

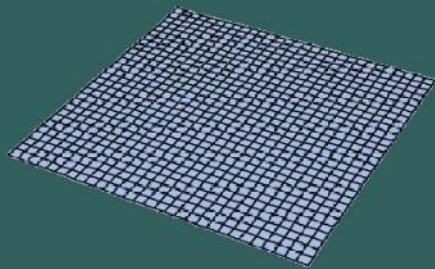
重力波電磁波対応天体の可視 赤外線フォローアップ

広島大学・宇宙科学センター
吉田道利

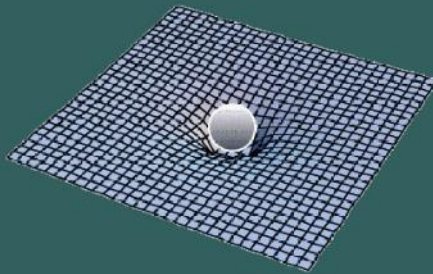
重力波とは何か？

- ◆ 質量を持つ物体は空間をゆがめる。その物体が運動をすると、周りのゆがんだ空間が波のように広がる ← 一般相対論

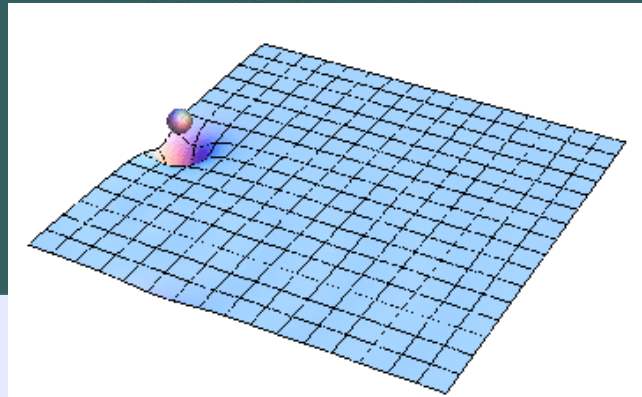
平坦な空間



星の重さで歪んだ空間



重い星が運動して重力波発生
(例：連星中性子星)



重力波のイメージ

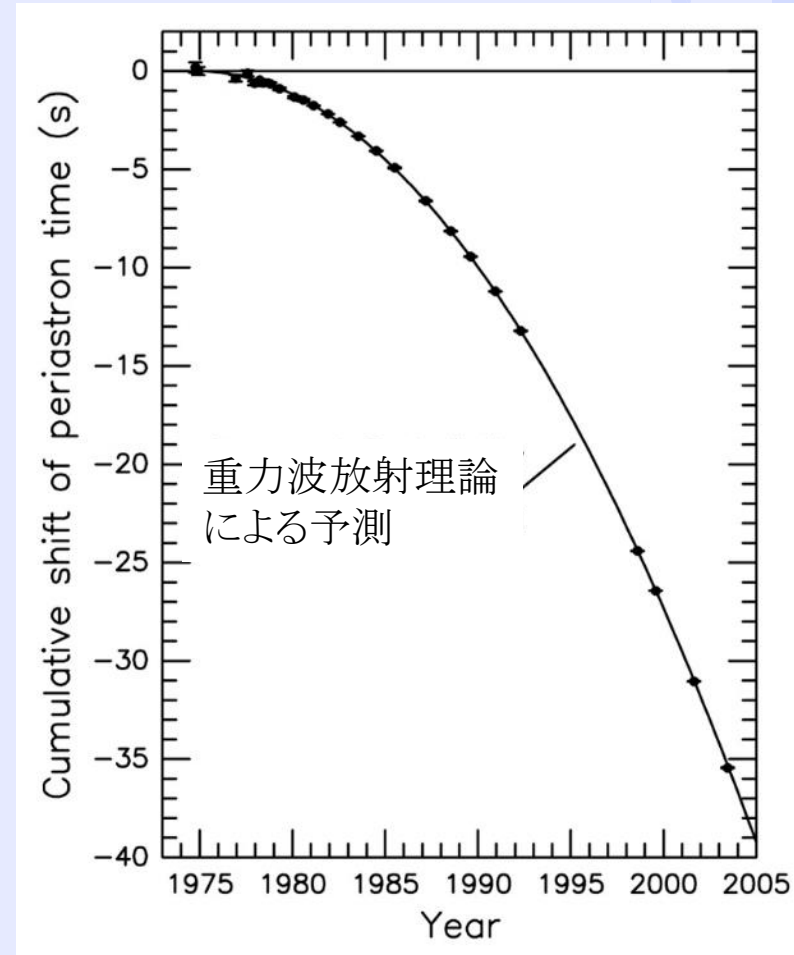
重力波の直接検出

- 一般相対論の検証
- 強い重力場での物理
- 重力波天文学の創生

重力波の間接的証拠

- ◆ 中性子連星PSR1913+16の発見(1974年)。
- ◆ その連星運動から強い重力波が発生していたら、連星の公転周期が短くなるはず。
- ◆ PSR1913+16の公転周期の変化を観測→公転周期の短縮が、重力波が原因であると仮定して得られる理論的な予想と一致(1979年)

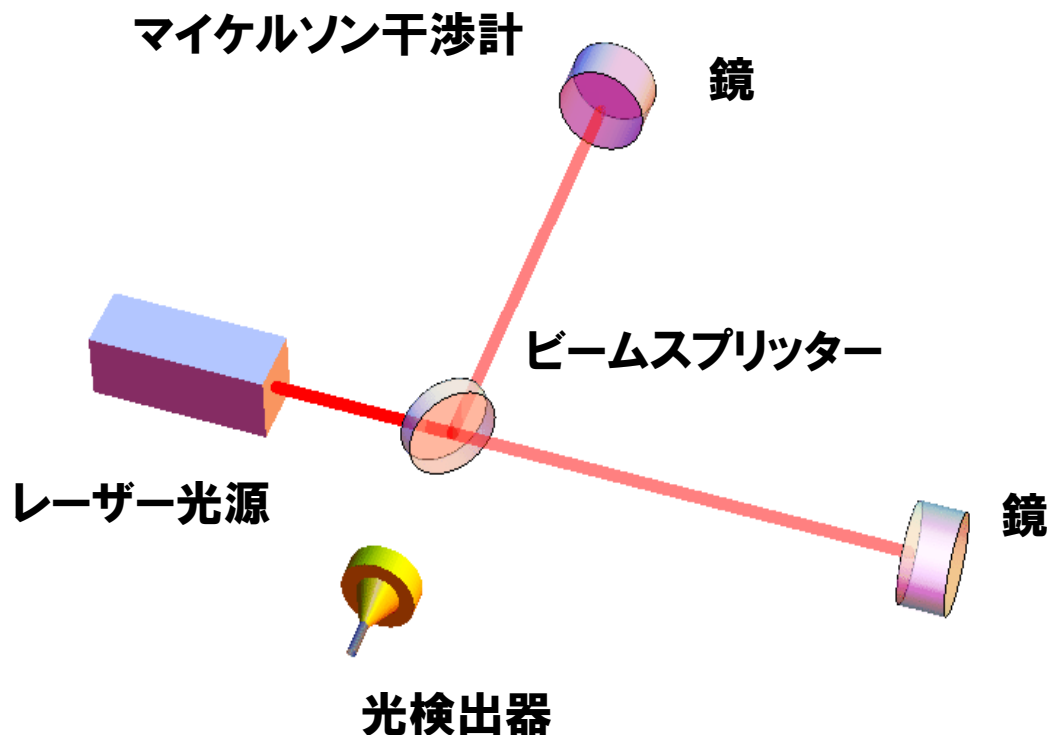
PSR1913+16の公転周期の変化



Hulse and Taylor (1979)

