


重力波の初検出(GW150914)の持つ意義 - 初代星起源説と電磁波対応天体 -



重力波天体の多様な観測による宇宙物理学の新展開

New development in astrophysics through multimessenger observations of gravitational wave sources

田中 貴浩
(京大院理)

重力波の初検出(GW150914)の持つ意義 - 初代星起源説と電磁波対応天体 -

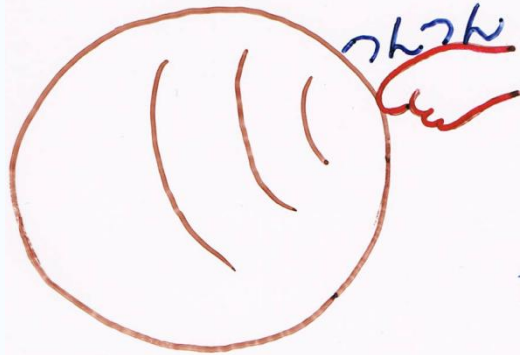
このお題は、中村卓史さんから頂いたものです。最初はこのインフォーマルミーティングで中村さんが話す予定でしたが、私が学会に行く予定であると話したところ、「それじゃあ話してきて」となった次第です。

しかしながら、中村さんから発表ファイルをもらって発表するわけではないので、間違ったことをトラペに書いていたら完全に私の責任です。



一般相対論～時空の曲がりとして重力を記述

その結果



時空の曲がり～潮汐力が波として伝わる



重力波

ニュートン重力にはなかったまったく新しい現象

Einsteinがその存在を予言してからちょうど100年

ただし、1916年の重力波論文には間違いがある

重力波検出

- ・ 共振型重力波アンテナ
 - Joseph Weber
 - 1969年に重力波検出をPRLに発表した^が、他の追観測は成功せず。
 - ・ 重力波干渉計
 - アウトライン
 - ・ Rainer Weiss (1972)
 - 40m Caltechプロトタイプ
 - LIGO(1992年にNSFが予算承認、2001年にデータ取得開始)
 - ・ 平川研での共振型
 - (1974年–1993年)
 - ・ 新学術領域(1991年～)
 - 20m Fabri-Perot
 - 100m Delay line
- ↓
- 300m TAMA(2001年に世界最高感度を達成)
 - 20m LISM
 - 100m CLIO
 - 3km KAGRA(2009年にスタートして、iKAGRAが開始目前)

LIGOによる重力波初検出

- 2016年2月11日
日本時間では2月12日0:30から記者会見
- 39日間の観測データを解析、2台の検出器が同時に観測しているデータは16日分
- 2015年9月14日09:50:45 UTCに振幅 10^{-21} の連星ブラックホールからの重力波をS/N~24で検出
- 合体前の質量は $36_{-4}^{+5} M_{\text{太陽}} + 29_{-4}^{+4} M_{\text{太陽}}$
- 合体後の質量は $62_{-4}^{+4} M_{\text{太陽}}$
- 推定される距離は $410_{-180}^{+160} \text{Mpc}$ $z = 0.09_{-0.04}^{+0.03}$
- GW150914と命名された

これが同時に発表された論文で、最初ダウンロードができた人は素早い人に限られていた。



Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

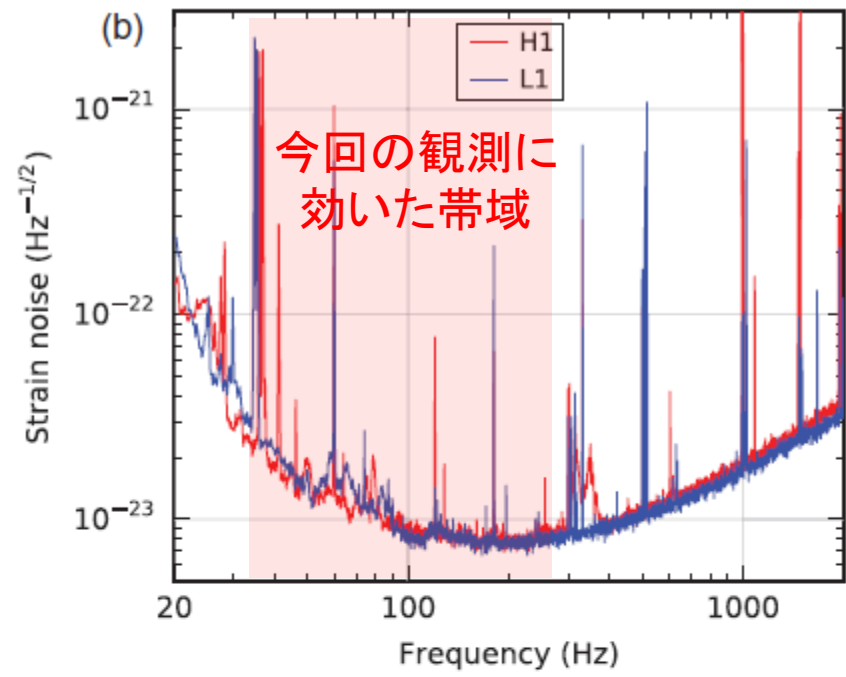
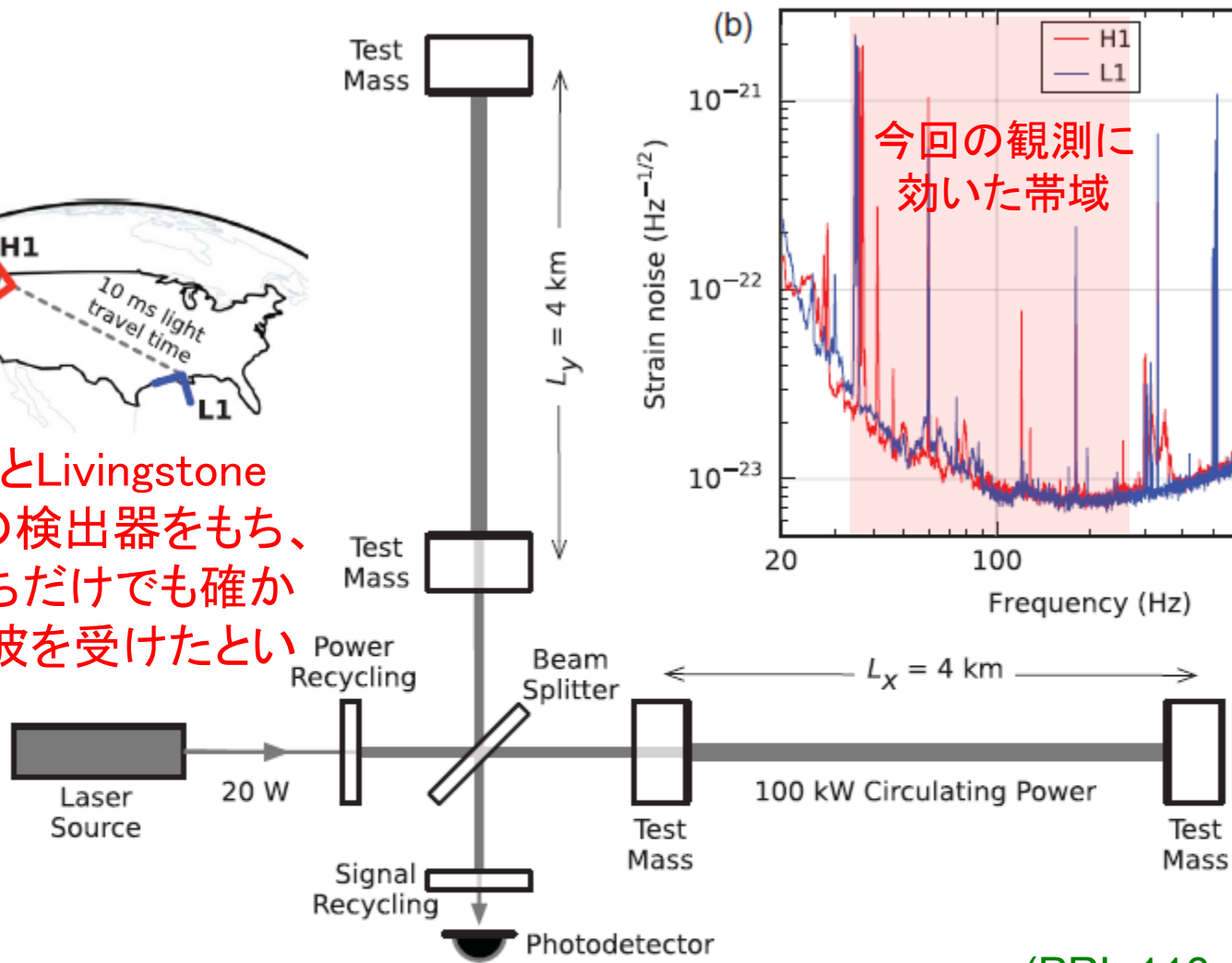
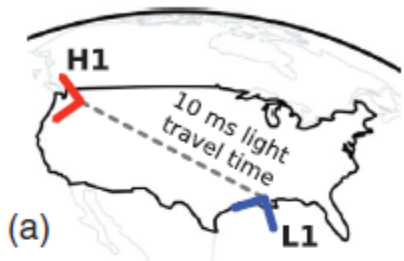
B. P. Abbott *et al.**

