

# J-GEM:天体重力波の電磁波 追跡観測ネットワーク

広島大学・宇宙科学センター

吉田道利

J-GEM collaboration

# 重力波

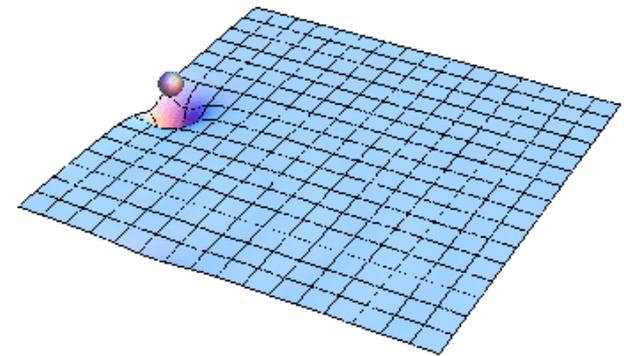
アインシュタイン 1916

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu} \quad (h_{\mu\nu} \ll 1)$$

$$\rightarrow \bar{h}_{\mu\nu} \equiv h_{\mu\nu} - \frac{1}{2}\eta_{\mu\nu}h$$

アインシュタイン方程式より、 $\bar{h}_{\mu\nu}$ の満たすべき方程式は、次の波動方程式になる

$$\left( \nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \bar{h}_{\mu\nu} = 0$$



重力波のイメージ

時空の歪みが波として光の速度で伝播

→ 重力波

# 重力波源の候補

## • 突発現象

- 高密度天体 (中性子星(NS)、ブラックホール(BH)) 合体
- 超新星爆発
- パルサーのグリッチ (パルサー回転の急上昇)

## • 周期的現象

- 高密度天体連星 (NS-NS、BH-NS、BH-BH)
- 回転中性子星

## • その他

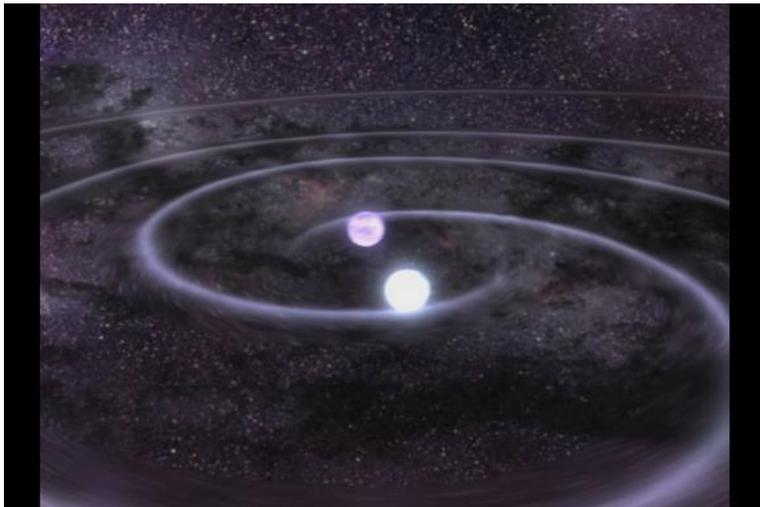
- インフレーション起源
- 宇宙ひも

# 重力波の直接検出の意義

- 一般相対性理論の検証
- 強い重力場での物理解明
- 電磁波で見えない天体・現象(ブラックホール、恒星内部、超新星中心、CMB以前の宇宙初期、など)の解明
- 重力波天文学の創生

# 最新鋭重力波望遠鏡のターゲット

- 突発現象
  - 中性子星、ブラックホール同士の合体
  - 超新星爆発(銀河系内)
  - 未知の重力波現象



# 重力波の位置決定精度

## Source localization accuracy

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 <b>K</b>
median of $\delta\Omega$ [Deg <sup>2</sup> ]	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 <b>K</b>	LHV <b>KI</b>
median of $\delta\Omega$ [Deg <sup>2</sup> ]	21.5	8.44	4.86

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

# 重力波の位置決定精度

## Source localization accuracy

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	LHVK
median of $\delta\Omega$ [Deg <sup>2</sup> ]	30.25	9.5

L:LIGO-Livingston

H:LIGO-Hanford

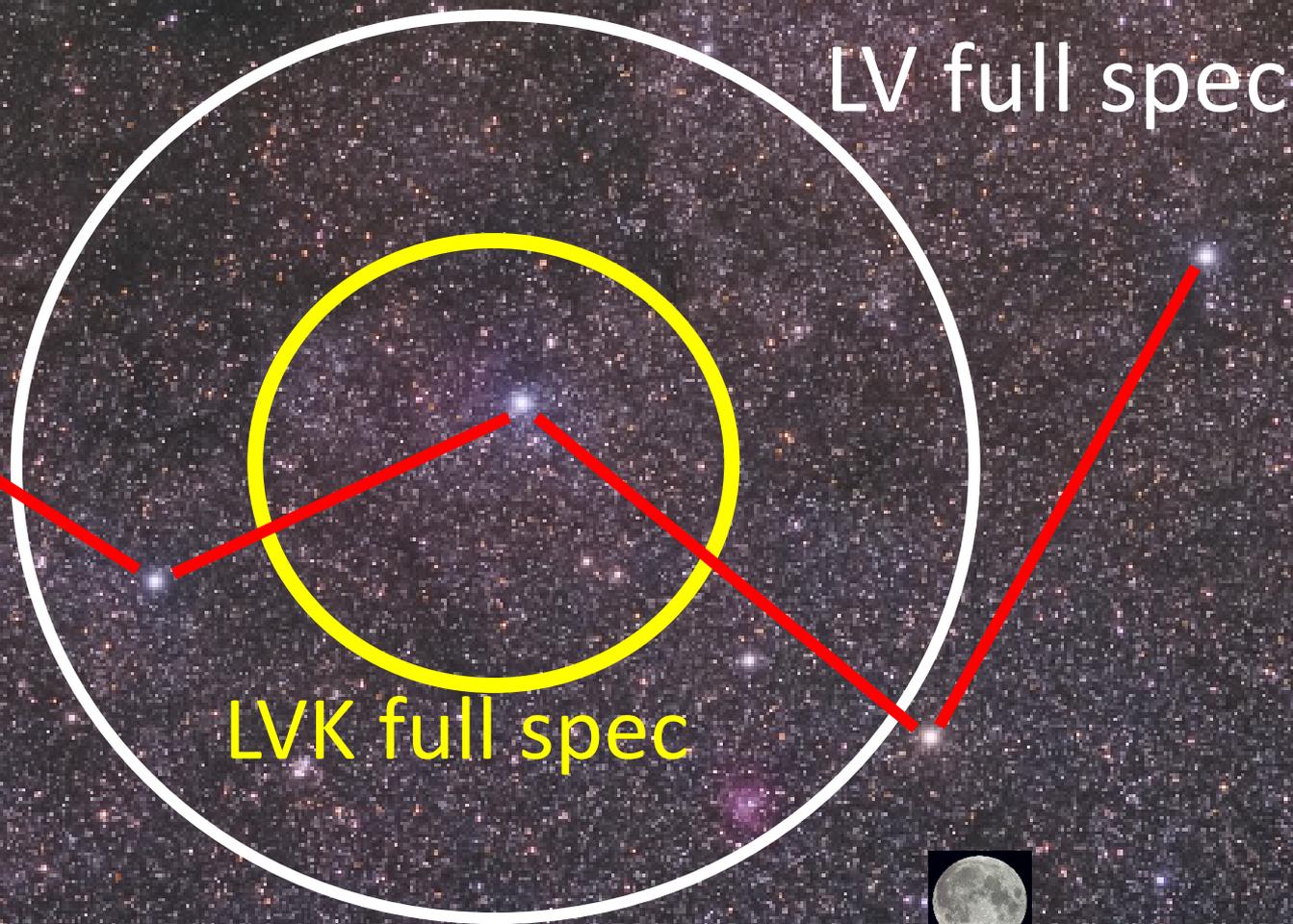
V: Virgo

K: KAGRA

I: LIGO-India

LIGO, Virgo, Kagra で ~10 平方度  
LV だけだと ~30 平方度  
今の LIGO は ~500 平方度

# 重力波望遠鏡の位置決定精度



LV full spec

LVK full spec



月の大きさ

# 重力波観測だけでわからないこと

- 重力波がどこからやってきたのか
  - 現在建設中のすべての重力波望遠鏡(LIGO、Virgo、KAGRA)がフルスペックで稼働しても、月を50個並べた程度の位置精度しかない
- 重力波が発生したことは分かっても、「**どんな天体現象と関係しているのか**」が分からない！



**重力波源のマルチメッセンジャー(電磁波、ニュートリノ)観測が必須**

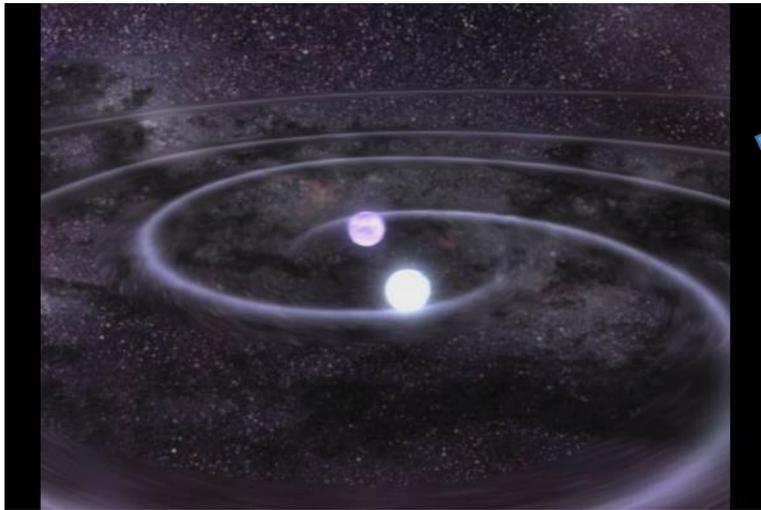
# 重力波天体のマルチメッセンジャー観測に期待されること

- 重力波源の正確な位置 → 天体現象との関係
- 重力波源からの放射メカニズム
  - NS-NS合体とガンマ線バーストの関係
  - BH-BH合体の電磁波放射
  - BH合体周辺環境
- NS-NS合体の環境・頻度
- $r$ プロセス元素合成の起源
- 超新星爆発メカニズムとNS、BH形成
- etc...

本講演では、重力波天体の可視赤外線追跡観測について述べます。

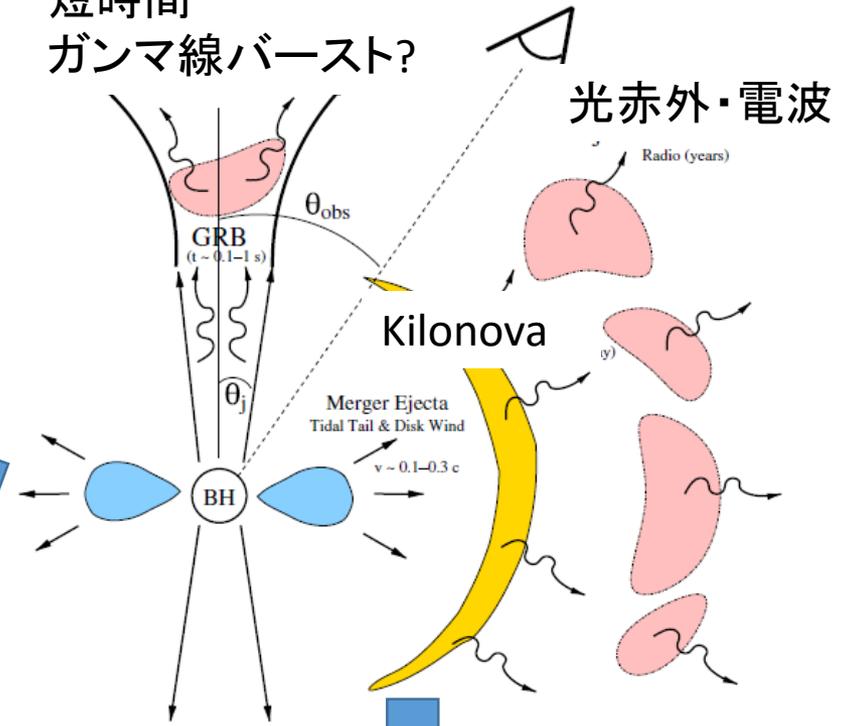
# 重力波天体の可視赤外線 対応現象の有力候補

# kilonova

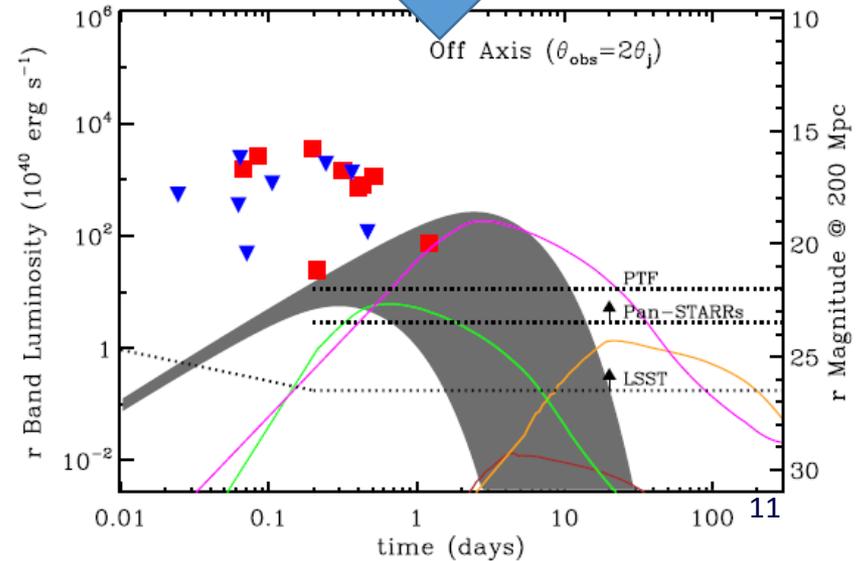


中性子星連星の合体

短時間  
ガンマ線バースト?



