



重力波研究の現状 重力波源 電磁波対応天体探索への期待

田越秀行
(大阪市立大学)

木曽広視野サーベイと京都3.8m即時分光によるタイムドメイン天文学の推進

2017/2/21

重力波

一般相対論による予言(アインシュタイン, 1916)
時空の歪みの波動
光速

発生源: 強い重力を持つ天体など
ブラックホール, 中性子星, 白色矮星
及びこれらが関係する天体現象

地上検出器の重力波源

- コンパクト連星合体
- 重力崩壊型超新星爆発
- (回転)中性子星
- 宇宙紐
- 天体起源背景重力波, ...

現在の重力波検出器プロジェクト

- **アメリカ LIGO** (ルイジアナ州, ワシントン州の2カ所) 4km
2010年まで initial LIGOとして稼働.
advanced LIGOへアップグレード (O1: 2015/9/18-2016/1/12)



LIGO-Livingston



LIGO-Hanford



LIGO-India(承認)

- **イタリア・フランス Virgo** (Cascina, イタリア) 3km
2011年頃まで稼働
その後advanced Virgoへアップグレード中



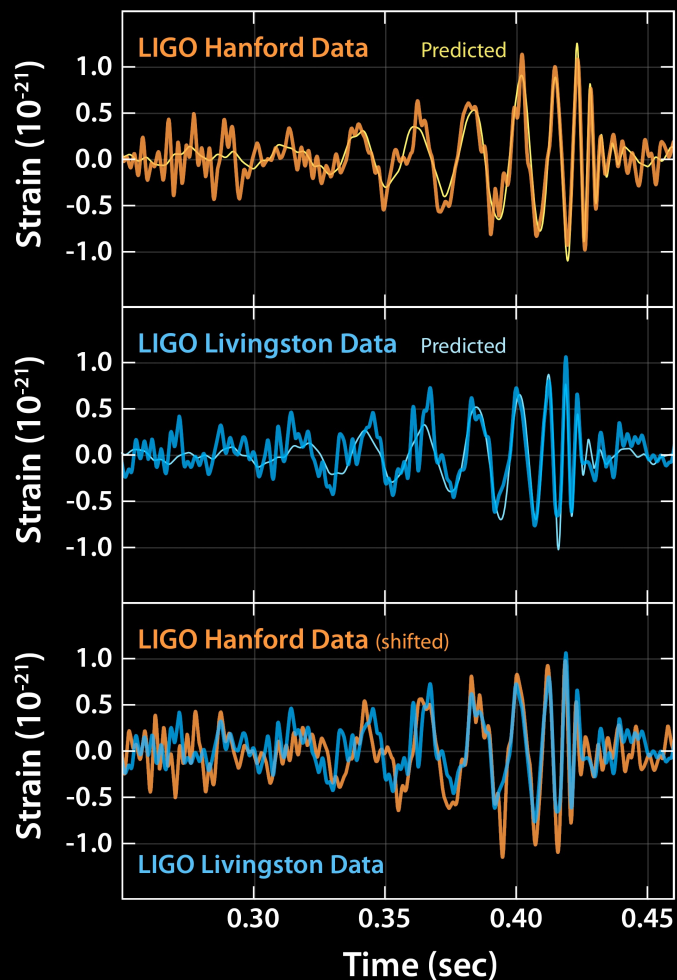
Virgo

- **日本**
TAMA300 (1995-,1999-2004-...)
KAGRA (2010-)

LIGOが発見した重力波

LIGOが発見した重力波イベント(2つ+候補1つ)

GW150914



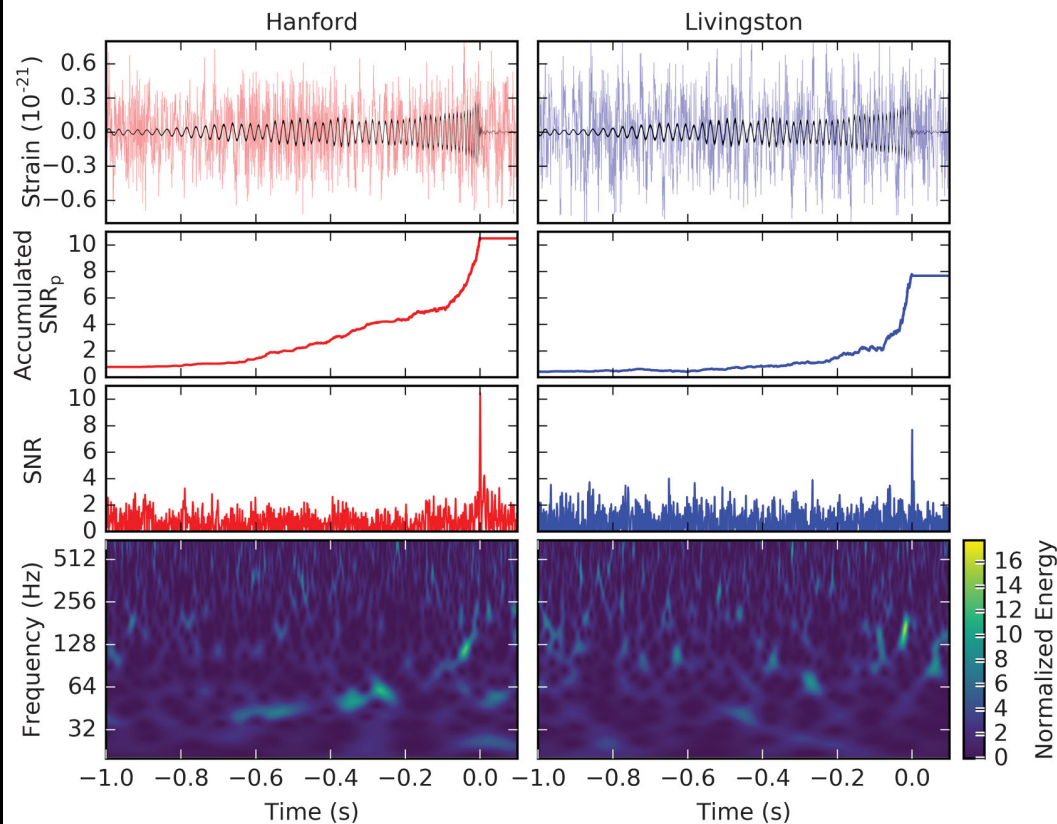
Phys. Rev. Lett. 116, 061102 (2016)

Phys. Rev. Lett. 116, 241103 (2016)

