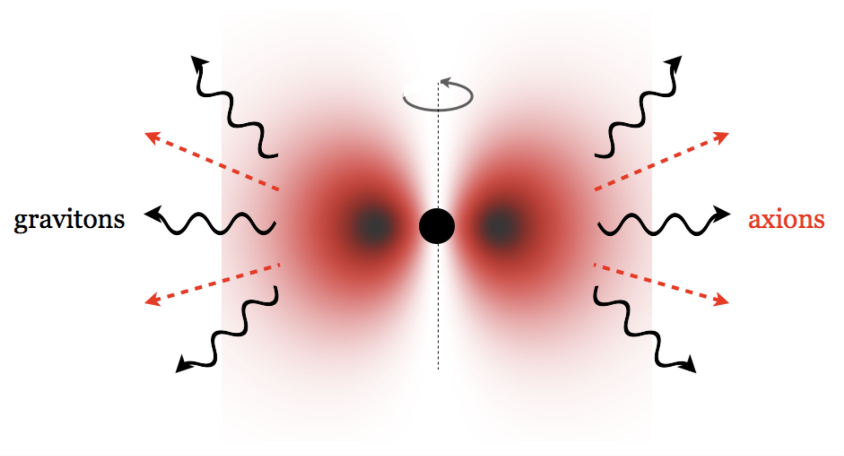
ブラックホール・アクシオン系と重力波放射

吉野裕高（大阪市大）

& 小玉英雄（京大基研）



PTP128, 153 (2012);
PTEP2014, 043E02 (2014);
PTEP2015, 061E01 (2015);
arXiv:1505.00714.

神戸大学大学院理学研究科宇宙論研究室セミナー

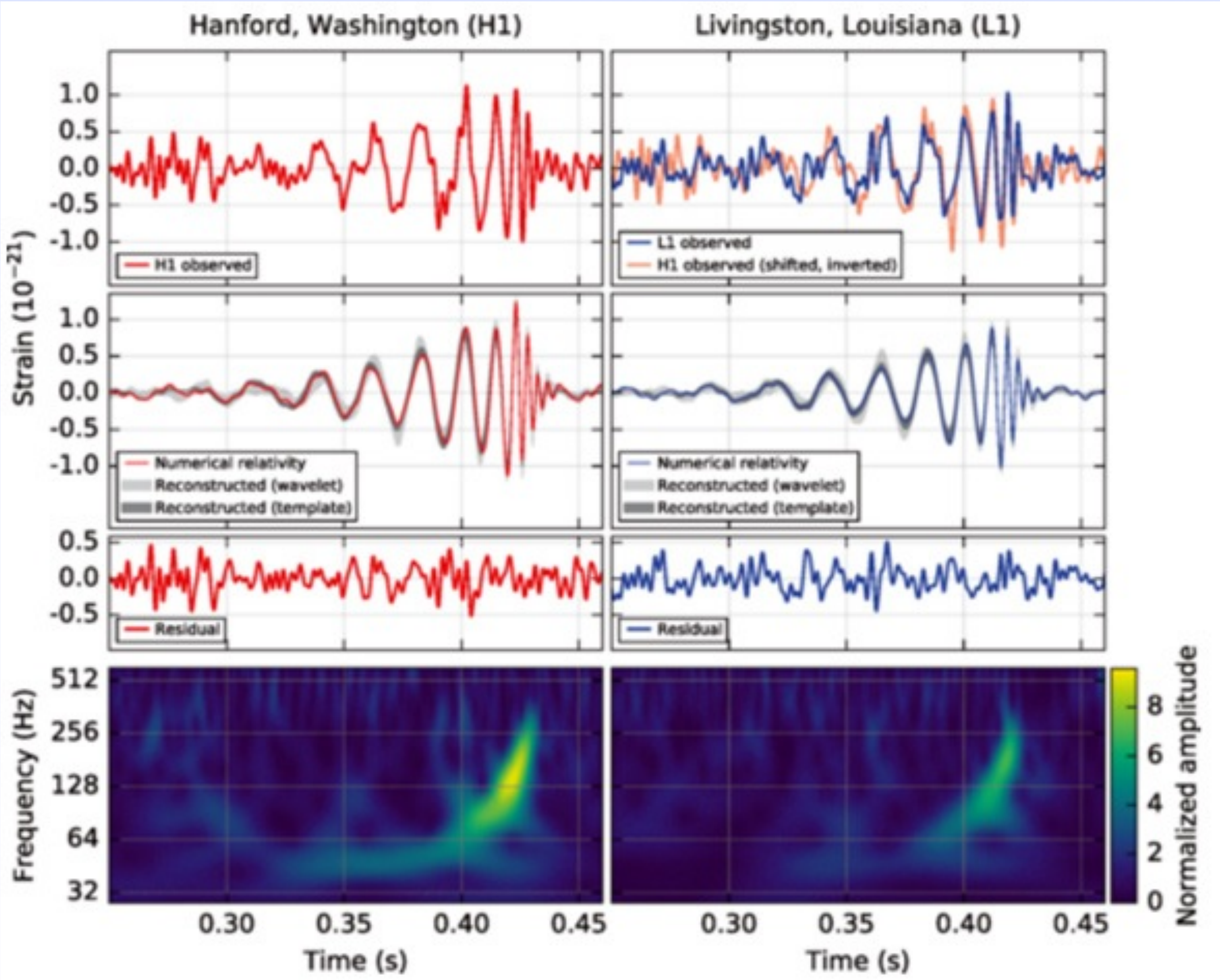
(2016年6月29日)

目次

- イントロダクション
- 超放射不安定
- ブラックホール・アクシオン系の時間発展
- 非線形自己相互作用 *PTP128, 153 (2012); arXiv:1505.00714.*
- 重力波放射 *arXiv:1505.00714.*
- モデルに対する制限
- まとめ

イントロダクション

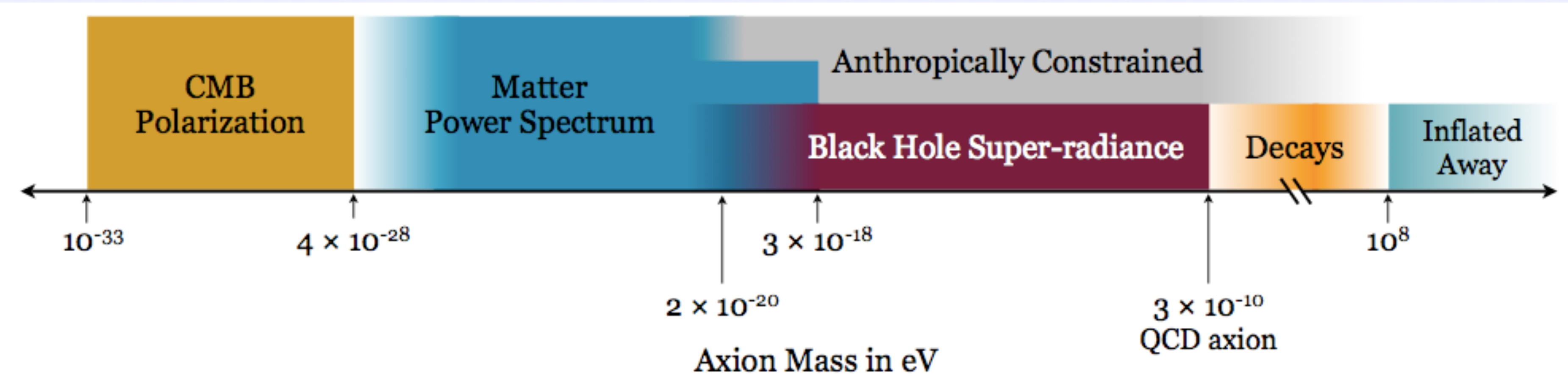
重力波が検出された！


Hanford, Washington (H1)
Livingston, Louisiana (L1)
Strain (10^{-21})
1.0
0.5
0.0
-0.5
-1.0
H1 observed
L1 observed
H1 observed (shifted, inverted)
Numerical relativity
Reconstructed (wavelet)
Reconstructed (template)
Residual
Frequency (Hz)
512
256
128
64
32
0.30
0.35
0.40
0.45
Time (s)
Normalized amplitude
0
2
4
6
8

AXIVERSE シナリオ

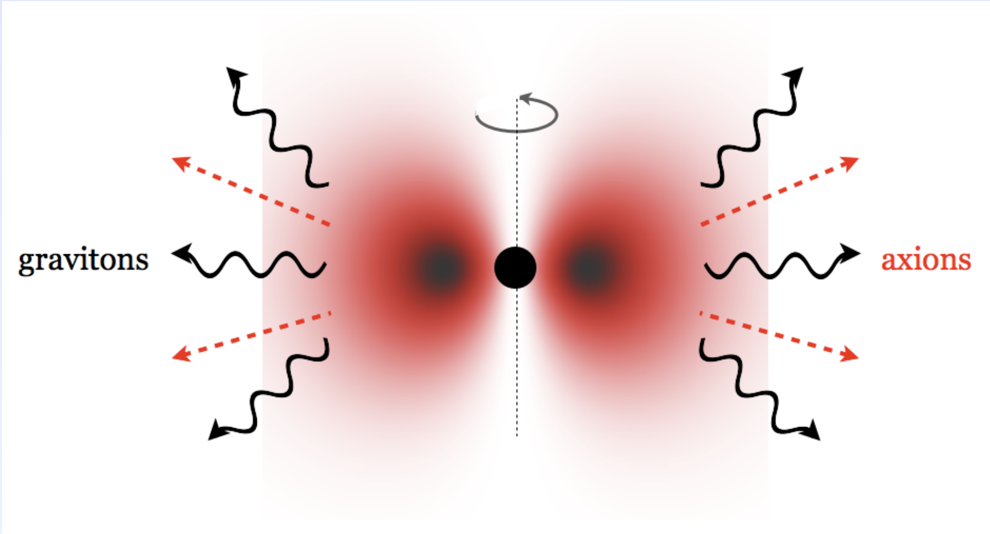
Arvanitaki, Dimopoulos, Dubvosky, Kaloper, March-Russel,
PRD81 (2010), 123530.

- ストリングアクシオン
  - 超弦理論は10〜100のアクシオン的な有質量粒子の存在を予言する
  - ストリングアクシオンが引き起こすと期待される様々な現象がある

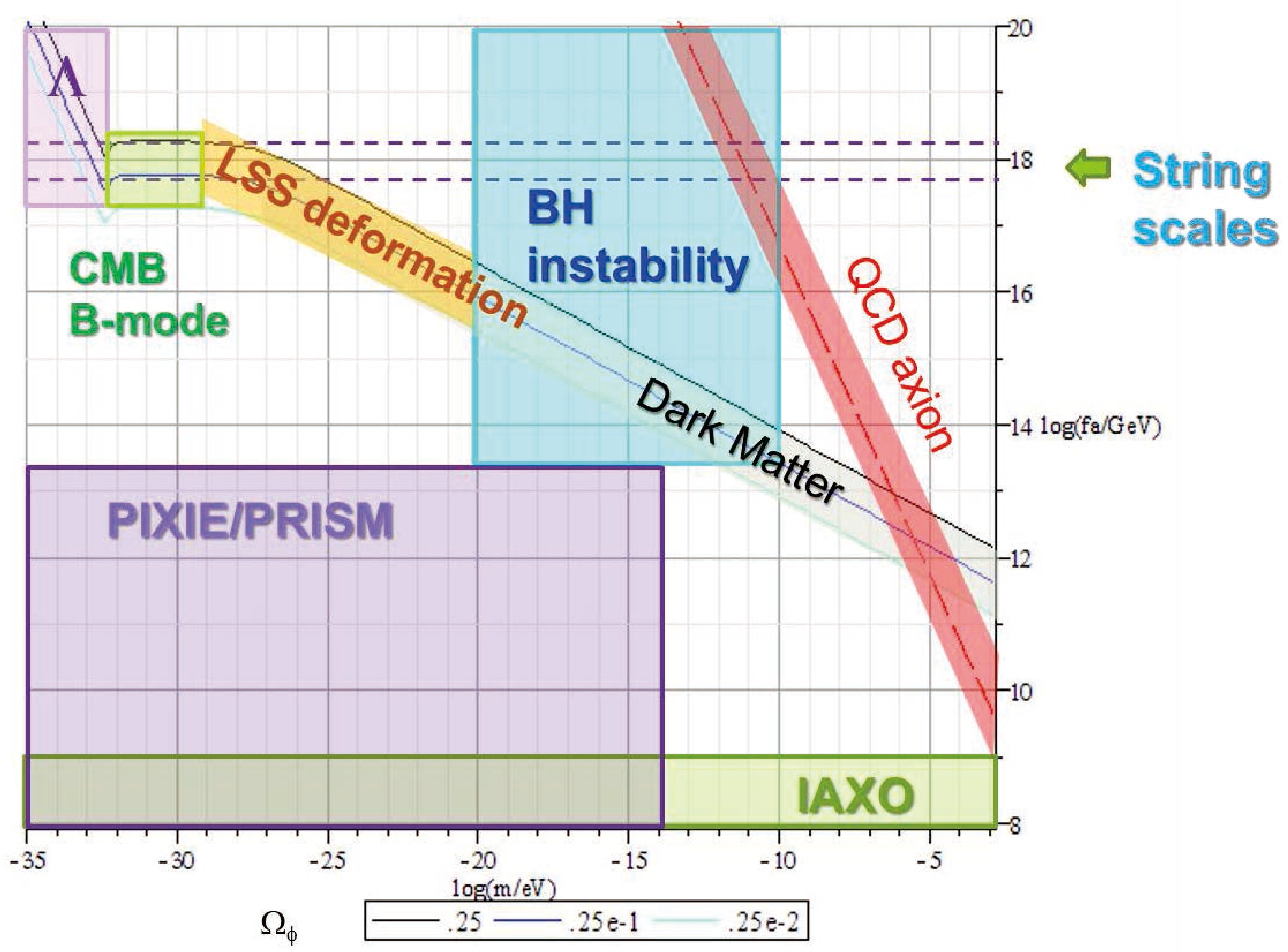


ストリングアクシオン場がある場合

- 天体ブラックホールの回転エネルギーを引き抜き、アクシオンの雲を形成する。



  - 超放射不安定
  - 非線形の自己相互作用
  - 重力波放射
  - BHパラメーターの時間発展



by Hideo Kodama

超放射不安定

Kerr ブラックホール

- メトリック

$$ds^2 = -\left(\frac{\Delta - a^2 \sin^2\theta}{\Sigma}\right) dt^2 - \frac{2a \sin^2\theta (r^2 + a^2 - \Delta)}{\Sigma} dt d\phi$$
$$+ \left[\frac{(r^2 + a^2)^2 - \Delta a^2 \sin^2\theta}{\Sigma}\right] \sin^2\theta d\phi^2 + \frac{\Sigma}{\Delta} dr^2 + \Sigma d\theta^2$$

