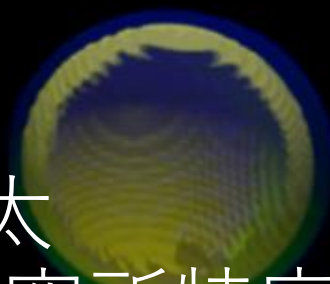
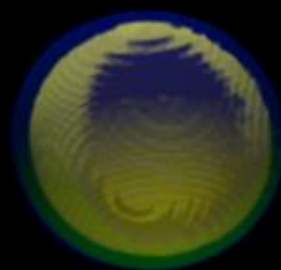


連星中性子星合体の数値モデリング と重力波



木内建太
(京都大学基礎物理学研究所特定准教授)



2017年ノーベル物理学賞



The Nobel Prize in Physics 2017

Nobelpriset i fysik 2017



Med ena hälften till
With one half to:



Photo: Bryce Vickmark

Rainer Weiss
LIGO/VIRGO Collaboration

och med den andra hälften gemensamt till
and with the other half jointly to:

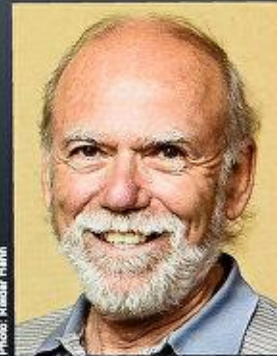


Photo: Rainer Hahn

Barry C. Barish
LIGO/VIRGO Collaboration

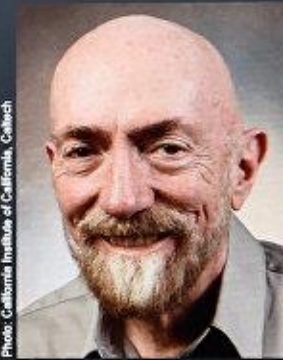


Photo: California Institute of California, Caltech

Kip S. Thorne
LIGO/VIRGO Collaboration

”för avgörande bidrag till LIGO-detektorn och observationen av gravitationsvågor”

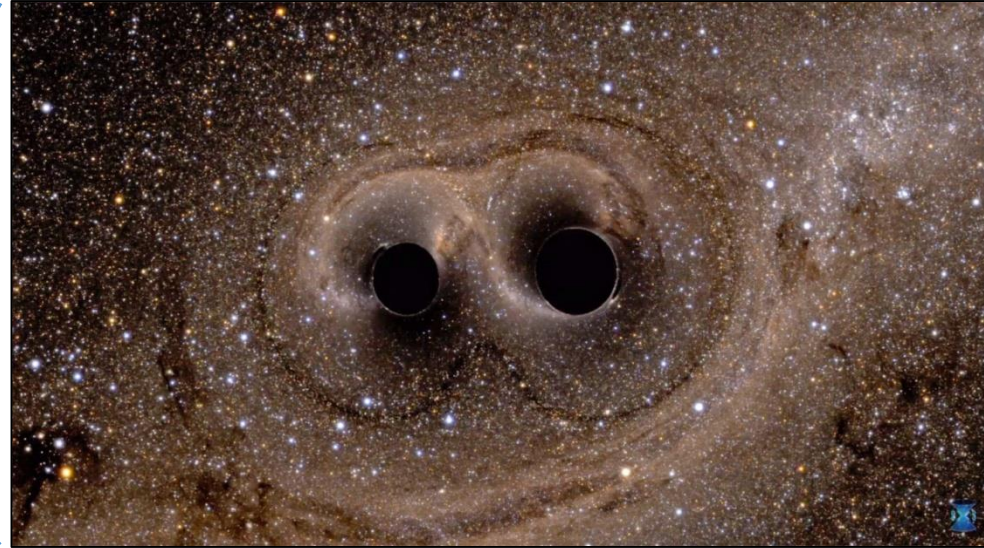
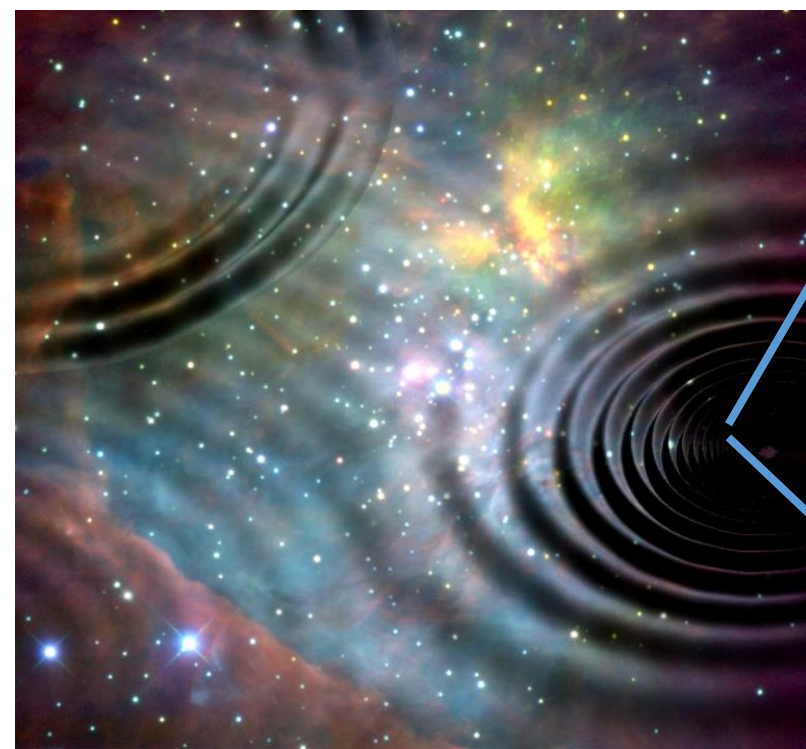
“for decisive contributions to the LIGO detector and the observation of gravitational waves”

