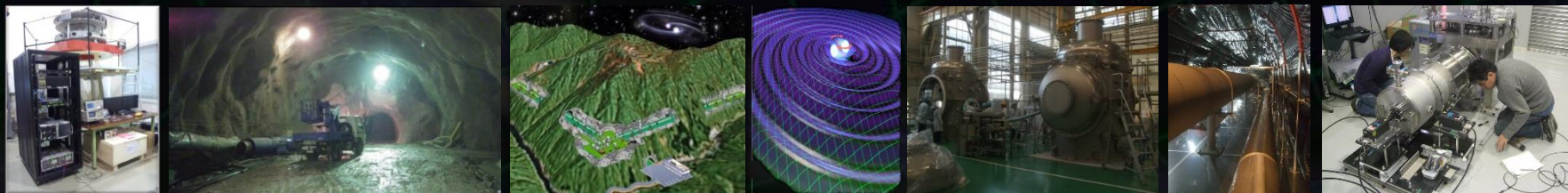


重力波の観測

安東 正樹 (東京大学/国立天文台)



イントロダクション

元素組成
化学進化

中性子星連星の合体

数値相対論計算

質量放出

r-process

重力波形

ニュートリノ

重力波の観測

電磁波・ニュー
トリノ天体観測

輻射輸送計算

頻度

Chirp波
Merger

Short GRB
Kilonova

星形成シナリオ

原子核理論・状態方程式

レーザー干渉計重力波望遠鏡をもちいて
どのような観測ができるのか、を概観する。
→ 重力波望遠鏡の概要。
期待できる観測頻度, 角度分解能。
KAGRAの現状。

大型低温重力波望遠鏡



大型低温重力波望遠鏡

かぐら (KAGRA)

岐阜県・神岡で建設中の
次世代重力波検出器
(本格観測 2017年-)



重力波天文学の創成

レーザー干渉計型重力波検出器

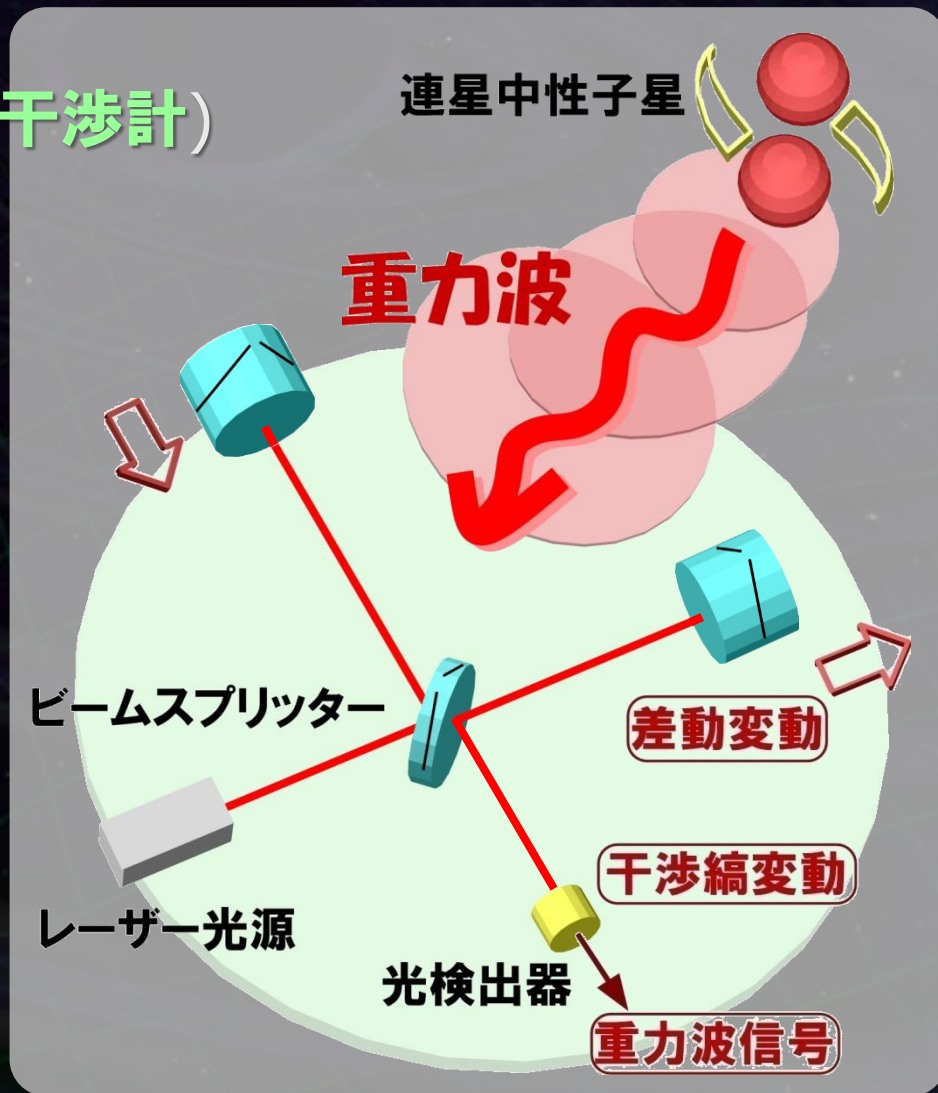
レーザー干渉計 (マイケルソン干渉計)

- レーザー光源からの光を直交する2方向に分岐.
- 懸架された鏡で打ち返し干涉.
- 光検出器で観測.

重力波が入射



腕の長さの差動変動を
干涉光量の変動として検出



第1世代 重力波検出器

検出の試み：1960年代より行われる

2000年前後より、大型干渉計型検出器が観測を開始

レーザー干渉計型：5台, 共振型検出器：3台



- ⇒ 国際的観測ネットワーク：1年を超える観測データ
→ 科学的成果（上限値, 理論モデルへの制約など）

連星中性子星合体イベント：50kpc~20Mpcの観測レンジ

→ 我々の銀河, 近傍銀河でイベントがあれば検出可能

ただ... 第1世代干渉計で検出できるような
重力波イベントは稀 (10^{-4} - 10^{-2} event/yr)

