

ブラックホール中性子星連星合体: スピンの傾きと状態方程式依存性

○川口 恭平^A，久徳 浩太郎^B，中野 寛之^C，
大川 博督^D，谷口 敬介^E，柴田 大^A

A:基礎物理学研究所 B:University of Milwaukee Wisconsin C:京都大学理学研究科 D:早稲田大学理工学術院 E:東大総合文化

2015.2.12

「コンパクト連星合体からの重力波・電磁波放射とその周辺領域」 @基研

BHNS連星合体

- 重力波を放出して接近、やがて合体

→有望な重力波源

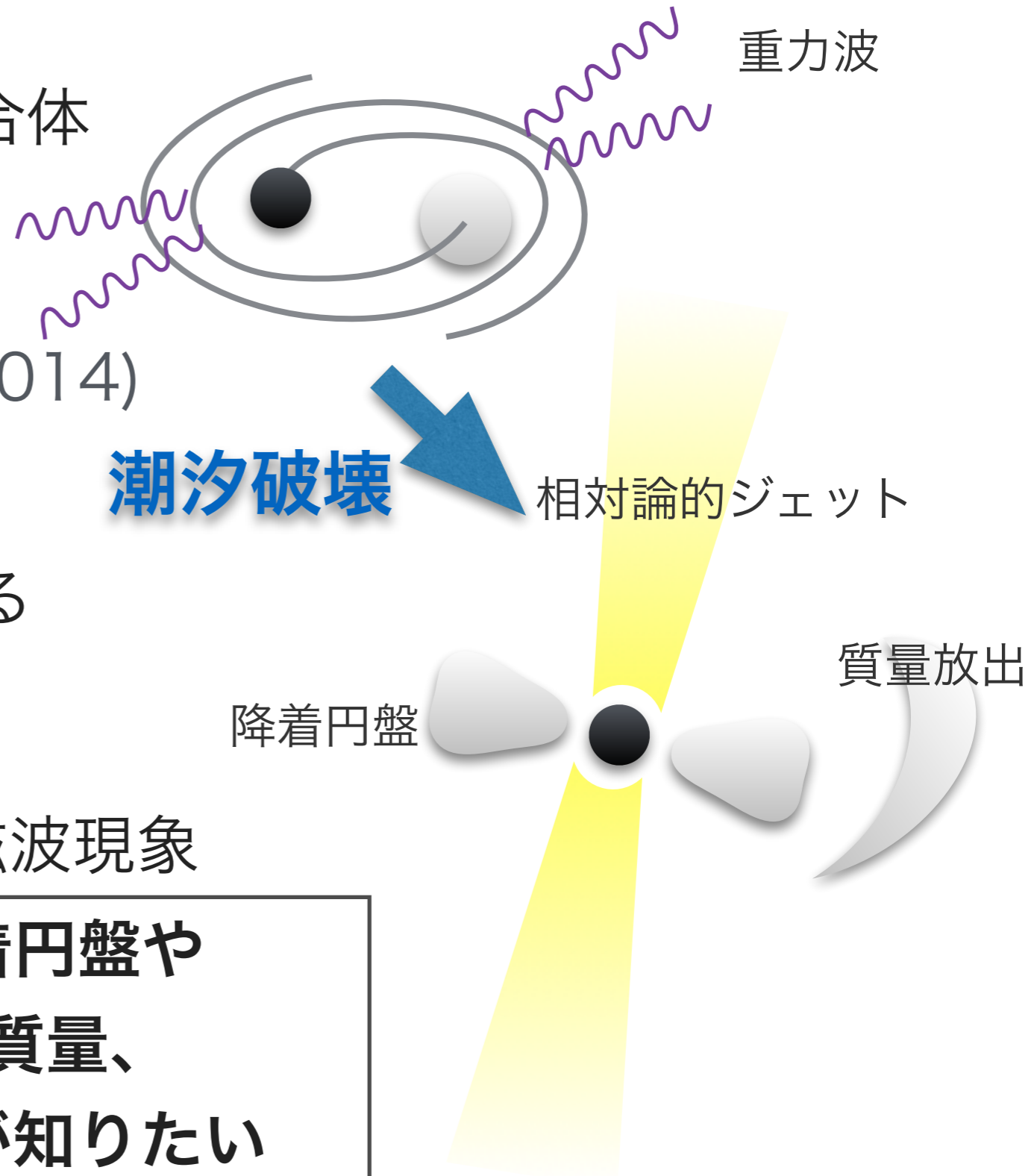
~10Event/yr.? (M. Dominik 2014)

- 中性子星が**潮汐破壊**されると
降着円盤形成や質量放出が起きる

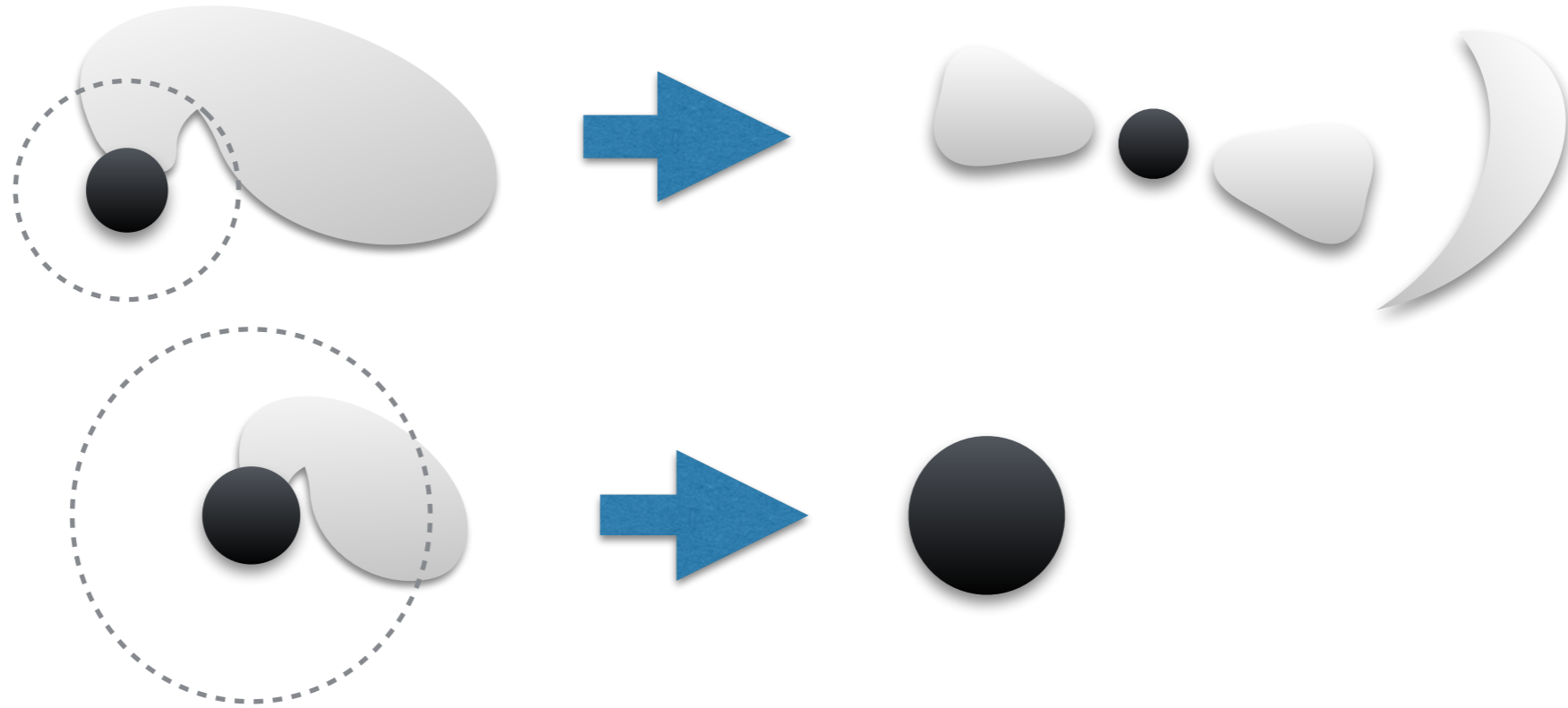
→ガンマ線バースト、

Kilonova/Macronovaなどの電磁波現象

連星合体で形成される降着円盤や
放出される物質の構造と質量、
それらのパラメータ依存性が知りたい



潮汐破壊



ブラックホールから潮汐力が中性子星の自己重力を上回ると
中性子星は**潮汐破壊**する

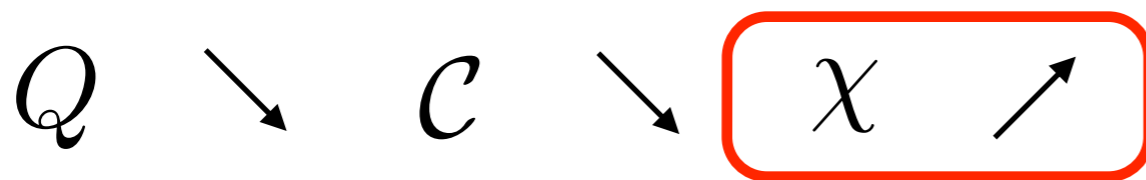
降着円盤が形成されたり、物質が系外へ放出されるためには中性子星の潮汐破壊が**ブラックホールのISCOより外側**で起こる必要がある

パラメータ依存性: 潮汐破壊

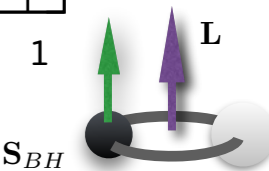
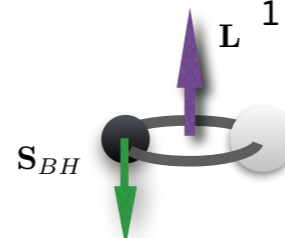
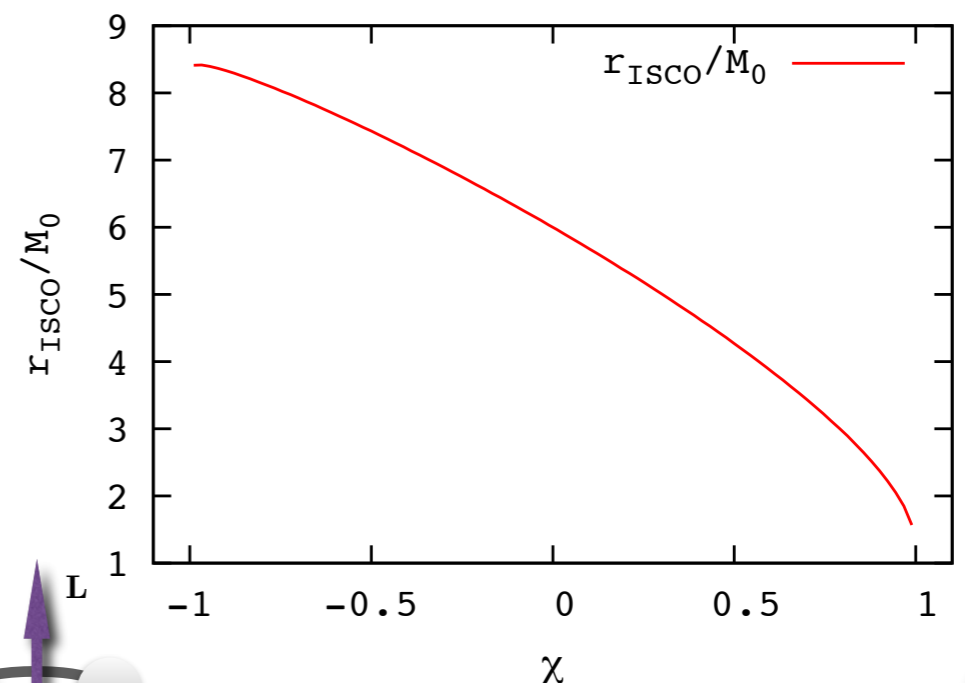
$$\frac{M_{NS}}{R_{NS}^2} \leq \frac{M_{BH} R_{NS}}{r_{ISCO}^3} \iff \frac{M_{BH}}{r_{ISCO}} \geq C Q^{2/3}$$

$$M = M_{NS} + M_{BH} \quad Q = M_{BH}/M_{NS} \quad C \equiv M_{NS}/R_{NS} \quad \chi = S_{BH}/M_{BH}^2$$

