GRADUATE SCHOOL OF FACULTY OF SCIENCE
KYOTO UNIVERSITY

重力波

田中 貴浩
（京大院理）

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

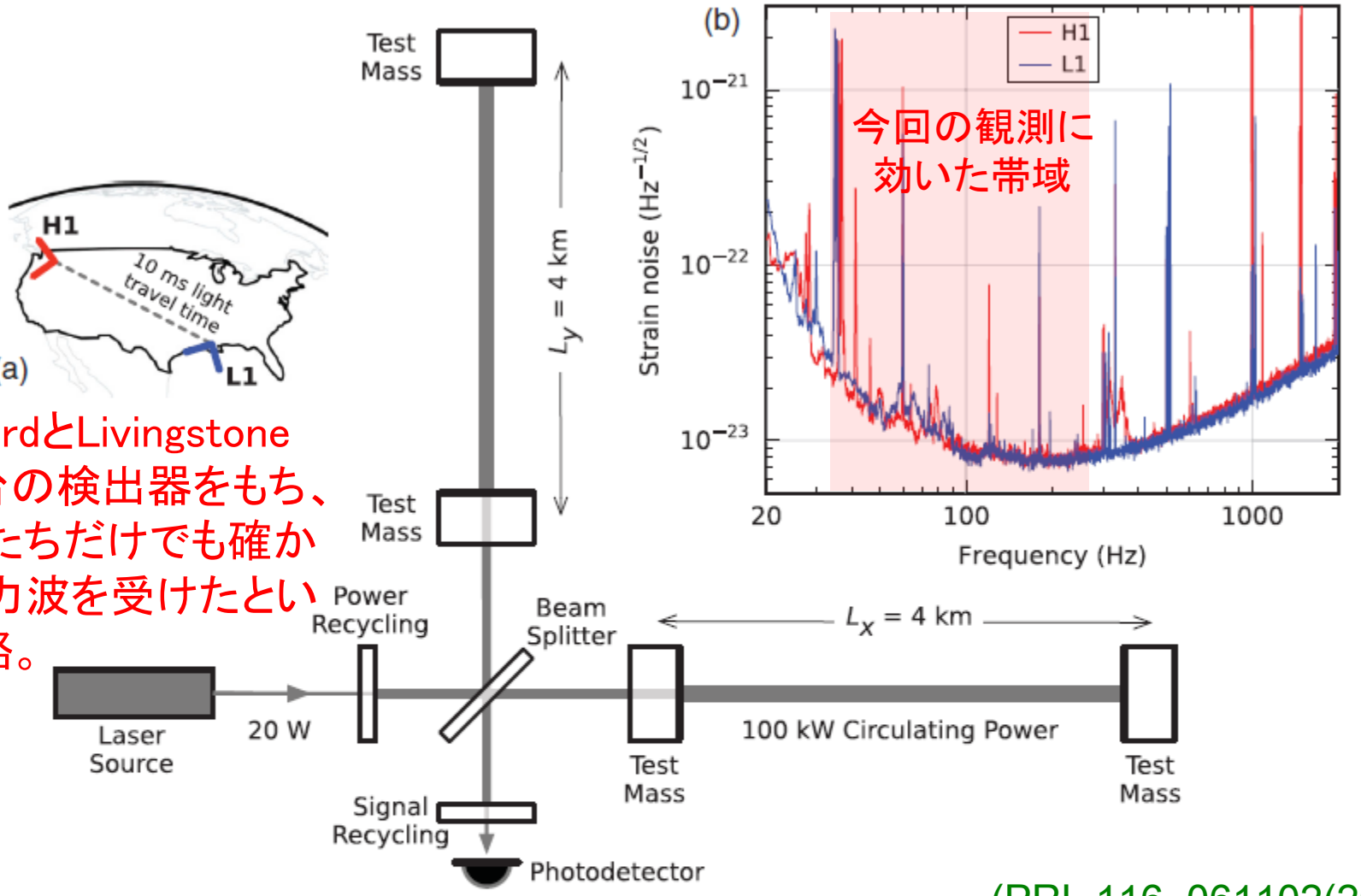
ニュートン重力にはなかったまったく新しい現象

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

LIGOによる重力波初検出

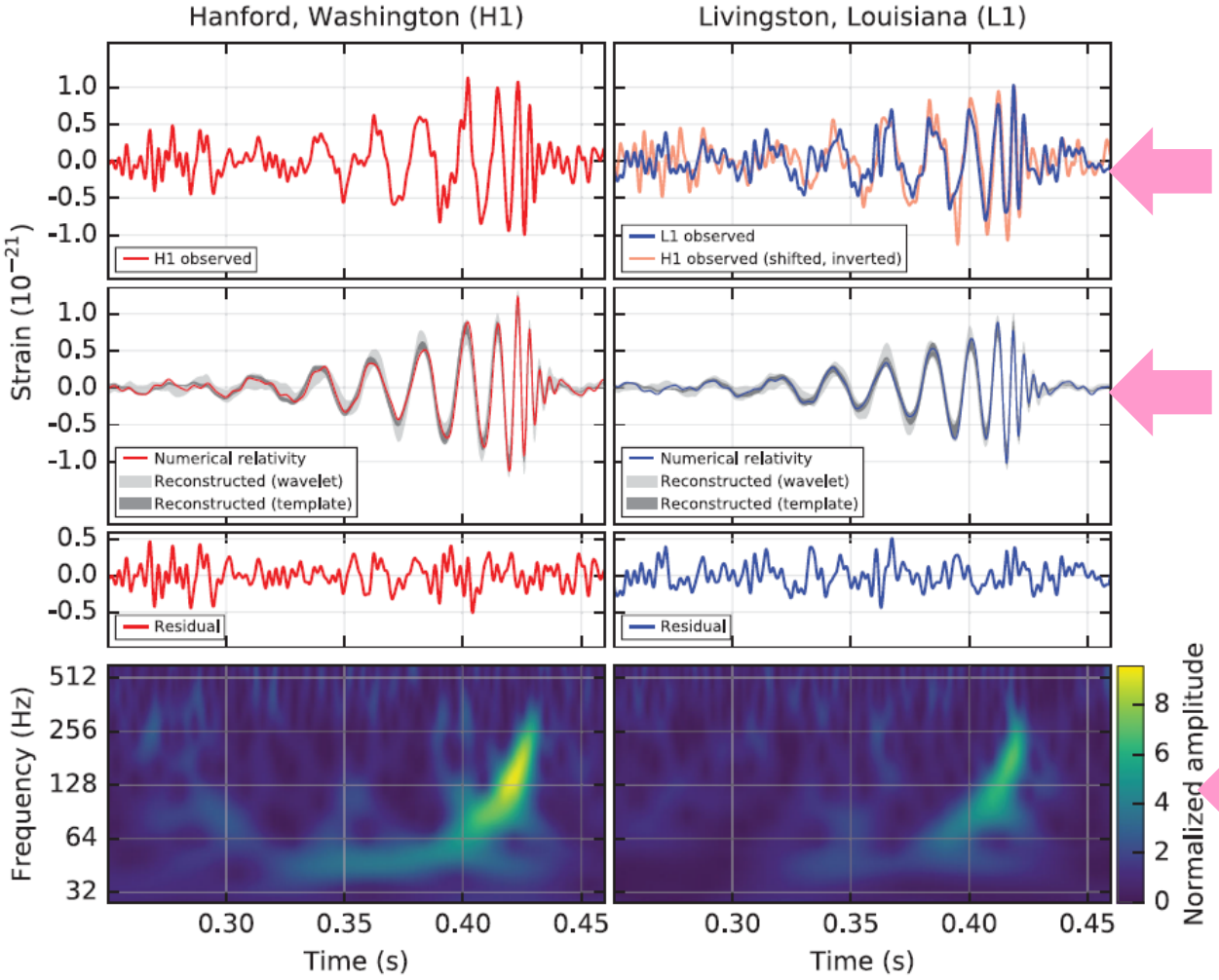
- 2016年2月11日
  日本時間では2月12日0:30から記者会見
- ３９日間の観測データを解析、２台の検出器が同時に観測しているデータは１６日分
- 2015年9月14日09:50:45 UTCに振幅10^{-21}の連星ブラックホールからの重力波をS/N~24で検出
- 合体前の質量は　$36^{+5}_{-4}M_{太陽}+\ 29^{+4}_{-4}M_{太陽}$
- 合体後の質量は　$62^{+4}_{-4}M_{太陽}$
- 推定される距離は　$410^{+160}_{-180}Mpc$　　$z=0.09^{+0.03}_{-0.04}$
- GW150914と命名された