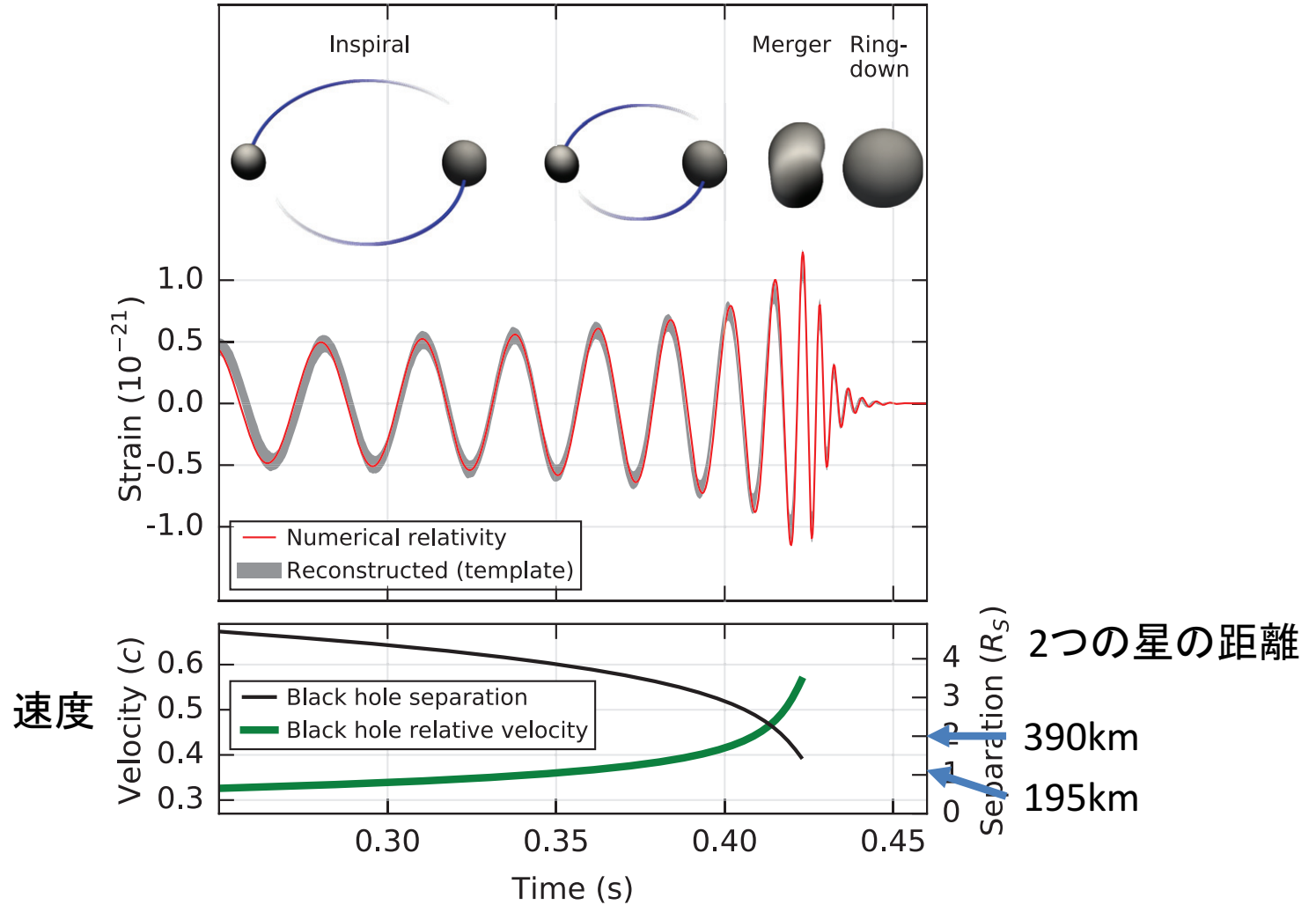
Phys. Rev. X 6, 041015 (2016)

.....

GW151226



GW150914



BBH合体のイベントレート

以前の評価

Class. Quantum Grav. **27** (2010) 173001

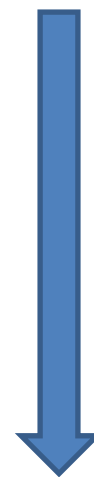
Table 4. Compact binary coalescence rates per Mpc^3 per Myr^a .

| Source | R_{low} | R_{re} | R_{high} | R_{max} |
|---|-------------------------|-----------------|-------------------|------------------|
| NS–NS ($\text{Mpc}^{-3} \text{Myr}^{-1}$) | 0.01 [1] | 1 [1] | 10 [1] | 50 [16] |
| NS–BH ($\text{Mpc}^{-3} \text{Myr}^{-1}$) | 6×10^{-4} [18] | 0.03 [18] | 1 [18] | |
| BH–BH ($\text{Mpc}^{-3} \text{Myr}^{-1}$) | 1×10^{-4} [14] | 0.005 [14] | 0.3 [14] | |

観測に基づいた評価

| Mass distribution | $R/(\text{Gpc}^{-3}\text{yr}^{-1})$ | | |
|-------------------|-------------------------------------|----------------------|----------------------|
| | 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} |
| Astrophysical | | | |
| Flat in log mass | 31^{+43}_{-21} | 30^{+43}_{-21} | 30^{+43}_{-21} |
| Power Law (−2.35) | 100^{+136}_{-69} | 95^{+138}_{-67} | 99^{+138}_{-70} |

0.1 – 300 / Gpc^3/yr



9 – 240 / Gpc^3/yr

連星合体イベントレート予測値

Class. Quantum Grav. **27** (2010) 173001

Table 5. Detection rates for compact binary coalescence sources.

| IFO | Source ^a | $\dot{N}_{\text{low}} \text{ yr}^{-1}$ | $\dot{N}_{\text{re}} \text{ yr}^{-1}$ | $\dot{N}_{\text{high}} \text{ yr}^{-1}$ | $\dot{N}_{\text{max}} \text{ yr}^{-1}$ |
|----------|---------------------|--|---------------------------------------|---|--|
| Initial | NS–NS | 2×10^{-4} | 0.02 | 0.2 | 0.6 |
| | NS–BH | 7×10^{-5} | 0.004 | 0.1 | |
| | BH–BH | 2×10^{-4} | 0.007 | 0.5 | |
| | IMRI into IMBH | | | $<0.001^{\text{b}}$ | 0.01^{c} |
| | IMBH–IMBH | | | $10^{-4\text{d}}$ | $10^{-3\text{e}}$ |
| Advanced | NS–NS | 0.4 | 40 | 400 | 1000 |
| | NS–BH | 0.2 | 10 | 300 | |
| | BH–BH | 0.4 30 | 20 | 1000 | |
| | IMRI into IMBH | | | 10^{b} | 300^{c} |
| | IMBH–IMBH | | | 0.1^{d} | 1^{e} |