$$\Sigma = r^2 + a^2 \cos^2\theta,$$
$$\Delta = r^2 + a^2 - 2Mr.$$

$$J = Ma$$

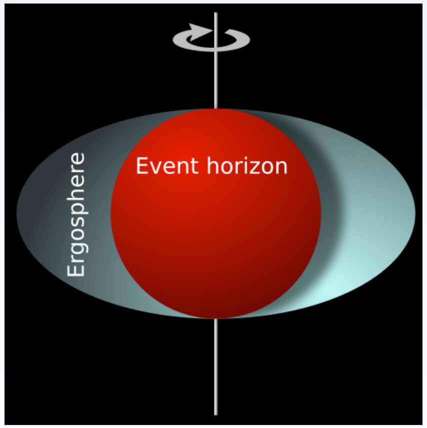
- エルゴ領域

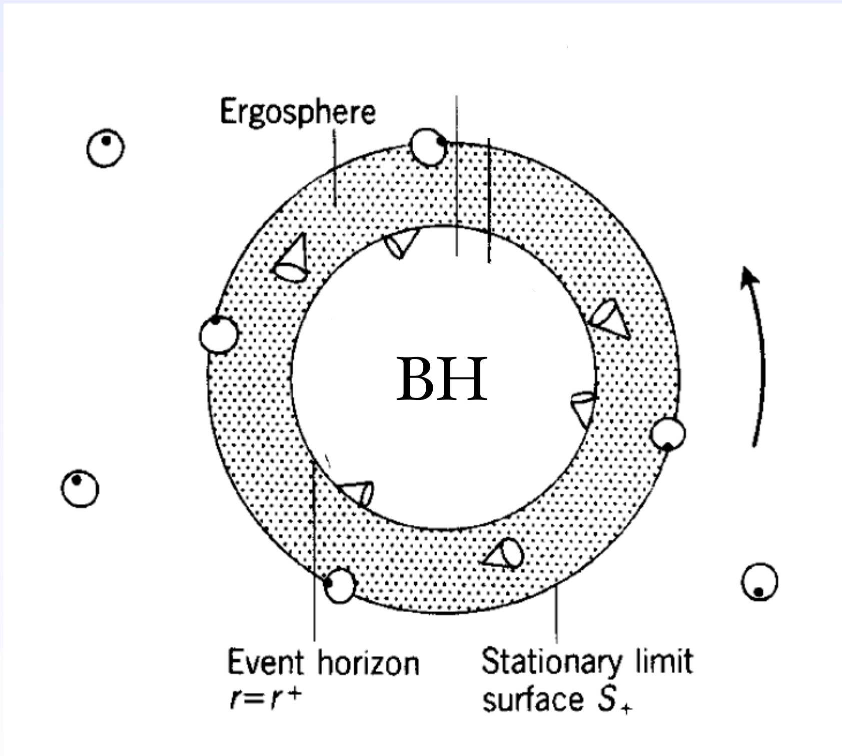
$\xi = \partial_t$ が空間的になる

$$\xi_a \xi^a = g_{tt} > 0$$

$$E = -p_a \xi^a$$

正にも負にもなる



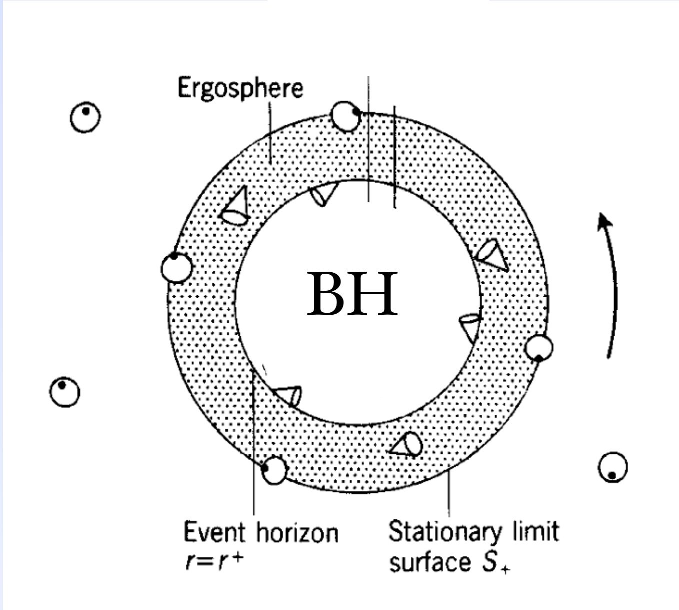


Energy extraction

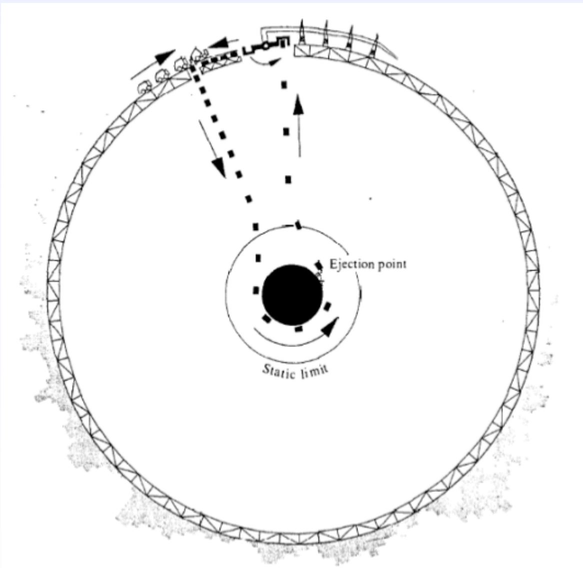
- BH's rotational energy

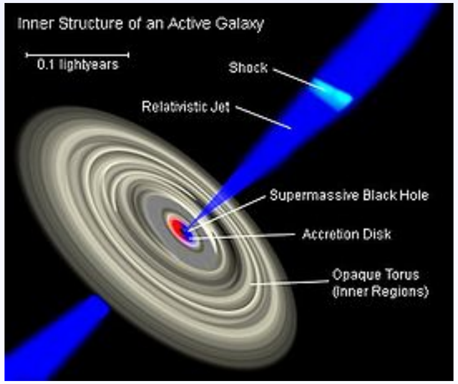
$$M_{\rm rot} = M - M_{\rm irr}$$

$$M_{\rm irr} = \sqrt{\frac{A_H}{16\pi}}$$



- Methods of energy extraction
  - Penrose process
  - Blandford-Znajek process
  - Superradiance





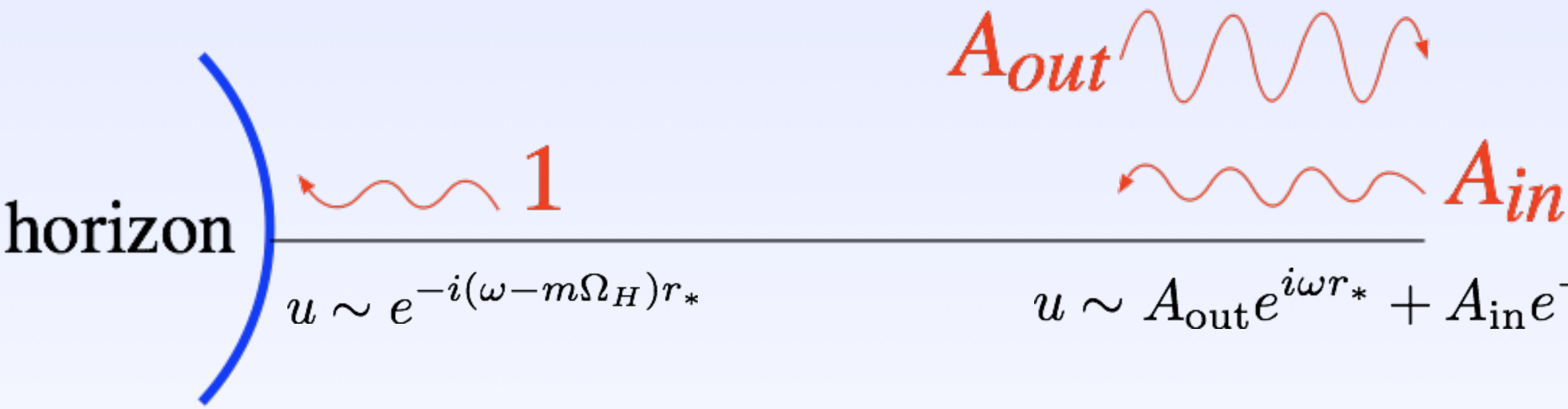
(Next slide)

Superradiance

- Massless Klein-Gordon field $\nabla^2\Phi = 0$ Zel'dovich (1971)

$$\Phi = \mathrm{Re}[e^{-i\omega t}R(r)S(\theta)e^{im\phi}]$$

$$R = \frac{u}{\sqrt{r^2+a^2}} \quad \Rightarrow \quad \frac{d^2u}{dr_*^2} + \left[\omega^2 - V(\omega)\right]u = 0$$



$$u \sim e^{-i(\omega - m\Omega_H)r_*}$$

$$u \sim A_{\mathrm{out}}e^{i\omega r_*} + A_{\mathrm{in}}e^{-i\omega r_*}$$

$$\boxed{\left(1 - \frac{m\Omega_H}{\omega}\right)|T|^2 = 1 - |R|^2}$$

Superradiant condition:

$$\omega < \Omega_H m$$

重力原子

- 有質量スカラー場

$$\nabla^2\Phi - \mu^2\Phi = 0$$

$$\Phi = \mathrm{Re}[e^{-i\omega t}R(r)S(\theta)e^{im\phi}]$$

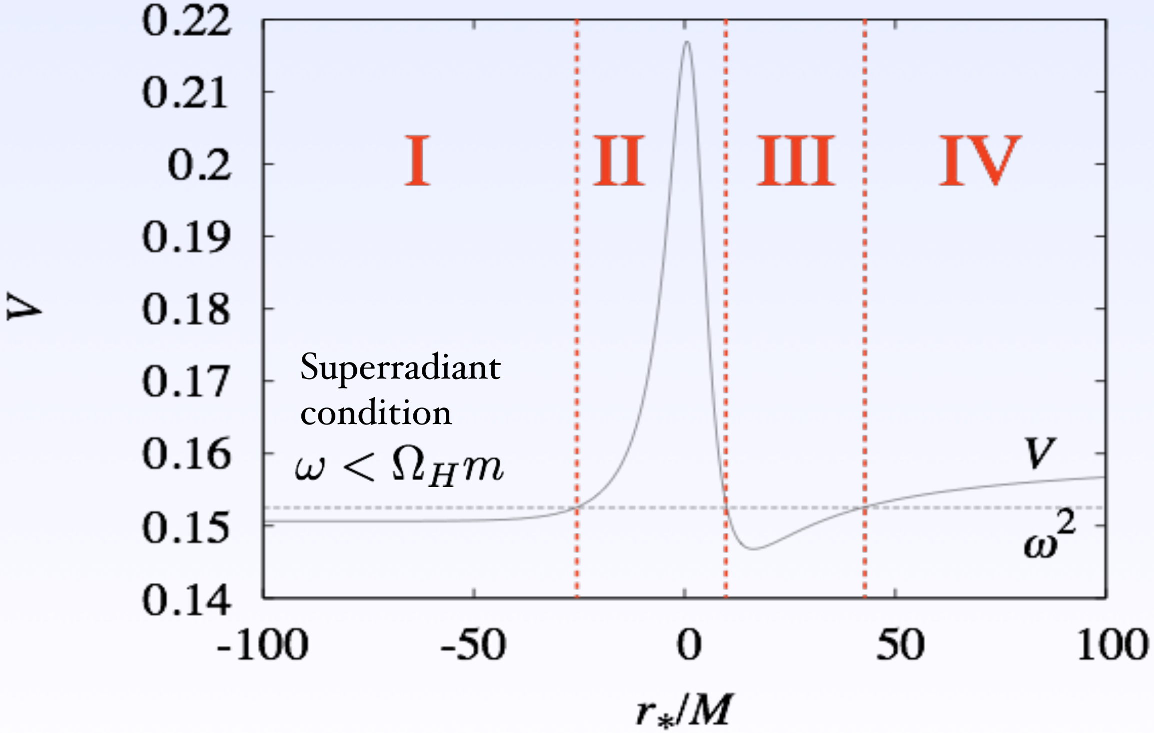
$$R = \frac{u}{\sqrt{r^2+a^2}}$$

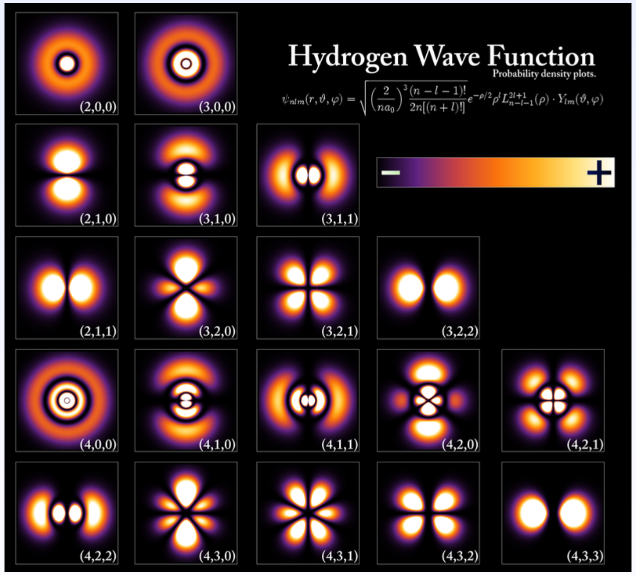
$$\frac{d^2u}{dr_*^2} + \left[\omega^2 - V(\omega)\right]u = 0$$

$$\omega = \omega_R + i\,\boxed{\omega_I}$$ 正ならば不安定

量子数:

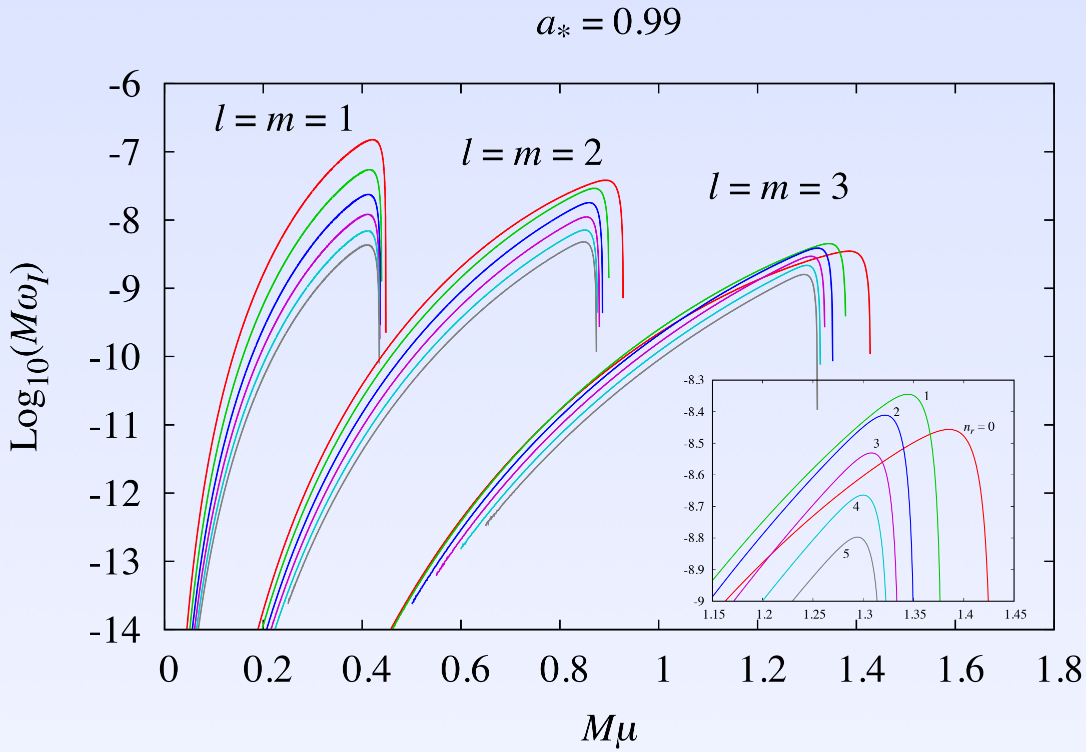
$$\ell,\ m,\ n\ (\mathrm{or}\ n_r)$$





波動関数と成長率

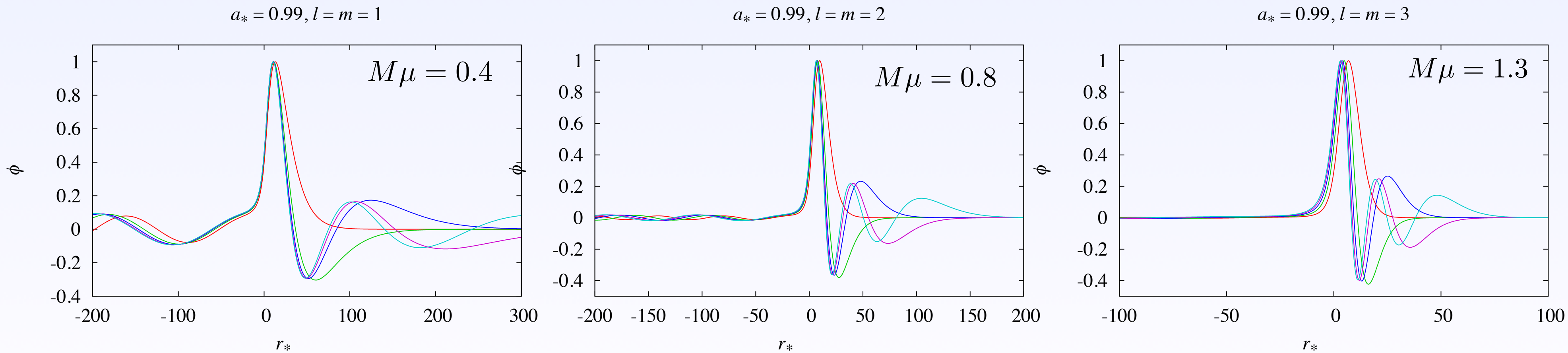
HY and Kodama, arXiv:1505.00714.



