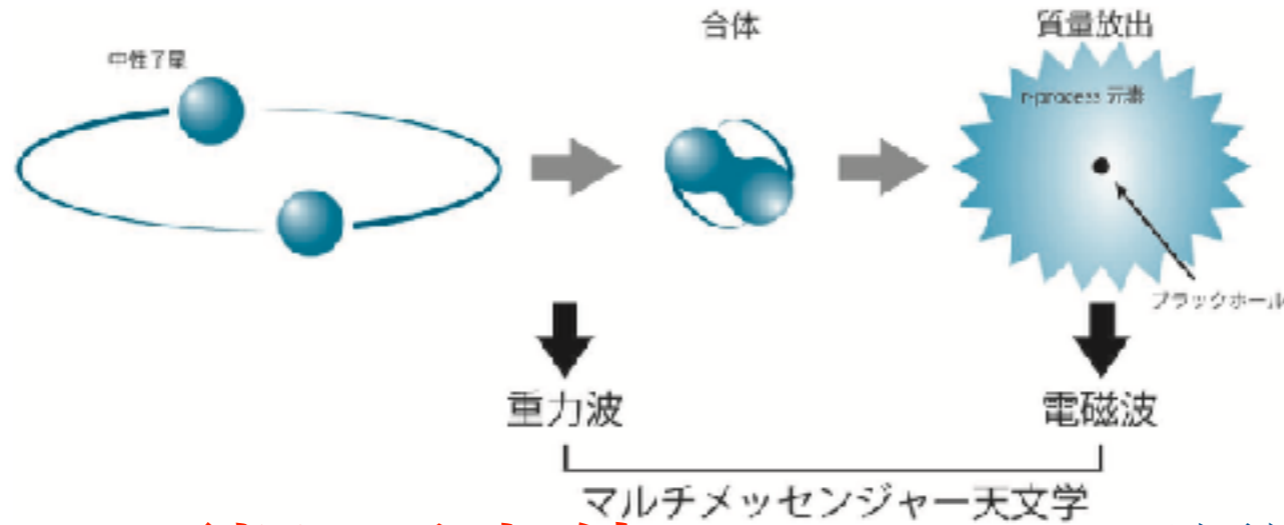


# 重力波可視光対応天体探査

内海洋輔 (広島大学) + J-GEM collaboration

冨永望 (甲南大学), 朝倉悠一郎, 阿部文雄 (名古屋大学), Paul Tristram (Mt. John天文台), 諸隈智貴, 土居守, 本原顕太郎, 田村陽一, 酒向重行, 大澤亮 (東京大学), 藤沢健太 (山口大学), 伊藤亮介, 植村誠, 川端弘治, 吉田道利 (広島大学), 伊藤洋一 (兵庫県立大学), 河合誠之, 斉藤嘉彦, 谷津陽一 (東京工業大学), 田中雅臣, 黒田大介, 柳澤顕史 (国立天文台), 松林和也, 太田耕司 (京都大学), 村田勝寛 (名古屋大学), 永山貴宏 (鹿児島大学)

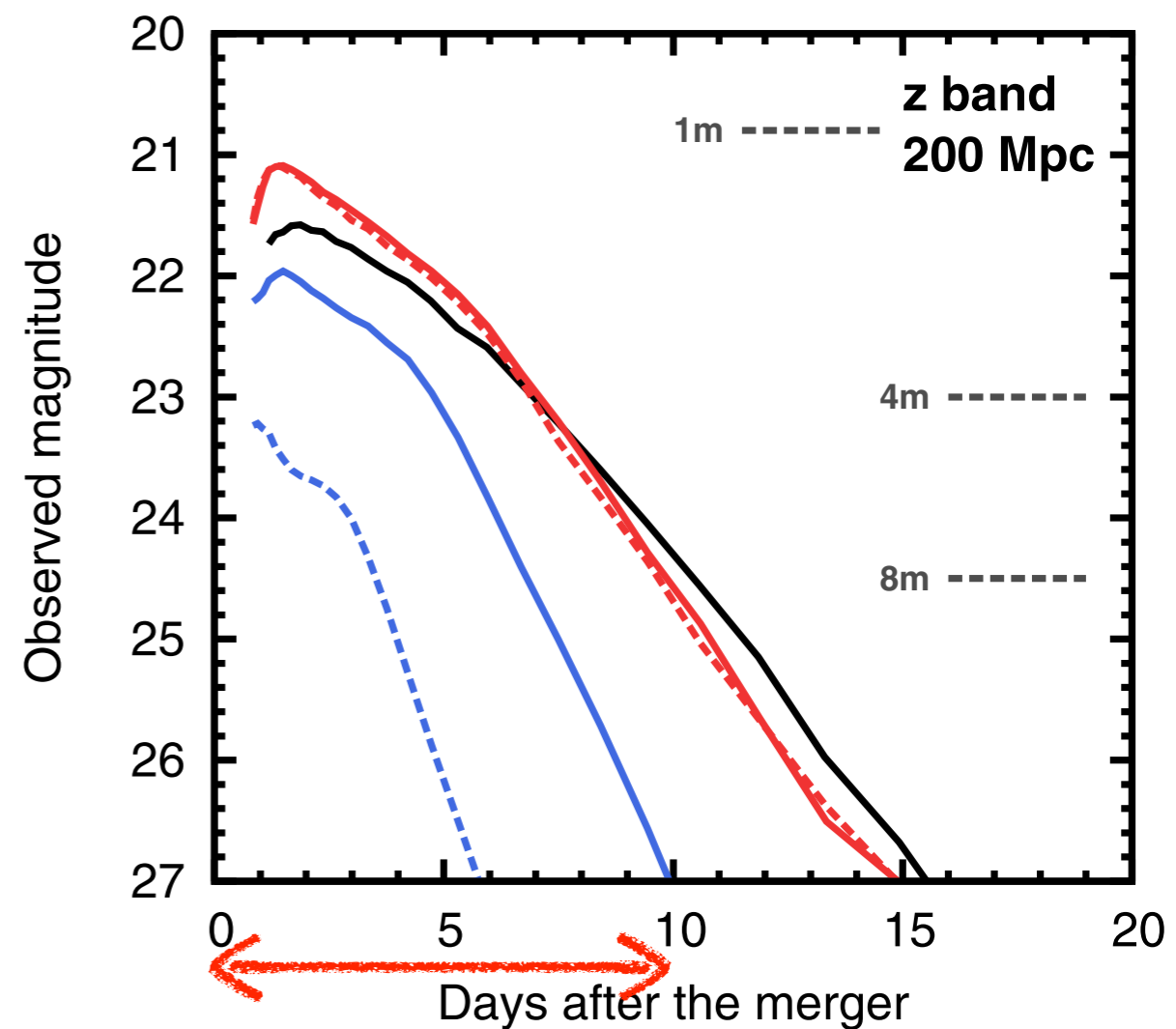
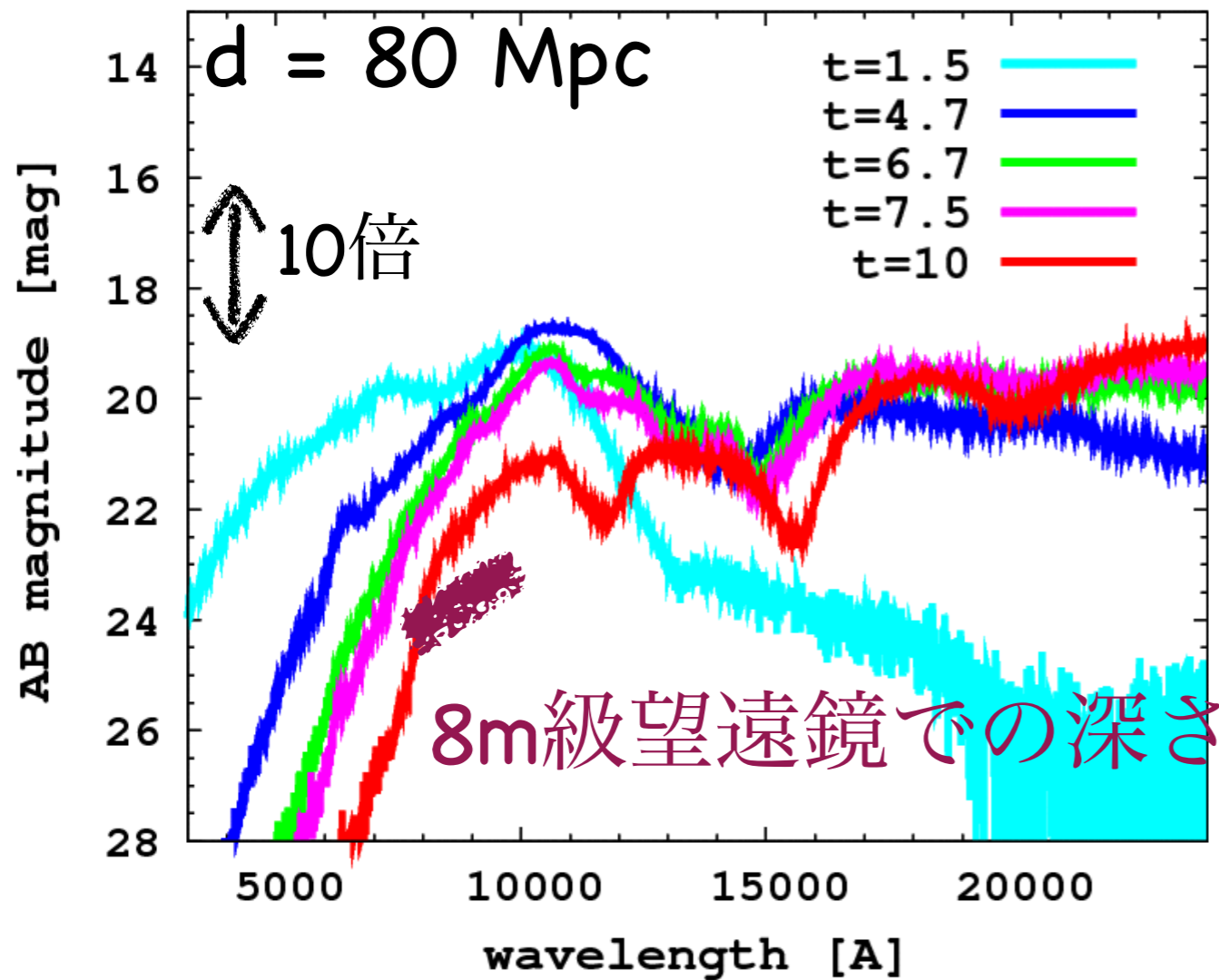
# 重力波源候補：中性子星合体



