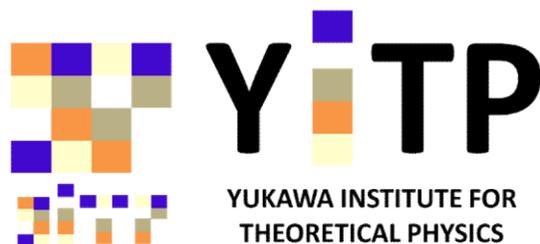


中性子星連星からの 重力波テンプレートの作成

柴田 大

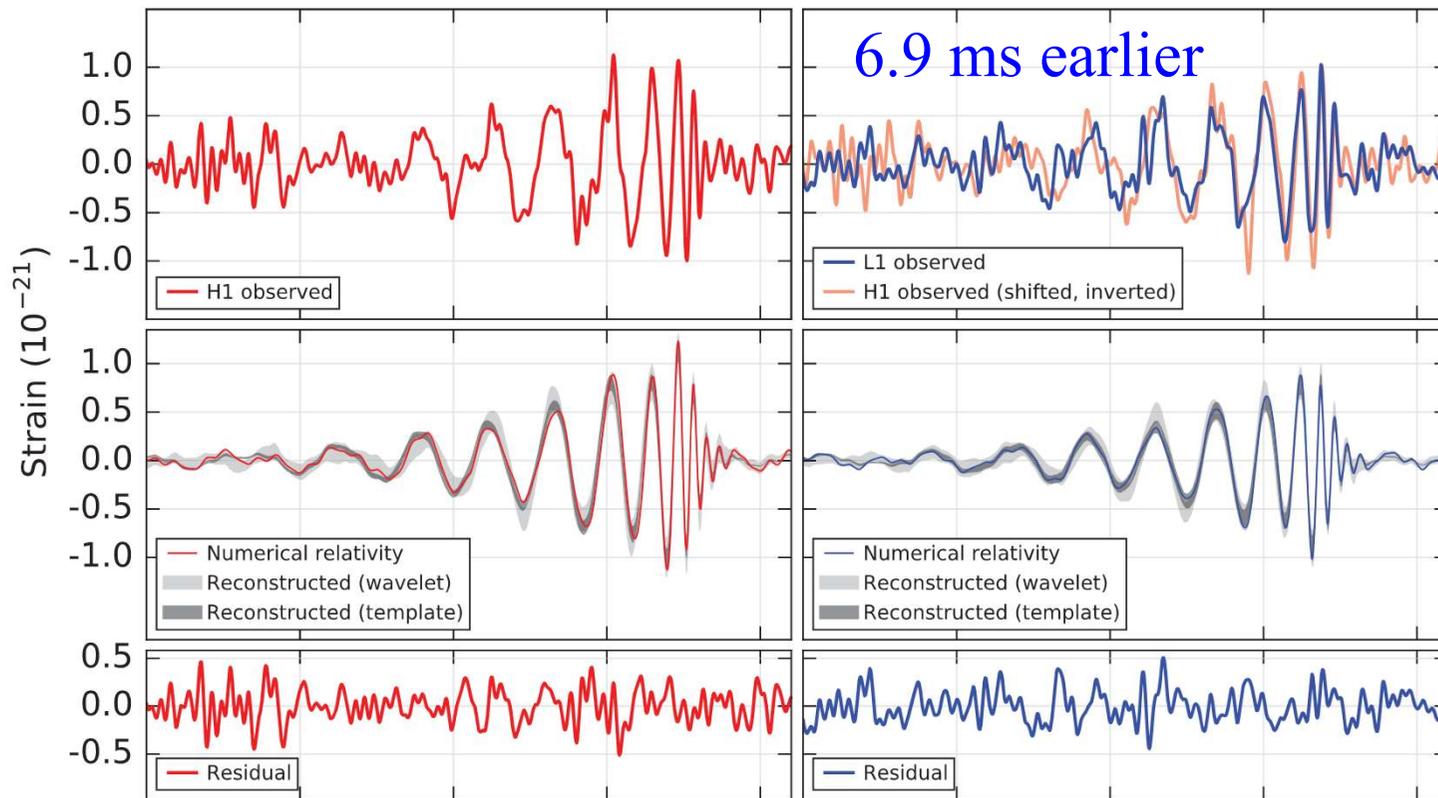
京都大学 基礎物理学研究所



GW150914: 重力波波形

Hanford, Washington (H1)

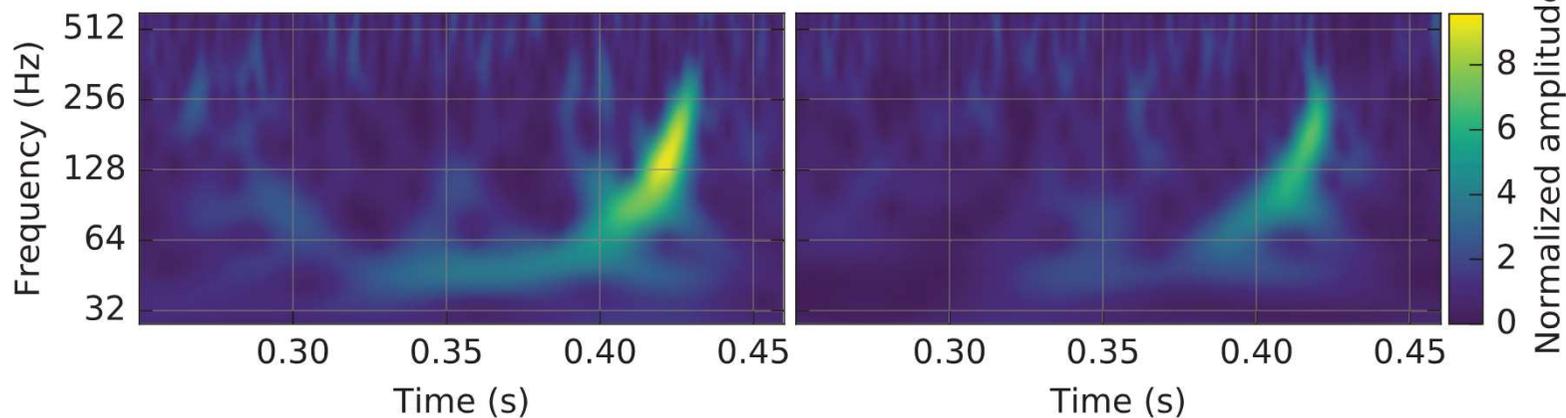
Livingston, Louisiana (L1)



