

# KAGRAデータ解析と、 重力波検出器ネットワークによる 突発天体現象重力波の検出

田越秀行(大阪大学)

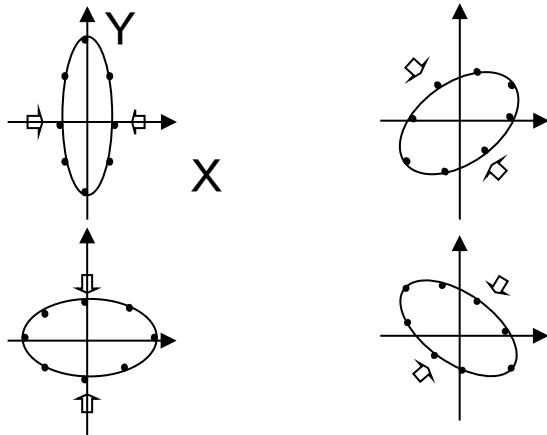
# 目次

---

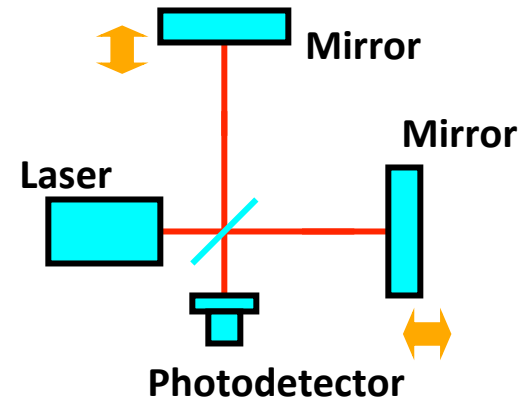
- 重力波の紹介
- KAGRAと世界的状況
- ソース, 重力波突発現象
- トリガー探査
- 多様な観測によるフォローアップ  
重力波の速報

# 重力波

重力波とは・・・一般相対論による時空のゆがみの波動  
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

# 重力波の発生

## 重力波の発生要因

- 質量分布の時間変化

$$\frac{v}{c} \sim 1 \quad \text{and/or} \quad \left( \frac{v^2}{c^2} \sim \right) \frac{GM}{rc^2} \sim 1$$

高速運動 強い重力場 の場合, より強い重力波が放出される

- 非球対称的变化(4重極モーメントの変化)

ニュートン力学同様, 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



# 国際観測網

GEO 600m



LIGO (Livingston) 4km



advanced LIGO

2016年には観測開始

Virgo 3km

advanced Virgo



IndIGO

LIGO (Hanford) 4km



TAMA 300m

CLIO 100m

KAGRA 3km

## ★ 地下サイト

岐阜県神岡鉱山

静謐で安定した環境

## ★ 低温鏡

20K

サファイヤ単結晶

## ★ 3km 基線長

## ★ スケジュール

2010 : 建設開始

2015 : 常温でのテスト観測 (iKAGRA)

2018- (or 2017後半?) - : 低温での高感度観測運転(bKAGRA)



© ICRR, university of Tokyo





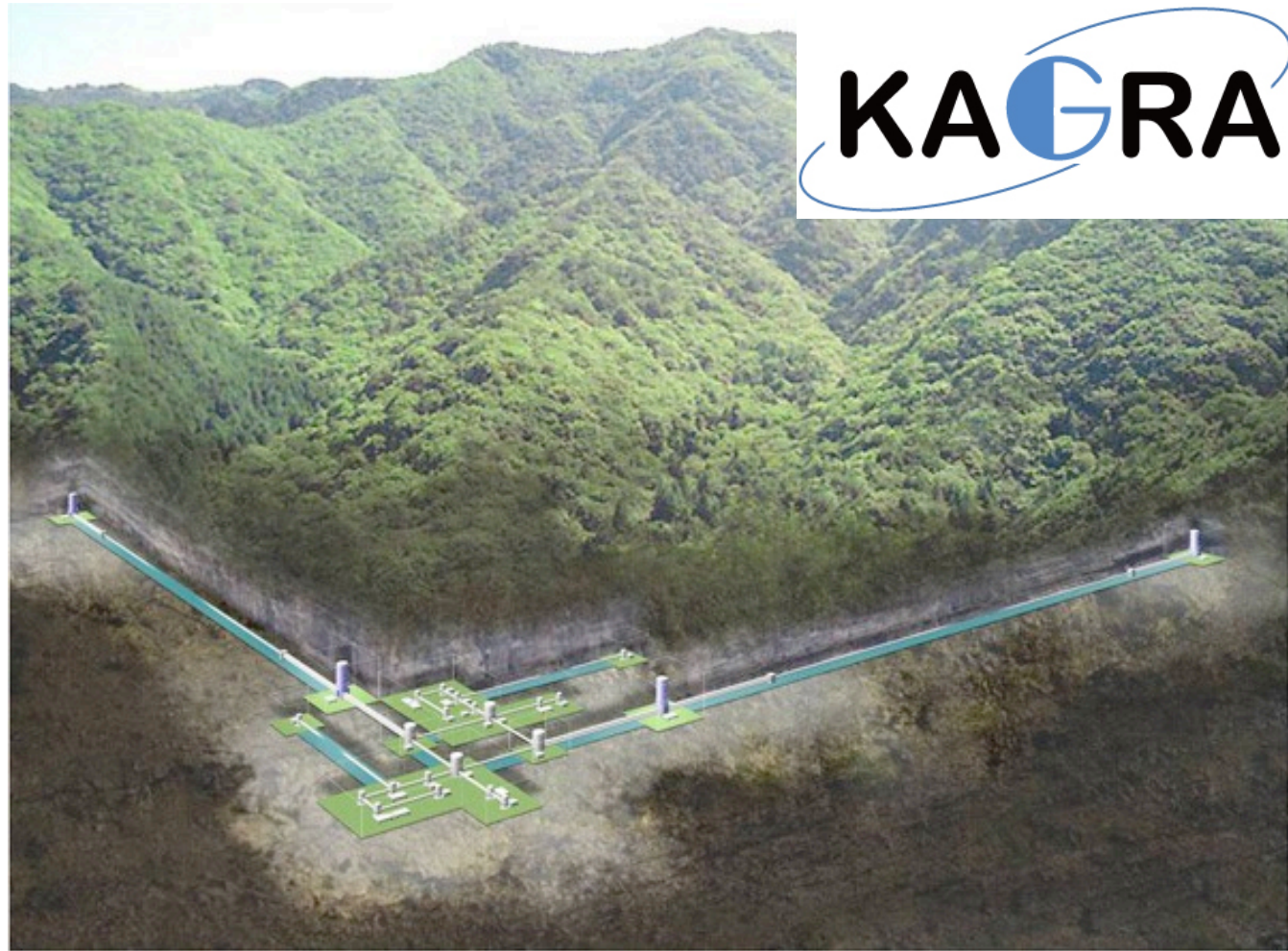
# KAGRA

## Underground

In Kamioka mine.  
Stable environment.  
Low seismic noise  
(by approximately  
 $10^{-2}$  @ 0.5-50Hz  
compared to TAMA  
site)