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



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

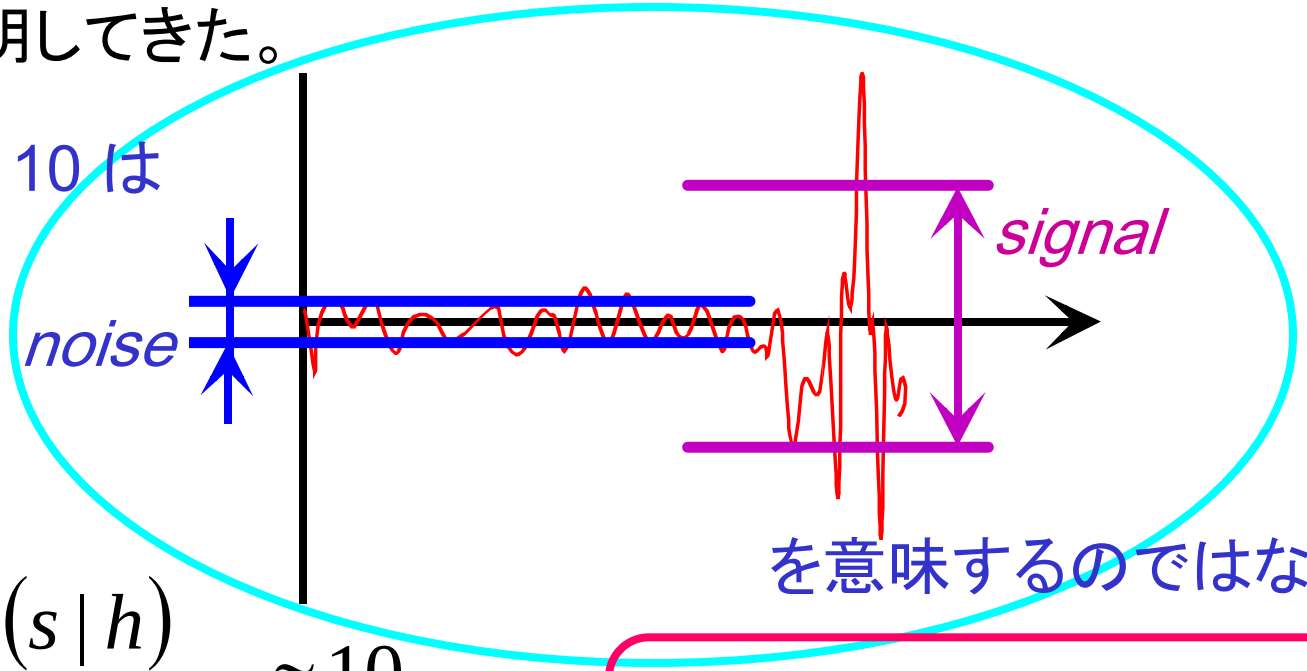
FIG. 1. The gravitational-wave event GW150914 observed by the LIGO Hanford (H1, left column panels) and Livingston (L1, right column panels) detectors. Times are shown relative to September 14, 2015 at 09:50:45 UTC. For visualization, all time series are filtered with a 35–350 Hz bandpass filter to suppress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

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



を意味するのではなく,

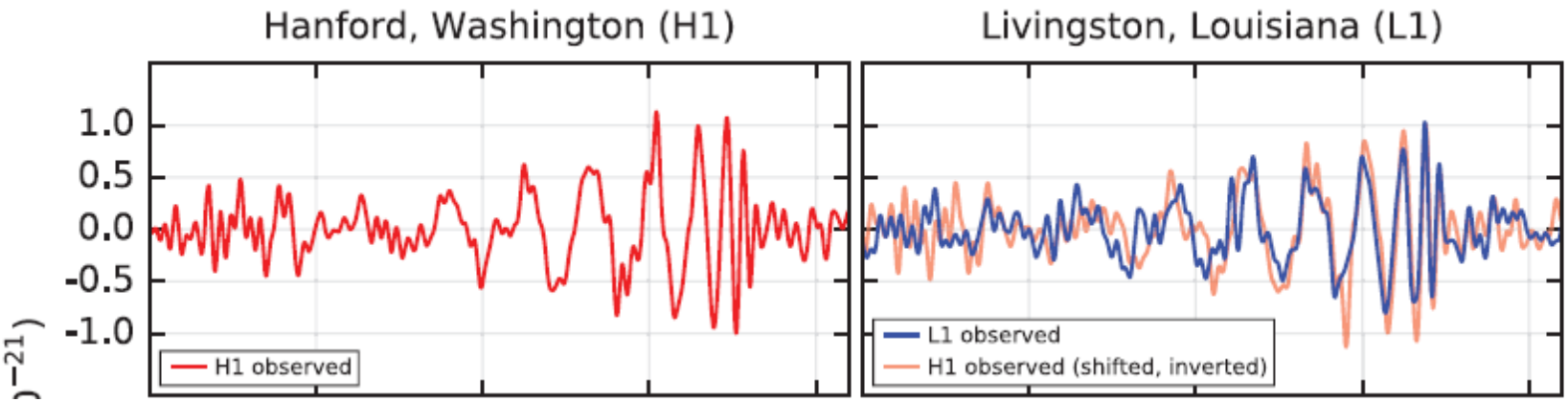
$$\frac{(s|h)}{\sqrt{\left\langle (n|h)^2 \right\rangle}} \approx 10$$

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

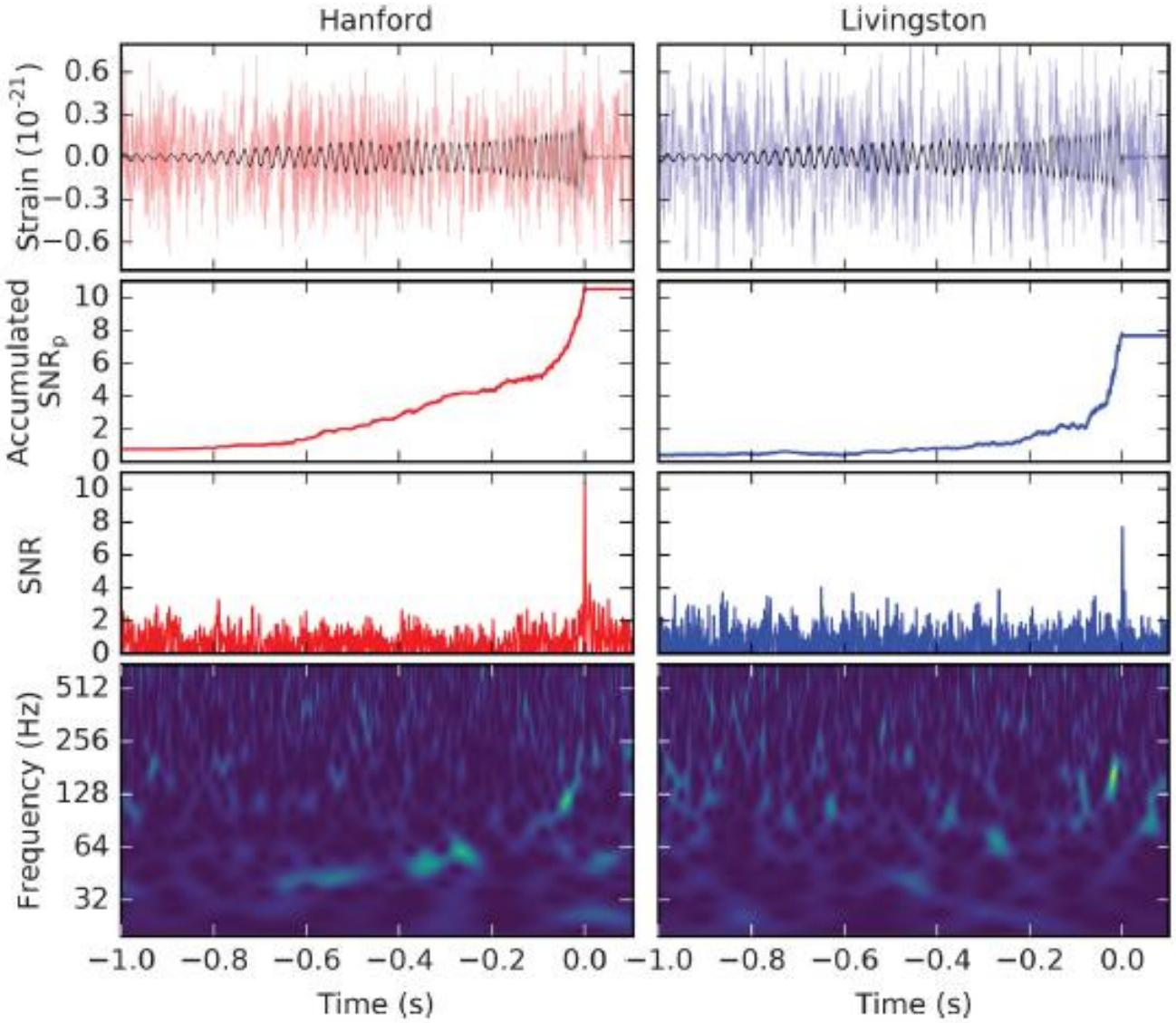
しかし、今回のGW150914では相関解析なしにシグナルが見えている



(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回転ほどしかしないBH連星合体では話が大きく異なる。

そうこうするうちに、二つ目のイベントが発表された



GW151226

PRL 116, 241103 (2016)

(arXiv:1606.04855)

今度はmatched filtering が必要

Event	GW150914	GW151226	LVT151012
Signal-to-noise ratio ρ	23.7	13.0	9.7
False alarm rate FAR/yr^{-1}	$< 6.0 \times 10^{-7}$	$< 6.0 \times 10^{-7}$	0.37
p-value	7.5×10^{-8}	7.5×10^{-8}	0.045
Significance	$> 5.3\sigma$	$> 5.3\sigma$	1.7σ
Primary mass $m_1^{\rm source}/{\rm M}_\odot$	$36.2^{+5.2}_{-3.8}$	$14.2^{+8.3}_{-3.7}$	23^{+18}_{-6}
Secondary mass $m_2^{\rm source}/{\rm M}_\odot$	$29.1^{+3.7}_{-4.4}$	$7.5^{+2.3}_{-2.3}$	13^{+4}_{-5}
Chirp mass $\mathcal{M}^{\rm source}/{\rm M}_\odot$	$28.1^{+1.8}_{-1.5}$	$8.9^{+0.3}_{-0.3}$	$15.1^{+1.4}_{-1.1}$
Total mass $M^{\rm source}/{\rm M}_\odot$	$65.3^{+4.1}_{-3.4}$	$21.8^{+5.9}_{-1.7}$	37^{+13}_{-4}
Effective inspiral spin $\chi_{\rm eff}$	$-0.06^{+0.14}_{-0.14}$	$0.21^{+0.20}_{-0.10}$	$0.0^{+0.3}_{-0.2}$
Final mass $M_{\rm f}^{\rm source}/{\rm M}_\odot$	$62.3^{+3.7}_{-3.1}$	$20.8^{+6.1}_{-1.7}$	35^{+14}_{-4}
Final spin $a_{\rm f}$	$0.68^{+0.05}_{-0.06}$	$0.74^{+0.06}_{-0.06}$	$0.66^{+0.09}_{-0.10}$
Radiated energy $E_{\rm rad}/({\rm M}_\odot c^2)$	$3.0^{+0.5}_{-0.4}$	$1.0^{+0.1}_{-0.2}$	$1.5^{+0.3}_{-0.4}$
Peak luminosity $\ell_{\rm peak}/({\rm erg\,s}^{-1})$	$3.6^{+0.5}_{-0.4} \times 10^{56}$	$3.3^{+0.8}_{-1.6} \times 10^{56}$	$3.1^{+0.8}_{-1.8} \times 10^{56}$
Luminosity distance $D_{\rm L}/{\rm Mpc}$	420^{+150}_{-180}	440^{+180}_{-190}	1000^{+500}_{-500}
Source redshift z	$0.09^{+0.03}_{-0.04}$	$0.09^{+0.03}_{-0.04}$	$0.20^{+0.09}_{-0.09}$
Sky localization $\Delta\Omega/{\rm deg}^2$	230	850	1600

