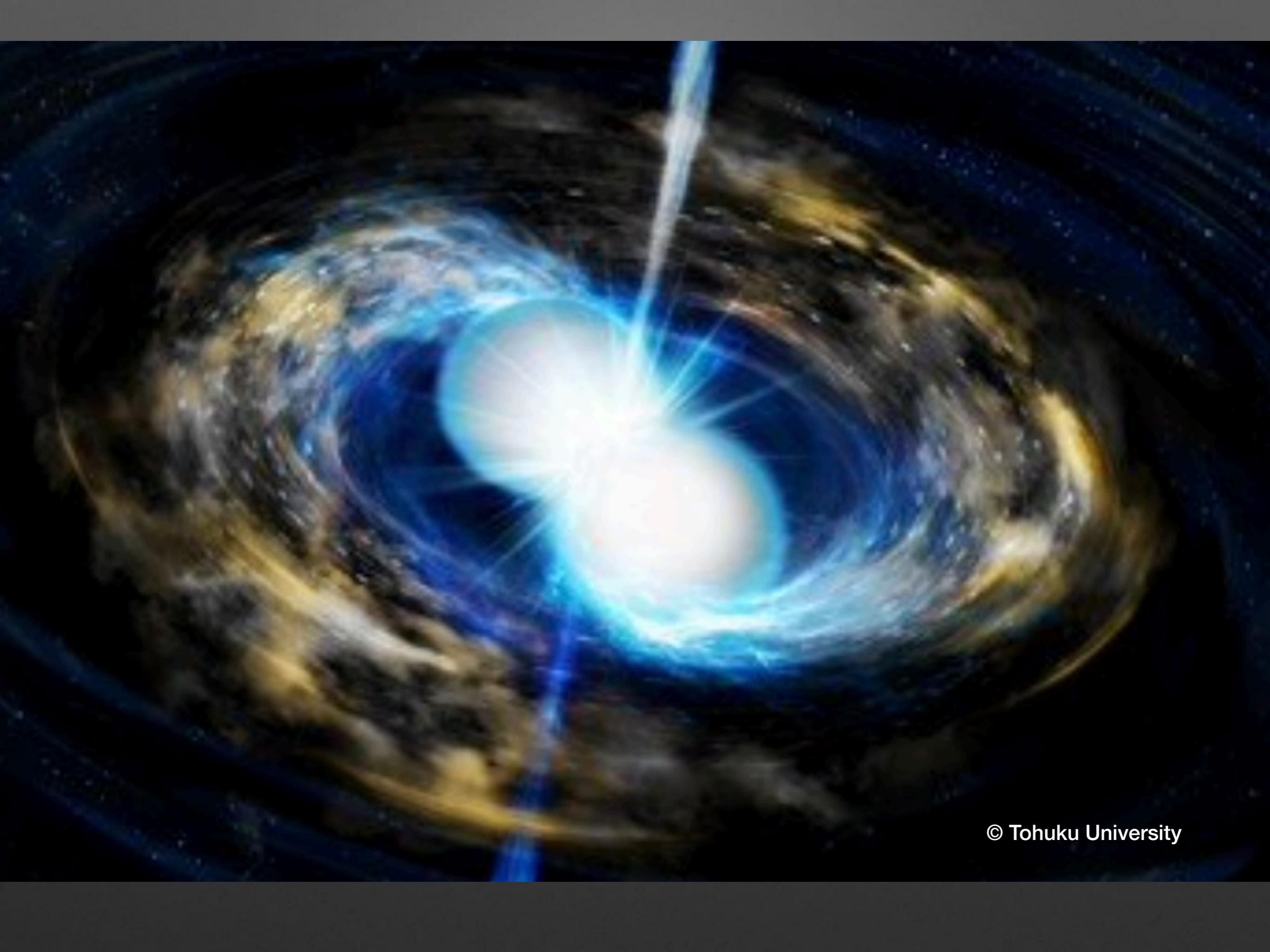
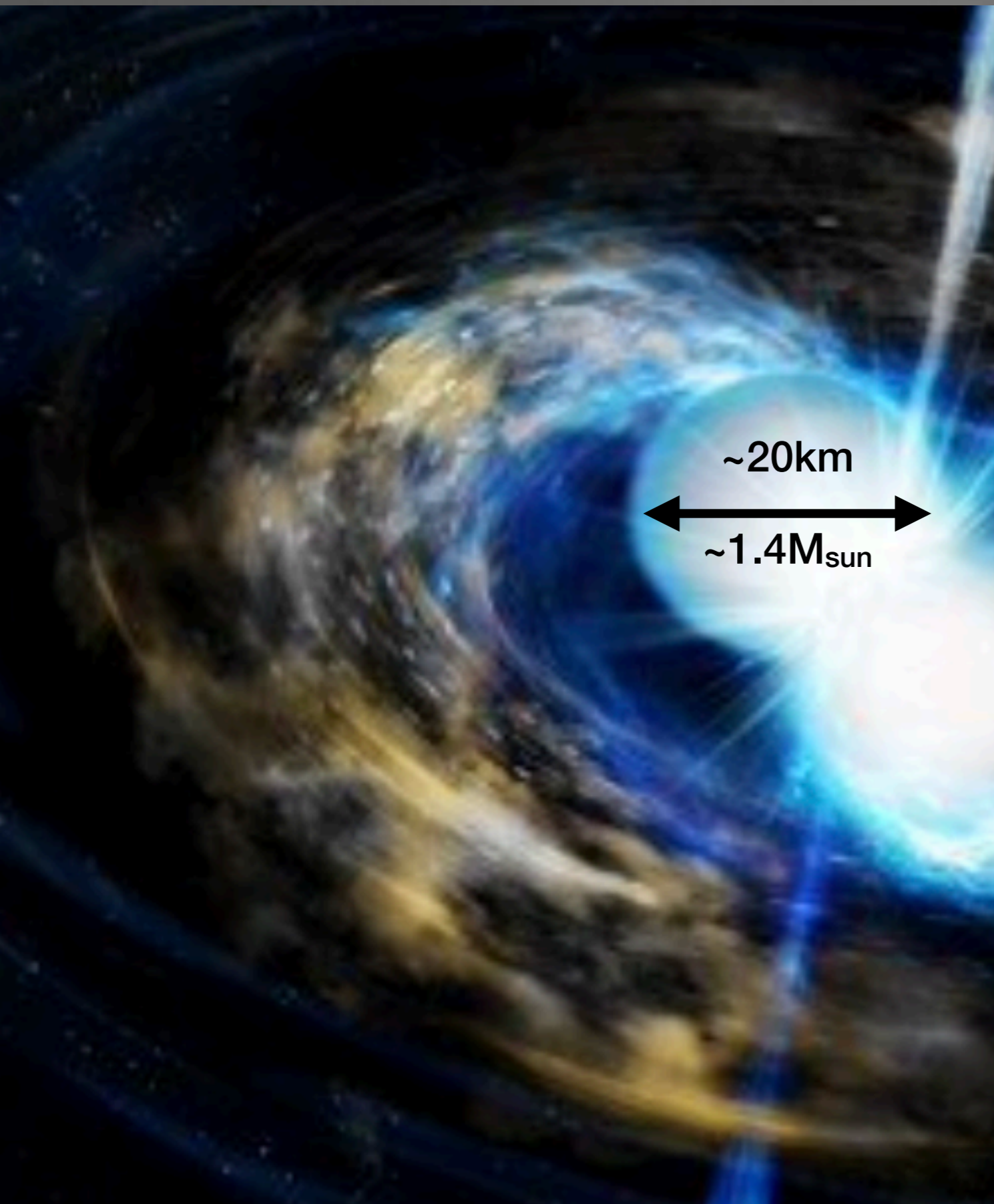


# 中性子星連星の合体に対する 電磁波対応天体

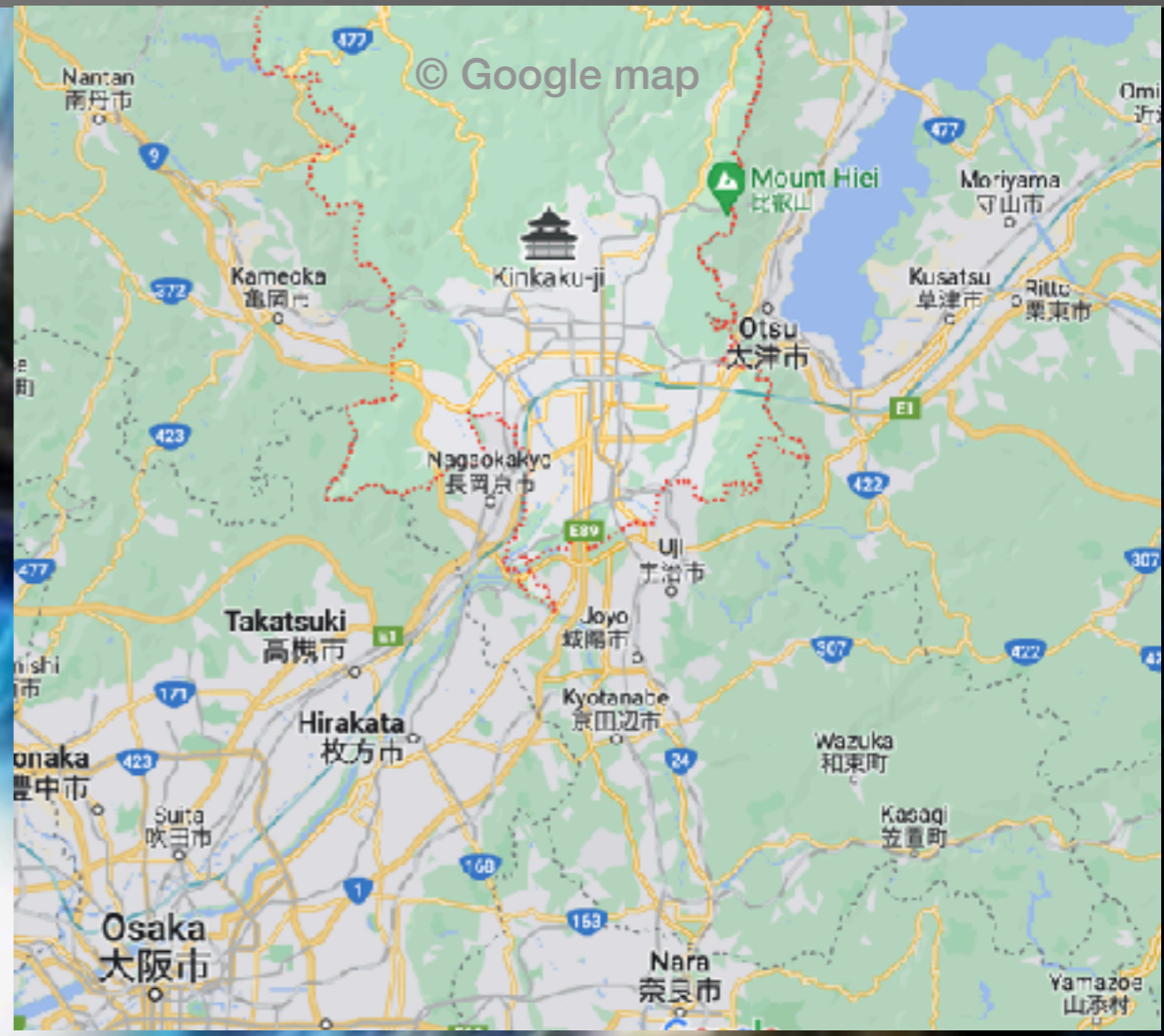
仏坂健太

(東京大学 ビッグバン宇宙国際研究センター)





~20km  
~1.4M<sub>sun</sub>



# 1. 重力波の強力な発生源

~20km  
~1.4M<sub>sun</sub>



1. 重力波の強力な発生源

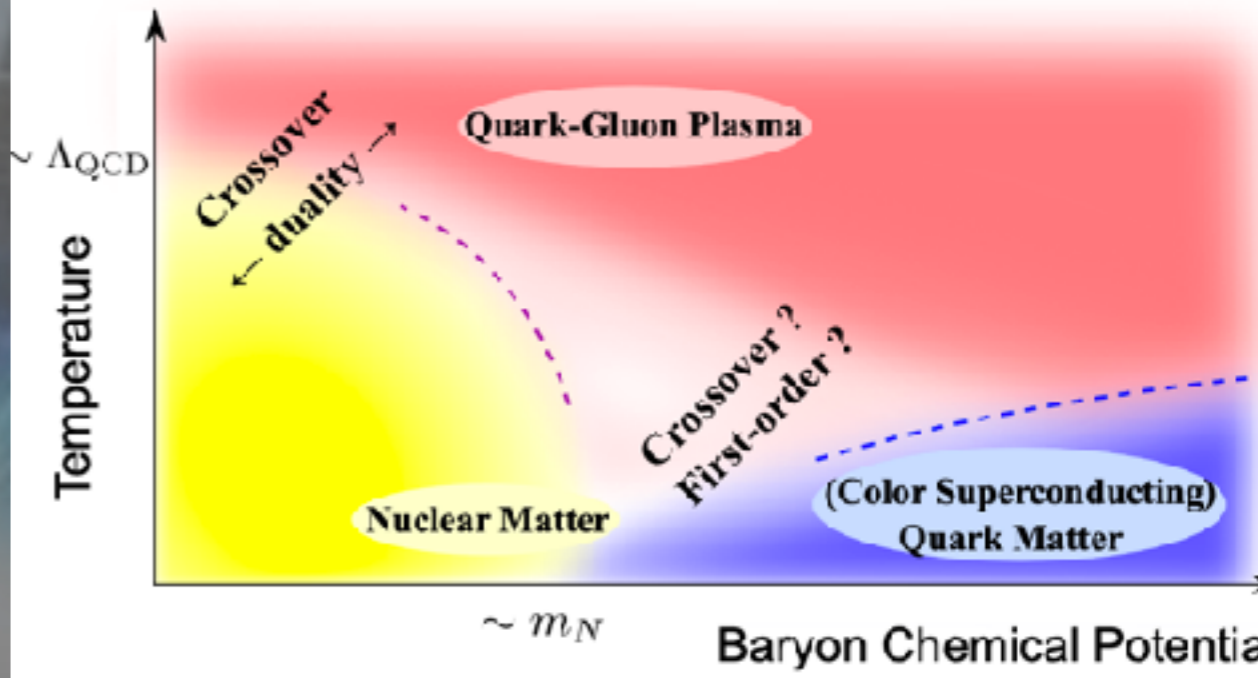
2. 超高密度物質の実験場

~20km

~1.4M<sub>sun</sub>



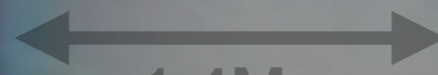
Fujimoto, Fukushima, KH, Kyutoku 22



1. 重力波の強力な発生源

2. 超高密度物質の実験場

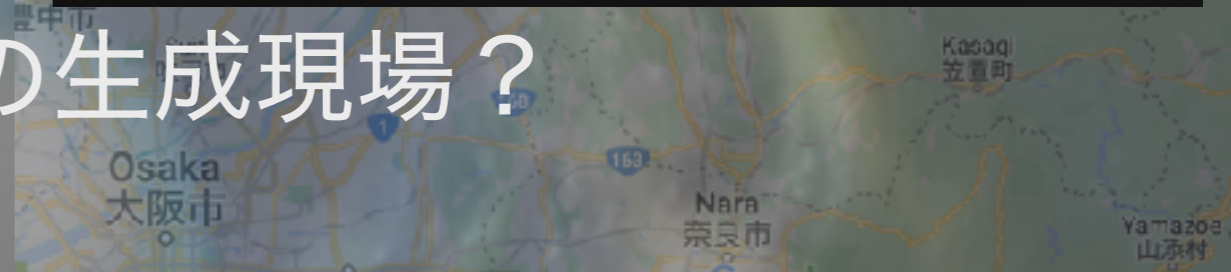
~20km



~1.4M<sub>sun</sub>

3. 金・プラチナ等、重元素の生成現場？

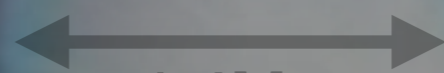
© Gerry Images/iStockphoto



1. 重力波の強力な発生源

2. 超高密度物質の実験場

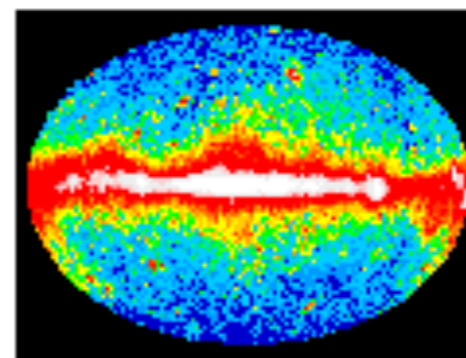
~20km



~1.4M<sub>sun</sub>

3. 金・プラチナ等、重元素の

4. ガンマ線バーストの起源？



Counts per Second

30000

20000

10000

0

0

5

10

Time in Seconds

<https://www.swift.ac.uk/about/grb.php>

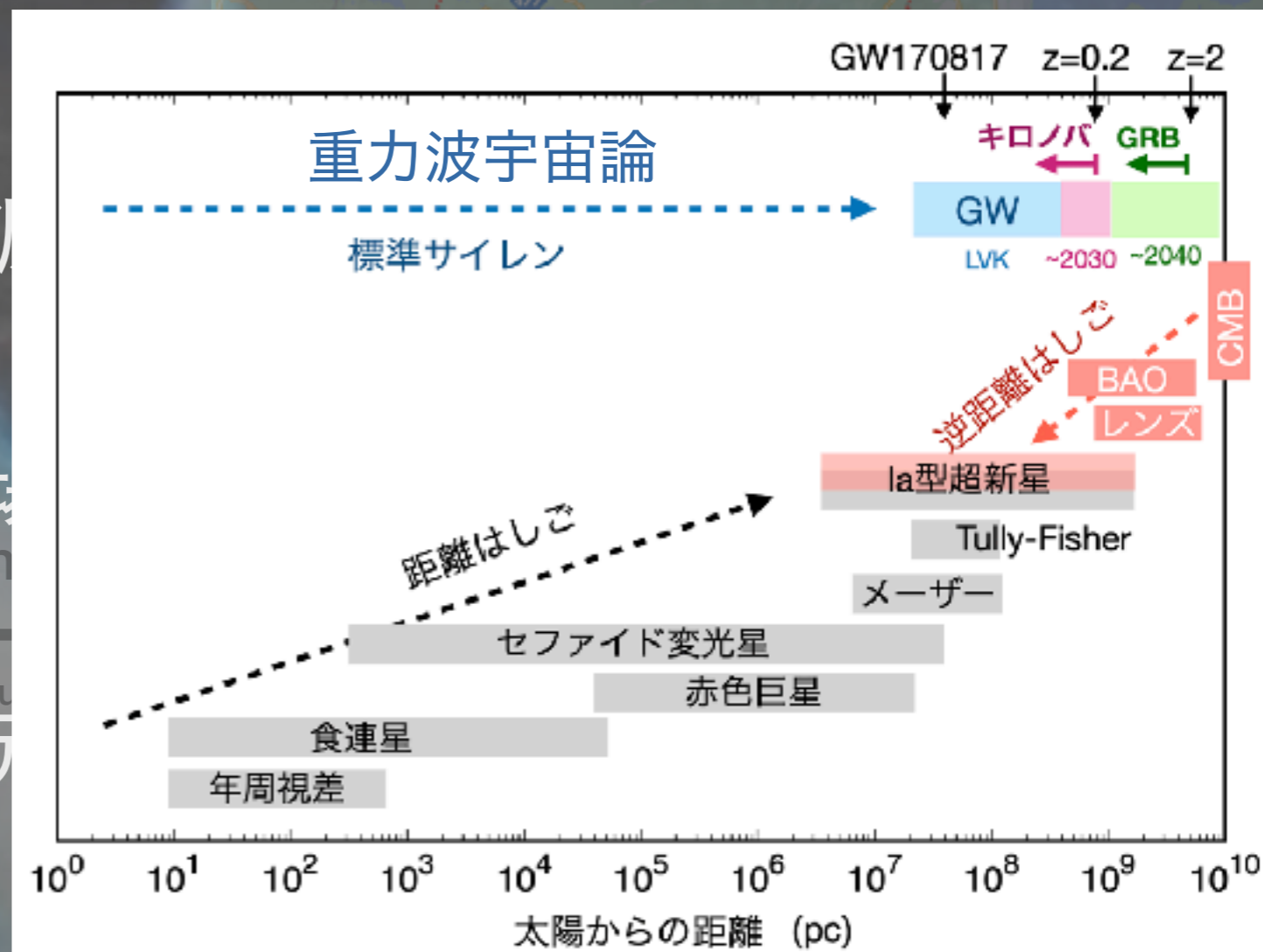
1. 重力波の強力な発生源

2. 超高密度物質の実験場

3. 金・プラチナ等、重元素

4. ガンマ線バーストの起源？

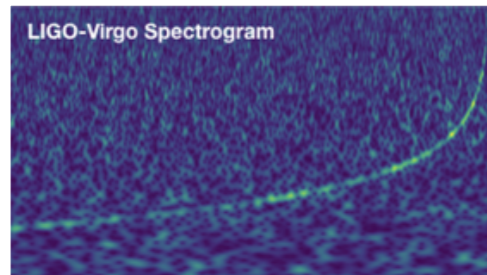
5. 重力波宇宙論を可能にする？



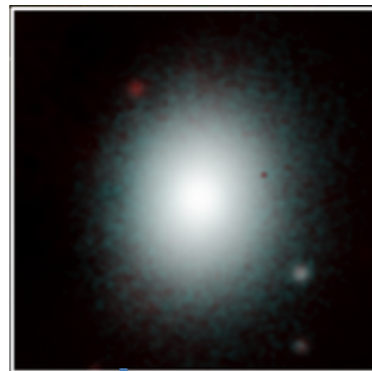


# 中性子星合体 GW170817の発見

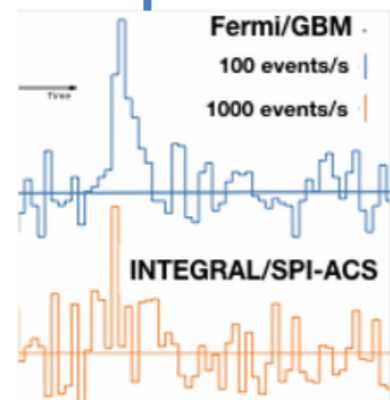
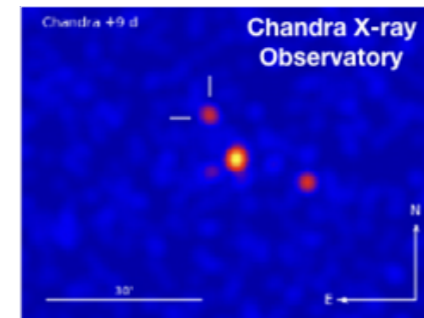
Gravitational waves  
(2017 Aug 17.5)  
T = 0