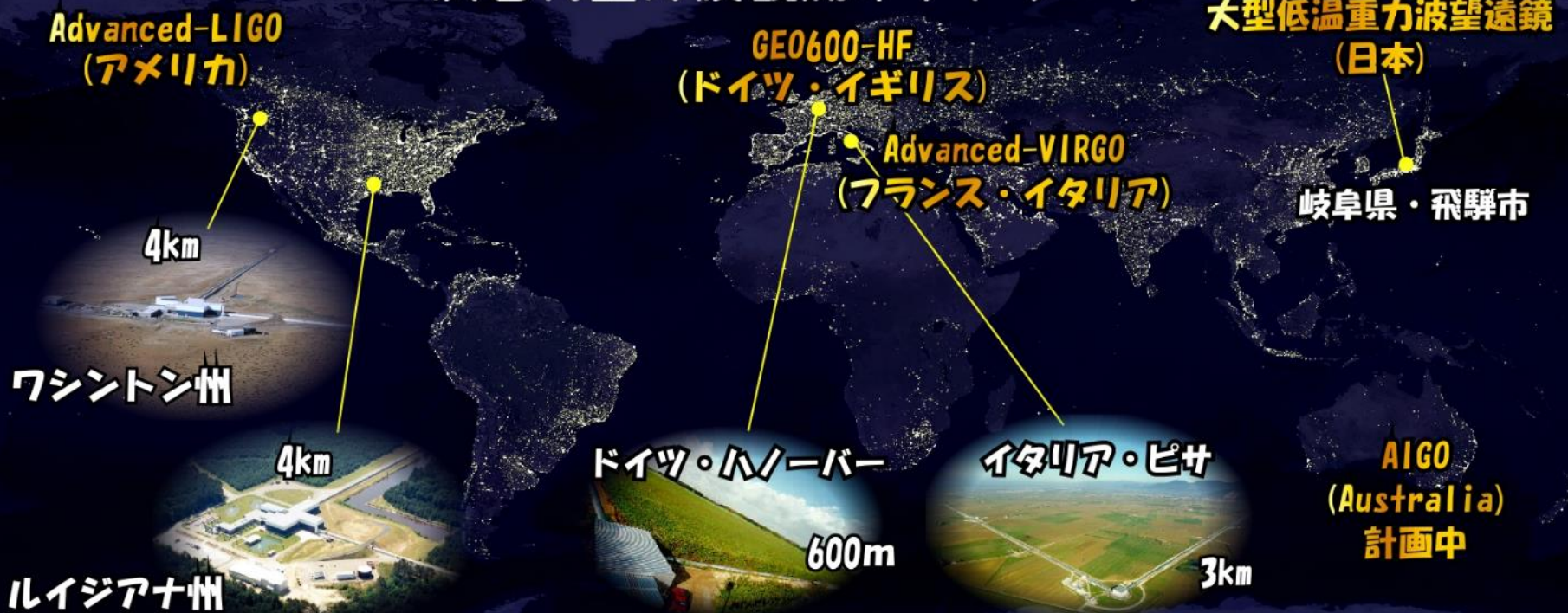
世界の重力波望遠鏡

- ◆ レーザー干渉計 (マイケルソン干渉計) タイプが主流



世界の最新鋭重力波望遠鏡

次世代重力波観測ネットワーク



LIGO アメリカ

4km × 4km 重力波望遠鏡 (2015年末から運用開始)



LIGO ハンフォード (ワシントン州)



LIGO リビングストン (ルイジアナ州)

Virgo ヨーロッパ

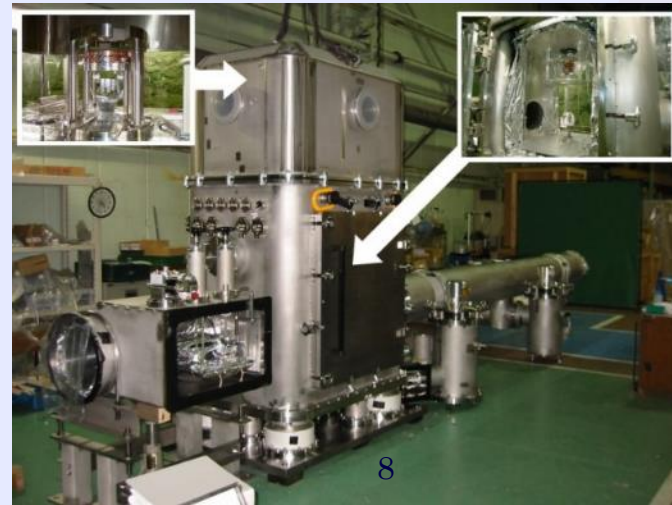
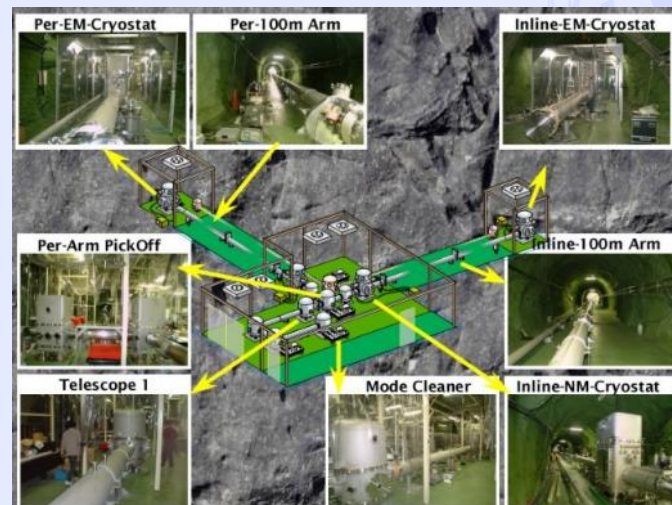
3km × 3km 重力波望遠鏡
イタリア・ピサ郊外 (2016年から運用)



