

TAOによる重力波放出源の 光学対応天体の追跡調査

広島大学宇宙科学センター

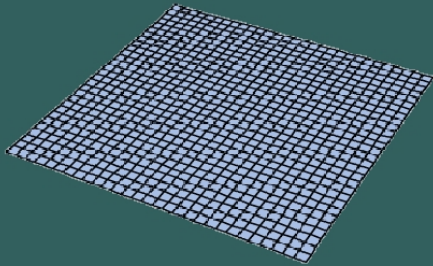
吉田道利

J-GEMチーム

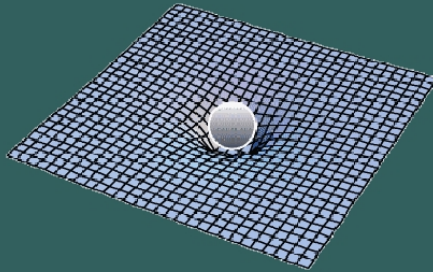
重力波とは何か？

- 一般相対論によれば、質量を持つ物体は空間をゆがめる。その物体が加速度運動をすると、周りのゆがんだ空間が波のように広がる。

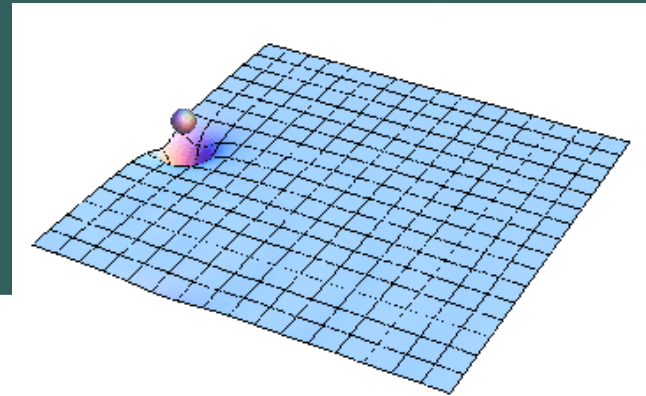
平坦な空間



星の重さで歪んだ空間



重い星が運動して重力波発生
(例：連星中性子星)



重力波のイメージ

重力波の直接検出

- 一般相対論の検証
- 強い重力場での物理
- 重力波天文学の創生

重力波の直接検出: GW150914

- 2015年9月14日 UT
- LIGOによる重力波の直接検出
- $30M_{\odot}$ — $30M_{\odot}$ BH合体 @ $\sim 400\text{Mpc}$
- $\sim 3M_{\odot}$ が重力波として放出
 - ピーク重力波luminosity $\sim 3.6 \times 10^{56} \text{ erg/s}$

LIGO アメリカ

4km × 4km 重力波望遠鏡 (2015年末から運用開始)



LIGO ハンフォード(ワシントン州)



LIGO リビングストン(ルイジアナ州)