潮汐破壊はブラックホールISCOの外側で

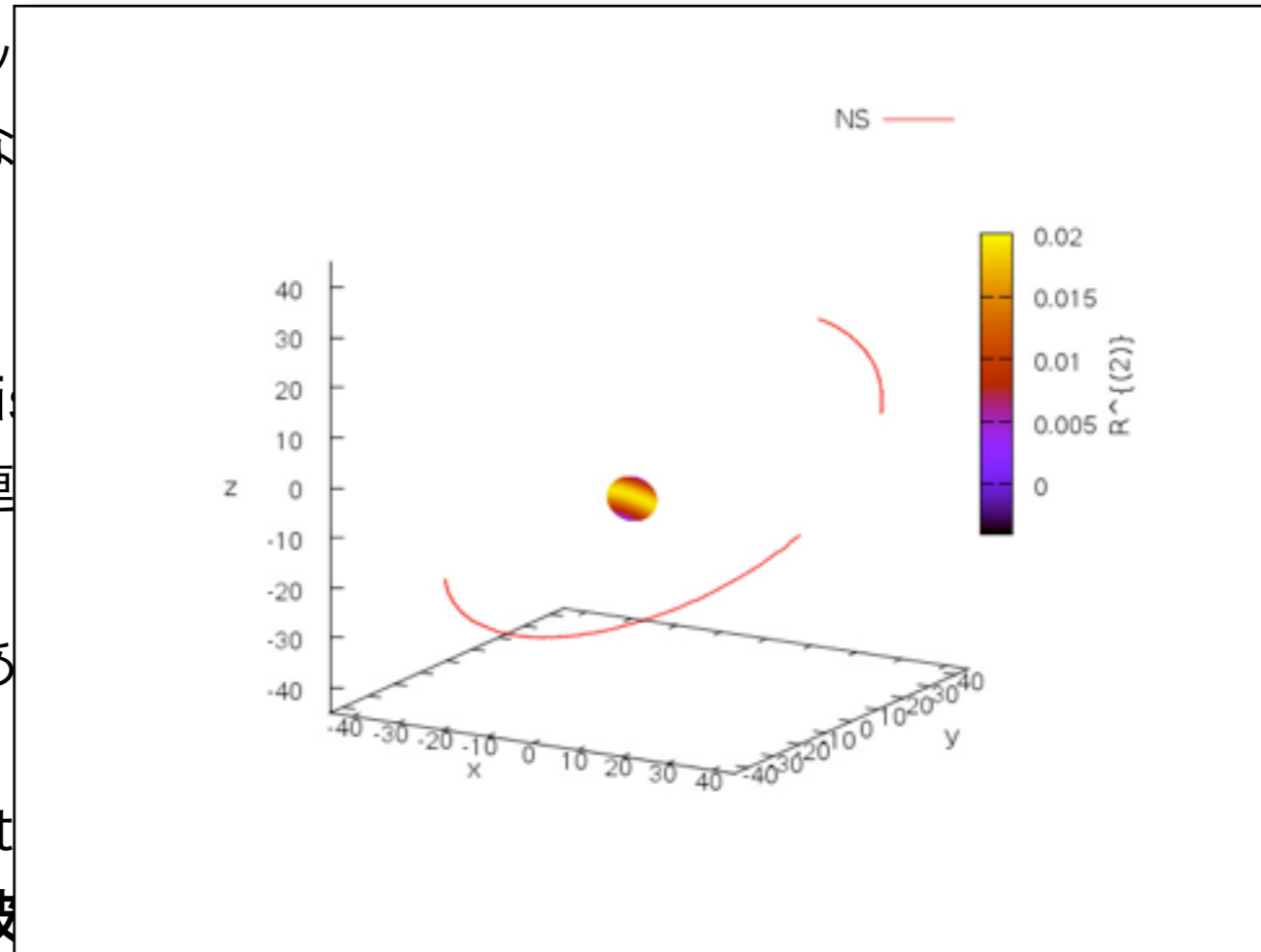


のとき起こりやすい

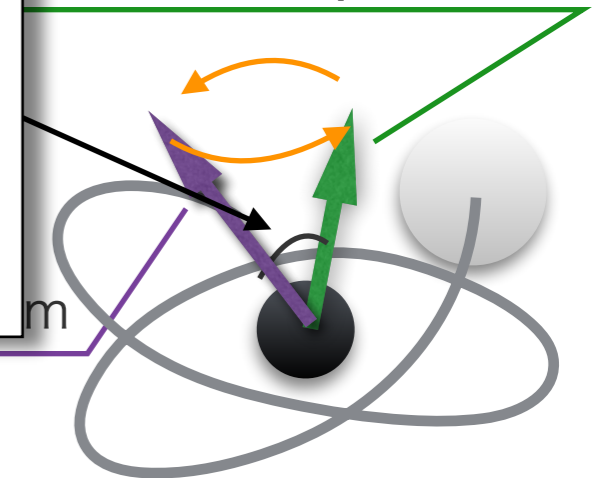
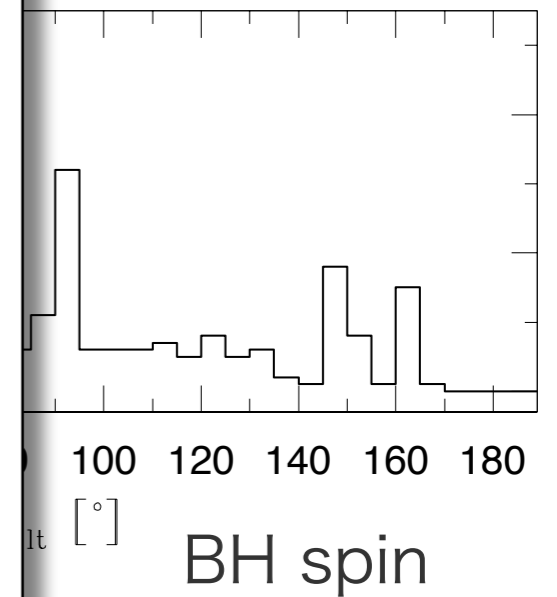


スピンの傾きの効果

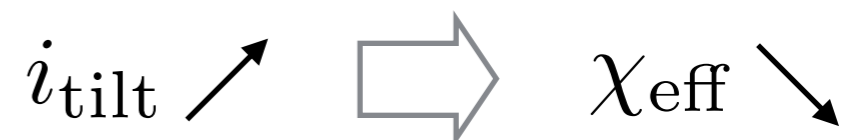
- 軌道角運動量とブラックホールの方向は揃っていても良い
- Population Synthesisは形成されるBHNS連が $i_{\text{tilt}} \geq 45^\circ$ であるとする結果もある
- スピンの傾きはeffect効果を弱める→潮汐破



K. Belczynski et. al. (2008)



$$\chi_{\text{eff}} = \chi \cos i_{\text{tilt}}$$



- スピン軌道角運動量相互作用により軌道が歳差運動する (Kidder et. al. 1995)

i_{tilt} : const. for inspiral phase

スピンの傾いたBHNS連星合体の 数値相対論による先行研究

- At Foucart et. al. (2011,2013), では
 $Q = 3, \chi = 0.5, i_{tilt} = 0, 20, 40, 60, 80[\text{deg.}]$

fig: Foucart et. al. (2013)

と

$$Q = 7, \chi = 0.9, i_{tilt} = 0, 20, 40, 60[\text{deg.}]$$

のケースについて調べている

- スピン傾きは潮汐破壊を妨げる方向に働く
- どちらの場合も
EOS: $\Gamma = 2$ Polytrope, $C = 0.144$
- 質量放出は取り扱われていない



研究の目的

「ブラックホール中性子星連星合体において
スピンの傾きが重力波波形や降着円盤形成、質
量放出に与える影響を**系統的**かつ**定量的**に明ら
かにすること」

今回は特に**降着円盤**、**質量放出**に着目した話

モデル

- ・ 中性子星質量、連星の質量比、ブラックホールスピンの大きさは固定 $M_{NS} = 1.35M_{\odot}$ $Q = 5$ $\chi = 0.75$

- ・ スピンの傾きをふる:

$$i_{tilt} = 30, 60, 90[\text{deg.}]$$

- ・ 4種類の原子核物理ベースのゼロ温度状態方程式のモデルを採用.
(4-piecewise polytropic EOS(J. Read et. al. 2009))

$$\text{APR4}(R_{NS}^{1.35M_{\odot}} = 11.1, \mathcal{C}^{1.35M_{\odot}} = 0.180)$$

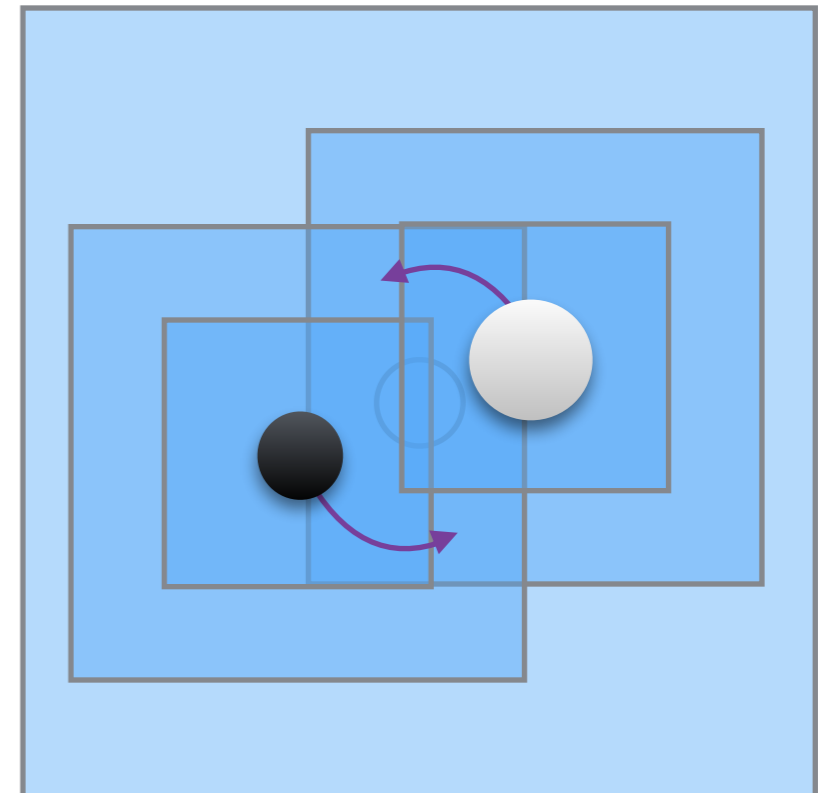
$$\text{ALF2}(R_{NS}^{1.35M_{\odot}} = 12.4, \mathcal{C}^{1.35M_{\odot}} = 0.161)$$

$$\text{H4}(R_{NS}^{1.35M_{\odot}} = 13.5, \mathcal{C}^{1.35M_{\odot}} = 0.147)$$

$$\text{MS1}(R_{NS}^{1.35M_{\odot}} = 14.5, \mathcal{C}^{1.35M_{\odot}} = 0.138)$$

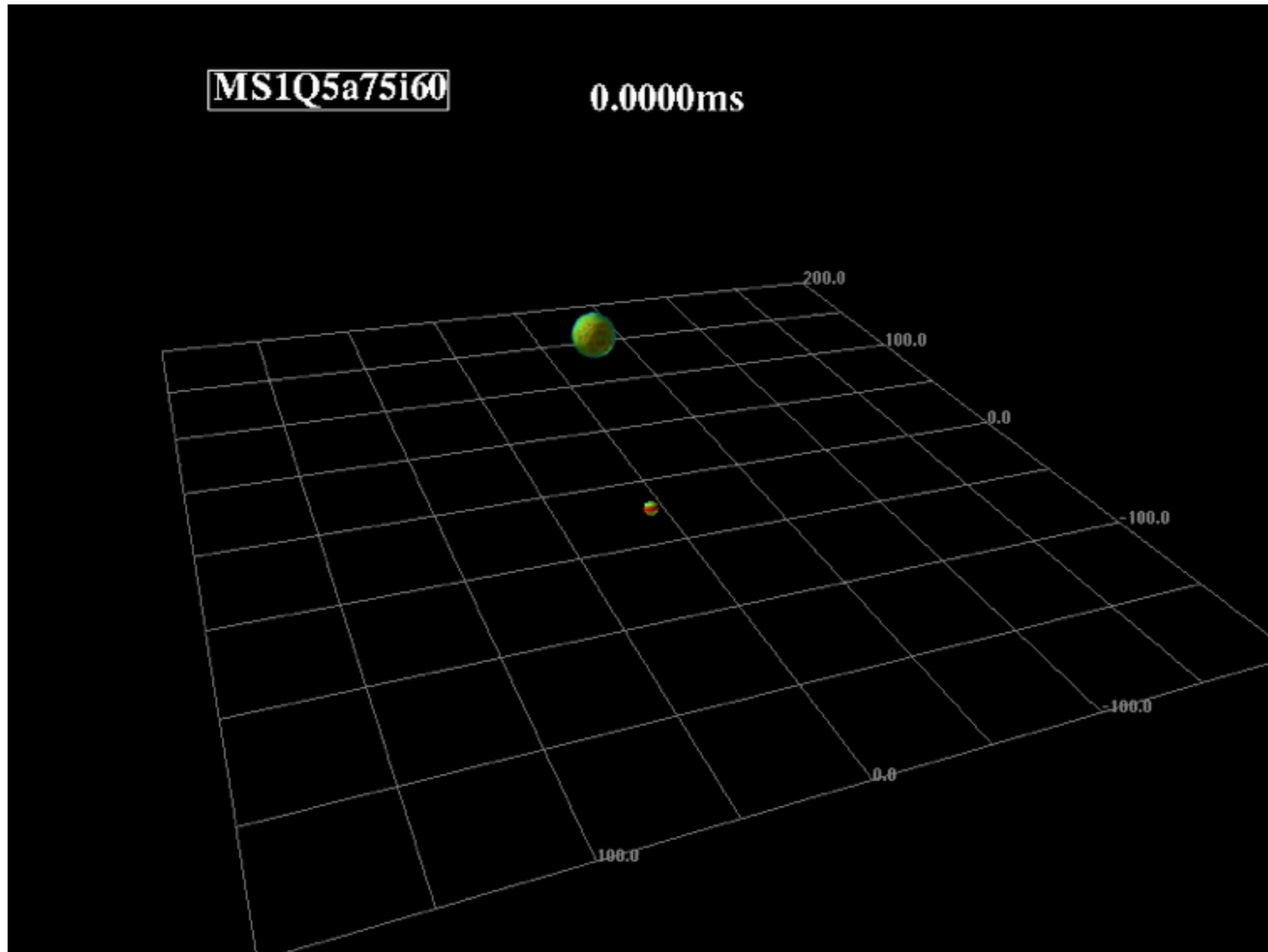
シミュレーションコード

- NR(GRHD) simulation code **SACRA** (*Yamamoto et. al. 2008*)
- BSSN(+Z4c [*D. Hildtch et. al. 2013*]) formalism
- Adaptive mesh refinement (Moving Grid)
- moving-puncture gauge