田中(2016)天文月報

赤い@可視-近赤外

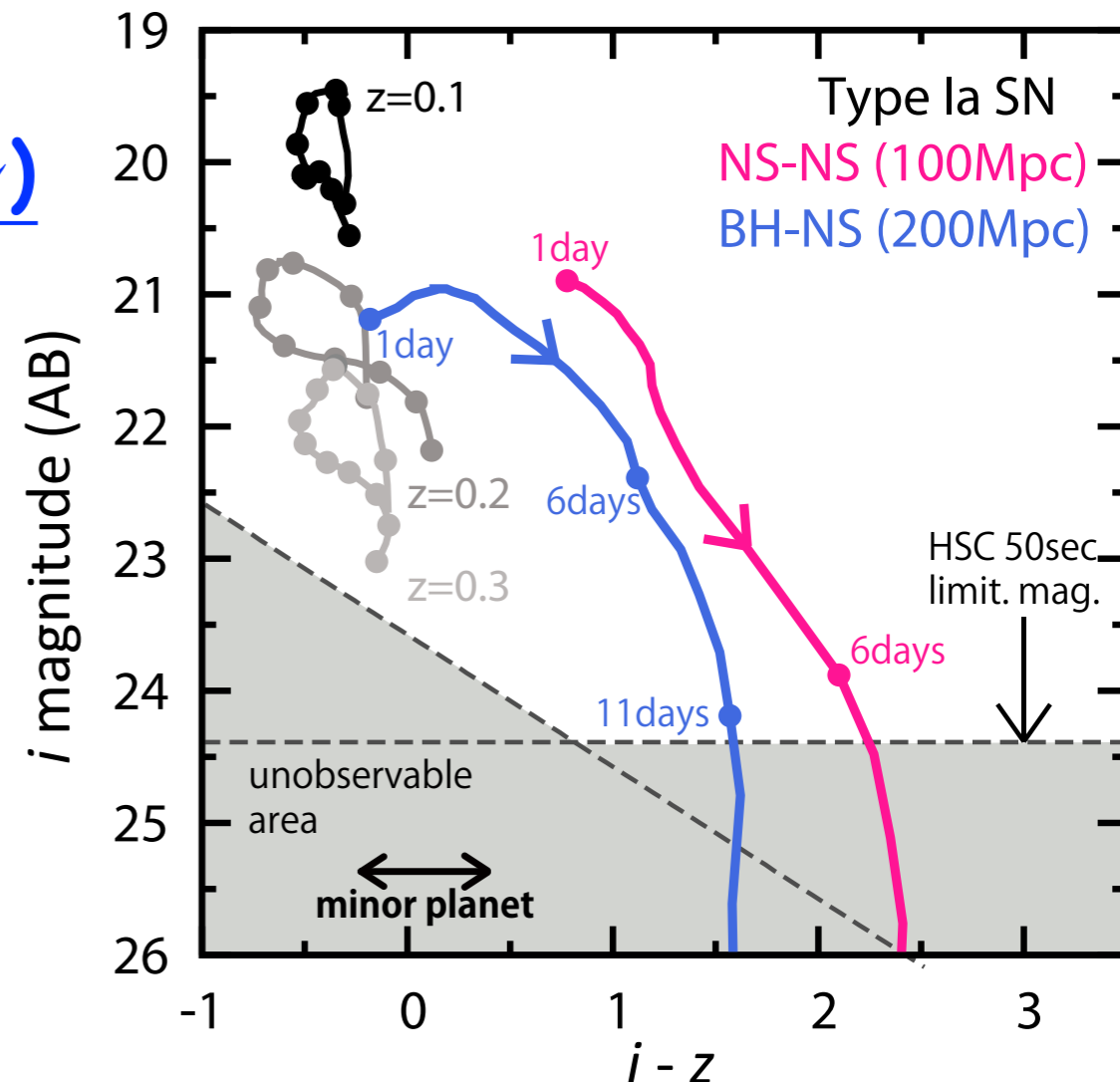
1週間程度で暗くなる



10 days

# どのように中性子星合体を選び出すか

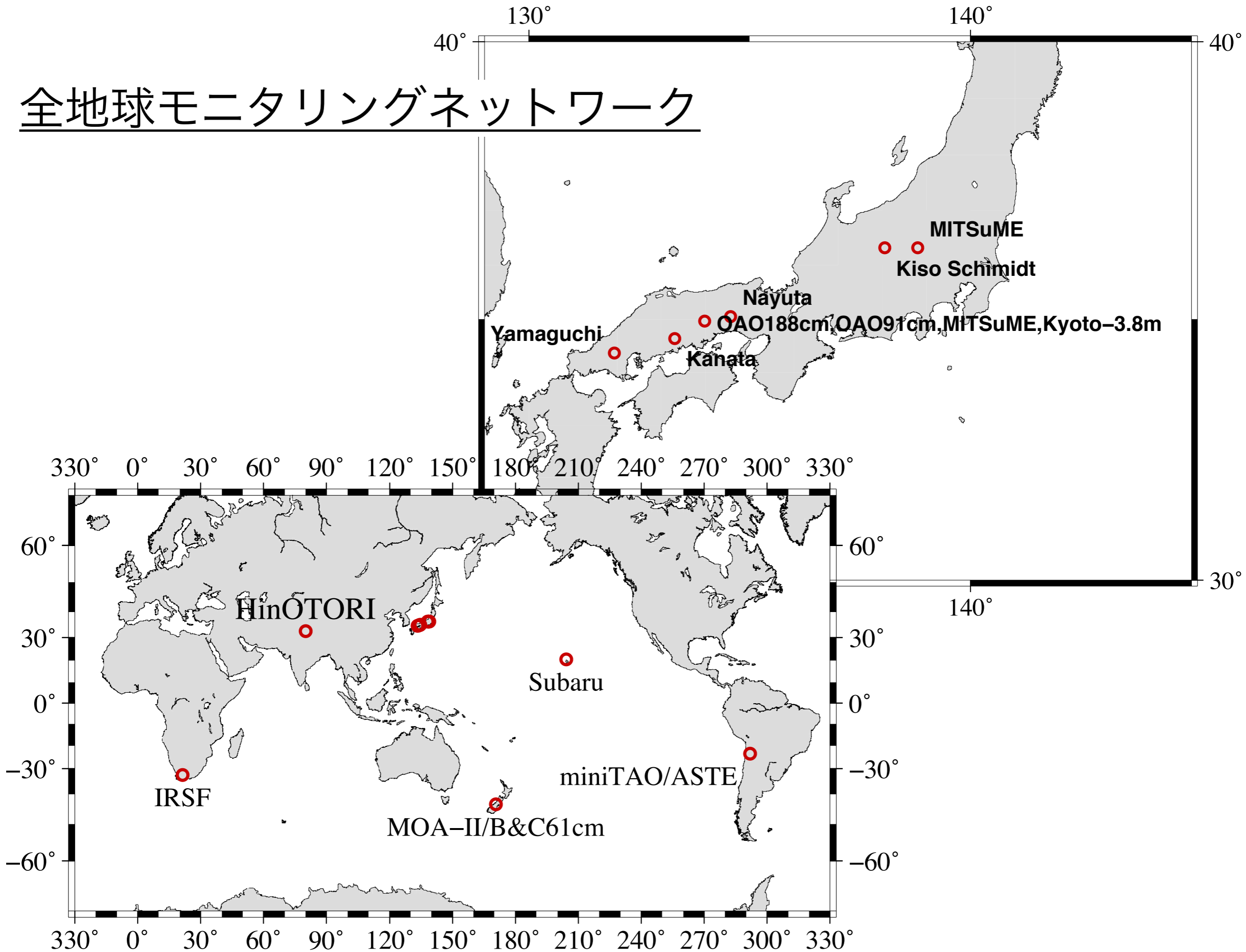
- たくさんのコンタミ
    - 変光星、超新星、AGN、移動天体・・・
    - $O(100)$ - $O(1000)$ のコンタミから1つの中性子星合体を選びたい
  - 光度変動、スペクトル情報から高効率な選択方法
    - 2バンドでの撮像:  **$i-z$ で赤い**
    - 数日で暗くなる(速いタイムスケール)
  - 重力波天体は系外銀河に付随
    - 定常的に光っている銀河・星が邪魔
    - 画像の引き算
    - 系外変動天体
      - 数日のタイムスケール
      - $\sim O(1) \text{ deg}^{-2}$  w/ すばる望遠鏡
- (TM+2008, Yoshida+submitted)



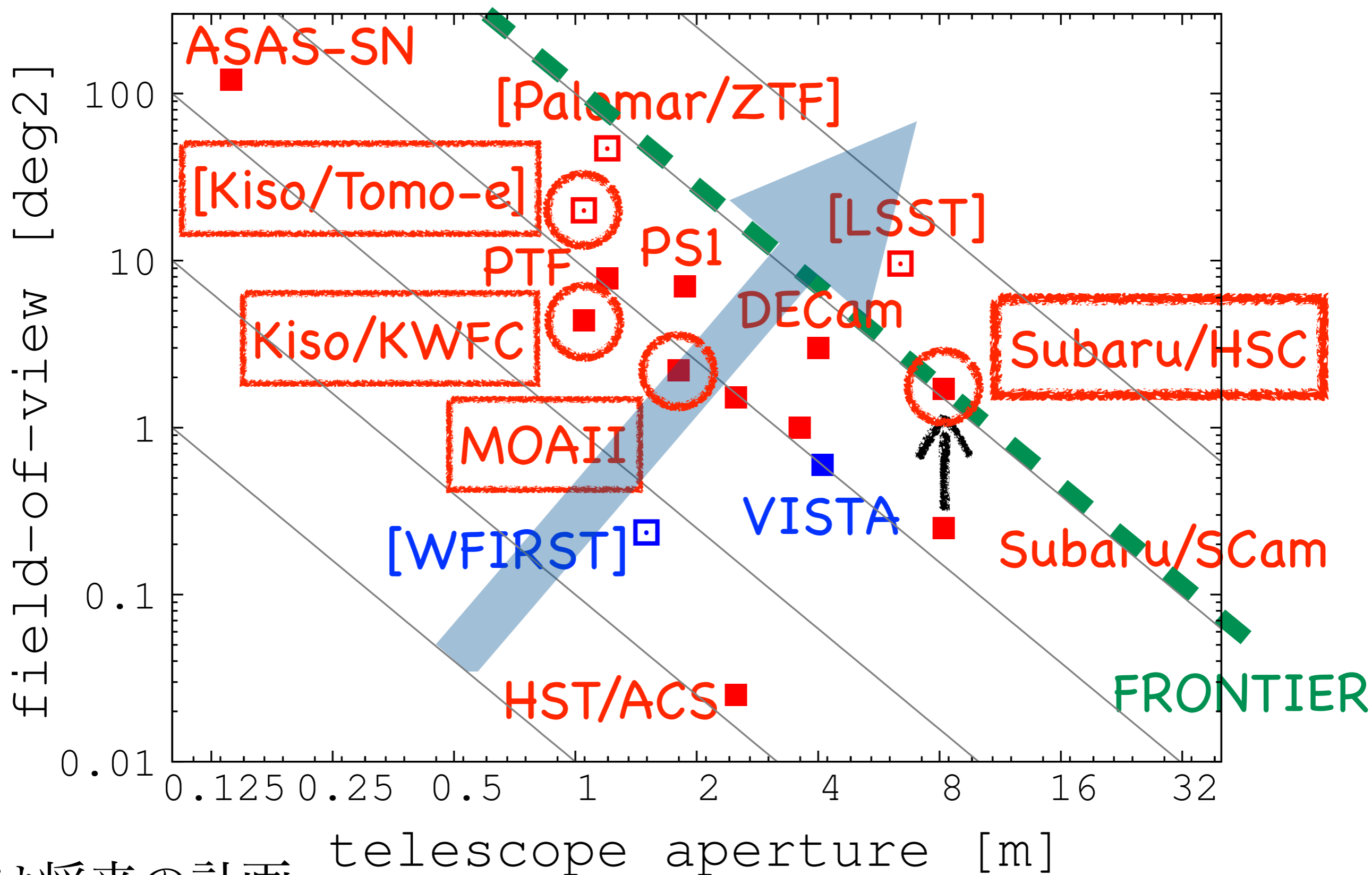
# J-GEM = Japanese collaboration for Gravitational wave Electromagnetic follow-up

- LIGO, Virgo, KAGRAからの重力波アラートを受けて  
突発天体の可視・近赤外、電波でのサーベイを行う
- LIGO-Virgo Collaboration (LVC)とのMoU (2014年4月)
- PI: 吉田道利氏 (広島大学)
- 16望遠鏡
  - 多経度
  - 北天 + 南天
  - 広視野観測 + 近傍銀河ターゲット観測 (GWGC, White+2011)
  - 高機動力
  - 分光観測
  - 電波