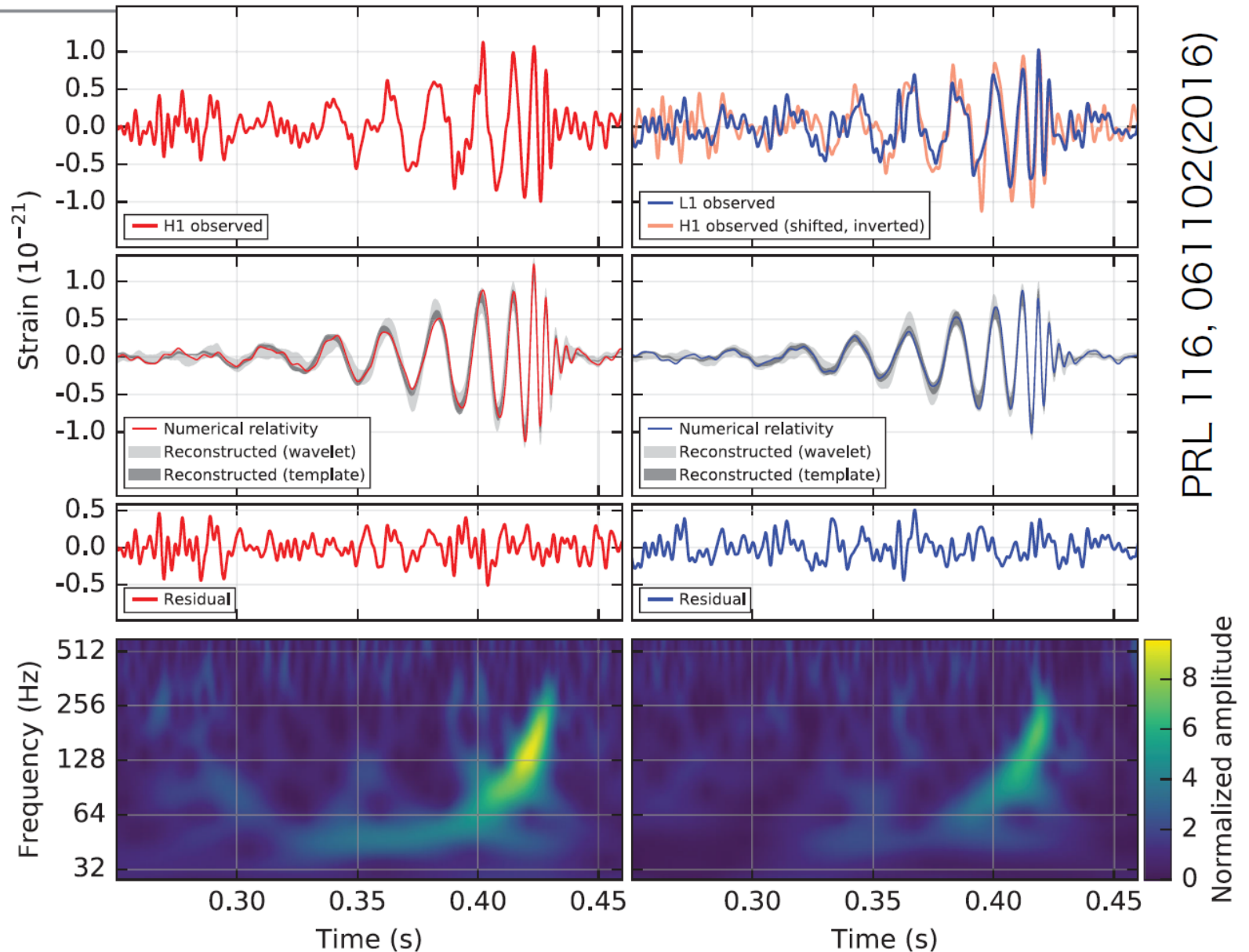
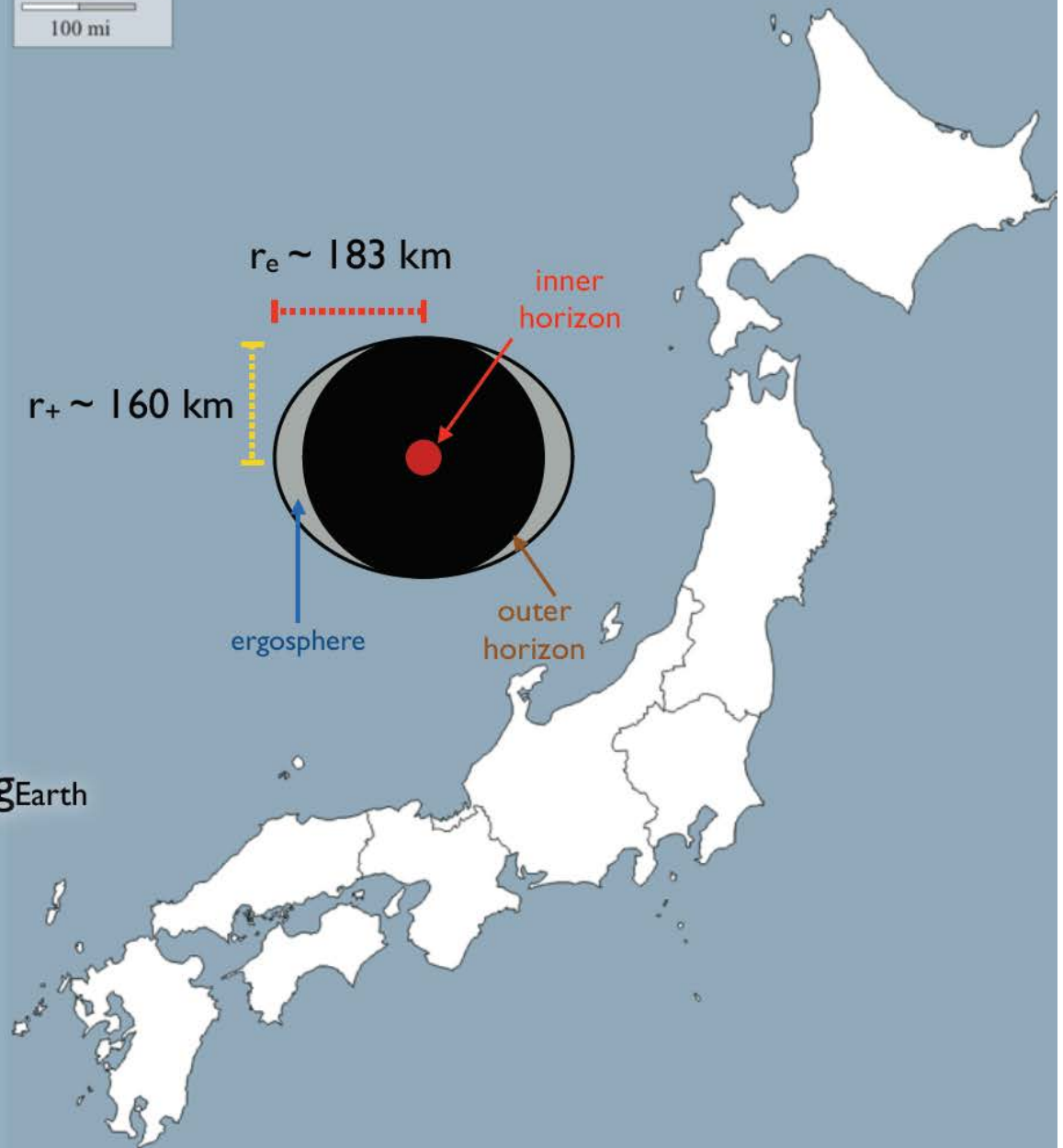


FIG. 1. The gravitational-wave event GW150914 observed by the LIGO Hanford (H1, left column panels) and Livingston (L1, right column panels) detectors. Times are shown relative to September 14, 2015 at 09:50:45 UTC. For visualization, all time series are filtered with a 35–350 Hz bandpass filter to suppress large fluctuations outside the detectors’ most sensitive frequency band, and band-reject



- $M_f \sim 62 \pm 4 M_\odot$
- due to spin $\sim 4 M_\odot$
- 20 million Earths
- $f_{\text{rot}} \sim 100 \text{ Hz (G}_2)$
- $f_{22} \sim 250 \text{ Hz (B}_3)$
- $\tau_{22} \sim 4 \text{ ms}$
- Surface gravity $\sim 2 \times 10^{10} g_{\text{Earth}}$
- Equatorial speed $\sim 0.4 c$
- Area $\sim 3 \times 10^5 \text{ km}^2$