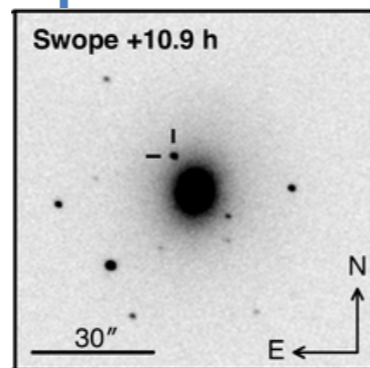
Near Infrared  
T = 11h 36m



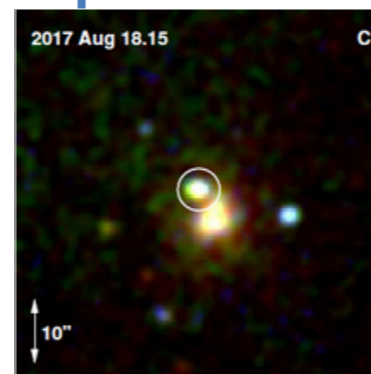
X-rays  
T = 9 days



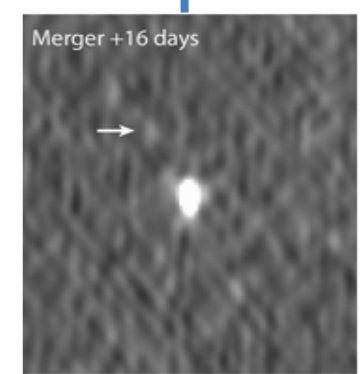
Gamma-rays  
T = 1.7 seconds



Optical  
T = 10h 52m



Ultraviolet  
T = 15 hours



Radio  
T = 16 days

# 本日の話題

- 中性子星合体とは？
- 電磁波対応天体 キロノバ
- 電磁波対応天体 シンクロトロン残光
- 展望

# 連星中性子星とその合体

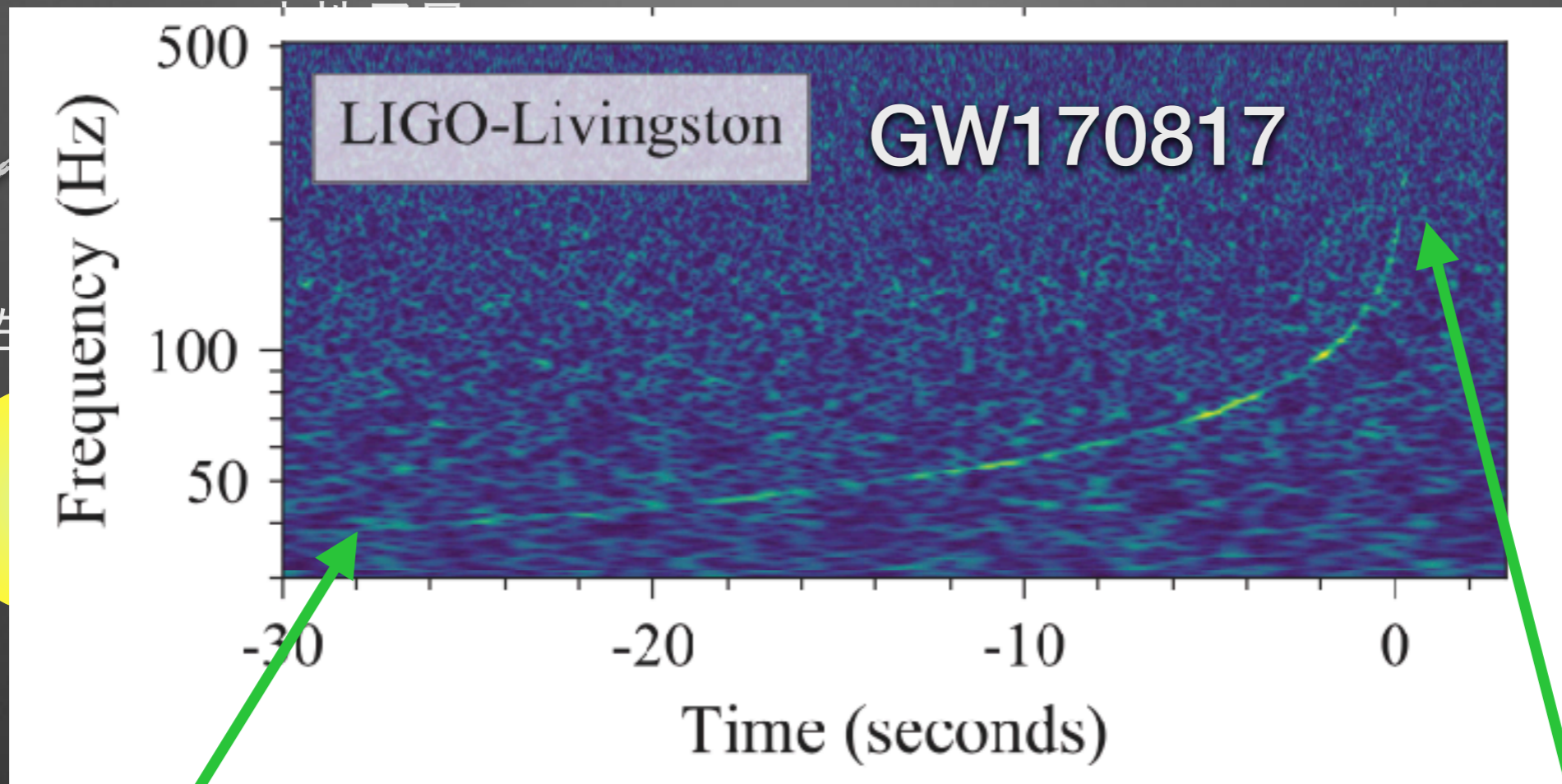


- 合体までに要する時間 ~ 0.3億年 (at 軌道半径 ~ 太陽半径)

※合体時間は軌道半径の4乗に比例

- 徐々に軌道半径が減少し、合体に至る。

# 連星中性子星とその合体

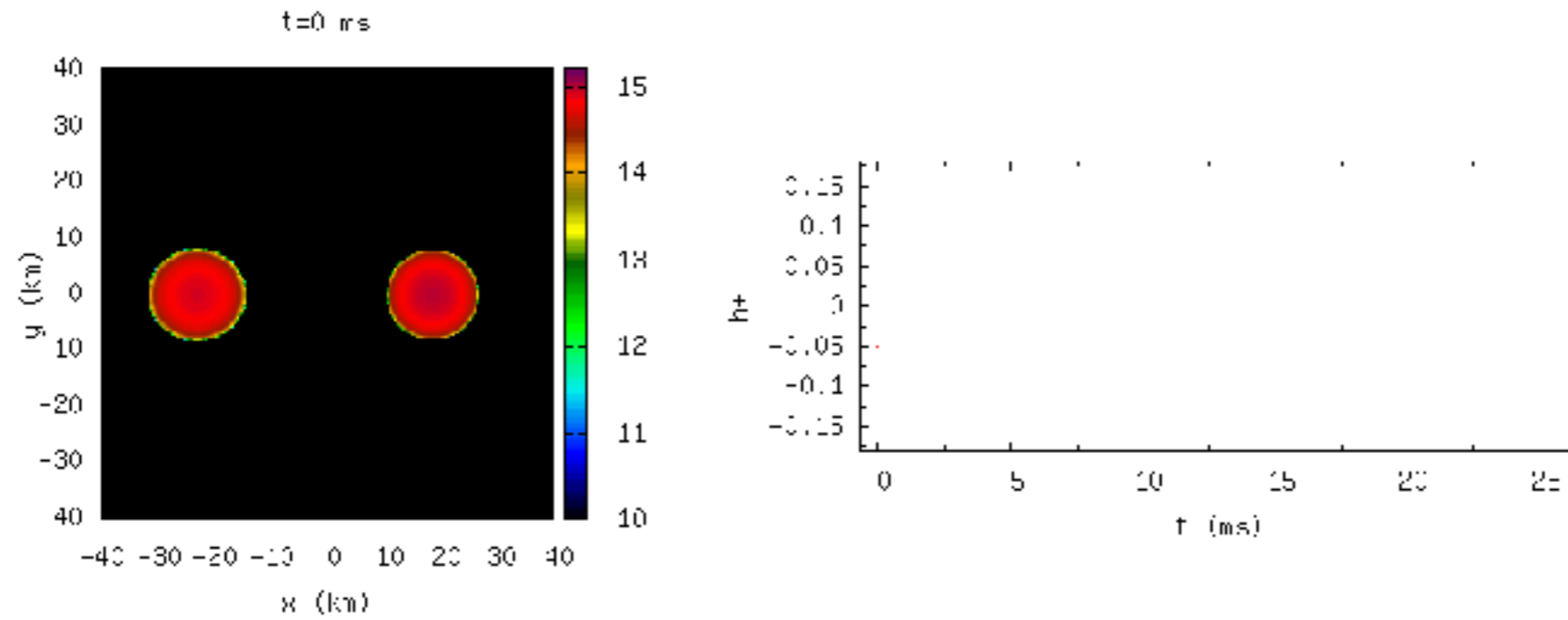


中性

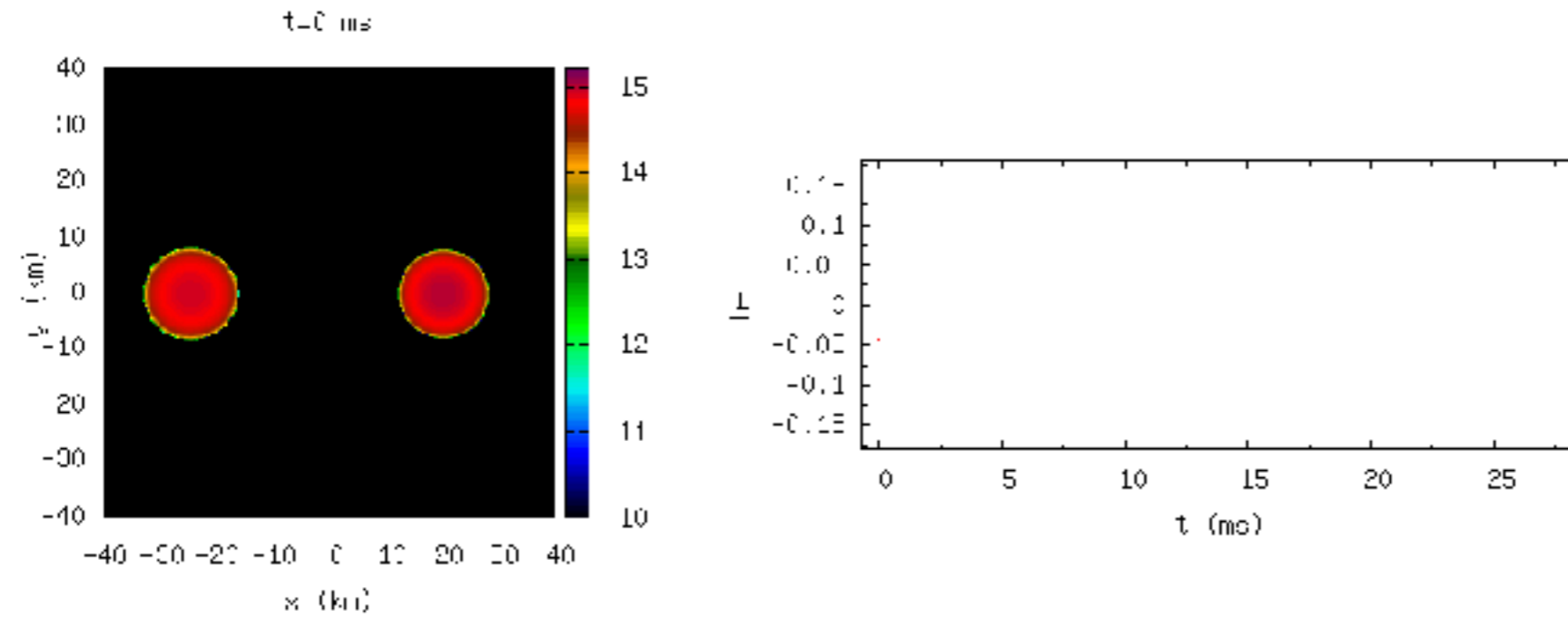
軌道半径~100km

合体~10km

# EOS=APR, $M_{\text{tot}} = 2.7M_{\text{sun}}$



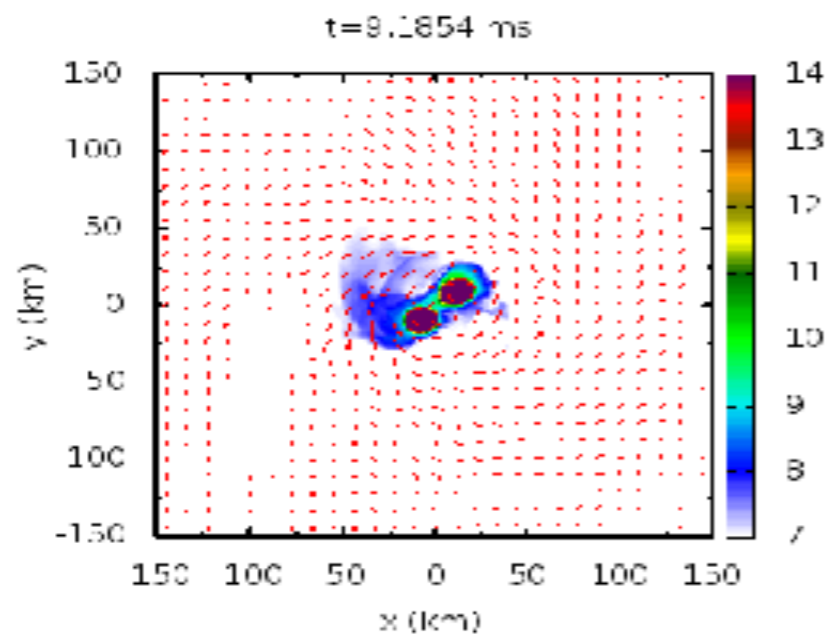
# EOS=APR, $M_{\text{tot}} = 2.9M_{\text{sun}}$