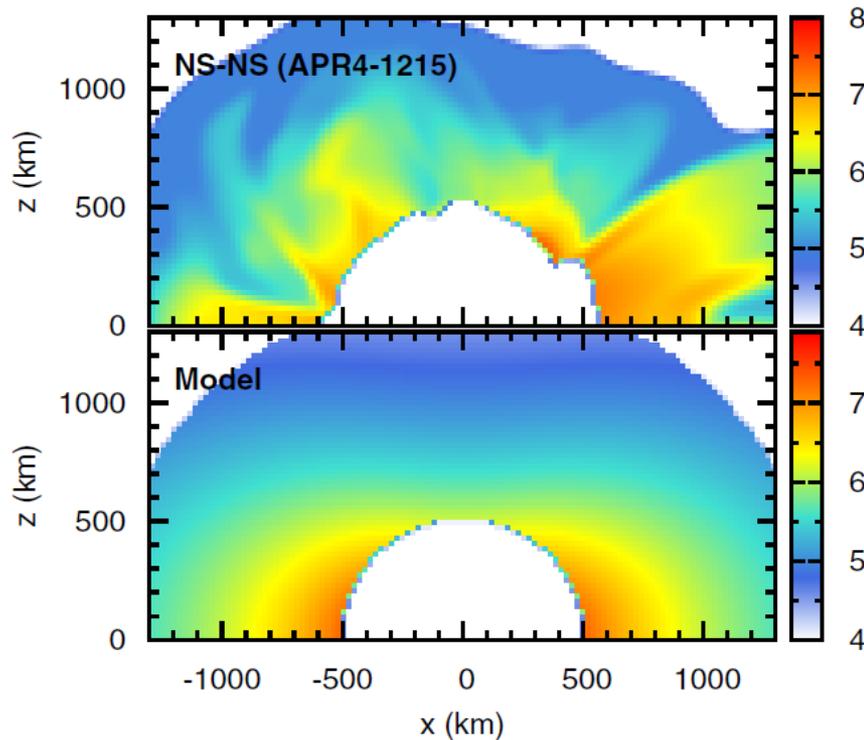
Metzger & Berger 2012



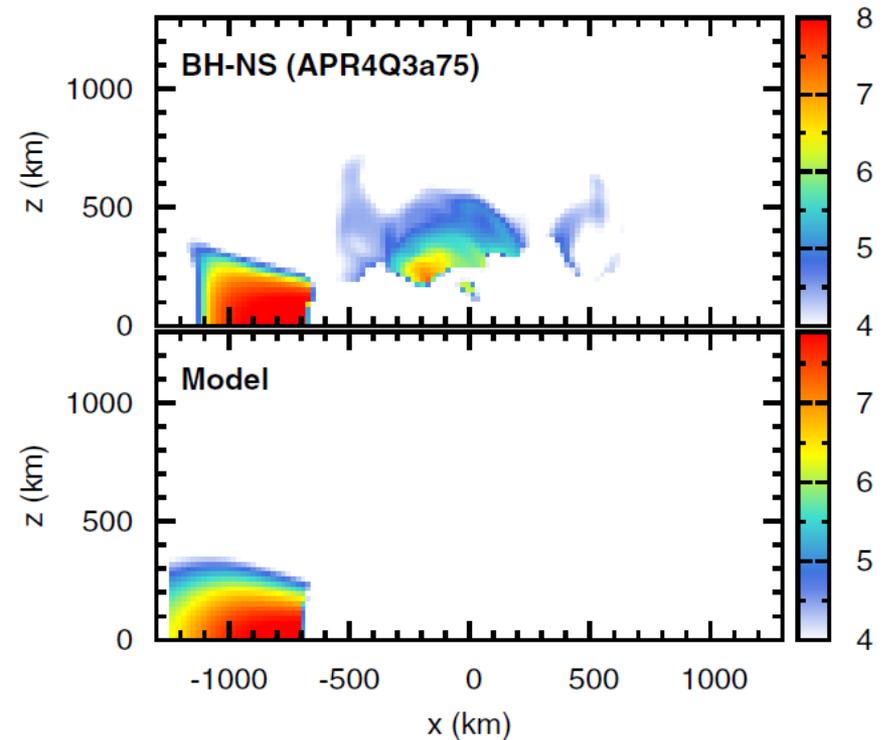
# kilonovaシミュレーション

Tanaka, et al. 2014

## NS-NS、BH-NS合体による物質放出



NS-NS merger



BH-NS merger

# kilonova候補天体 GRB130603B

NR Tanvir *et al.* (2013)

バーストから10日後に  
赤外線で明るくなった



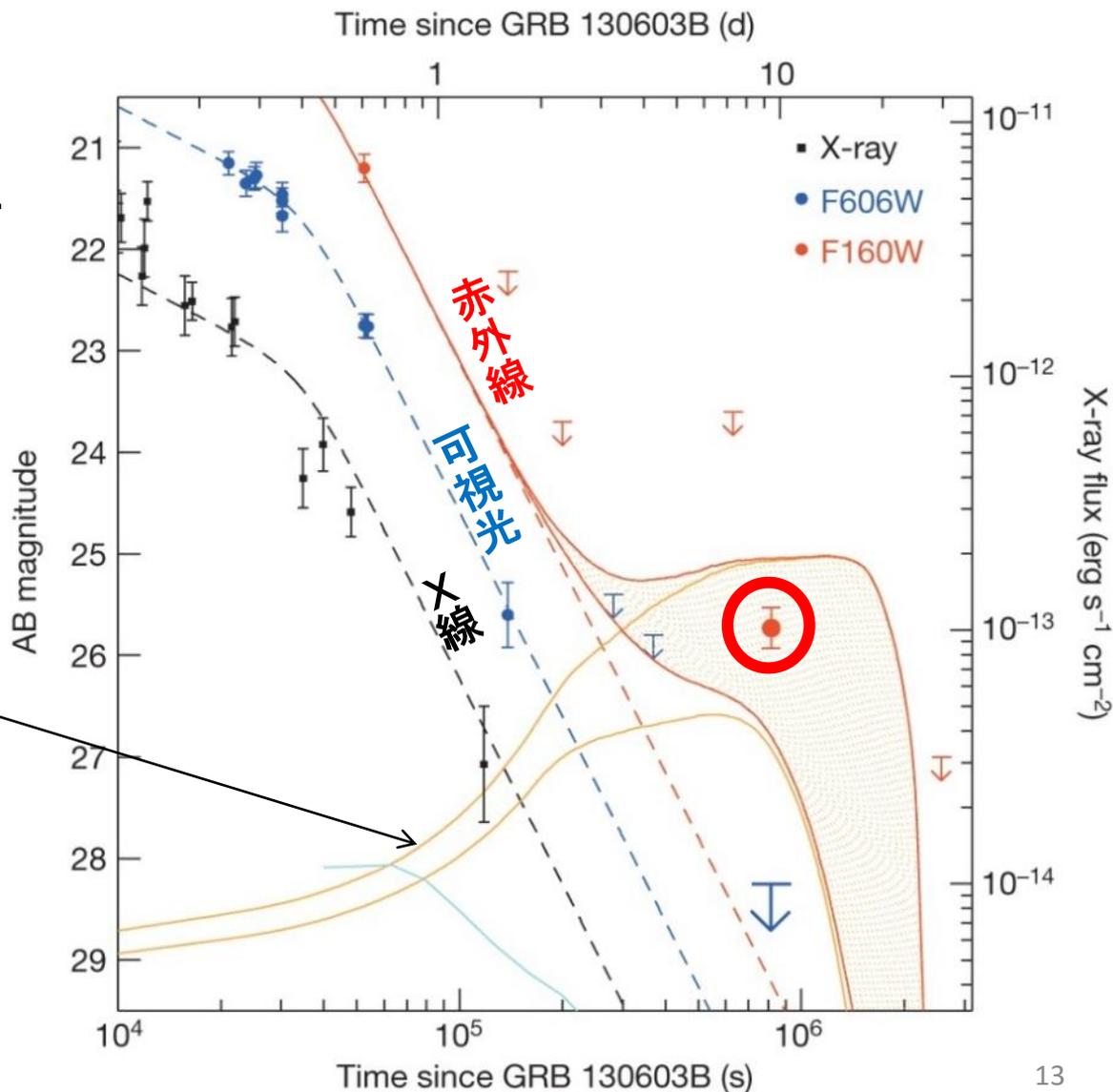
kilonovaの予測と  
一致

Kilonova models

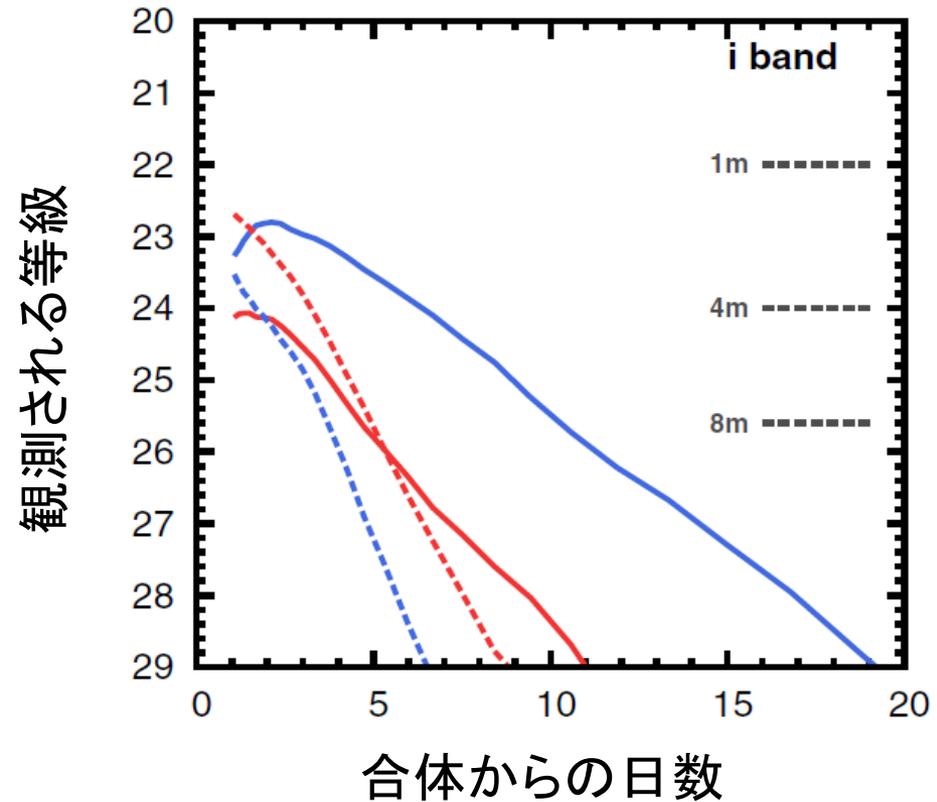
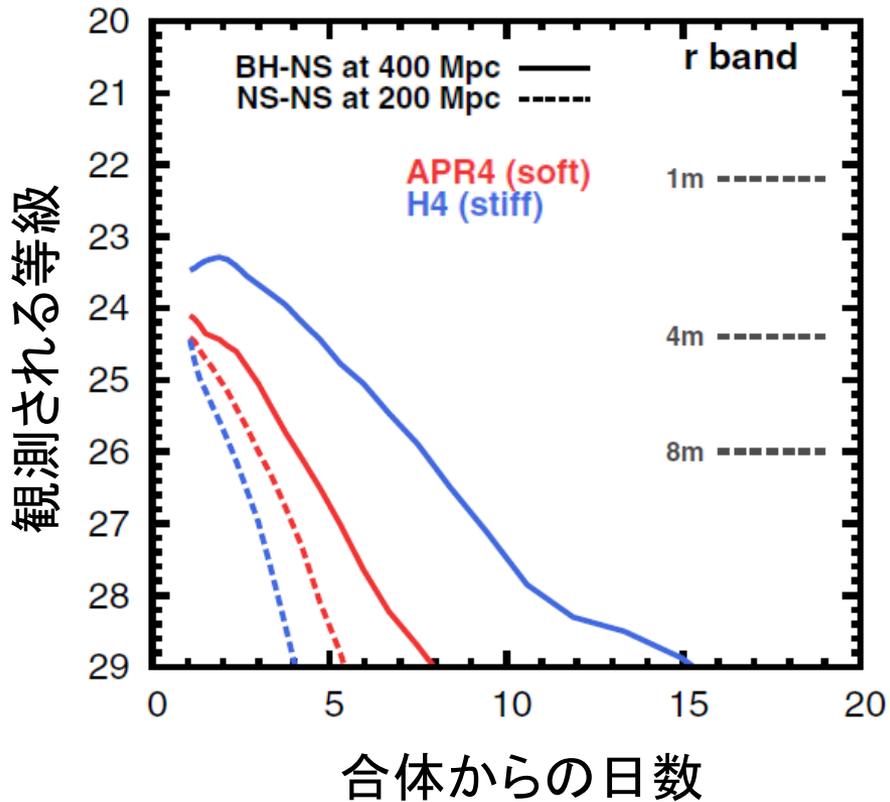
ejecta mass

