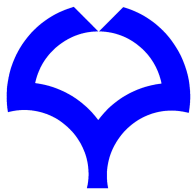


KAGRAによるScience

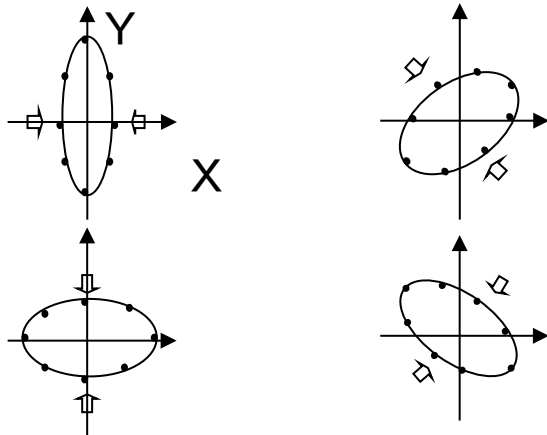
田越秀行(大阪大学)



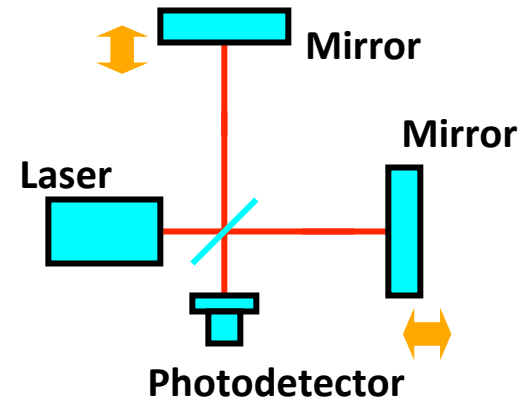
OSAKA UNIVERSITY
School of Science
Graduate School of Science

重力波

重力波とは・・・時空のゆがみの波動. 光速で伝搬.
伝搬の効果・・・物体に4重極的変形を及ぼす



重力波がz方向へ伝搬する
ときの質点の動き



レーザー干渉計模式図

重力波の放射

重力波の四重極放射

$$h_{ij}^{TT} = \frac{2}{R} \frac{G}{c^4} \ddot{I}_{ij}^{TT},$$

TT: transverse-traceless part

$$I_{ij} = \int \underbrace{\rho(x)}_{\text{密度}} \left(x^i x^j - \frac{1}{3} \delta_{ij} x^2 \right) d^3x \quad \text{: 四重極モーメント}$$

$$h \sim \frac{1}{R} \frac{GM}{c^2} \left(\frac{v}{c} \right)^2 \varepsilon$$

M: 系の質量, v: 系の速度,
 ε : 扁平度

距離 質量 速度 扁平度

重力波の発生

重力波の発生要因

- 質量分布の時間変化
 $\frac{v}{c} \sim 1$ すなわち $\frac{v^2}{c^2} \sim \frac{GM}{c^2 L} \sim 1$
高速運動 強い重力
(重力束縛系)
の場合, より強い重力波が放出される
(L: 系のサイズ)
- 非球対称的变化 (4重極モーメントの変化)

球対称の物体が球対称のまま変化しても, 何も起こらない



コンパクト天体が主要なソースとなる

重力波は放出されている!

連星中性子星

例: PSR 1913+16 (Hulse-Taylor binary)
1974年発見. 1993年ノーベル物理学賞

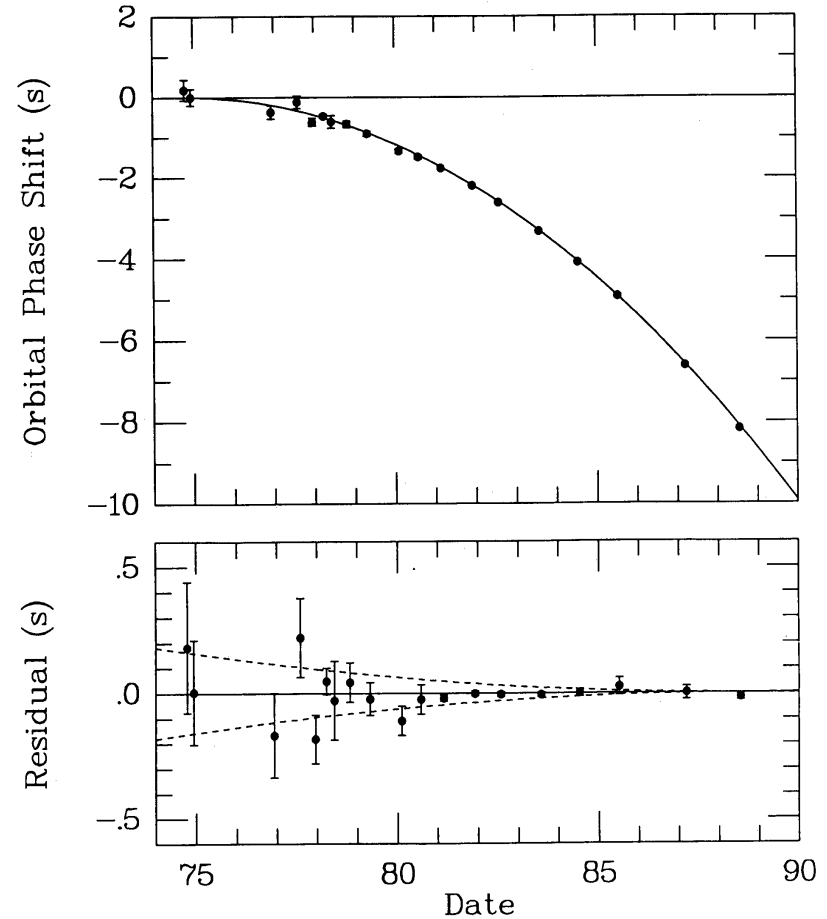
軌道の変化



一般相対論の予測と一致

重力波によるエネルギー放出

重力波放射の間接的な証明



Taylor, Weisberg (1989)

しかしそれで十分か？

- 直接的な実験的確認ではない。
- 放射された重力波が、その後どのように伝搬するかは全く確かめられていない。

例：

重力理論： bi-gravity理論（メトリックが2つある理論）

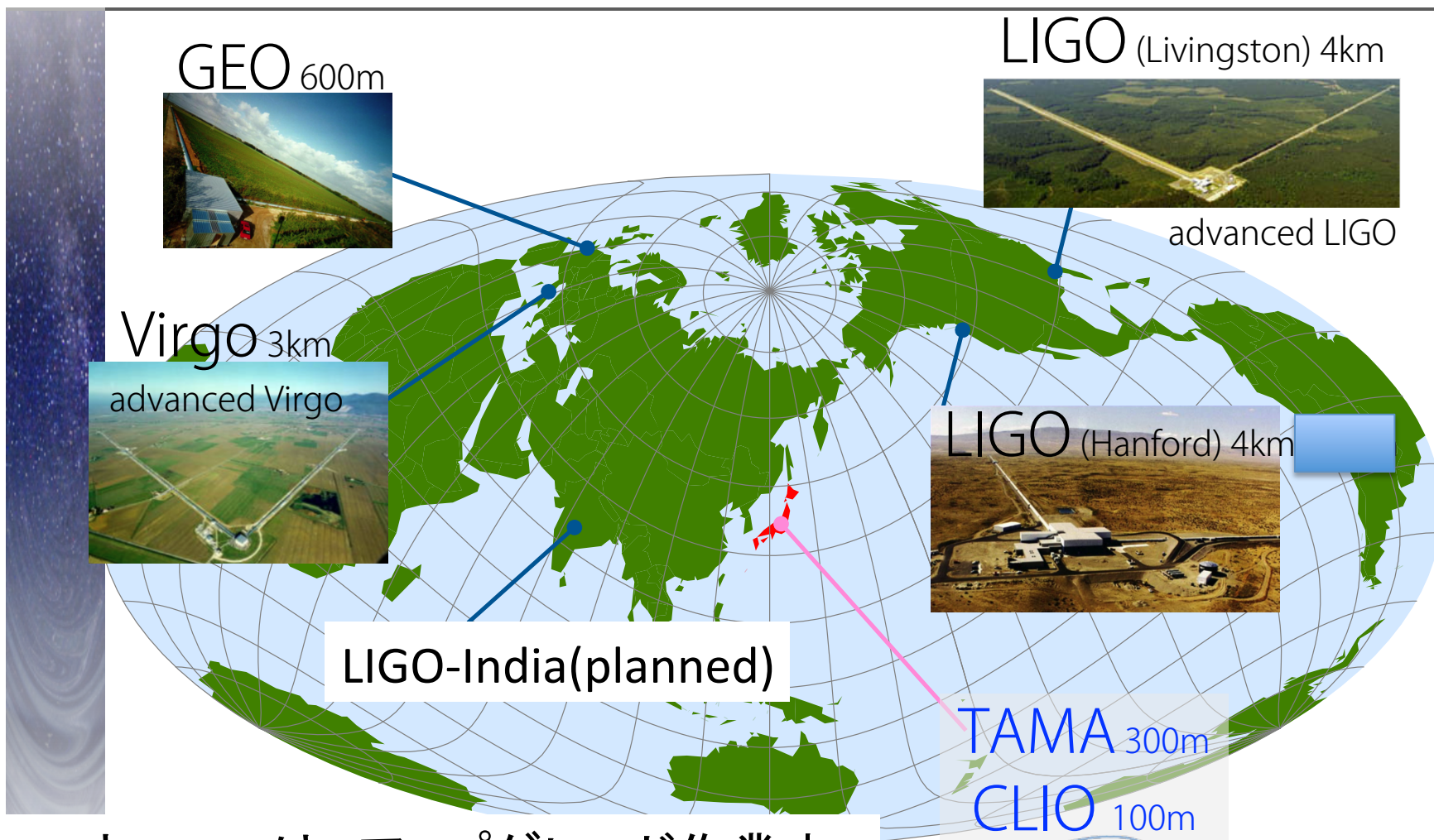
(Hassan, Rosen 2012)

