

# 合体する連星系の Standard Candleとしての可能性

新潟大学宇宙物理学研究室

M1 金山 雅人

Ref. B.Shutz, Nature **323**, 310 (1986)

# cosmological distance ladder

---

- ・年周視差  $\sim 100\text{pc}$
- ・standard candle : 絶対光度が分かる天体
  - ・脈動変光星

セファイド変光星

こと座RR型変光星

**変光周期－絶対光度関係**  $\sim 30\text{Mpc}$



# cosmological distance ladder

---

- ・Ia 型超新星爆発

ピーク時の絶対光度と減光率の一様性 ~ Gpc

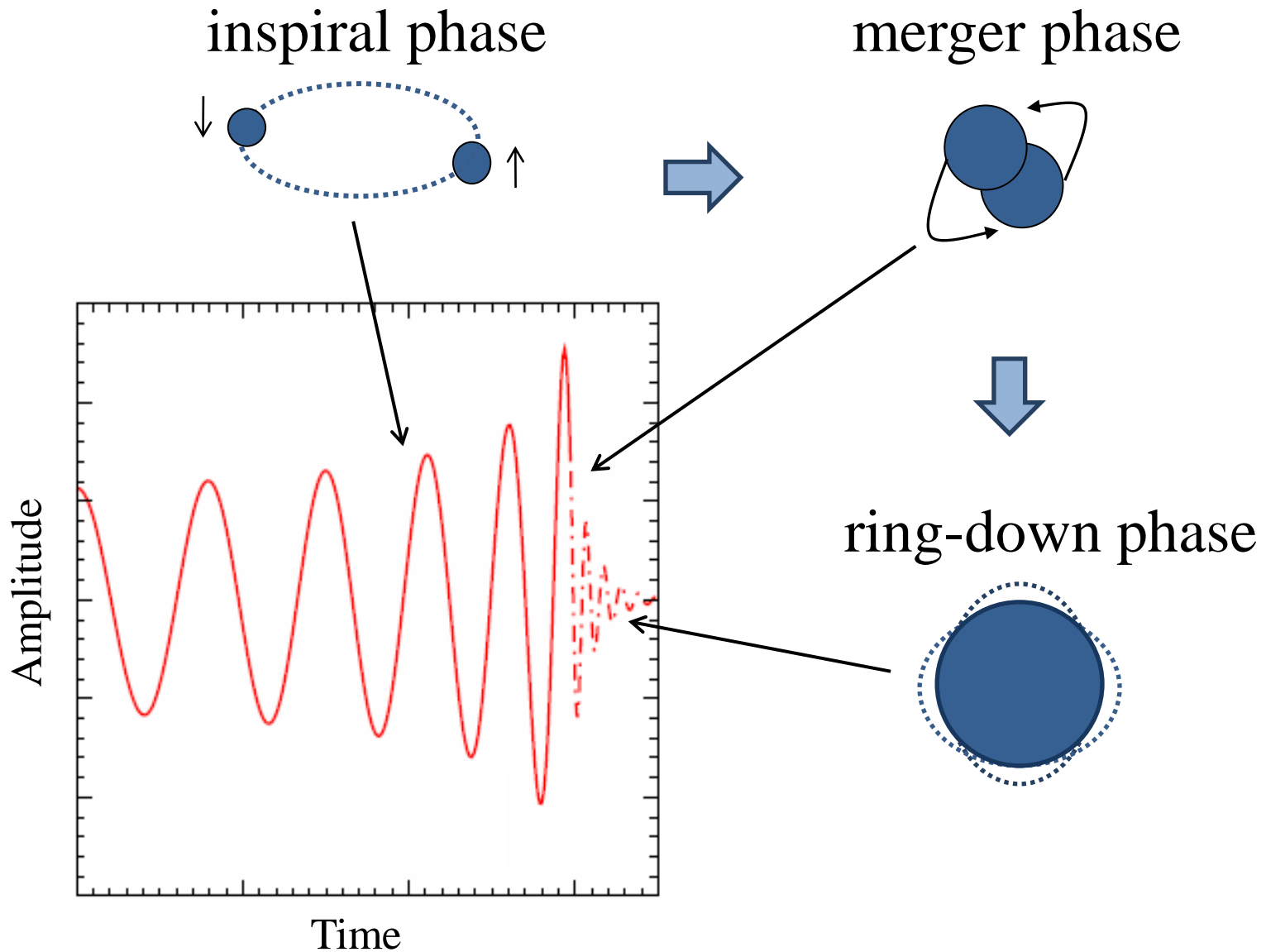
- ・Hubbleの法則 Gpc以上 ( $z \geq 1$ )

