

重力波検出の意義と今後の展開

牧野淳一郎

2016/2/16 AICS 研究部門進捗報告会資料から公開用調整版

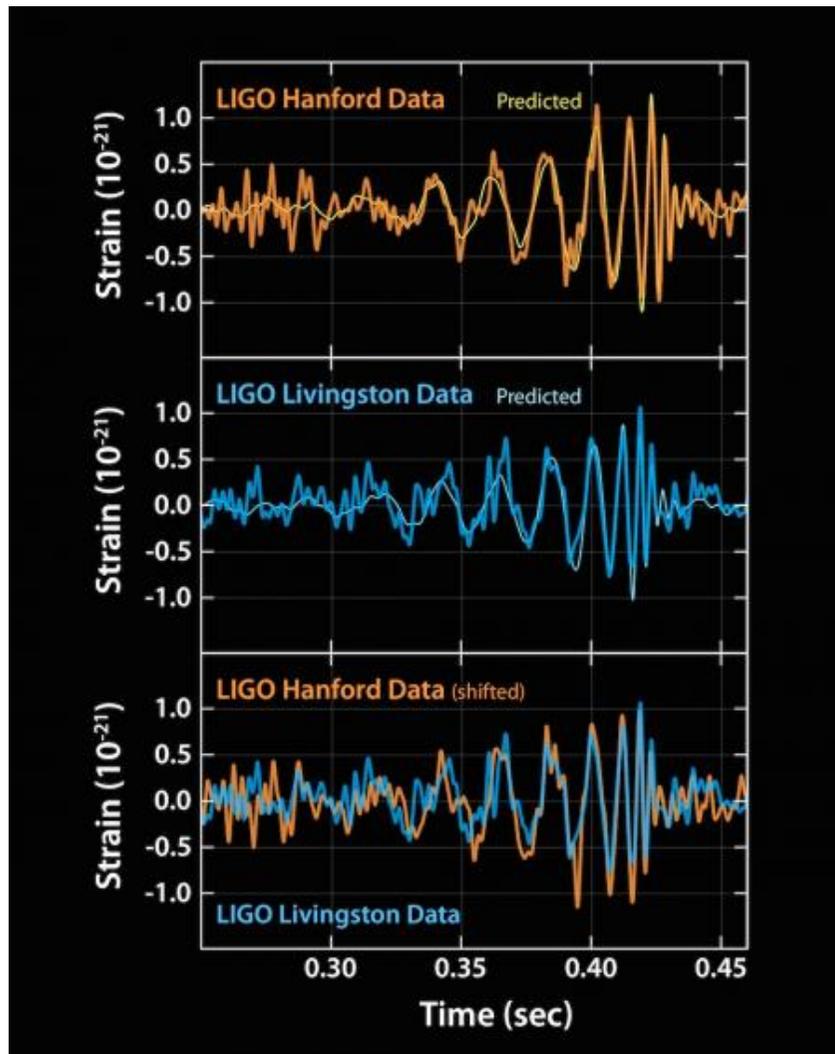
話の構成

1. 重力波初観測
2. 観測の意義
3. ブラックホール連星の形成機構
4. シミュレーションによる研究

重力波初観測

- 先週の木曜 10:30 (東海岸時間) LIGO グループ発表
“We have detected gravitational waves. We did it!”
- どこにあるどういう天体だったか
 - 13億光年先
 - 太陽質量の 36 倍のブラックホールと 29 倍のブラックホールが合体、62 倍のブラックホールになった (3 太陽質量が重力波のエネルギーになった)