## Cryogenic mirror

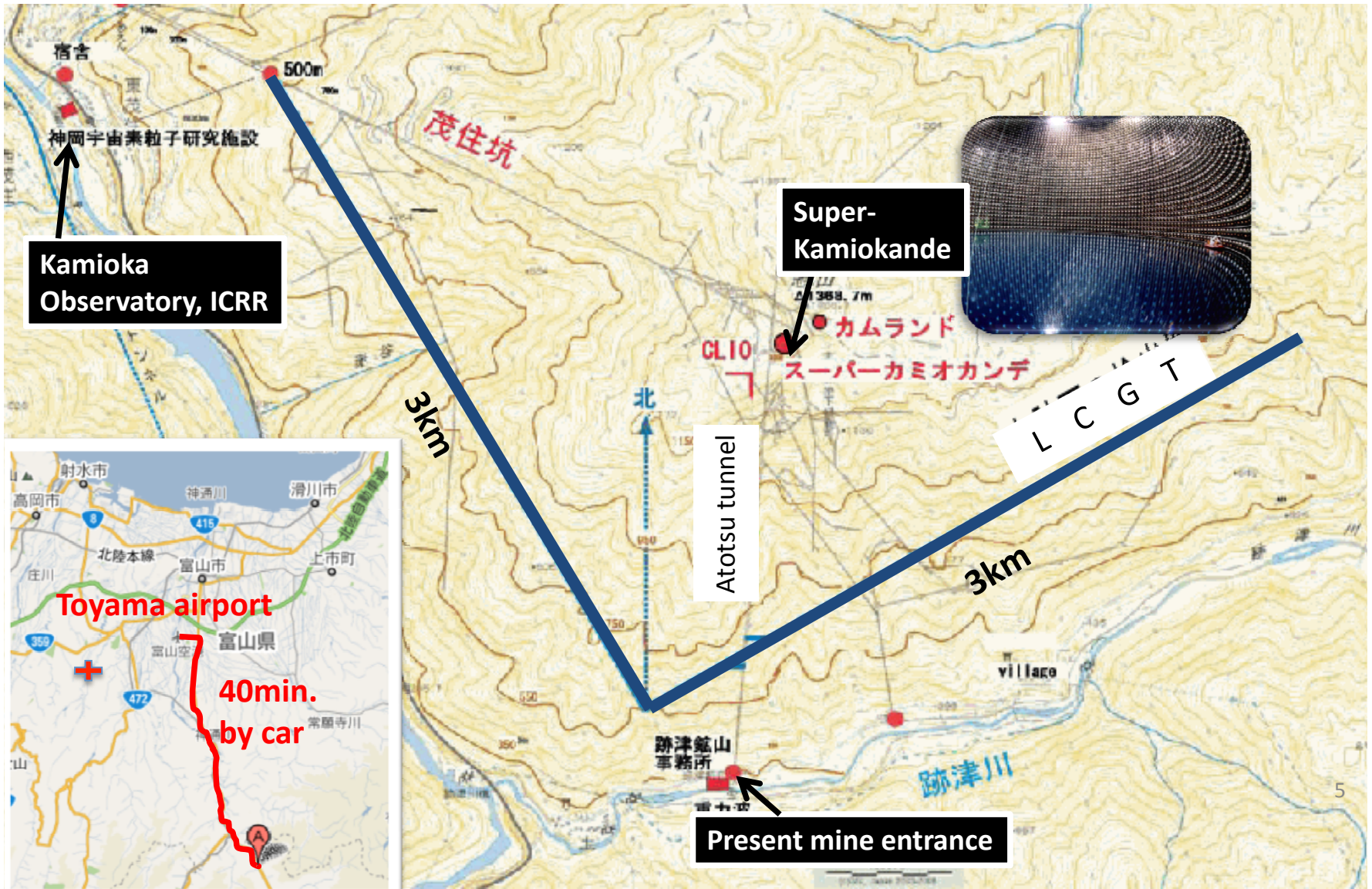
Reduction of thermal  
noise.