3 October 2017

© Kungl. Vetenskapsakademien

受賞理由：観測装置LIGOと重力波観測への決定的な貢献

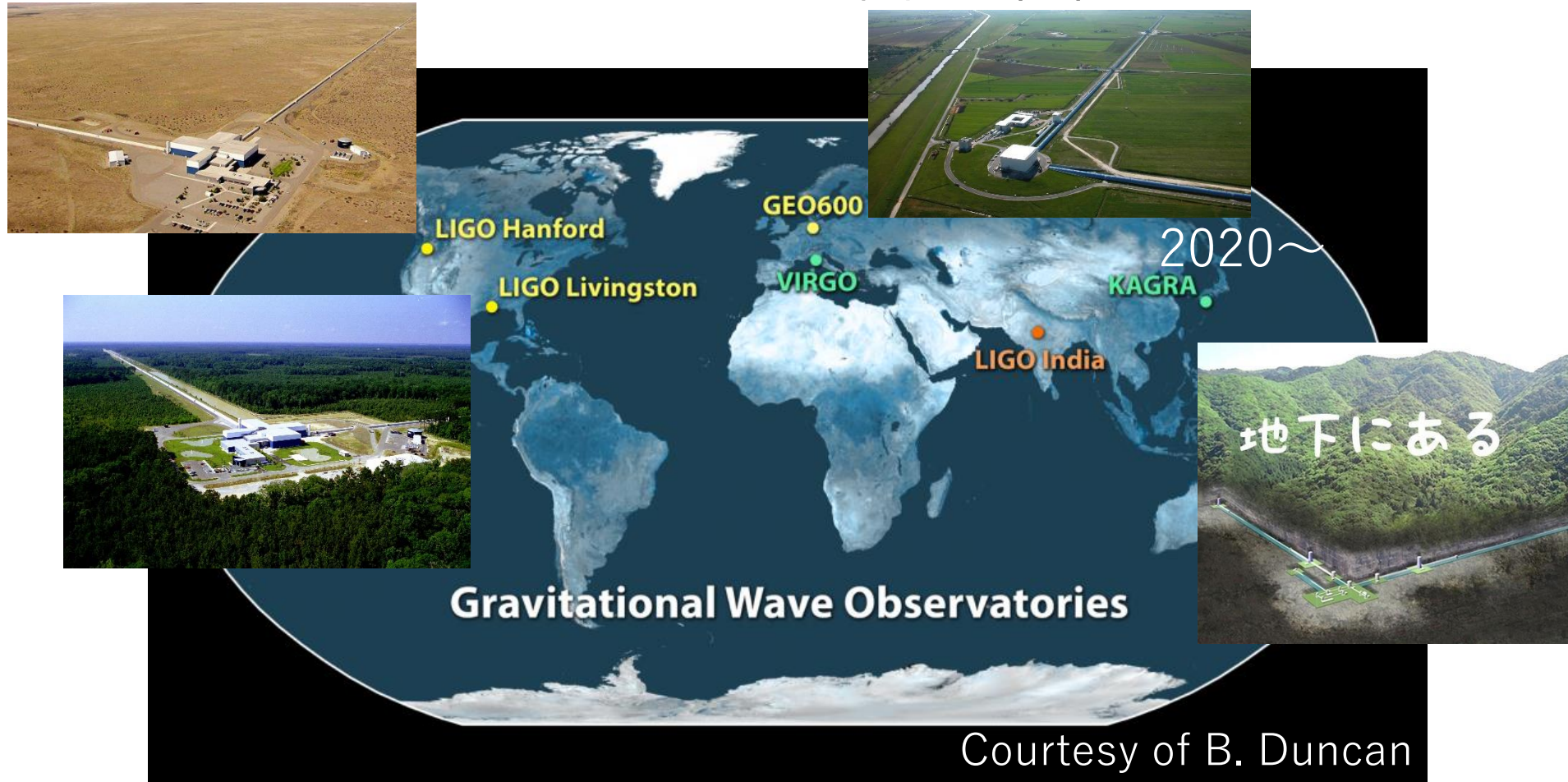
重力波とは？



一般相対性理論⇒時空の漣

▶ブラックホールや中性子星のような重い天体が加速度運動することによって放射

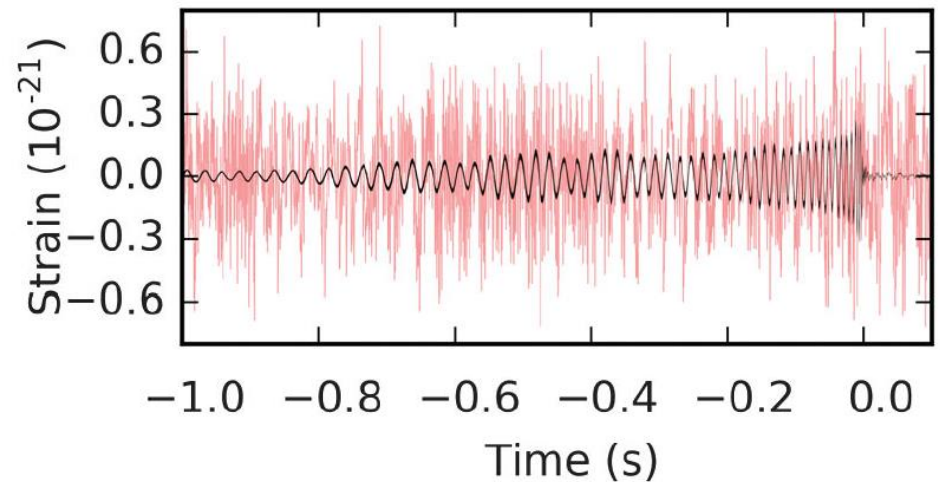
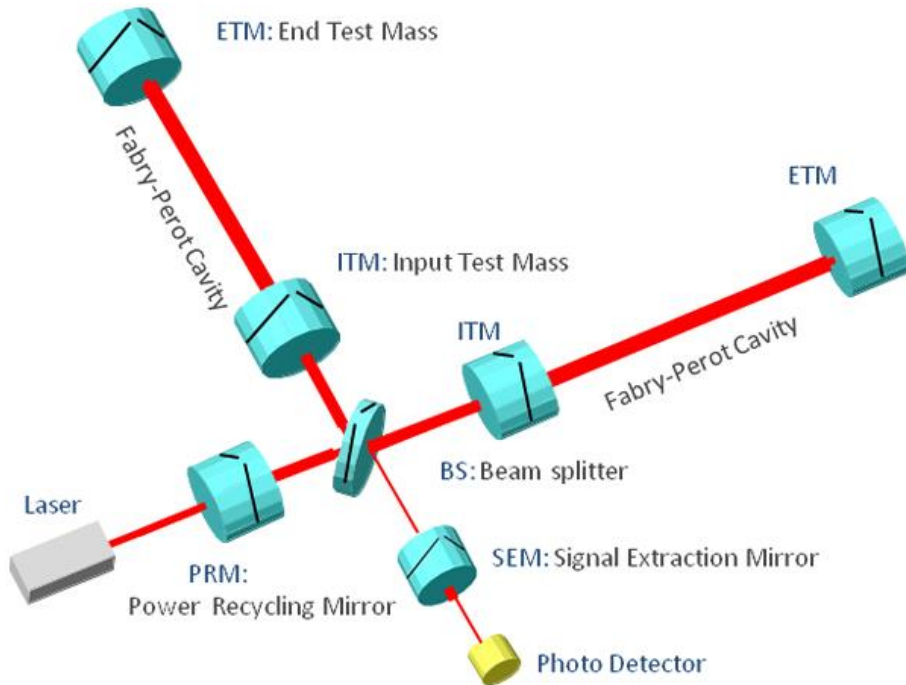
重力波干渉計地図



重力波振幅は $10^{-22} \approx (\text{水素原子}) / (\text{地球—太陽間の距離})$
すさまじい精度の観測が要求される。

重力波観測原理

レーザー干渉計



観測雑音中の微弱な信号を捉えるためには、波形の鋳型（テンプレート）が必要不可欠！

精緻なテンプレートの導出は理論家の最重要課題

波形の鋳型の作成方法

アインシュタイン方程式
(一般相対性理論の基礎方程式)

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

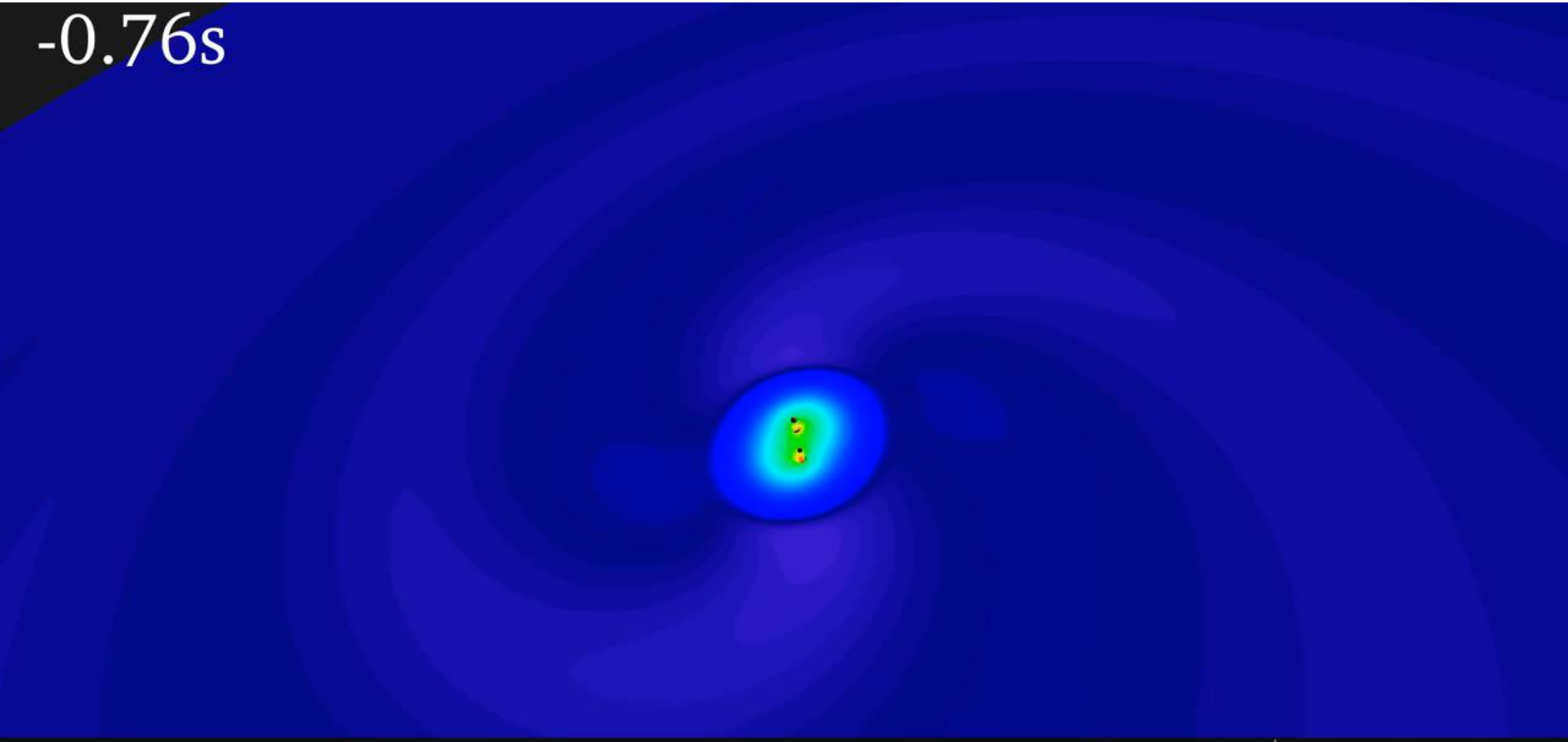


- ▶ 非線形2階偏微分連立方程式
- ⇒ 解析的に解くことはほぼ不可能 (特殊な状況を除く)
- ⇒ スーパーコンピューターを使用した数値シミュレーションが必要不可欠

