

# 重力波天体とマルチメッセンジャー天文学

Gravitational Wave Sources and Multi-messenger Astronomy

田中 雅臣 (国立天文台)

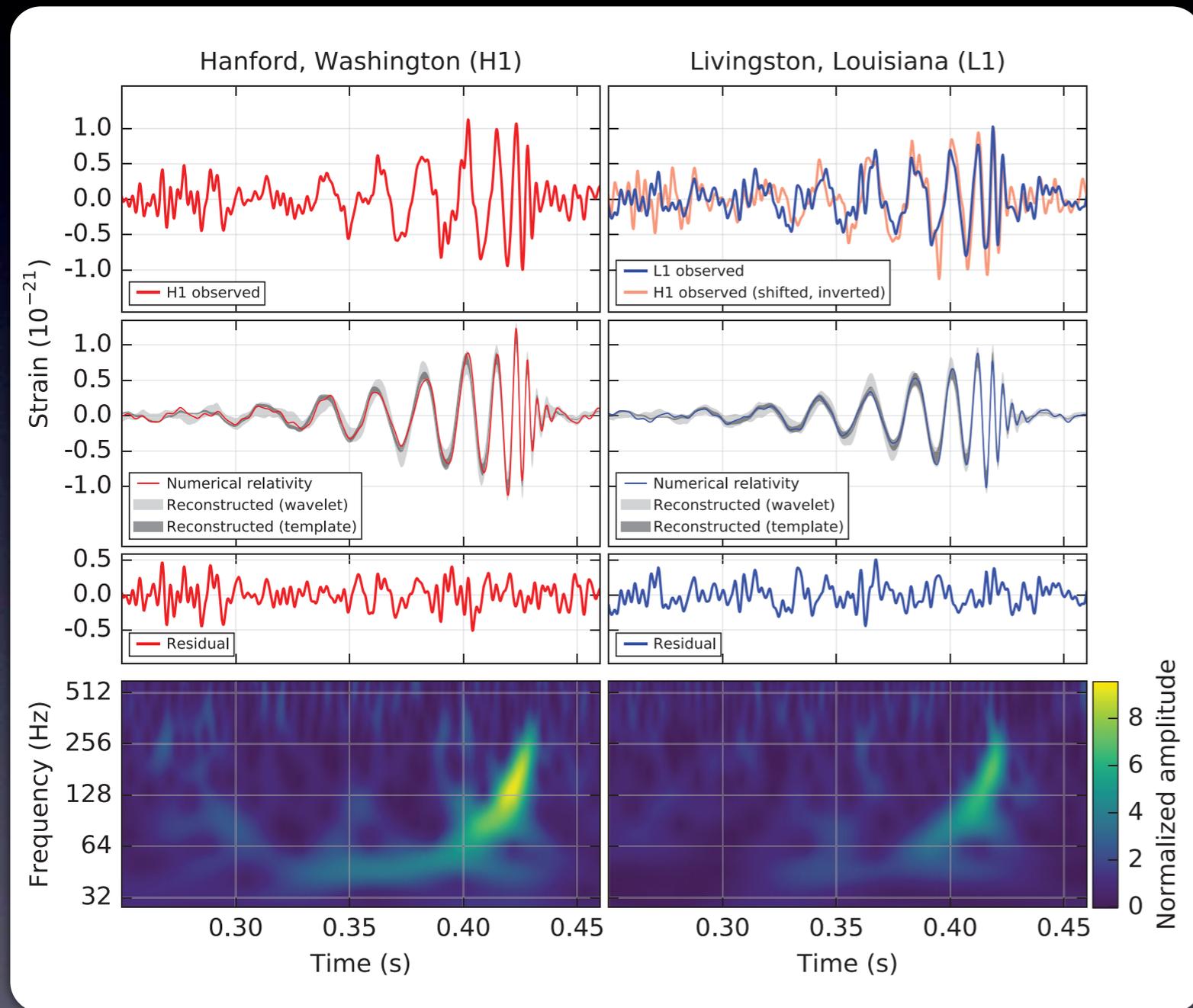
Masaomi Tanaka (NAOJ)

C: SXS collaboration

## 重力波天体とマルチメッセンジャー天文学

- 「マルチメッセンジャー天文学」の幕開け
- 中性子星合体：元素の合成と電磁波放射
- 未解決問題・これから面白そうなこと

# 史上初の重力波検出



**GW 150914**

**ブラックホール(BH)同士の合体**

**(~30 Msun) @ 400 Mpc**

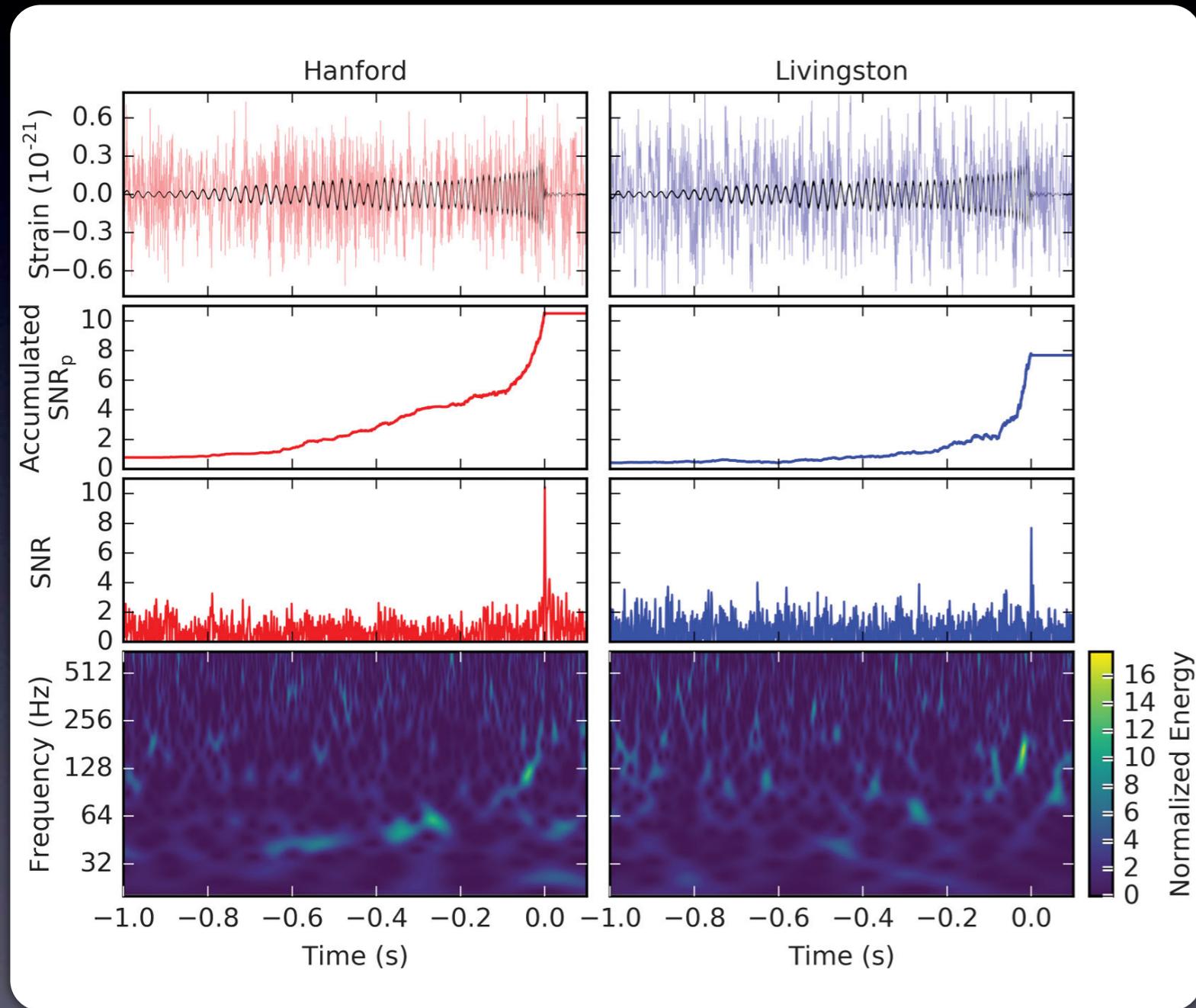


**事前の予想**

**- 中性子星(NS)合体 (~< 200 Mpc)**

**- BH-NS合体 (~< 800 Mpc)**

# 2例目の検出



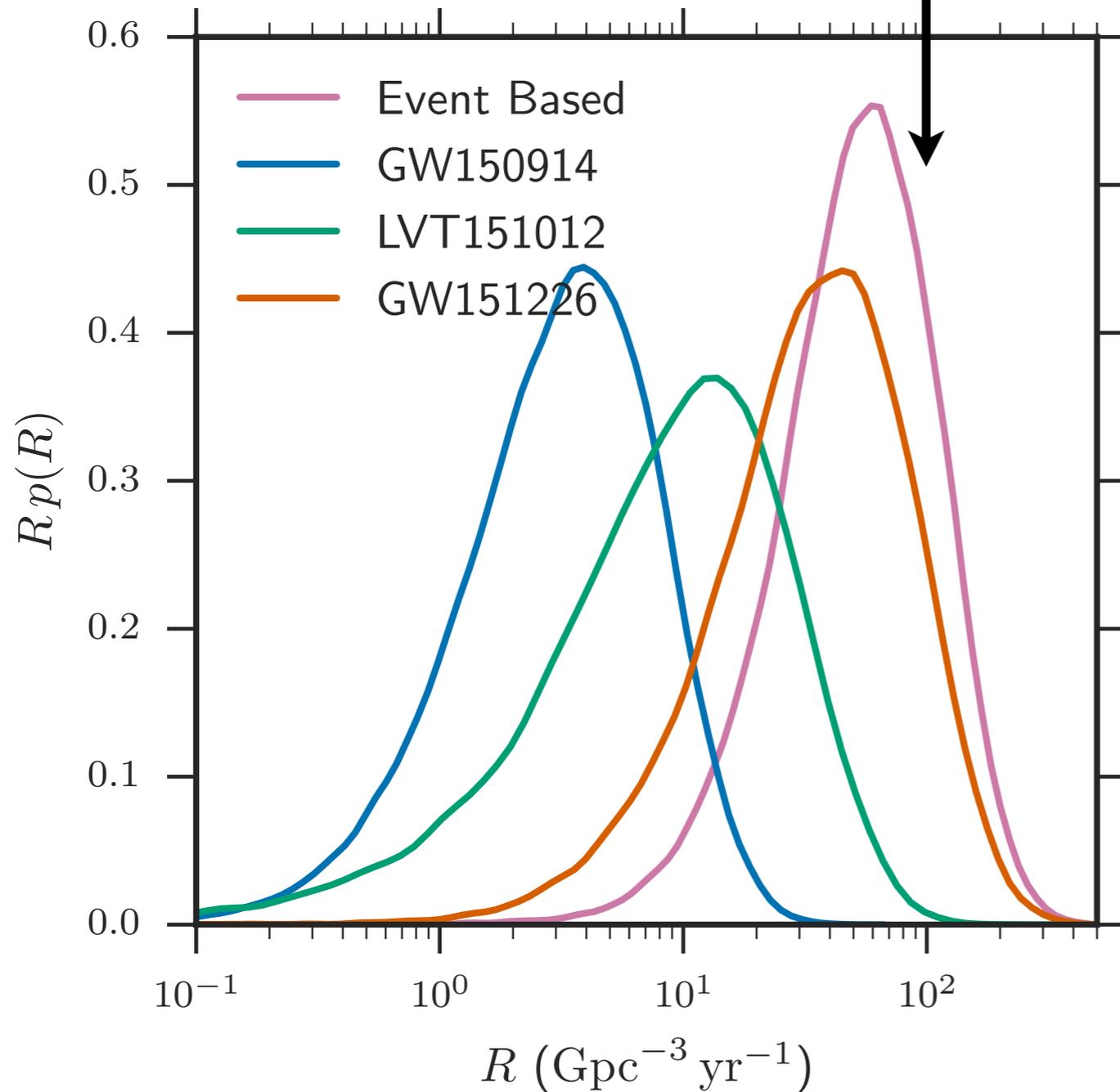
**GW 151226**

**BH-BH**

**(~14+8 Msun) @ 440 Mpc**

# BH-BH合体 イベントレート

超新星の1/1000



$R \sim 9-240 \text{ Gpc}^{-3} \text{yr}^{-1}$

事前の予想

$R \sim 0.1-300 \text{ Gpc}^{-3} \text{yr}^{-1}$

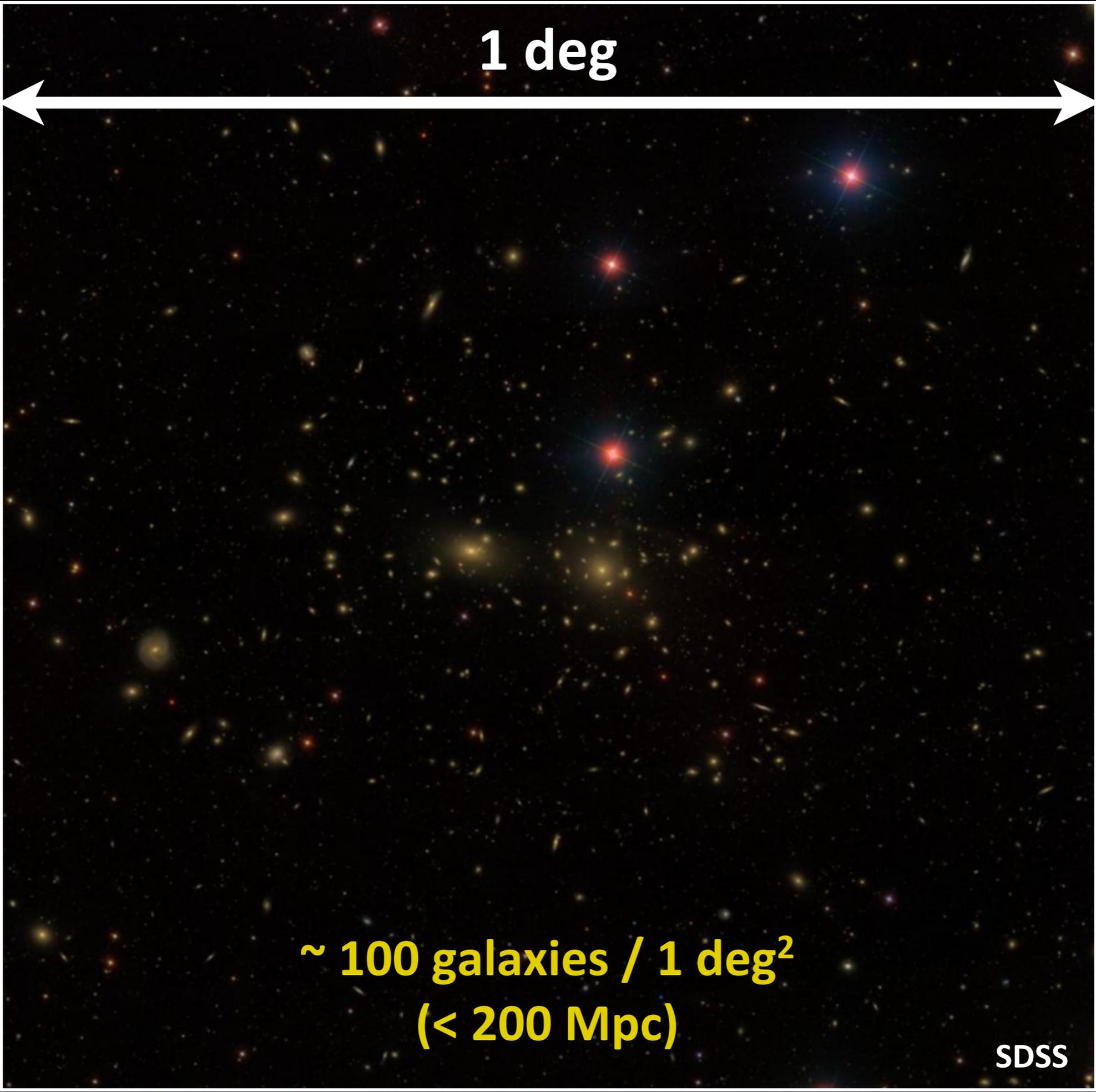
BH-BHへの進化経路?  
(恒星進化、BH形成)

超新星

$R \sim 10^5 \text{ Gpc}^{-3} \text{yr}^{-1}$

ロングガンマ線バースト

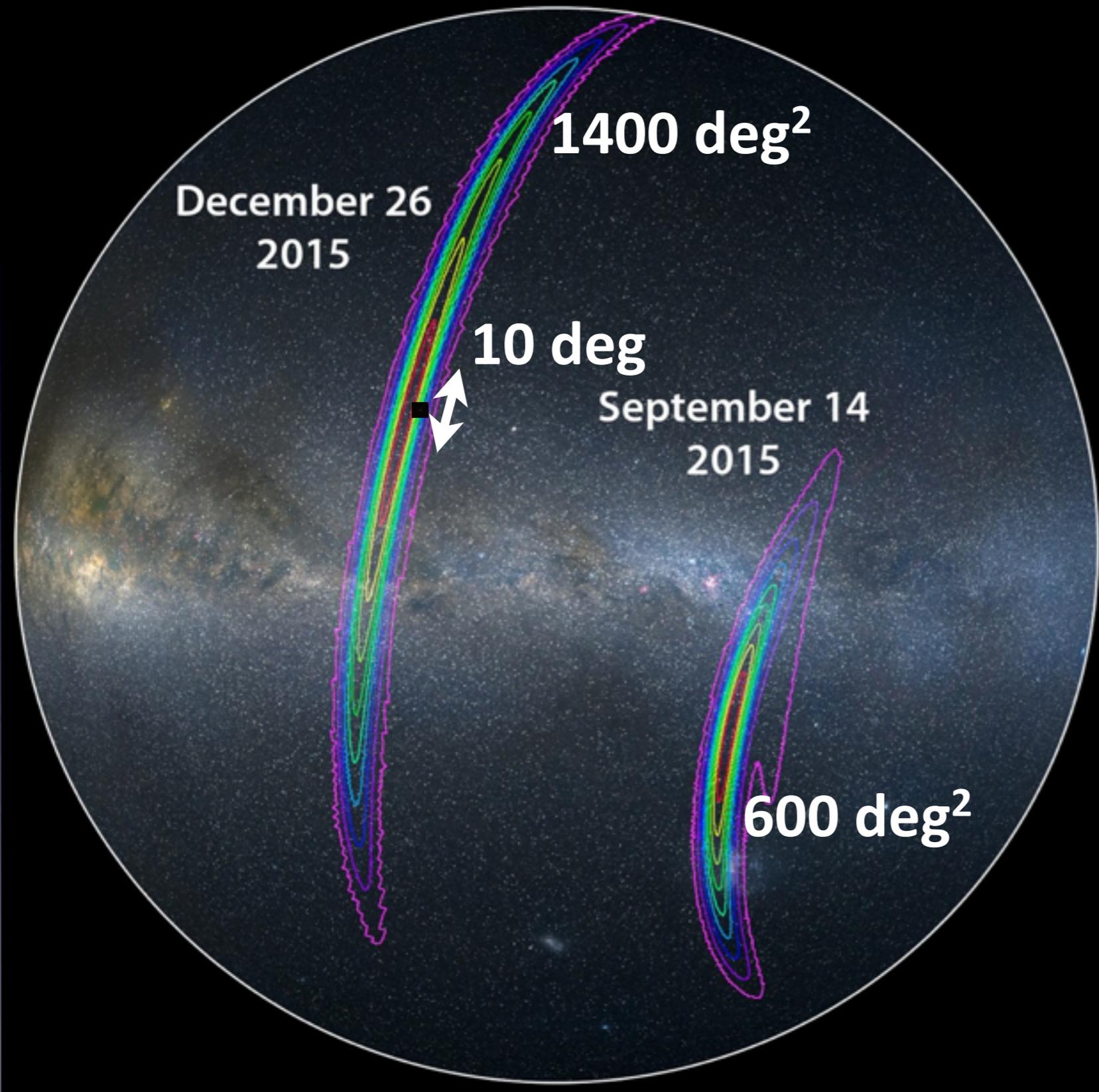
$R \sim 10^2-10^3 \text{ Gpc}^{-3} \text{yr}^{-1}$