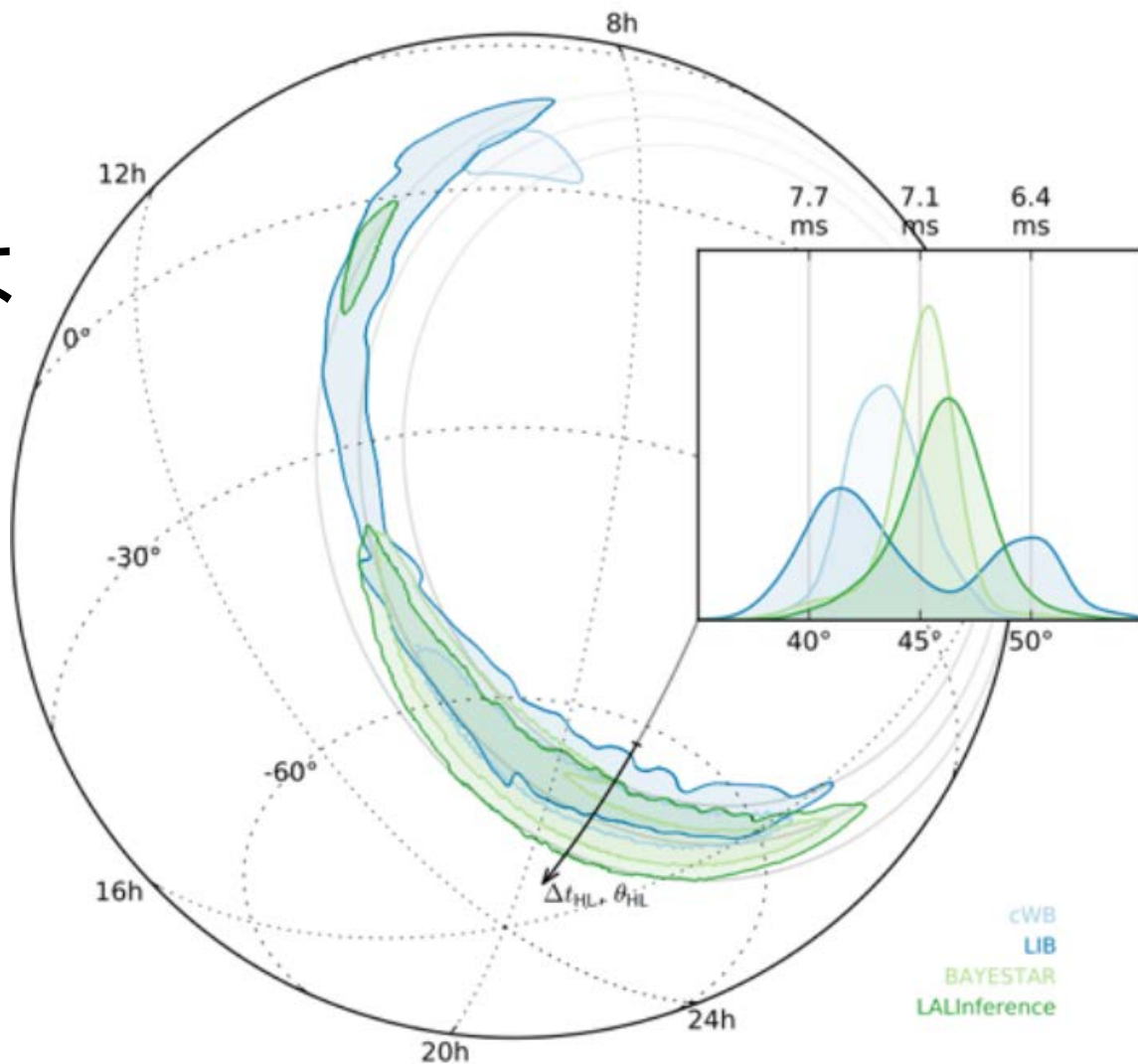
ただし、

位置の不定性は
とても大きい
～600平方度

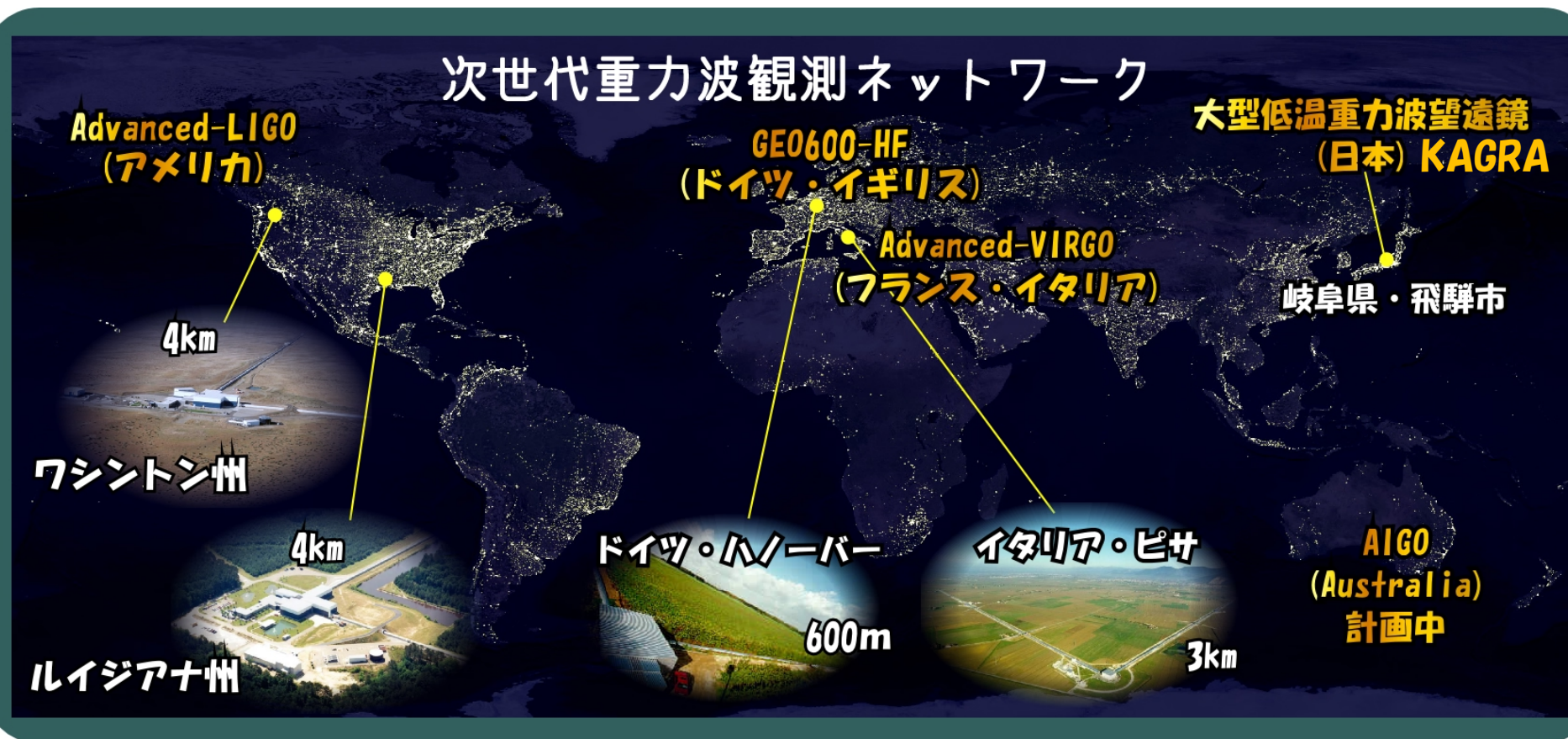
どの天体(銀河)に
付随する現象なの
か、不明



位置決定精度を上げ、電磁波対応現象を
同定することが必須！

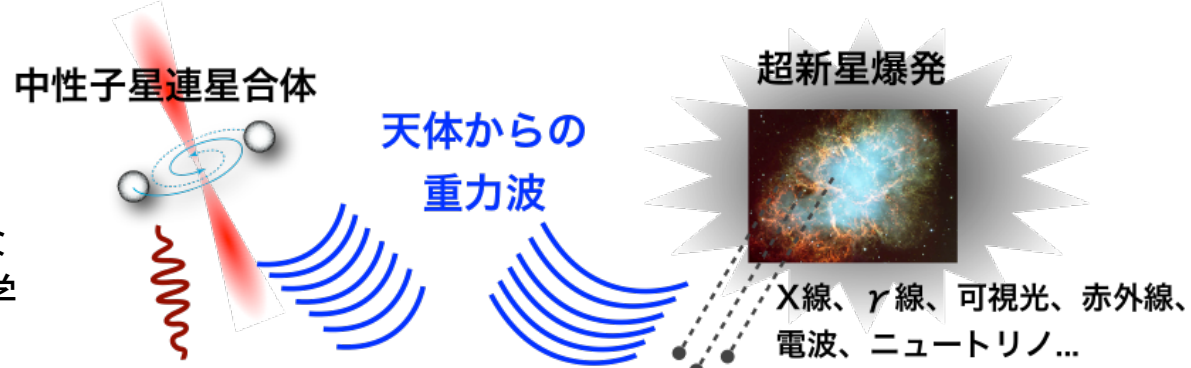


重力波だけで位置精度を上げる → 多地点観測網



天体現象との対応をつける →マルチメッセンジャー観測

