

連星中性子星合体における 物質の放出と重元素の起源： 数値シミュレーションによる現状の理解

Sho Fujibayashi (藤林 翔)

(東北大学 学際科学フロンティア研究所、

Max Planck Institute for Gravitational Physics)



自己紹介

藤林 翔 (ふじばやし しょう)

1989.8：三重県伊賀市に生を受ける



iga-travel.jp



自己紹介

藤林 翔 (ふじばやし しょう)

1989.8：三重県伊賀市に生を受ける

～～

2012.4：MIの自己紹介で「忍者」の称号を手にする

2018.3：学位@京都大学

2018.6－2024.6：ポスドク@MPI for Gravitational Physics, ポツダム, ドイツ

2024.6－現在：助教@東北大学 学際科学フロンティア研究所

キラキラしたキャリアについての話は出来ないのですが、
興味があればどこかで捕まえて聞いて下さい

藤林と夏の学校

2012年(第43回)－2017年(第47回)までフル参加

2012 @東尋坊

M1：初参加&事務局（会計係）

素粒子・重力・宇宙論

多くの友人と出会う

2013 @宮城蔵王

M2：引き続き参加

コンパクト天体

更に多くの友人と出会う

2014-2017

@上山田

D1：引き続き参加

コンパクト天体

座長

D2：引き続き参加

事務局にちよっかいを出す

D3：引き続き参加

（覚えていない）

夏の学校では友達をたくさんつくりましょう

※写真は削除しました

Outline

1. 導入

- 元素の起源
- r-process
- 連星中性子星と合体
- Kilonova

2. 連星中性子星合体の数値モデリング

3. 結果

- Dynamical ejecta (~ 0.01 s)
- Post-merger ejecta ($\sim 1 - 10$ s)
- 組成, 電磁波放射

4. まとめ

身の回りの元素はいかに作られたか？

1 H Hydrogen 1,008																	18 He Helium 4,002
3 Li Lithium 6,941	4 Be Beryllium 9,012											5 B Boron 10,811	6 C Carbon 12,011	7 N Nitrogen 14,007	8 O Oxygen 15,999	9 F Fluorine 18,998	10 Ne Neon 20,180
11 Na Sodium 22,990	12 Mg Magnesium 24,305	3 Sc	4 Ti	5 V	6 Cr	7 Mn	8 Fe	9 Co	10 Ni	11 Cu	12 Zn	13 Al Aluminum 26,982	14 Si Silicon 28,086	15 P Phosphorus 30,974	16 S Sulfur 32,065	17 Cl Chlorine 35,453	18 Ar Argon 39,948
19 K Potassium 39,098	20 Ca Calcium 40,078	21 Sc Scandium 44,956	22 Ti Titanium 47,867	23 V Vanadium 50,942	24 Cr Chromium 51,996	25 Mn Manganese 54,938	26 Fe Iron 55,845	27 Co Cobalt 58,933	28 Ni Nickel 58,693	29 Cu Copper 63,546	30 Zn Zinc 65,390	31 Ga Gallium 69,723	32 Ge Germanium 72,640	33 As Arsenic 74,922	34 Se Selenium 78,960	35 Br Bromine 79,904	36 Kr Krypton 83,800
37 Rb Rubidium 85,468	38 Sr Strontium 87,620	39 Y Yttrium 88,906	40 Zr Zirconium 91,224	41 Nb Niobium 92,906	42 Mo Molybdenum 94,938	43 Tc Technetium 98,000	44 Ru Ruthenium 101,070	45 Rh Rhodium 102,906	46 Pd Palladium 106,420	47 Ag Silver 107,868	48 Cd Cadmium 112,411	49 In Indium 114,818	50 Sn Tin 118,710	51 Sb Antimony 121,760	52 Te Tellurium 127,600	53 I Iodine 126,905	54 Xe Xenon 131,293
55 Cs Cesium 132,906	56 Ba Barium 137,327	57 - 71 Lanthanides	72 Hf Hafnium 178,490	73 Ta Tantalum 180,948	74 W Tungsten 180,948	75 Re Rhenium 186,207	76 Os Osmium 190,230	77 Ir Iridium 192,217	78 Pt Platinum 195,078	79 Au Gold 196,967	80 Hg Mercury 200,590	81 Tl Thallium 204,383	82 Pb Lead 207,200	83 Bi Bismuth 208,980	84 Po Polonium 209,000	85 At Astatine 210,000	86 Rn Radon 222,000
87 Fr Francium 223,000	88 Ra Radium 226,000	89 - 103 Actinides	104 Rf Rutherfordium 261,000	105 Db Dubnium 262,000	106 Sg Seaborgium 266,000	107 Bh Bohrium 264,000	108 Hs Hassium 277,000	109 Mt Meitnerium 278,000	110 Ds Darmstadtium 281,000	111 Rg Roentgenium 282,000	112 Cn Copernicium 285,000	113 Nh Nihonium 286,000	114 Fl Flerovium 289,000	115 Mc Moscovium 290,000	116 Lv Livermorium 293,000	117 Ts Tennessine 294,000	118 Og Oganesson 294,000
57 La Lanthanum 138,906	58 Ce Cerium 140,116	59 Pr Praseodymium 140,908	60 Nd Neodymium 144,240	61 Pm Promethium 145,000	62 Sm Samarium 150,360	63 Eu Europium 151,964	64 Gd Gadolinium 157,250	65 Tb Terbium 158,925	66 Dy Dysprosium 162,500	67 Ho Holmium 164,930	68 Er Erbium 167,259	69 Tm Thulium 168,934	70 Yb Ytterbium 173,040	71 Lu Lutetium 174,967			
89 Ac Actinium 227,000	90 Th Thorium 232,038	91 Pa Protactinium 231,036	92 U Uranium 238,029	93 Np Neptunium 237,000	94 Pu Plutonium 244,000	95 Am Americium 243,000	96 Cm Curium 247,000	97 Bk Berkelium 247,000	98 Cf Californium 251,000	99 Es Einsteinium 252,000	100 Fm Fermium 257,000	101 Md Mendelevium 258,000	102 No Nobelium 259,000	103 Lr Lawrencium 262,000			