GW150914は非常にS/Nが高い

質量分布に広がりが見えてきた

GW151226は、合体前に自転があったことが示唆される

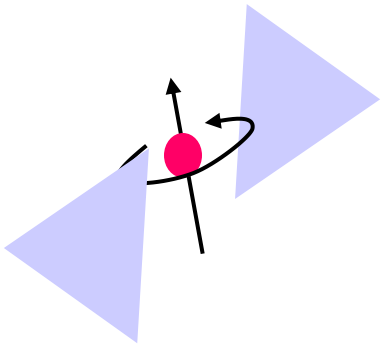
(arXiv:1606.04856)

今回の重力波検出から何が言えるのか

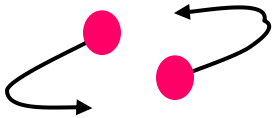
- 重力波の直接検出
  - 本当に受かった
    - 重力波振幅が10^{-21}とは4kmの腕の長さに対して10^{-3}fm以下の変位
  - 本当に伝播してきた
- $30M_{太陽}$のブラックホールの存在
  - ～$10M_{太陽}$のブラックホール候補天体X線連星として約20例見つかっている
  - BH候補天体なのか、ブラックホールと言いきってよいのか？

間接的な重力波の存在証明は存在

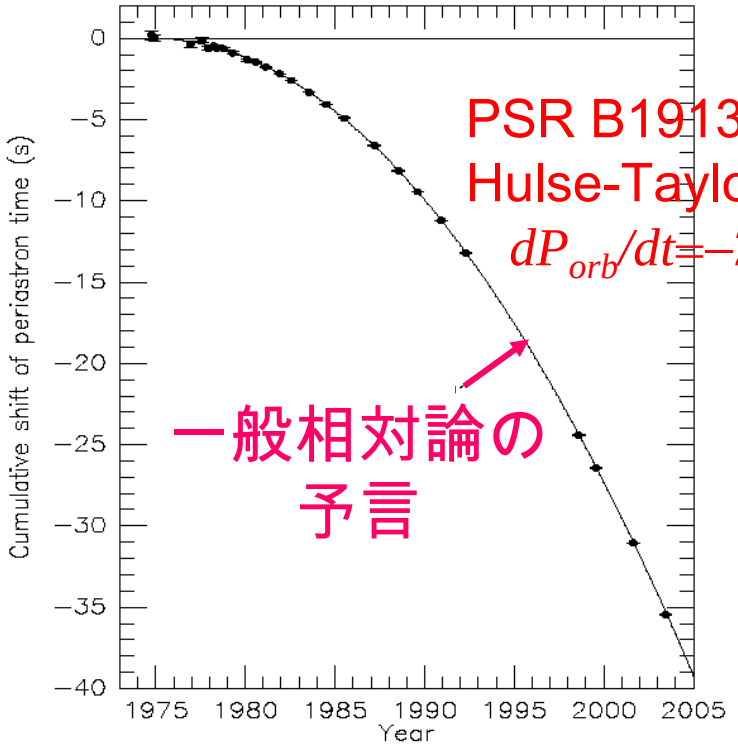
Pulsar は理想的な時計



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
- $30M_{太陽}$のブラックホール連星の存在
  - ～$10M_{太陽}$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。
    - 0.6-12events/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？

ApJ Lett., 818:L22 (2016)

ASTROPHYSICAL IMPLICATIONS OF THE BINARY BLACK-HOLE MERGER GW150914

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 ($\gtrsim 1\ \mathrm{Gpc^{-3}\,yr^{-1}}$) 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

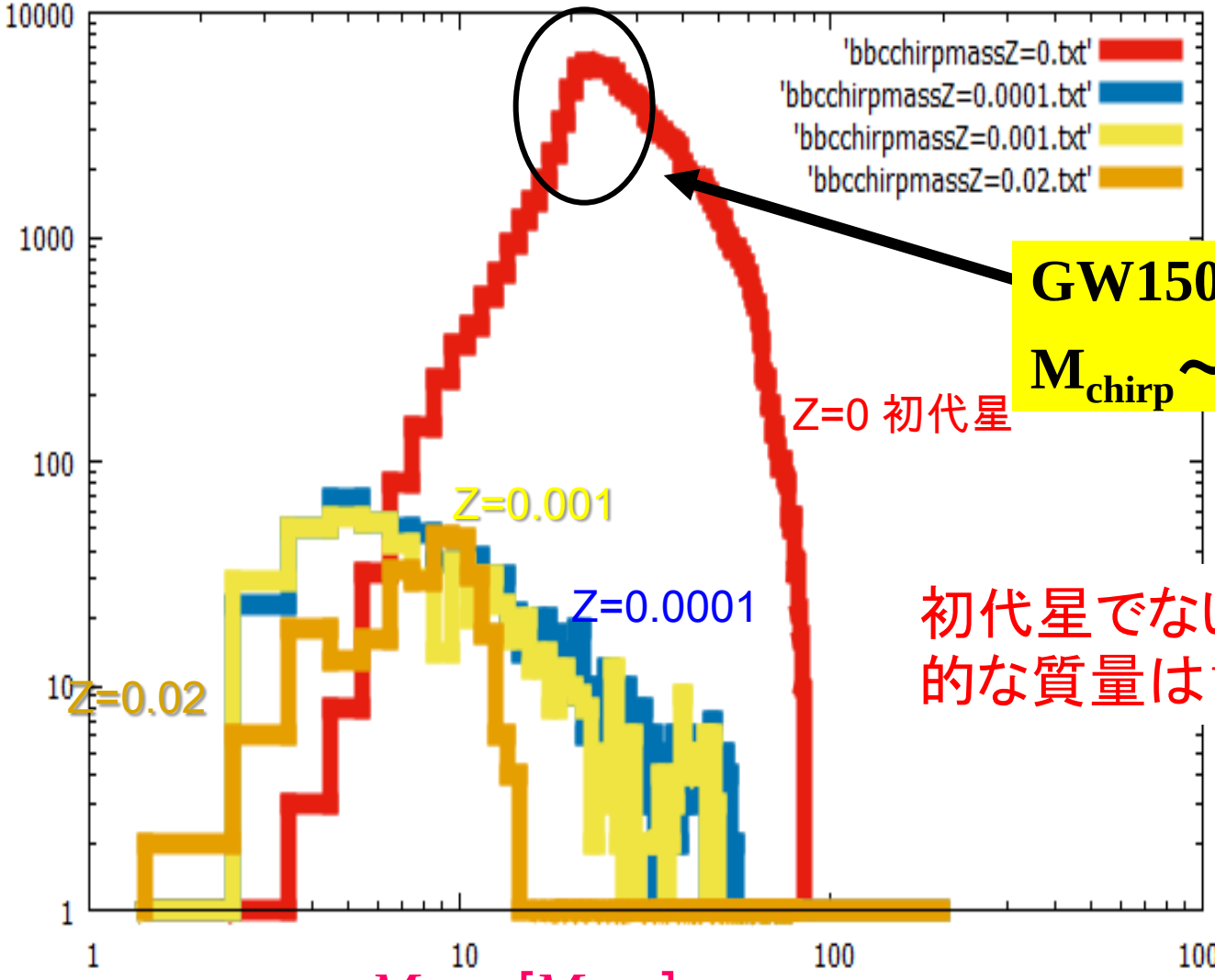
The Astrophysical Journal Letters, 818:L22 (2016)

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、30$M_{太陽}$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されていた。

(衣川君のスライドを一部改変)

10^6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}～28 $M_{太陽}$

初代星でない場合には典型的な質量は$10M_{太陽}$以下

(Kinugawa et al.2014)

