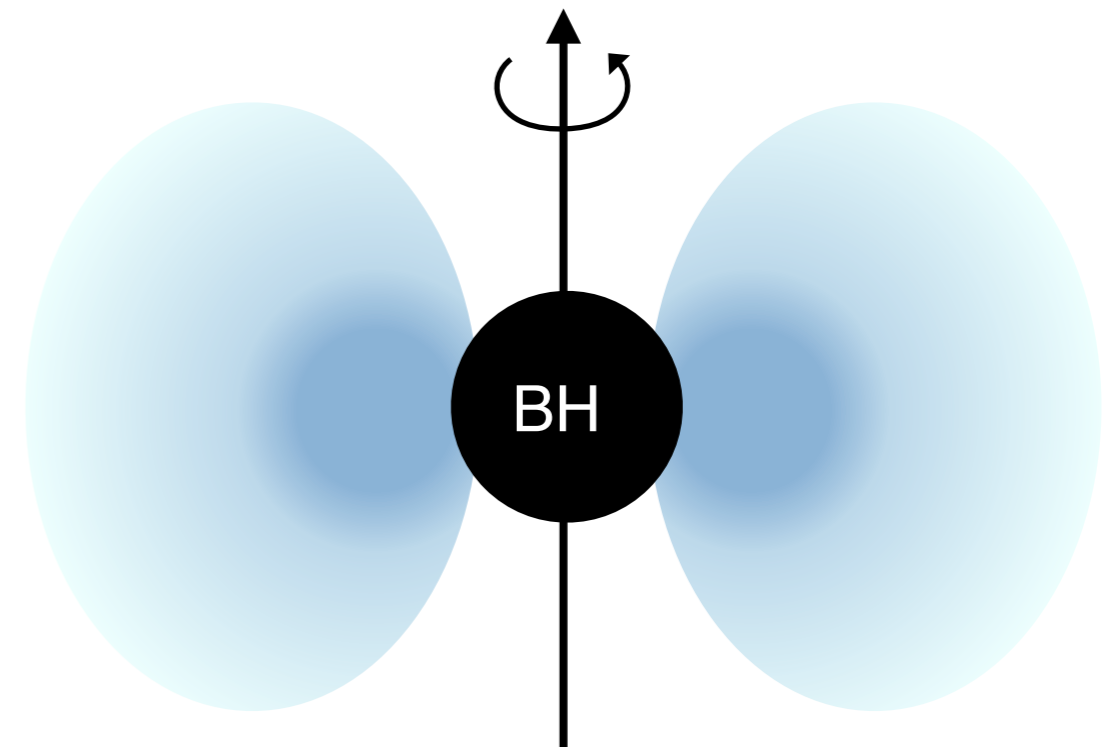
QCD axion, axion-like particles,...