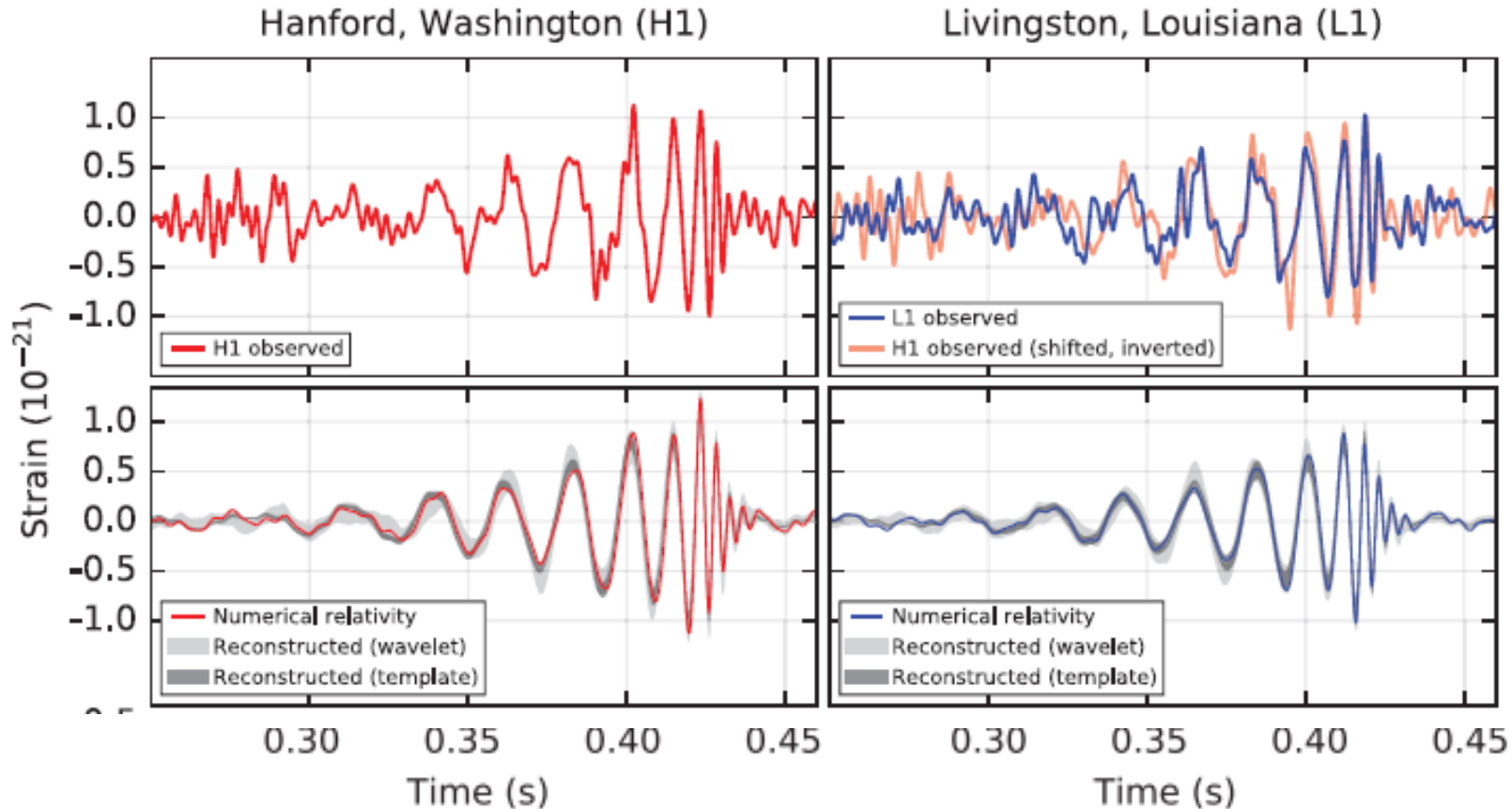
数値相対論(Numerical Relativity)

ブラックホールーブラックホール連星の合体シミュレーション (SXS collaboration)

-0.76s



2015年9月14日重力波初観測



▶観測（上段）と理論シミュレーション（下段）の見事な一致

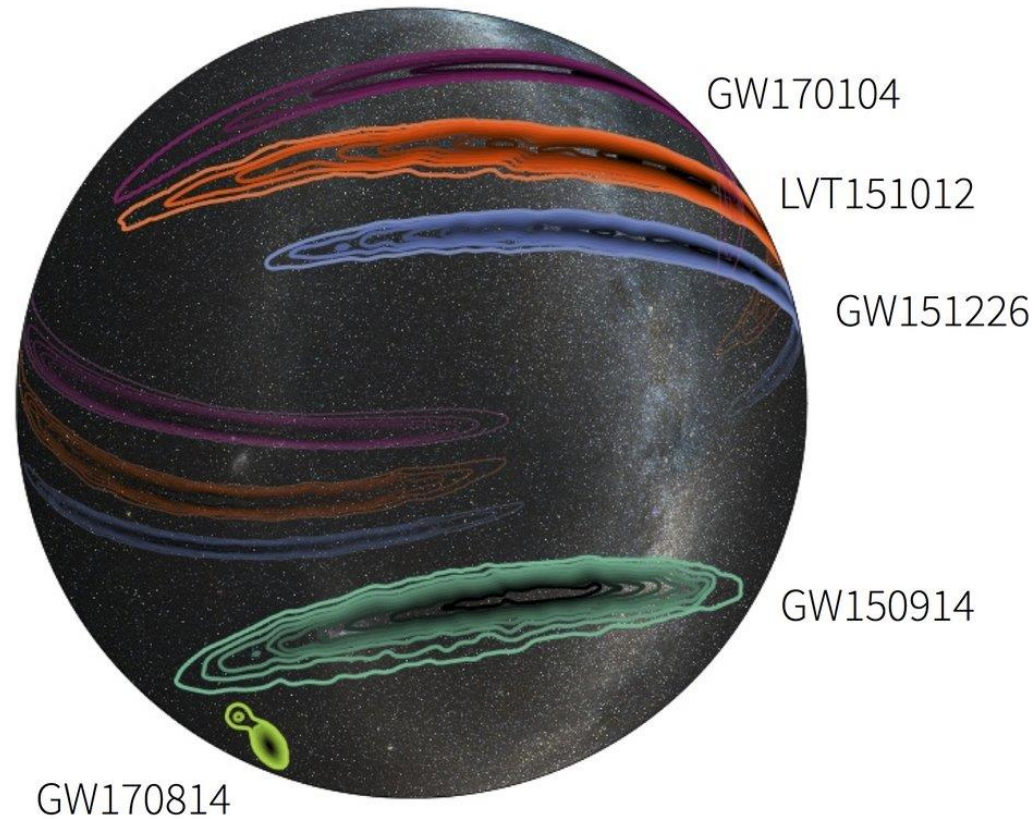
▶計算科学の最も大きな成果の一つ

2016年2月12日記者発表

ガリレオによる望遠鏡の発明に匹敵する成果
(重力波 = 宇宙を見る新しい目)