⇒ 約1桁感度を向上した 第2世代の重力波望遠鏡

高感度化 → より多くの銀河をカバーする

(重力波の振幅) $\propto 1/(\text{波源までの距離})$



感度が10倍向上 → イベントレートは 10^3 倍

得られるサイエンス

Initial LIGO 1年間の観測

~ Advanced LIGO 9時間の観測

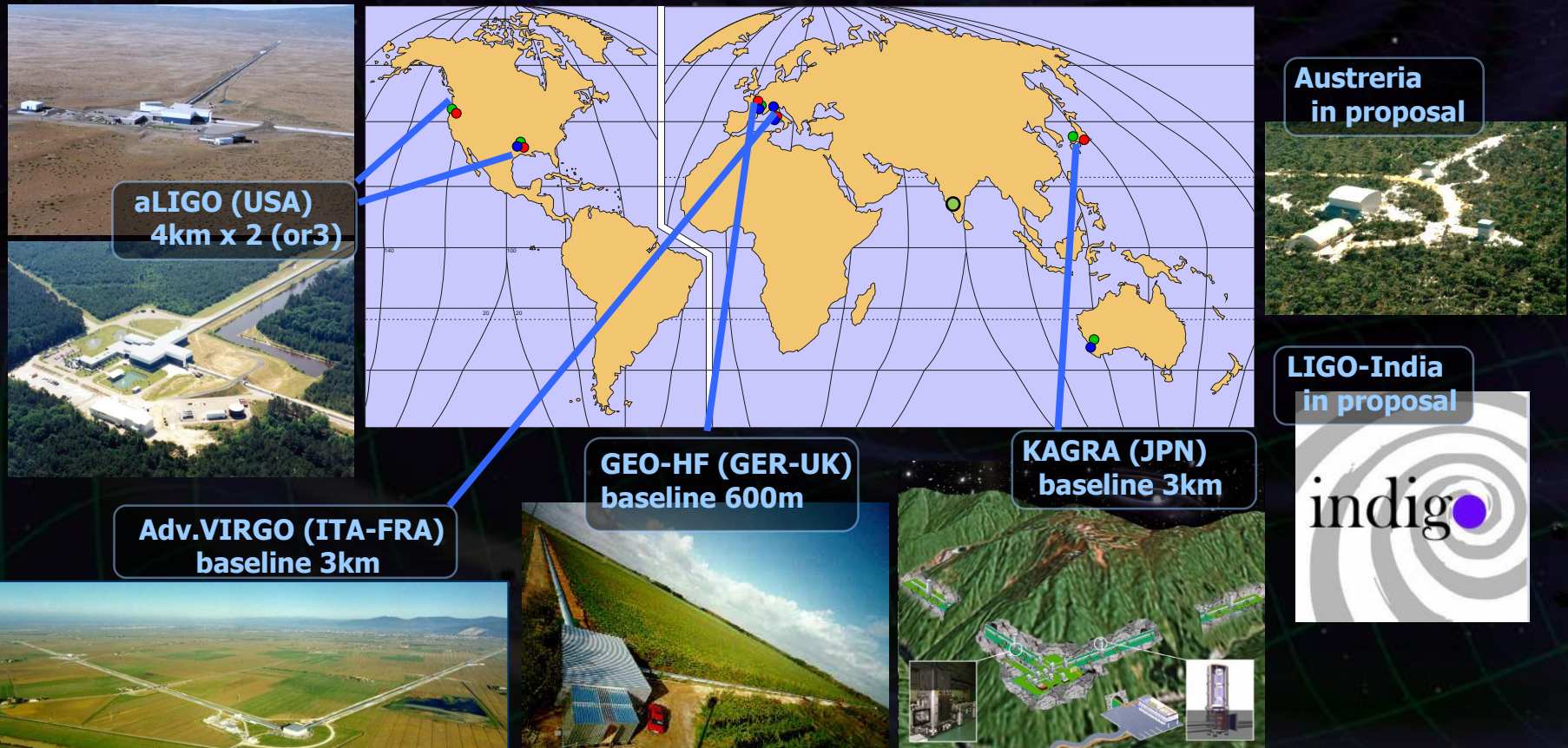


第2世代望遠鏡では、検出頻度 ~ 10 event/year

第2世代 重力波望遠鏡

国際観測ネットワークが形成される (現在から 約5年後)

→ 重力波天文学 (重力波の検出, 位置, 物理情報, ...)