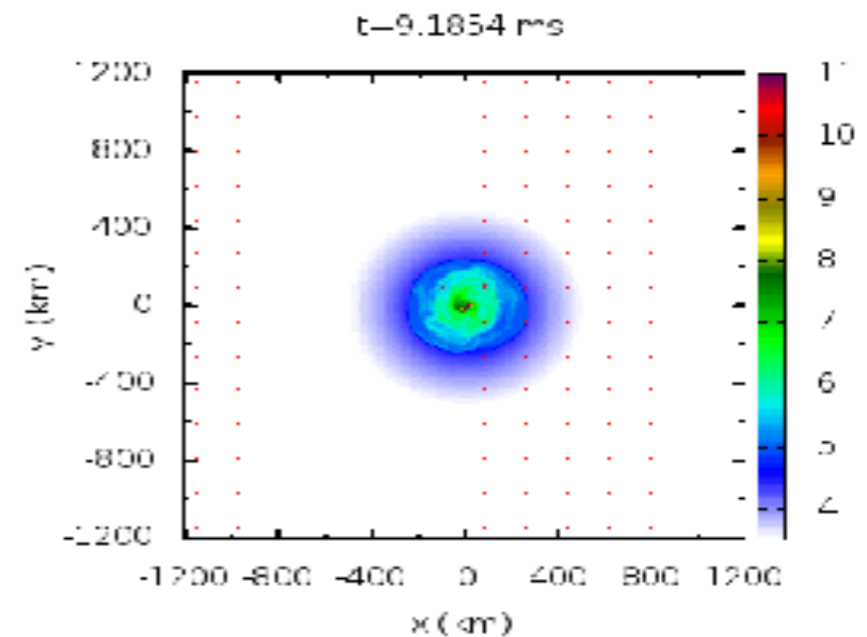
# 中性子星合体から飛び出す物質1 合体の瞬間

KH, et al 13

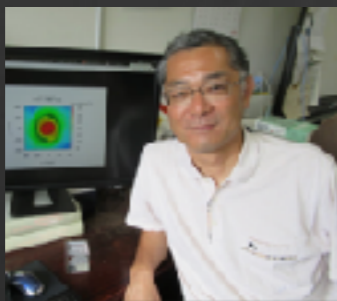
300 km x 300 km



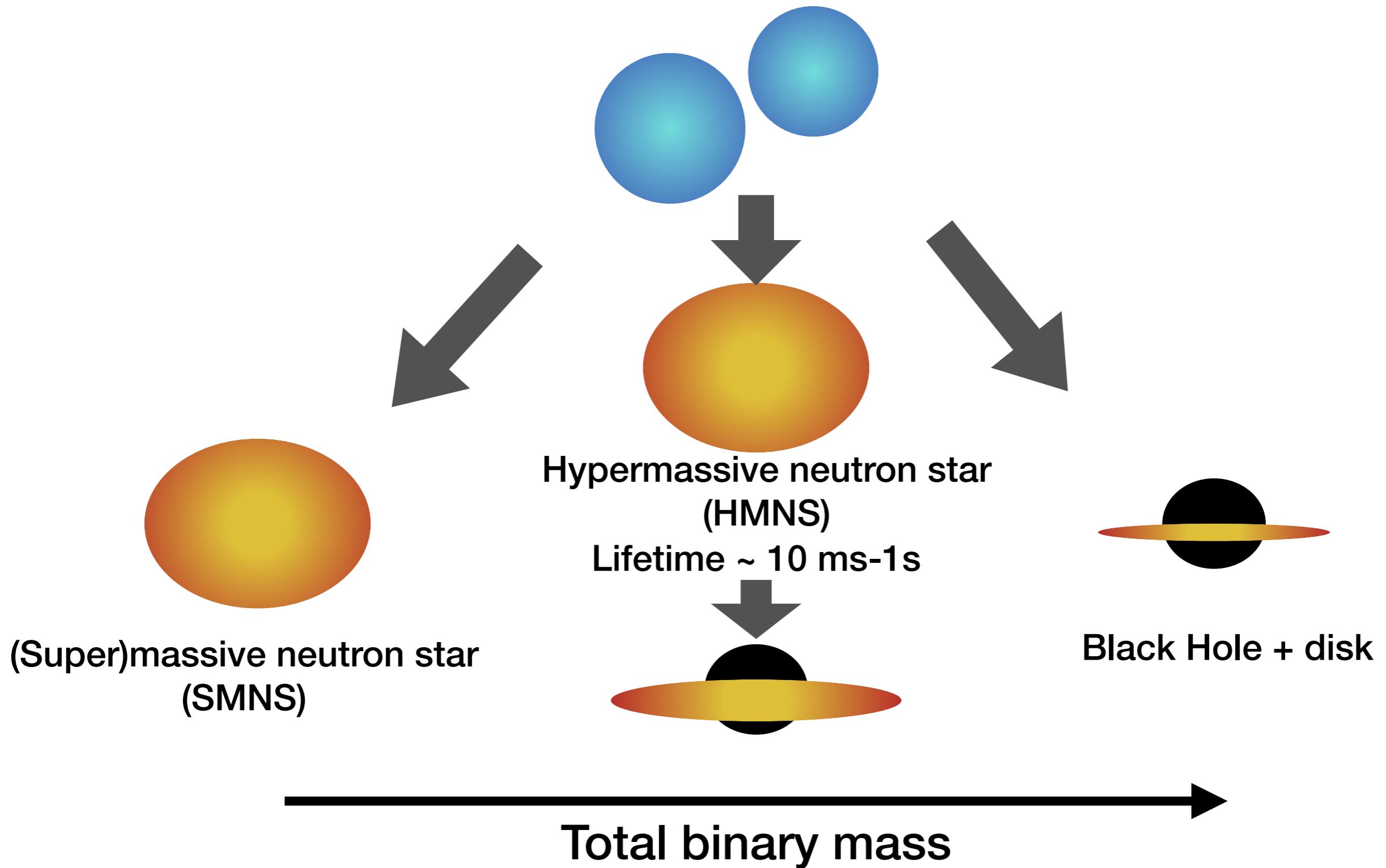
2400 km x 2400 km



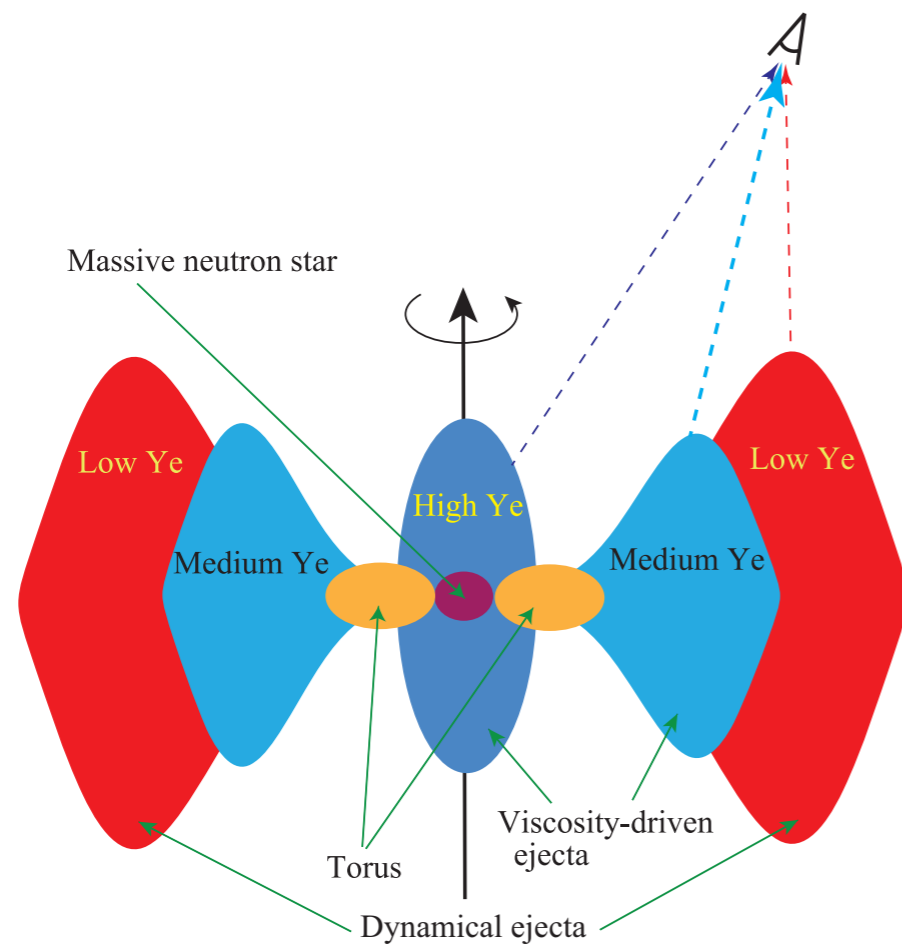
私の博士論文のメインテーマ。数値相対論による質量放出の最初の計算。



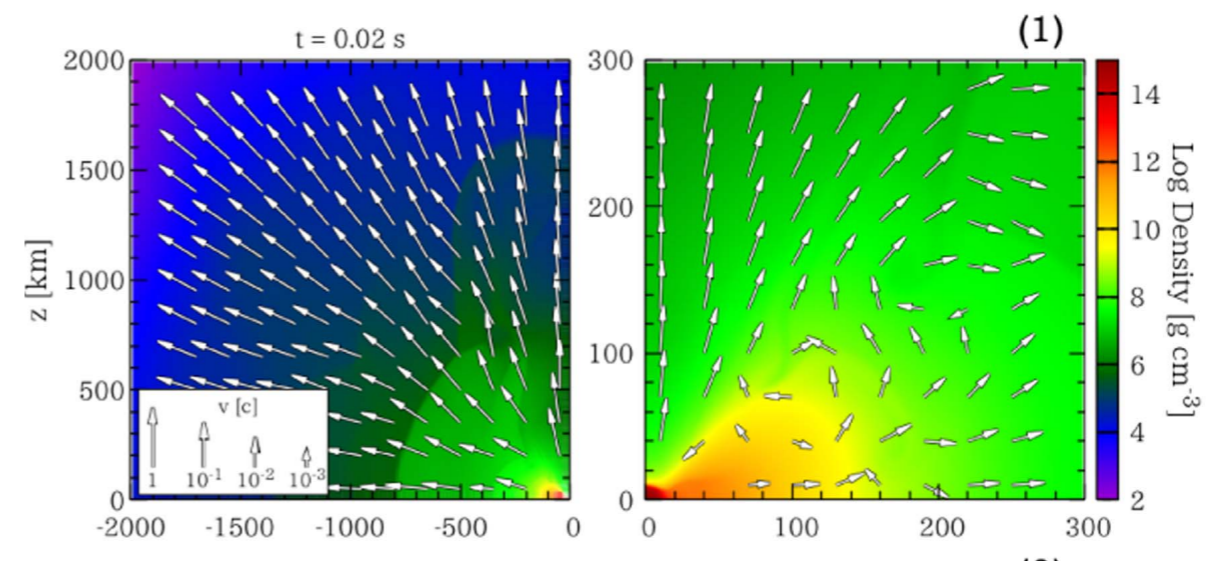
# 中性子星合体後に何が出来る？



# 中性子星合体から飛び出す物質2 合体後



Shibata+17, Fujibayashi+18



合体後、中性子星+降着円盤、もしくはBH+降着円盤から質量放出が起こる。アウトフローの性質は、中性子星合体後の進化に強く依存。

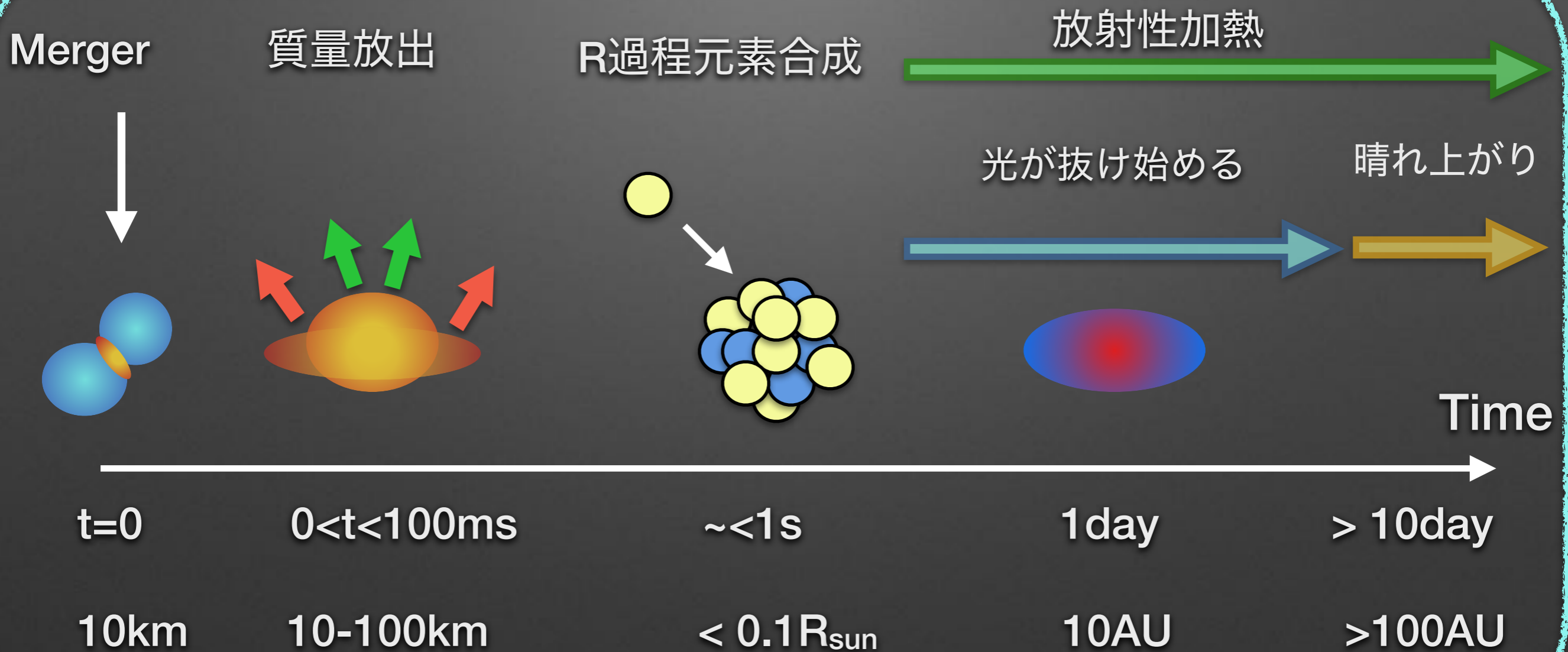


# 本日の話題

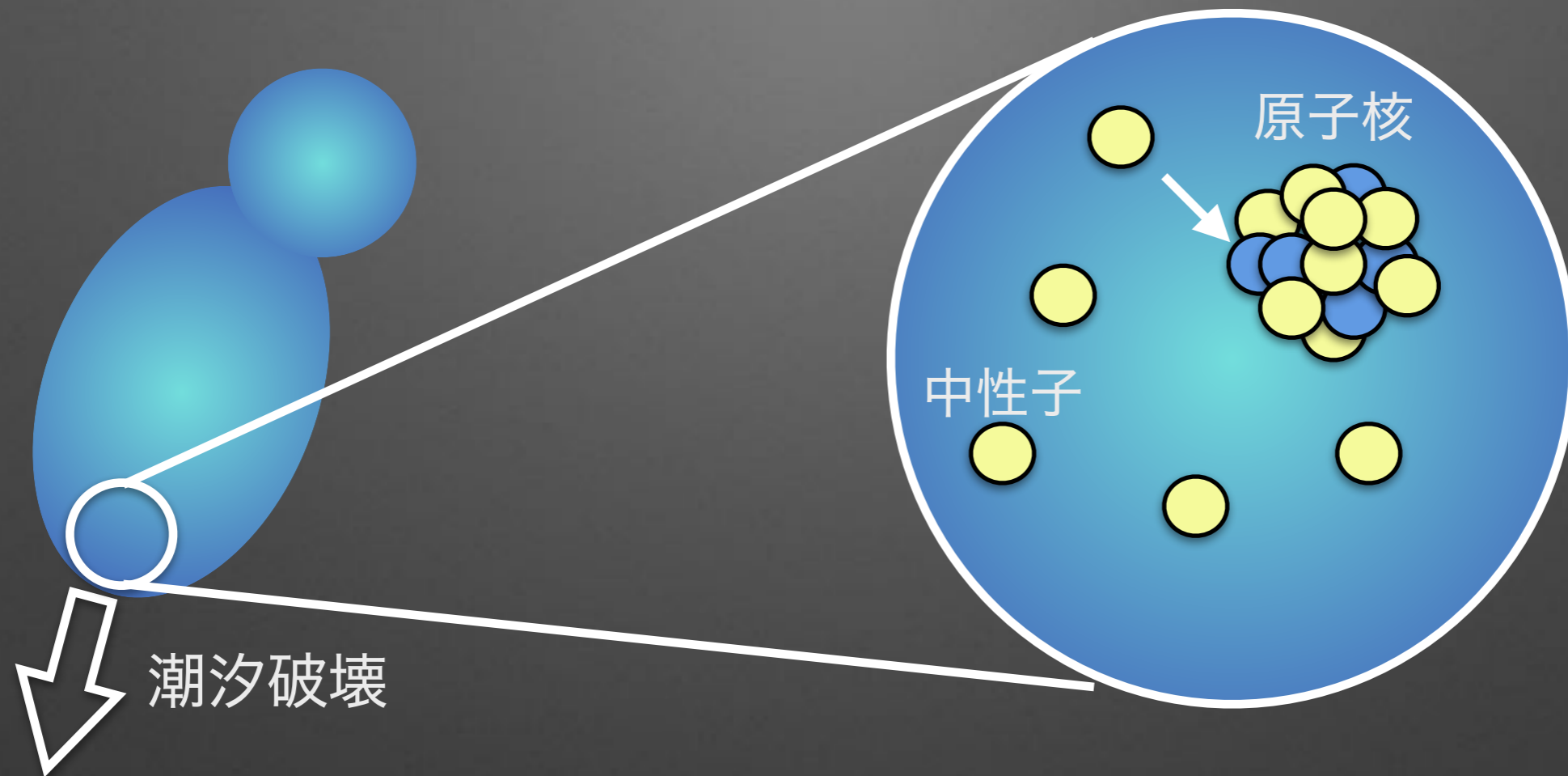
- 中性子星合体とは？
- 電磁波対応天体 キロノバ
- 電磁波対応天体 シンクロトロン残光
- 展望

# 電磁波対応天体 キロノバ

Li & Paczynski 98, Kulkarni 05, Metzger + 10, Barnes & Kasen 13, Tanaka & KH 13

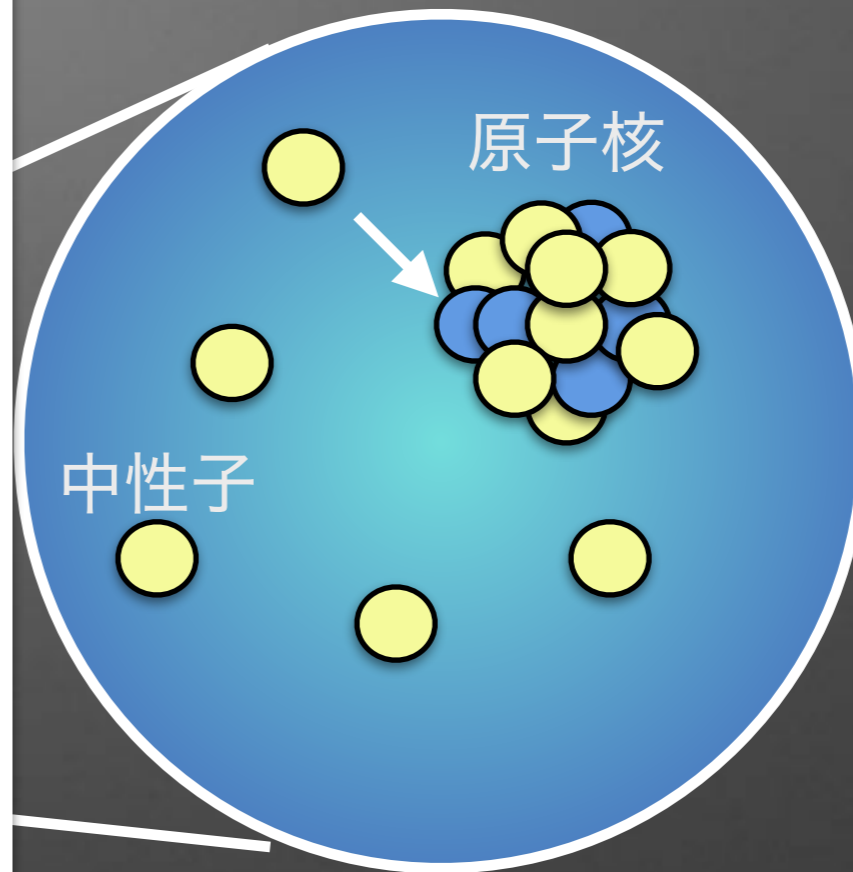
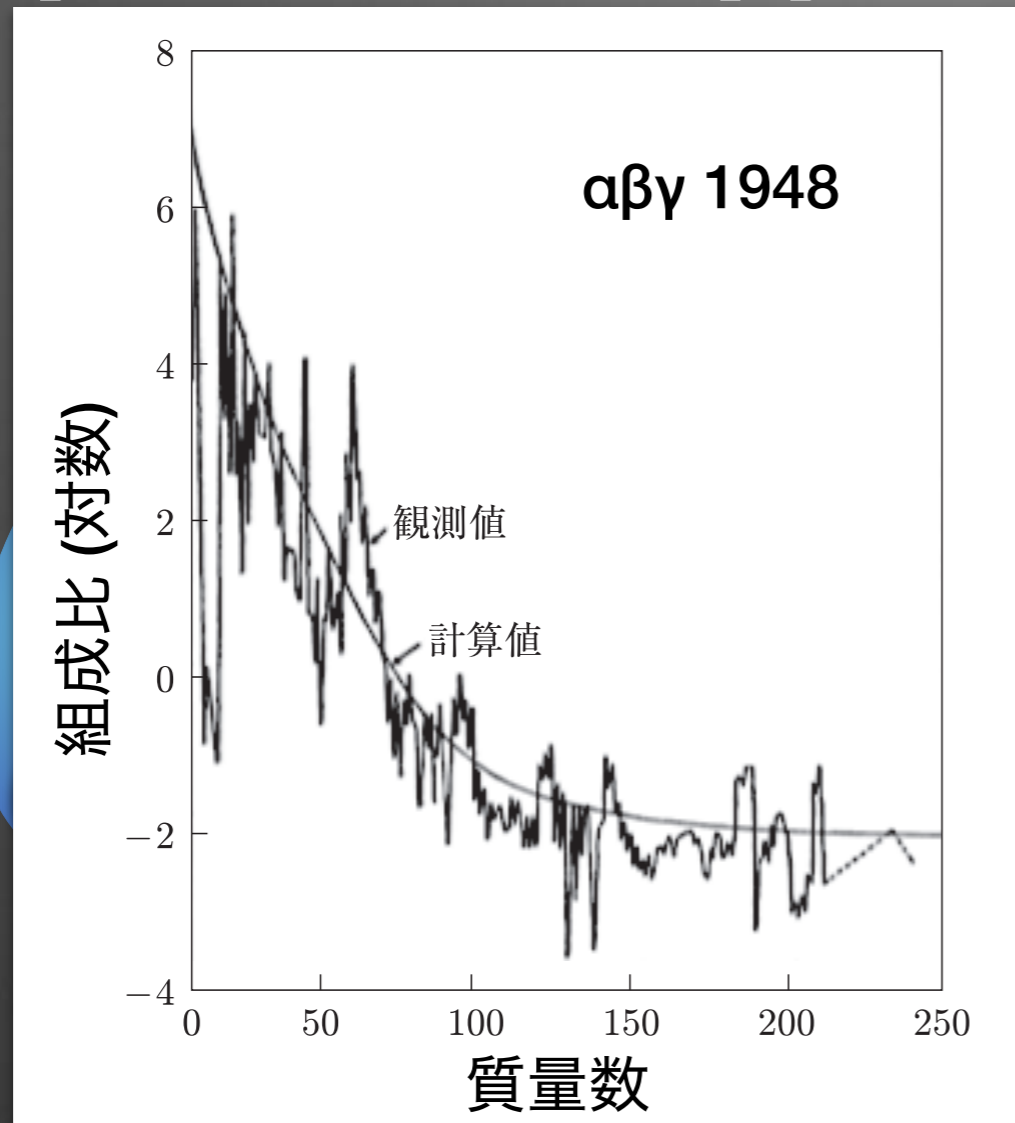


# 中性子星合体のR過程元素合成



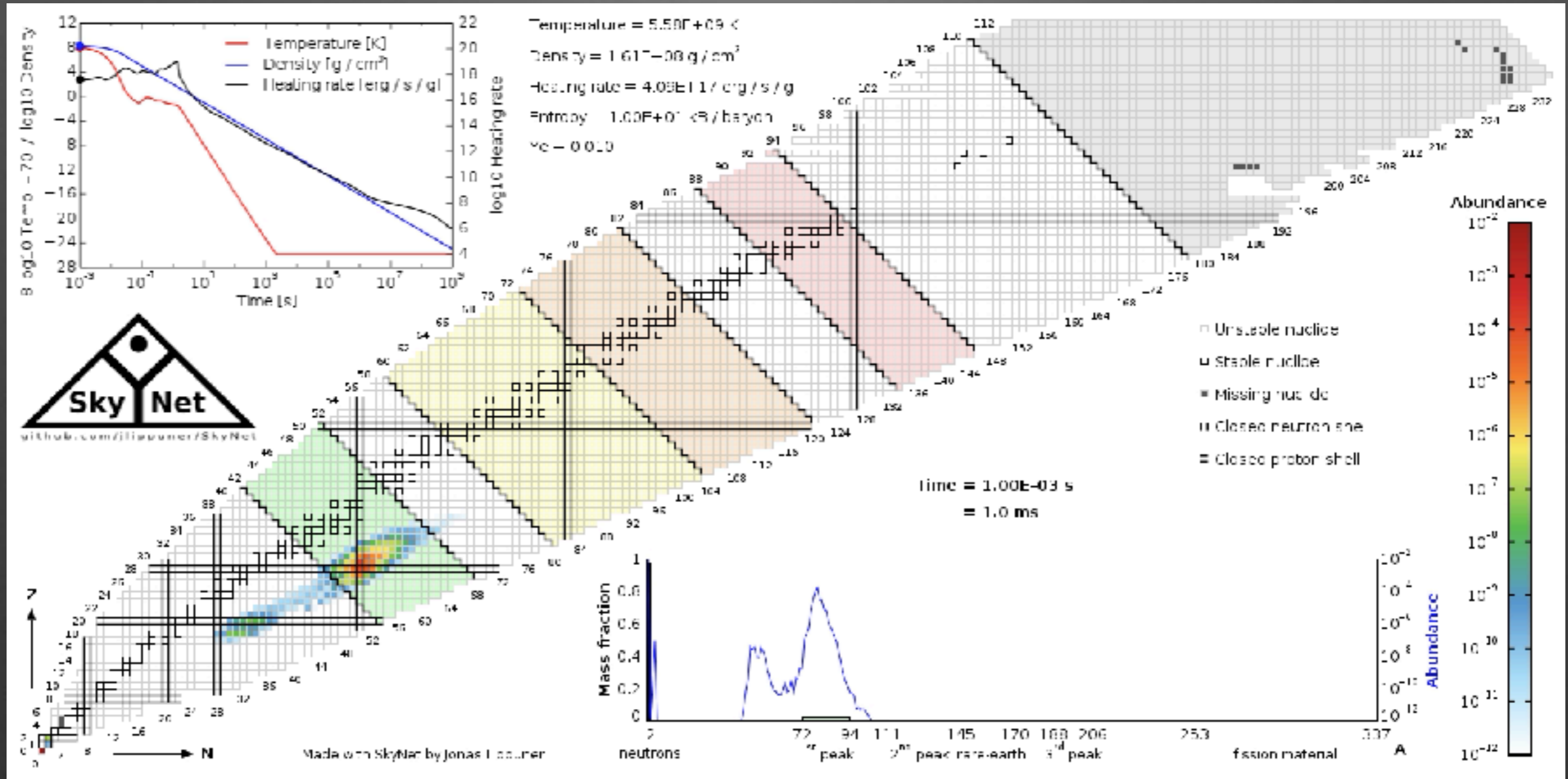
- 中性子星の一部が引き伸ばされ、中性子が原子核に捕獲される非平衡反応(R過程)が起こる。
- ビッグバン元素合成に類似：ビッグバンでは陽子過剰で光が極めて多い熱い環境という点で異なる。