身の回りの元素はいかに作られたか？

1 H Hydrogen 1,008																	2 He Helium 4,003							
3 Li Lithium 6,941	4 Be Beryllium 9,012											5 B Boron 10,811	6 C Carbon 12,011	7 N Nitrogen 14,007	8 O Oxygen 15,999	9 F Fluorine 18,998	10 Ne Neon 20,180							
11 Na Sodium 22,990	12 Mg Magnesium 24,305											13 Al Aluminum 26,982	14 Si Silicon 28,086	15 P Phosphorus 30,974	16 S Sulfur 32,065	17 Cl Chlorine 35,453	18 Ar Argon 39,948							
19 K Potassium 39,098	20 Ca Calcium 40,078	21 Sc Scandium 44,956	22 Ti Titanium 47,867	23 V Vanadium 50,942	24 Cr Chromium 51,996	25 Mn Manganese 54,938	26 Fe Iron 55,845	27 Co Cobalt 58,933	28 Ni Nickel 58,693	29 Cu Copper 63,546	30 Zn Zinc 65,38	31 Ga Gallium 69,723	32 Ge Germanium 72,630	33 As Arsenic 74,922	34 Se Selenium 78,96	35 Br Bromine 79,904	36 Kr Krypton 83,80							
37 Rb Rubidium 85,468	38 Sr Strontium 87,620	39 Y Yttrium 88,906	40 Zr Zirconium 91,224	41 Nb Niobium 92,906	42 Mo Molybdenum 95,94	43 Tc Technetium 98,00	44 Ru Ruthenium 101,07	45 Rh Rhodium 102,90										51 Sb Antimony 121,75	52 Te Tellurium 127,60	53 I Iodine 126,90	54 Xe Xenon 131,29			
55 Cs Cesium 132,90	56 Ba Barium 137,32	57-71 Lanthanides	72 Hf Hafnium 178,49	73 Ta Tantalum 180,94	74 W Tungsten 180,94	75 Re Rhenium 186,20	76 Os Osmium 190,23	77 Ir Iridium 192,21										61 Pm Promethium 145,00	62 Sm Samarium 150,36	63 Eu Europium 151,96				
87 Fr Francium 223,00	88 Ra Radium 226,00	89-103 Actinides	104 Rf Rutherfordium 261,00	105 Db Dubnium 262,00	106 Sg Seaborgium 266,00	107 Bh Bohrium 264,00	108 Hs Hassium 277,00	109 Mt Meitnerium 278,00										89 Ac Actinium 227,00	90 Th Thorium 232,03	91 Pa Protactinium 231,03	92 U Uranium 238,02	93 Np Neptunium 237,00	94 Pu Plutonium 244,00	95 Am Americium 243,00