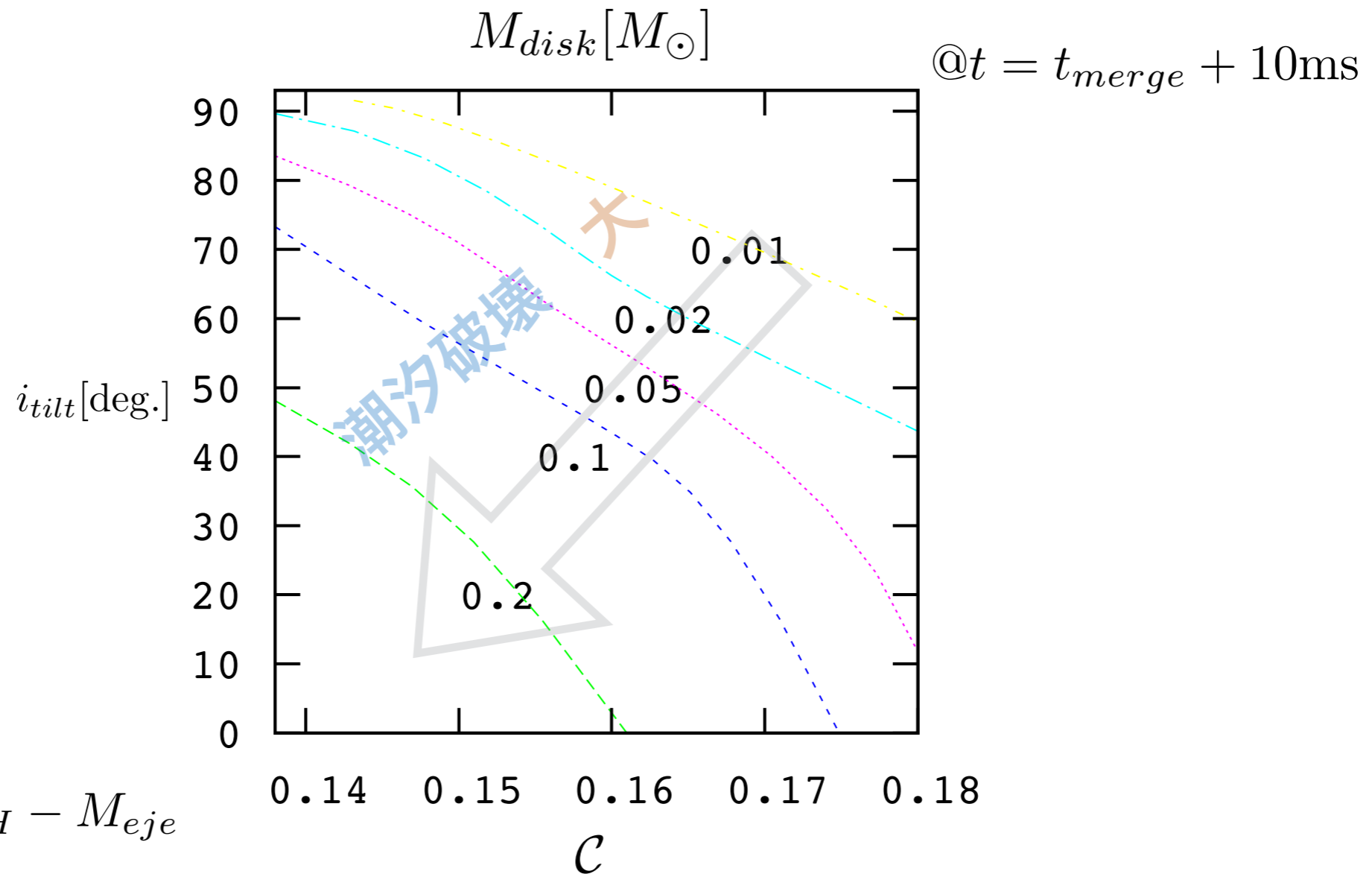


Result

Animation



降着円盤質量



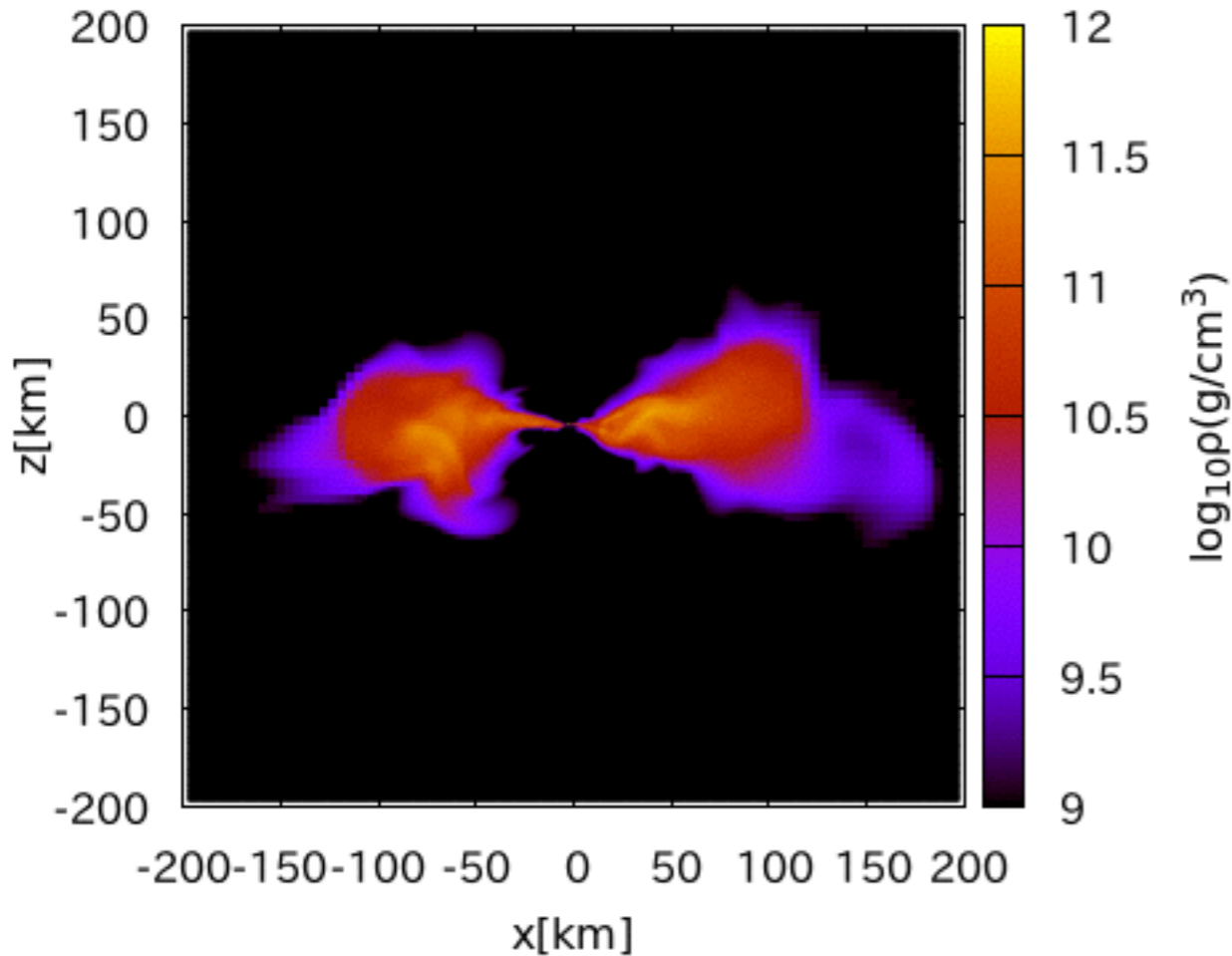
中程度のコンパクトネス ~ 0.16 において **0.1 太陽質量以上** の降着円盤が形成されるためには、スピンの傾きが **$\sim 50 [\text{deg.}]$ よりも小さい必要がある**

降着円盤の傾き

MS1i30

50.0 [ms]

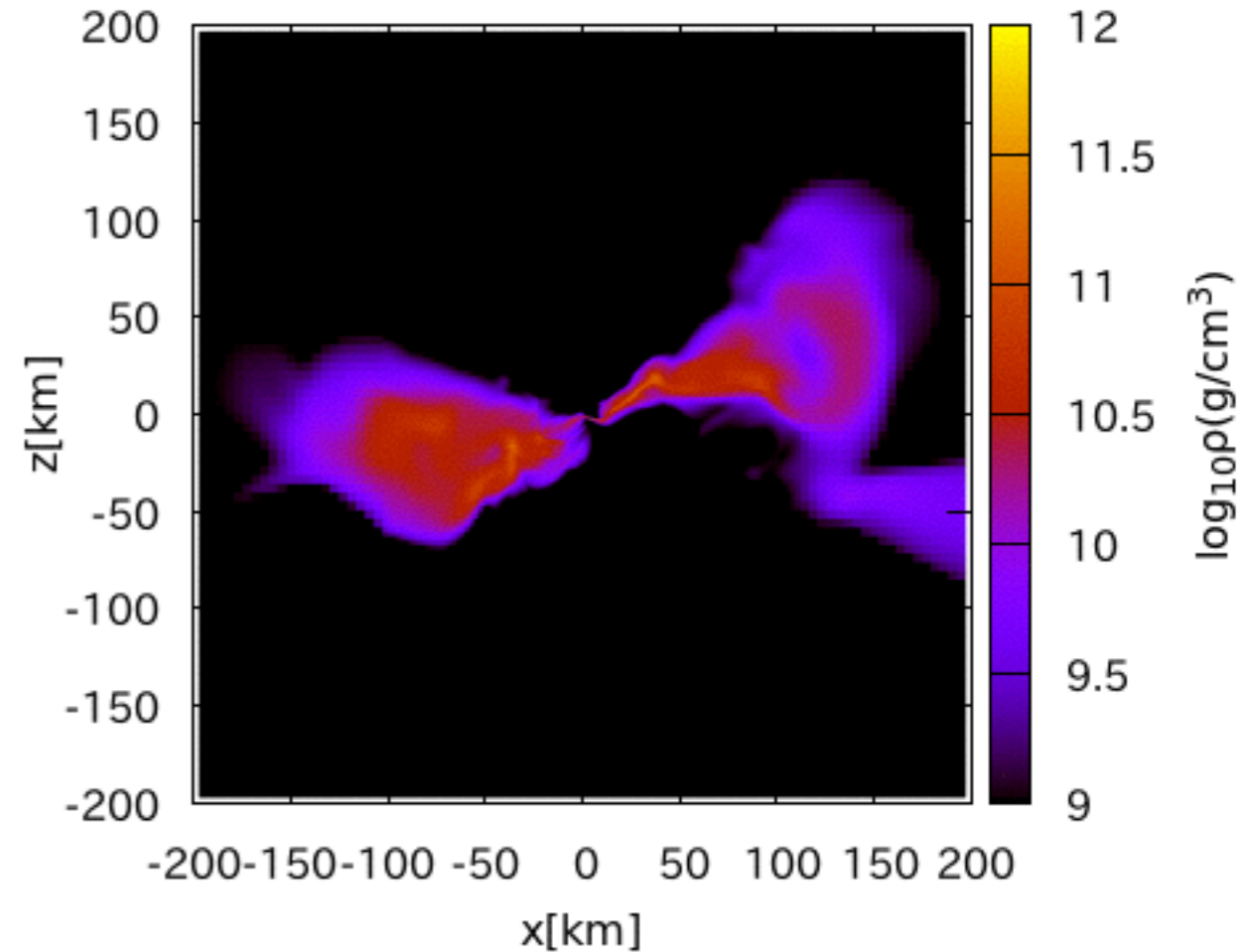
$t_{\text{merge}} \approx 34 \text{ ms}$



MS1i60

44.1 [ms]

$t_{\text{merge}} \approx 27 \text{ ms}$



※BH spinはほぼz軸を向いている

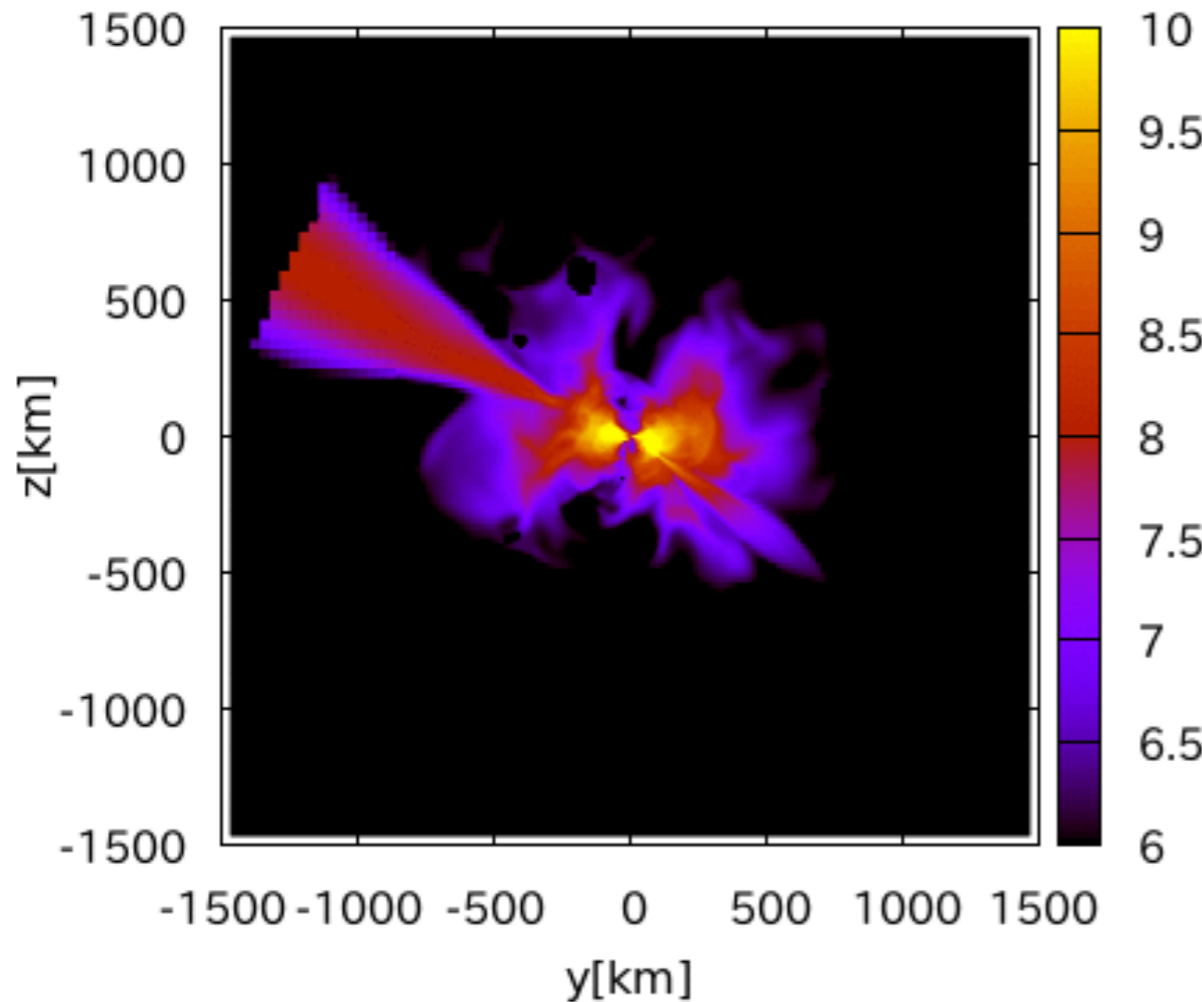
$$t_{\text{prec}} \sim 100 \text{ms} \left(\frac{100 [GM_{\odot}/c^2]}{r} \right)^3 \left(\frac{J}{50 [GM_{\odot}^2/c]} \right)$$

スピンの傾きが60°のモデルでは、合体直後~20°ほどBHスピンから傾いた降着円盤が形成されるが、~50msほどでその傾きは消える

降着円盤の傾き

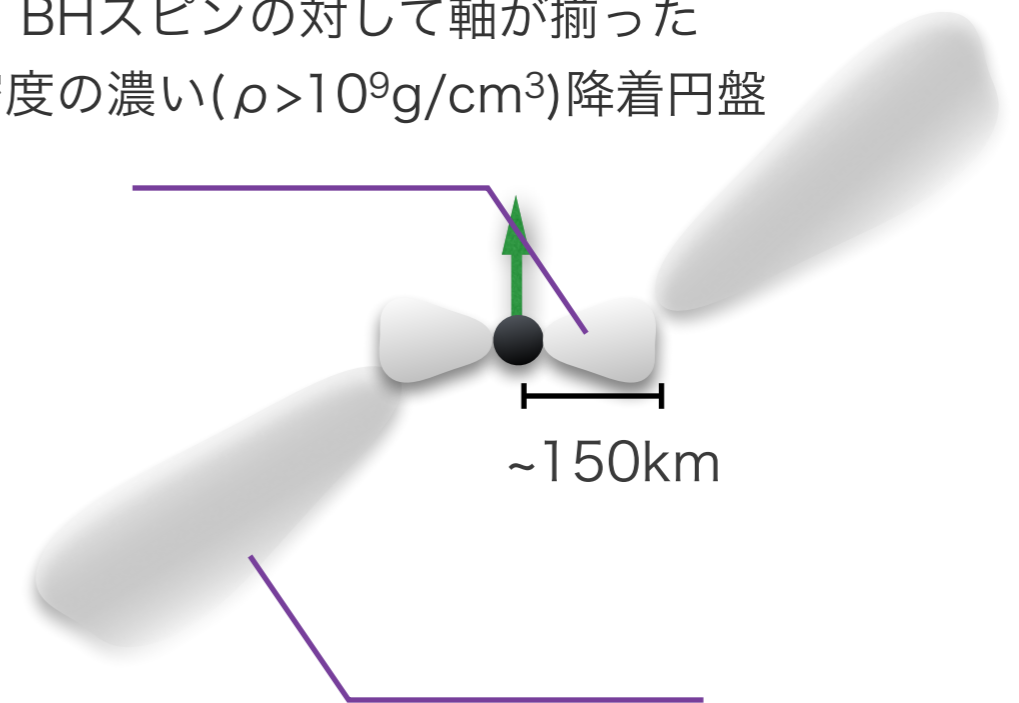
MSTi60

57.4 [ms]