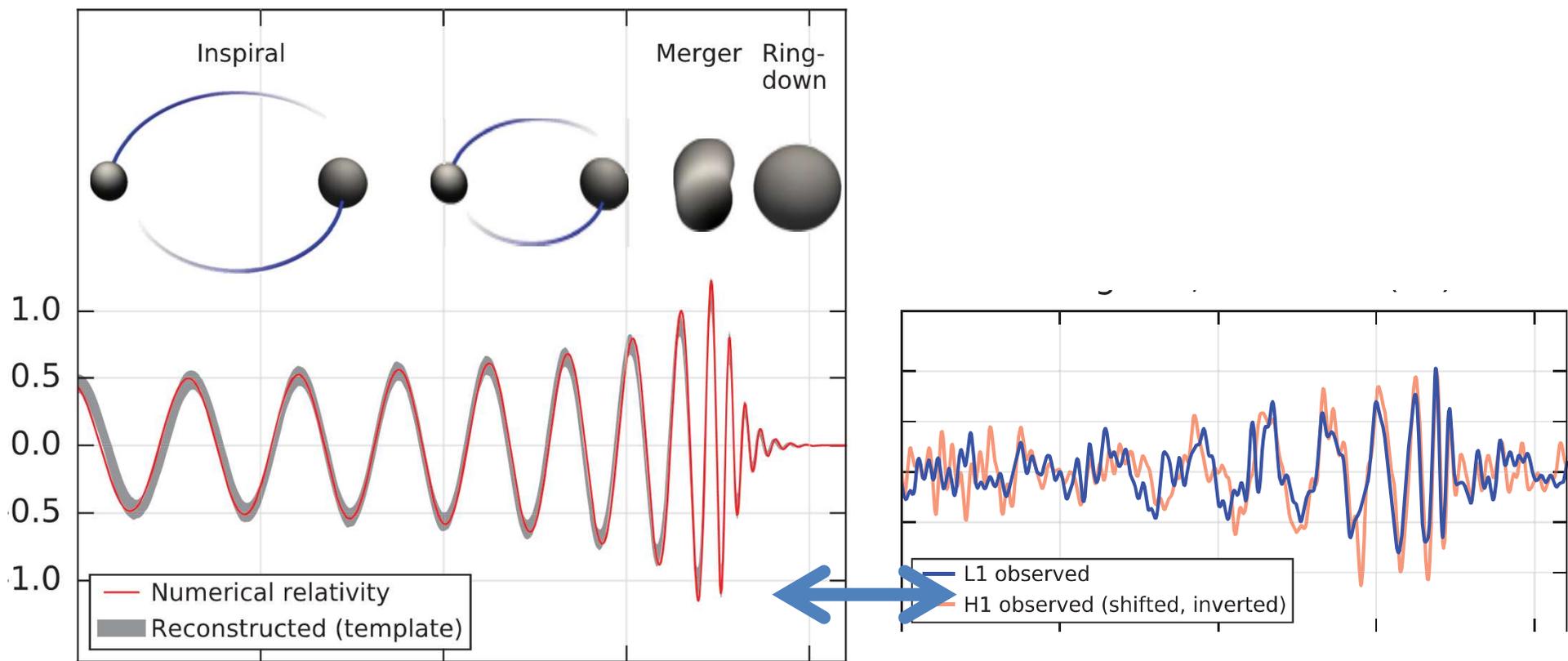
6.9 ms earlier

PRL 116
061102
(2016)