身の回りの元素はいかに作られたか？

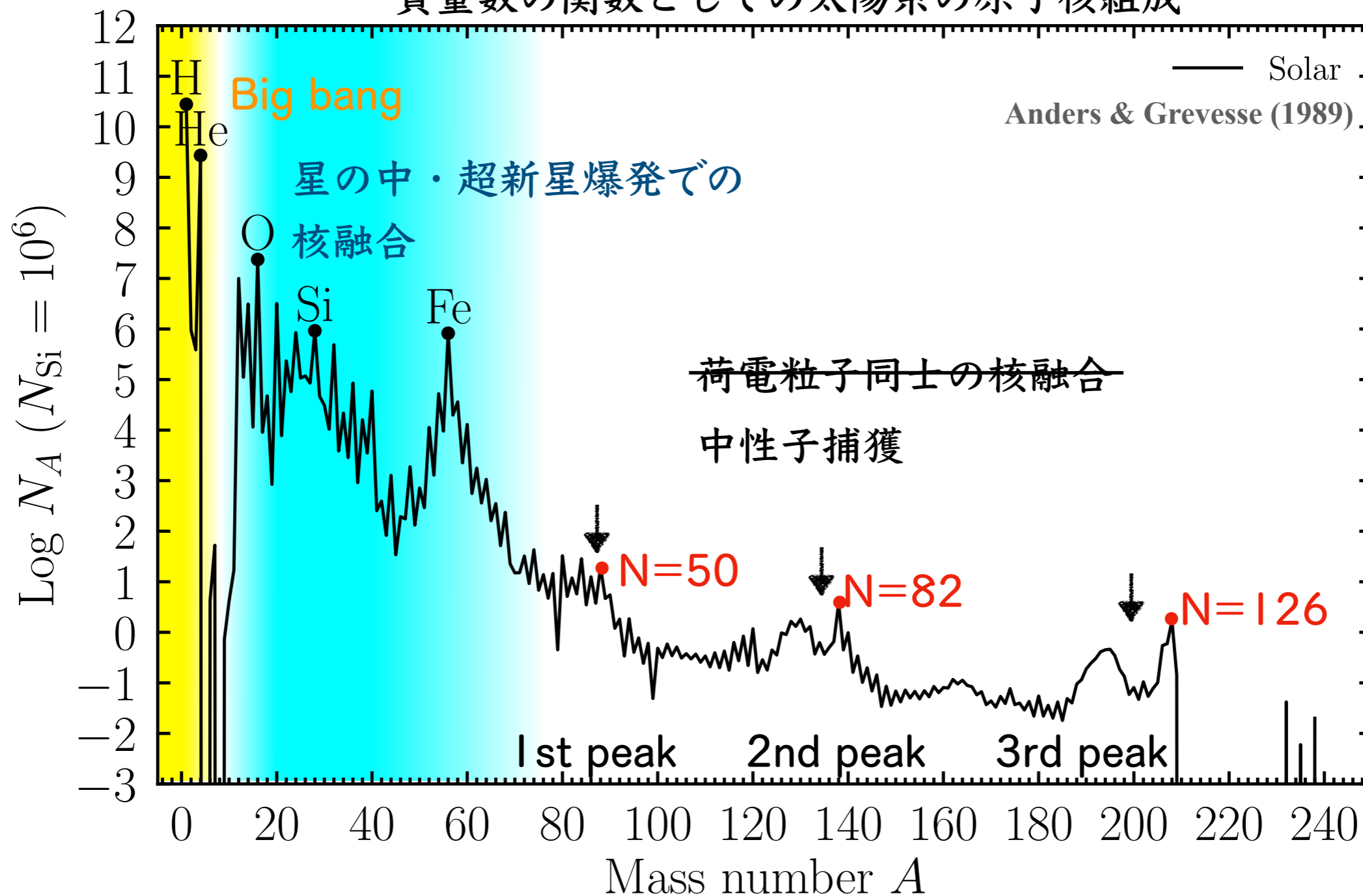
1 H Hydrogen 1,008																	2 He Helium 4,003
3 Li Lithium 6,941	4 Be Beryllium 9,012											5 B Boron 10,811	6 C Carbon 12,011	7 N Nitrogen 14,007	8 O Oxygen 15,999	9 F Fluorine 18,998	10 Ne Neon 20,180
11 Na Sodium 22,990	12 Mg Magnesium 24,305											13 Al Aluminum 26,982	14 Si Silicon 28,086	15 P Phosphorus 30,974	16 S Sulfur 32,065	17 Cl Chlorine 35,453	18 Ar Argon 39,948
19 K Potassium 39,098	20 Ca Calcium 40,078	21 Sc Scandium 44,956	22 Ti Titanium 47,867	23 V Vanadium 50,942	24 Cr Chromium 51,996	25 Mn Manganese 54,938	26 Fe Iron 55,845	27 Co Cobalt 58,933	28 Ni Nickel 58,693	29 Cu Copper 63,546	30 Zn Zinc 65,390	31 Ga Gallium 69,723	32 Ge Germanium 72,640	33 As Arsenic 74,922	34 Se Selenium 78,960	35 Br Bromine 79,904	36 Kr Krypton 83,800
37 Rb Rubidium 85,468	38 Sr Strontium 87,620	39 Y Yttrium 88,906	40 Zr Zirconium 91,224	41 Nb Niobium 92,906	42 Mo Molybdenum 95,938	43 Tc Technetium 98,906	44 Ru Ruthenium 101,07	45 Rh Rhodium 102,905	46 Pd Palladium 106,420	47 Ag Silver 107,868	48 Cd Cadmium 112,411	49 In Indium 114,818	50 Sn Tin 118,710	51 Sb Antimony 121,760	52 Te Tellurium 127,600	53 I Iodine 126,905	54 Xe Xenon 131,293