重力波の伝搬途中で、2つのメトリックの間の遷移が起きる。

(De Felice, Nakamura, Tanaka, arXiv:1304.3920)

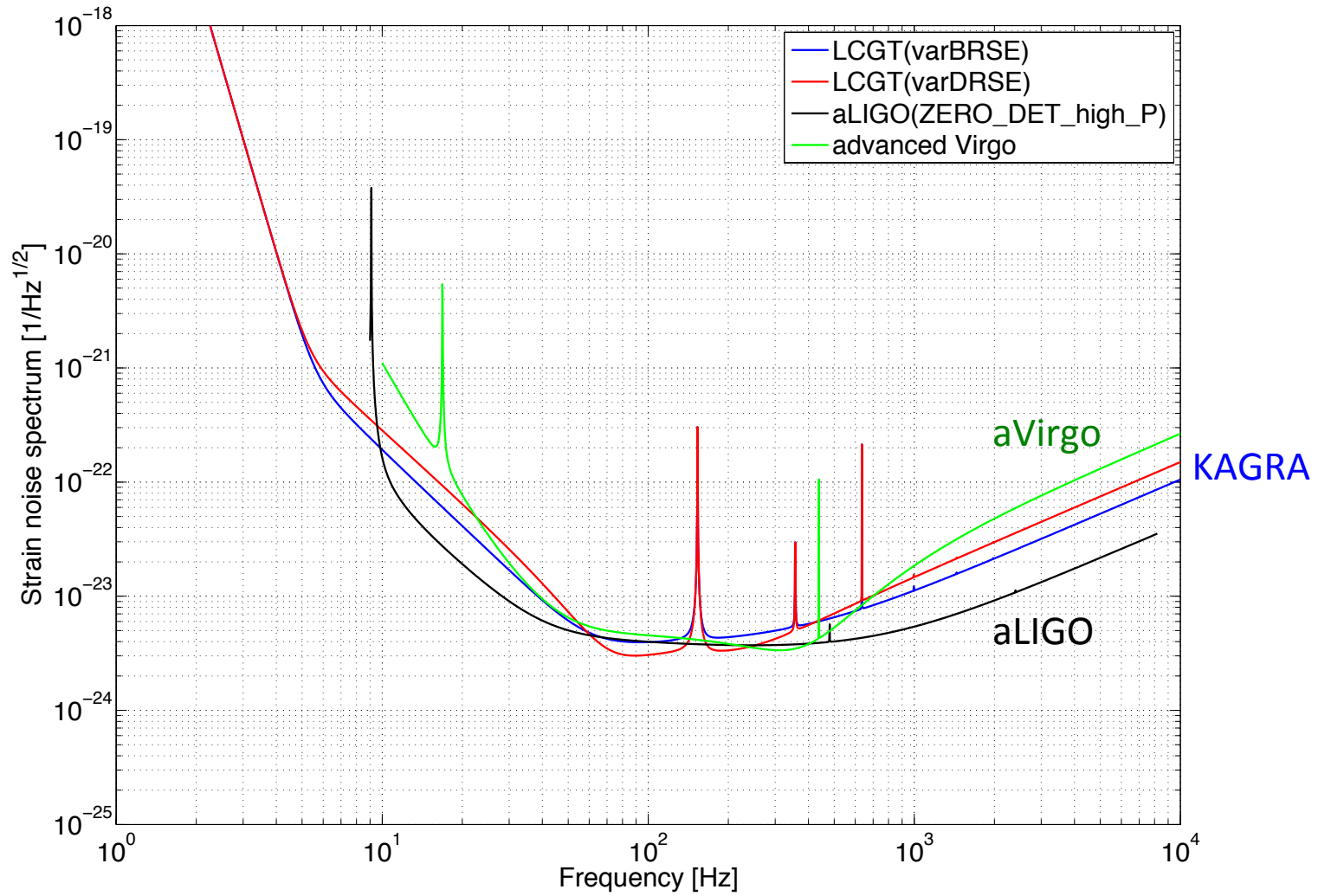
やはり直接的に検出して確かめる必要がある

Laser interferometers in the world



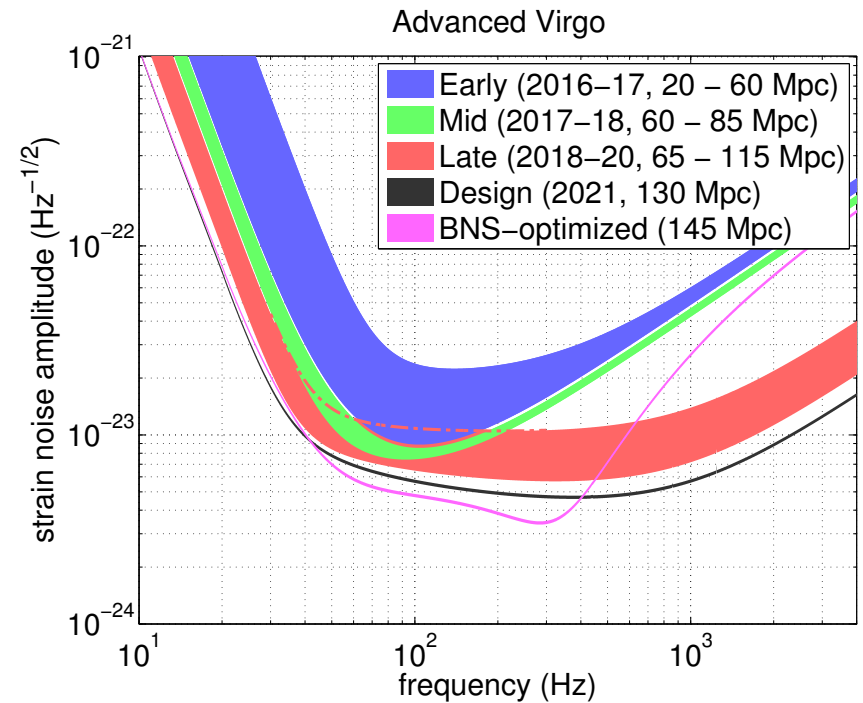
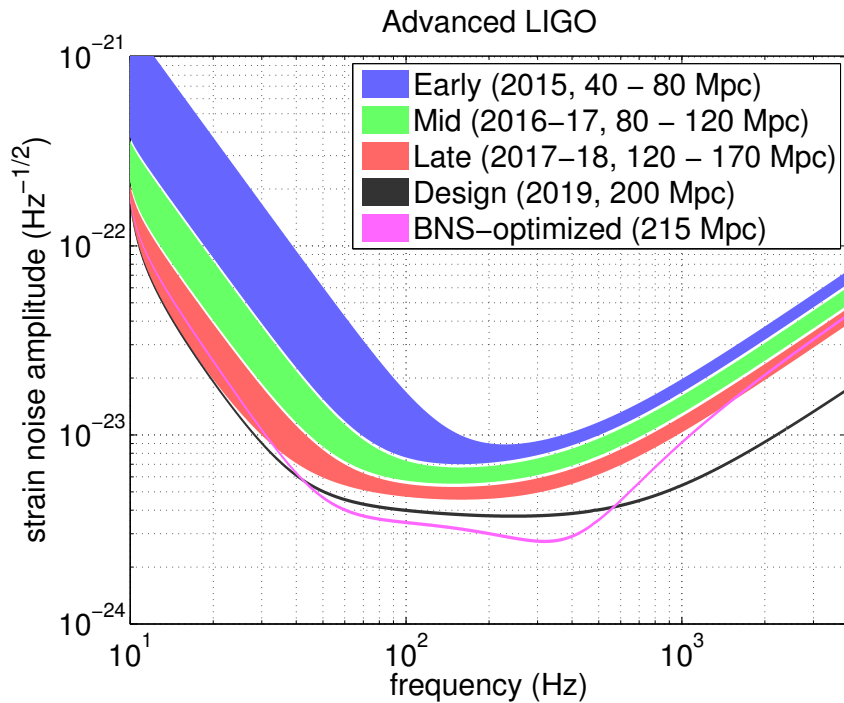
LIGOとVIRGOは、アップグレード作業中
LIGO 2015年より観測開始予定
VIRGO 2016年より観測開始予定

Noise spectrum --aLIGO,aVIRGO,KAGRA--



Data for the KAGRA noise spectrum :
<http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/researcher/parameter>

aLIGO, aVIRGO 感度進展予想



LSC&Virgo 1304.0670v1

主な重力波源

突発的重力波源

コンパクト連星合体(CBC)

中性子星(NS), ブラックホール(BH)

星の重力崩壊

超新星爆発(SN)