1 deg

**~ 100 galaxies / 1 deg<sup>2</sup>  
( < 200 Mpc )**

SDSS

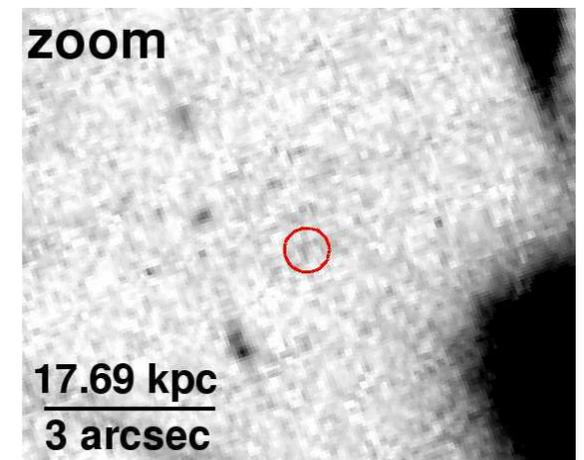
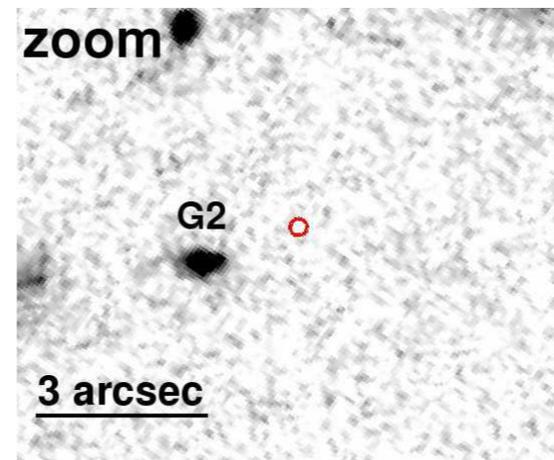
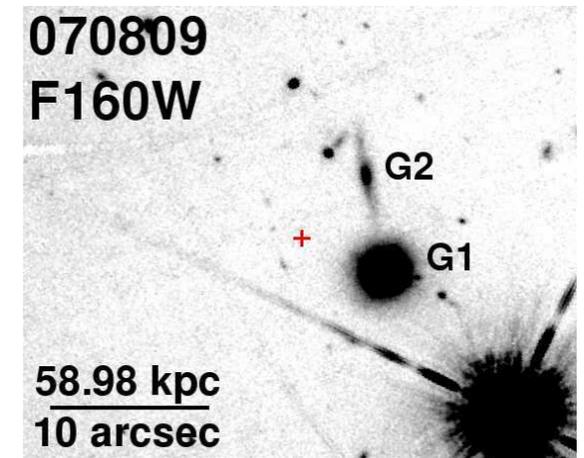
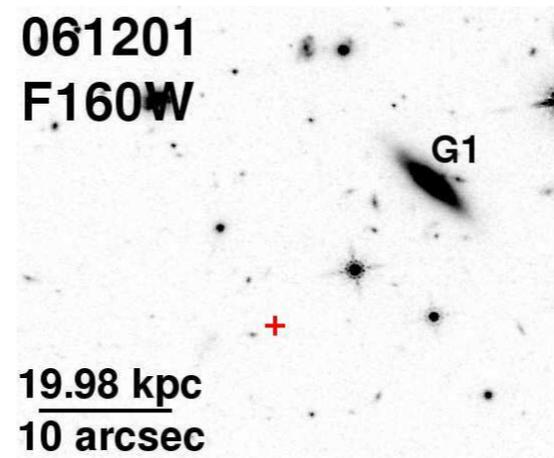
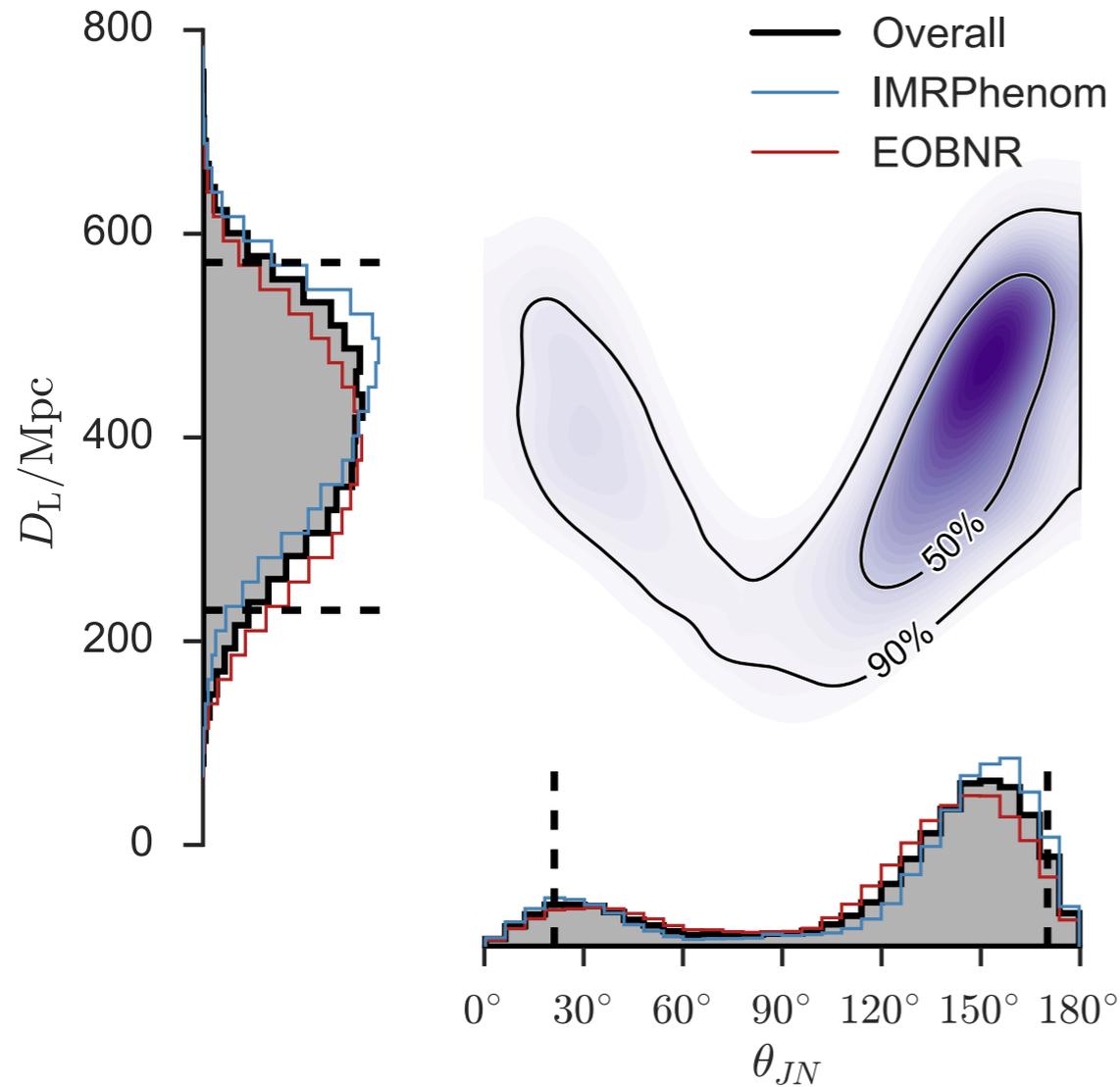


電磁波対応天体の検出  
が必須

- 赤方偏移 (距離)
- 母銀河
- 銀河内の環境

# 傾斜角と距離の縮退を解く

# 近傍環境を調べる



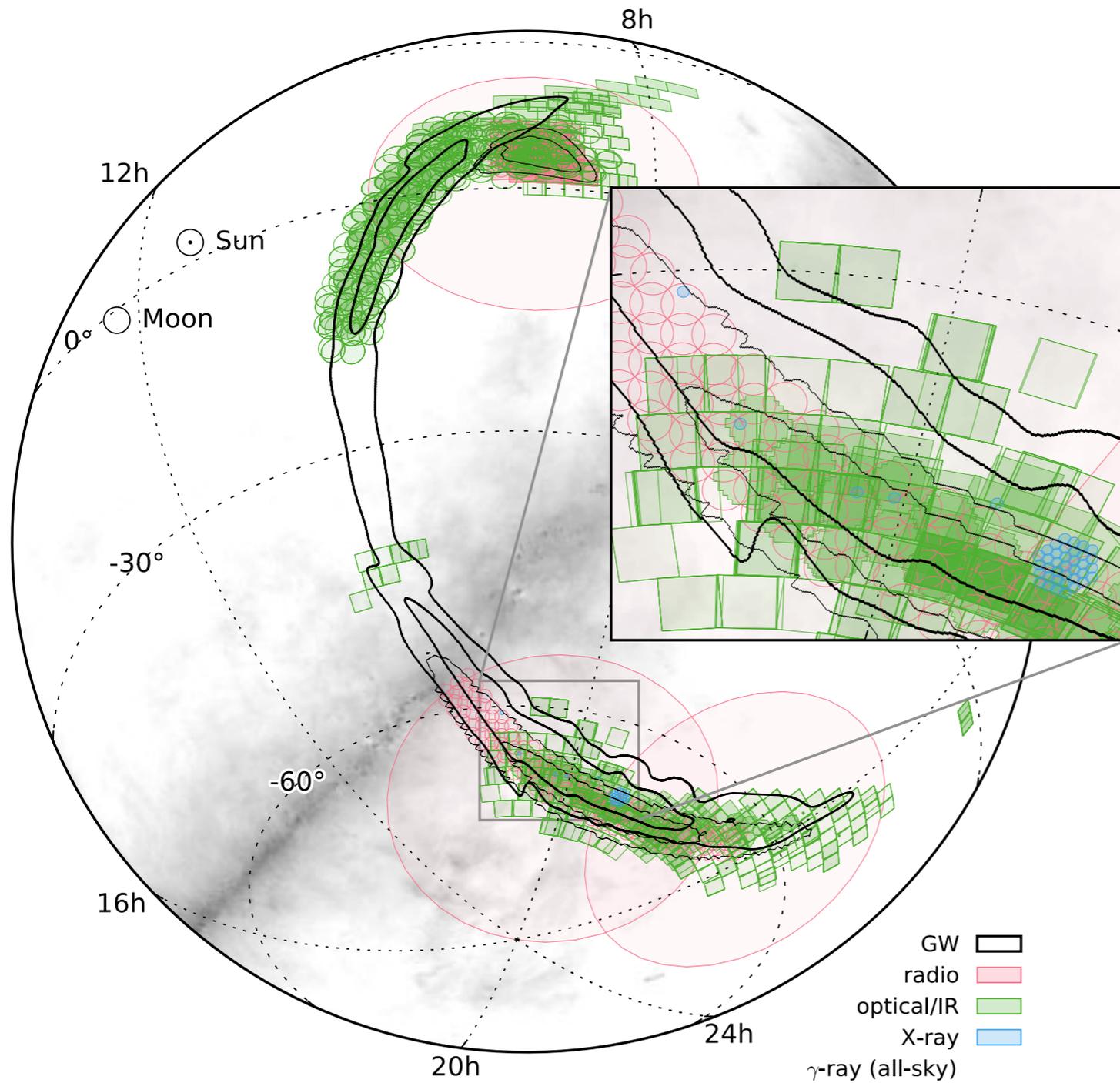
GW 150914 (Abbott et al. 2016, PRL, 116, 241102)

short GRBs (Berger 2014, ARA&A, 52, 43)

# 「マルチメッセンジャー」天文学！

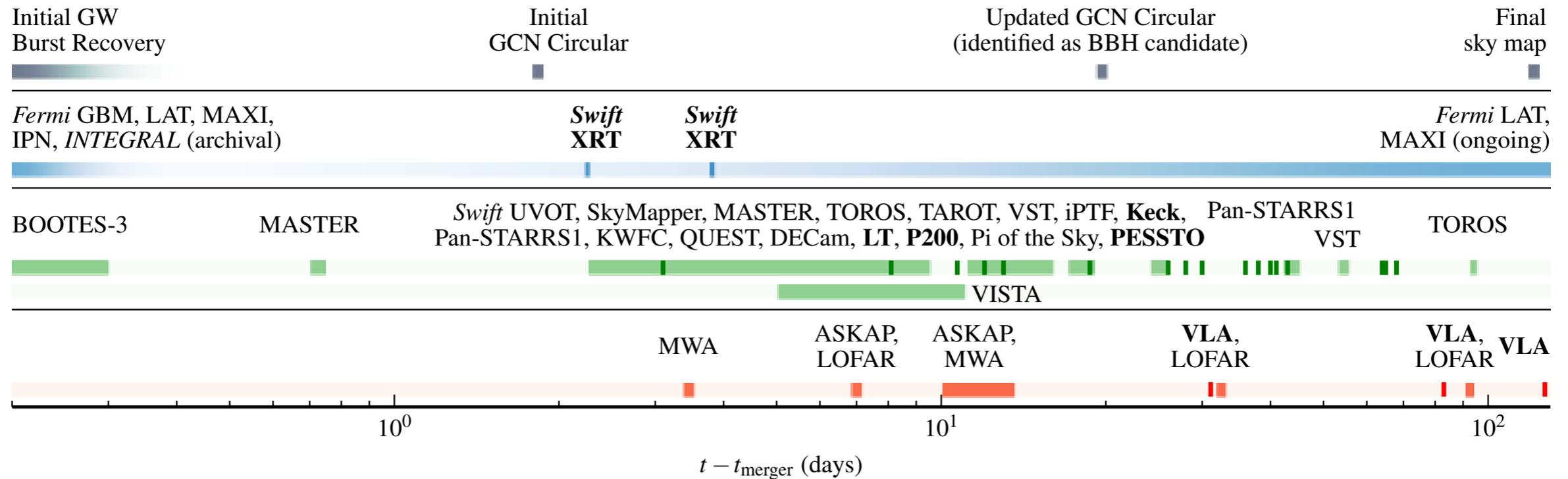
LVC collaboration and EM follow-up groups, 2016, ApJ, 826, L13

Morokuma, MT, and J-GEM collaboration, 2016, PASJ, in press (arXiv:1605.03216)



# GW150914の電磁波観測

LVC collaboration and EM follow-up groups, 2016, ApJ, 826, L13



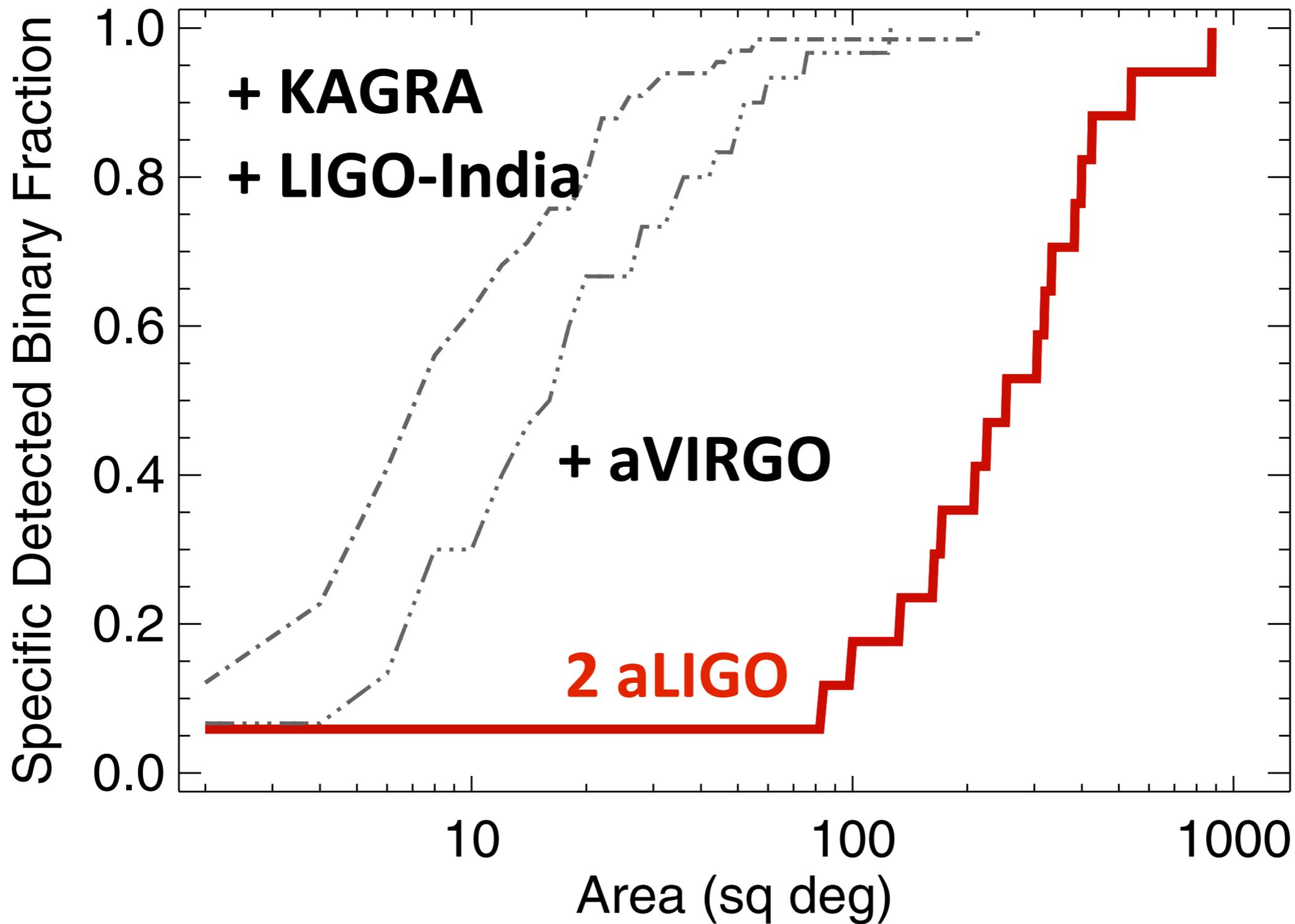
## 電磁波対応天体は見つからなかった

Possible Fermi/GBM detection?? (Connaughton+2016, ApJ, 826, L6)

Non detection w/ INTEGRAL (Savchenko+2016, ApJ, 820, L36)

そもそもBH-BH合体は電磁波で光る？

# 位置決定精度の改善



## 重力波天体とマルチメッセンジャー天文学

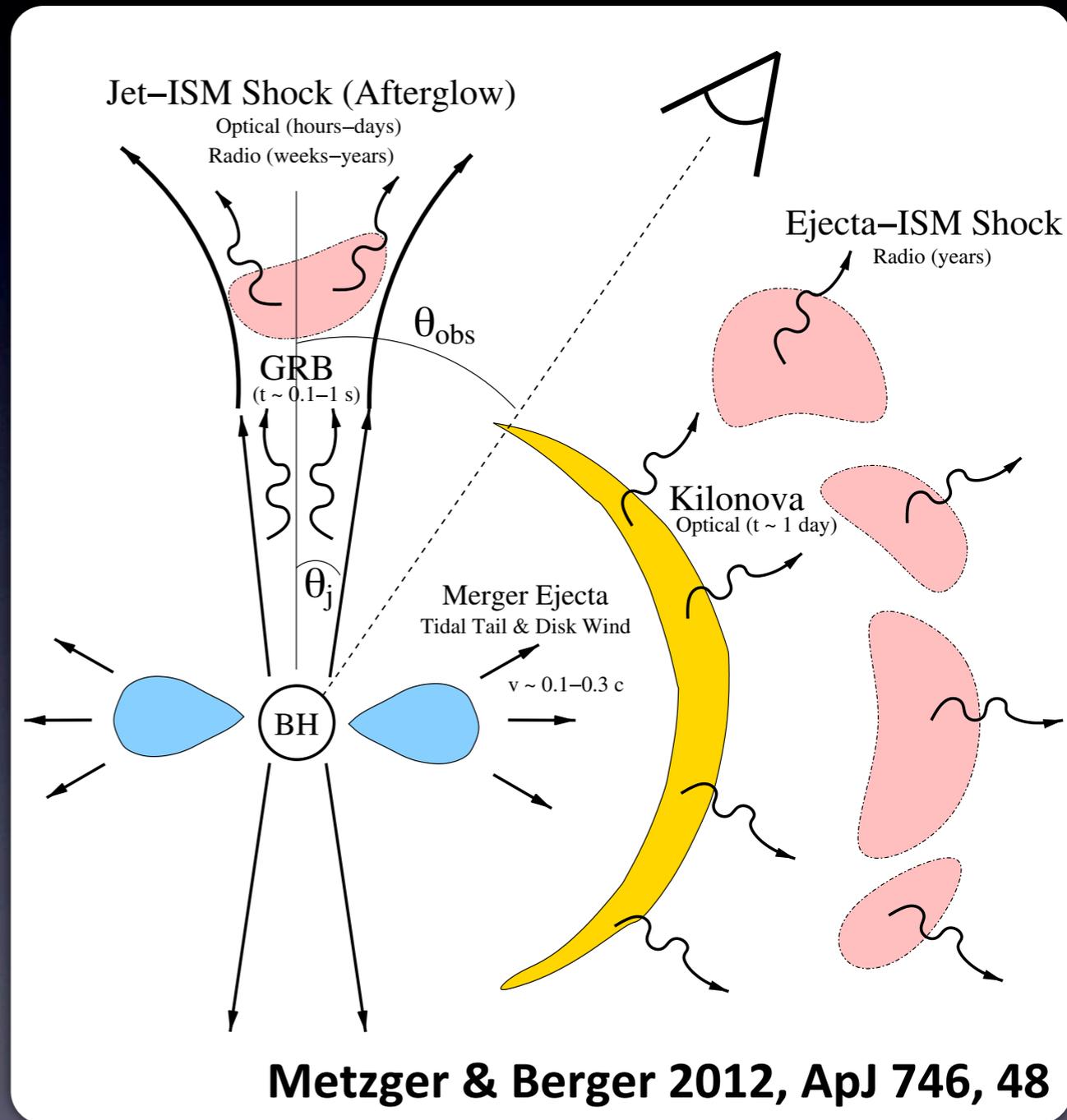
- 「マルチメッセンジャー天文学」の幕開け
- 中性子星合体：元素の合成と電磁波放射
- 未解決問題・これから面白そうなこと

# 中性子星合体からの電磁波放射

- ショートガンマ線バースト

- 電波残光

- 可視光・赤外線放射  
kilonova/macronova



# ショートガンマ線バースト

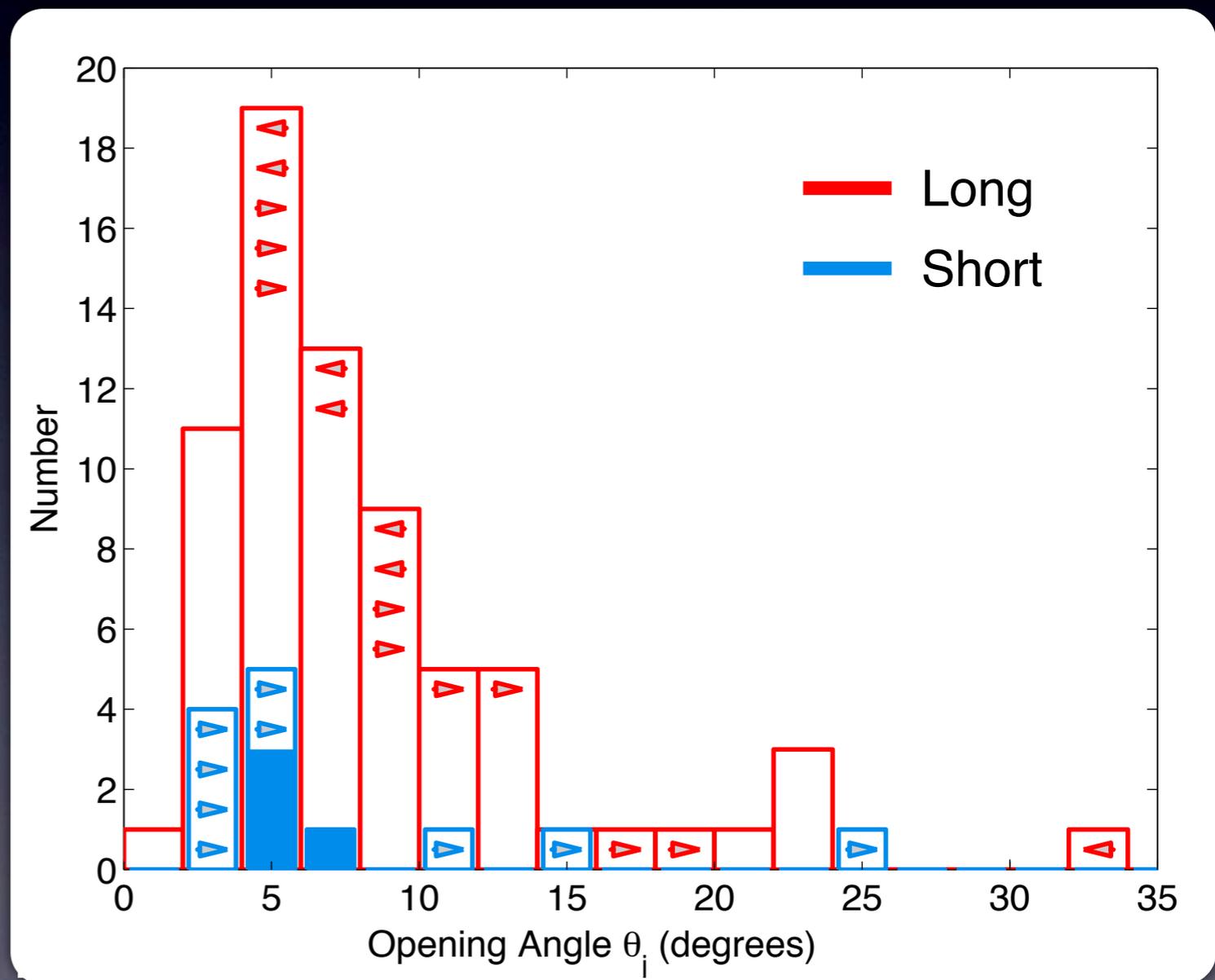
山崎了さん招待講演 (7/28 13:30-)