Total SNR
=23.6



Gravitational waveform by numerical relativity

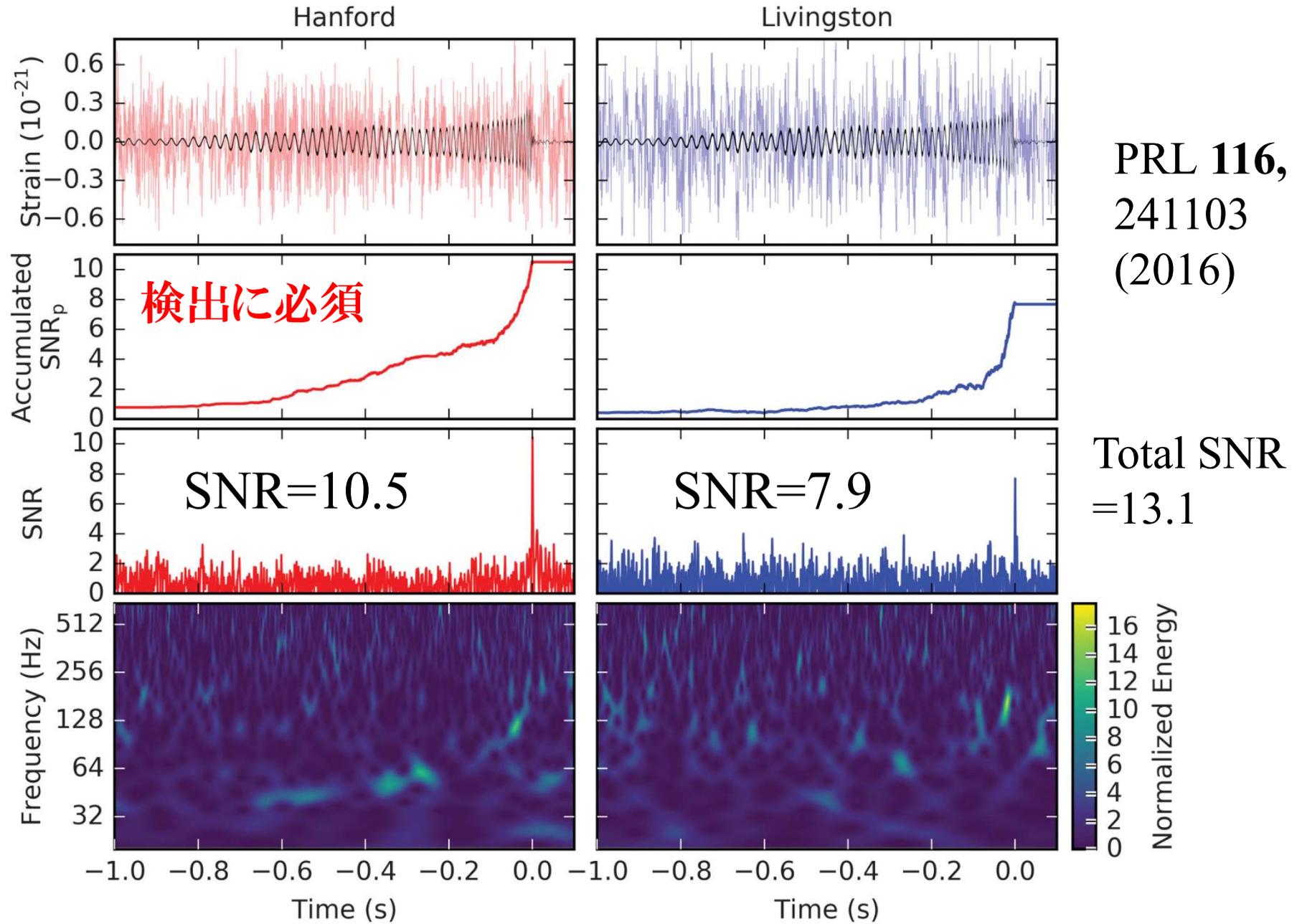


よく一致！



$$M_1 = 36 M_{\text{sun}} \quad M_2 = 29 M_{\text{sun}}$$

GW151226



重力波観測におけるデータ解析

1. 検出

2. パラメータ抽出

- どちらに対してもテンプレートが必須。
- 特に、**パラメータ抽出**に対しては、正確なテンプレートが求められる。

連星に対するテンプレートの実際

- 標準的戦略：
数値相対論シミュレーション (late inspiral + merger)
& ポストニュートン近似 (early inspiral phase)
+ 最適化補正 (数値相対論結果に基づく)
- 現状では2つ方法がある
 - 1) Effective one body 法: $h(t)$
time domainでのテンプレート作成
 - 2) Phenomenological 法: $h(f) = |h(f)| \exp[i\Psi(f)]$
frequency domainでのフィッティング公式
- どちらを使うにせよ、高精度の数値相対論シミュレーションが必須

連星ブラックホールのパラメータ推定値

	GW150914			GW151226		
	EOBNR	IMRPhenom	Overall	EOBNR	IMRPhenom	Overall
Detector frame						
Total mass M/M_{\odot}	$71.0^{+4.6}_{-4.0}$	$71.2^{+3.5}_{-3.2}$	$71.1^{+4.1\pm 0.7}_{-3.6\pm 0.8}$	$23.6^{+8.0}_{-1.3}$	$23.8^{+5.1}_{-1.5}$	$23.7^{+6.5\pm 2.2}_{-1.4\pm 0.1}$
Chirp mass \mathcal{M}/M_{\odot}	$30.4^{+2.3}_{-1.6}$	$30.7^{+1.5}_{-1.5}$	$30.6^{+1.9\pm 0.3}_{-1.6\pm 0.4}$	$9.71^{+0.08}_{-0.07}$	$9.72^{+0.06}_{-0.06}$	$9.72^{+0.07\pm 0.01}_{-0.06\pm 0.01}$
Primary mass m_1/M_{\odot}	$40.2^{+5.2}_{-4.8}$	$38.5^{+5.4}_{-3.3}$	$39.4^{+5.4\pm 1.3}_{-4.1\pm 0.2}$	$15.3^{+10.8}_{-3.8}$	$15.8^{+7.2}_{-4.0}$	$15.6^{+9.0\pm 2.6}_{-4.0\pm 0.2}$
Secondary mass m_2/M_{\odot}	$30.6^{+5.1}_{-4.2}$	$32.7^{+3.1}_{-4.9}$	$31.7^{+4.0\pm 0.1}_{-4.9\pm 1.2}$	$8.3^{+2.5}_{-2.9}$	$8.1^{+2.5}_{-2.1}$	$8.2^{+2.6\pm 0.2}_{-2.5\pm 0.5}$