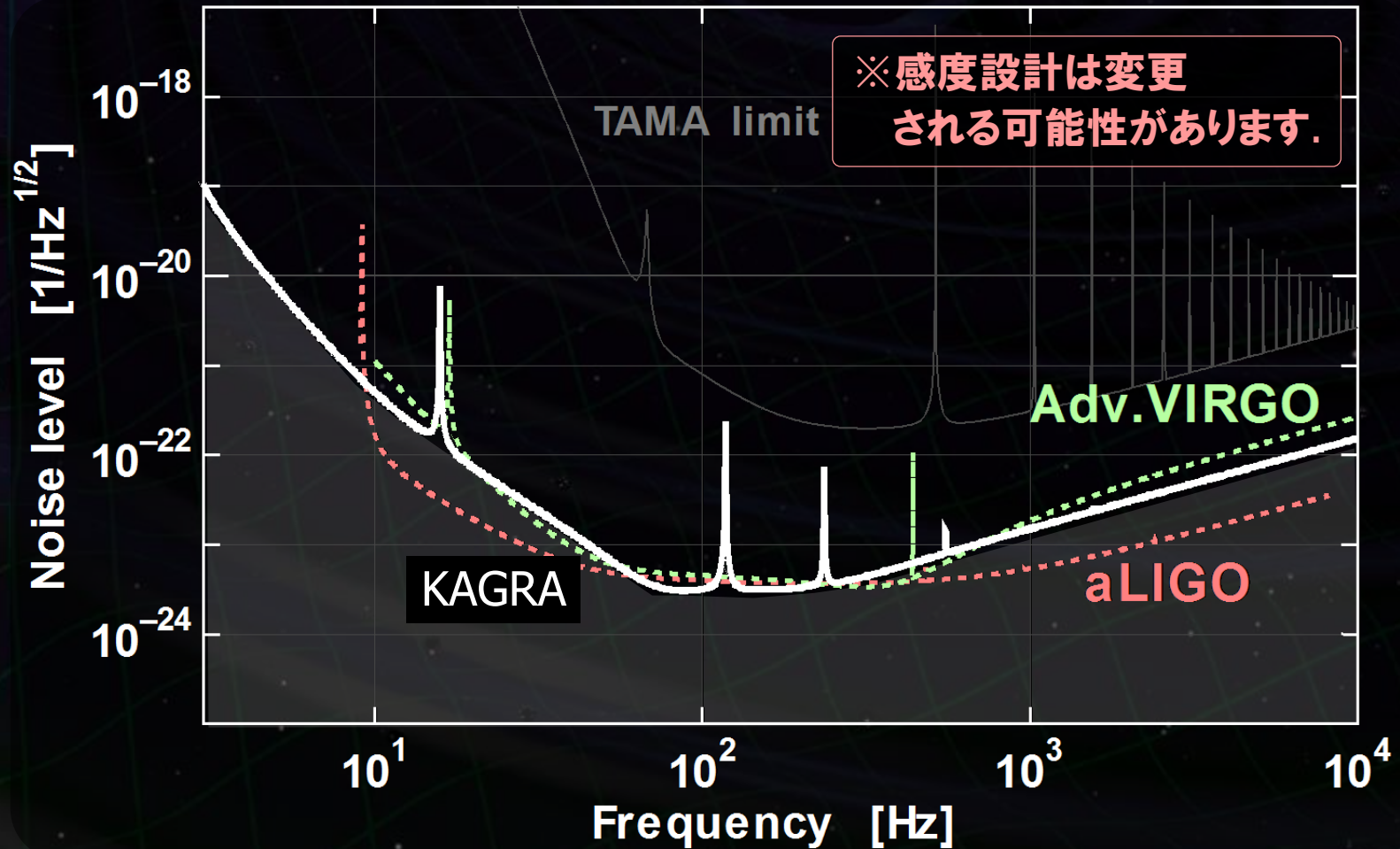


KAGRAの感度限界

主要な雑音源で決まる限界感度
aLIGO や Ad.VIRGOと同等

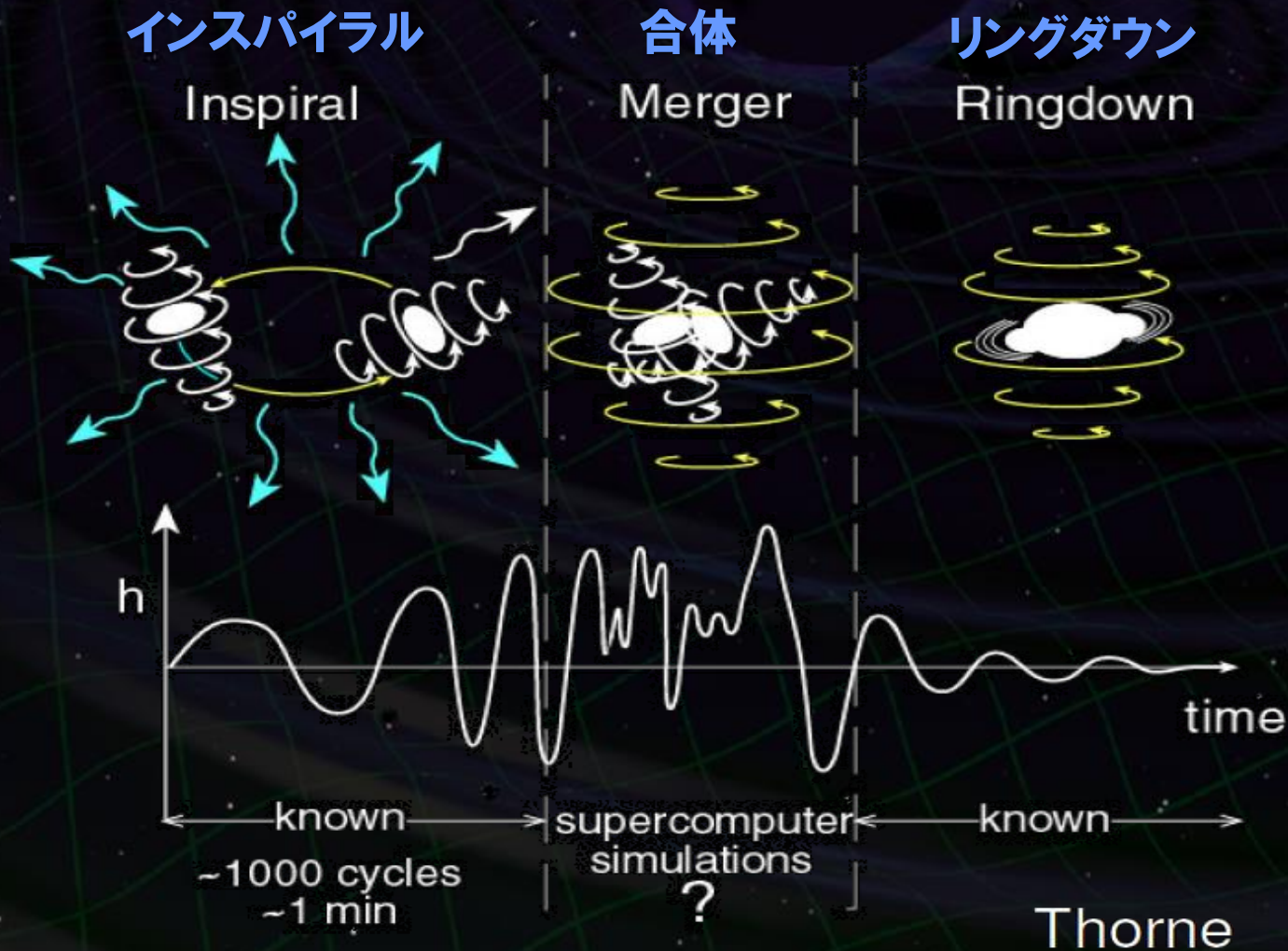


国際観測網を形成
年間1回以上の重力波検出



連星合体現象からの重力波

KAGRAの第一のターゲット：連星合体からの重力波



• 重力波の初検出

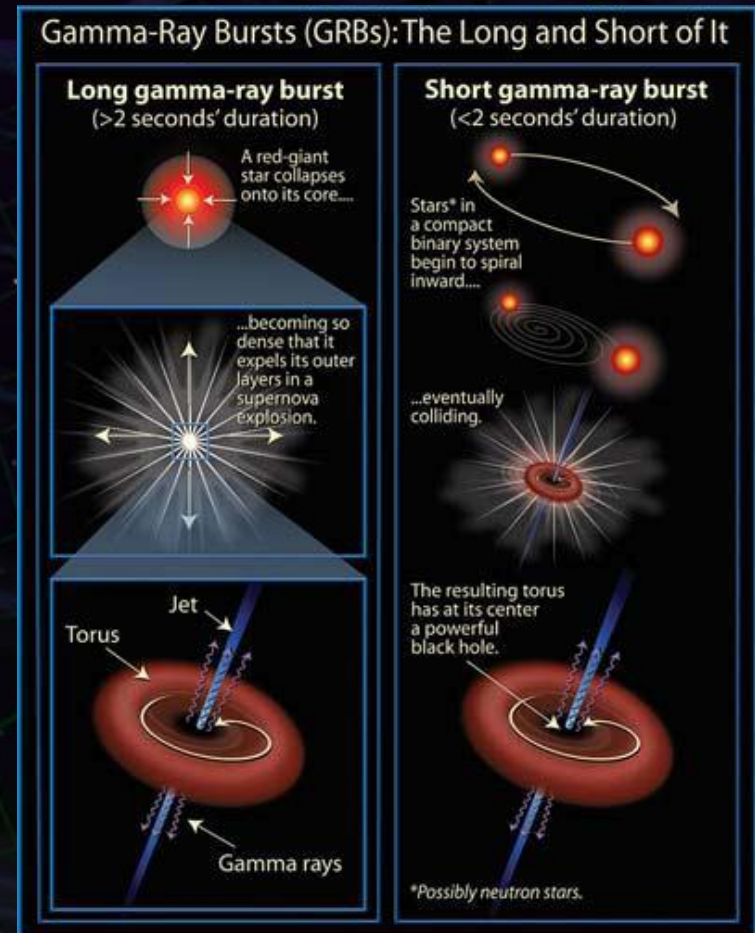
- 連星中性子星：存在が確実，波形が予測できる。
- 相対性理論/重力法則の検証。
- 新しい天文学の創生。
- ガンマ線バーストの起源，未知の発見。

• 高密度核物質の直接探査

- 中性子星の状態方程式の情報。
- 潮汐変形/破壊，HMNSの形成など。

• 宇宙論・銀河形成史に対する知見

- 宇宙論パラメータへの制限。
- 超巨大ブラックホールの形成過程
- 連星の進化や分布の情報。



From encyclopedia of science

中性子星連星の合体

中性子星連星 及びその候補 : 10組
そのうち, 寿命が宇宙年齢より短いもの : 6組

⇒ 確実性が高い4組を見積もりに使用.

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

H-T pulsar

Double pulsar

最も最近に発見 (2006)

球状星団M15外周部

合体レートの見積もり

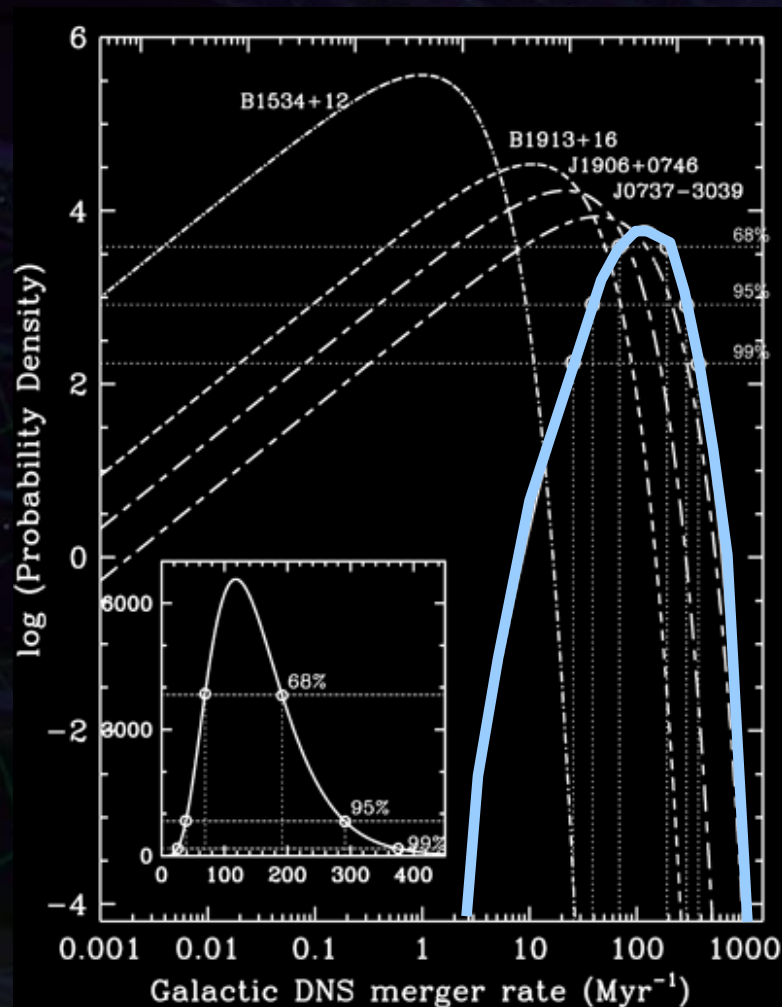
Kalogera+, ApJ (2004), Lorimer, LRR (2008), Kim+ (2008)

- 宇宙年齢以内に合体するDNS 4つ
- 各'種類' → 銀河系内の数を見積もる。
 - 連星の寿命, 明るさ
 - パルサー探査で見つけられる確率
 - 銀河系内の分布モデル
- + その種類の連星系が
1つ見つかったという観測事実.