$10^{-1} M_{\odot}$

$10^{-2} M_{\odot}$

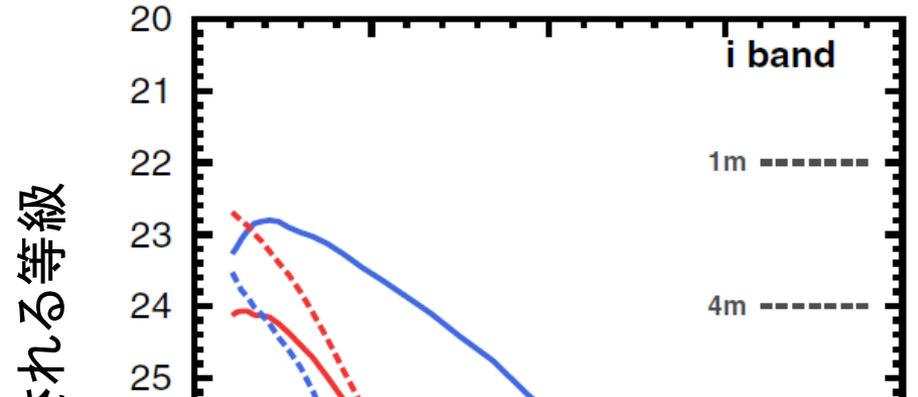
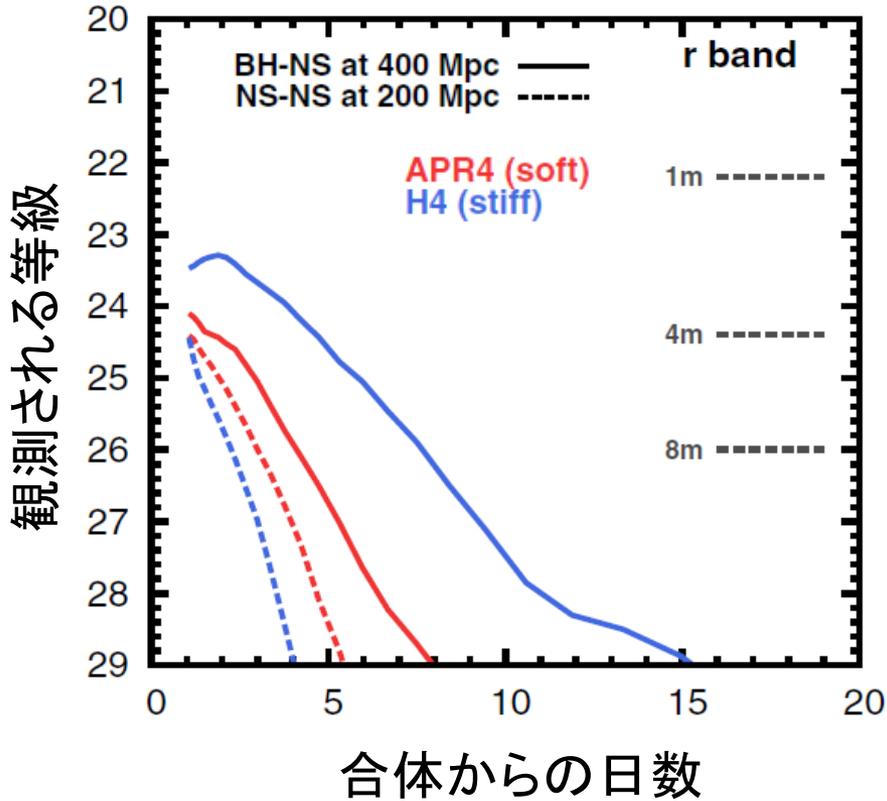


# kilonova光度変化モデル (Tanaka+ 2014)



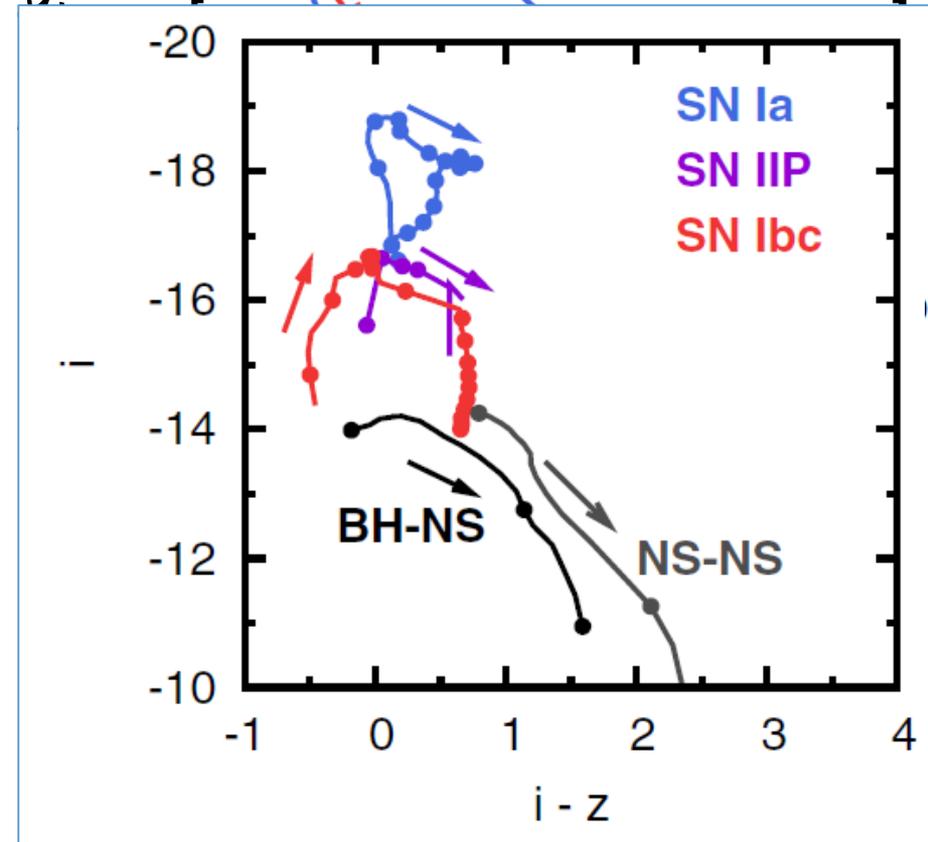
ブラックホール・中性子星合体 400Mpc  
中性子星・中性子星合体 200Mpc

# kilonova光度変化モデル (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

色変化で超新星と弁別できる



# 電磁波追跡観測

- 重力波が検出されたら、電磁波（光、電波、X線など）で追跡観測
  - 重力波にともなった爆発がないか？
- 「何が（どんな天体現象が）重力波を発生させたのか」を捉える

# 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（京都大学理学研究科教授）

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）

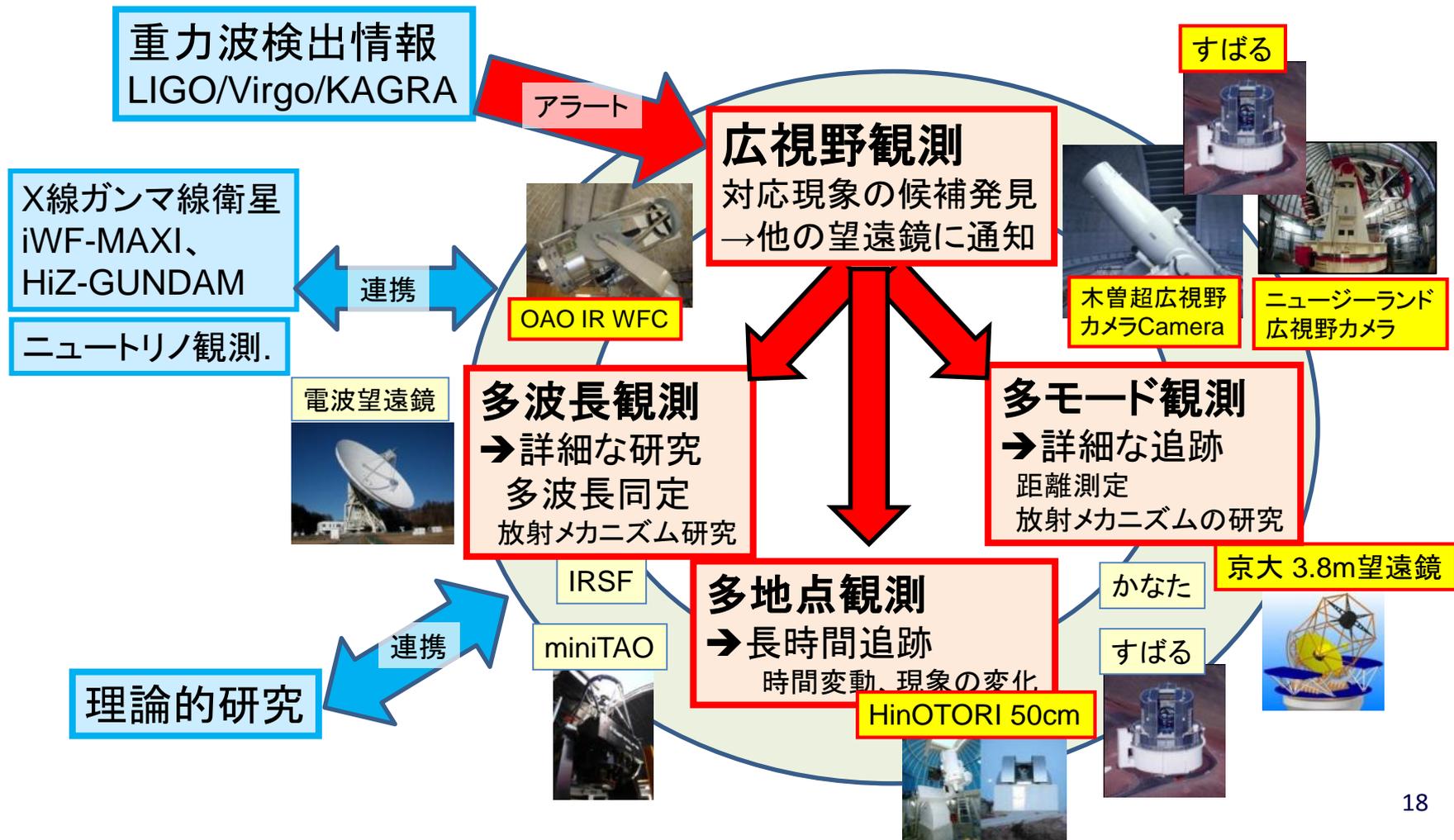


が協力して、重力波の追跡観測体制を構築

# 計画研究 A02 : 天体重力波の光学赤外線対応現象の探索

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 **G**ravitational wave **E**lectro-**M**agnetic follow-up observations
- 日本の光赤外電波望遠鏡を結集

## メンバー

吉田道利(広島大・研究代表者)

内海洋輔、川端弘治、植村誠、伊藤亮介(広島大)

太田耕司、松林和也(京都大)

本原顕太郎、諸隈智樹、土居守(東京大)

田中雅臣、柳沢顕史、田村陽一(国立天文台)

阿部文雄、朝倉雄一郎(名古屋大)

河合誠之、斉藤嘉彦、谷津陽一(東京工業大)

富永望(甲南大)

永山貴弘(鹿児島大)

藤沢健太(山口大)

伊藤洋一(兵庫県立大)

# 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 deg<sup>2</sup> opt. imaging w/ 1m  
1 deg<sup>2</sup> 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)  
超広視野カメラ→ 36平方度
- 1.5m かなた望遠鏡(広大)
- 2m なゆた望遠鏡(西はりま)
- 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)
- 32m 電波望遠鏡(山口大)



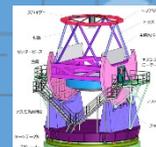
50cm 望遠鏡  
(広島大学)



3.8m 望遠鏡  
(京都大学)



すばる望遠鏡



TAO 望遠鏡  
(東京大学)

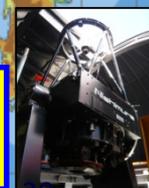


IRSF (名古屋大学)  
@ 南アフリカ

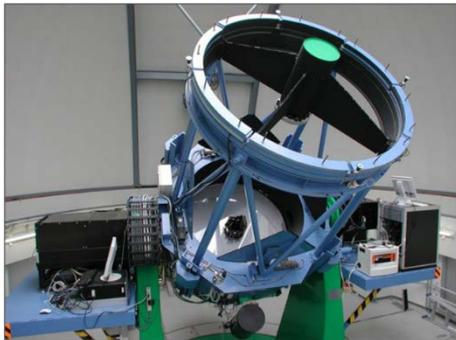
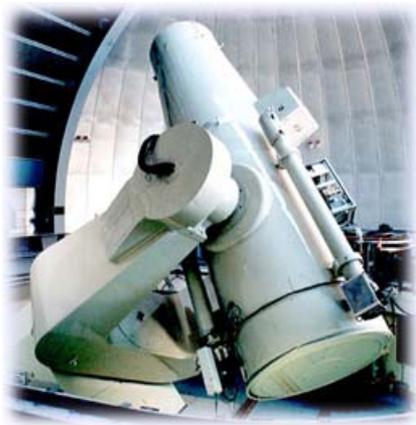