Final mass M_f/M_{\odot}	$67.8^{+4.0}_{-3.6}$	$67.9^{+3.2}_{-2.9}$	$67.8^{+3.7\pm 0.6}_{-3.3\pm 0.7}$	$22.5^{+8.2}_{-1.4}$	$22.8^{+5.3}_{-1.6}$	$22.6^{+6.7\pm 2.2}_{-1.5\pm 0.1}$
Source frame						
Total mass $M^{\text{source}}/M_{\odot}$	$65.5^{+4.4}_{-3.9}$	$65.1^{+3.6}_{-3.1}$	$65.3^{+4.1\pm 1.0}_{-3.4\pm 0.3}$	$21.6^{+7.4}_{-1.6}$	$21.9^{+4.7}_{-1.7}$	$21.8^{+5.9\pm 2.0}_{-1.7\pm 0.1}$
Chirp mass $\mathcal{M}^{\text{source}}/M_{\odot}$	$28.1^{+2.1}_{-1.6}$	$28.1^{+1.6}_{-1.4}$	$28.1^{+1.8\pm 0.4}_{-1.5\pm 0.2}$	$8.87^{+0.35}_{-0.28}$	$8.90^{+0.31}_{-0.27}$	$8.88^{+0.33\pm 0.01}_{-0.28\pm 0.04}$
Primary mass $m_1^{\text{source}}/M_{\odot}$	$37.0^{+4.9}_{-4.4}$	$35.3^{+5.1}_{-3.1}$	$36.2^{+5.2\pm 1.4}_{-3.8\pm 0.4}$	$14.0^{+10.0}_{-3.5}$	$14.5^{+6.6}_{-3.7}$	$14.2^{+8.3\pm 2.4}_{-3.7\pm 0.2}$
Secondary mass $m_2^{\text{source}}/M_{\odot}$	$28.3^{+4.6}_{-3.9}$	$29.9^{+3.0}_{-4.5}$	$29.1^{+3.7\pm 0.0}_{-4.4\pm 0.9}$	$7.5^{+2.3}_{-2.6}$	$7.4^{+2.3}_{-2.0}$	$7.5^{+2.3\pm 0.2}_{-2.3\pm 0.4}$
Final mass $M_f^{\text{source}}/M_{\odot}$	$62.5^{+3.9}_{-3.5}$	$62.1^{+3.3}_{-2.8}$	$62.3^{+3.7\pm 0.9}_{-3.1\pm 0.2}$	$20.6^{+7.6}_{-1.6}$	$20.9^{+4.8}_{-1.8}$	$20.8^{+6.1\pm 2.0}_{-1.7\pm 0.1}$
Energy radiated $E_{\text{rad}}/(M_{\odot}c^2)$	$2.98^{+0.55}_{-0.40}$	$3.02^{+0.36}_{-0.36}$	$3.00^{+0.47\pm 0.13}_{-0.39\pm 0.07}$	$1.02^{+0.09}_{-0.24}$	$0.99^{+0.11}_{-0.17}$	$1.00^{+0.10\pm 0.01}_{-0.20\pm 0.03}$