銀河系あたりの合体レート

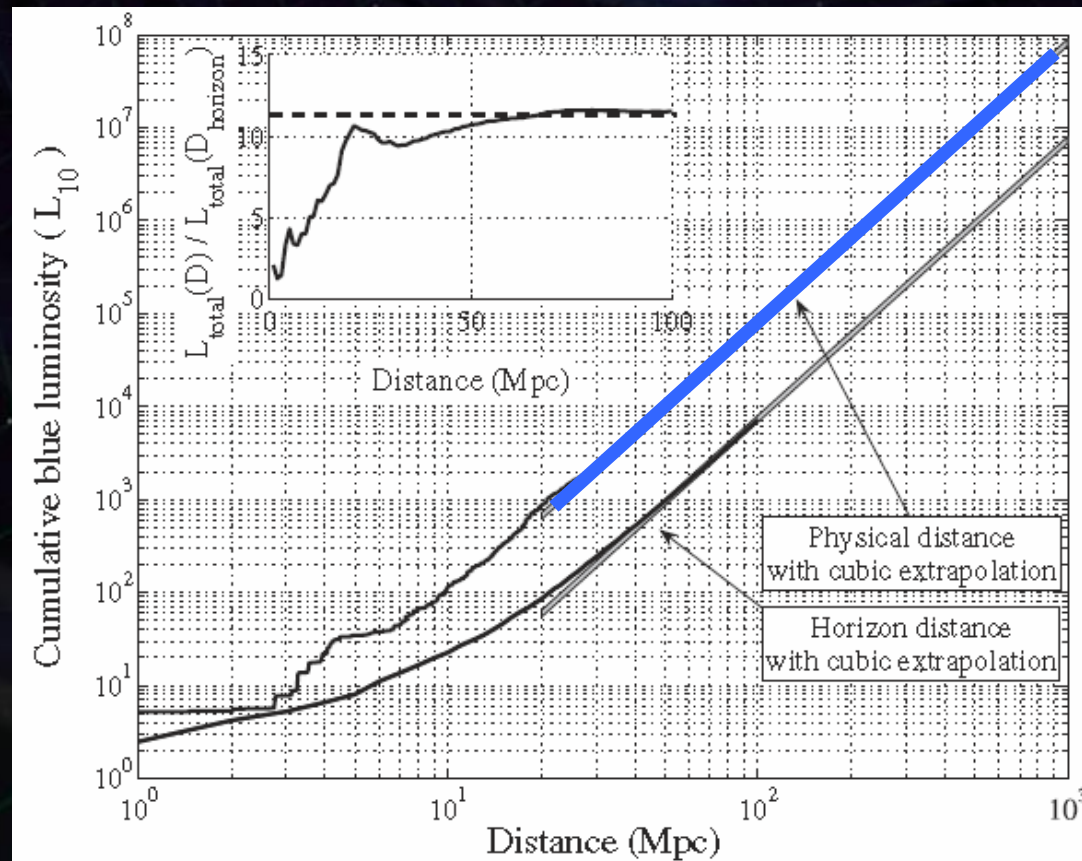
$$\mathcal{R} = 118_{-79}^{+174} [\text{events/Myr}]$$



銀河の個数密度

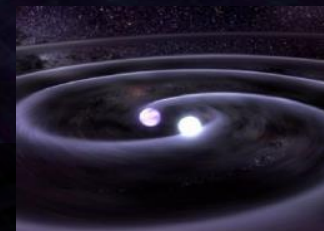
近傍銀河の観測結果を外掃して見積もる

$$\Rightarrow \rho = 1.2 \times 10^{-2} \text{ [Mpc}^{-3}\text{]}$$



Kopparapu+, ApJ (2008), Abadie+, CQG (2010)

連星中性子星合体からの重力波観測



観測レンジ

感度曲線 → 観測可能距離 270 Mpc

(SNR 8, 最適方向・偏波)

銀河の個数密度 :

$$\rho = 1.2 \times 10^{-2} \text{ [Mpc}^{-3}\text{]}$$

R. K. Kopparapu et.al.,
ApJ, 675 1459 (2008)

銀河あたりのイベントレート:

$$\mathcal{R} = 118_{-79}^{+174} \text{ [events/Myr]}$$

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



KAGRAの観測レート **9.8 events/yr**

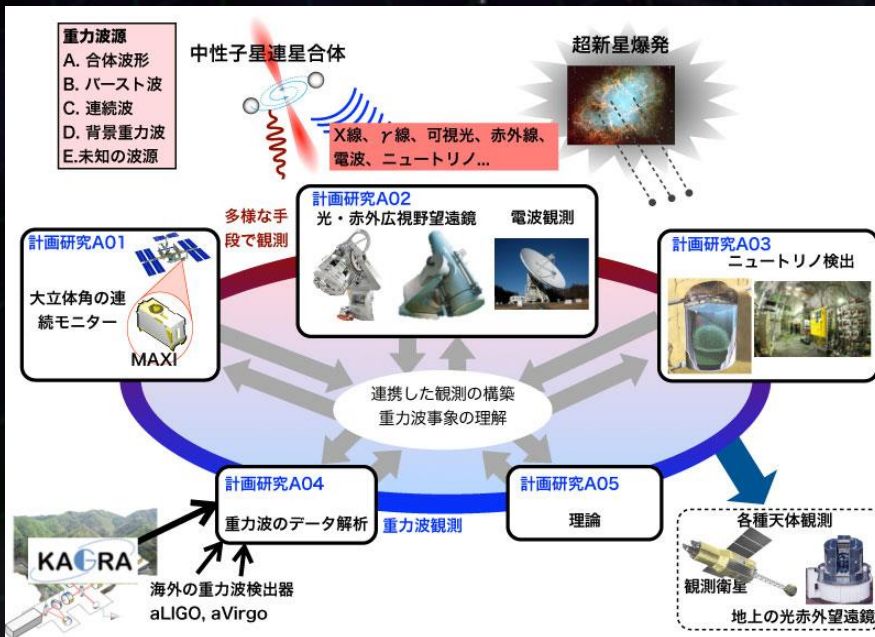
(1年間の観測での検出確率 99.9%以上)

・新学術領域研究

「重力波天体の多様な観測による宇宙物理学の新展開」

→ 重力波の理論・データ解析, X線・光赤外・電波,
ニュートリノによる突発天体観測.

・KAGRA, LIGO, VIRGO間のMoU → データの共有へ.



19-Sep-12

Memorandum of Understanding between

KAGRA, LIGO and Virgo Scientific Collaborations

A. Purpose of the agreement:

The purpose of this Memorandum of Understanding (MOU) is to establish a collaborative relationship between the signatories who are seeking to discover gravitational waves and pursue the new field of gravitational wave astronomy. The main scientific motivation is that the maximum return from gravitational wave observations is through simultaneous joint measurements by several instruments.

- Short GRB 130603B
Optical + NIR 対応天体の観測。
「キロノヴァ」の最初の観測。

→ 中性子連星合体に起因する
r-process 元素合成による残光
と考えられる。

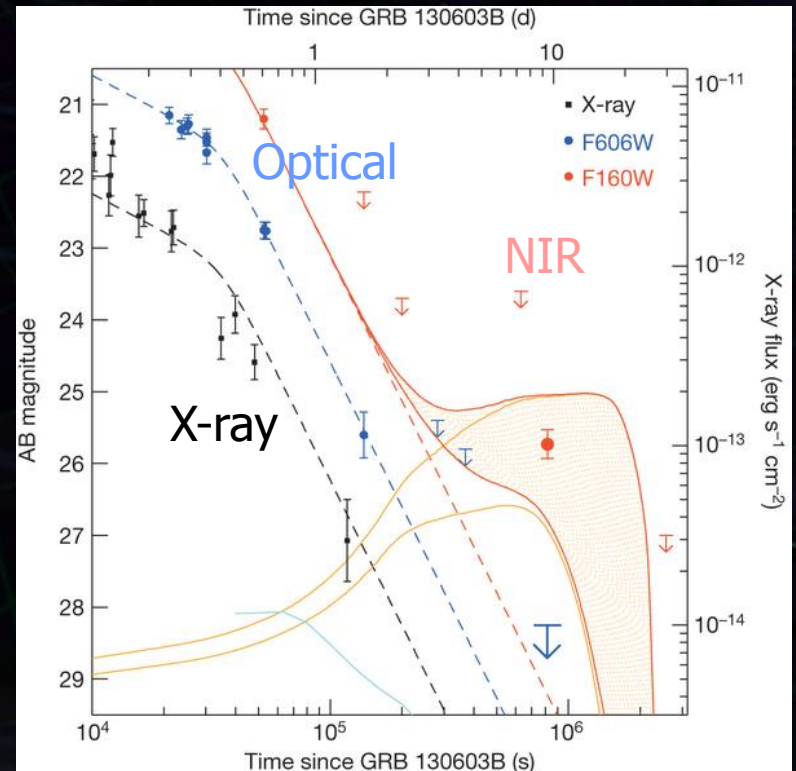
- ⇒
- SGRBが連星合体に起因する
という推測に対する強い証拠。
 - 重力波観測に対応する天体の
有力な探査対象。