パルサーグリッジ

宇宙紐のカस्प, キンク

連続的重力波源

回転中性子星, 連星系

背景重力波

初期宇宙起源

天体起源

ソースの分類

データ解析方法の違いに基づくソースの分類

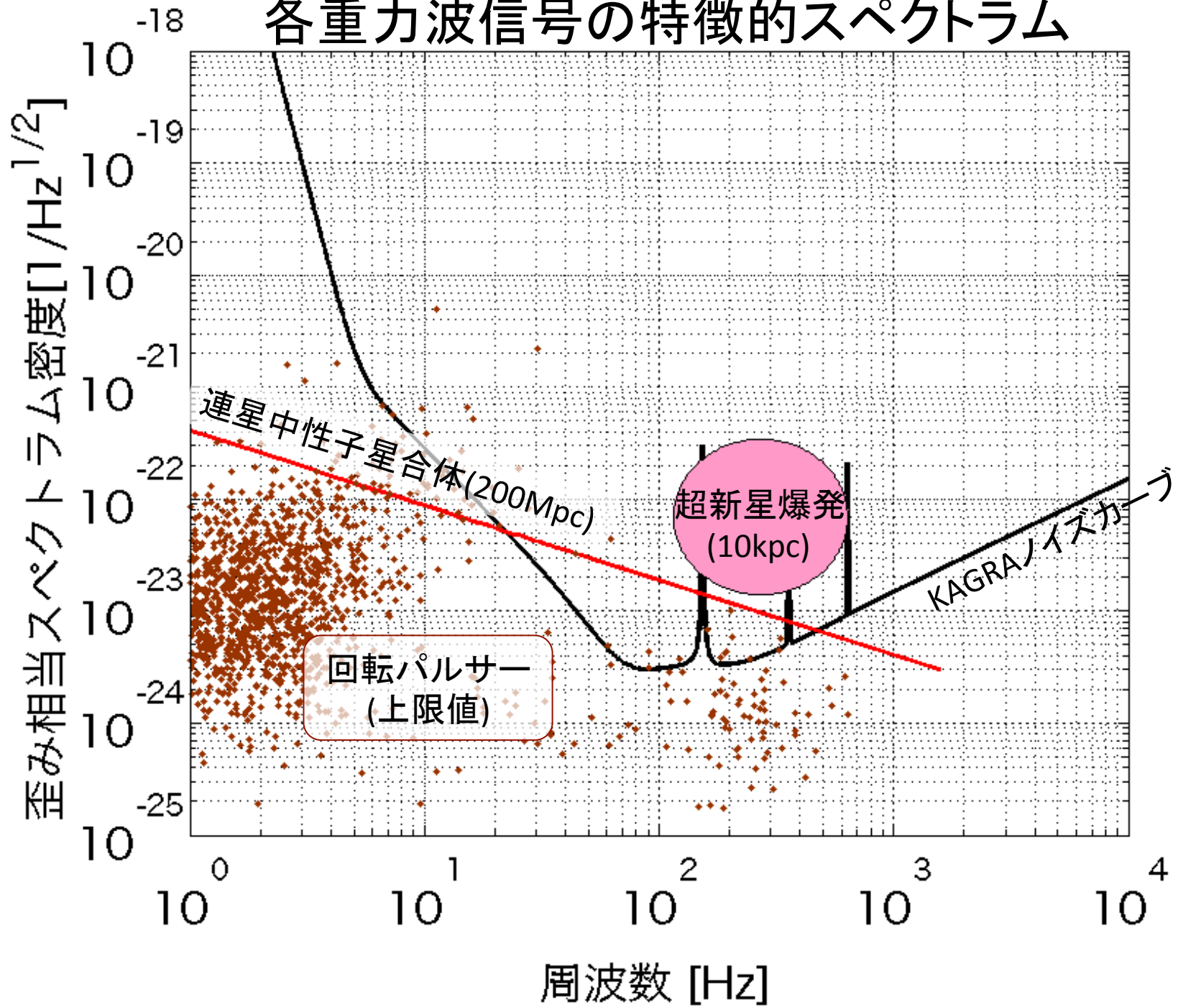
| | Deterministic | | Stochastic | |
|----------------|-------------------------|-------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| | known waveform | unknown waveform | Early universe origin | Astrophysical origin |
| Short duration | CBC(inspiral,ring down) | SN CBC (merger) Pulsar glitch | inflation ... | Superposition of too many sources |
| Long duration | Pulsar (rotating NS) | | Nearly isotropic | anisotropic |

Matched filter

Burst search

Cross correlation search

各重力波信号の特徴的スペクトラム



コンパクト連星合体

中性子星, ブラックホールの連星の合体
最も有望な重力波源
特に中性子星連星合体

今から数億-10数億年以内に合体するものが5個-6個ある

| 名前 | パルス周期(ms) | 公転周期(hr) | 離心率 | 寿命(Gyr) |
|--------------------------|-----------|----------|-------|---------|
| B1913+16 ^a | 59.03 | 7.75 | 0.617 | 0.37 |
| B1534+12 ^a | 37.90 | 10.10 | 0.274 | 2.93 |
| J0737-3039A ^a | 22.70 | 2.45 | 0.088 | 0.23 |
| J1756-2251 ^a | 28.46 | 7.67 | 0.181 | 2.03 |
| J1906+0746 ^b | 144.14 | 3.98 | 0.085 | 0.082 |
| J2127+11C ^{bcd} | 32.76 | 8.047 | 0.681 | 0.32 |

100億年以内に合体する連星中性子星

LCGTの重力波源(3)

中性子星連星合体イベントレート

銀河系での合体率: $83.0_{-66.1}^{+209.1} \times 10^{-6} / \text{yr}$

V. Kalogera et.al.,
ApJ, 601 L179 (2004)

観測可能平均距離: 176Mpc

“銀河”個数密度: $1.16 \times 10^{-2} \text{Mpc}^{-3}$

 KAGRAでのイベントレート: $\sim 20 \text{ events/yr}$

銀河系合体率の不定性は非常に大きい。
しかし、年間1イベント以上はありそうである。

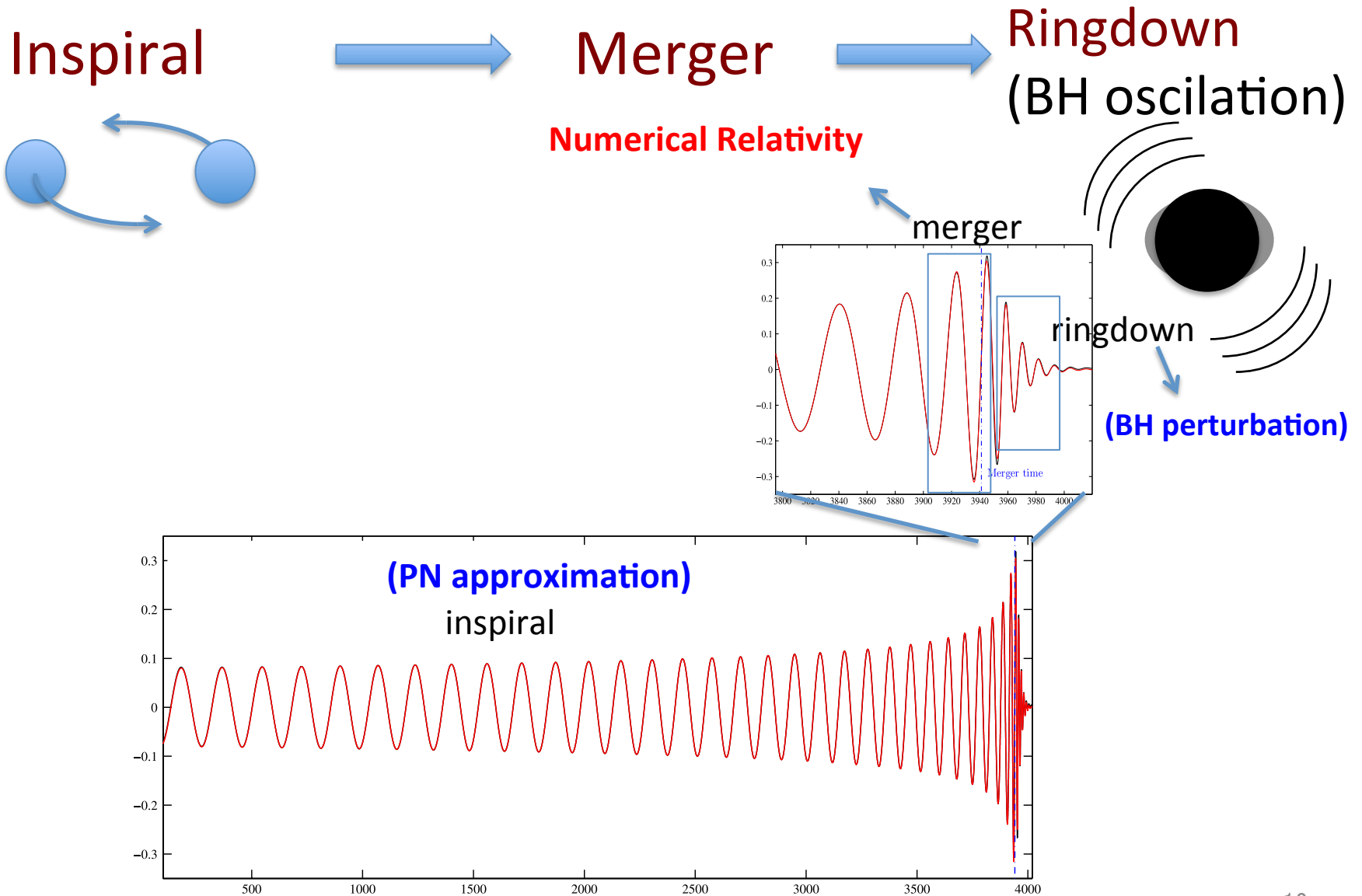
Expected detection rates

Abadie et al. CQG27, 173001(2010)

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 | 20 | 1000 | |
| | IMRI into IMBH | | | 10^{b} | 300^{c} |
| | IMBH-IMBH | | | 0.1^{d} | 1^{e} |

Physics in Compact Binary Coalescence



Basic value for the inspiral waveform

| (m_1, m_2) [Msolar] | (1.4, 1.4) | (10, 1.4) | (10, 10) |
|--------------------------|------------|-----------|----------|
| frequency@ISCO[Hz] | 1570 Hz | 386 Hz | 220 Hz |
| duration(10Hz-ISCO)[sec] | 1002 sec | 224 sec | 38 sec |
| cycle(10Hz-ISCO) | 16038 | 3585 | 605 |
| orb. radius@10Hz[Mt] | 174 Mt | 68 Mt | 47 Mt |

$$M_t = m_1 + m_2$$

ISCO: Inner most stable circular orbit.