# 中性子星合体のR過程元素合成

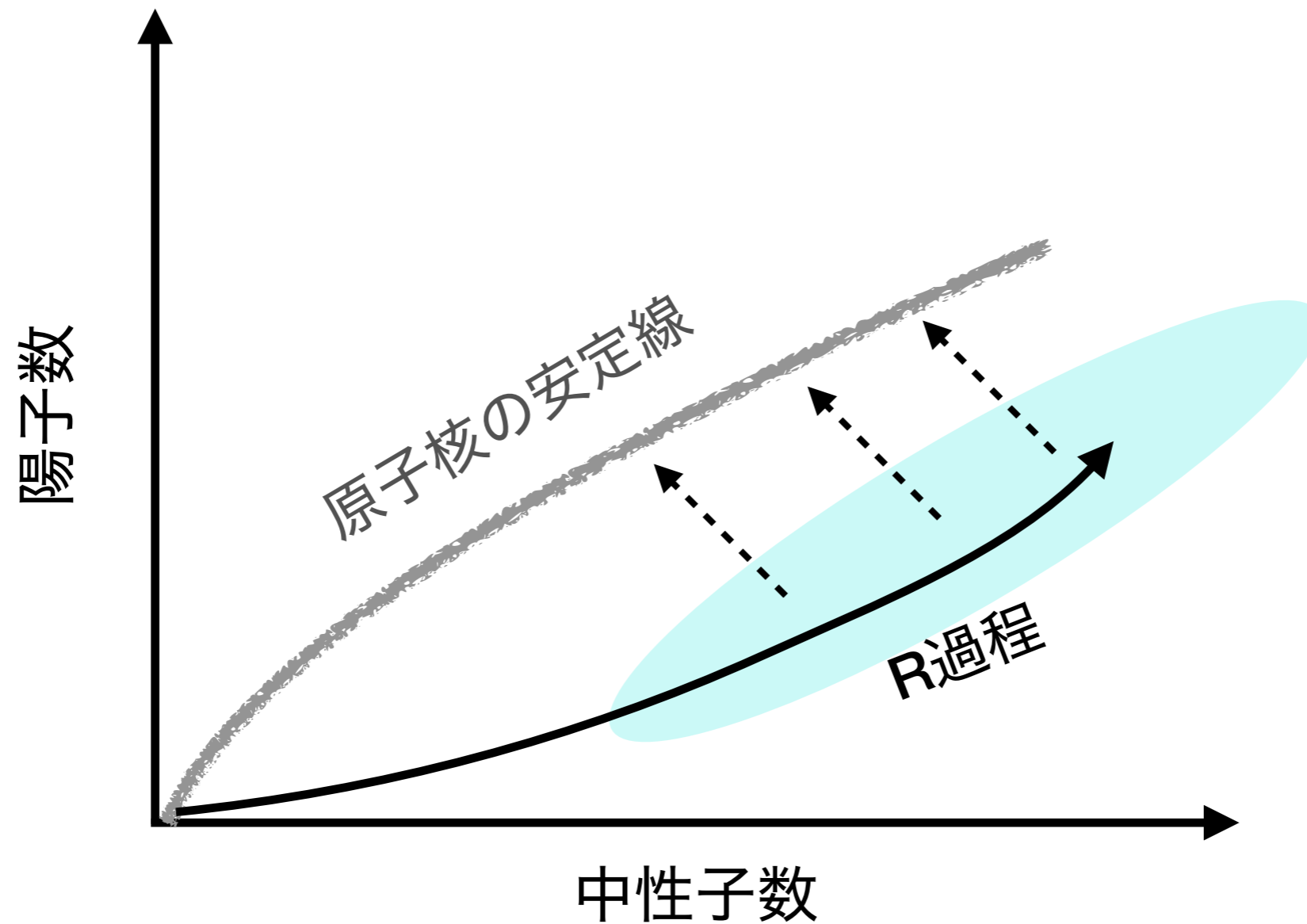


- 中性子星の一部が引き伸ばされ、中性子が原子核に捕獲される非平衡反応(R過程)が起こる。
- ビッグバン元素合成に類似：ビッグバンでは陽子過剰で光が極めて多い熱い環境という点で異なる。Alpher, Bethe, Gamow 1948は純中性子を初期条件に取ったのでR過程を見ていたとも言える。

# 中性子星合体のR過程元素合成

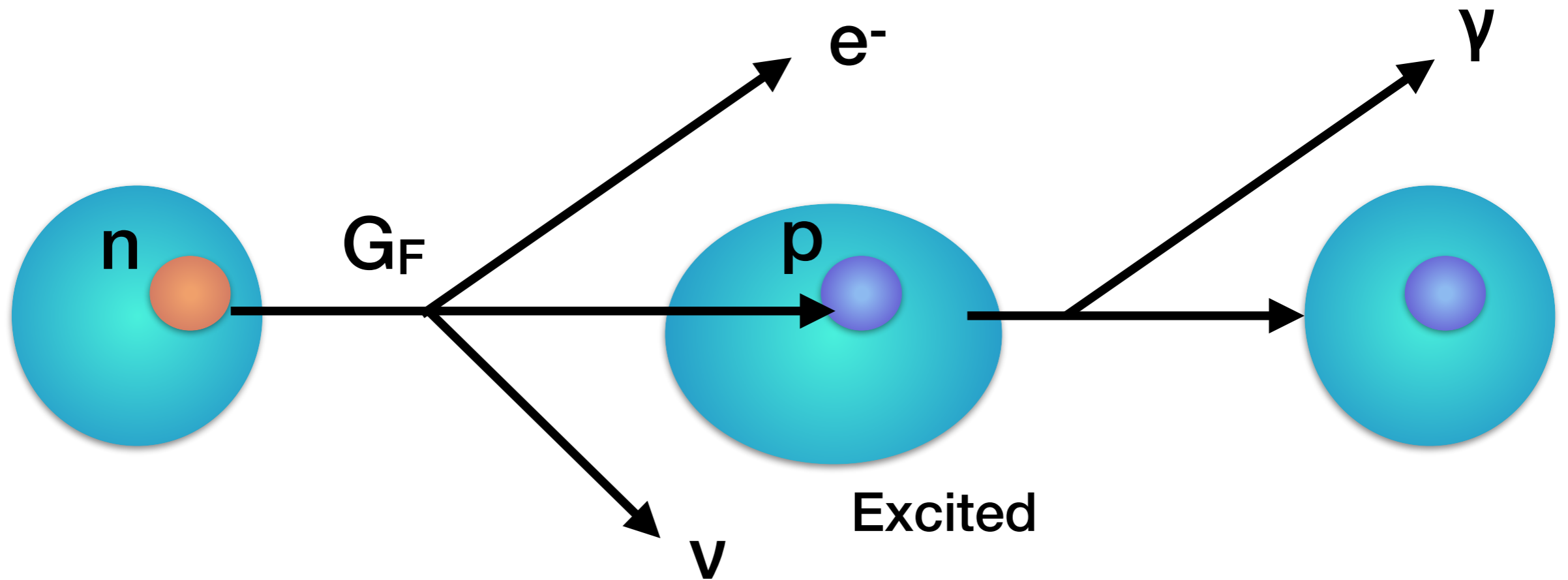


# R過程とキロノバのエネルギー源



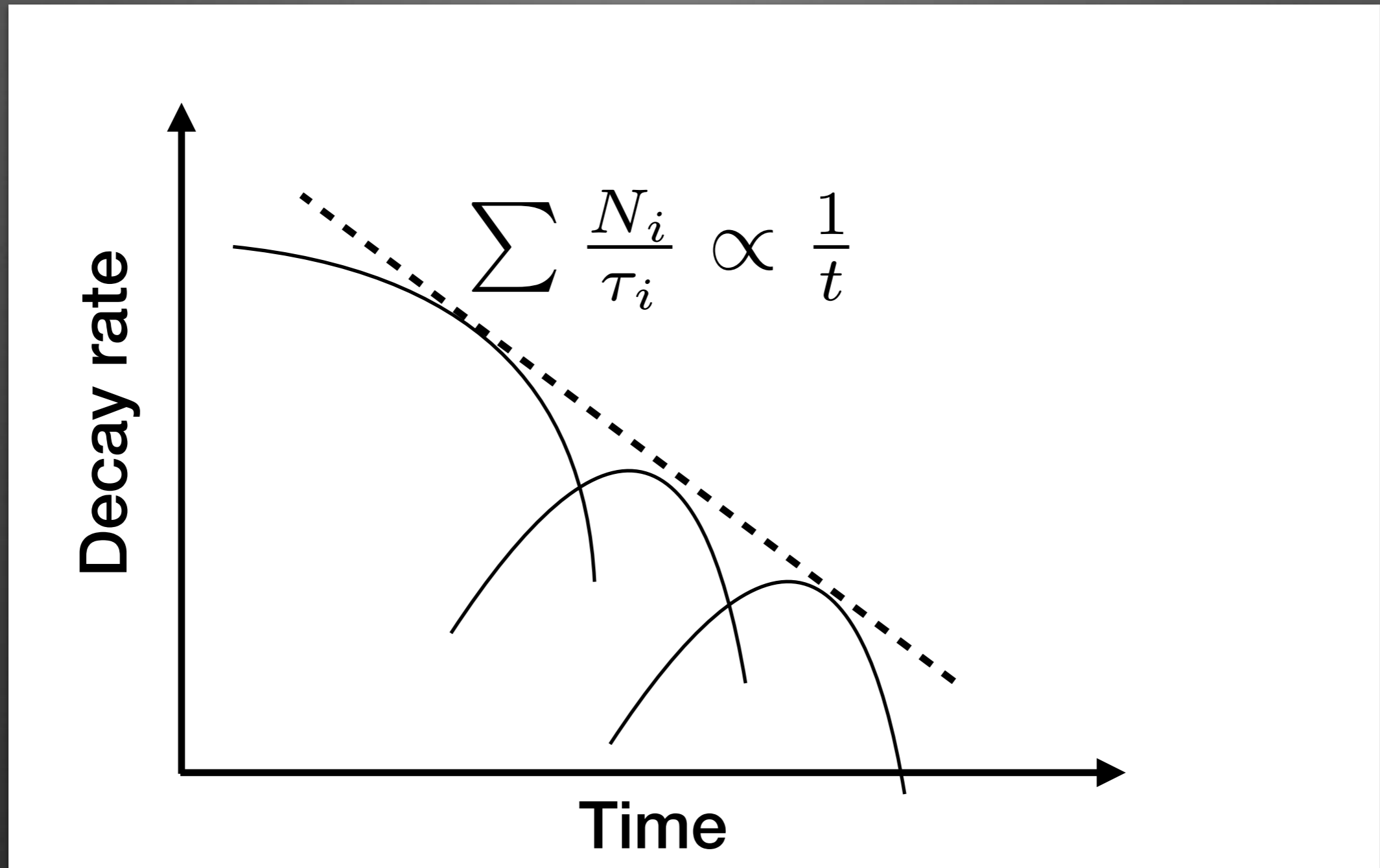
多くのベータ崩壊チェーン

# $\beta$ -decay



# たくさんの核種が崩壊するとき

(Metzger et al 10, Goriely et al 11, Roberts et al 11, Korobkin et al 12, Wanajo et al 2014, Lippuner and Roberts 2015, KH, Sari, Piran 2017)





# キロノバのエネルギー源：ベータ崩壊

KH,Sari,Piran 17

- たくさんの核種の崩壊:

$$\frac{dN}{dt} \propto \frac{1}{t} \longrightarrow \dot{Q}(t) \propto \frac{E(t)}{t}$$

- 核の平均寿命と崩壊エネルギーの関係:

$$\tau \propto E^{-5} \longrightarrow \dot{Q}(t) \propto t^{-1.2}$$

# キロノバのエネルギー源：ベータ崩壊

KH,Sari,Piran 17

- たくさんの核種の崩壊:

$$\frac{dN}{dt} \propto \frac{1}{t} \longrightarrow \dot{Q}(t) \propto \frac{E(t)}{t}$$

- 核の平均寿命と崩壊エネルギーの関係:

$$\tau \propto E^{-5} \longrightarrow \dot{Q}(t) \propto t^{-1.2}$$

- ベータ崩壊の物理定数:

Energy:  $m_e c^2$

Time:  $t_F \equiv \frac{2\pi^3}{G_F^2} \frac{\hbar^7}{m_e^5 c^4} \approx 9000 \text{ s}$

イオン当たりの加熱率:

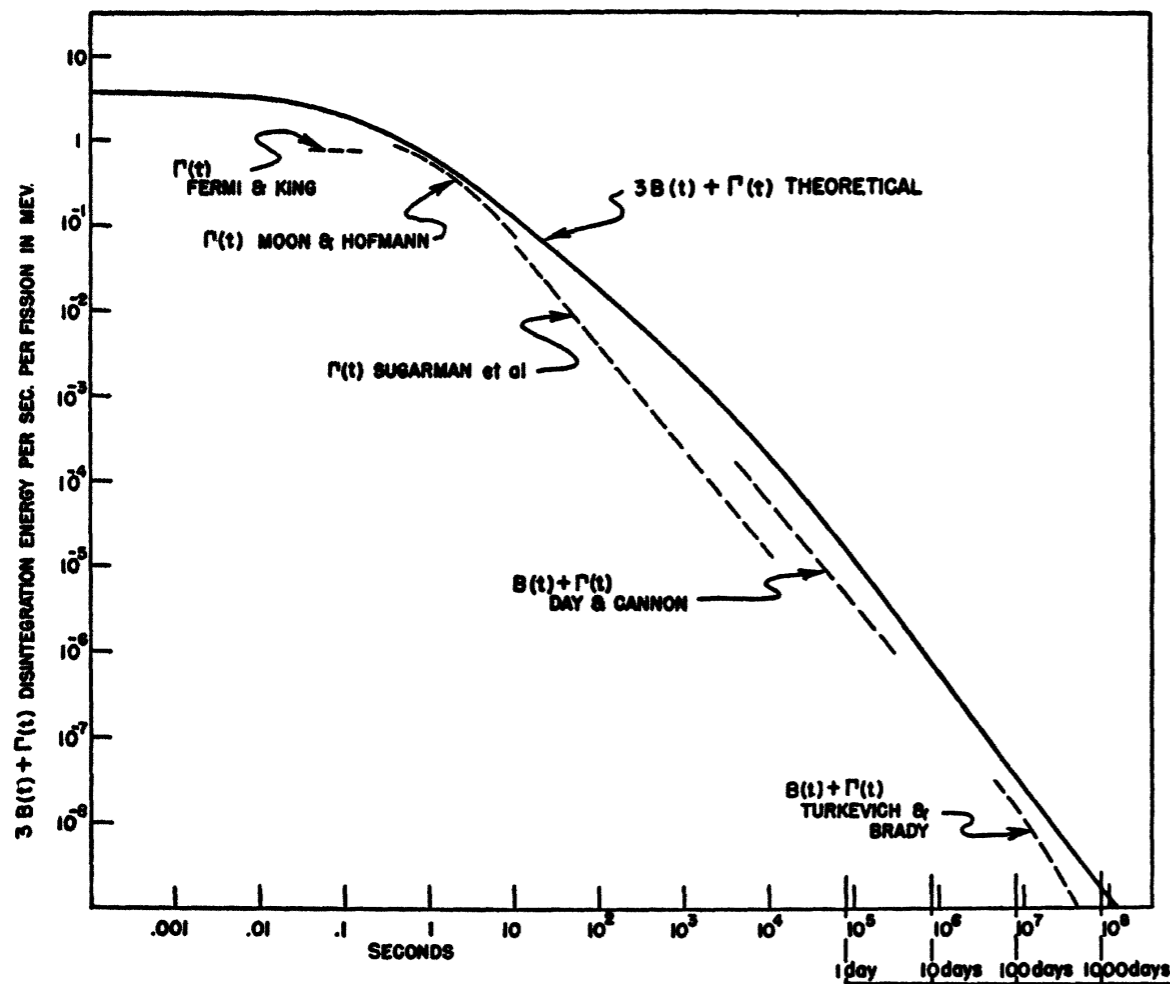
$$\longrightarrow \dot{Q}(t) \sim \frac{m_e c^2}{t_F} \left( \frac{t}{t_F} \right)^{-1.2} \sim 1 t_{\text{day}}^{-1.2} \text{ eV/s/ion}$$

$$\longrightarrow 10^8 \times \text{太陽光度! at 1 day}$$

# キロノバのエネルギー源：ベータ崩壊

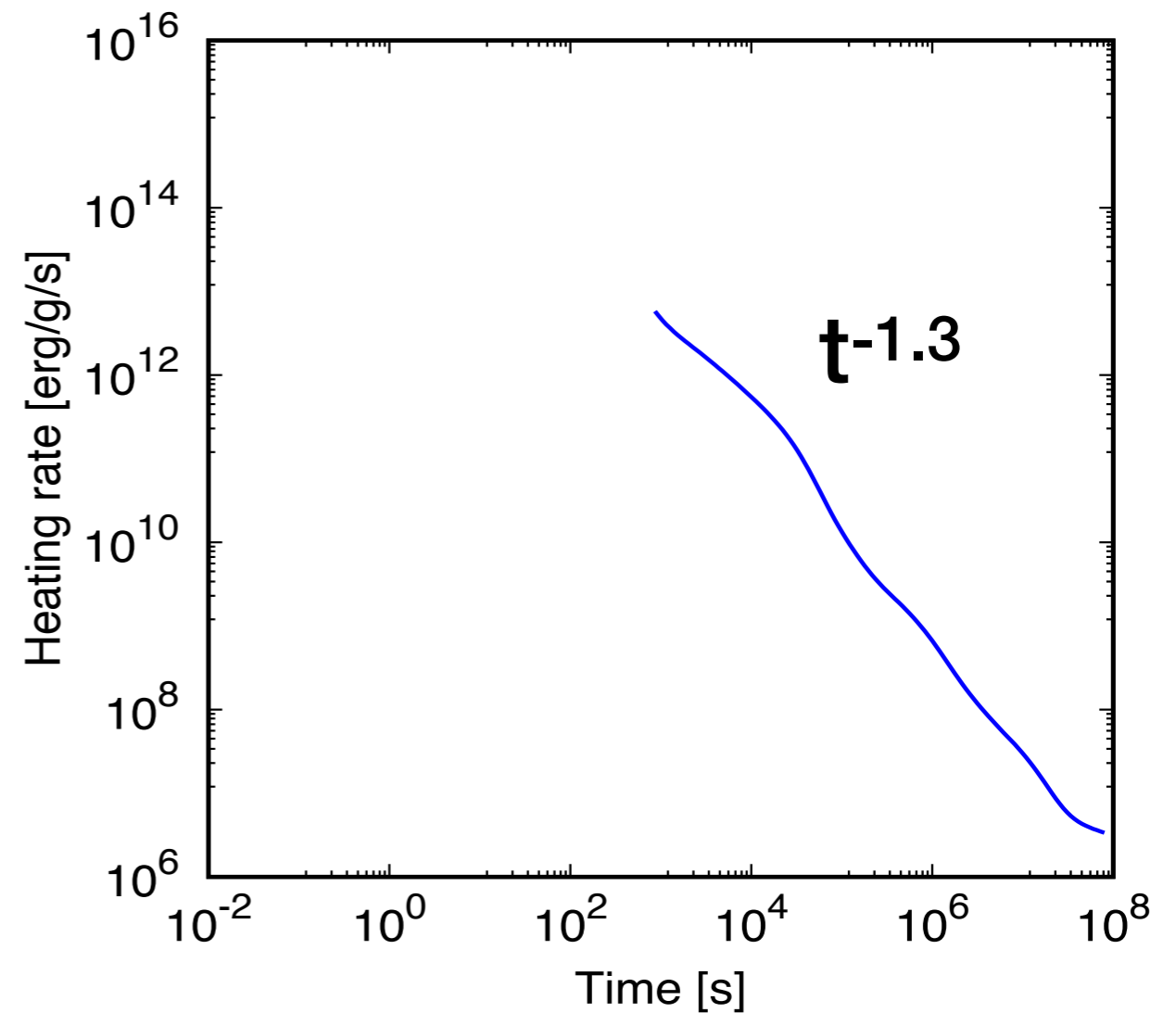
Way & Wigner 1948

KH & Nakar 2020



(a)