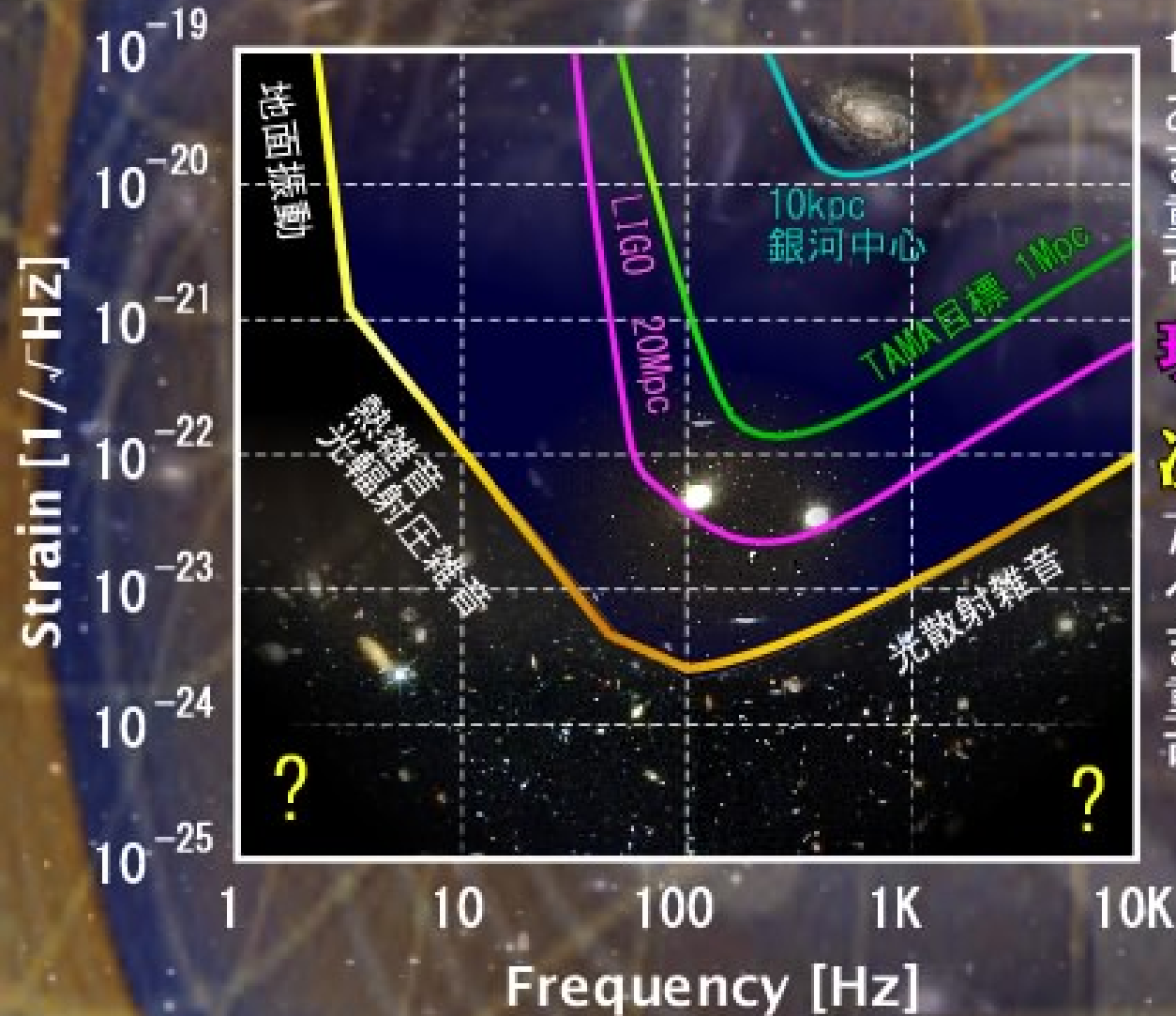
KAGRA 大型低温重力波望遠鏡

神岡鉱山(岐阜県) 3km×3km重力波望遠鏡 (2017年から運用)

大型低温重力波望遠鏡



最新鋭の重力波望遠鏡の性能



1000万光年離れた
おとめ座銀河団
まで見える
重力波を観測できる
可能性は1000年に1回程度

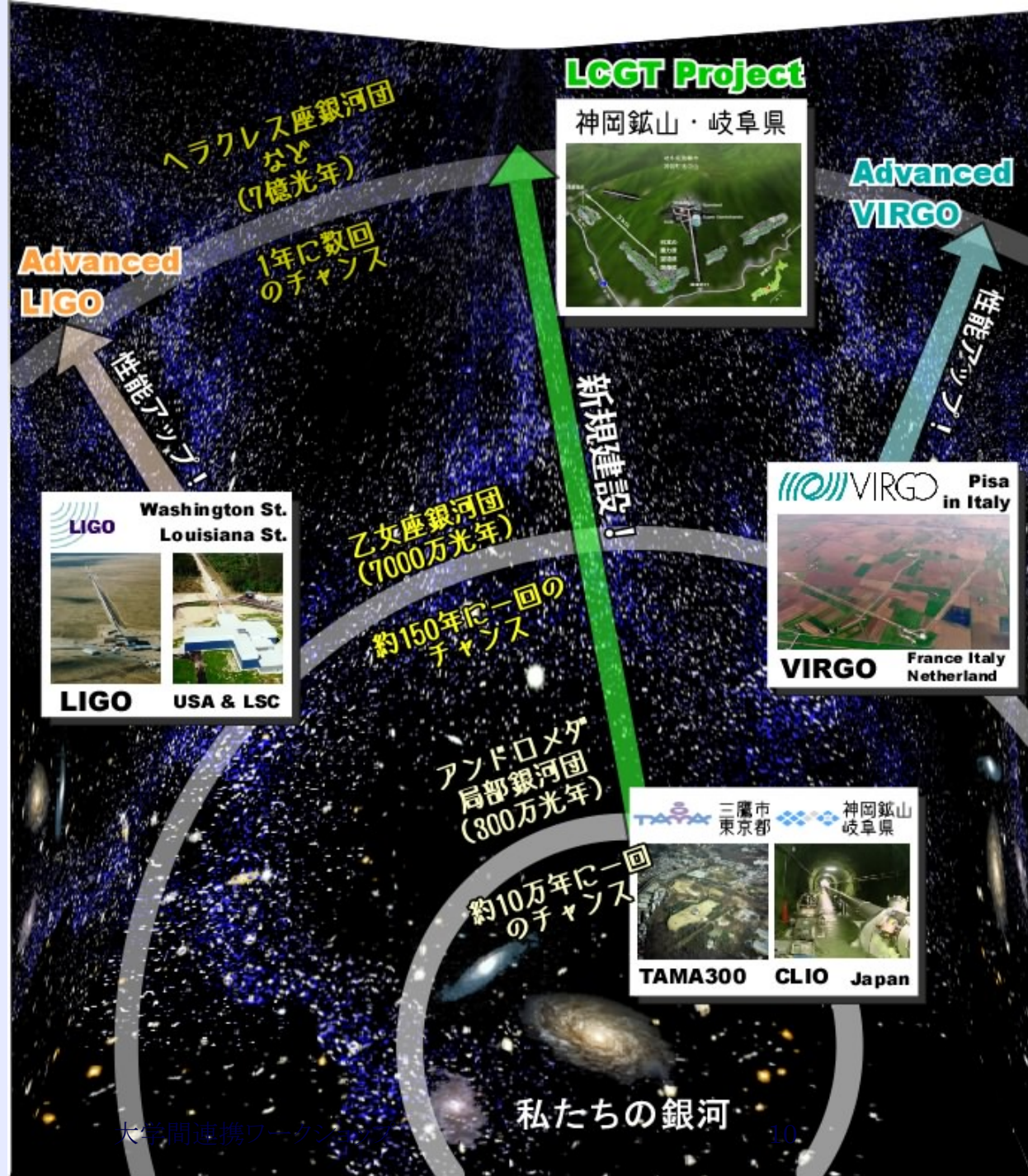
現世代重力波望遠鏡

次世代重力波望遠鏡

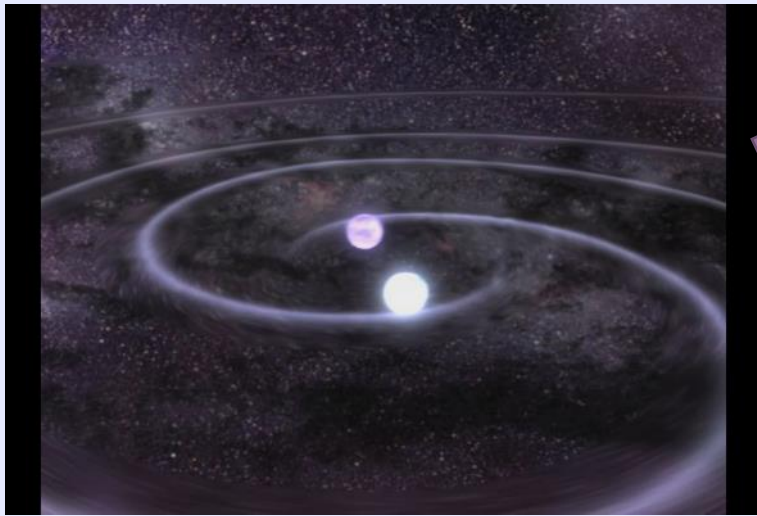
7億光年先の
へラクレス座銀河団
まで見える
重力波を観測できる
可能性は1年に数回程度