BHスピンの対して軸が揃った
密度の濃い($\rho > 10^9 \text{g/cm}^3$)降着円盤

$\log_{10}(\rho/\text{g/cm}^3)$



長い半径の軌道をもち傾いた
比較的薄い($\rho < 10^8 \text{g/cm}^3$)Tidal Tail

※BH spinはほぼz軸を向いている

重力的に束縛されている物質のうち

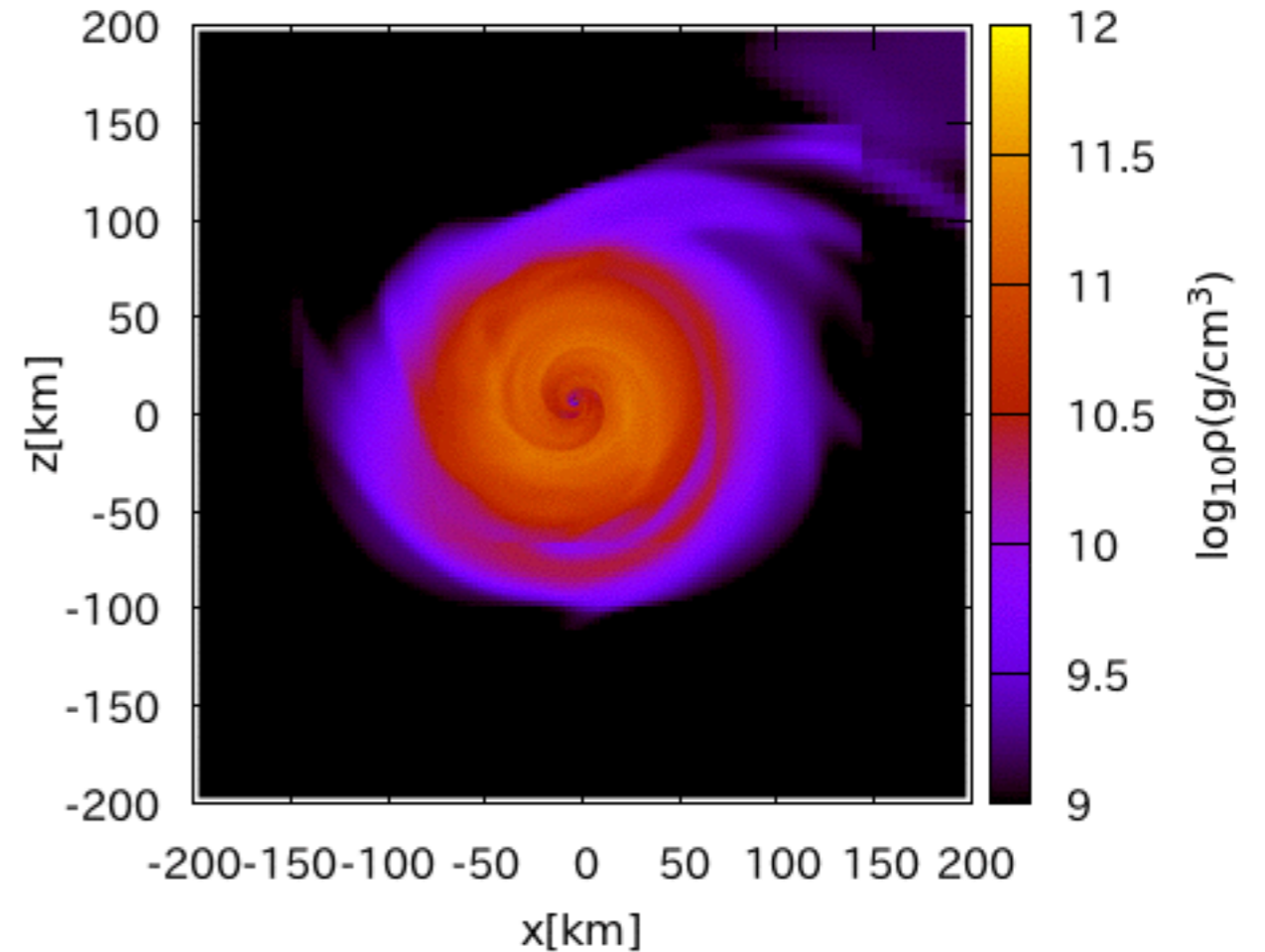
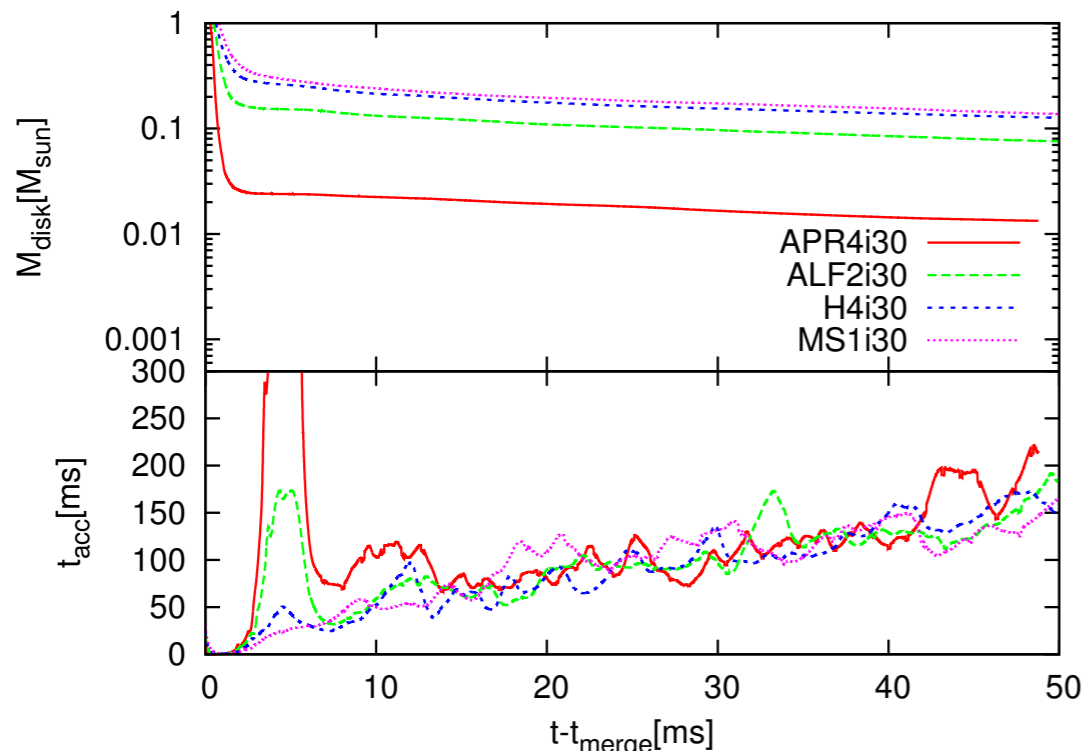
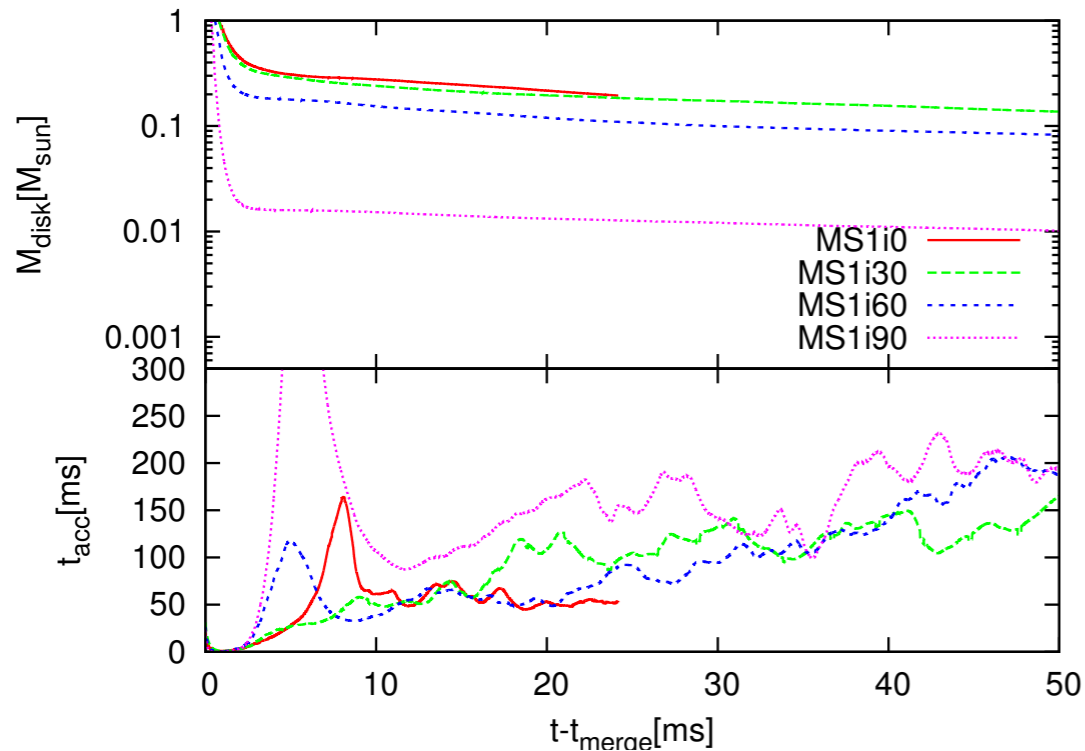
長い半径の軌道を持つ成分はスピン軸にから傾いた軌道をもつ

BHへの降着率

MSTi30

55.9 [ms]

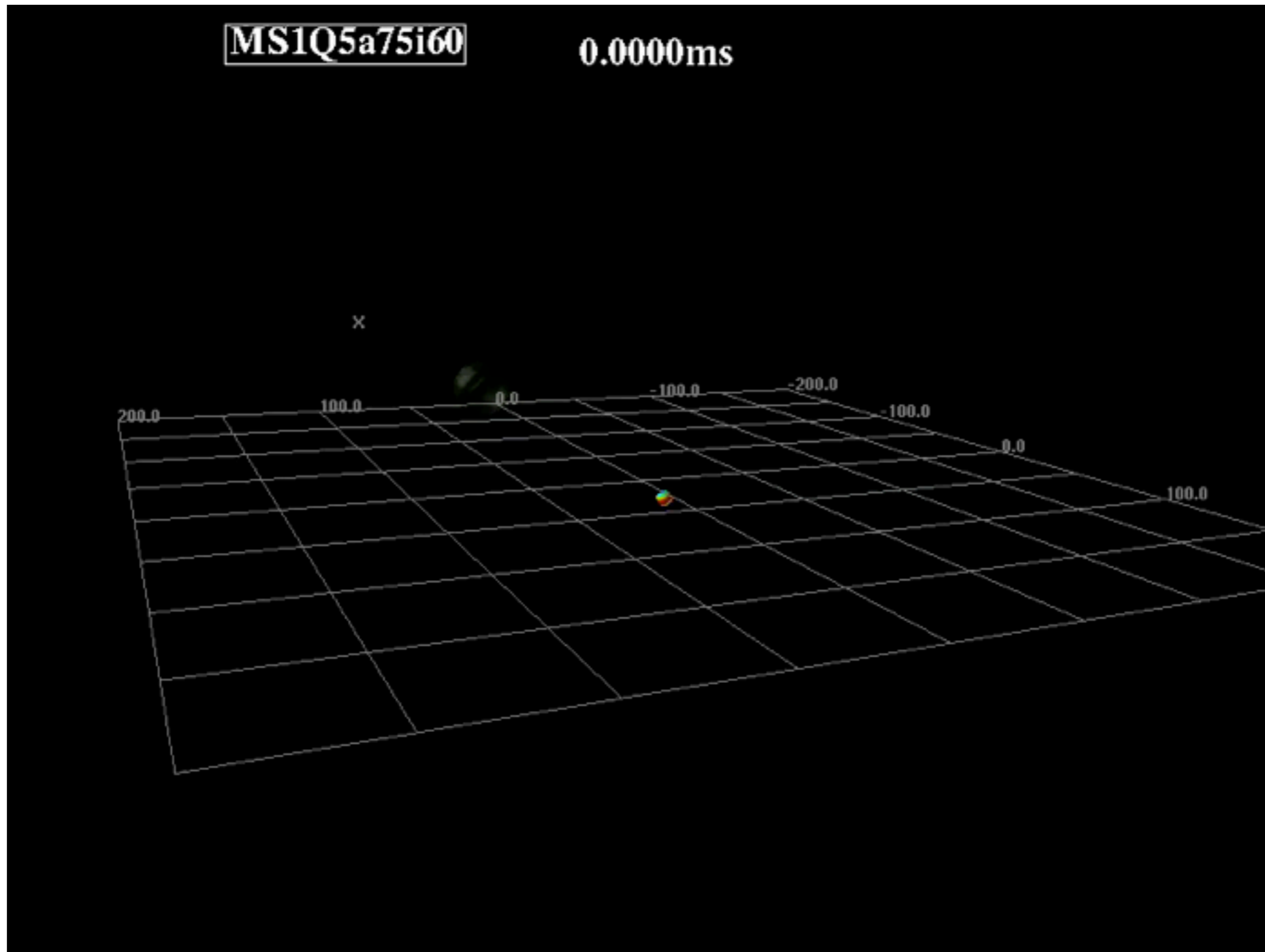
$M_{\text{disk}} \approx 0.3M_{\odot}$



$$t_{\text{acc}} = \frac{M_{\text{disk}}}{\dot{M}_{<AH}}(t) \sim 100\text{ms}$$

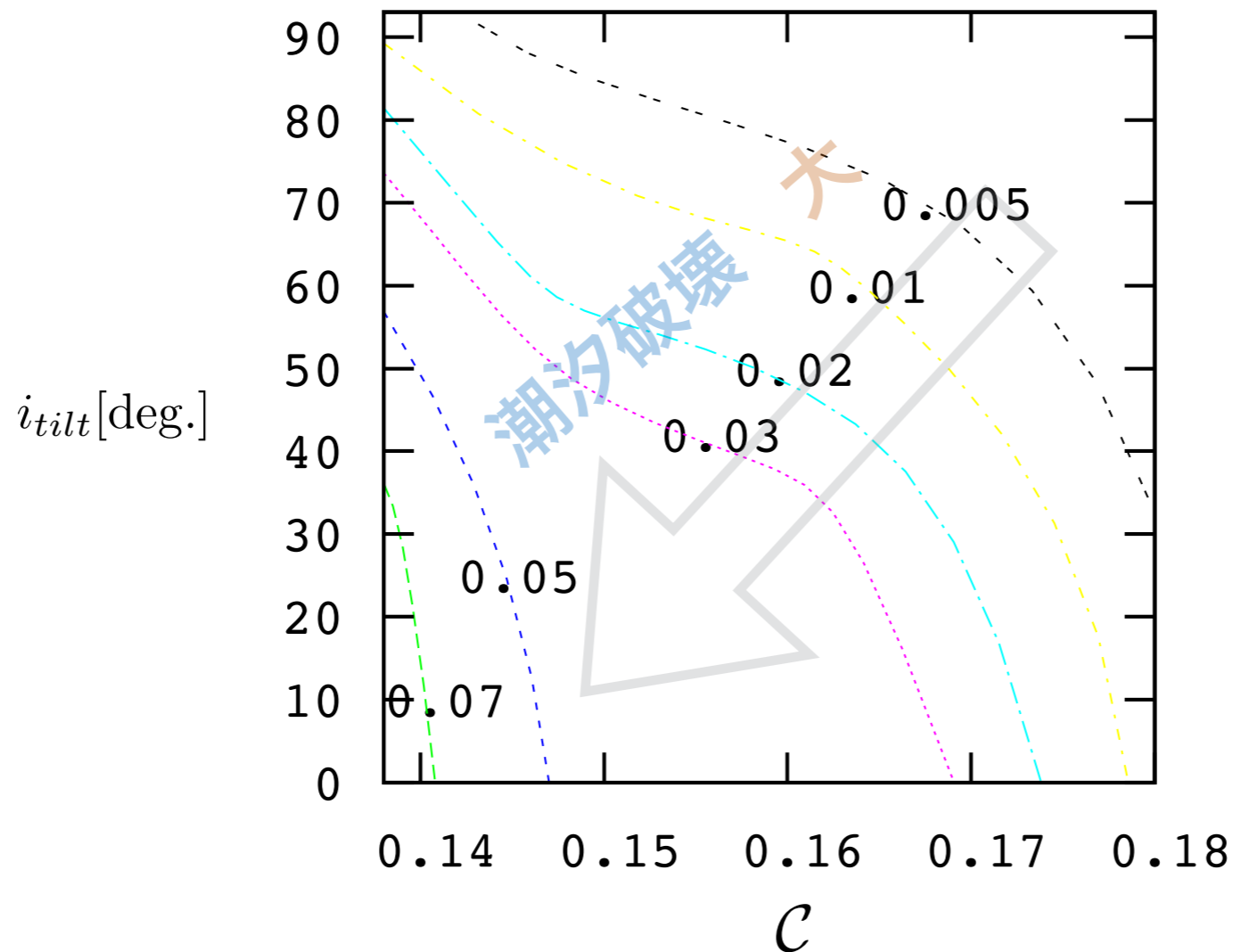
$$\alpha \sim 0.01 \left(\frac{t_{\text{orb}}}{10\text{ms}} \right) \left(\frac{100\text{ms}}{t_{\text{acc}}} \right) \left(\frac{0.3}{H/r} \right)^2$$