見える

見えない

ジェットの開き角 ~ 10度

=> こちらを向く確率は数%



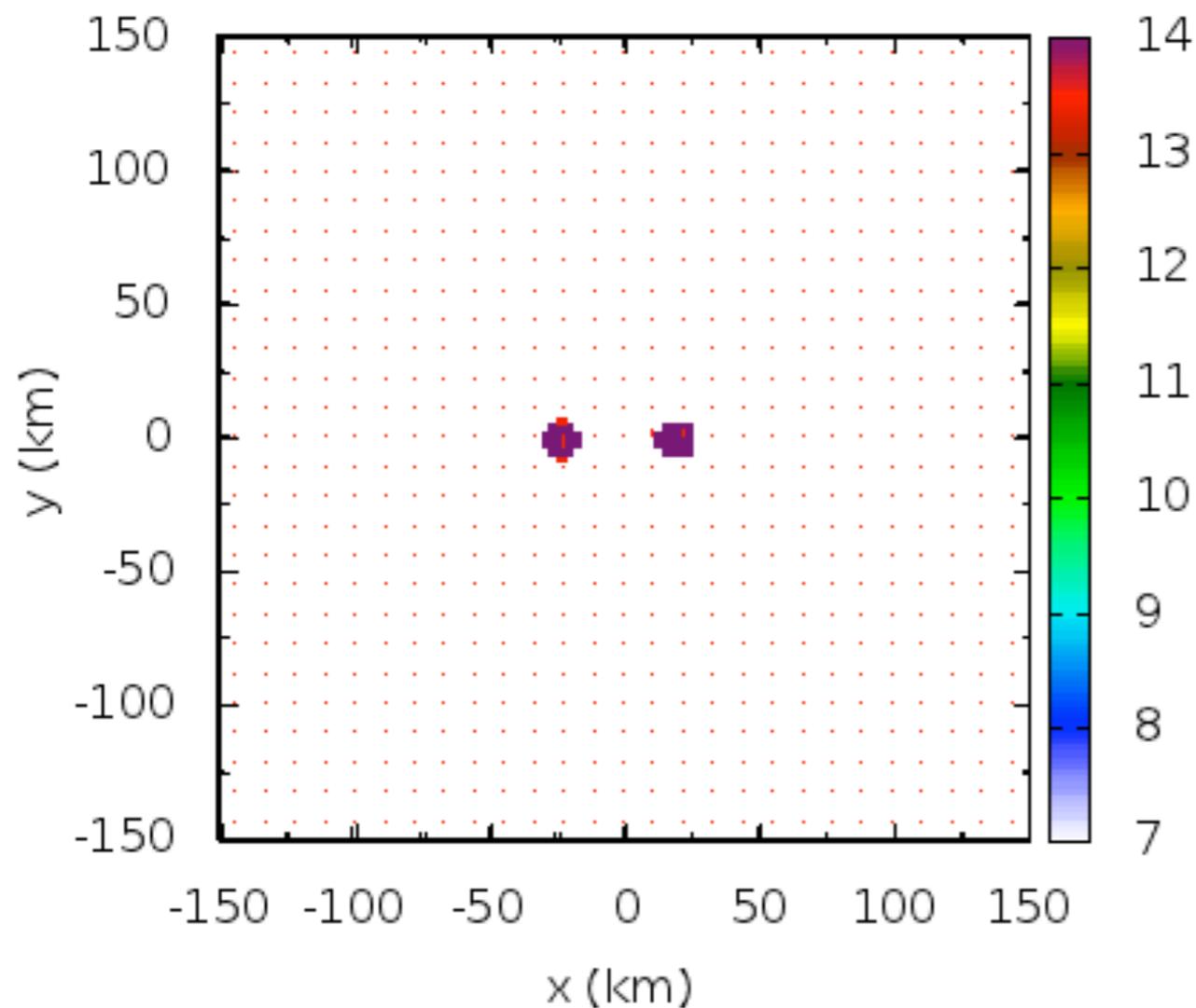
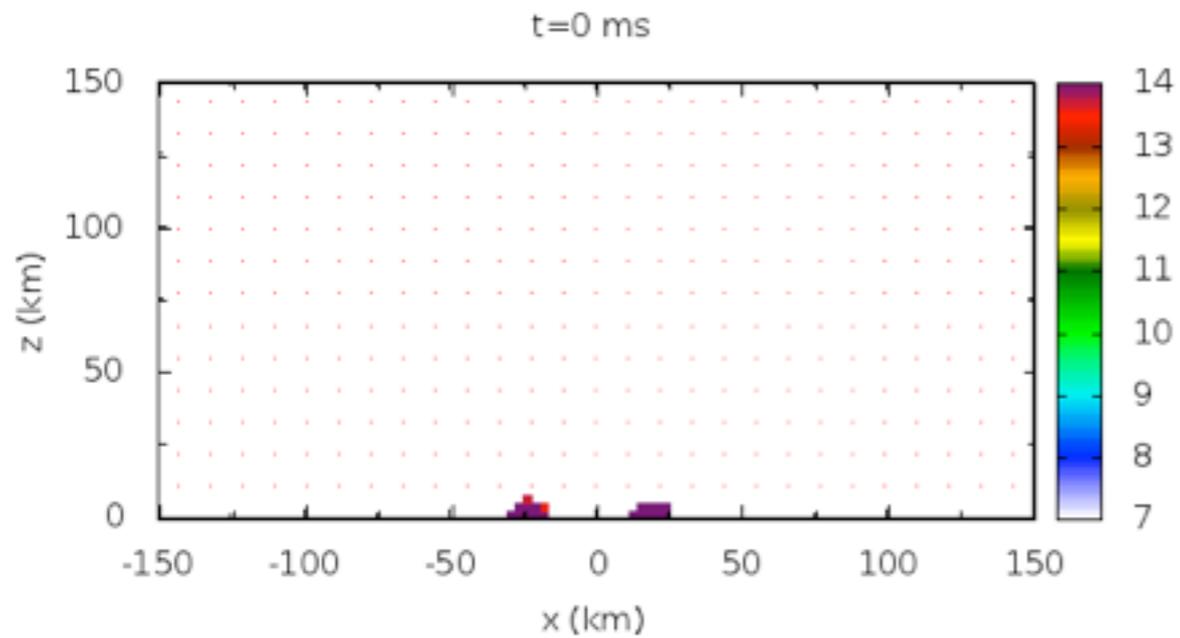
# 数値相対論計算

## 中性子星合体からの 質量放出

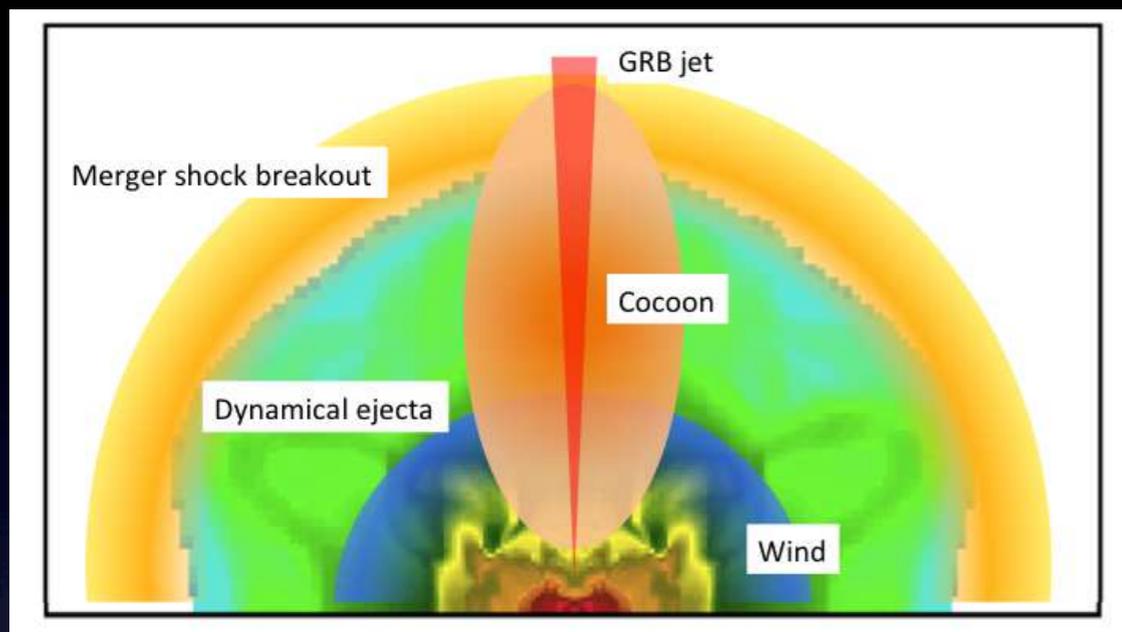
- 潮汐破壊
- 衝撃波加熱

$M \sim 10^{-3} - 10^{-2} M_{\text{sun}}$   
 $v \sim 0.1 - 0.2 c$

Hotokezaka+13, PRD, 87, 4001  
Rosswog+13, MNRAS, 430, 2580



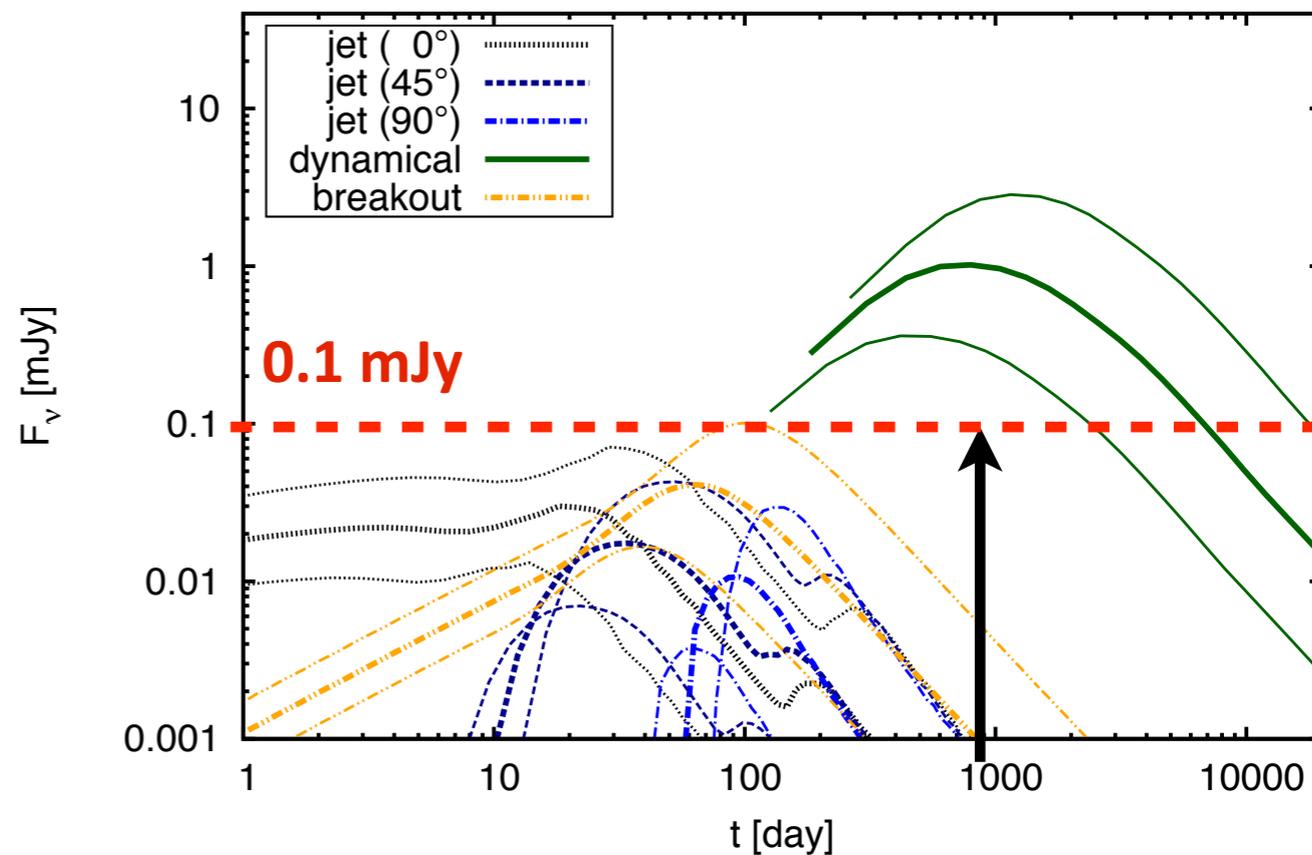
# 電波残光



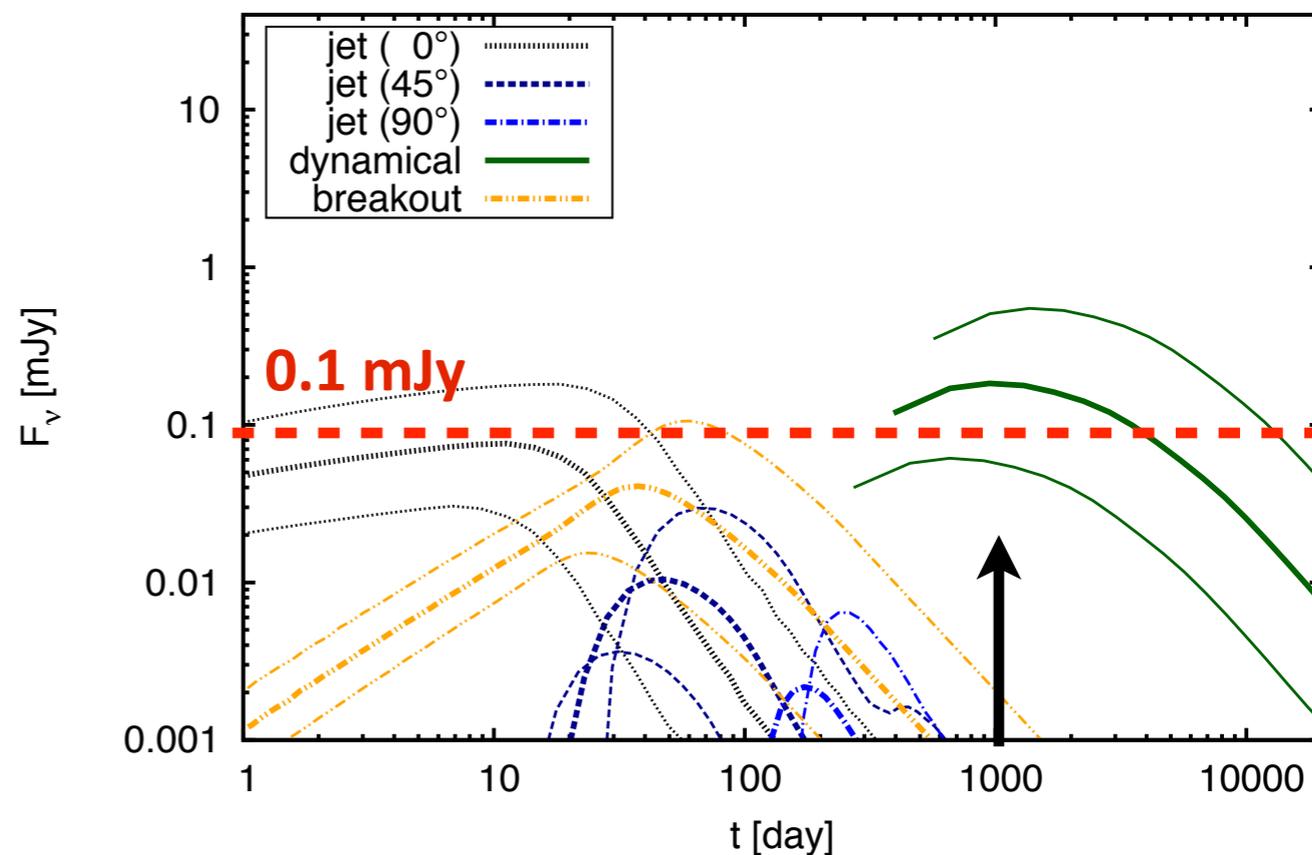
- ~1000 日程度の遅れ
- 暗いか？(星間密度が低い)