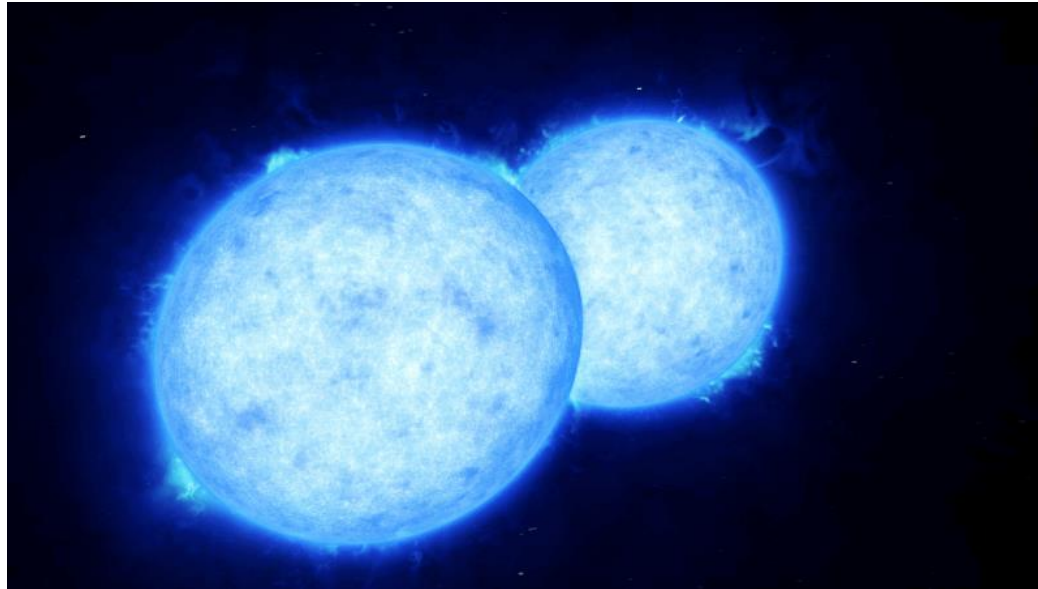
LIGO+VIRGOによる観測



- ▶ 4例の直接観測と1つの候補：すべて連星ブラックホール
- ▶ GW170814は3台で同時観測⇒位置決定精度の劇的な改善（多点観測の重要性）

他には？

連星中性子星



- ▶ 中性子星 = 質量が太陽程度、半径が10キロメートル程度の極限天体の一つ
- ▶ 連星中性子星はこれまでに8天体見つかっている
⇒ 宇宙年齢以内に合体

連星ブラックホールでは得られない科学的成果 1（原子核物理の見地から）

真の核密度状態方程式の探求

中性子星内部の高密度状態は（実験的にも理論的にも）未解明

内部状態は状態方程式（密度の関数としての圧力）に反映される⇒中性子星の構造を決める重要な要因

連星中性子星合体からの重力波は中性子星の質量と半径（に相当するもの）の情報をもたらす。

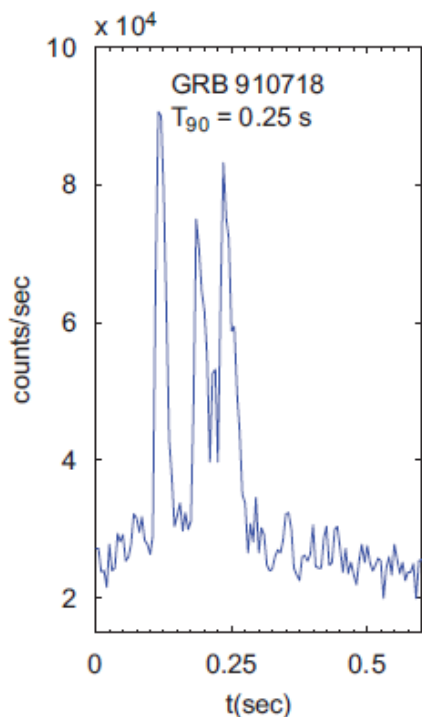
⇒真の核密度状態方程式の推定が可能

連星ブラックホールでは得られない科学的成果2 (天文学の見地から)

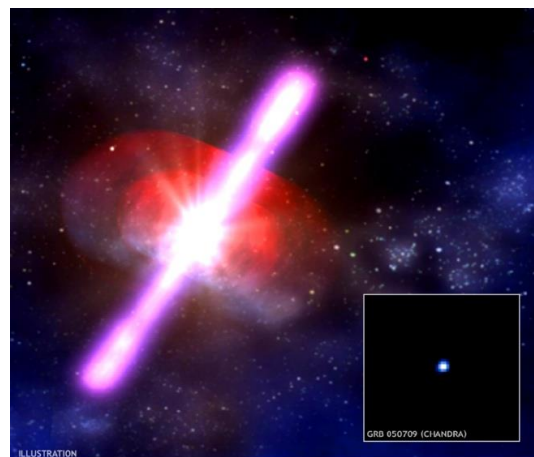
ガンマ線バーストの動力源の解明

- ▶ $E_{\text{iso}, \gamma} \sim 10^{49} - 10^{51} \text{ g cm}^2 \text{ s}^{-2}$, 継続時間 $\sim 0.1 - 2 \text{ s}$

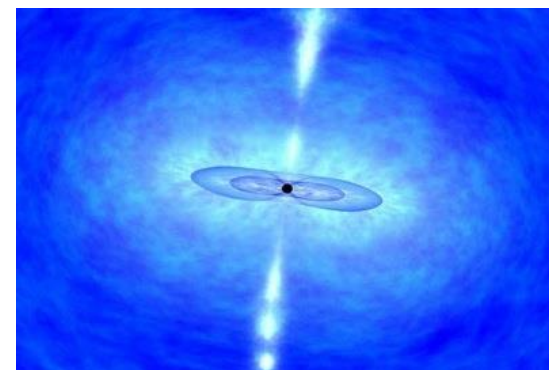
光度曲線



GRBのイメージ



ブラックホールと降着円盤？



連星中性子星合体がガンマ線バーストを起こしている？

連星ブラックホールでは得られない科学的成果 3 (宇宙核物理学の見地から)

宇宙の重元素の起原

原子核による速い中性子捕獲反応による元素合成

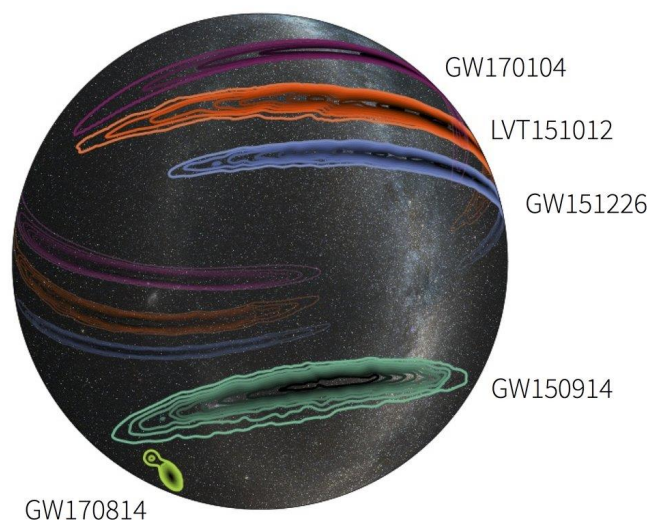
⇒ 元素合成サイトは未解明



▶ 連星中性子星合体 ⇒ 大量の中性子過剰物質 ⇒ 速い中性子捕獲過程による重元素合成の可能性

連星ブラックホールでは得られない？科学的成果4（天文学の見地から）

重力波源の電磁波対応天体

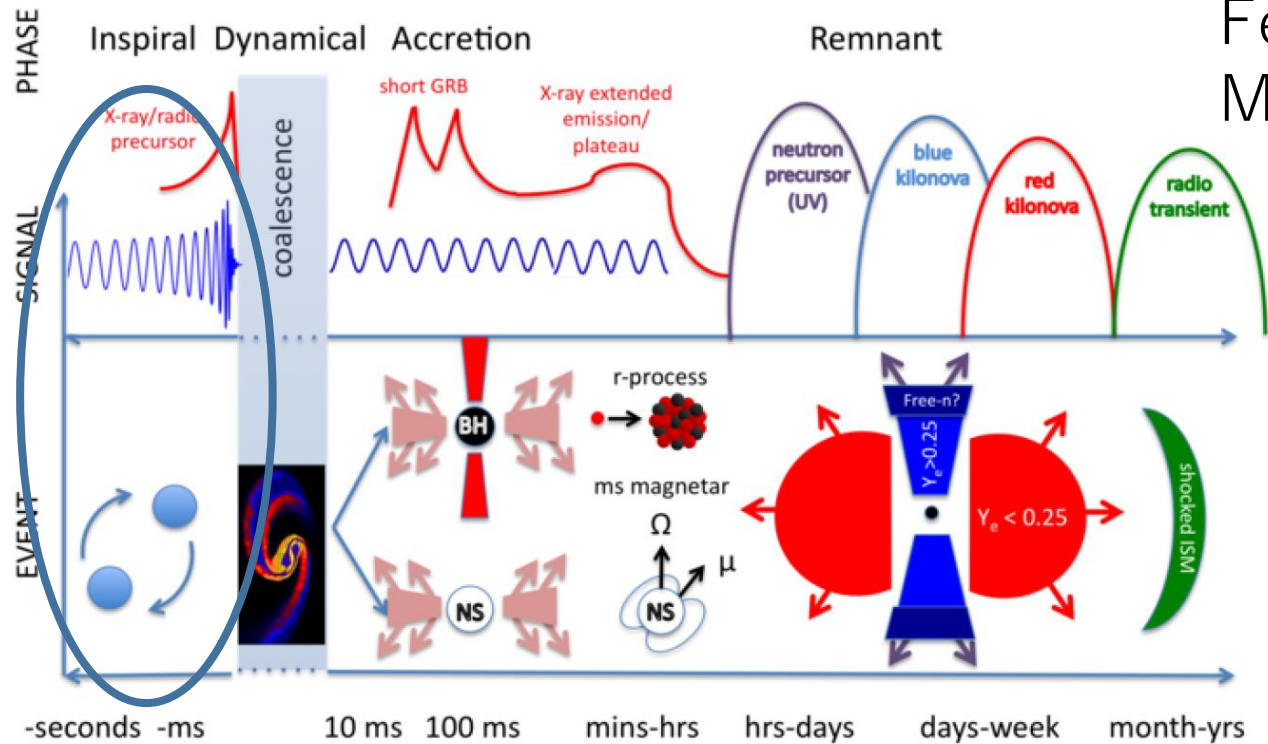


Sky map of
LIGO events

- ▶ 重力波干渉計だけでは位置決定精度は高くない、GW170814では60平方度程度 ⇒ 母銀河の同定が困難
- ▶ 電磁波による同時観測が必要
- ▶ 速い中性子捕獲過程元素の放射性崩壊 ⇒ 可視・近赤外帯域の電磁波放射の可能性