# 全地球モニタリングネットワーク



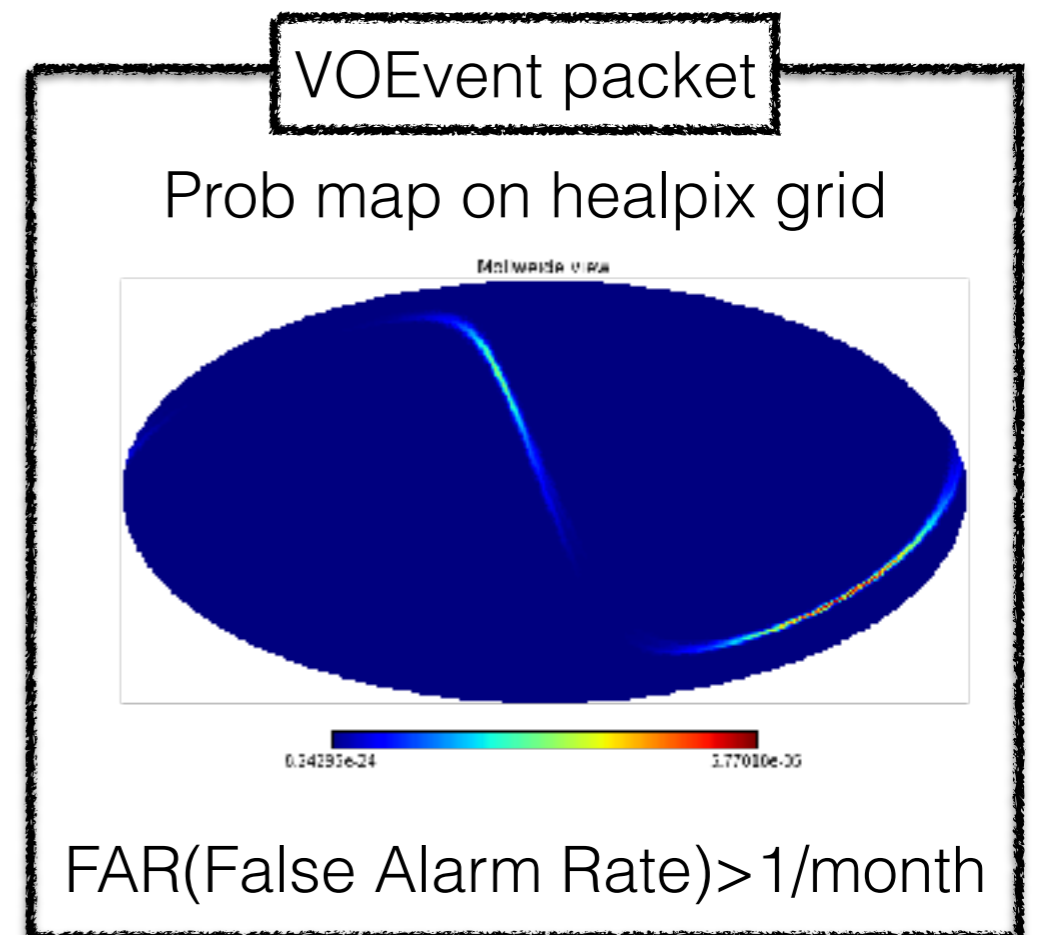
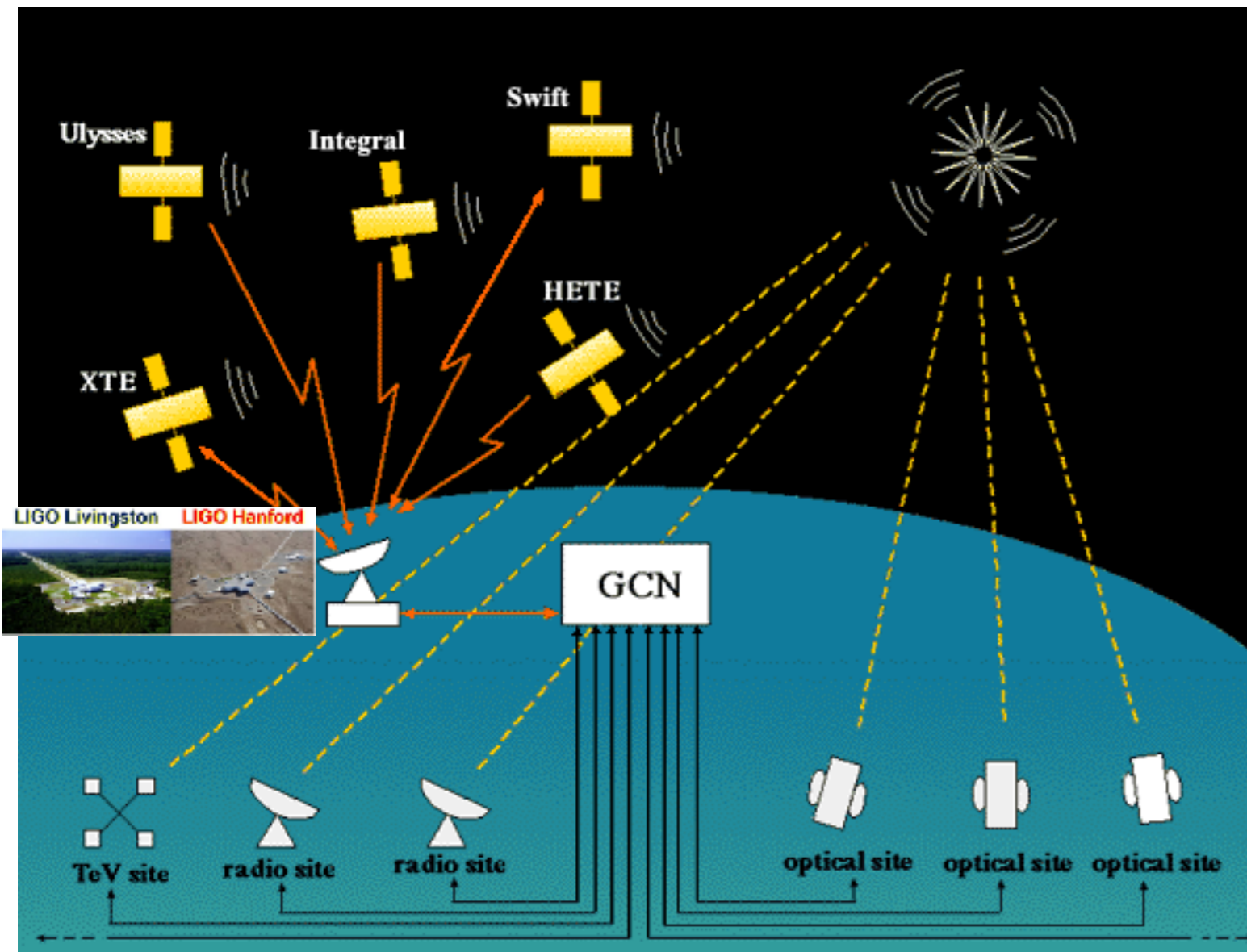
# 広視野サーベイ能力 (可視近赤外望遠鏡)



□は将来の計画

# 即時通報システムはある

GRB (GWよりも即時性の要求) やそれ以前の変動天体通知ネットワークに相乗りする形  
Gamma-ray Coordinates Network/Transient Astronomy Network (GCN/TAN)



利用するためには守秘義務などを取り決めた MoU を LIGO と結ぶ必要がある

# 高機動力の例：数十秒での観測を実現

TITLE: GCN CIRCULAR  
NUMBER: 20039  
SUBJECT: GRB 161014A: **Kanata** optical observation  
DATE: 16/10/14 16:56:59 GMT  
FROM: Michitoshi Yoshida at HASC, Hiroshima U <yoshidam@hiroshima-u.ac.jp>  
(略)

#	T0+	MID-UT	T-EXP	R mag.	R err	R limit
-----						
<b>86</b>		12:32:48	30	15.1	0.2	17.0
-----						

TITLE: GCN CIRCULAR  
NUMBER: 20036  
SUBJECT: GRB 161014A: **MITSuME-Akeno** optical observation  
DATE: 16/10/14 13:14:41 GMT  
FROM: Yoichi Yatsu at Tokyo Tech. <yatsu@hp.phys.titech.ac.jp>  
(略)

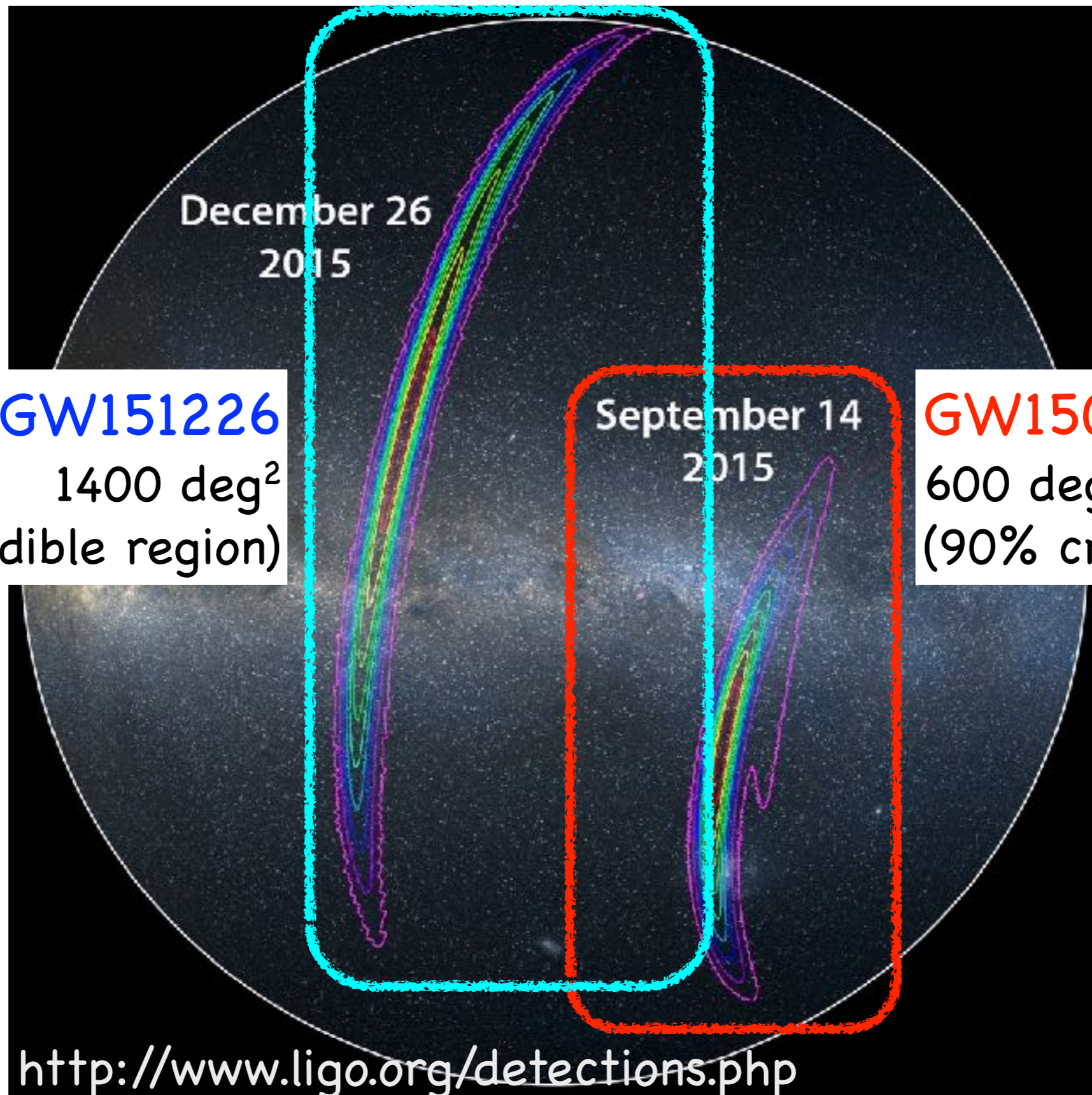
T0+[sec]	MID-UT	T-EXP[sec]	Rc	Rc_err
-----				
<b>46</b>	12:32:23	30	~14.52	0.06
-----				

T0+ : Elapsed time after the burst

T-EXP: Total Exposure time



# skymap (最終版)



**GW151226**

1400 deg<sup>2</sup>

(90% credible region)

September 14

2015

**GW150914**

600 deg<sup>2</sup>

(90% credible region)

<http://www.ligo.org/detections.php>

# J-GEM follow-up for GW150914

Mon, 14 Sep 2015 18:59:45

GW150914 検出！しかし GCN notice は流れなかった

Wed, 16 Sep 2015 14:39:44 (Singer)

GCN circular が E-mail で送信された

Wed, 16 Sep 2015 15:07 (吉田)

観測ターゲットリスト作成, visibility が悪いので IRSF (南ア)/ MOA (NZ)に依頼

Thu, 17 Sep 2015 28:07:34 (諸隈, 田中雅臣)