新学術領域
「重力波天体の多様な
観測による宇宙物理学
の新展開」概念図



大立体角の連続モニター
計画研究A01

広視野望遠鏡によるフォローアップ
計画研究A02

広視野赤外カメラ シュミット望遠鏡

海外の重力波検出器

KAGRA

重力波のデータ解析
計画研究A04

理論予想
計画研究A05

フォローアップ観測

X線望遠鏡

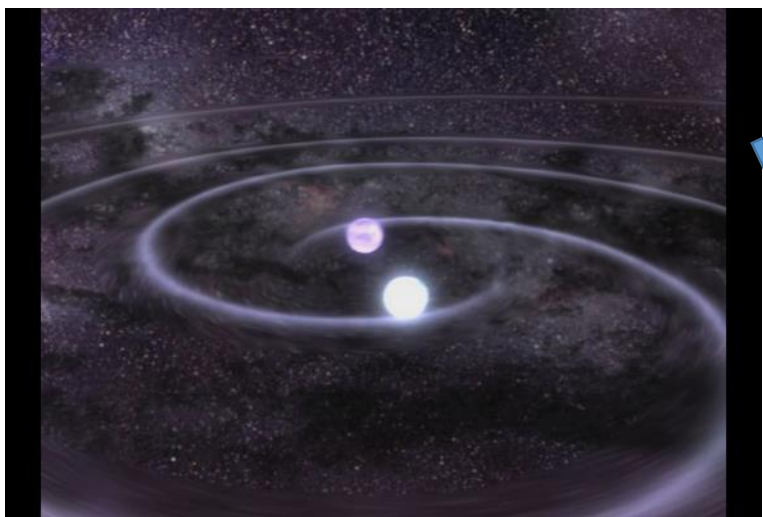
地上の光赤外望遠鏡

ニュートリノ検出

計画研究A03