Hotokezaka & Piran 2015,  
MNRAS, 450, 1430

200 Mpc 150 MHz,  $n = 0.1 \text{ cm}^{-3}$

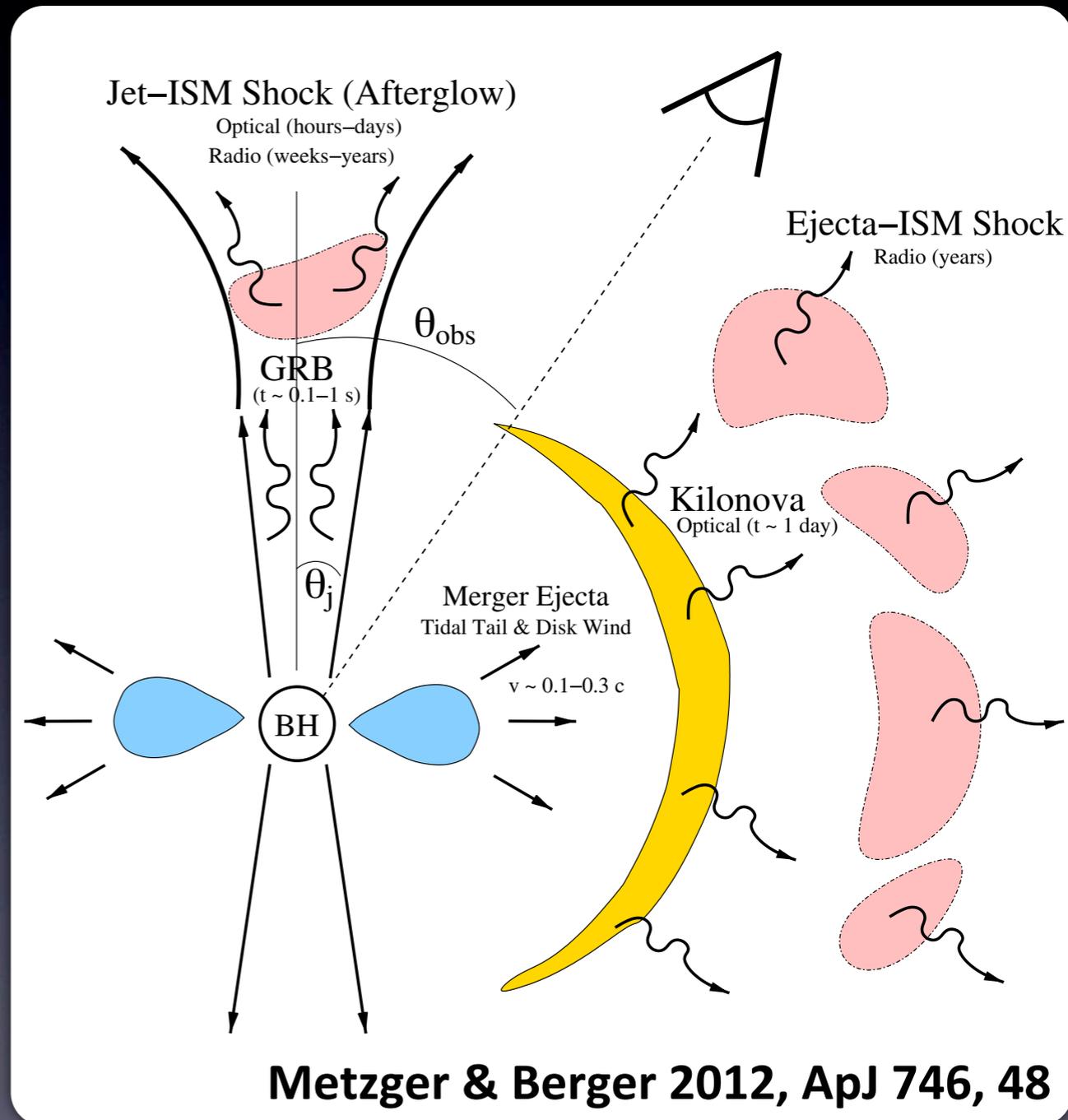


150 MHz,  $n = 0.01 \text{ cm}^{-3}$

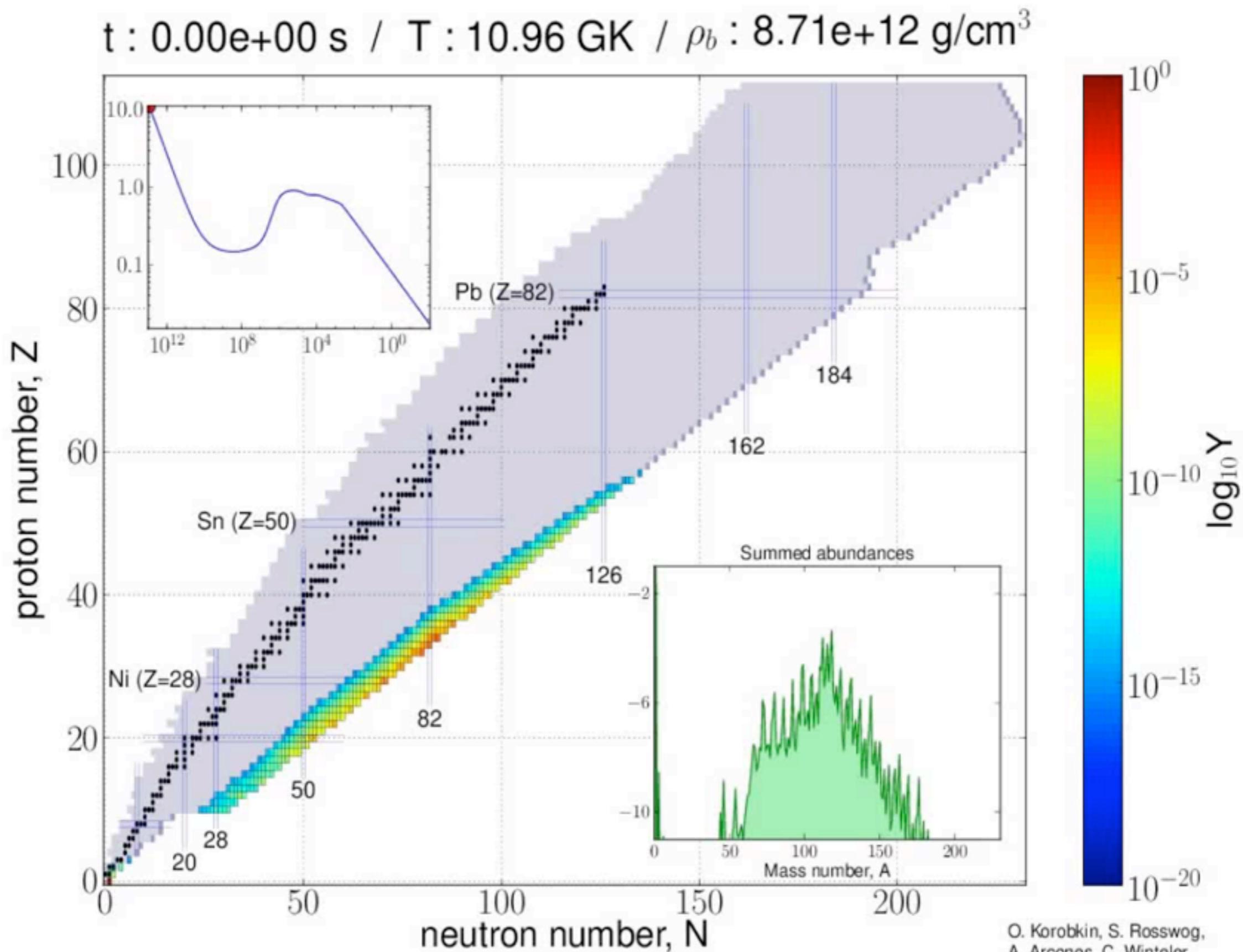


# 中性子星合体からの電磁波放射

- ショートガンマ線バースト
  - ビーミング ✖
- 電波残光
  - 等方的 ✔
  - time delay長い ✖
- 可視光・赤外線放射  
kilonova/macronova
  - 等方的 ✔
  - time delay短い ✔



# 中性子星合体における元素合成



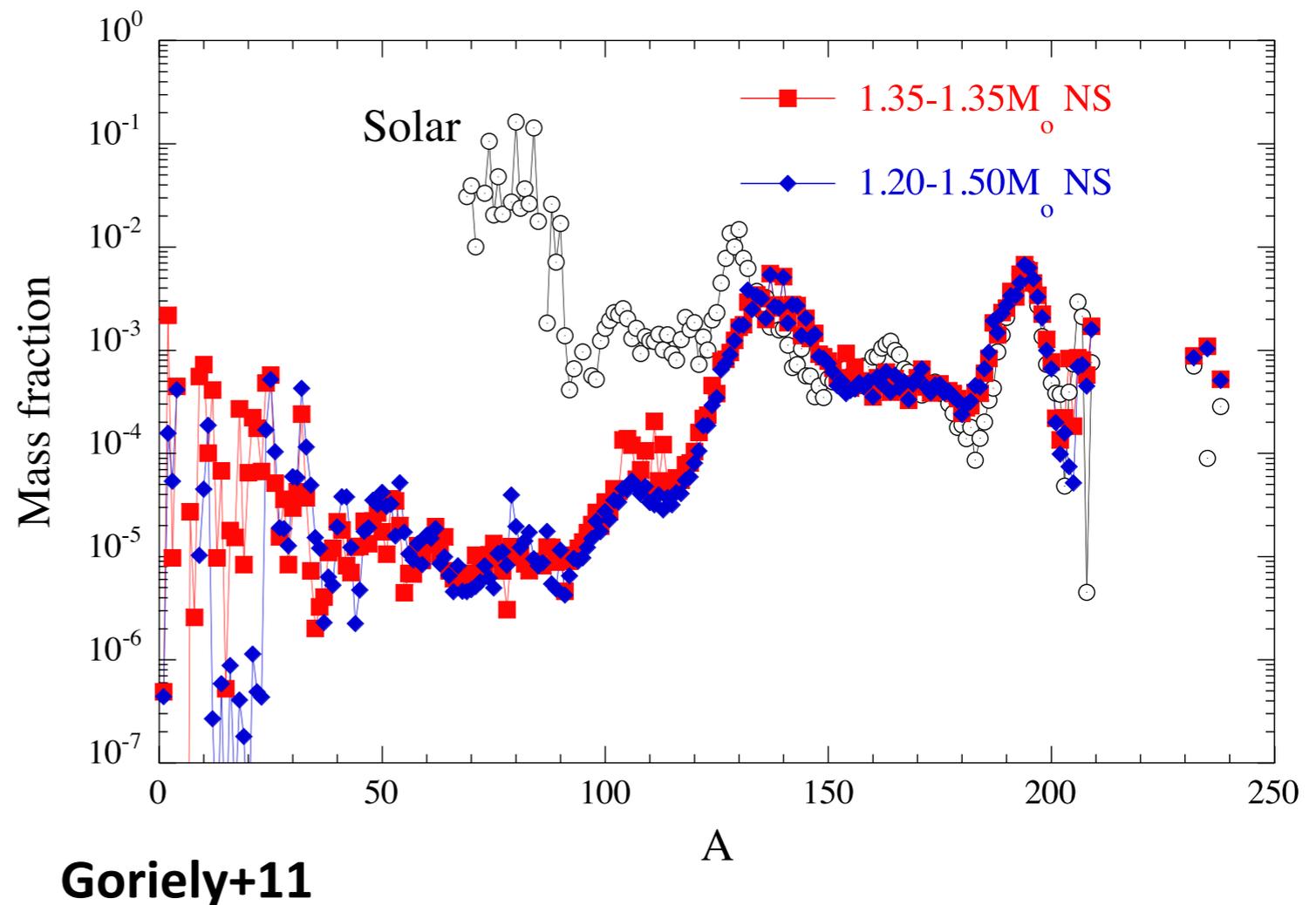
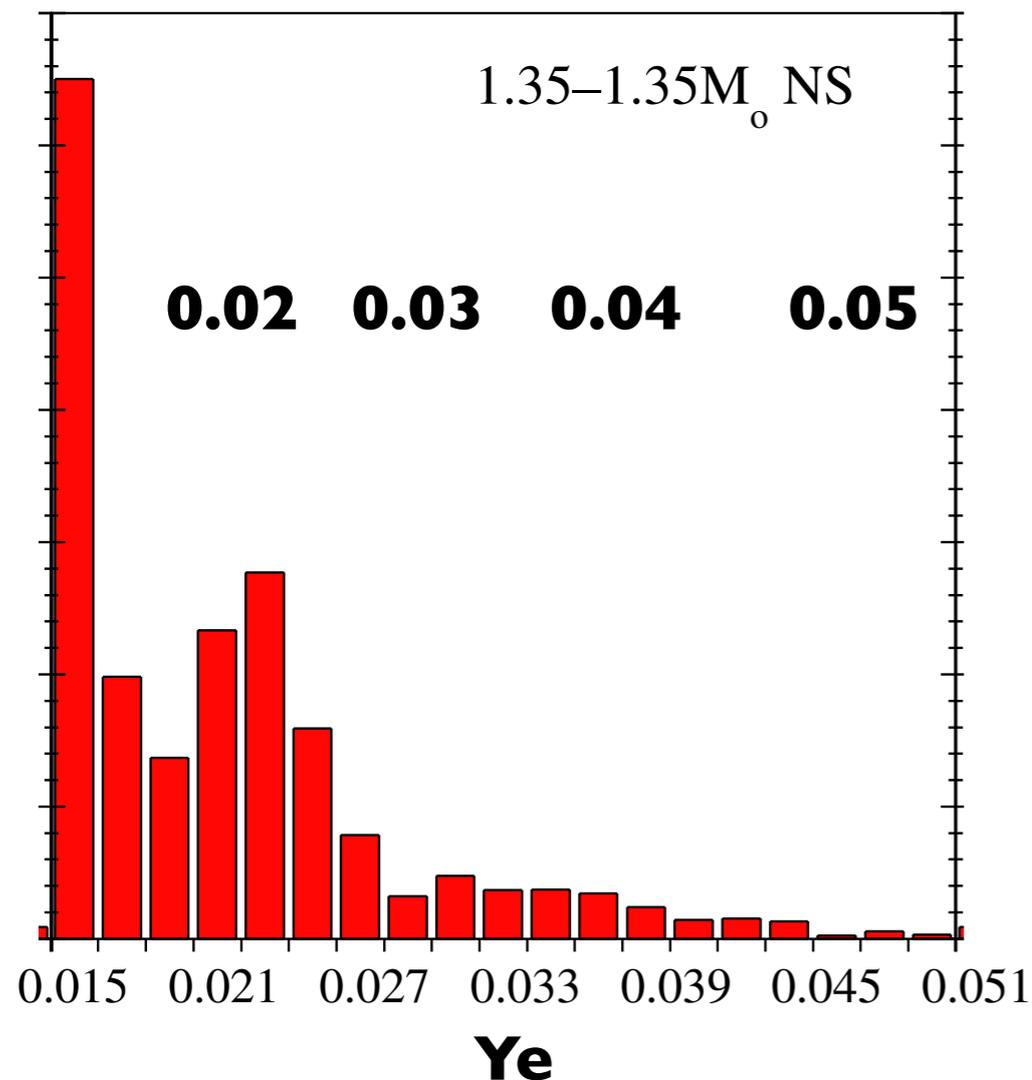
# 中性子星合体における元素合成

$$Y_e = \frac{n_e}{n_p + n_n} = \frac{n_p}{n_p + n_n}$$

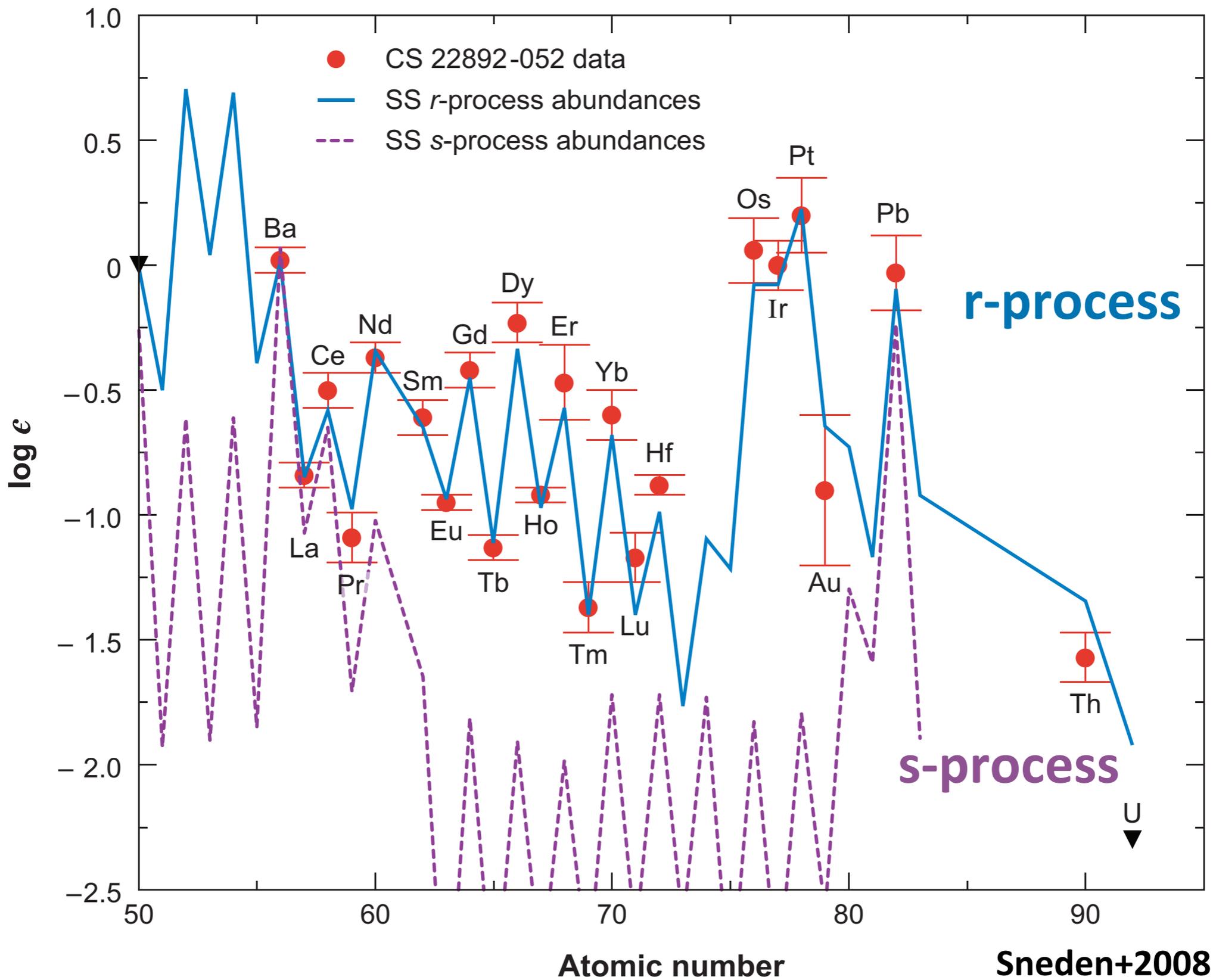
$Y_e$ 小さい (中性子過剰)

=> r-processが進む

中性子過剰すぎる？



# r-process 元素の “Universality”



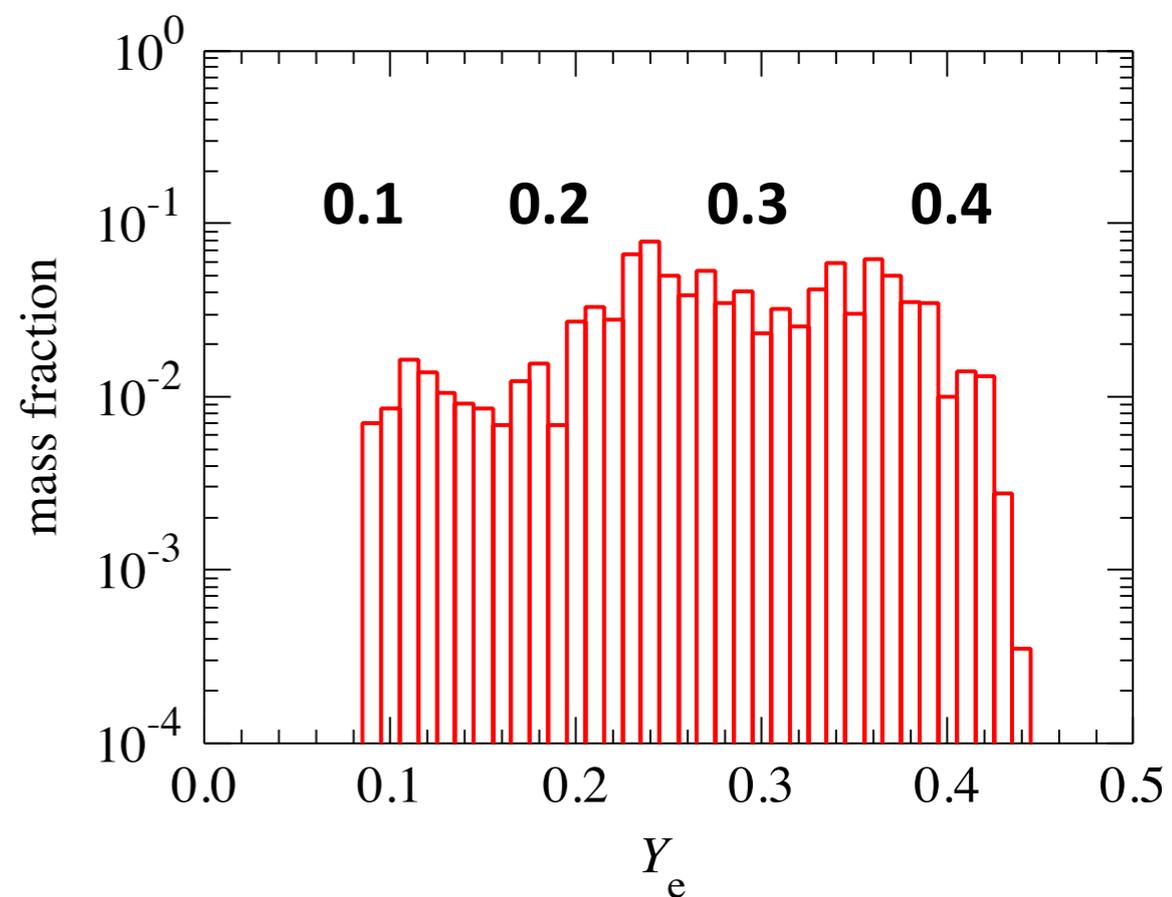
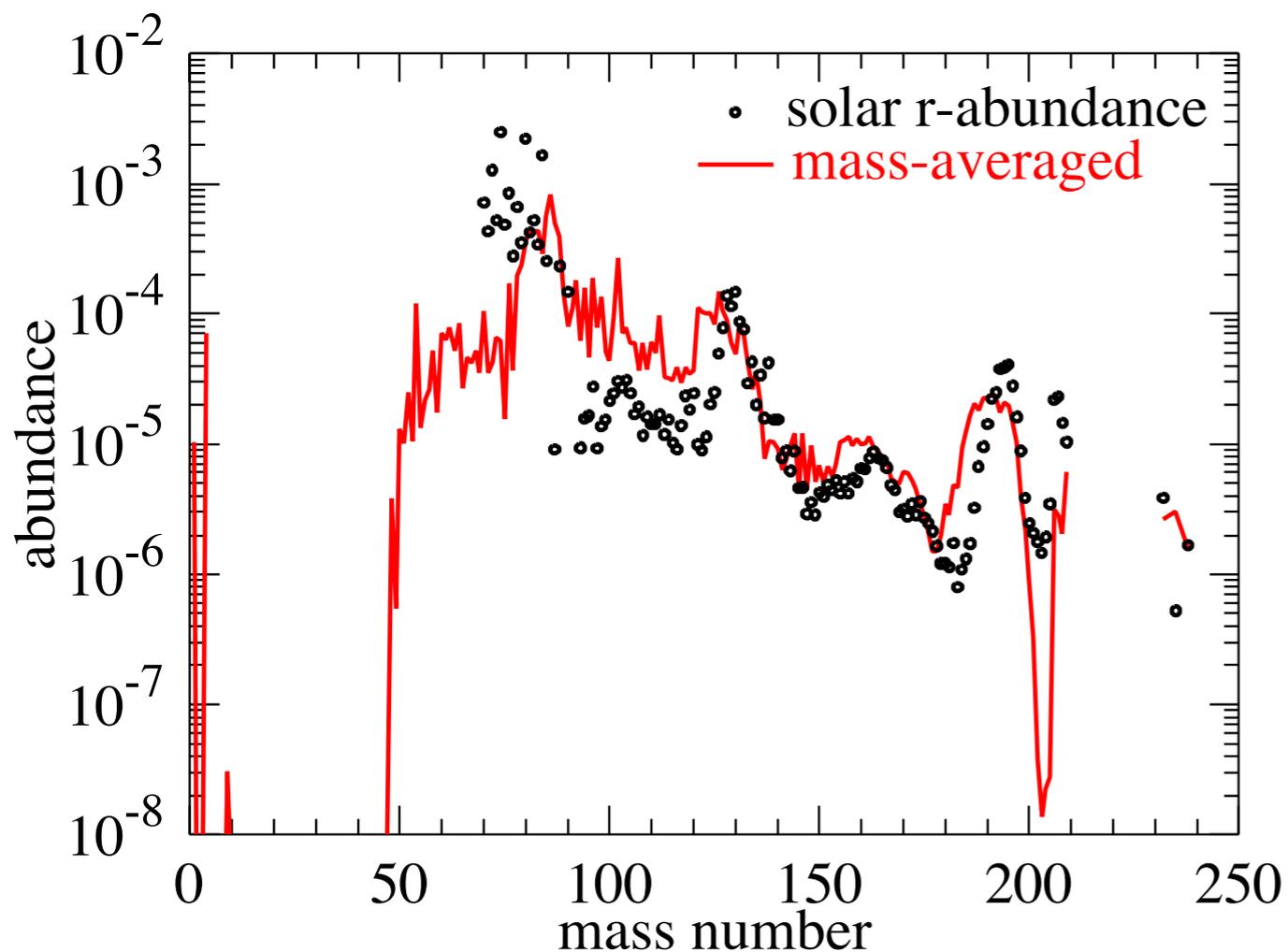
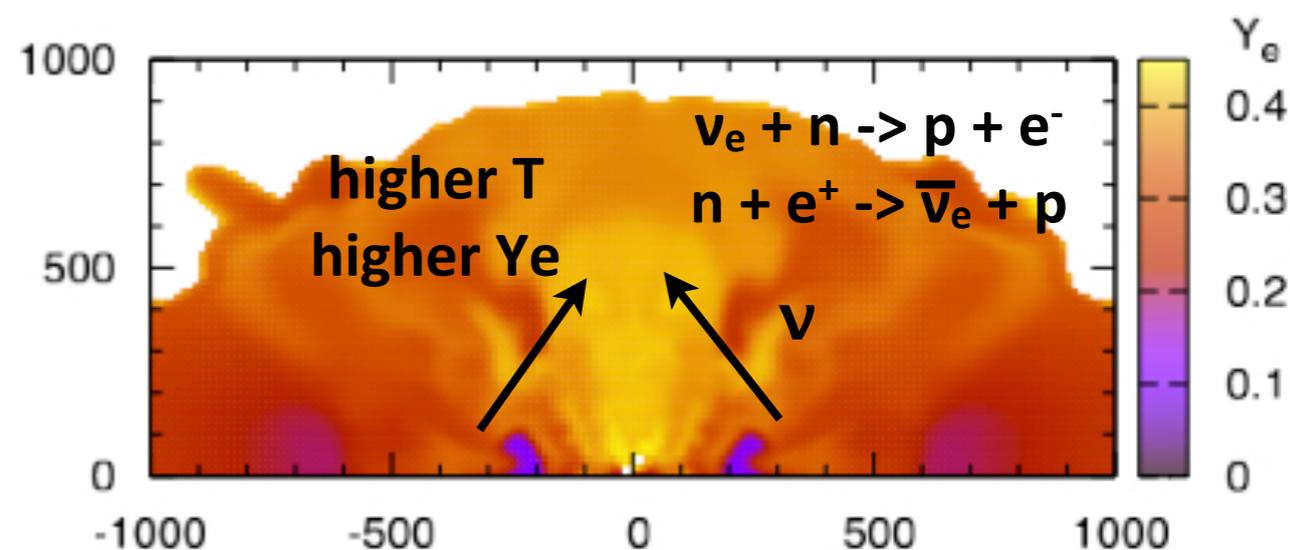
# 最近の進展