検出された波形



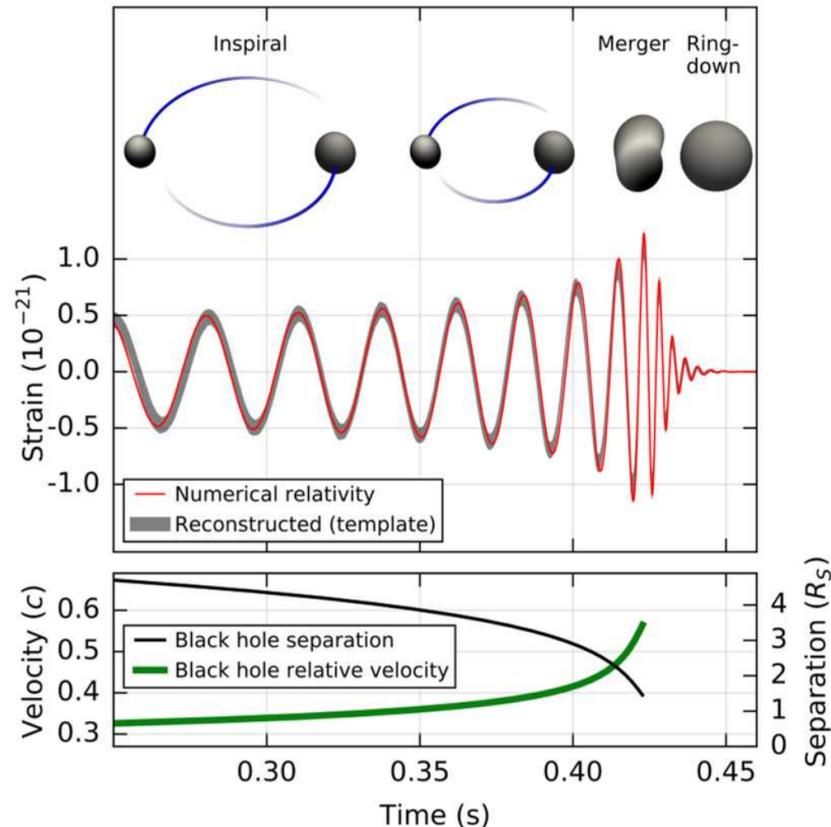
横軸: 時間

縦軸: 歪み (「空間の歪み」)