連星中性子合体の全容を解明する

Fernandez & Metzger 16

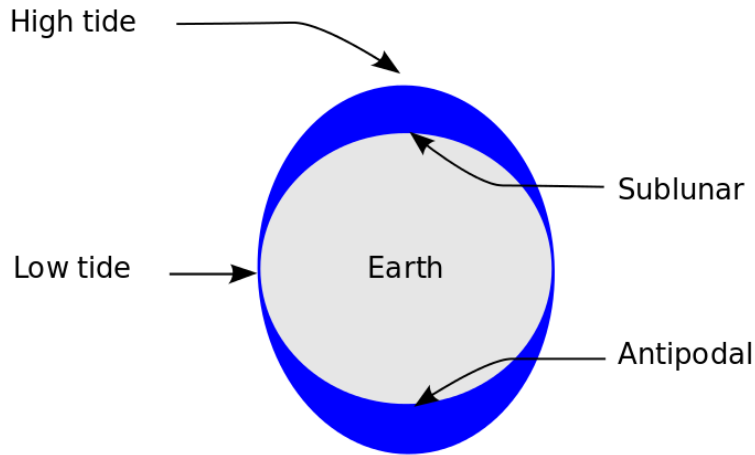


- ▶ 一般相対性理論
- ▶ 核密度状態方程式
- ▶ ニュートリノ輻射輸送
- ▶ 磁場

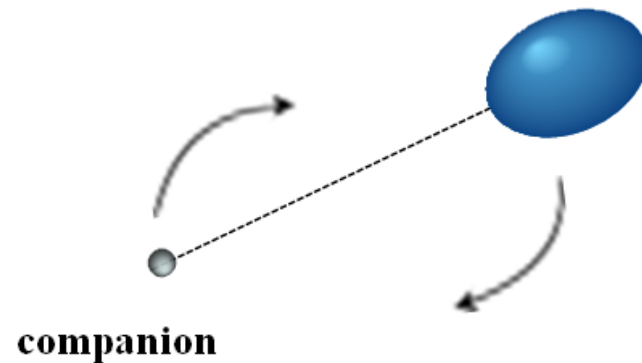


インスパイラルから後期インスパイラル

地球の潮汐



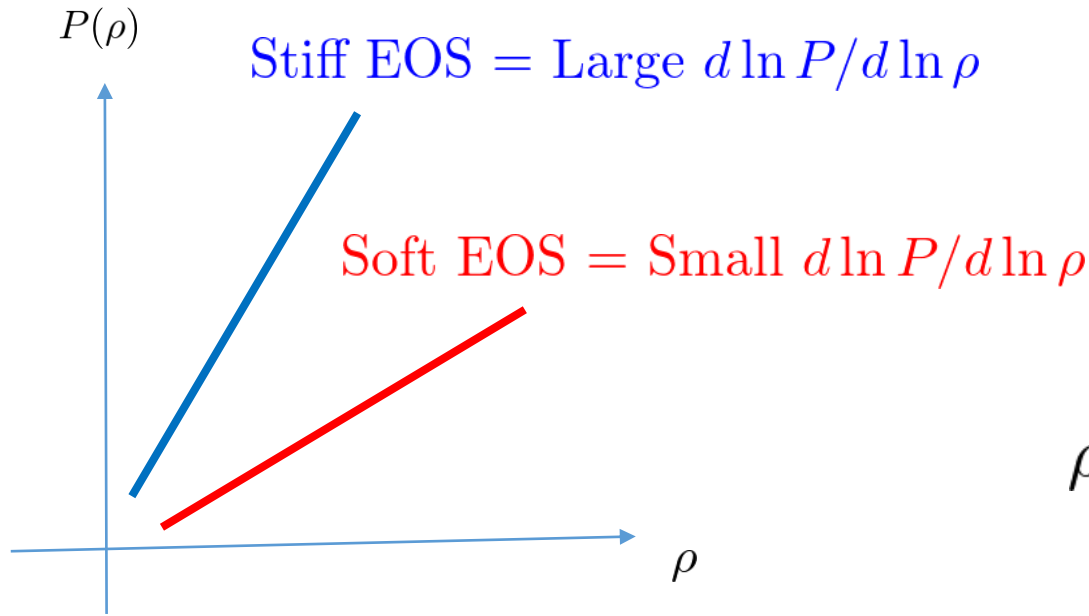
non spinning NS in a binary



合体直前の中性子星は伴星が作る潮汐場によって変形する。⇒変形度 = 潮汐変形度

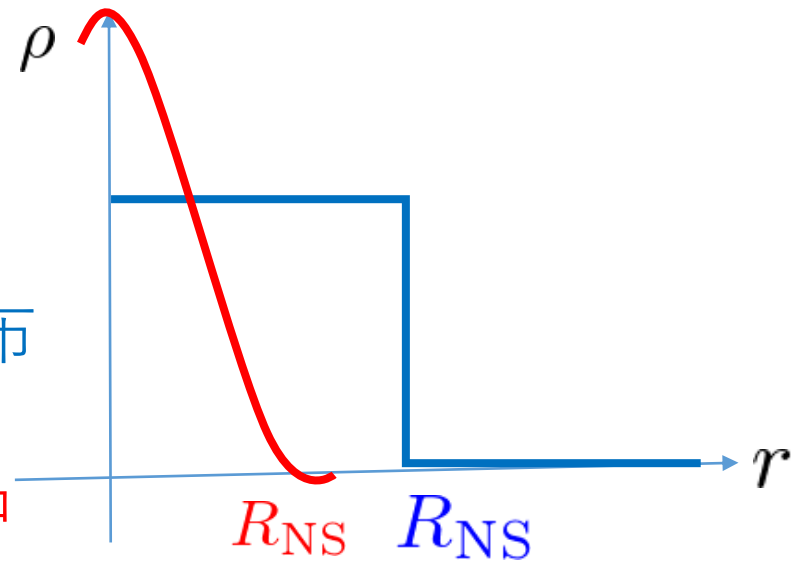
インスパイラルから後期インスパイラル

潮汐変形度は中性子星の状態方程式に依存する。
状態方程式 \Rightarrow 密度 ρ の関数としての圧力 P



$$\nabla P = -\rho \nabla \phi_g$$

ϕ_g is a gravitational potential



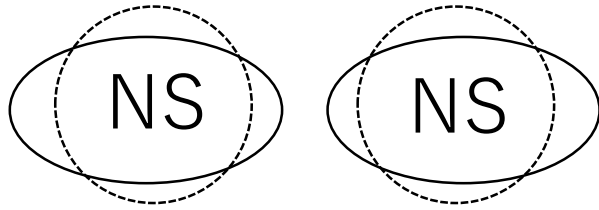
固い状態方程式 \Rightarrow 一様密度分布
(半径大)

柔らかい状態方程式 \Rightarrow 中心集中
密度分布(半径小)

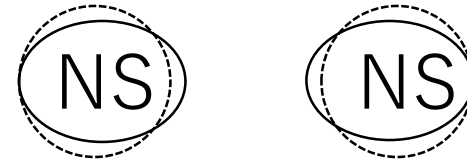
インスパイラルから後期インスパイラル

潮汐変形

固い状態方程式 (半径大) | 柔らかい状態方程式 (半径小)