質量の小さい連星の方が見える距離が短い

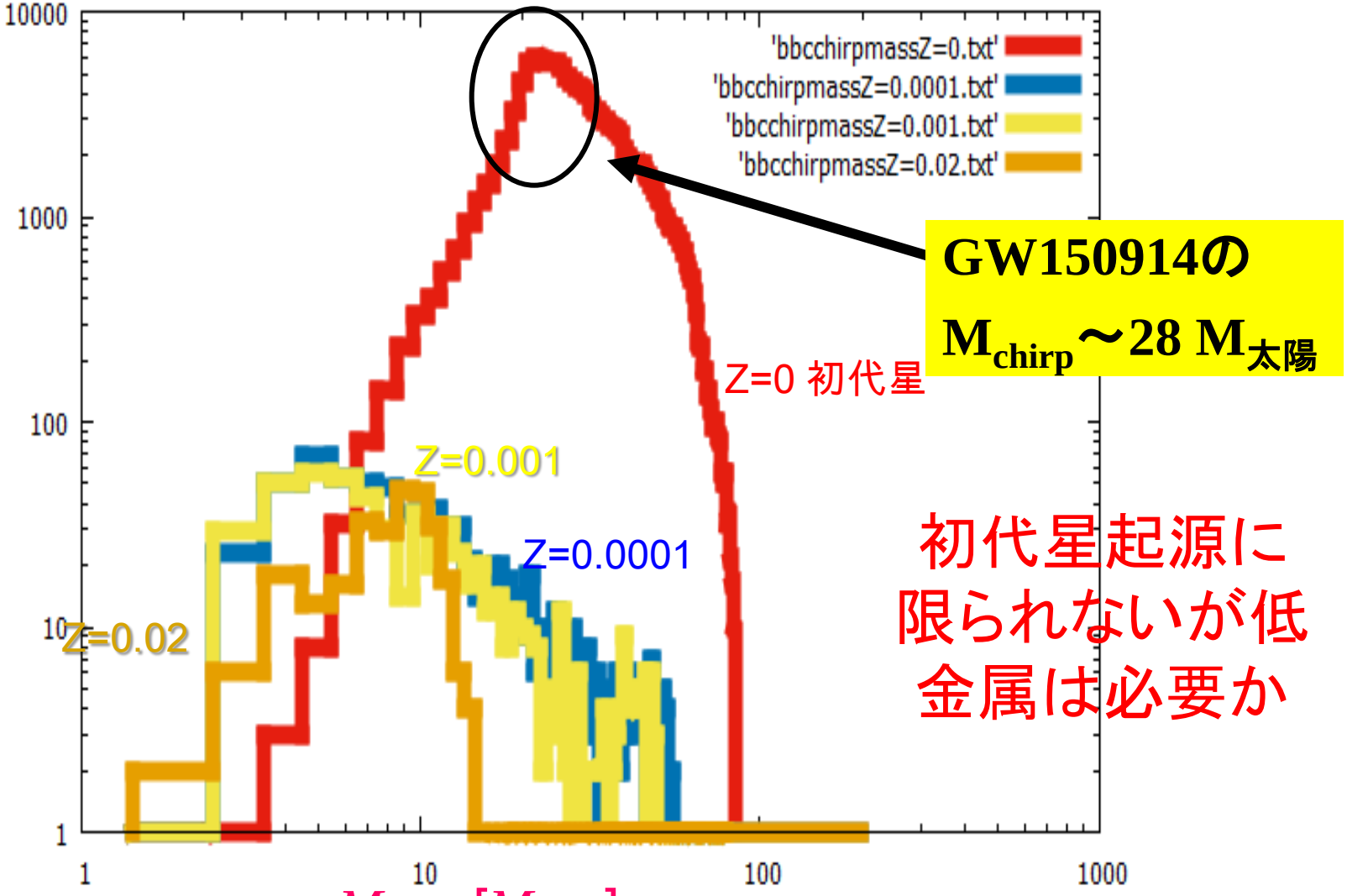
$$\tilde{h}(f) \approx 10^{-21} f^{-1} \left(\frac{f}{10^5 \mathrm{Hz}} \right)^{-1/6} \left(\frac{M_{chirp}}{M_{太陽}} \right)^{5/6} \left(\frac{r}{100 Mpc} \right)^{-1} \mathrm{Hz}^{-1}$$

GW151226のようなBH連星が単位体積当たりでは、
GW150914のような連星の10倍程沢山あってもよい

Mass distribution	$R/(\mathrm{Gpc}^{-3}\mathrm{yr}^{-1})$		
	PyCBC	GstLAL	Combined
	Event based		
GW150914	$3.2^{+8.3}_{-2.7}$	$3.6^{+9.1}_{-3.0}$	$3.4^{+8.6}_{-2.8}$
LVT151012	$9.2^{+30.3}_{-8.5}$	$9.2^{+31.4}_{-8.5}$	$9.4^{+30.4}_{-8.7}$
GW151226	35^{+92}_{-29}	37^{+94}_{-31}	37^{+92}_{-31}
All	53^{+100}_{-40}	56^{+105}_{-42}	55^{+99}_{-41}

(衣川君のスライドを一部改変)

10^6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}～28 $M_{太陽}$

初代星起源に限られないが低金属は必要か

(Kinugawa et al.2014)

大質量のBH連星の形成シナリオの別の可能性

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

- 星の密度が高い球状星団の中での星の合体

イベントレートがちゃんと説明できるというシナリオもある

(例えば、arXiv:1604.04254)

- 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)

Primordial black hole scenario for the gravitational wave event GW150914

我々も論文を書いてしまいました

Misao Sasaki[a], Teruaki Suyama[b], Takahiro Tanaka[c], and Shuichiro Yokoyama[d]

[a] *Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Kyoto 606-8502, Japan*

[b] *Research Center for the Early Universe (RESCEU), Graduate School of Science, The University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan*

[c] *Department of Physics, Kyoto University, Kyoto 606-8502, Japan*

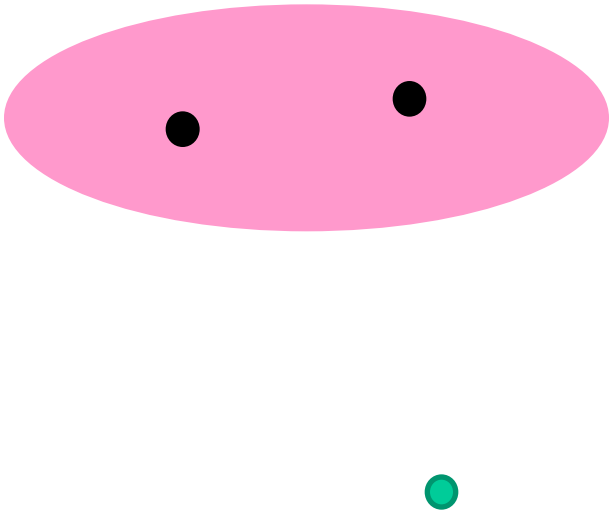
[d] *Department of Physics, Rikkyo University, Tokyo 171-8501, Japan*

arXiv:1603.08338

Abstract

We point out that the gravitational wave event GW150914 observed by the LIGO detectors can be explained by the coalescence of primordial black holes (PBHs). It is found that the expected PBH merger rate would exceed the rate estimated by the LIGO scientific collaboration and Virgo collaboration if PBHs were the dominant component of dark matter, while it can be made compatible if PBHs constitute a fraction of dark matter. Intriguingly, the abundance of PBHs required to explain the suggested lower bound on the event rate, > 2 events/year/Gpc^3, roughly coincides with the existing upper limit set by the non-detection of the CMB spectral distortion. This implies that the proposed PBH scenario may be tested in the not-too-distant future.

ランダムな分布を持った原始BHの形成を仮定



局所的なBHのエネルギー密度
＞radiationのエネルギー密度
がある時期に成立

⇩

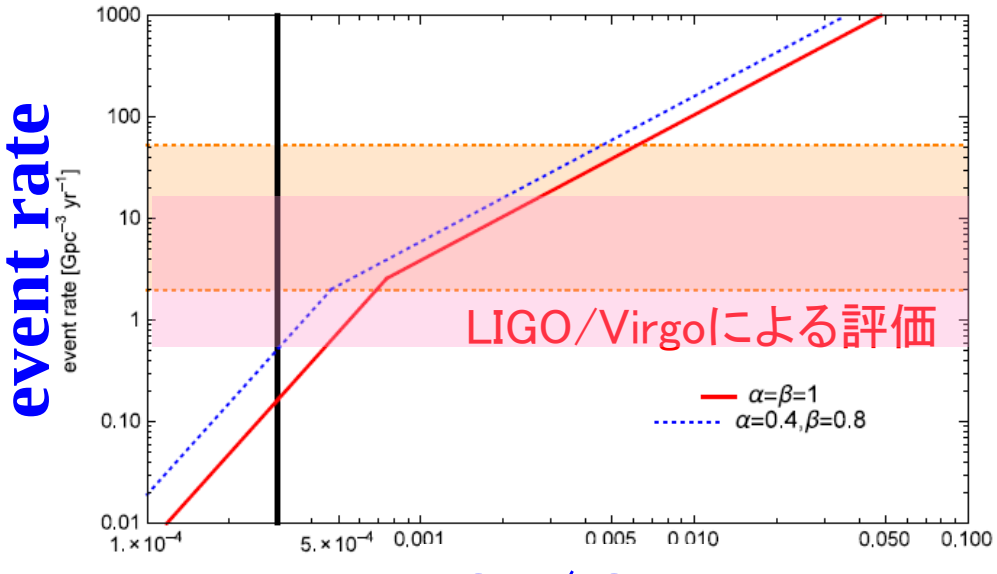
最近接BHが引き合い連星を形成

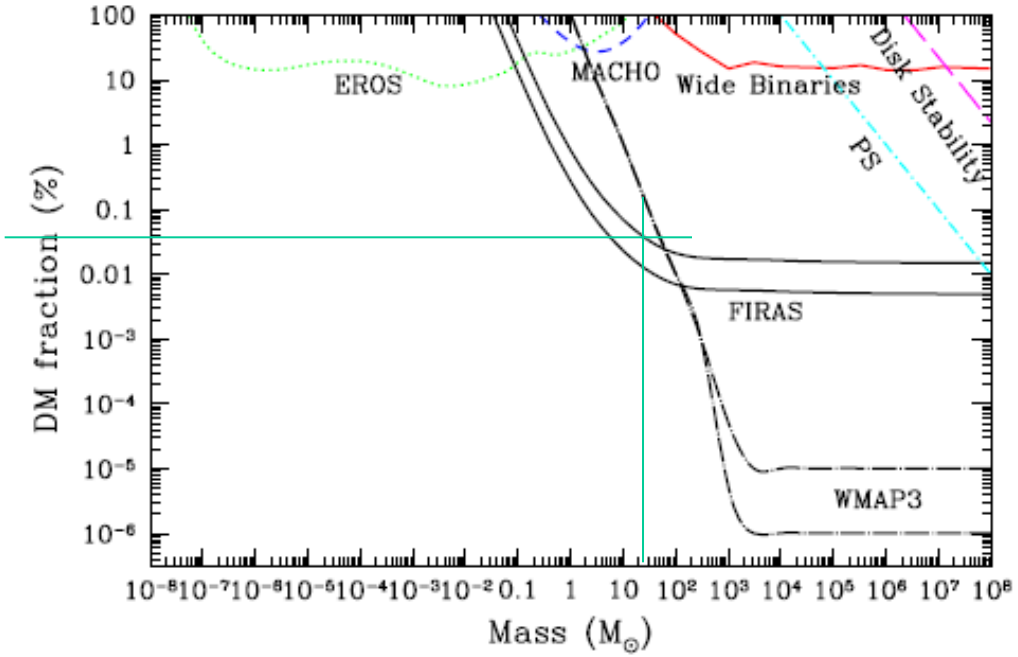
⇩

3体目からのトルクで連星は小さな角運動量を獲得

BHの初期位置 ⇔ Semi-major axis: a
Eccentricity: e

BHの分布 ⇒ (a,e)の分布 ⇒ 合体時刻の分布





(Ricotti, Ostriker, Mack 2008)