55 Cs Cesium 132,906	56 Ba Barium 137,327	57-71 Lanthanides	72 Hf Hafnium 178,490	73 Ta Tantalum 180,948	74 W Tungsten 180,948	75 Re Rhenium 186,207	76 Os Osmium 190,230	77 Ir Iridium 192,217	78 Pt Platinum 195,078	79 Au Gold 196,967	80 Hg Mercury 200,590	81 Tl Thallium 204,383	82 Pb Lead 207,200	83 Bi Bismuth 208,980	84 Po Polonium 209,000	85 At Astatine 210,000	86 Rn Radon 222,000
87 Fr Francium 223,000	88 Ra Radium 226,000	89-103 Actinides	104 Rf Rutherfordium 261,000	105 Db Dubnium 262,000	106 Sg Seaborgium 266,000	107 Bh Bohrium 264,000	108 Hs Hassium 277,000	109 Mt Meitnerium 278,000	110 Ds Darmstadtium 281,000	111 Rg Roentgenium 282,000	112 Cn Copernicium 285,000	113 Nh Nihonium 286,000	114 Fl Flerovium 289,000	115 Mc Moscovium 290,000	116 Lv Livermorium 293,000	117 Ts Tennessine 294,000	118 Og Oganesson 294,000
			57 La Lanthanum 138,906	58 Ce Cerium 140,116	59 Pr Praseodymium 140,908	60 Nd Neodymium 144,240	61 Pm Promethium 145,000	62 Sm Samarium 150,360	63 Eu Europium 151,964	64 Gd Gadolinium 157,250	65 Tb Terbium 158,925	66 Dy Dysprosium 162,500	67 Ho Holmium 164,930	68 Er Erbium 167,259	69 Tm Thulium 168,934	70 Yb Ytterbium 173,040	71 Lu Lutetium 174,967
			89 Ac Actinium 227,000	90 Th Thorium 232,038	91 Pa Protactinium 231,036	92 U Uranium 238,029	93 Np Neptunium 237,000	94 Pu Plutonium 244,000	95 Am Americium 243,000	96 Cm Curium 247,000	97 Bk Berkelium 247,000	98 Cf Californium 251,000	99 Es Einsteinium 252,000	100 Fm Fermium 257,000	101 Md Mendelevium 258,000	102 No Nobelium 259,000	103 Lr Lawrencium 262,000