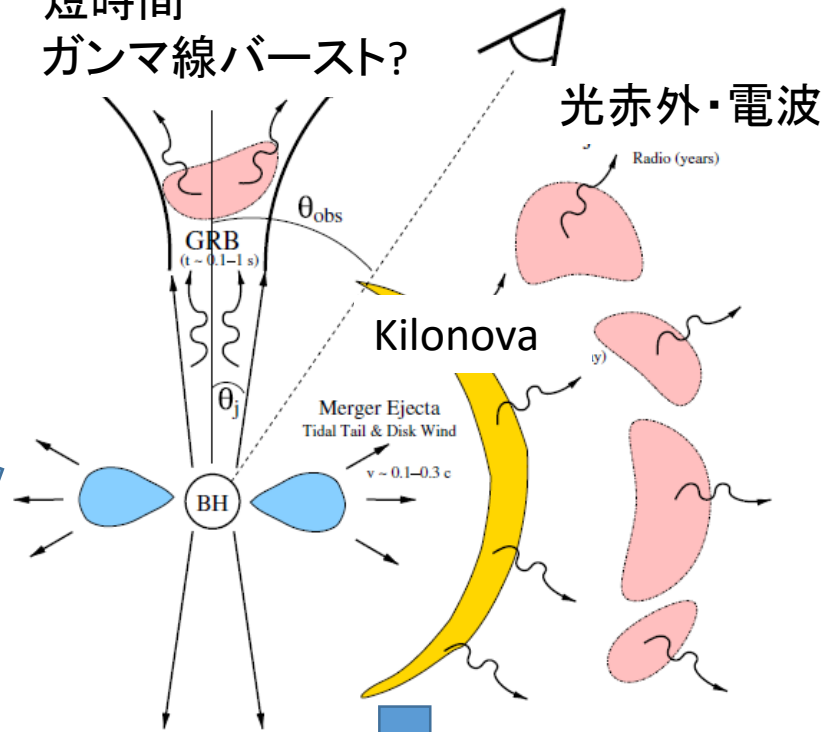


電磁波対応天体の有力候補 Kilonova

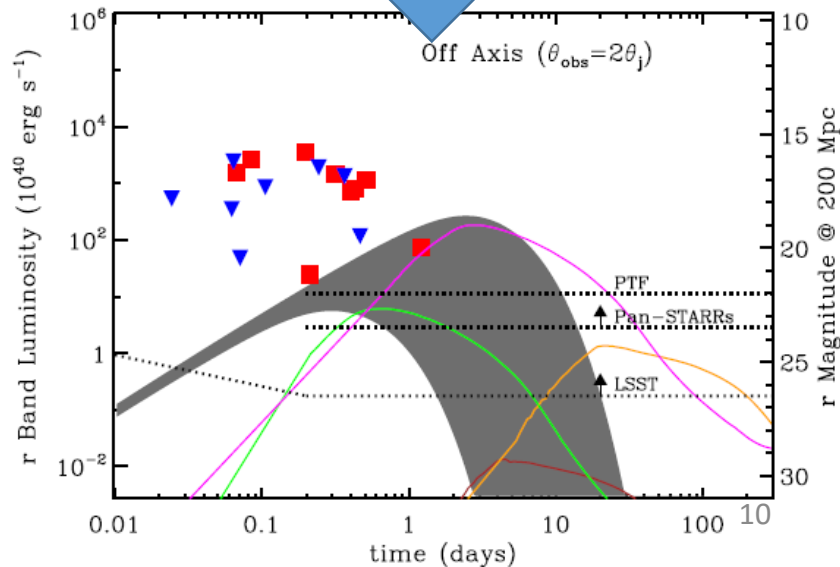


The most promising GW sources → NS-NS merger

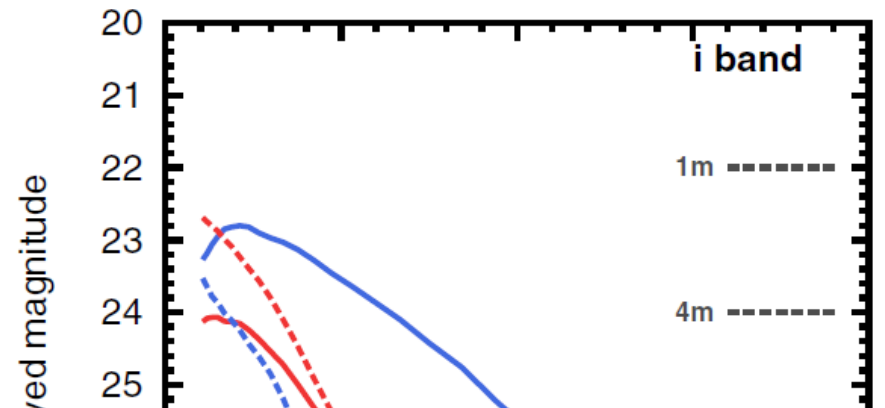
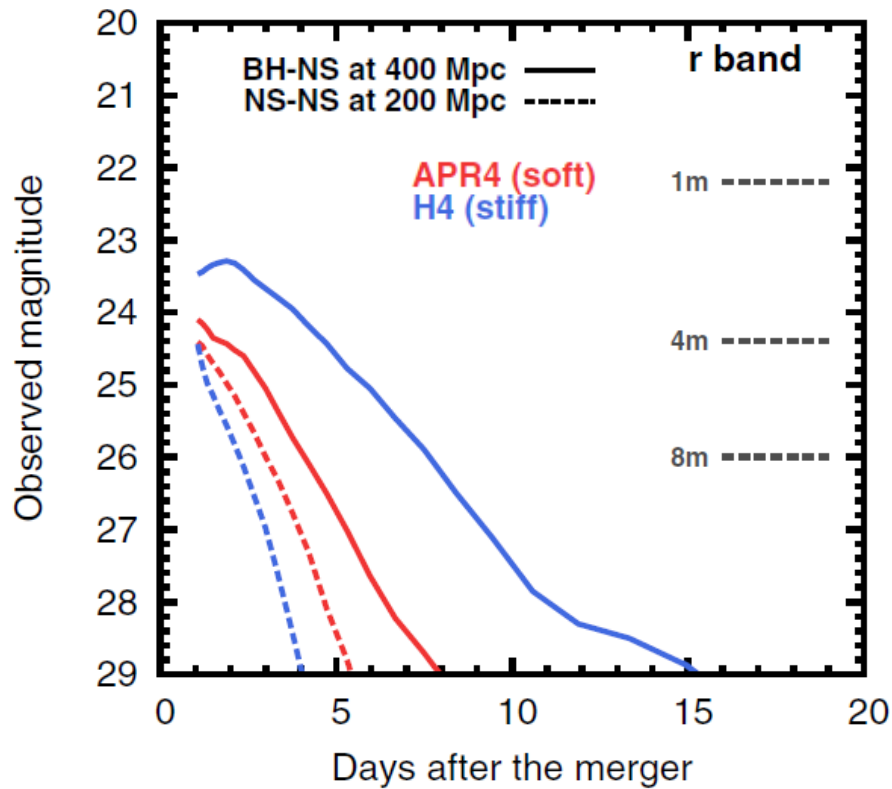
短時間
ガンマ線バースト?