2015年室温でテスト観測 (iKAGRA)  
2018年度(or2017年度末) 低温での本格観測



# KAGRA -- Location--

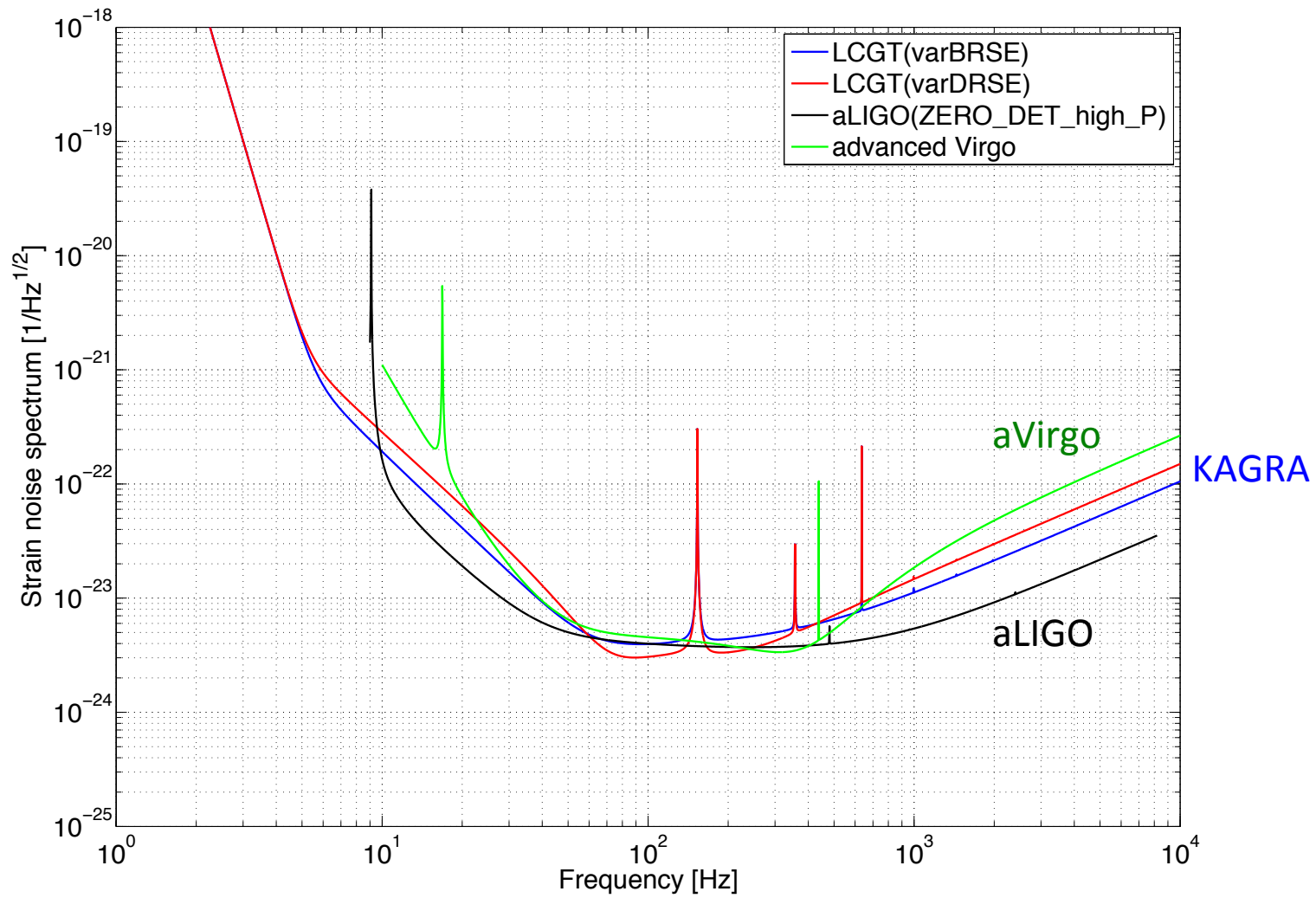






現在 トンネル掘削～13%完了

# Noise spectrum --aLIGO,aVIRGO,KAGRA--



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



# 主な重力波源

## 突発的重力波源

コンパクト連星合体

中性子星(NS), ブラックホール(BH)

星の重力崩壊

超新星爆発

パルサーグリッジ

宇宙紐のカスプ, キンク

## 連続的重力波源

回転中性子星, 連星系

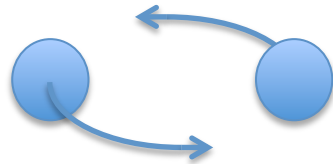
## 背景重力波

初期宇宙起源

天体起源

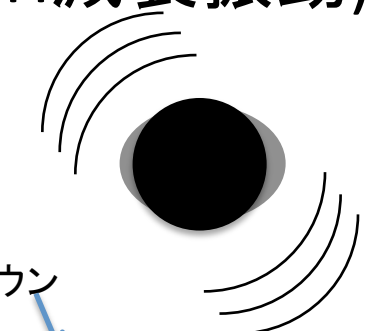
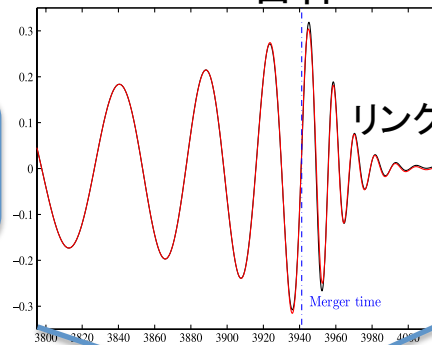
# コンパクト連星合体

- 波形 インスパイラル → 合体 → リングダウン (BH減衰振動)



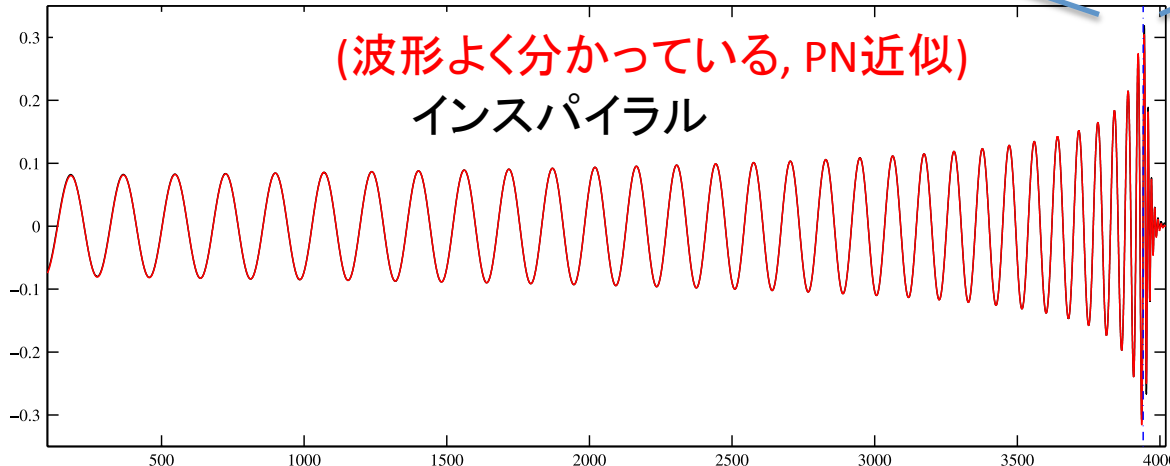
数値相対論

合体



(波形よく分かっている, BH振動)

(波形よく分かっているとは・・・比較的少数の  
パラメータで(準)解析的に表すことができる)



(波形よく分かっている, PN近似)  
インスパイラル

電磁波放射:  
SGRB  
afterglow(X,optical,radio)  
kilonova (optical)



# NS-NS for KAGRA

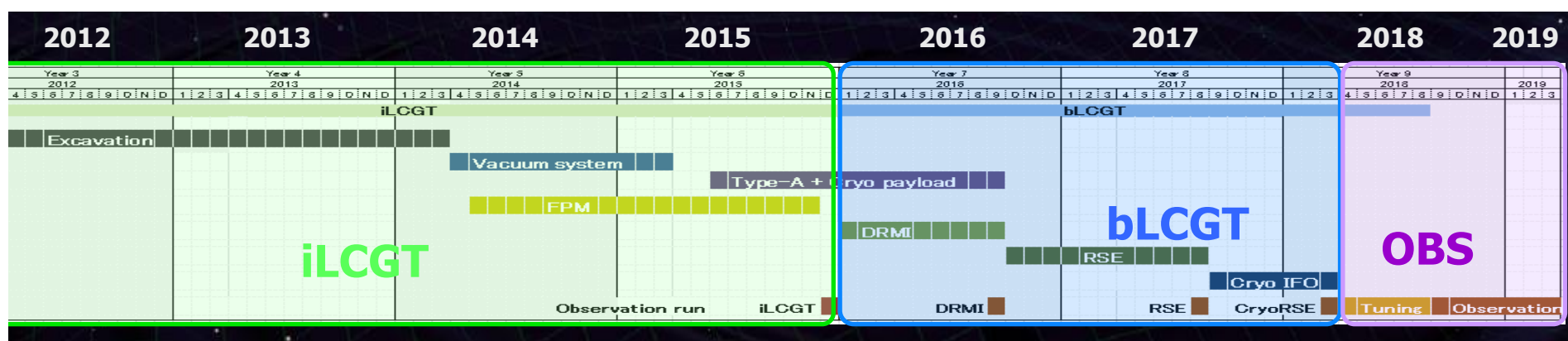
NS-NS binary coalescence

Horizon distance (S/N=8, optimal direction, face-on)

iKAGRA **29Mpc**  $\rightarrow$  bKAGRA **280Mpc**  
 (In LIGO's definition, 18Mpc) (173Mpc)