MOA-II (名古屋大学)  
@ ニュージーランド

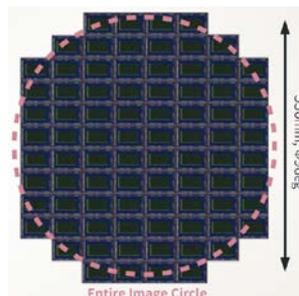
miniTAO (東京大学)  
@ チリ



# J-GEMに参加している望遠鏡



# J-GEMの試み



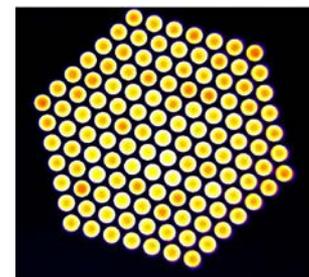
## • 新しい開発

1. 超広視野カメラ(東京大・木曾観測所)
2. 広視野赤外線カメラ(岡山天体物理観測所)
3. 面分光装置(京都大)
4. ロボット望遠鏡(広島大)

## • 世界の重力波望遠鏡との連携

- KAGRA
- LIGO & Virgo

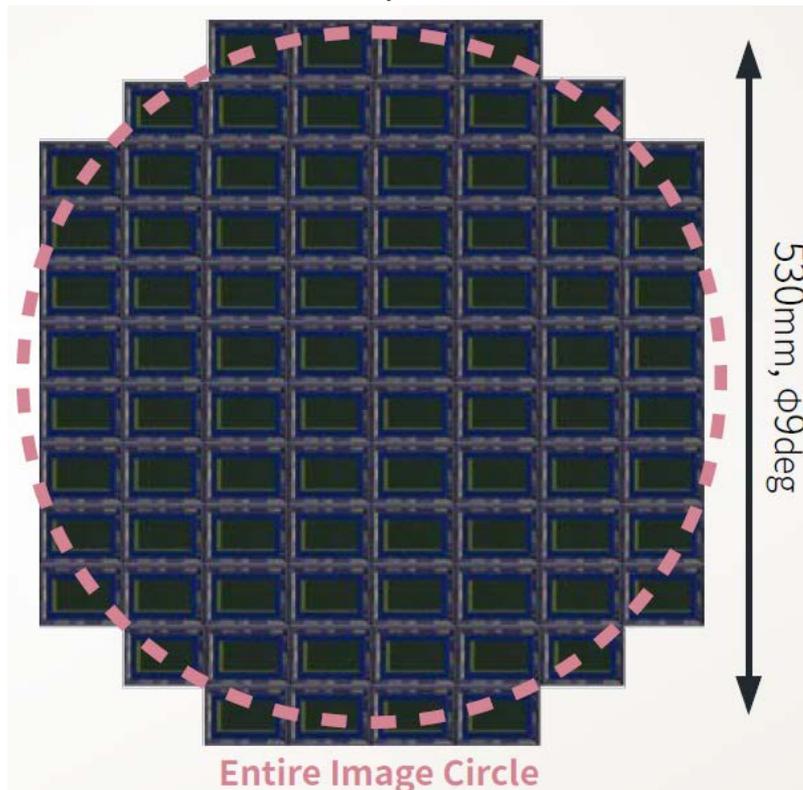
## • 全世界望遠鏡ネットワークの構築



# 1. 木曾観測所・超広視野カメラ: Tomo-e

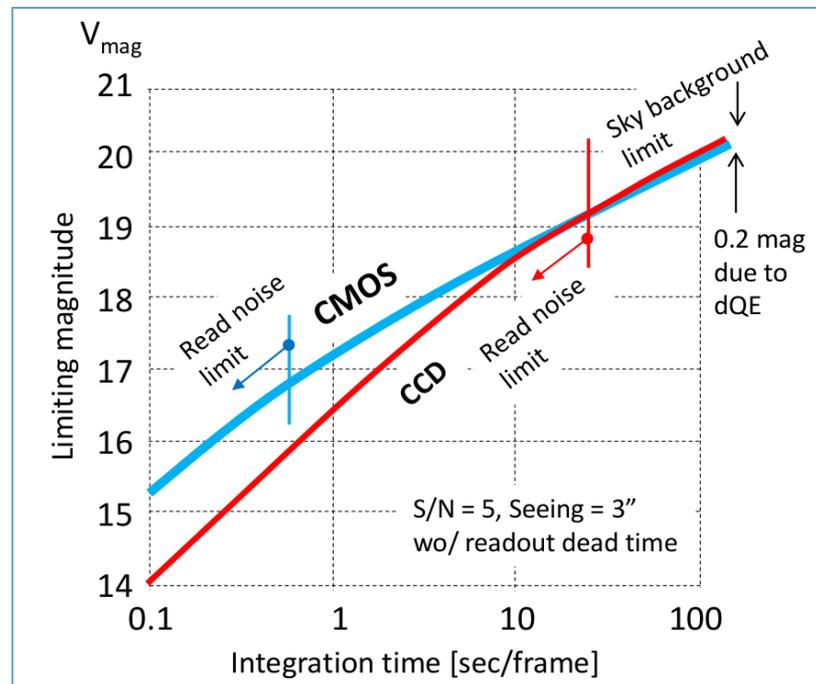
可視光超広視野(20平方度)  
による迅速な対応天体探査

木曾観測所105cmシュミット望遠鏡  
検出器: 84個の大型CMOSセンサ  
視野: 直径9度, 総計20平方度



Entire Image Circle

カメラレイアウト



- CMOSセンサ(Canon)感度
  - 10秒以下の露出ではCCDより上
  - 100秒露出でcomparable
- 8個のセンサ(総視野2平方度)による試験観測実施 → 性能確認

## 2. 広視野赤外線カメラ: OAO-WFC

近赤外線広視野による迅速な探査

岡山観測所 91cm望遠鏡

視野: 1平方度 2K×2K MCTセンサ

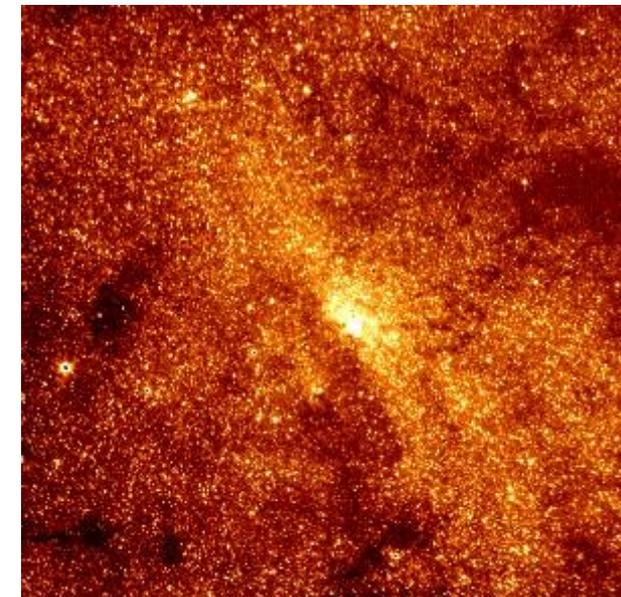


Appearance of OAO-WFC

- 現在は1K×1K検出器で視野0.25平方度で運用
- 2K検出器は2016にインストール



NGC2024 taken with OAO-WFC



Ks band image of Galactic center<sup>24</sup>

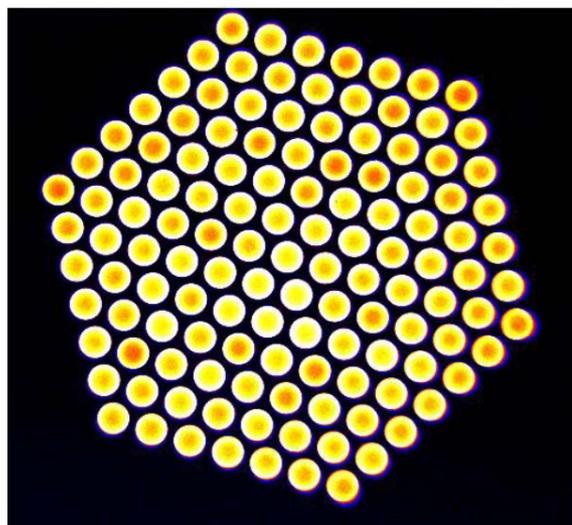
### 3. 京大3.8m望遠鏡用面分光装置

対応天体の迅速な可視光分光観測

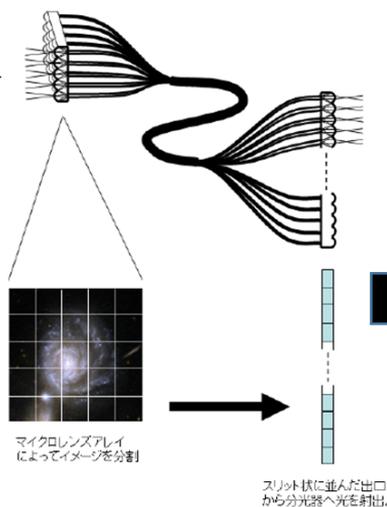
視野: 30秒φ 波長分解能~1,000

面分光ユニットは完成 → 岡山観測所188cm望遠鏡に装着  
ショートGRB観測体制の整備

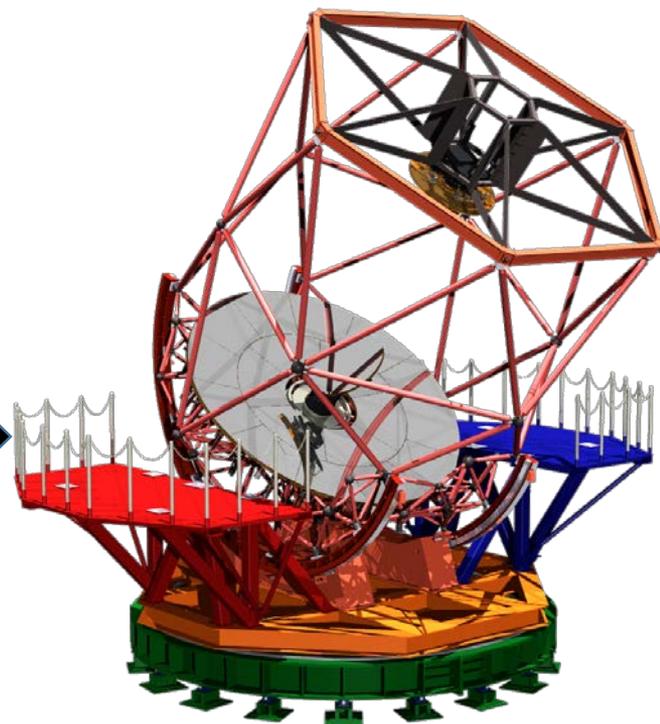
3.8m望遠鏡の完成にあわせて移設



焦点面光ファイバーアレイ



ファイバー伝送系



京大3.8m望遠鏡

## 4. ロボット望遠鏡 HinOTORI project

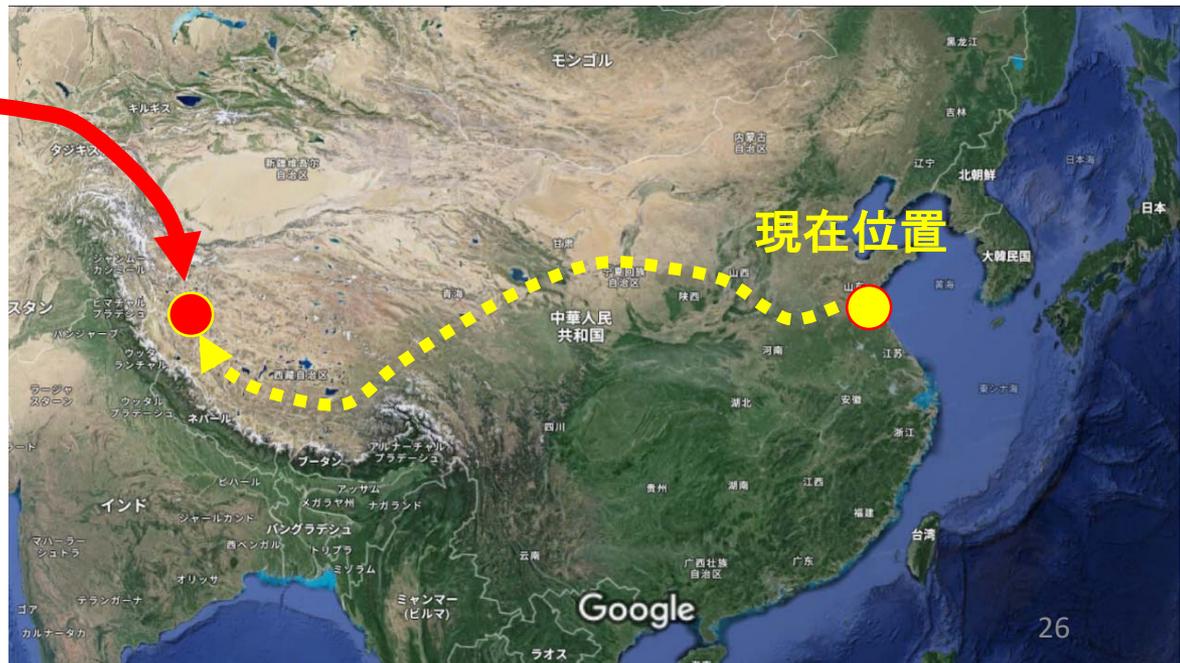
突発天体観測の空白地域(中国西域)を埋める自動観測施設

50cm自動望遠鏡@チベット

視野:0.25平方度

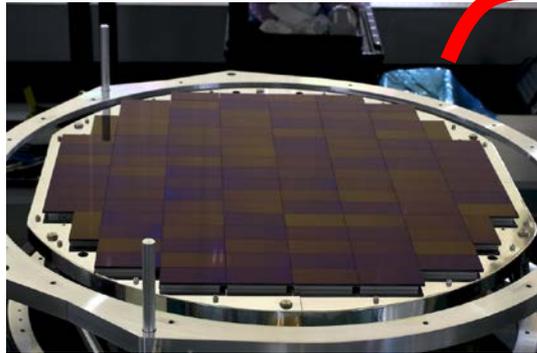
可視三色同時カメラ:u (380nm), R (660nm), I (800nm)

