J-GEM: Japanese GW-EM Follow-up Group in Optical, Near-Infrared, and Radio Wavelengths

諸隈 智貴 (東京大学)

on behalf of J-GEM collaboration

Morokuma et al. 2016, PASJ, 68, L9 (GW150914) Yoshida et al. 2016, PASJ, 69, 9 (GW151226) Utsumi et al. 2016, in prep. (GW151226, Subaru/HSC)

Contents

- □ 重力波源からの電磁波放射
- □ 電磁波フォローアップ観測網
 - 口 日本: J-GEM (+ MAXI, CALET)
- ロ J-GEMの観測方針
- □ GW150914, GW151226に対する電磁波観測
- □ 今後の展望
- ロ まとめ

重力波源

超新星: < several kpc (Galactic, Gossan+2015)
 コンパクト天体連星合体
 ブラックホール - ブラックホール: 電磁波 X?
 ブラックホール - 中性子星: 電磁波 O
 中性子星 - 中性子星: 電磁波 O (short GRB?)







-50-40-30-20-10 0 10 20 30 40 50

x (km)

Hotokezaka+2013

Tanaka & Hotokezaka 2013

重力波研究交流会

high opacity in kilonova ==> optically faint



Tanaka & Hotokezaka 2013

重力波研究交流会



Tanaka & Hotokezaka 2013, ApJ, 775, 113

kilonova emission@optical-NIR

short GRBs

GRB 130603B@z=0.356 (1400 Mpc, DM=41.4)
 NIR (H-band, 1.6um) emission excess w/ HST
 GRB 150101B@z=0.134 (560 Mpc, DM=39.0)
 no detection w/ 8m-class telescopes



free neutron decay? (Metgzer+2015)

□ a small fraction of ejected neutron (~10⁻⁴ Msun) expands rapidly. (Bauswein+2013) ==> β -decay: n --> p + e⁻ + ν

==> hour-scale "precursor" emission to kilonova



free neutron decay? + kilonova



重力波研究交流会







subtracted image

real vs bogus ~1 : 1000



©Takahiro Kato, Masaomi Tanaka

subtraction done @IPMU (& onsite-transient) PCs

Machine Learning for Transient

Mikio Morii, JST/CREST collaboration, et al. submitted to PASJ (Kavli IPMU, Institute for Statistical Mathematics, NTT Communication Science, and Tsukuba Univ.) ROC curve in each mag band slice



July 2014 (reference)



Tominaga+2015, ATel, 7565

May 2015 (search)



Tominaga+2015, ATel, 7565

[May 2015] - [July 2014] (subtraction)



Tominaga+2015, ATel, 7565



重力波研究交流会



どのように中性子星合体を選び出すか

ロ たくさんのコンタミ

□ 変光星、超新星、AGN、移動天体・・・

ロ 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



Preparation for GW-EM Follow-Up Observation

- MoU w/ LIGO Scientific Collaboration (LSC) Virgo Collaboration (LVC)
- □ ~180 groups@2016 August
 - G 3 Japanese groups
 - **J**-GEM: optical, NIR, radio
 - MAXI: X-ray (Serino+2015, GCN)
 - CALET: gamma-ray (Sakamoto+2016)



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
- ロ LSC-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
- C 広視野観測webpmen
 ==> GLADE (h
 観測体制強化:
 IFU, 木曽/Torr

広視野観測。webpment of the Kiso Extremely Wide-Field CMOS Camera: Tomo-e Gozen—Investigation of Space Debris with Wide-Field Movie Observation

KOOLS-





Kiso 105cm Schmidt 20deg² in Φ9deg circle 2160×1200 CMOS sensor rs 84 chips 1.2 arcsec/pix







Galaxy List for the Advanced Detector Era (GLADE)

- □ higher completeness required than GWGC (White+2011)
- 2MASS XSC + 2 MPZ + HyperLEDA
- B mag + redshift + IR magnitudes

aquarius.elte.hu/glade





ーベイ能力 (可視近赤外望遠鏡)



すばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam (HSC)

- □ すばる8.2m望遠鏡 (共同利用望遠鏡)
- □ 視野: 1.5 deg直径 (1.8平方度)
- □ ~0.5 arcsecの星像
- □ 世界最高のサーベイ能力
 - CTIO-4m/DECam: i~22.2, z~21.9@28 deg² (GW151226)
 Subaru/HSC: i~24.6, z~23.8@63.5 deg² (GW151226)