連星合体パラメータ

Parameters

$(\ln(r), \ln(M_c), \delta \text{ or } \ln(\eta), t_c, \phi_c, \underbrace{\theta_s, \phi_s, \psi}_{\text{direction}}, \cos(\epsilon))$

polarization
angle

Inclination
angle

$$M_c = M\eta^{3/5}, \quad \delta = (m_1 - m_2)/M$$

$$M = m_1 + m_2, \quad \eta = m_1 m_2 / M^2$$

星のスピンなしの場合・・・9個

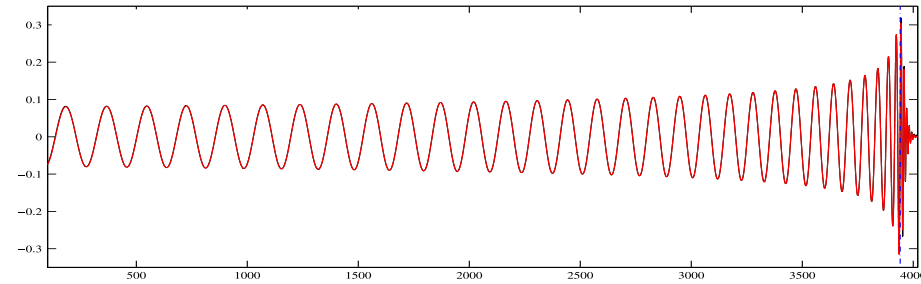
星のスピンありの場合・・・9 + 6 = 15個

質量決定精度

観測帯域 [$f > f_0$] での振動回数

四重極公式+Newton重力

$$N = \frac{1}{32\pi} \frac{1}{(\pi M_c f_0)^{5/3}}$$



$M_c \equiv M\eta^{3/5}$: chirp mass

$$\eta = m_1 m_2 / M^2$$

$$M = m_1 + m_2$$

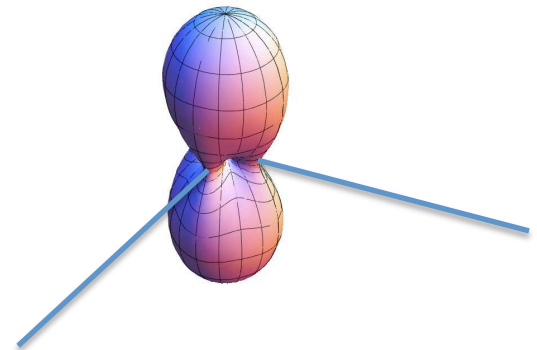
$$\frac{\delta M_c}{M_c} \sim \frac{\delta N}{N} \sim \frac{1}{N} \sim 10^{-4} \sim \underline{0.01\%}$$

~ 1
 $\sim 10^4$

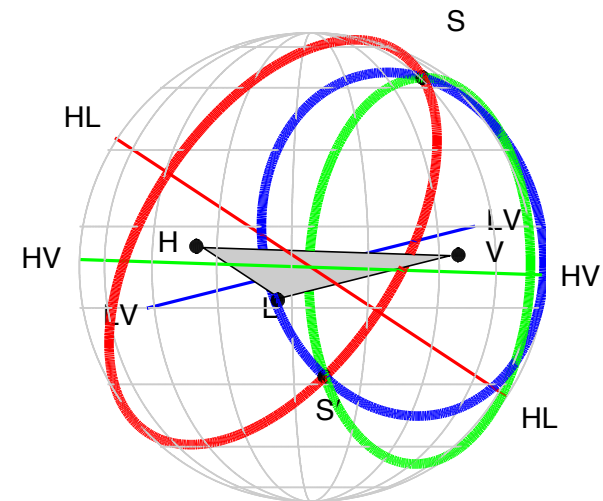
$$\frac{\delta N}{N} \sim \frac{\delta \eta}{\eta} \left(\frac{v}{c}\right)^2 \sim 0.01 \frac{\delta \eta}{\eta} \rightarrow \frac{\delta \eta}{\eta} \sim 100 \frac{\delta N}{N} \sim \underline{1\%}$$

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)



時刻と方向決定精度

時刻決定精度

$$\delta t_c \sim \frac{1}{\sigma_f \rho}$$

σ_f : 実効的周波数バンド幅[Hz]

ρ : S/N比

$$\sigma_f \sim 100 \text{ Hz}$$

$$\rho \sim 10$$



$$\delta t_c \sim 10^{-3} \text{ sec}$$

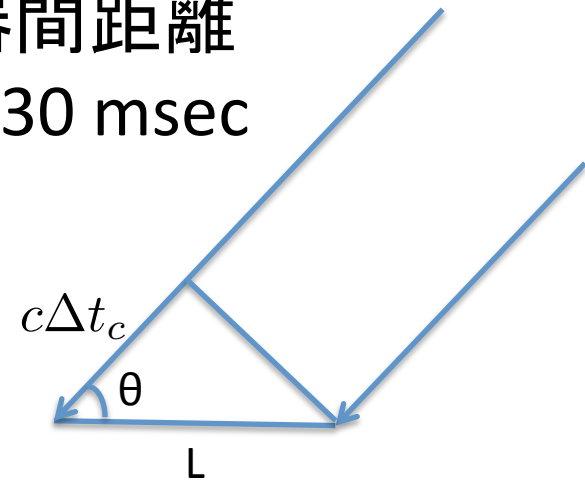
$$\delta(\cos \theta) \sim \frac{c \delta(\Delta t_c)}{L} \sim \frac{c \delta t_c}{L}$$

L: 検出器間距離

$L/c \sim 10\text{-}30 \text{ msec}$

$$\delta \theta \sim \frac{1}{10} \text{ [rad]} \sim 5 \text{ deg}$$

$$\delta \Omega \sim (\delta \theta)^2 \sim \underline{\underline{20 \text{ deg}^2}}$$



質量、時刻決定精度

| PN Order | NS-NS (1.4,1.4)Msun | | | | NS-BH (10,1.4)Msun | | | |
|---------------|---------------------|-----------------|----------------------------------|--------------------|--------------------|-----------------|----------------------------------|--------------------|
| | Δt_c | $\Delta \phi_c$ | $\Delta \mathcal{M}/\mathcal{M}$ | $\Delta \eta/\eta$ | Δt_c | $\Delta \phi_c$ | $\Delta \mathcal{M}/\mathcal{M}$ | $\Delta \eta/\eta$ |
| Advanced LIGO | | | | | | | | |
| 1PN | 0.3977 | 0.9256 | 0.0267% | 4.656% | 0.5959 | 1.261 | 0.1420% | 7.059% |
| 1.5PN | 0.4668 | 1.474 | 0.0142% | 1.638% | 0.7394 | 2.091 | 0.0763% | 2.316% |
| 2PN | 0.4623 | 1.392 | 0.0143% | 1.764% | 0.7208 | 1.848 | 0.0773% | 2.669% |
| 2.5PN | 0.5090 | 1.354 | 0.0134% | 1.334% | 0.9000 | 1.213 | 0.0686% | 1.515% |
| 3PN | 0.4938 | 1.326 | 0.0135% | 1.348% | 0.8087 | 1.126 | 0.0698% | 1.571% |
| 3.5PN | 0.5198 | 1.273 | 0.0133% | 1.319% | 0.9980 | 0.9203 | 0.0679% | 1.456% |

| BH-BH (10,10)Msun | | | |
|-------------------|-----------------|----------------------------------|--------------------|
| Δt_c | $\Delta \phi_c$ | $\Delta \mathcal{M}/\mathcal{M}$ | $\Delta \eta/\eta$ |
| 1.162 | 1.974 | 1.041% | 59.88% |
| 1.441 | 3.188 | 0.6115% | 9.609% |
| 1.404 | 2.850 | 0.6240% | 10.79% |
| 1.819 | 1.555 | 0.5300% | 5.934% |
| 1.544 | 1.559 | 0.5466% | 6.347% |
| 2.086 | 1.137 | 0.5237% | 5.730% |

S/N=10

Arun et al. (2004)

方向決定精度

To have 4th and 5th detector is very important to determine the source direction accurately because of more number of 3 detectors combination

NS-NS coalescence @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

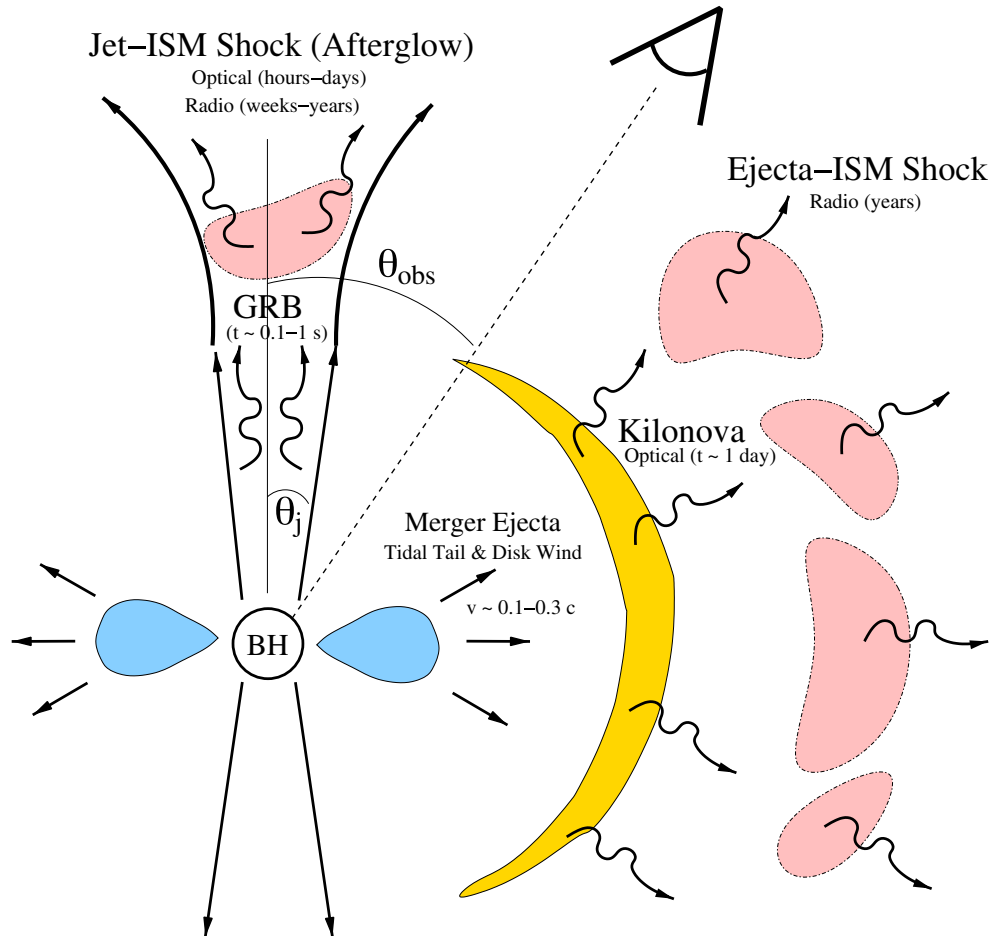
BH-NS coalescence @200Mpc

| (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 (2014), Fisher analysis)

