

# 数値相対論による重力波シミュレーション

富江 亮友, 高橋 優介  
東京理科大学 理学研究科 物理学専攻 加瀬研究室

## 1. 数値相対論ってな～に？？？

- 一般相対論… Einsteinが1915年頃に発表した重力の理論！
- Einstein方程式… 一般相対論の基礎方程式(力学の運動方程式に対応). なんと10元連立2階非線形偏微分方程式！

### Einstein方程式

$$G_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$$

⇒手計算で解くのは(かなり特別な場合を除いて)無理！

⇒ コンピュータを使って解こう！⇒ 数値相対論



$G_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$   
左辺時空の曲がり具合  
右辺エネルギー(質量)  
エネルギーが時空を歪ませる！  
時空の歪み=重力  
©いらすとや

## 2. Einstein方程式・・・解けたらなにが嬉しいの？

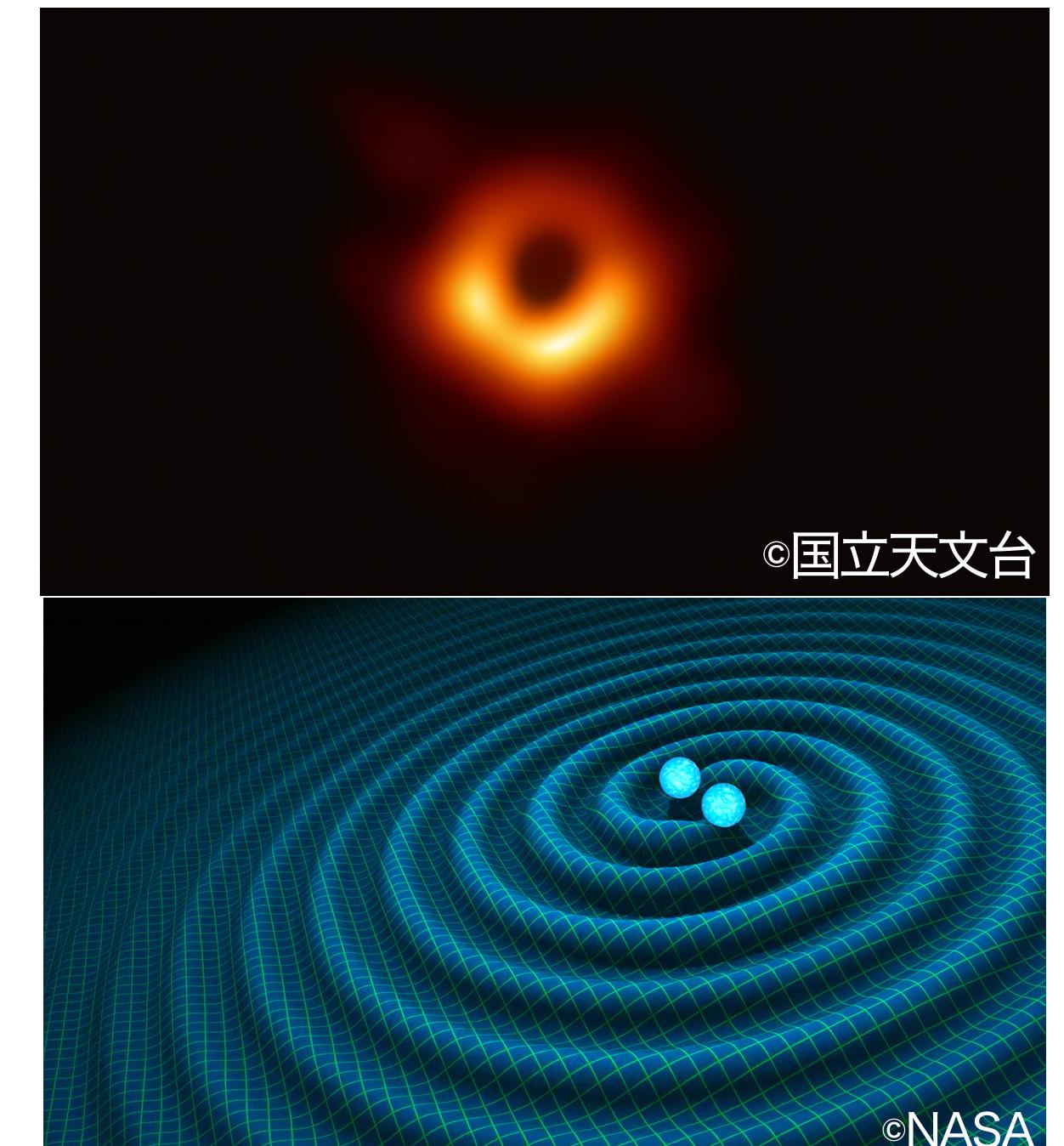
一言で言えば、宇宙がわかる！

宇宙にはまだまだ謎がいっぱい！たとえば・・・

- 重力波(GW)… 時空のさざ波？
- ブラックホール(BH)… 光すら逃げられない領域？
- 中性子星(NS)… とても質量密度の大きい星。内部のことはよくわかっていない。
- 暗黒物質(DM)… 誰も見たことがない、でもあるはずの未知の物質！
- 暗黒エネルギー(DE)… 宇宙を膨張させるエネルギー！その正体は未だ不明・・・