最大振幅: 10^{-21}

3000km 離れた2つの測定器
(基線 4km のマイケルソン・
モーレー干渉計) で同じ波形
観測

LIGO が捉えたもの



Inspiral: 合体直前、重力波放出によって軌道が近付き、周期が短く、振幅が大きくなる
合体の瞬間: 大振幅、高周波数の波

リングダウン: 1個のブラックホールになってからの時空の振動

シミュレーションで予測されていたものと非常に良く一致:
逆に合計の質量・質量比、距離を決められる

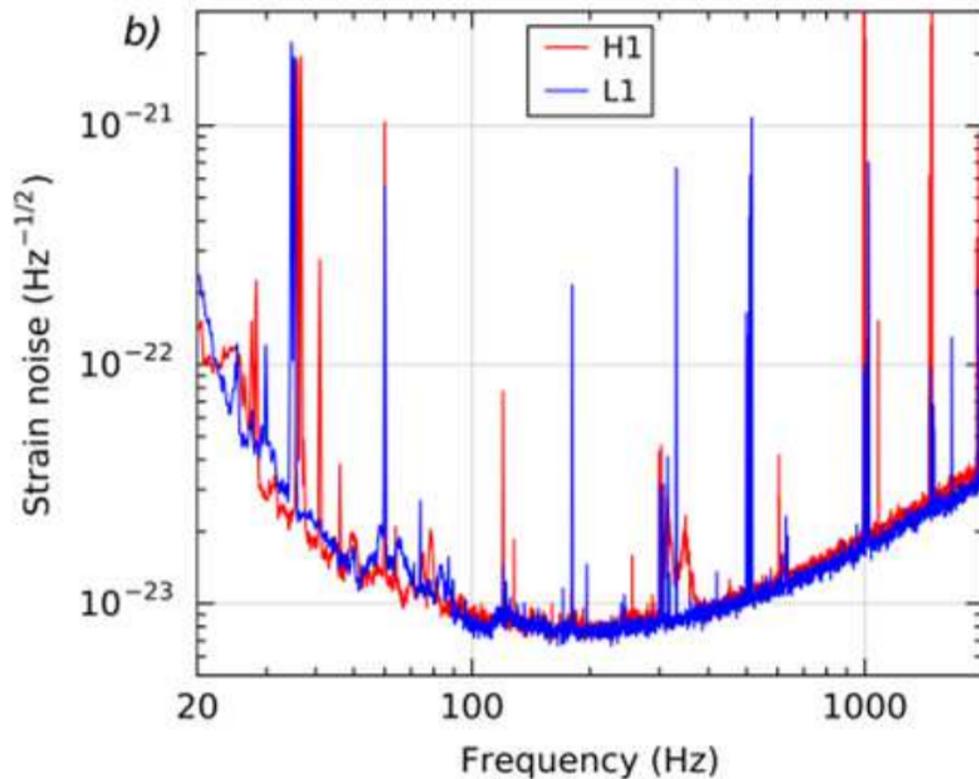
重力波検出の意義と今後の研究の方向

- 本当に重力波が世界で初めて検出された
 - 一般相対性理論が本当にそこまで正しいことの完全な証明 (線型の範囲で正しい代替理論はすべて否定されたといっている)
 - より精密な重力理論、ブラックホールの性質の研究への道 (スピン、電荷の影響他)
- 36 太陽質量と 29 太陽質量のブラックホール同士の合体だった
 - 全く予想外
 - 見つかると思っていた/見つけようとしていたもの: 連星中性子星の合体 (戦略分野5でもずっとそれを、、、)

何故予想外だったか？

- 中性子星は多数見つかっている。超新星爆発の後に普通にできる(かに星雲パルサー: 1054年の超新星爆発でできた)。球状星団1つだけでその中に数十から数百個ある。
- 中性子星連星もいくつかは見つかっている。(連星パルサー)
- ブラックホールは10太陽質量を確実に超えるものは見つかっていなかった。ブラックホール連星はもちろん見つかっていない。
- なお、100万太陽質量を超える大きなブラックホールは多数見つかっている。これらは銀河中心にある。我々の太陽系の中心:400万太陽質量のブラックホール。

とはいえ理論的には、、、



LIGO の感度: 100Hz
あたりで最も高い
今回のイベントはちょう
どその辺
イベントの重力波強度:
距離が同じなら質量に
比例。

宇宙の体積あたりのイベントレートが同じなら、(感度が落ちない範囲で) 重いものは質量の3乗に比例して検出レート上がる。

ブラックホール合体が多いわけではない。中性子星合体の1/1000 より多い、という程度。

これから期待されること

- 非常に沢山のイベントが検出される。年に 1000 個を超えるかも？
- 観測される質量の上限: 100-200 太陽質量。そこから上は LIGO は感度がない。
- 中性子星合体もそこそこの数検出されるはず

つまり: (200 太陽質量以下に限ると) 宇宙のどこでいつどう
いう質量のブラックホールや中性子星が合体したか、が大体わ
かる。

言い換えると:

メカニズムも距離も謎なガンマ線バーストや、Kepler 衛
星まで数が少なかった系外惑星に比べると、突然膨大な観
測情報がやってくる。

期待できるかどうかまだ分からないこと

- 対応天体 (特に可視光で見える天体) の同定
 - 今回ガンマ線バーストはうかっている (かもしれない)

今後の研究課題

- 観測: 最重要なのは、より長波長で感度があるミッションの加速。計画は LISA とかあるけど20年先に必要な感度より5桁上を実現することになってる。
- 理論、シミュレーション: 膨大な数観測されるであろう数十太陽質量ブラックホール合体の「理解」

理論的理解の目標

- それらのブラックホールがどのようにして形成され、連星になり、合体したか
- それらのブラックホールはより大きなブラックホール形成にどう寄与しているか、あるいはしていないか

を理解すること。

もうちょっと具体的には

- 形成チャネルの理論的検討
- シミュレーションによる各形成チャネルから期待できるイベントレート、質量分布、イベントレートの年齢依存(赤方変移依存)の推定
- 形成チャネルの検証

形成チャネルの例

- 大質量星が始めから連星で生まれ、連星を壊すことなくそれぞれがブラックホールになり、宇宙年齢以内に合体
- 若い、星の数密度が高い星団の中で、3体相互作用や2体の非弾性相互作用でブラックホール連星やブラックホールと大質量星の連星が形成、ブラックホール連星に進化。そのまま重力波で合体
- 球状星団の形成直後に同様なメカニズムでブラックホール連星形成、星団から打ち出されたあと、重力波で次第に軌道が縮んで合体
- その他エキゾチックなメカニズムも提案されている