(LIGO's definition)=(KAGRA's definition) $\times(\sqrt{2})\times(0.44)$

(Assuming phase is measured. Averaged over the sky and inclination angle.)

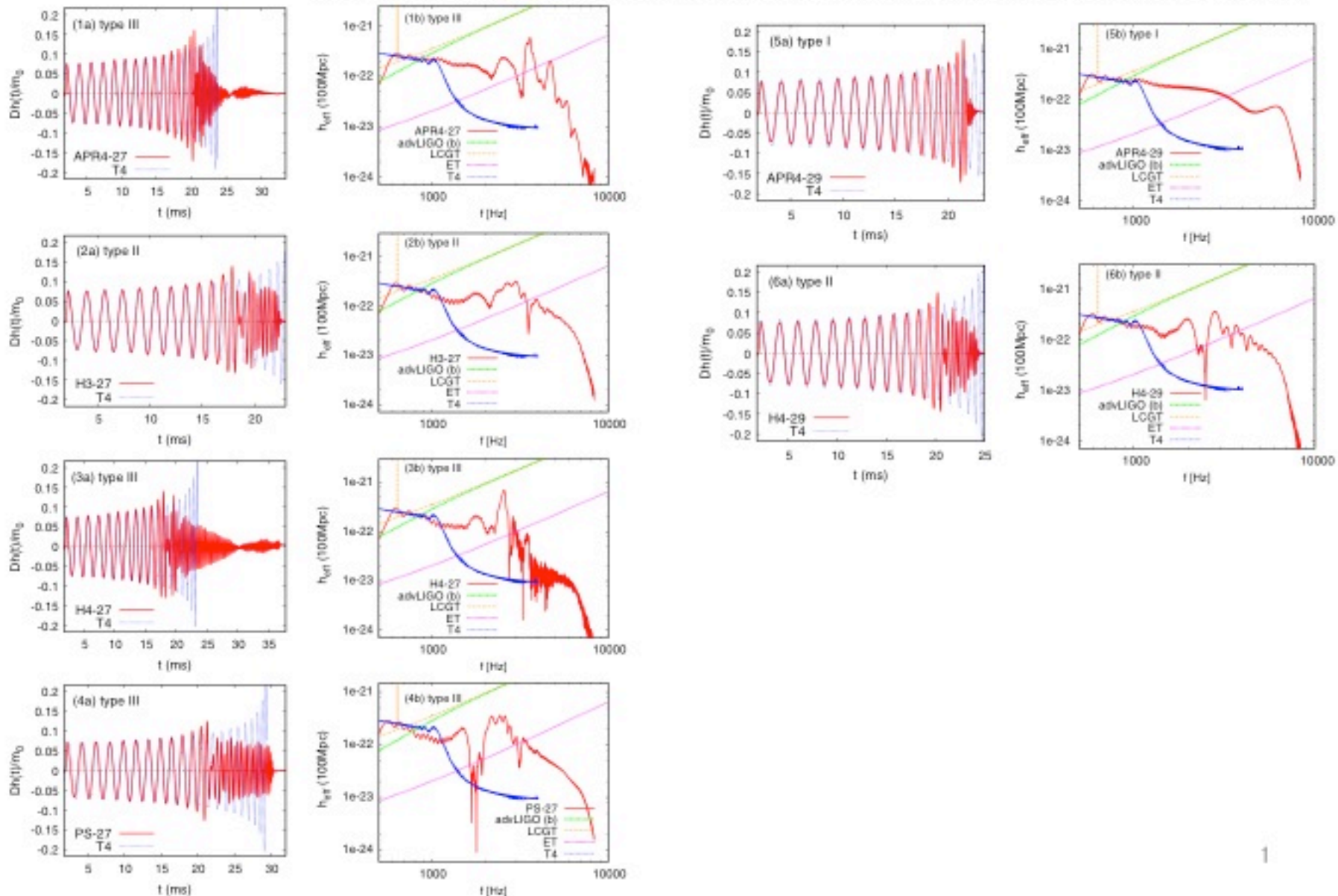


Event rate for bKAGRA :  $9.8^{+14}_{-6.6} \text{ yr}^{-1}$

(based on Kim ('08), Lorimer ('08))

# 中性子星連星合体 HMNS

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



# Basic value for the inspiral waveform

$(m_1, m_2)$ [Msolar]	(1.4, 1.4)	(10, 1.4)	(10, 10)	(100, 1.4)
frequency@ISCO[Hz]	1570 Hz	386 Hz	220 Hz	43 Hz
duration(10Hz-ISCO)[sec]	1002 sec	224 sec	38 sec	46 sec
cycle(10Hz-ISCO)	16038	3585	605	743
orb. radius@10Hz[Mt]	174 Mt	68 Mt	47 Mt	16 Mt

$$Mt = m_1 + m_2$$

ISCO: Inner most stable circular orbit.

# LIGO観測結果 -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

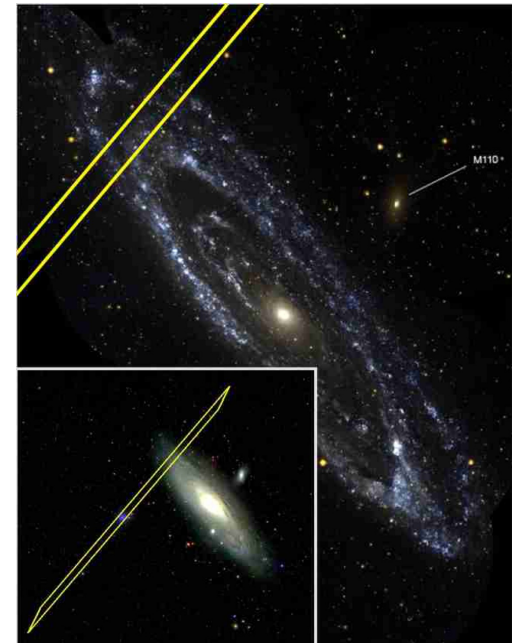
GRB070201 SGRB, 発生方向: M31の方向  
LIGO-H1ロックしていた.