Metzger & Berger 2012

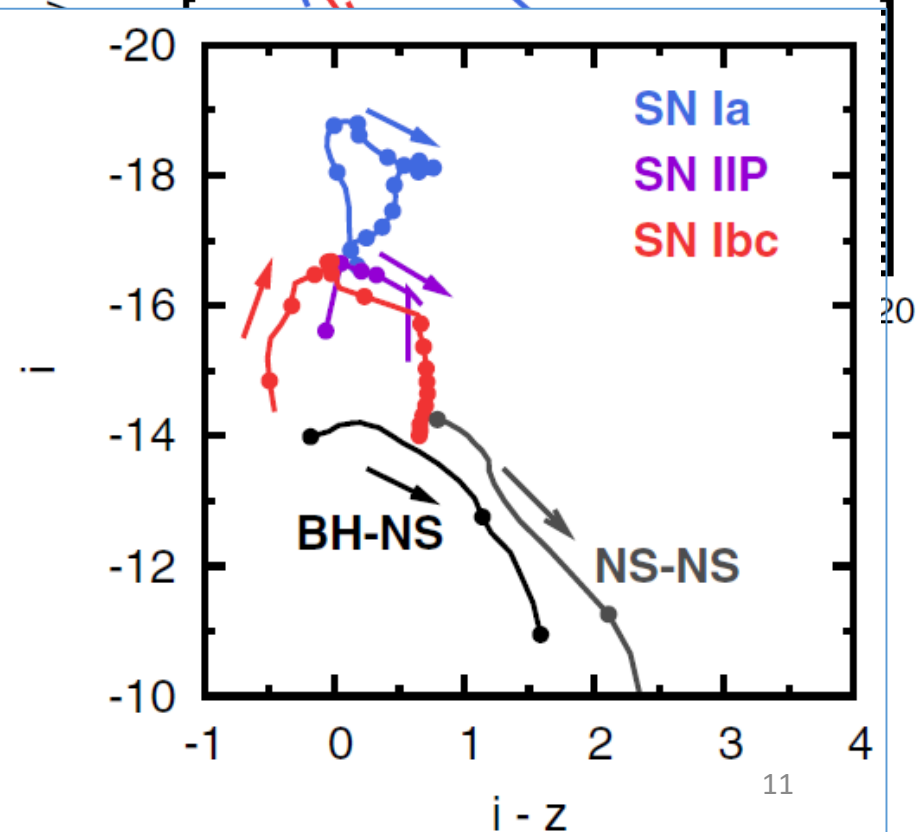


Kilonova model (Tanaka+ 2014)



ブラックホール・中性子星合体 400Mpc
中性子星・中性子星合体 200Mpc

カラー進化でSNと弁別できる



重力波追跡観測網J-GEM

- Japanese collaboration of **G**ravitational wave **E**lectro-**M**agnetic follow-up observations
- 新学術領域「重力波」A02の拡張
- 日本の光赤外電波望遠鏡を結集

J-GEM の概要

日本および世界に散らばる日本の望遠鏡群のネットワーク
重力波対応現象の探索

主な観測能力:

5 deg² opt. imaging w/ 1m
1 deg² NIR imaging w/ 1m
opt-NIR spectroscopy w/ 1–8m
opt-NIR polarimetry



- 1m 木曾シュミット望遠鏡(東大)
TOMOEカメラ→ 20平方度
- 1.5m かなた望遠鏡(広大)
- 50cm MITSuME望遠鏡(国立天文台)
- 91cm 広視野赤外線望遠鏡
(国立天文台)
- 2m なゆた望遠鏡(西はりま)
- 32m 電波望遠鏡(山口大)



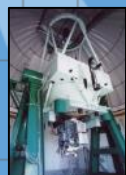
50cm 望遠鏡
(広島大学 2016)



3.8m 望遠鏡
(京都大学 2018)



すばる望遠鏡



IRSF (名古屋大学)
@ 南アフリカ



MOA-II (名古屋大学)
@ ニュージーランド

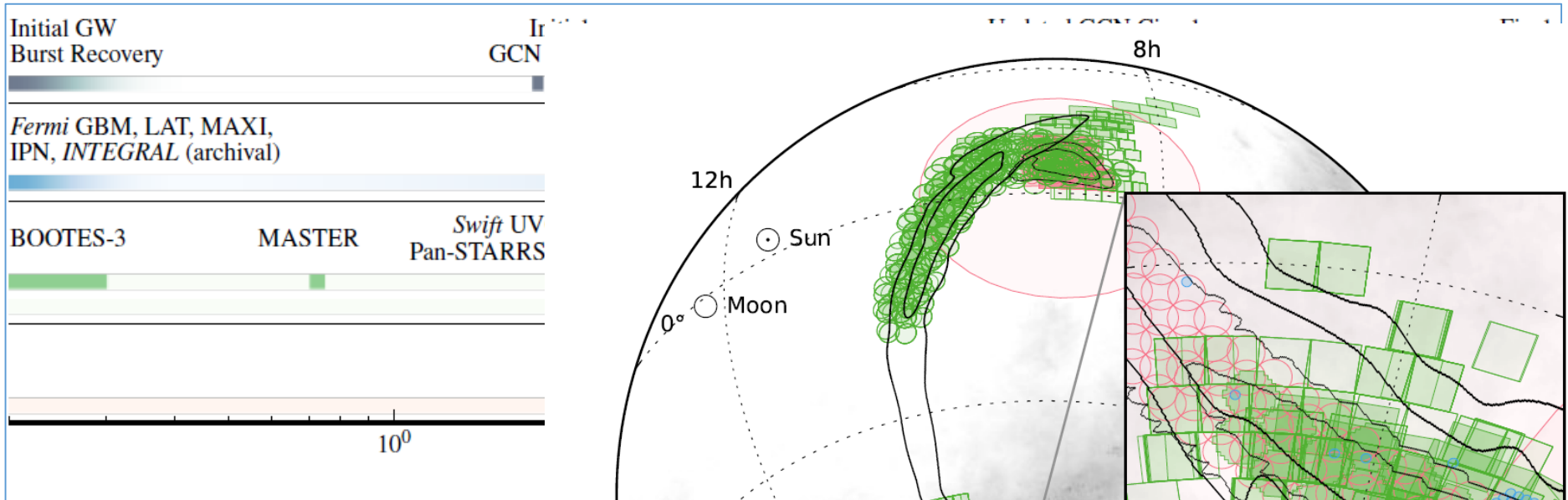
TAO
(東京大学 2018)