望遠鏡・装置は完成 中国輸送準備完了

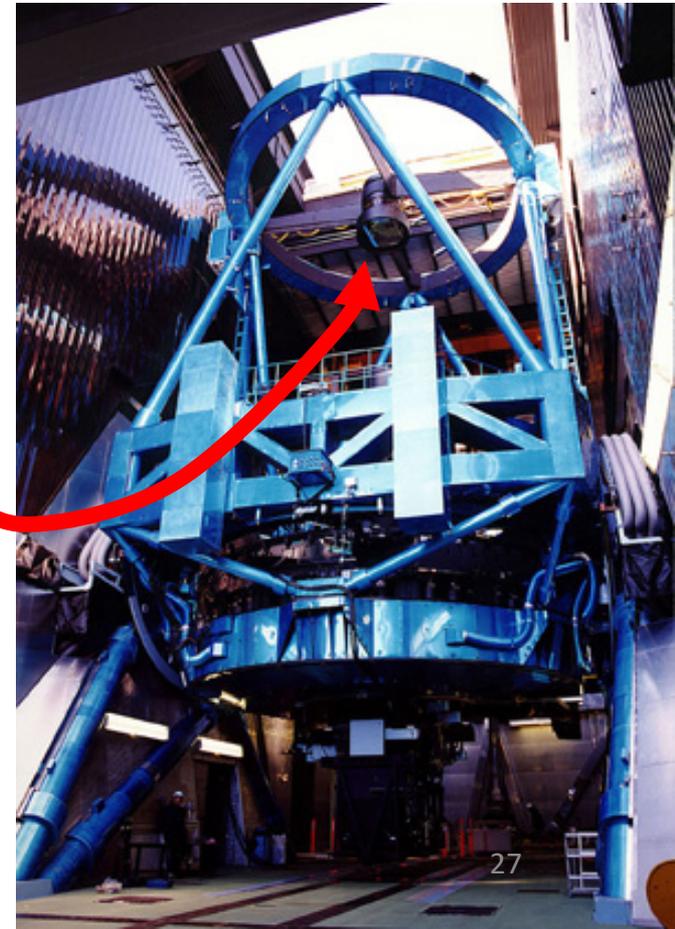
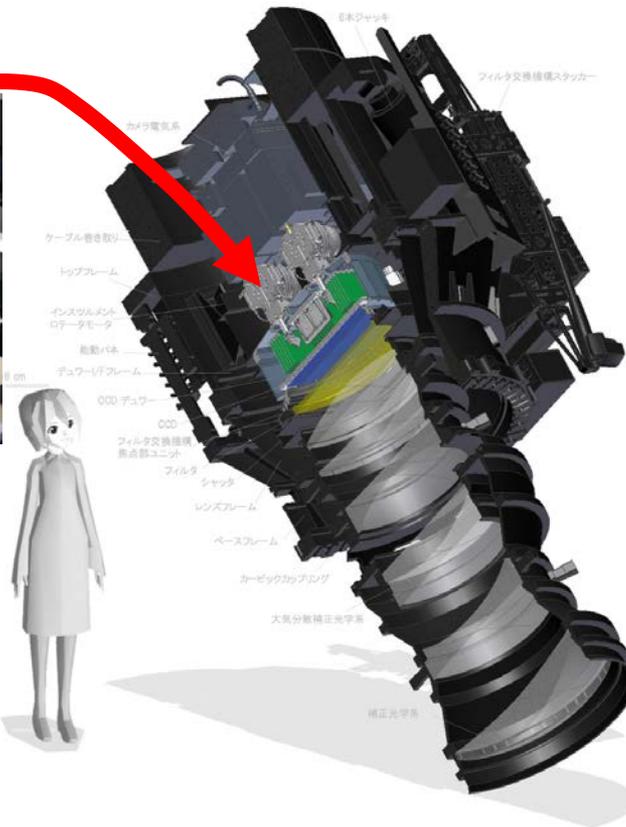