LIGO, Virgoの状況

LIGO O2

Engineering run: 11月初めから

O2前半: 11月30日から

年末年始中断後1月第2週から再開

O2後半: 3月下旬から5月まで

NS-NS $\sim 70\text{Mpc}$

BBH(10+10 M_{sun}) $\sim 300\text{Mpc}$

BBH(30+30 M_{sun}) $\sim 700\text{Mpc}$

<http://www.ligo.org/news/index.php#O2Jan2017update>

Virgo

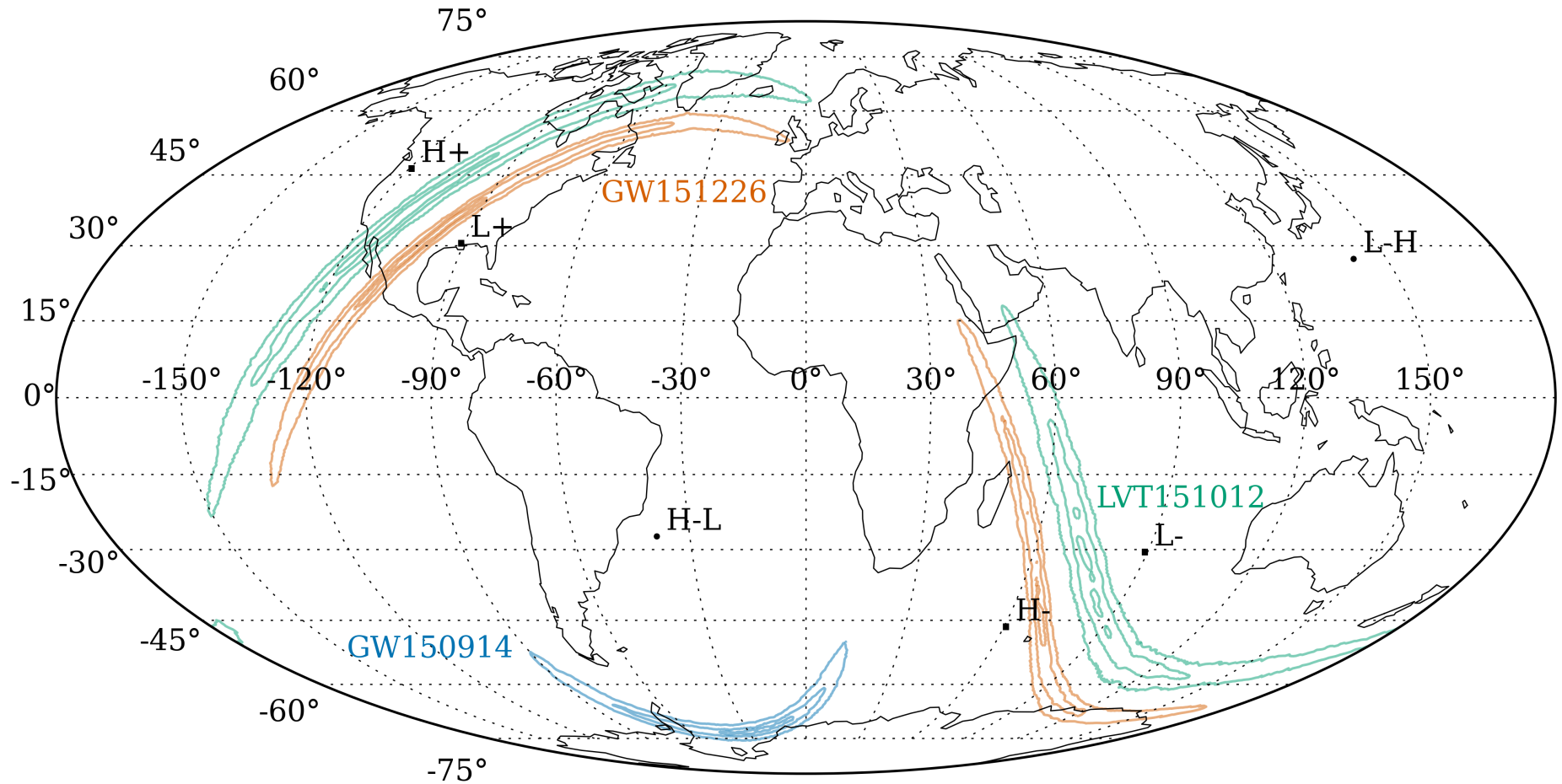
3月, O2後半からの観測参加を目指している

1月末に決定のはず=>どうなったかについては未発表

方向決定精度

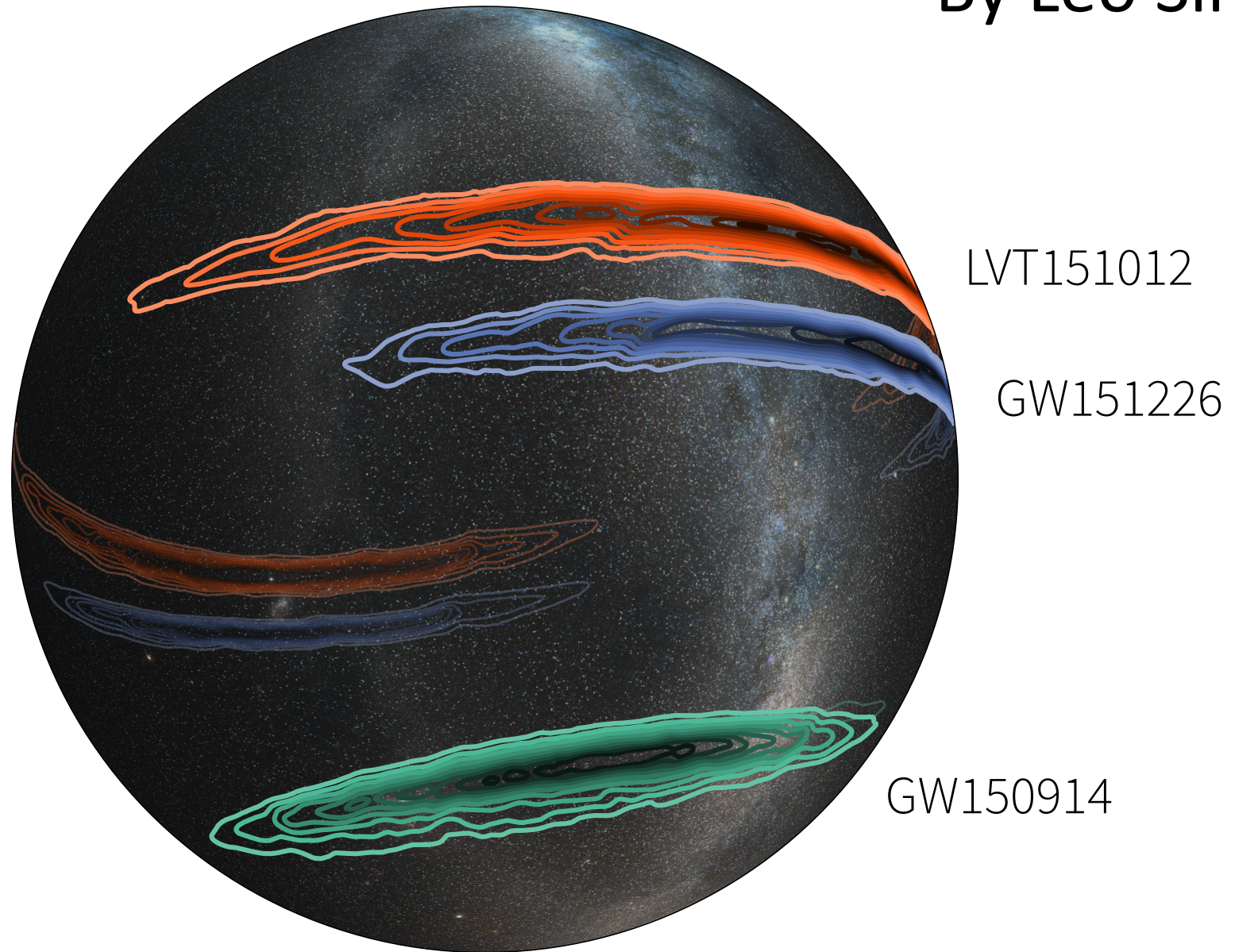
検出器2台では、方向は良く決まらない。

arXiv:1606.04856



検出器2台では、方向は良く決まらない。

By Leo Singer

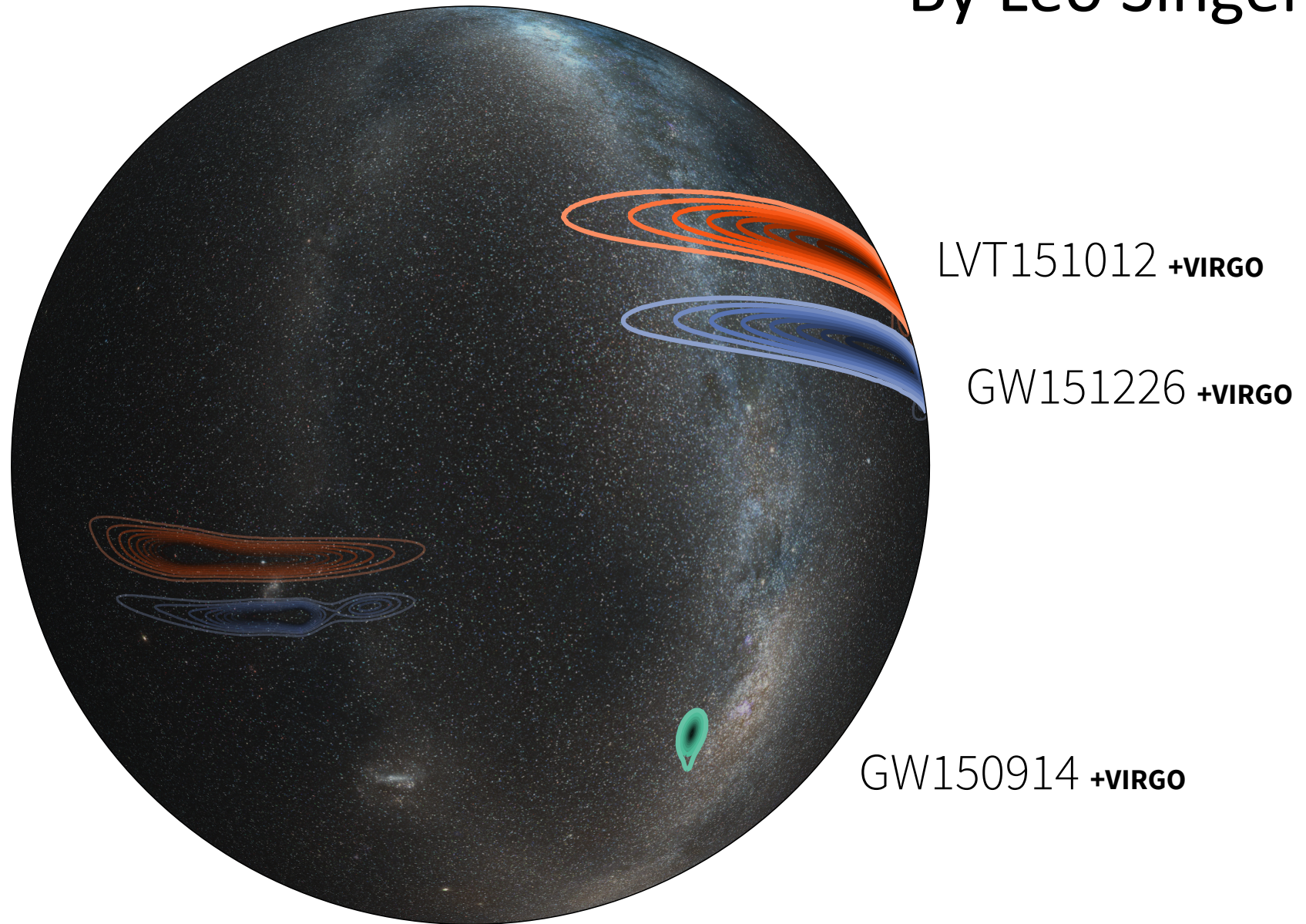


LVT151012

GW151226

GW150914

By Leo Singer