潮汐変形しやすい



潮汐変形しにくい

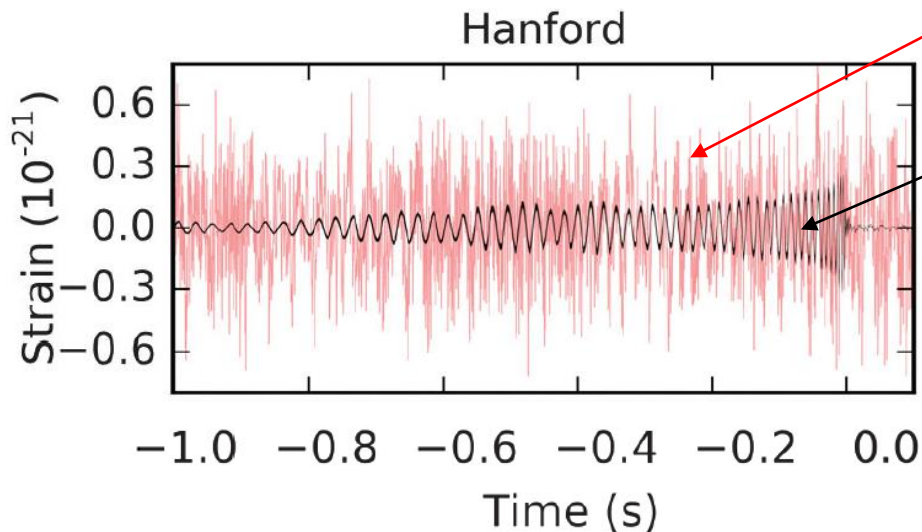
潮汐変形度は状態方程式に依存する

重力波に刻印される潮汐変形度

$$h = \frac{A(t)}{\text{振幅}} e^{i\Phi(t)} \quad \text{位相}$$

潮汐場は引力 \Rightarrow 潮汐変形すると軌道の進化は早まる
 \Rightarrow 重力波の位相進化も早まる

重力波波形の鋳型



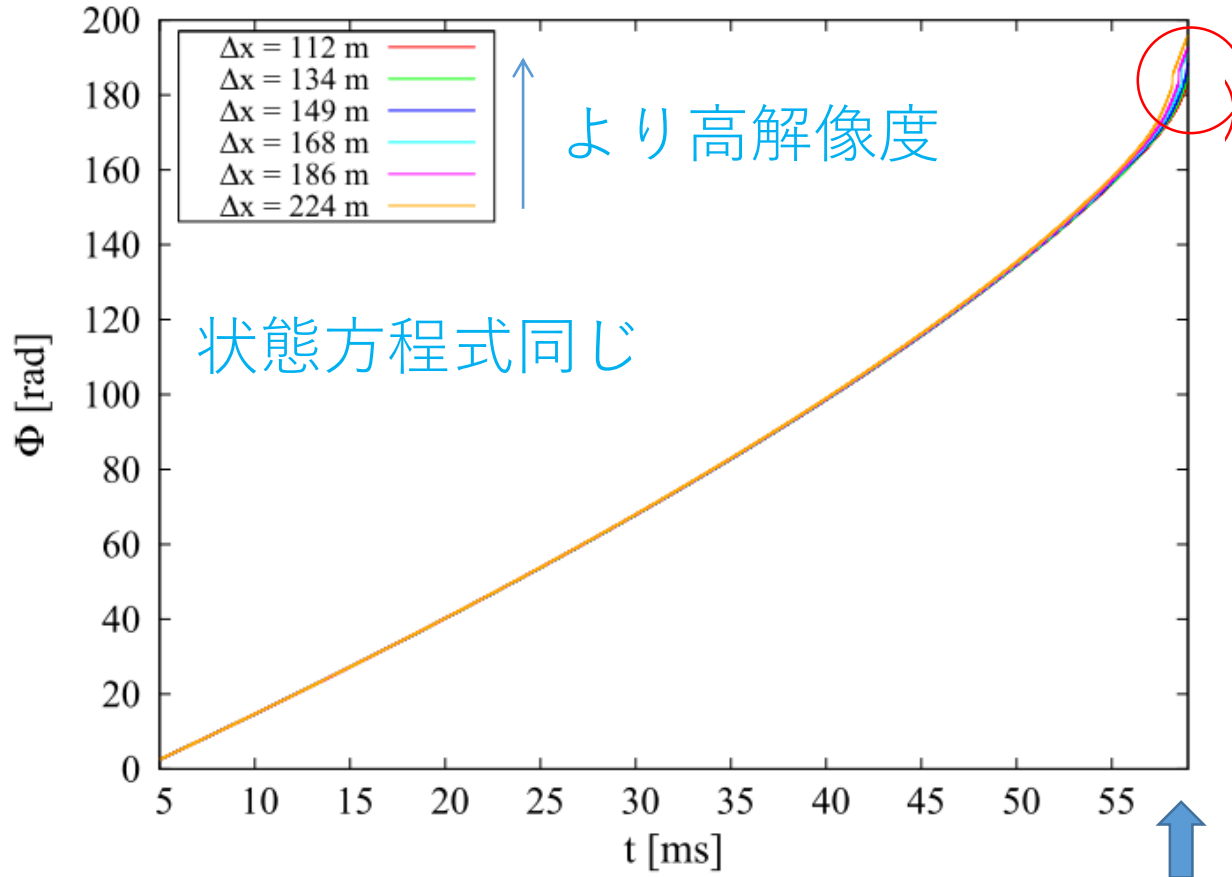
観測データ (雑音
込み)

鋳型 (理論波形)

重力波波形テンプレートの構築

潮汐変形度大 \Rightarrow 重力波の位相変動大

数値散逸 \Rightarrow 重力波の（偽の）位相変動大



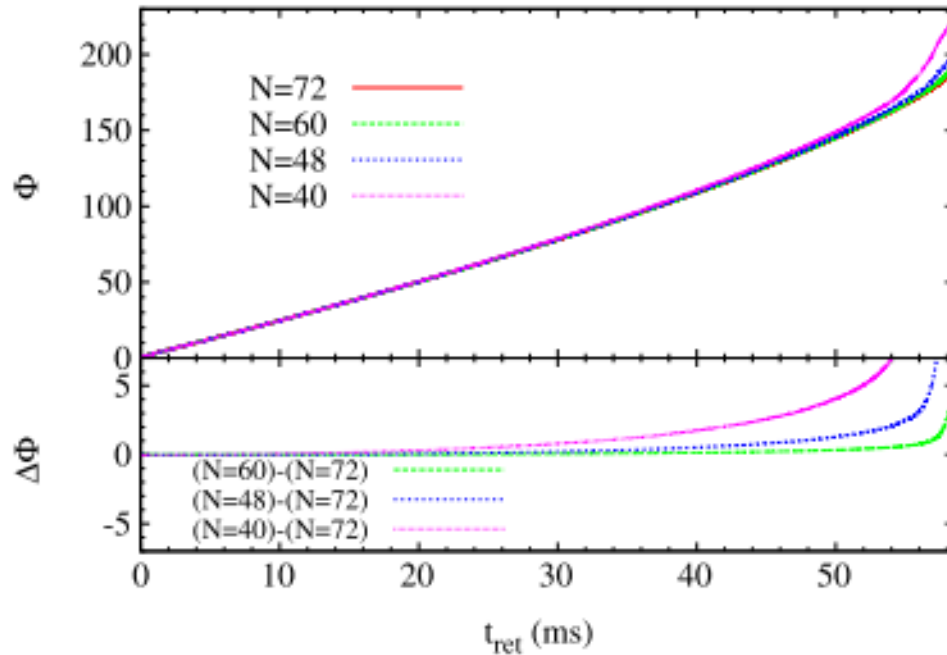
要求: $\Delta\Phi_{\text{error}} < \Delta\Phi_{\text{tidal}}$

解像度に対する収束性のチェックが肝要

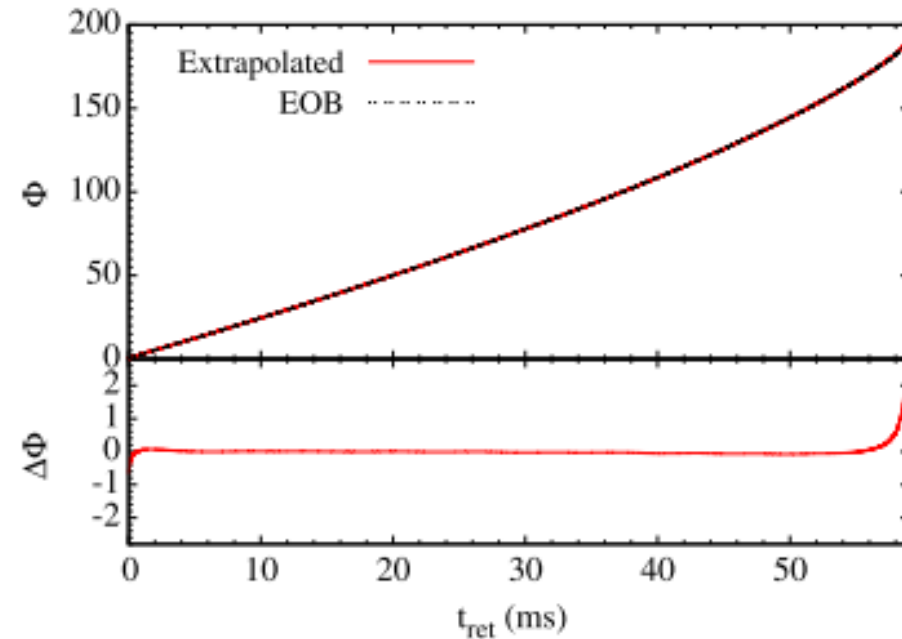
数値相対論シミュレーションの現状

Hotokezaka et al. 13, 15, 16, see also Dietrich et al. 17, Bernuzzi et al. 15

重力波の位相と位相変調



連続極限と近似的手法の比較



- ▶ $\Delta\Phi_{\text{error}} \approx 3 - 4$ radian
- ▶ $\Delta\Phi_{\text{NR-PN}} \approx 2 - 3$ rad.