36+29太陽質量と言う中心値を出した結果はない！
 テンプレートの作成は実は道半ば。特に中性子星絡みでは。

連星中性子星の合体

- LIGO/VIRGO/KAGRAに対するもう1つの強力な重力波源
- 今後検出されるだろう
- 中性子星の謎の解明に貢献できるはず

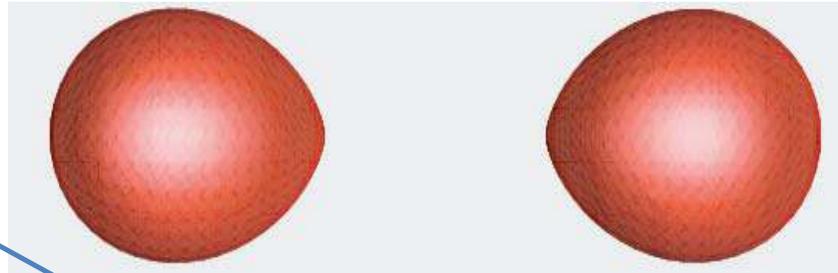
Imprint of EOS on late inspiral waveform

In a binary system, the tides raised on each NS depend on the deformability of that NS:

Stiff EOS = larger radius = large deformability



Soft EOS = small radius = small deformability

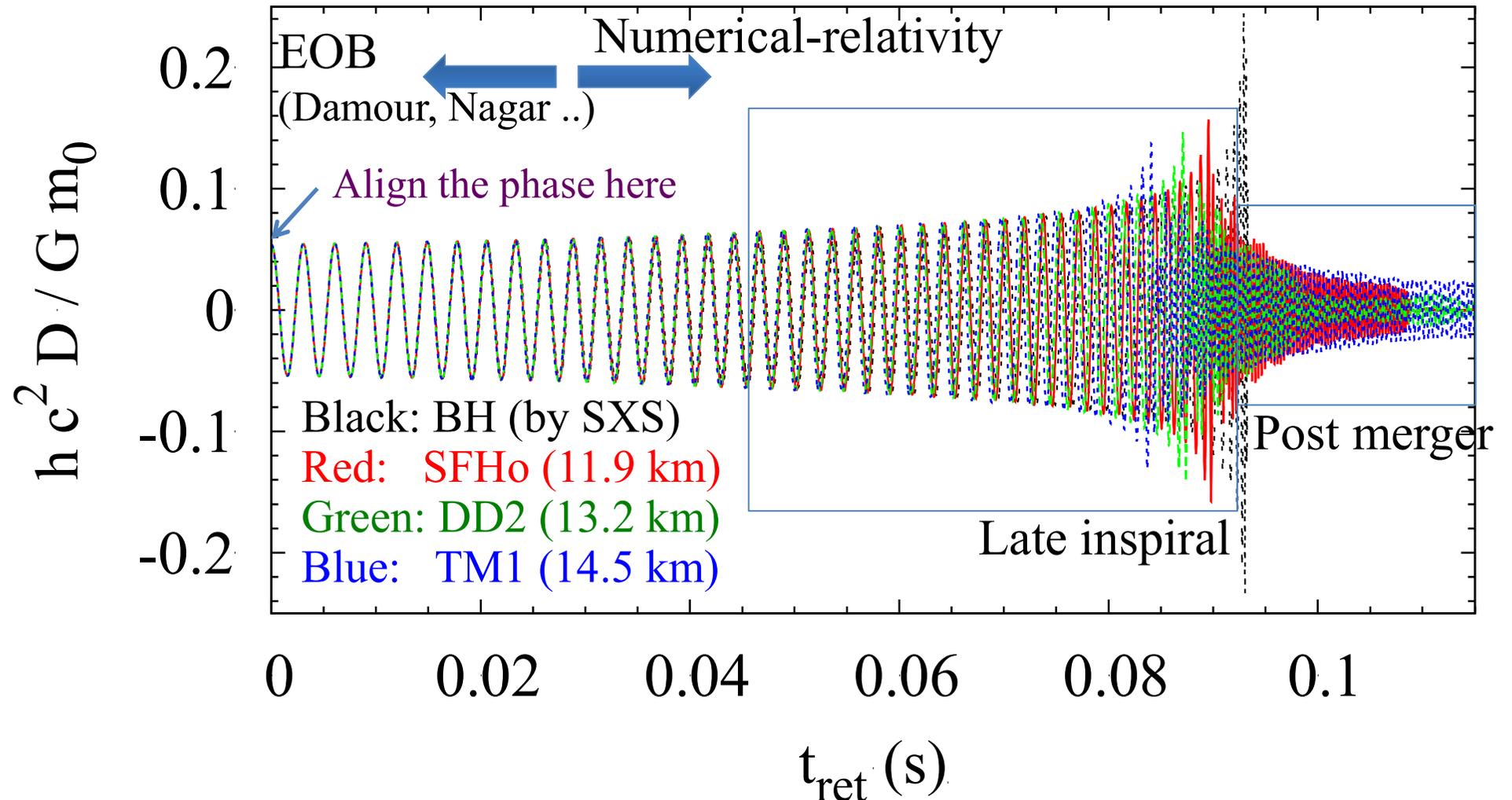


Additional attractive force

Courtesy J. Friedman

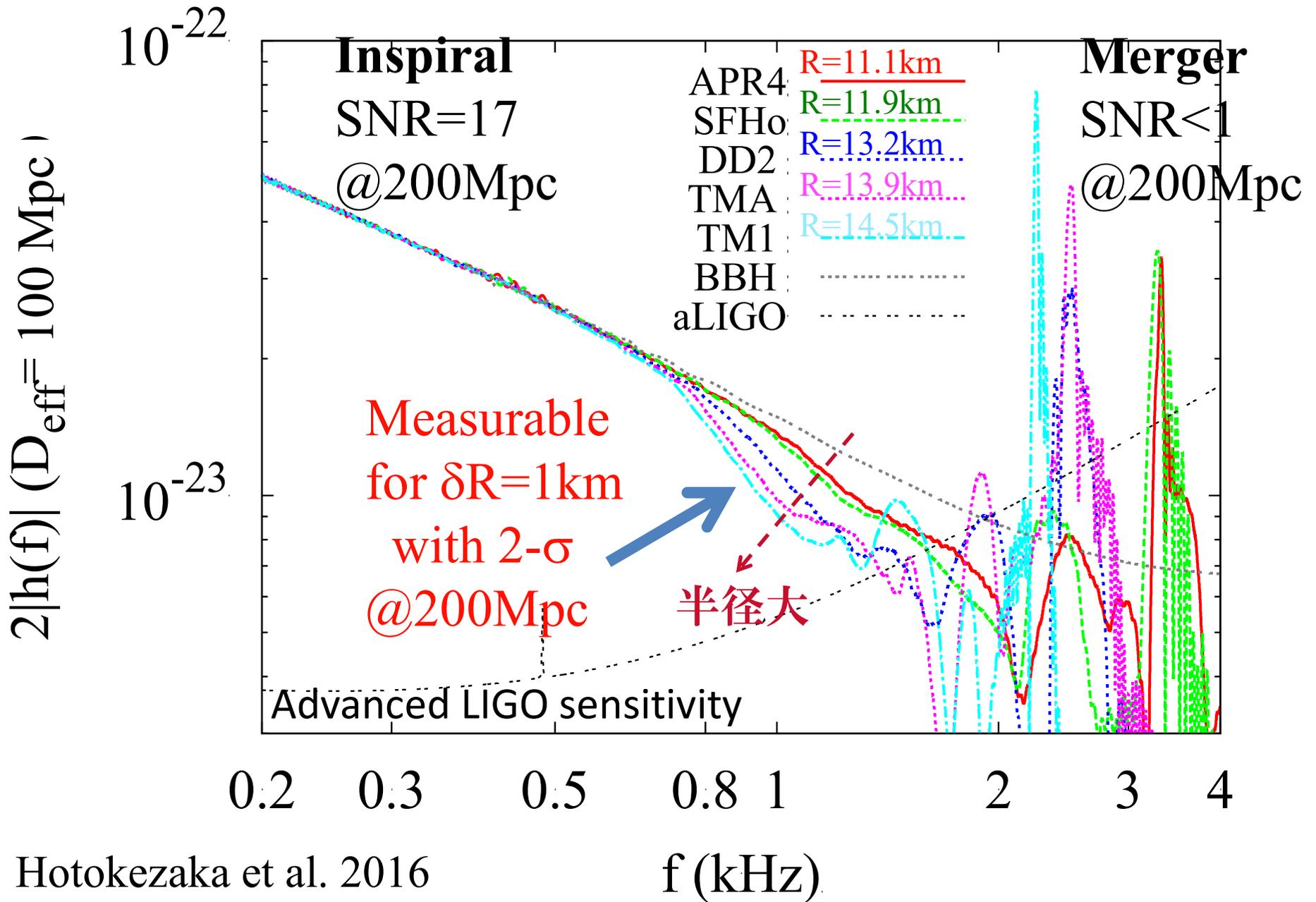
$$\phi \sim -\frac{GM}{r} - \frac{3I_{ij}^{TF} n^i n^j}{2r^3} : I_{ij}^{TF} = O(r^{-3}) \quad \text{Lai et al. (1994)}$$

Gravitational waveforms from NS-NS: hybrid waveforms with 1.35-1.35 solar mass



Hotokezaka ea. 2016 (also efforts by Bernuzzi ea., Haas ea.)