質量放出



Ejecta質量

$M_{eje}[M_{\odot}] @ t = t_{merge} + 10\text{ms}$



中程度のコンパクトネス ~ 0.16 においてスピンの傾きが ~ 65 [deg.]よりも小さければ、**0.01太陽質量**以上の物質が放出される

Ejecta速度

$$v_{ave} = \sqrt{\frac{2T_{kin}}{M_{eje}}}$$

$$P_{eje} = \int \rho v dV$$

$$P_{GW} = \int \frac{dP_{GW}}{dt} dt$$

Model	$M_{eje,10ms} [M_{\odot}]$	$v_{ave,10ms} [c]$	$P_{eje,10ms}/M [c]$	$P_{GW}/M [c]$
APR4i30	5×10^{-3}	2.56×10^{-1}	3.64×10^{-5}	2.8×10^{-4}
APR4i60	2×10^{-4}	2.85×10^{-1}	1.20×10^{-6}	1.8×10^{-3}
APR4i90	$< 10^{-4}$	2.40×10^{-1}	—	1.9×10^{-3}
ALF2i30	0.033	2.67×10^{-1}	7.15×10^{-4}	2.4×10^{-4}
ALF2i60	0.011	2.69×10^{-1}	6.28×10^{-5}	9.0×10^{-4}
ALF2i90	$< 10^{-4}$	2.52×10^{-1}	—	1.1×10^{-3}
H4i30	0.035	2.62×10^{-1}	1.09×10^{-3}	2.4×10^{-4}
H4i60	0.012	2.50×10^{-1}	2.20×10^{-4}	2.2×10^{-4}
H4i90	2×10^{-3}	2.73×10^{-1}	—	1.1×10^{-3}
MS1i30	0.074	2.70×10^{-1}	1.96×10^{-3}	2.1×10^{-4}
MS1i60	0.046	2.69×10^{-1}	1.02×10^{-3}	2.9×10^{-4}
MS1i90	8×10^{-3}	2.59×10^{-1}	—	1.2×10^{-4}

Ejectaの膨張速度のスピンの傾き、状態方程式依存性は**弱く**、およそ~0.3cに集中している。Ejectaの質量が大きいと、Ejectaの非等方な放出に伴う反跳が重力波放出による反跳より卓越する。

Ejecta形状

H4i30



$\geq 0.03M_{\odot}$

H4i60



$\approx 0.01M_{\odot}$

ALF2i60



$\approx 0.01M_{\odot}$

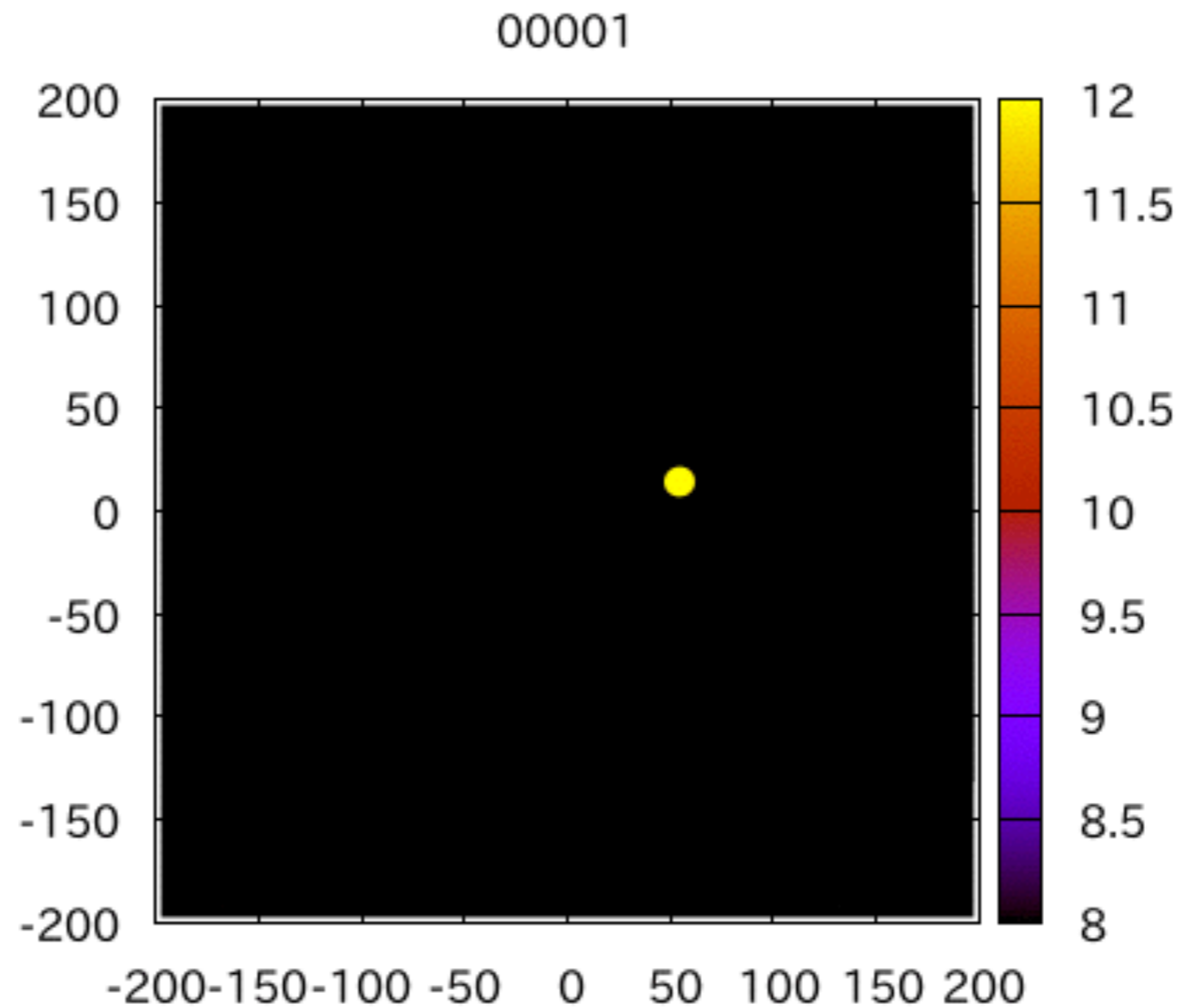
比較的大きい質量の物質が放出される時には (≥ 0.03 太陽質量), その形状は
三日月型となる。(開き角 ~ 180 [deg.])

放出される物質の質量が比較的小さい場合 (≤ 0.01 太陽質量), その開き角は
360[deg.]より大きい. このとき歳差運動の影響も形状に反映されている。

まとめ

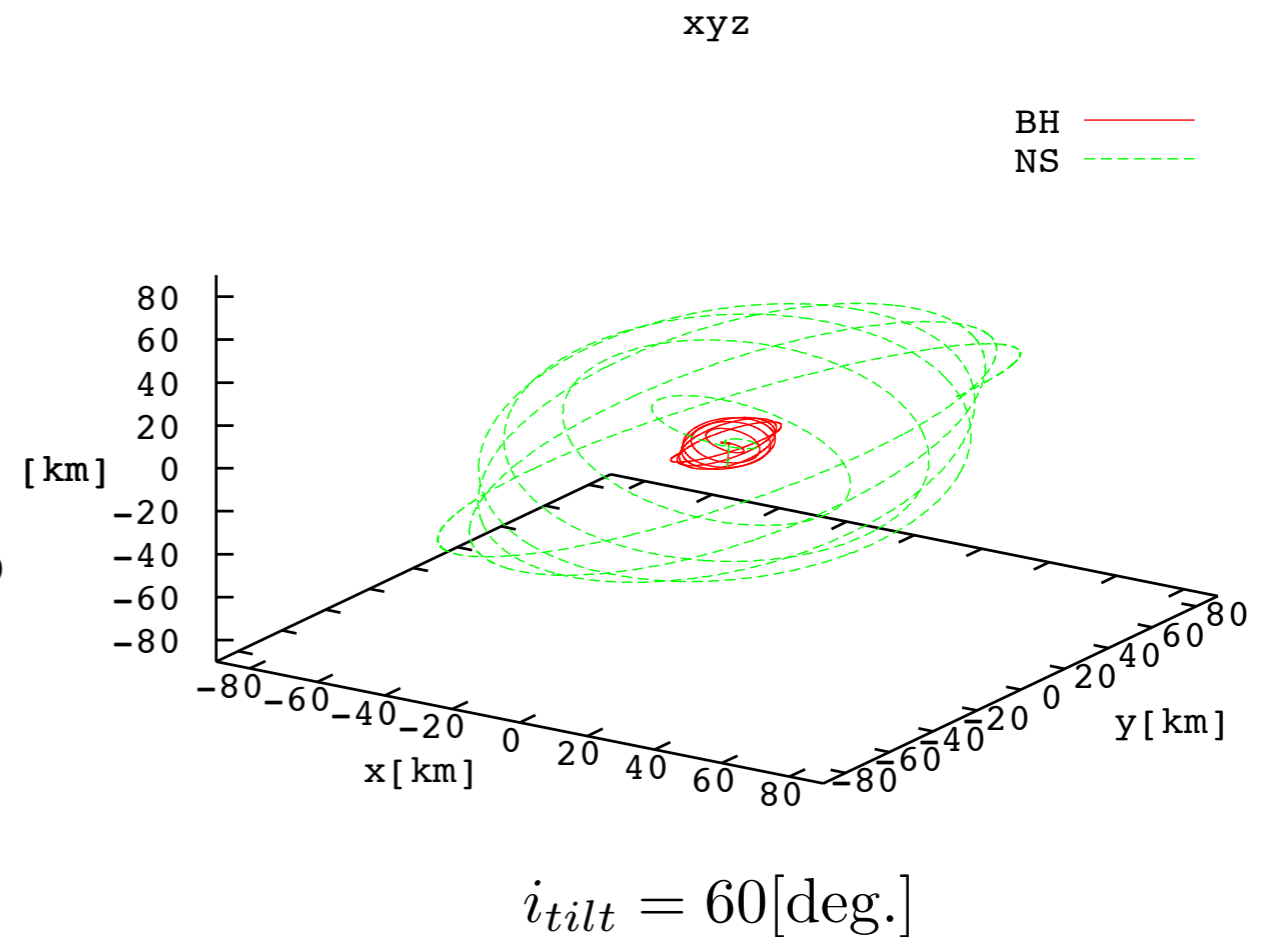
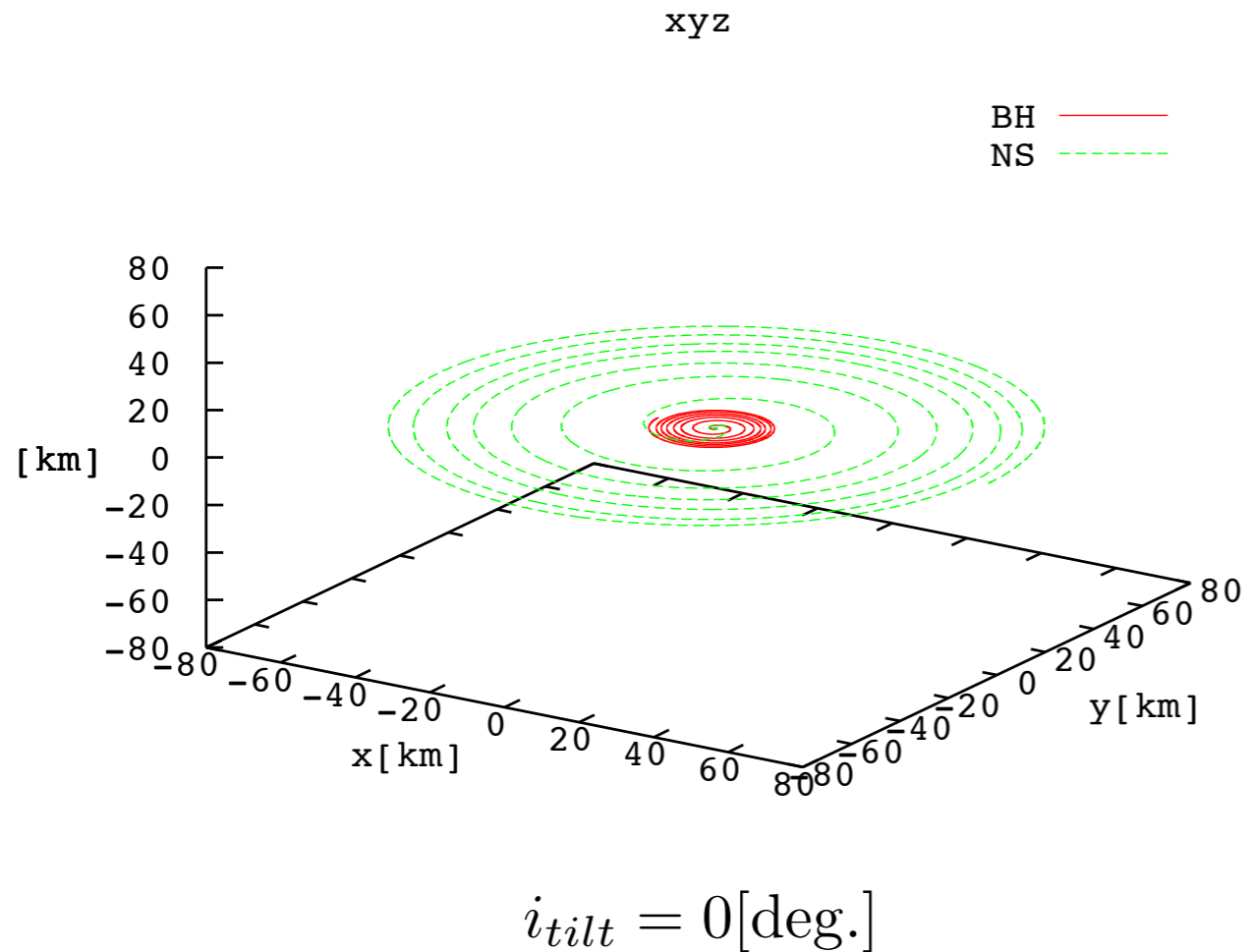
- ・ ブラックホール中性子星連星合体のスピンの傾きと状態方程式に対する依存性を数値相対論シミュレーションを用いて調べた。
 - ・ 形成される降着円盤と放出される物質の質量のスピンの傾きと状態方程式に対する依存性を定量的に明らかにした。
 - ・ 降着円盤のBHへの降着のタイムスケールは降着円盤の質量に関わらず~100msであった。また、降着円盤中にスパイラルショックが準安定的にたつ様子が見えた。
 - ・ スピンの傾きがある場合、降着円盤の持つ角運動量はブラックホールスピンの方向から傾いており、その傾きは初期のスピンの傾きが大きいほど大きい。降着円盤のdenseな部分($\sim 10^9 \text{g/cc}$)は合体後~50msでブラックホールスピンに対して揃う傾向にありそう。
 - ・ Ejecta質量（潮汐破壊の起こるタイミング）によってEjectaの形状が変わる事が確認された。比較的重いEjecta(~0.03太陽質量)は三日月状に飛ぶ一方、比較的軽いEjecta(~<0.01太陽質量)ではとぐろを巻いたような形状になる。
 - ・ Ejectaの膨張速度のスピンの傾きや状態方程式依存性は弱く、おおよそ~0.3cとなる。