非常に長い波長 → **宇宙観測**



BH superradiance

- 回転するBHからのエネルギー引き抜き
- 重力による束縛状態



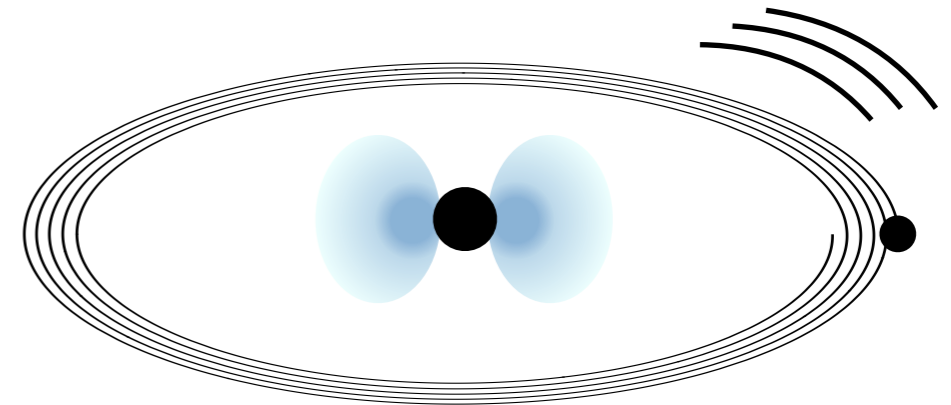
Axionの凝縮体 (Axion Cloud)
がBH周りに自発的に形成される

観測的兆候

① 重力波

連星BH合体からの重力波

→ 雲の存在による波形への影響

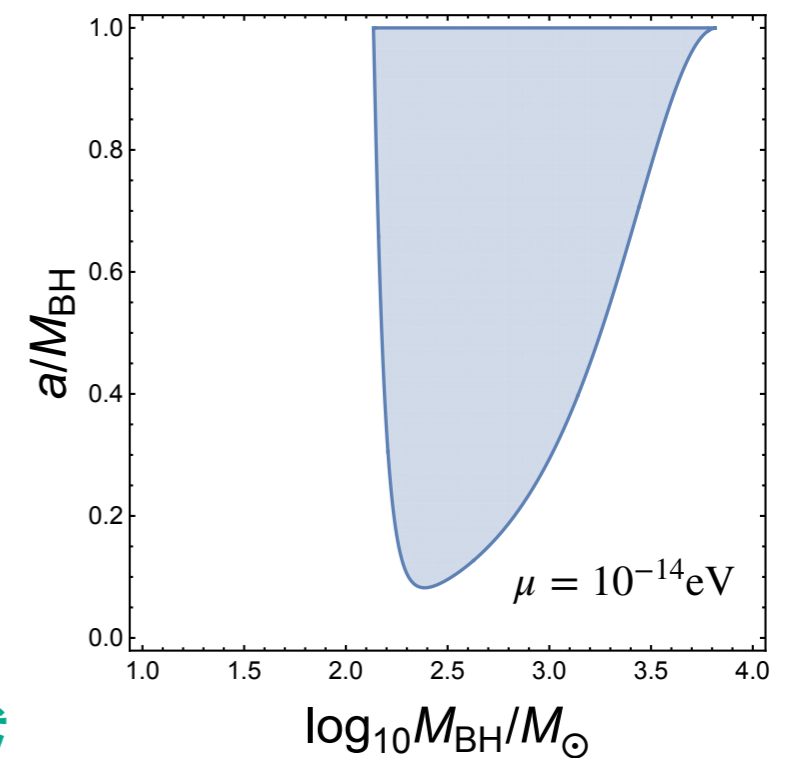


② BHの質量-スピン分布

superradianceに伴う

BH角運動量の引き抜き

→ アクシオン質量に応じた禁止領域

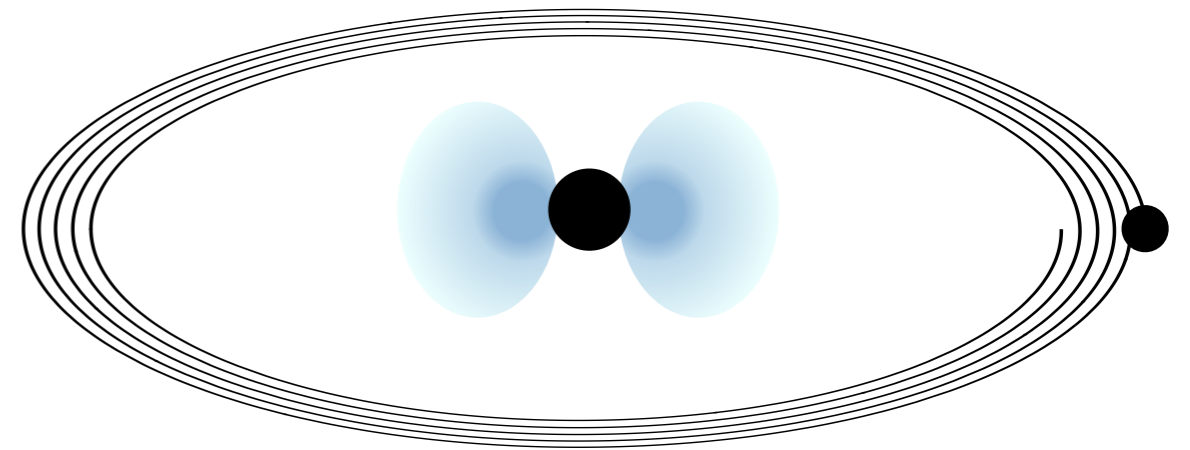


連星インスパイラルにおける共鳴

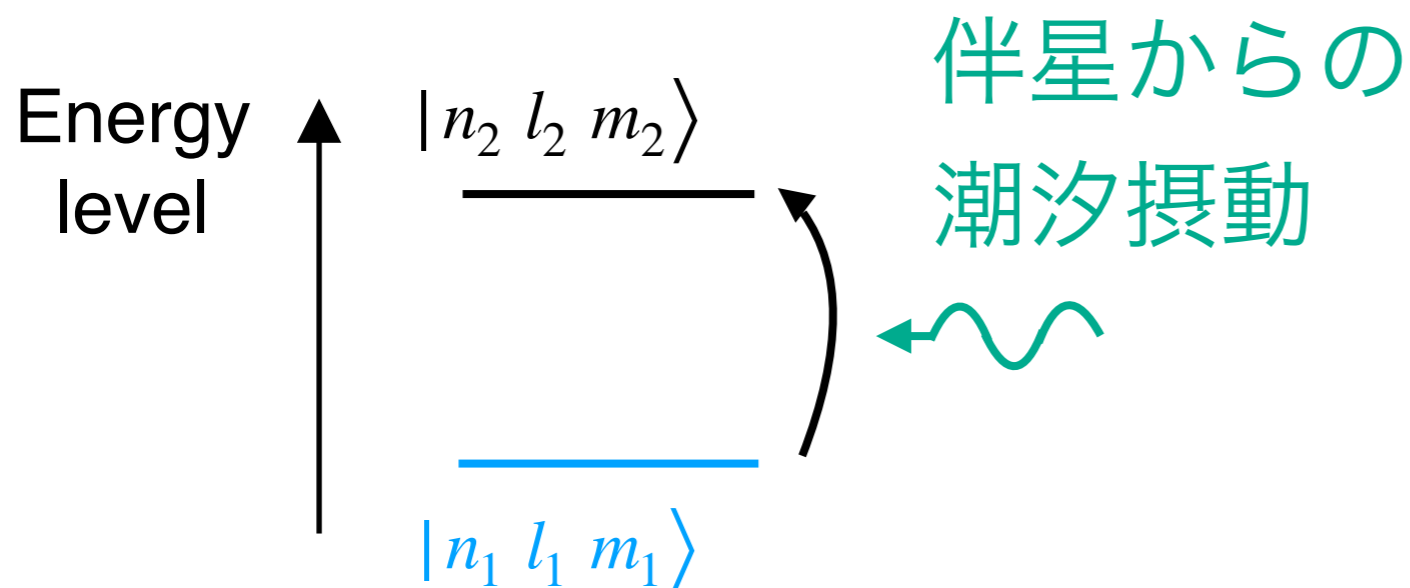
アクシオンの束縛状態の
エネルギー固有値は水素原子の
ようなスペクトルを持つ

$$\psi_{nlm} = e^{-i(\omega_{nlm} - \mu)t} R_{nl}(r) Y_{lm}(\theta, \varphi)$$

$$\omega_{nlm} = (\omega_R)_{nlm} + i(\omega_I)_{nlm}$$



D.Baumann et al., 2019



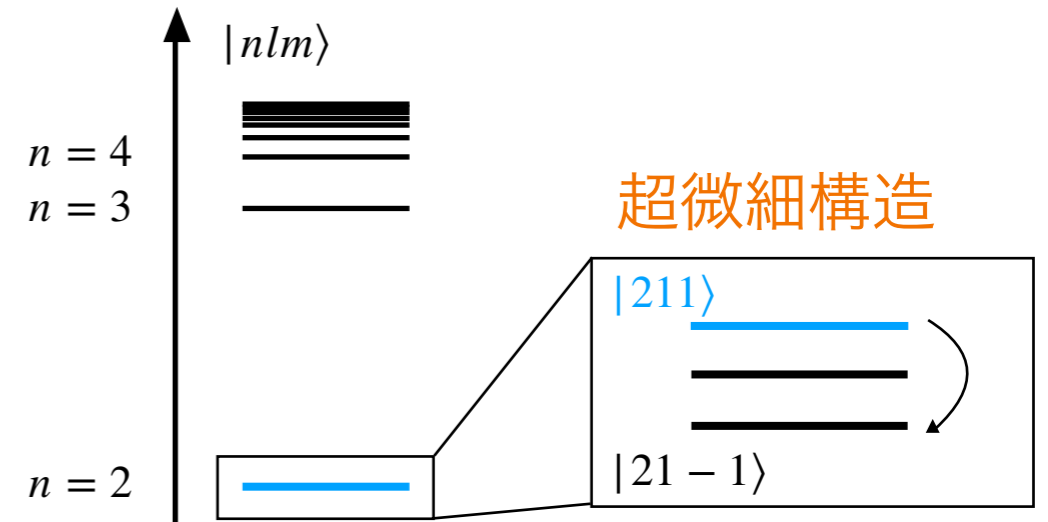
(エネルギー差)
= (軌道振動数)

→ **共鳴的な遷移**

観測に与える影響は？

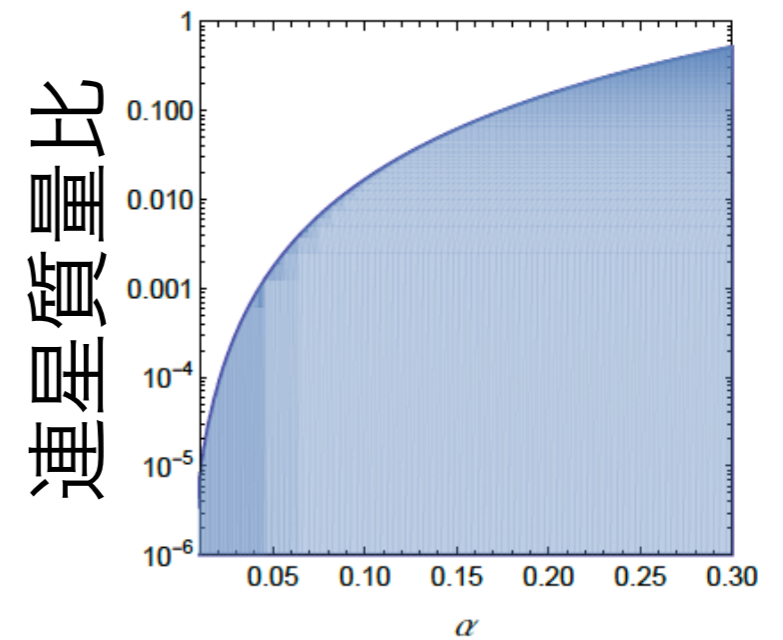
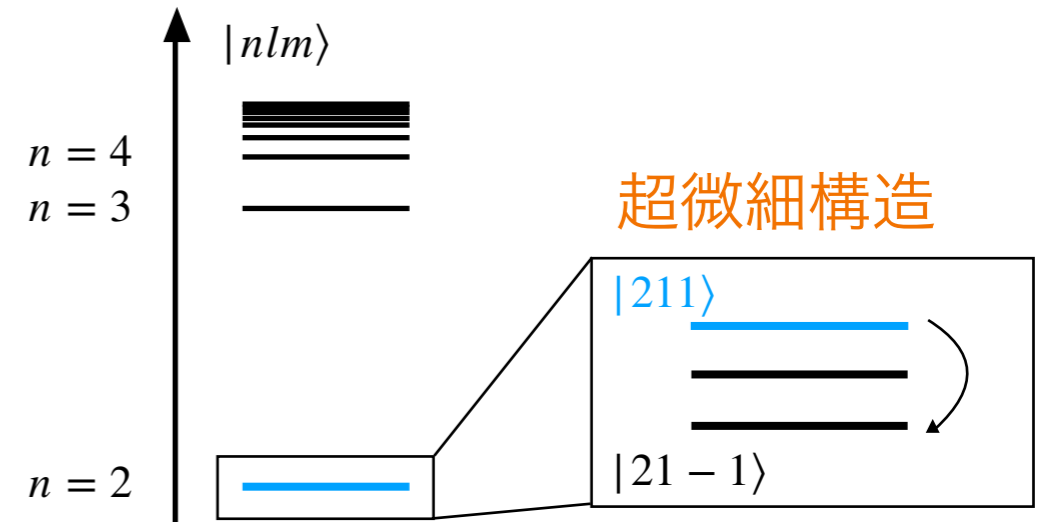
本研究の内容