SGRB and CBC

- NS-NS, BH-NS are candidates for the progenitor of SGRB
- GRB jets are beamed, probably toward the direction perpendicular to the orbital plane of the progenitor binaries.
- Jet direction and orbital inclination angle are related definitely.
- It is interesting to determine the inclination angle independently from GRB observation



Metzger, Berger ('12)

Inclination accuracy

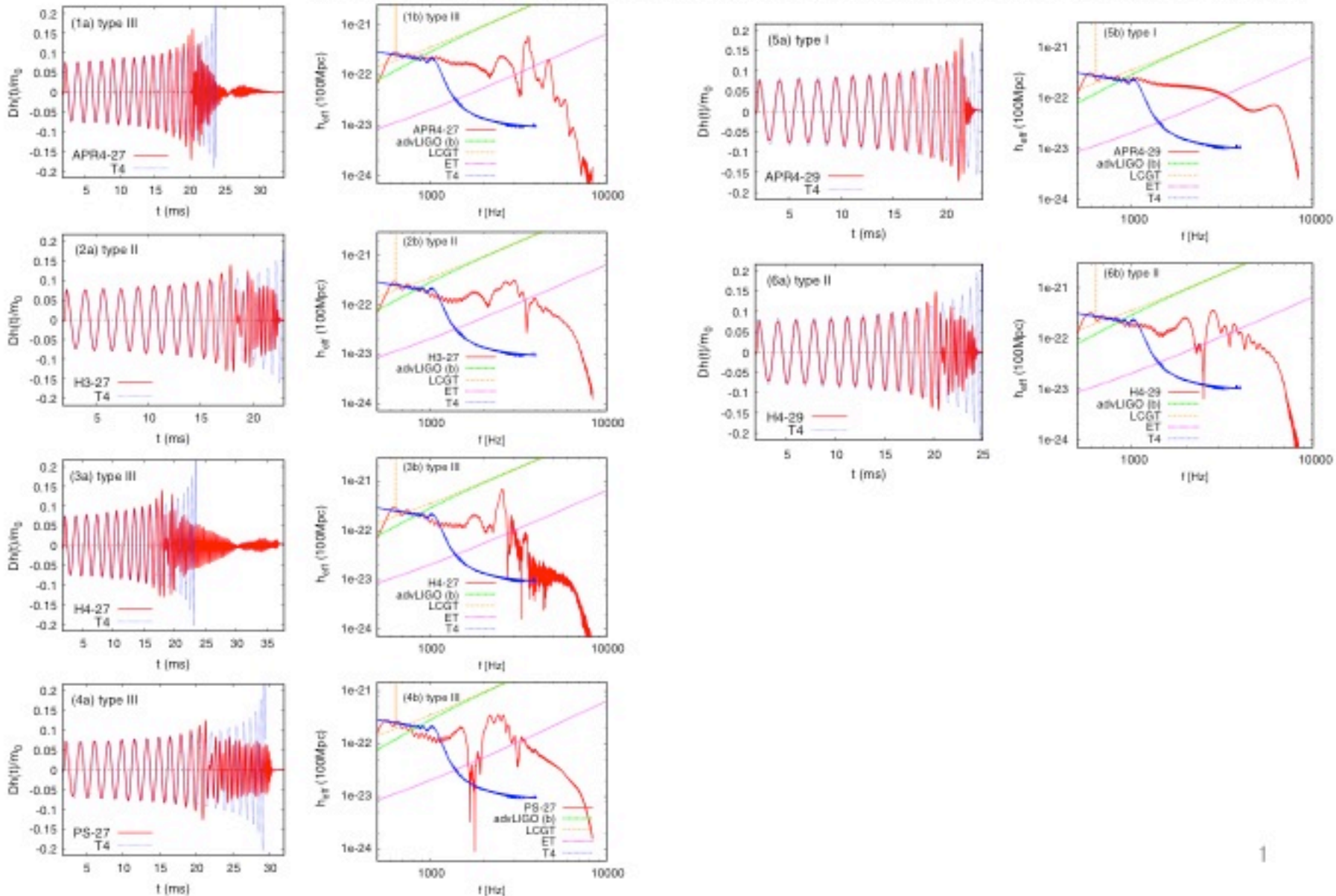
Median of $\Delta\iota$ [rad] (10,1.4) Msun @200Mpc
 ((1.4,1.4)Msun) @200Mpc only SNR_{network} >8

| | 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) |

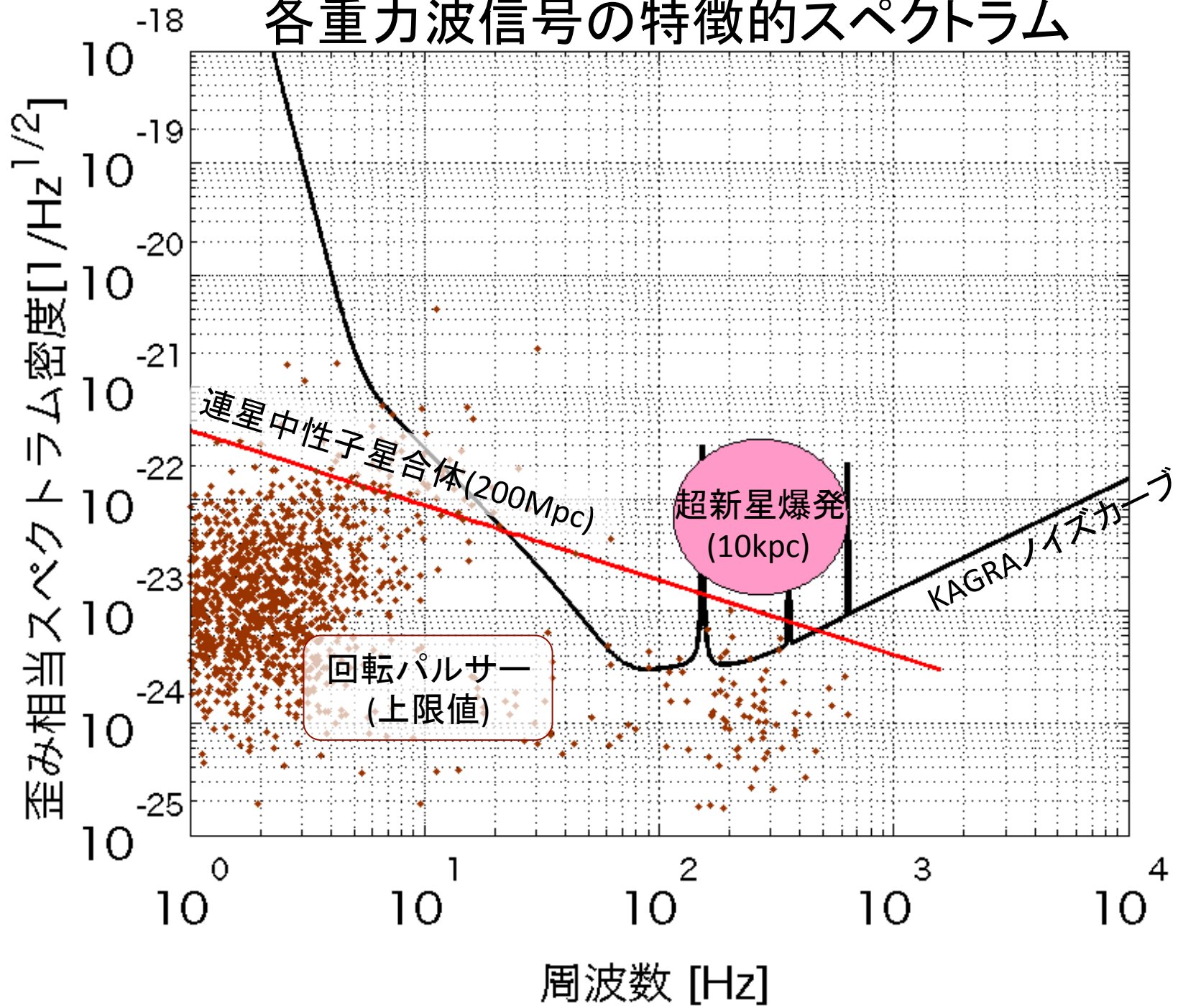
(Arun, Tagoshi, Pai, Mishra (2014), in preparation, Fisher analysis)

Post-merger waveform of NS-NS

Hotokezaka, Kyutoku, Okawa, Shibata, Kiuchi, PRD83, 124008 (2011)



各重力波信号の特徴的スペクトラム

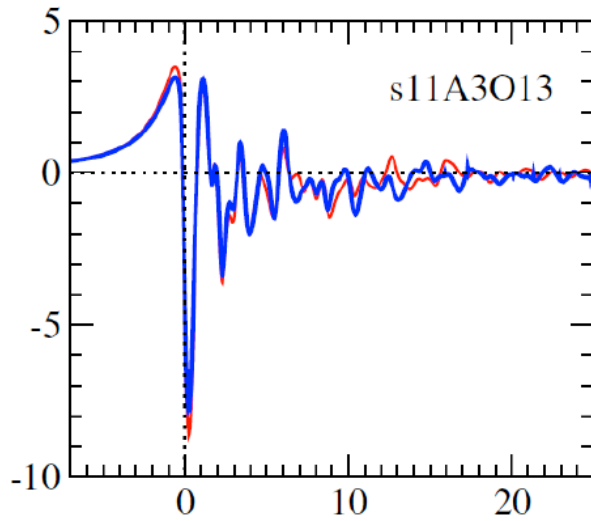


重力崩壊型超新星爆発

Ref. Ott, CQG, 26, 063001 (2009), Fryer and New, LRR, 14, 1 (2011)

Various possible gravitational wave emission mechanism.