重力波のスペクトル



モデル化と要求される精度

SNR=signal to noise ratio

$$\text{SNR} = \left(4 \int_0^{f_{\max}} \frac{s(f) \cdot g^*(f)}{S_n(f)} df \right)^{1/2}$$

$s(f) = h(f) + n(f)$: Total output

$h(f)$: Gravitational-wave signal

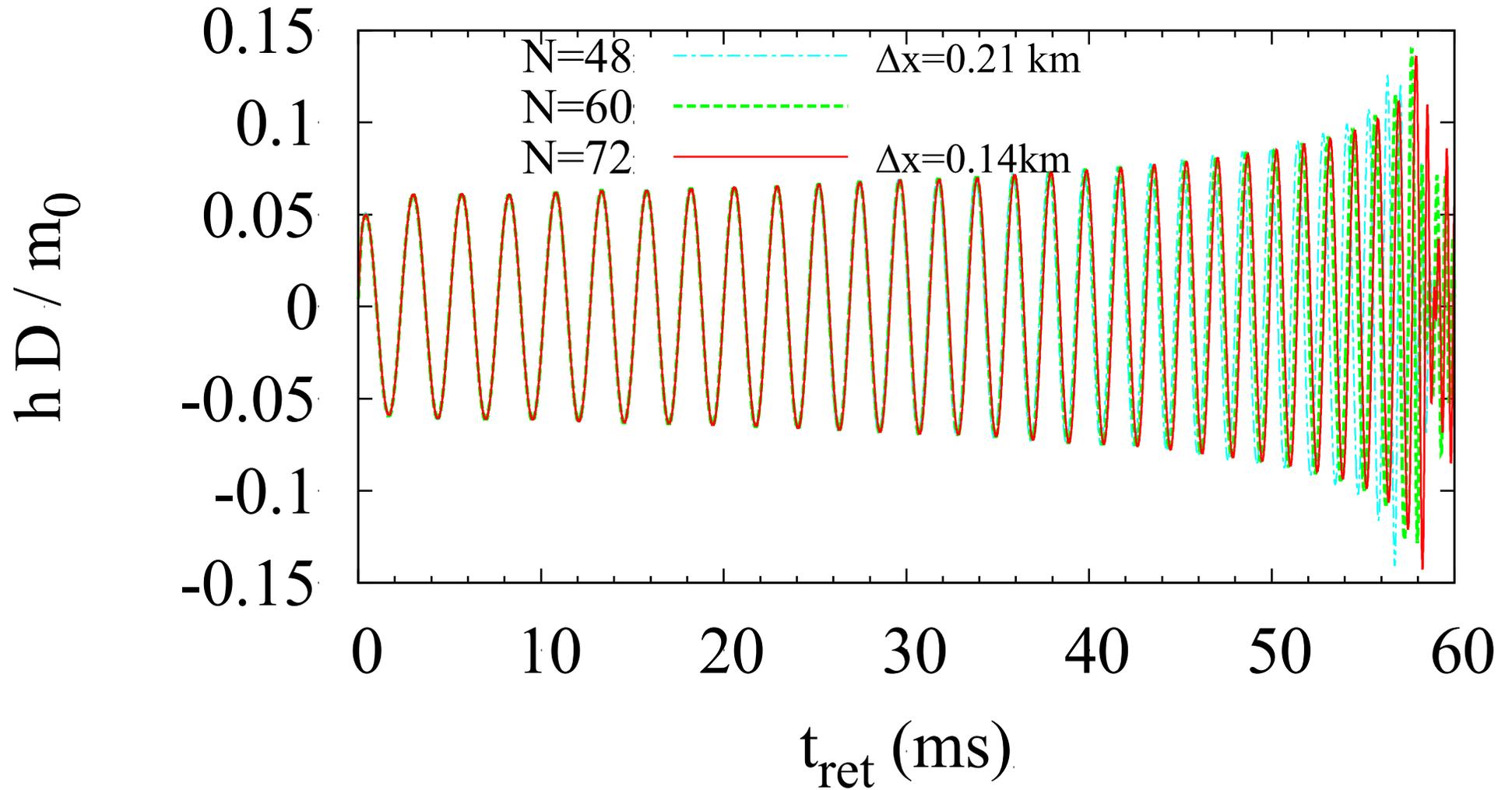
$n(f)$: Detector noise