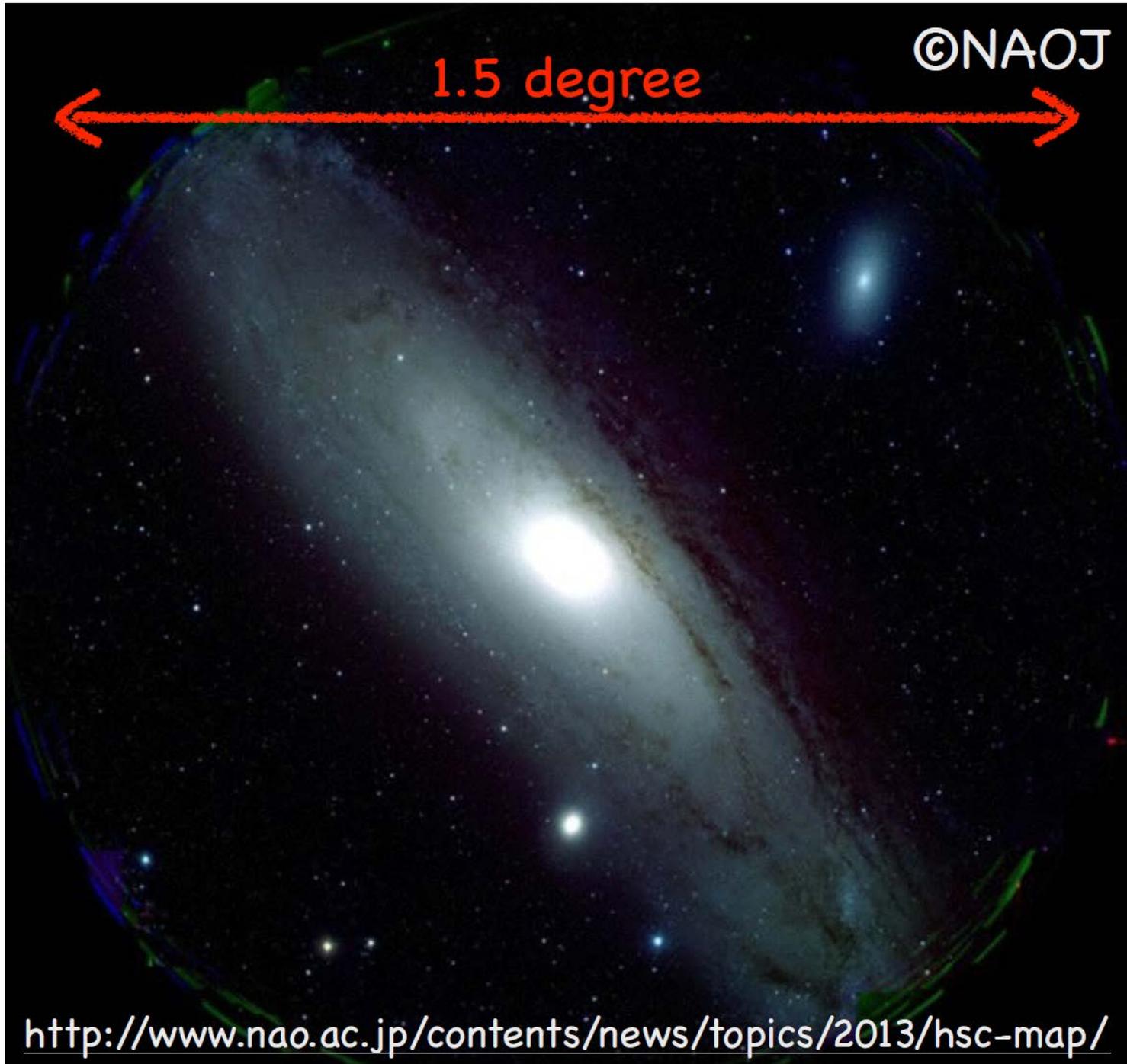
# 重力波天体の可視光追跡観測の 決定打 Hyper Suprime-Cam

すばる望遠鏡(口径8.2m)に搭載  
全長3m、総重量3tの世界最大のCCDカメラ  
視野: 1.7平方度



2K x 4K CCD 104個

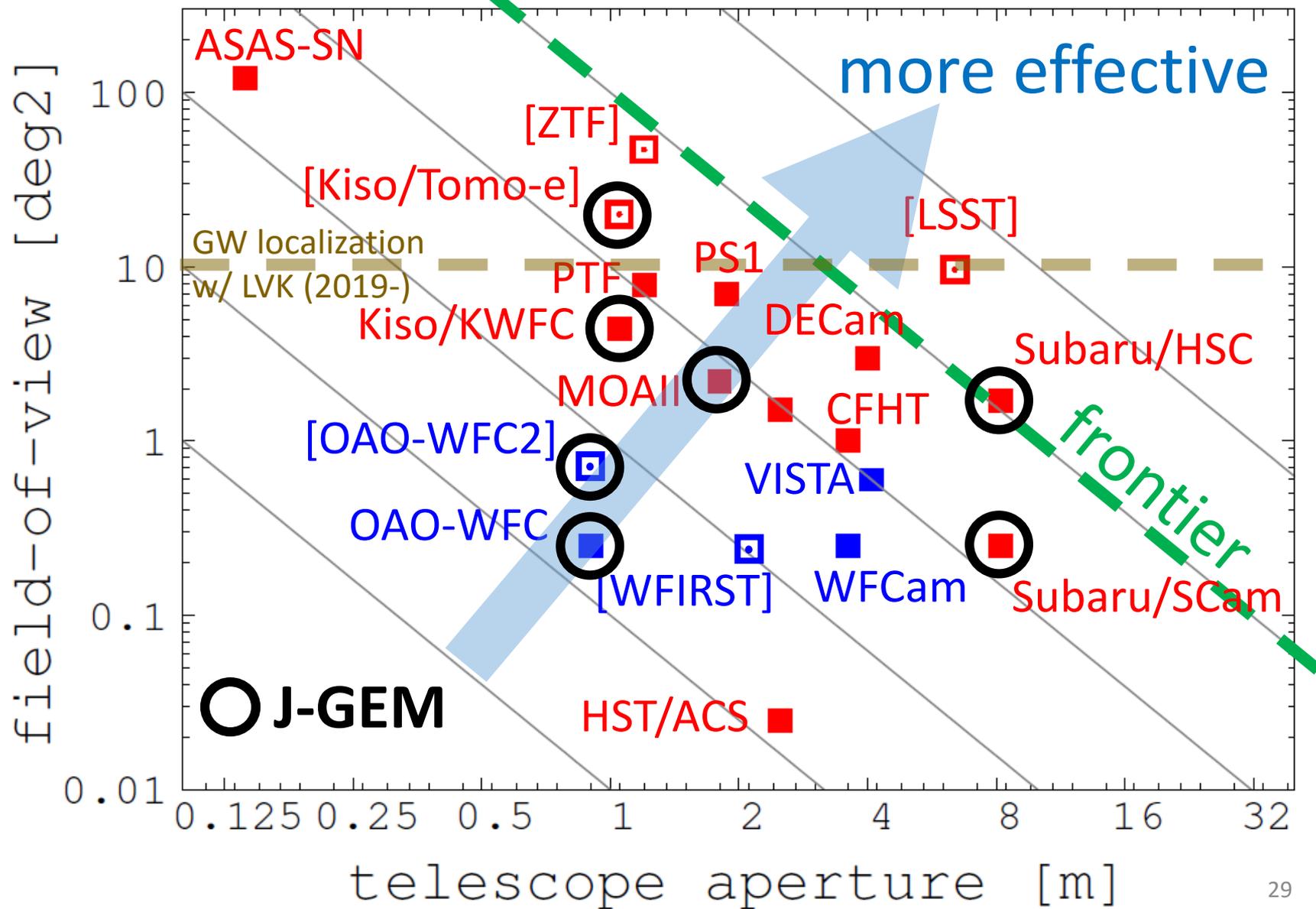




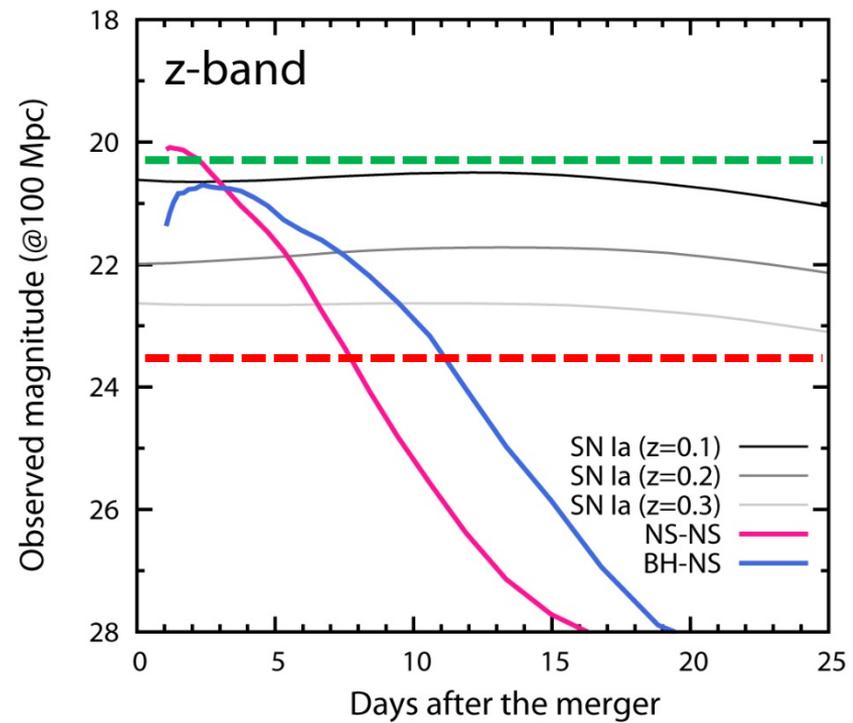
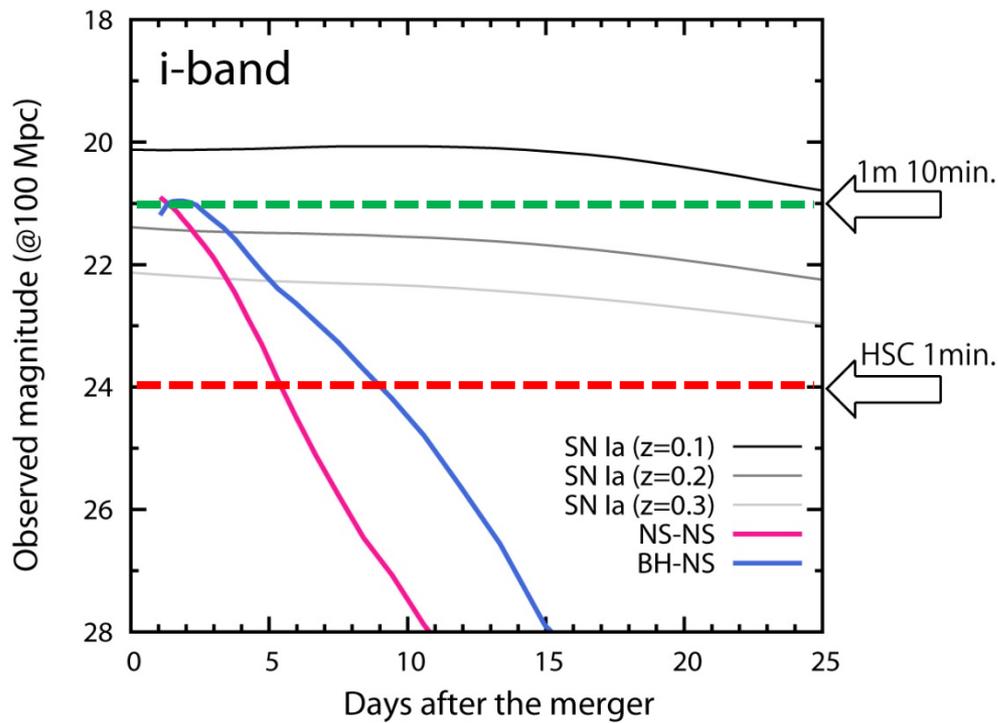
<http://www.nao.ac.jp/contents/news/topics/2013/hsc-map/>

# 世界の可視近赤外広視野望遠鏡・装置

可視:赤 赤外:青 [ ]:将来計画

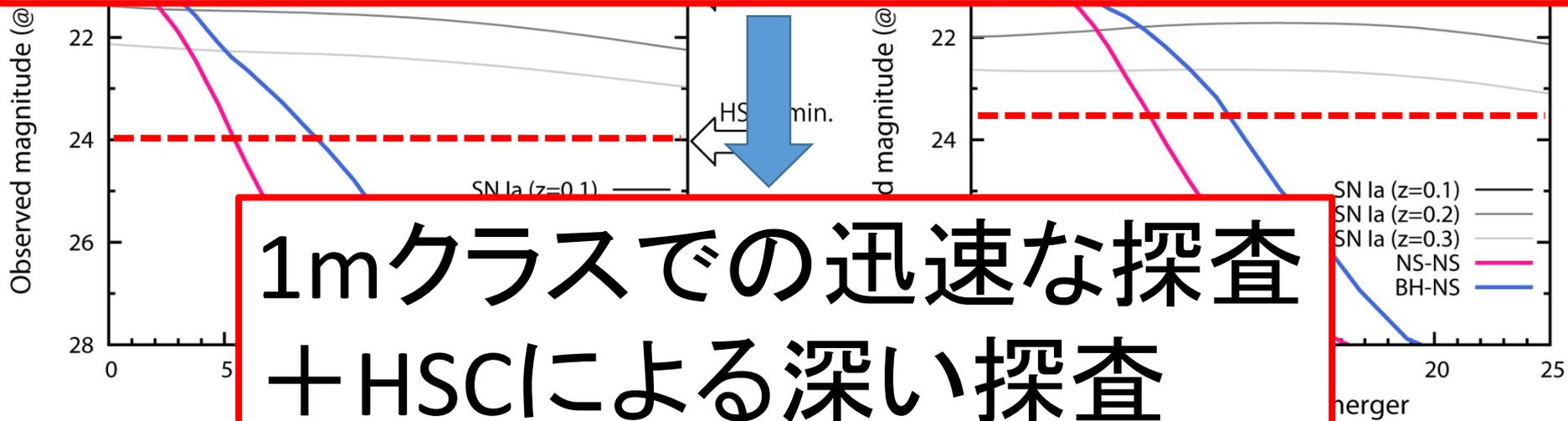


# Expected light curve of kilonova @ 100Mpc (Tanaka, M.)



# Expected light curve of kilonova @ 100Mpc (Tanaka, M.)

1、2日以内であれば1mクラスの望遠鏡で検出可能  
HSCを使えば10日～2週間ぐらいまで光度変化を追跡可能



# LIGO/Virgo電磁波追跡コンソーシアム

以下の協定書をLIGO/Virgoチームと結んだ(2014年4月)  
2015年4月、LIGO/Virgo電磁波追跡チーム会議(@イタリア)に吉田が出席

*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.

# LIGO/Virgo電磁波追跡コンソーシアム

以下の協定書をLIGO/Virgoチームと結んだ(2014年4月)

2015年4月、LIGO/Virgo電磁波追跡チーム会議(@イタリア)に吉田が出席

## LIGOとのお約束

1. LIGOが4つ重力波を見つけるまでは重力波アラートについては秘密
2. LIGOが4つ重力波を見つけるまでは論文を勝手に書いてはいけない
3. 電磁波追跡で何か見つかったら必ずLIGOに知らせなさい

## LIGOからの注意

- ときどき偽信号を入れるからね。

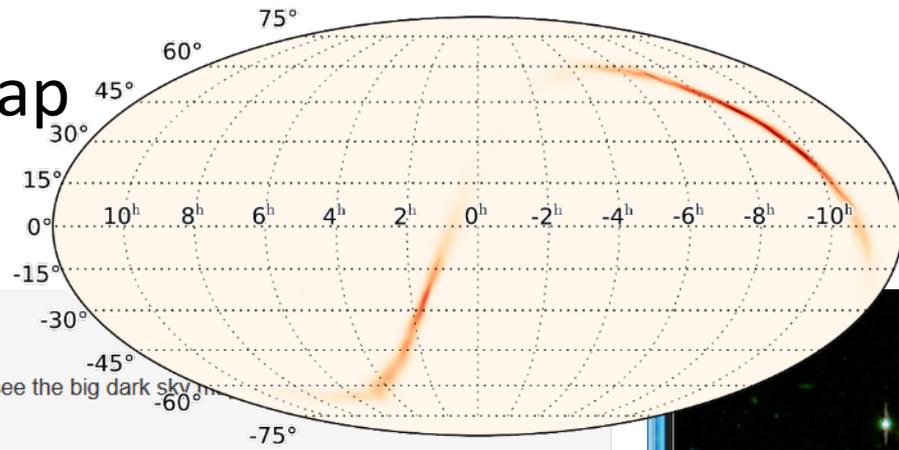
# LIGO/Virgoの運用計画

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 <sup>2</sup>	20 deg <sup>2</sup>
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  $10^{-2} \text{ yr}^{-1}$ . 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 second run (O2) : 2016年8月スタート 6ヶ月間

# LIGO/Virgoから提供されるskymap

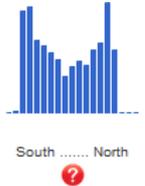


## Skymap Viewer

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

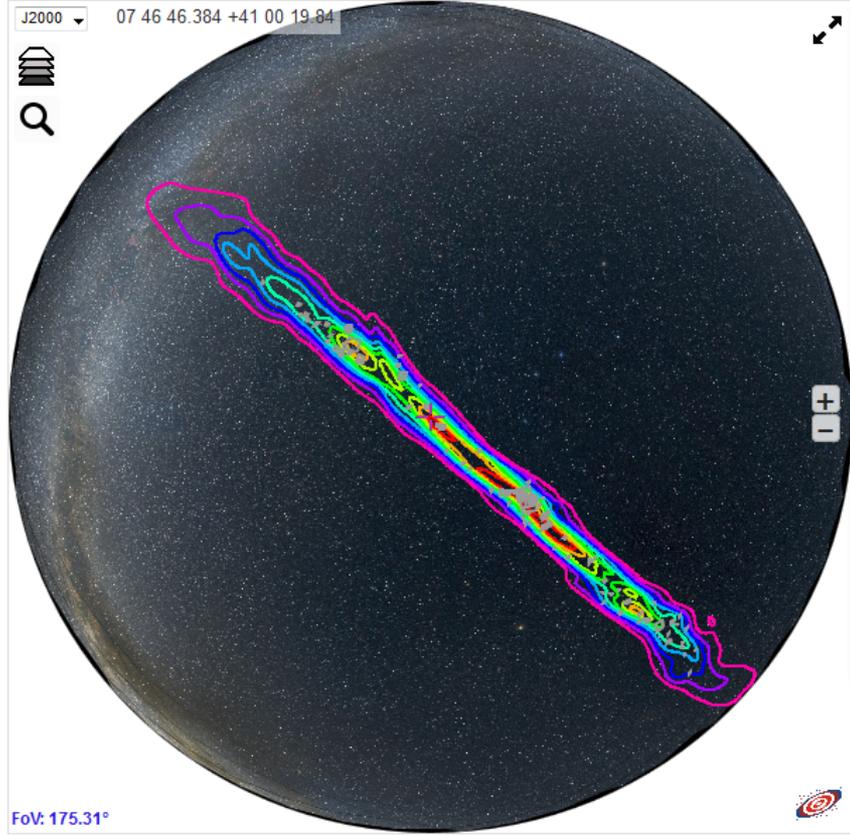
E Longitude  east lon Latitude  latitude

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

(人類が初めて検出した重力波イベント)

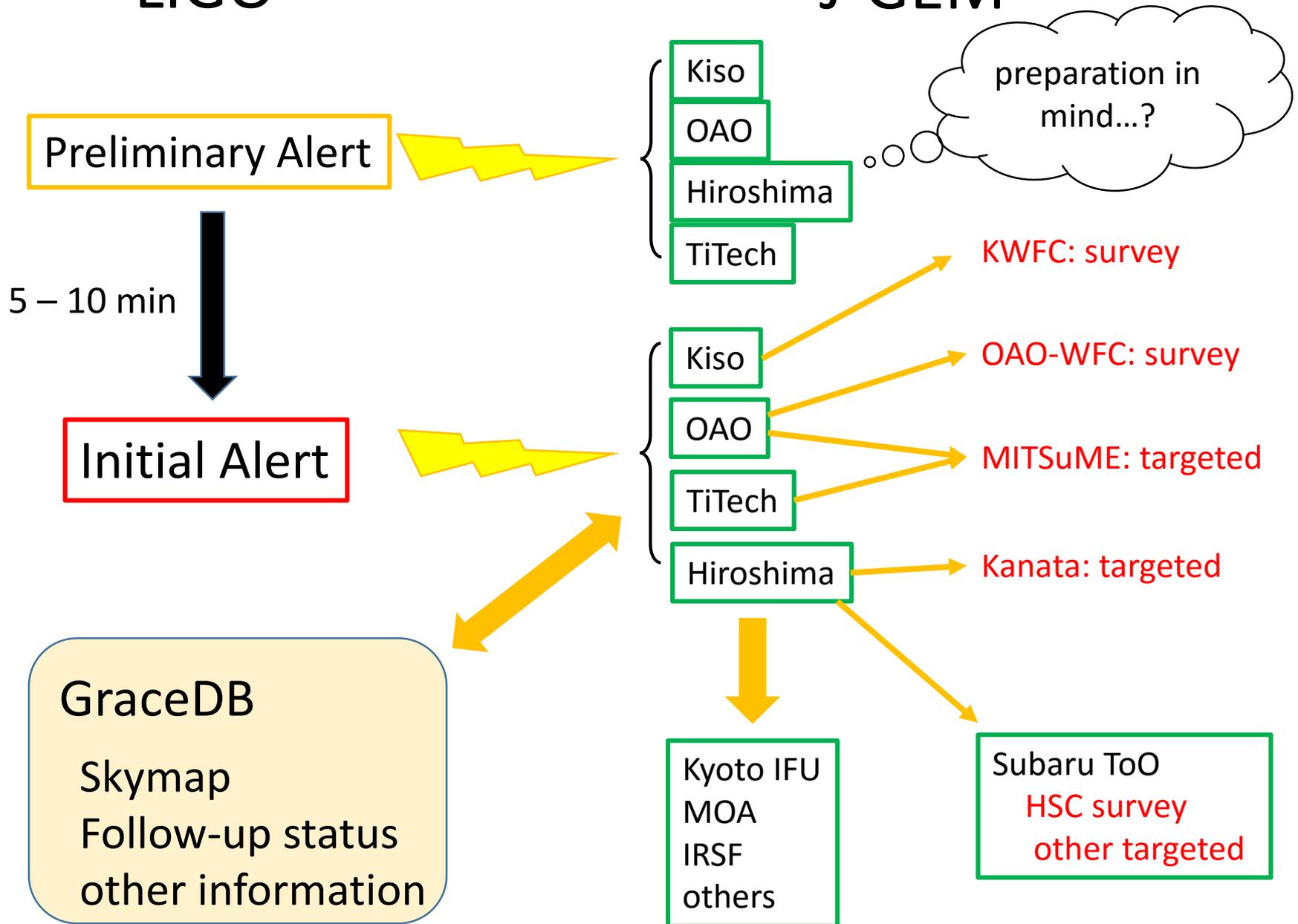
**GW150914で、J-GEM**

(Abbott+ 2016, PRL, 116, 061102)

**は何をしたのか？**

# LIGO

# J-GEM



LIGO

J-GEM

Preliminary Alert

Kiso

OA0

Hiroshima

preparation in  
mind...?