http://ligo.org/detections/

重力波研究交流会

2(+1) GW Detections @ LIGO 01

	GW150914	GW151226
GW detection (UT)	Sep. 14, 2015, 09:50:45	Dec. 26, 2015, 03:38:53
alert date (UT)	Sep. 16, 2015, 03:12:12	Dec. 27, 2015, 16:28:13
alert	GCN Notices, e-mail (Burst)	GCN Notices (CBC)
frequency	35-250 Hz	35-450 Hz
strain	1.0×10^{-21}	3.4×10^{-21}
S/N ratio	24	13
nature	BH+BH merger	BH+BH merger
luminosity distance [Mpc]	410+160-180	440+180-190
redshift	0.09+0.03-0.04	0.09+0.03-0.04
m1 [Msun]	36+5-4	14.2+8.3-3.7
m2 [Msun]	29+4-4	7.5+2.3-2.3
BH [Msun]	62+4-4	20.8+6.1-1.7
GW energy [Msun c ²]	3.0+0.5-0.5	1.0+0.1-0.2
GW observation paper	Abbott+2016, PRL, 116, 061102	Abbott+2016, PRL, 116, 240113
	Livingston, Louisiana (L1)	Livingston
	L1 observed H1 observed (shifted, inverted)	
重力波研究交流会	0.30 0.35 02407/02/0.745	Time (s)

skymap (最終版)



重力波研究交流会







J-GEM電磁波観測@LIGO O1

GW	GW150914	GW151226			
localization (90%)	~600 deg2	~1400 deg2			
area & prob. by LV–EM	~900 deg2, ~50%	> 1000 deg2, ~90%??			
survey by J-GEM	24 deg2, 0.1%	986.5 deg2, 29%			
nearby galaxies by J-GEM	18 galaxies	238 galaxies			
#(telescope)	2	10			
Subaru/HSC	not available	i~24.6, z~23.8@63.5 deg2			
note	_	1 transient observed with KOOLS-I			
reference	Morokuma+2016, PASJ, 68, L9	Yoshida+2016 in press (summary) Utsumi+ in prep. (HSC)			

Abbott et al. 2016, ApJL, 826, L13 Others' EM observations (GW150914)



September 2015

Sun	Mon	Tue	Wcd Thu		Fri	Sat
		Sep 01	Sep 02	Sep 03	Sep 04	Scp 05 ()
		Obs SCE1AO+AO188		Obs FOCAS		UH-18B1 Stockton FOCAS
Sep 06	Sep 07	Sep 08	Sep 09	Sep 10	Sep 11	Sep 12
UH-18B1 Stockton FOCAS	Service FOCAS	S15B-055 Maeda FOCAS	S15B Uchij S-C	H017 yarna Jarn	Gemini Dawson S-Cam	S15B-050 Utsumi S-Cam
Sep 13	Sep 14	Sep 15	Sép 16	Sep 17	Sep 18	Sep 19
S15B-050 Utsumi S-Cam		UH-09A Reipurt S-Cam		Obs IRCS+AO188		S15A-105 Helmiriak IRCS+AO188 Service IRCS+AO188
Sep 20 C	Sep 21	Sep 22	Sep 23	Sep 24	Sep 25	Sep 26
Obs IRCS+A0188 Eng IRCS+A0188	Scil-139 hitera OMICS	Service FOCAS	Final Stress Str	S15B-045 Kawaguchi Kyoto3DII+AO188	Ofts Kyoto3DII+AO188	
Sep 27 C	Sep 28	Sep 29	Sep 30			
Obs Kyoto3DII+AO18	Eng COMICS	Service IRCS+AO188	Obs IRCS+A018			

alert

October 2015

Sun	Mon	Tue	Wed	Thu	Fri	Sat	
				Oct 01	Oct 02	Oct 03	
				Obs IRCS+AD188			
Oct 04 0	Oct 05	Oct 06	Oct 07	Oct 08	Oct 09	Oct 10	
Obs ERCS+AOLSS	StrObs HSC	GTU HSC	S 15B Ch Hi	+0611 iba SC	StrObs HSC	S15B-05H Chiba HSC	
Oct 11	Oct 12 🔴	Oct 13	Oct 14	Oct 15	Oct 16	Oct 17	
S15B-0611 Chiba HSC	UH-14B1 Tholen HSC	StrObs HSC	Keck Brodie HSC		S15B-0611 Chiba HSC		
OCT 18	00 19 0	Uet 20	Oct 21	Oct 22	Oct 23	Oct 24	
Keck			515P 54	S15B-154 Arai	4 S15B-128 Takagi 8 HDS		
HSC	StrObs HSC	HSC HSC	S15B-0 N Tsujimo a HDS	S15B-078 Tsujimoto HDS	- Tak Hi	agi XS	
HSC Oct 25	StrObs HSC	HSC	S15B-0-8 Tsujimolo HDS Oct 28	S15B-078 Tsujimoto HDS Oct 29	Oct 30	agi 25 Oct 31	
Oct 25	StrObe HSC Oct 26 S15B-154 Arai HDS	Oct 27 O Obs HDS	SISB-0 8 Tsujimo HDS Oct 28	SISB-078 Tsujimoto HDS Oct 29	Oct 30 S15E-111 Carrie SCEXAO+AO188	agi XS Oct 31 UH-17A Haedborg	
Oct 25 S15B-090 Kawahara HDS	StrObs HSC Oct 26 S15B-154 Arai HDS Service HDS	Oct 27 O Obs HDS Service HDS	SISB-0 8 Tsujimon HDS Oct 28	SISB-078 Tsujimoto HTXS Oct 29	Tab HI Oct 30 S15E-111 Carria SCExAO+AO188 S15B-160 Kotani SCExAO+AO188	agi XS Oct 31 UH-17A Hagelberg SCEXAC+AO188	