KWFC で観測を開始

Fri, 18 Sep 2015

LIGO O1 はじまる

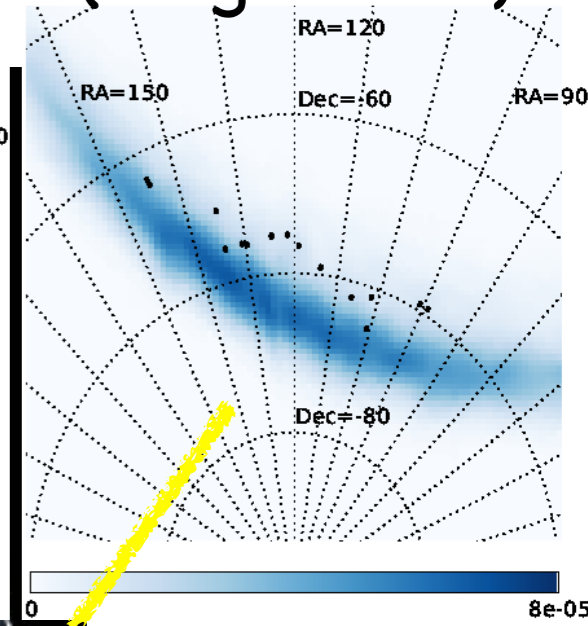
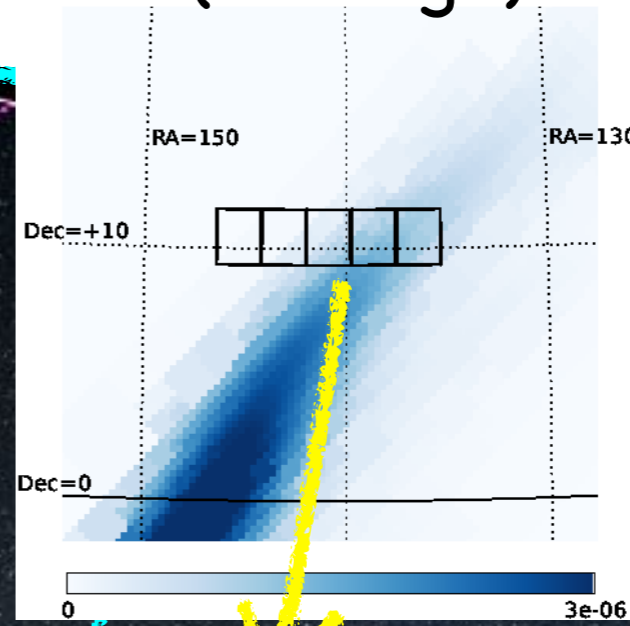
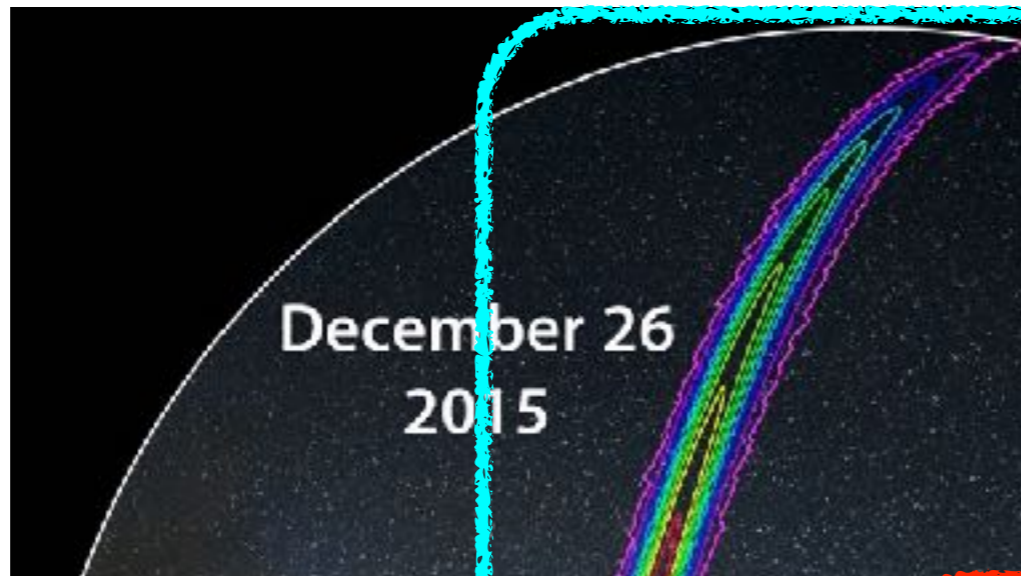
Sun, 20 Sep 2015 ?????? (朝倉ほか)

B&C61cm で観測を開始

# skymap (最終版)

Morokuma+2016 Kiso/KWFC  
(24 deg<sup>2</sup>)

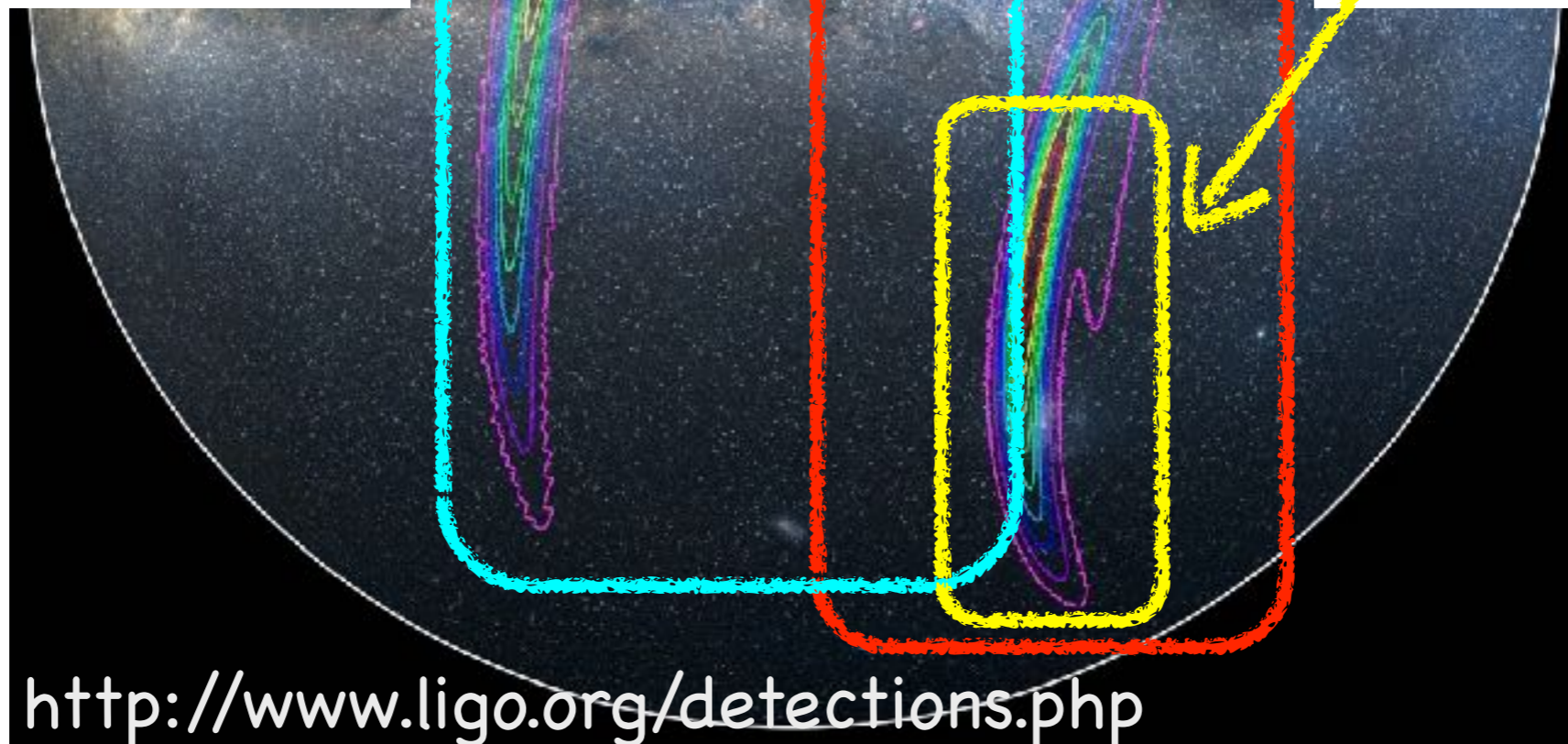
B&C Tripole5  
(18 galaxies)



**GW151226**  
1400 deg<sup>2</sup>  
(90% credible region)

September 14  
2015

**GW150914**  
600 deg<sup>2</sup>  
(90% credible region)



<http://www.ligo.org/detections.php>

# J-GEM follow-up for GW151226

Sat, 26 Dec 2015 12:38:53.648

GW151226 検出！しかしまた GCN notice は流れなかった

Sun, 27 Dec 2015 26:39:45 (Leo Singer)

GCN circular が E-mail によって流された

Sun, 27 Dec 2015 27:14:22 (内海)

当番観測者（伊藤，中岡，川端）から依頼されターゲットリストを作成

Sun, 27 Dec 2015 30:45:18 (伊藤，中岡，川端，内海)

[Kanata/HOWPol](#) 18銀河の観測と即時解析を実施

Mon, 28 Dec 2015 13:30:23 (吉田)

各観測所へ観測ターゲットを割り当て

From 28 Dec 2015

Observations started with [Nayuta/MINT](#), [Kanata/HONIR](#), [OAO91cm/OAO-WFC](#), [TIT-OAO50cm/MITSuME](#), [Kiso/KWFC](#)

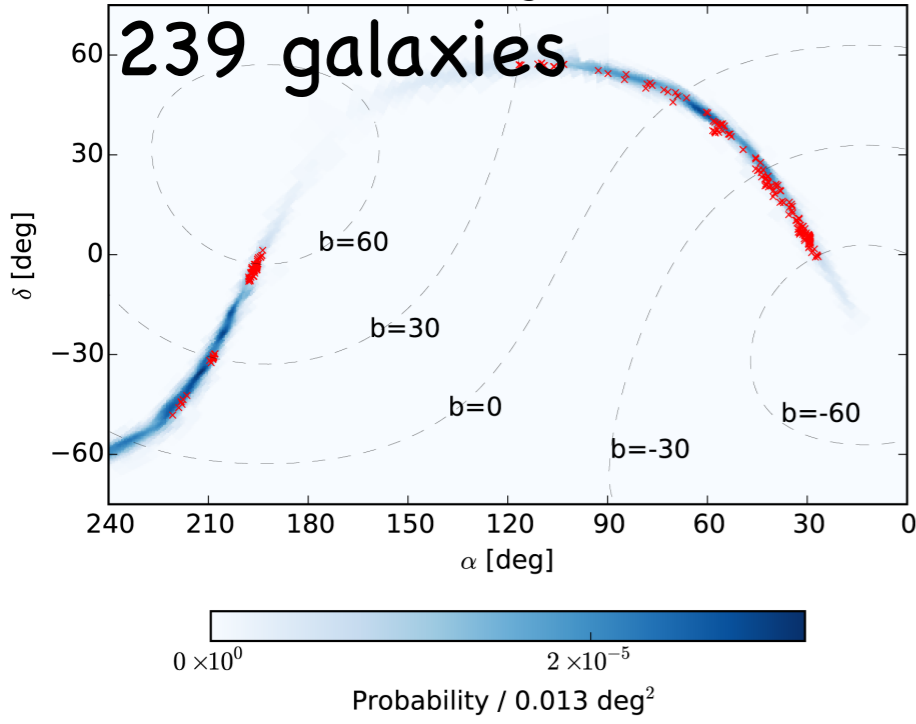
From 29 Dec 2015

Observations started with [MOA-II/MOA-Red](#), [IRSF/SIRIUS](#), [OAO188cm/KOOLS-IFU \(spec\)](#)

Thu, 8 Jan 2016 13:59:03 (吉田，本原，富永，田中，諸隈，仲田，寺居，Finet, 内海)

[HSC 観測開始](#)