LETTER

doi:10.1038/nature12505

A 'kilonova' associated with the short-duration γ -ray burst GRB 130603B

N. R. Tanvir¹, A. J. Levan², A. S. Fruchter³, J. Hjorth⁴, R. A. Hounsell⁵, K. Wiersema¹ & R. L. Tunnicliffe²



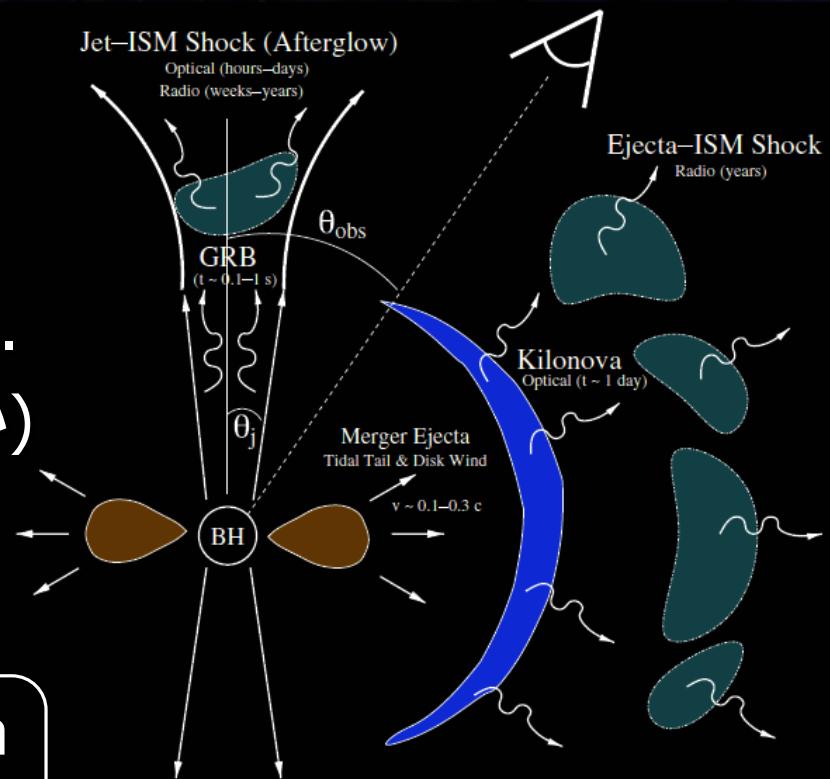
NR Tanvir *et al.* *Nature* **500**, 547-549 (2013)

- KAGRAなど, 次世代重力波望遠鏡の観測可能距離 ~数百Mpc ($z \sim 0.05-0.1$).
- 8.5年のSwift観測期間, $z < 0.12$ のSGRBは観測されていない.



- (A) 連星合体率が小さい or
 - (B) SGRBとしては観測されていない.
(SGRBのbeaming angleが狭い)
- Swift観測の2-3桁大きな合体レートであっても良い.

ほぼ等方的に観測されるkilonovaからの電磁波観測が重要



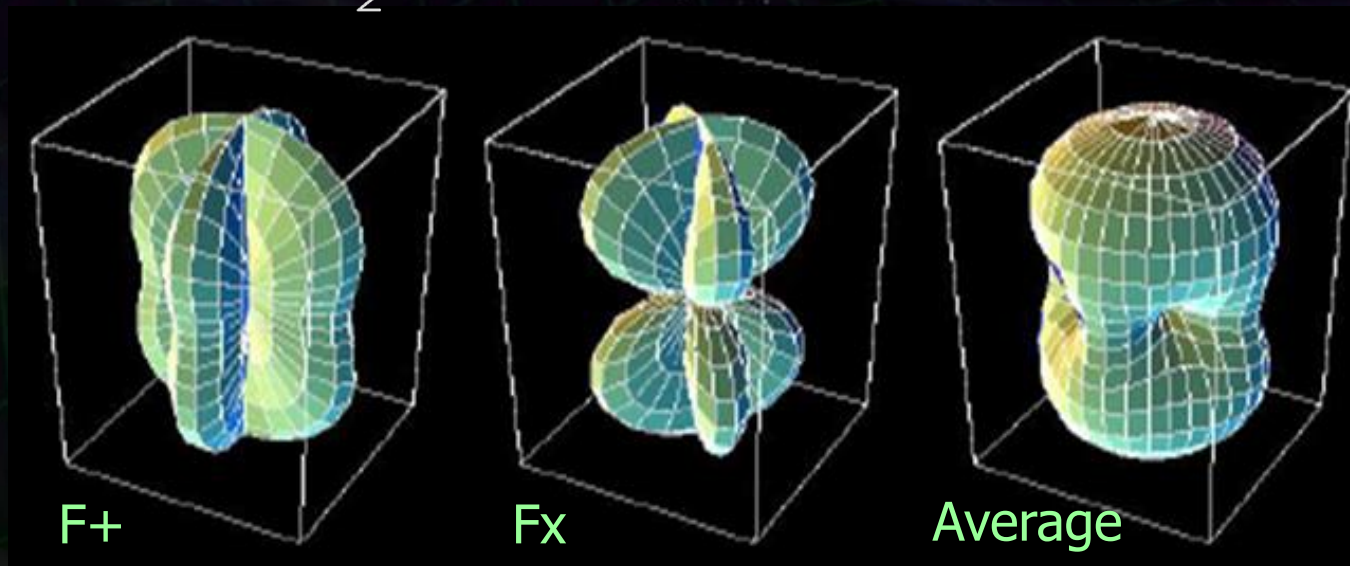
干渉計型重力波検出器：指向性・偏波依存性がある。

$$h_{\text{obs}}(t) = F_+ \cdot h_+(t) + F_x \cdot h_x(t)$$

干渉計のアンテナパターン

$$F_+ = -\frac{1 + \cos^2 \theta}{2} \cos 2\phi \cos 2\psi - \cos \theta \sin 2\phi \sin 2\psi$$

$$F_x = \frac{1 + \cos^2 \theta}{2} \cos 2\phi \sin 2\psi - \cos \theta \sin 2\phi \cos 2\psi$$