建設中のLIGO、
Virgo、KAGRA
なら中性子星合
体からの重力波
を200Mpcまで観
測することができる

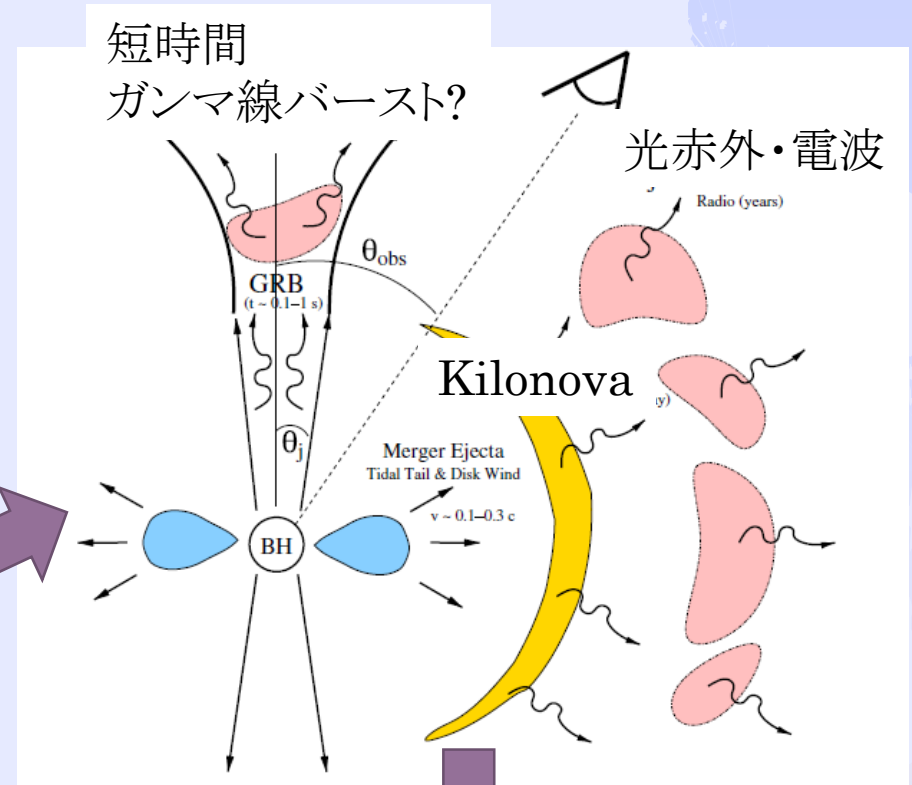
→1年に10回程
度重力波をとらえ
られるようになる！



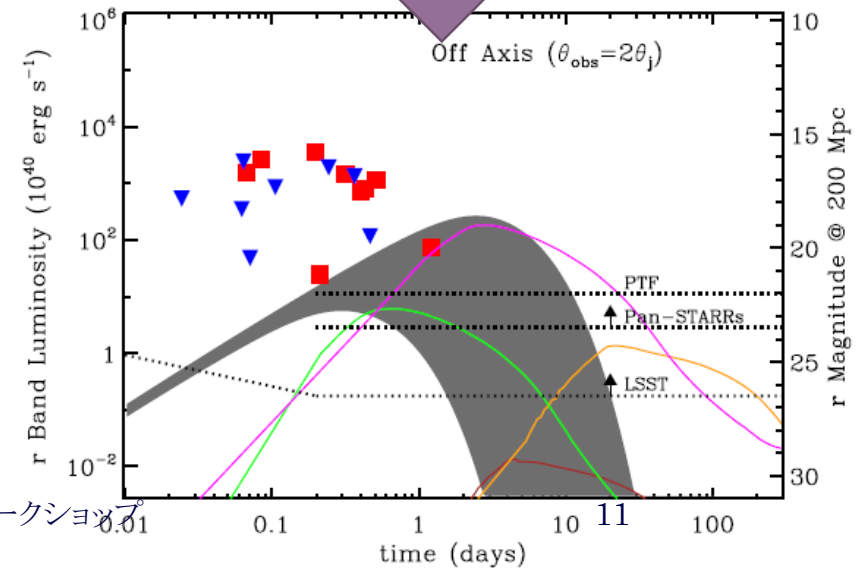
Searching for EM counter part is crucial for understanding the nature of GW sources