- インスパイラルにおいて共鳴は一番小さいエネルギー差に対応する共鳴振動数で最初に起こる



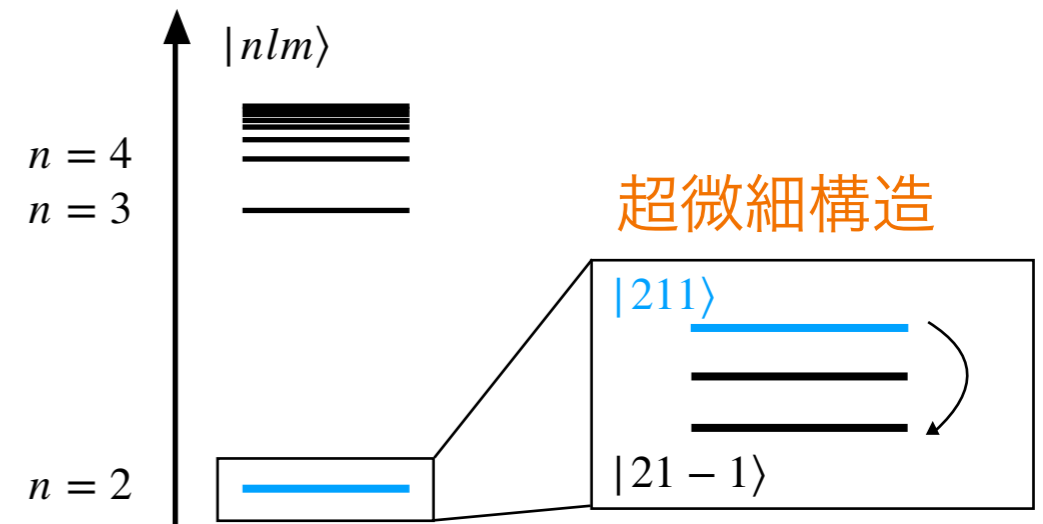
本研究の内容

- インスパイラルにおいて共鳴は一番小さいエネルギー差に対応する共鳴振動数で最初に起こる
- 等質量連星の場合は，超微細構造での遷移は無視できた TT et al., 2021
- 質量比が小さい場合は？



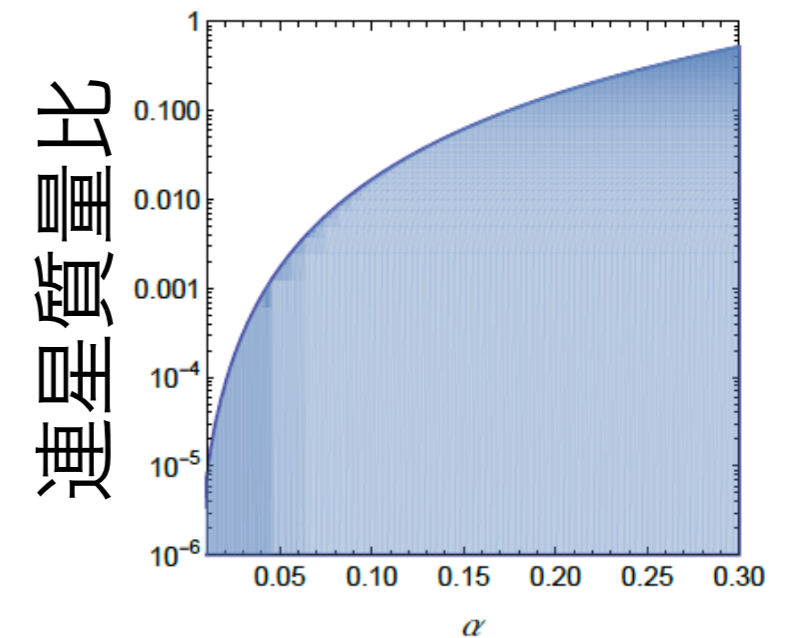
本研究の内容

- インスパイラルにおいて共鳴は一番小さいエネルギー差に対応する共鳴振動数で最初にかかる
- 等質量連星の場合は、超微細構造での遷移は無視できた TT et al., 2021
- 質量比が小さい場合は？



非常に長いタイムスケール

-
- 軌道, 中心BHへのbackreaction
 - 遷移後のアクシオンの崩壊



それらを含めた系全体の時間発展を明らかにした

2. 定式化

アクシオン雲の運動方程式

EoM for axions $(g^{\mu\nu} \nabla_\mu \nabla_\nu - \mu^2) \phi = A^\nu(h) \nabla_\nu \phi$

Background part

非相対論近似

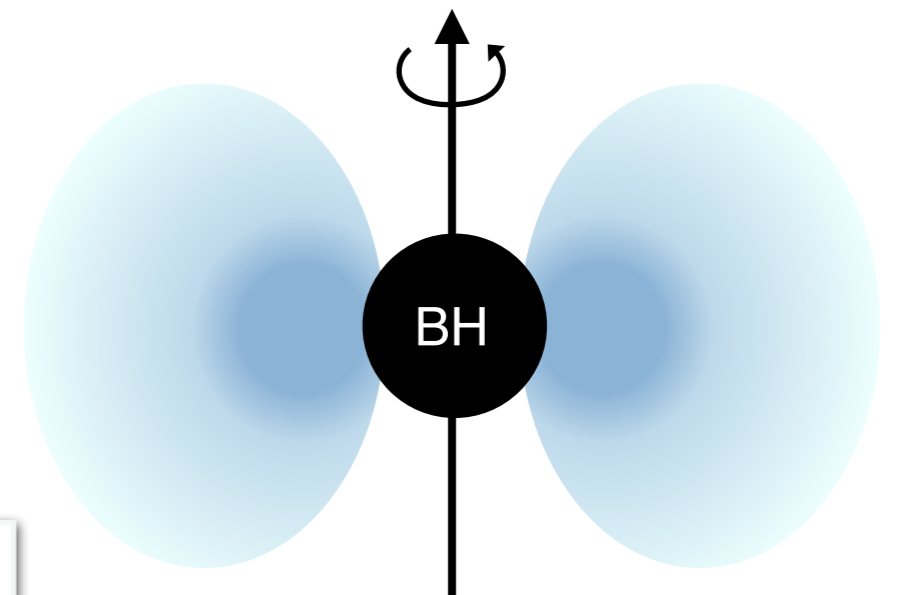
$$\phi = \frac{1}{\sqrt{2\mu}} (e^{-i\mu t} \psi + e^{i\mu t} \psi^*)$$

$$i \frac{\partial}{\partial t} \psi = H_0 \psi, \quad H_0 = -\frac{1}{2\mu} \nabla^2 - \frac{\alpha}{r} + \mathcal{O}(\alpha^2)$$

重力微細構造定数

$$\alpha = M\mu$$

- $\alpha \ll 1$ で良い近似



BH mass M ,
axion mass μ

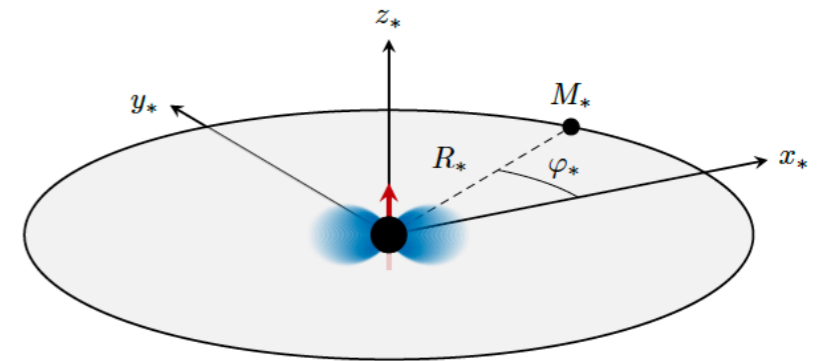
$$(c = G = \hbar = 1)$$

摂動①：潮汐相互作用

EoM for axions $(g^{\mu\nu} \nabla_\mu \nabla_\nu - \mu^2) \phi = \underline{A^\nu(h) \nabla_\nu \phi}$

$$i \frac{\partial}{\partial t} \psi = \left(-\frac{1}{2\mu} \nabla^2 - \frac{\alpha}{r} + V_*(t) \right) \psi$$

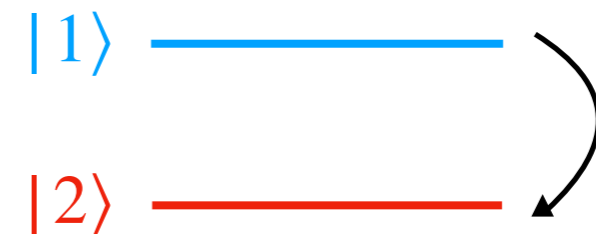
伴星からの潮汐ポテンシャル



D.Baumann et al., 2022

共鳴現象 → 2準位系を考える

$$\psi = c_1(t) \varphi_1 + c_2(t) \varphi_2$$



各状態の粒子数の時間発展

$$i \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -(\Omega - \Omega_{\text{res}}) + i\omega_I^{(1)} & \eta \\ \eta & (\Omega - \Omega_{\text{res}}) + i\omega_I^{(2)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix}$$

