

連星中性子星合体における 潮汐力の影響と状態方程式

仏坂健太(京大)

共同:久徳浩太郎(KEK)
柴田大、関口雄一郎、木内建太(基研)
大川博督(ポルトガル)、谷口敬介(東大)

連星インスパイルの話

仏坂健太(京大)

共同:久徳浩太郎(KEK)
柴田大、関口雄一郎、木内建太(基研)
大川博督(ポルトガル)、谷口敬介(東大)

Outline

- Introduction
- 連星ブラックホールの運動と重力波（摂動計算）
- 連星中性子星の運動と重力波（摂動計算）
- 連星中性子星の運動と重力波（Full GR）
- まとめと今後

Introduction ~重力波天文学~

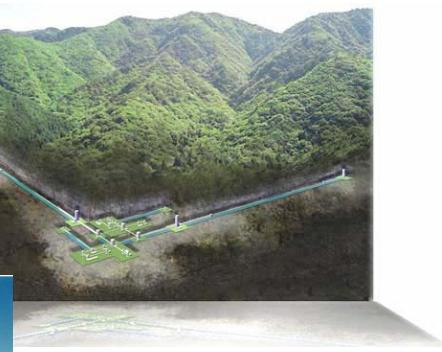
地上GW Advanced detectors
(2017~)



Advanced LIGO

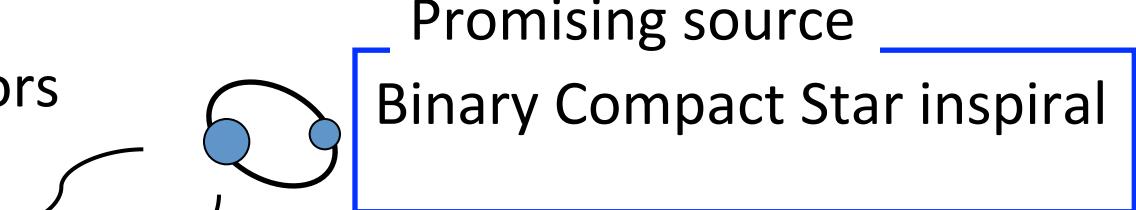


Advanced Virgo



LCGT->KAGRA

検出した時点で、
質量が決まる → NSの“半径”は決まるか？



正確な理論波形を用意可能
テンプレート (m_1, m_2)



Matched filtering

期待されるイベントレート
~40 events / yr

Abadie et al.(2010)

Introduction ~重力波放射~

重力波放射の四重極公式

四重極モーメント

($\sim M^*R^*R$)

運動に依存

$$h_{ij} \sim \frac{2G}{Dc^4} \frac{d^2 I_{ij}}{dt^2}$$

距離 (天体-観測者)

とても重いものが、とても速く動くと
振幅の大きな重力波が出る \rightarrow BH や NS

連星BHの運動と重力波

重力波で質量を測る

連星BH

M_2



一般相対論が十分正しいとする

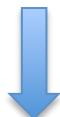


BHの運動は、 M_1 、 M_2 で決定される
※スピンは無視できるとする

M_1



重力波の波形は、運動で決まり、
観測できれば M_1 、 M_2 がわかる



連星BHの運動を摂動的に解く

Effective One Body formalism

計量

$$\frac{dr}{dt} = \frac{A(r)}{\sqrt{D_3^0(r)}} \frac{\partial H_{\text{real}}}{\partial p_{r_*}},$$

ハミルトニアン

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{\partial H_{\text{real}}}{\partial p_\phi}.$$

$$\frac{dp_{r_*}}{dt} = - \frac{A(r)}{\sqrt{D_3^0(r)}} \frac{\partial H_{\text{real}}}{\partial r},$$