数値相対論

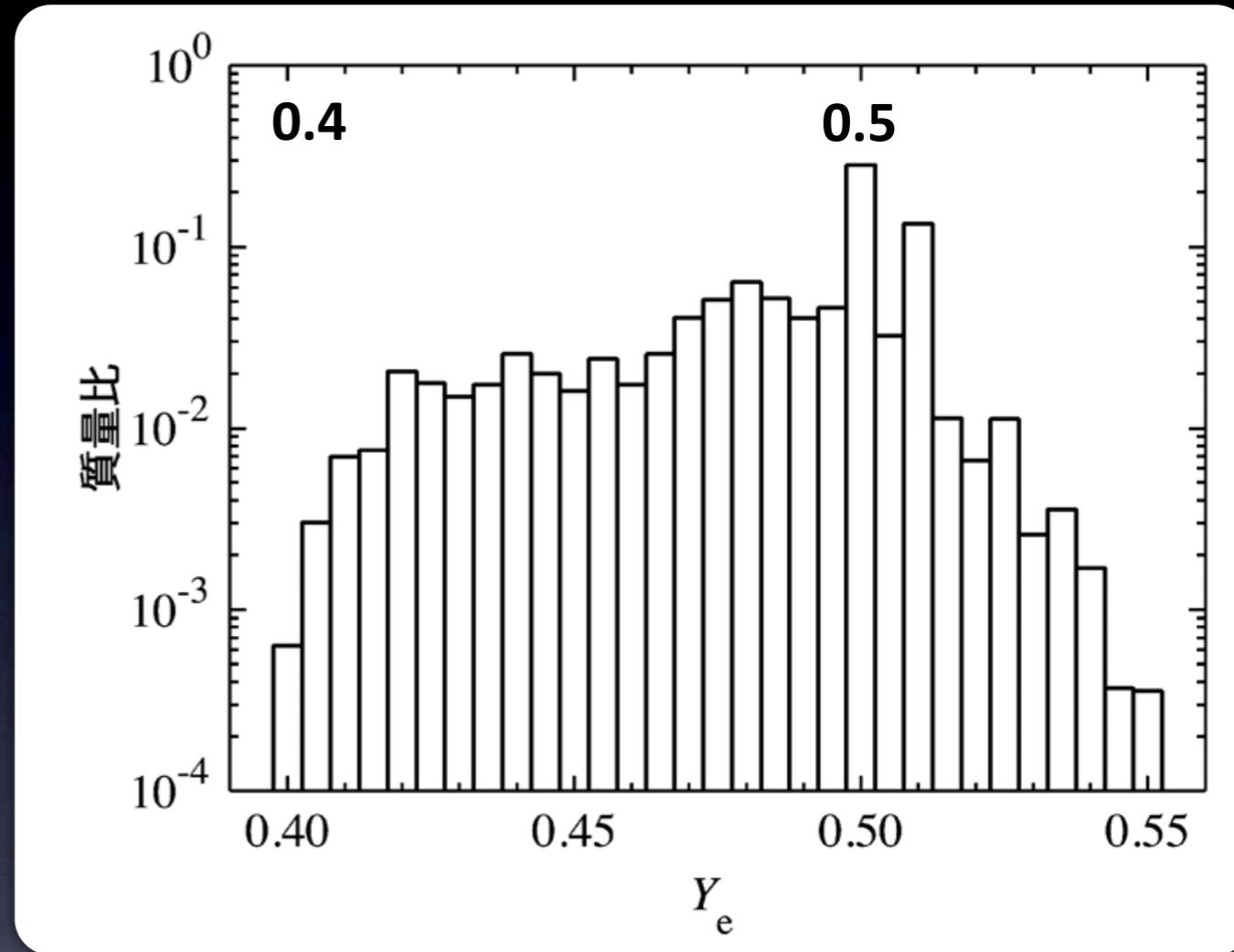
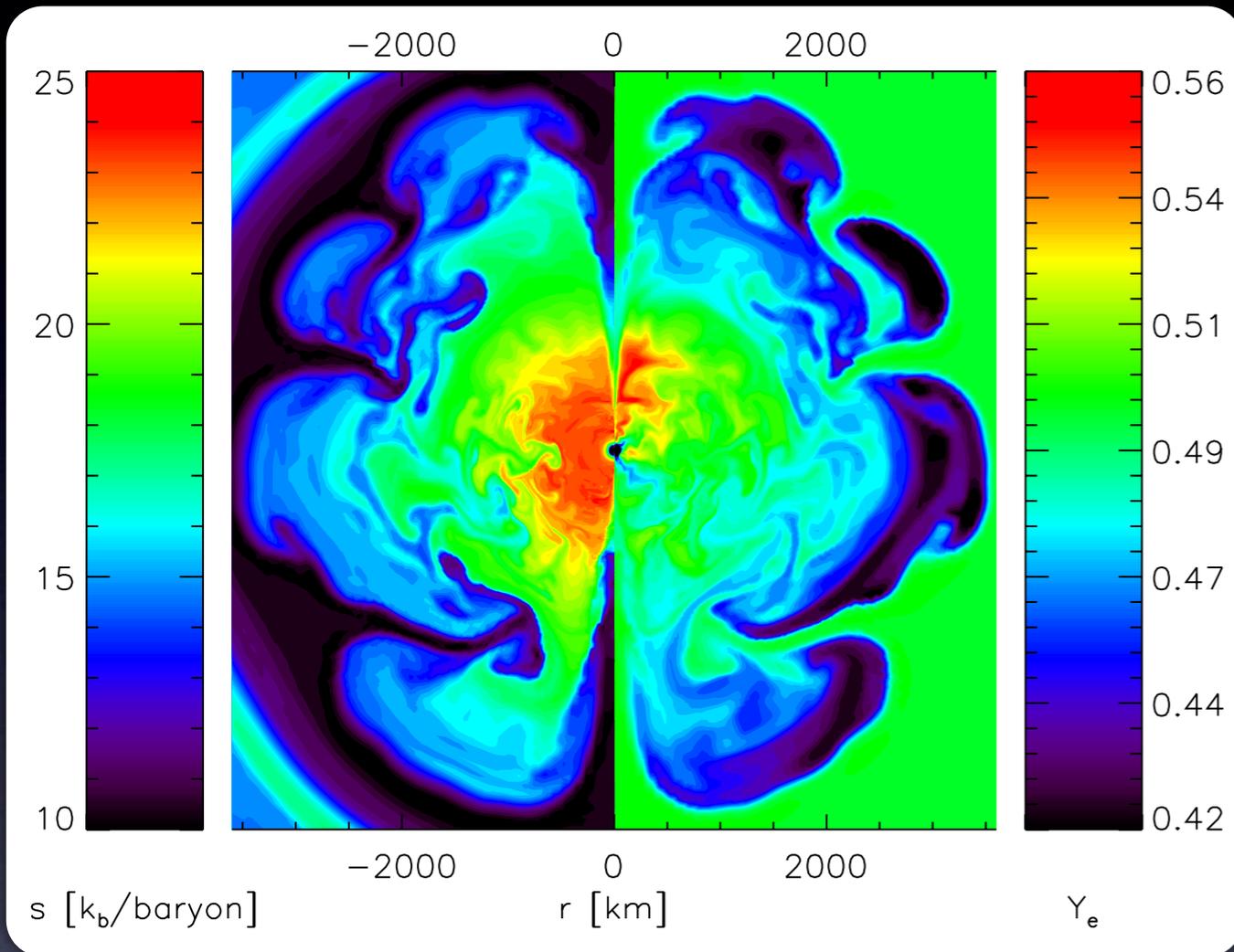
+ ニュートリノ輸送

=> 太陽系組成を再現

(Wanajo+14, Just+16)

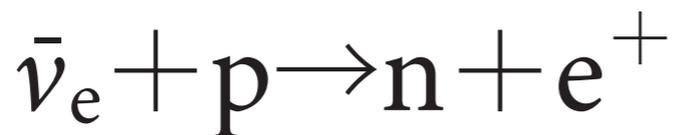
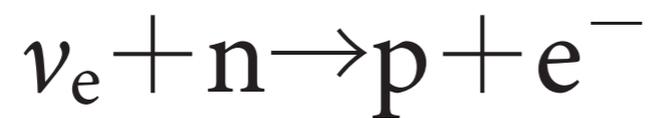


# r-processは超新星爆発ではなかったの？



Wanajo+11, 和南城さん天文月報 2014年1月号

ニュートリノ反応



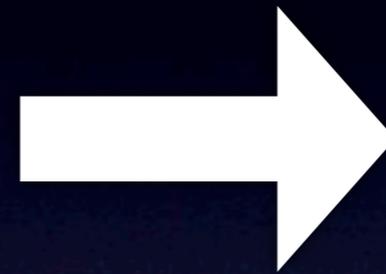
(普通の超新星では)  
中性子過剰な環境を作りにくい

# 中性子星合体はr-process元素の起源かもしれない

Event rate

← 重力波観測

$$R_{\text{NSM}} \sim 10^{-4} \text{ event Galaxy}^{-1} \text{ yr}^{-1}$$
$$\sim 10^3 \text{ event Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$$



中性子星合体rate

200 Mpc以内

~ 30 GW events/yr  
(~0.3-300)

Ejection per event

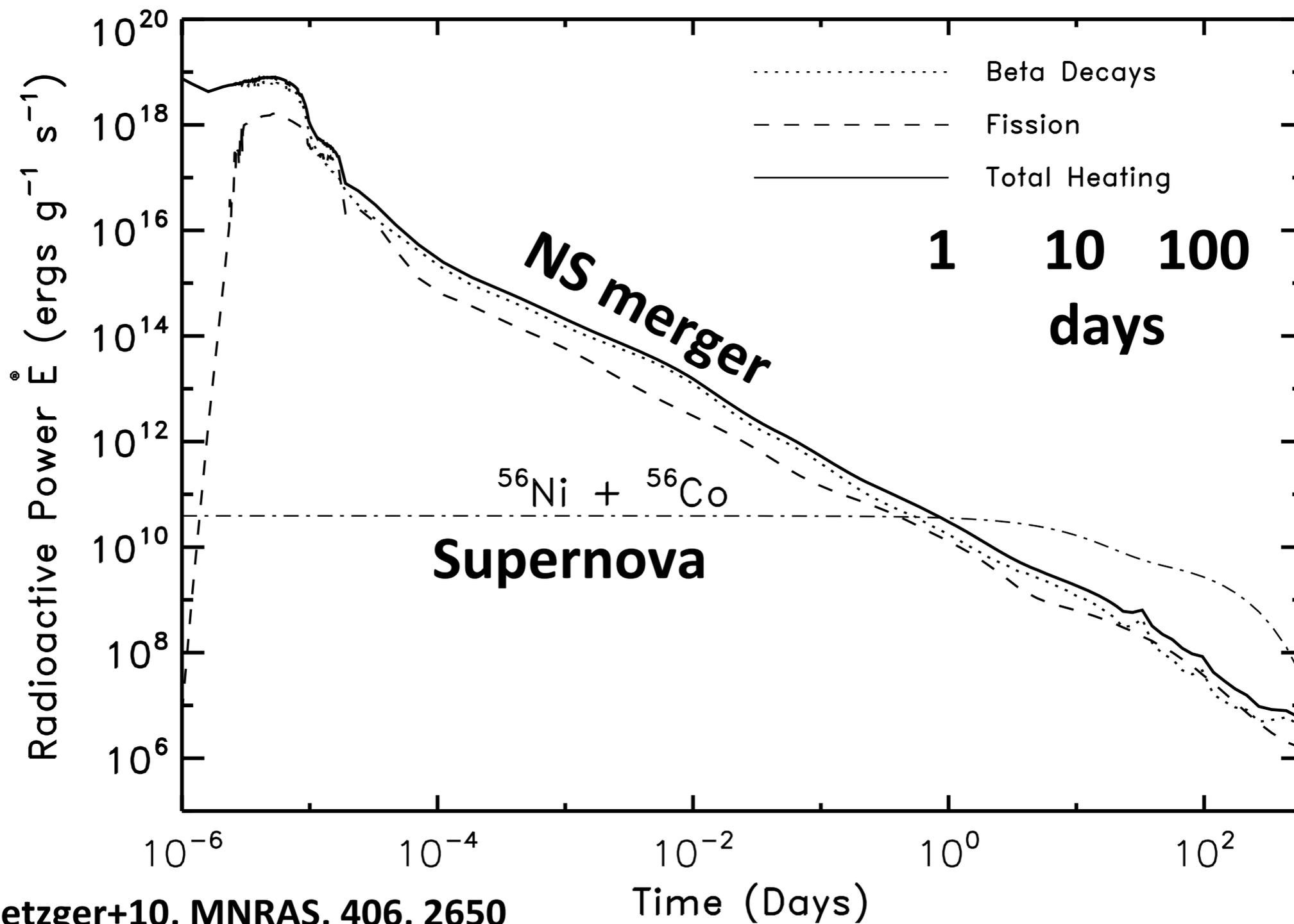
← 電磁波観測

$$M_{\text{ej}}(\text{r-process}) \sim 10^{-2} \text{ Msun}$$

$$M(\text{Galaxy, r-process}) \sim M_{\text{ej}}(\text{r}) \times (R_{\text{NSM}} \times t_{\text{G}})$$
$$\sim 10^{-2} \times 10^{-4} \times 10^{10} \sim 10^4 \text{ Msun}$$

観測的に検証可能な時代がやってきた

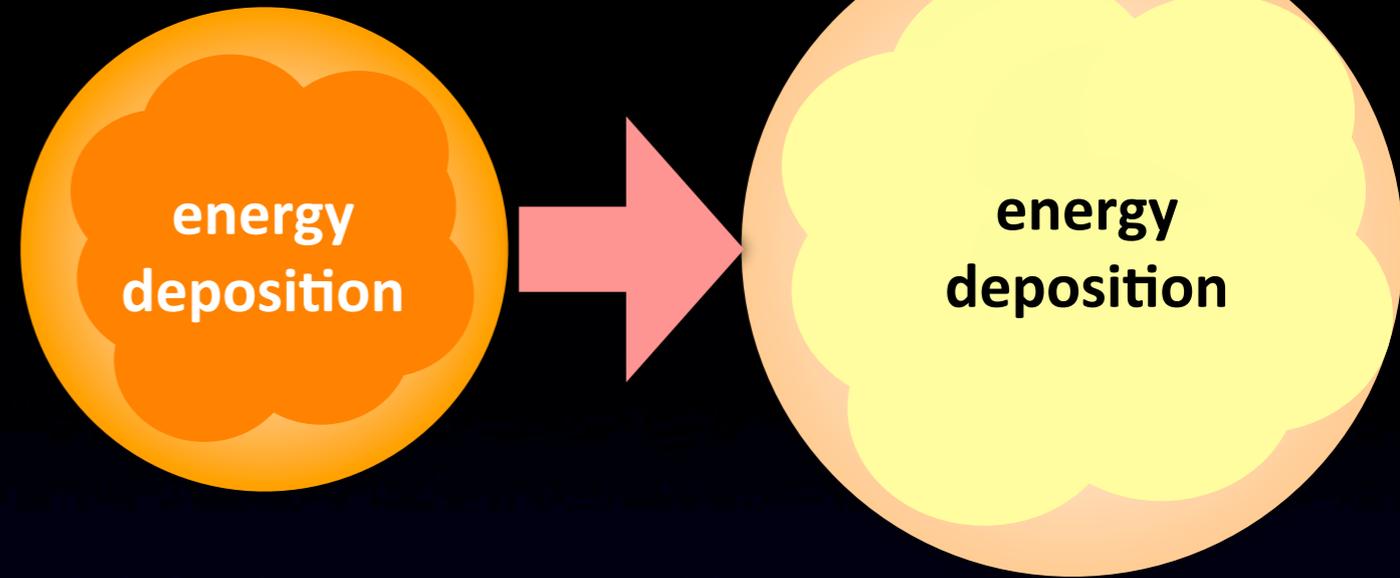
# r-process元素 => 放射性エネルギー => 電磁波放射



Metzger+10, MNRAS, 406, 2650

# “kilonova/macronova”

Li & Paczynski 98, Metzger+10,  
MT & Hotokezaka 13, MT+14,  
Kasen+13, Barnes & Kasen 13



典型的な  
時間

$$t_{\text{peak}} = \left( \frac{3\kappa M_{\text{ej}}}{4\pi c v} \right)^{1/2}$$
$$\simeq 8.4 \text{ days} \left( \frac{M_{\text{ej}}}{0.01 M_{\odot}} \right)^{1/2} \left( \frac{v}{0.1c} \right)^{-1/2} \left( \frac{\kappa}{10 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}} \right)^{1/2}$$

光度

$$L_{\text{peak}} = L_{\text{dep}}(t_{\text{peak}})$$
$$\simeq 1.3 \times 10^{40} \text{ erg s}^{-1} \left( \frac{M_{\text{ej}}}{0.01 M_{\odot}} \right)^{0.35} \left( \frac{v}{0.1c} \right)^{0.65} \left( \frac{\kappa}{10 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}} \right)^{-0.65}$$

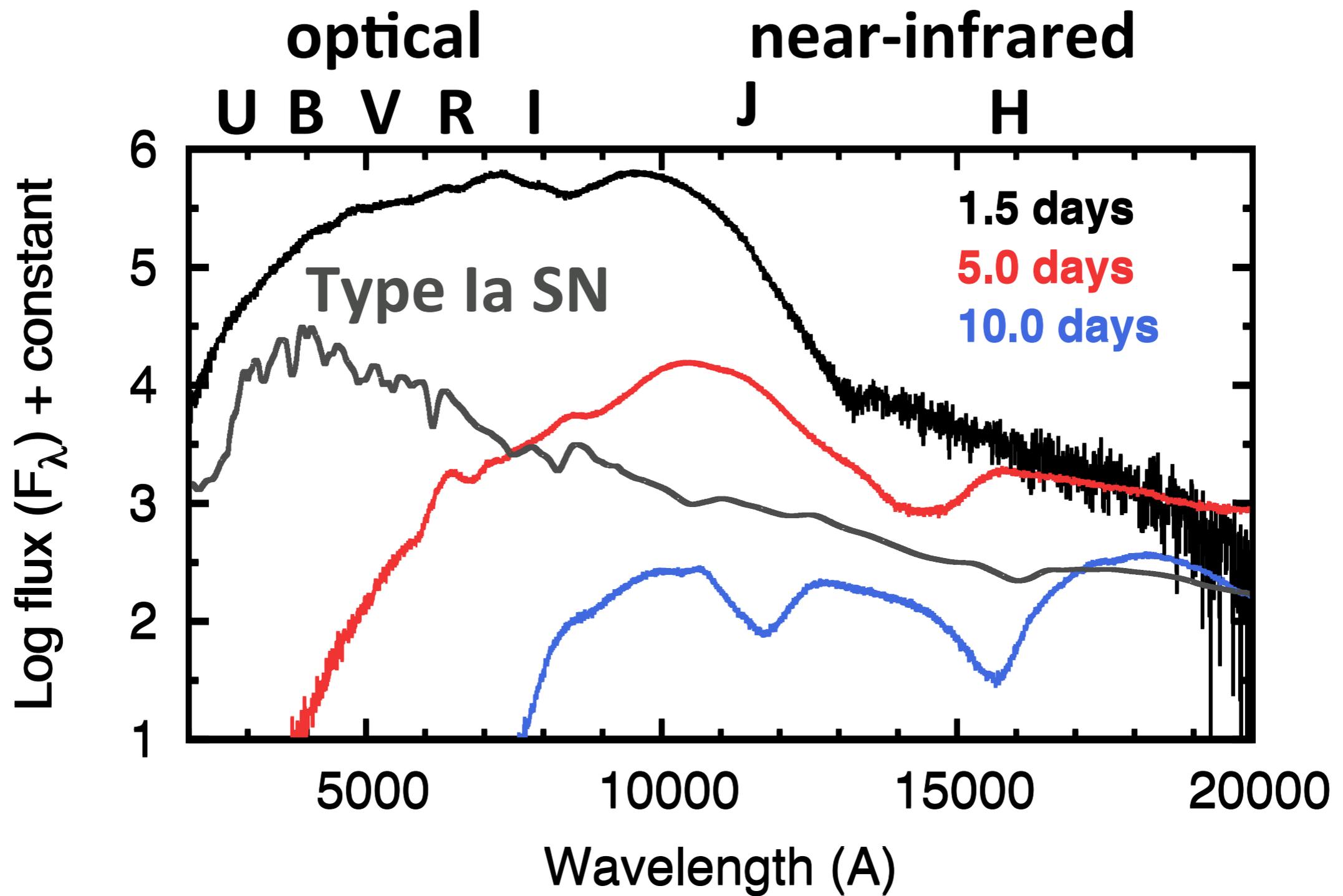
see Tanaka 2016 (review article), Advances in Astronomy (arXiv:1605.07235)