摂動②：雲からの重力波

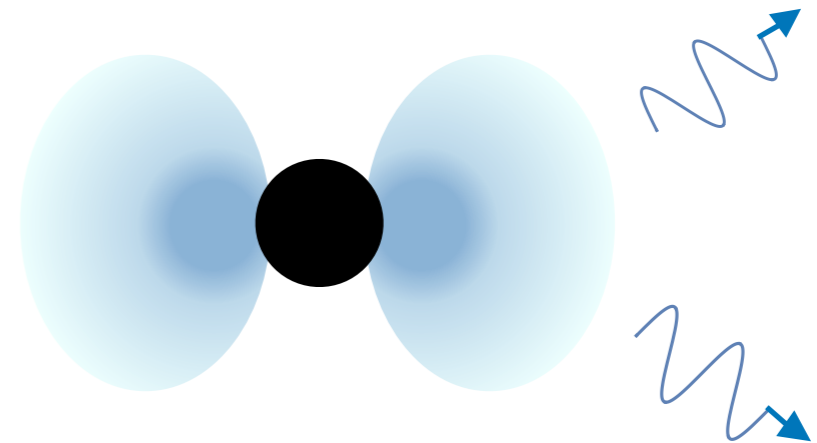
EoM for axions $(g^{\mu\nu} \nabla_\mu \nabla_\nu - \mu^2) \phi = \underline{A^\nu(h) \nabla_\nu \phi}$

雲が形成された後，アクシオンの対消滅に伴う重力波放射で雲は減衰する

エネルギーフラックス

$$\frac{dE_{\text{GW}}}{dt} = C \left(\frac{M_c}{M} \right)^2 \alpha^{14}$$

H.Yoshino & H.Kodama, 2013



重力波放射の効果のみを考えると $\dot{M}_c = -\dot{E}_{\text{GW}}$

$$\rightarrow \frac{dn_1}{dt} = -\frac{C}{M_{c,0}} \left(\frac{M_{c,0}}{M} \right)^2 n_1^2 \alpha^{14}$$

雲の質量で規格化した粒子数

$$n_1(t) = \frac{\mu |c_1(t)|^2}{M_{c,0}}$$

系全体の時間発展

断熱近似で系全体の時間発展を記述 ($\omega_R \gg \omega_I$)

変数は BH質量 M , 角運動量 J , 軌道角速度 Ω
各モードの係数 c_1, c_2

エネルギー保存@ホライズン

$$\frac{dM}{dt} + 2\omega_I^{(1)} M_c^{(1)} + 2\omega_I^{(2)} M_c^{(2)} = 0 ,$$

角運動量保存@ホライズン

$$\frac{dJ}{dt} + \frac{2\omega_I^{(1)}}{\mu} M_c^{(1)} - \frac{2\omega_I^{(2)}}{\mu} M_c^{(2)} = 0 ,$$

系全体の角運動量保存

$$\frac{d}{dt} (J_{\text{orb}} + J + J_c) + \frac{1}{\mu} \frac{dE_{\text{GW}}}{dt} = -\mathcal{T}_{\text{GW}}$$

各モードの粒子数
の時間発展

$$i \frac{dc_1}{dt} = \left(-(\Omega - \Omega_{\text{res}}) + i\omega_I^{(1)} - i\Gamma_{\text{GW}} \right) c_1 + \eta c_2 ,$$

$$i \frac{dc_2}{dt} = \eta c_1 + \left((\Omega - \Omega_{\text{res}}) + i\omega_I^{(2)} \right) c_2 ,$$

系全体の時間発展

断熱近似で系全体の時間発展を記述 ($\omega_R \gg \omega_I$)

変数は BH質量 M , 角運動量 J , 軌道角速度 Ω
各モードの係数 c_1, c_2

エネルギー
角運動量
系全

問題点：
初期条件に敏感 + 振動する振る舞いで現実的なパラメータで解くのが難しい

$$\frac{dM}{dt} = \mu \frac{dJ}{dt}$$

各モードの粒子数の時間発展

$$i \frac{dc_1}{dt} = \left(-(\Omega - \Omega_{\text{res}}) + i\omega_I^{(1)} - i\Gamma_{\text{GW}} \right) c_1 + \eta c_2 ,$$

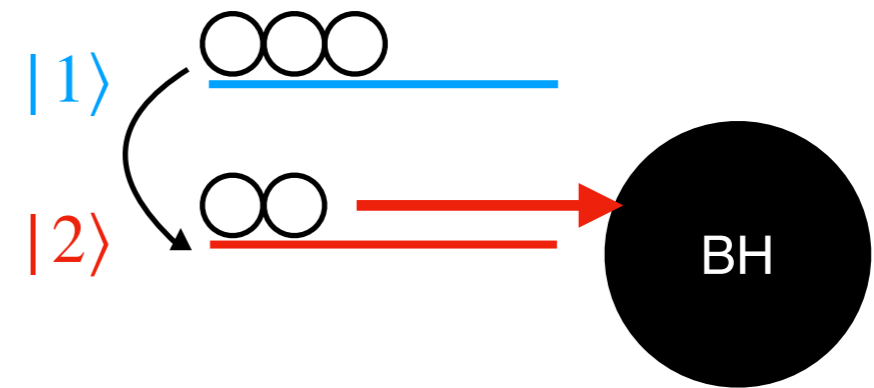
$$i \frac{dc_2}{dt} = \eta c_1 + \left((\Omega - \Omega_{\text{res}}) + i\omega_I^{(2)} \right) c_2 ,$$

Adiabatic elimination

遷移先のモード

の崩壊率 $|\omega_I^{(2)}| \gg \eta$ 潮汐摂動

有効的に一つ目のモードの
粒子数で記述できる



$$i \frac{dc_1}{dt} = \left(-(\Omega - \Omega_{\text{res}}) + i\omega_I^{(1)} - i\Gamma_{\text{GW}} \right) c_1 + \eta c_2,$$

$$i \frac{dc_2}{dt} = \eta c_1 + \left((\Omega - \Omega_{\text{res}}) + i\omega_I^{(2)} \right) c_2,$$



大雑把には $\eta^2 / |\omega_I^{(2)}|^2$ のleadingで

$$\frac{dn_1}{dt} = 2\omega_I^{(1)} n_1 + \frac{2\Gamma\eta^2}{\Delta^2 + \Gamma^2} n_1 - \frac{1}{M_{c,0}} \frac{dE_{\text{GW}}}{dt}$$

$$n_2 = \frac{\eta^2}{\Delta^2 + \Gamma^2} n_1$$

係数 $c_i(t)$ ではなく、粒子数 $n(t)$ の式に！

系全体の時間発展 (改善版)

変数は BH質量 M , 角運動量 J , 軌道角速度 Ω
 粒子数 n_1

エネルギー保存@ホライズン

$$\frac{dM}{dt} + 2\omega_I^{(1)} M_c^{(1)} + 2\omega_I^{(2)} M_c^{(2)} = 0 ,$$

角運動量保存@ホライズン

$$\frac{dJ}{dt} + \frac{2\omega_I^{(1)}}{\mu} M_c^{(1)} - \frac{2\omega_I^{(2)}}{\mu} M_c^{(2)} = 0 ,$$

系全体の角運動量保存

$$\frac{d}{dt} (J_{\text{orb}} + J + J_c) + \frac{1}{\mu} \frac{dE_{\text{GW}}}{dt} = -\mathcal{T}_{\text{GW}}$$

粒子数の時間発展

$$\frac{dn_1}{dt} = 2\omega_I^{(1)} n_1 + \frac{2\Gamma\eta^2}{\Delta^2 + \Gamma^2} n_1 - \frac{1}{M_{c,0}} \frac{dE_{\text{GW}}}{dt}$$

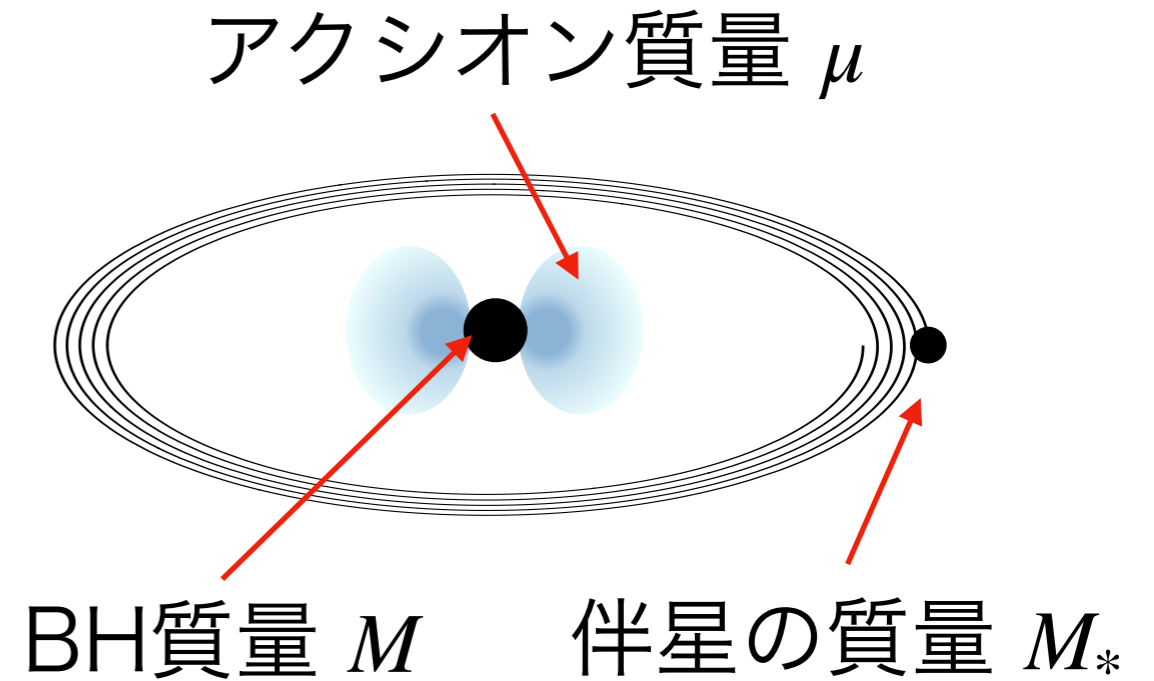
- backreaction, BHへの崩壊, 重力波放射を含んだ定式化
- 広いパラメータ領域で解ける