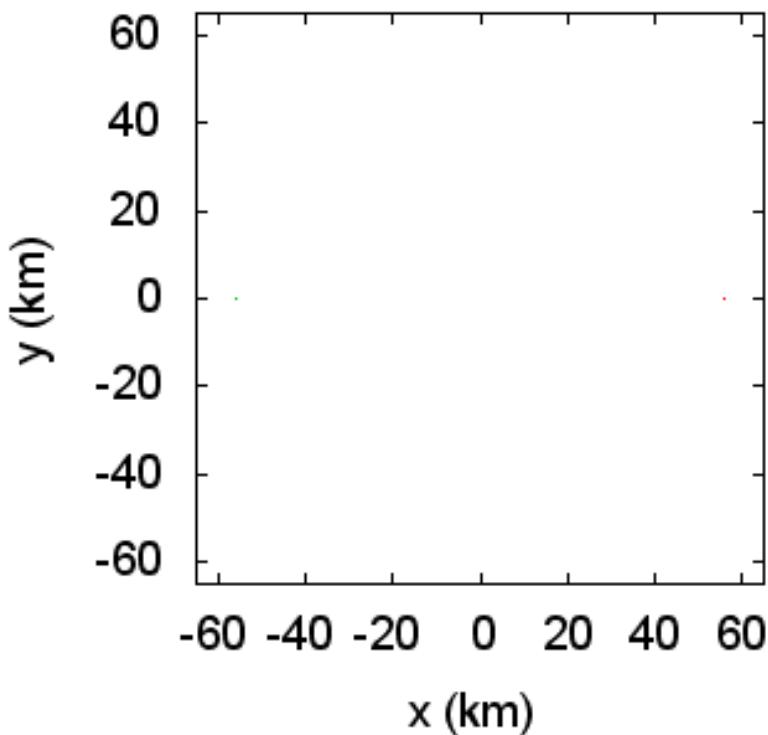
重力波の反作用

$$\frac{dp_\phi}{dt} = \mathcal{F}_\phi.$$

これらを、ポストニュートン展開($1/r$)して解く

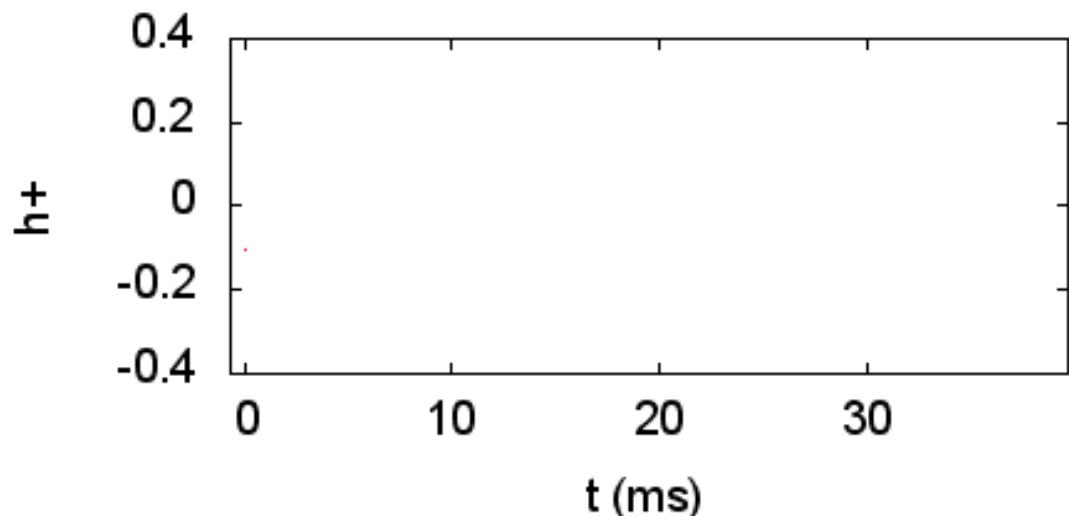
連星BHのinspiral 波形

t=0 ms



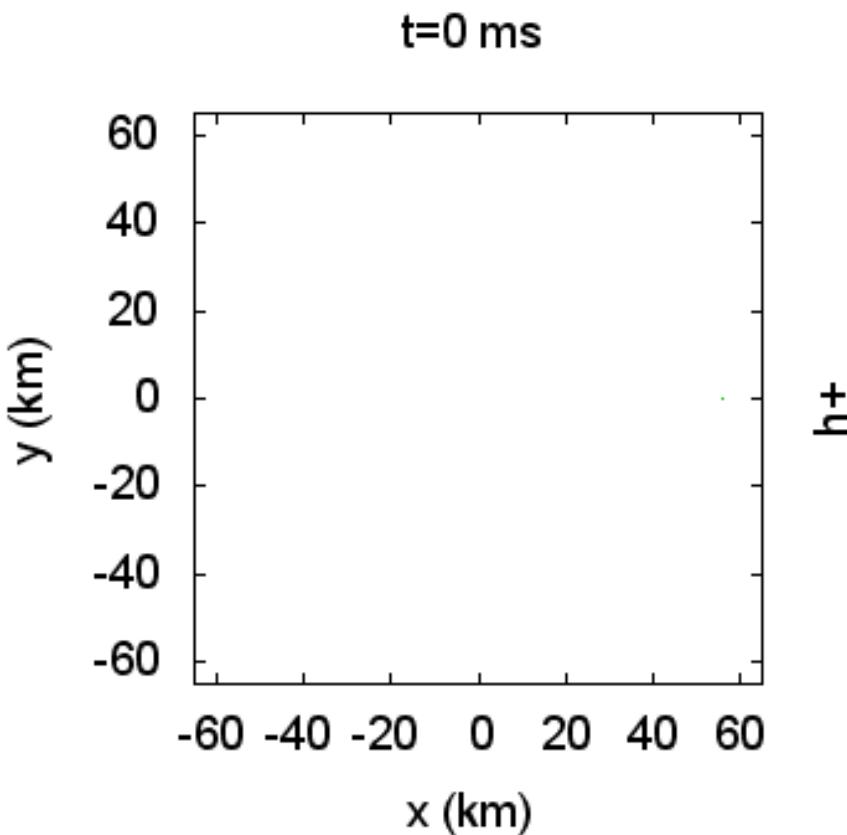
連星の軌道