この原始BHシナリオでは
CMBのy-distortionの制限と
ぎりぎり整合する。

y-distortionの制限の見積も
りには質量降着モデルの不
定性があるが、PIXIEのような
将来の観測で見つかること
が期待できる。

我々の銀河内に存在す
るBHの質量
～$10^{8-9}M_{sun}$

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
- $30M_{太陽}$のブラックホール連星の存在
  - ～$10M_{太陽}$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。
    - 2-100events/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？

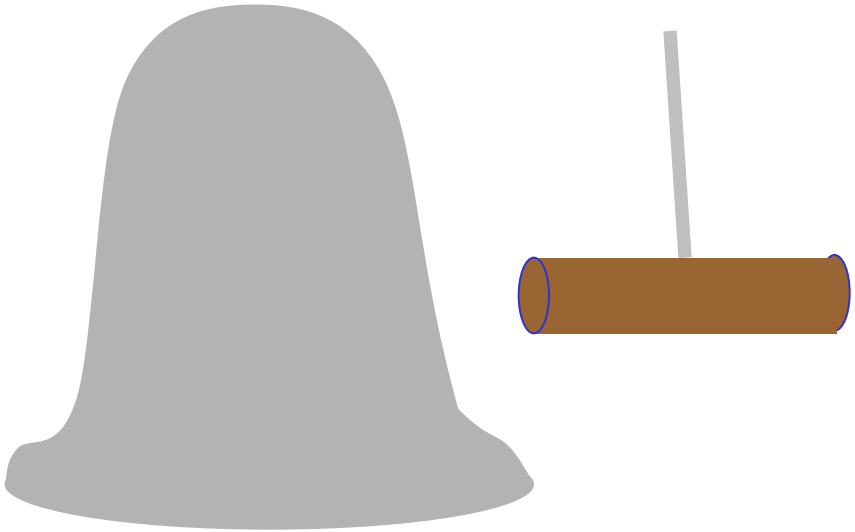
「概ね確かめられたと思っているが、Bモードが検出されればより確実だ」

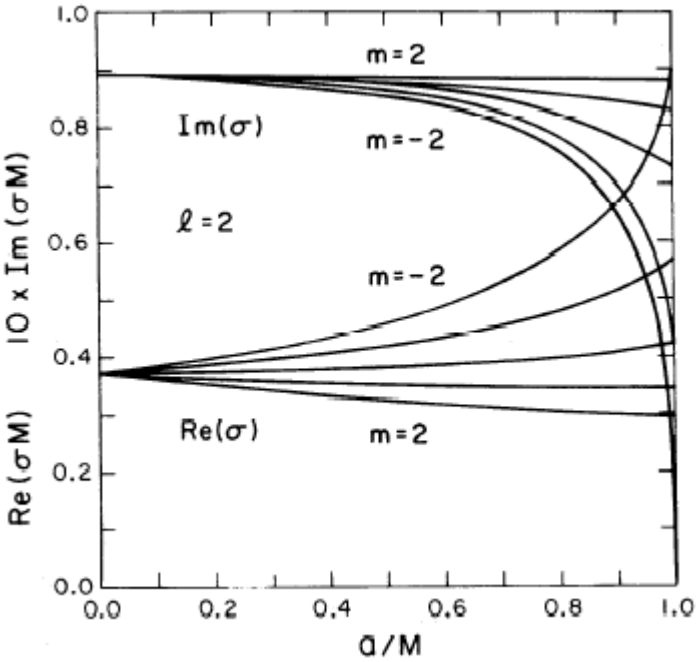
「概ね確かめられたと思っているが、QNMモードが検出されればより確実だ」

ブラックホールの準固有振動(QNM)

ブラック
ホール

≈





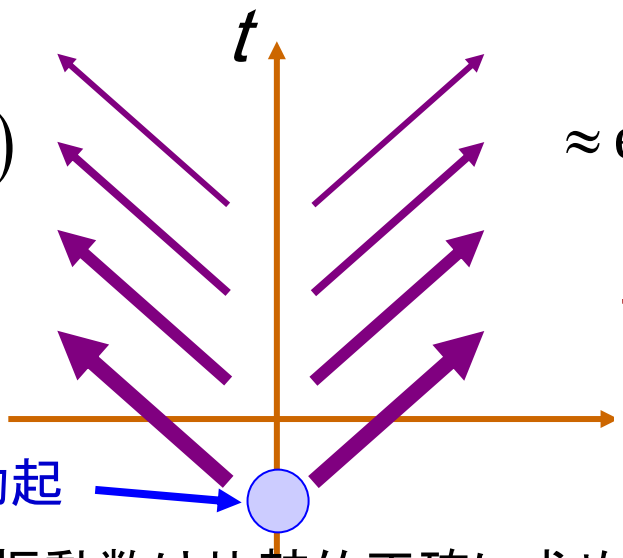
ブラックホールの質量と自転で決まる振動数と減衰率

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？

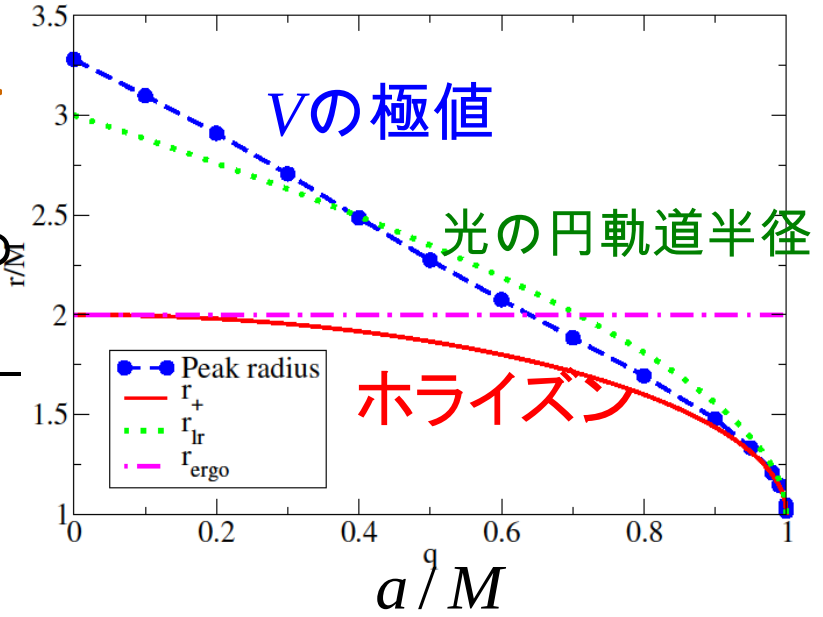
$$\approx \exp\left(-ik\left(t+r_*\right)\right)$$



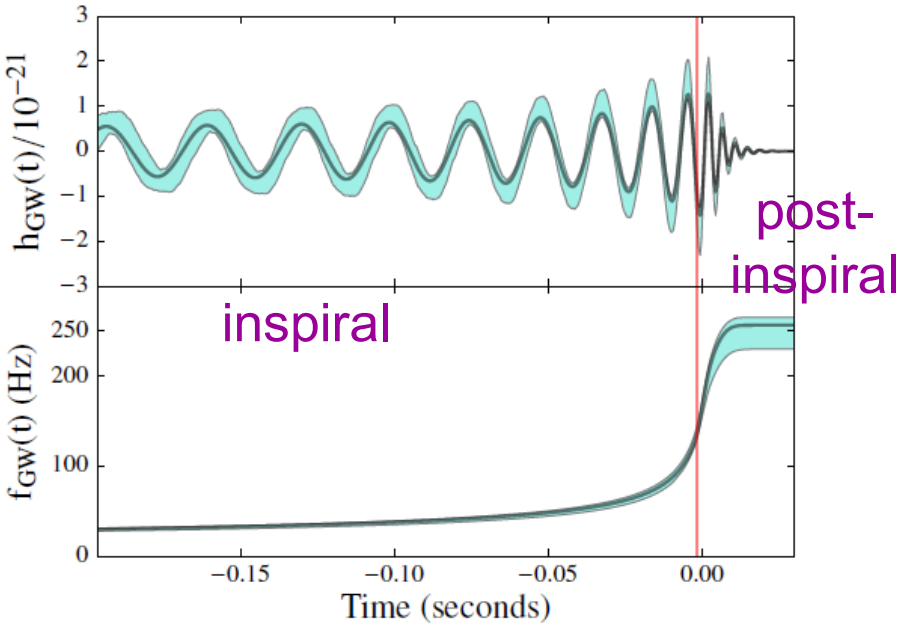
$$\approx \exp\left(-i\omega\left(t-r_*\right)\right)$$