3. 結果

セットアップ

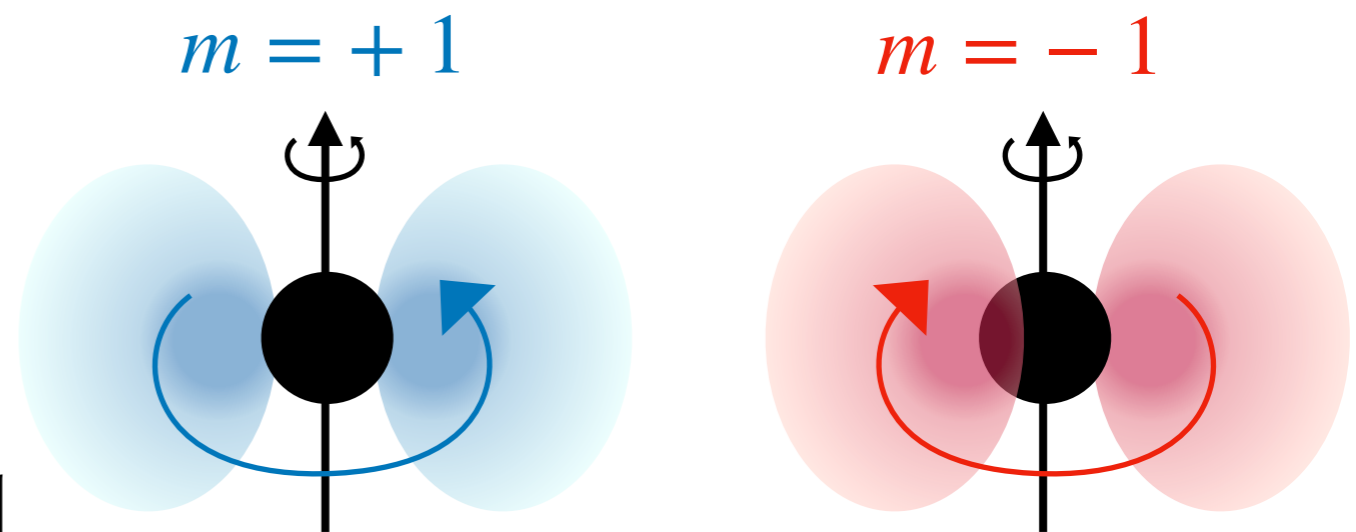
パラメーター

- 重力結合 $\alpha = M\mu$
- 質量比 $q = M_*/M$
- 初期の雲質量 $M_{c,0}$



状況設定

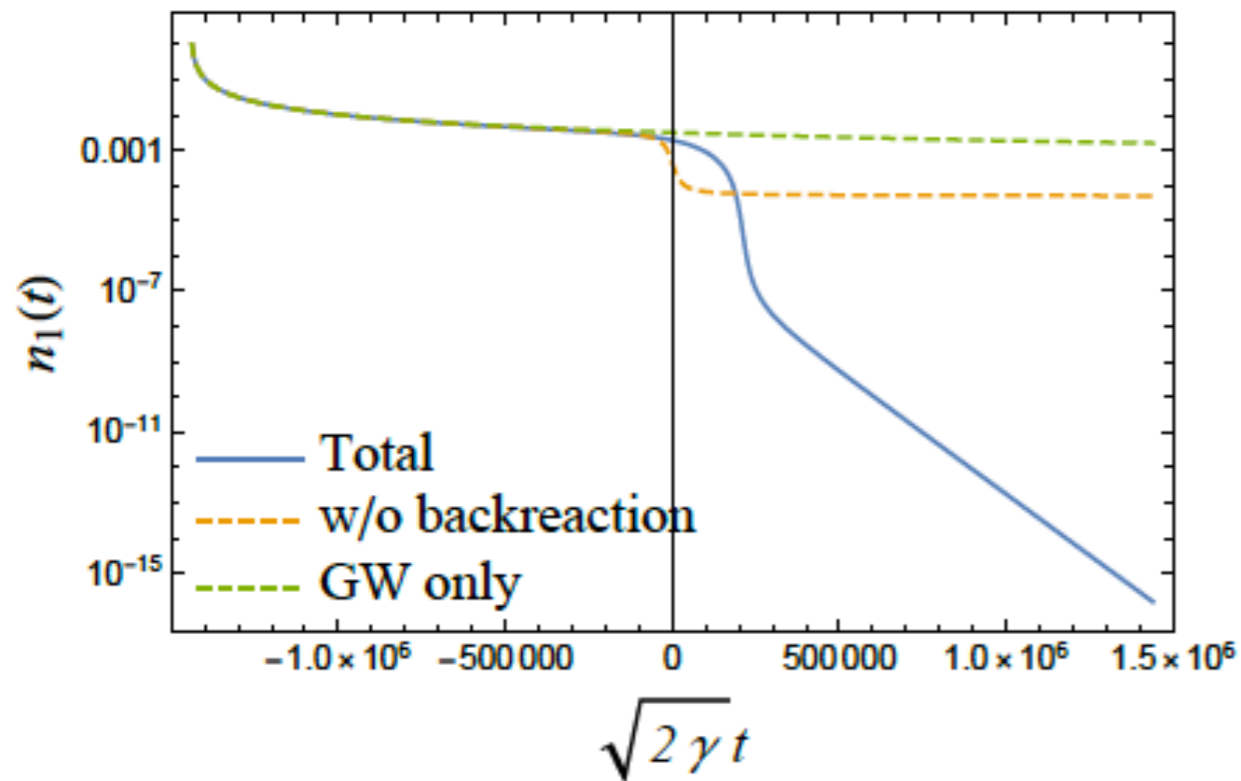
- 遷移 $|211\rangle \rightarrow |21-1\rangle$
- 初期のBH spinで
superradiance条件が飽和