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現象  
ではない(信頼度99%以上で).

Astrophys. J. 681, 1419 (2008)

(アンドロメダ星雲, 770kpc)



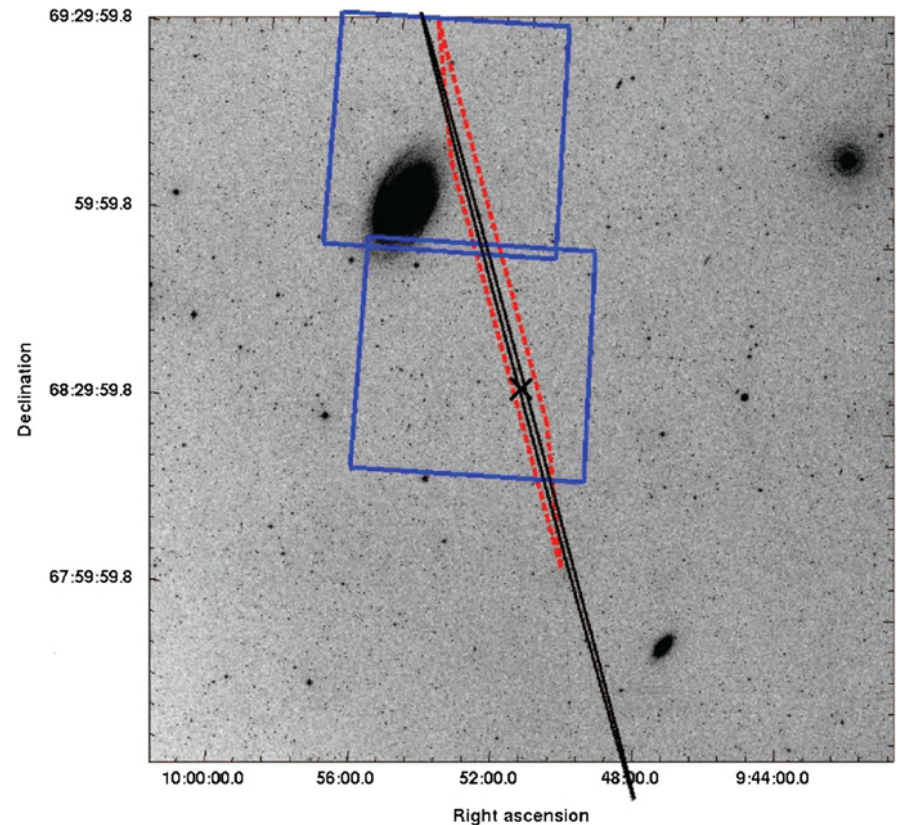
Konus-Wind, INTEGRAL,  
and MESSENGER

# LIGO観測結果 -ガンマ線バースト-

GRB051107 SGRB, 発生方向: [M81](#) (3.6Mpc)の近傍  
LIGO S5観測開始の前日でテスト運転中  
LIGO-L1, H2はロックしていた

しかし, LIGOデータ解析の結果,  
この時刻にNS-NS連星合体,  
NS-BH連星合体は検出できない。  
従って, M81で起こったコンパクト  
連星合体ではない。

Astrophys. J. 755, 2 (2012)



**Figure 1.** Central region of the M81 group, showing the original error trapezium (red dashed line) from the IPN and the refined  $3\sigma$  error ellipse (solid black). The blue boxes are the regions studied in the optical. Figure from Hurley et al. (2010) Copyright (c) 2010 RAS.

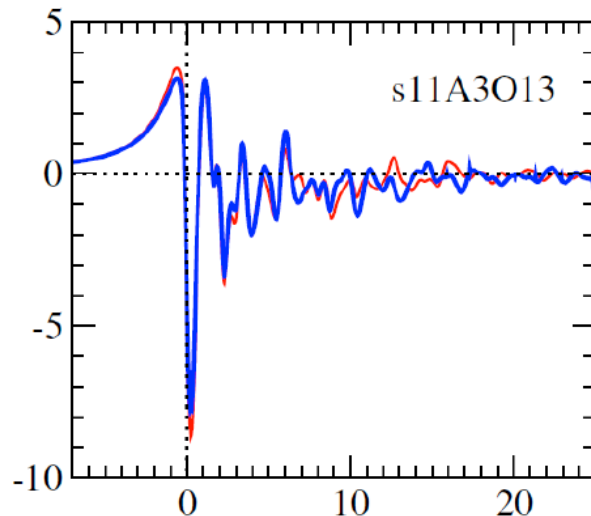


# 重力崩壊型超新星爆発

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

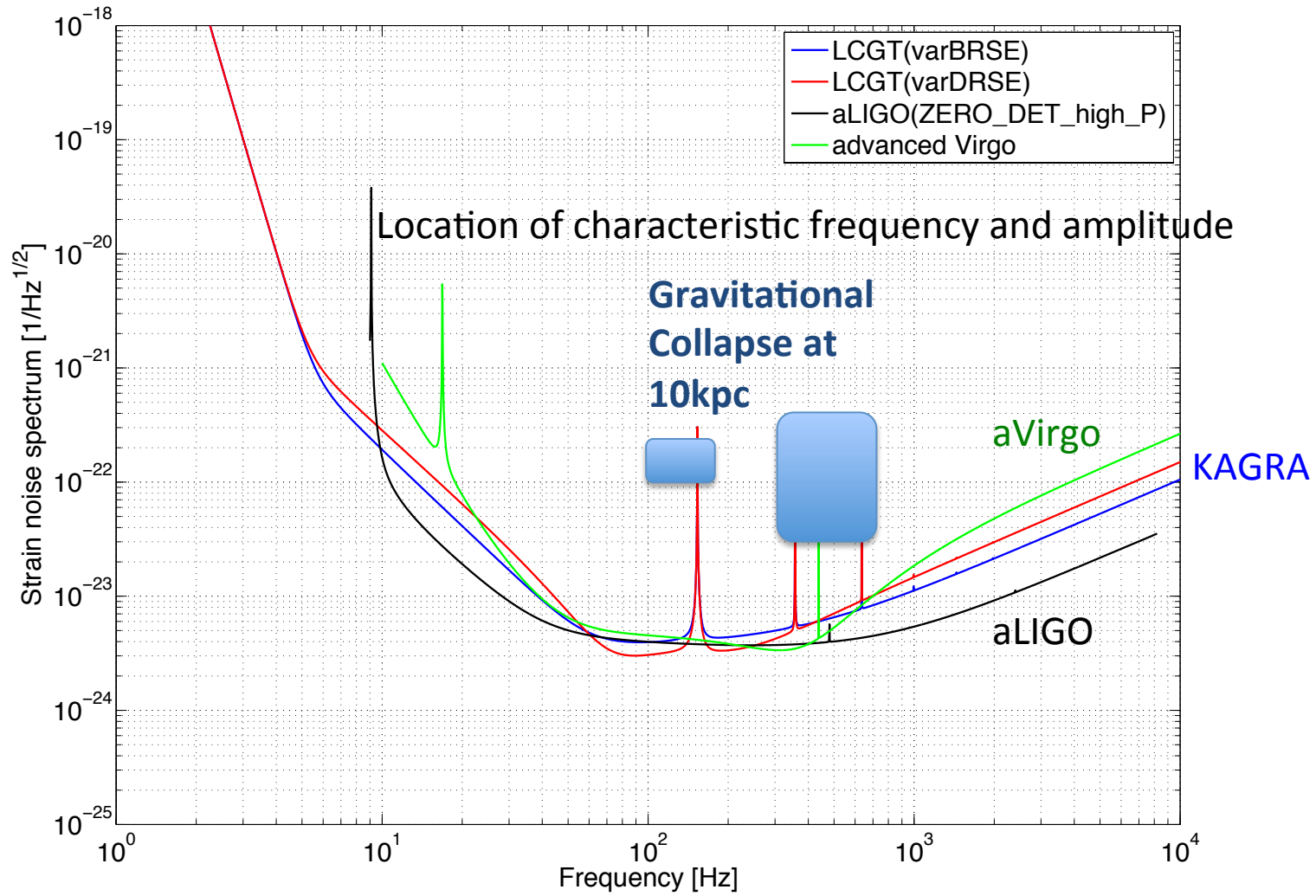
Various possible gravitational wave emission mechanism.