$M_1 = M_2 = 1.35M_{sun}$



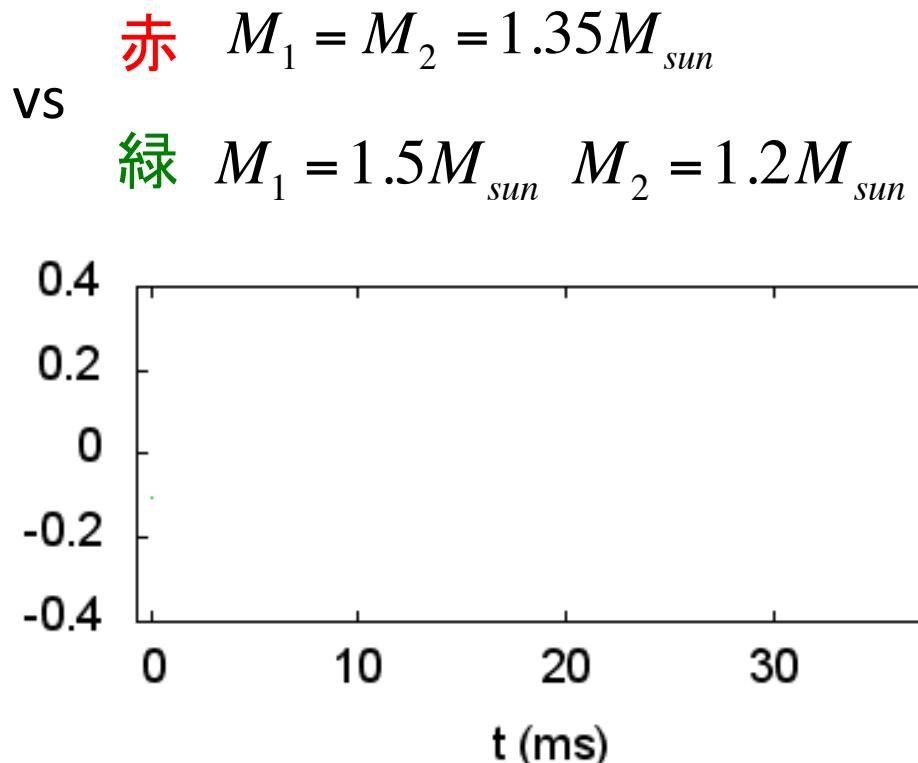
重力波波形

Equal mass vs Unequal mass



連星の軌道

それぞれの質量は、1%ほどの精度で決まる
(Cutler and Flanagan 1994)



重力波波形

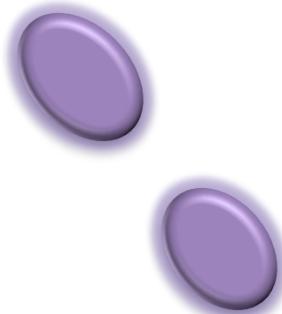
Ref : Y. Pan et al. (2011)