そもそも一般相対論ってどこまで正しいの！？⇒一般相対論の検証が必要！

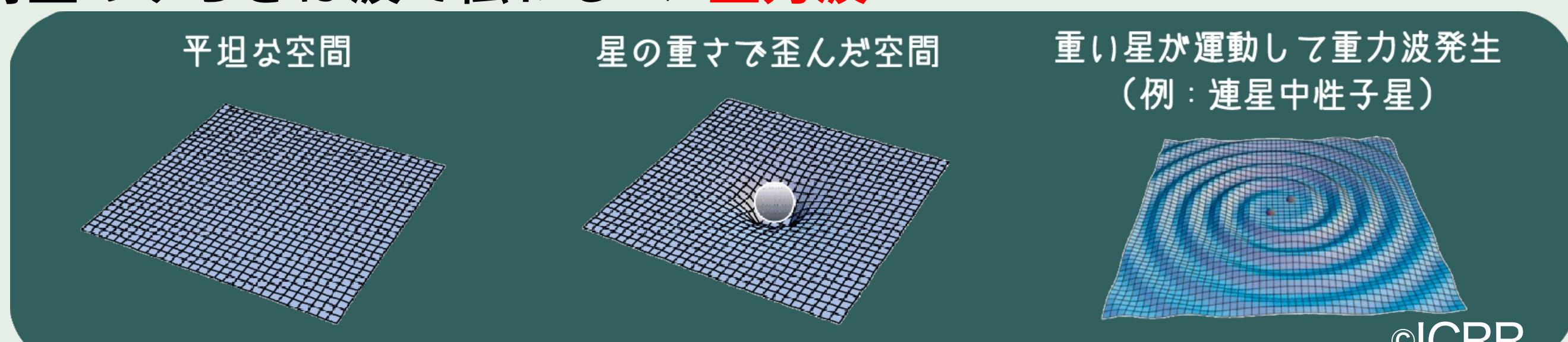
⇒一般相対論を超えた理論でシミュレーションして比較しよう！



## 3. 数値相対論の適用例：重力波

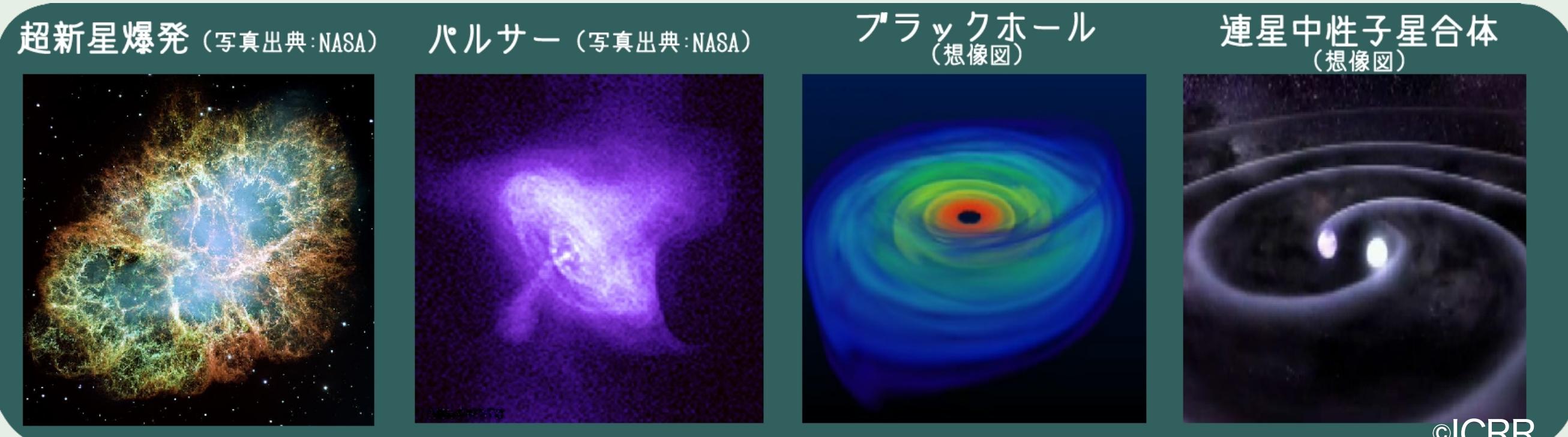
### 重力波とは？

- モノが動くと発生する時空のゆらぎ！
- 時空のゆらぎは波で伝わる ⇒ 重力波！



- 重力波の発生源はいろいろ！

▶ BH連星, NS連星, BH-NS連星の合体, 超新星爆発, インフレーション



⇒現在、加瀬研ではBH連星のシミュレーションを主に行っています！