- 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]

# 星の重力崩壊



KAGRA, aLIGOは数100kpcまで観測可能

# 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

- フォロースアップ観測

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。

# 重力波検出器ネットワークの必要性

重力波観測による方向決定

突発的ソースに対しては、レーザー干渉計は1台では波の到来方向が分からない。

波の到来方向を知る方法

- 地球の運動によるドップラー効果(1台でも可能)  
(長時間継続する重力波のみ有効(パルサーからの重力波))
- 3台以上の検出器での検出時刻の差の情報

他にも複数検出器ネットワークは

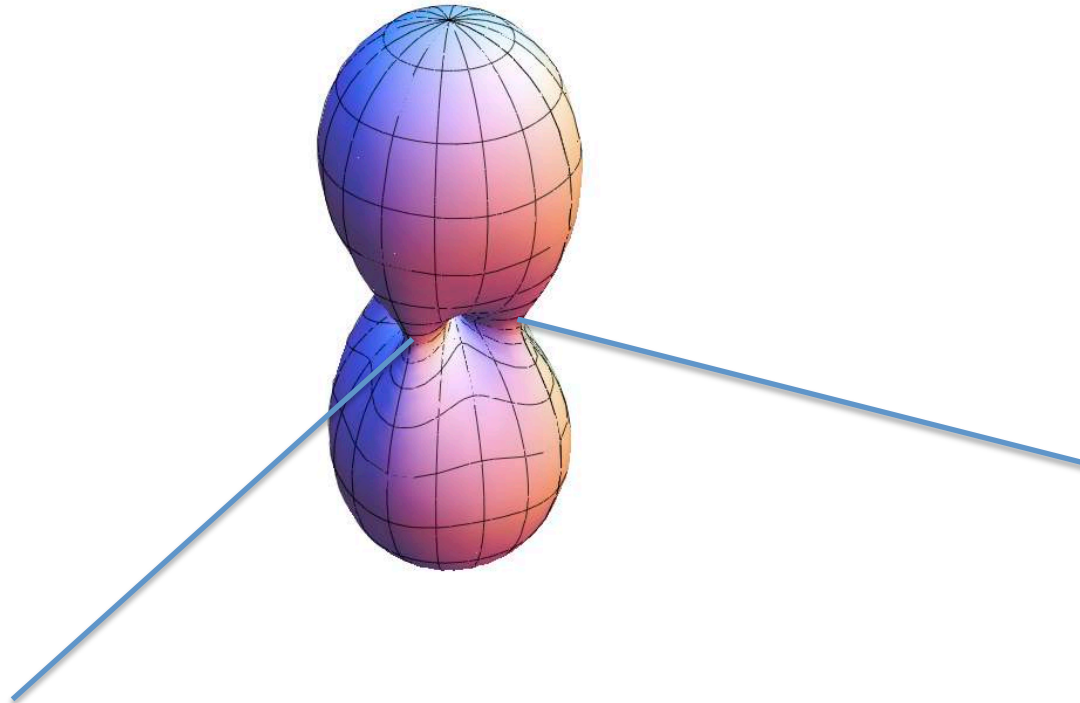
全天カバー率の向上

重力波検出の信頼度向上

に重要。

国際的共同観測は必要不可欠

# レーザー干渉計アンテナパターン



# 方向決定精度

NS-NS連星合体 @180Mpc

L:LIGO-Livingston

H:LIGO-Hanford

V: Virgo

**K: KAGRA**

I:LIGO-India

median of $\delta\Omega$ [Deg <sup>2</sup> ]	LHV	LHVK	LHVI
(1.4, 1.4) Msolar	30.25	9.5	9.0

(95%CI)

Ref. J.Veitch et al., PRD85, 104045 (2012)  
シミュレーション

direction, inclination, polarization angle  
are given randomly

方向決定精度はだいたい **10 - 30 Deg<sup>2</sup>** (@180Mpc).

see also Wen and Chen (2010)  
Fairhurst (2011)

# 速報の可能性

電磁波などとの相互フォローアップを考え、  
例えば連星中性子星合体の高速処理をするなら、  
質量範囲を狭めるなどをすれば、原理的には数分以内で可能。

データ転送、前処理を高速処理する工夫が必要。

$m_1, m_2$	1-2Msolar	1.3-1.5Msolar
テンプレート数	4800	36
CPU power	1.2Gflops	8.8Mflops

信号継続時間(約10分)と同じ時間で解析を終了するために必要な演算速度

# 予報の可能性

(1.4,1.4)Msolar case

Time to coalescence and GW frequency, S/N loss rate

	60 sec	30 sec	10 sec	5 sec	1 sec
GW freq.	29Hz	37 Hz	56Hz	73Hz	133Hz
$\rho/\rho_0$	0.15	0.21	0.37	0.50	0.76

$\rho_0$ : S/N when integrating to ISCO

(1.4,1.4)Msolar

Cutoff frequency : 56Hz (10 sec before ISCO)



S/N is less than 37% of total value

Further, source localization accuracy becomes worse.