連星NSの運動と重力波 (摂動計算)

～重力波で“半径”が測ることができるか？～

重力波で“サイズ”を測る

$M_2 \ \Lambda_2$ 潮汐変形率



$M_1 \ \Lambda_1$

一般相対論が十分正しいとする



変形した天体の運動は、
 $M_1, M_2, \Lambda_1, \Lambda_2$ で決定される
※スピンは無視できるとする



重力波の波形は、運動で決まり、
観測すれば $M_1, M_2, \Lambda_1, \Lambda_2$ がわかる

中性子星の潮汐変形率

星の四重極モーメント

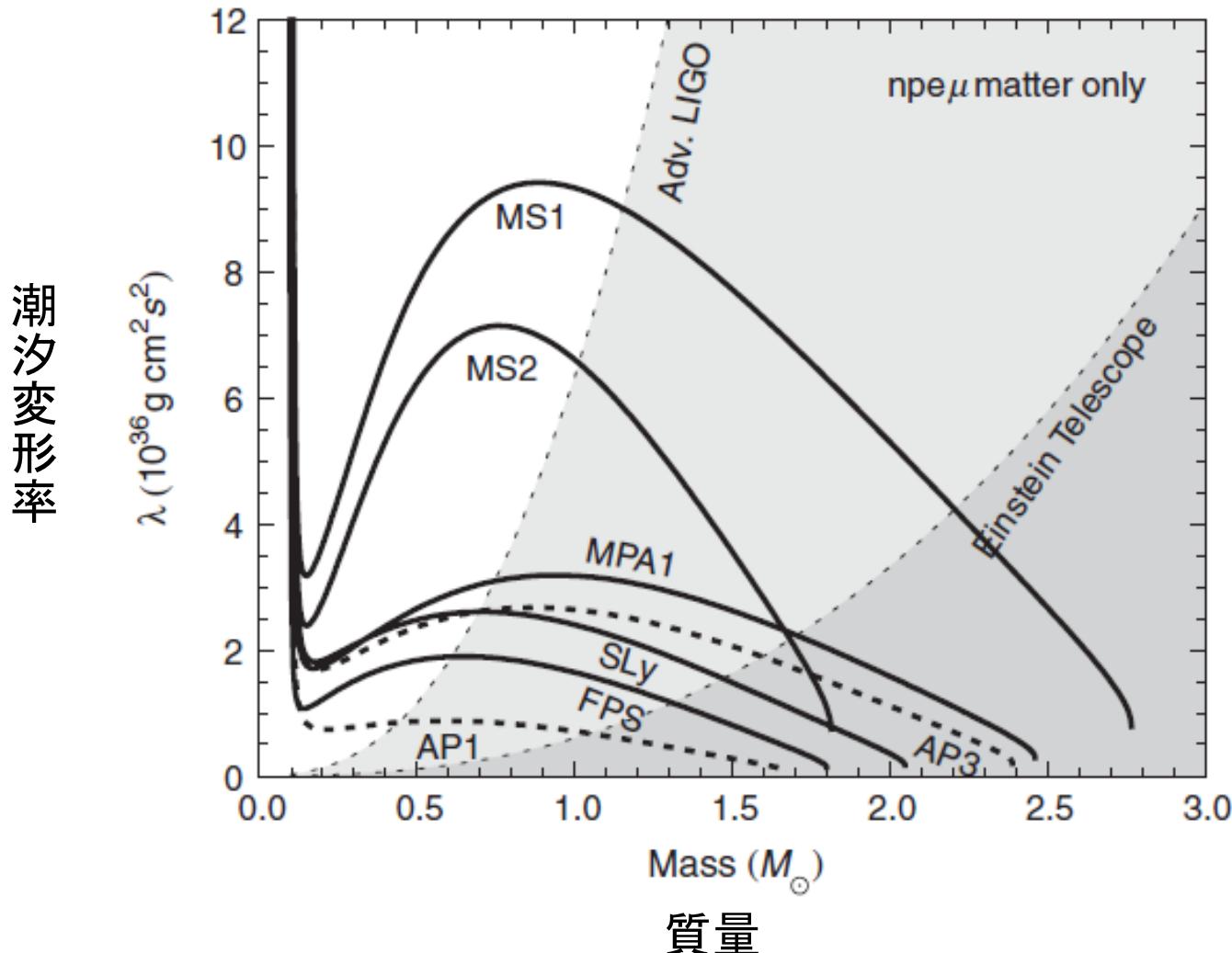
星に働く、潮汐重力

$$Q_{ij} = -\frac{Q_{ij}}{\Delta E_{ij}} \Lambda E_{ij}$$

※断熱近似
潮汐変形率
(EOSで決まる)