日本の重力波検出器KAGRA

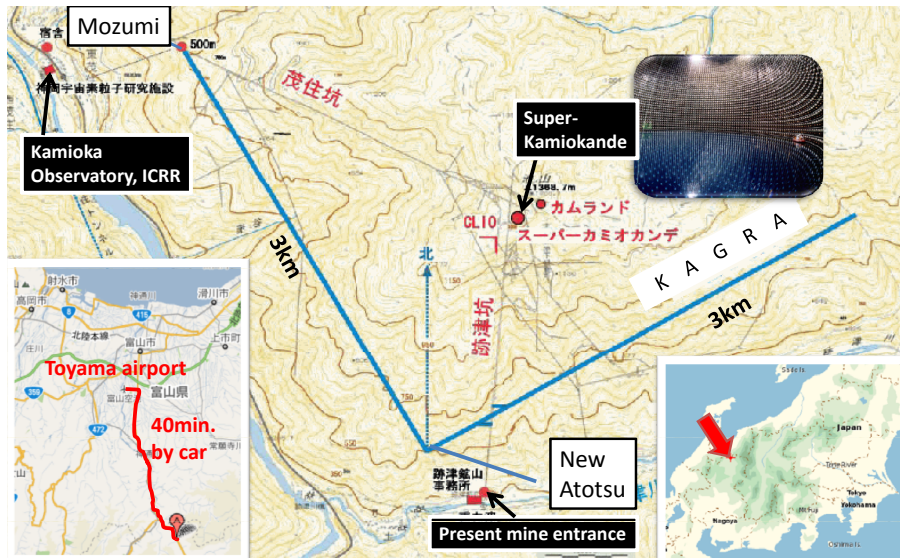


東京大学宇宙線研究所(ホスト機関)
国立天文台, 高エネルギー加速器研究機構
国内外の大学などの研究機関

岐阜県飛騨市神岡町神岡鉱山に建設
腕の長さ3kmのレーザー干渉計
低温鏡を使用する

2016年3月4月に初めての観測運転実施
2017年度末までに低温鏡による観測予定
その後本格的な観測運転予定

重力波天文学推進のために必要不可欠
国際的にも極めて重要な検出器
(方向決定や全天を網羅するため, etc)



KAGRAの状況

2016年3月25日, KAGRAの最初の観測運転開始

iKAGRA: 簡単なレーザー干渉計構成,

室温鏡による試験観測

前半: 3/25-31, 後半: 4/12-25

その後は, bKAGRAへ向けたインストール作業中

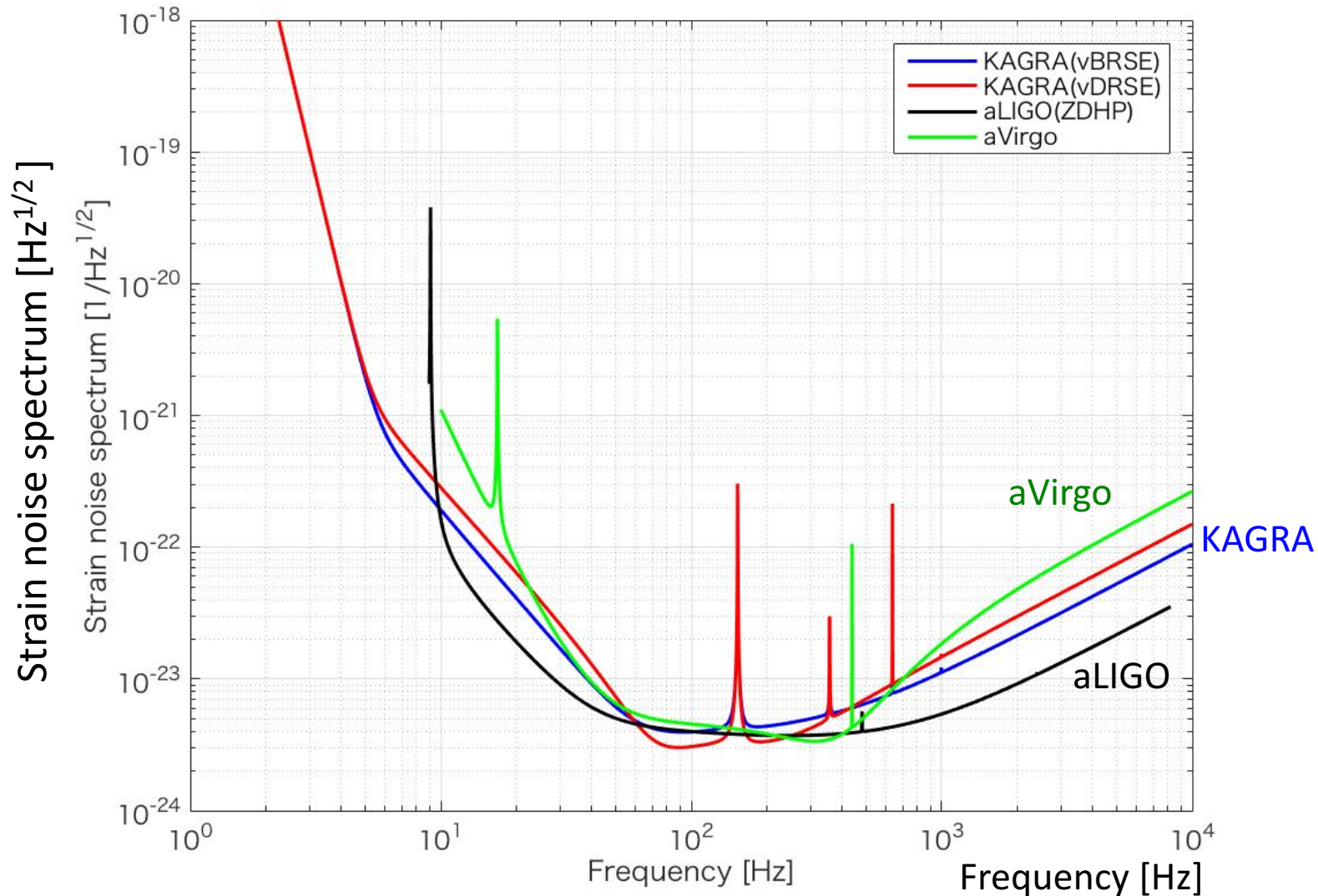
bKAGRA: フルスペックのKAGRA

2017年度末 低温鏡での試験運転

2019年 フルスペックの構成完成

その後本格観測へ

デザイン感度比較 - aLIGO, aVIRGO, KAGRA -



Data for the KAGRA noise spectrum :