光の進みにくさ = opacity  $\kappa$  ( $\text{cm}^2 \text{ g}^{-1}$ )

金属(気体)の束縛遷移

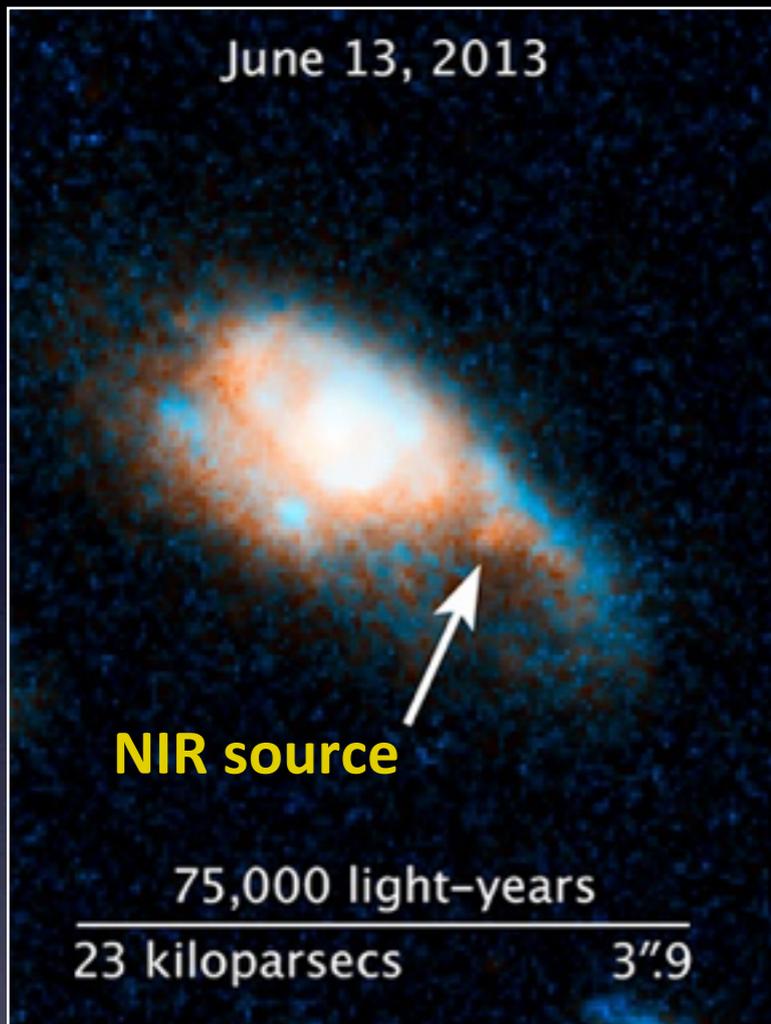
不定性あり (データの不完全性)

	la型超新星		中性子星合体
質量	1.4 Msun	>	0.01 Msun
速度	10,000 km/s	<	30,000-60,000 km/s
運動E	$10^{51}$ erg	$\approx$	$(1-5) \times 10^{50}$ erg
元素組成	Fe-group, Si, S, C, O		r-process elements
熱源	$^{56}\text{Ni}$		r-process elements

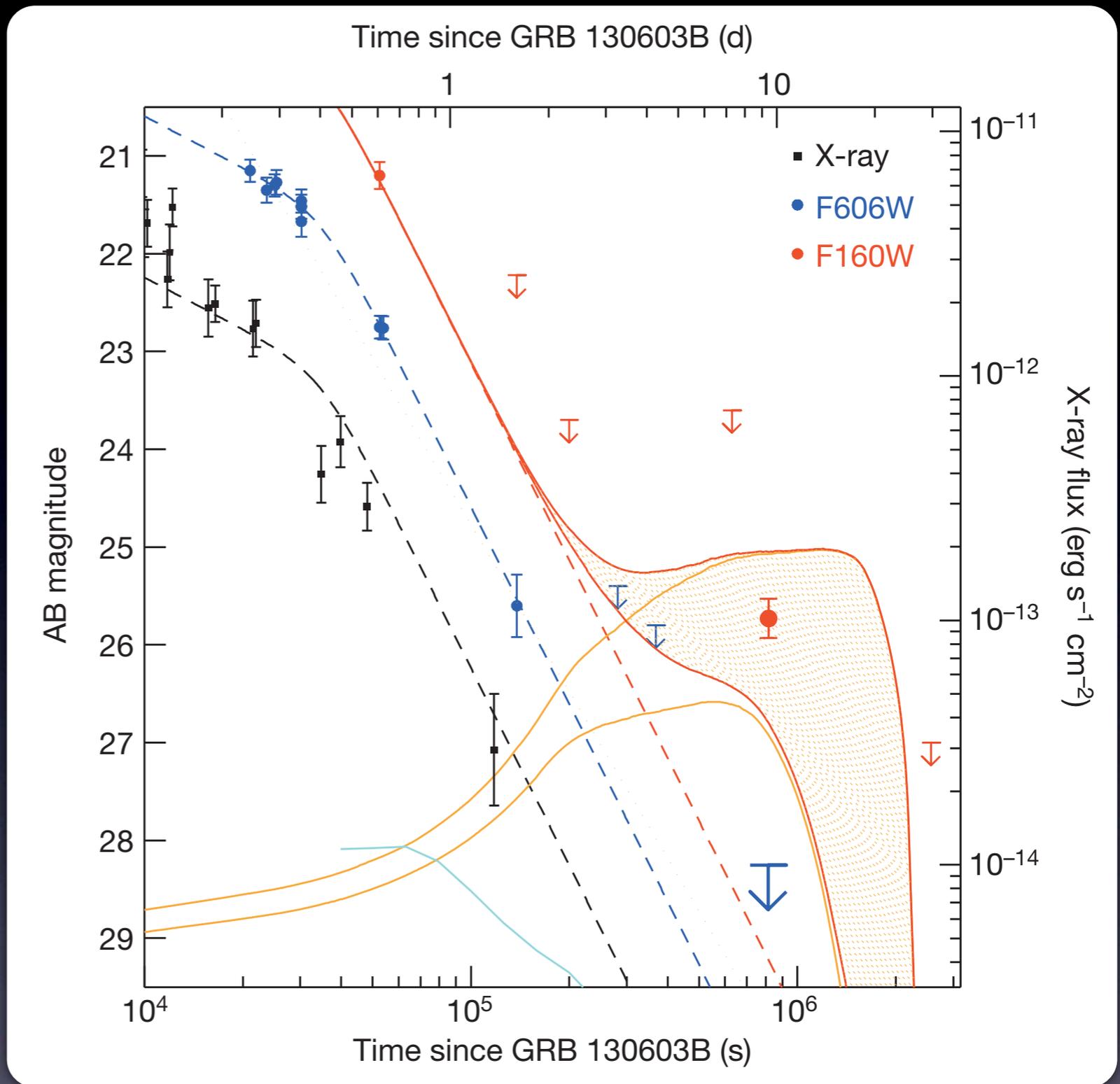


- 非常に「赤い」(赤外線にピーク)
- 幅が広く、特徴のないスペクトル

# short GRB 130603B ( $z \sim 0.36$ , 2Gpc)



Tanvir+2013, Nature, 500, 547  
Berger+2013, ApJ, 774, L23



理論予想通りの赤い放射 =>  $\sim 0.02 M_{\text{sun}}$ が放出されている  
(r-process元素の起源としては朗報)

# GRB 130603B => 中性子星半径(<=> 高密度状態方程式)

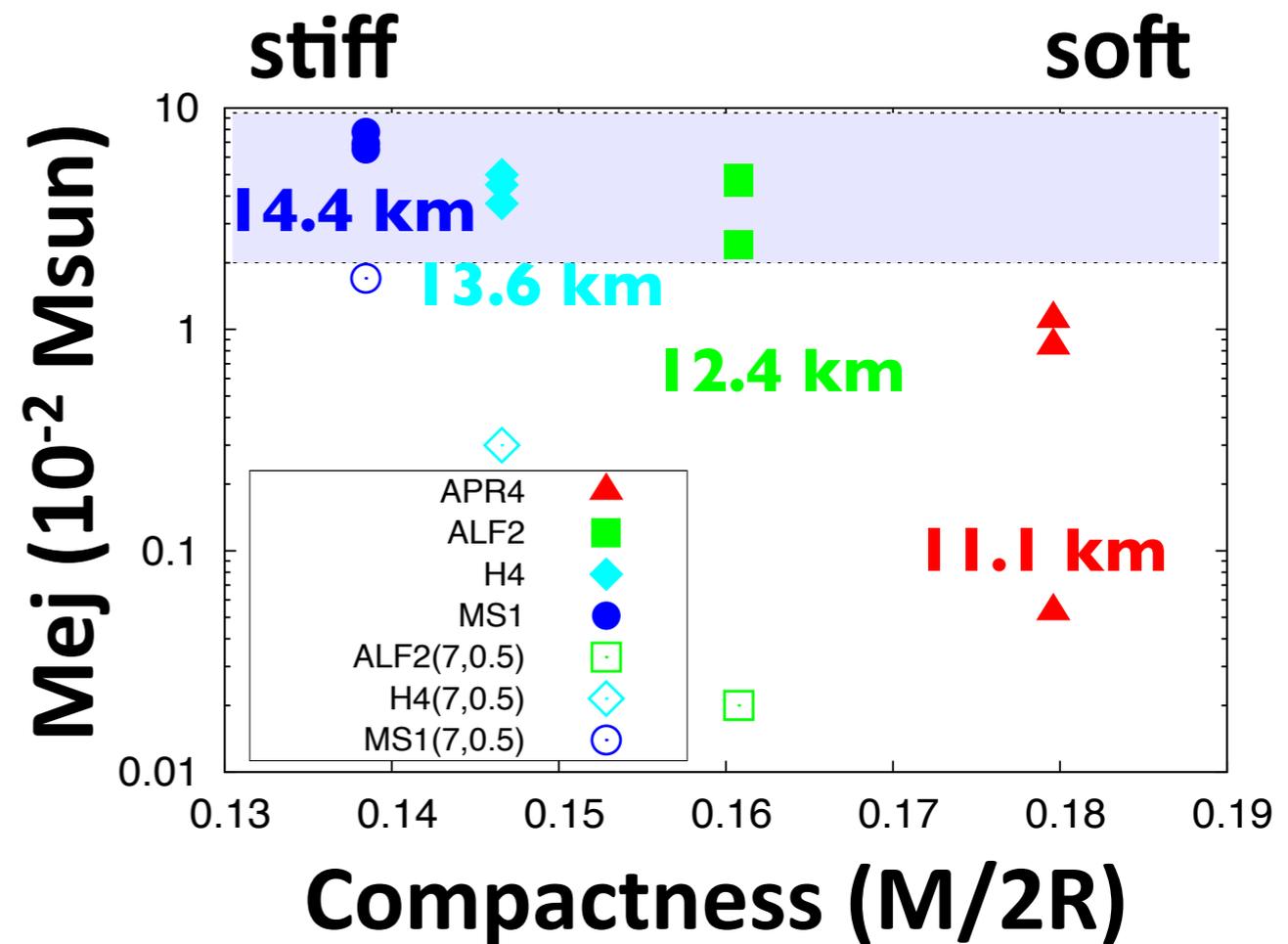
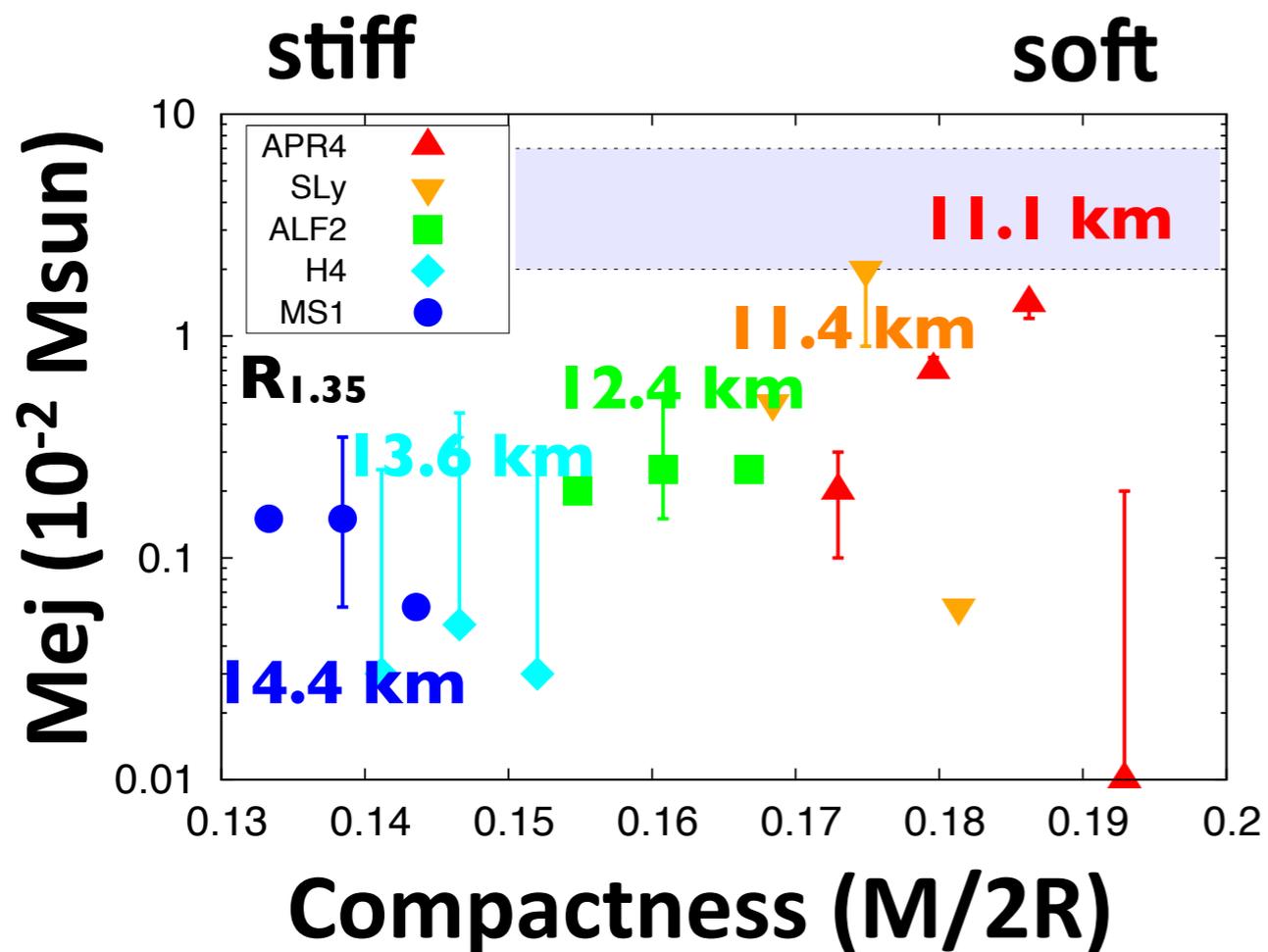
Hotokezaka, Kyutoku, MT, Kiuchi, Sekiguchi, Shibata, Wanajo 2013, ApJ, 778, L16

**NS-NS**

=> **soft EOS (small R)**

**BH-NS**

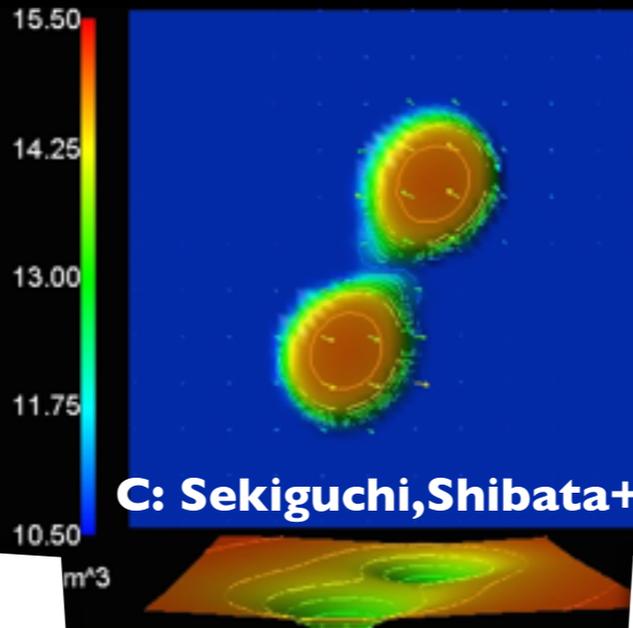
=> **stiff EOS (large R)**



ショートガンマ線バーストはNS-NS? BH-NS?