時間スケール:

$$\omega_I M \sim 10^{-7} \quad \Rightarrow \quad \sim 1 \text{ min.}$$

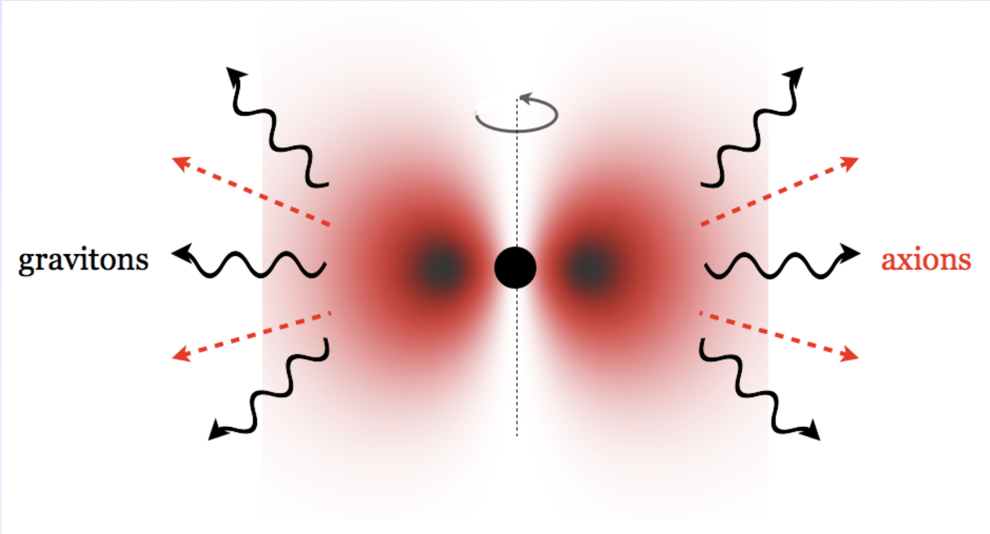
$$M = M_\odot$$



ブラックホール・アクシオン系の時間発展（他のグループの研究）

ストリングアクシオン場がある場合

- 天体ブラックホールの回転エネルギーを引き抜き、アクシオンの雲を形成する。

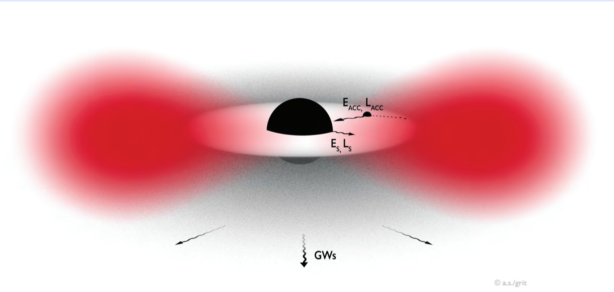


- 超放射不安定
- 非線形の自己相互作用
- 重力波放射
- BHパラメーターの時間発展

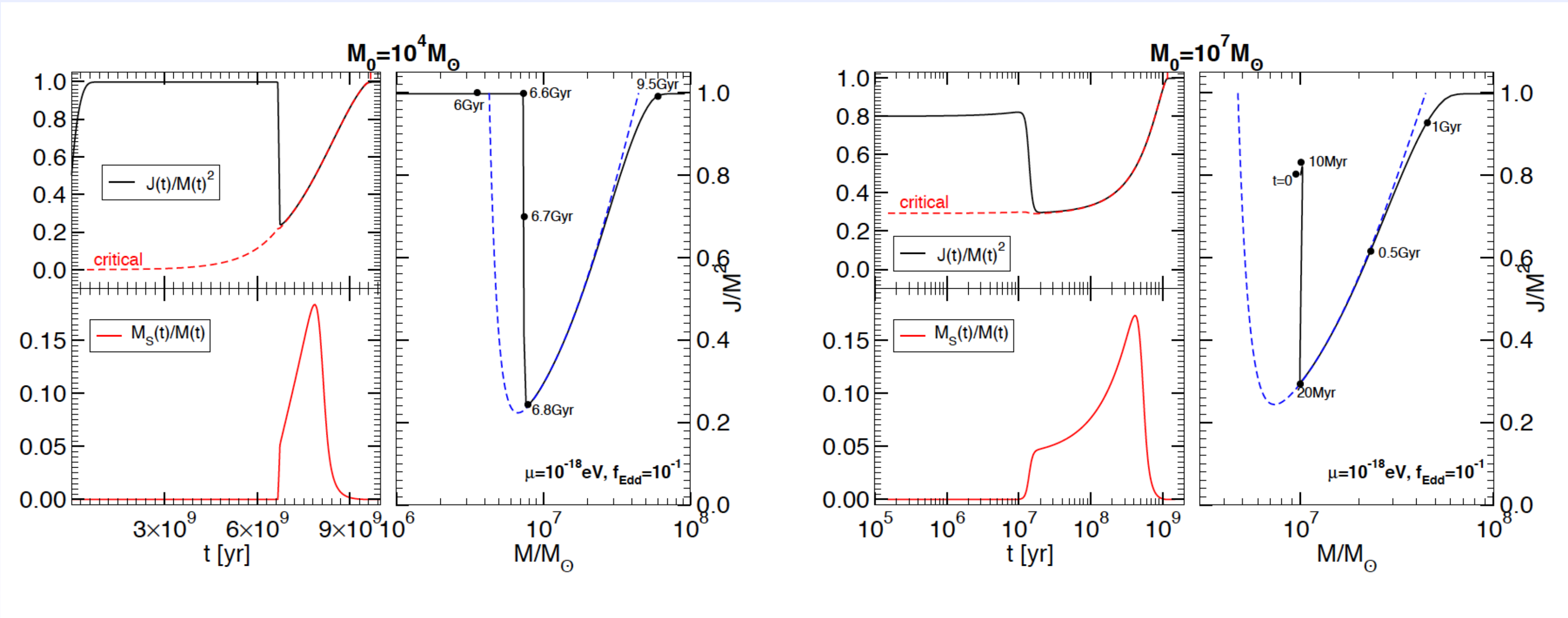
ブラックホール・アクシオン系の時間発展

Brito, Cardoso & Pani, arXiv:1411.0686.

$$\dot{M} + \dot{M}_S = -\dot{E}_{\rm GW} + \dot{M}_{\rm ACC}\,,$$
$$\dot{J} + \dot{J}_S = -\frac{1}{\mu}\dot{E}_{\rm GW} + \dot{J}_{\rm ACC}\,,$$



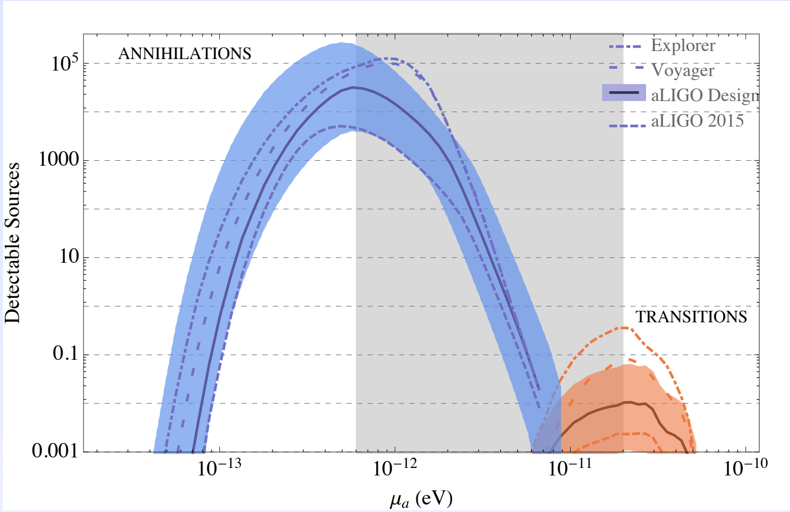
$$\dot{M} = -\dot{E}_S + \dot{M}_{\rm ACC}\,,$$
$$\dot{J} = -\frac{1}{\mu}\dot{E}_S + \dot{J}_{\rm ACC}\,,$$



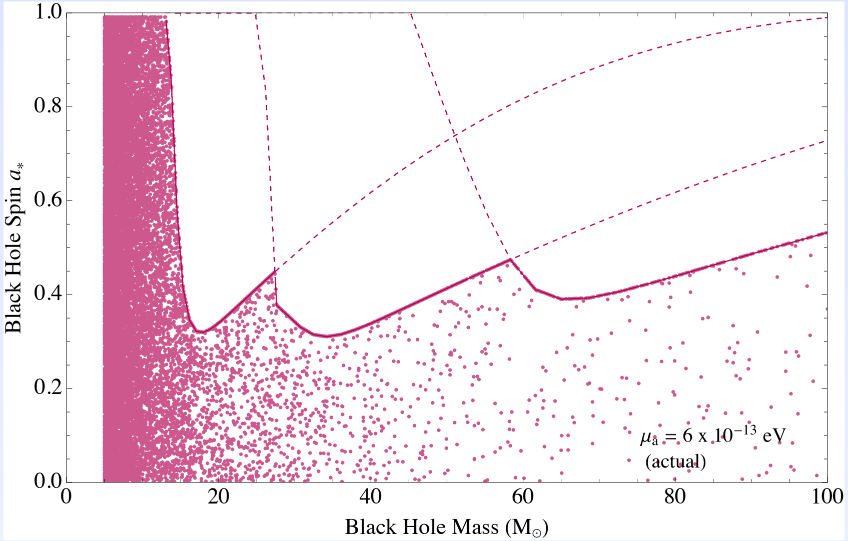
観測的検証の可能性 (QCDアクシオン)

Arvanitaki *et al.*, arXiv:1411.0686.

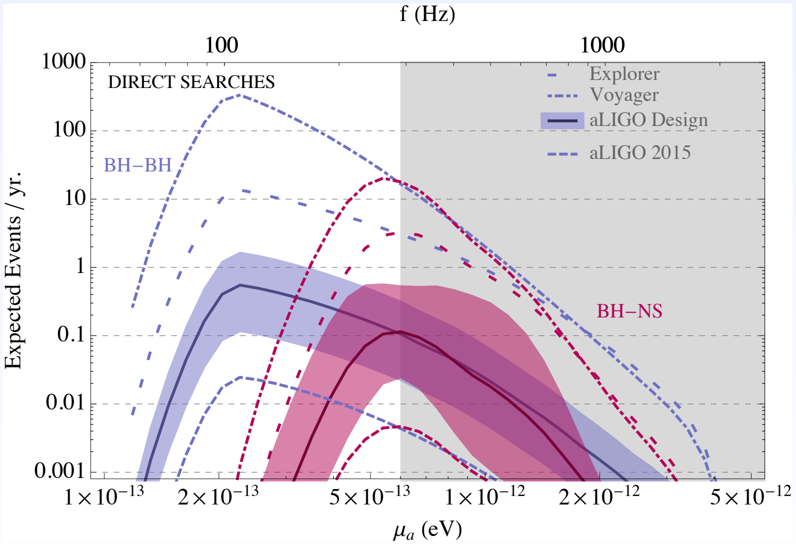
- 連続重力波検出可能性



- 合体前のBHのパラメータ分布



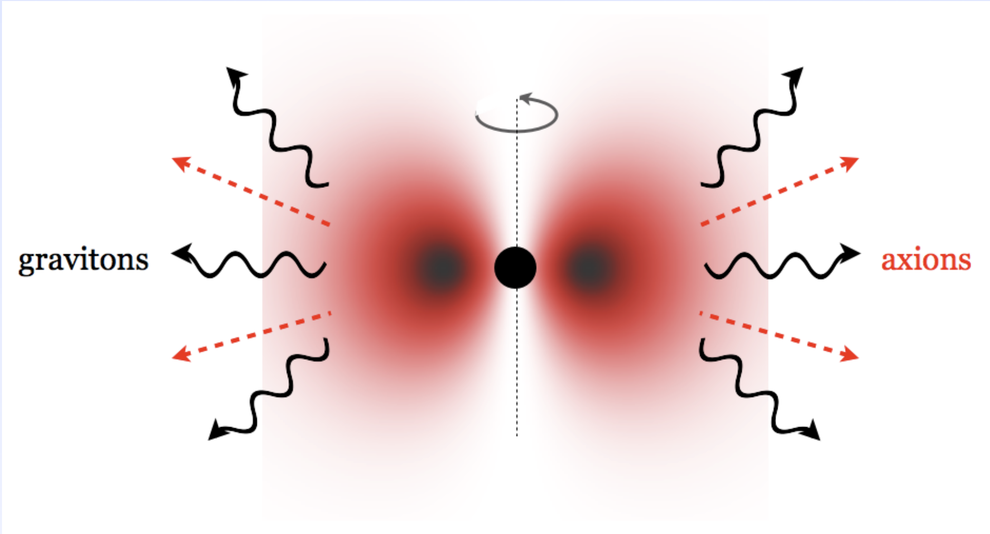
- 合体後の連続重力波検出可能性



非線形自己相互作用

ストリングアクシオン場がある場合

- 天体ブラックホールの回転エネルギーを引き抜き、アクシオンの雲を形成する。



- 超放射不安定
- 非線形の自己相互作用
- 重力波放射
- BHパラメーターの時間発展

非線形自己相互作用の効果

- $$V = f_a^2 \mu^2 [1 - \cos(\Phi / f_a)]$$

$$\boxed{\nabla^2 \varphi - \mu^2 \sin\varphi = 0} \qquad \varphi \equiv \frac{\Phi}{f_a}$$

- 非線形相互作用が効く条件： $$\frac{E_a}{M} \sim \frac{1}{(\mu M)^4} \left(\frac{f_a}{M_p} \right)^2$$

- BHスピンダウンが効く条件： $$\frac{E_a}{M} \sim 1 - \frac{1}{\sqrt{2}}$$

典型的なパラメータでは、スピンダウンよりも前に効く

シミュレーション

- Sine-Gordon 場をカー時空を背景時空として解く。

$$\nabla^2 \varphi - \mu^2 \sin\varphi = 0$$

- コード:
  - 3Dコード(r, θ, ϕ) HY and Kodama, PTP128, 153 (2012)

    数値不安定をさけるために回転座標系を用いる

  - 擬スペクトル法のコード

$$\varphi = \sum_{\ell,m} a_{\ell m}(t, r_*) Y_{\ell m}(\theta, \phi)$$

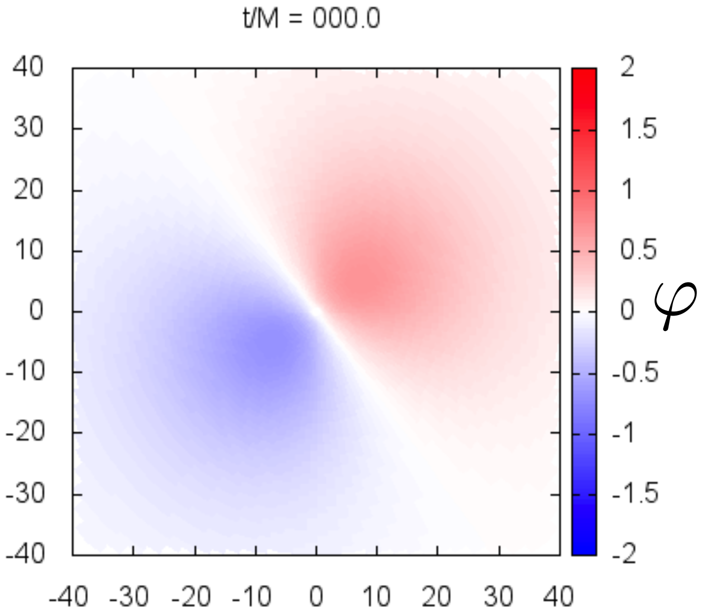
ここで見せるシミュレーション

Simulations	a_*	$M\mu$	(ℓ, m)	Bosenova?
arXiv:1505.00714. (1a)	0.99	0.4	$(1, 1)$	Yes
arXiv:1505.00714. (1b)	0.99	0.3	$(1, 1)$	Yes
arXiv:1505.00714. (2)	0.99	0.8	$(2, 2)$	No
arXiv:1505.00714. (3a)	0.99	0.4	$(1, 1) + (2, 2)$	(?)
PRELIMINARY (3b)	0.99	0.4	$(1, 1) + (2, 2)$	(?)