The most promising GW sources → NS-NS merger

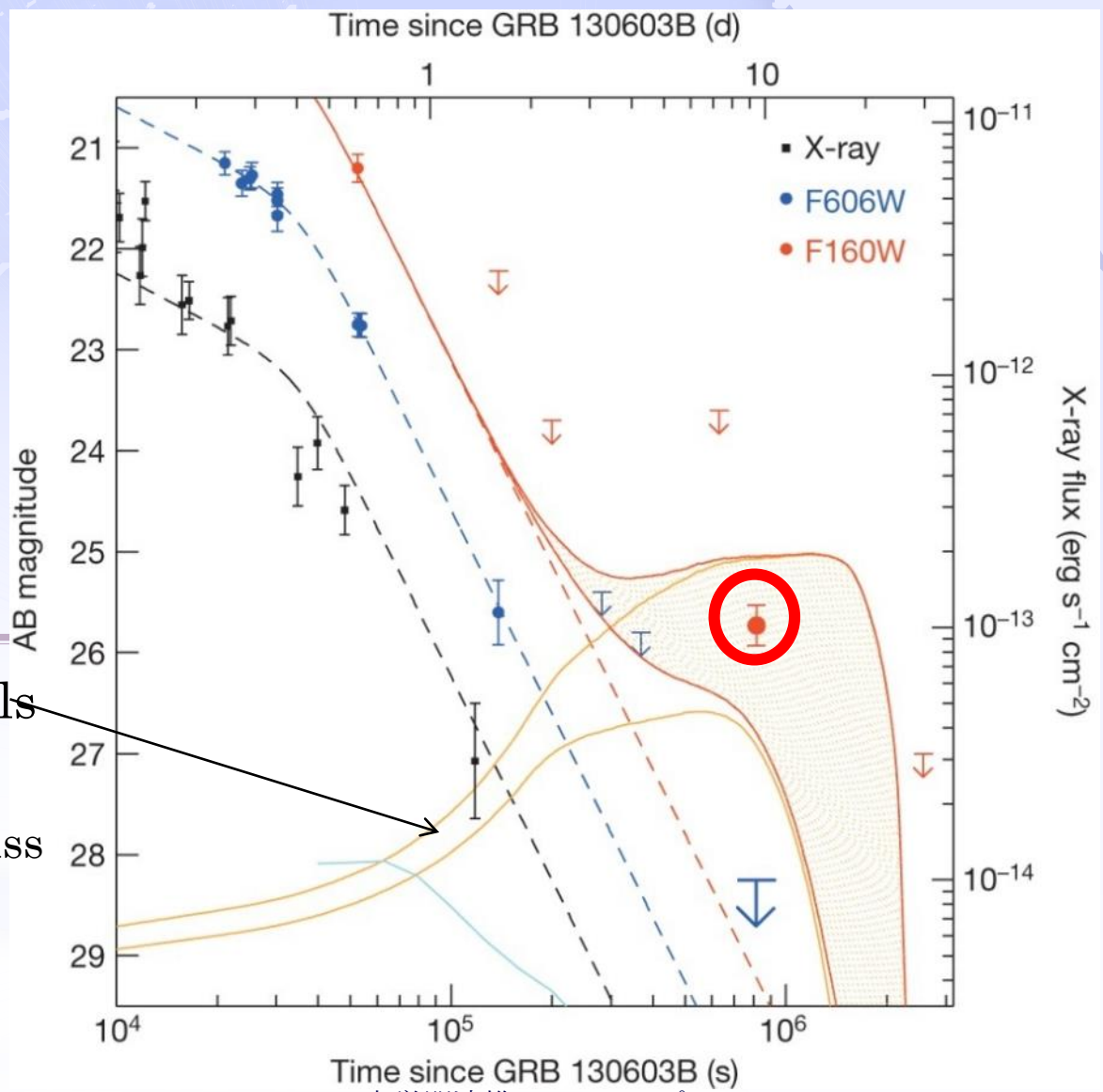


Metzger & Berger 2012

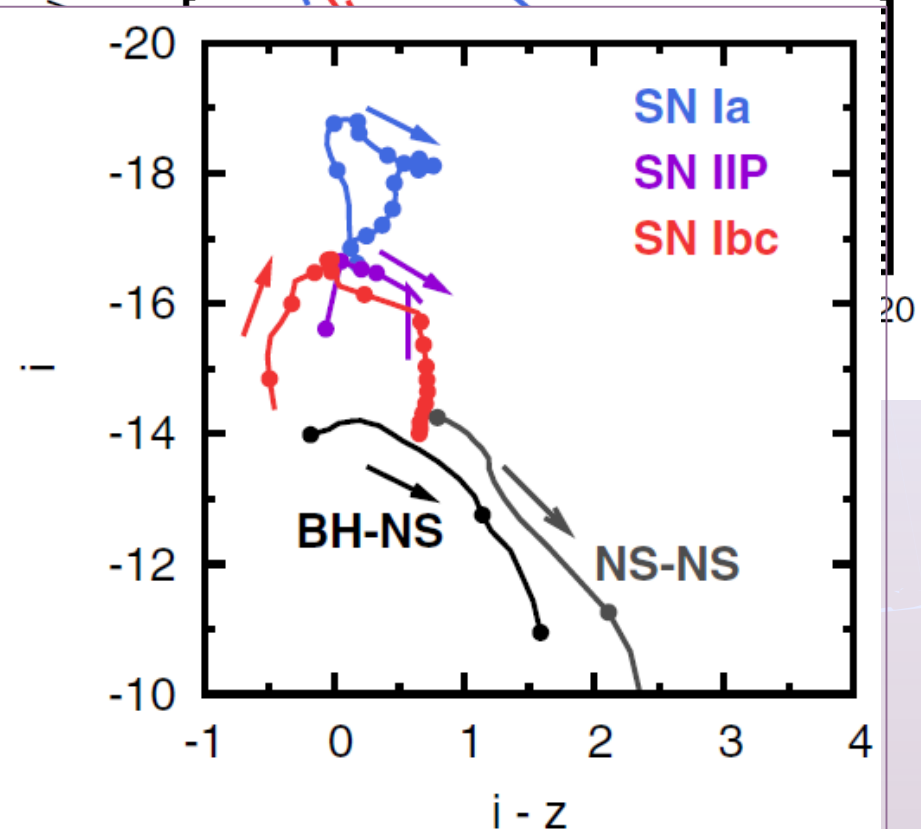
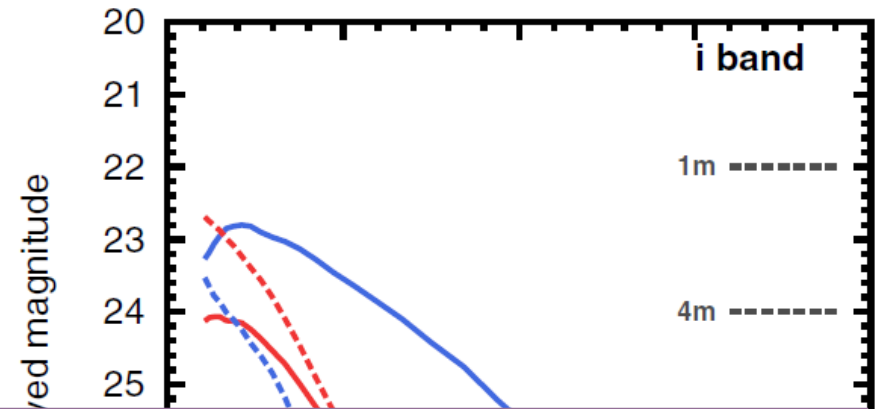
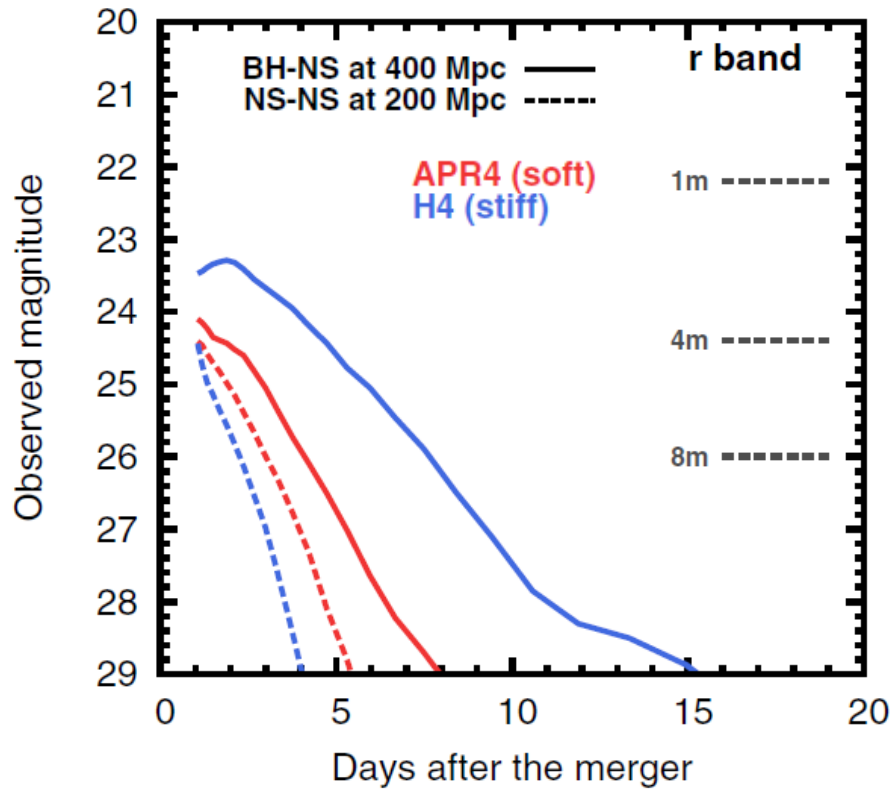


Optical, NIR and X-ray light curves of GRB130603B.