重力波+電磁波対応天体 => 本格的な制限へ

# 理論・数値シミュレーション



数値相対論

輻射輸送

電磁波天文学

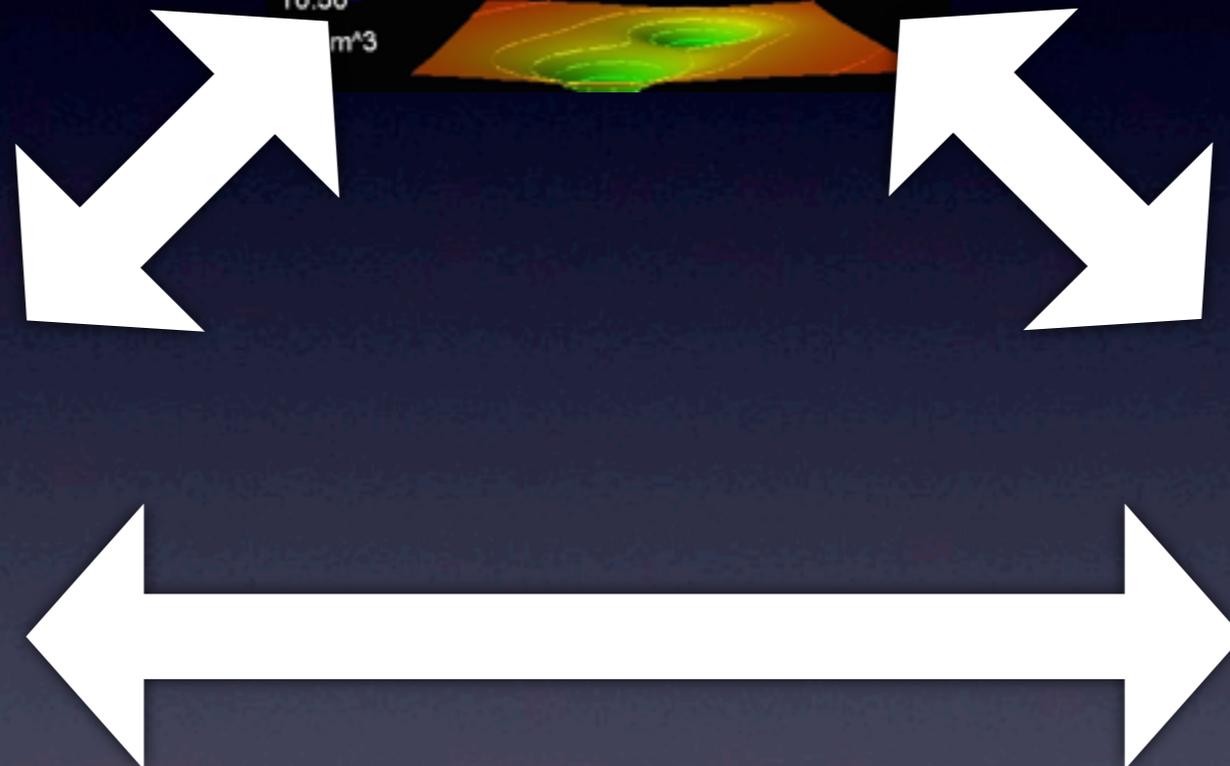


Ejected mass

重力波天文学



Event rate



マルチメッセンジャー天文学

r-process元素の起源

高密度状態方程式

## 重力波天体とマルチメッセンジャー天文学

- 「マルチメッセンジャー天文学」の幕開け
- 中性子星合体：元素の合成と電磁波放射
- 未解決問題・これから面白そうなこと

# (個人的意見) 重要だと思うこと

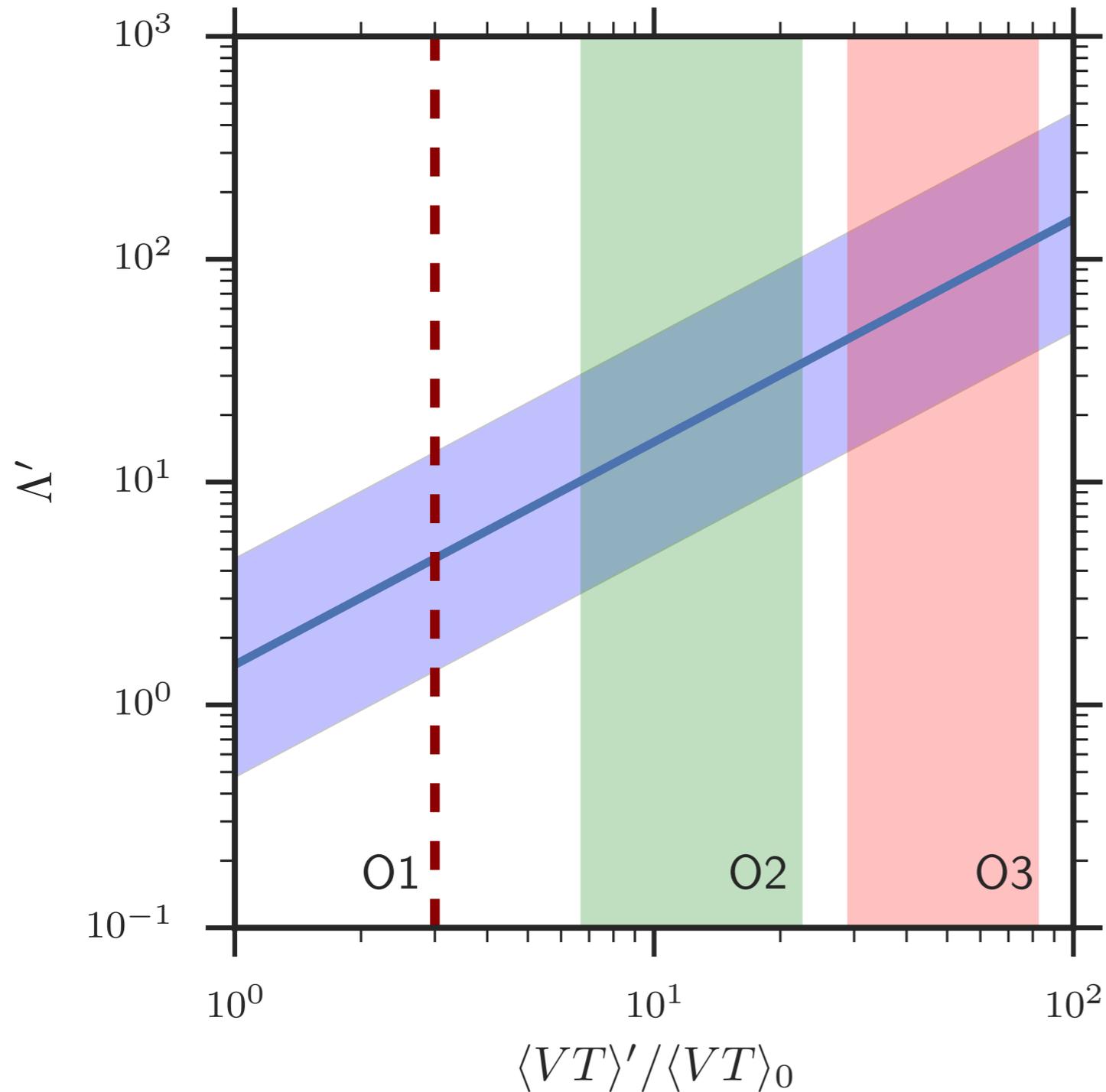
## ● BH-BH

1. 連星進化、BH形成 ( $\Leftrightarrow$  超新星)  
=> 宇宙におけるBH population

## ● NS-NS/BH-NS

1. BH + 降着円盤
2. 電磁波対応天体の同定
3. 銀河の化学進化

# 毎日のようにBH-BHからの重力波がやってくる

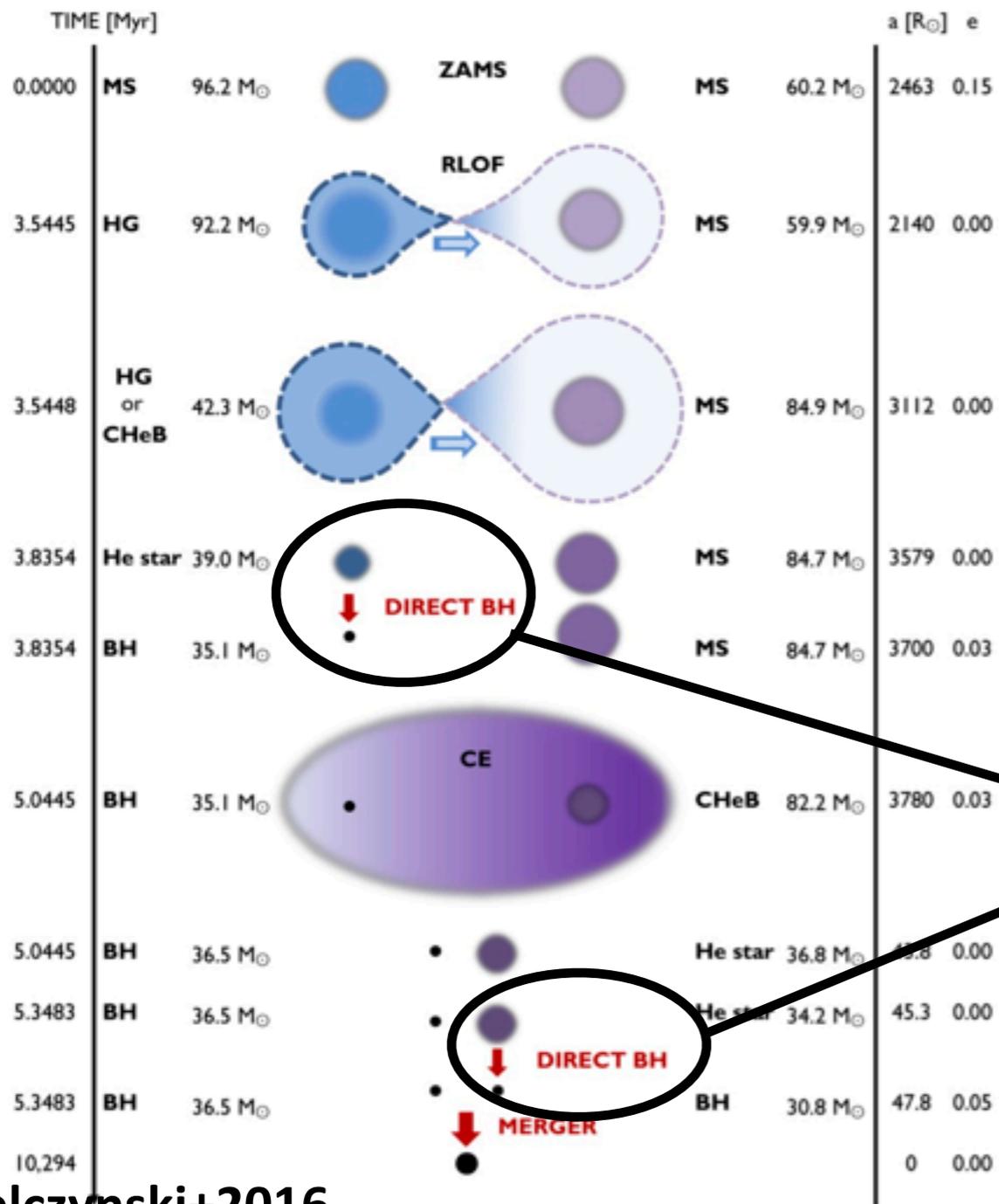


~ 10 events/yr in O2  
(今年！)

~ 100 events/yr in O3  
(< a few yr)

**BH-BHの統計的研究が  
可能になるのは間違いない**

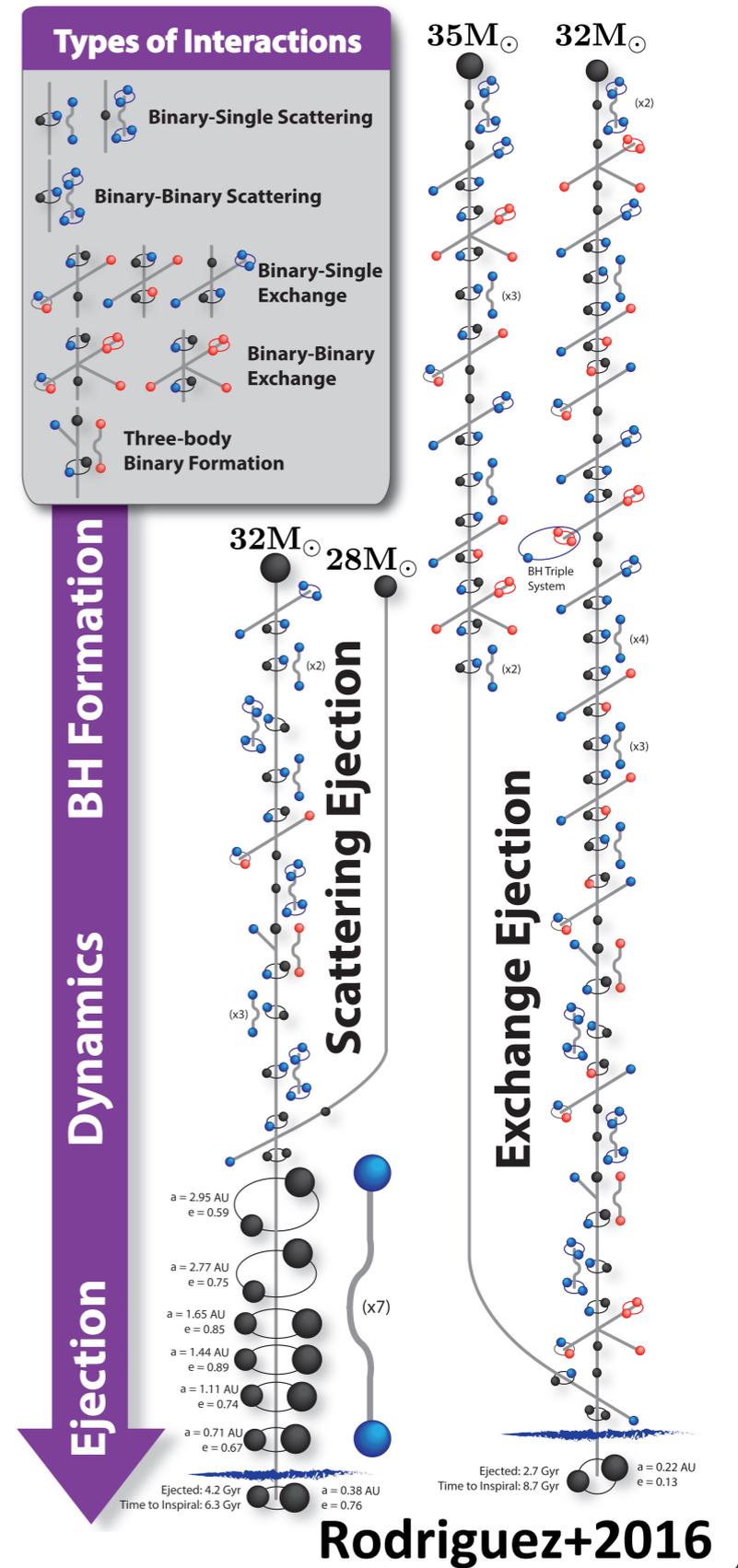
# BH-BH合体への進化経路



Belczynski+2016

超新星爆発  
(の失敗)

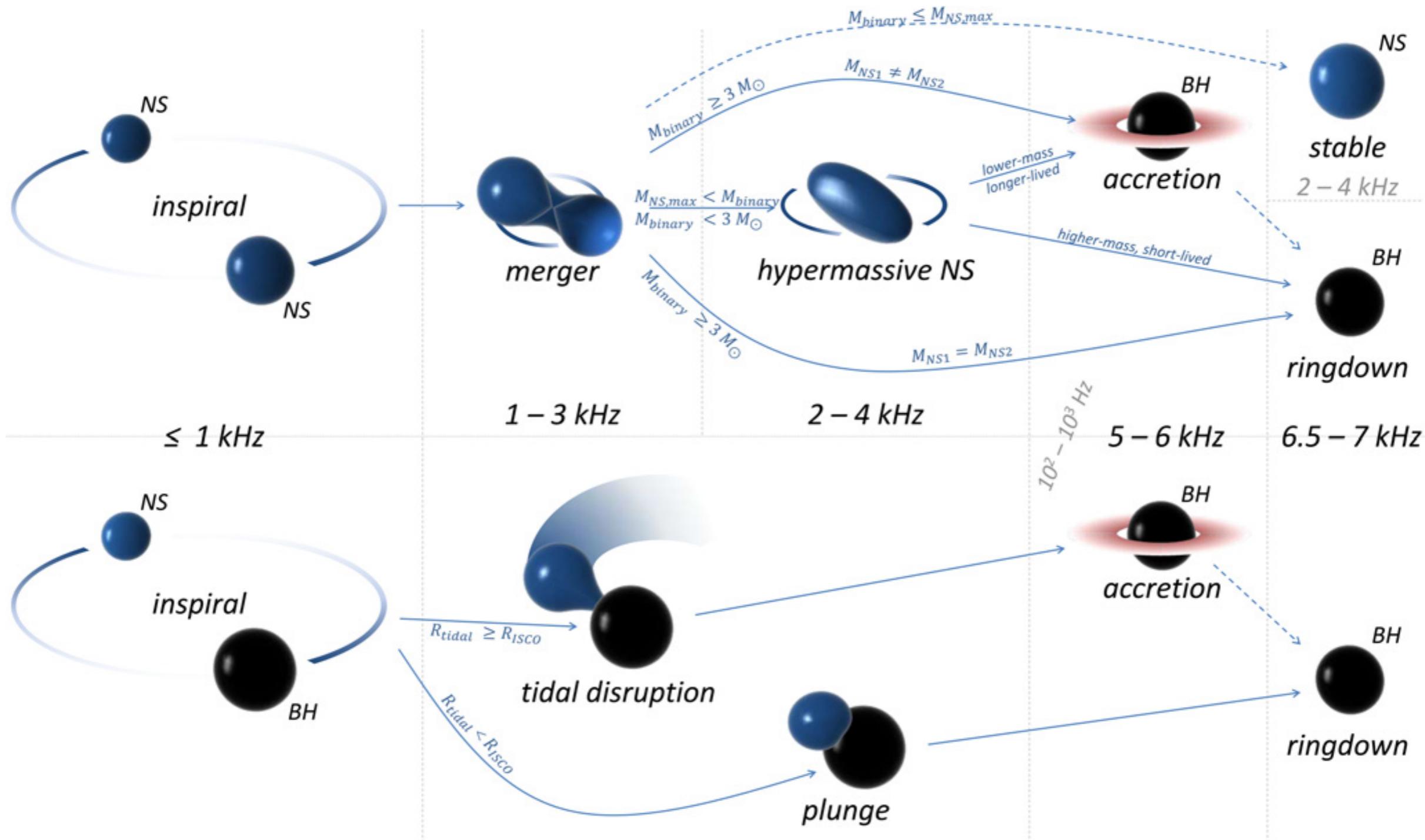
恒星進化・連星進化



星団進化

Tanikawa+2013  
Rodriguez+2015

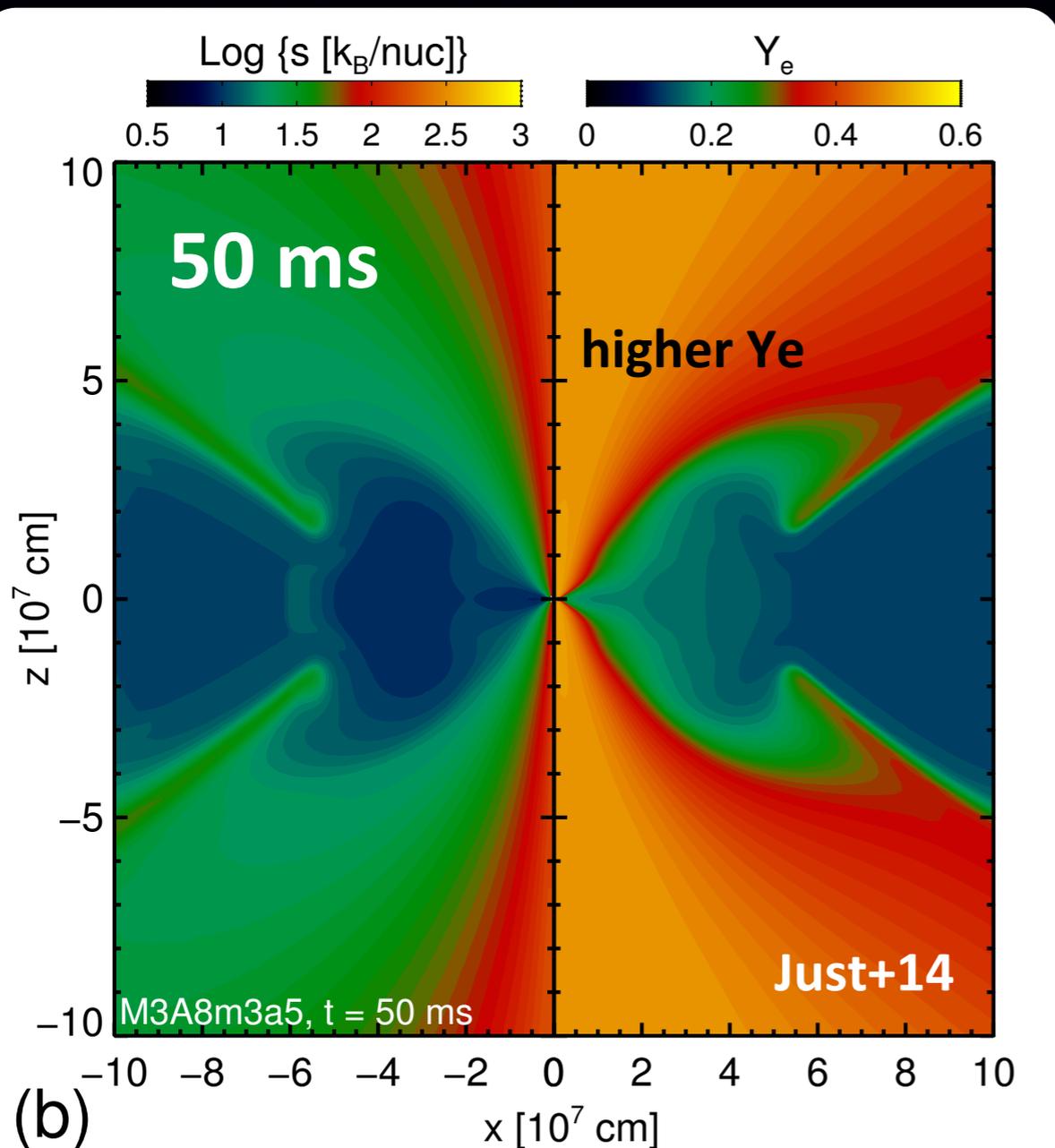
# 1. NS-NS/BH-NS合体 => BH + 降着円盤



# 降着円盤風 (disk wind)のシミュレーション

(e.g., Fernandez 2013, Just+2014)

活動銀河核  
X線連星



円盤質量  $\sim 0.1 M_{\text{sun}}$

放出される質量  $\sim 0.03 M_{\text{sun}}$

(組成も異なるかも)

=> 電磁波放射の予想に影響

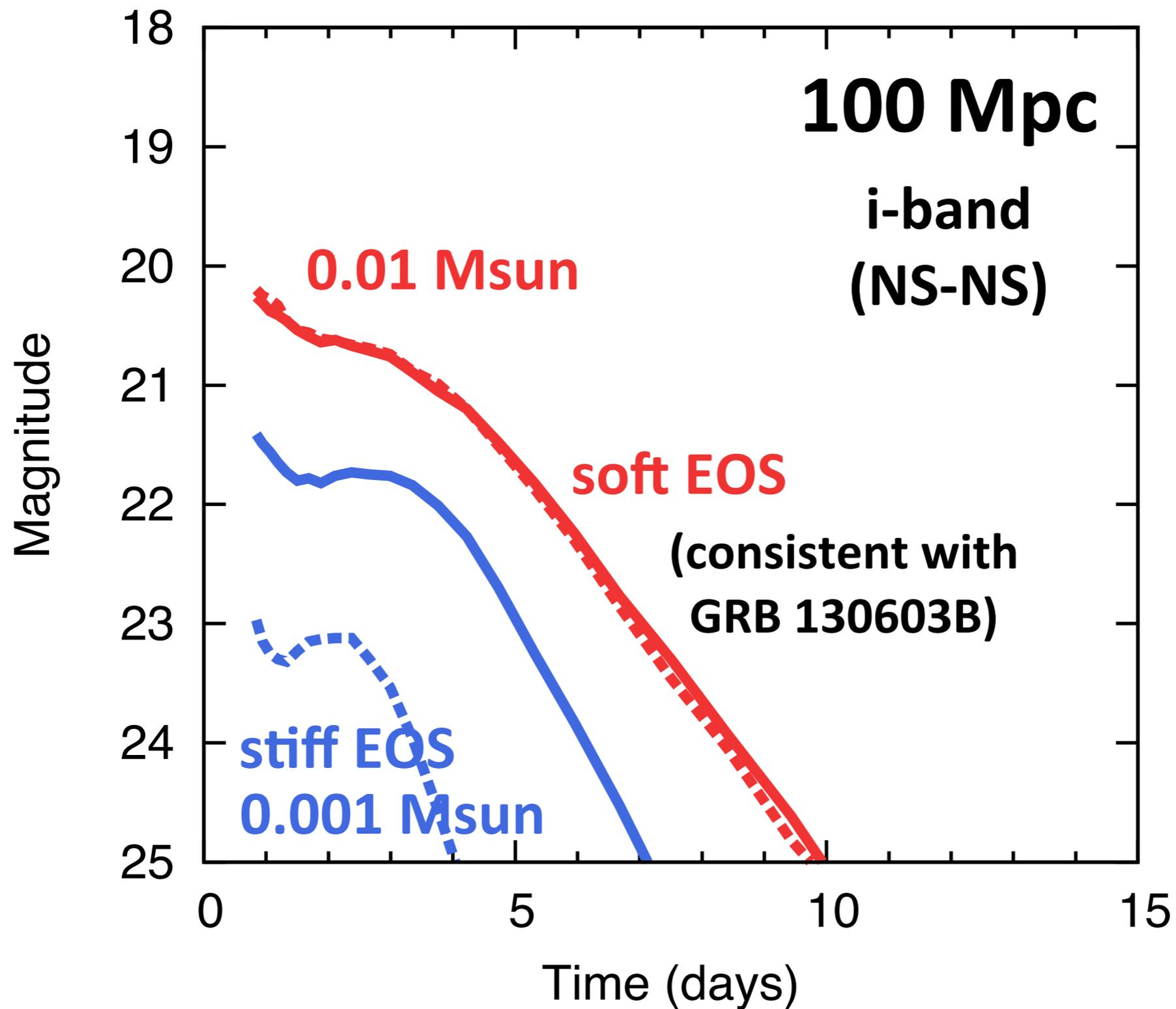
(Metzger+ 2014, Kasen+2015)