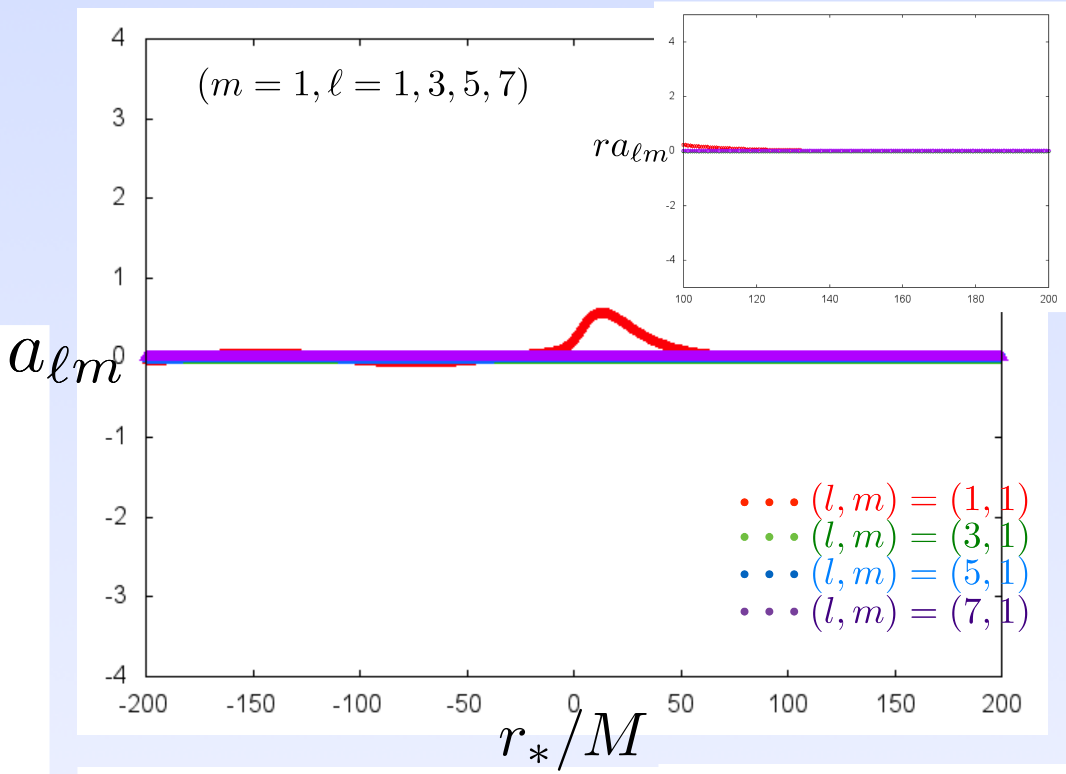
ここで見せるシミュレーション

Simulations	a_*	$M\mu$	(ℓ, m)	Bosenova?
arXiv:1505.00714. (1a)	0.99	0.4	$(1, 1)$	Yes
arXiv:1505.00714. (1b)	0.99	0.3	$(1, 1)$	Yes
arXiv:1505.00714. (2)	0.99	0.8	$(2, 2)$	No
arXiv:1505.00714. (3a)	0.99	0.4	$(1, 1) + (2, 2)$	(?)
PRELIMINARY (3b)	0.99	0.4	$(1, 1) + (2, 2)$	(?)

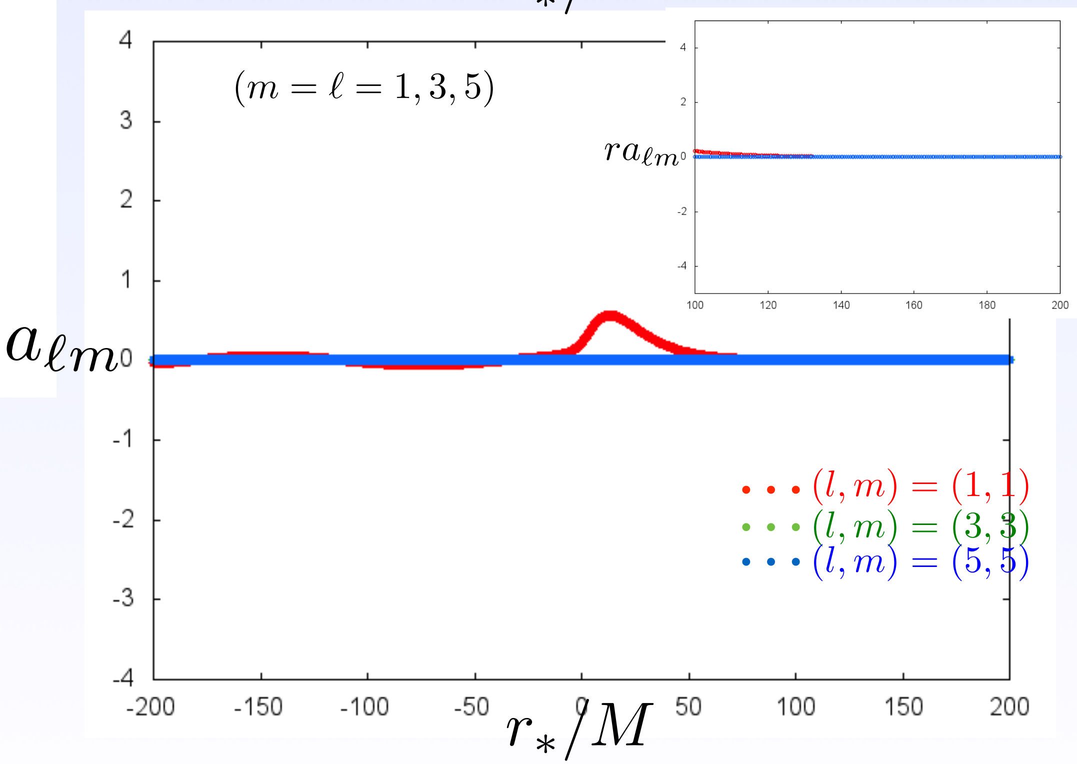
(Ia) の場合



t/M = 000.0
φ



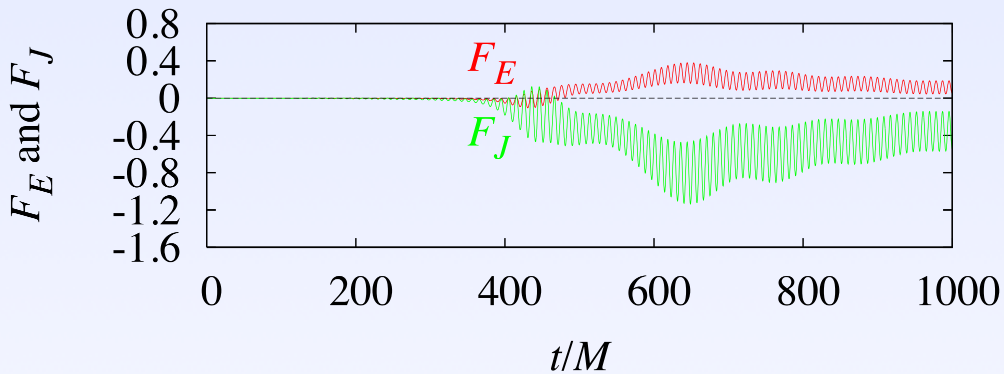
$(m = 1, \ell = 1, 3, 5, 7)$
$a_{\ell m}$
$r a_{\ell m}$
r_*/M
$(l, m) = (1, 1)$
$(l, m) = (3, 1)$
$(l, m) = (5, 1)$
$(l, m) = (7, 1)$



$(m = \ell = 1, 3, 5)$
$a_{\ell m}$
$r a_{\ell m}$
r_*/M
$(l, m) = (1, 1)$
$(l, m) = (3, 3)$
$(l, m) = (5, 5)$

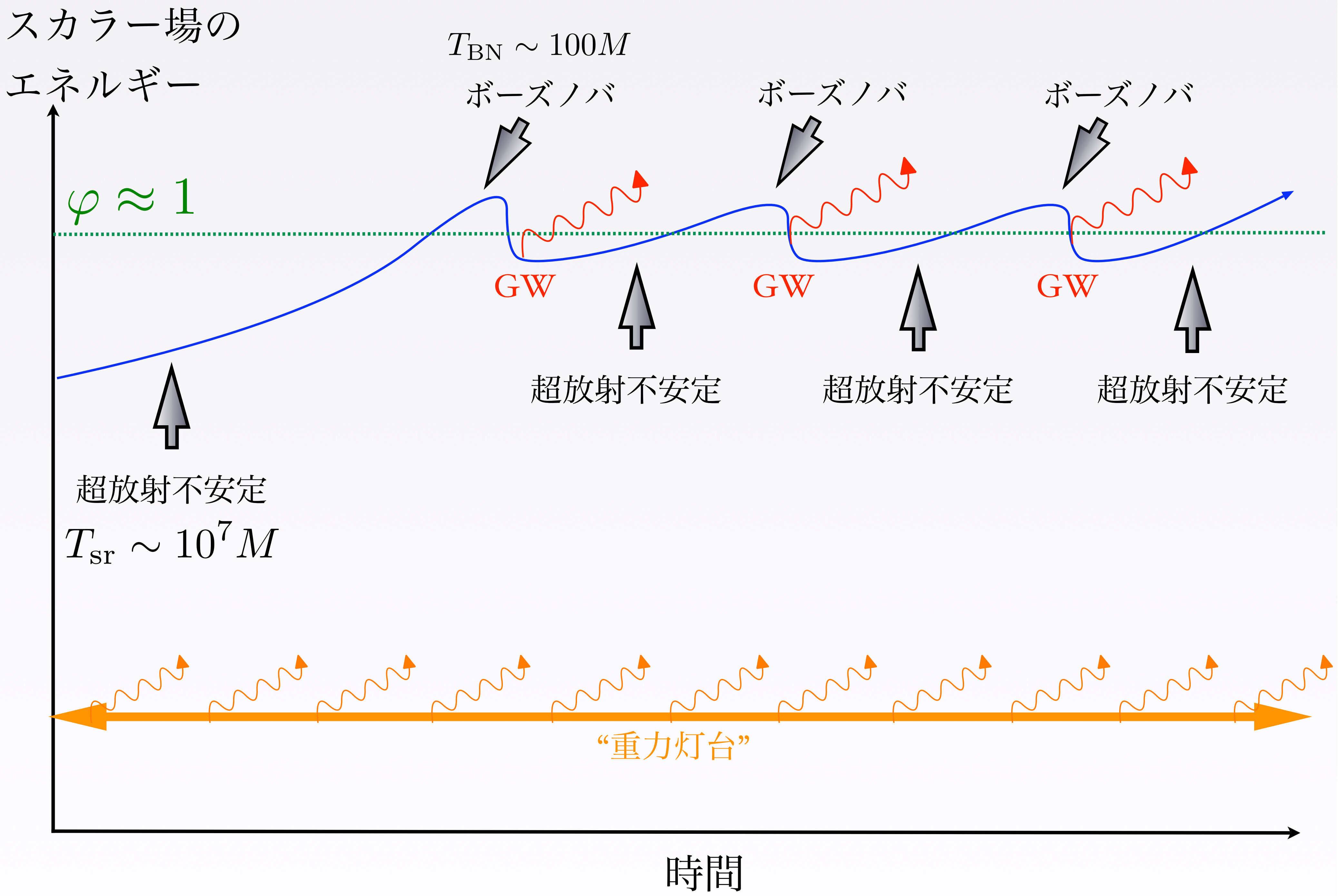
シミュレーション (1a) のまとめ

- $\varphi_{\rm peak} \lesssim 0.6$ ⇨ 何も起こらない
- $\varphi_{\rm peak} \gtrsim 0.7$ ⇨ ボーズノバが起こる
- ボーズノバは、モードの励起による正のエネルギーの落下によって特徴づけられる。



  - m = -1 モードにより超放射不安定が中断される。約5%のエネルギーがブラックホールに落下
  - 高次の (l,m) モードにより、20%のエネルギーが遠方に運ばれる。

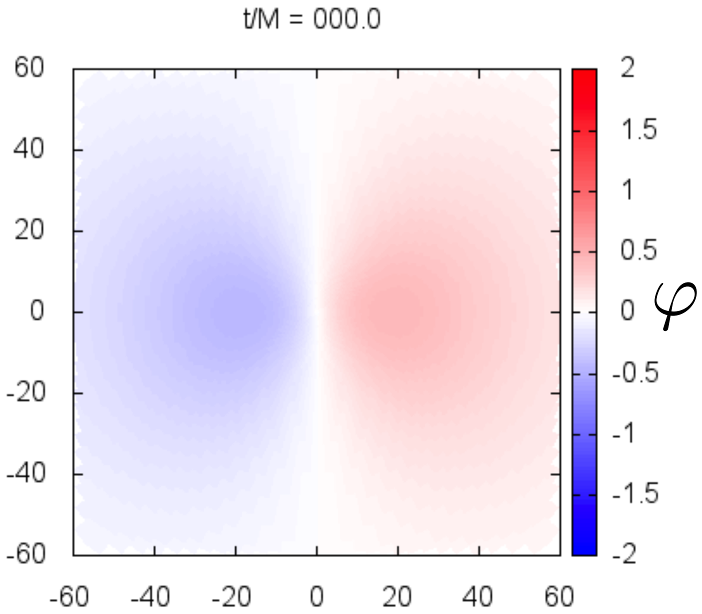
BH-アクシオン系のおおまかな時間発展



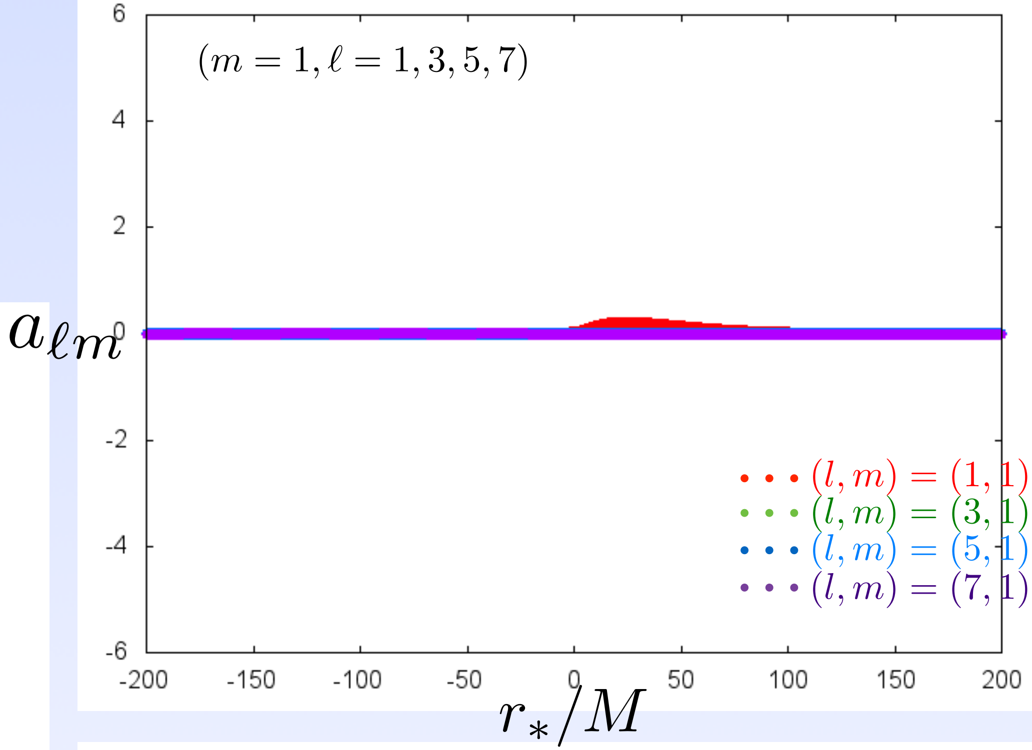
ここで見せるシミュレーション

Simulations	a_*	$M\mu$	(ℓ, m)	Bosenova?
arXiv:1505.00714. (1a)	0.99	0.4	$(1, 1)$	Yes
arXiv:1505.00714. (1b)	0.99	0.3	$(1, 1)$	Yes
arXiv:1505.00714. (2)	0.99	0.8	$(2, 2)$	No
arXiv:1505.00714. (3a)	0.99	0.4	$(1, 1) + (2, 2)$	(?)
PRELIMINARY (3b)	0.99	0.4	$(1, 1) + (2, 2)$	(?)