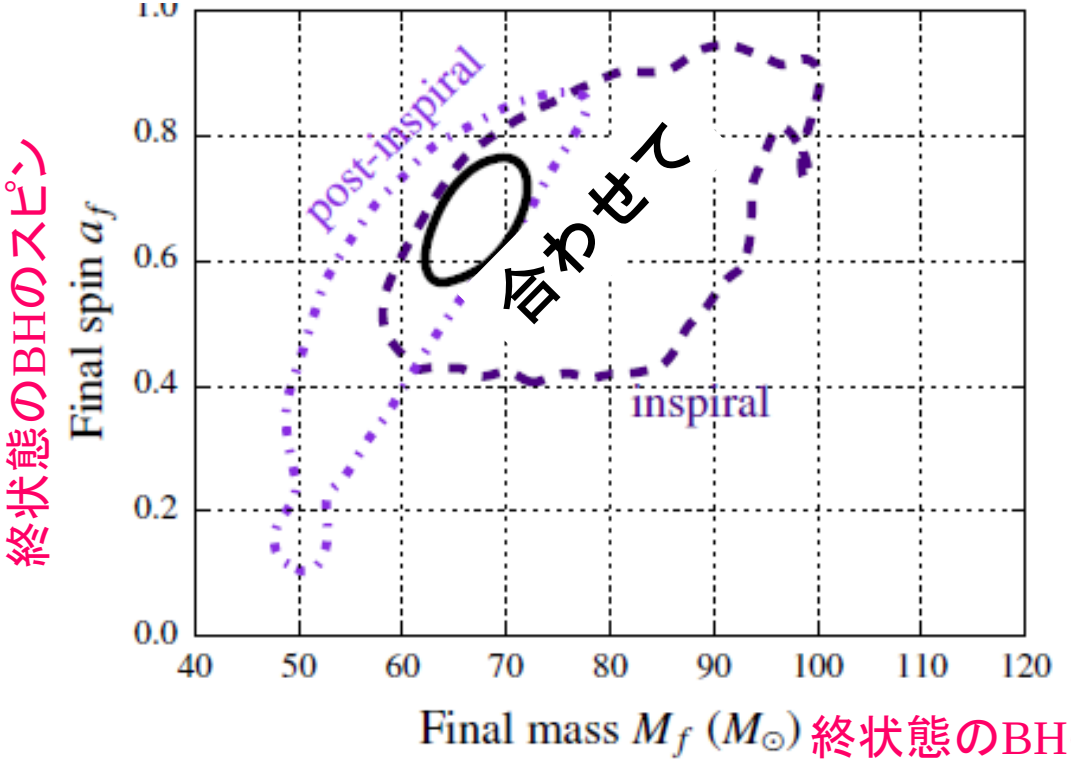
- WKB近似でQNM振動数は比較的正確に求められる (Schutz &Will, ApJ, 291 (1985))
- しかし、WKB近似の破たんがないと、内側でin-going、外側でout-goingの解は作れない。
- このWKB近似が破れるのは摂動方程式の有効ポテンシャル*V*の極値周辺。
- WKB近似ではそのまわりの振る舞いだけでQNM振動数が決まる。
- *V*の極値がQNMでどこまで見たかの目安を与える (Nakamura et al., Phys.Rev. D93 (2016))

半径



(Nakamura, Nakano, arXiv:1602.02385)





終状態のBHのスピン

終状態のBHの質量

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)

GW150914による修正重力に対する制限

Theoretical Mechanism	GR Pillar	PN	$\lvert\beta\rvert$	Example Theory Constraints		
			GW150914	Repr. Parameters	**GW150914**	Current Bounds
Scalar Field Activation	SEP	-1	$\mathbf{1.6\times10^{-4}}$	$\sqrt{\lvert\alpha_{\rm EdGB}\rvert}$ [km]	—	10^{7} [39], 2 [40–42]
	SEP, No BH Hair	-1	$\mathbf{1.6\times10^{-4}}$	$\lvert\dot{\phi}\rvert$ [1/sec]	—	10^{-6} [43]
	SEP, Parity Invariance	$+2$	$\mathbf{1.3\times10^{1}}$	$\sqrt{\lvert\alpha_{\rm CS}\rvert}$ [km]	—	10^{8} [44, 45]
Vector Field Activation	SEP, Lorentz Invariance	0	$\mathbf{7.2\times10^{-3}}$	(c_+, c_-)	$(\mathbf{0.9}, \mathbf{2.1})$	$(0.03, 0.003)$ [46, 47]
Extra Dimension Mass Leakage	4D spacetime	-4	$\mathbf{9.1\times10^{-9}}$	ℓ [μm]	$\mathbf{5.4\times10^{10}}$	10–10^{3} [48–52]
Time-Varying G	SEP	-4	$\mathbf{9.1\times10^{-9}}$	$\lvert\dot{G}\rvert$ [10^{-12}/yr]	$\mathbf{5.4\times10^{18}}$	0.1–1 [53–57]
Massive graviton	massless graviton	$+1$	$\mathbf{1.3\times10^{-1}}$	m_g [eV]	$\mathbf{1.2\times10^{-22}}$ [12]	10^{-29}–10^{-18} [58–62]
Modified Dispersion Relation (*Modified Special Relativity*)	$v_g = c$	$+5.5$	$\mathbf{2.3\times10^{2}}$	$\mathbb{A} > 0$ [1/eV]	$\mathbf{1.6\times10^{-7}}$	—
		$+5.5$	$\mathbf{2.3\times10^{2}}$	$\mathbb{A} < 0$ [1/eV]	$\mathbf{1.6\times10^{-7}}$	2.7×10^{-36} [63]
Modified Dispersion Relation (*Extra Dimensions*)	$v_g = c$	$+7$	$\mathbf{8.7\times10^{2}}$	$\mathbb{A} > 0$ [1/eV^2]	$\mathbf{9.3\times10^{4}}$	—
		$+7$	$\mathbf{8.7\times10^{2}}$	$\mathbb{A} < 0$ [1/eV^2]	$\mathbf{9.3\times10^{4}}$	4.6×10^{-56} [63]
Modified Dispersion Relation (*Lorentz Violation*)	SEP, Lorentz Invariance	—	—	c_+	**0.7** [64]	$(0.03, 0.003)$ [46, 47]

$$\tilde{h}_i(f) = A_i(f)e^{i\Phi_i(f)}\,. \qquad \delta\Phi_{\rm I,ppE}(f) = \beta\,(\pi\mathcal{M}f)^{b/3}$$

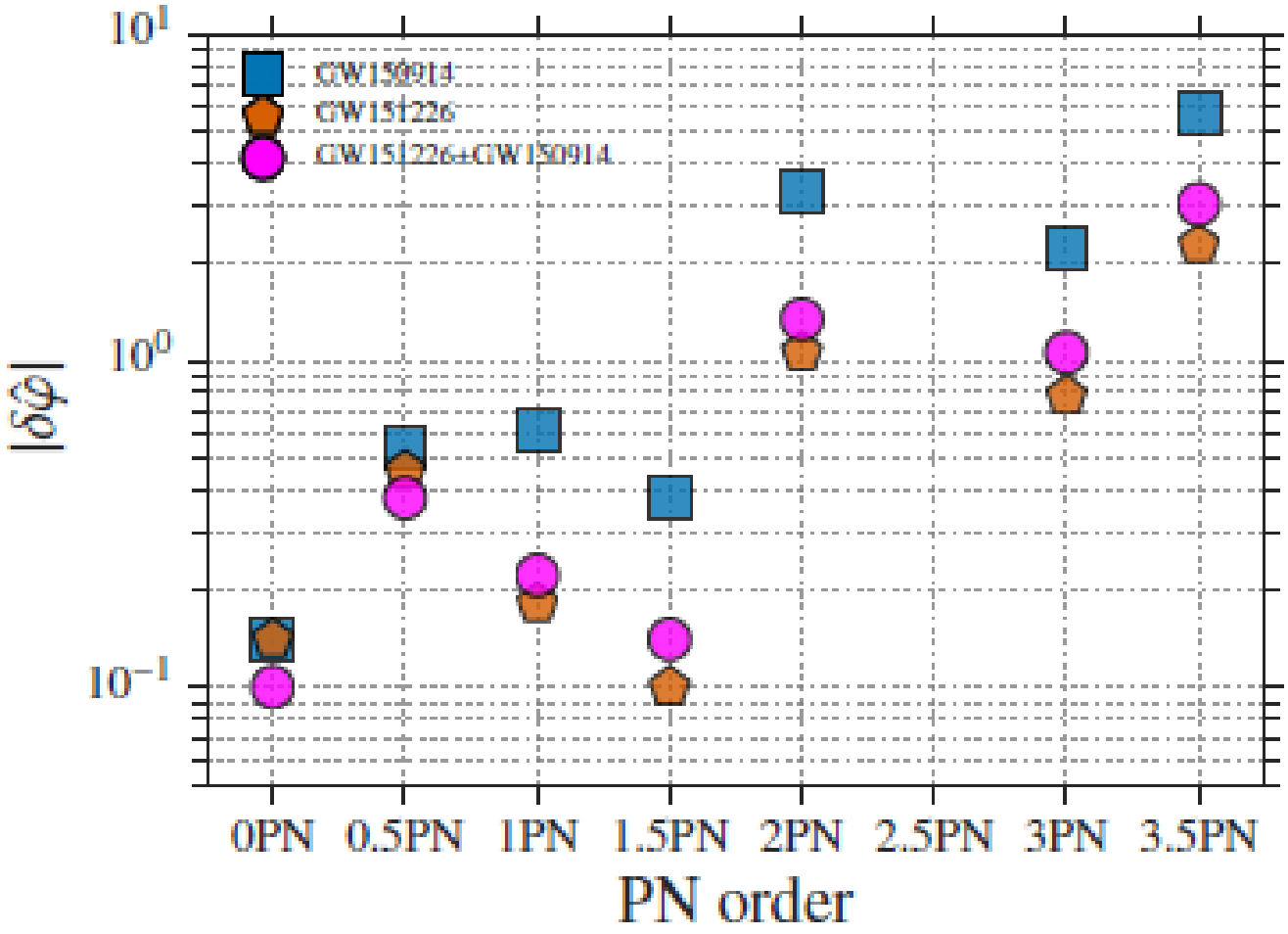
(arXiv:1603.08955)