EOS毎の潮汐変形率

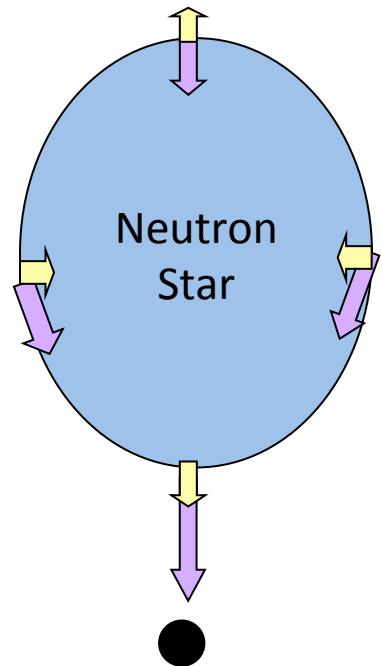
Ref) Hinderer et al. (2010)



中性子星の潮汐力変形

連星系

伴星の重力場



潮汐力

重力エネルギー($l=0, m=0$)

$$= (\text{NSの質量}) * (\text{重力ポテンシャル} l=0)$$

$$\propto -1/r$$

潮汐エネルギー($l=2, m=2$)
 $\propto 1/r^3$

$$= (\text{四重極モーメント}) * (\text{重力ポテンシャル} l=2)$$

$$\propto -1/r^3$$

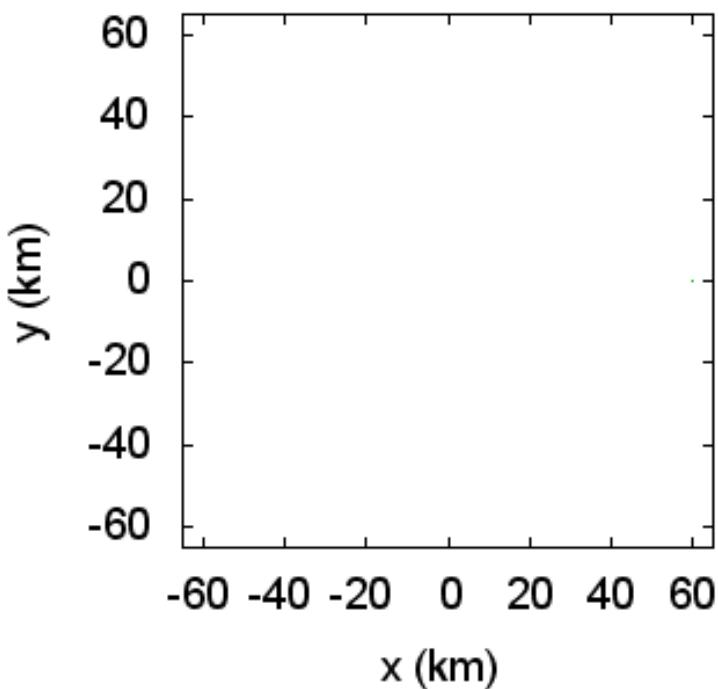
$$\boxed{\text{潮汐エネルギー } \propto -1/r^6}$$