miniTAO (東京大学)
@ チリ

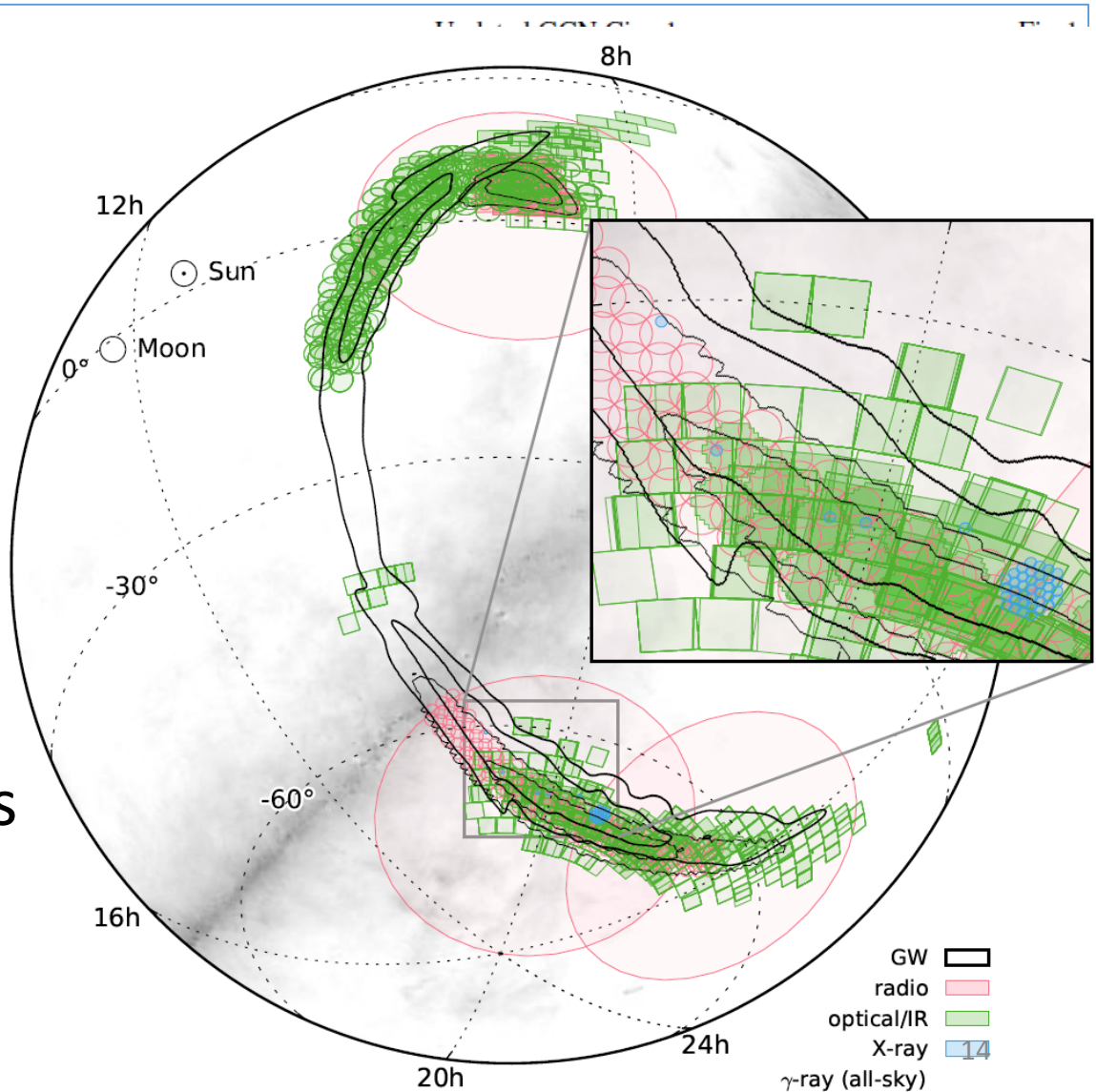


GW150914: 世界の電磁波フォローアップ

Timeline of EM follow-up of GW150914

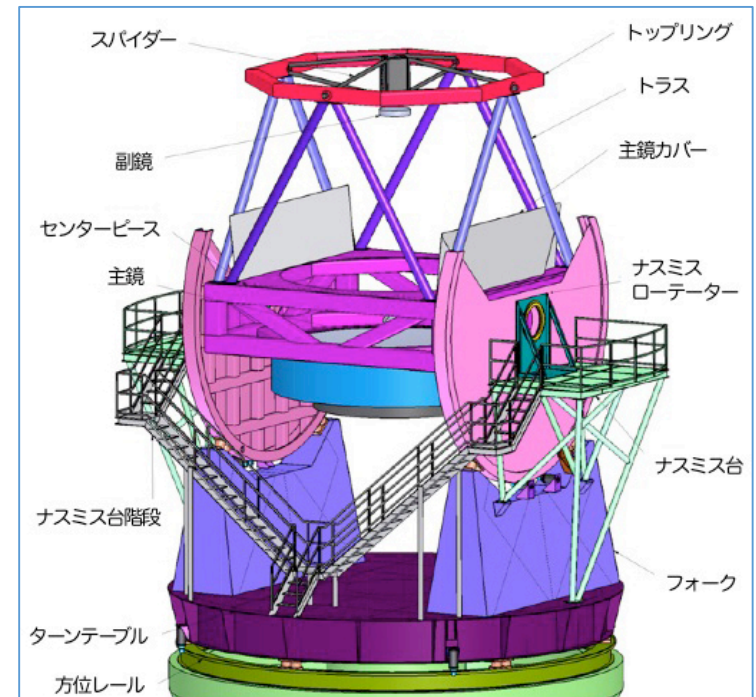


Skymap covered by the EM teams



Performance of TAO

- TAO 6.5m
- 視野 **最大25分角 ϕ** \rightarrow 0.14平方度
 - SWIMSは9.6分角
- 近赤外限界等級 (点光源@SWIMSの場合)
 - **撮像 (2分 S/N=5)**
 - **J=23.1、H=22.8、Ks=22.8**
 - **撮像 (10分 S/N=5)**
 - J=23.9、H=23.6、Ks=23.6
 - **分光 (1時間、S/N=5)**
 - **J=21.4、H=20.7、Ks=20.7**
- IFU機能@SWIMS
 - 18.4" \times 13.7" with 0.5" pitch