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

(Received 21 January 2016; published 11 February 2016)

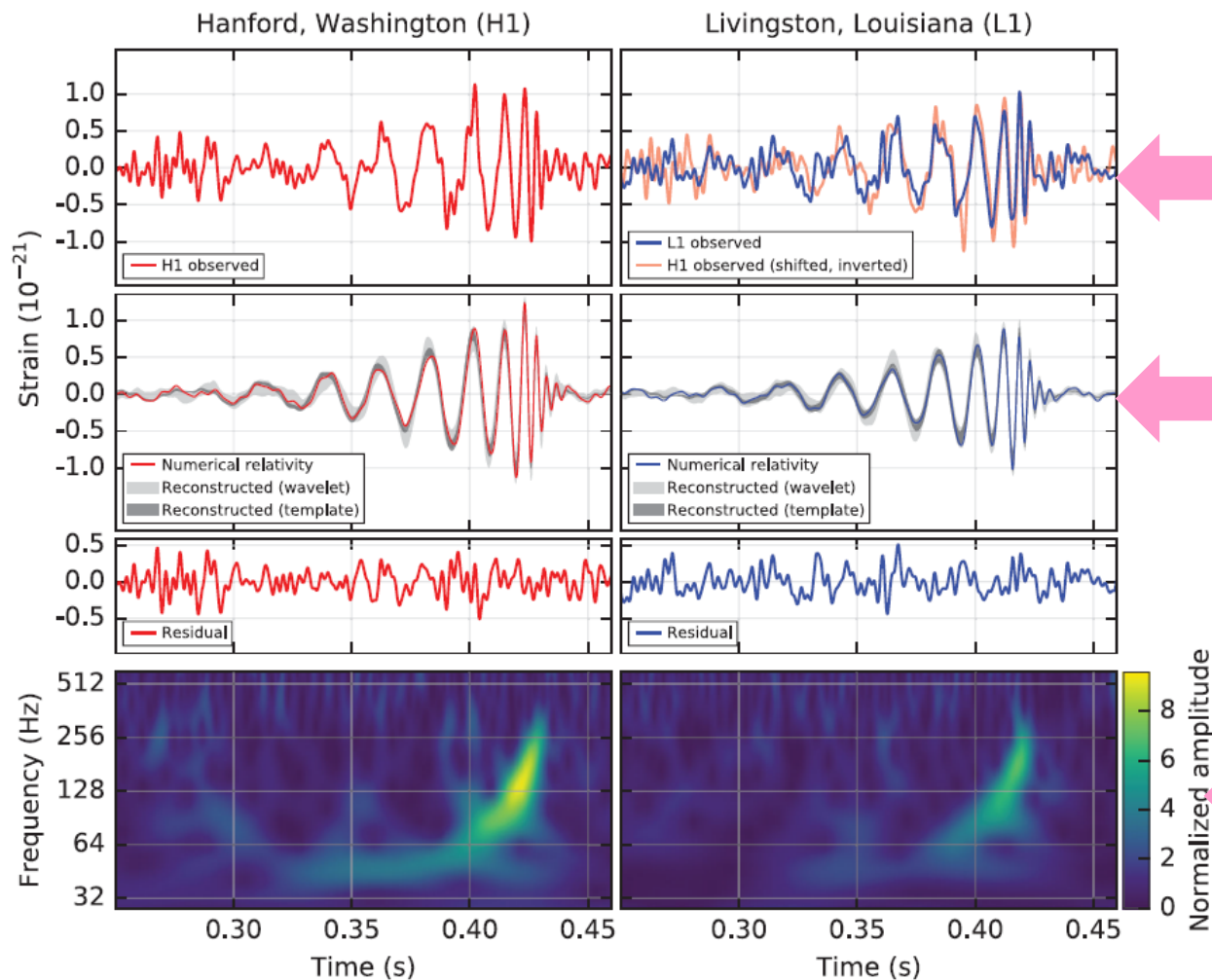
On September 14, 2015 at 09:50:45 UTC the two detectors of the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory simultaneously observed a transient gravitational-wave signal. The signal sweeps upwards in frequency from 35 to 250 Hz with a peak gravitational-wave strain of 1.0×10^{-21} . It matches the waveform predicted by general relativity for the inspiral and merger of a pair of black holes and the ringdown of the resulting single black hole. The signal was observed with a matched-filter signal-to-noise ratio of 24 and a false alarm rate estimated to be less than 1 event per 203 000 years, equivalent to a significance greater than 5.1σ . The source lies at a luminosity distance of 410_{-180}^{+160} Mpc corresponding to a redshift $z = 0.09_{-0.04}^{+0.03}$. In the source frame, the initial black hole masses are $36_{-4}^{+5} M_{\odot}$ and $29_{-4}^{+4} M_{\odot}$, and the final black hole mass is $62_{-4}^{+4} M_{\odot}$, with $3.0_{-0.5}^{+0.5} M_{\odot} c^2$ radiated in gravitational waves. All uncertainties define 90% credible intervals. These observations demonstrate the existence of binary stellar-mass black hole systems. This is the first direct detection of gravitational waves and the first observation of a binary black hole merger.

HanfordとLivingstone
に2台の検出器をもち、
自分たちだけでも確かに
重力波を受けたという戦略。



(PRL 116, 061102(2016))

FIG. 3. Simplified diagram of an Advanced LIGO detector (not to scale). A gravitational wave propagating orthogonally to the detector plane and linearly polarized parallel to the 4-km optical cavities will have the effect of lengthening one 4-km arm and shortening the other during one half-cycle of the wave; these length changes are reversed during the other half-cycle. The output photodetector records these differential cavity length variations. While a detector's directional response is maximal for this case, it is still significant for most other angles of incidence or polarizations (gravitational waves propagate freely through the Earth). *Inset (a)*: Location and orientation of the LIGO detectors at Hanford, WA (H1) and Livingston, LA (L1). *Inset (b)*: The instrument noise for each detector near the time of the signal detection; this is an amplitude spectral density, expressed in terms of equivalent gravitational-wave strain amplitude. The sensitivity is limited by photon shot noise at frequencies above 150 Hz, and by a superposition of other noise sources at lower frequencies [47]. Narrow band features include calibration lines (22, 28, 330, and 1080 Hz), vibrational modes of suspension



35Hz-350Hzの帯域のみに制限し、強いノイズを含む周波数だけを取り除いた結果

数値相対論にもとづく best-fitモデル

時間周波数空間でのパワーでもシグナルが見えている

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 filters to remove the strong instrumental spectral lines seen in the Fig. 3 spectra. *Top row, left*: H1 strain. *Top row, right*: L1 strain. GW150914 arrived first at L1 and $6.9^{+0.5}_{-0.4}$ ms later at H1; for a visual comparison, the H1 data are also shown, shifted in time by this amount and inverted (to account for the detectors’ relative orientations). *Second row*: Gravitational-wave strain projected onto each detector in the 35–350 Hz band. Solid lines show a numerical relativity waveform for a system with parameters consistent with those recovered from GW150914 [37,38] confirmed to 99.9% by an independent calculation based on [15]. Shaded areas show 90% credible regions for two independent waveform reconstructions. One (dark gray) models the signal using binary black hole template waveforms [39]. The other (light gray) does not use an astrophysical model, but instead calculates the strain signal as a linear combination of sine-Gaussian wavelets [40,41]. These reconstructions have a 94% overlap, as shown in [39]. *Third row*: Residuals after subtracting the filtered numerical relativity waveform from the filtered detector time series. *Bottom row*: A time-frequency representation [42] of the strain data, showing the signal frequency increasing over time.