距離指標関係として、

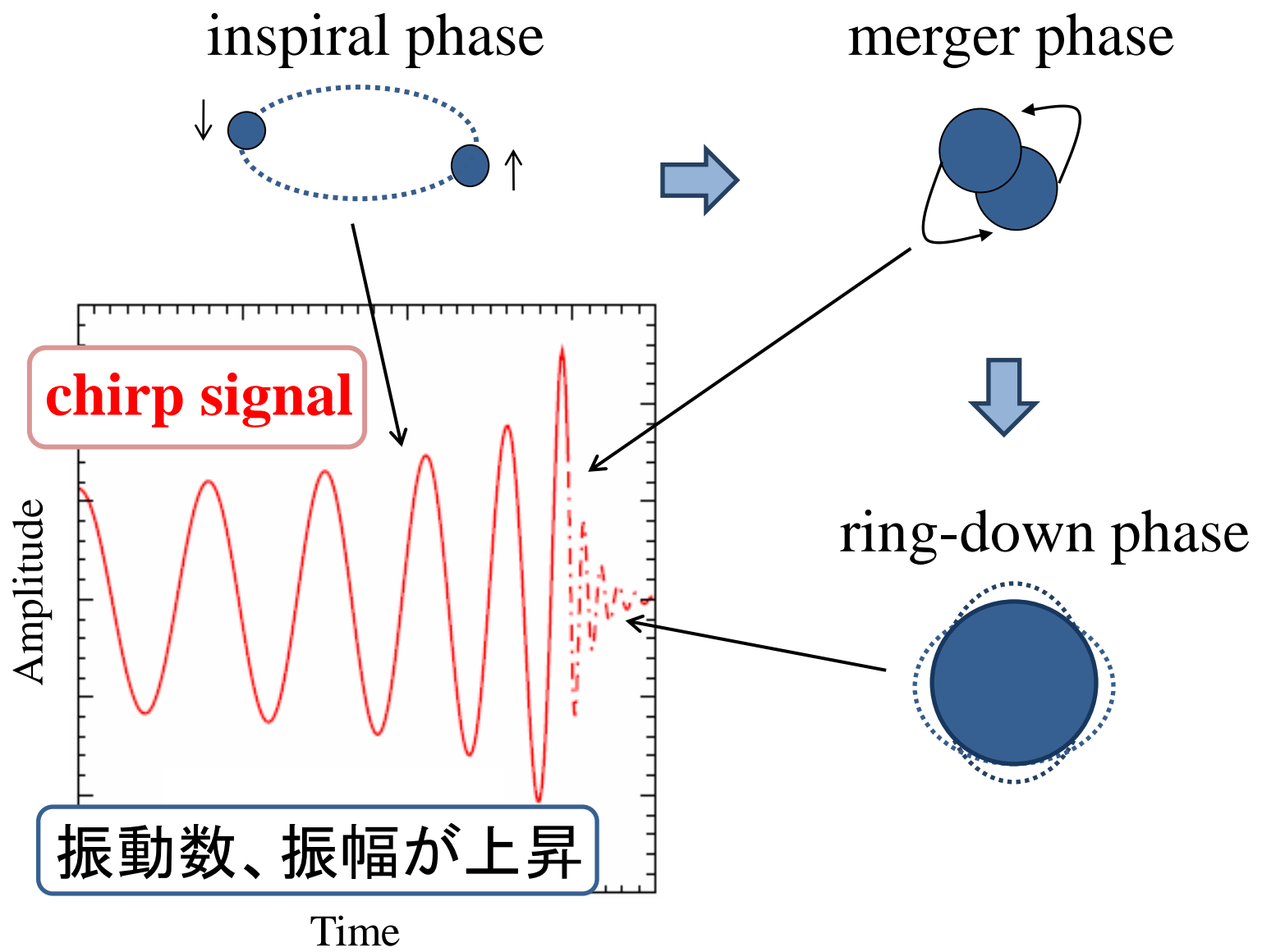
経験則を用いない距離の決定法が必要。

➡ **重力波を用いたstandard candle**  
としての可能性を検討。

# コンパクト星連星からの重力波の波形



# コンパクト星連星からの重力波の波形



# 重力波の偏極モード

## 四重極公式

$$h_{ij}^{TT}(t, \vec{x}) = \frac{2G}{c^4 r} \ddot{I}_{ij}^{TT}(t_R)$$

## 四重極モーメント

$$I_{ij} = \int \rho x_i x_j d^3x$$

## 極座標に変換

$$h_{ab} = h_{ij}^{TT} \frac{\partial x^i}{\partial x^a} \frac{\partial x^j}{\partial x^b}$$