NR Tanvir *et al.* (2013)



Kilonova model (Tanaka+ 2014)



ブラックホール・中性子星合体 400Mpc
中性子星・中性子星合体 200Mpc

カラー進化でSNと弁別できる

重力波天体の多様な観測による宇宙物理学の新展開

New development in astrophysics through multimessenger observations of gravitational wave sources

文部科学省科学研究費補助金「新学術領域研究」
2012年度～2016年度

研究代表者：中村卓史（京都大学基礎物理学研究所教授）



KAGRAのデータ解析チーム(A04)を中心に

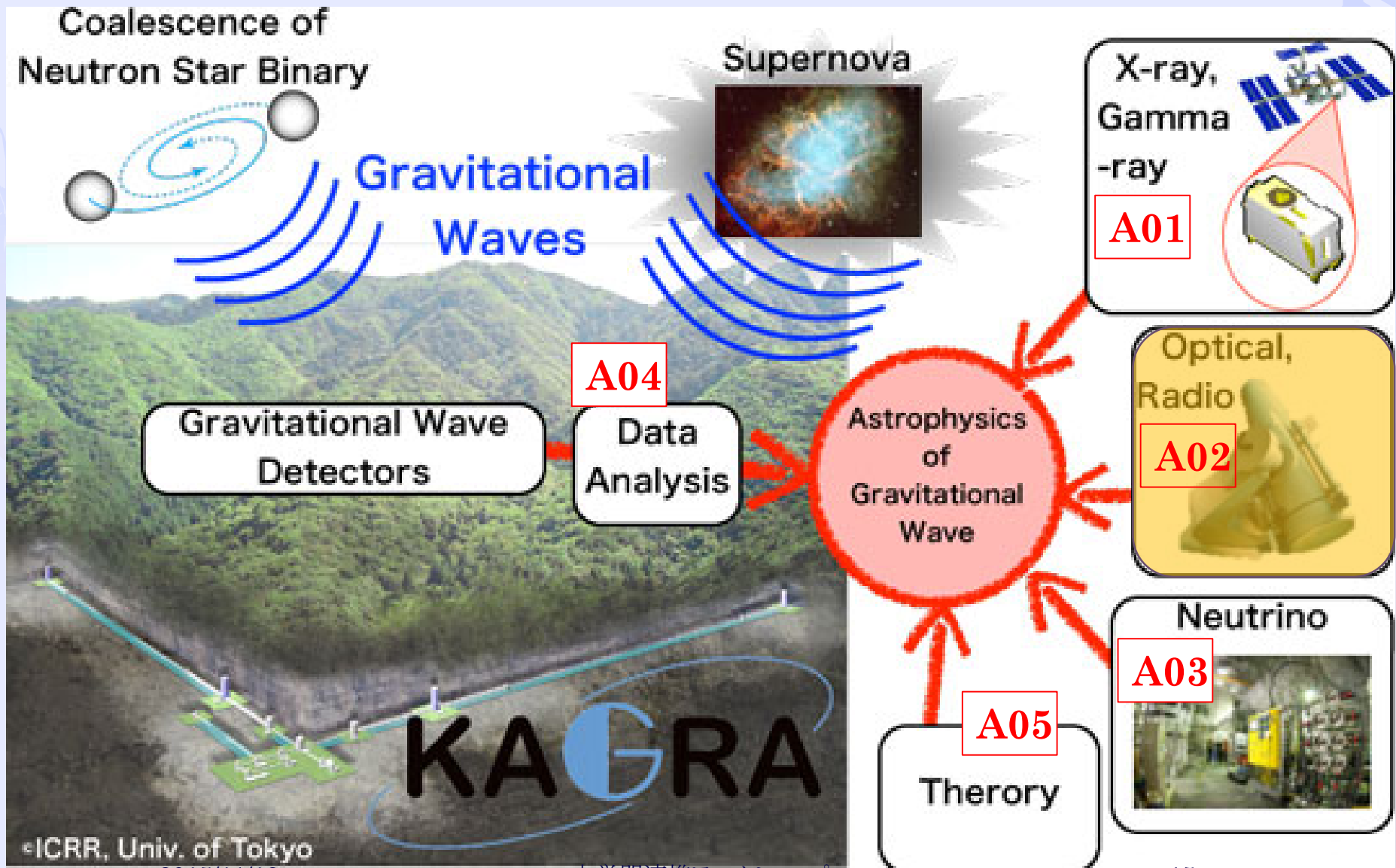


- X線ガンマ線追跡観測チーム(A01)
- 光赤外電波追跡観測チーム(A02)
- ニュートリノ追跡観測チーム(A03)
- 理論研究チーム(A05)



が協力して、重力波の追跡観測体制を構築

Overview of the project



重力波の光赤外対応現象の探索

重力波望遠鏡での重力波検出
→ 多数の望遠鏡を使って追跡観測

重力波発生源の正体をあきらかに



重力波追跡観測網J-GEM

- ◆ Japanese collaboration of Gravitational wave Electro-Magnetic follow-up observations
- ◆ 新学術領域A02の拡張
- ◆ 日本の光赤外電波望遠鏡を結集

J-GEM の概要

日本および世界に散らばる日本の望遠鏡群のネットワーク
重力波対応現象の探索

主な観測能力:

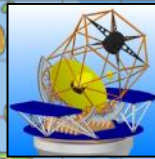
5 deg² opt. imaging w/ 1m
1 deg² NIR imaging w/ 1m
opt-NIR spectroscopy w/ 1–8m
opt-NIR polarimetry



- 1m 木曾シュミット望遠鏡 (東大)
TOMOEカメラ → 20平方度
- 1.5m かなた望遠鏡 (広大)
- 50cm MITSuME望遠鏡 (国立天文台)
- 91cm 広視野赤外線望遠鏡
(国立天文台)
- 2m なゆた望遠鏡 (西はりま)
- 32m 電波望遠鏡 (山口大)



50cm 望遠鏡
(広島大学 2016)



3.8m 望遠鏡
(京都大学 2018)

すばる望遠鏡



TAO
(東京大学 2018)

miniTAO (東京大学)
@ チリ



IRSF (名古屋大学)
@ 南アフリカ

2015/11/12



MOA-II (名古屋大学)
@ 大学間連携ユニオン

LIGO / Virgoの運用計画

Epoch	Estimated Run Duration	$E_{\text{GW}} = 10^{-2} M_{\odot} c^2$ Burst Range (Mpc)		BNS Range (Mpc)		Number of BNS Detections	% BNS Localized within	
		LIGO	Virgo	LIGO	Virgo		5 deg ²	20 deg ²
2015	3 months	40 – 60	–	40 – 80	–	0.0004 – 3	–	–
2016–17	6 months	60 – 75	20 – 40	80 – 120	20 – 60	0.006 – 20	2	5 – 12
2017–18	9 months	75 – 90	40 – 50	120 – 170	60 – 85	0.04 – 100	1 – 2	10 – 12
2019+	(per year)	105	40 – 80	200	65 – 130	0.2 – 200	3 – 8	8 – 28
2022+ (India)	(per year)	105	80	200	130	0.4 – 400	17	48

Table 1: Summary of a plausible observing schedule, expected sensitivities, and source localization with the advanced LIGO and Virgo detectors, which will be strongly dependent on the detectors' commissioning progress. The burst ranges assume standard-candle emission of $10^{-2} M_{\odot} c^2$ in GWs at 150 Hz and scale as $E_{\text{GW}}^{1/2}$. The burst and binary neutron star (BNS) ranges and the BNS localizations reflect the uncertainty in the detector noise spectra shown in Fig. 1. The BNS detection numbers also account for the uncertainty in the BNS source rate density [28], and are computed assuming a false alarm rate of 10^{-2} yr^{-1} . Burst localizations are expected to be broadly similar to those for BNS systems, but will vary depending on the signal bandwidth. Localization and detection numbers assume an 80% duty cycle for each instrument.