数値モデルの系統誤差は依然大きい

高精度重力波波形の導出に向けて

スーパーコンピューターによる効率的な波形の導出

我々の数値コードの現状

年間約100程度の理論波形の導出が可能。

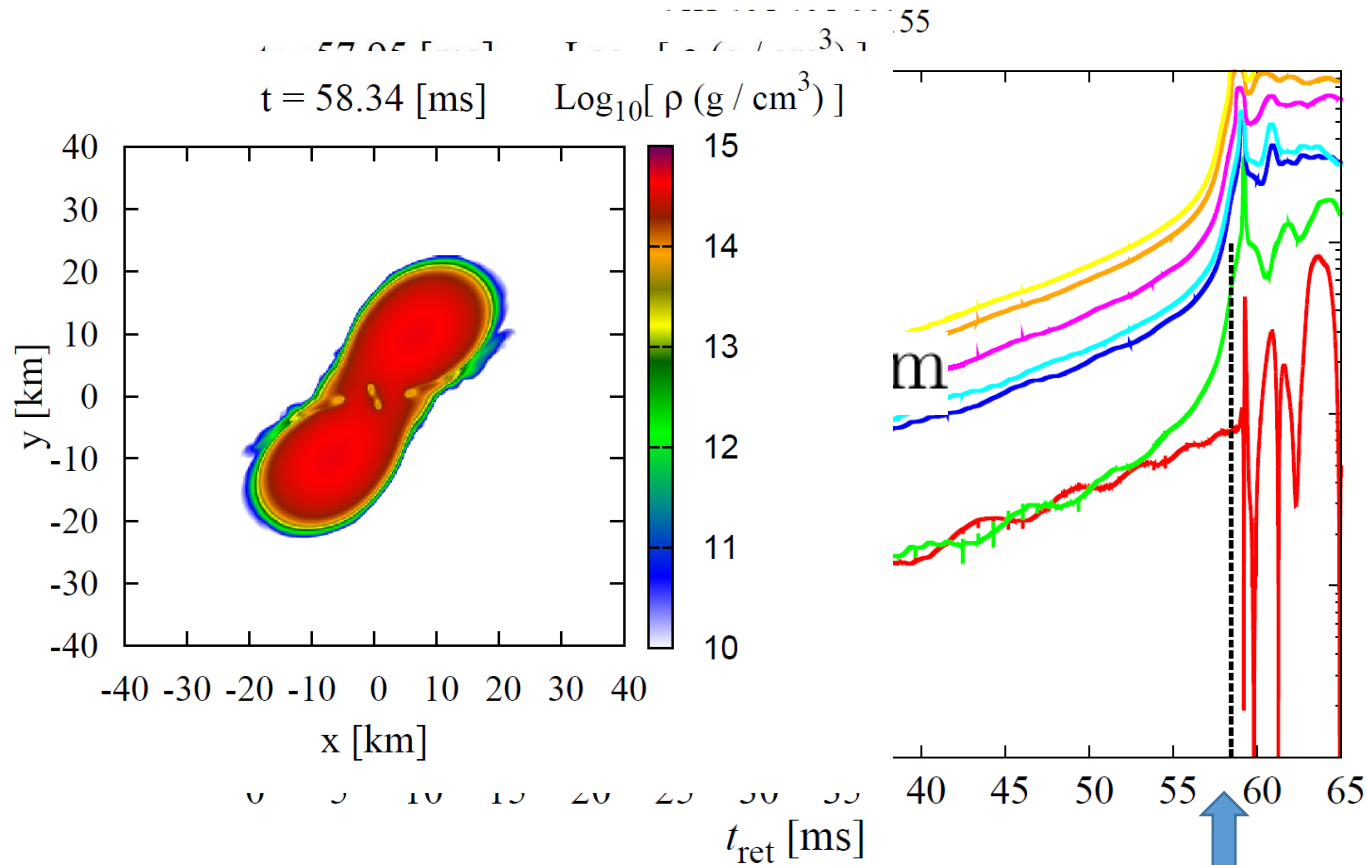
⇒ 連星パラメーター（状態方程式と質量）に関する系統的なスタディが可能。

3つの鍵

- ▶ 収束性チェック (4-5通り)
- ▶ 低い軌道離心率 ($e \sim 10^{-3}$)
- ▶ 長時間発展(合体まで15-16周)

重力波の位相誤差

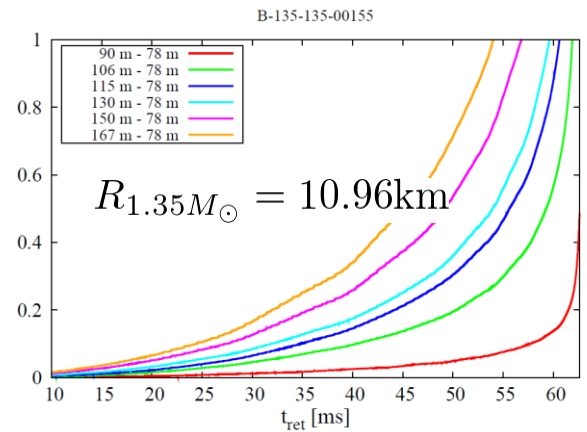
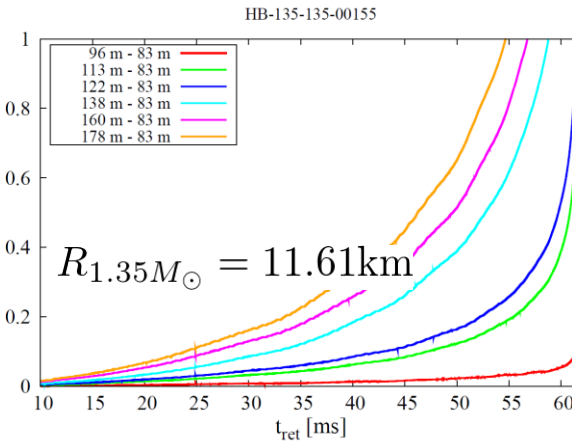
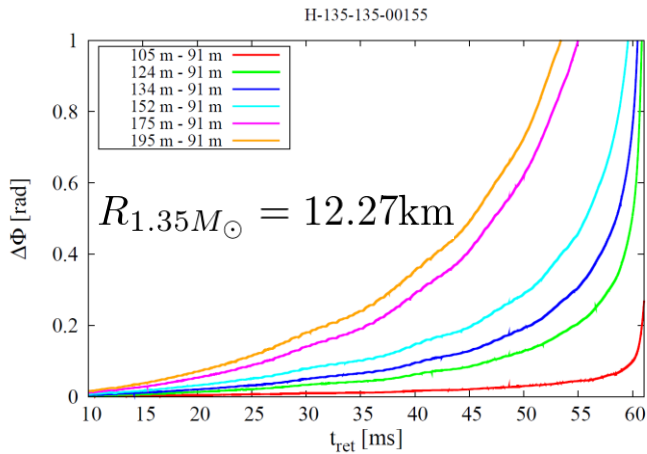
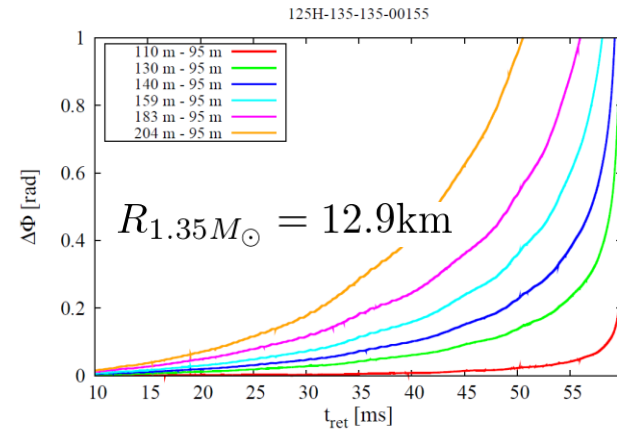
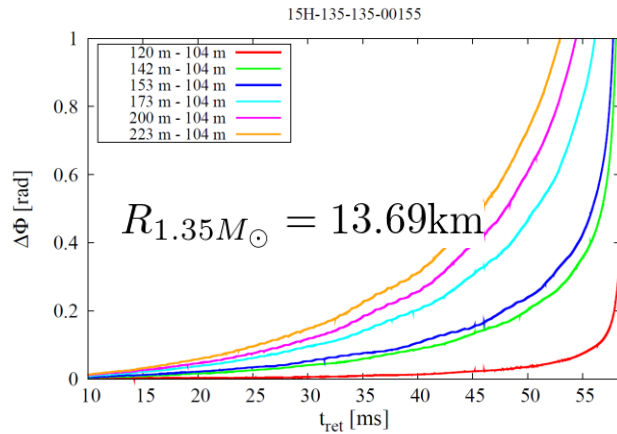
$1.35M_{\odot} - 1.35M_{\odot}$



合体時間 (58.42ms)