磁場の効果？

相対論の効果？

ジェットは出るか？

## 2. 電磁波対応天体の同定



# J-GEM:

## Japanese collaboration for GW EM follow-up

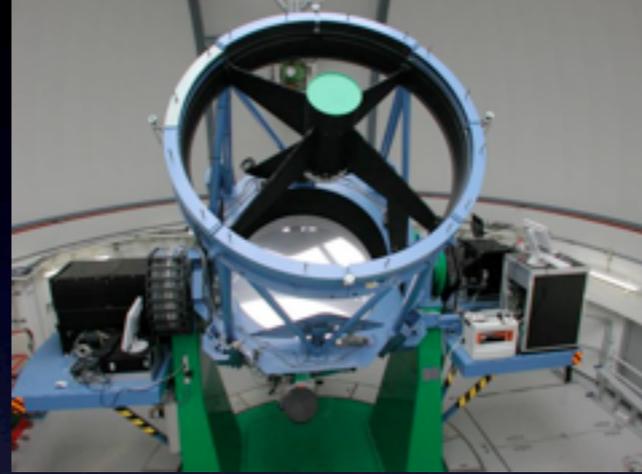
Okayama 0.91m



Okayama 1.88m



Hiroshima 1.5m



Kiso 1m (**wide field**)



MOA-II 1.8m

(**wide field**, south)



IRSF 1.4m

(south)

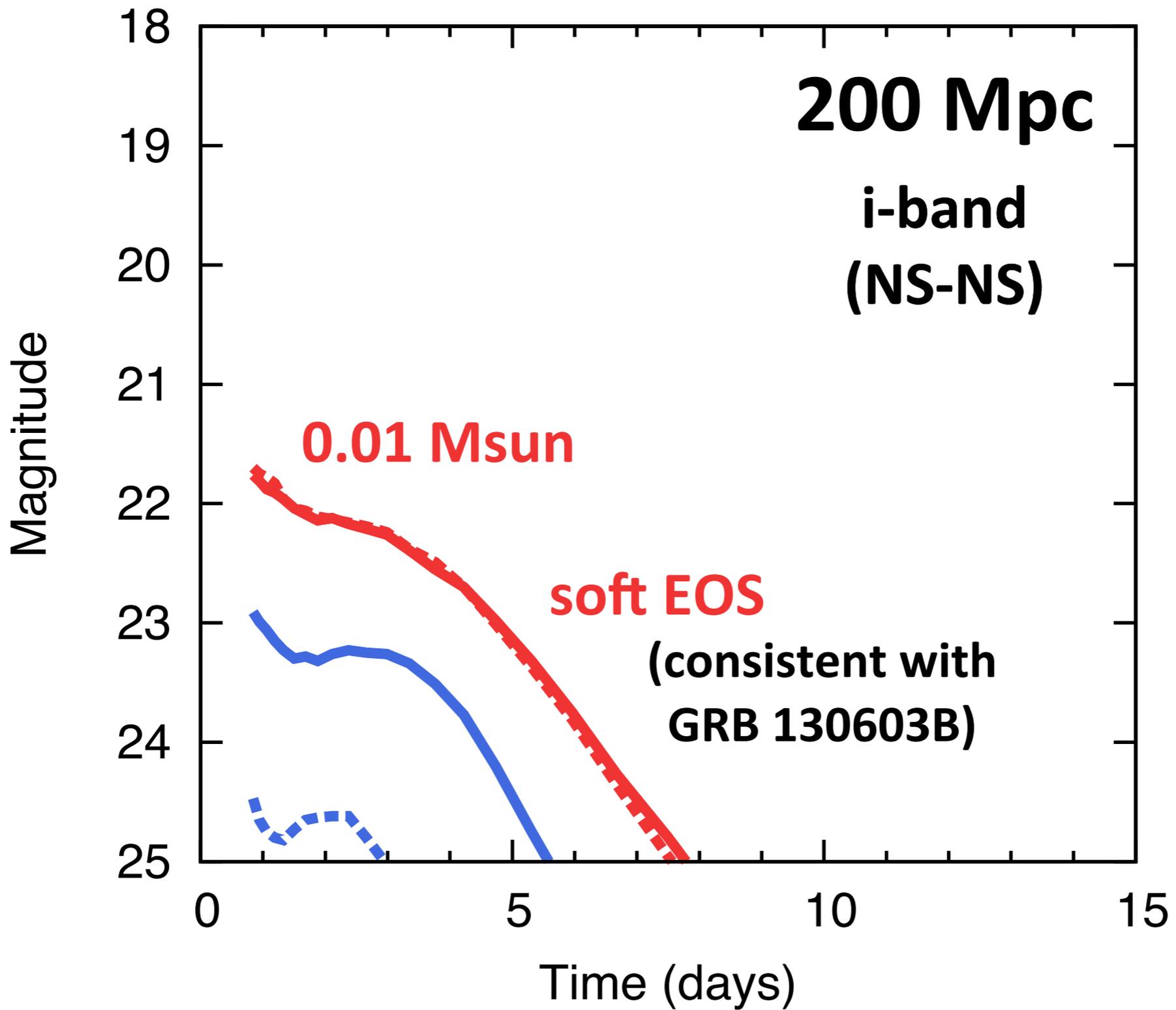


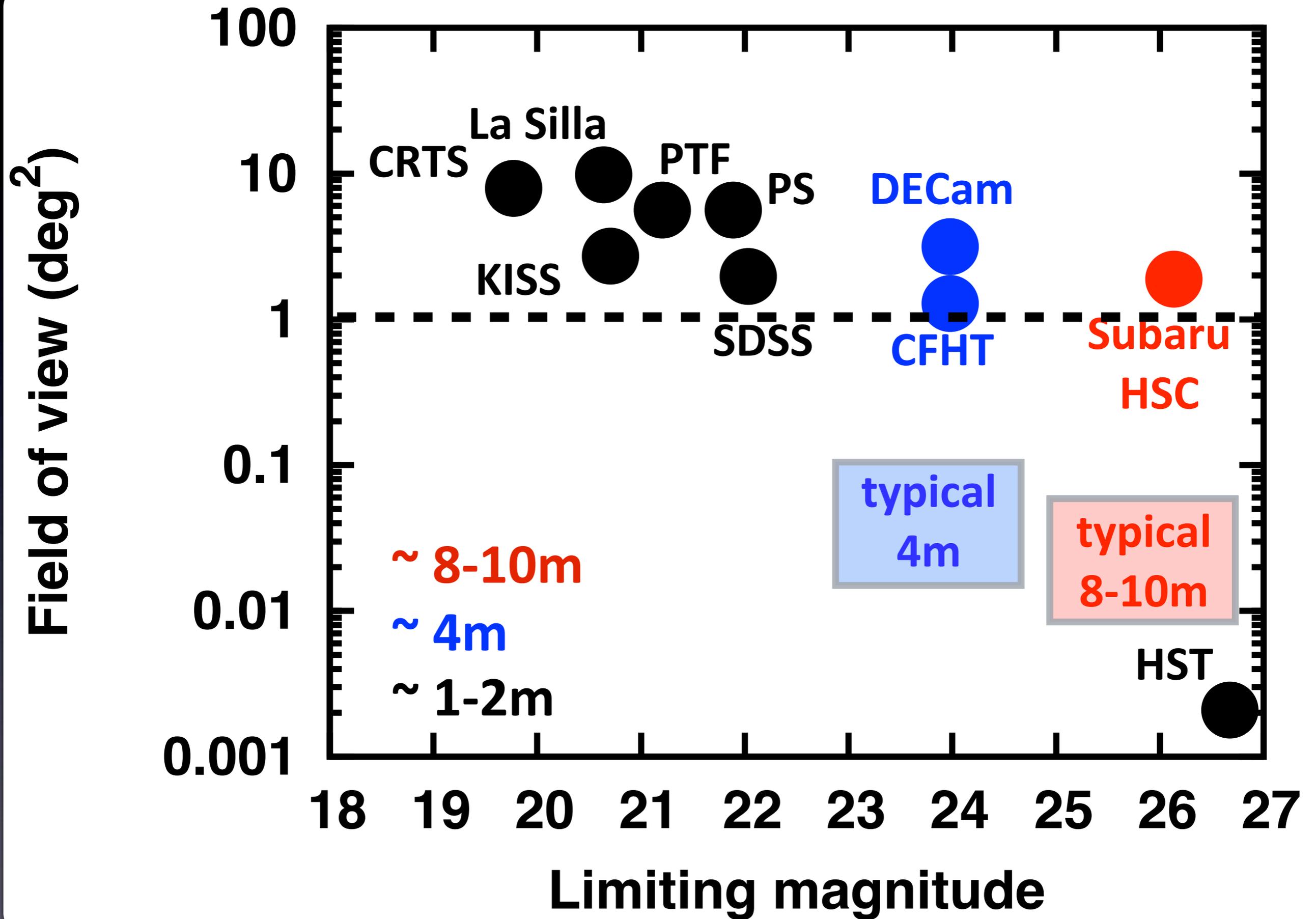
“time-domain” astronomy  
(時間軸天文学)

突発天体

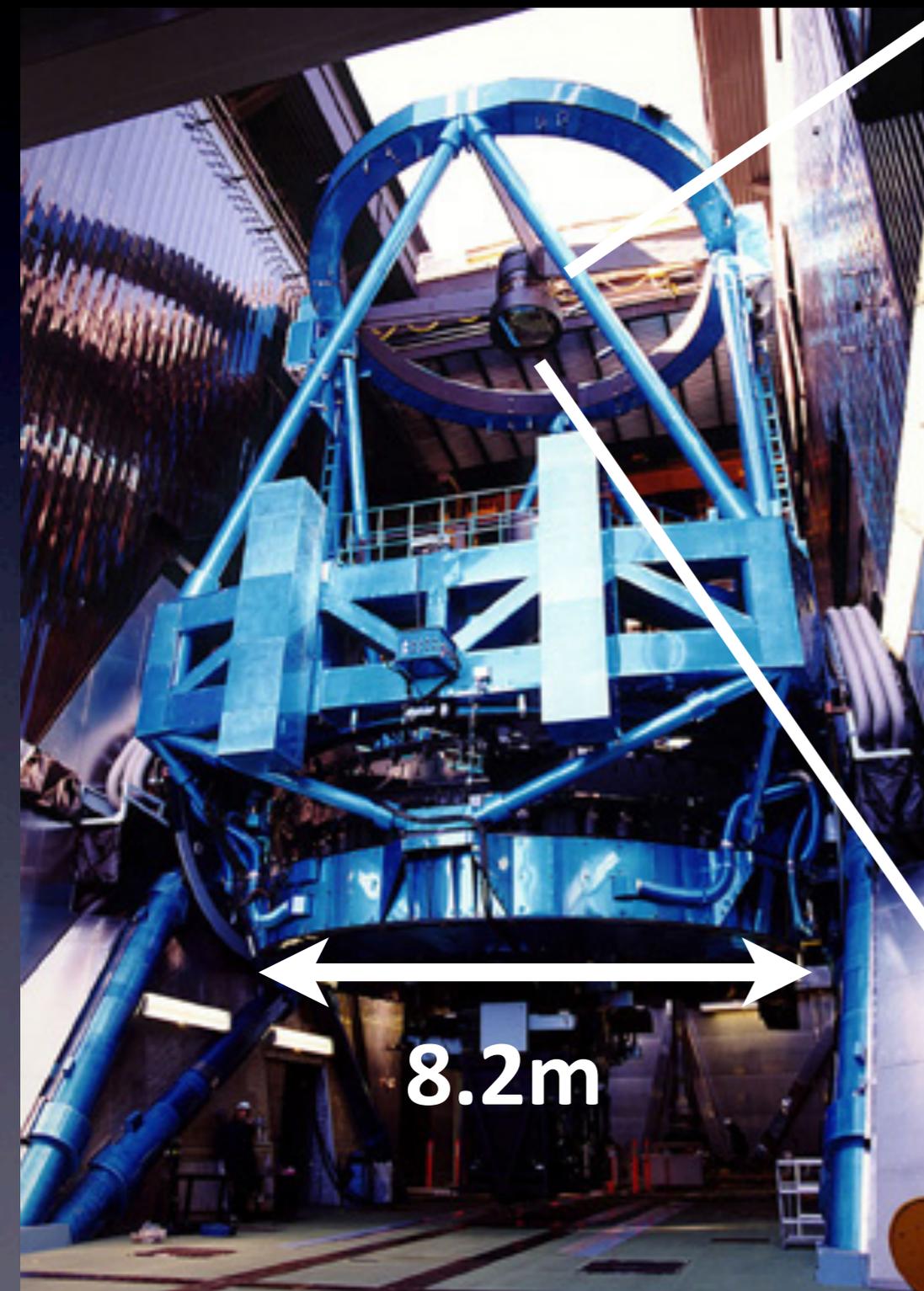
(超新星爆発、ガンマ線バースト)

変光星、マイクロレンズ、、、





# Subaru/Hyper Suprime-Cam

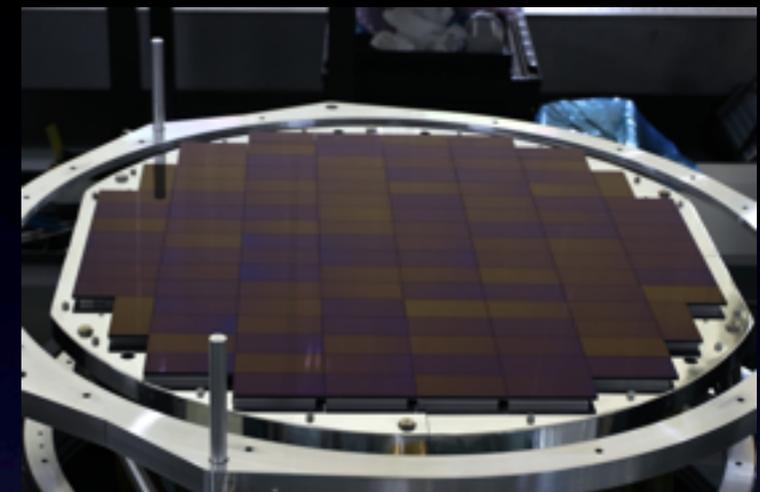


8.2m



3m

~3t



104 CCDs  
~ 900 Megapixel

2 GB/image  
~300 GB/night

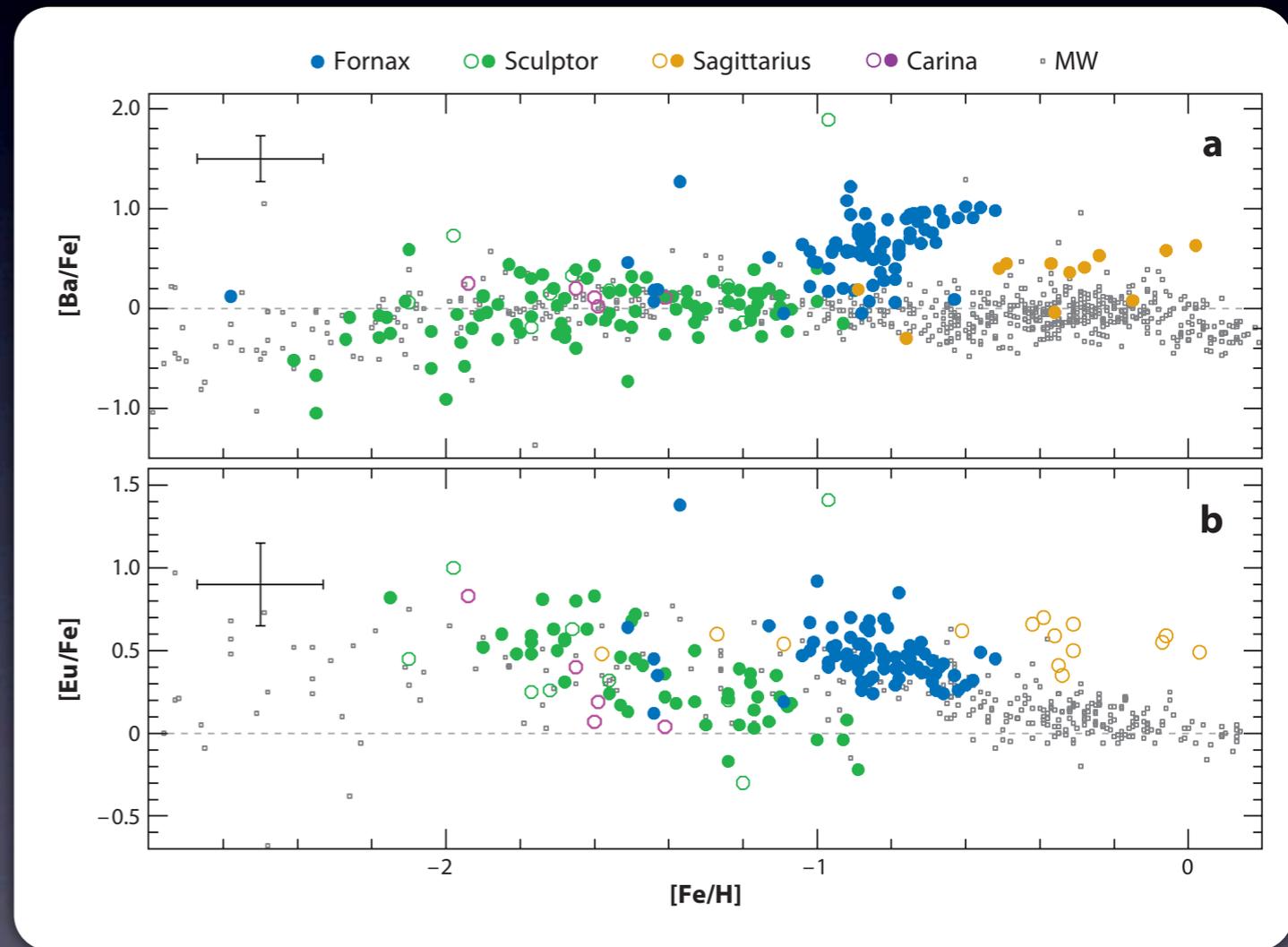
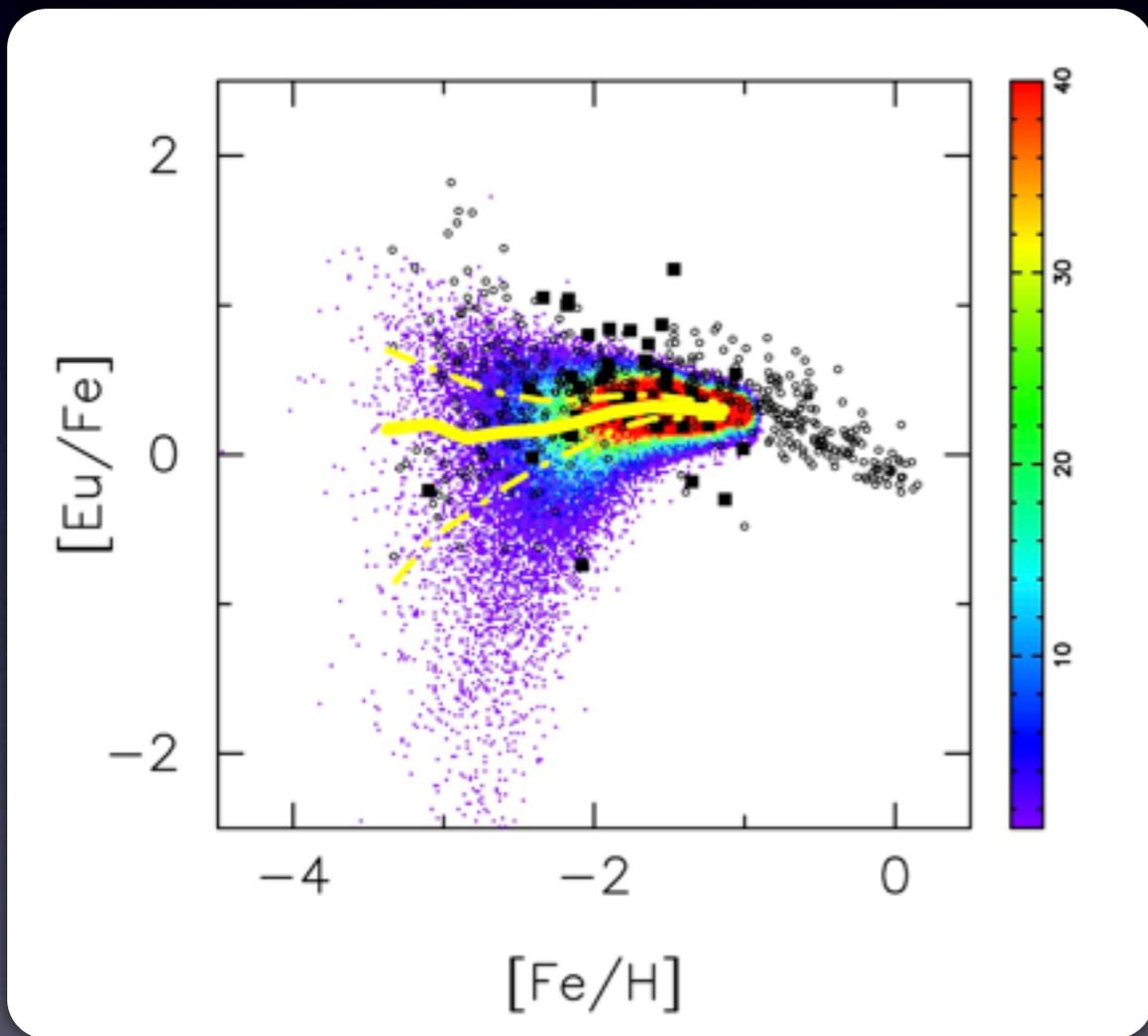
ビッグデータ処理  
機械学習

# 3. 銀河の化学進化

本田敏志さん招待講演 (この後すぐ)

## 矮小銀河の 化学進化シミュレーション

## 矮小銀河の星の分光観測



Hirai+2015

Tolstoy+2009

銀河形成・進化

金属欠乏星

# まとめ：重力波天体とマルチメッセンジャー天文学

**BH-BH**

**NS-NS/BH-NS**

**理論**

進化経路  
恒星進化  
星団進化

連星合体

BH+降着円盤

AGN, X線連星

BH population

BH形成(超新星)

元素合成

銀河形成・進化

輻射輸送

金属欠乏星

**観測**

電磁波？

電磁波対応天体探査

超新星/GRB

複合領域の連携で挑む必要 ==> 夏の学校はととてもよい機会です

ありがとうございました