LIGO first run (O1) : 2015年9月18日スタート 4ヶ月間

MoU with LIGO/Virgo collaboration

LIGO-M1400069, VIR-0127-14

1

Memorandum of Understanding between J-GEM and LIGO and VIRGO regarding follow-up observations of gravitational wave event candidates

April 5, 2014

This Memorandum of Understanding (MOU) establishes a collaborative effort among the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO) and LIGO Scientific Collaboration (LSC), the European Gravitational Observatory and Virgo Collaboration (EGO/Virgo), and Japanese Collaboration for Gravitational-Wave Electro-Magnetic Follow-up (J-GEM) in order to participate in a program to perform follow-up observations of gravitational wave (GW) candidate events with the sharing of proprietary information (see LIGO-M1300550 and VIR-0494#-13 for an overview).

The purpose of this MOU is to reference the parties involved and their relevant policies; define the appropriate data and information that is to be shared under this arrangement, and its permitted use; and establish how any publications and presentations coming out of this work will be handled. By signing this MOU, the parties agree that they understand the nature of the collaborative work, consider it to be scientifically worthwhile, and will do their best to bring it to successful completion.

1. LIGO/Virgo schedule

year	duration	telescope	burst	BNS	localization
2015	3 months	LIGO	40-60 Mpc	40-80 Mpc	100-500 deg ²
2016-17	6 months	LIGO	60-75 Mpc	80-120 Mpc	50-100 deg ²
		Virgo	20-40 Mpc	20-60 Mpc	50-100 deg ²
2017-18	9 months	LIGO	75-90 Mpc	120-170 Mpc	20-50 deg ²
		Virgo	40-50 Mpc	60-85 Mpc	20-50 deg ²

2. Timeline of LIGO First Observing Run (O1):

Sep.14 – Dec.13 (tentative) + Virgo short run (Oct.12)

LIGO duty cycle: < 80 %

3. GW alert will be issued as VOEvent through GCN/TAN

Expected brightness of “kilonova”

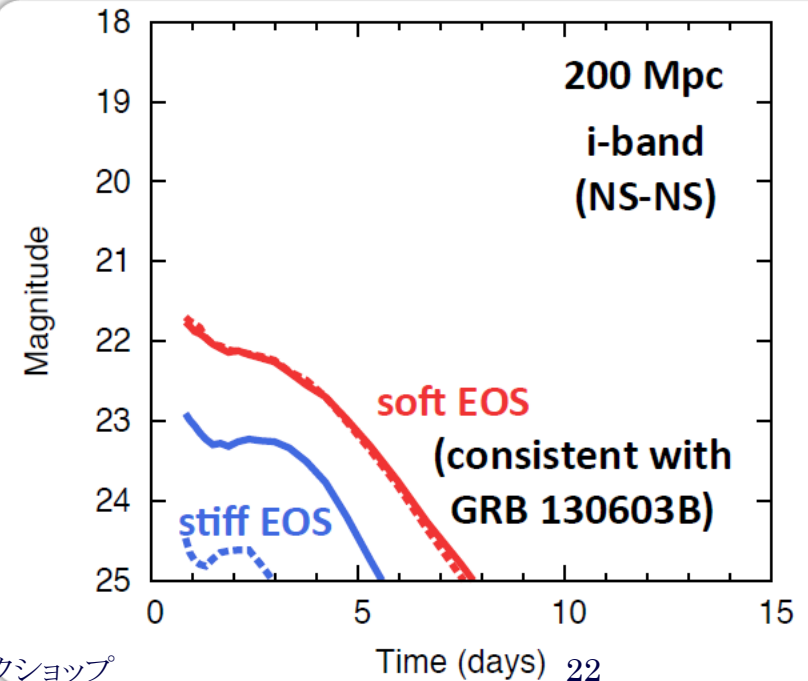
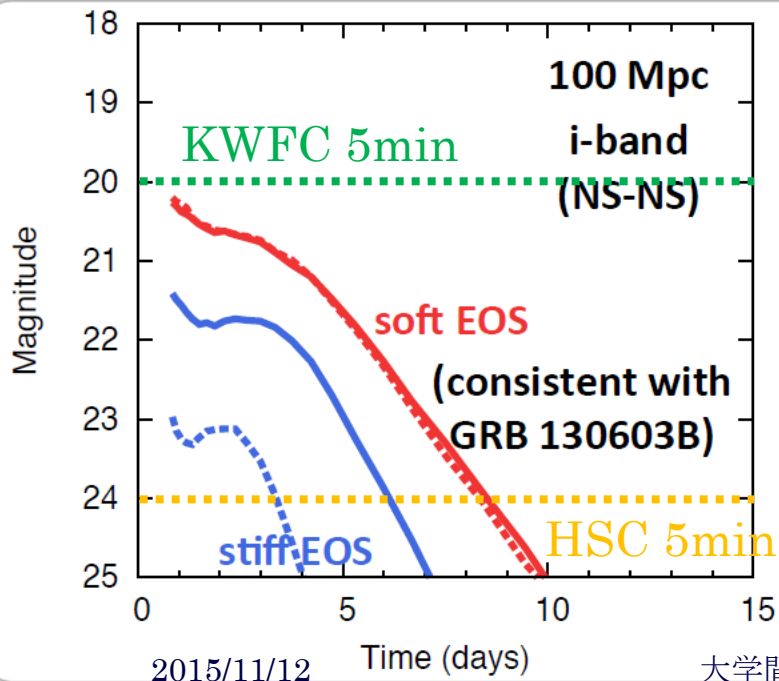
Mi \sim -14 mag@ peak, 1d

Barnes & Kasen 2013, ApJ, 775, 18

Tanaka & Hotokezaka, 2013, ApJ, 775, 113

Tanaka et al. 2014, ApJ, 780, 31

distance	80 Mpc ($\mu = 34.5\text{mag}$)	180 Mpc ($\mu = 36.3\text{mag}$)
i-band mag@1d	~ 20 mag	~ 22 mag
i-band mag@1week	~ 22 mag	~ 24 mag



Follow-up observation strategy

(とりあえずLIGO O1対応)