重力子のCompton波長に対する制限は太陽系での制限を少し上回っている。

精度の向上にはinspiral phaseでの長期間の観測が必要

⇒ space interferometer

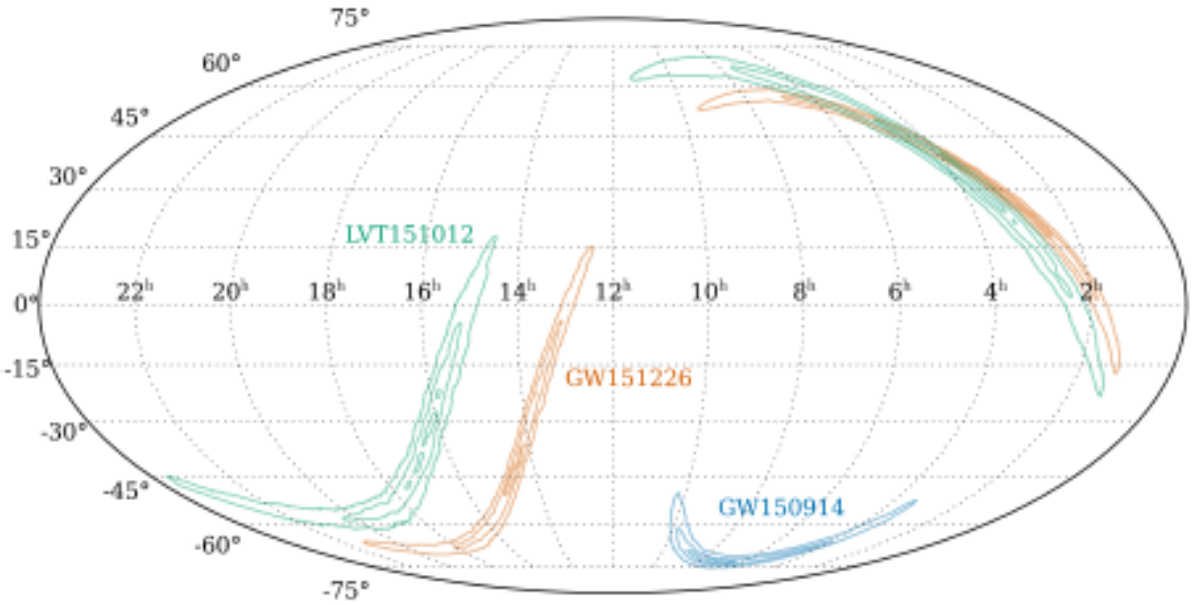
GW151226が加わったことによる修正重力に対する制限



1PN係数への制限は5倍くらい厳しくなった

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



GW150914の場合

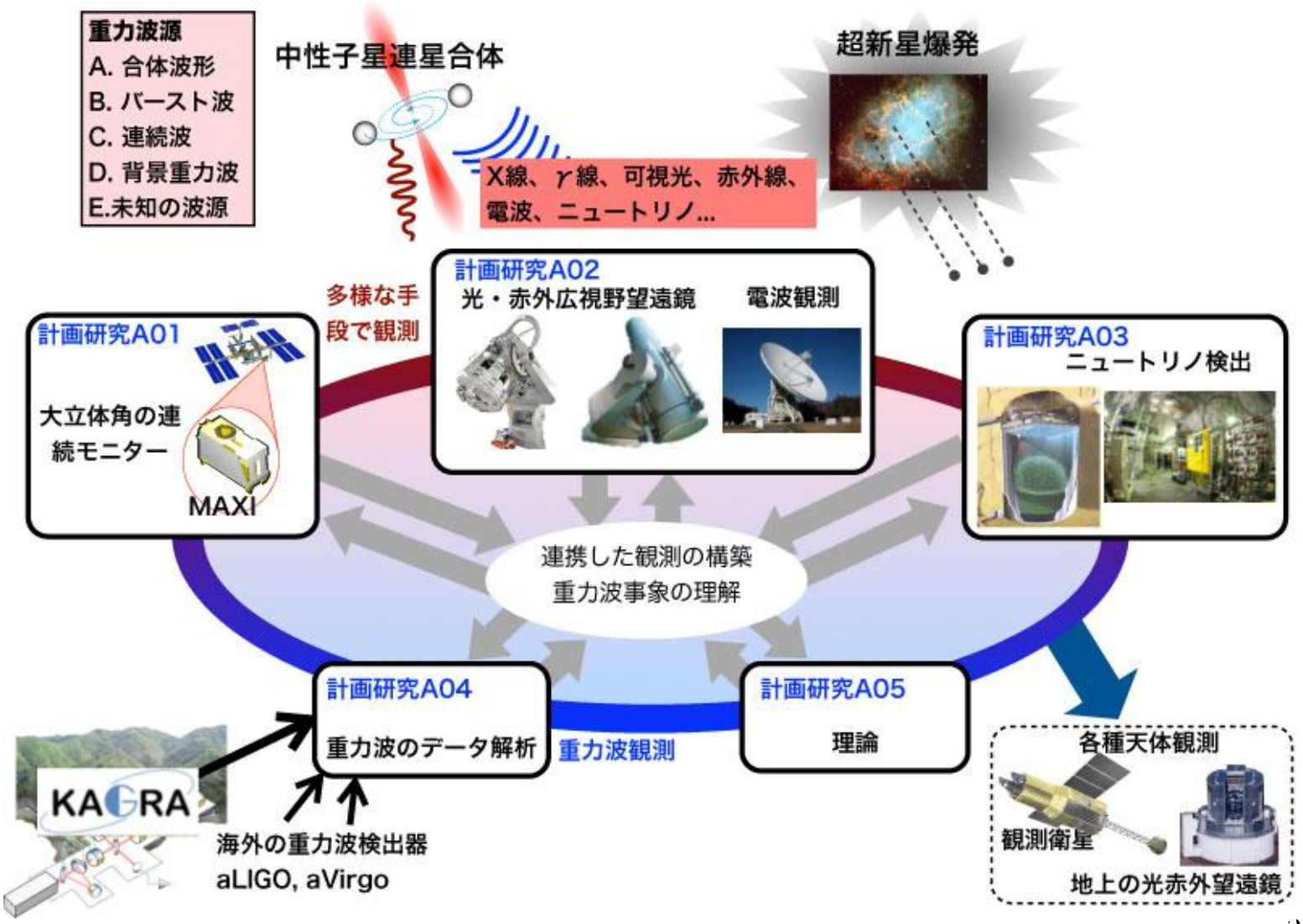
- 2台の検出器の間の7m秒の時間差で決まる円周上に制限される
- 感度の方向依存性とのマッチング

⇒ 600平方度 (90%)
（2月の発表時）

⇒ 230平方度 (90%)
（6月の論文）

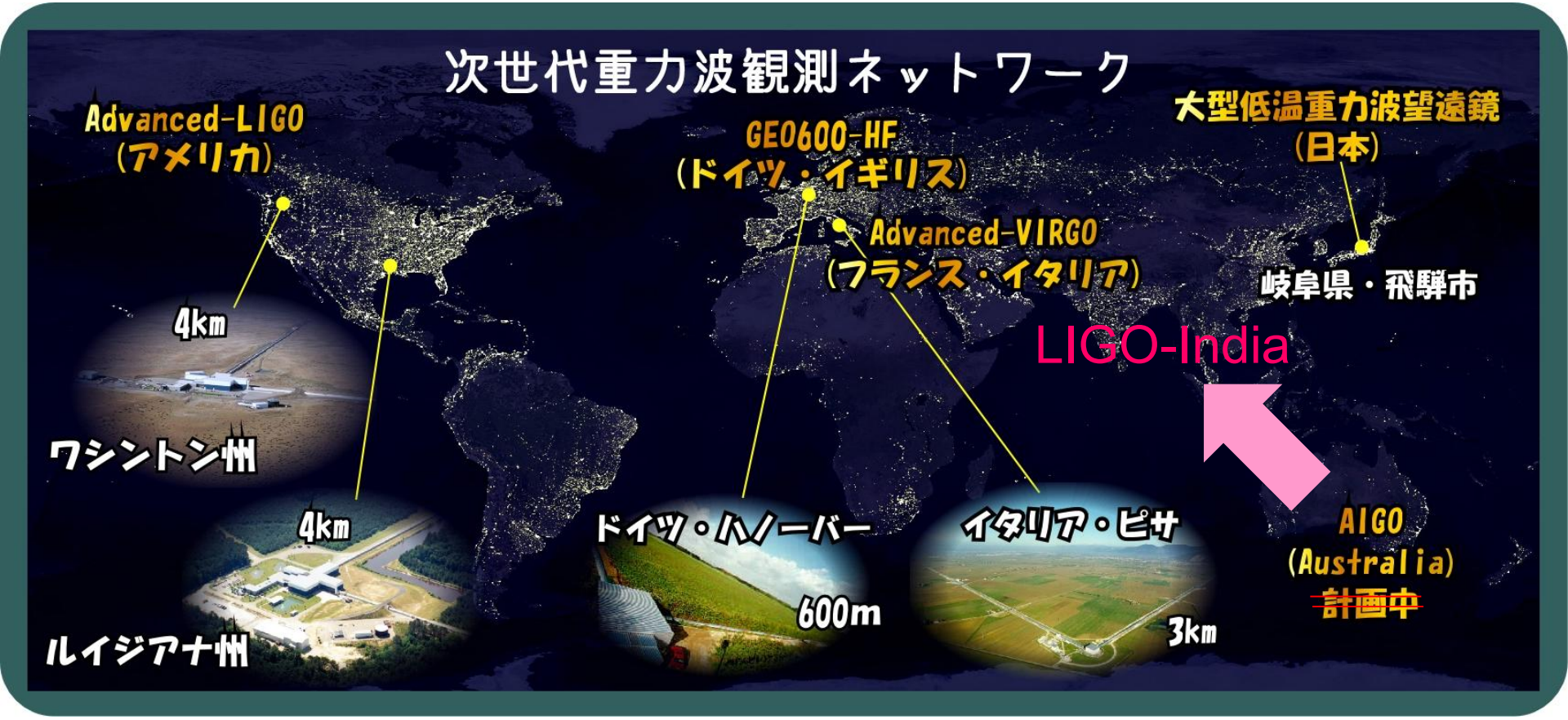
GW151226では
850平方度 (90%)