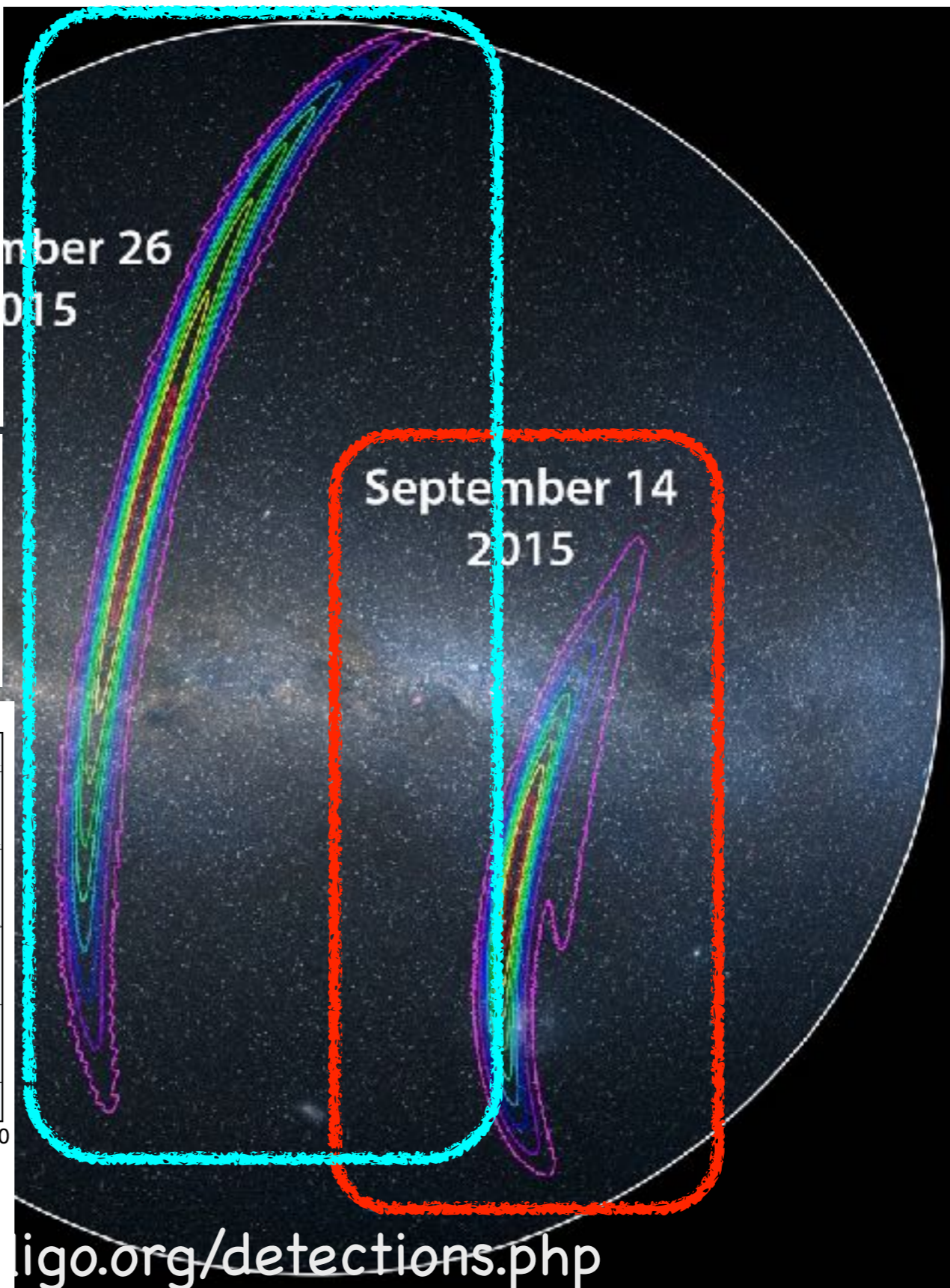
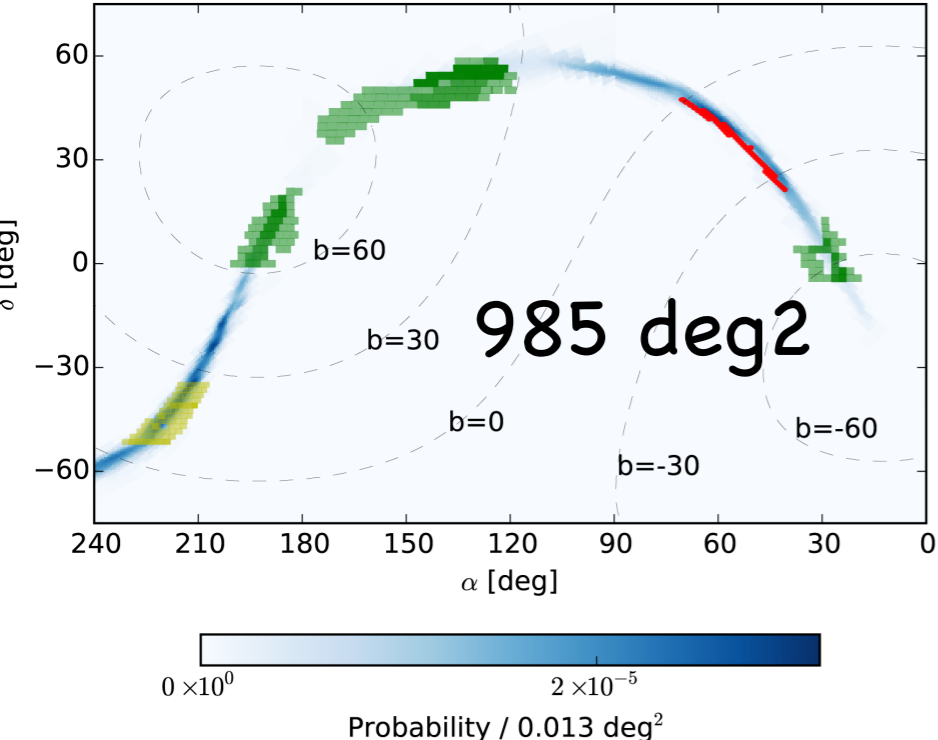
Distribution of observed galaxies for GW151226



反)

**GW151226**  
 1400 deg<sup>2</sup>  
 (90% credible region)

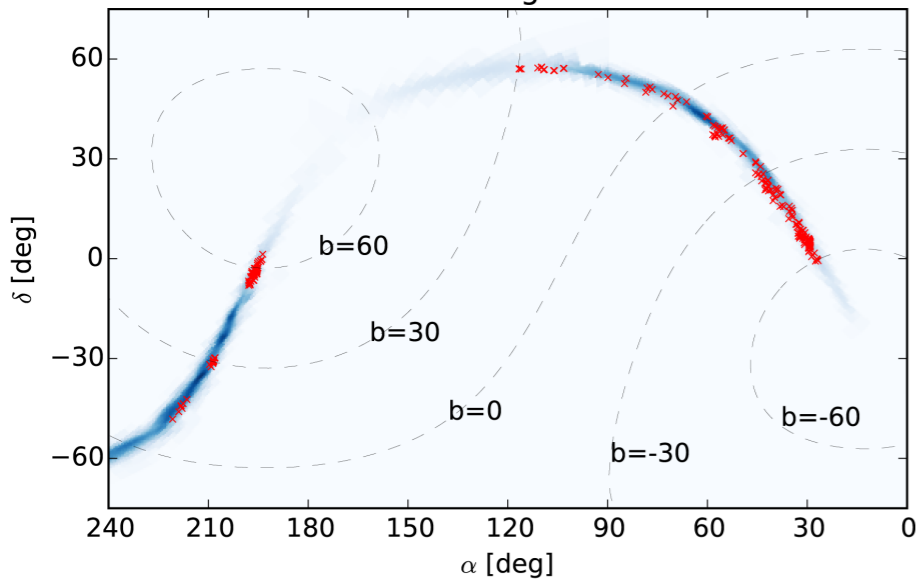
Pointing map for GW151226



[ligo.org/detections.php](http://ligo.org/detections.php)

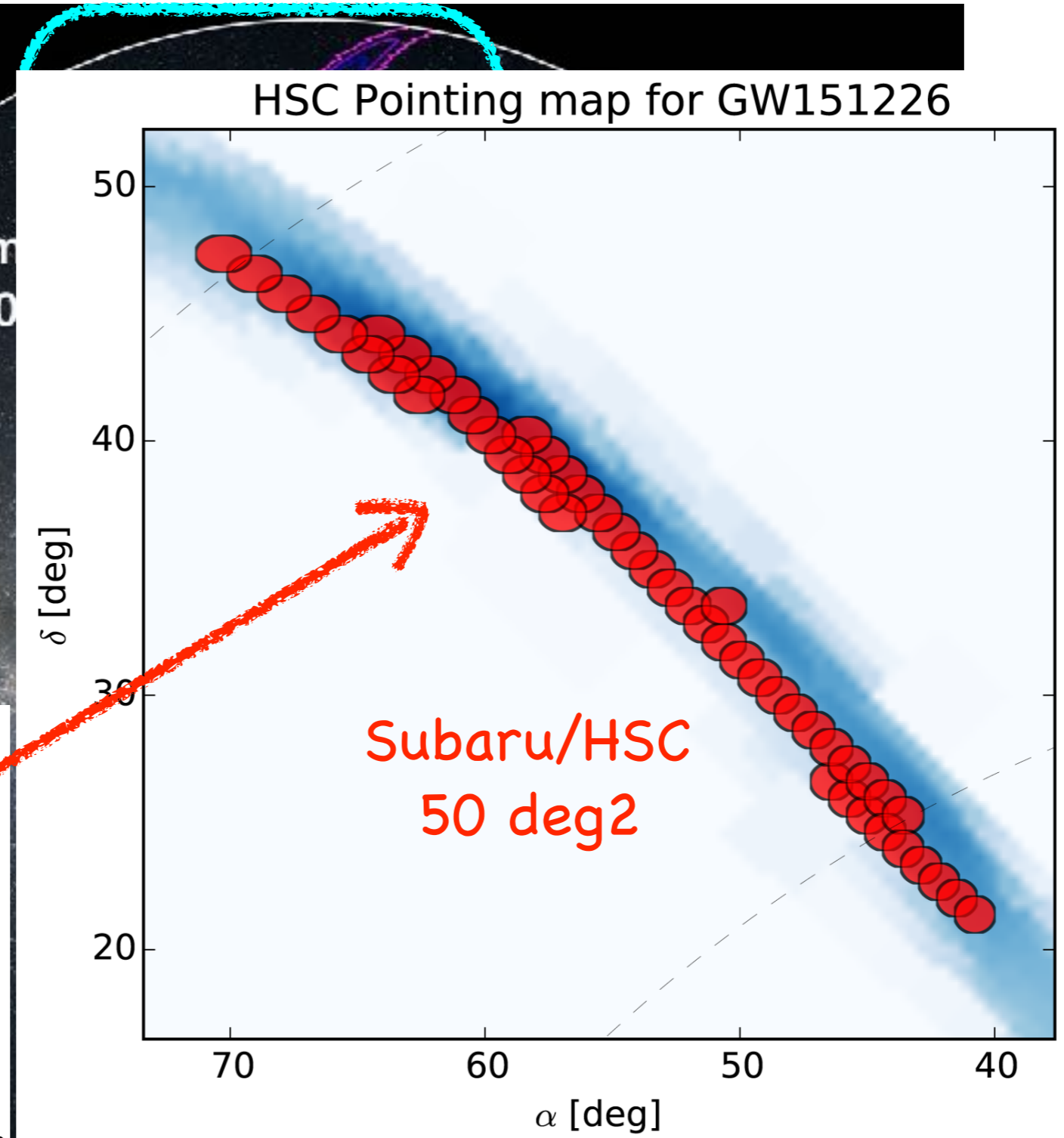
Yoshida+submitted

Distribution of observed galaxies for GW151226

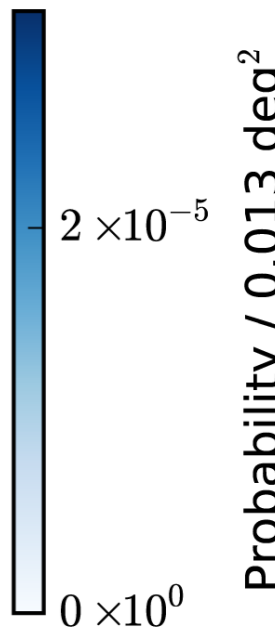


反)