潮汐力は、5次ポストニュートン以降の引力

→ 摂動計算に取り入れて、運動を解く

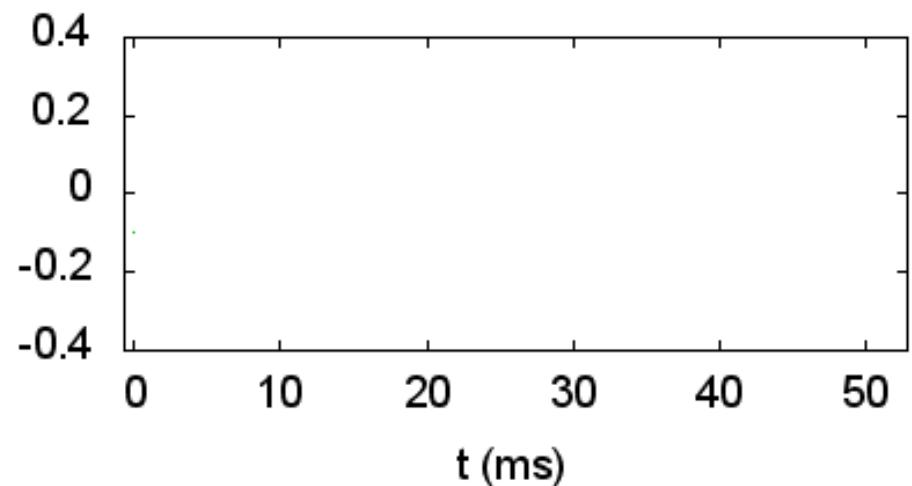
連星BH vs 連星NS

t=0 ms



$$M_1 = M_2 = 1.35M_{\text{sun}}$$

EOS : MS



赤: ブラックホール
緑: 中性子星

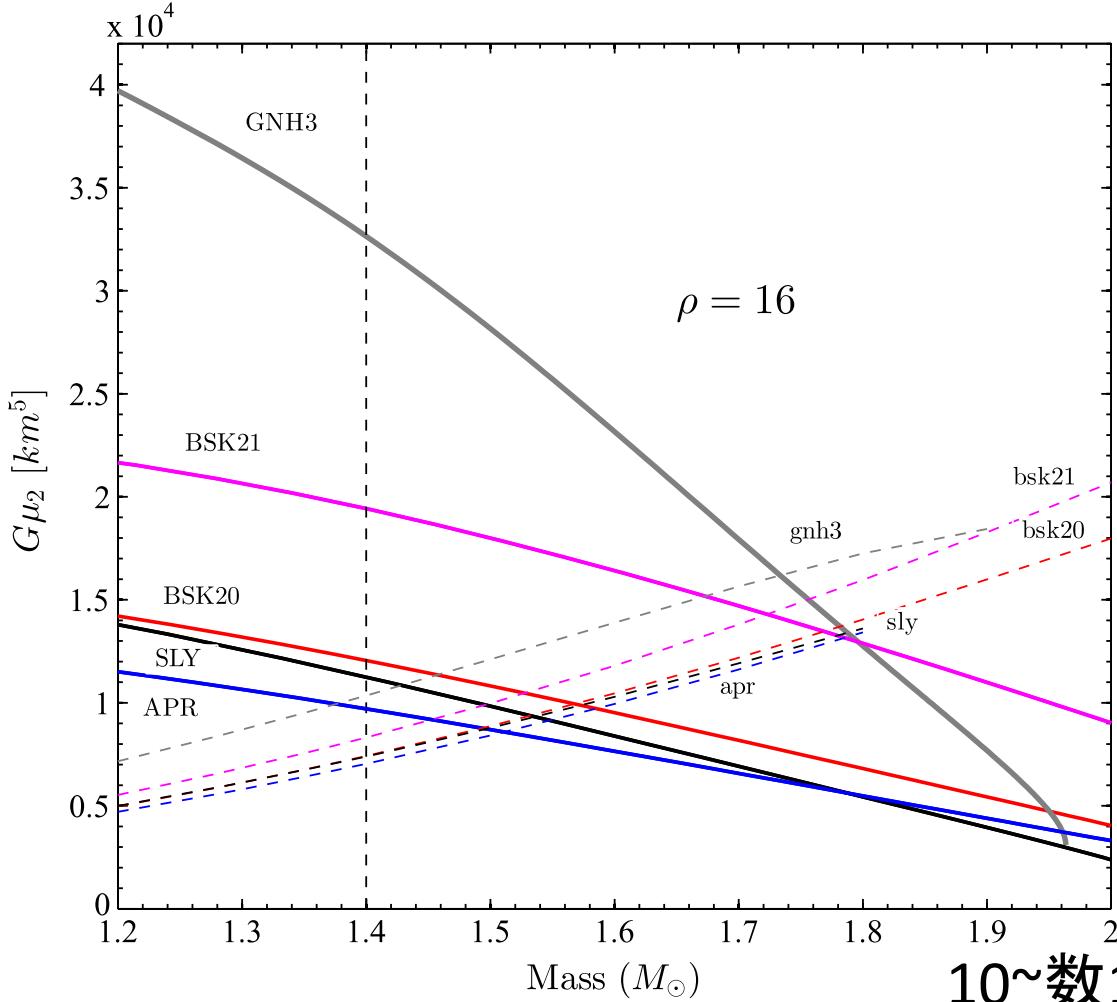
Ref) Y. Pan et al. (2011)