- Core collapse and bounce
 - Rotational non-axisymmetric instabilities of proto-neutron star
 - Post-bounce convection
 - Non-radial pulsations of proto-neutron star
 - Anisotropic neutrino emission
- etc.
- } Related to the explosion mechanism



Collapse and bounce wave form from
Dimmelmeier et al. 2008 [PRD 78, 064056]

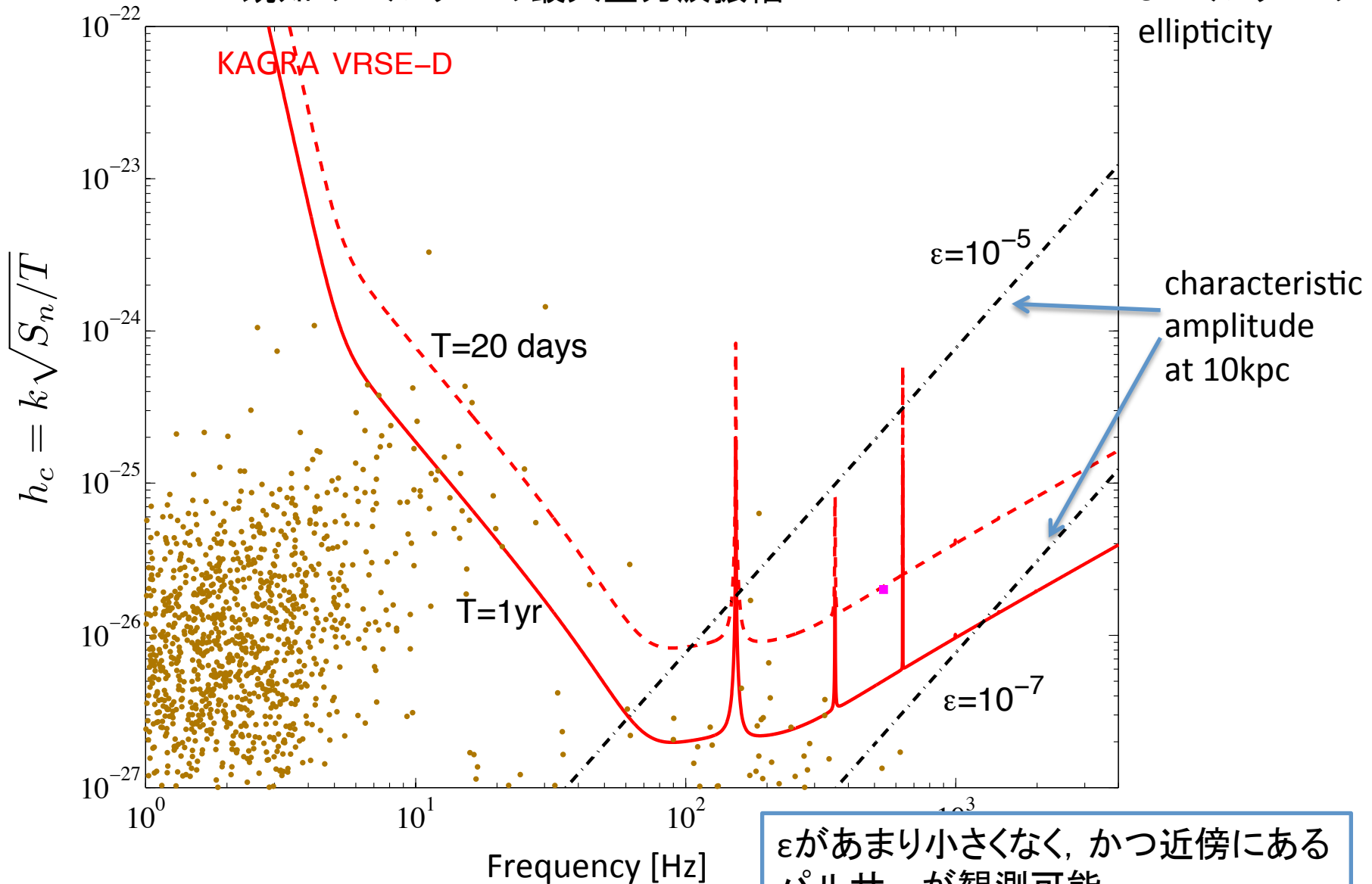
超新星爆発メカニズムと重力波

| Model Dim. | Candidate Explosion Mechanism | |
|------------|---|--|
| | Neutrino-driven mechanism (slow/no rotation) | MHD mechanism (rapid rotation/large B fields) |
| | SASI & Convection | |
| | Bounce & MHD Outflows | |
| 2D | <p style="background-color: red; color: white; text-align: center; padding: 5px;">“stochastic” and broad-band signal</p> | <p style="background-color: red; color: white; text-align: center; padding: 5px;">“Bounce with “tail” broad-band signal</p> |
| | SASI & Convection | |
| | Non-axisymmetric Instabilities | |
| 3D | <p style="background-color: red; color: white; text-align: center; padding: 5px;">“stochastic” and broad-band signal</p> | <p style="background-color: red; color: white; text-align: center; padding: 5px;">“Long-lasting” narrow-band signal</p> |

パルサー (回転中性子星)

既知のパルサーの最大重力波振幅

ϵ : パルサーの ellipticity



Data analysis activities of KAGRA

KAGRA **DMG** (Data Management Subsystem)

- Data flow

Kanda

KAGRA **Detchar** (Detector Characterization-MIF subsystem)

- Characterization of detector noise

Hayama

KAGRA **DAS** (Data Analysis Subsystem)

- Analysis itself

Tagoshi

Each subsystem is managed by the leadership of subsystem leaders, and is conducting the tasks as a team

Data Analysis Subsystem (DAS)

Chief: H.Tagoshi

Sub-chiefs: Y.Itoh, H.Takahashi

Core members: N.Kanda, K.Oohara, K.Hayama

Korean subgroup
Leader: Hyung Won Lee

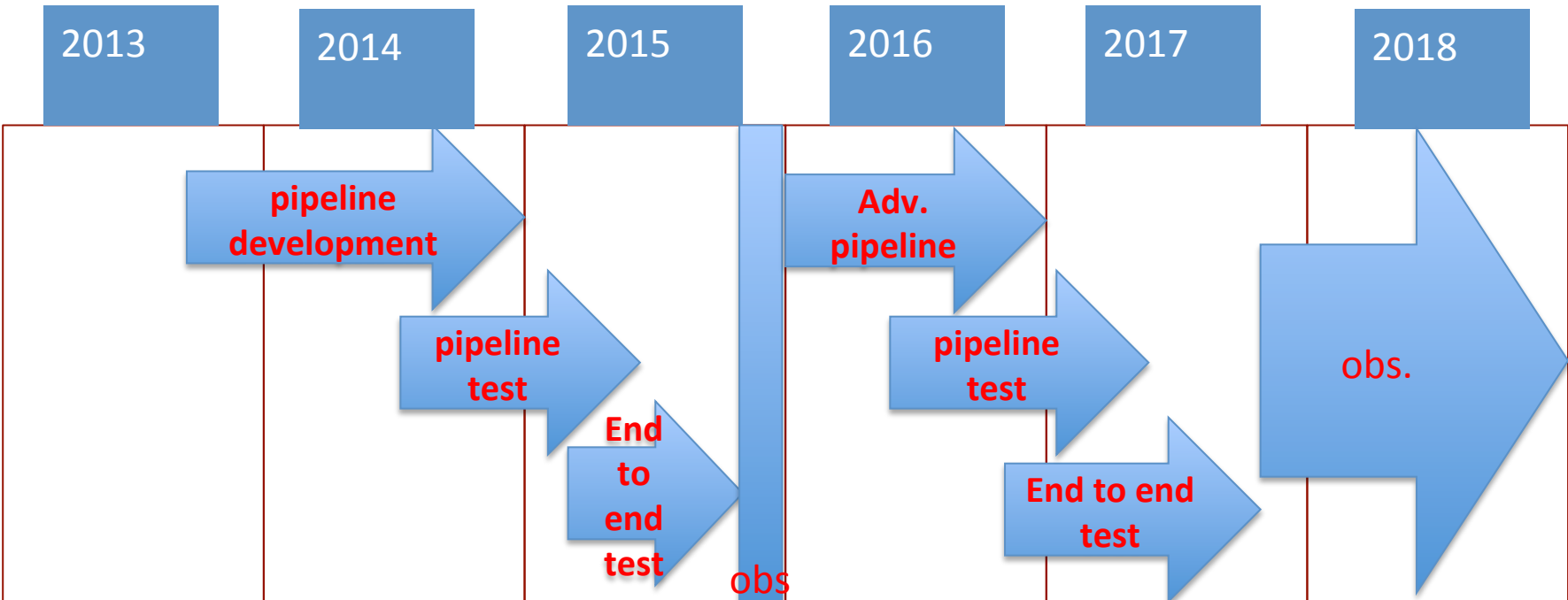
Osaka Univ : H. Tagoshi, K.Ueno, T.Narikawa
Osaka City Univ : N.Kanda, K.Hayama, T.Yokozawa,
H.Yuzurihara, T.Yamamoto, K.Tanaka,
M. Asano, M. Toritani
Univ Tokyo : Y.Itoh, J. Yokoyama
Nagaoka Tech : H.Takahashi,
Niigaka Univ : K.Oohara, Y.Hiranuma, M. Kaneyama,
T. Wakamatsu
Toyama Univ : S. Hirobayashi

Inje Univ. : Hyung Won Lee
Jeongcho Kim
Seoul Nat. U.: Chunglee Kim

Total: ~22 (incl. graduate students)

- Core members' meeting (with DMG) : every Friday 16:30-17:30
- Plenary meeting: about once a month on Friday evening

KAGRA data analysis schedule



iKAGRA target

- Operation of the whole analysis pipeline which includes analysis of data and production of the scientific results.
- Discovery of a local fortuitous GW event.

bKAGRA target

- Detection of GW signals
- Joint data analysis with LV
- GW astronomy

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、方向が分かれば, 重力波検出に極めて有利(しきい値が下げられる).