核分裂後のベータ加熱（原子炉）



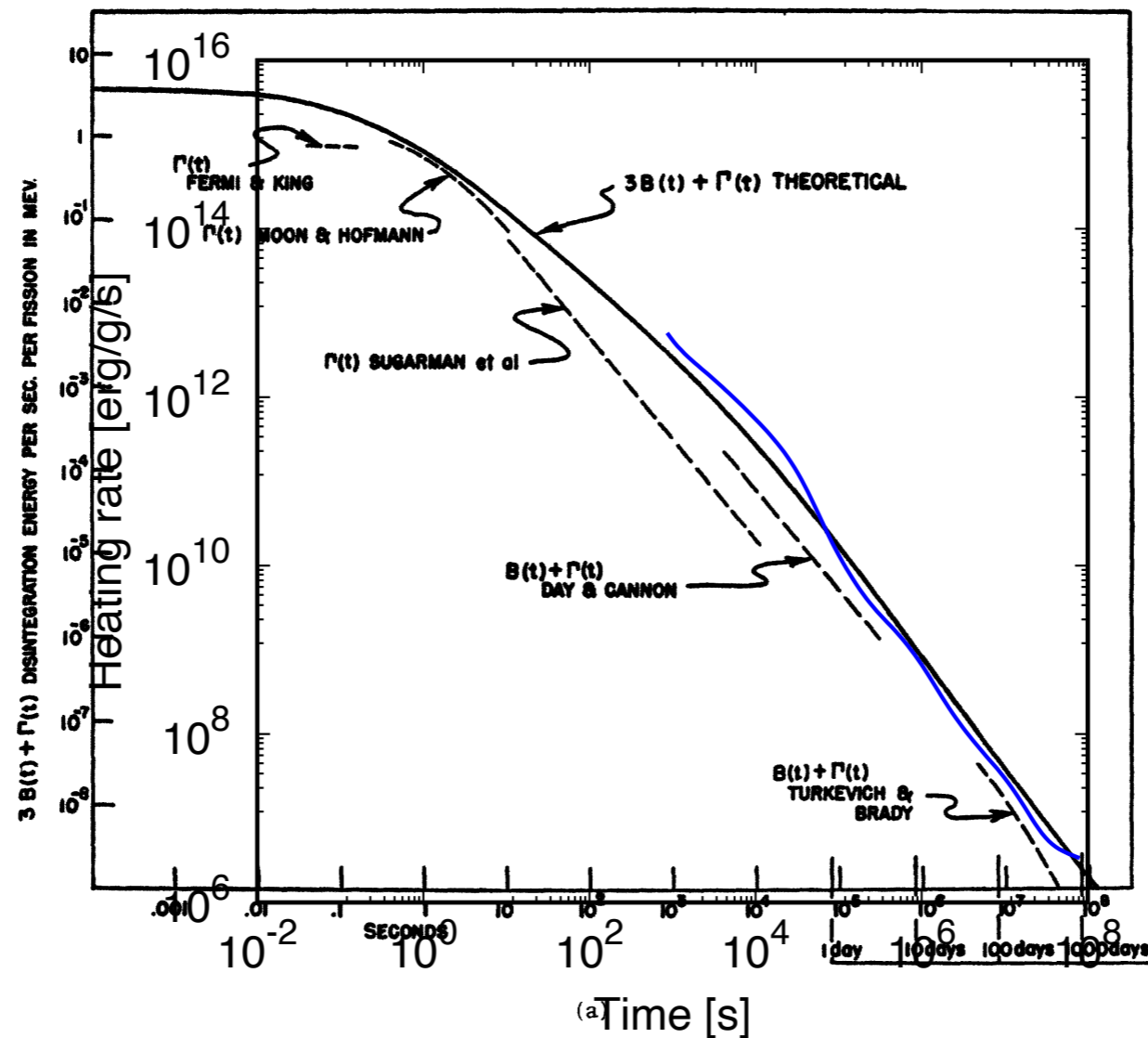
R過程後のベータ加熱（キロノバ）

ベータ加熱率は、組成パターンの詳細には弱くしか依存しない。

# キロノバのエネルギー源：ベータ崩壊

Way & Wigner 1948

KH & Nakar 2020



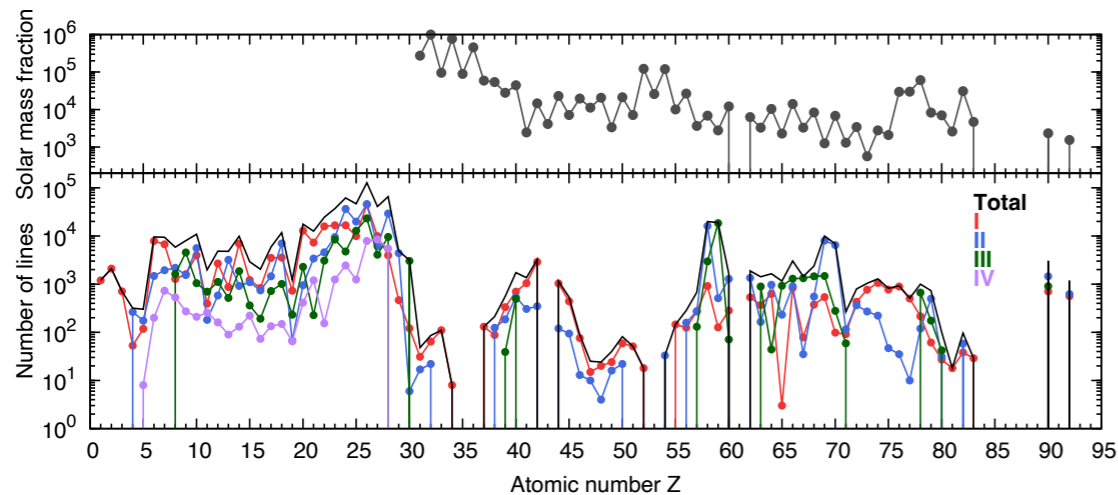
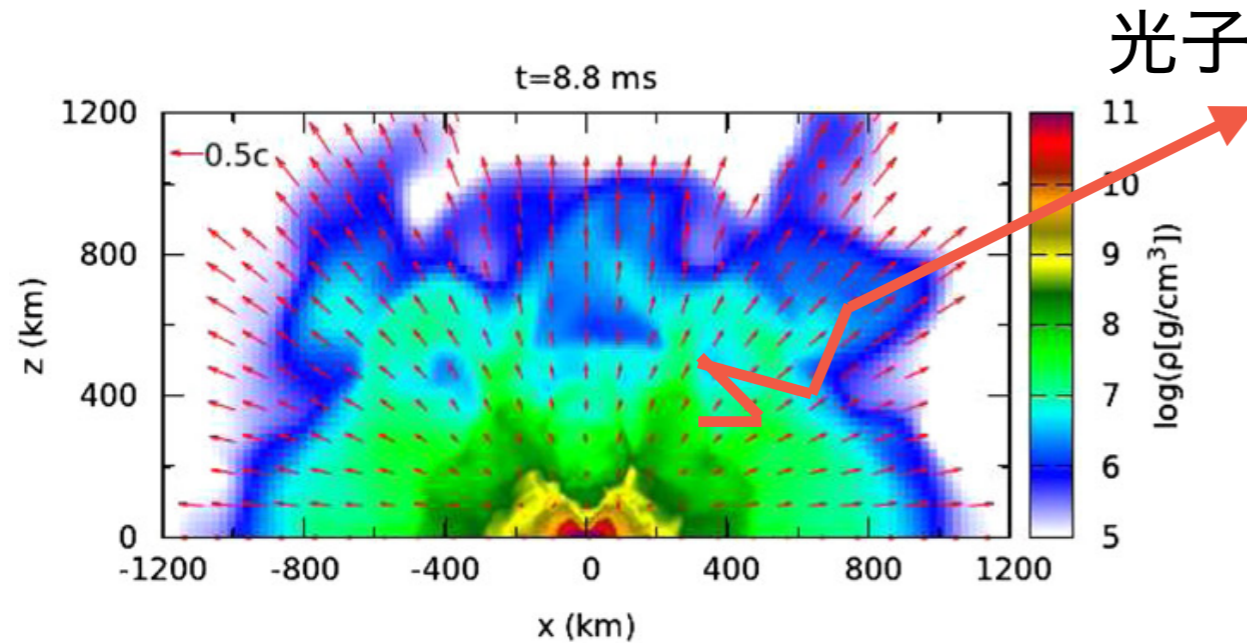
核分裂後のベータ加熱（原子炉）

R過程後のベータ加熱（キロノバ）

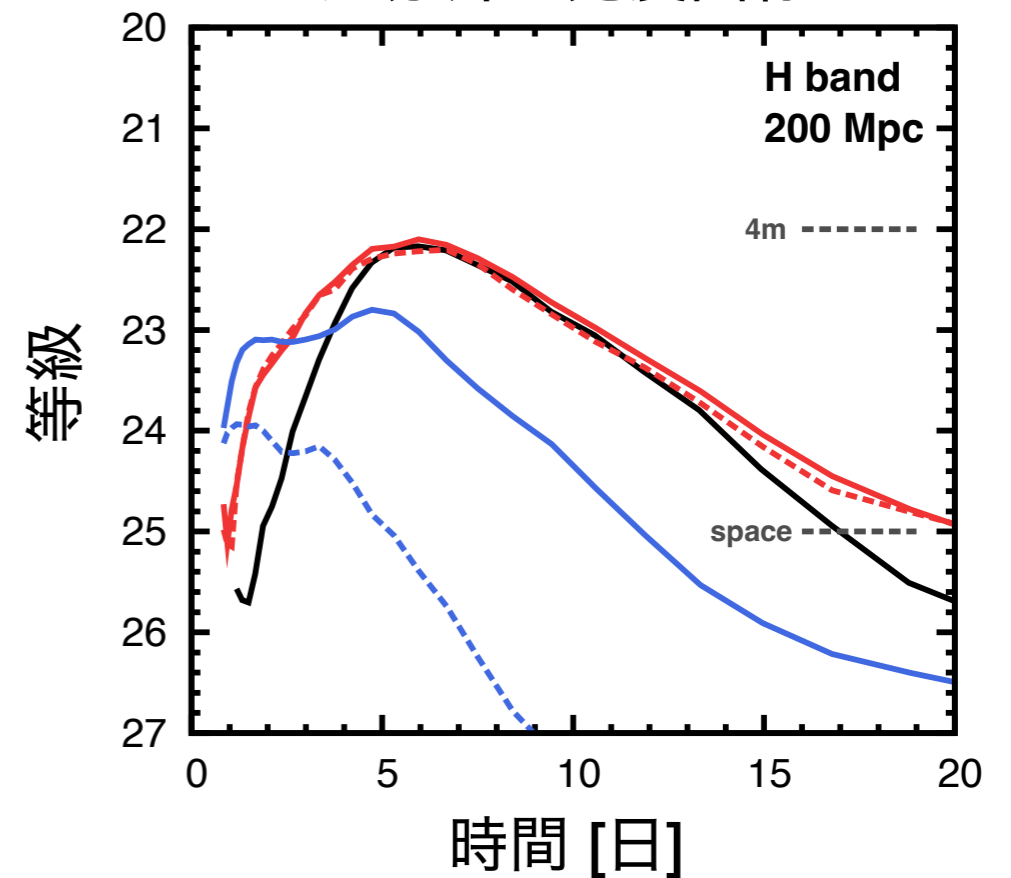
ベータ加熱率は、組成パターンの詳細には弱くしか依存しない。

# キロノバ放射予想

Tanaka & KH 2013



近赤外の光度曲線

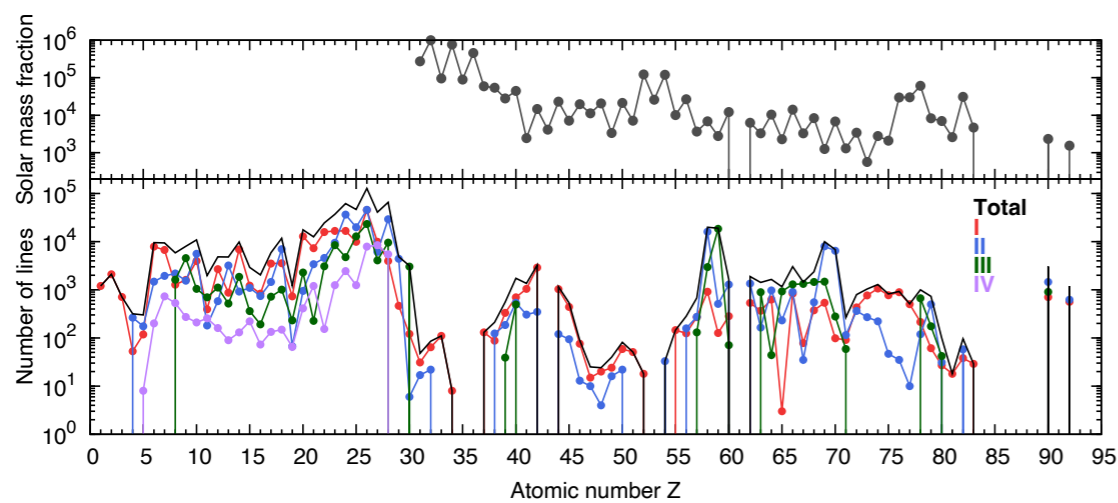
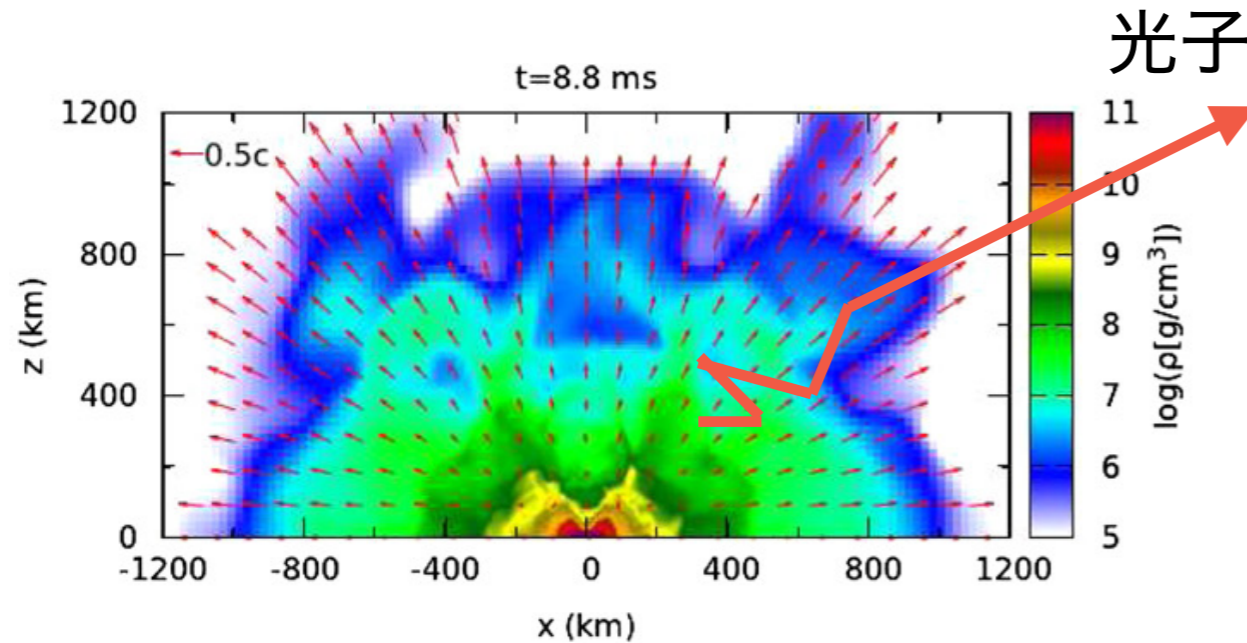


重元素が光を強く吸収し、キロノバは従来の期待よりも暗く赤いと予想。

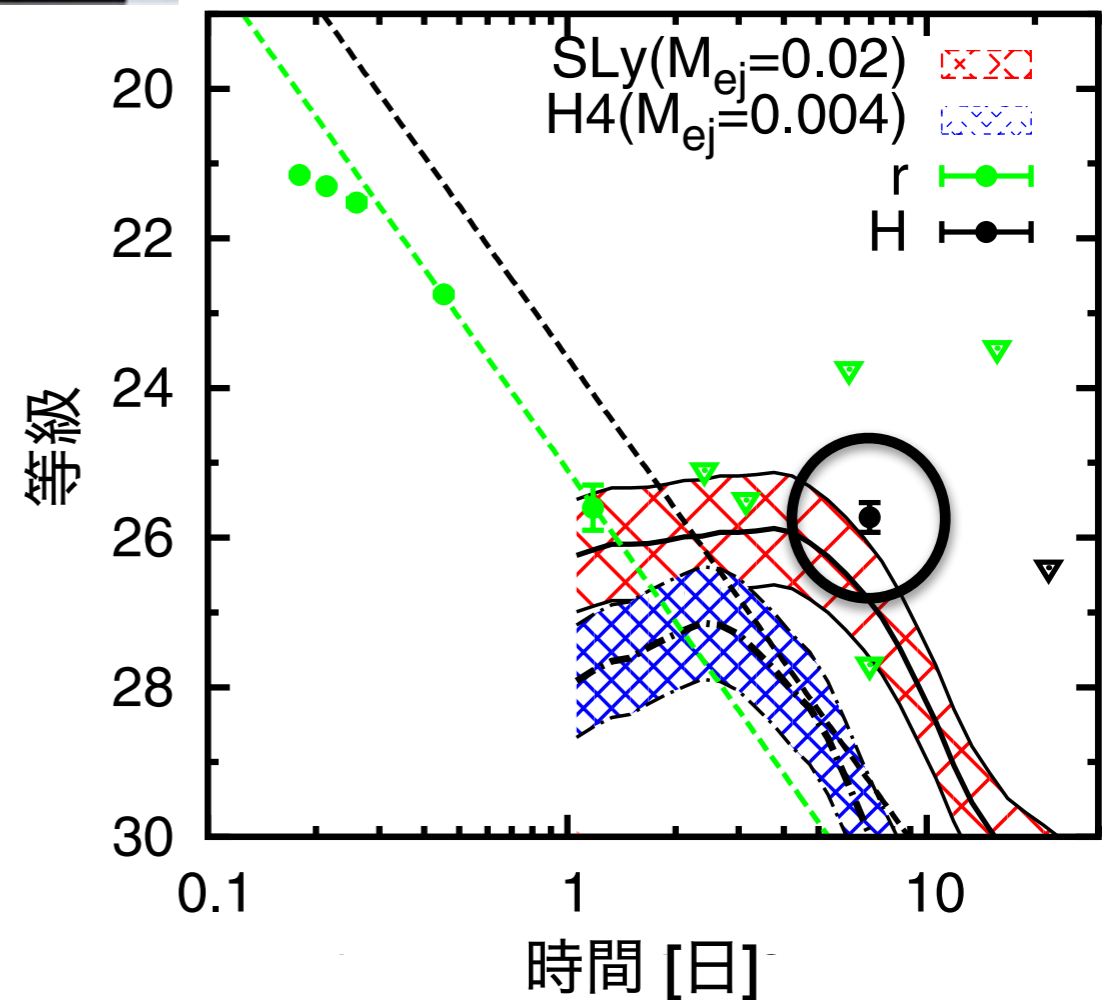
D3にして初めて”等級”を学ぶ。

# ガンマ線バーストとキロノバ

Tanaka & KH 2013, KH+2013



## ガンマ線バースト 130603B



観測値が、キロノバ理論が予想する時刻、明るさ、色と一致。

# ガンマ線バーストとキロノバ

Tanaka & KH 2013, KH+2013

光子

観測が発表された日

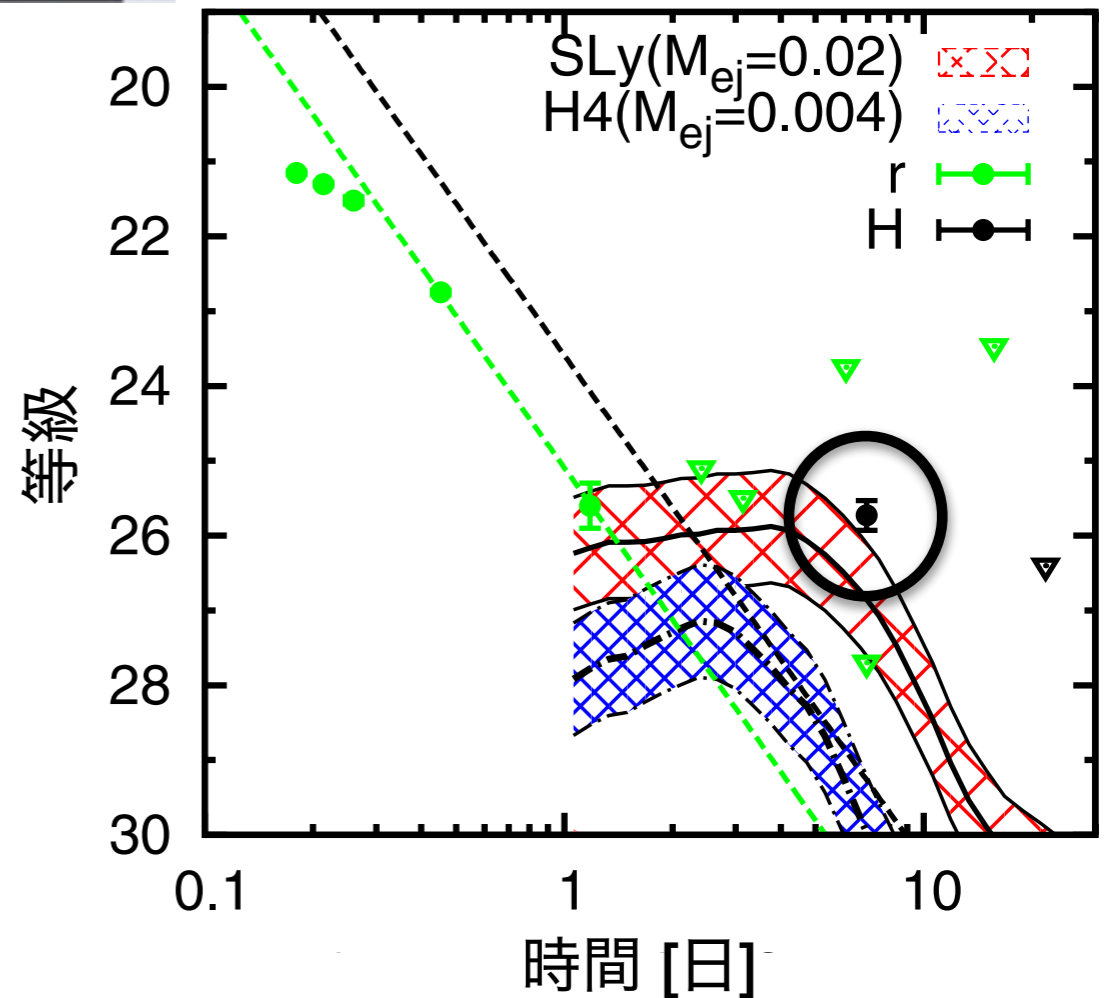
当たったな。。。  
(悔しそうに)