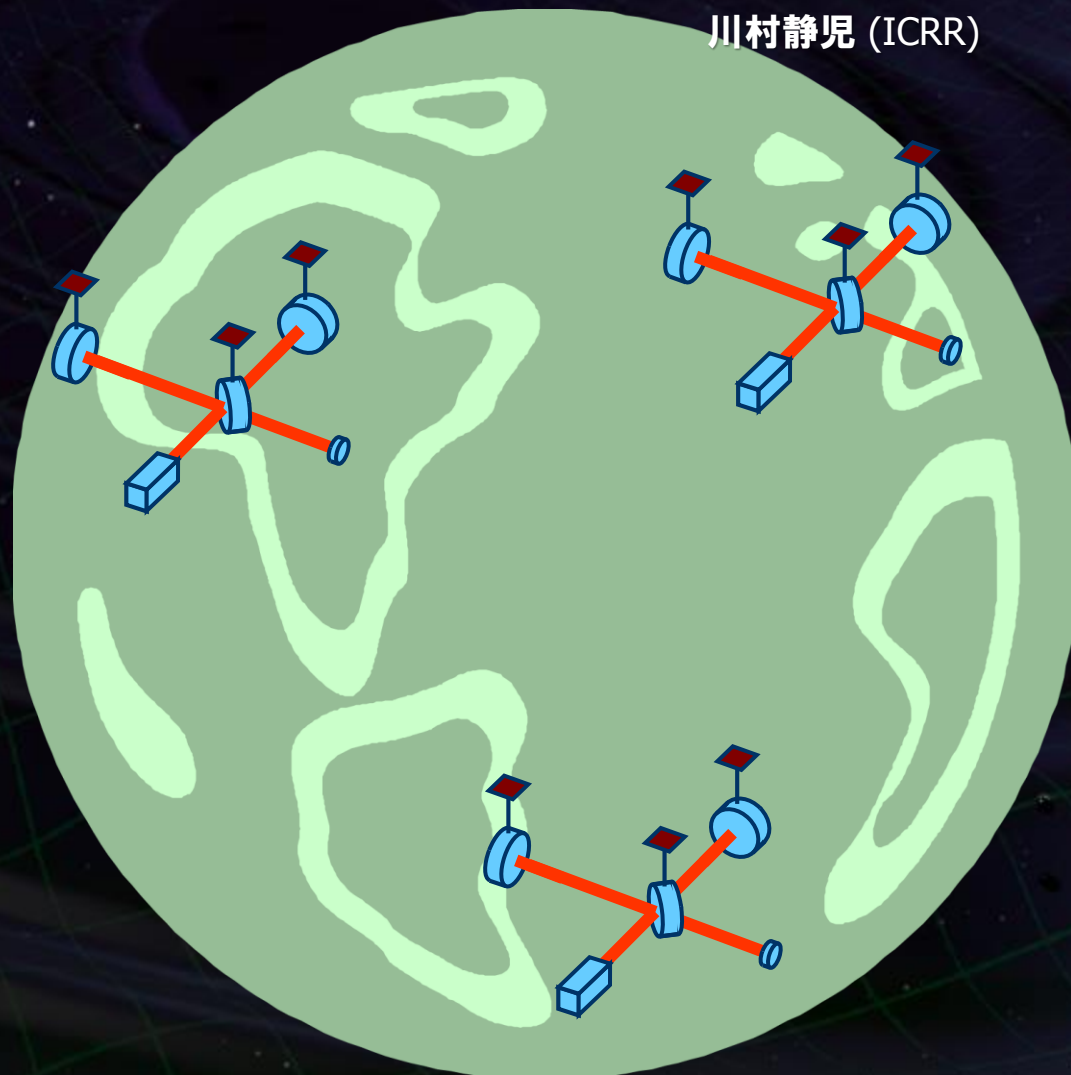
国際観測網での同時観測

アニメーション：
川村静児 (ICRR)

複数台で同時観測



到着時間の差から
波源の方向が分かる！

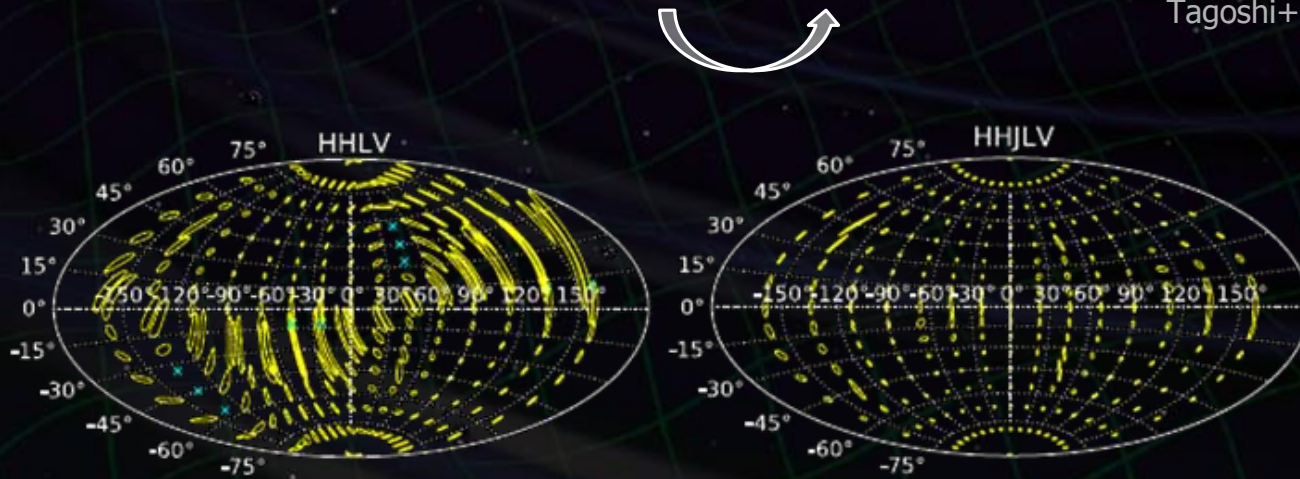


天球上の角度分解能

NS-NS coalescence @180Mpc (95%CI)		
(1.4,1.4)Msun	LHV	LHV K
median of $\delta\Omega$ [Deg ²]	30.25	9.5

H: LIGO--Hanford
 L: LIGO--Livingston
 V: Virgo,
 K: KAGRA
 I: LIGO-Indea

From presentation by H. Tagoshi
 J.Veitch+, PRD85, 104045 (2012)
 Tagoshi+ (2014)

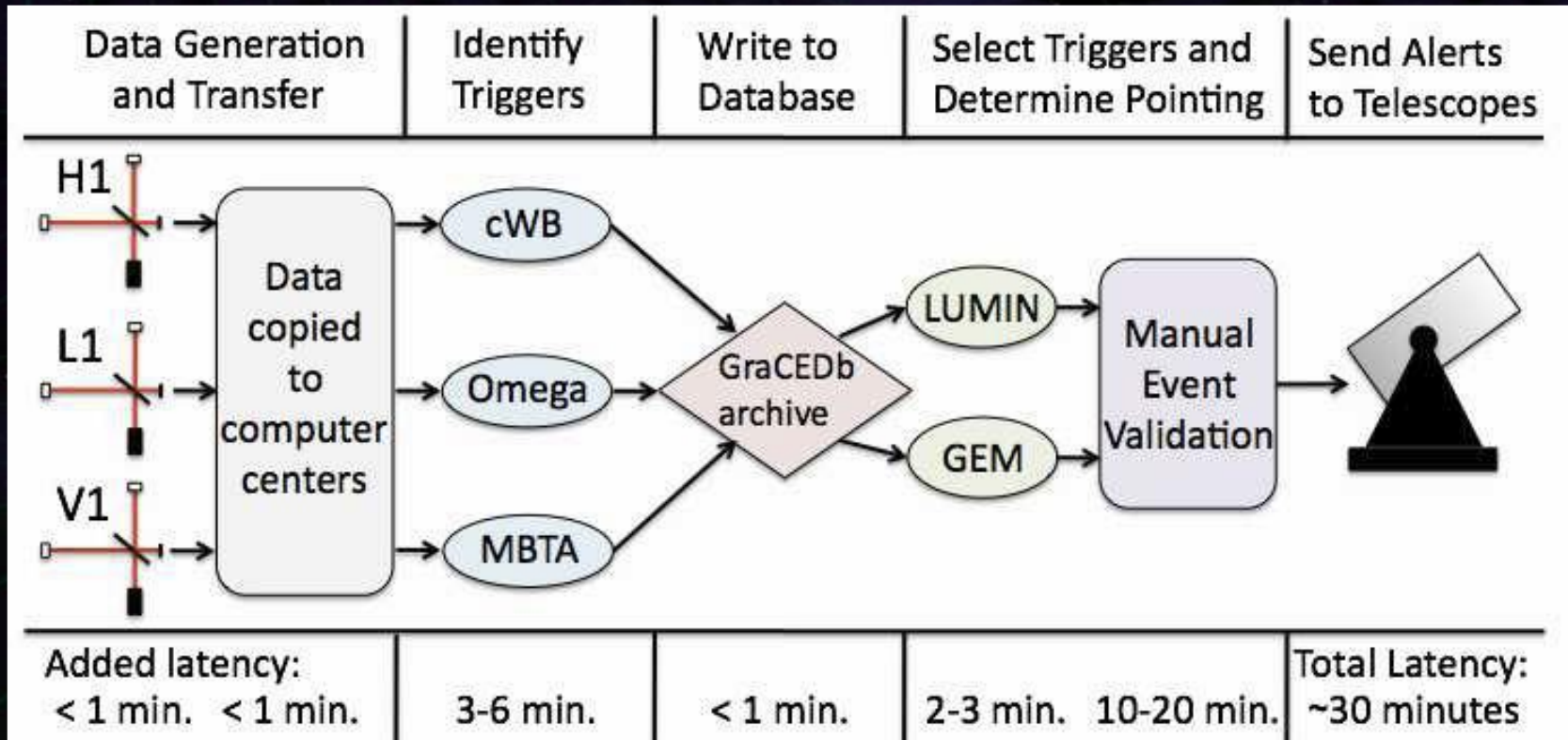


S.Fairhurst
 CQG 28(2011) 105021

Adding KAGRA to (aLIGO + adv. VIRGO) network
 → Factor ~3-4 improvement in sky area

重力波信号アラート

LIGO-VIRGOの例：自動解析部分 ~4minで完了.