### 数値相対論と重力波観測

#### 数値相対論を観測に使う

- 重力波は弱すぎて、ただ観測するだけだとノイズと区別できない・・・
  - 太陽と地球の間の距離(約 $1.5 \times 10^8$  km)と同じくらいの長さの棒が水素原子1つ分(約 $1.0 \times 10^{-10}$  m)振動する程度の弱さ・・・
- そこで、数値相対論で事前に波形を予測してから観測する！

#### 数値相対論と観測を比較する

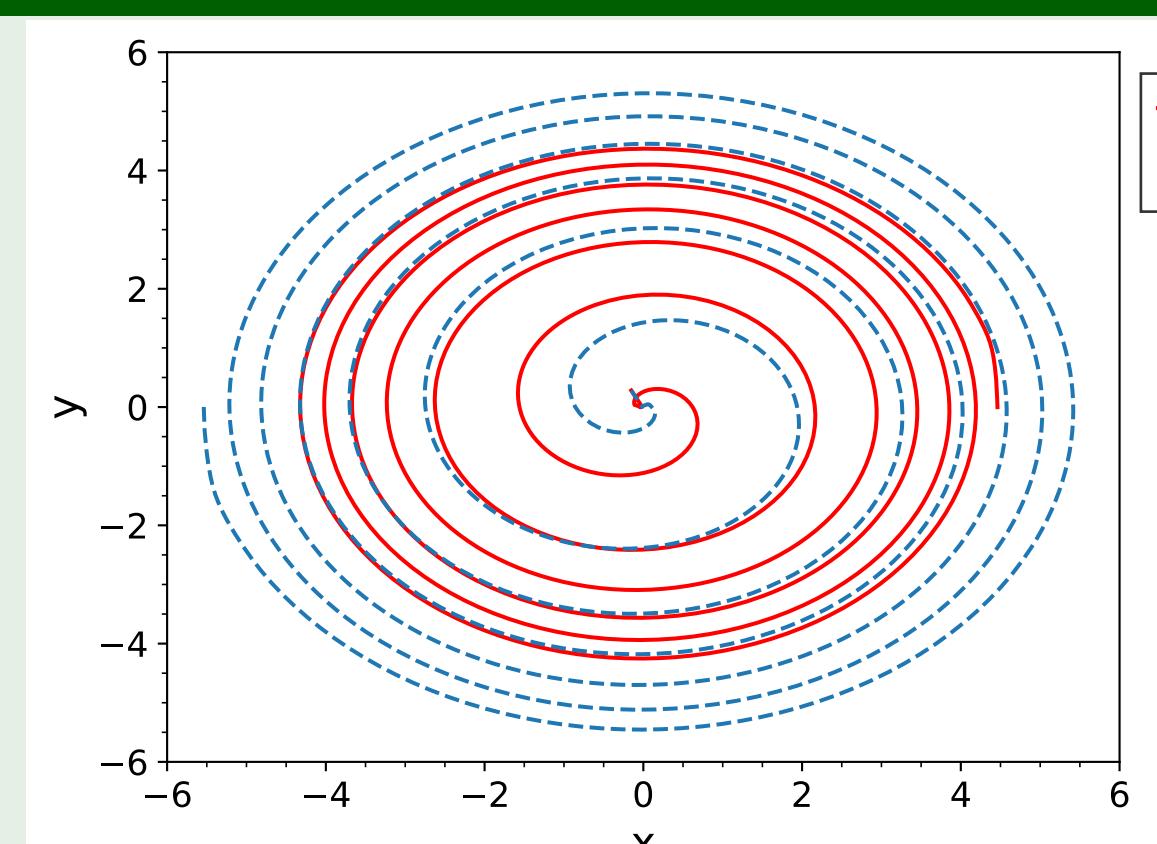
- もしも、観測された重力波形と数値相対論で計算した波形が違ったら？⇒ 一般相対論を超えた理論の可能性！
- 加瀬研究室では一般相対論を修正・拡張する理論を研究しています！