中村さん、当時、  
研究室の教授



ガンマ線バースト 130603B



観測値が、キロノバ理論が予想する時刻、明るさ、色と一致。

# ガンマ線バーストとキロノバ

Tanaka & KH 2013, KH+2013

光子



翌日

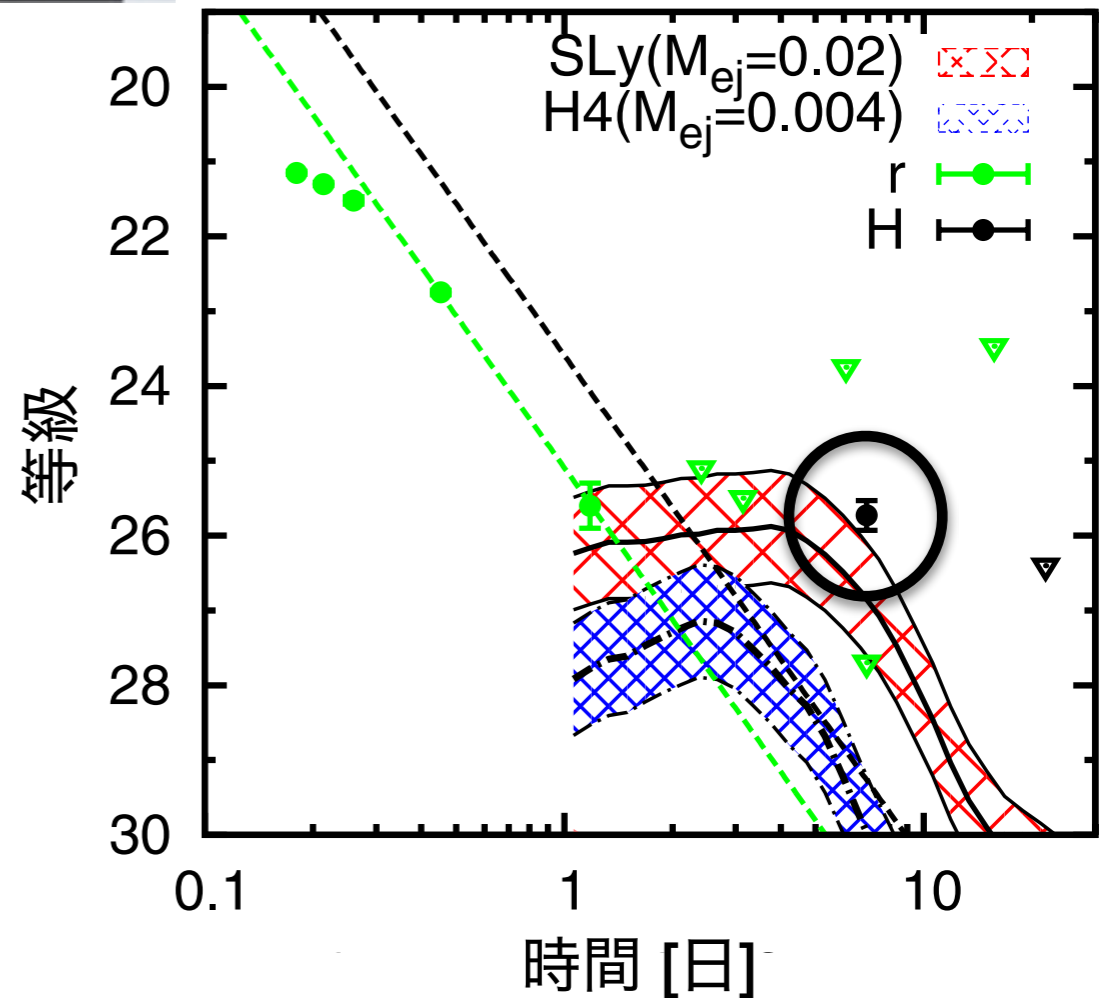
キロノバが暗いこと  
の証拠や、  
こんな見つけられ  
へんから違う対応天  
体考えなあかんわ！  
(嬉しそうに)



中村さん、当時、  
研究室の教授

100%研究者として学生と接する姿勢  
に感銘を受ける。

ガンマ線バースト 130603B

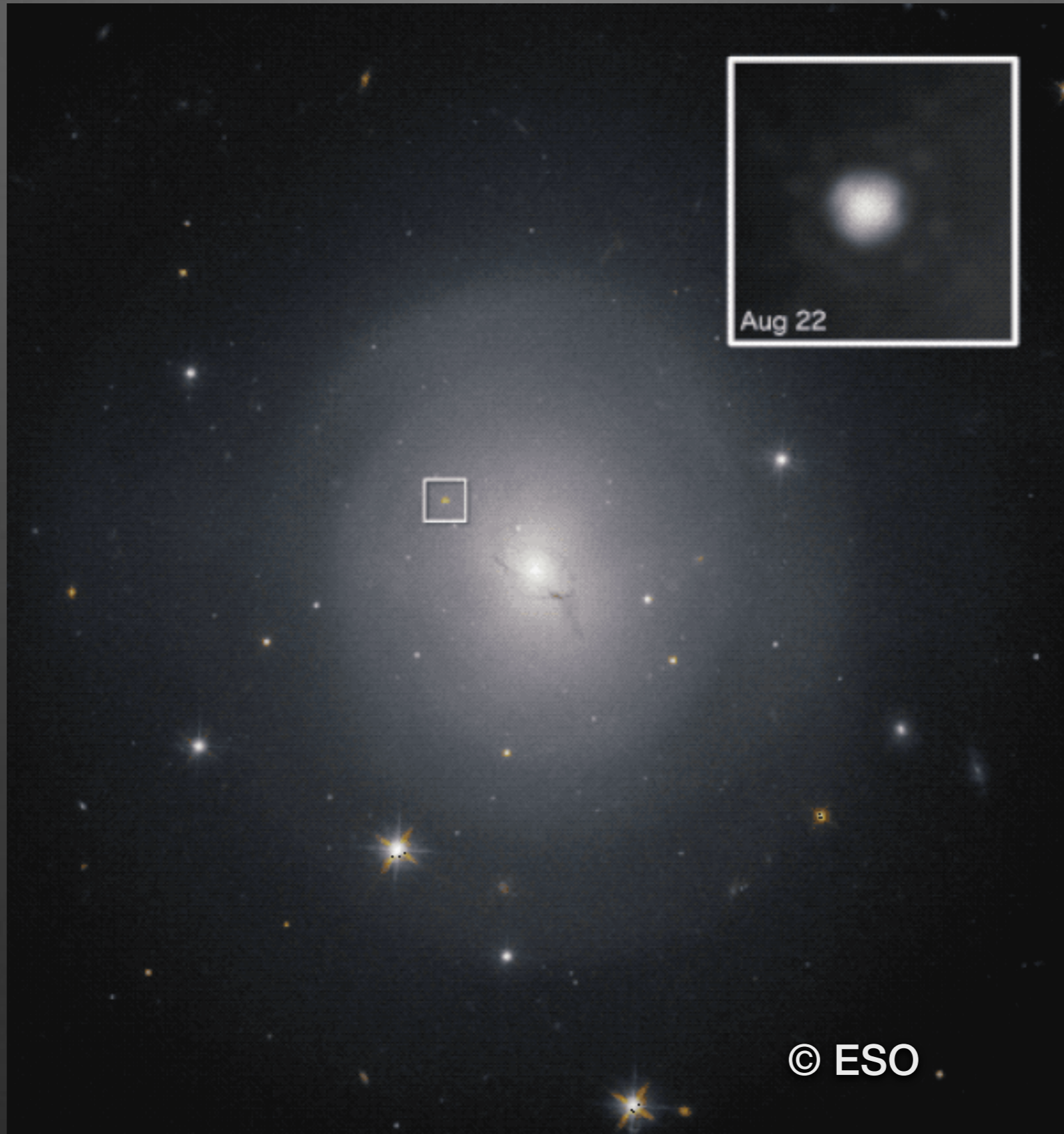


観測値が、キロノバ理論が予想する時刻、明るさ、色と一致。

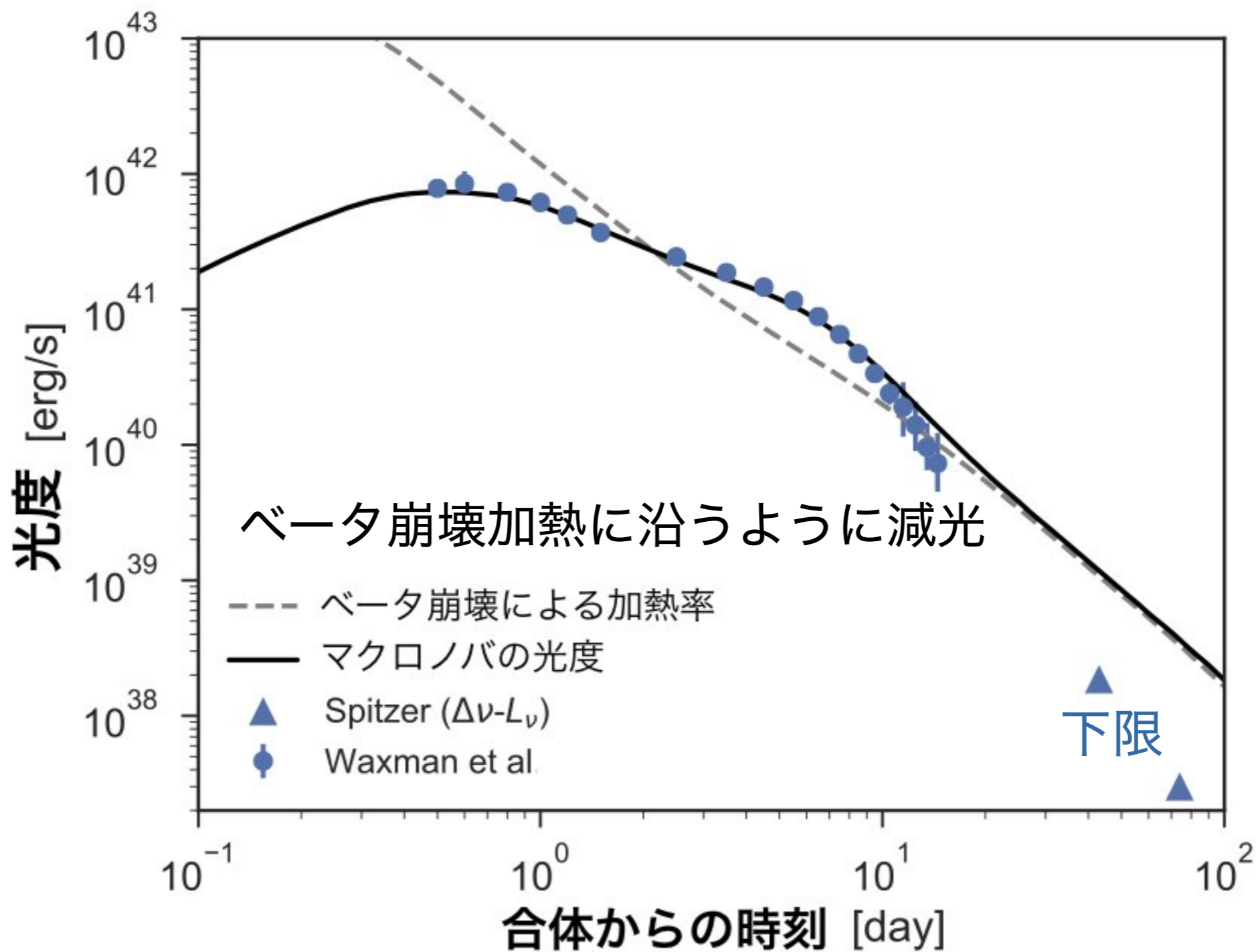
Atomic number Z



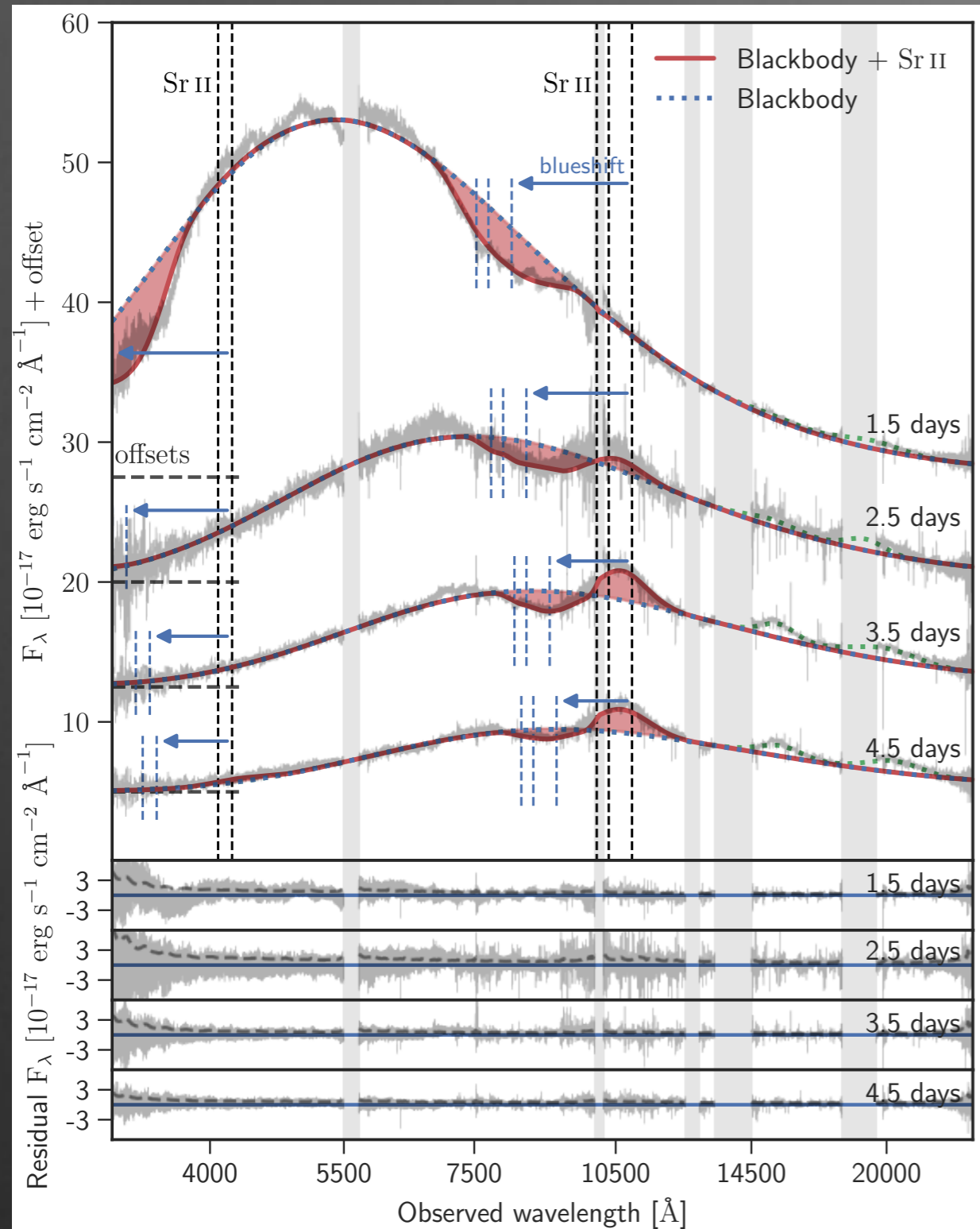
# キロノバ GW170817



# キロノバの光度曲線 (GW170817)



# キロノバのスペクトル



1.5日のスペクトルは、綺麗な黒体放射に吸収線が載っている。

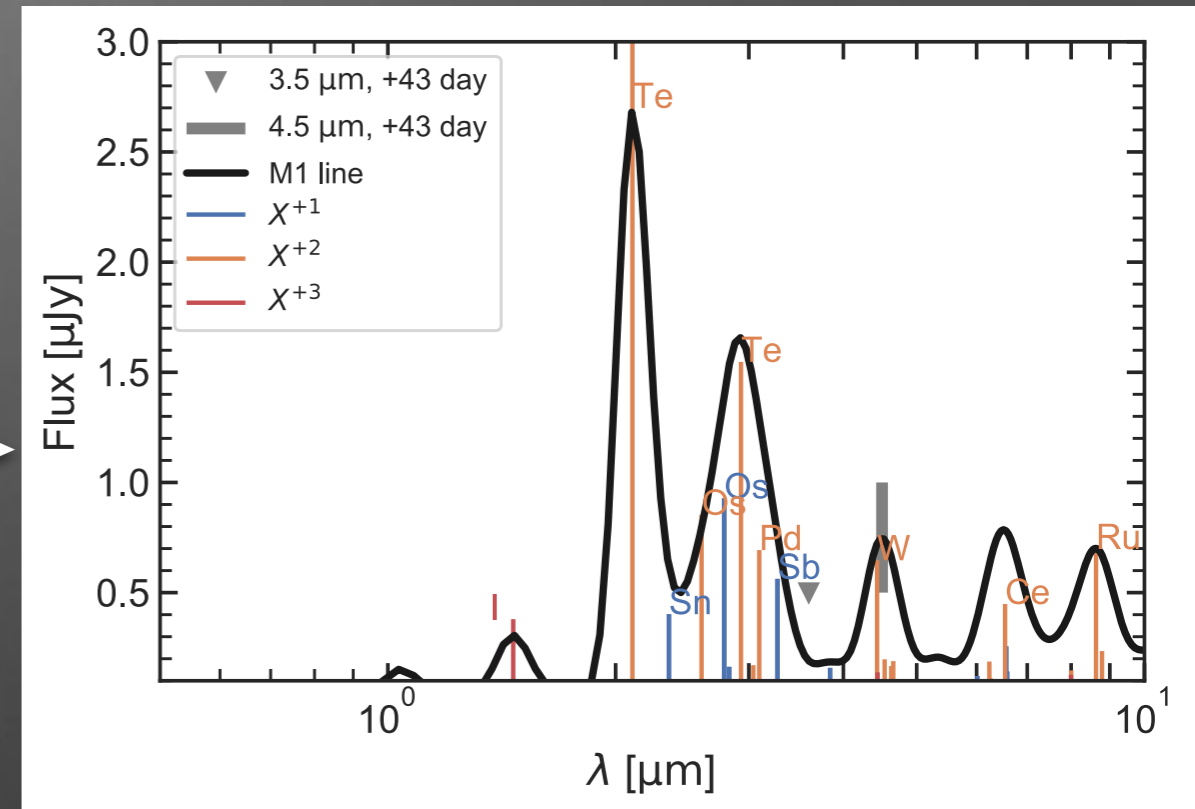
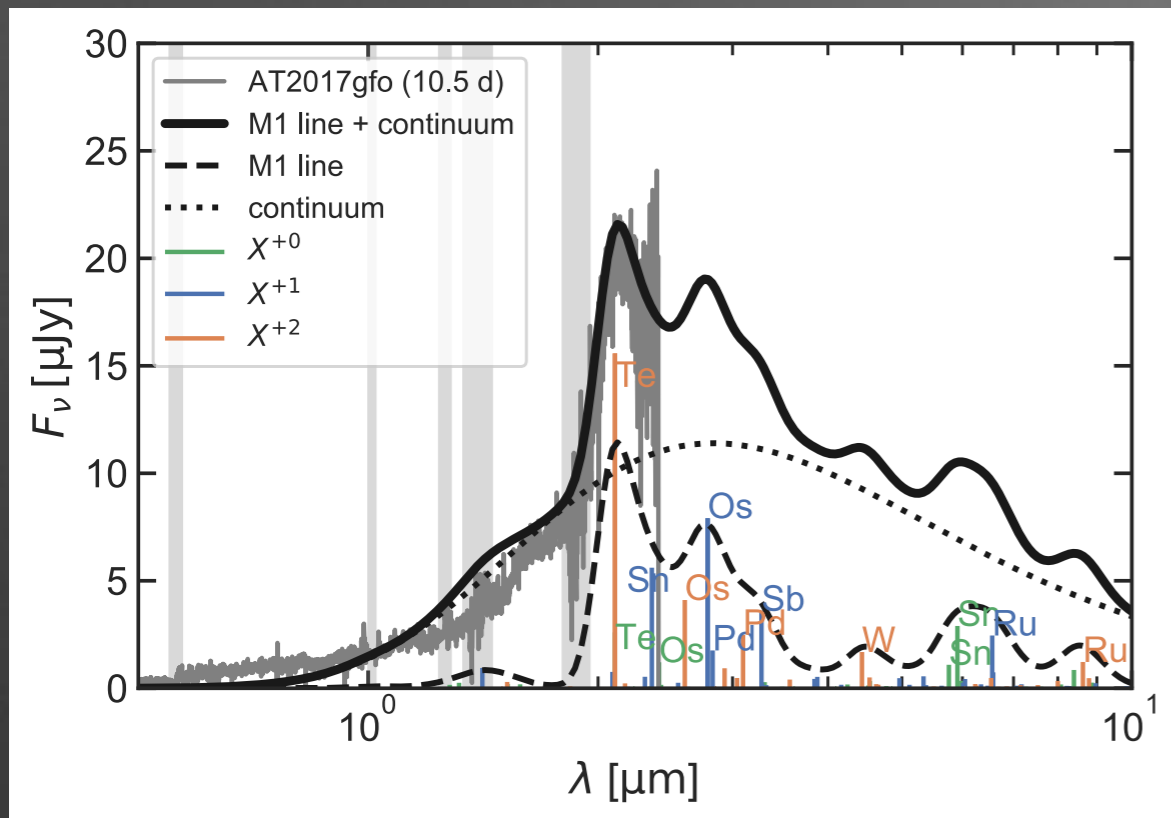
2.5日以降も同じ波長付近に吸収・放射線が見える

=> 膨張物質による吸収放射の典型的なプロファイル (P-Cygni)