HSC Pointing map for GW151226

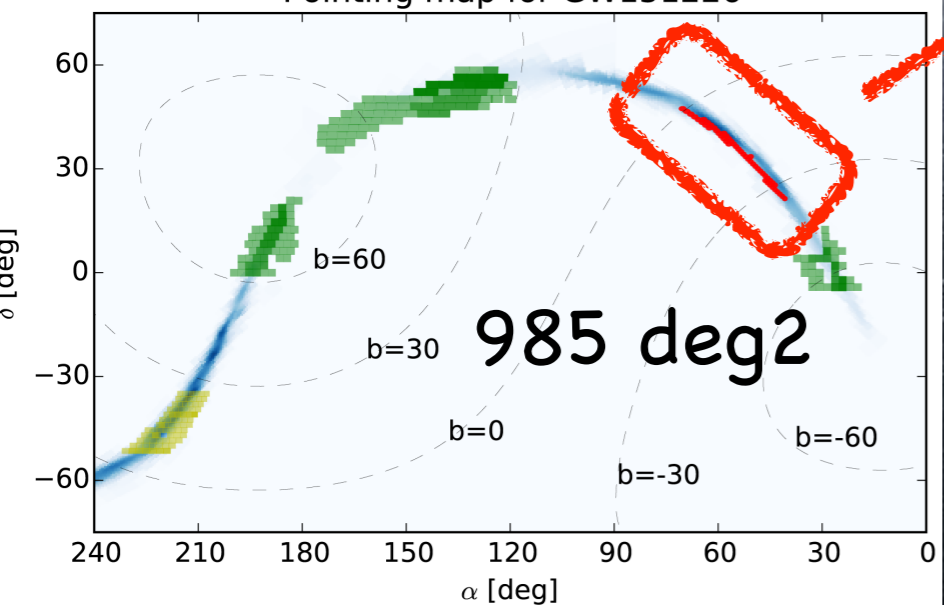


Subaru/HSC  
50 deg<sup>2</sup>

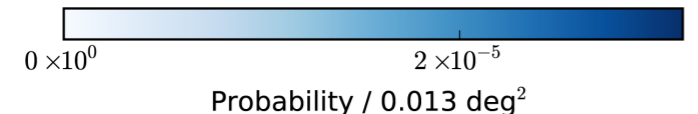


**GW151226**  
1400 deg<sup>2</sup>  
(90% credible region)

Pointing map for GW151226



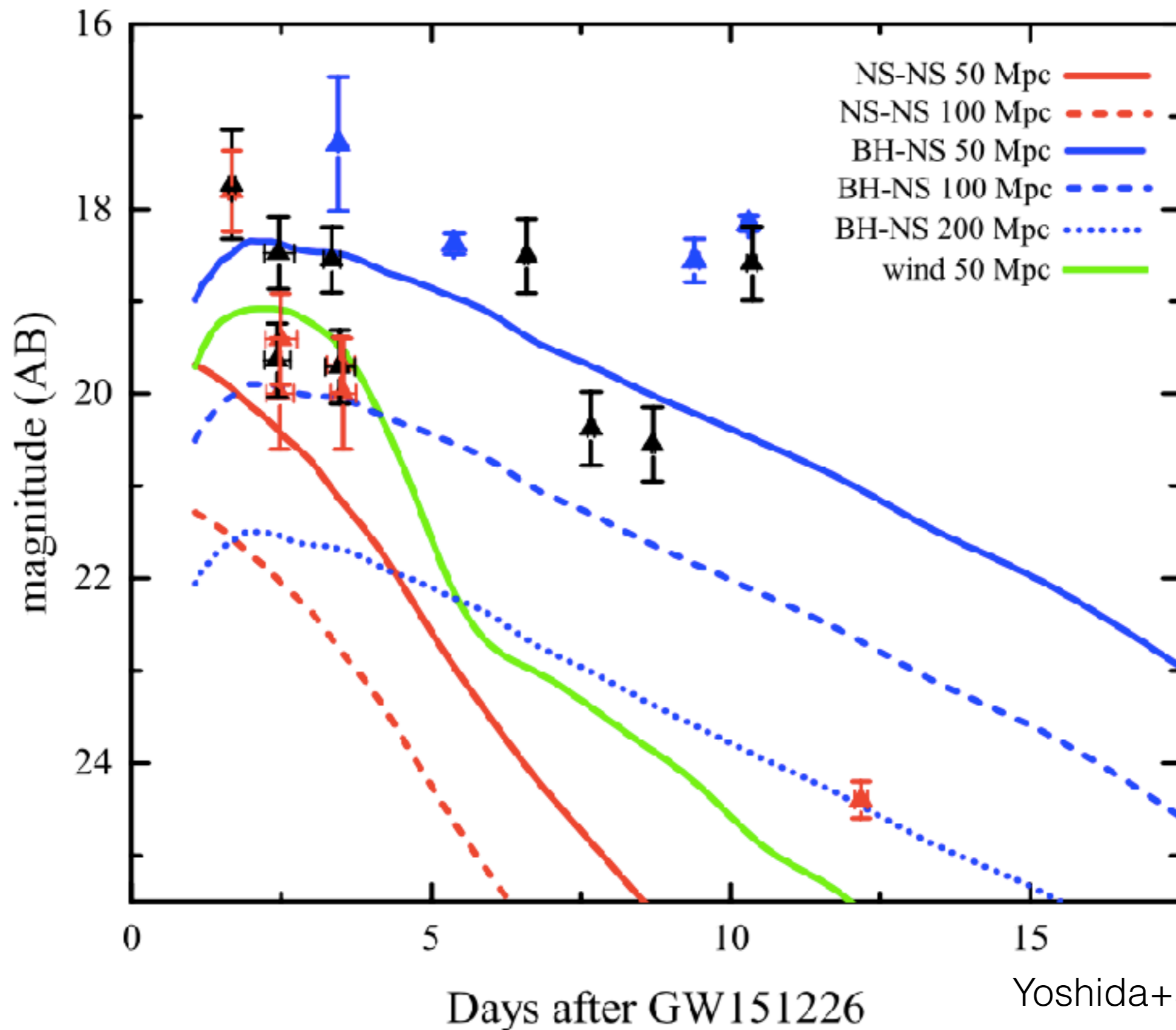
985 deg<sup>2</sup>



Yoshida+submitted

[igo.org/detections.php](http://igo.org/detections.php)

# J-GEM フォローアップの達成深さ



# J-GEM電磁波観測@LIGO 01

GW	GW150914	GW151226
localization (90%)	~600 deg <sup>2</sup>	~1400 deg <sup>2</sup>
area & prob. by LV-EM	~900 deg <sup>2</sup> , ~50%	> 1000 deg <sup>2</sup> , ~90%??
survey by J-GEM	24 deg <sup>2</sup> , 0.1%	985 deg <sup>2</sup> , 29%
nearby galaxies by J-GEM	18 galaxies	239 galaxies
#(telescope)	2	10
Subaru/HSC	not available	i~24.6, z~23.8@50 deg <sup>2</sup>
reference	Morokuma+2016, PASJ, 68, L9	Yoshida+ in prep. (summary) Utsumi+ in prep. (HSC)



# GW151226 HSC follow up

## 検出条件

$|S/N(\text{pdf})| > 5 \text{ sigma}$   
in difference image

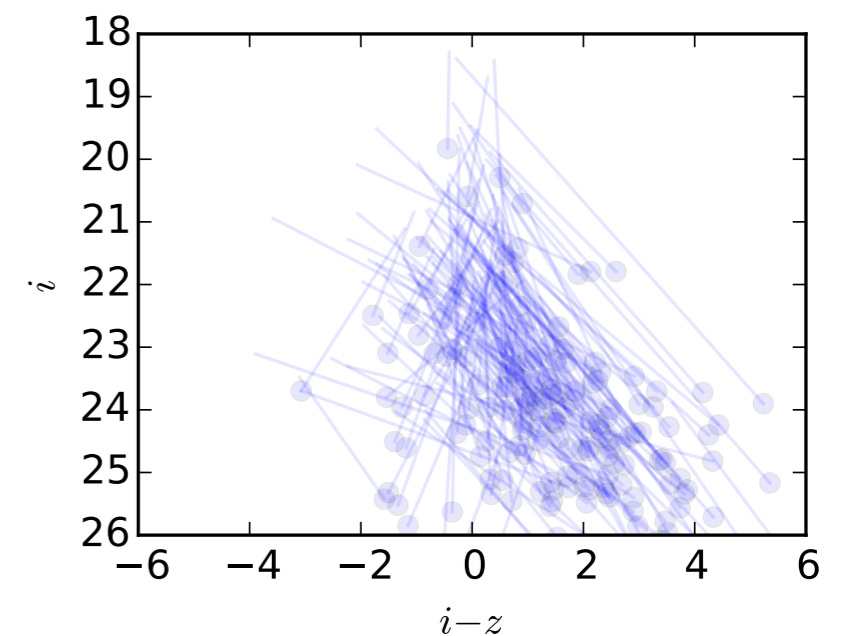
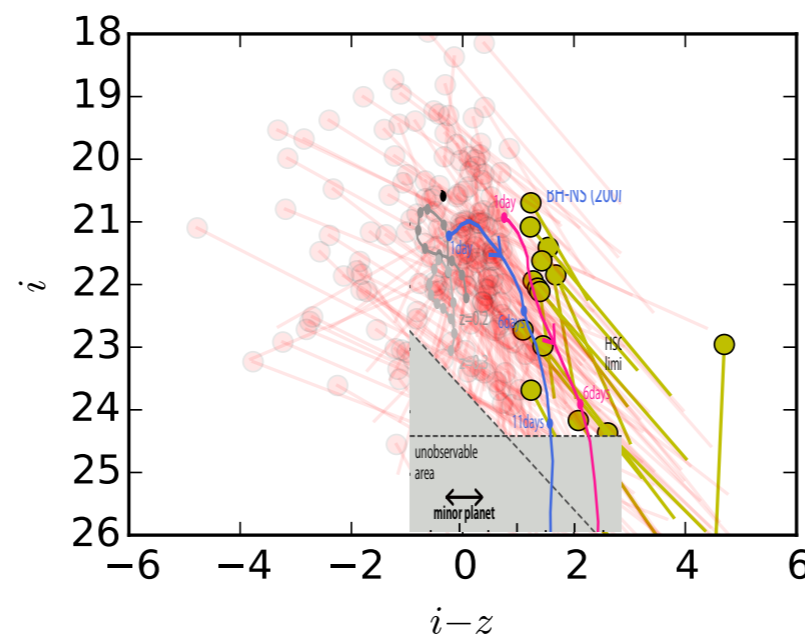
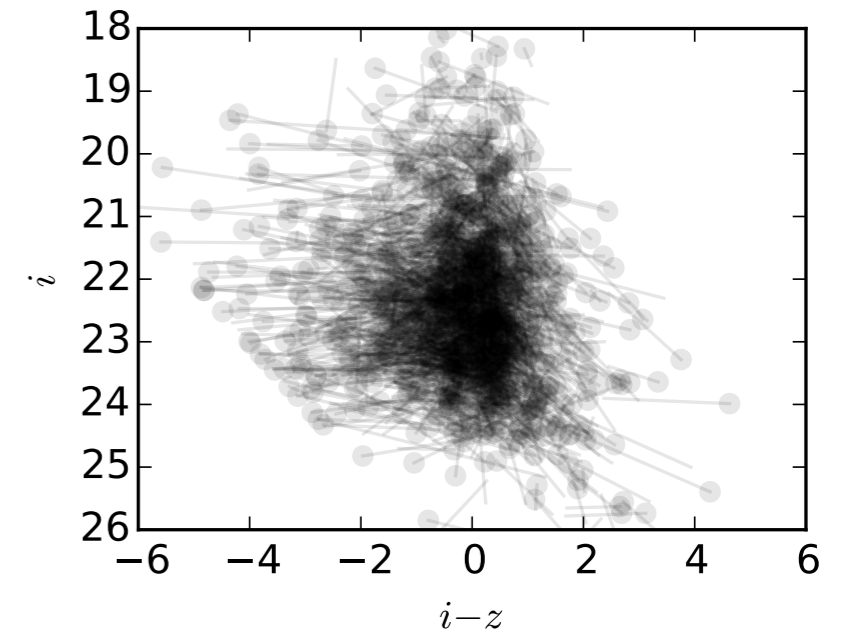
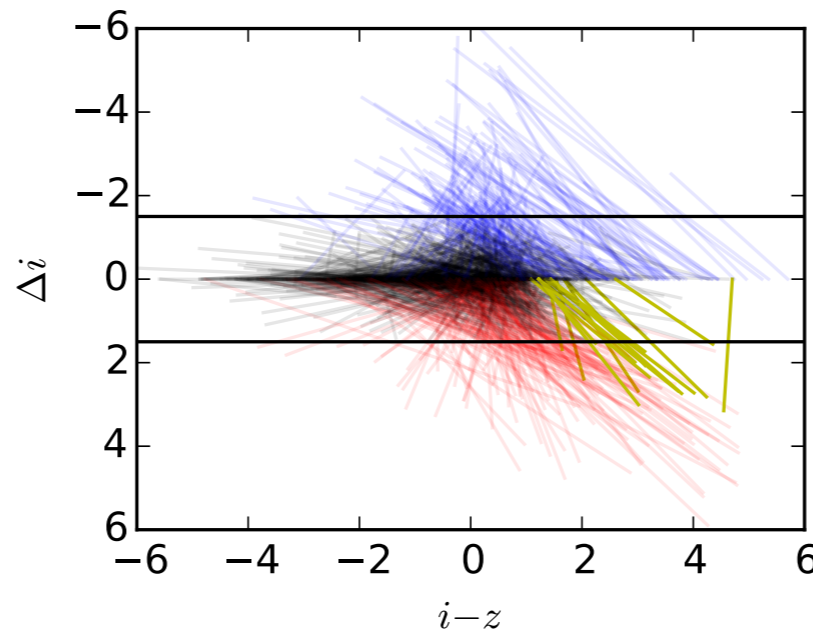
$\text{elongation} > 0.8$

$0.8 < \text{fwhm} < 1.3$

$\text{residual} < 3 \text{ sigma}$   
(psf subtraction in a  
difference image)

$S/N(1.5'' \text{ ap}) > 5 \text{ sigma}$   
in science image

detected in 2 epoch



生き残った天体

1744

急減光( $dm > 1.5$ )

186

赤い( $(i-z)_1 > 1.0$   $(i-z)_2 > 1.5$ )

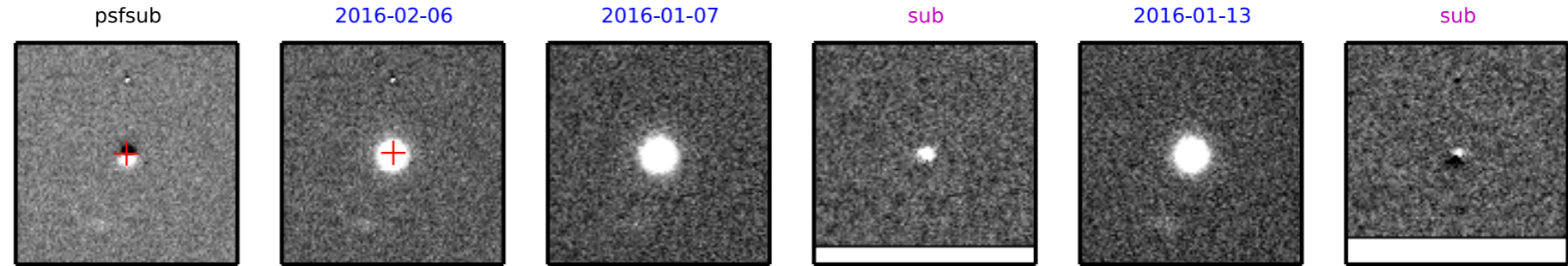
15

銀河に付随するか?