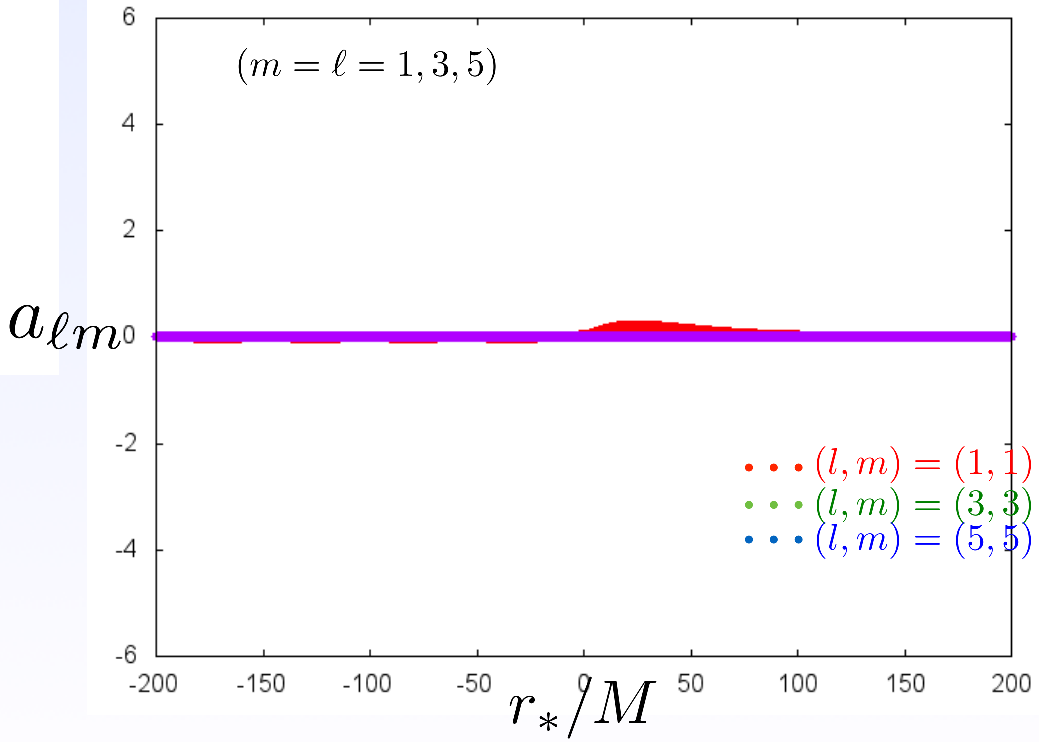
(1b) の場合



t/M = 000.0
φ



$(m = 1, \ell = 1, 3, 5, 7)$
$a_{\ell m}$
r_*/M
$(l, m) = (1, 1)$
$(l, m) = (3, 1)$
$(l, m) = (5, 1)$
$(l, m) = (7, 1)$

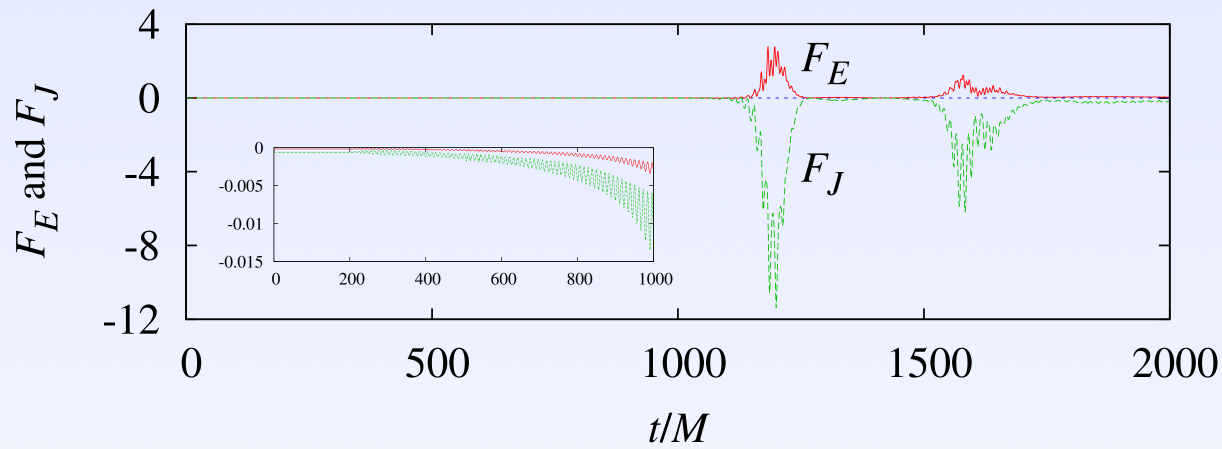


$(m = \ell = 1, 3, 5)$
$a_{\ell m}$
r_*/M
$(l, m) = (1, 1)$
$(l, m) = (3, 3)$
$(l, m) = (5, 5)$

シミュレーション (1b) のまとめ

- $\varphi_{\rm peak} \lesssim 0.4$ ➩ 何も起こらない

- $\varphi_{\rm peak} \lesssim 0.45$ ➩ ボーズノバが起こる

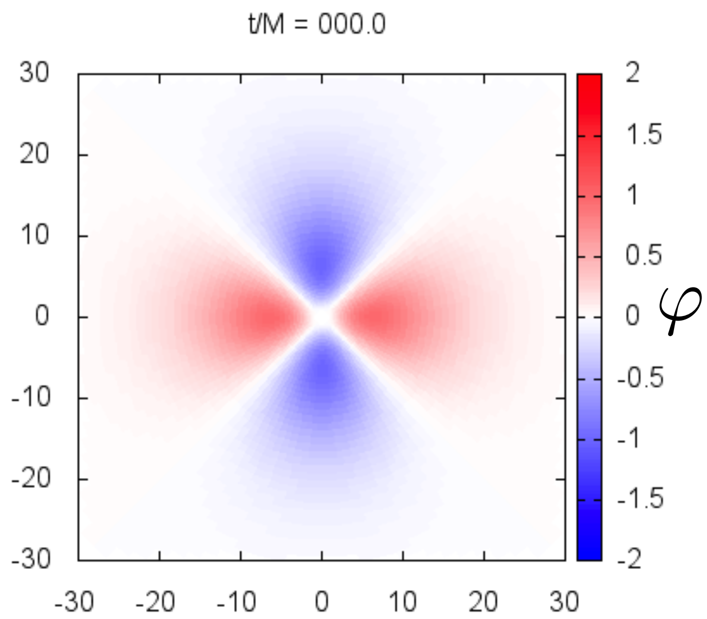


- $M\mu$ が小さいほどモード励起が強くなる（ボーズノバは激しくなる）。
- $M\mu$ が小さいと、より小さい振幅でボーズノバが起こる（エネルギーの値はより大きい値でおこる）.

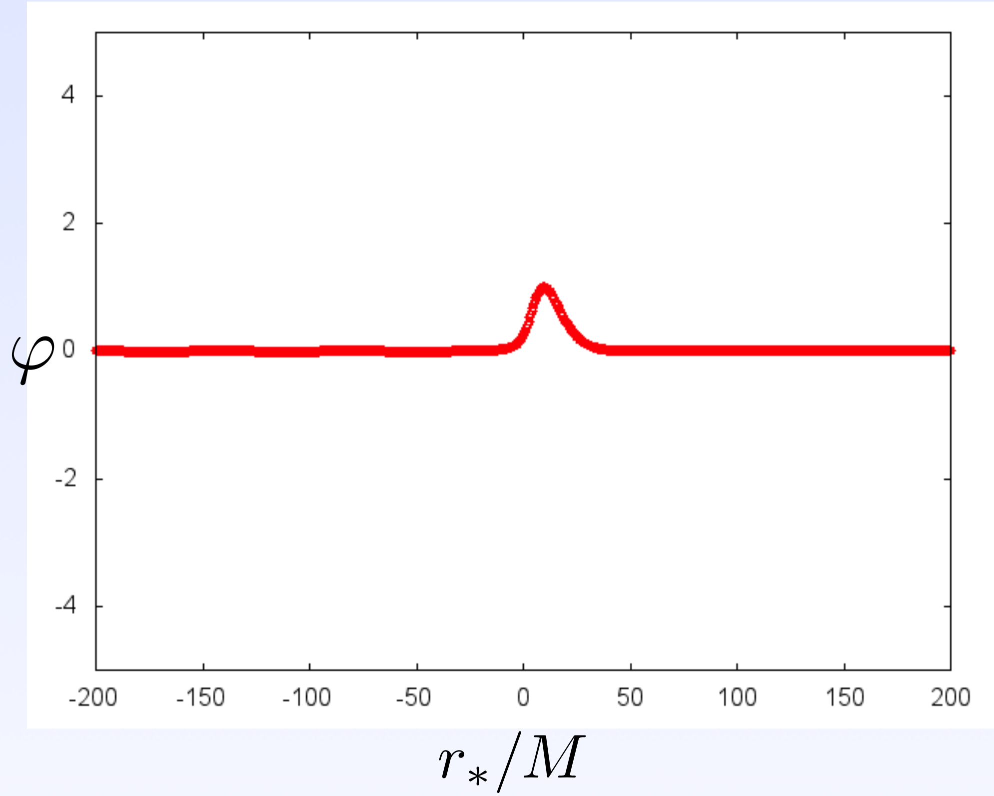
ここで見せるシミュレーション

Simulations	a_*	$M\mu$	(ℓ, m)	Bosenova?
arXiv:1505.00714. (1a)	0.99	0.4	$(1, 1)$	Yes
arXiv:1505.00714. (1b)	0.99	0.3	$(1, 1)$	Yes
arXiv:1505.00714. (2)	0.99	0.8	$(2, 2)$	No
arXiv:1505.00714. (3a)	0.99	0.4	$(1, 1) + (2, 2)$	(?)
PRELIMINARY (3b)	0.99	0.4	$(1, 1) + (2, 2)$	(?)

(2) の場合



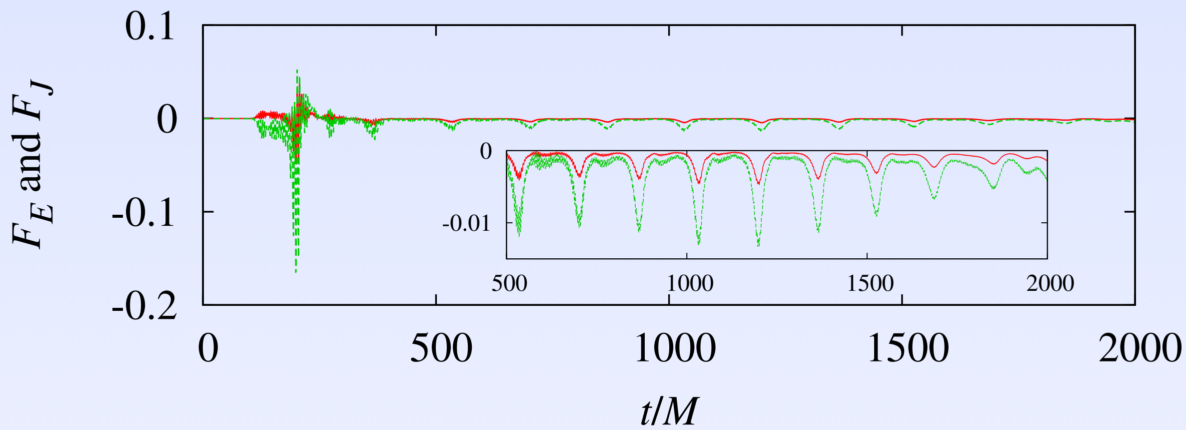
t/M = 000.0
30
20
10
0
-10
-20
-30
-30
-20
-10
0
10
20
30
2
1.5
1
0.5
0
-0.5
-1
-1.5
-2
φ



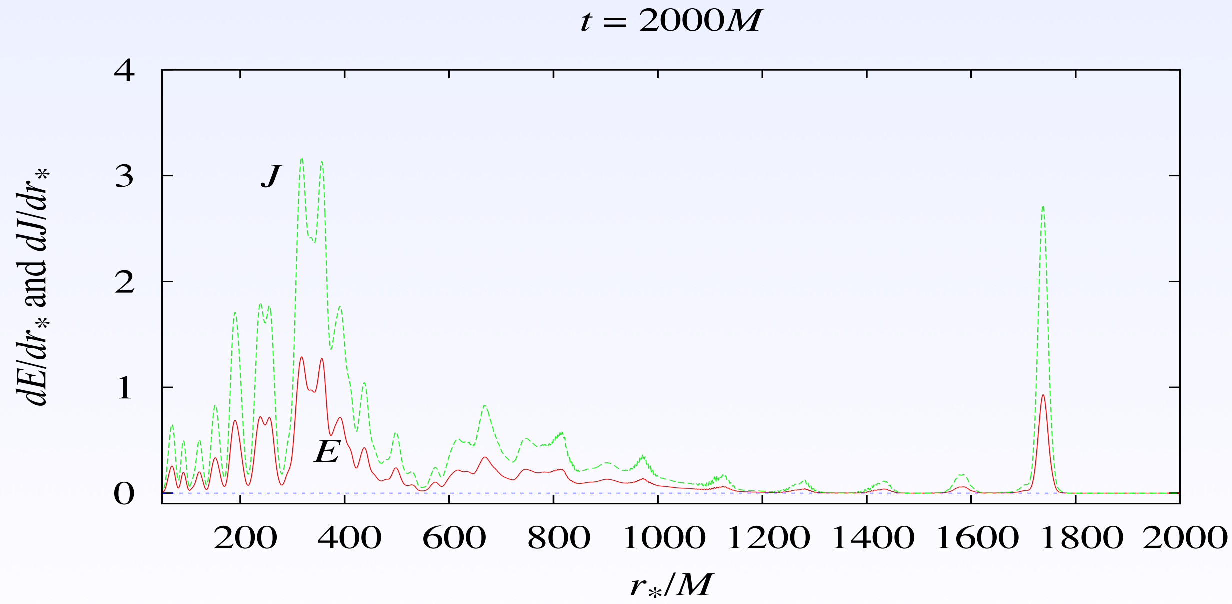
4
2
0
-2
-4
-200
-150
-100
-50
0
50
100
150
200
φ
r_*/M

シミュレーション結果 (2)

- エネルギーと角運動量は引き抜かれ続ける



- エネルギーと角運動量は遠方に放出され続ける



シミュレーション (2) のまとめ

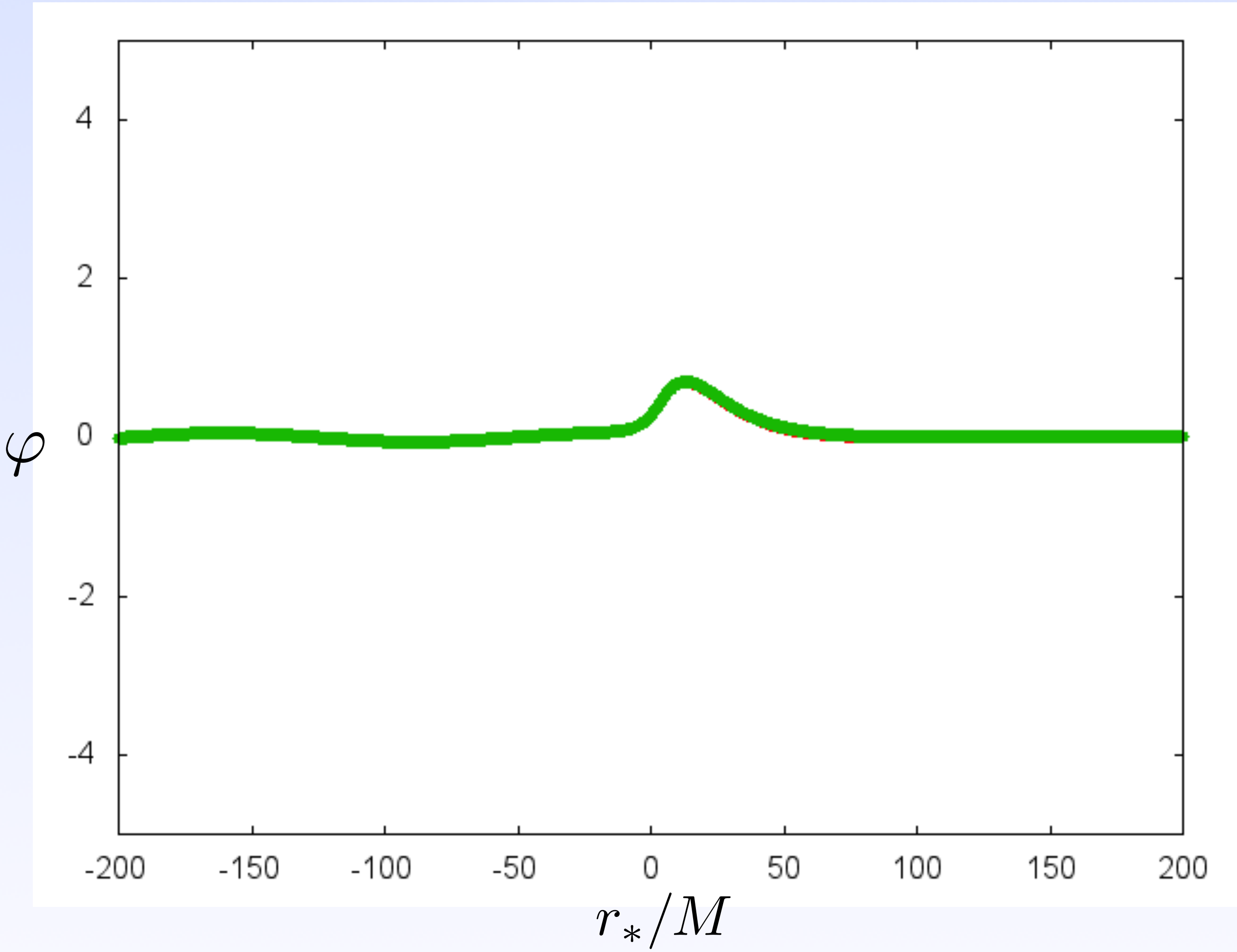
- アクシオン雲が l=m=2 モードにある場合, ボーズノバは起こらない.
- ブラックホールからのエネルギー引き抜きが続き, 同時に外向きのフラックスも発生する.
- l=m=2 の場合, アクシオン雲は scalar breather のように振る舞う.