<http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/researcher/parameter>

重力波の種類

データ解析方法に基づく重力波の分類

- Deterministic

| | 波形分かる | 波形分からない |
|----------------|-------------|-------------------|
| short duration | 連星合体 宇宙紐 | 超新星爆発 パルサーグリッチ |
| long duration | 回転中性子星 | |

- Stochastic

天体起源背景放射
初期宇宙起源背景放射

→ 30分以上
地球回転無視できない

天文観測との連携の重要性

•Triggered search

重力波以外の信号(電磁波, ニュートリノ)の観測から時刻、方向を絞り込む.

重力波検出のしきい値が下げられる. 信号検出可能性が高まる.

ガンマ線バースト, 超新星爆発,
等々でなされてきた

LIGO-Virgo の2009-2010データの解析では,
154個のGRBの時刻, 方向の情報を使ったトリガー探査では,
使わない解析より2倍程度しきい値が下げられた.

(距離で2倍遠くまで観測できた) arXiv:1205.2216

フォローアップ観測への期待

- フォローアップ観測

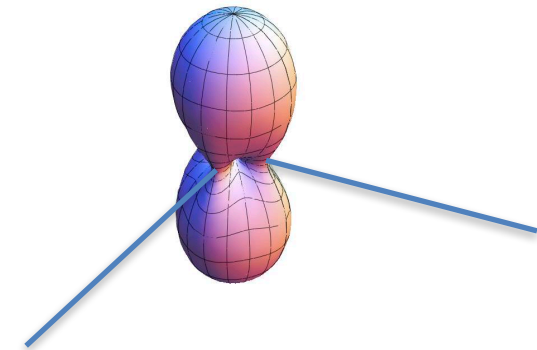
重力波をまず検出し、その時刻、方向を電磁波で観測を行う。

重力波検出器は広視野

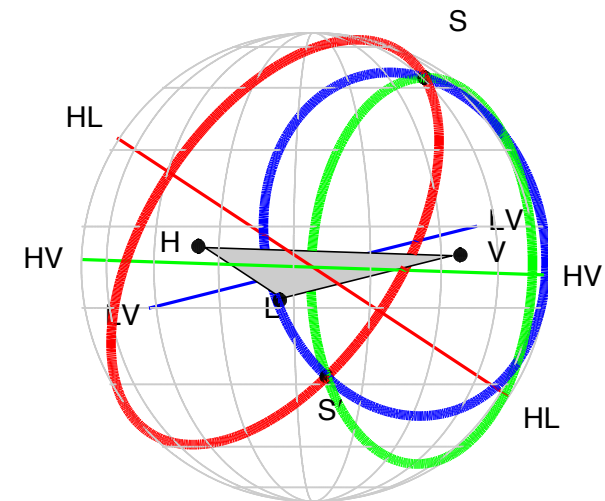
- 重力波検出の確からしさの向上
- 正確な方向と距離が判明し、重力波源パラメータのより良い決定
- 素性がよく分からない重力波信号の波源が明らかになる

方向決定精度

- レーザー干渉計は1台では方向は分からない
- 3台以上の検出器必要
- 方向決定精度に一番効くのは時刻決定精度
(到来時刻の差)



レーザー干渉計
アンテナパターン(指向性)



方向決定精度

NS-NS 合体 @180Mpc (95%CI)

| (1.4,1.4)Msun | LHV | LHV ^K |
|--|-------|------------------|
| median of $\delta\Omega$ [Deg ²] | 30.25 | 9.5 |

L:LIGO-Livingston

H:LIGO-Hanford

V: Virgo

^K: KAGRA

^I: LIGO-India

J.Veitch et al., PRD85, 104045 (2012)

(Bayesian inference)

See also Rodriguez et al. 1309.3273

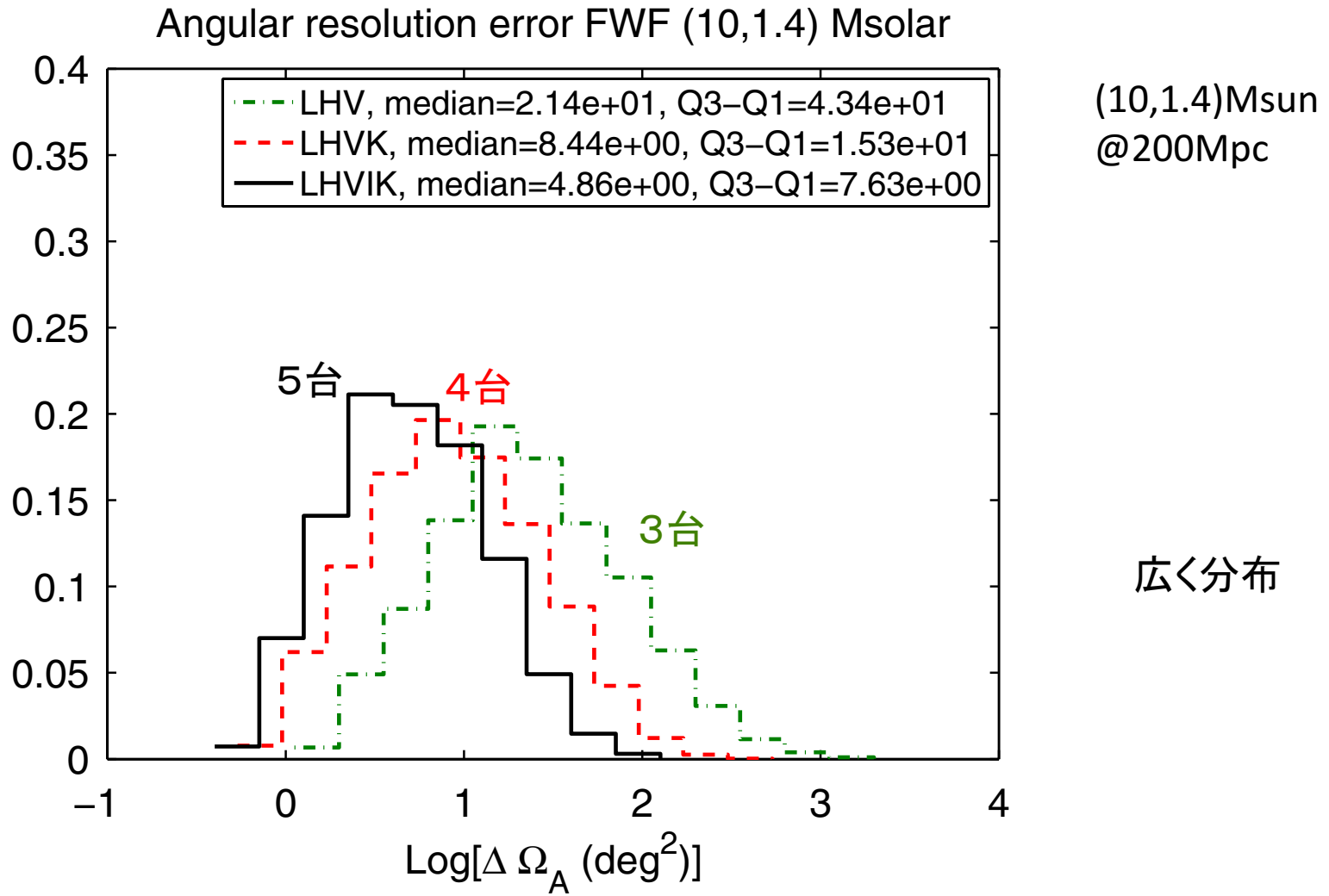
direction, inclination, polarization angle
are given randomly