(e.g., Kochanek, Piran (1993))

例: ガンマ線バースト: 星の重力崩壊 or コンパクト連星合体
ニュートリノ: 銀河系近傍での超新星爆発
広視野光学赤外望遠鏡: 超新星爆発, GRB監視

実際, 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

天文観測との連携の重要性

- フォローアップ観測

重力波をまず検出し、その時刻、方向を速報して電磁波で観測を行う。

重力波の広視野性を生かす。

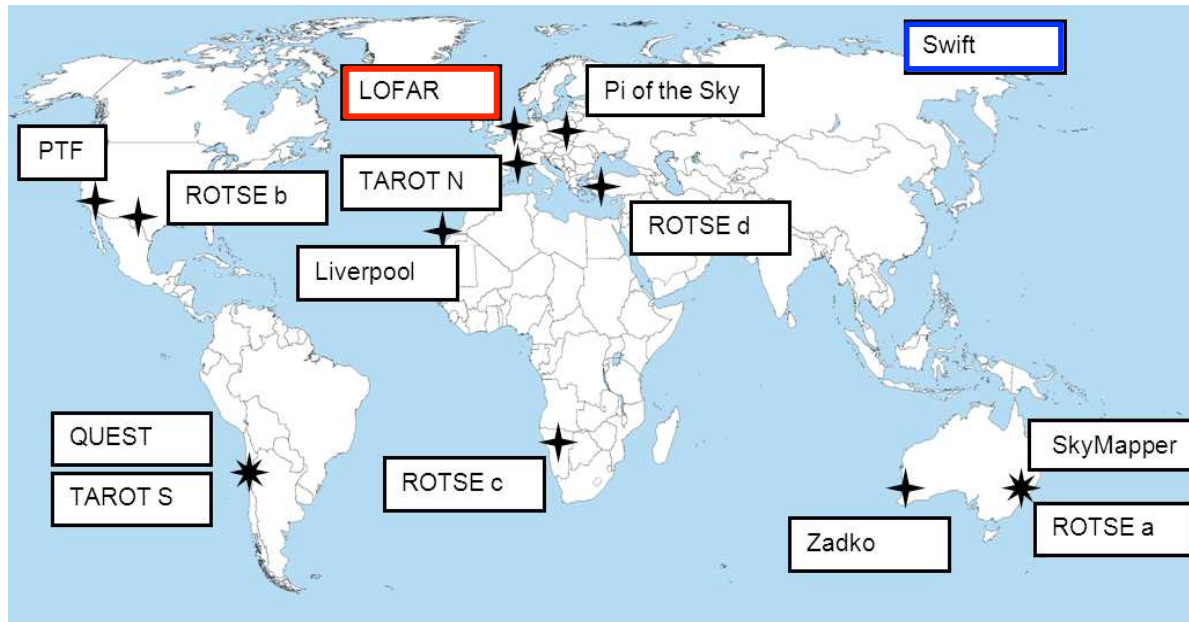
重力波検出の確からしさの向上, 重力波源の性質の究明。

速報の実例: LIGO – Virgo 観測

Ref. A&A 539, 124 (2012), A&A 541, 155 (2012)

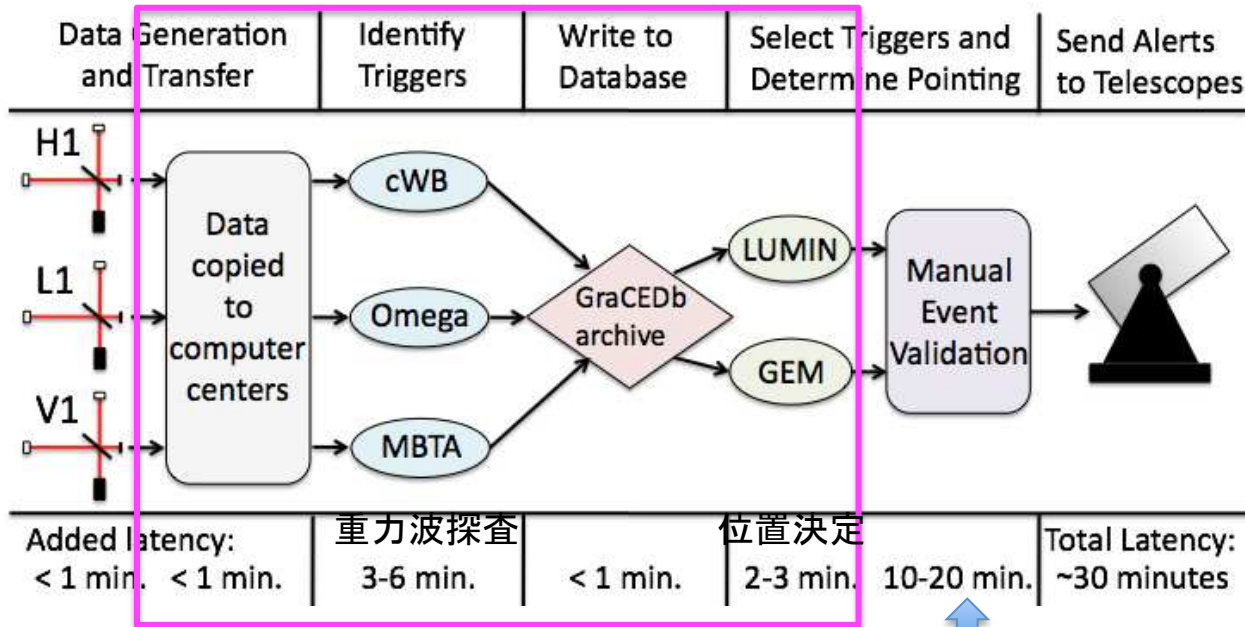
LIGO S6, Virgo VSR2 の2つの期間に, 電磁波観測によるfollow-upを目指して, low-latencyパイプラインによる重力波イベント候補探査と, 候補イベントの位置の速報が行われた.

(12/17/2009-1/8/2010, 9/2-10/20/2010)



参加した観測機器

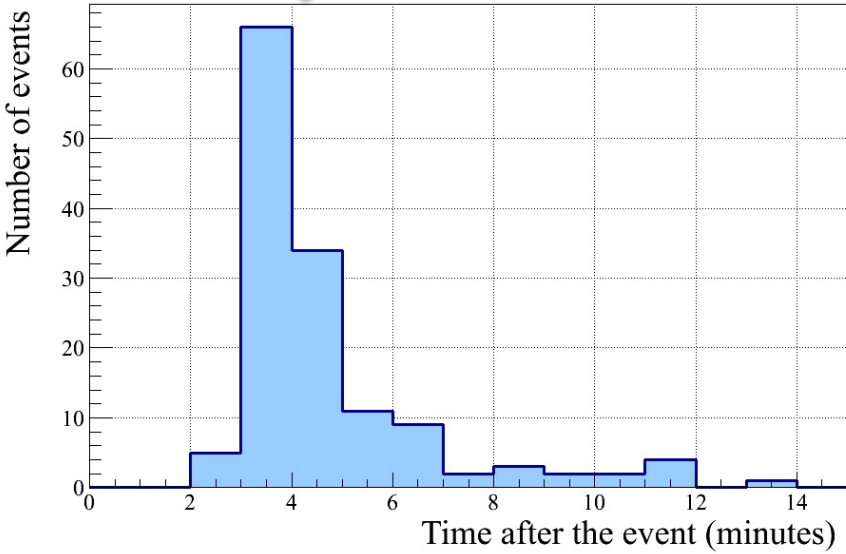
速報の実例：LIGO – Virgo 観測



人が待機していて確認する

MBTA(連星合体)の場合の自動化された部分のみの時間典型的には**4分程度**. A&A 541, 155 (2012)

現在は新しい方法により、**1分以内に完了**



実例: LIGO – Virgo 観測 --電磁波で観測すべき場所を選ぶ--

レーザー干渉計による位置決定精度は数 $10 \sim 100$ 平方度
(initial LIGO, VirgoなのでaLIGOよりさらに悪い).
ほとんどの天文観測機器の視野角(FOV)より大きい.



銀河カタログ (The Gravitational Wave Galaxy Catalog (GWGC))
を用いて、**探査すべき領域をしぼる** (典型的には $3-4 \text{deg}^2$ まで).