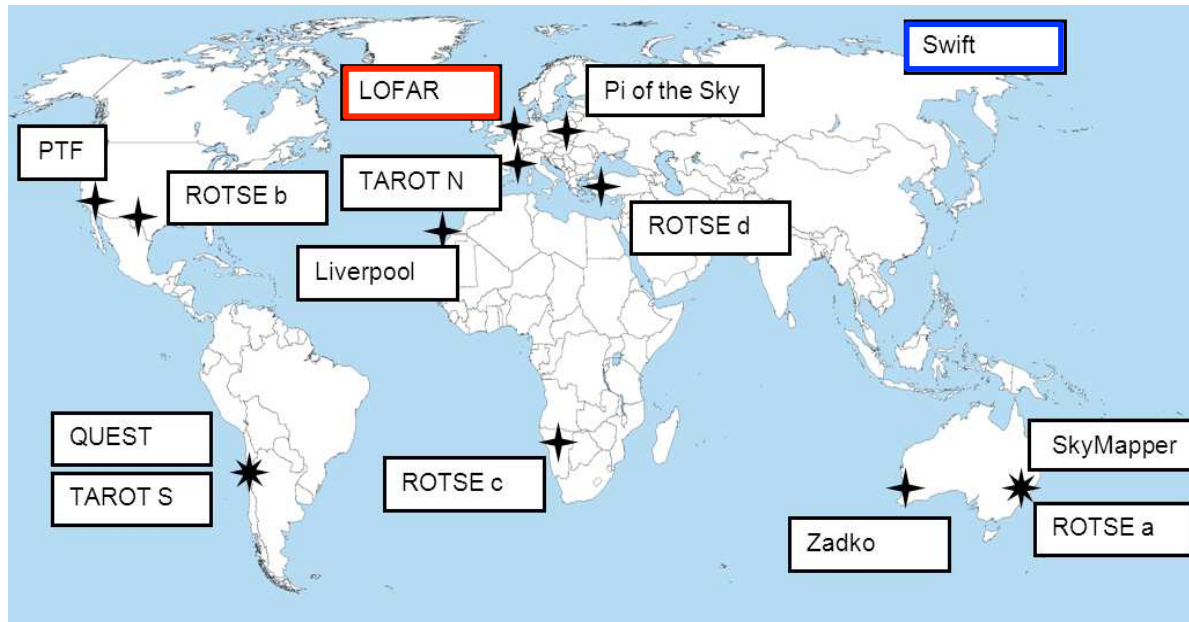
Nevertheless, if the event occur near our Galaxy, we will have a chance to detect such event before coalescence.

# 実例：LIGO – Virgo 観測

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

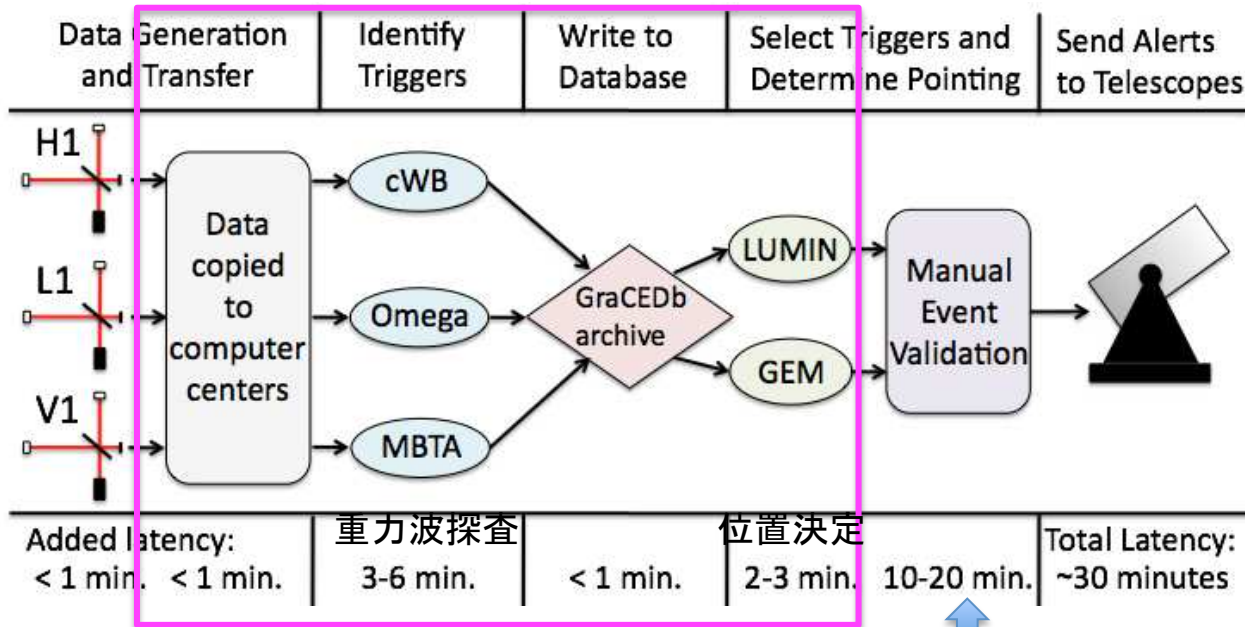
LIGO S6, Virgo VSR2 の2つの期間に，電磁波観測によるfollow-upを目指して，low-latencyパイプラインによる重力波イベント候補探査と，候補イベントの位置の速報が行われた。

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



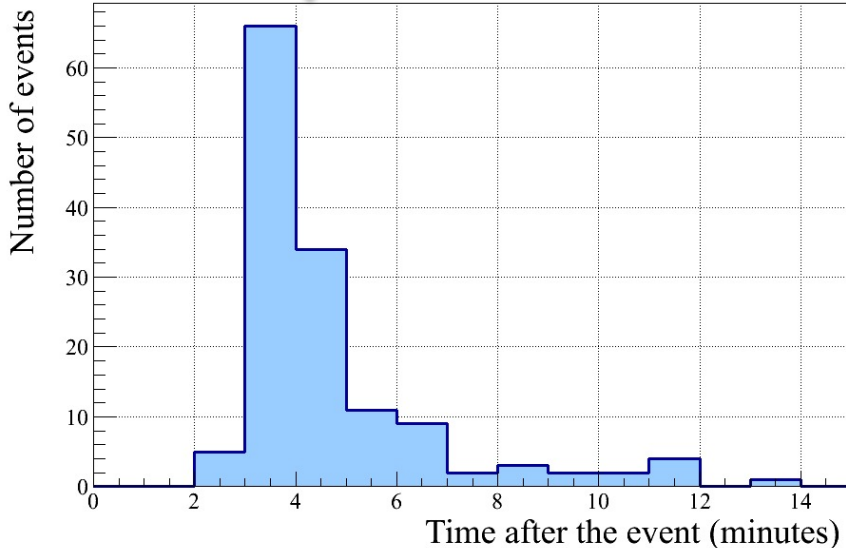
参加した観測機器

# 実例: LIGO – Virgo 観測 --フローチャート--



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)