これらの強いラインはSr II と考えられる (Heの可能性もあり)。

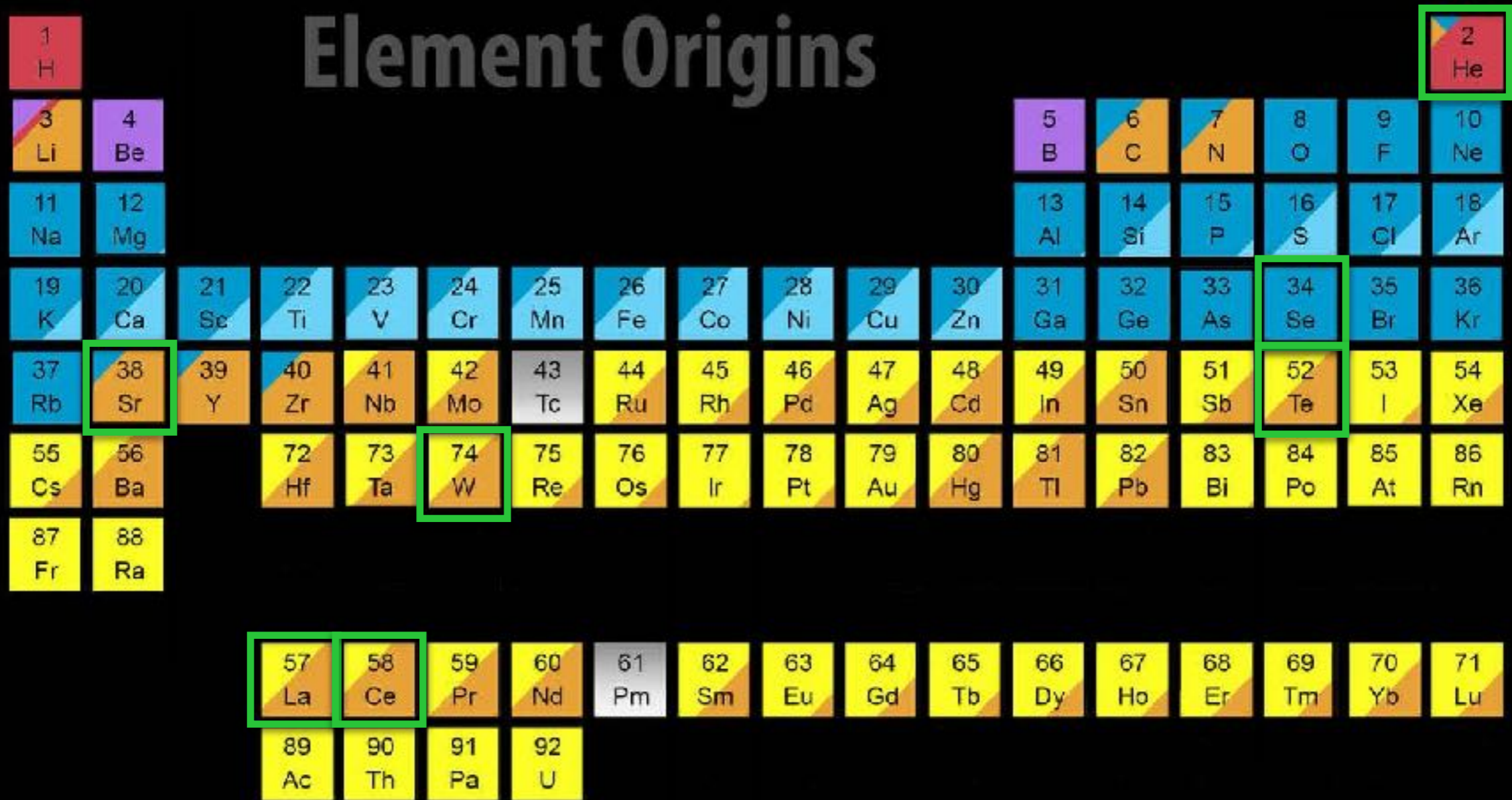
# キロノバ後期スペクトルと元素の起源

GW170817 spectrum rescaled to 100 Mpc (KH, et al 2022)



- 10日の近赤外ピーク  $\Rightarrow$  Te (Z=52)?
- 40日の赤外観測  $\Rightarrow$  W (Z=74)?
- JWST(感度  $\sim 0.1 \mu\text{Jy}$ )で見れば、綺麗なスペクトルが取れると期待。

# GW170817からの元素の起源への示唆



**Merging Neutron Stars**  
**Dying Low Mass Stars**

**Explosing Massive Stars**  
**Explosing White Dwarfs**

**Big Bang**  
**Cosmic Ray Fission**

Based on graphic created by Jennifer Johnson

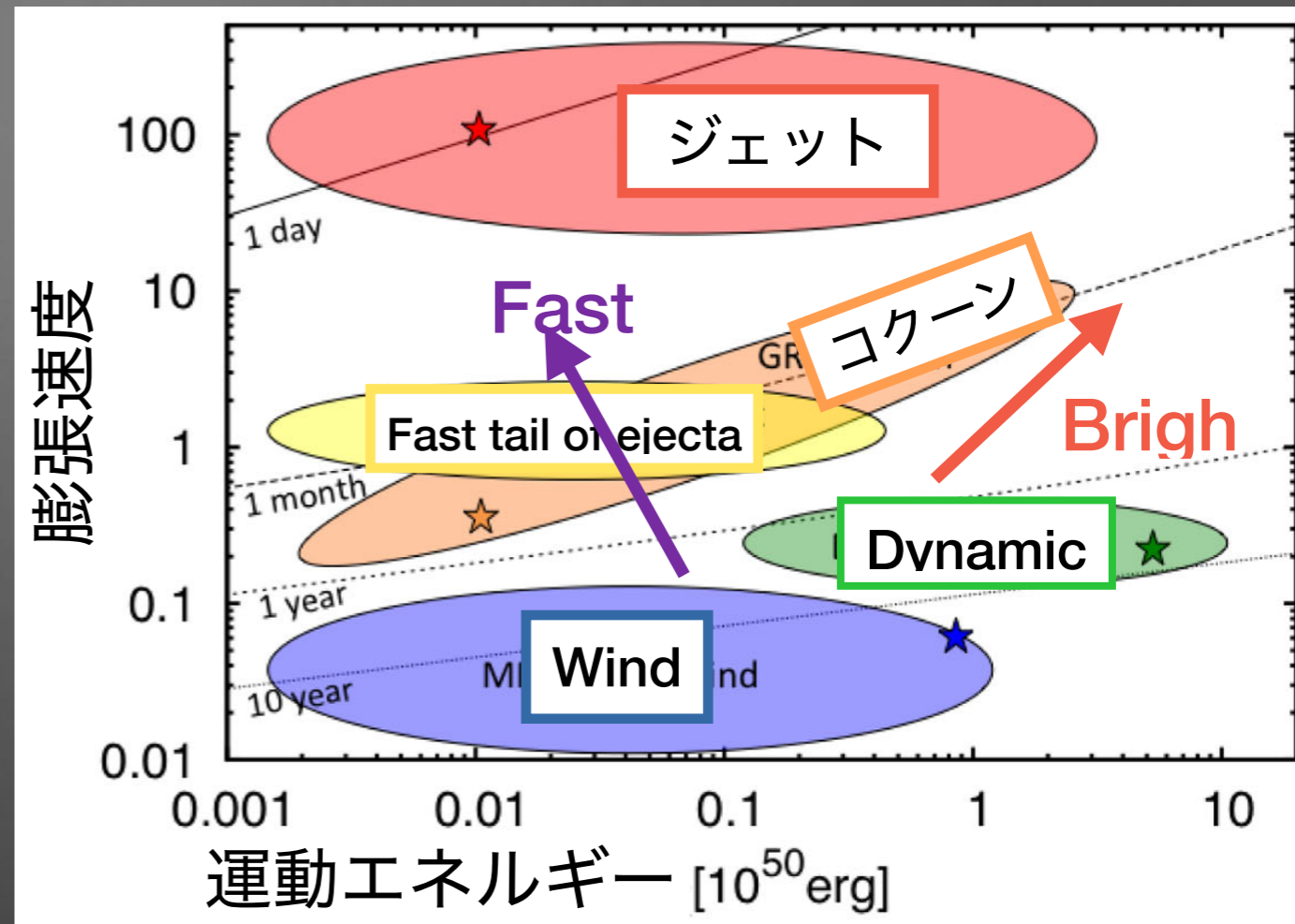
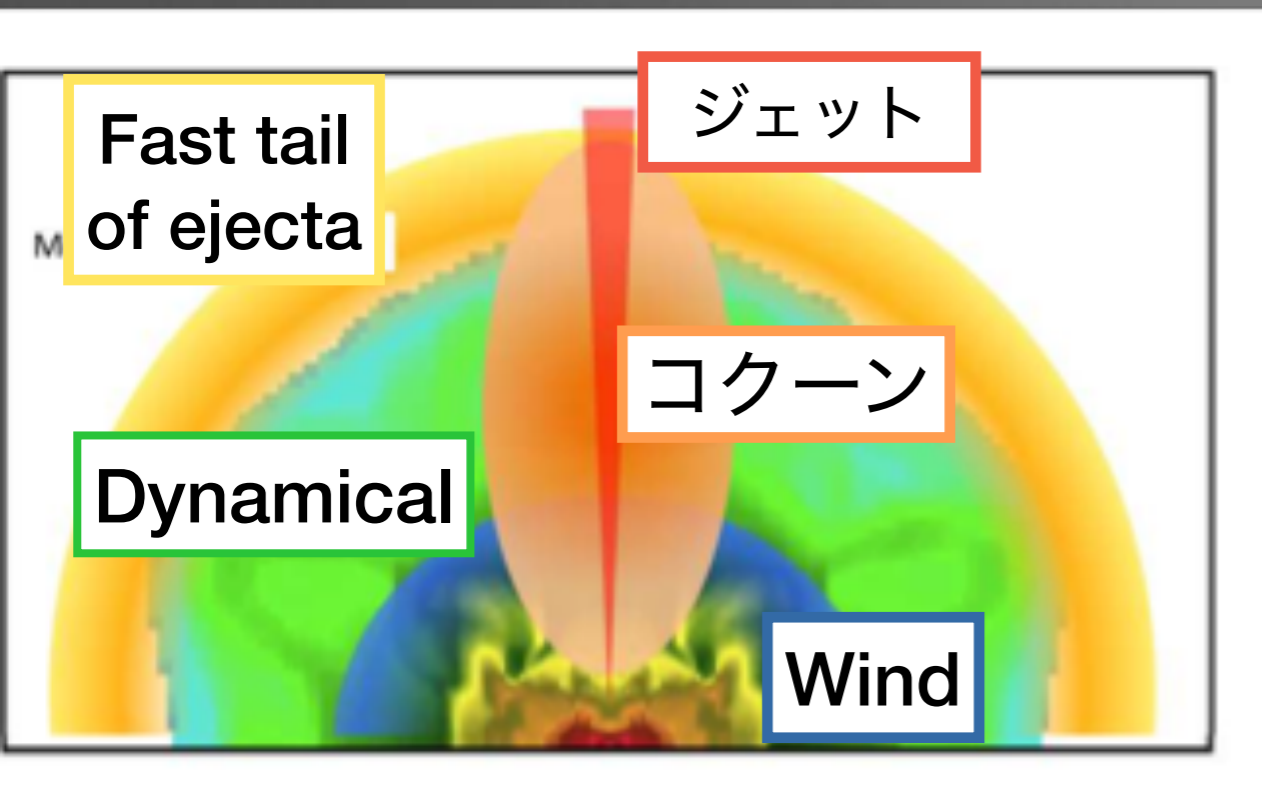
Watson+ 19, Perego+21, Gillandars+22, KH+22, Domoto+22, Tarumi, KH+ in prep.

# 本日の話題

- 中性子星合体とは？
- 電磁波対応天体 キロノバ
- 電磁波対応天体 シンクロトロン残光
- 展望

# シンクロトロン電波残光

Nakar & Piran 2011, KH & Piran 2015



- 中性子星合体のアウトフローは様々な速度・エネルギーを持つ。
- アウトフローが星間物質と衝突し衝撃波加速が起こりシンクロトロン放射を生成。

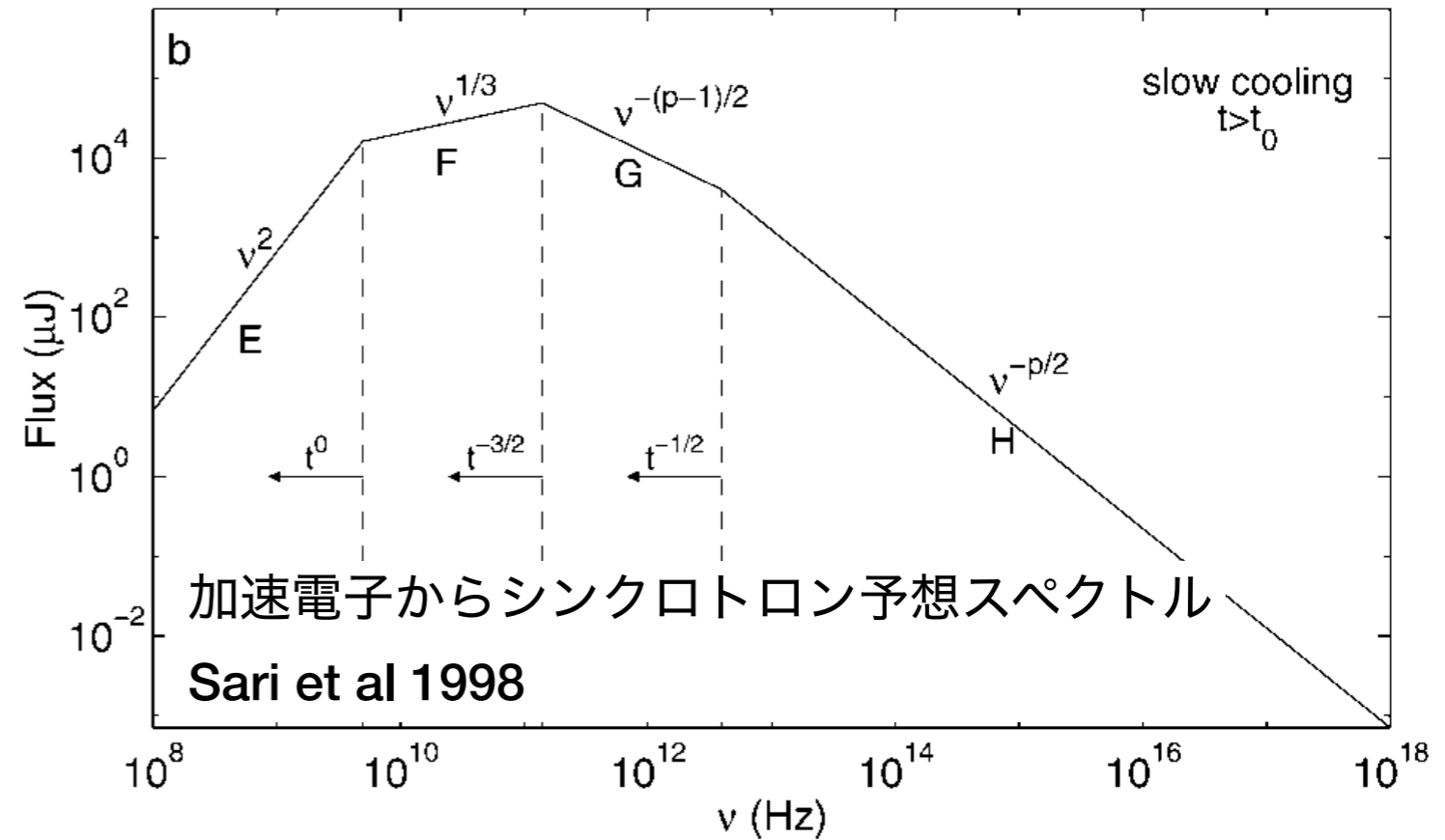
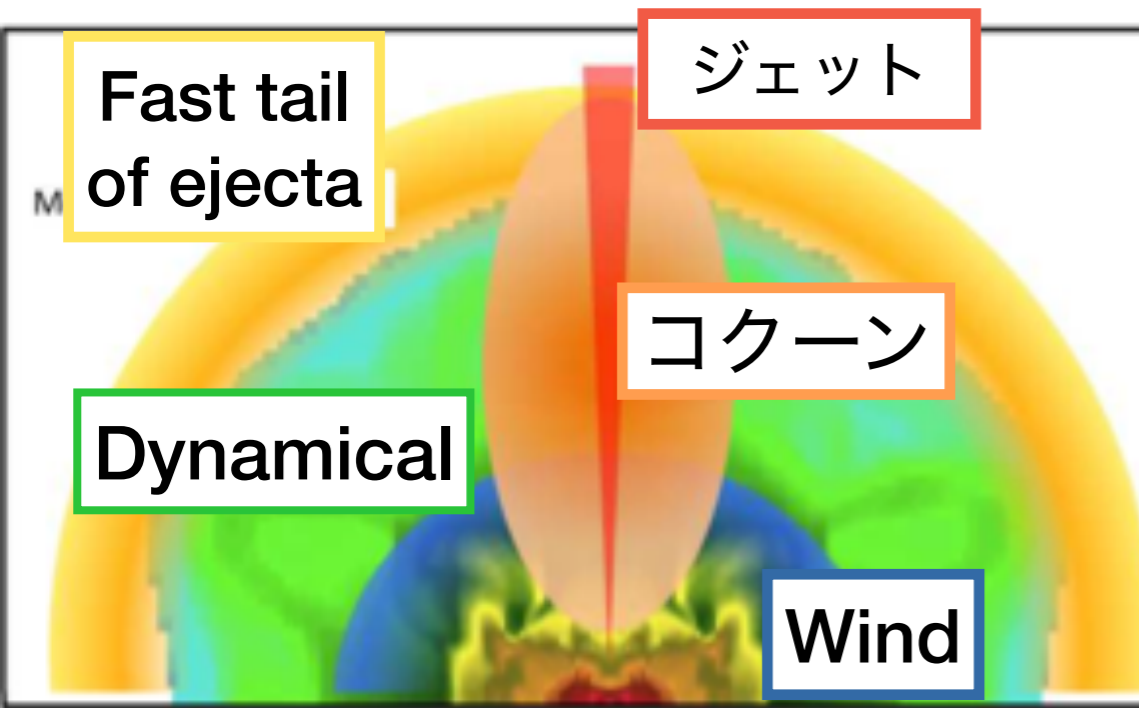
明るさ:  $F_{\text{peak}} \propto E \beta^{11/4} n^{7/8}$  (電波にピーク)

↑
↑
↑

運動エネルギー                  膨張速度                  星間物質の密度

# シンクロトロン電波残光

Nakar & Piran 2011, KH & Piran 2015



- 中性子星合体のアウトフローは様々な速度・エネルギーを持つ。
- アウトフローが星間物質と衝突し衝撃波加速が起こりシンクロトロン放射を生成。

明るさ:  $F_{\text{peak}} \propto E \beta^{11/4} n^{7/8}$  (電波にピーク)

運動エネルギー      膨張速度      星間物質の密度



# 2015年当時、電波残光は対応天体として劣勢

Nakar & Piran (PD時代のボス)

LETTER

doi:10.1038/nature10365

## Detectable radio flares following gravitational waves from mergers of binary neutron stars

Ehud Nakar<sup>1</sup> & Tsvi Piran<sup>2</sup>



様々な否定的な意見

1. 合体は薄い密度の環境
2. エジェクタの速度が遅い
3. ピーク時間が遅い
4. 母銀河と分離できない
5. AGNと超新星と間違える
6. ....

# 2015年当時、電波残光は対応天体として劣勢

Nakar & Piran (PD時代のボス)

LETTER

doi:10.1038/nature10365

## Detectable radio flares following gravitational waves from mergers of binary neutron stars

Ehud Nakar<sup>1</sup> & Tsvi Piran<sup>2</sup>



様々な否定的な意見

1. 合体は薄い密度の環境
2. エジェクタの速度が遅い
3. ピーク時間が遅い
4. 母銀河と分離できない
5. AGNと超新星と間違える
6. ....