- ▶ 重力波の位相誤差は0.1radian以下 (全体では200radian進化)
- ▶ 合体の0.5ミリ秒前からは既存の半解析的な方法は破綻

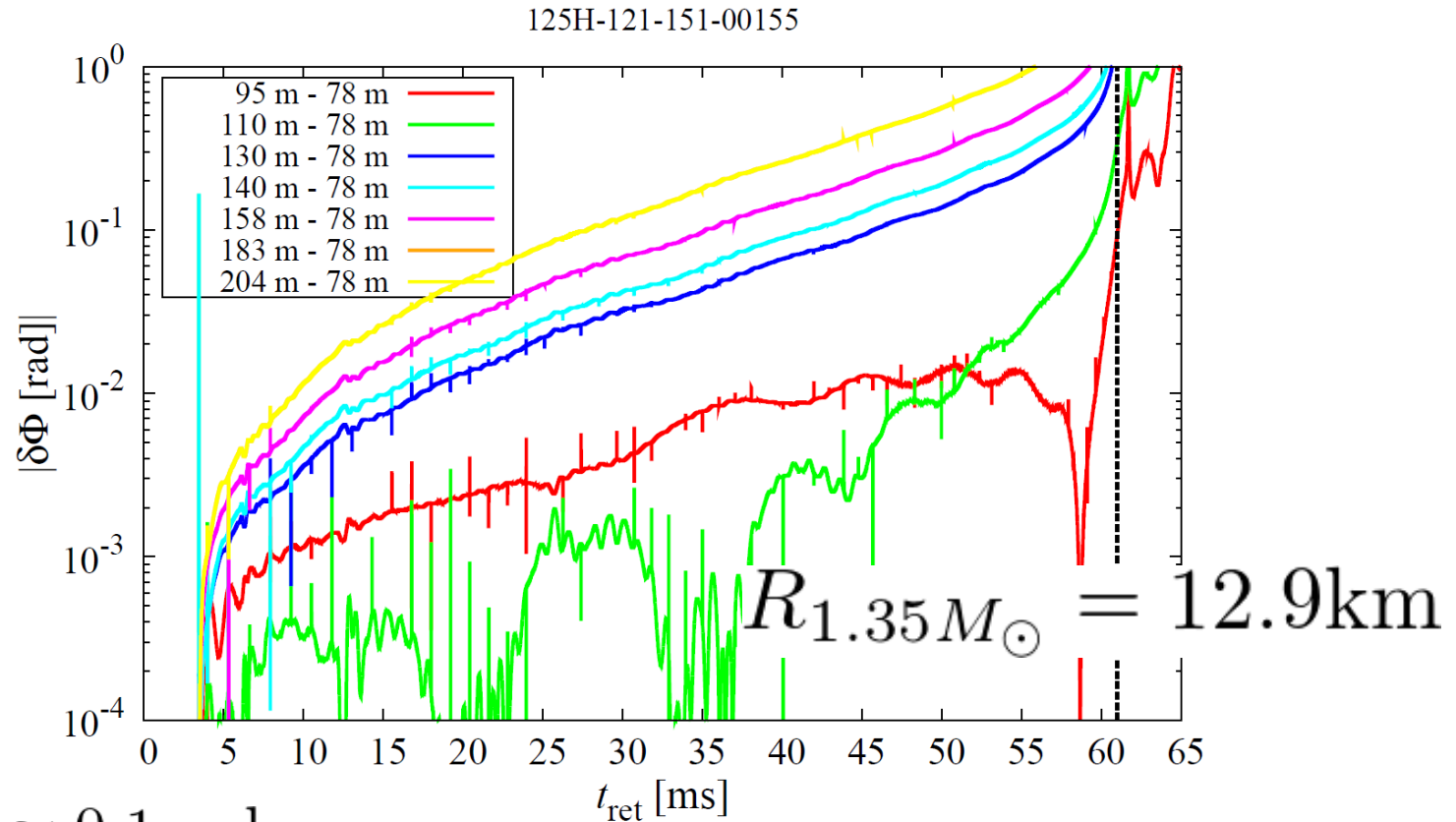
数値相対論シミュレーションの現状



▶ 先行研究より約2.2倍程度高い解像度のシミュレーション

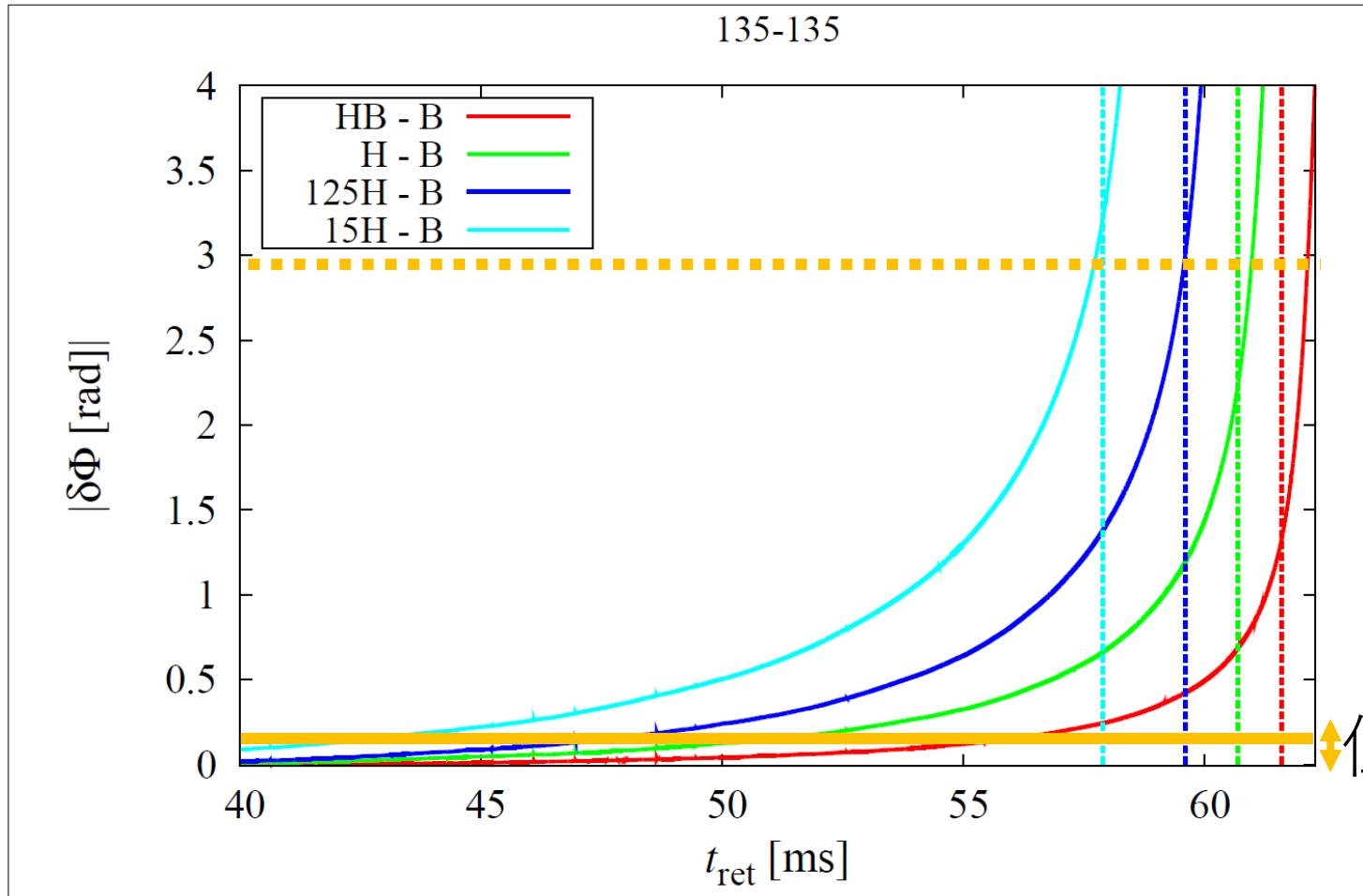
▶ $\Delta\Phi_{\text{error}} \approx 0.1 \text{ rad.}$ 位相誤差の大幅な改善

非等質量連星 $1.21M_{\odot} - 1.51M_{\odot}$



- ▶ $\Delta\Phi_{\text{error}} \approx 0.1$ rad.
- ▶ 他のモデルも順調に計算中

数値相対論シミュレーションの現状



▶ 位相誤差が十分に小さく抑えられている。

To do list

▶ 数値相対論データも元に現象論的波形モデルを構築中

まとめ

重力波天文学の開闢

- ▶連星ブラックホール合体からの重力波観測における数値シミュレーションの重要性が確立
- ▶連星中性子星合体からの重力波観測にも数値シミュレーションは本質的な役割を果たすと予想。

インスパイラルから後期インスパイラル⇒真の核密度状態方程式を決めるための高精度理論波形

合体後の進化：ニュートリノ輻射場／磁気流体といったmultiphysicsが鍵（c.f., ガンマ線バースト、電磁波対応天体）

[10月16日にLIGOが新たな発表をする予定](#)