LIGO O1が始まるまでに想定していた

しかし、この通りには  
物事は進まなかった・・・

GraceDB

Skymap

Follow-up status

other information

Kyoto IFU

MOA

IRSF

others

Subaru ToO

HSC survey

other targeted

# そもそも、、、

- ライゴ (LIGO) の定常運転 2015年9月18日  
から開始

のはずだった。

- 我々 (J-GEM) を含め、世界の追跡観測チームは9月18日に向けて準備
- しかも、「どーせ最初は機械が安定しないから、練習みたいなもんだよ」という空気が・・・



# 第一報

16 Sep 2015

G184098

Subject: [lv-em-observers] LIGO/Virgo G184098: Burst candidate in LIGO engineering run data  
Date: Wed, 16 Sep 2015 05:39:44 +0000  
To: lv-em-observers@gw-astronomy.org <lv-em-observers@gw-astronomy.org>

Dear colleagues,

世界標準時 : 2015-09-14 09:50:45

We would like to bring to your attention a trigger identified by the online Burst analysis during the ongoing Engineering Run 8 (ER8). Normally, we would send this in the form of a private GCN Circular, but the LIGO/Virgo GCN Circular list is not ready yet.

The LIGO Scientific Collaboration and Virgo report that the cWB unmodeled burst analysis identified candidate G184098 during real-time processing of data from LIGO Hanford Observatory (H1) and LIGO Livingston Observatory (L1) at 2015-09-14 09:50:45 UTC (GPS time: 1126259462.3910). Alerts were not sent in real-time because the candidate occurred in ER8 data; however, we have now sent GCN notices through our normal channel.

G184098 is an unvetted event of interest, as the false alarm rate (FAR) determined by the online analysis would have passed our stated alert threshold of  $\sim 1$ /month. The event's properties can be found at this URL:

<https://gracedb.ligo.org/events/G184098>

There are important caveats associated to this event:

- \* It occurred before the initiation of the planned observing run;
- \* The detectors were not in their final O1 configuration;
- \* Calibration is not finalized.

In particular, calibration uncertainties may imply systematic errors in sky localization.

# 第一報に書いてあること

- エンジニアリング中 (LIGO E8) だけど、おととい、何か重力波らしいものを検出しちゃったぜ。
- 正式運転はあさってだけど、結構信号レベルが高いから、観測してみてちょーだい。
- でも次のことに注意してね。
  1. LIGOはまだ正式運転してない
  2. LIGOは本来の性能はまだ出てない
  3. キャリブレーションもちゃんとできてない
- まだ正式なアラート体制も立ち上がってないから、とりあえずメールで連絡しとくわ。よろしく。

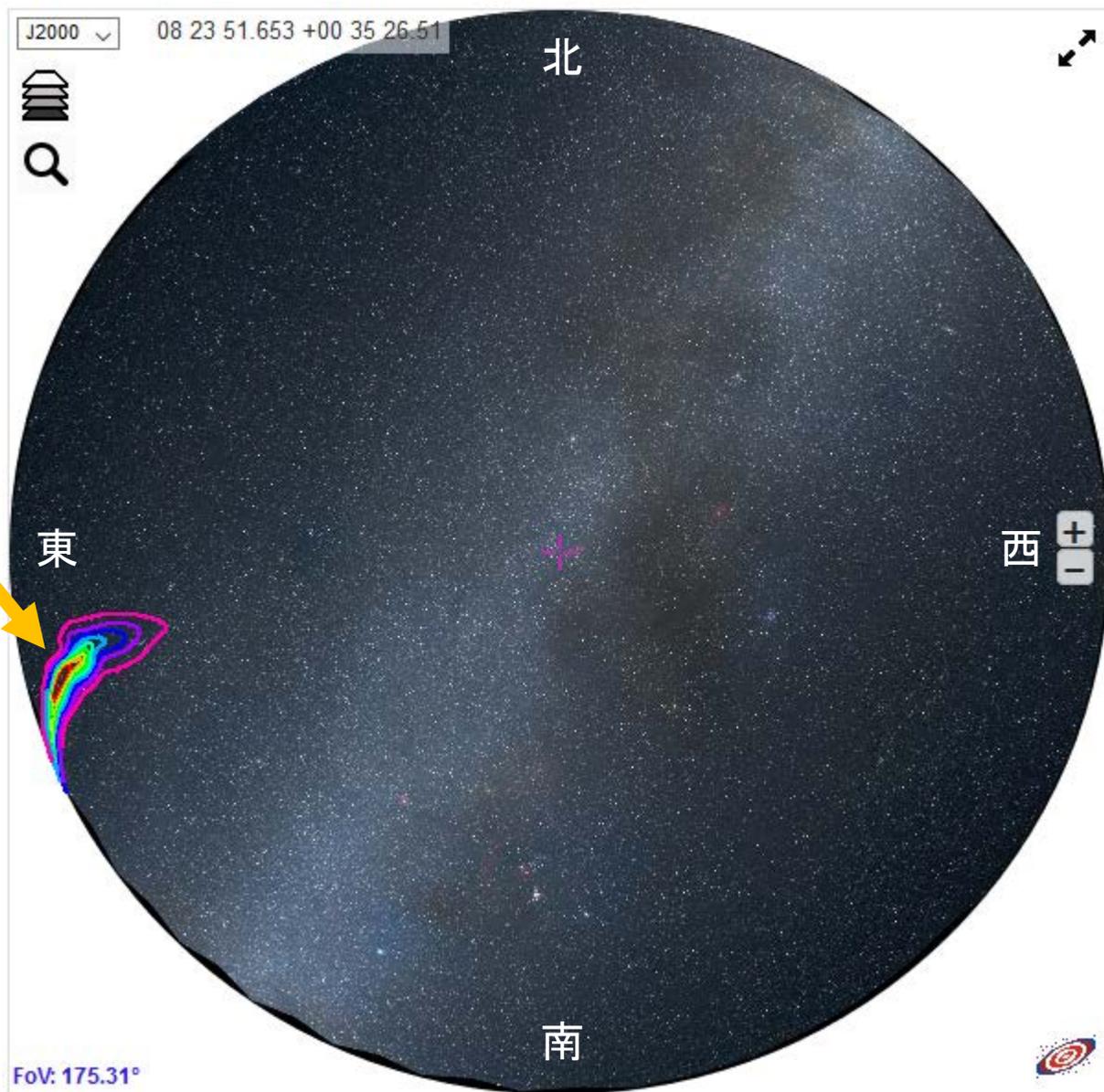
# 私たちの反応

- まだ始まってないのに、何これ。
- 性能も出てないしキャリブもちゃんとできてないって、それでも信じろというのか。
- でも、初めての信号だし、やらざるを得んか。
- で、空のどこから来たって？

2015年9月16日  
午前6時  
日本から見た空

ココが重力波  
到来方向(推測)

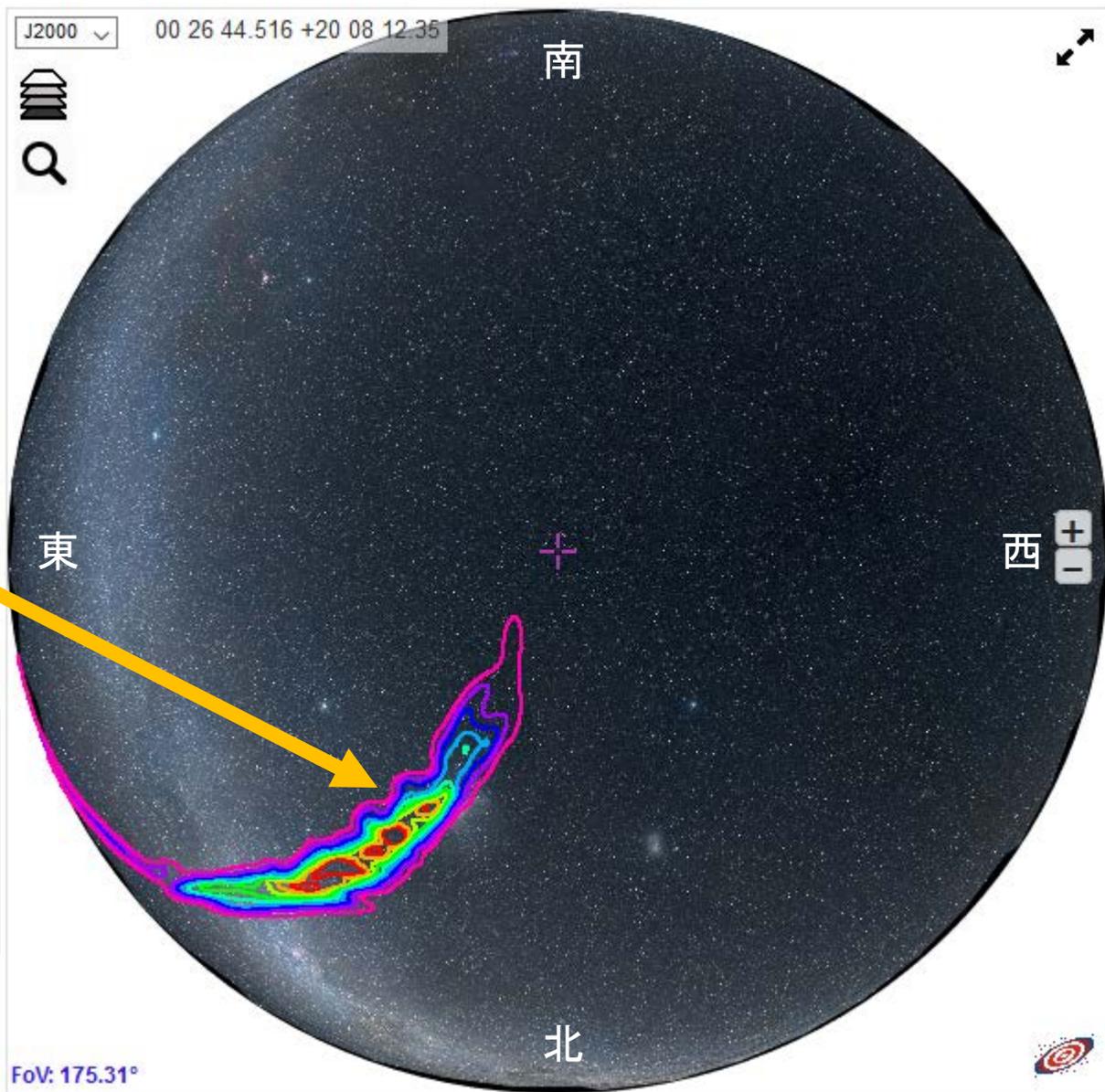
日本からじゃ、  
明け方だけ！



2015年9月16日  
午前3時  
ニュージーランド  
から見た空

ココが重力波  
到来方向(推測)