(PRL 116, 061102(2016))

Generic transient search



横軸がシグナルの強さ

縦軸が頻度

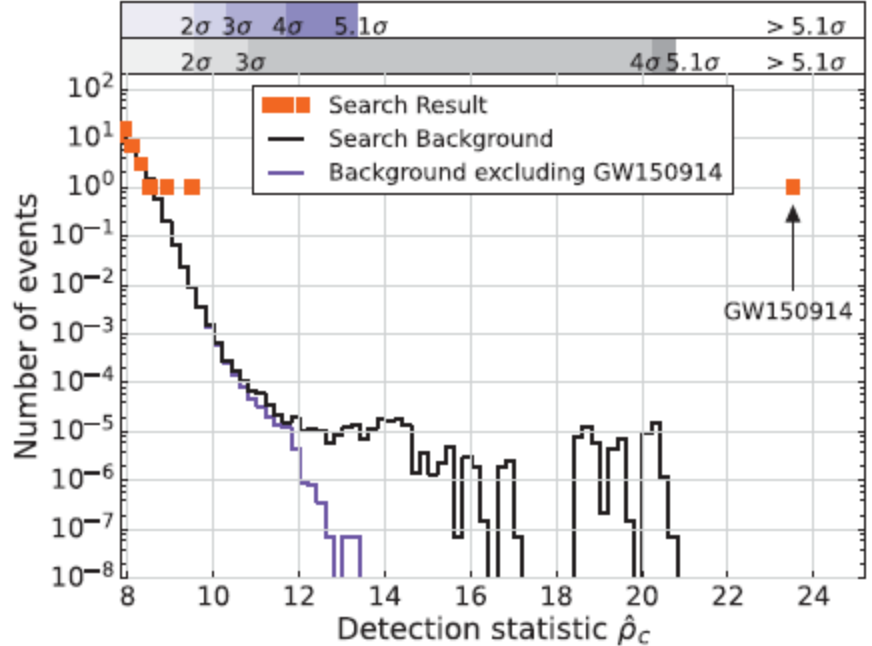
黒線と青線は2台の検出器の相関を取る際に時間をわざとずらして疑似データをつくり、偽のイベントが偶然起こる確率を評価したもの

黒線はGW150914も含むデータ

5. 1σ での検出と報じられているが、この黒線の偶然事象の発生確率にもとづく評価

Along with the primary search (C3) we also show the results (blue markers) and background (green curve) for an alternative search that treats events independently of their frequency evolution (C2 + C3). The classes C2 and C3 are defined in the text. *Right:* The tail in the black-line background of the binary coalescence search is due to random coincidences of GW150914 in one detector with noise in the other detector. (This type of event is practically absent in the generic transient search background because they do not pass the time-frequency consistency requirements used in that search.) The purple curve is the background excluding those coincidences, which is used to assess the significance of the second strongest event.

Binary coalescence search

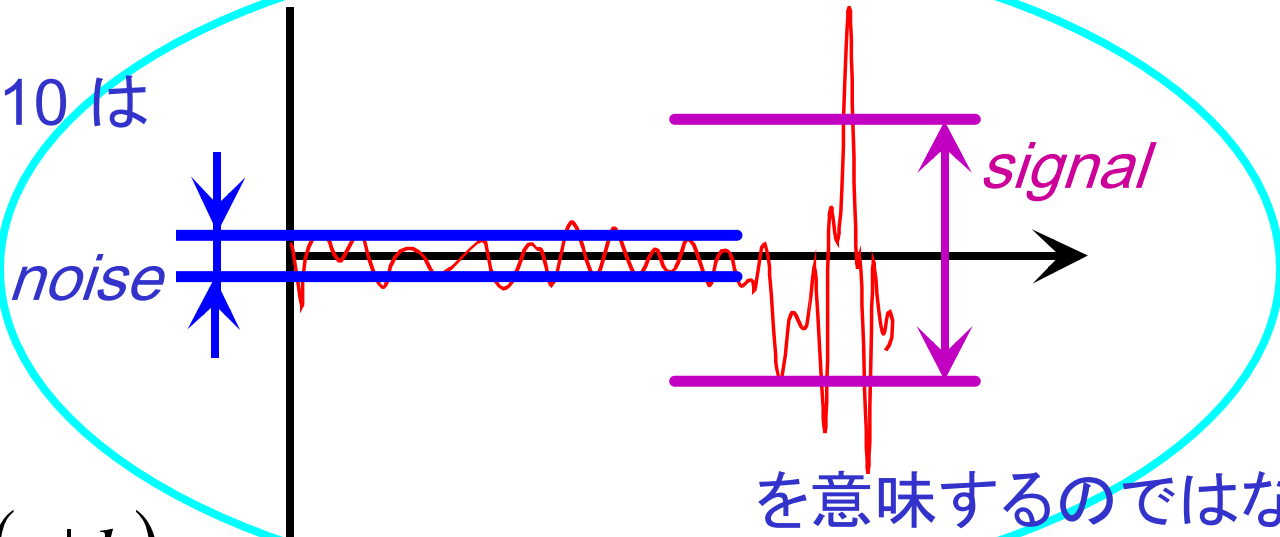


and the binary coalescence search (right). These histograms show the number of background events (black lines) in the search class where the detection statistic is ρ_c and with a bin width of 0.2. The scales on the top give the corresponding noise background. The significance of GW150914 is 5.1σ in the generic transient searches, respectively. *Left:* Along with the primary

正確な理論波形の予言が必要だったのか？

これまで、しばしば、データ解析では noisy data と templates の間の最大相関を探するために理論的な波形の予測が不可欠と説明してきた。

S/N ~ 10 は



$$\frac{(s|h)}{\sqrt{\langle (n|h)^2 \rangle}} \approx 10$$

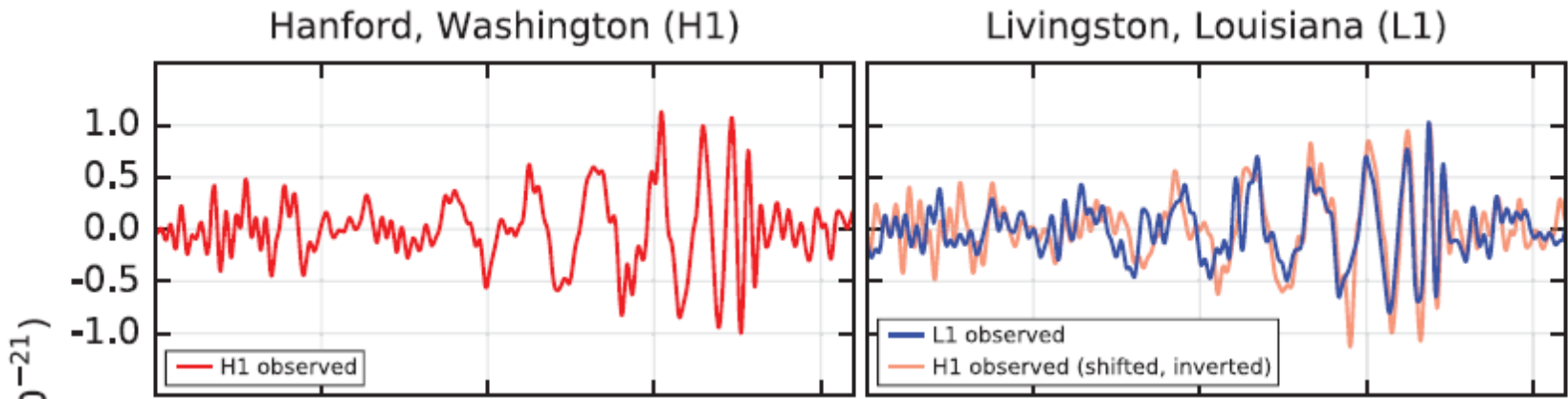
noise

template

$$(s|h) \approx \int \frac{df}{S_n(f)} s(f) h^*(f)$$

Noiseの2点相関のフーリエ成分

しかし、今回のGW150914では相関解析なしにシグナルが見えている



(PRL 116, 061102(2016))

- 初検出のS/Nはthresholdぎりぎりの10程度である可能性が高いと予想されていた。
- それにもまして、合体までに2000回転ほどする中性子星連星合体と10回転ほどしかないBH連星合体では話が大きく異なる。