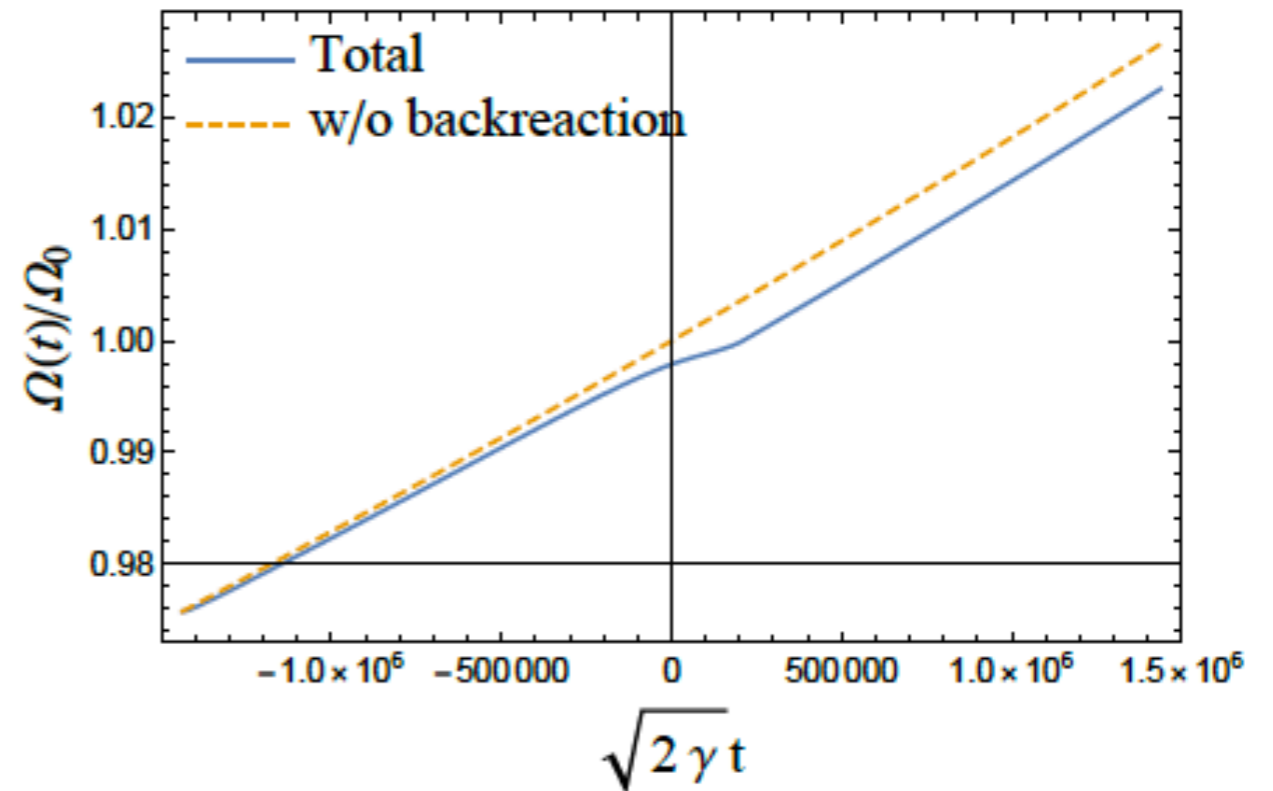
結果

$$\{q = 10^{-4}, \alpha_0 = 0.1, M_{c,0} = 10^{-3}\}$$

規格化した粒子数



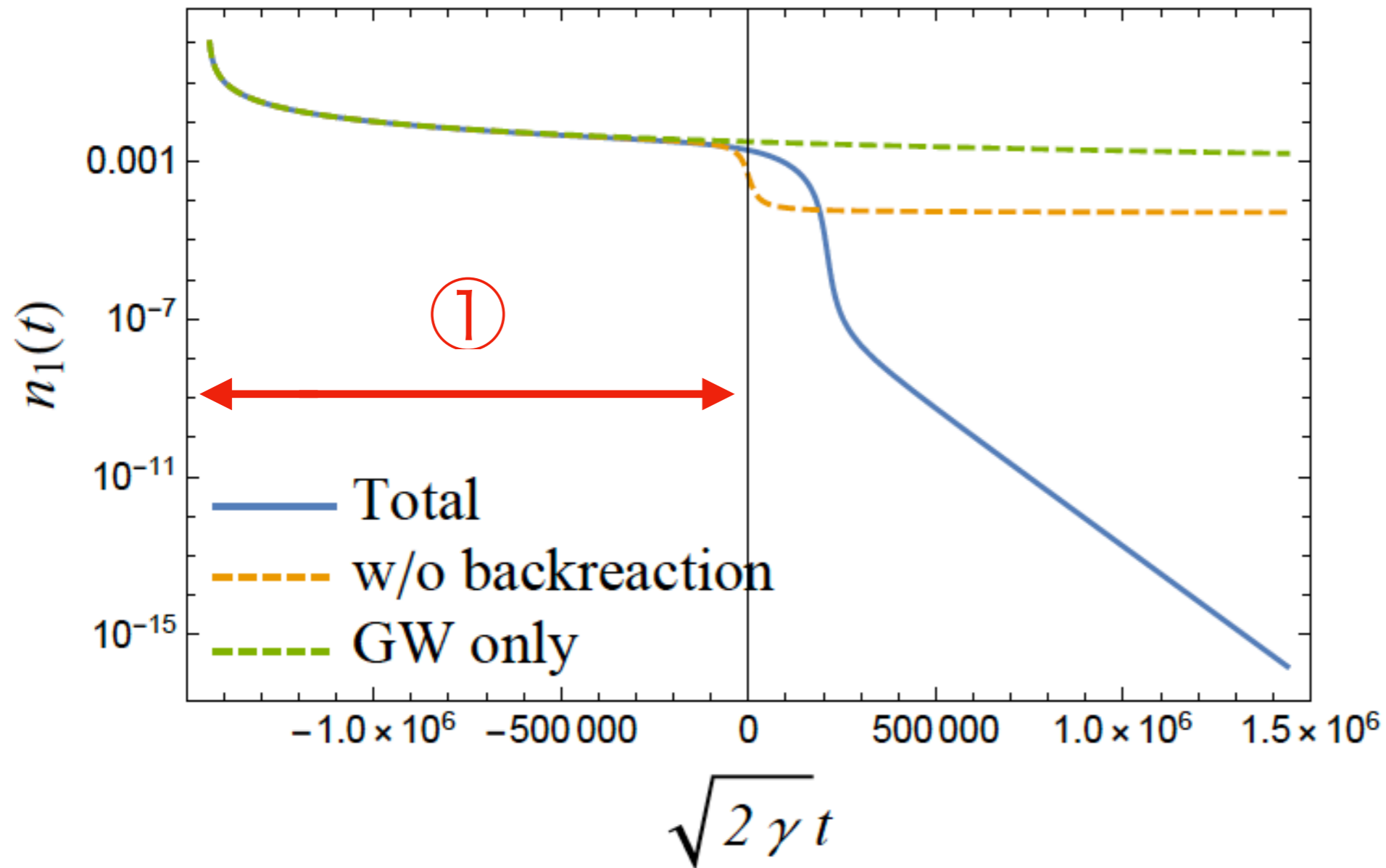
連星の軌道振動数



- $t = 0$ で共鳴が起きる
- 青い実線が全ての効果を取り入れた結果

粒子数の時間発展

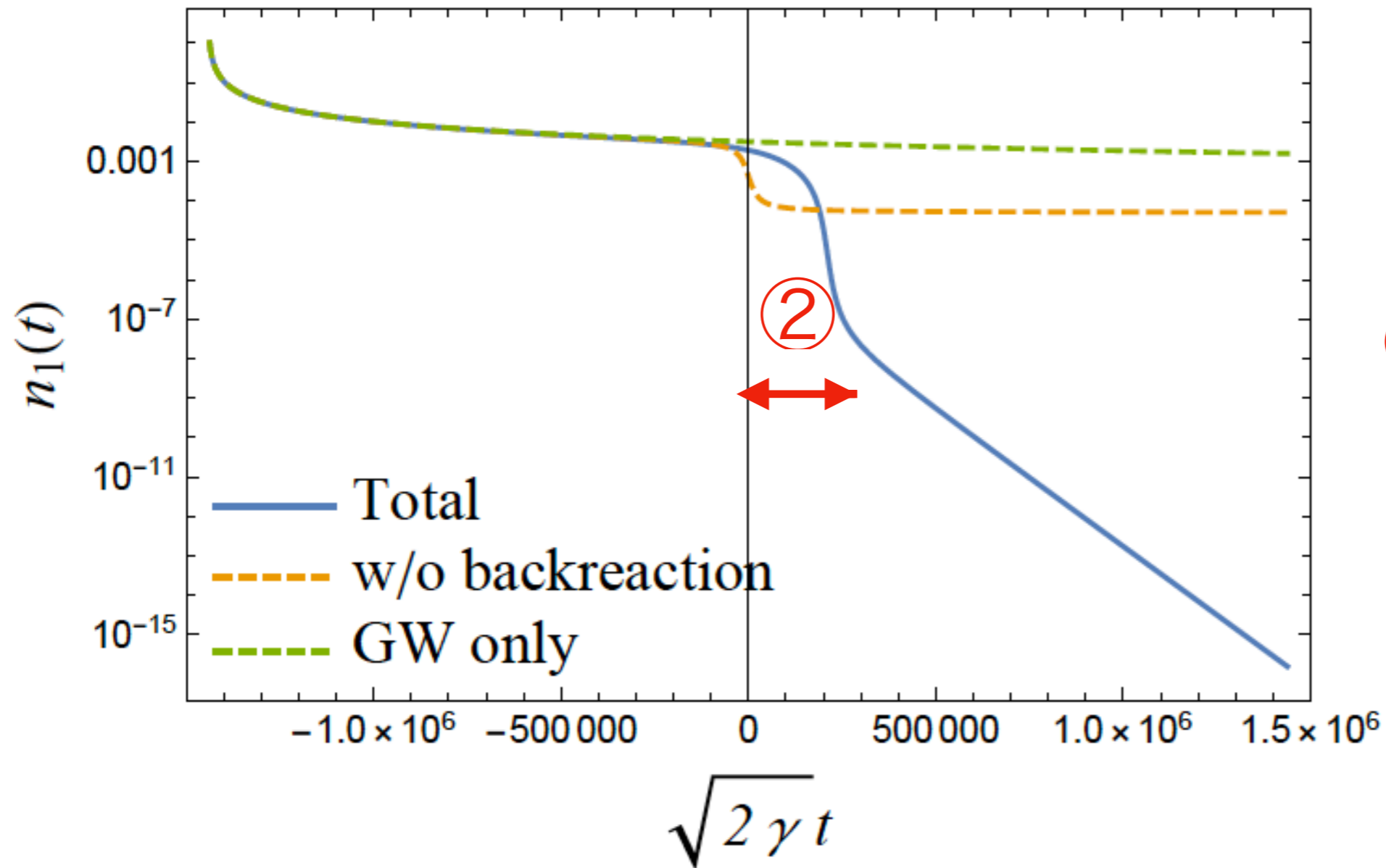
規格化した粒子数



① 主に重力波
放射で減衰

粒子数の時間発展

規格化した粒子数

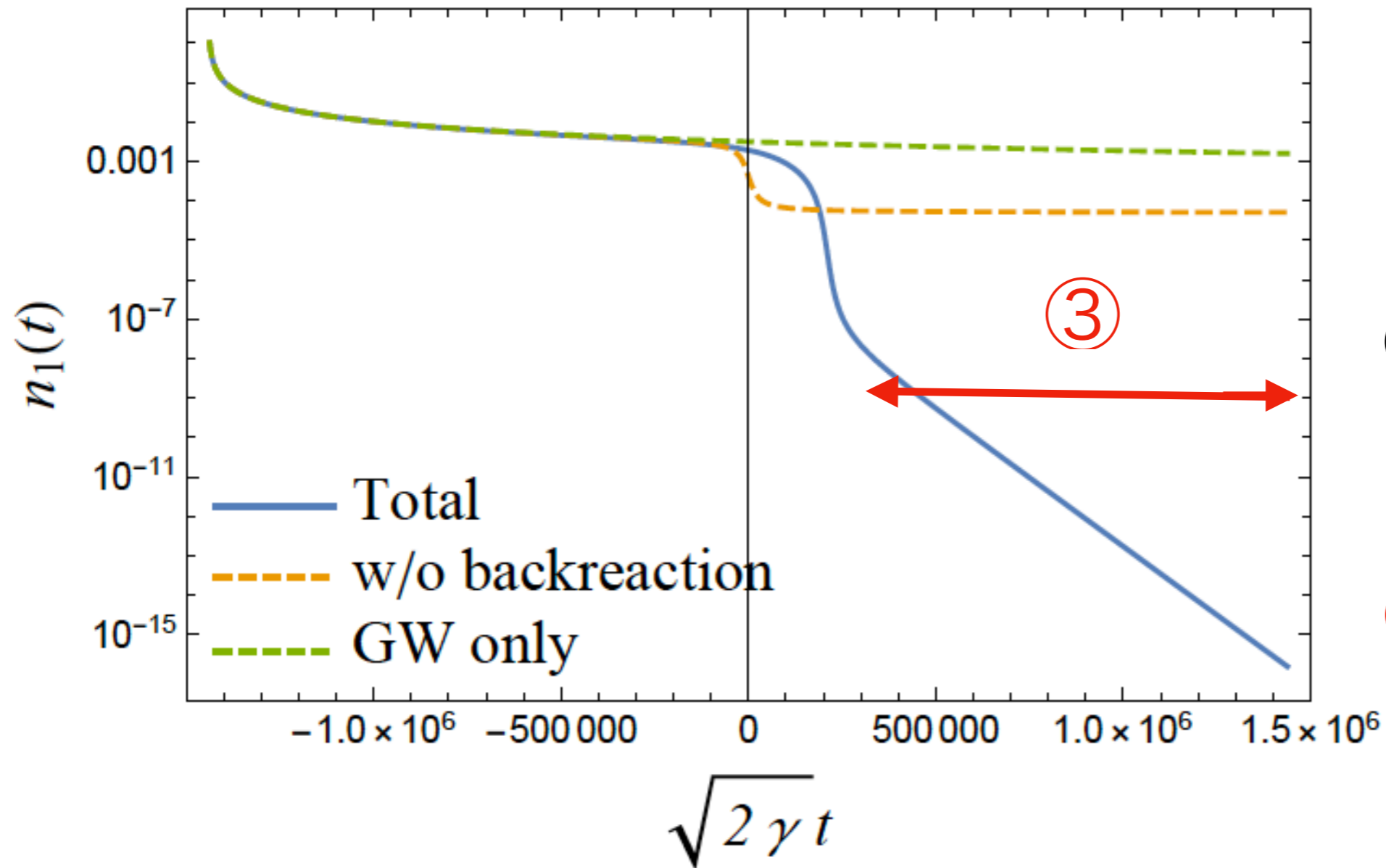


① 主に重力波
放射で減衰

② 潮汐相互作用
による遷移

粒子数の時間発展

規格化した粒子数



① 主に重力波
放射で減衰

② 潮汐相互作用
による遷移

③ BHへの再吸収