MS 1 i30のDisk傾き進化



Orbital evolution

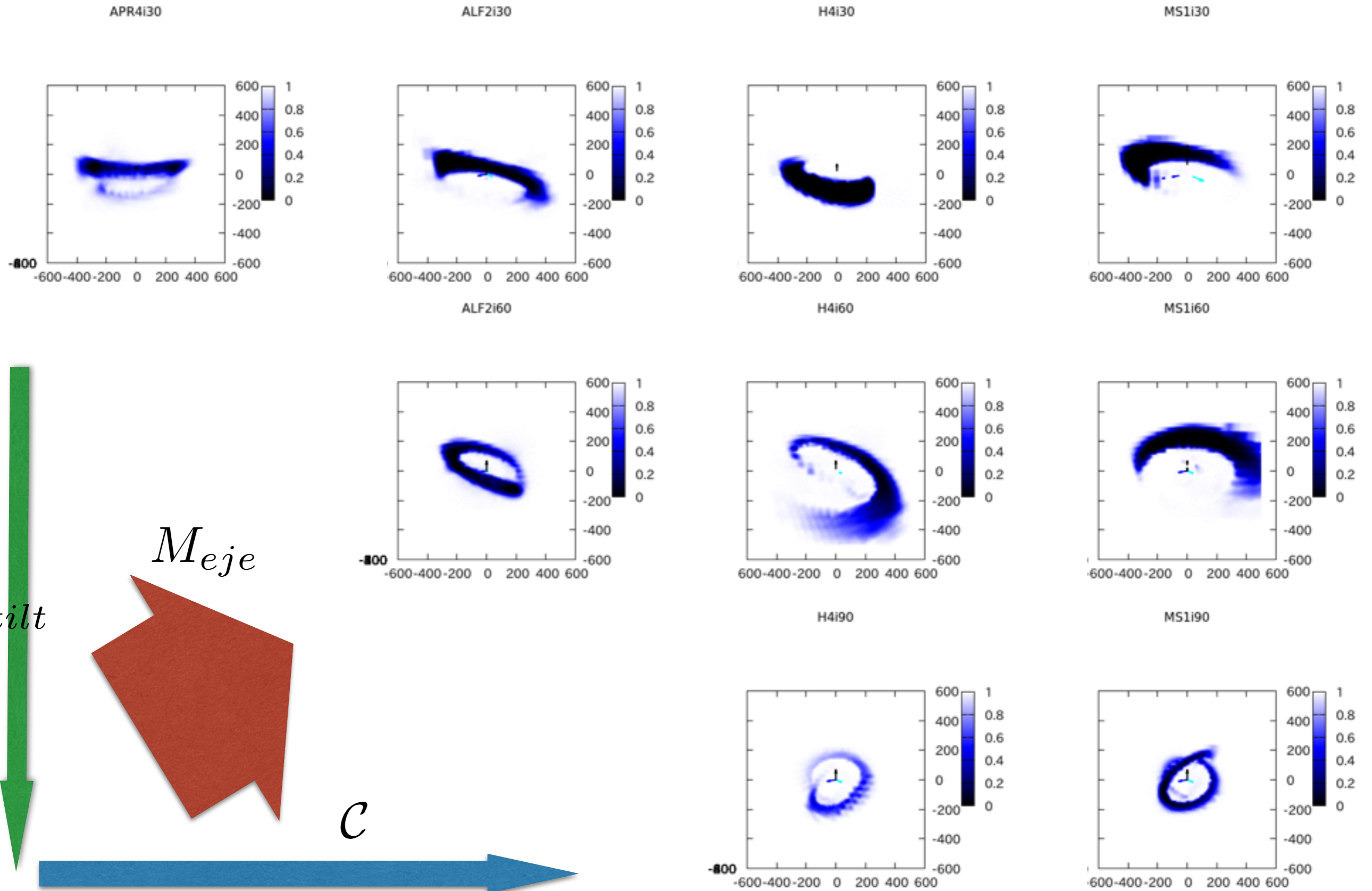
EOS : APR4



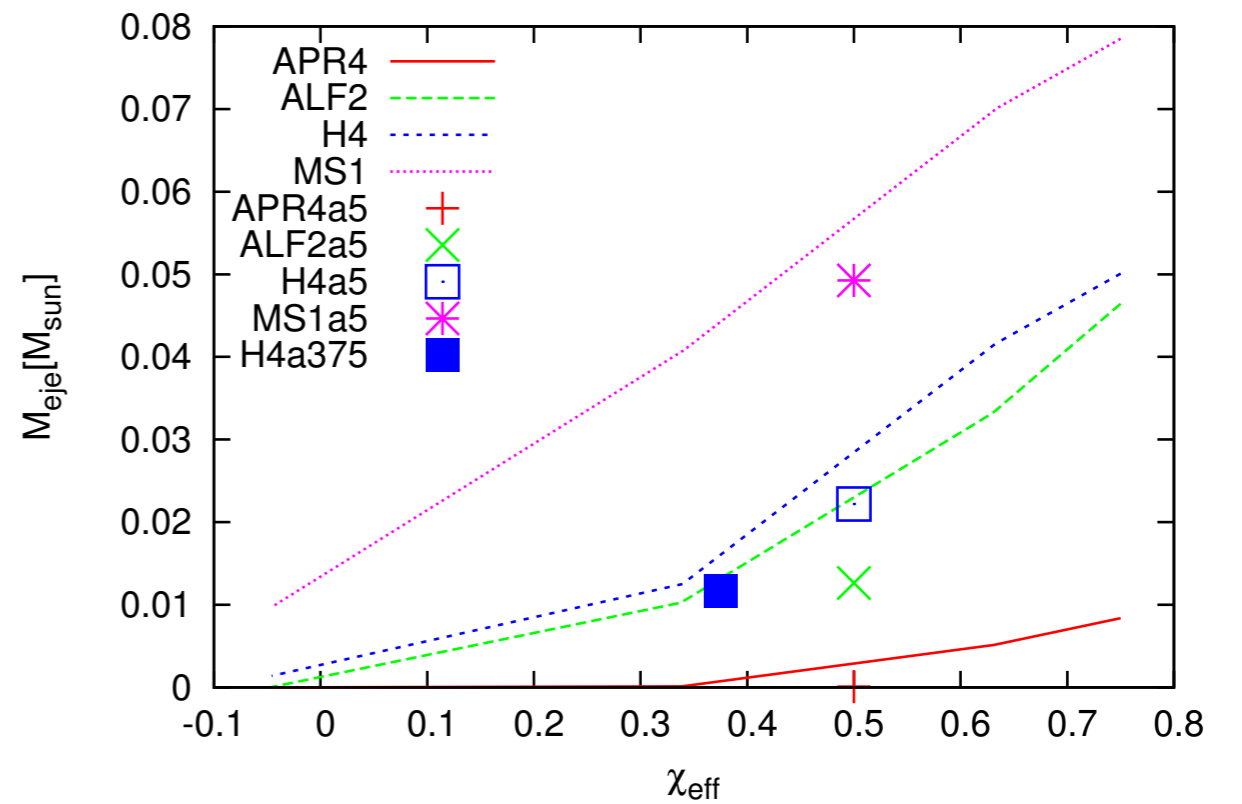
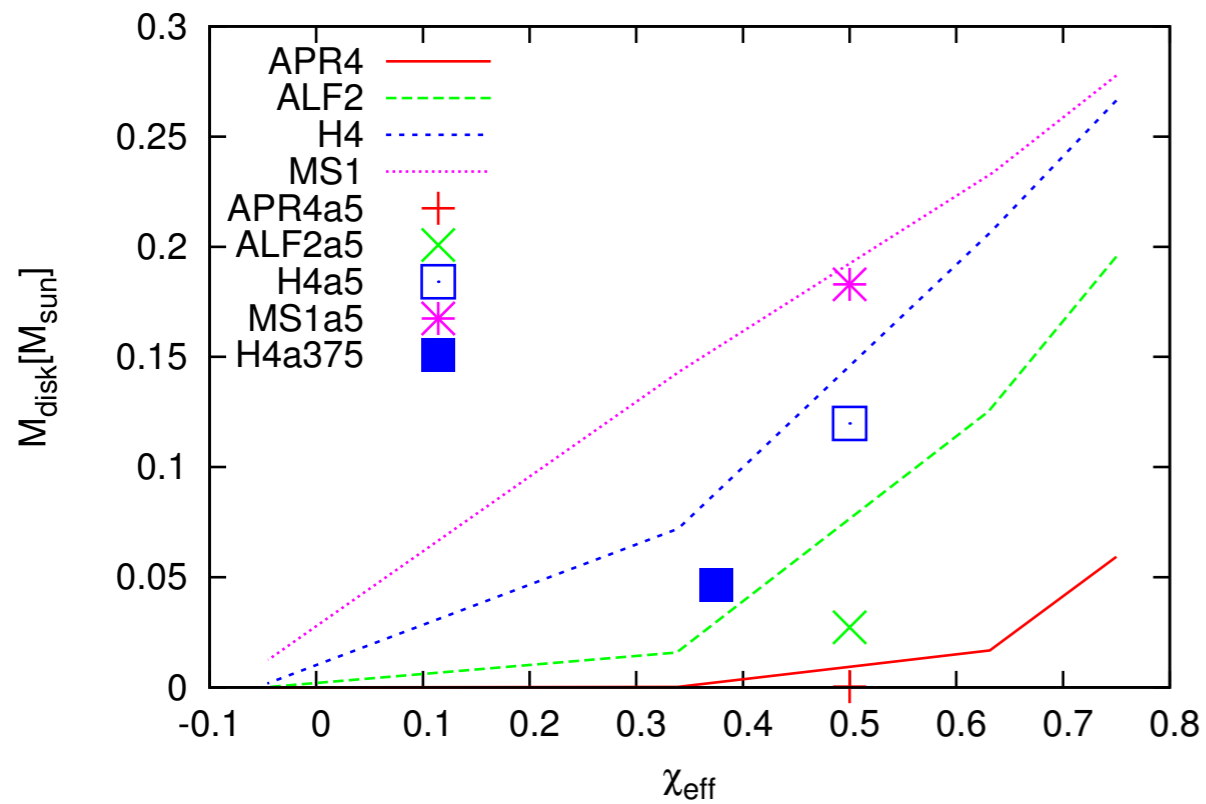
The orbit is precessing due to the effect of spin-orbit coupling.
The precessing frequency is small comparing to the orbital frequency.