T. Damour and A. Nagar (2010)

T. Damour et al. (2012)

潮汐変形率の測定可能性 (Advanced detector 2017~)

仮定:合体直前まで摂動論が正しい



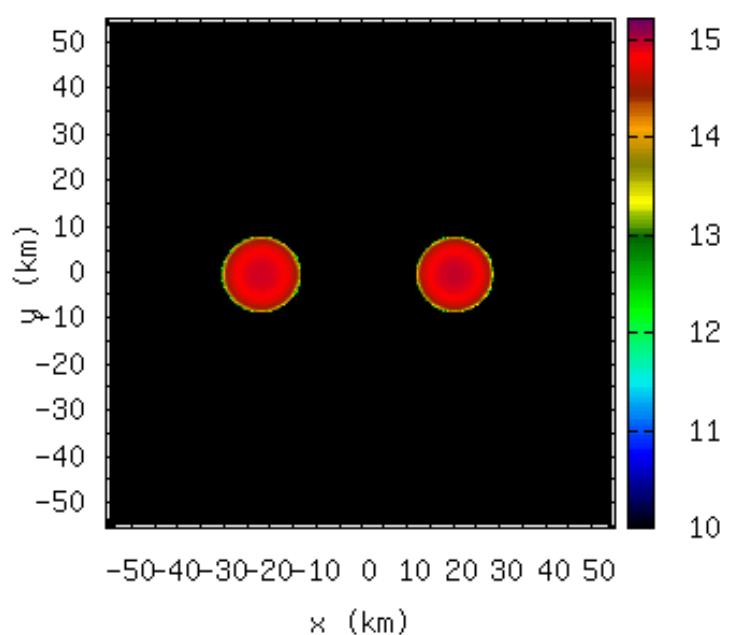
連星NSの運動と重力波 (数値相対論)