BH-NS 合体 @200Mpc

| (10,1.4)Msun | LHV | LHV ^K | LHV ^{KI} |
|--|------|------------------|-------------------|
| median of $\delta\Omega$ [Deg ²] | 21.5 | 8.44 | 4.86 |

(Tagoshi, Mishra, Arun, Pai, PRD90, 024053 (2014) , Fisher matrix)

方向決定精度分布



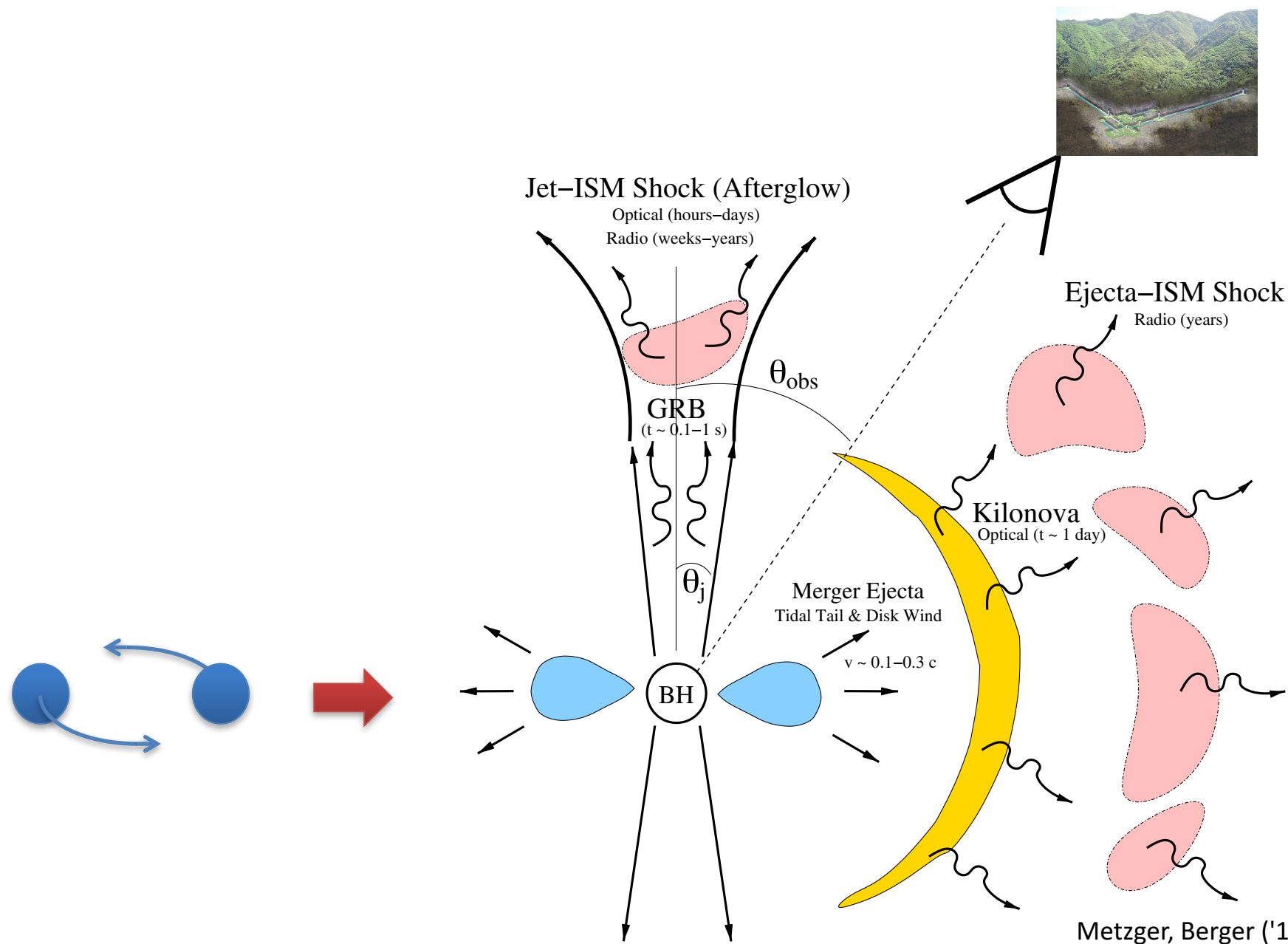
軌道傾斜角

Median of $\Delta\iota$ [rad] (10,1.4) Msun @200Mpc
((1.4,1.4)Msun) @200Mpc only SNR_{network} >8

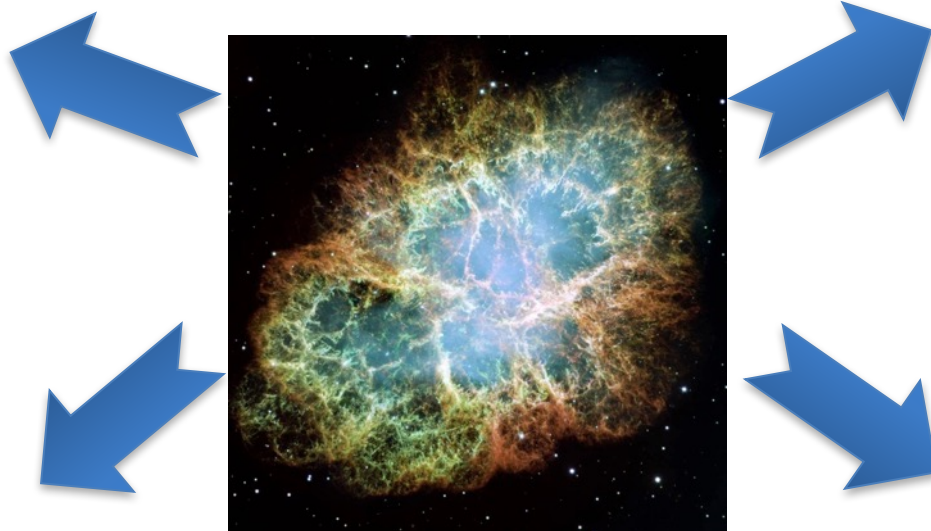
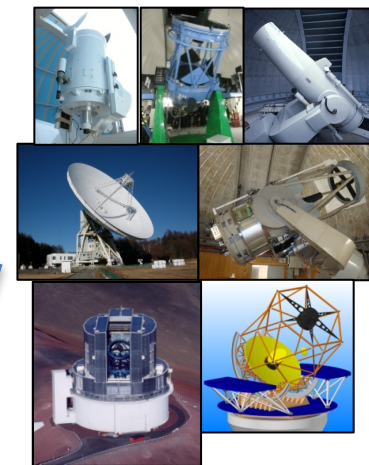
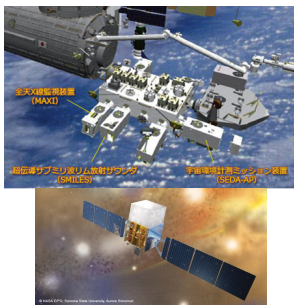
| | all unknown | direction known | D_L and direction known |
|-------|---------------------|---------------------|---------------------------|
| LHV | 9.3deg (41.5deg) | 8.3deg (34.4deg) | 3.3deg (8.6deg) |
| LHVK | 7.1deg (24deg) | 6.5deg (21.0deg) | 2.7deg (6.4deg) |
| LHVKI | 5.8deg (15.5deg) | 5.5deg (14.3deg) | 2.2deg (5.1deg) |