望遠鏡建設中!!!

- KAGRAの現状 -



大型低温重力波望遠鏡 KAGRA



基線長3kmの大型干渉計

2017年頃本格的な観測開始 → 重力波天文学の創成.
低温技術・地下干渉計 → 次世代干渉計技術.



- ・ホスト機関：
東京大学 宇宙線研究所
- ・副ホスト機関：
国立天文台
高エネルギー加速器研究機構
- ・国内外の研究機関
東京大 理・工・地震研,
大阪市大, 東工大, 大阪大,
京都大, 産業技術総合研究所,
情報通信研究機構, 電気通信
大, 山梨英和大 など.

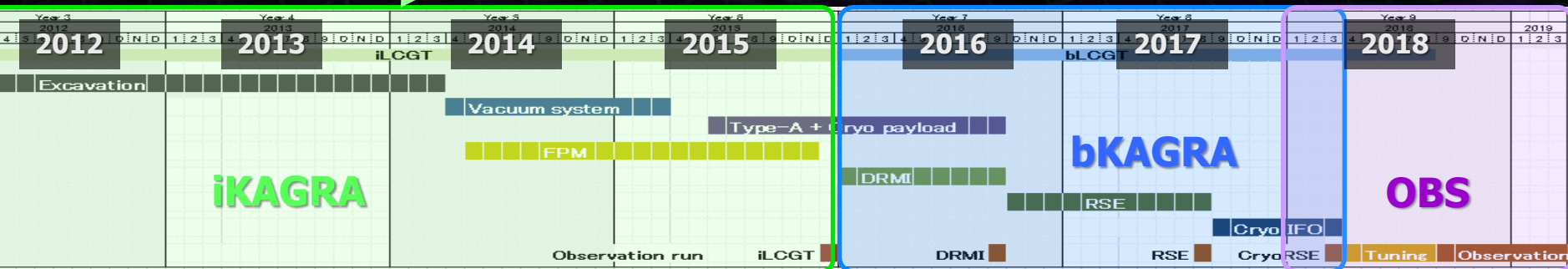
KAGRAスケジュール



• **iKAGRA** (2010.10 – 2015.12)

3-km FPM interferometer

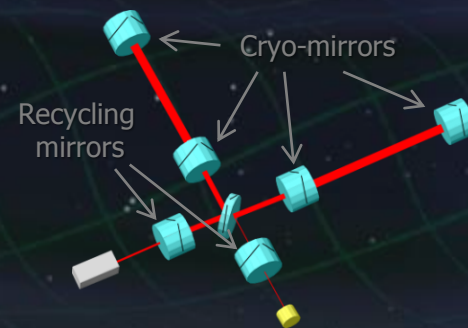
- Baseline 3km room temp.
- Operation of total system with simplified IFO and VIS.



• **bKAGRA** (2016.1 – 2018.3)

Operation with full config.

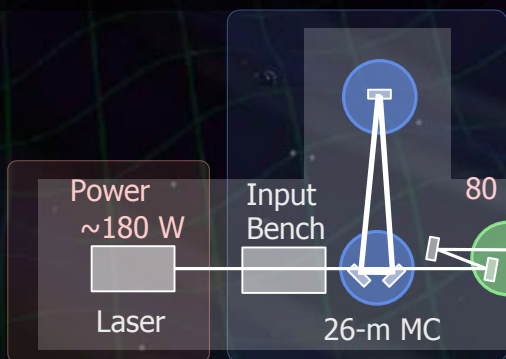
- Final IFO+VIS configuration
- Cryogenic operation.



KAGRA 干涉計構成

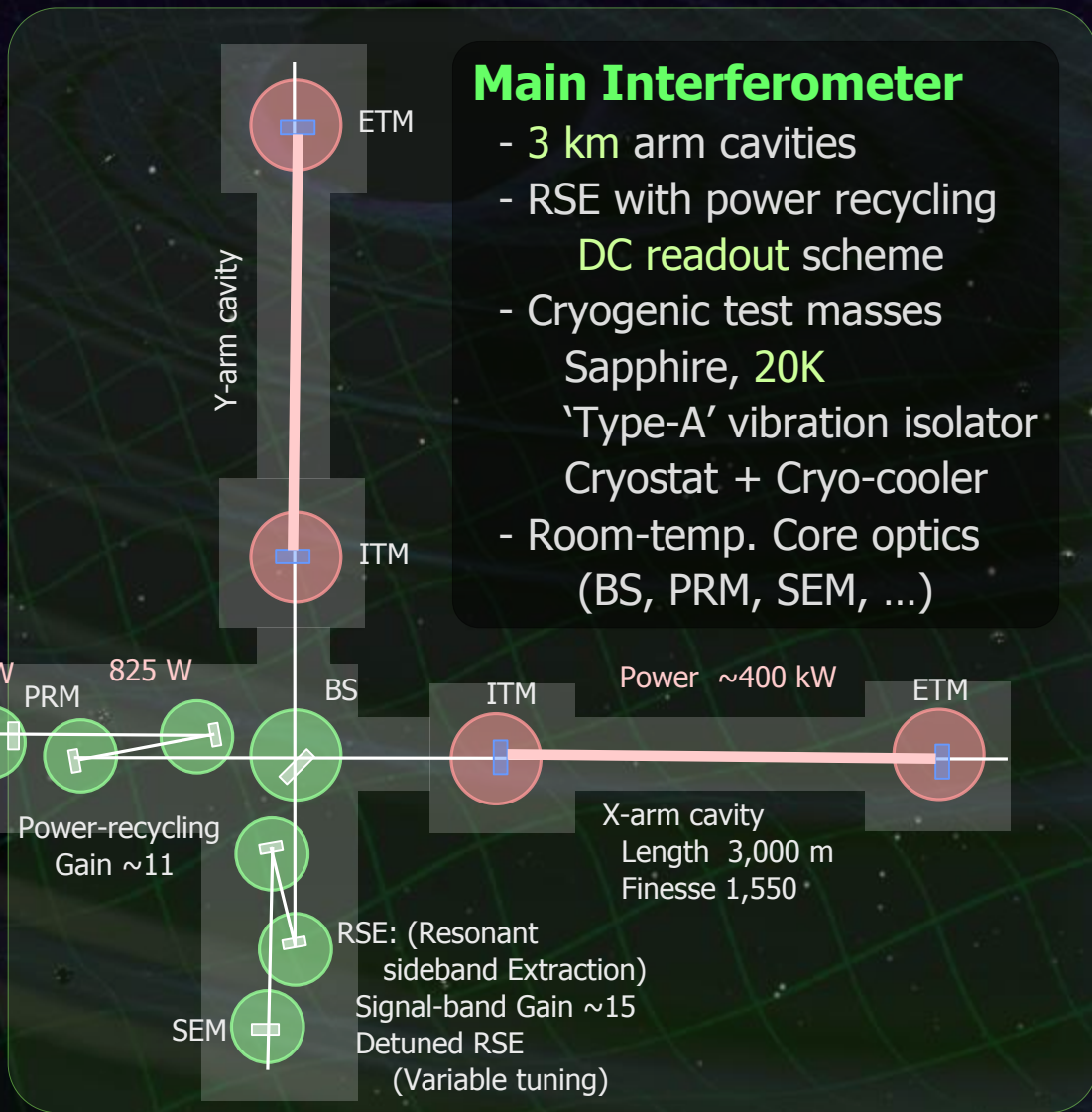
Input/Output Optics

- Beam Cleaning and stab.
- Modulator, Isolator
- Fixed pre-mode cleaner
- Suspended mode cleaner
Length 26 m, Finesse 500
- Output MC
- Photo detector



Laser Source

- Wavelength 1064 nm
- Output power 180 W
- High-power MOPA



Main Interferometer

- 3 km arm cavities
- RSE with power recycling
DC readout scheme
- Cryogenic test masses
Sapphire, 20K
- 'Type-A' vibration isolator
Cryostat + Cryo-cooler
- Room-temp. Core optics
(BS, PRM, SEM, ...)