GWGC:

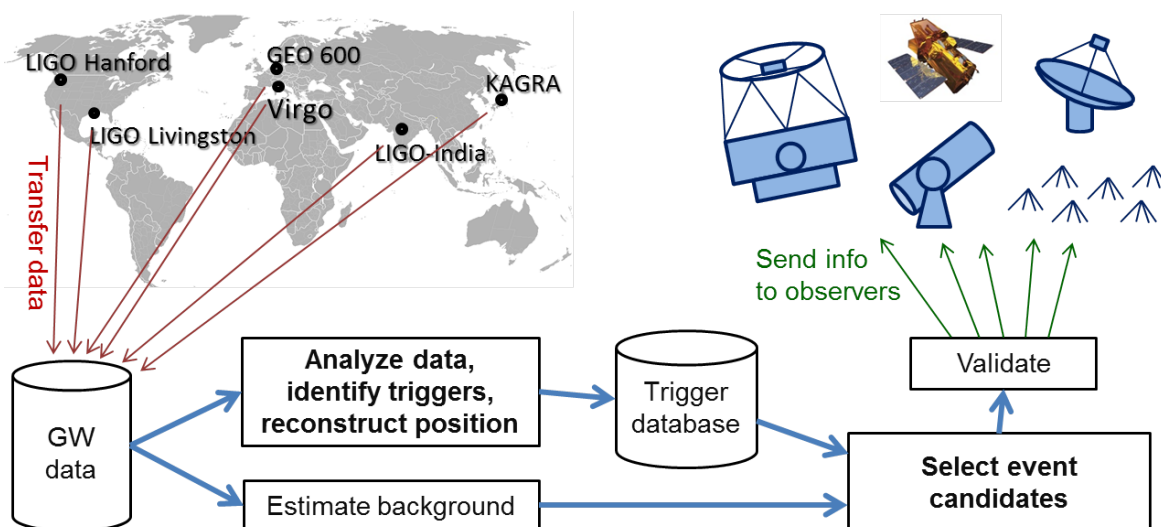
既存の複数の文献から集めてまとめたもの.

100Mpc以内の53,225個の銀河、150個の銀河系内球状星団を含む.

SDSSデータとの比較で、40Mpc以内の銀河については
ほぼcompleteと思われる.

KAGRAでの高速データ解析, 速報

- KAGRAでも, 高速データ解析と天文観測への速報ができるようなシステムを構築する.
- とりあえずは, 自動化部分は数分で終わらせることが目標.
- フォローアップ観測すべき方向は, 重力波だけでなく, 事前に銀河カタログなどを用意して絞り込める可能性がある(要検討).
- 以上はKAGRAの国際重力波観測網への参加が前提. 従って, 本格運用はbKAGRAの段階と考えられる.



taken from
arxiv:1206.6163₃₉

Current relation to the LSC and VIRGO

- N. Kanda and H. Tagoshi are assigned to liaison persons between LSC/Virgo and KAGRA on data analysis. This is based on the MOU between KAGRA, LSC and Virgo.

Since October 2013, they are participating the meeting of the **Data Analysis Council of LSC-Virgo**.

(Every Friday night at 0 a.m. or 1 a.m. (JST))

- We want to perform data transfer test between LIGO and Virgo within a few month.

This will be an important first step toward the collaboration on the data analysis with LSC and Virgo.

まとめ

- 第2世代レーザー干渉計重力波検出器の観測は数年後始まる
 - advanced LIGO 2015年
 - advanced Virgo 2016年
 - iKAGRA 2015年末, bKAGRA 2017年度末
- 電磁波観測との連携により, 重力波検出の信頼度, 検出可能距離が増大する.
- それと同時に, 重力波発生天体の正体を明らかにしたり, メカニズム解明に寄与できる.
- 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」
国内の天体観測装置との協力体制構築
- データ解析システム構築, LIGO-Virgoとの協力関係構築を進める.

End

ショートガンマ線バースト

ガンマ線バースト: 1ミリ秒から1000秒という短時間だけ,
ガンマ線が1日1回程度地球に到達する現象.

長いバースト(Long Burst): 継続時間2秒以上

短いバースト(Short Burst): 継続時間2秒以下

短いバーストの発生源(候補): 連星中性子星, あるいは
中性子星ブラックホール連星の合体

LIGO S5データ解析

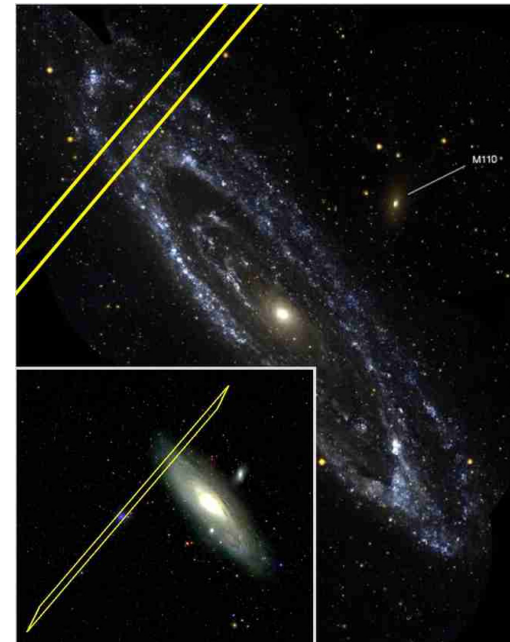
Astrophys. J. 681, 1419 (2008)

GRB070201 : SGRB, 発生方向: **M31**の方向
(アンドロメダ星雲, 770kpc)
近い!



しかしながら, LIGOでのデータ解析の結果, この
時刻には連星合体重力波は検出できない.

つまり, **M31で起こったコンパクト連星合体现象**
ではない(信頼度99%以上で).



Crab パルサー

かに星雲中にあるパルサー(中性子星)

1054年の超新星爆発で誕生

自転周波数の減少の原因

・・・電磁波放射, 粒子加速, 重力波放射 etc.

もし, 重力波放射だけで減少しているとする

$$h \sim 1.4 \times 10^{-24}$$

LIGO 2005-6年の9ヶ月間のデータから

$$h < 2.7 \times 10^{-25} \text{ (上限値) が分かった.}$$

つまり重力波によるエネルギーロスは小さいということが
初めて直接的に示された. *Astrophys. J. Lett.* 683, L45 (2008)

LIGO 2005-7年の2年間分のデータ解析からは

$$h < 2 \times 10^{-25} \quad \textit{Astrophys. J.} \text{ 713, 671 (2010)}$$

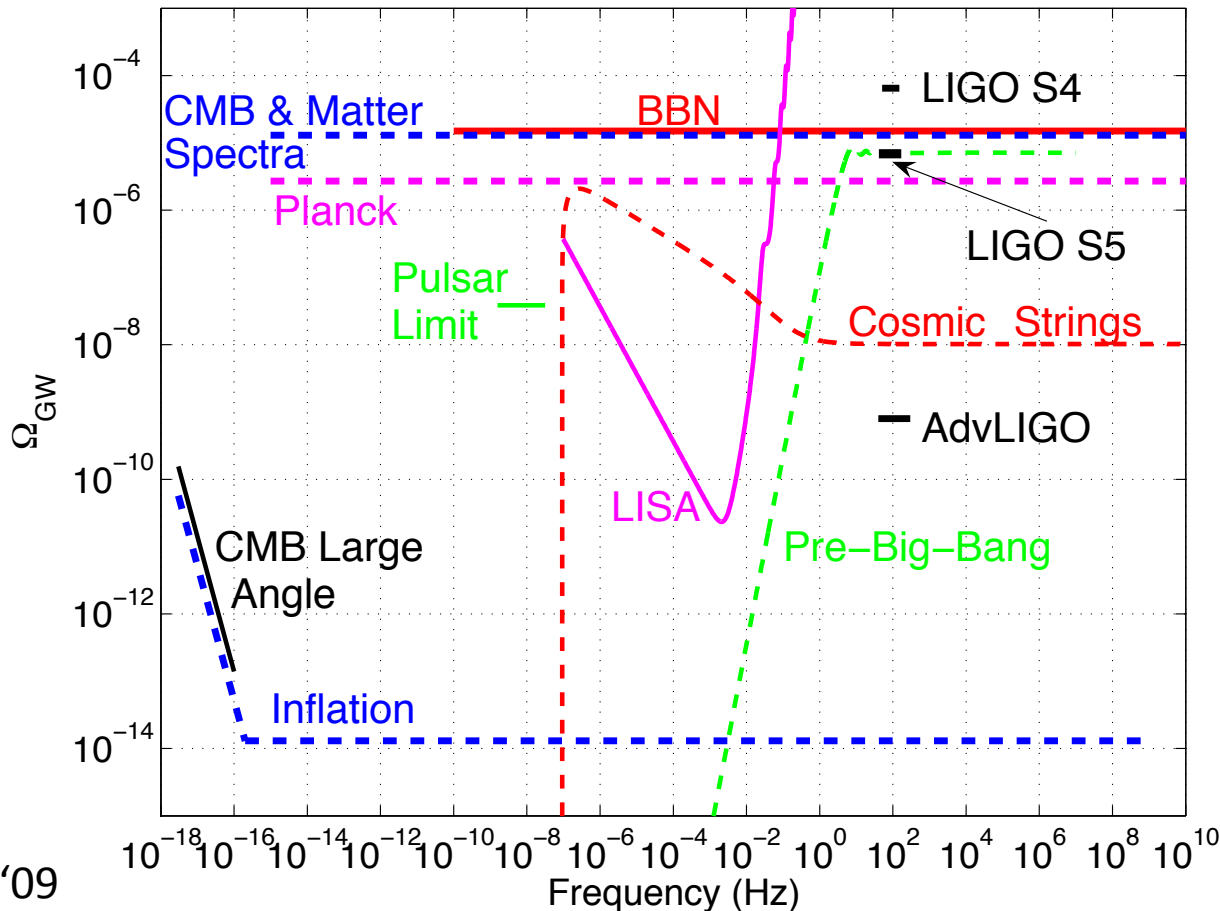
かに星雲



自転周波数 29.78 Hz
距離 2 kpc

宇宙背景重力波

- 初期宇宙起源・・・インフレーション、宇宙紐、、、
- 天体起源・・・多くの天体起源重力波の重ね合わせ



インフレーション
重力波は
地上検出器
では困難