$g(f)$: Template

- ✓ SNRの最大値を取るテンプレートを信号と見なす
- ✓ SNRには位相の情報が重要

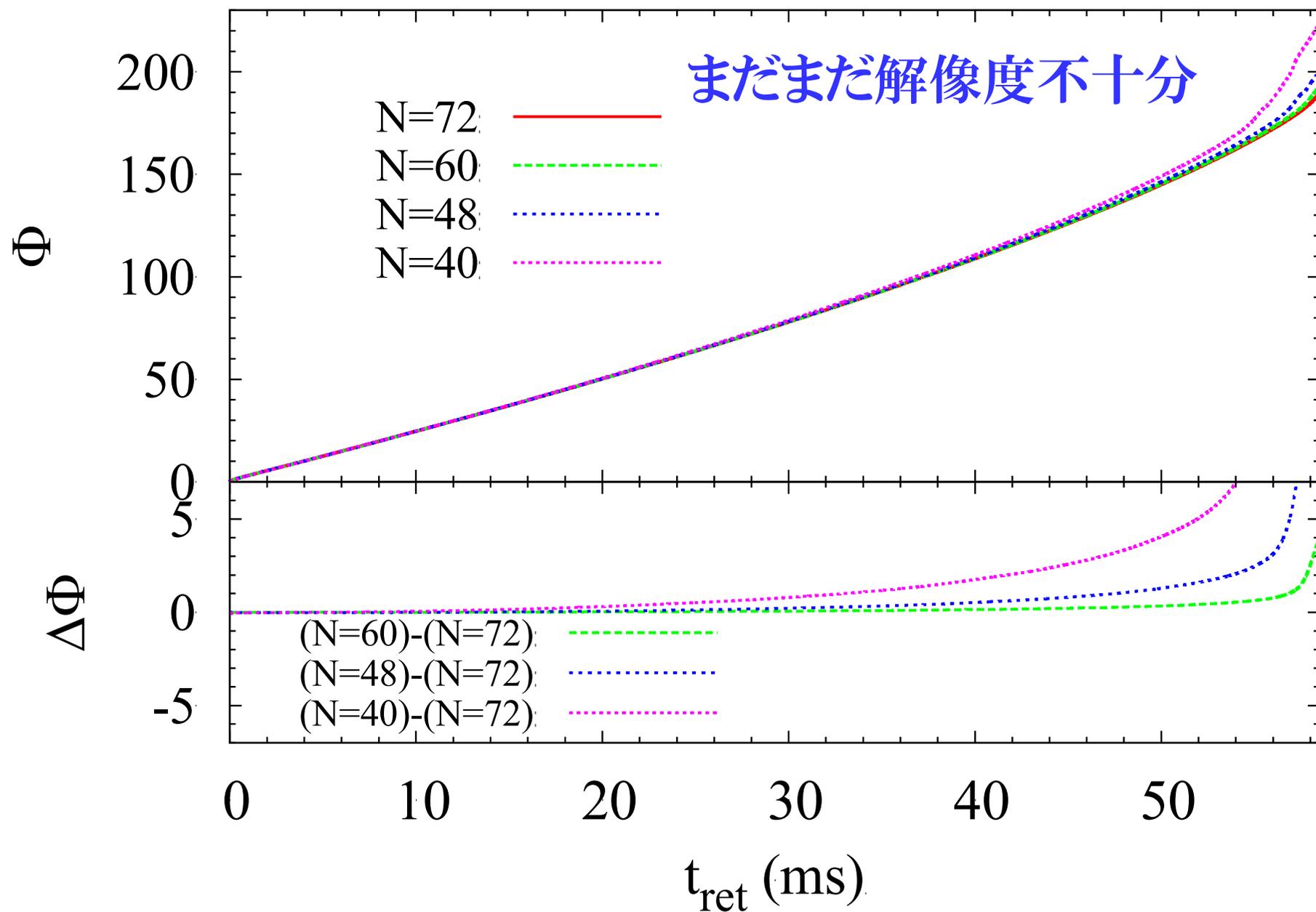
重力波の位相エラーを0.1 radian 以内に抑えたい

波形の収束性

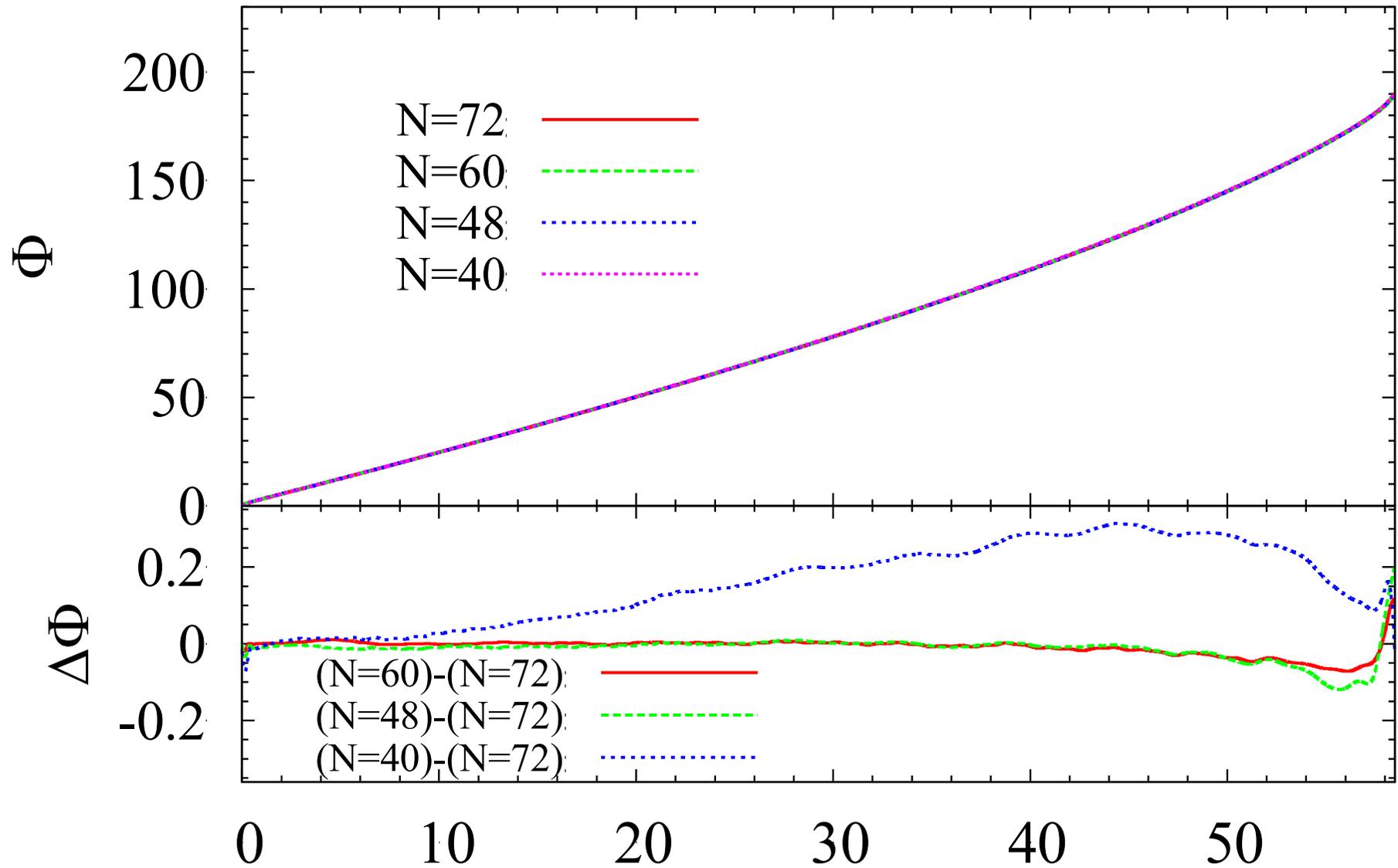


最後の15周を解像度を変えて計算。収束は3~4次程度。

重力波の位相の収束性



収束性を調べ外挿



大幅な改善。が、まだ不十分 t_{ret} (ms)