今回の重力波検出から何が言えるのか

- 重力波の直接検出

- 本当に受かった

- 重力波振幅が 10^{-21} とは4kmの腕の長さに対して1fm以下の変位

- 本当に伝播してきた

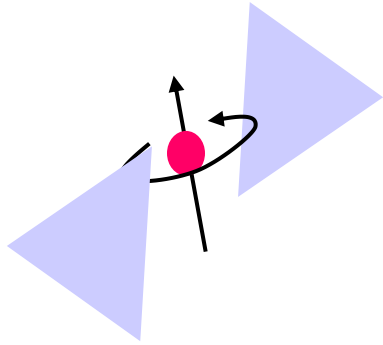
- $30M_{\text{太陽}}$ のブラックホールの存在

- $\sim 10M_{\text{太陽}}$ のブラックホール候補天体X線連星として約20例見つかった

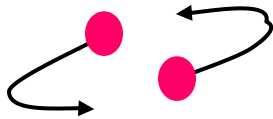
- BH候補天体なのか、ブラックホールと言いきってよいのか？

間接的な重力波の存在証明は存在

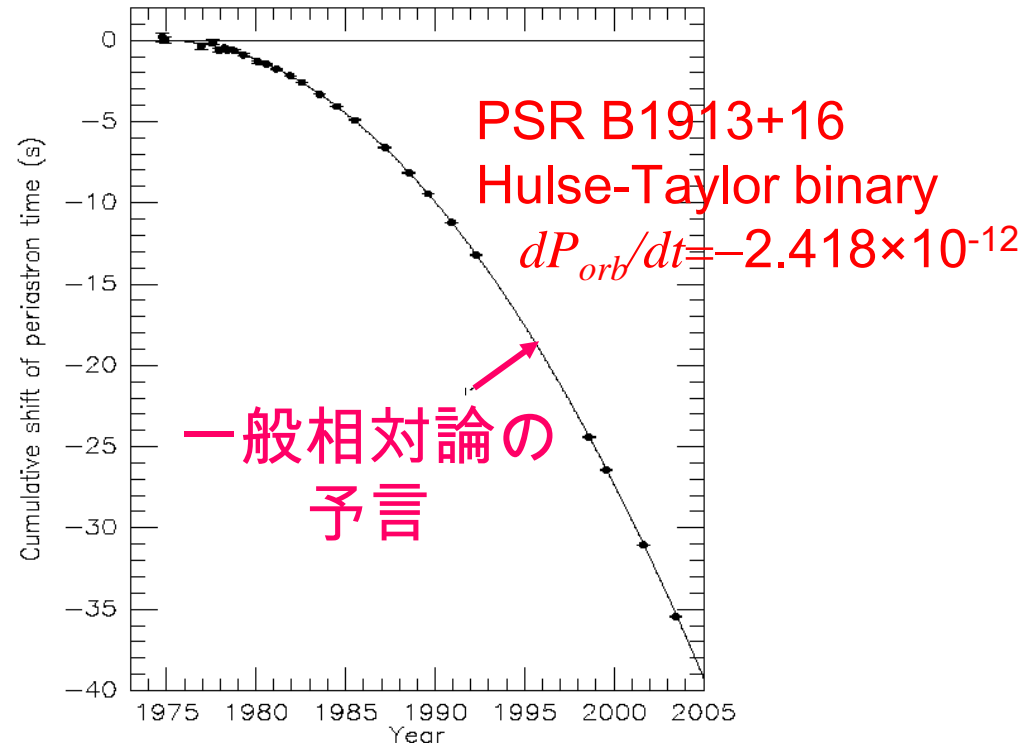
Pulsar は理想的な時計



連星をなす pulsar による
一般相対論の検証



重力波放出による近点通過時刻の変化



(J.M. Weisberg and J.H. Taylor, astro-ph/0407149.)

HulseとTaylorは1993年にNobel賞を受賞

- 重力波の放出は確かめられていたが、伝播は未確認だった

今回の重力波検出から何が言えるのか

- 重力波の直接検出

- 本当に受かった
- 本当に伝播してきた

- $30M_{\text{太陽}}$ のブラックホール連星の存在

- $\sim 10M_{\text{太陽}}$ のブラックホール候補天体はX線連星として約20例見つかっているが、これほど重たいBHの存在は明らかではなかった。しかも、かなりたくさん存在しているらしい。

- $2-100\text{events/year/Gpc}^3$

- BH候補天体なのか、ブラックホールと言いきってよいのか？

ABSTRACT

The discovery of the gravitational-wave source GW150914 with the Advanced LIGO detectors provides the first observational evidence for the existence of binary black-hole systems that inspiral and merge within the age of the Universe. Such black-hole mergers have been predicted in two main types of formation models, involving isolated binaries in galactic fields or dynamical interactions in young and old dense stellar environments. The measured masses robustly demonstrate that relatively “heavy” black holes ($\gtrsim 25 M_{\odot}$) can form in nature. This discovery implies relatively weak massive-star winds and thus the formation of GW150914 in an environment with metallicity lower than $\simeq 1/2$ of the solar value. The rate of binary black-hole mergers inferred from the observation of GW150914 is consistent with the higher end of rate predictions ($\gtrsim 1 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$) from both

大質量のBH連星の形成シナリオ

- 重元素量が少ない

⇒ 透明度が高い

⇒ 星形成段階での弱いフィードバック

⇒ 星風による質量放出が弱い

低い重元素量は
不可欠な要素

- 星の高速回転

⇒ 対流領域の増加による一様化

⇒ 星がよりコンパクトになり、星風による質量放出が弱い

The Astrophysical Journal Letters, 818:L22 (2016)

rations). However, if one assumes that the properties of PopIII massive binaries are not very different from binary populations in the local Universe (admittedly a considerable extrapolation), then recently predicted BBH total masses agree astonishingly well with GW150914 and can have sufficiently long merger times to occur in the nearby Universe (Kinugawa et al. 2014). This is in contrast to the predicted mass properties of low (as opposed to zero) metallicity populations, which show broader distributions (Belczynski et al. 2015).

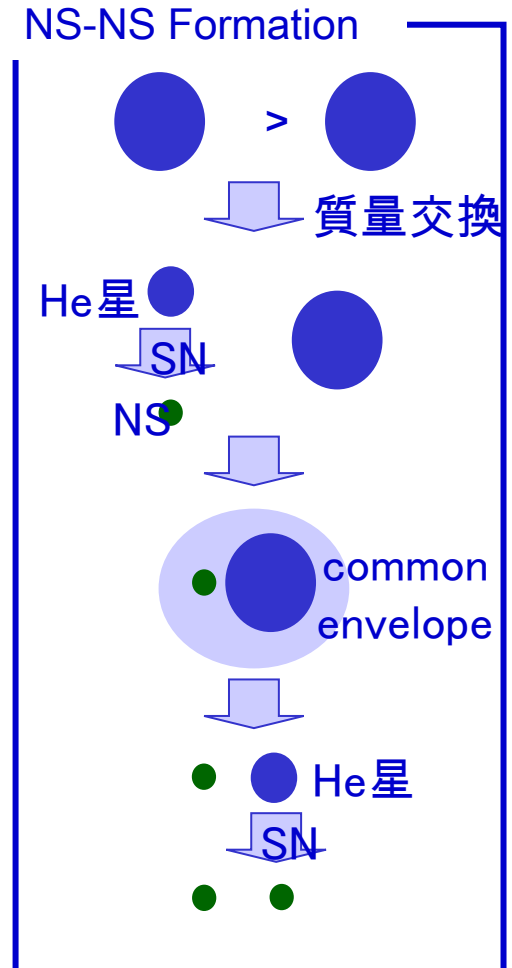
この論文で、 $30M_{\text{太陽}}$ のBH連星が最初に見つかったことと衣川君たちの論文で考えた初代星起源の連星形成シナリオが非常にぴったりと符合しているとmentionされている。