全ての否定的な意見に  
反論せよ

ほぼ喧嘩に見えるような論争によって  
サイエンスを進展させる姿勢を学ぶ。

# 2015年当時、電波残光は対応天体として劣勢

Nakar & Piran (PD時代のボス)

LETTER

doi:10.1038/nature10365

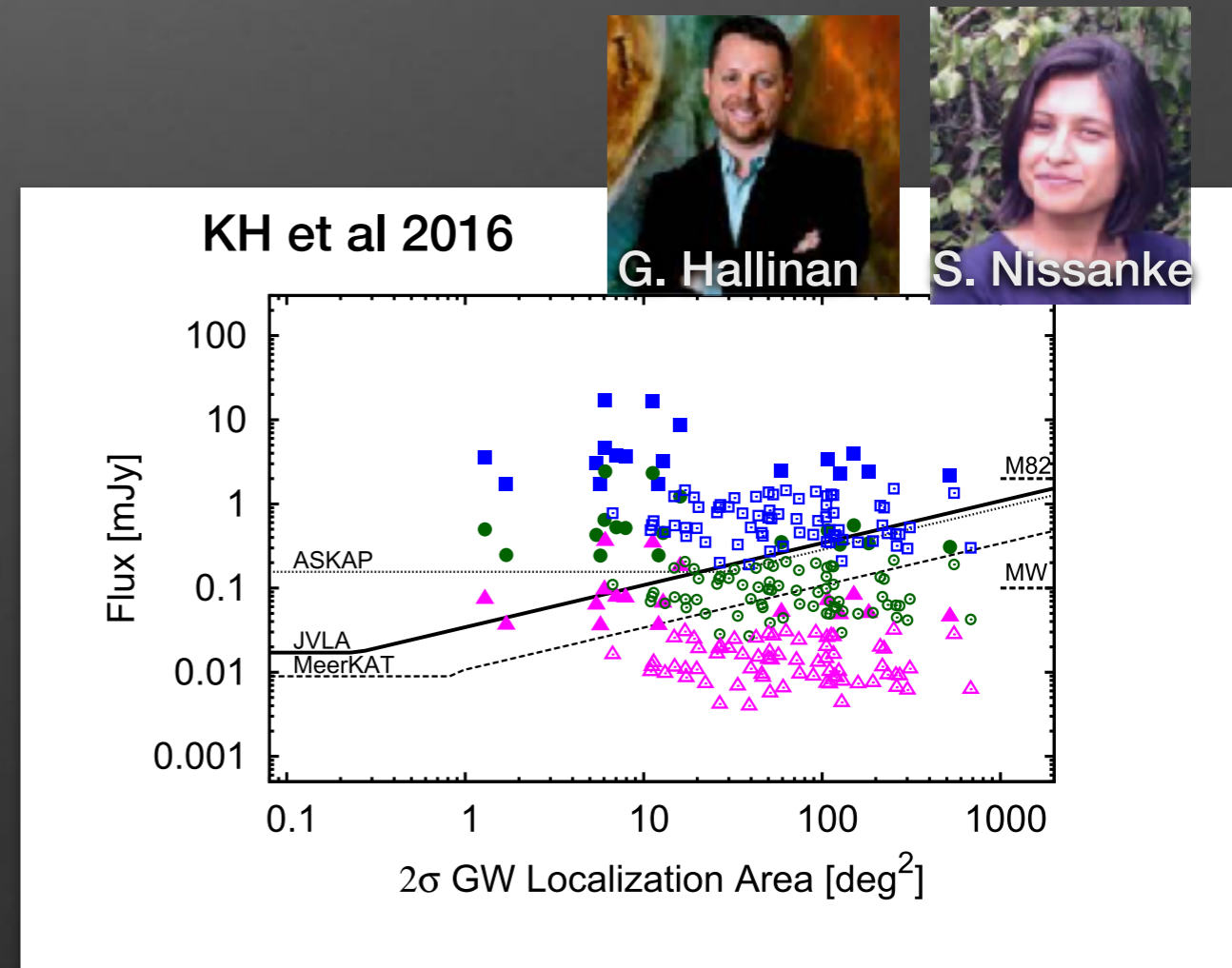
## Detectable radio flares following gravitational waves from mergers of binary neutron stars

Ehud Nakar<sup>1</sup> & Tsvi Piran<sup>2</sup>



様々な否定的な意見

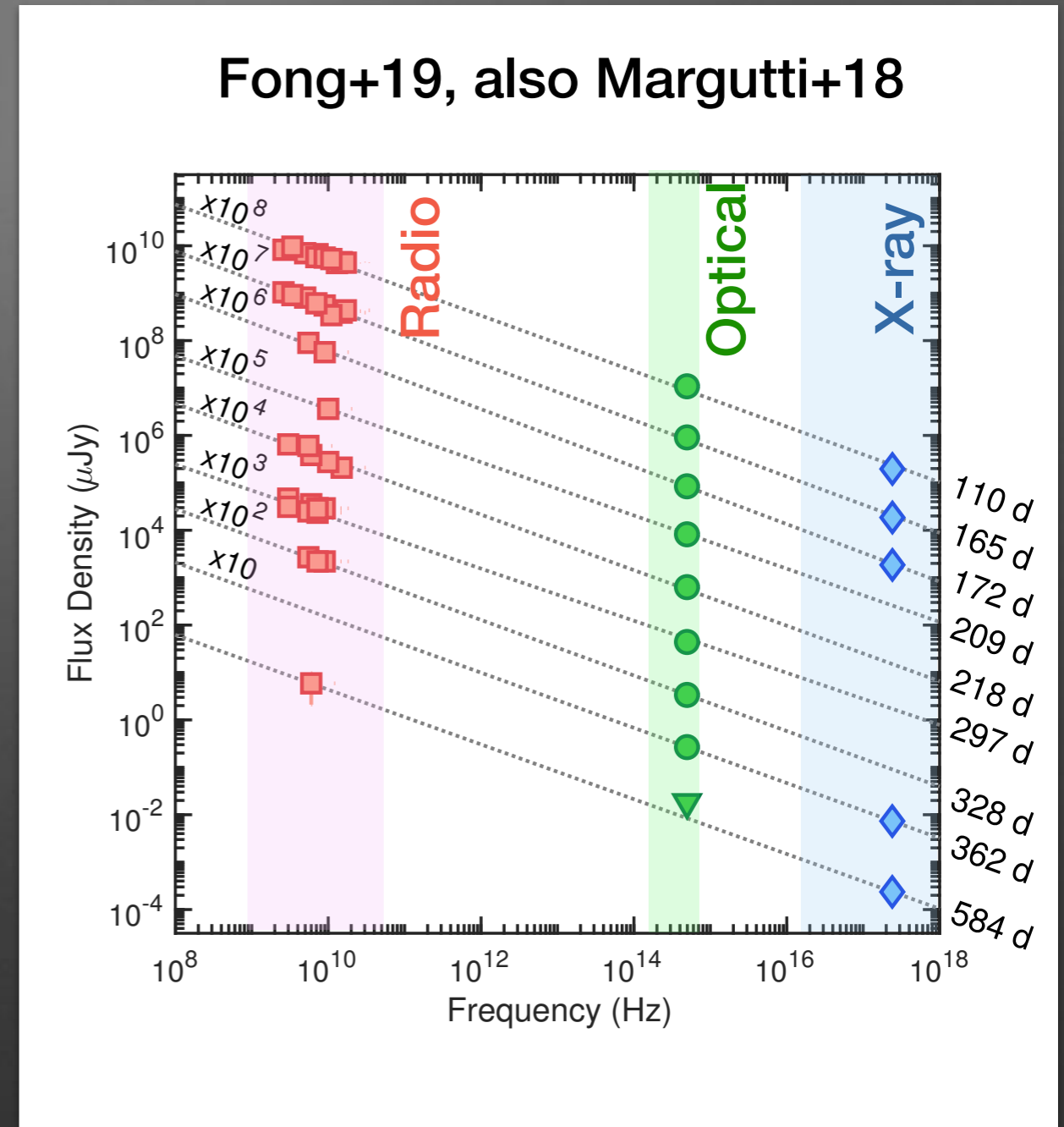
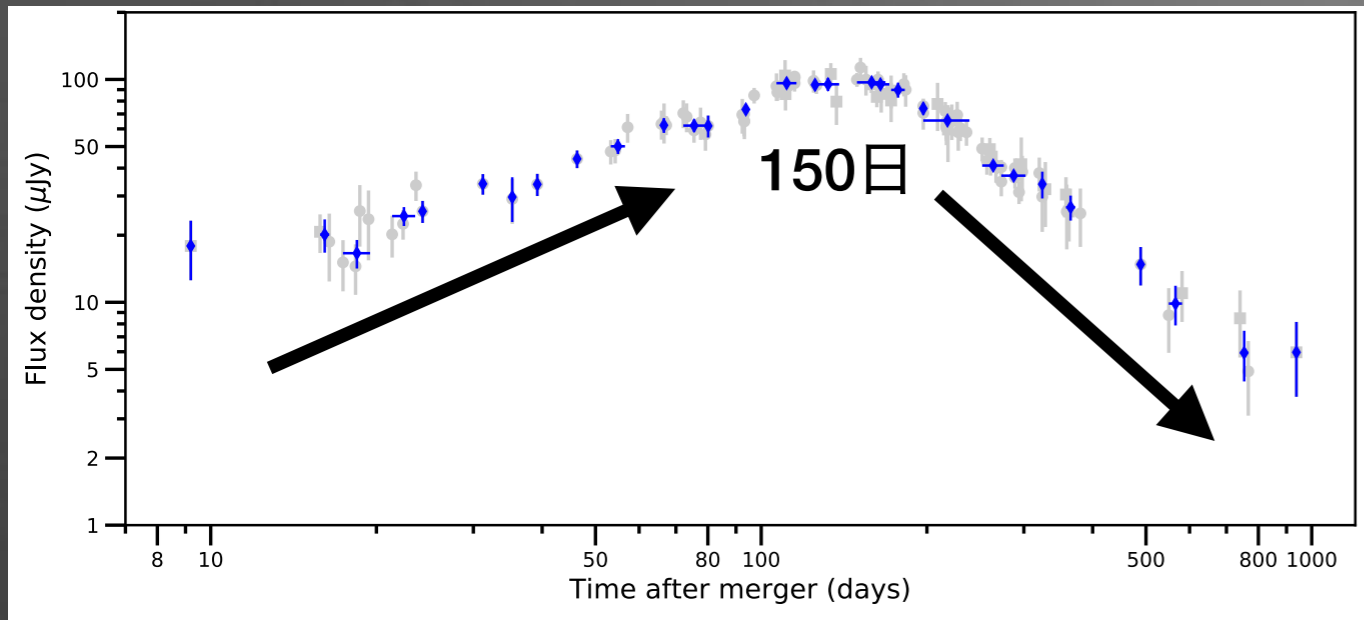
1. 合体は薄い密度の環境
2. エジェクタの速度が遅い
3. ピーク時間が遅い
4. 母銀河と分離できない
5. AGNと超新星と間違える
6. ....



# 残光 in GW170817: 美しい冪則

光度曲線 (Hallinan+17, Mooley+18, Makhathini+2020)

スペクトル



- 光度曲線・スペクトル、共に冪則を示す。
- 特に、スペクトルは電波からX線まで、およそ8桁の周波数帯に渡って単一べき則。
- アウトフローと星間物質の衝撃波によって、電子加速が起きていることがよくわかる。

Hallinan+17, Margutti+17,18, Troja+17,19,  
Haggard+17, Ruan+17, Lyman+18, Mooley+18

# 電波干渉計を使って見るジェット

Mooley...KH (2018)

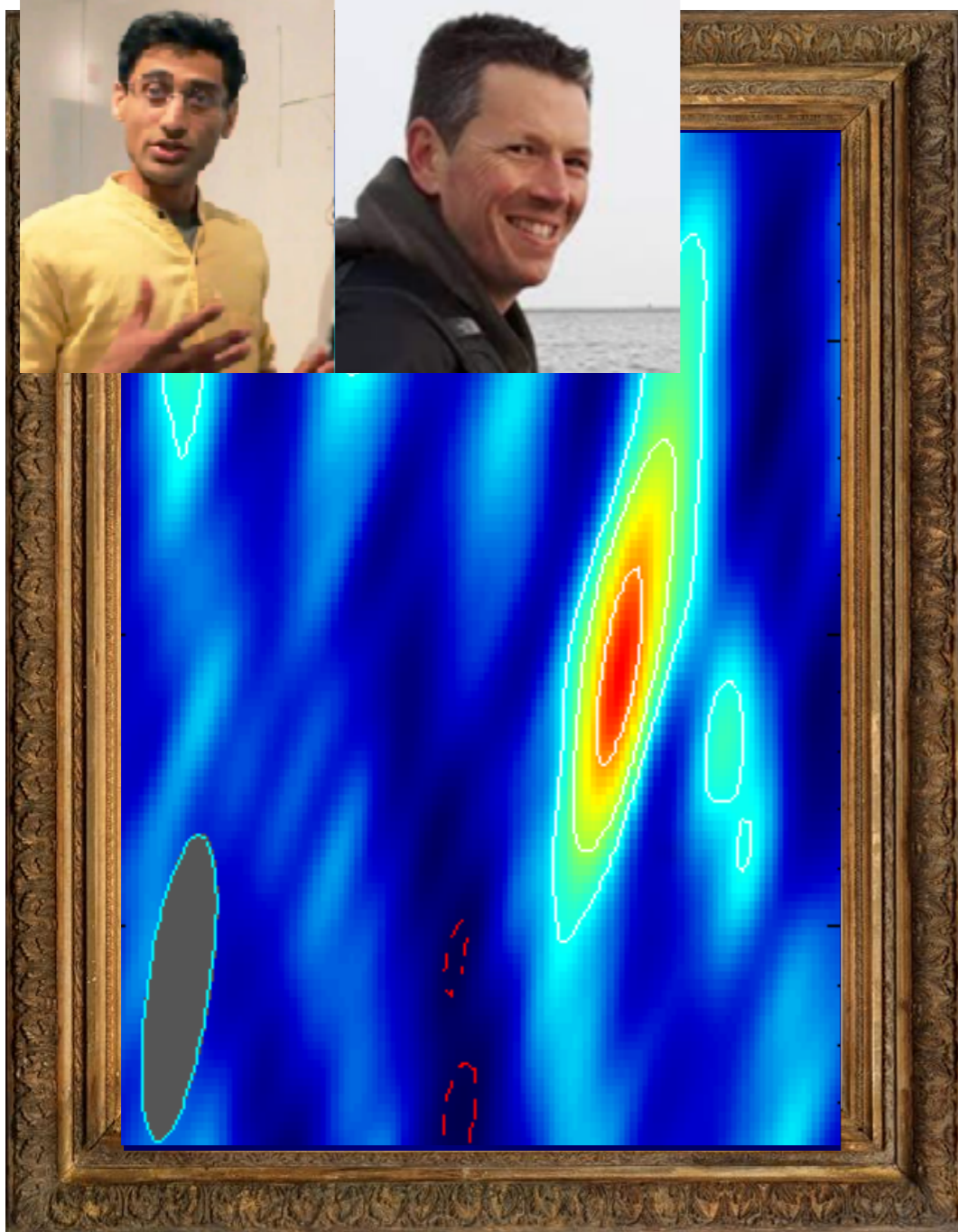


Two observations with the HSA  
(75 d and 230 d post-merger)

# 電波干渉計を使って見るジェット

K. P. Mooley & A. T. Deller

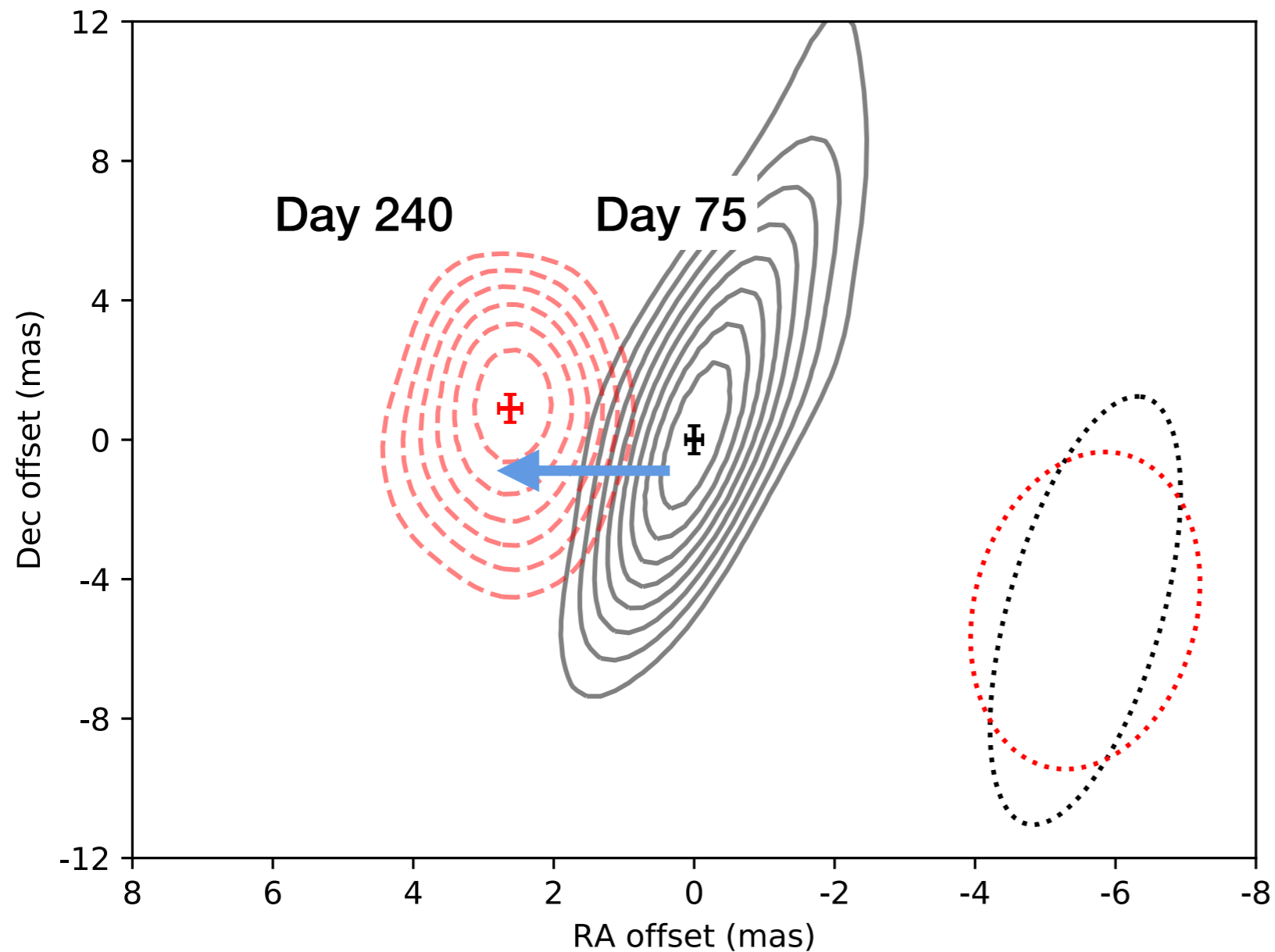
Mooley...KH (2018)



Two observations with the HSA  
(75 d and 230 d post-merger)

# 超光速ジェット in GW170817

VLBI resolve the motion of the radio source Mooley...KH (2018)



1, 電波源が動いている

2.7 ミリ秒角 in 155 日

=> ~ 0.5 パーセク (at 40Mpc)

見かけの速度 (c)

$$\beta_{\text{app}} = 4.1 \pm 0.4$$

2, 電波源は点源と無矛盾



小さい開きを持つ相対論的なジェット

$$\theta_{\text{obs}} = 69^\circ$$

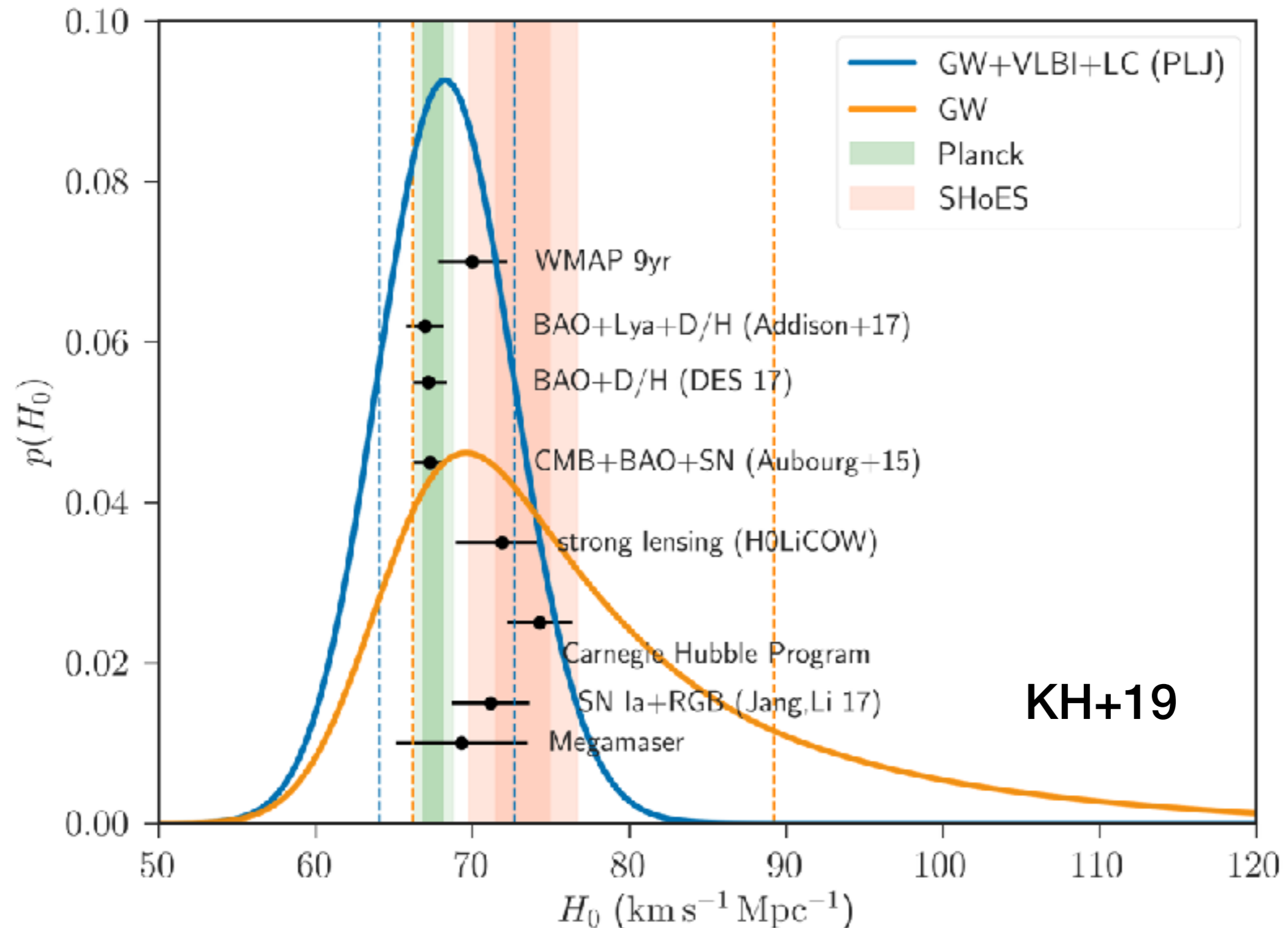
$t = 0.00 \text{ s}$

*Massive core ejecta*





# ジェットの見込み角の情報=> H0



$68.1^{+4.5}_{-4.3} \text{ km/s/Mpc}$

3-4% ジェットのモデルの不定性

# 今後の展望

- LIGO/Virgo/KAGRA O4が今年から始まる。感度向上により、検出頻度が上がる。ただし、距離が遠くなるので、電磁波対応天体探査はより難しくなる。

数年

- 高感度宇宙望遠鏡JWSTにより、キロノバスペクトルの大部分をhigh S/Nでカバー。元素の特定など。

- 中性子星合体の多様性や、ブラックホール・中性子星合体の対応天体。

~10年

- イベント数が50ほどになれば、ハッブル定数の測定精度がIa超新星を超える。

- 次世代の地上干渉計へ。高赤方偏移の重力波宇宙論。重力波+ガンマ線バースト。近傍イベントでは中性子星の状態方程式に対して極めて強い示唆。

~15年

- 宇宙干渉計。地上からは見えない重力波ソースが見え、質的な変化が起こる。

~100年

- 系内超新星爆発からのニュートリノ・重力波・電磁波観測