構築したいもの：周波数空間のテンプレート

$$\tilde{h}_{\text{TF2}}(f) = \frac{m_0^2}{D_{\text{eff}}} \sqrt{\frac{5\pi}{96}} (\pi m_0 f)^{-7/6} \underline{e^{i\psi_{\text{TF2T}}(f)} A_{\text{TF2T}}(f)}, \quad (\text{C1})$$

where

$$A_{\text{TF2T}}(f) = \sum_{k=0}^{12} A_k (\pi m_0 f)^{k/3}, \quad (\text{C2})$$

$$\begin{aligned} \psi_{\text{TF2T}}(f) = & 2\pi f t_0 - \phi_0 - \frac{\pi}{4} \\ & + \frac{3}{32} (\pi m_0 f)^{-5/3} \sum_{k=0}^{12} \alpha_k (\pi m_0 f)^{k/3}, \end{aligned} \quad (\text{C3})$$

低次はポストニュートン
近似から既知。
高次の係数は決まっ
ていない。数値計算結果と
のフィッティングで決める。



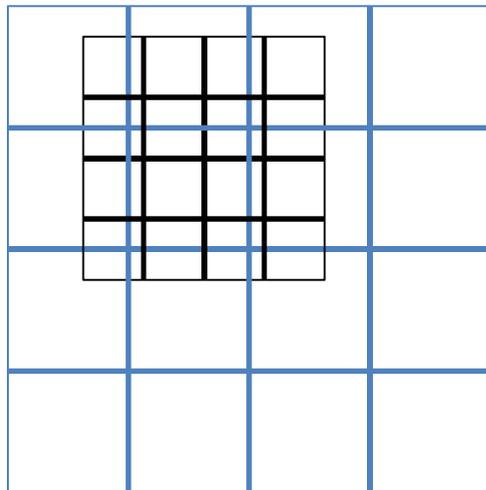
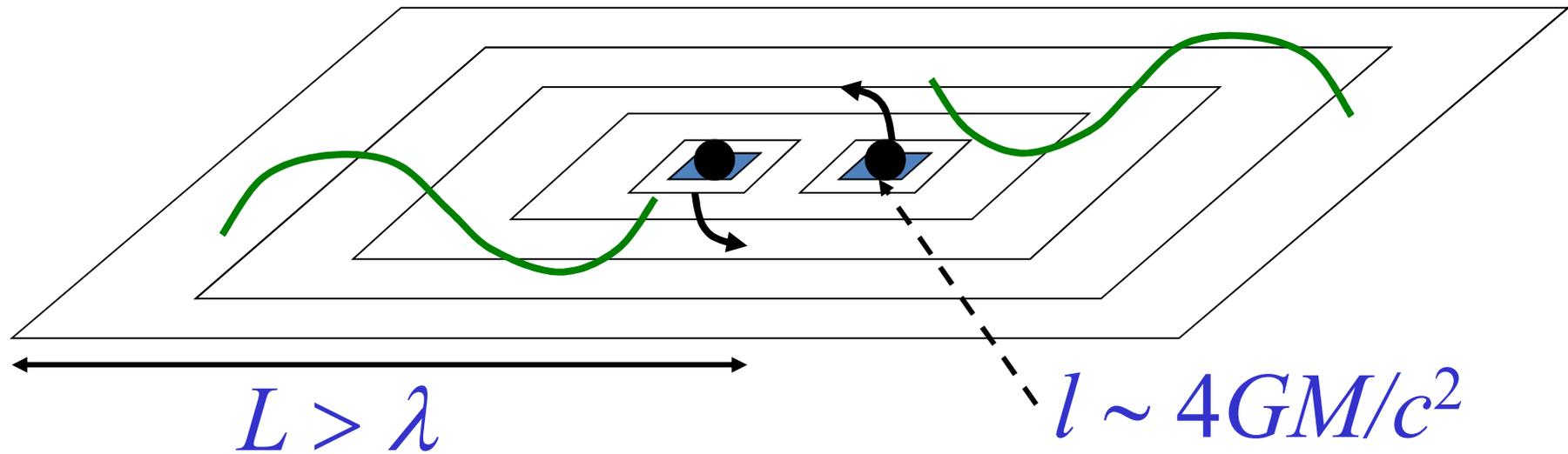
$$\begin{aligned} A_0 = 1, \quad A_2 = -\frac{37}{48}, \quad A_4 = -\frac{9237931}{2032128}, \\ A_6 = \frac{41294289857}{7510745088} - \frac{205\pi^2}{192} \\ A_{10} = -\frac{27}{16} \Lambda, \quad A_{12} = -\frac{449}{64} \Lambda, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha_0 = 1, \quad \alpha_2 = \frac{2435}{378}, \quad \alpha_3 = -16\pi, \\ \alpha_4 = \frac{11747195}{254016}, \quad \alpha_5 = \frac{9320}{189} \pi [1 + \ln(\pi m_0 f)], \\ \alpha_6 = \frac{1382467552339}{1173553920} - \frac{6848}{21} \gamma_E - \frac{7985\pi^2}{48} \\ - \frac{6848\gamma_E}{63} \ln(64\pi m_0 f) \\ \alpha_7 = \frac{1428740}{3969} \pi, \\ \alpha_{10} = -\frac{39}{2} \Lambda, \quad \alpha_{12} = -\frac{3115}{64} \Lambda. \end{aligned}$$

今年、来年の計画

- Adaptive Mesh Refinement codeの並列化を木内君 (+川口君)が実行中 (これまでは Fixed Mesh Refinement code のみをチューンしてきた)。
- 京、FX10、XC30,40 などを用いて、解像度を上げたシミュレーションを行い、収束性を精査するとともに、外挿結果の向上を目指す。
- 質量や状態方程式を、最低~100は振ったシミュレーションが必要。まずは、連星中性子星で行う。ブラックホール・中性子星の場合、ブラックホールスピンの自由度が増え、より多数のシミュレーションが必要。
- 同時にフィッティング法を探求。
- 重力波の観測に間に合わせなければならない。

Adaptive Mesh Refinement (AMR)



- 各ドメインはノードごとに分割
- 親ドメインと子ドメインでデータのやりとりが必須。
- 自明でない、ノード間通信
- 場合分けが多いが、場合を自ら書き尽くせば無駄な演算が省ける