初代星によるBH-BH連星形成

初代星は大質量星が多い。進化過程での質量放出がefficientでないためNS連星を作ろうとすると超新星爆発の質量放出で連星が解体してしまう。

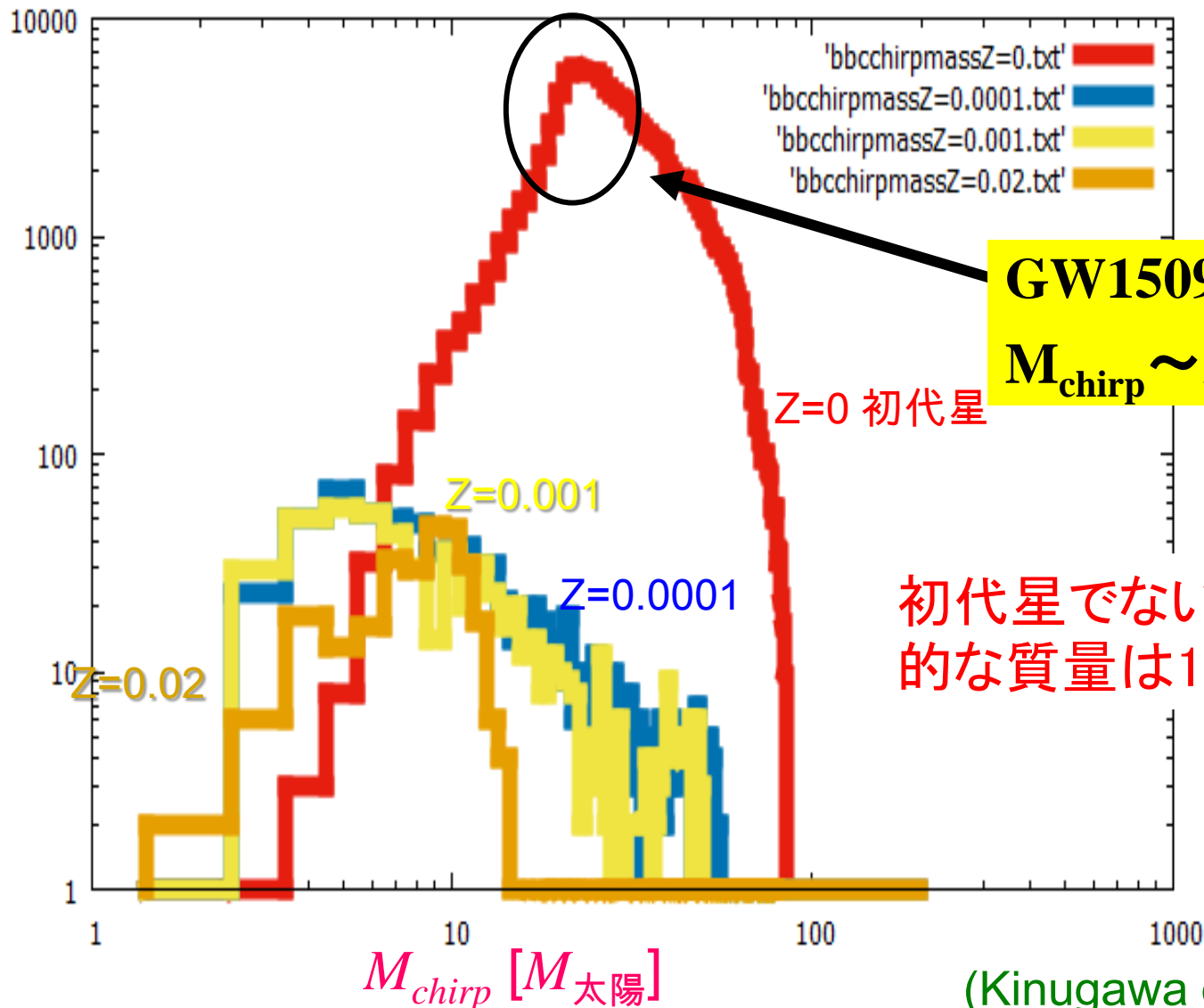
しかし、BH-BH連星なら形成される可能性が十分にある。

様々な仮定は必要だが、連星進化のシミュレーションをおこない、BH連星合体のイベントレートを評価



(衣川君のスライドを一部改変)

10⁶個の連星進化で宇宙年齢内に合体する連星の Chirp mass $M_{chirp} = (m_1 m_2)^{3/5} / (m_1 + m_2)^{1/5}$ の分布



**GW150914の
 $M_{chirp} \sim 28 M_{\text{太陽}}$**

初代星でない場合には典型的な質量は10 $M_{\text{太陽}}$ 以下

(Kinugawa et al.2014)

分布が $30M_{\text{太陽}}$ あたりにピークを持つ理由

初代星進化経路

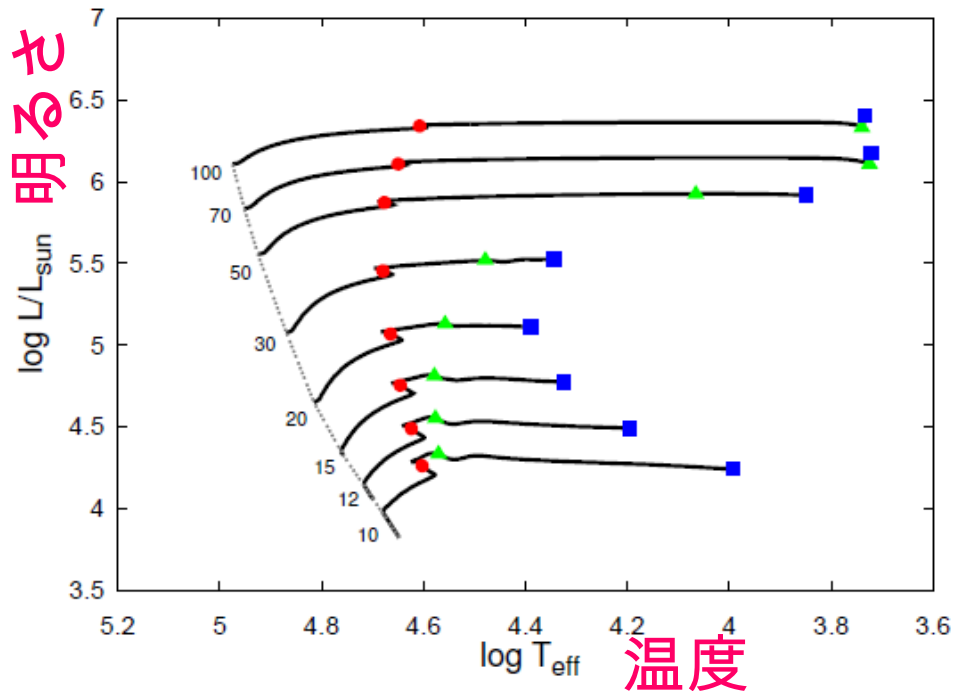


Figure 1. The Hertzsprung-Russell (HR) diagram for the Pop III stars of mass $10 M_{\odot} \leq M \leq 100 M_{\odot}$ using the data taken from Marigo et al. (2001). The number attached to each solid curve is the mass of each star in unit of M_{\odot} . The dashed line shows the ZAMS (Zero Age Main Sequence) stars. Red circles, green triangles and blue squares correspond to the beginning of He-burning, the end of the He-burning and the beginning of the C-burning, respectively.

- $M > 50M_{\text{太陽}}$ では赤色巨星になり、近接連星では質量を失う。
- $M < 50M_{\text{太陽}}$ 青色巨星として進化し、質量を保持。

(Kinugawa et al.2014)

大質量のBH連星の形成シナリオの別の可能性

- 星の密度が高い球状星団の中での星の合体
 - BHになる前に合体
 - ⇒結局、星風による質量放出で質量を失う
 - BHになってから合体
 - ⇒合体のプロセスで球状星団からはじき出される？

(ApJ Lett., 818:L22 (2016))

- 宇宙初期に形成された原始BHの可能性も完全には否定しきれない

(arXiv:1603.00464, arXiv:1603.05234)

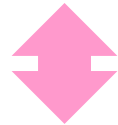
今回の重力波検出から何が言えるのか

- 重力波の直接検出
 - 本当に受かった
 - 本当に伝播してきた
- $30M_{\text{太陽}}$ のブラックホール連星の存在
 - $\sim 10M_{\text{太陽}}$ のブラックホール候補天体X線連星として約20例見つかっているが、これほど重たいBHの存在は明らかではなかった。しかも、かなりたくさん存在しているらしい。
 - $2\text{-}100\text{events/year/Gpc}^3$
 - BH候補天体なのか、ブラックホールと言いきってよいのか？

BH候補天体なのか、ブラックホールと言いきってよ
いのかの判断は最終的には程度問題ではあるが、

- 数値相対論の進展のおかげでBH連星合体が
高い精度でシミュレーション可能
- この数値計算と観測の間に大きな矛盾はないこ
とは、BHの降着円盤の観測にもとづくこれまでの
の知見以上のものが確かにあるだろう。
- インフレーションが確かめられたかという問と似たよ
うな状況？

「概ね確かめられたと思っているが、Bモードが検出
されればより確実だ」

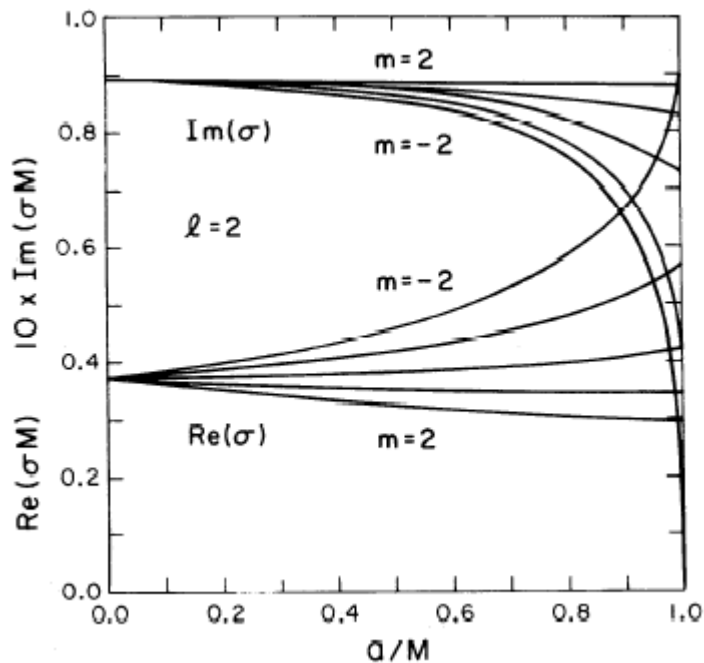
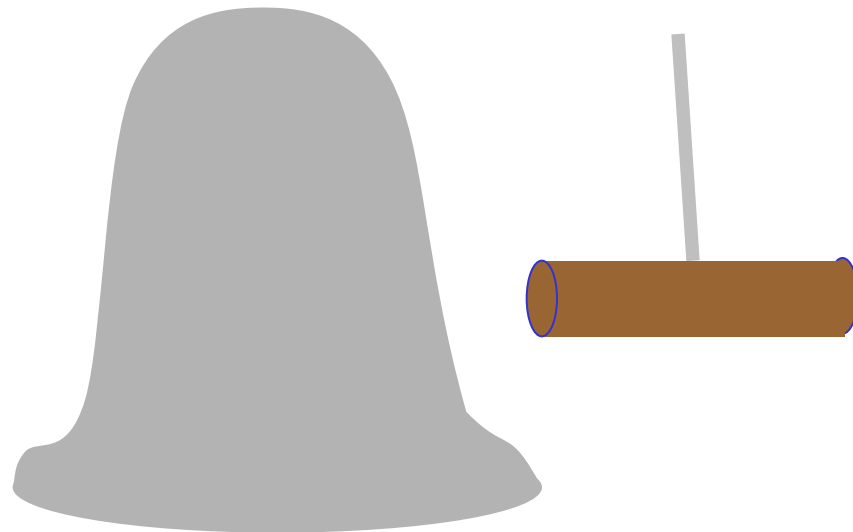