距離と軌道傾斜角は縮退している
距離が分かると、軌道傾斜角良く決まる

ショートガンマ線バーストと連星合体



超新星爆発



同時観測
超新星爆発メカニズム解明



重力波：銀河系近傍(<数10kpc)で起これば検出可能 23

超新星爆発重力波 観測可能距離

Gossan et al. 1511.02836

See also Nakamura et al.
1602.03028

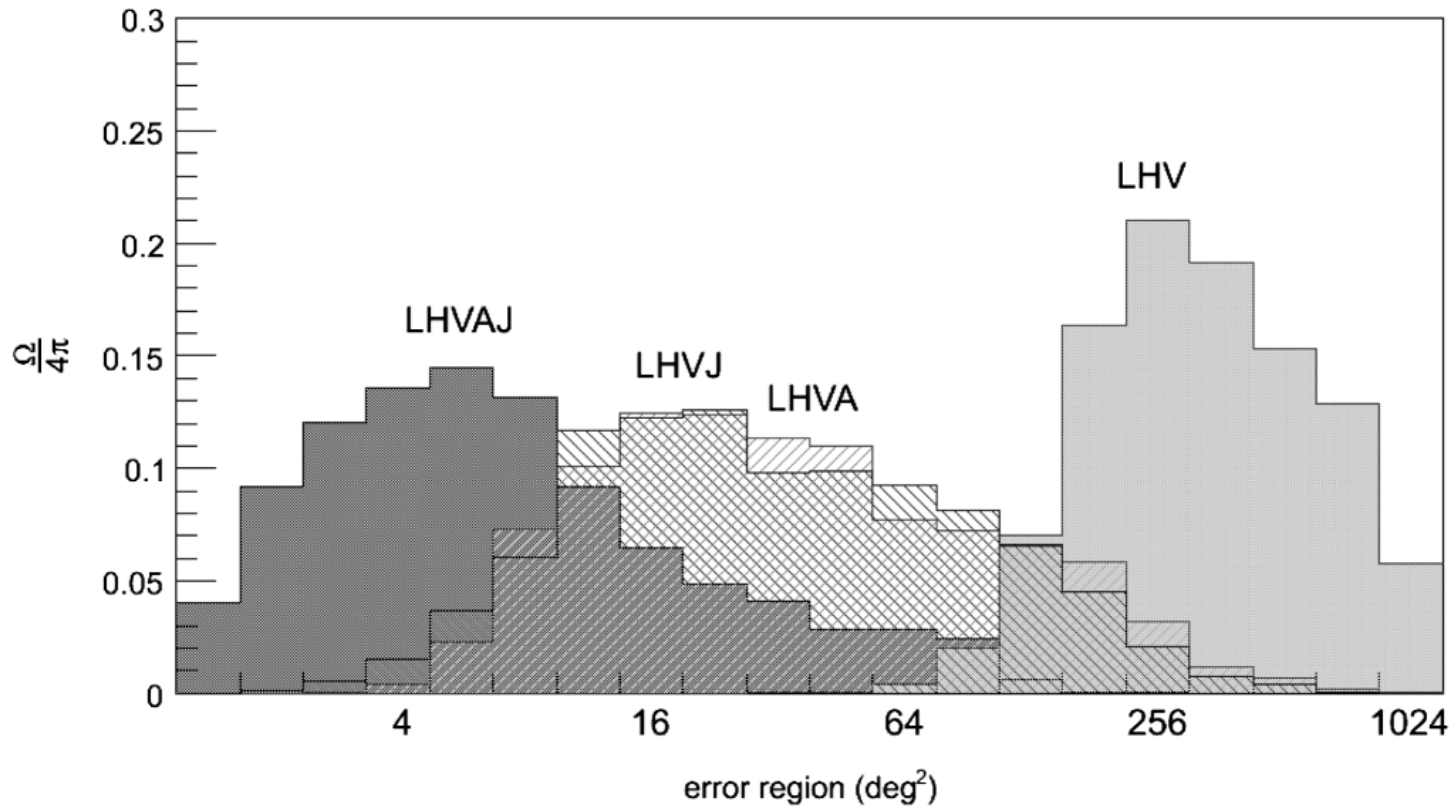
| | 銀河中心方向 | | | | LMC方向 | | | |
|----------|--------------------------------------|------|----------|----------|--------------------------|------|----------|----------|
| | $d^{50\%}$ [kpc] for Galactic center | | | | $d^{50\%}$ [kpc] for LMC | | | |
| Waveform | HL | 2015 | HLV 2017 | HLV 2019 | HL | 2015 | HLV 2017 | HLV 2019 |
| müller1 | | 2.3 | 3.3 | 4.7 | | 2.5 | 3.8 | 5.3 |
| müller2 | | 1.0 | 1.5 | 2.2 | | 1.2 | 1.8 | 2.5 |
| müller3 | | 1.2 | 1.5 | 2.4 | | 1.4 | 1.6 | 2.7 |
| ott | | 2.4 | 3.4 | 5.5 | | 3.2 | 4.9 | 7.2 |
| yak | | 1.5 | 1.8 | 5.1 | | 1.6 | 2.1 | 6.2 |
| dim1 | | 7.0 | 9.1 | 17 | | 7.4 | 10 | 18 |
| dim2 | | 11 | 17 | 29 | | 13 | 20 | 32 |
| dim3 | | 13 | 21 | 38 | | 18 | 32 | 50 |
| sch1 | | 31 | 43 | 78 | | 36 | 48 | 90 |
| sch2 | | 35 | 50 | 98 | | 45 | 56 | 120 |

| Waveform Type | Ref. | Waveform Name | $\langle h_{\text{rss}} \rangle$ [10^{-22} at 10 kpc] | f_{peak} [Hz] | E_{GW} [$10^{-10} M_{\odot} c^2$] |
|--|-------|---------------|---|---------------------------|---|
| 2D neutrino-driven convection and SASI | [14] | yak | 1.89 | 888 | 0.11 |
| 3D neutrino-driven convection and SASI | [37] | müller1 | 1.66 | 150 | 0.14 |
| 3D neutrino-driven convection and SASI | [37] | müller2 | 3.85 | 176 | 0.42 |
| 3D neutrino-driven convection and SASI | [37] | müller3 | 1.09 | 203 | 0.26 |
| 3D neutrino-driven convection and SASI | [29] | ott | 0.24 | 1067 | 4.46 |
| 2D rotating core collapse | [17] | dim1 | 1.05 | 774 | 8.54 |
| 2D rotating core collapse | [17] | dim2 | 1.80 | 753 | 30.97 |
| 2D rotating core collapse | [17] | dim3 | 2.69 | 237 | 1.53 |
| 3D rotating core collapse | [147] | sch1 | 5.14 | 465 | 1.92×10^3 |
| 3D rotating core collapse | [147] | sch2 | 5.80 | 700 | 3.53×10^3 |