# 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.

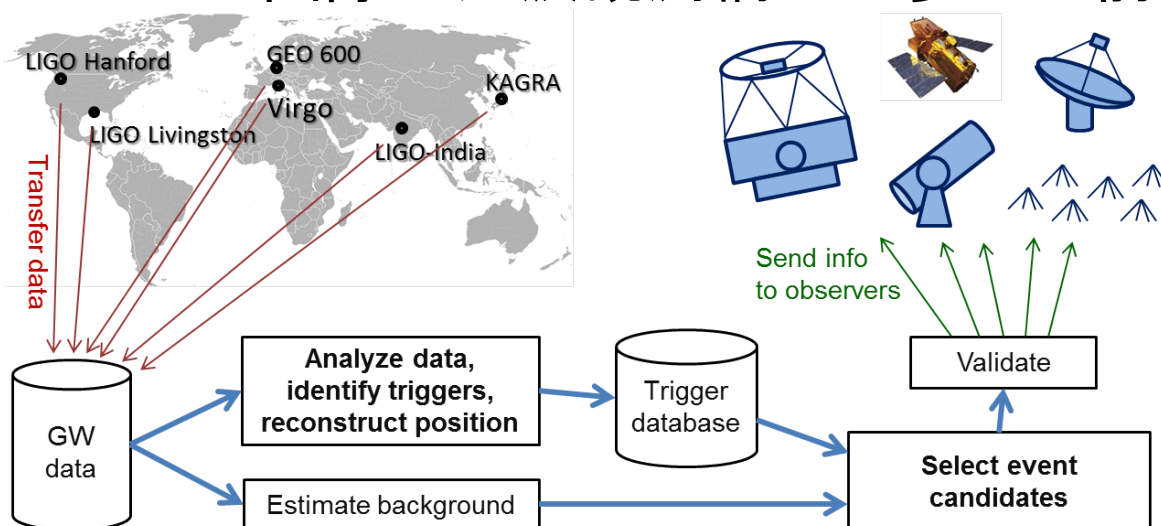
# KAGRAでの高速データ解析, 速報

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.

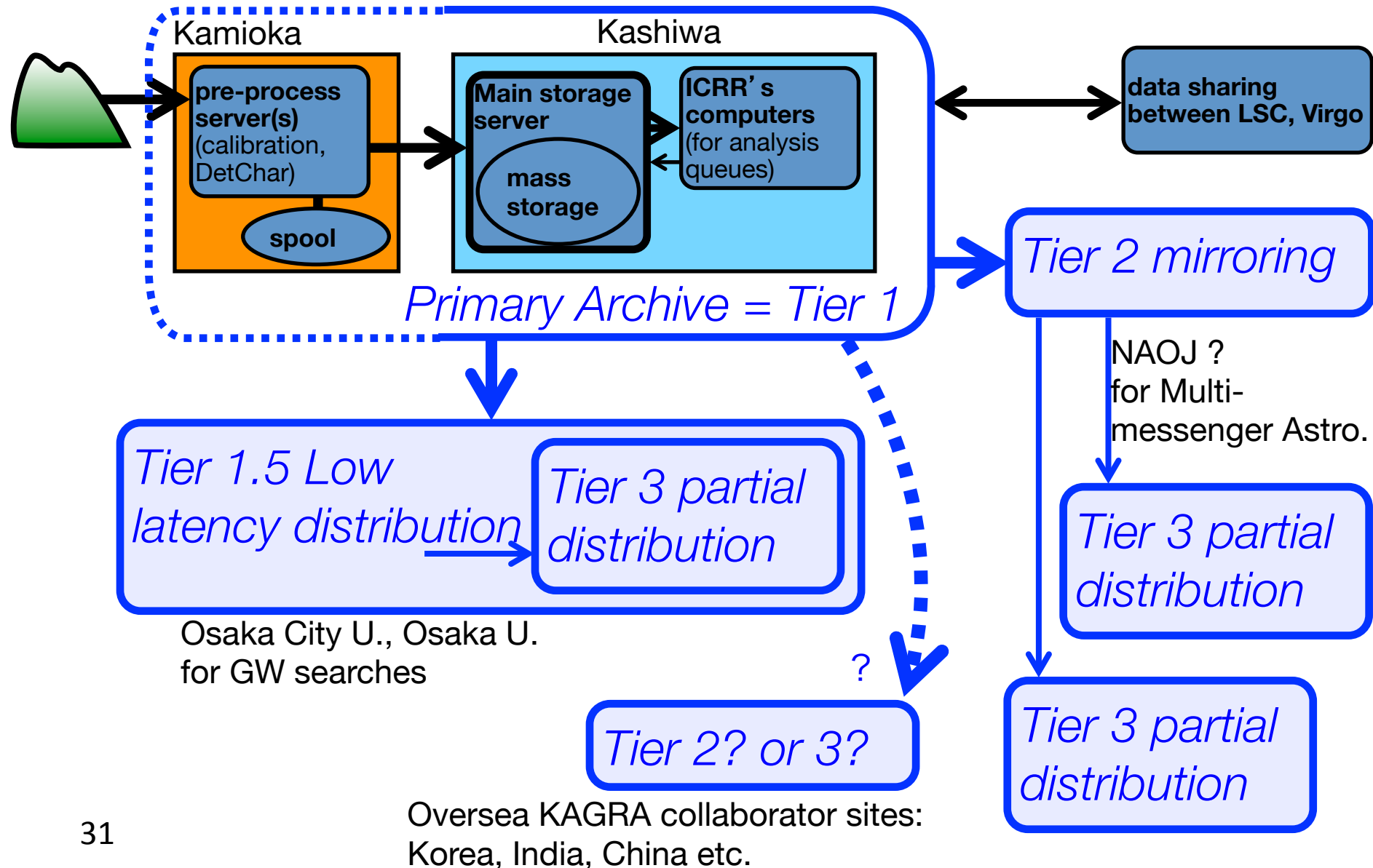
フォローアップ観測すべき方向は, 重力波だけでなく, 事前に銀河カタログなどを用意して絞り込める可能性がある(要検討).

以上はKAGRAの国際重力波観測網への参加が前提



taken from  
arxiv:1206.6163

# KAGRA Data flow



# 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    2016年頃  
KAGRA            2018年頃
- 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(新しい科研費)開始 2012-2016  
「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