「概ね確かめられたと思っているが、QNMモードが
検出されればより確実だ」

ブラックホールの準固有振動 (QNM)



≈

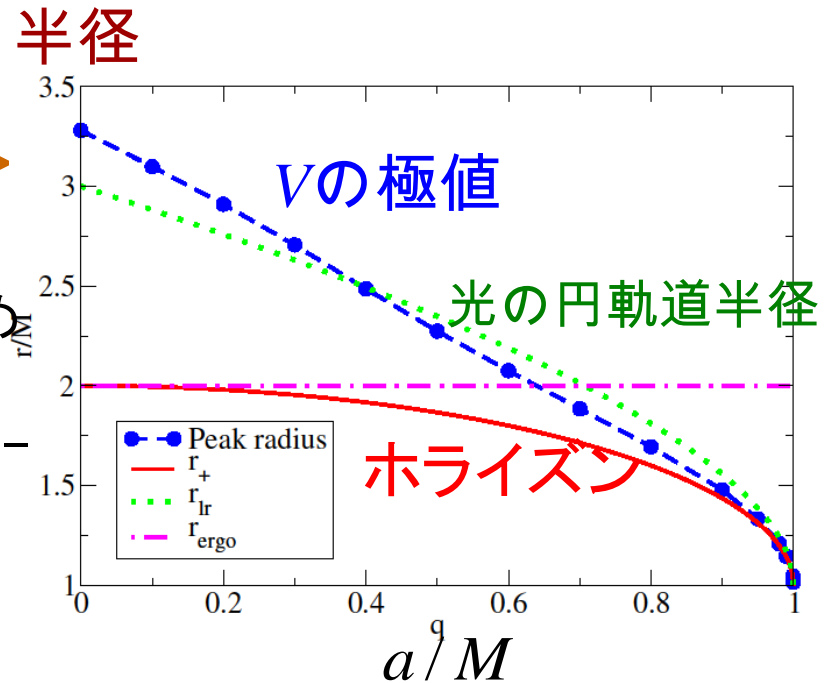
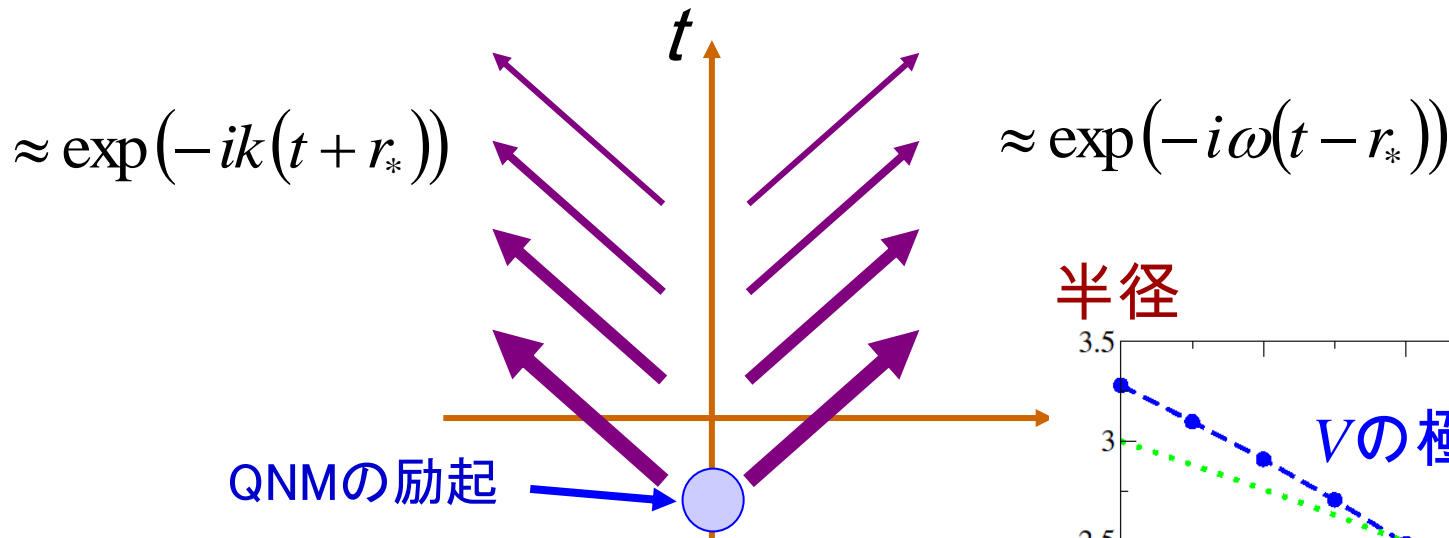


ブラックホールの質量と自転で決まる振動数と減衰率

ブラックホール形成の決定的証拠

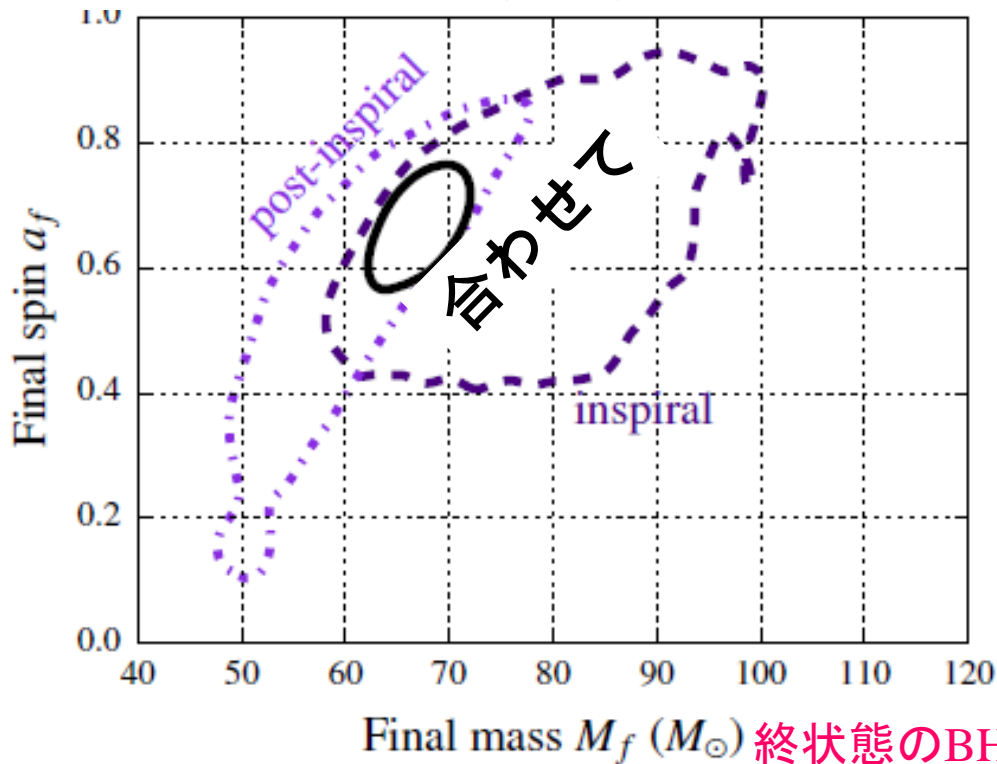
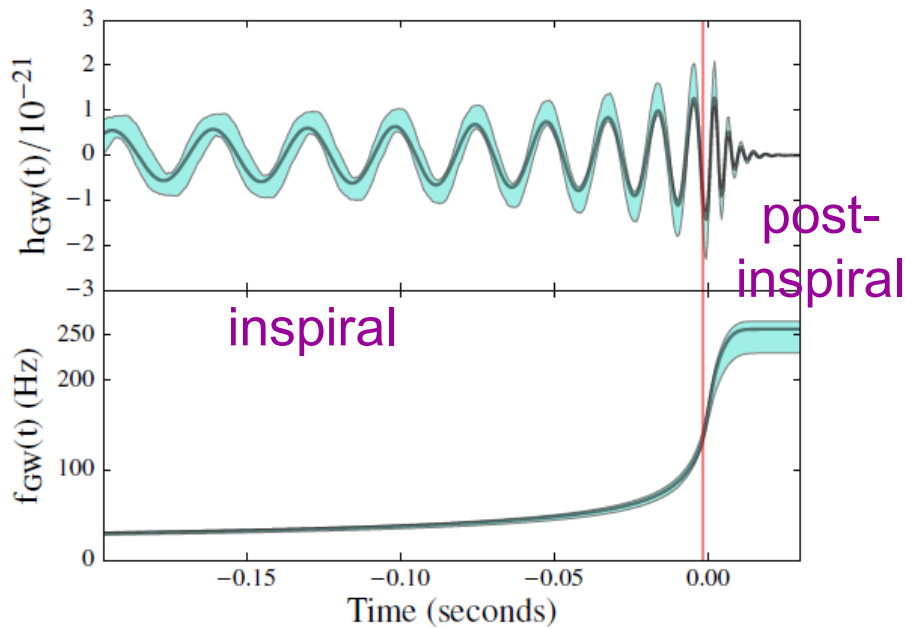
(Detweiler ApJ239 292 (1980))