$a, b = r, \theta, \varphi$

$c$ : 光速

$G$ : 万有引力定数

$r$ : 距離

$\rho$ : 質量密度

TT: Transverse – Traceless

$$\square = \frac{\partial}{\partial t}$$

$$t_R = t - \frac{r}{c}$$

プラスモード

$$h_+ = \frac{h_{\theta\theta}}{r^2}$$

クロスモード

$$h_\times = \frac{h_{\theta\varphi}}{r^2 \sin \theta}$$

# コンパクト星連星からの重力波

- ・円軌道のケプラー運動 (質点の質量:  $M_1, M_2$ )

## 四重極波

$$h_+(t) = \frac{4}{rc^4} (GM_C)^{5/3} (\pi f(t_R))^{2/3} \left( \frac{1 + \cos^2 i}{2} \right) \cos(\Phi(t_R))$$

$$h_\times(t) = \frac{4}{rc^4} (GM_C)^{5/3} (\pi f(t_R))^{2/3} \cos i \sin(\Phi(t_R))$$

chirp mass

$$M_C = \frac{(M_1 M_2)^{3/5}}{(M_1 + M_2)^{1/5}}$$

振動数変化

$$\dot{f} = \frac{96}{5} \pi^{8/3} \left( \frac{GM_C}{c^3} \right)^{5/3} f^{11/3}$$


$i$  : 軌道傾斜角       $\Phi(t) = 2\pi \int_{t_0}^t f(t') dt'$

# 一様膨張宇宙を伝播する重力波

- 赤方偏移:  $z$
- ・ 観測量  $f_{obs} = \frac{f}{1+z}$
  - ・  $r \rightarrow d_L(z)$ : 光度距離
  - ・  $\dot{f}_{obs} = \frac{96}{5} \pi^{8/3} \left( \frac{Gm_C}{c^3} \right)^{5/3} f_{obs}^{11/3}$

形式的に  $m_C \equiv (1+z)M_C$  とおく。

$$h(t) = \frac{4}{d_L(z)c^4} (Gm_C)^{5/3} (\pi f_{obs}(t))^{2/3}$$


$$\left[ \begin{array}{l} h_+(t) = h(t_R) \left( \frac{1 + \cos^2 i}{2} \right) \cos(\Phi(t_R)) \\ h_\times(t) = h(t_R) \cos i \sin(\Phi(t_R)) \end{array} \right.$$



# 重力波でのstandard candle

観測量

$$h(t), f_{obs}, \dot{f}_{obs}$$



chirp mass

$$m_C = (1+z)M_C$$

距離指標関係

$$h(t), m_C$$



$$d_L(z) = \frac{4}{c^4 h(t)} (Gm_C)^{5/3} (\pi f_{obs}(t))^{2/3}$$

連星系からの重力波を観測することで、直接的に光度距離  $d_L(z)$  が決まる。

$M_C, f$  を決定するためには、 $z$  が必要。

# 重力波検出器の精度

---

電磁波の観測から $z$ を求める(重力波と電磁波で観測している天体が同一であることが必要)。

- 検出器の角度分解能

複数の検出器を用いることで角度分解能は向上可能。

- 検出器の感度

連星中性子星からの重力波 ( $r = 100\text{Mpc}, f = 100\text{Hz}$ )

$$h \sim 10^{-22}$$

LCGT : Large Cryogenic Gravitational Telescope ( $f = 100\text{Hz}$ )

$$h \sim 10^{-23}$$

# まとめ

---

- 重力波を放出しながら、合体する連星系を standard candleとして確立できた。
  - 距離はしごではなく、直接的に距離が求まる。
  - 経験則を用いずに、物理法則から明確に決まる。
- 角度分解能や検出器の精度を上げることで、連星系を standard candleとして用いることができる。