BH spin

Superradiance条件

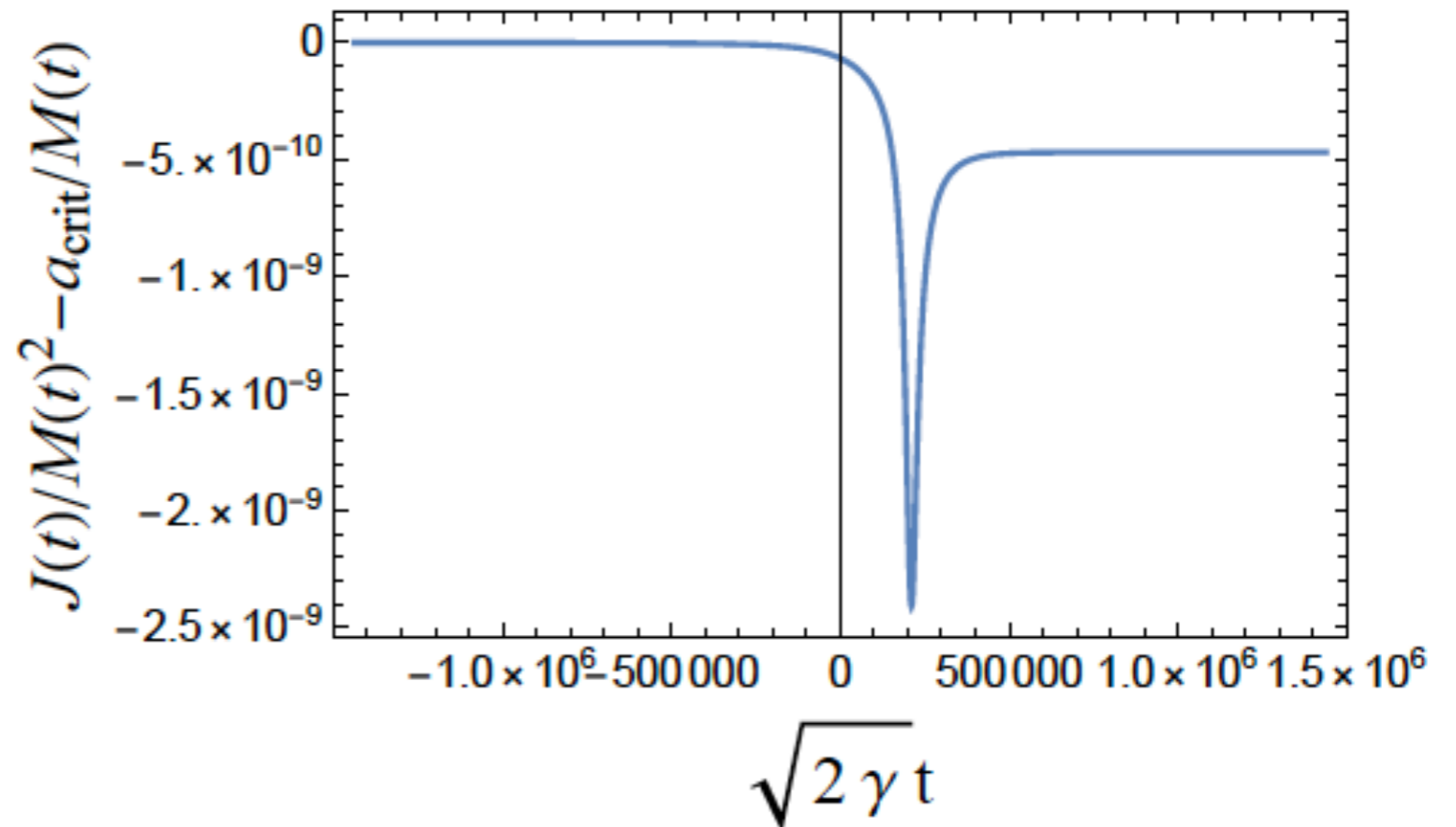
$$\omega_R < m\Omega_H$$

BHの角速度

$$a > a_{\text{crit}} \Rightarrow \omega_I^{(1)} > 0$$

$$a < a_{\text{crit}} \Rightarrow \omega_I^{(1)} < 0$$

臨界spinからのずれ



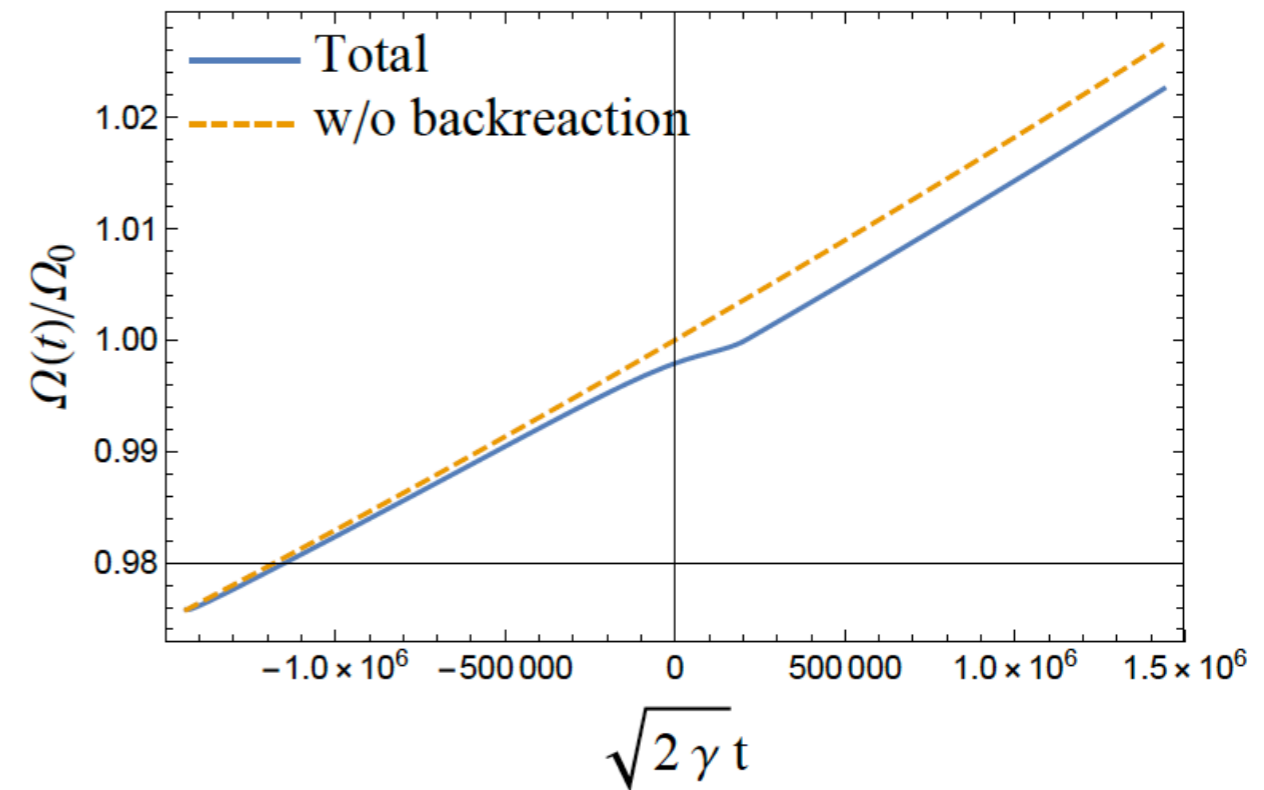
- $m = -1$ のモードに遷移したアクシオンが再吸収されBHがspin-down
- しかし, 禁止領域に影響を与えるほどではない

重力波の振動数変化

共鳴振動数は将来観測の
振動数帯域に入りえる

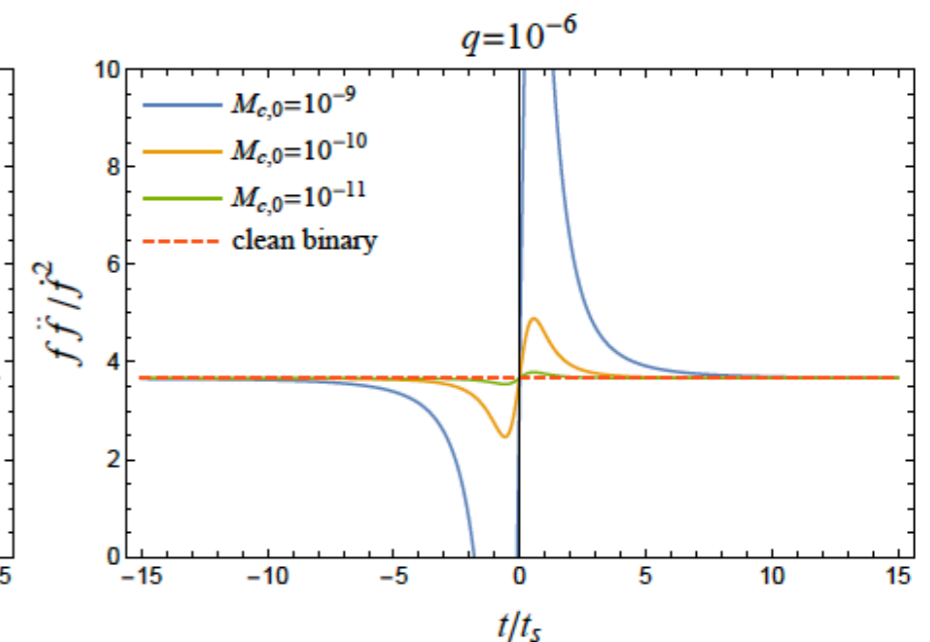
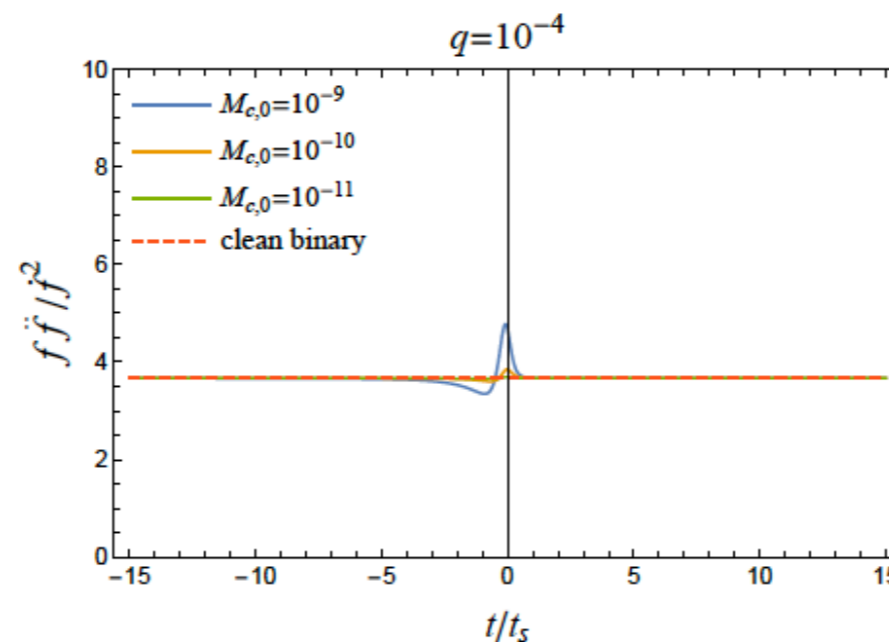
$$f_{\text{res}} = \frac{\Omega_{\text{res}}}{\pi} = 2.2 \text{ mHz} \frac{1}{1 + 4\alpha_0^2} \left(\frac{\alpha_0}{0.1}\right)^7 \left(\frac{10M_{\odot}}{M}\right)$$

- 連星進化の時間スケールは
観測時間より長い



指標

$$\frac{f\ddot{f}}{\dot{f}^2}$$



まとめ

- アクシオン雲が存在する小質量比連星系の進化を調べた.
- backreaction, BHへの崩壊, 重力波放射を含み, 広いパラメーターで系全体の時間発展を解ける定式化を与えた.

結果

- 潮汐相互作用が効率的に働く場合は, 雲は完全に消失
- BH質量-スピン分布の禁止領域はrobust
- $f\dot{f}/f^2$ は雲の存在を示す指標になり得る