ここで見せるシミュレーション

Simulations	a_*	$M\mu$	(ℓ, m)	Bosenova?
arXiv:1505.00714. (1a)	0.99	0.4	$(1, 1)$	Yes
arXiv:1505.00714. (1b)	0.99	0.3	$(1, 1)$	Yes
arXiv:1505.00714. (2)	0.99	0.8	$(2, 2)$	No
arXiv:1505.00714. (3a)	0.99	0.4	$(1, 1) + (2, 2)$	(?)
PRELIMINARY (3b)	0.99	0.4	$(1, 1) + (2, 2)$	(?)

(1a) と (3a)の場合

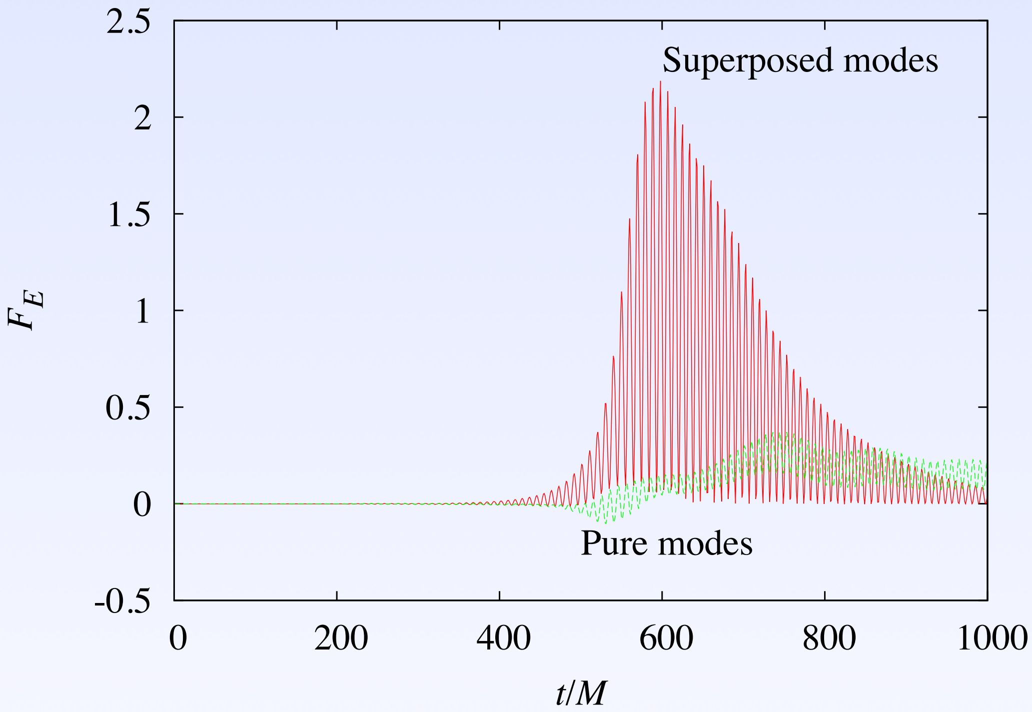
初期の振幅は l=m=1 モード→0.7
l=m=2 モード→0.01



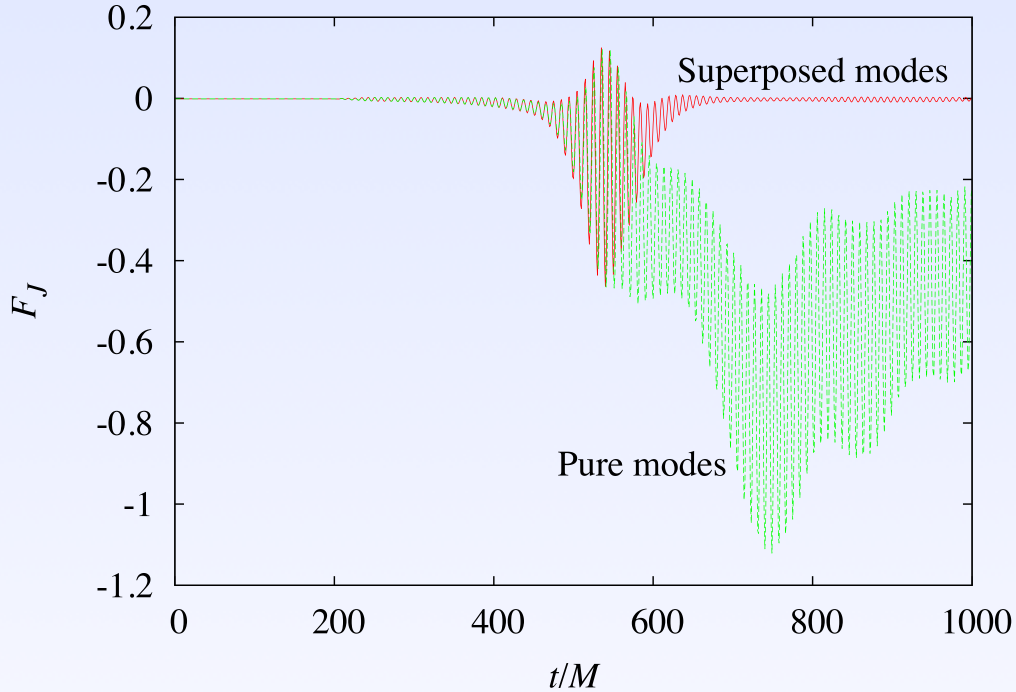
$\cdots (1,1)$

$\cdots (1,1) + (2,2)$

地平面に落ちるエネルギー束



地平面に落ちる角運動量束



シミュレーション(3a)のまとめ（当時）

- l=m=1 モードのアクシオン雲に小さい量の l=m=2 モードを加えると、スカラー場の振る舞いは大きくかわる.
- これは l=m=2 モードが強制振動のように励起されるからである。
- アクシオン雲のダイナミクスは初期条件に強く依存する.
- 詳細なスカラー場のダイナミクスの予言は難しい.

ここで見せるシミュレーション

Simulations	a_*	$M\mu$	(ℓ, m)	Bosenova?
arXiv:1505.00714. (1a)	0.99	0.4	$(1, 1)$	Yes
arXiv:1505.00714. (1b)	0.99	0.3	$(1, 1)$	Yes
arXiv:1505.00714. (2)	0.99	0.8	$(2, 2)$	No
arXiv:1505.00714. (3a)	0.99	0.4	$(1, 1) + (2, 2)$	(?)
PRELIMINARY (3b)	0.99	0.4	$(1, 1) + (2, 2)$	(?)

Gurzinov の議論 arXiv:1604.06422

非線形項 φ^3 の効果

→m=1, 2 モードの結合

m=0モードの生成

$$\dot{N} = 2\gamma_1 N_1 - N_1^2 N_2 - N_1 N_2^2$$

$$\dot{L} = 2\gamma_1 N_1 - 3N_1 N_2^2$$

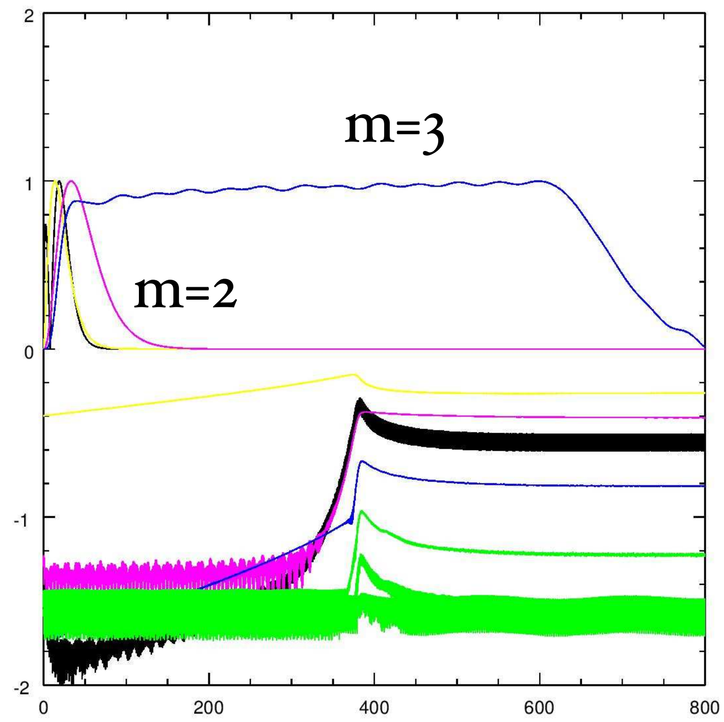
m=3モードの生成

(unbound)

$$\dot{N}_1 = 2\gamma_1 N_1 - 2N_1^2 N_2 + N_1 N_2^2$$

$$\dot{N}_2 = N_1^2 N_2 - 2N_1 N_2^2$$

2+1次元トイモデル

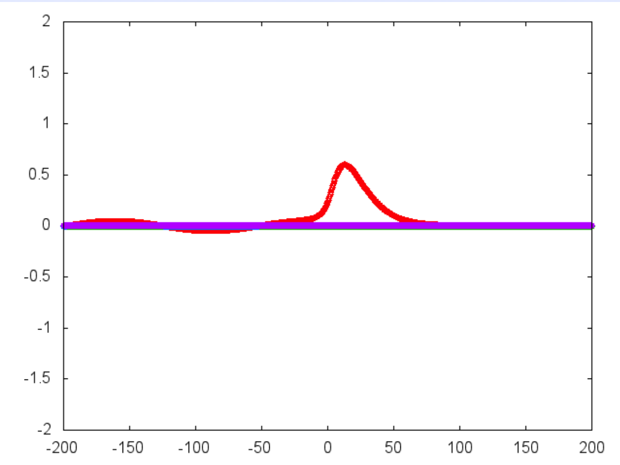


(3b) の場合

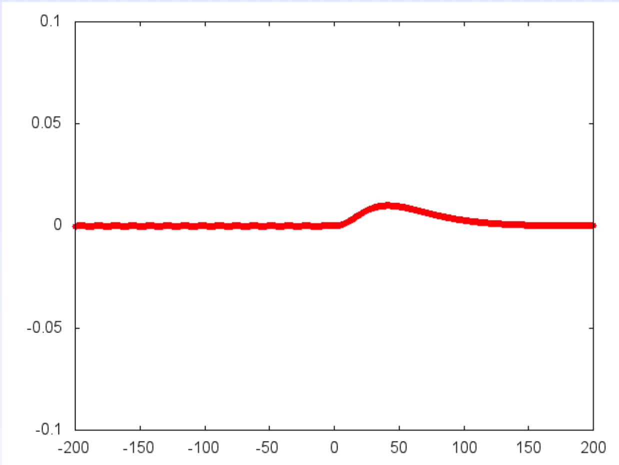
初期の振幅は l=m=1 モード→0.6
l=m=2 モード→0.01

- スカラー場

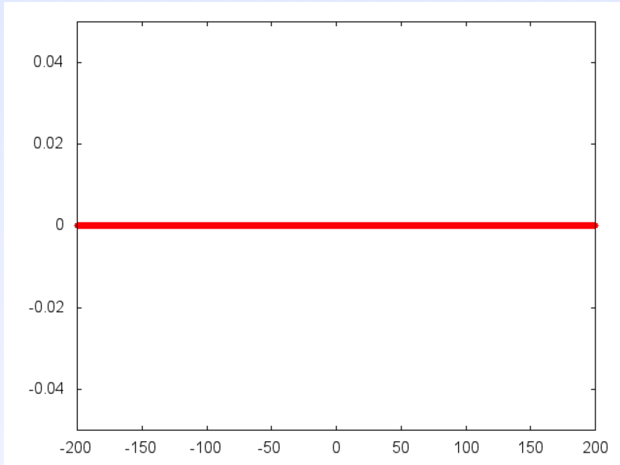
m=1



m=2



m=3



PRELIMINARY

シミュレーション (3b) のまとめ

- l = m = 2 モードの成長が見られるが O(1) にはならない.

- l = m = 3 モードの励起は確かめられる.
  Unbounded なモードのように見える.

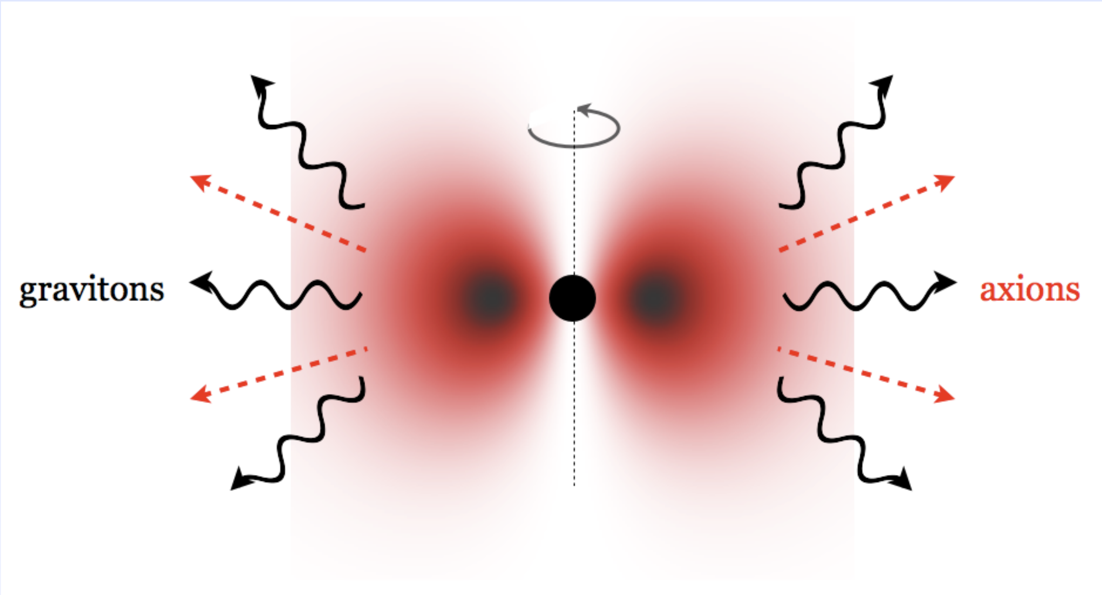
- これらがボーズノバの発生を妨げるかもしれない.

PRELIMINARY

重力波放射

ストリングアクシオン場がある場合

- 天体ブラックホールの回転エネルギーを引き抜き、アクシオンの雲を形成する。



- 超放射不安定
- 非線形の自己相互作用
- 重力波放射

ボーズノバで発生する重力波の計算

- スカラー場をテスト場の近似で計算
- テスト場のエネルギー・運動量テンソル $T_{\mu\nu}$ を計算
- $T_{\mu\nu}$ を源として発生する Teukolsky 方程式を時間領域で解く

$$\left[\frac{(r^2+a^2)^2}{\Delta} - a^2\sin^2\theta\right]\frac{\partial^2\psi}{\partial t^2} + \frac{4Mar}{\Delta}\frac{\partial^2\psi}{\partial t\partial\phi} + \left[\frac{a^2}{\Delta} - \frac{1}{\sin^2\theta}\right]\frac{\partial^2\psi}{\partial\phi^2}$$

$$-\Delta^{-s}\frac{\partial}{\partial r}\left(\Delta^{s+1}\frac{d\psi}{dr}\right) - \frac{1}{\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial\psi}{\partial\theta}\right) - 2s\left[\frac{a(r-M)}{\Delta} + \frac{i\cos\theta}{\sin^2\theta}\right]\frac{\partial\psi}{\partial\phi}$$

$$-2s\left[\frac{M(r^2-a^2)}{\Delta} - r - ia\cos\theta\right]\frac{\partial\psi}{\partial t} + (s^2\cot^2\theta - s)\psi = 4\pi\Sigma T$$

- Schwarzschild の場合

arXiv:1505.00714.