HSC observing run



detection

Others' EM observations

Abbott et al. 2016, ApJL, 826, L13

Facility /	Area					ontained	Probability		
Instrument	Band ^a	Depth ^b	Time ^c	(deg ²)	cWB	LIB	BSTR ^d	LALInf	GCN
			Optic	al ^e					
DECam	<i>i</i> , <i>z</i>	<i>i</i> < 22.5, <i>z</i> < 21.5	3.9, 5, 22	100	38	14	14	11	18344, 18350
iPTF	R	R < 20.4	3.1, 3, 1	130	2.8	2.5	0.0	0.2	18337
KWFC	i	i < 18.8	3.4, 1, 1	24	0.0	1.2	0.0	0.1	18361
MASTER	С	< 19.9	-1.1, 7, 7	710	50	36	55	50	18333, 18390, 18903, 19021
Pan-STARRS1	i	i < 19.2 - 20.8	3.2, 21, 42	430	28	29	2.0	4.2	18335, 18343, 18362, 18394
La Silla– QUEST	<i>g</i> , <i>r</i>	<i>r</i> < 21	3.8, 5, 0.1	80	23	16	6.2	5.7	18347
SkyMapper	i, v	i < 19.1, v < 17.1	2.4, 2, 3	30	9.1	7.9	1.5	1.9	18349
Swift UVOT	и	u < 19.8 (gal.)	2.3, 1, 1	3	0.7	1.0	0.1	0.1	18331
	и	u < 18.8 (LMC)	3.4, 1, 1						18346
TAROT	С	R < 18	2.8, 5, 14	30	15	3.5	1.6	1.9	18332, 18348
TOROS	С	r < 21	2.5, 7, 90	0.6	0.03	0.0	0.0	0.0	18338
VST@ESO	r	r < 22.4	2.9, 6, 50	90	29	10	14	10	18336, 18397
			Near Int	frared					
VISTA@ESO	Y, J, K_S	J < 20.7	4.8, 1, 7	70	15	6.4	10	8.0	18353

Table 1Summary of Tiled Observations

We reported only KWFC observations to GCN.

- □ ~900 deg²
 □ >~50% of initial LIB skymap
 - slightly less: final LALInference skymap





O2でのJ-GEMの観測戦略

- **ロ** O2開始: 2016年11月末 (計6ヶ月間)
- 0 02と01の違い
 - □ 得られる情報:距離,中性子星を含んでいそうかどうか
 - 観測ランの後半はAdvanced Virgoが参加予定(O2b)
 - □ 感度:検出数の向上 <==> 共同利用時間(ToO)は限られている
 - □ Virgo参加後はlocalizationも改善. 依然としてO(100)deg2.
- □ 「電磁波が出そうな天体」
 - = NS+NS or NS+BHを優先的に
 - □ NSを含むかどうかの情報
 - ロ サーベイ観測: すばる/HSC,
 - 木曽シュミット望遠鏡, 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



重力波研究交流会

まとめ

□ 中性子星連星,中性子星ブラックホール連星からの電磁波を捉えたい.

- **ロ** r-process元素生成の場
- □ 暗く、赤く、早く減光する.
- **ロ** 20等級くらいの深さまで観測したい.
- □ 可視では大量のコンタミ(別の種類の光度変動天体)を取り除く必要.
- □ 電磁波対応天体同定の試みは世界中のあらゆる波長の望遠鏡で
 - □ J-GEM = 日本@光赤外(+電波)
 - □ 世界中に望遠鏡、すばる/HSCは特にユニーク.
 - HINOTORI, OAO/WFC, KOOLS-IFU, Tomo-e Gozen開発
 - □ 系統的な解析環境(引き算処理含む)の準備
- □ LIGO O1で検出された重力波はどちらもブラックホール連星.
 - □ 強い電磁波放射は期待できなかった.
- □ J-GEM: GW150914 (TM+2016), GW151226 (Yoshida+2017, Utsumi+2017) □ LIGO O2が始まった.
 - □ 中性子星を含む合体現象からの重力波が受かるかもしれない.