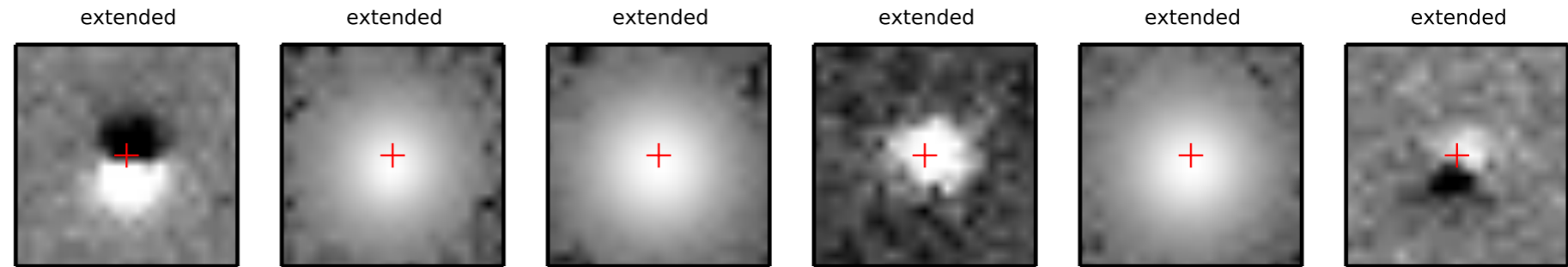
0

# 候補天体例

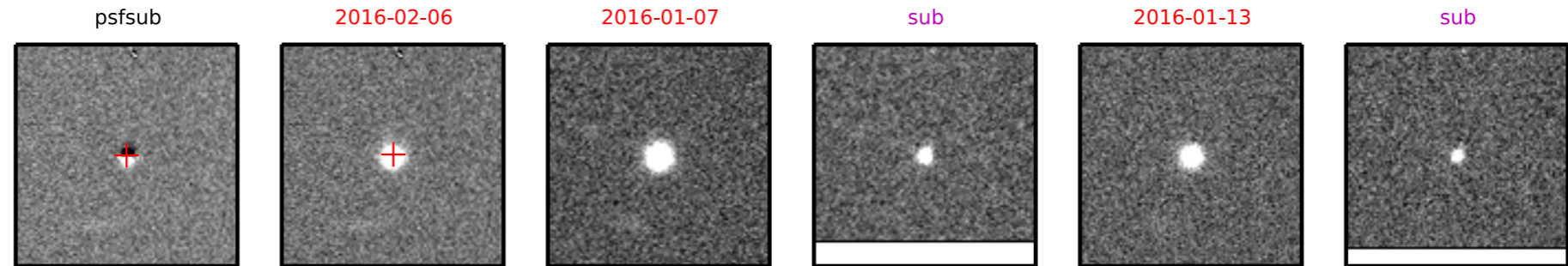
i-band  
100 x 100  
0.168"/pix



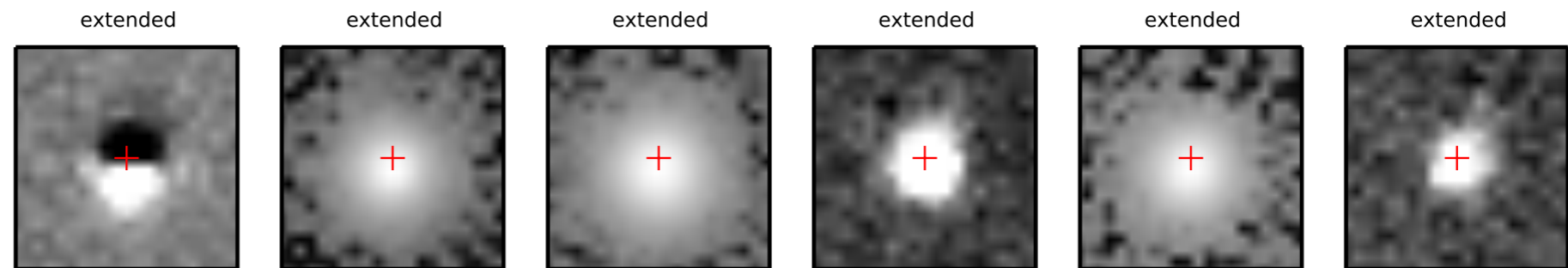
20 x 20



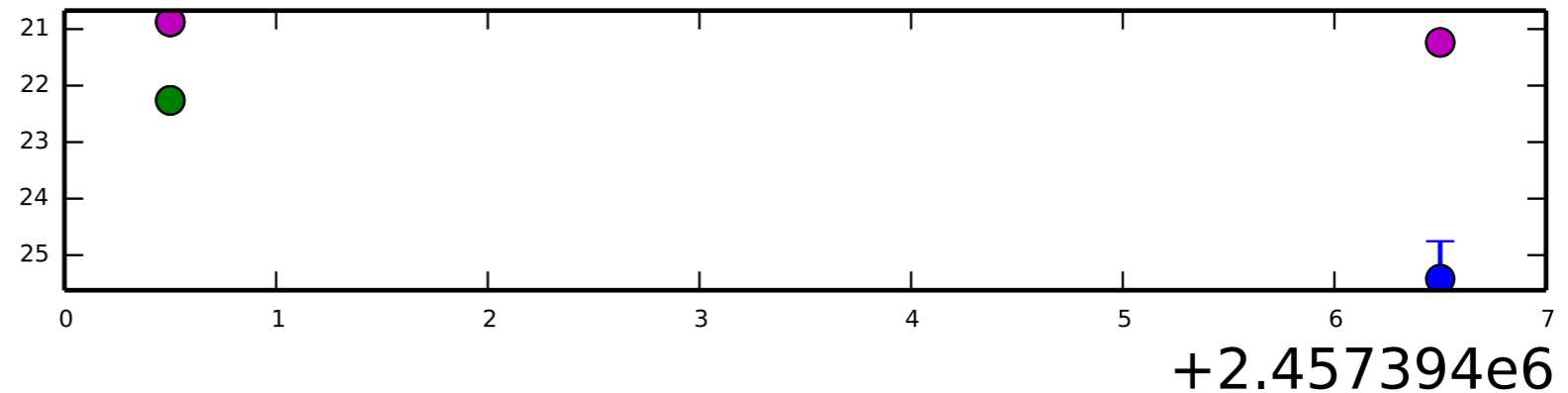
z-band  
100 x 100



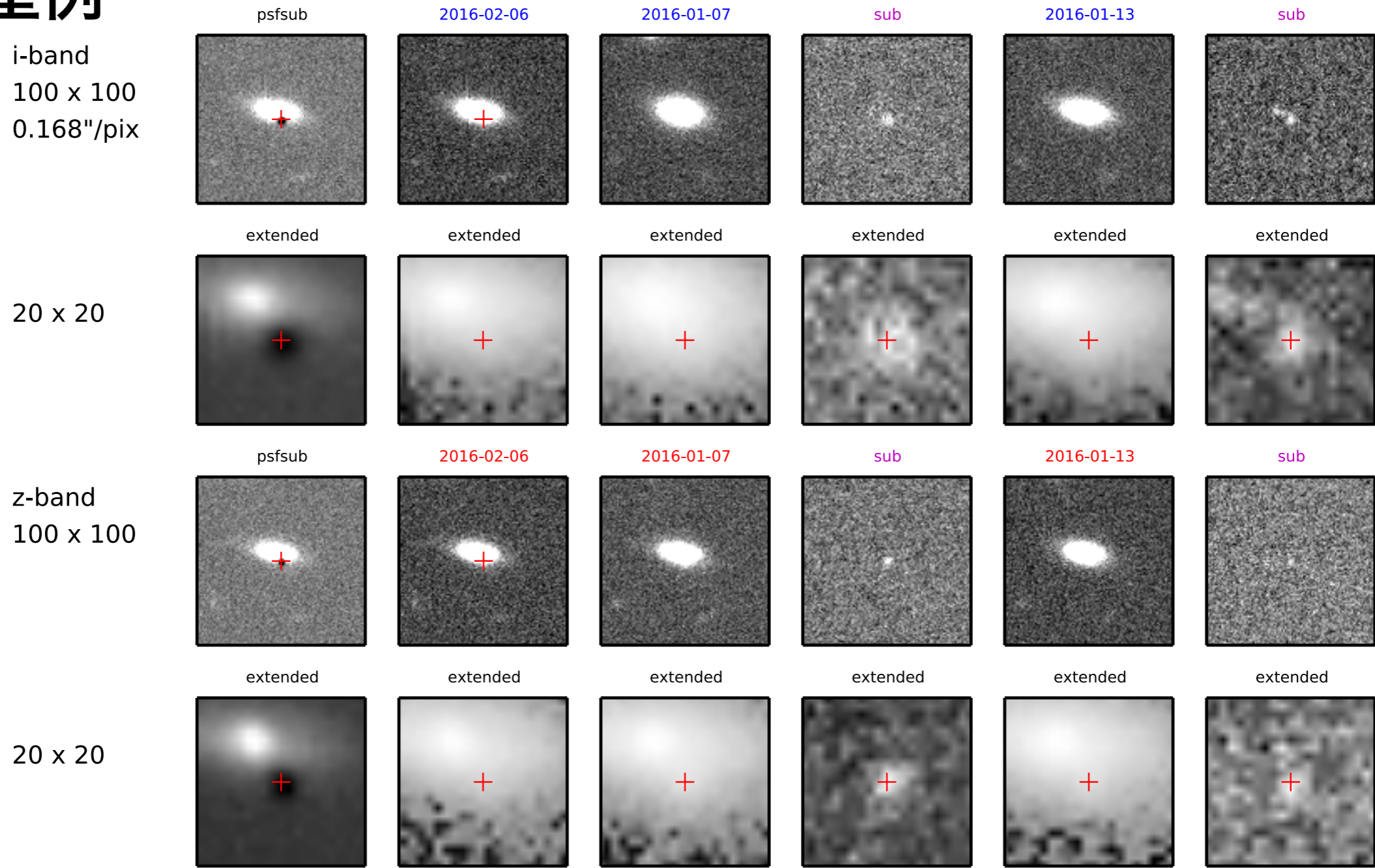
20 x 20



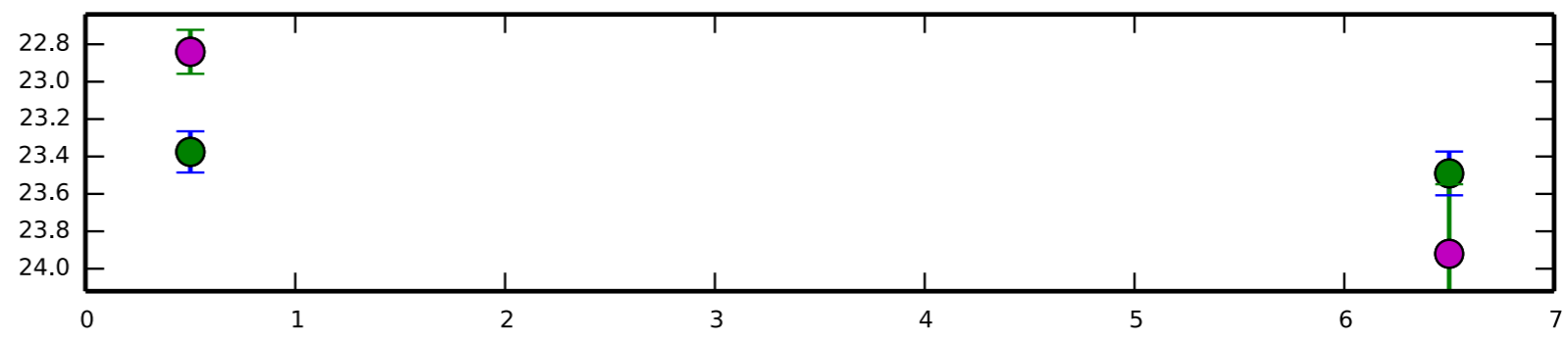
RA: 50.4222492412 deg  
Dec: 33.3732033161 deg  
l: 155d41m03.06  
b: -19d46m28.10  
E(B-V): 0.34792  
i-z: 1.39  
i-z (int): 1.18