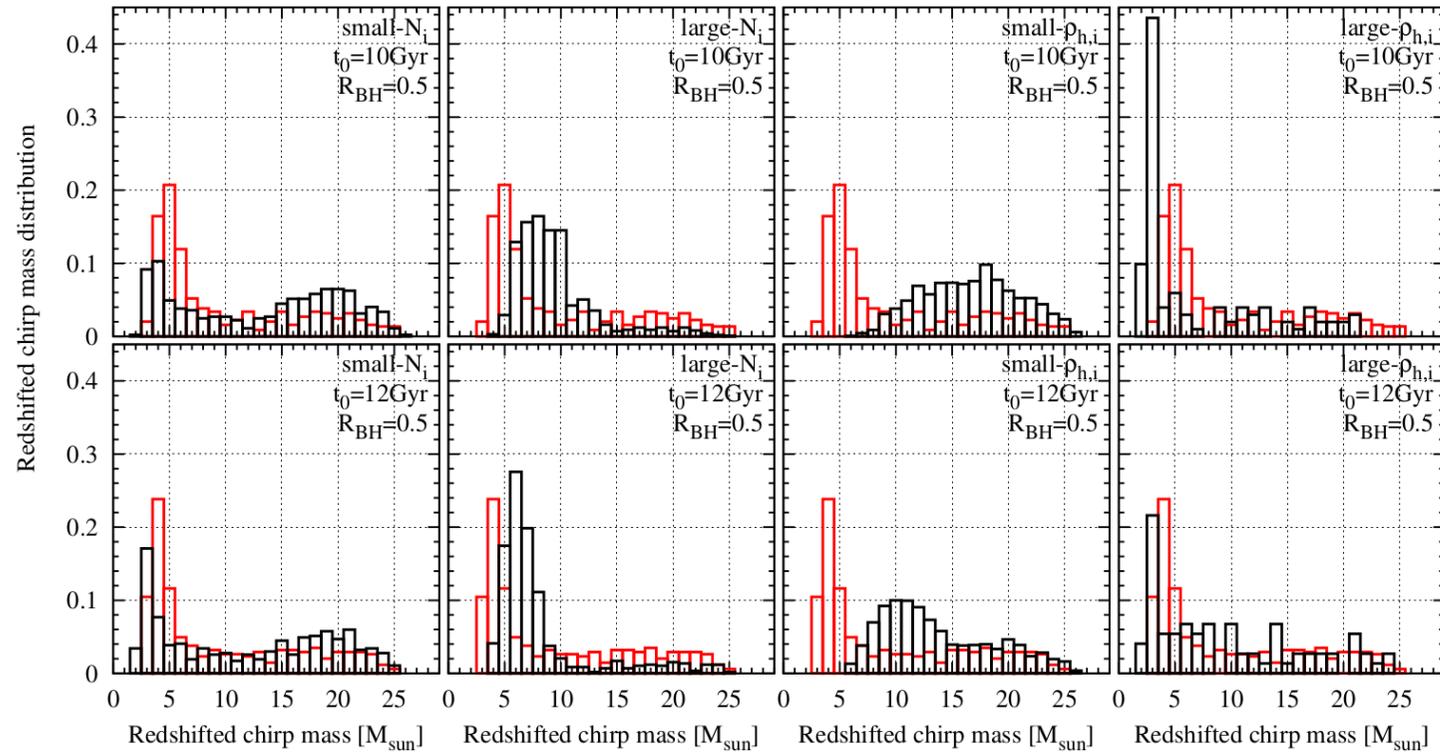
シミュレーション計算の例

谷川 (2015/9 まで粒子系シミュレータチーム) 2013

Dynamical evolution of stellar-mass black holes in dense stellar clusters: estimate for merger rate of binary black holes originating from globular clusters

- 球状星団の中での恒星進化、ブラックホール形成、ブラックホールと恒星の3体相互作用、連星形成を N 体シミュレーションで調べた

結果の例



モデルの仮定により色々な分布が、、、
もうちょっとモデルを精密にして色々調べる必要あり。

他にも理論としてすべきことは 沢山ある、

特に重要なのは

- 大質量星の形成
- 大質量星の進化
- ブラックホール形成につながるような (failed) supernova のモデル計算

まとめ

- 重力波が検出された。
- かなり予想外の、ほぼ 30 太陽質量のブラックホール2つの合体だった
- 理論・シミュレーション研究としては、何故そういうものが起こるか、の検証が急務