$$\omega_{prec} \leq 0.1\omega_{orb}$$

Ejecta Morphology

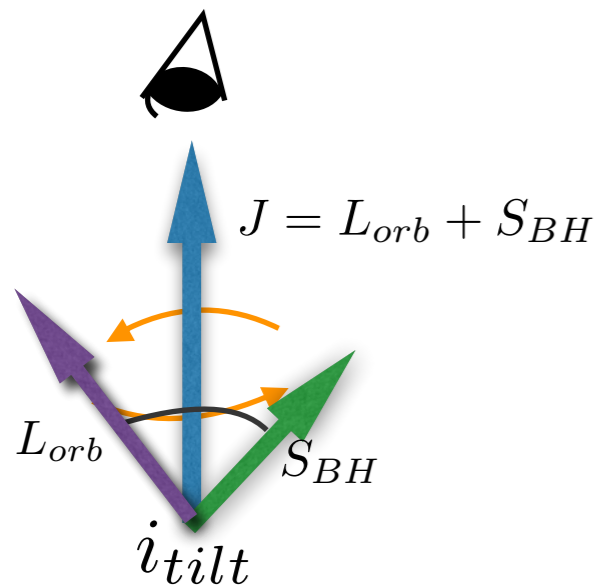


aligned spin との比較

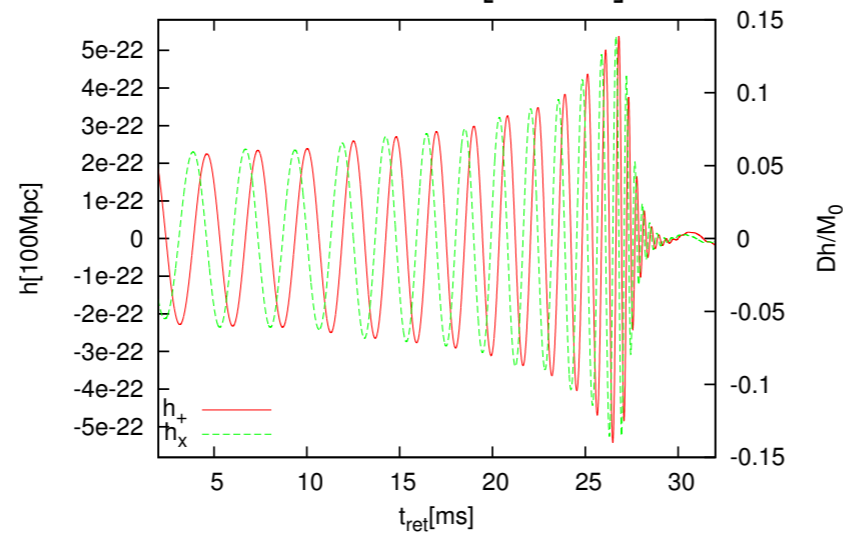


Gravitational Waveform

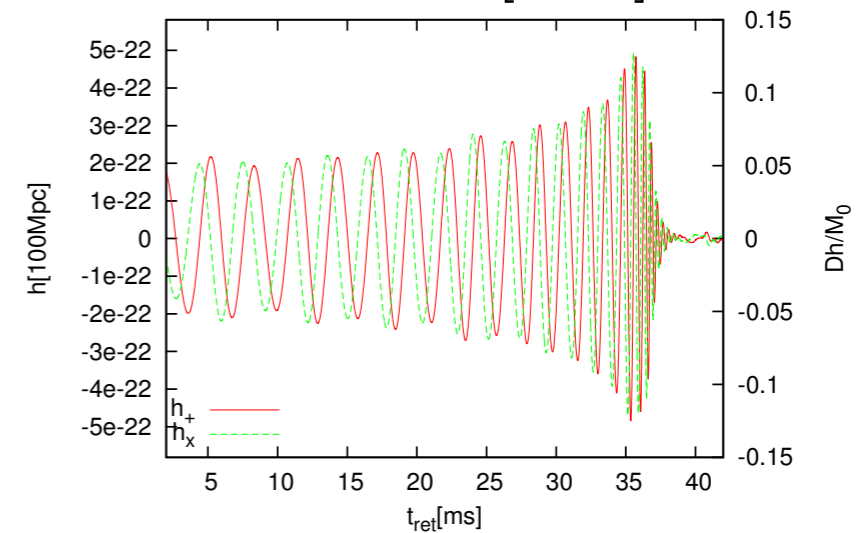
EOS : APR4



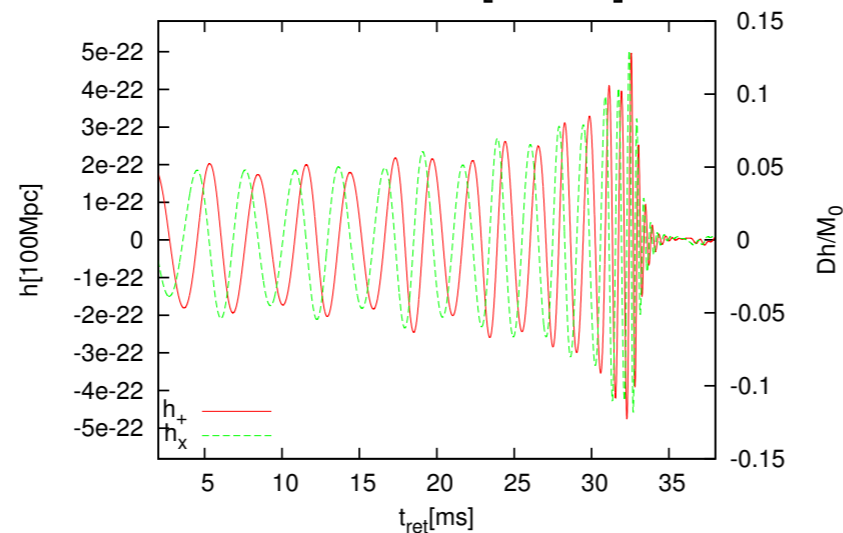
$i_{tilt} = 0[\text{deg.}]$



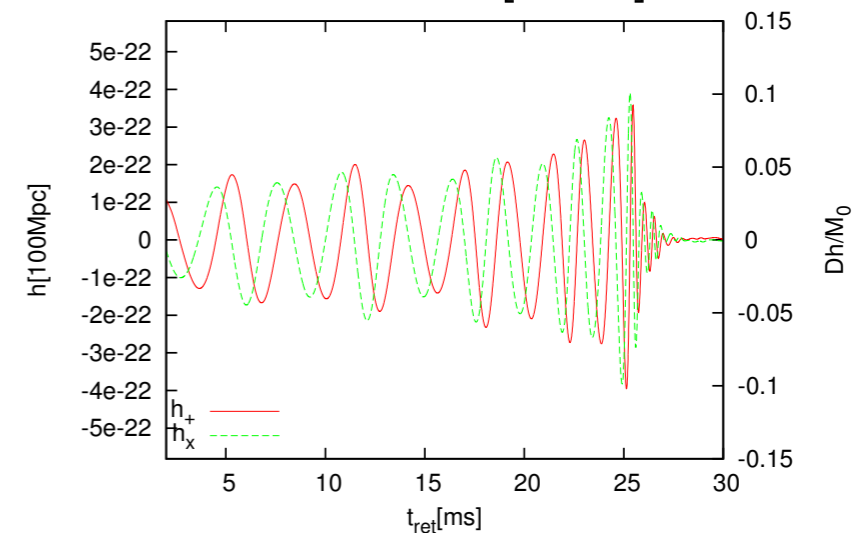
$i_{tilt} = 30[\text{deg.}]$



$i_{tilt} = 60[\text{deg.}]$

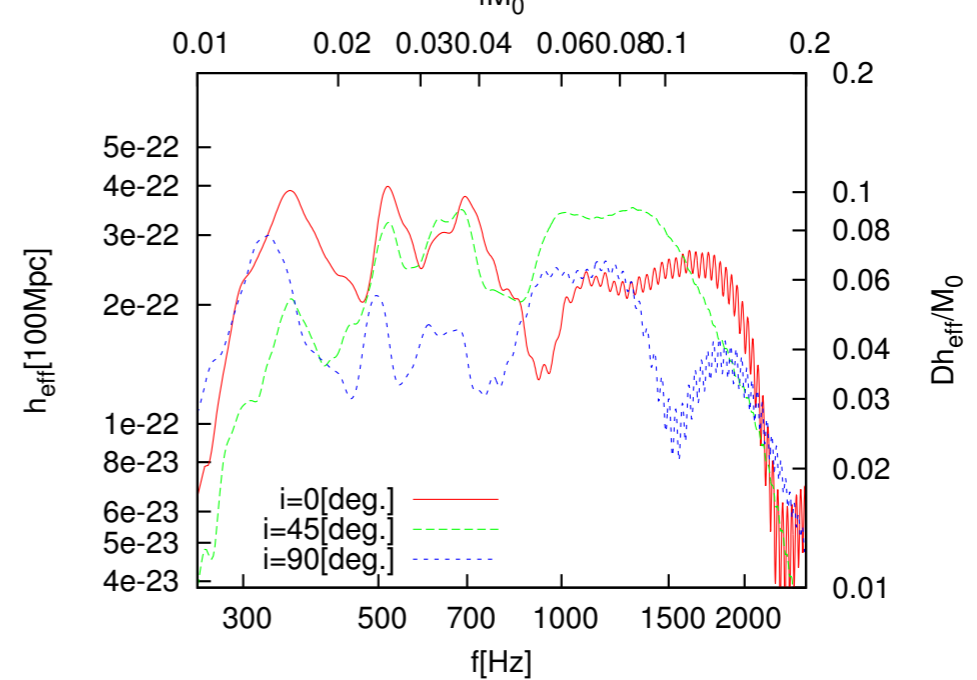
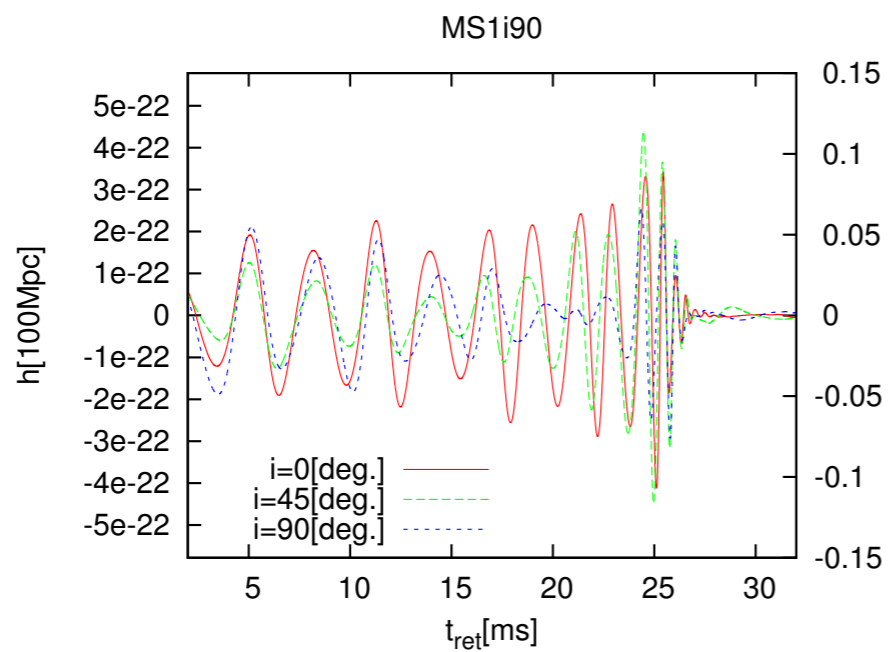
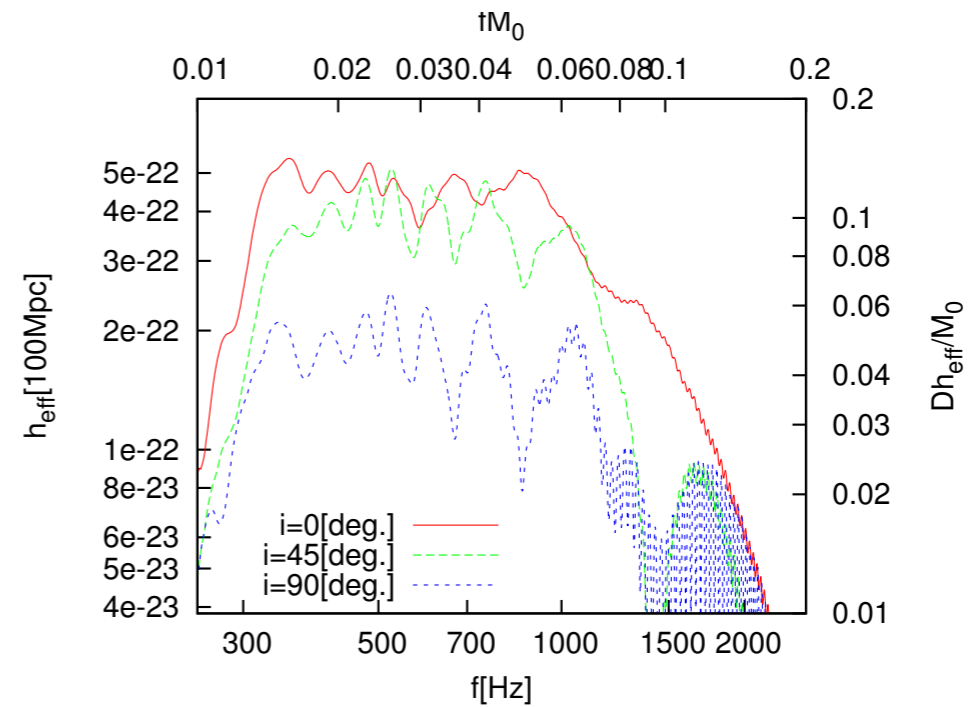
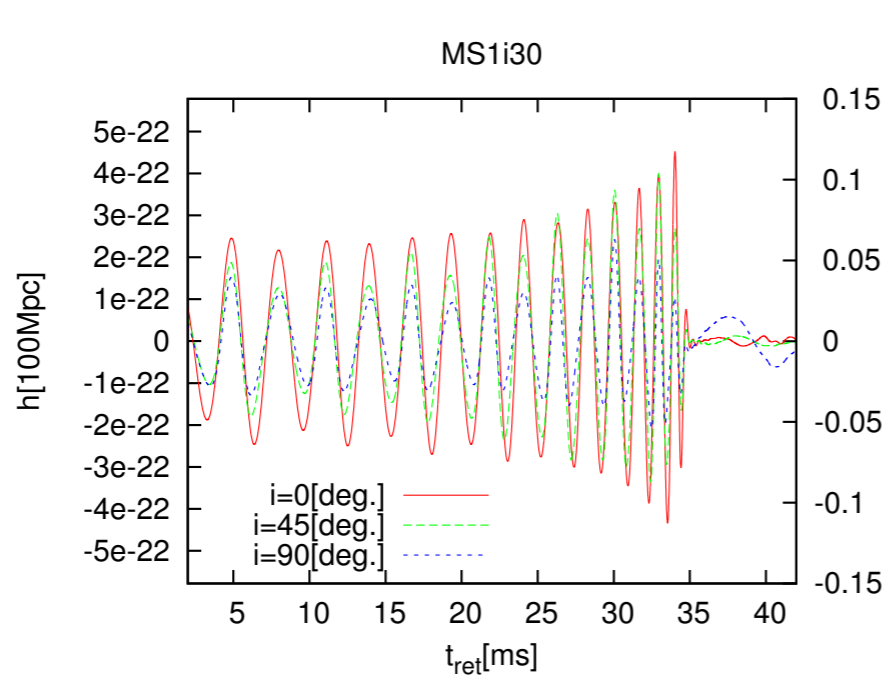


$i_{tilt} = 90[\text{deg.}]$

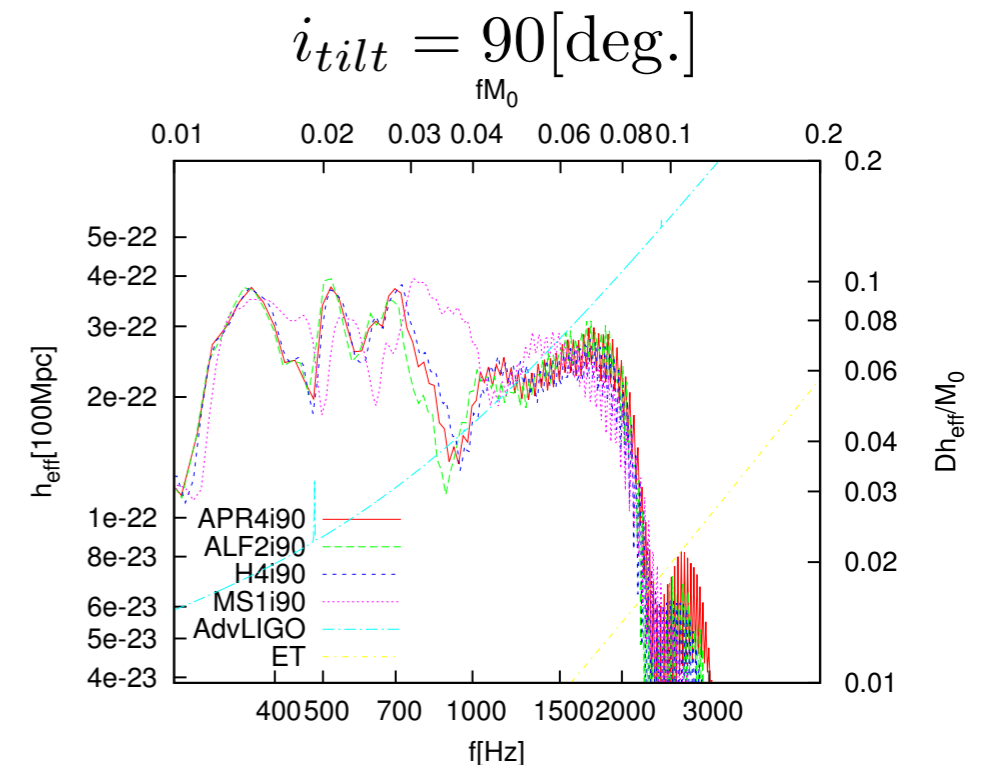
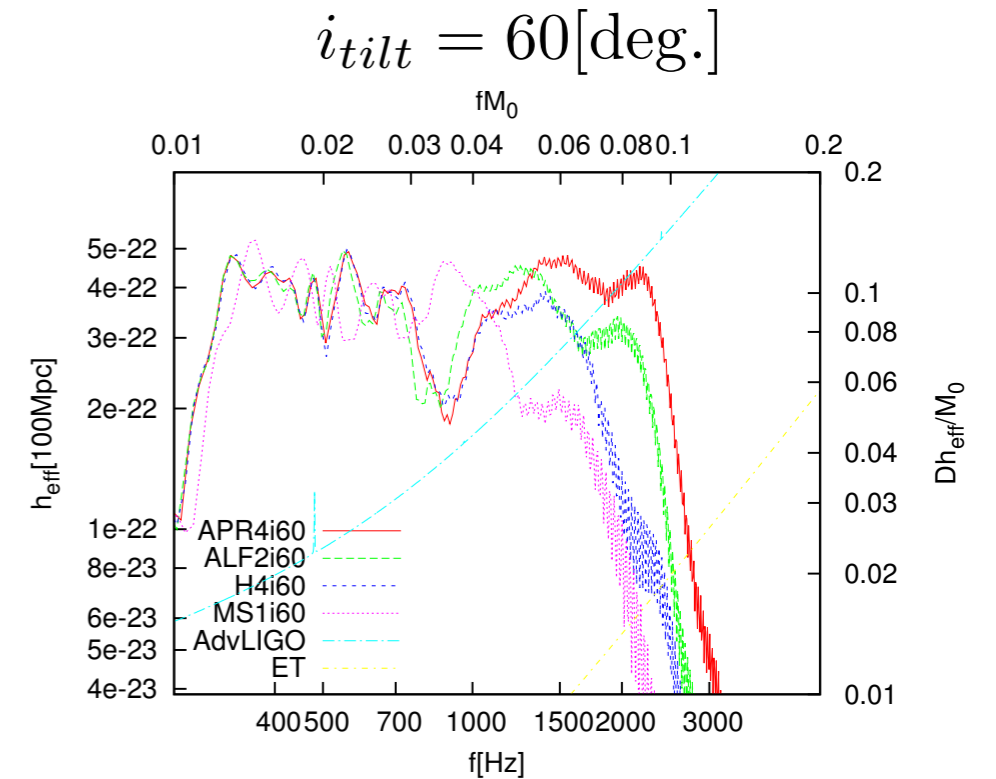
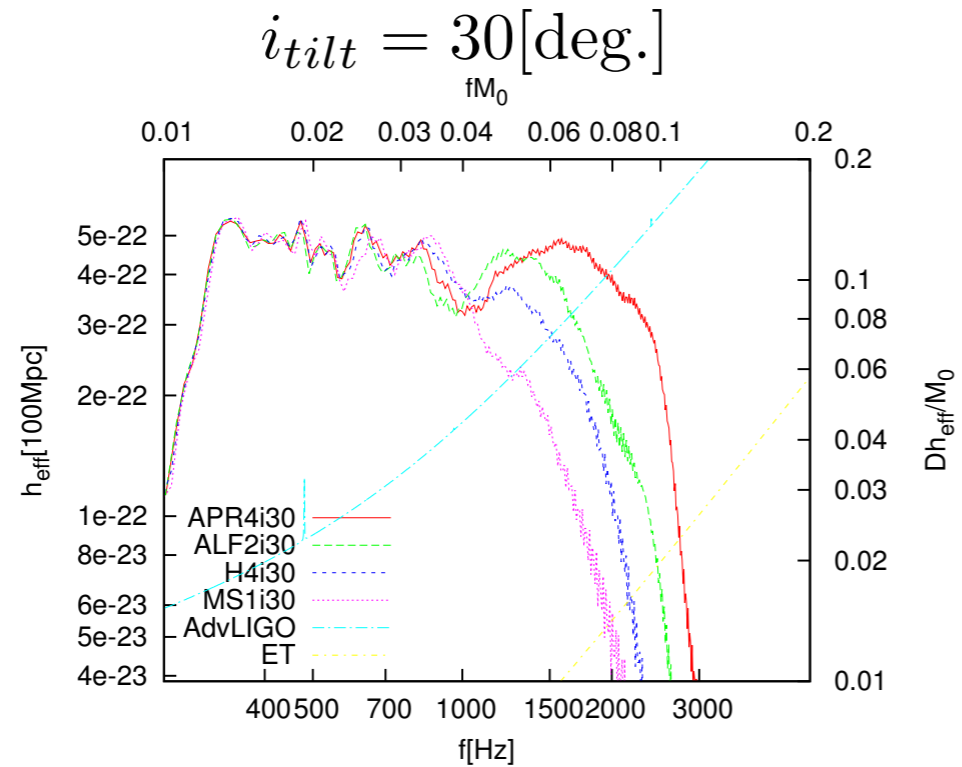


There shows gravitational waveforms observed from the direction of the total angular momentum. The modulation of the gravitational waveform becomes larger for the model with larger misalignment angle.