- Kerr の場合

ONGOING

GW (Schwarzschild)

Calculation of source term (3)

- Schwarzschild case

$$f = \Phi^{(m_1)}$$

$$g = \Phi^{(m_2)}$$

$$
\begin{aligned}
(\text{source term}) = -\pi \frac{2^{\frac{|m-2|+|m+2|}{2}}\Sigma}{\Delta G \rho^4 r} \times \Bigg(& \\
& m_2(m_2 - \mathrm{sgn}(m_2))(1+y)^{\frac{|m_1|+|m_2|-2+4\theta(m_2)-|m+2|}{2}}(1-y)^{\frac{|m_1|+|m_2|-2+4\theta(-m_2)-|m-2|}{2}} \\
& \qquad \times \left[\ddot{f} + f_{,r_*r_*} - 2\dot{f}_{,r_*} - \frac{2(r-3M)}{r^2}(\dot{f} - f_{,r_*})\right] g \\
+ \quad & m_1(m_1 - \mathrm{sgn}(m_1))(1+y)^{\frac{|m_1|+|m_2|-2+4\theta(m_1)-|m+2|}{2}}(1-y)^{\frac{|m_1|+|m_2|-2+4\theta(-m_1)-|m-2|}{2}} \\
& \qquad \times f \left[\ddot{g} + g_{,r_*r_*} - 2\dot{g}_{,r_*} - \frac{2(r-3M)}{r^2}(\dot{g} - g_{,r_*})\right] \\
+ \quad & 2m_1 m_2 (1+y)^{\frac{|m_1|+|m_2|-2+2\theta(m_1)+2\theta(m_2)-|m+2|}{2}}(1-y)^{\frac{|m_1|+|m_2|-2+2\theta(-m_1)+2\theta(m_2)-|m-2|}{2}} \\
& \qquad \times \left[-(\dot{f} - f_{,r_*})(\dot{g} - g_{,r_*}) + \frac{\Delta^2}{r^6} f g\right] \\
+ \quad & (1+y)^{\frac{|m_1|+|m_2|+2-|m+2|}{2}}(1-y)^{\frac{|m_1|+|m_2|+2-|m-2|}{2}} \\
& \qquad \times \left\{\left[\ddot{f} + f_{,r_*r_*} - 2\dot{f}_{,r_*} - \frac{2(r-3M)}{r^2}(\dot{f} - f_{,r_*})\right] g_{,yy}\right. \\
& \qquad + f_{,yy}\left[\ddot{g} + g_{,r_*r_*} - 2\dot{g}_{,r_*} - \frac{2(r-3M)}{r^2}(\dot{g} - g_{,r_*})\right] \\
& \qquad \left. - 2(\dot{f}_{,y} - f_{,yr_*})(\dot{g}_{,y} - g_{,yr_*}) + 2\frac{\Delta^2}{r^6} f_{,y} g_{,y}\right\} \\
+ \quad & 2m_2(1+y)^{\frac{|m_1|+|m_2|+2\theta(m_2)-|m+2|}{2}}(1-y)^{\frac{|m_1|+|m_2|+2\theta(-m_2)-|m-2|}{2}} \\
& \times \left\{-\left[\ddot{f} + f_{,r_*r_*} - 2\dot{f}_{,r_*} - \frac{2(r-3M)}{r^2}(\dot{f} - f_{,r_*})\right] g_{,y} + (\dot{f}_{,y} - f_{,yr_*})(\dot{g} - g_{,r_*}) - \frac{\Delta^2}{r^6} f_{,y} g\right\} \\
+ \quad & 2m_1(1+y)^{\frac{|m_1|+|m_2|+2\theta(m_1)-|m+2|}{2}}(1-y)^{\frac{|m_1|+|m_2|+2\theta(-m_1)-|m-2|}{2}} \\
& \times \left\{-f_{,y}\left[\ddot{g} + g_{,r_*r_*} - 2\dot{g}_{,r_*} - \frac{2(r-3M)}{r^2}(\dot{g} - g_{,r_*})\right] + (\dot{f} - f_{,r_*})(\dot{g}_{,y} - g_{,yr_*}) - \frac{\Delta^2}{r^6} f g_{,y}\right\} \Bigg)
\end{aligned}
$$

Simulations

- Setup

HY and Kodama, arXiv:1505.00714.

  - Schwarzschild black hole
  - $M\mu = 0.3$
  - Initial condition: Quasi-bound state of Klein-Gordon field in the mode l = m = 1, nr=0
    - (1) Klein-Gordon case
    - (2) Mildly nonlinear case
    - (3) Strongly nonlinear case

Simulations

- Setup

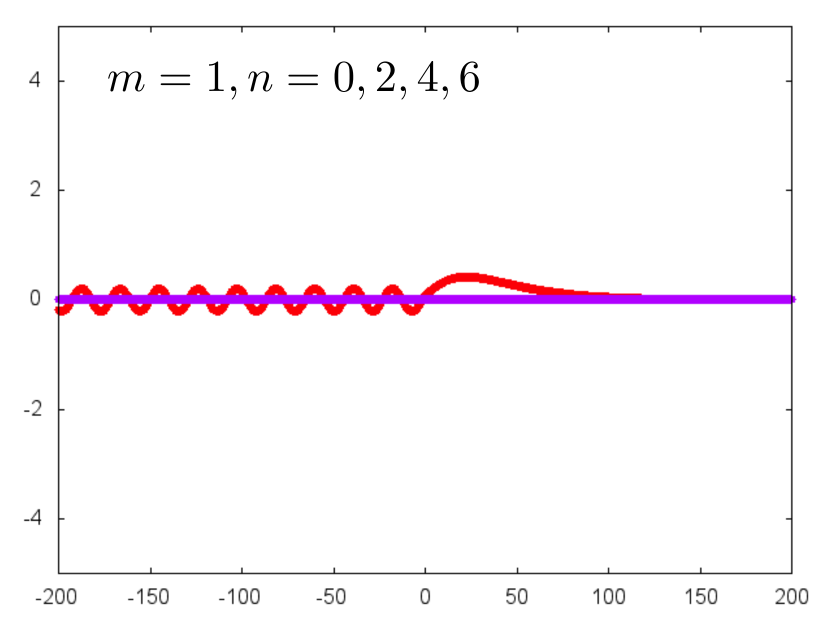
HY and Kodama, arXiv:1505.00714.

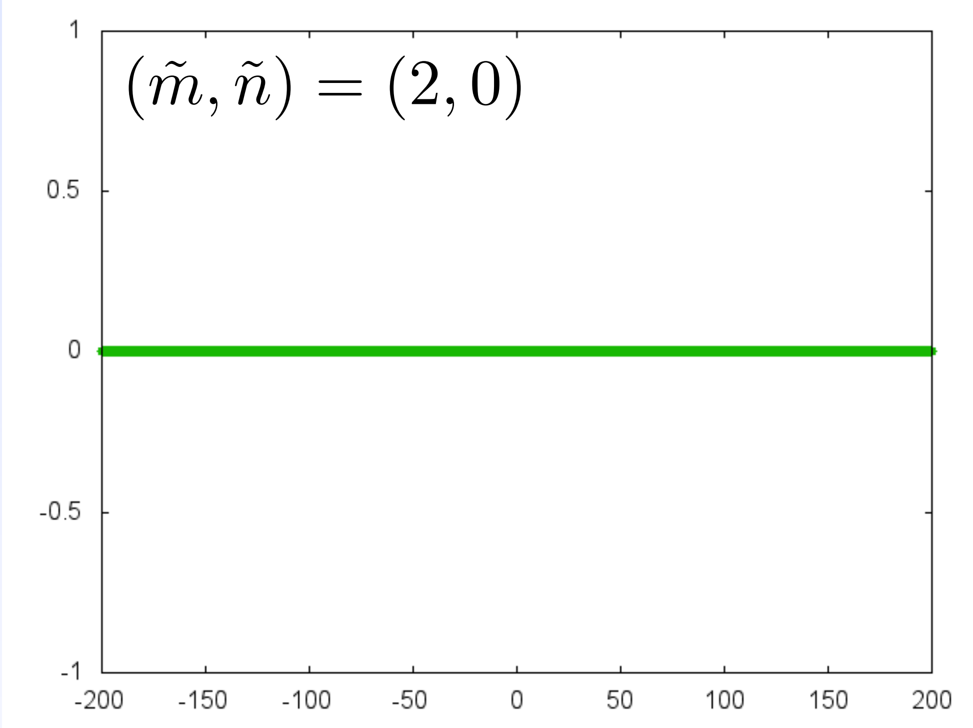
  - Schwarzschild black hole
  - $M\mu = 0.3$
  - Initial condition: Quasi-bound state of Klein-Gordon field in the mode l = m = 1, nr=0

  - (1) Klein-Gordon case
  - (2) Mildly nonlinear case
  - (3) Strongly nonlinear case

GW emission from Klein-Gordon “boundstate"

$$m_1 = m_2 = 1 \;\Rightarrow\; \tilde{m} = 2$$





Simulations

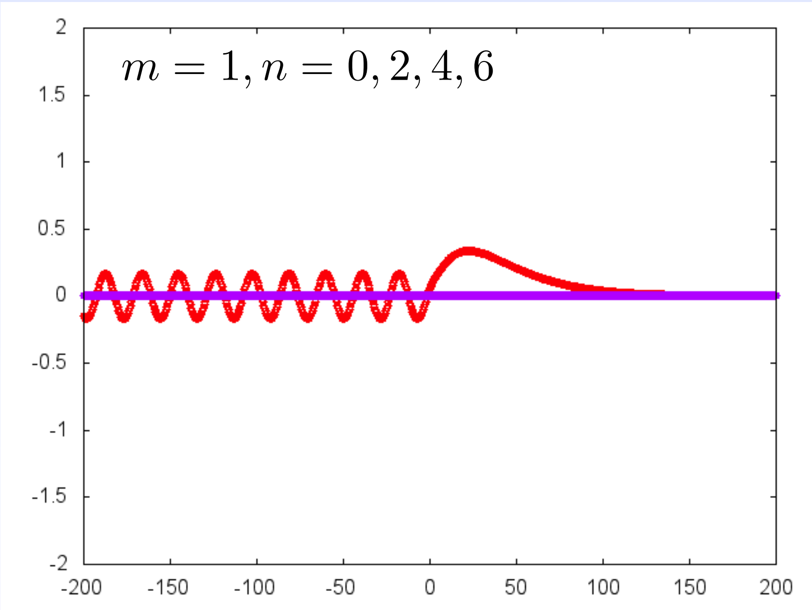
- Setup

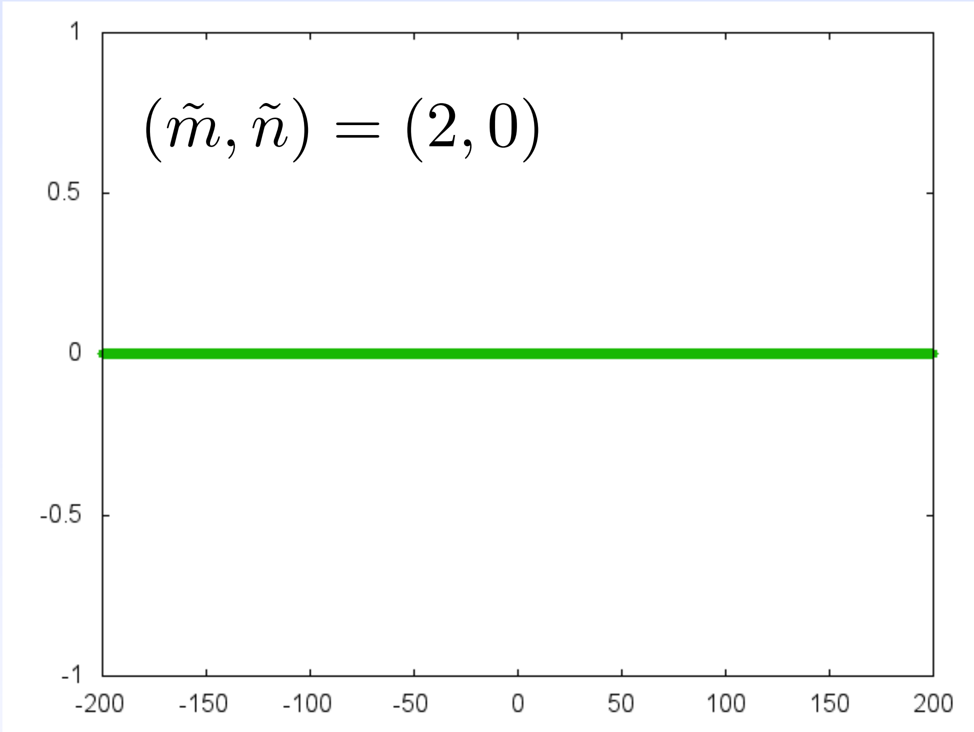
HY and Kodama, arXiv:1505.00714.

  - Schwarzschild black hole
  - $M\mu = 0.3$
  - Initial condition: Quasi-bound state of Klein-Gordon field in the mode l = m = 1, nr=0
  - (1) Klein-Gordon case
  - (2) Mildly nonlinear case
  - (3) Strongly nonlinear case

GW emission: Mildly nonlinear case

$$m_1 = m_2 = 1 \Rightarrow \tilde{m} = 2$$





Simulations

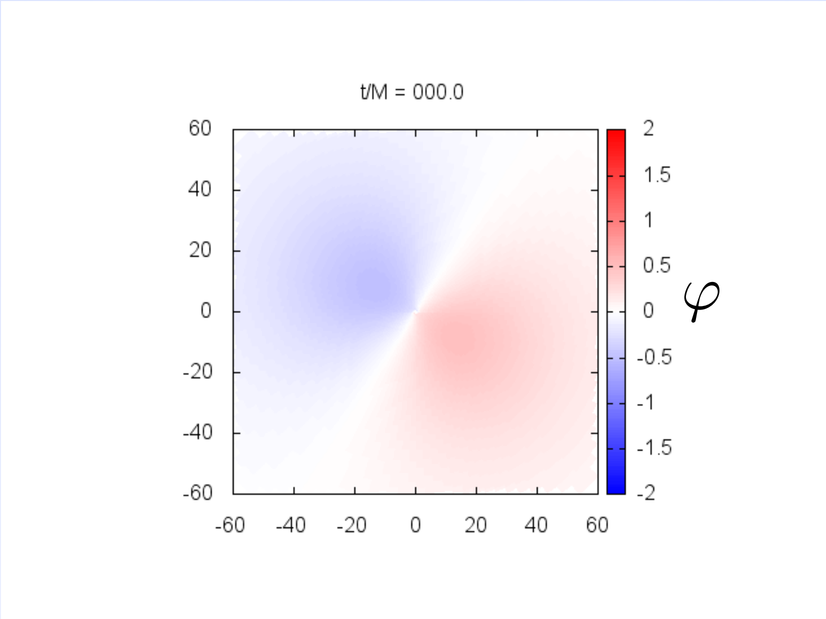
- Setup

HY and Kodama, arXiv:1505.00714.

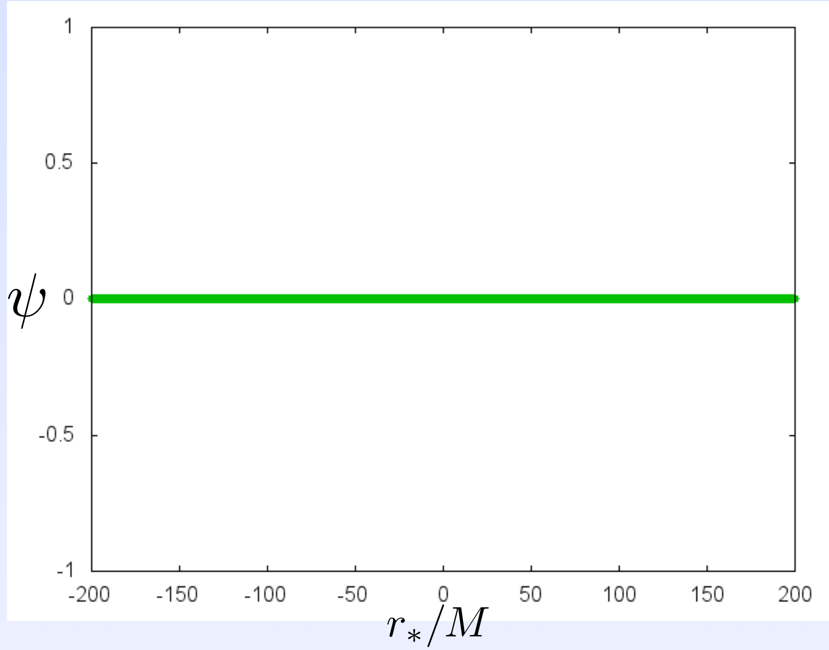
  - Schwarzschild black hole
  - $M\mu = 0.3$
  - Initial condition: Quasi-bound state of Klein-Gordon field in the mode l = m = 1, nr=0
    - (1) Klein-Gordon case
    - (2) Mildly nonlinear case
    - (3) Strongly nonlinear case

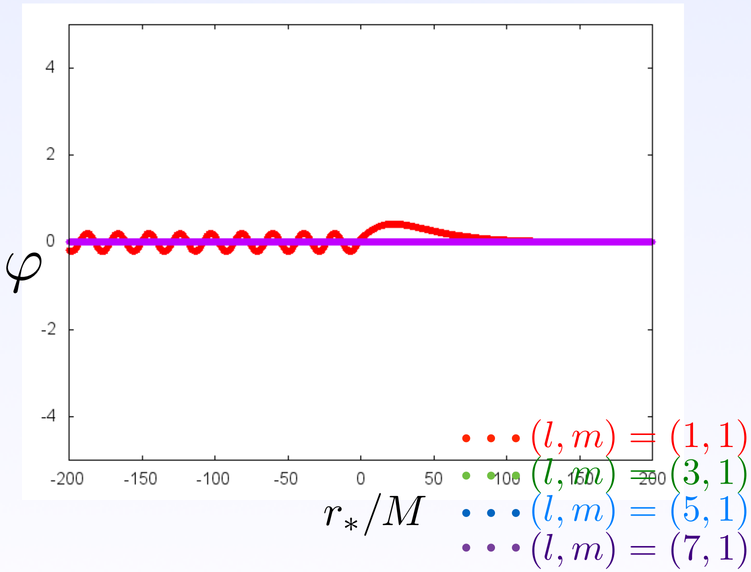
GW emission from the “bosenova” (Schwarzschild)