よし、ニュージー  
ランドと南アフリカ  
の望遠鏡を投入  
しよう！



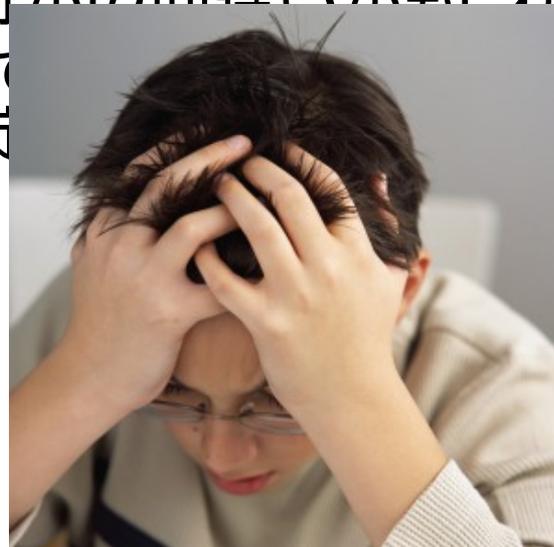
# で、がんばりました

- 木曾観測所で明け方のわずかなチャンスに観測実施  
→ 24平方度(満月120個分の視野)観測
- ニュージーランド61cm望遠鏡で重力波位置誤差範囲内にある16個の銀河を観測
- 南アフリカは・・・
  - 「今、南アフリカの人が使ってますが、割り込みますか？」
  - 「いや、まだLIGOも練習中だし、何かの間違いかもしれないし、偽信号かもしれないから、そこまでしなくていいだろう。他の人にアラートをバラすとLIGOとの協定違反にもなるし・・・」
  - てことで、あきらめた

# で、がんばりました

- 木曾観測所で明け方のわずかなチャンスに観測実施  
→ 24平方度(満月120個分の明るさ)を観測
- ニューハORIZONズ望遠鏡で重力波位置誤差範囲内にある15個の銀河を観測
- 怪しい天体は見つからなかった
- 南アフリカは…
  - 「今、南アフリカの人が使ってますが、割り込みますか？」
  - 「いや、まだLIGOも練習中だし、何かの間違いかもしれないし、偽信号かもしれないから、そこまですぐにアラートをバラすとLIGOとの協定が…」
  - てことで、あきらめた

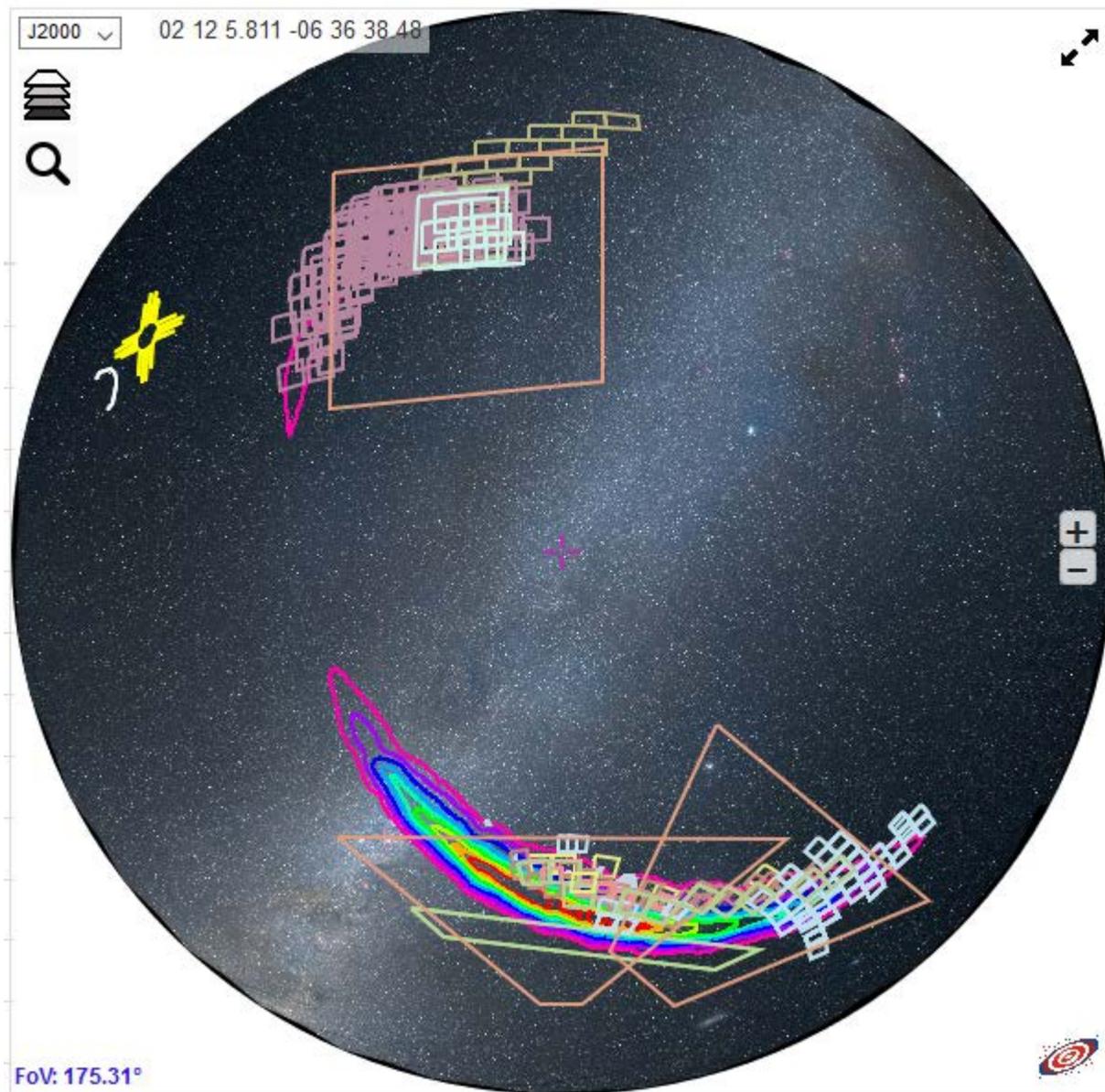
← やったときゃ良かった！



# 世界中で追跡観測

20を超えるグループが  
追跡観測

しかし、電磁波対応  
天体は発見できず



# GW150914: LIGOチームによるEM フォローアップのまとめ論文

- Abbott et al. でApJLに投稿 (2016/2/27)

LOCALIZATION AND BROADBAND FOLLOW-UP OF THE GRAVITATIONAL-WAVE TRANSIENT GW150914

B. P. ABBOTT<sup>1</sup>, R. ABBOTT<sup>1</sup>, T. D. ABBOTT<sup>2</sup>, M. R. ABERNATHY<sup>1</sup>, F. ACERNESE<sup>3,4</sup>, K. ACKLEY<sup>5</sup>, C. ADAMS<sup>6</sup>, T. ADAMS<sup>7</sup>, P. ADDESSO<sup>3</sup>, R. X. ADHIKARI<sup>1</sup>, V. B. ADYA<sup>8</sup>, C. AFFELDT<sup>8</sup>, M. AGATHOS<sup>9</sup>, K. AGATSUMA<sup>9</sup>, N. AGGARWAL<sup>10</sup>, O. D. AGUIAR<sup>11</sup>,

F. ABE<sup>317</sup>, M. DOI<sup>318</sup>, K. FUJISAWA<sup>319</sup>, K. S. KAWABATA<sup>320</sup>, T. MOROKUMA<sup>318</sup>, K. MOTOHARA<sup>318</sup>, M. TANAKA<sup>321</sup>, K. OHTA<sup>322</sup>,  
K. YANAGISAWA<sup>323</sup>, AND M. YOSHIDA<sup>320</sup>

The J-GEM Collaboration

- J-GEMとしては、MOUの絡みもあり、GW150914発生当時の参加メンバーを共著者に入れてもらった。
- J-GEMからの貢献としては、KWFCの24平方度サーベイ

Optical									
DECam	$i, z$	$i < 22.5, z < 21.5$	3.9, 5, 22	100	38	14	14	11	18344, 18350
iPTF	$R$	$R < 20.4$	3.1, 3, 1	140	3.1	2.9	0.0	0.2	18337
KWFC	$i$	$i < 18.8$	3.4, 1, 1	24	0.0	1.2	0.0	0.1	18361

# GW150914: J-GEM 手一ム論文 (通称: 諸隈論文) → PASJ 投稿予定

---

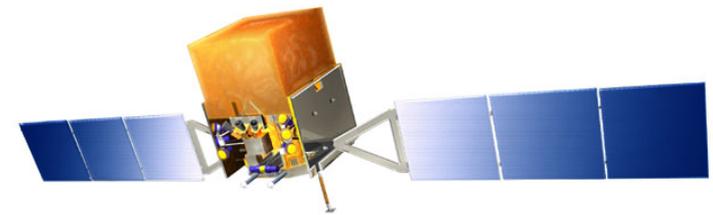
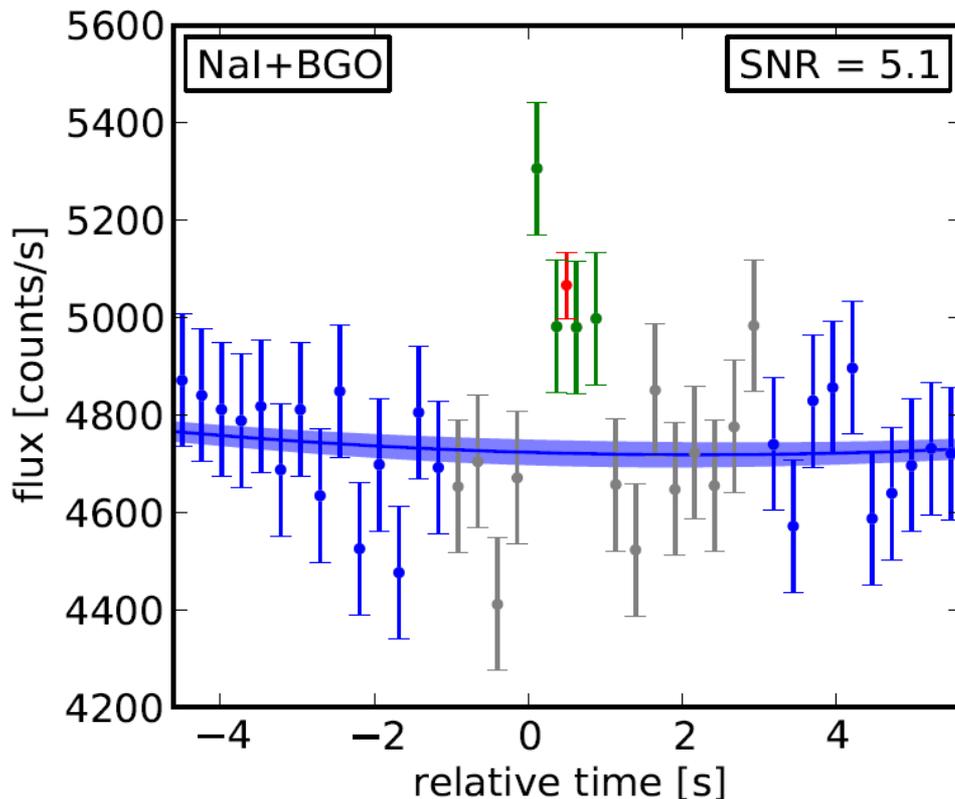
## J-GEM Follow-Up Observations to Search for Optical Counterparts of The First Gravitational Wave Source GW150914

Tomoki MOROKUMA<sup>b1</sup>, Masaomi TANAKA<sup>e2</sup>, Yuichiro ASAKURA<sup>c3</sup>, Fumio ABE<sup>c</sup>, Paul J. TRISTRAM<sup>nz</sup>, Yousuke UTSUMI<sup>a</sup>, Mamoru DOI<sup>b1</sup>, Kenta FUJISAWA<sup>i</sup>, Ryosuke ITOH<sup>a</sup>, Yoichi ITOH<sup>k</sup>, Koji S. KAWABATA<sup>a</sup>, Nobuyuki KAWAI<sup>f</sup>, Daisuke KURODA<sup>g</sup>, Kazuya MATSUBAYASHI<sup>j</sup>, Kentaro MOTOHARA<sup>b1</sup>, Katsuhiko MURATA<sup>c</sup>, Takahiro NAGAYAMA<sup>h</sup>, Kouji OHTA<sup>j</sup>, Yoshihiko SAITO<sup>f</sup>, Yoichi TAMURA<sup>b1</sup>, Nozomu TOMINAGA<sup>d,z</sup>, Makoto UEMURA<sup>a</sup>, Kenshi YANAGISAWA<sup>g</sup>, Yoichi YATSU<sup>f</sup>, Michitoshi YOSHIDA<sup>a</sup> and on behalf of J-GEM collaborations

# もしかするとフェルミ衛星が

Connaughton+ 2016

- フェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡が、LIGOの信号の0.4秒後にガンマ線を検出
- 重力波に伴うガンマ線放射か？



フェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡

しかし、Integralでは未検出・・・

質問:

GW150914しか検出できてないの？

- LIGOとのお約束により、言えません。

LIGOは今年1月からお休み中  
次の運転は今年の8月か9月  
から開始予定

# 今後のJ-GEM

- LIGO O2 & Virgo O1にむけての準備
  - データ解析システムの整備
  - すばるHSC観測時間の確保
- Kagraチームとの協力
  - アラート通知システムの整備
- ネットワークの拡大
  - 国内連携機関の拡大
  - 東アジア連携体制の構築
  - GROWTH (Global Relay of Observatories Watching Transients Happen) との連携

# まとめ

- 重力波は人類が宇宙を見るための最後のフロンティア
- 重力波は直接検出された
  - 最新重力波望遠鏡 LIGO、Virgo、KAGRA
- 重力波望遠鏡の位置精度は悪い→電磁波追跡観測が必須
- 世界中で電磁波追跡観測網が整備
- J-GEM = 日本が整備している電磁波追跡観測網
- 「重力波検出＋電磁波対応天体検出」によって重力波天文学をひらきたい