TAO時代の重力波検出

- 重力波望遠鏡の進展
 - LIGO 2017年にフル性能
 - Virgo 2018～2019年にフル性能
 - Kagra 2018年稼働 2020年(?)フル性能
- 重力波位置決定精度 (LVK 4台フル稼働)
 - **～10平方度 for NS-NS @ 180 Mpc** (J.Veitch+ 2012)
 - **Kagraが鍵** (Kagraなしだと>30平方度)
- TAOが本格稼働するころは、重力波は10平方度以下の精度で位置決定される！(かも)

TAOによる重力波対応天体追跡1 —近赤外広視野サーベイ—

- 25分角φ視野

～100ポインティング×2分露出

～10平方度(視野オーバーラップ込) @ ～8時間 @ Jバンド

限界等級: 23.1等 @ Jバンド

- 10分角視野 (SWIMS)

～400ポインティング×2分露出

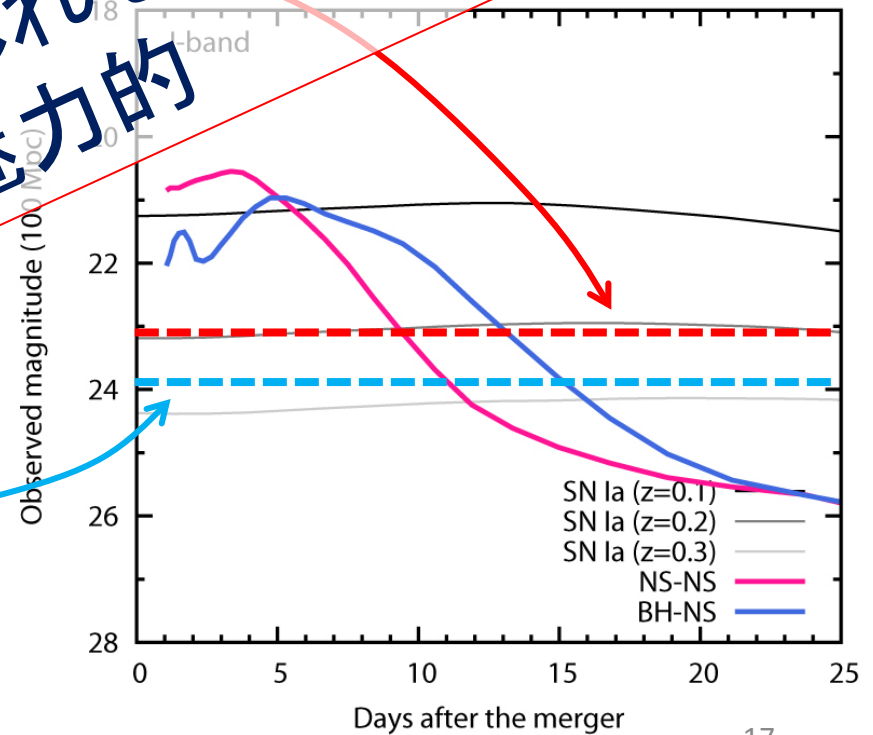
～8平方度 @ ～8時間 @ Jバンド

近赤外光度変化追跡観測

10分露出×N

限界等級: 23.9等 @ Jバンド

～weeksの追跡が可能かも



TAOによる重力波対応天体追跡2

—近赤外分光フォローアップ—

- 分光フォローアップ
 - 対応天体の分光観測
 - 近赤外分光
 - 1時間積分 限界等級 $J=21.4$ 等

- 母銀河の分光観測

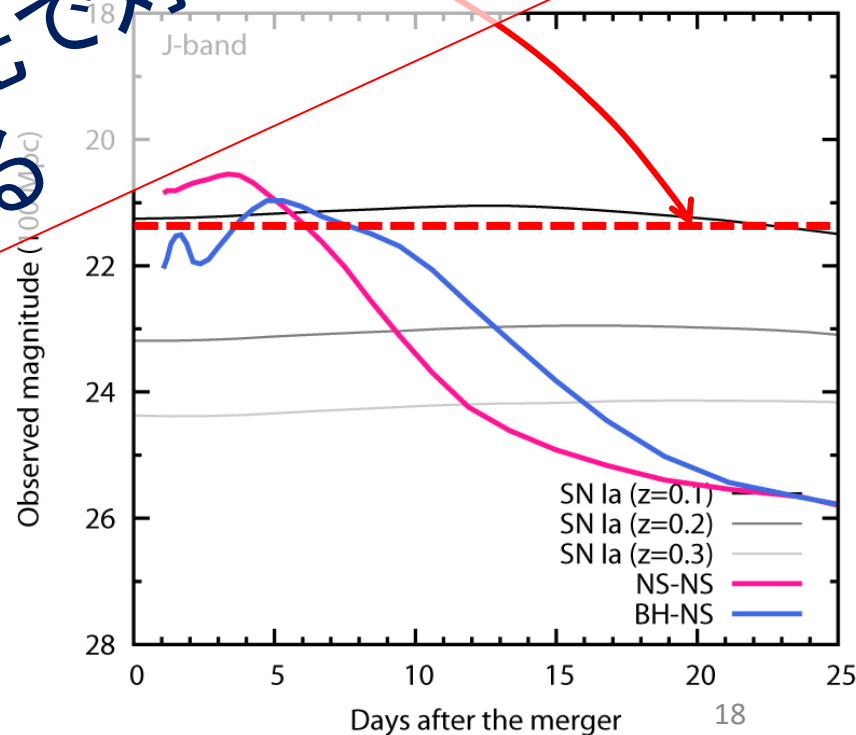
- 可視-近赤外分光

- 1時間積分 $J < 21.4$ 等

- 8時間積分 $J < 22.2$ 等

- 母銀河の正体に迫る

J-GEMや世界のフォローアップグループと協力して、赤外分光で対応天体と母銀河の正体に迫る



まとめ

- 重力波は直接検出された。しかし、天体現象との関係は不明
- マルチメッセンジャー観測により重力波に対応する天体現象を特定し、発生環境を探ることが必須
- TAO時代には重力波の位置決定精度は～10平方度
- TAOは大口径(6.5m)かつ広視野(25分φ)を活かして、重力波対応天体探査に威力を発揮 \leftrightarrow
ULTIMATE-Subaruとの連携(北天南天広視野赤外)
- 優れた赤外性能により、候補天体の近赤外線測光・分光フォローアップに期待