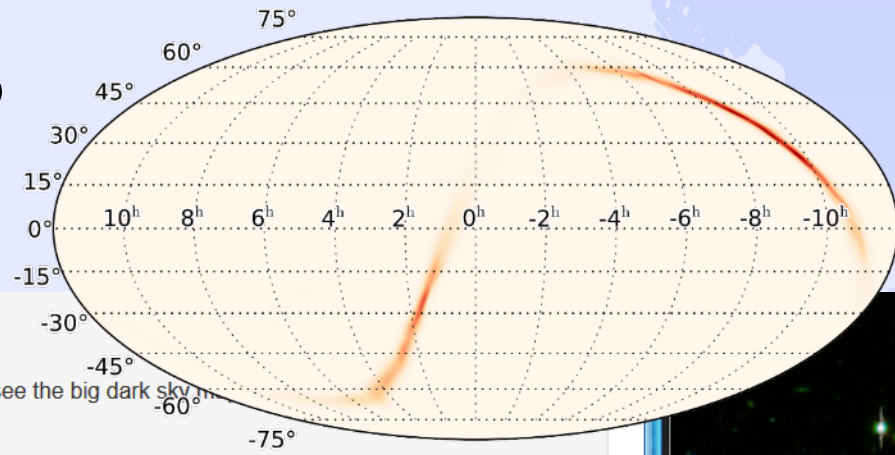
◆ Blind survey

- ◆ 10 deg² – 100 deg² blind survey within GW error area
- ◆ Wide field facility: KWFC, OAO-WFC, **HSC**
- ◆ 1-2 colors with short exp-time (< 5 min) survey → at least 2 times visit with an interval of a few days

◆ Targeted observation

- ◆ Select target galaxies using nearby galaxy catalogs
- ◆ Kyoto IFU-KOOLS, Kanata, Nayuta, MOA and IRSF, and Subaru S-Cam, FOCAS, and MOIRCS
- ◆ 2 colors with short exp-time (~5 min) per one galaxy

LIGO/Virgoから提供されるskymap

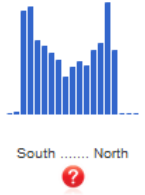


Skymap Viewer

A sky atlas for understanding LIGO-Virgo skymaps. Help [here](#), and skymaps [here](#). If you do not see the big dark sky map, look below and widen your browser. Zoom with the + and - at the right of the sky.

LIGO-Virgo Skymaps

This skymap is from GraceDB candidate **T153811**.
 50% area = 529.7 sq deg
 90% area = 2066. sq deg



Show Weighted Galaxies (or table).

Time and Place

Universal time
 2014-07-13T03:18:36 Now

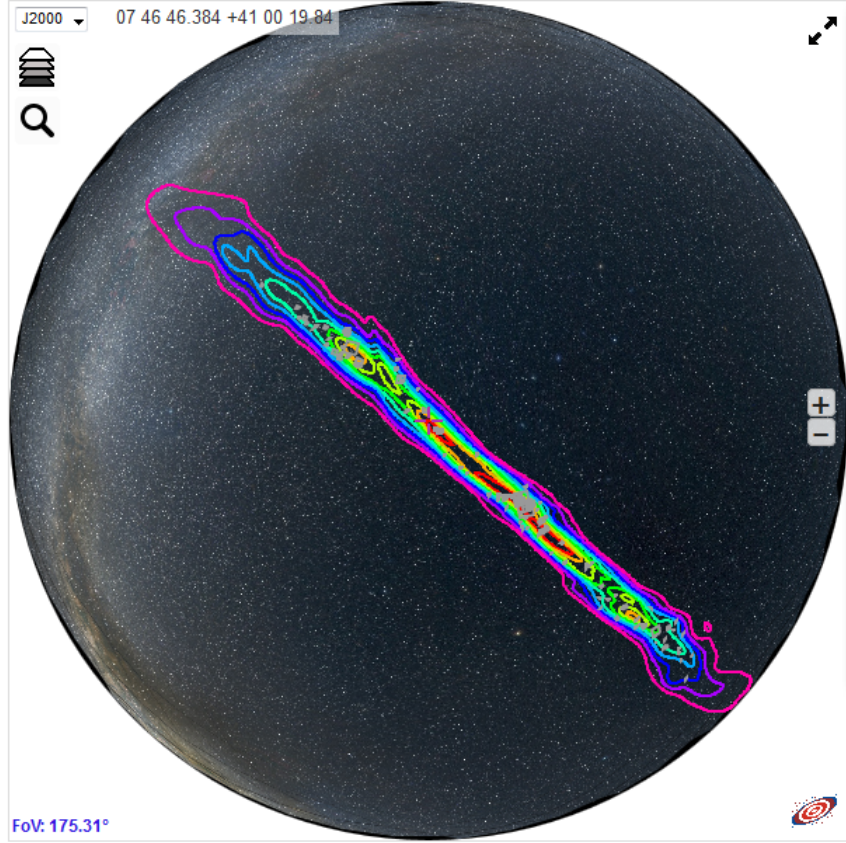
E Longitude east lon Latitude latitude

Show Sky

Sun = and = Moon

Catalog Sources

Click the Layers icon to switch on catalogs. If



Mozilla Firefox

<https://embb-dev.ligo.caltech.edu/sk>

Name	RA	Dec	Prior
NGC5395	209.66	37.42	1
NGC5406	210.08	38.92	0.91
NGC6189	247.92	59.63	0.83
NGC0613	23.58	-29.42	0.63
NGC4746	192.98	12.08	0.6
ESO297-037	29.55	-39.54	0.5
UGC08960	210.68	39.17	0.49
NGC6127	244.8	57.98	0.49
UGC08975	210.82	38.53	0.46
NGC5965	233.51	56.69	0.46
NGC0642	24.78	-29.91	0.43
ESO475-016	19.69	-23.95	0.42
ESO476-004	20.28	-26.73	0.41
ESO298-008	31.57	-41.52	0.39
NGC5351	208.37	37.91	0.38
ESO353-040	25.93	-36.09	0.35
ESO085-064	79.44	-62.92	0.35
UGC08739	207.31	35.26	0.35
NGC5318	207.65	33.7	0.35
ESO119-013	72.61	-61.35	0.34
UGC09081	212.91	39.64	0.34
NGC6223	250.77	61.58	0.34

これからの大学間連携とJ-GEM

- ◆ 次の大学間連携(光赤外＋電波)で重力波電磁波対応天体探査をターゲットに
- ◆ J-GEMと今の大学間連携が合体して新たな連携研究に発展させる
- ◆ 重力波対応天体の探査には、幅広いパラメータ空間(位置、明るさ、時間)を埋めていく観測が必要 → 多地点・多モード・多波長＋多様性(中小口径～大口径)がキーワードとなる

まとめ

- ◆ 重力波の検出とその放射機構の解明
 - ◆ 一般相対論の検証、強い重力場での物理解明、重力波天文学の創生
- ◆ 次世代重力波望遠鏡 (LIGO、Virgo、KAGRA) が2016～2018に立ち上がる
 - ◆ <200MpcまでのNS-NS合体が検出可能
 - ◆ ～10イベント/年
- ◆ 重力波望遠鏡の位置決定精度～10–100平方度 → 重力波放射現象の正体を知るには、電磁波対応天体の同定が極めて重要
- ◆ 光赤外追跡観測 → 広視野撮像＋ターゲット追跡 (近傍銀河探索) ＋ 多波長連携 (X線ガンマ線)
- ◆ J-GEMと大学間連携を合体、発展させて重力波対応天体の観測ネットワーク構築