では、QNMを観測すればブラックホールを どこまで観測したと言えるのか？



(Nakamura, Nakano,
arXiv:1602.02385)

- WKB近似でQNM振動数は比較的正確に求められる
(Schutz & Will, ApJ, 291 (1985))
- しかし、WKB近似の破たんがないと、内側でin-going、外側でout-goingの解は作れない。
- このWKB近似が破れるのは摂動方程式の有効ポテンシャル **V の極値周辺**。
- WKB近似ではそのまわりの振る舞いだけでQNM振動数が決まる。
- **V の極値が**QNMでどこまで見たかの目安を与える
(Nakamura et al., Phys.Rev. D93 (2016))



GW150914の場合

Inspiralとpost-inspiralのそれぞれの領域に分けると、終状態BHの質量とスピンの評価の誤差は大きいので、無矛盾であるという以上に言える段階ではない。

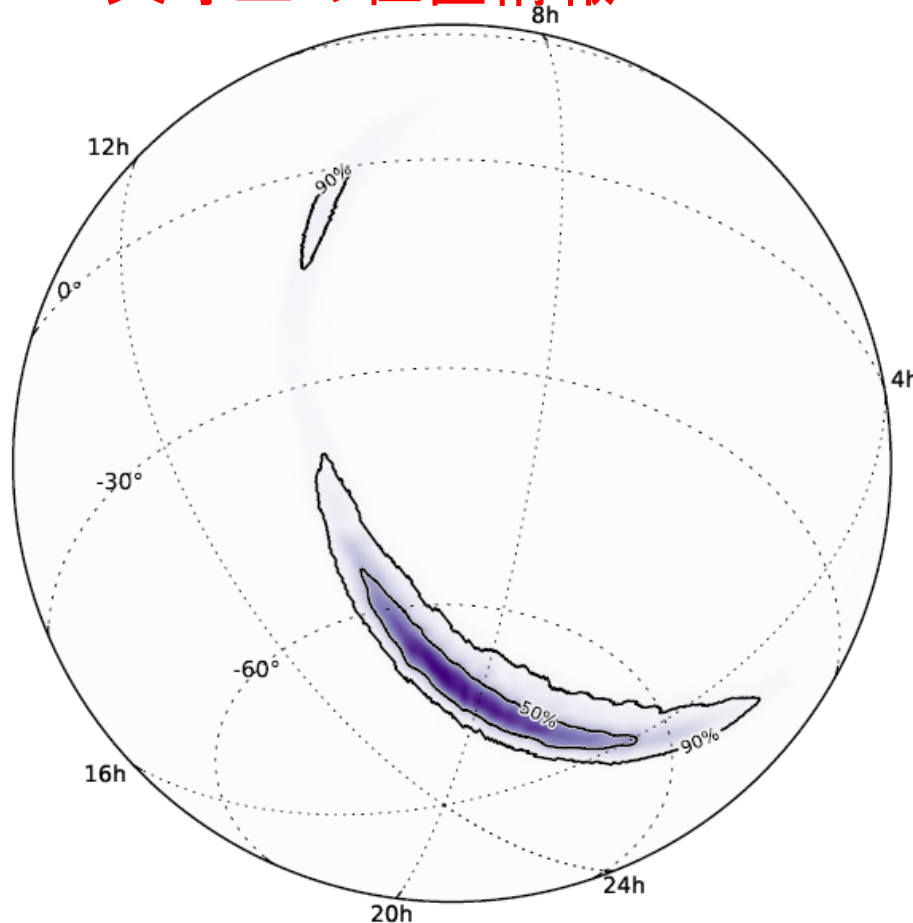
(arXiv:1602.03841)

終状態のBHのスピンの

Final mass M_f (M_\odot) 終状態のBHの質量

対応天体のフォローアップ観測

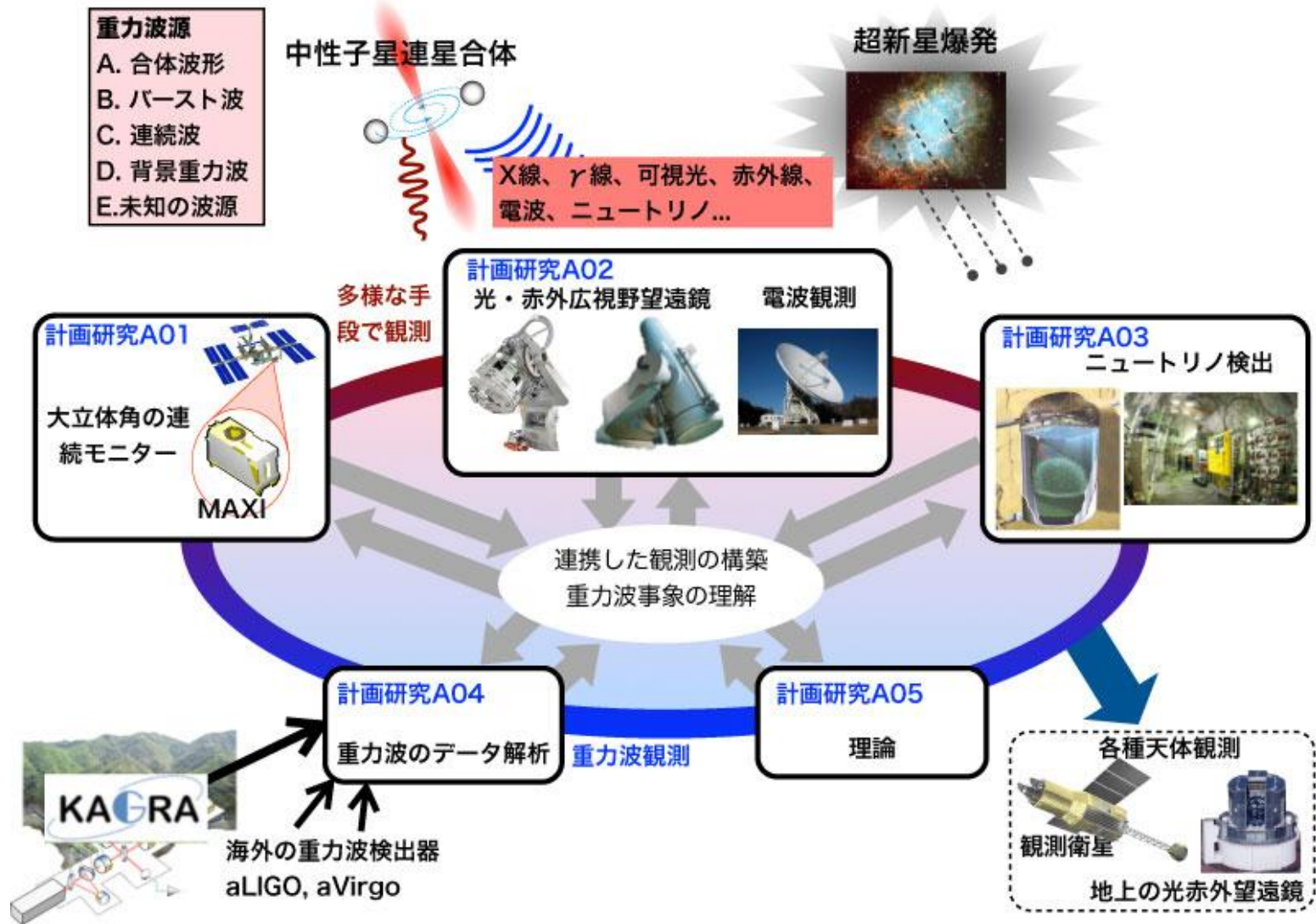
- 合体時刻の情報
- 天球上の位置情報



- 2台の検出器の間の7m秒の時間差で決まる円周上に制限される
- 感度の方向依存性と
のマッチング

⇒ **600平方度** (90%)