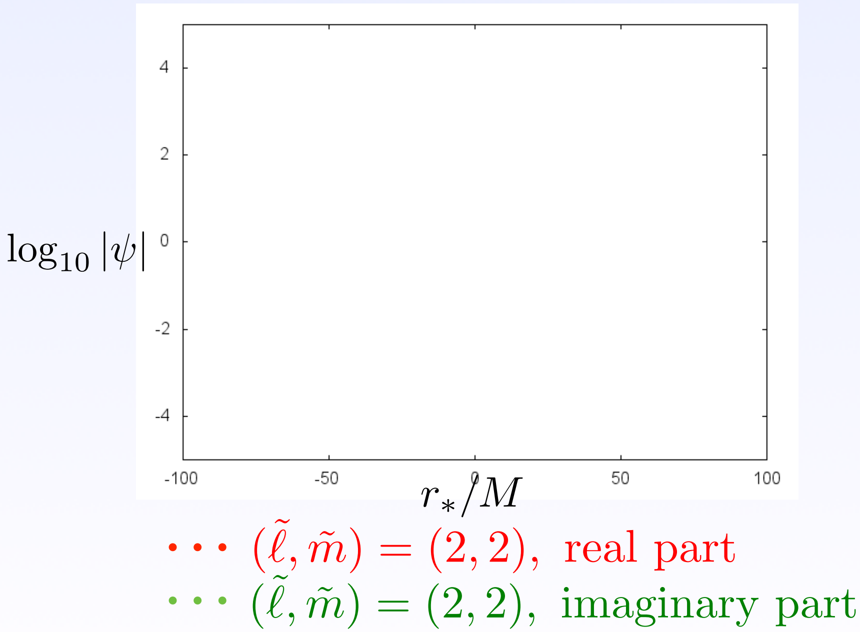
Scalar field



GWs

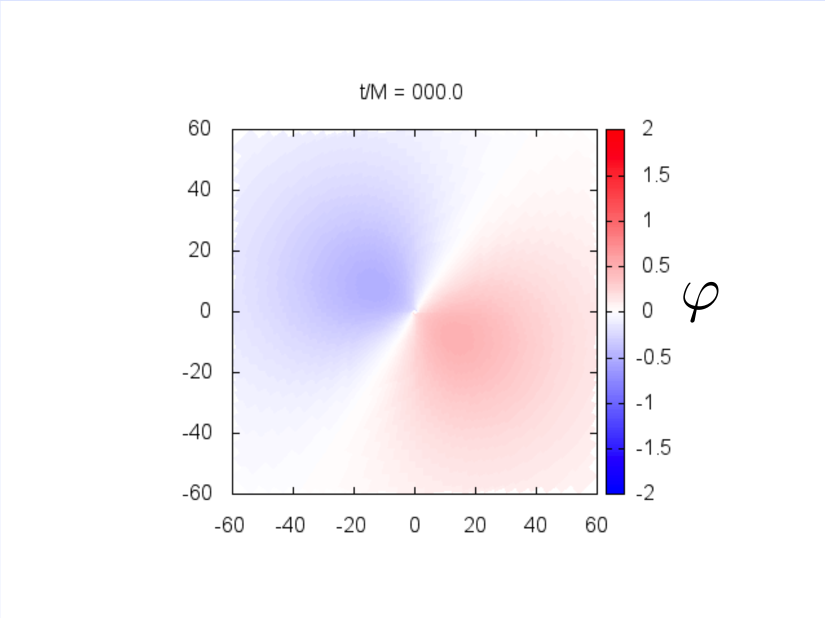




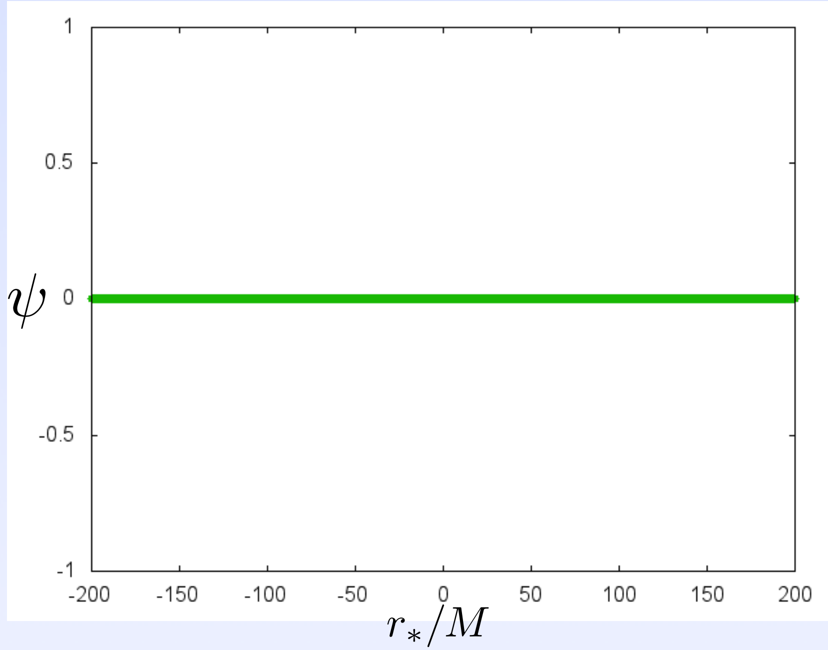


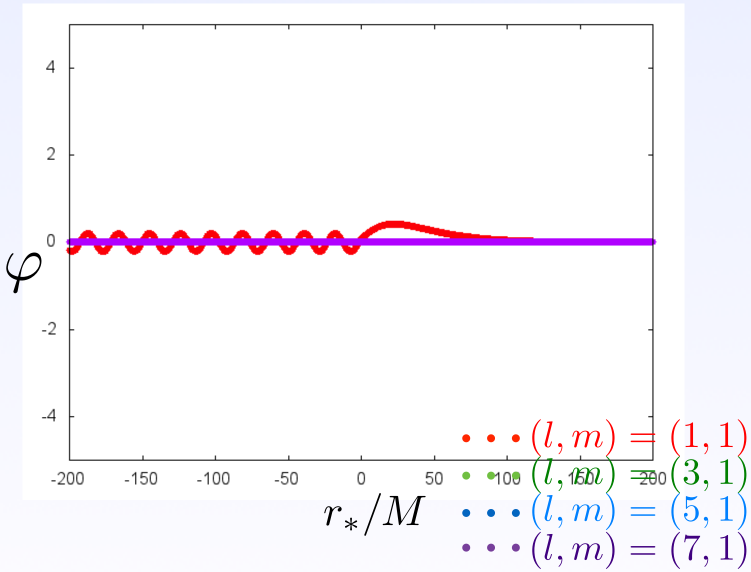
GW emission from the "bosenova" (Schwarzschild)

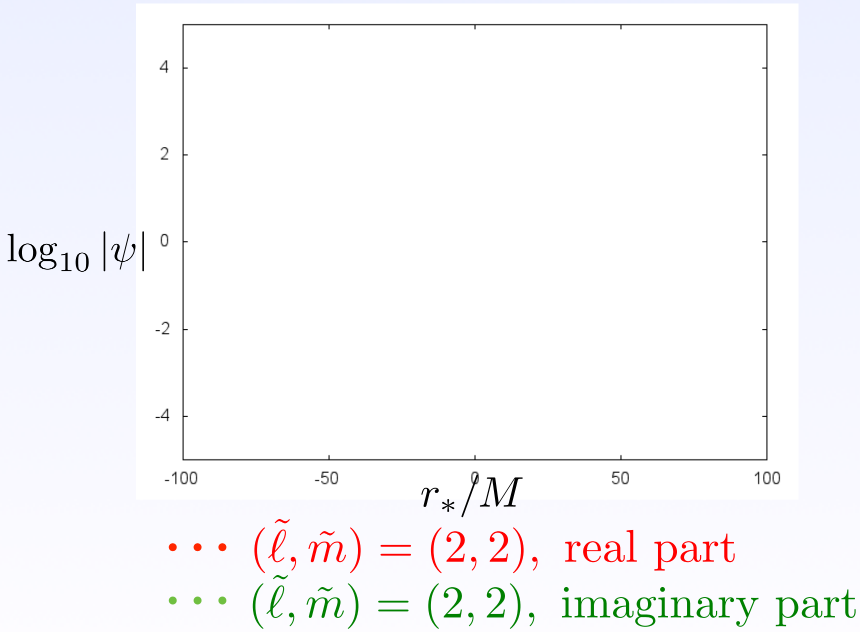
Scalar field



GWs







Summary (Physics)

The phenomena caused by scalar fields' nonlinear self-interaction highly depend on the situation.

- $l = m = 1$ mode:

  ⇨ Scalar field: Bosenova happens.

  GWs: GW burst is generated.

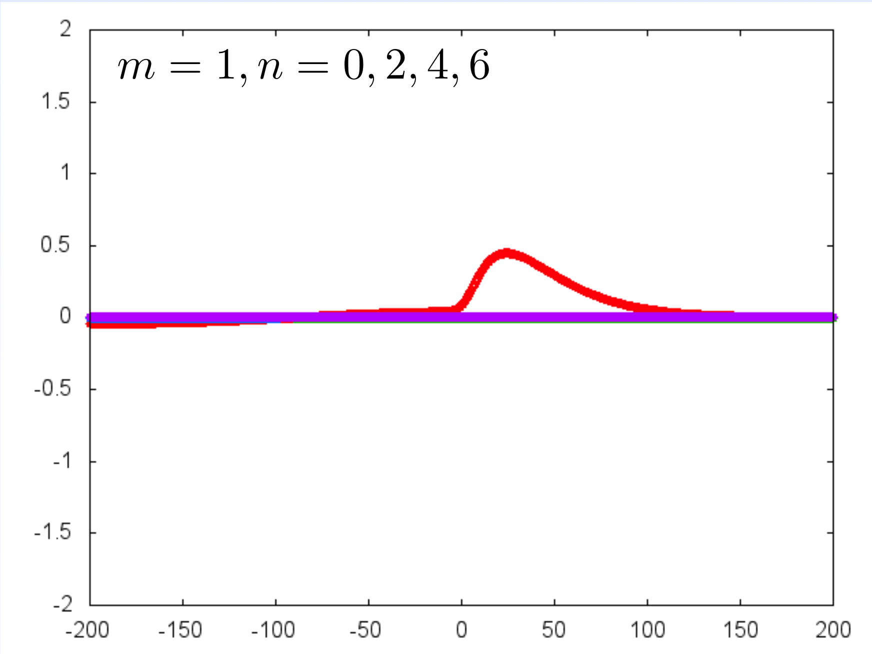
- $l = m = 2$ mode:

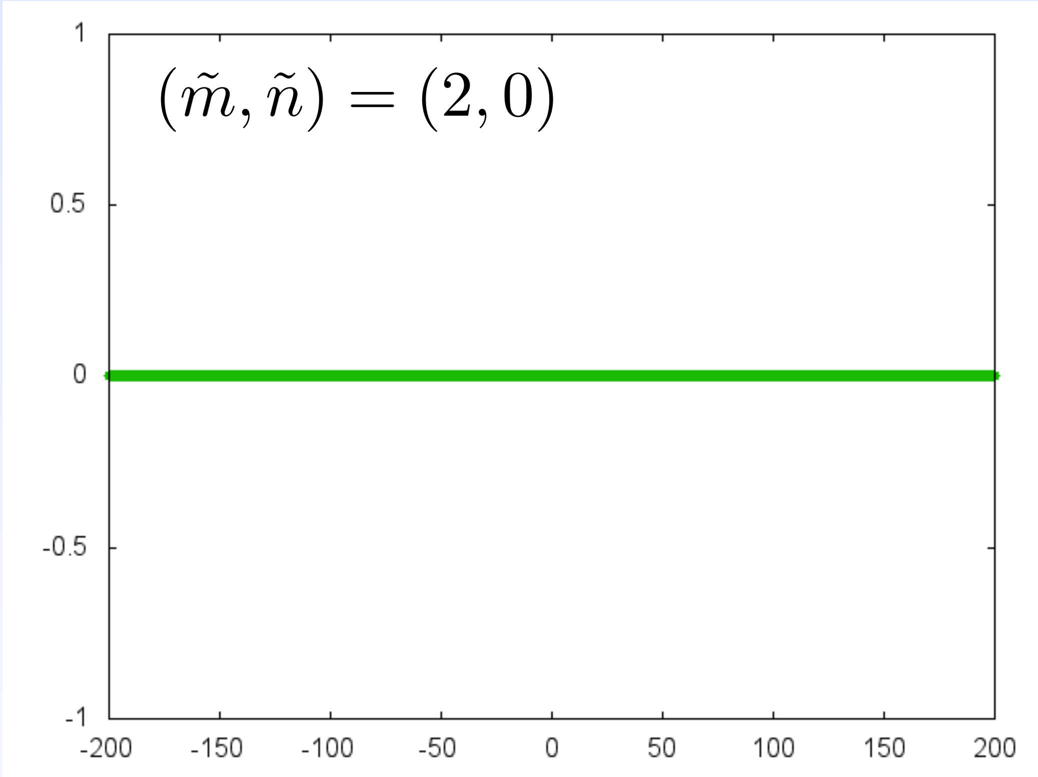
  ⇨ Scalar field: Bosenova does not happen.

  GWs: GW burst would not be generated (?).

GW emission: Mildly nonlinear case

$m_1 = m_2 = 1 \Rightarrow \tilde{m} = 2$

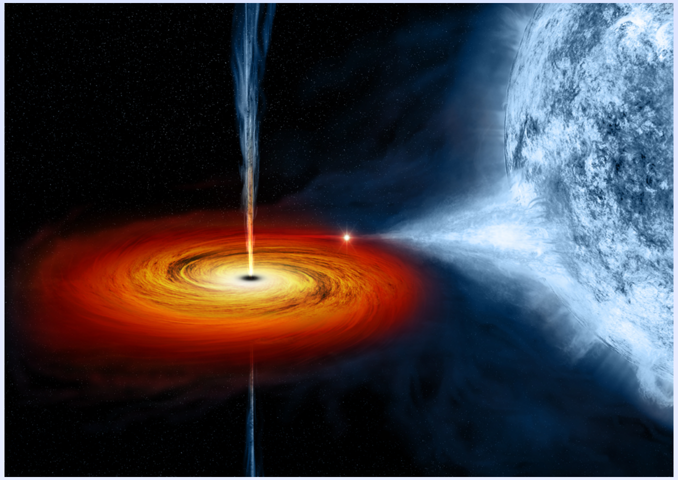




モデルに対する制限

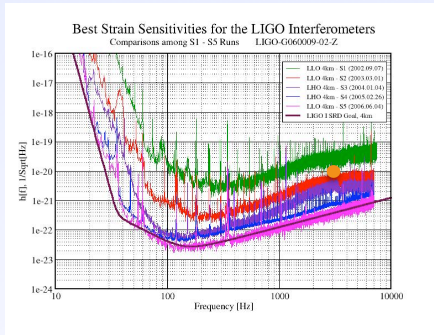
Cygnus X-1 を用いたモデルの制限

- $M \approx 15 M_\odot$
- $a_* \gtrsim 0.983$
- $d \approx 1.86$ kpc



McClintock, et al., arXiv:1106.3688-3690{astro-ph}

$\mu = 2.4 \times 10^{-12}\mathrm{eV}$ $(M\mu = 0.3)$ の場合を考える



- 重力波観測からつけられる制限 ⇨ $f_a \lesssim 10^{15}$ GeV
- ブラックホールの回転からつけられる制限 ⇨ $\Delta a_* \ll 1$

⇨ $f_a \lesssim 10^{11}$ GeV (PRELIMINARY)

まとめ

まとめ

- アクシオン・ボーズノバ
  - 信頼できるコードを開発し、カーブラックホールまわりでのアクシオン場の振る舞いを調べた.
  - $l = m = 1$ モード $\Rightarrow$ ボーズノバの発生。
  - $l = m = 2$ モード $\Rightarrow$ ボーズノバは発生しない。
  - $m=1, 2$ モードが同時に存在する場合はボーズノバは発生しないかもしれない。
- 重力波
  - ボーズノバ中にバースト重力波が放射される。
  - そのような重力波放射は断続的に起こると期待される。BH-アクシオン系は重力波の間欠泉と見なせる.
- ブラックホールの回転パラメーターを考慮すると, BH-アクシオン系からの重力波の観測は難しいかもしれない.