# 超新星例



RA: 44.1593807899 deg  
 Dec: 23.8030806907 deg  
 l: 156d31m21.89  
 b: -30d46m47.33  
 E(B-V): 0.18844  
 i-z: 0.54  
 i-z (int): 0.42



+2.457394e6

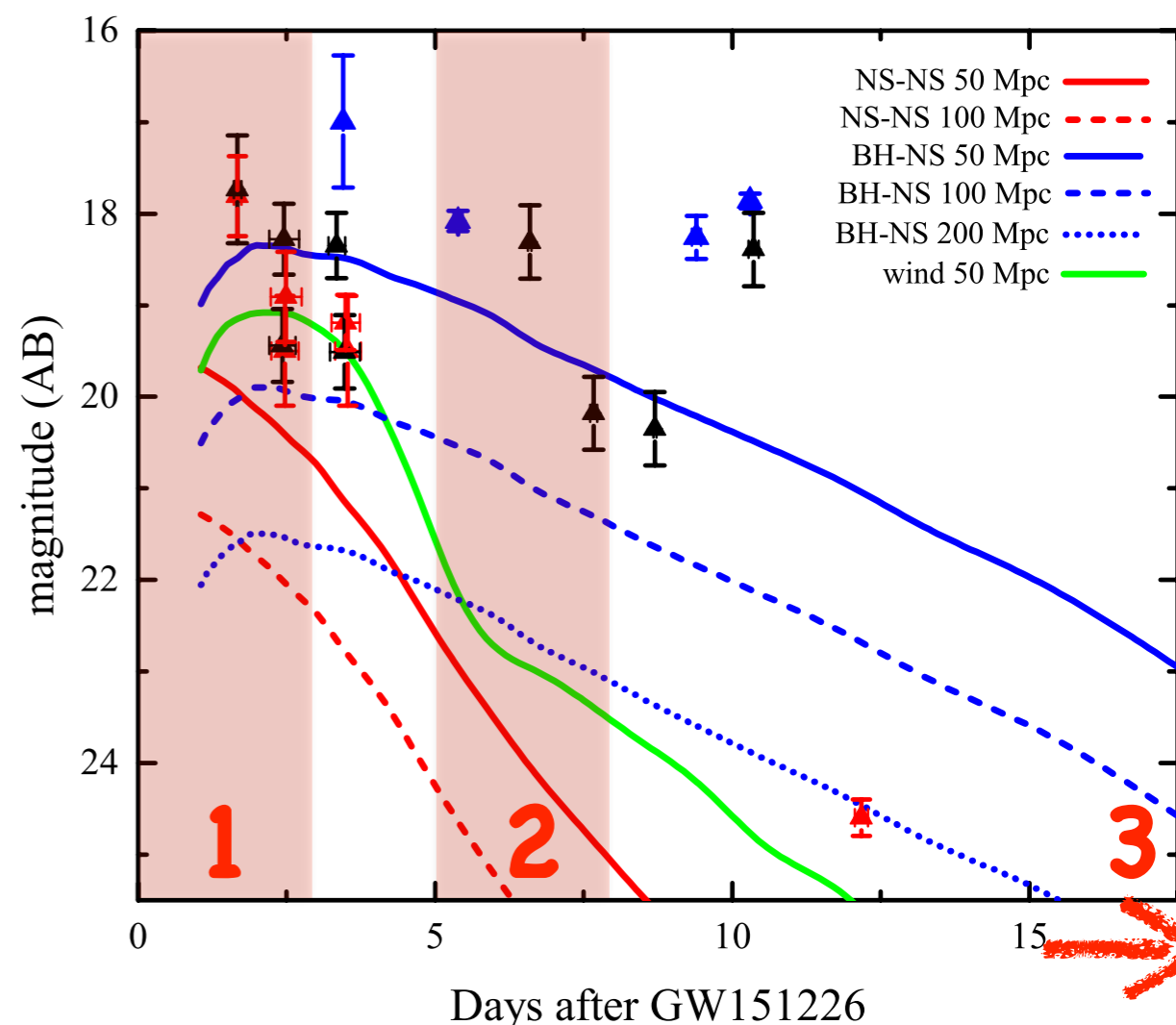
選択条件からは漏れている

# J-GEM観測まとめ@01

- J-GEM
  - 北天・南天、多経度にわたる
  - 可視・近赤外、電波での観測グループ
  - Survey と Targeted モードを併用
  - GW150914: 24 deg<sup>2</sup> + 18銀河
  - GW151226: 985 deg<sup>2</sup> + 391銀河
- すばる/HSCが世界で最も効率の良いサーベイ望遠鏡/装置
  - 3回の観測で区別: アラート直後、数日後、1-2ヶ月後
  - **急減光**して**赤い**天体を探せば良い
- 中小口径望遠鏡の機動力を十分に活かせなかった

# O2でのJ-GEMの観測戦略

- O2開始: 2016年12月? (計6ヶ月間)
- O2とO1の違い
  - **GCN Notice 来るはず** → **機動力**が活きる
  - 得られる情報: 距離, 中性子星を含んでいそうかどうか
  - 感度: 検出数の向上 <==> 共同利用時間(ToO)は限られている
  - 観測ランの後半はAdvanced Virgoが参加予定(O2b)
  - Virgo参加後はlocalizationも改善
- 「電磁波が出そうな天体」  
= NS+NS or NS+BHを優先的に
  - サーベイ観測: すばる/HSC, 木曾シュミット望遠鏡, MOA-II
    - 3回: 直後、数日後、1,2ヶ月後
  - 近傍銀河観測: それ以外で分担



# 観測装置強化：

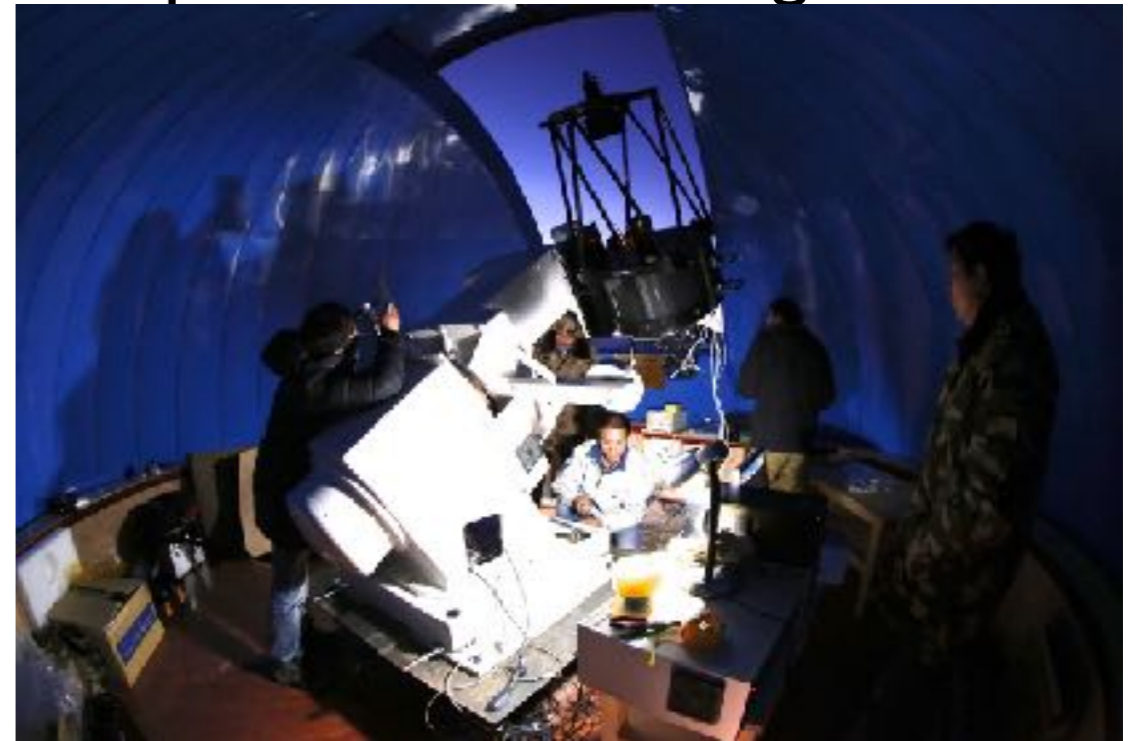
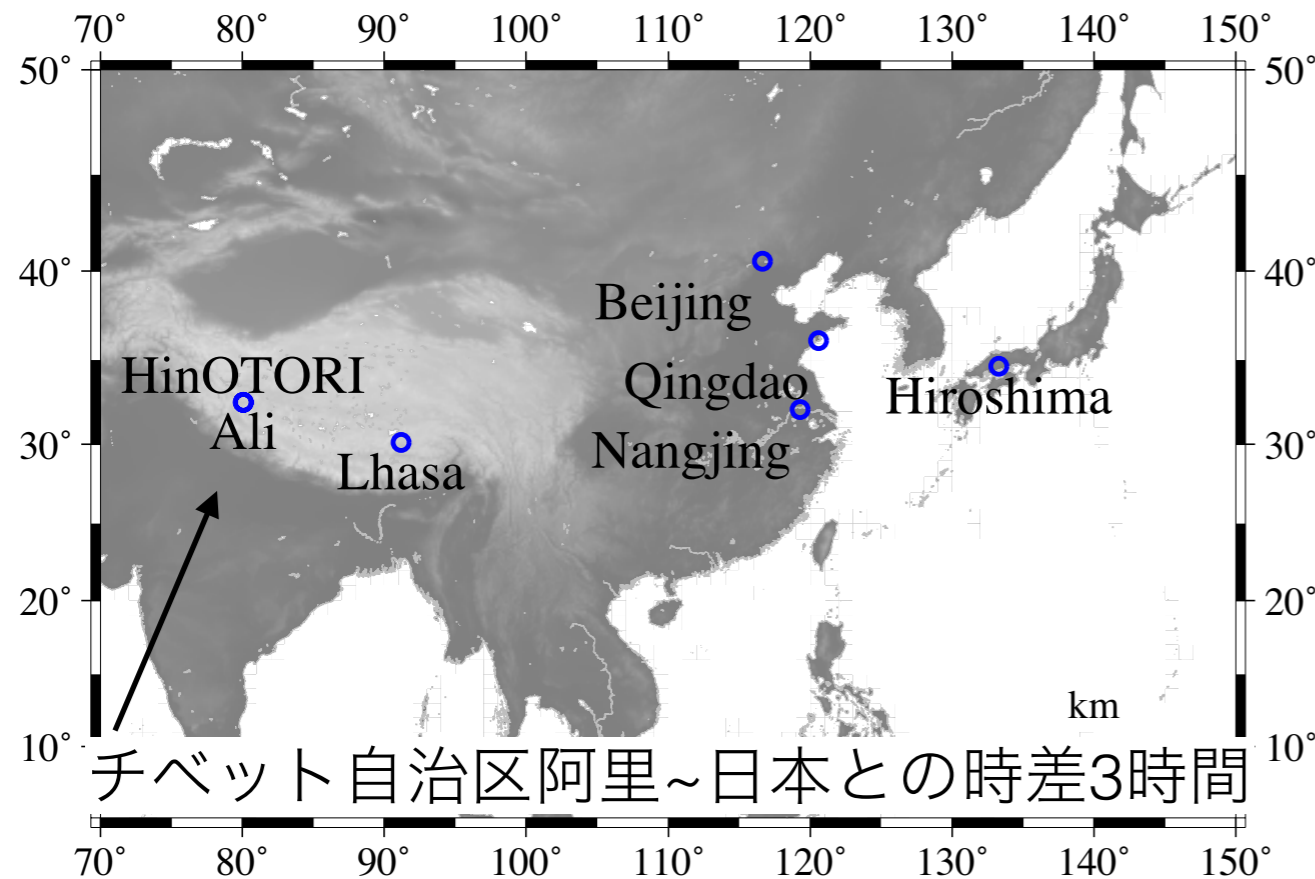
チベットロボット三色撮像カメラ HinOTORI プロジェクト

**H**iroshima **U**niversity **O**perated **T**ibet **O**ptical **R**obotic **I**mager

HinOTORI

Hiroshima University Operated Tibet Optical Robotic Imager

- 日中共同のプロジェクト
- 50cm RC 望遠鏡 u, Rc, Ic 同時撮像光学系
- 視野角 23'x23'
- シーイング ~ 0.6"
- 標高5100m — 紫外線透過率が良い
- **2013年6月以来3年3ヶ月ぶりに入藏, 仮設**



祝 2016/9/8 First light



2016/9/9 土星像の取得