～合体直前で、摂動計算はどれくらい正しいか？～

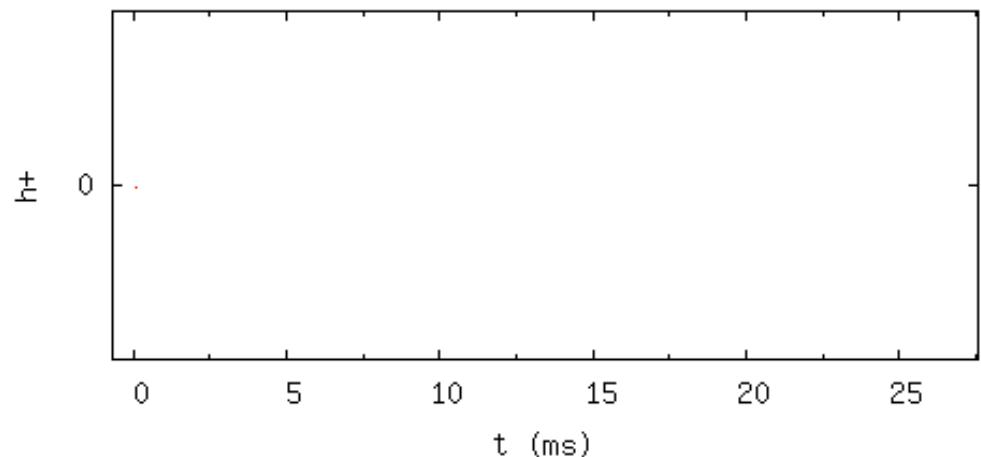
連星NS合体 Full GR

$$M_1 = 1.4M_{\text{sun}} \quad M_2 = 1.3M_{\text{sun}}$$

t=0 ms



EOS : APR

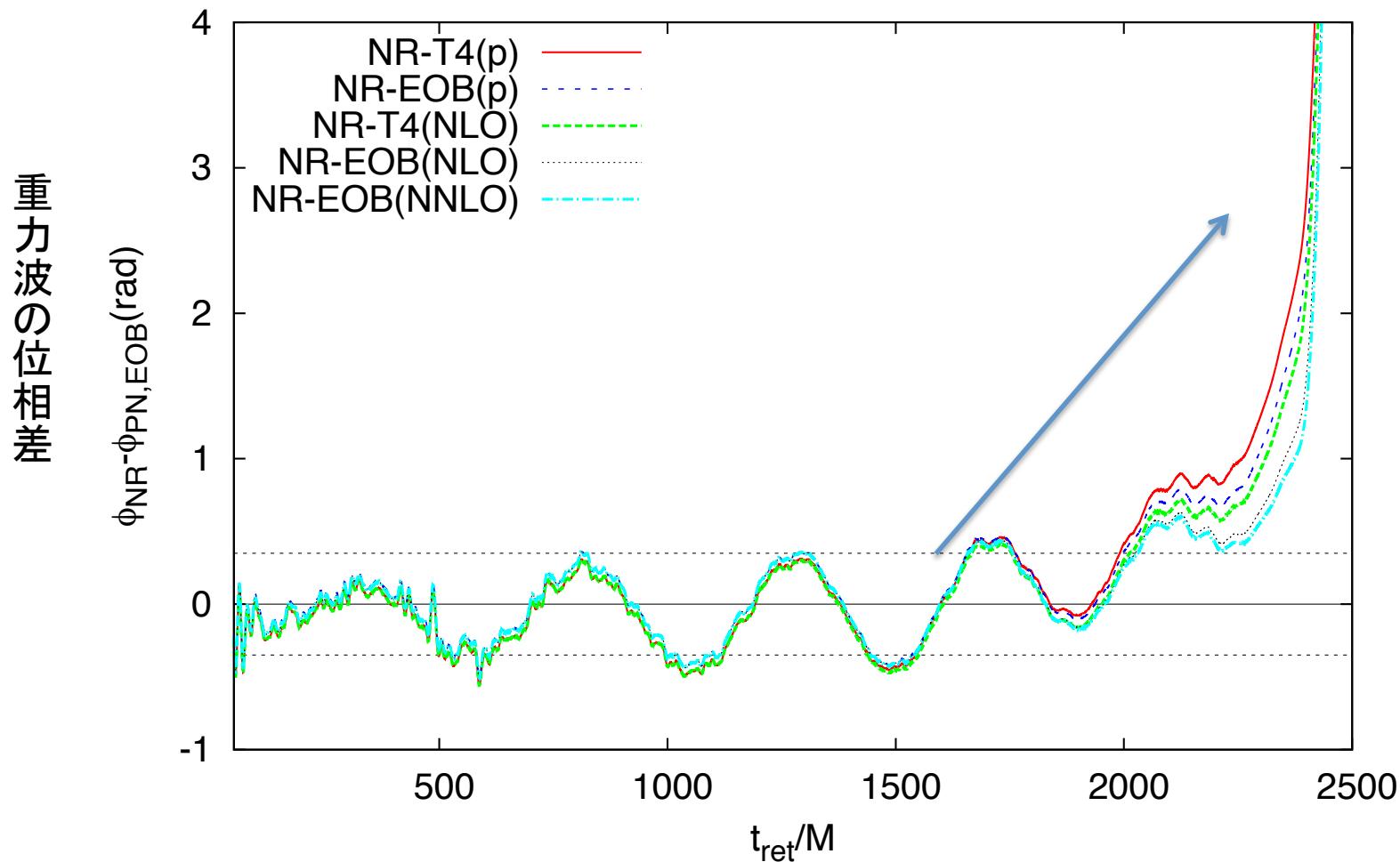


密度プロファイル

Hotokezaka, Shibata, Sekiguchi +
In prep.

Full GR と 摂動の位相差

Hotokezak et al. in prep.



Full GR 計算の方が早く落ちている
→潮汐の効果は“摂動計算結果”より強い

まとめ

- Advanced GW detector (2017~)によって、重力波の初検出が期待されている
- コンパクト連星のInspiral波形は正確に計算できる
→ 連星のパラメータを測定可能
- 連星NSの運動は天体の潮汐変形に依る
→ これを通してEOSの情報を得る
- 正確な波形を得るには、数値相対論と摂動論をつなぐべき

今後

- Inspiral – Merger – Hypermassive NS
一連のテンプレートを作る
- 電磁波 Signal を理論的に詳しく調べる
(目的 : パラメータ決定精度の向上、新しい天文学)

連星BH、全質量依存性