## 4. 加瀬研で行ったシミュレーション

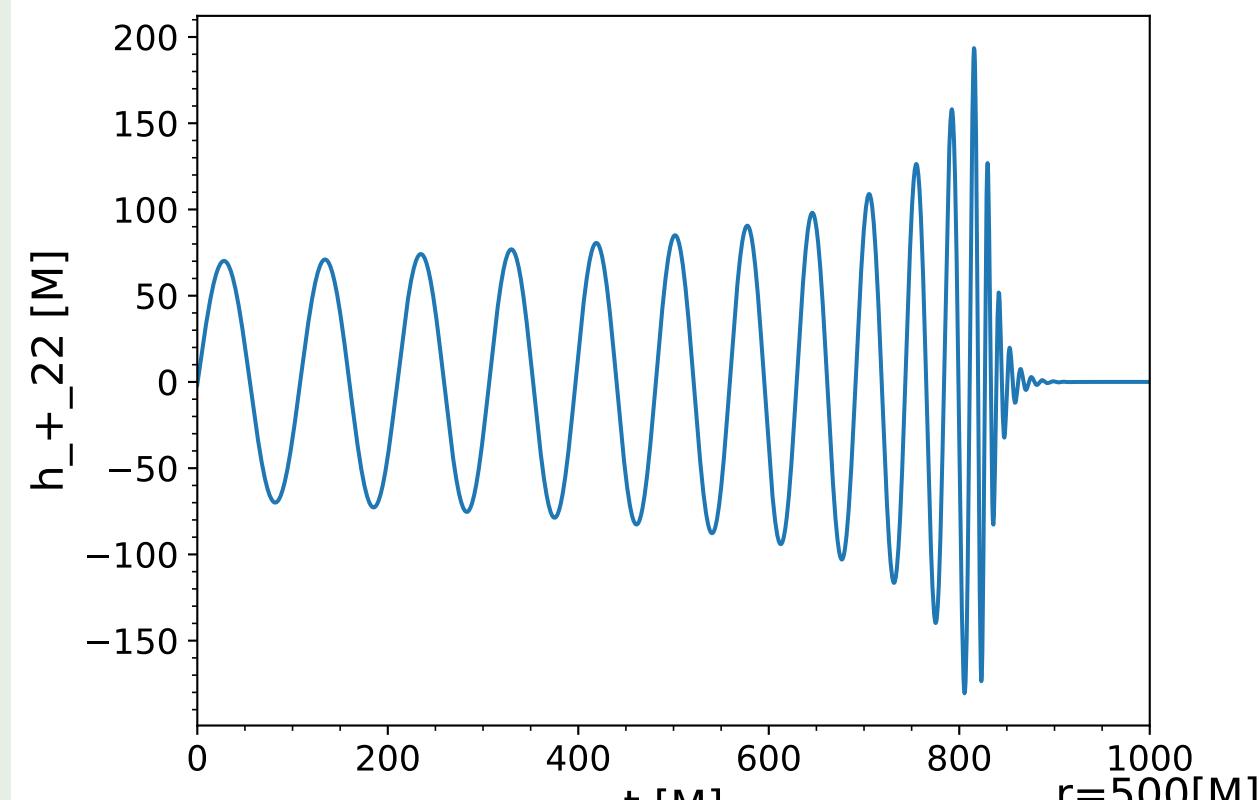
### GW150914を再現したBH連星の合体シミュレーション

#### ブラックホール連星の軌跡

BH1(赤実線), BH2(青破線)の軌道のプロット。2つのBHの重心の周りを軌道半径を小さくしながら周回し、最後に衝突して1つのBHになる。



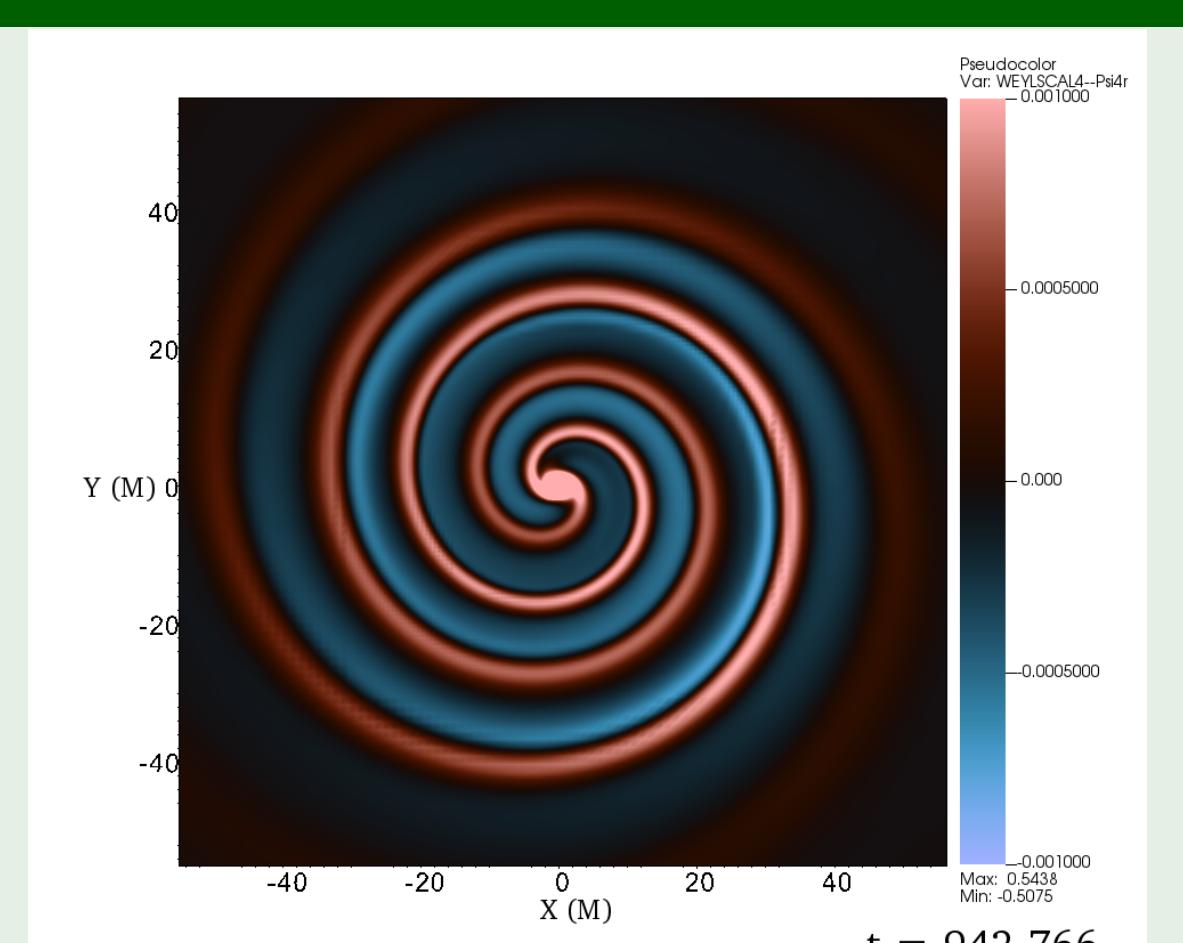
#### ブラックホール連星から生じる重力波



重力波(時空のゆらぎ)の時間変化の図。時空が歪んでいない時は振幅が0になる。BHが衝突するときが振幅のピークである。

#### Weyl Scalarの時間発展

Weyl Scalarは時空の歪みの時間二階微分(変化の加速度)に相当する。値が大きい腕(赤)と小さい腕(青)が合計4本出ている部分が特徴である。



動画で見たい方は

↓コチラ！



#### 今後の展望

一般相対論を修正・拡張する理論でBH連星のシミュレーションを行い、放出される重力波がどのように変更されるのかを研究する。

## 参考文献

[1] [https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/KAGRA\\_Nobel/data/KAGRA\\_brochure2.pdf](https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/KAGRA_Nobel/data/KAGRA_brochure2.pdf).

[2] <https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/plan/aboutu-gw>

[3] 佐藤 勝彦,『岩波基礎物理シリーズ(新装版) 相対性理論』(岩波書店,2021).

[4] 柴田,「一般相対論の世界を探る 重力波と数値相対論」, 東大出版会, 2007年.

[5] 柴田,「数値相対論と中性子星の合体」, 共立出版, 2021年.

[6] <https://www.nao.ac.jp/news/science/2019/20190410-eht.html>

[7] <https://www.nasa.gov/universe/nsfs-ligo-has-detected-gravitational-waves/>