日本では新学術領域「重力波天体の多様な観測による宇宙物理学の新展開」(2012-2016年度)を中心に組織化 ⇒ 今朝の吉田道利さんの講演



J-GEM と LIGO/VIRGOの間でMOUが交わされている

今回のフォローアップにおけるpossible associated signal

Fermi Gamma-ray Burst Monitor (GBM)が50keV以上のエネルギー領域のガンマ線を合体時刻から0.4秒後から1秒間に渡って検出した
(arXiv:1602.03920)

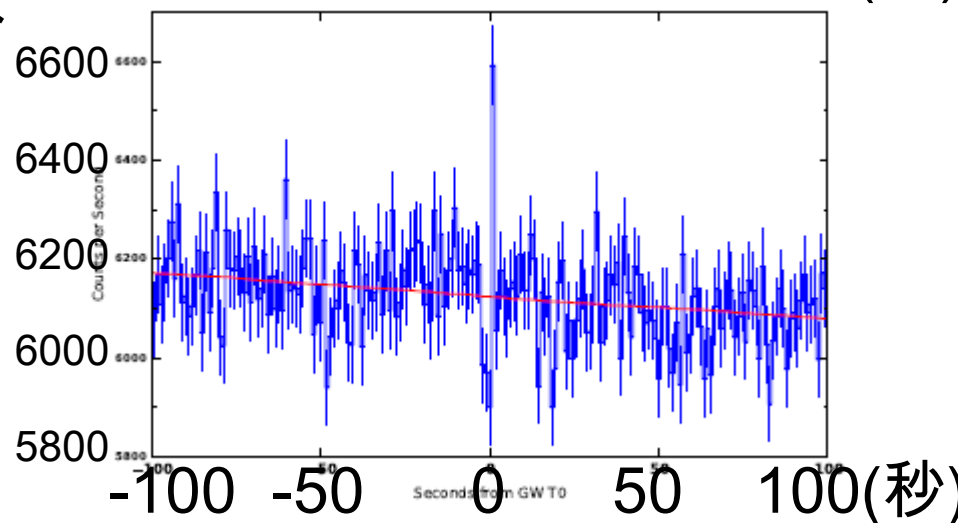
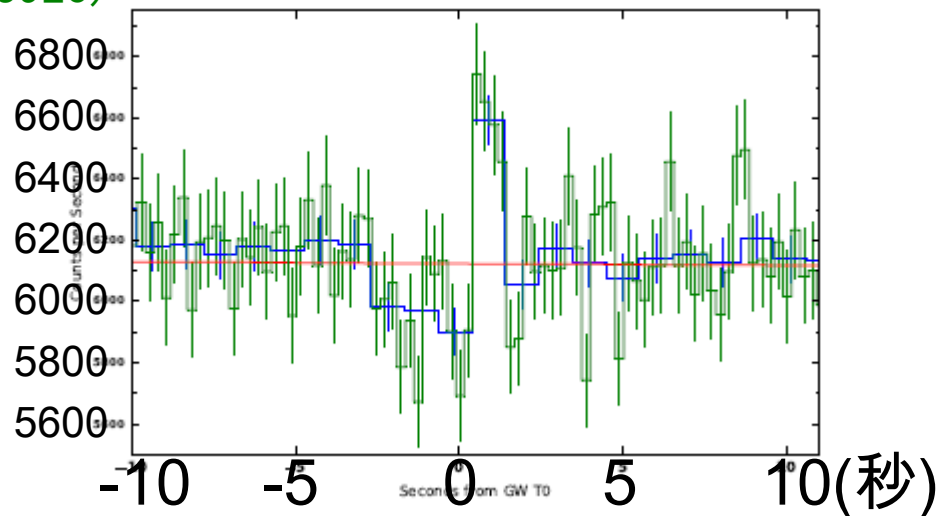
光度は $1.8_{-1.0}^{+1.5} \times 10^{49}$ erg/秒

暗いSGRBと比べても約1桁暗い

Integral衛星のupper boundとは
marginalにconsistent

Fermi GBMにおける当該イベント
よりも強いシグナルの発生頻度は
 1.23×10^{-4} Hz

理論的に説明はチャレンジング



今後の展開



(KAGRAのHPから)

位置決定精度の向上

中性子星連星の位置決定精度

複数台の重力波同時検出によってエラーボックスを小さくできる。

重力波データ解析からは5-10分での速報を目指している

KISS (1.05m) 4deg²
PTF (1.2m) 7deg²
Subaru-HSC(8.2m) 2.3deg²
LSST (8.4m) 9.4deg²

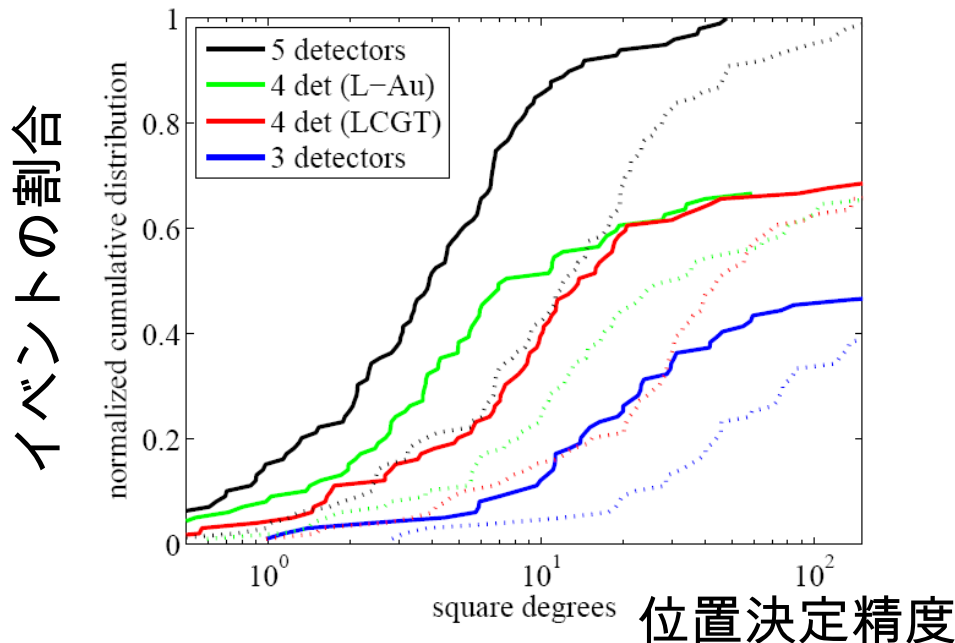


FIG. 3.— Normalized cumulative distributions as a function of the sky-error area (square degrees) of a sample of NS-NS binaries in Case I detection scenario. Key: Solid/dotted lines denote 68% and 95% confidence regions respectively. Black: LIGO+Virgo+LAU+LCGT network, green: LIGO+Virgo+LAU, red: LIGO+Virgo+LCGT, and blue: LIGO+Virgo only.

(Nissanke, Sievers, Dalal, Holz arXiv:1105.3184)

高いイベントレートが期待される

advLIGOは感度がさらに3倍向上
干渉計の台数が4台、5台となる
長時間の定常的な観測

⇒ $S/N > 100$ のイベントも期待できる

まとめ

- 重力波の直接検出がされた
- $30M_{\text{太陽}}$ のブラックホール連星の存在が明らかになった
 - 初代星起源かもしれない
 - BH-QNMが確認される日も近い
- 重力波物理学/天文学の幕開け
 - フォローアップ/複数台による観測の重要性
 - SGRBの正体の解明
 - 中性子星連星合体も当然期待される
 - 高密度核物質の状態方程式
 - r -プロセス元素(金、Pt)の起源
 - 重力理論の検証
 - スペースでの低振動数重力波観測やパルサータイミングアレイ

他にも様々な重力波源

A. Chirp Signal

NS-NS連星合体

NS-BH連星合体

BH-BH連星合体

中質量BHと太陽質量

天体の合体

BH-MACHO連星の合体

B. Bust Signal

非球対称な超新星爆発

ソフトガンマ線リピータ

の巨大フレア

宇宙紐のcuspやkink等

C. 連続波

非軸対称なパルサー

低質量X線連星

D. 背景重力波

超新星

宇宙紐

宇宙初期の相転移

E. 未知のソース