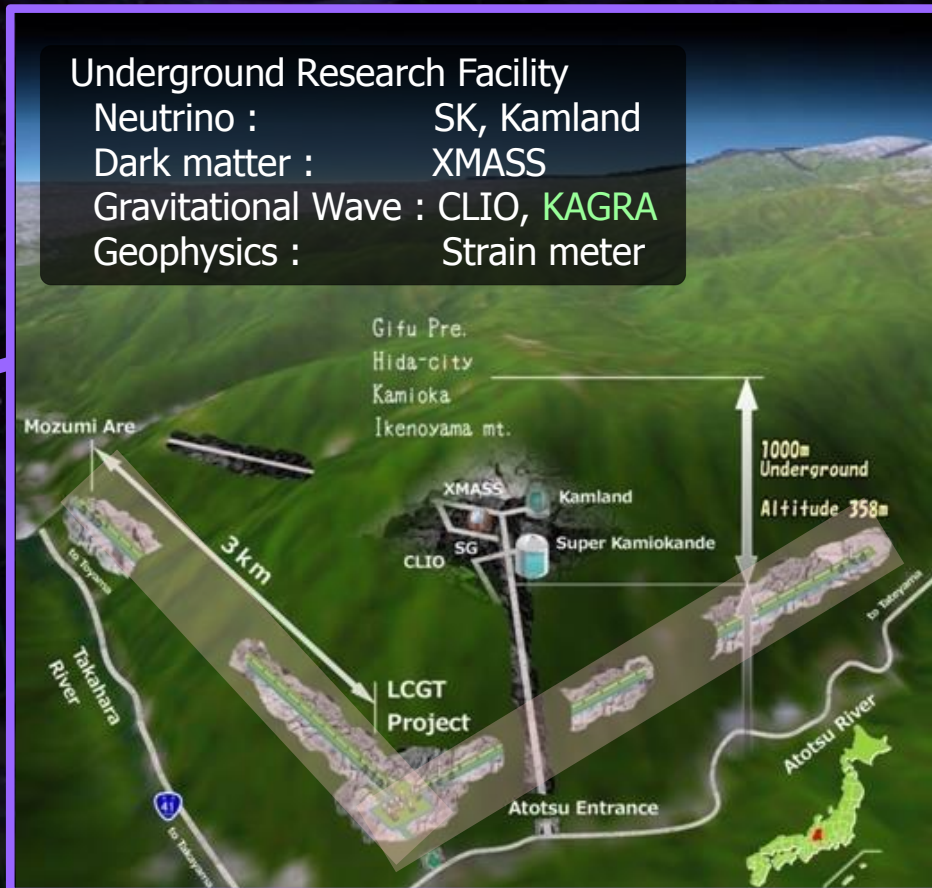
岐阜県・神岡町 の地下サイトに建設

Facility of the Institute of Cosmic-Ray Research (ICRR), Univ. of Tokyo.



富山大学から
車で約1時間

Map by Google



Underground Research Facility

Neutrino : SK, Kamland

Dark matter : XMASS

Gravitational Wave : CLIO, **KAGRA**

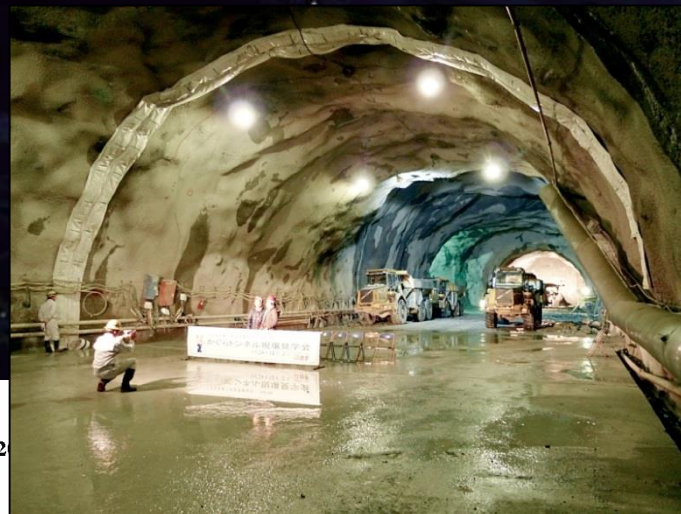
Geophysics : Strain meter

掘削工事の現状

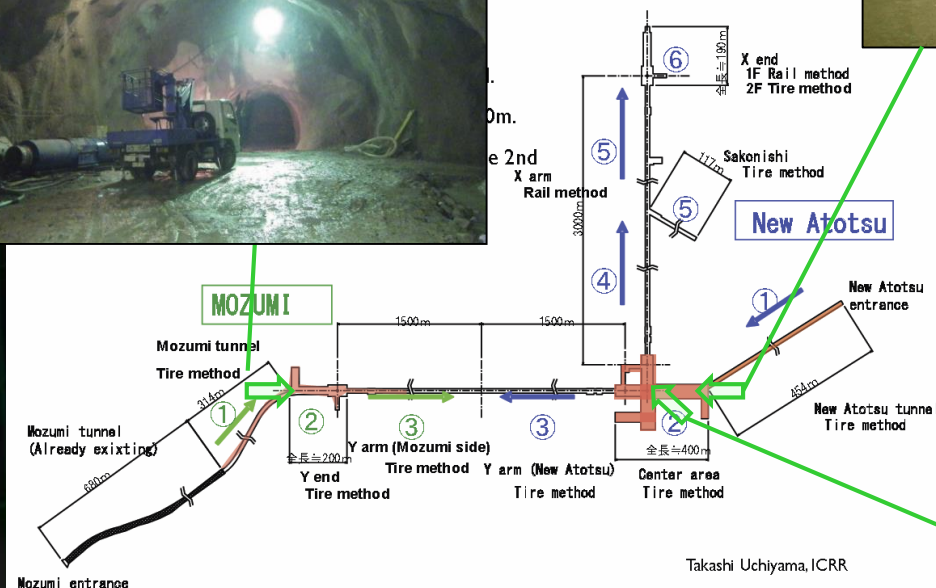
茂住口：
Y腕トンネル



新跡津口：センタールーム



Report for the KAGRA
2012/12/17. JGW-G12



神岡オフィス・実験室

- 現地でのオフィス・実験室.
- 坑内と専用回線で接続
→ データストレージ・解析用計算機を設置.



真空ダクト

3km x 2本の真空ダクト :

12m, $\Phi 800\text{mm}$ を478本接続. → 納品済.



Press to form a duct



Bellows for each duct



Baking at MIRAPRO Co.
Noda/MESCO, Kamioka



Test at MIRAPRO Co. Noda



Transportation to Kamioka

Presentation
By Y.Saito (KEK)

クライオスタットの製作

- ・クライオスタット用真空槽 (4台) 完成
→ 冷却試験 → 現地輸送完了.



Cryostat #1 in preparation for installation of radiation shield.

Toshiba Keihin Factory (Oct 31, 2012)

Cryostat #2 under leak test.

Inside the Rad. Shield



Cryo-cooler unit

まとめ

KAGRA : プロジェクト進行中

- 観測可能距離 $\sim 200\text{Mpc}$
 - 年間数回以上の重力波検出.
- 海外の望遠鏡とともに 第2世代の観測ネットワークを形成.
 - 位置決定精度 ~ 10 平方度, $< 4\text{min.}$ でのアラート.
 - 銀河カタログの利用, 解析手法の工夫など改善余地.
- 2017年頃 本格観測開始.

関連講演 : V2 地上観測機器 (3月22日 午前)
KAGRA関係の3講演.

終わり