観測者の角度依存性

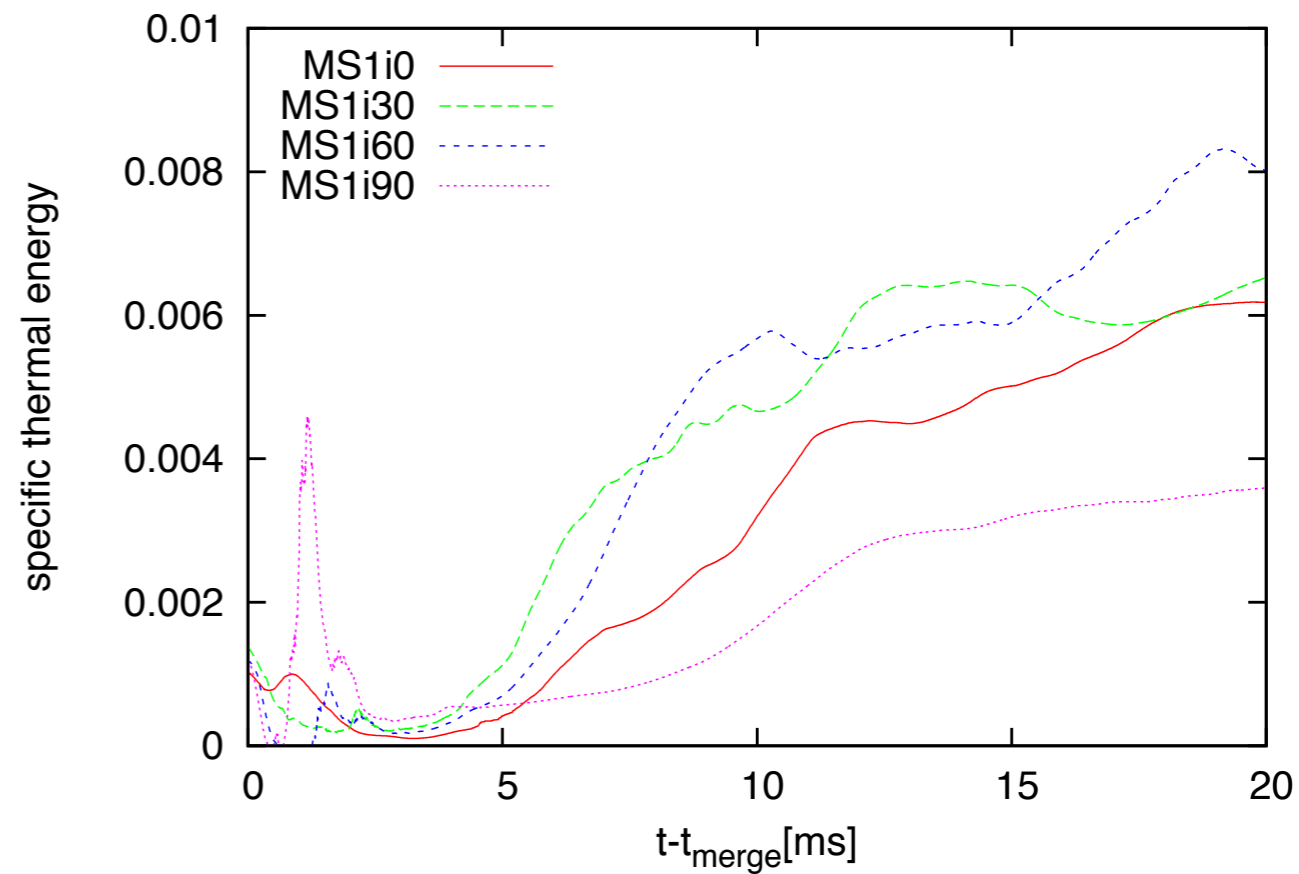
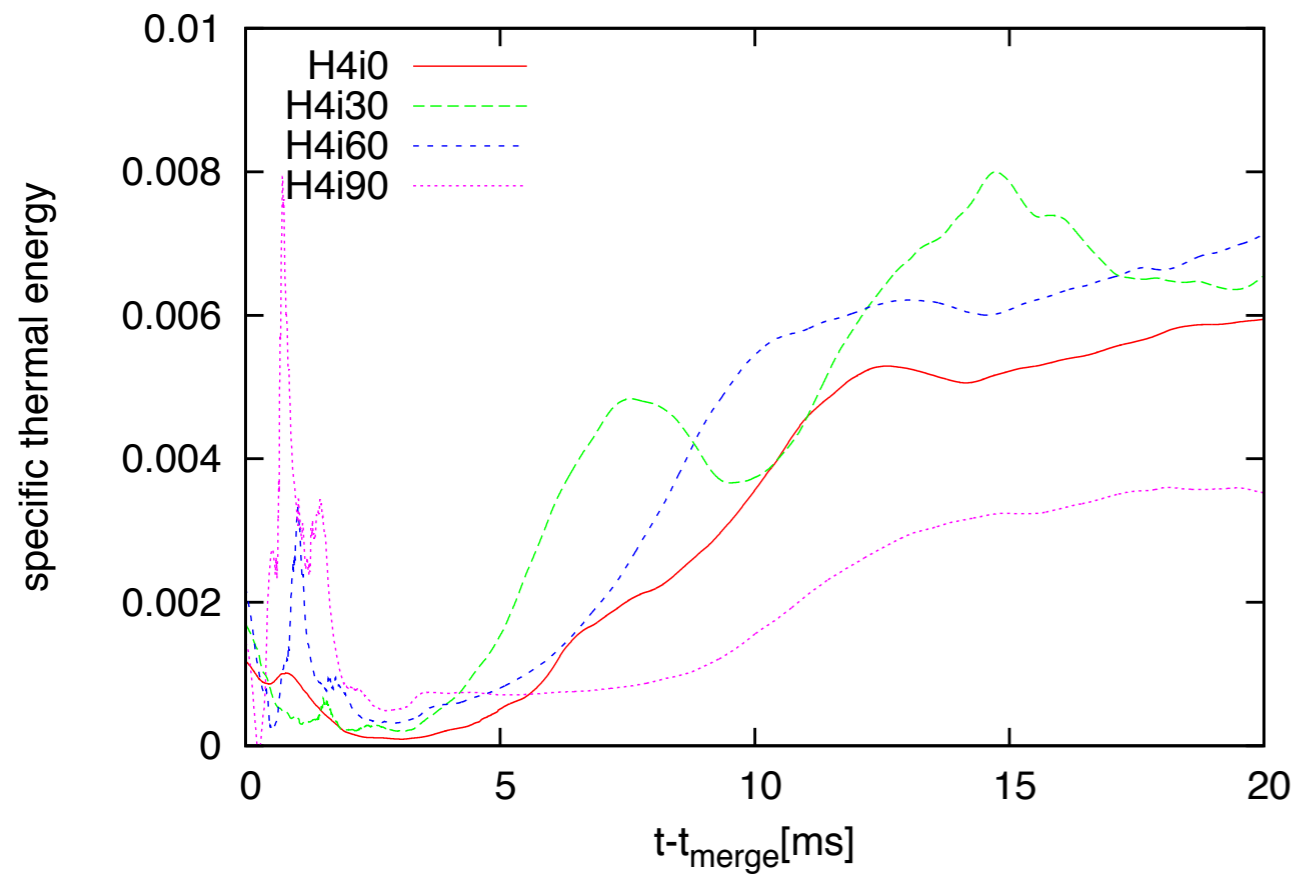


Gravitational Wave Spectrum

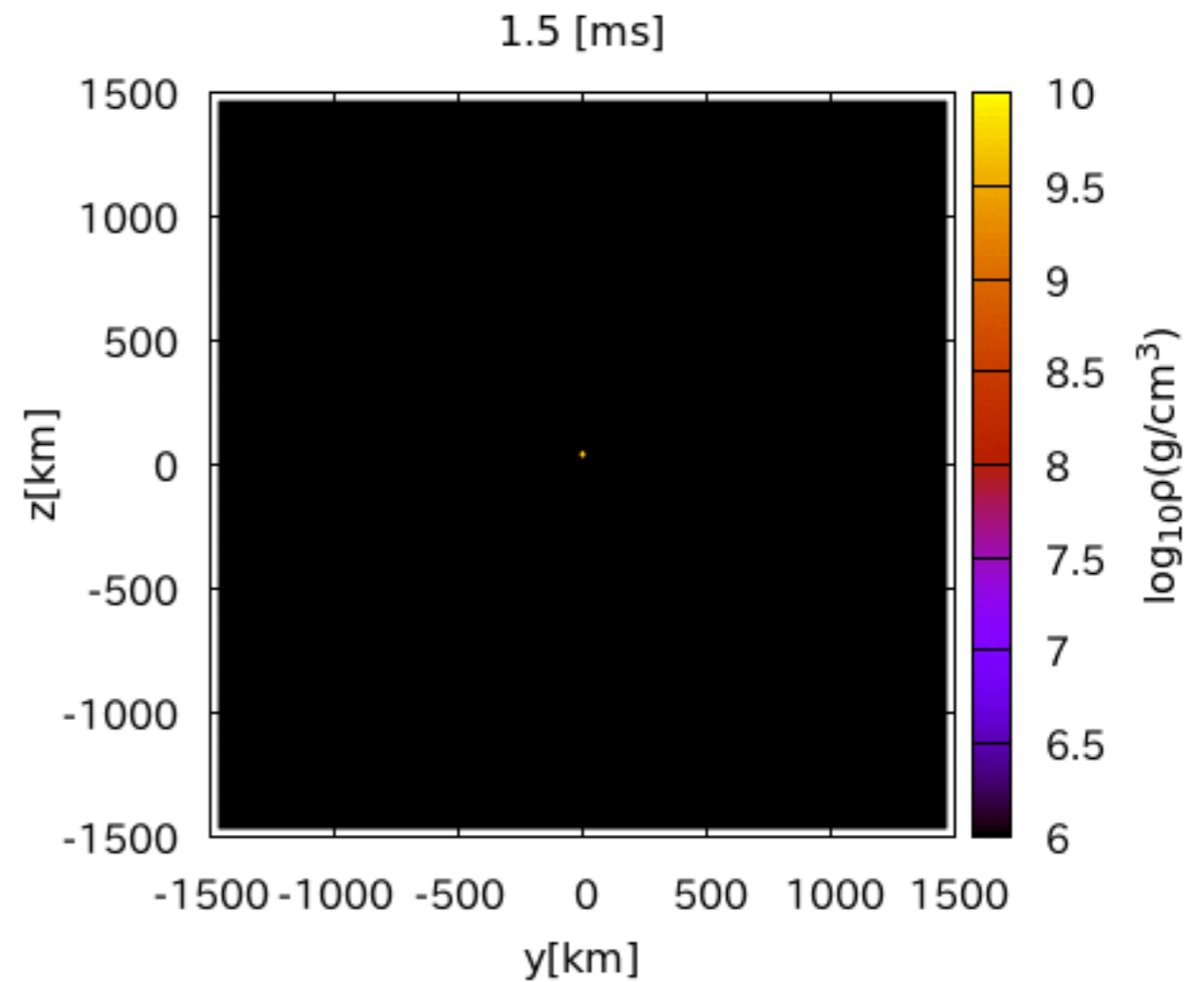
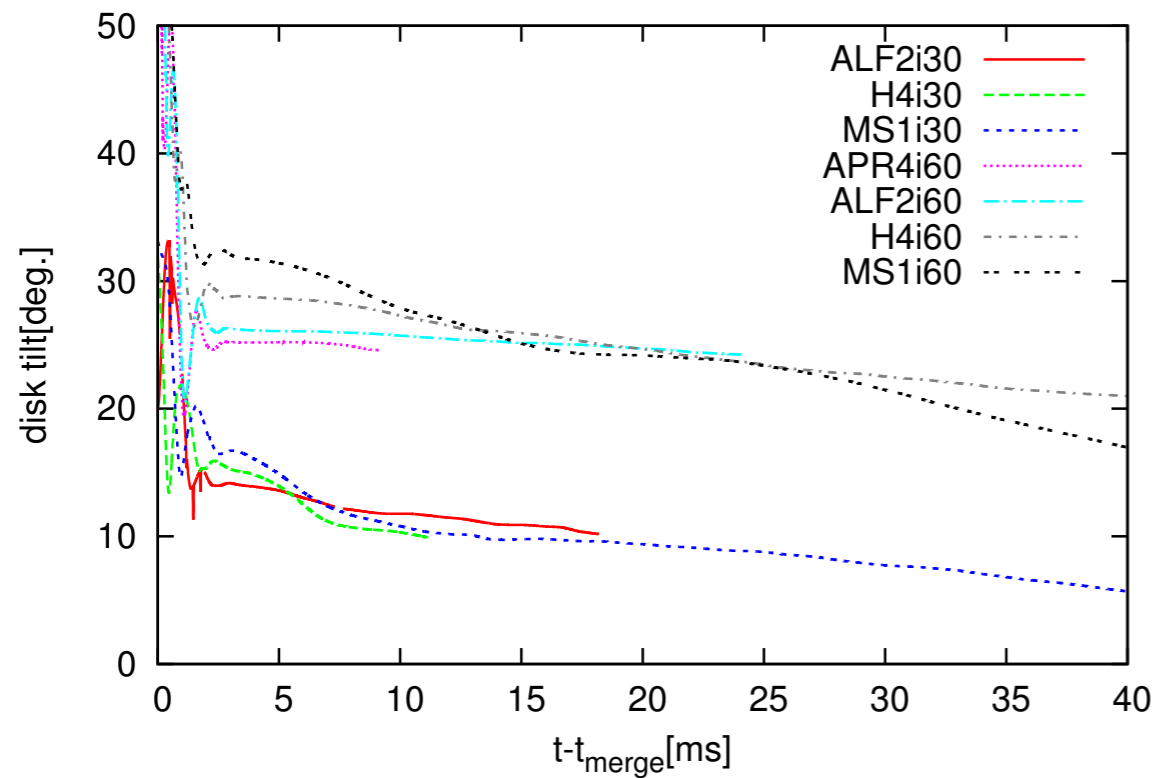


The difference of cutoff frequency is appreciable, at least, when misalignment angle is smaller than $\sim 60[\text{deg.}]$, while a dependance of cutoff frequency on EOS is no more appreciable when misalignment angle is $\sim 90[\text{deg.}]$.

Thermal Energy



Disk角運動量進化



$$J_{\text{disk}} := \int_{\text{disk}} \mathbf{x} \times \rho \mathbf{v} dV$$