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



J-GEM と LIGO/VIRGOの間でMOUが交わされている

今後の展開


次世代重力波観測ネットワーク
Advanced-LIGO
(アメリカ)
GEO600-HF
(ドイツ・イギリス)
大型低温重力波望遠鏡
(日本)
Advanced-VIRGO
(フランス・イタリア)
岐阜県・飛騨市
LIGO-India
4km
ワシントン州
4km
ルイジアナ州
ドイツ・ハノーバー
600m
イタリア・ピサ
3km
AIGO
(Australia)
計画中

位置決定精度の向上

中性子星連星の位置決定精度

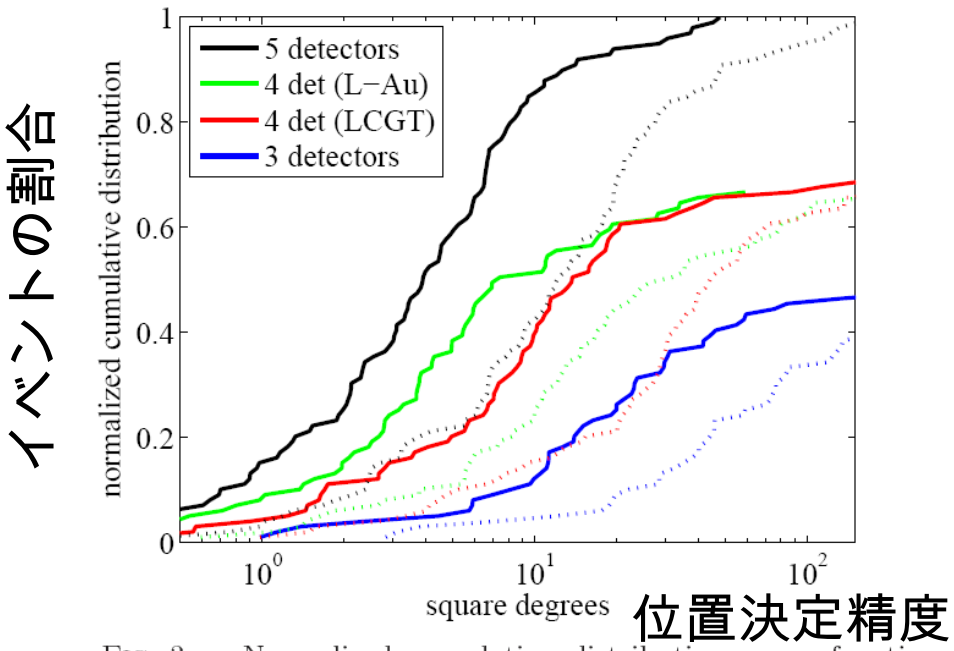


FIG. 3.— Normalized cumulative distributions as a function of the sky-error area (square degrees) of a sample of NS-NS binaries in Case I detection scenario. Key: Solid/dotted lines denote 68% and 95% confidence regions respectively. Black: LIGO+Virgo+LAu+LCGT network, green: LIGO+Virgo+LAu, red: LIGO+Virgo+LCGT,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

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

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。

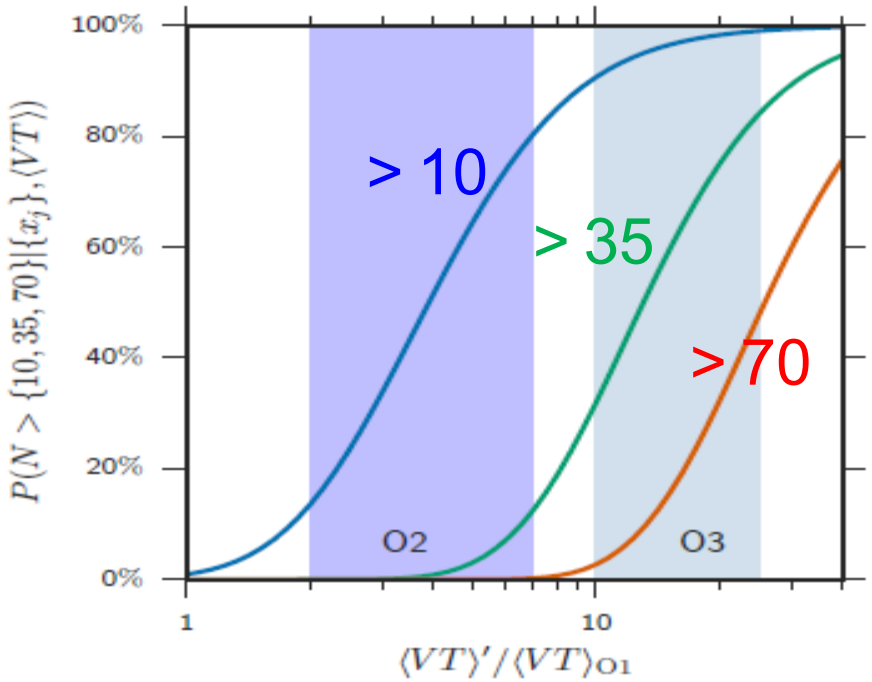
重力波データ解析からは5−10分での速報を目指している

KISS (1.05m) 4deg^2
PTF (1.2m) 7deg^2
Subaru-HSC(8.2m) 2.3deg^2
LSST (8.4m) 9.4deg^2

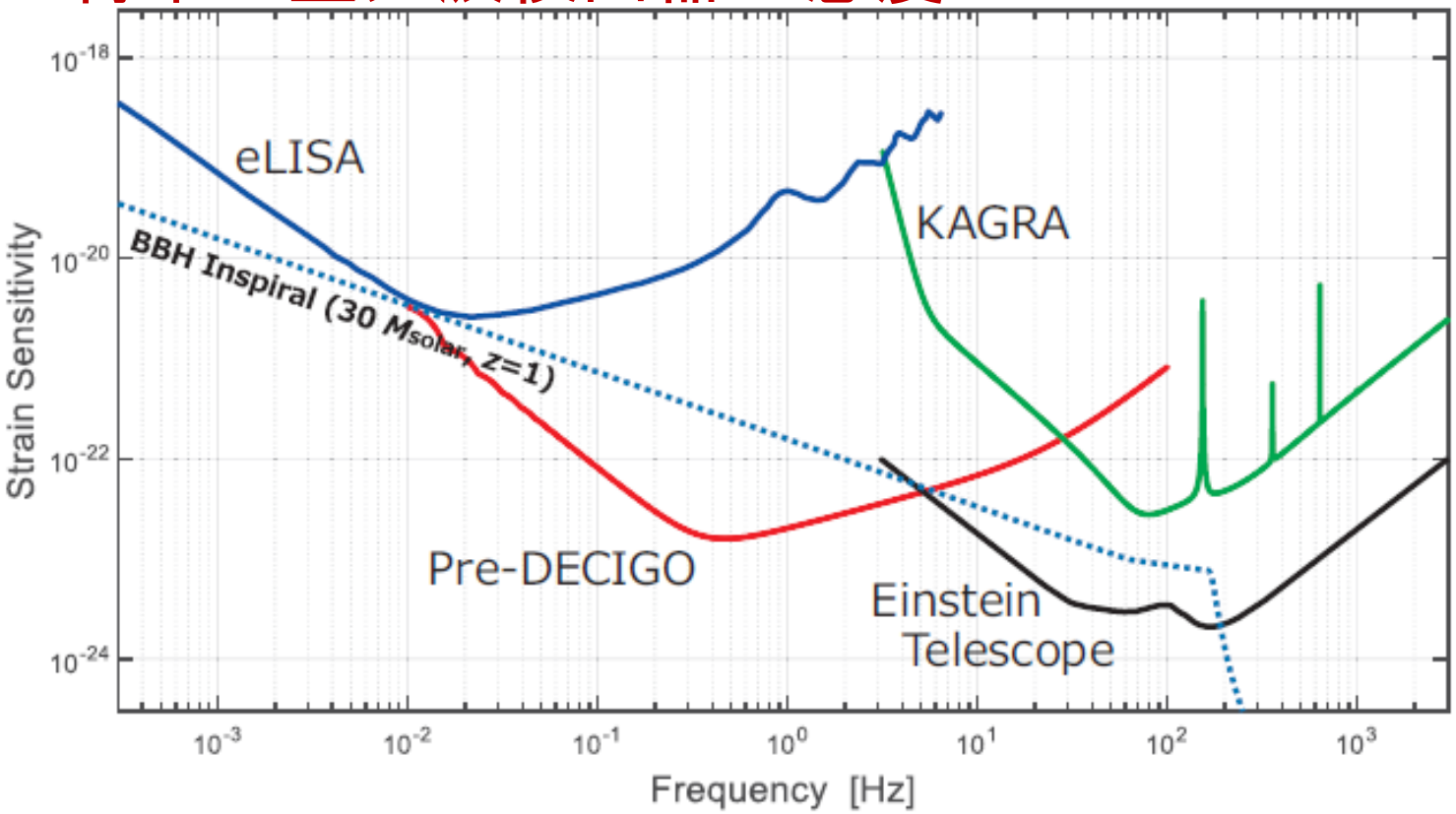
高いイベントレートが期待される

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



将来の重力波検出器の感度



$$h_c = 1.89\times10^{-21}(1+z)^{5/6}\left(\frac{M_c}{26.1M_\odot}\right)^{5/6}\left(\frac{\nu}{0.1\,\mathrm{Hz}}\right)^{-1/6}\left(\frac{d_L(z)}{1\,\mathrm{Gpc}}\right)^{-1} \propto (1+z)^{-1/6}$$

for $z >> 1$

z =30でも検出可能

⇒ Sourceのredshift分布からBBH形成シナリオを区別可能

高い方向決定精度で事前に連星の方向を予言

(arXiv:1607.00897)

まとめ

- 重力波の直接検出がされた
- $30M_{太陽}$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 (～年の周期)

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ー
- 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