バースト波方向決定精度

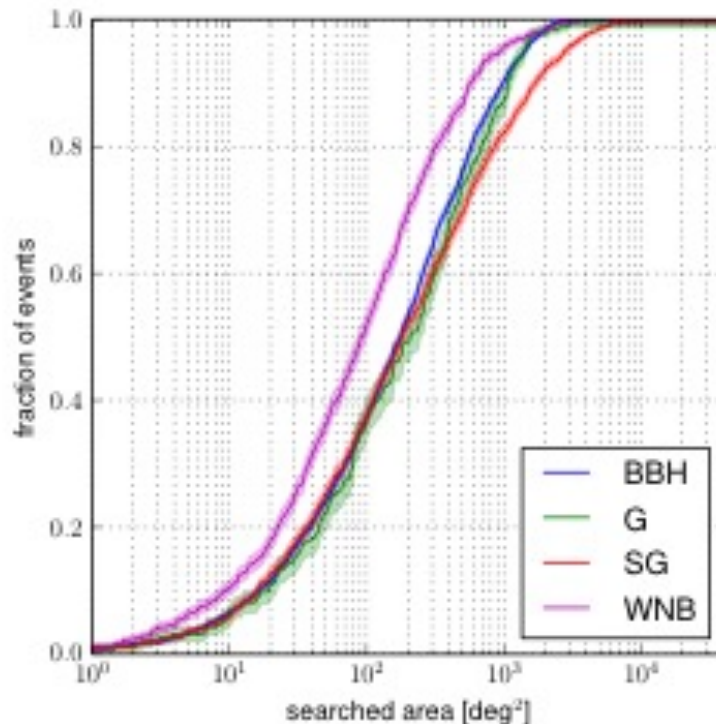
デザイン感度検出器

Klimenko et al. PRD83, 102001 (2011)



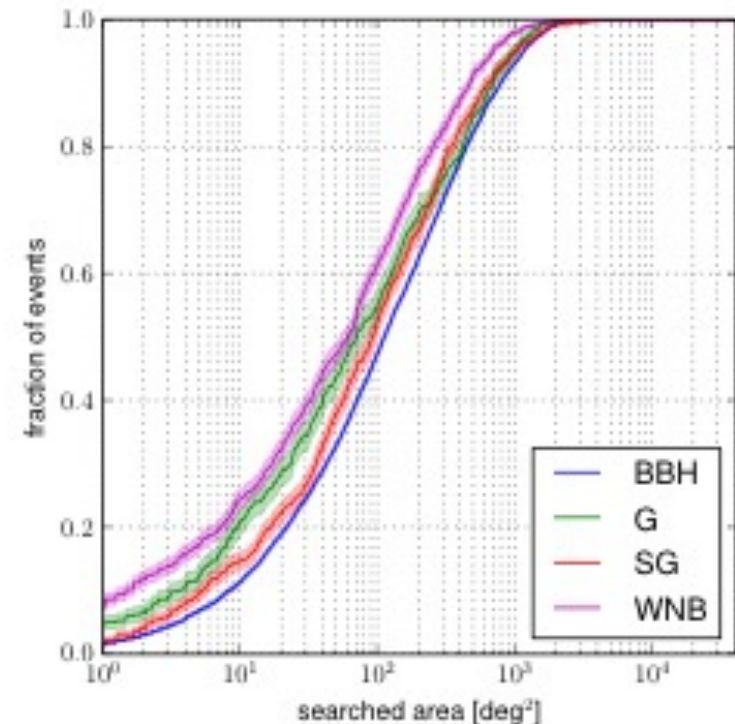
O1, O2バースト重力波方向決定精度

Essick et al. arXiv:1409.2435



2015年 LIGO 2台

50%のイベントが100-200平方度



2016年 LIGO-Virgo 3台

50%のイベントが60-110平方度

横軸: 注入したテスト信号を見つけ出すまでに調べなければならない領域の面積(平方度)

LIGO将来計画

O2: 2016-2017

O3: 2018

O4: 2019-2020 (aLIGO design)

A+ : Advanced LIGO plus

O5: 2022/2023(?)- (A+による観測)

Voyager:

Cosmic Explorer (CE) : $L=10-40\text{km}$

ヨーロッパ Einstein Telescope ($L=10\text{km}$)

current facility



new facility

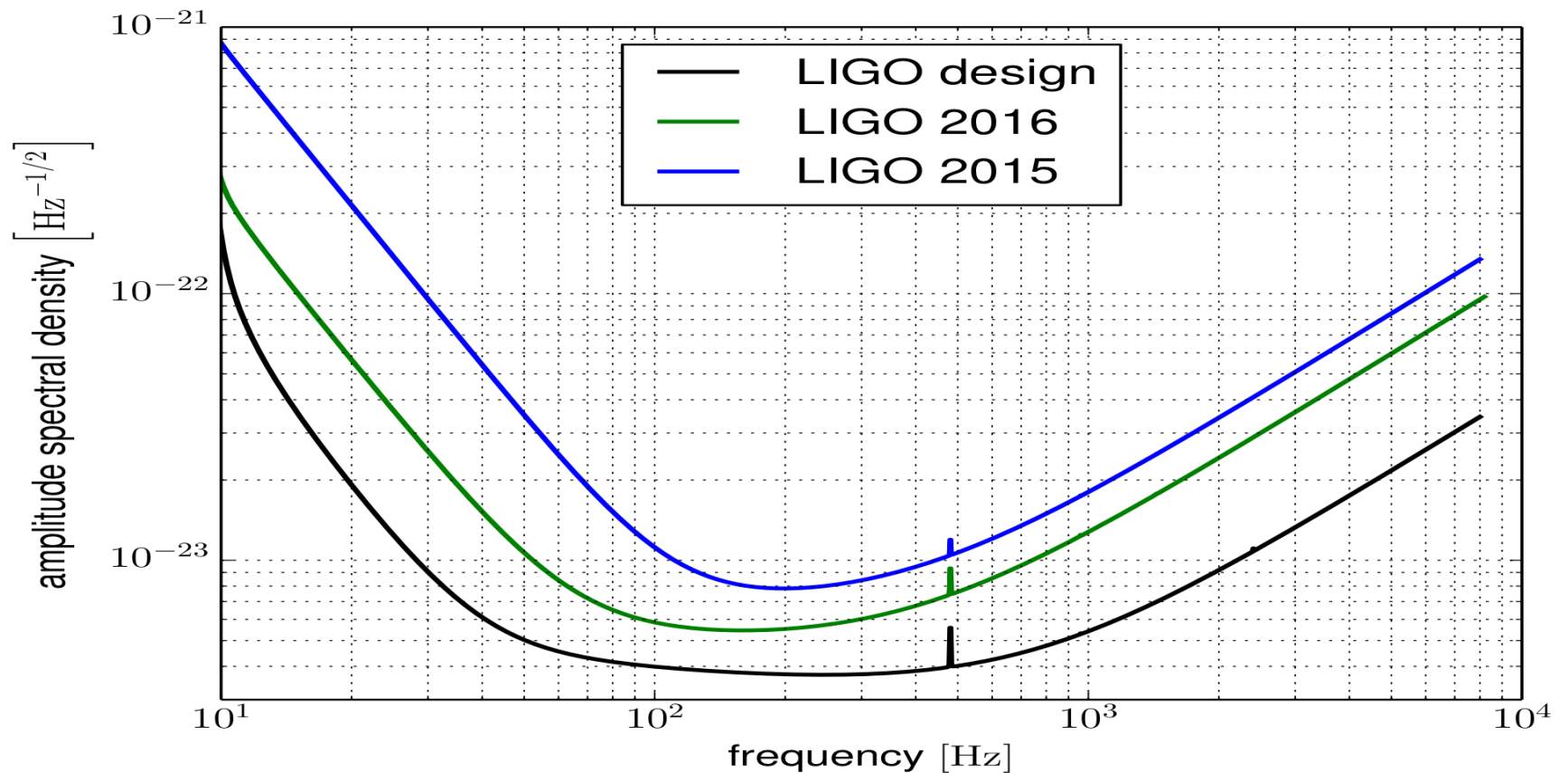
Appendix

aLIGO觀測可能距離

| | 平均(S/N=8) | 最大(S/N=8) |
|--------|-----------|-----------|
| NS-NS: | 196Mpc | 445Mpc |
| NS-BH: | 410Mpc | 927Mpc |
| BBH: | 967Mpc | 2187Mpc |

用いた感度曲線

Essick et al. arXiv:1409.2435



O1感度と論文の感度曲線比較

Essick et al. arXiv:1409.2435