プラチナ 金

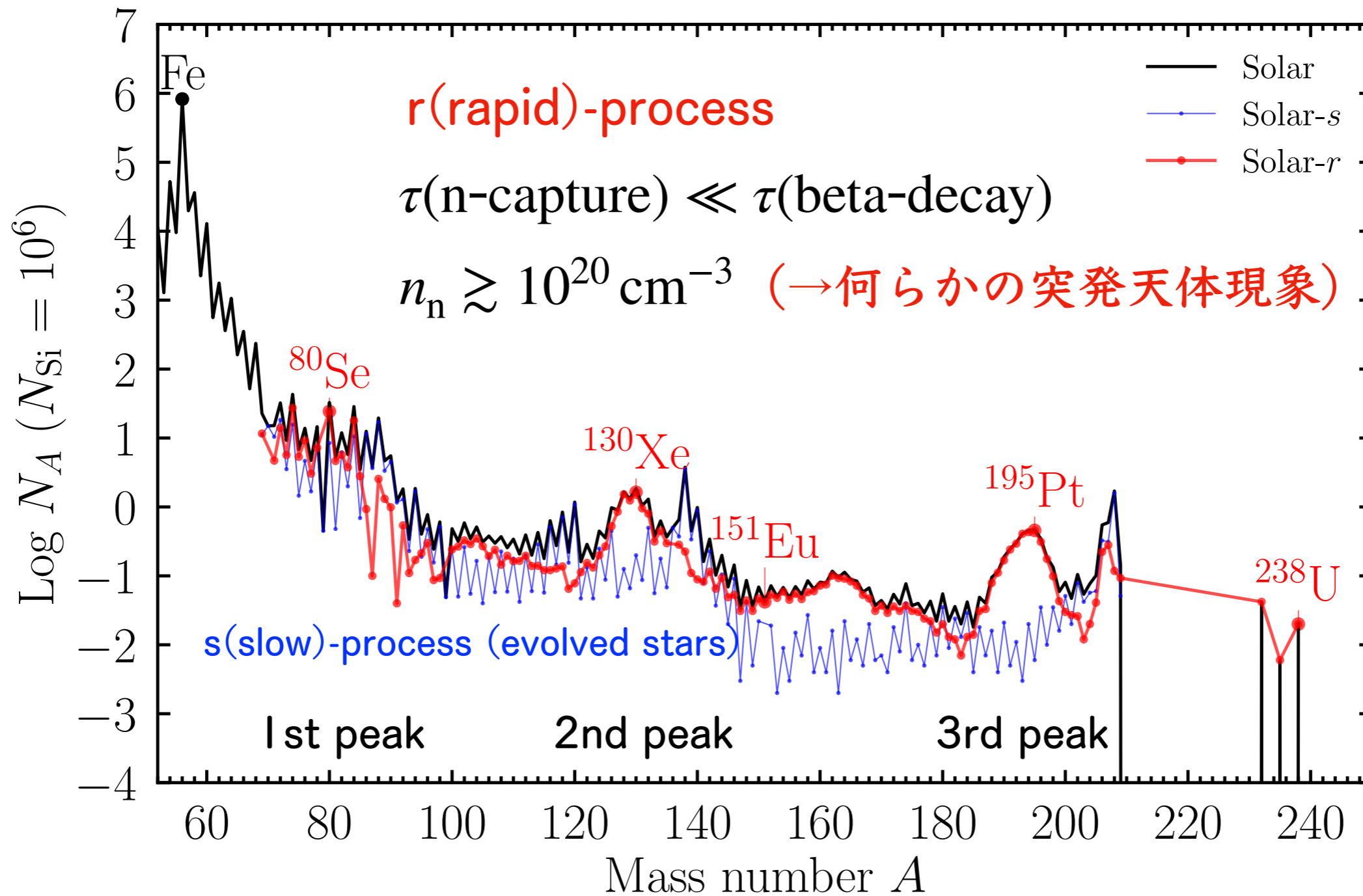
ウラン

ヒント：太陽系の元素組成

質量数の関数としての太陽系の原子核組成



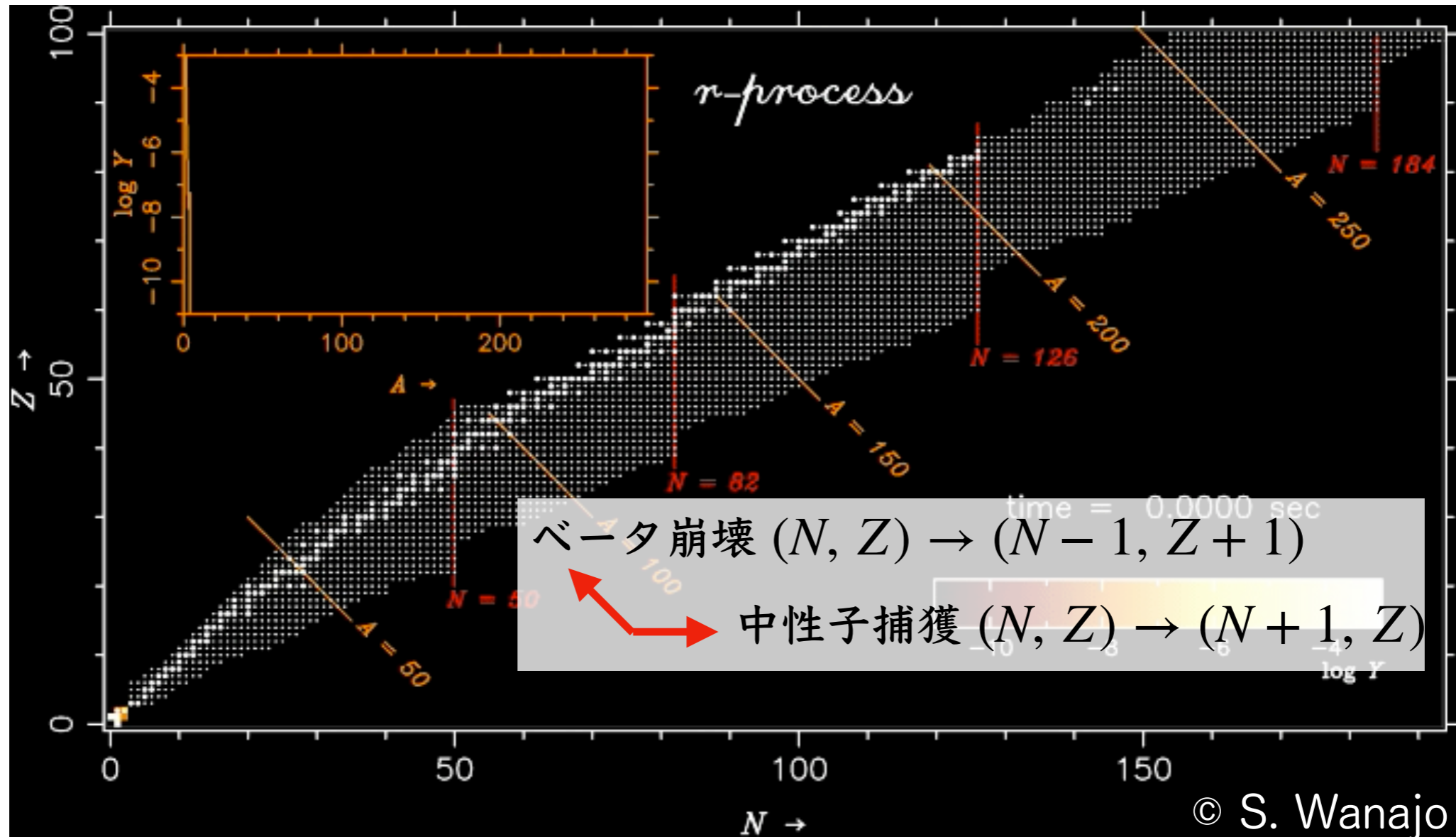
r-process



基礎理論ができてから60年ほど経つが、起源となる天体は未解明

r-process

核図表 (x軸：中性子数, y軸：陽子数) 白で安定核を示す”安定線”

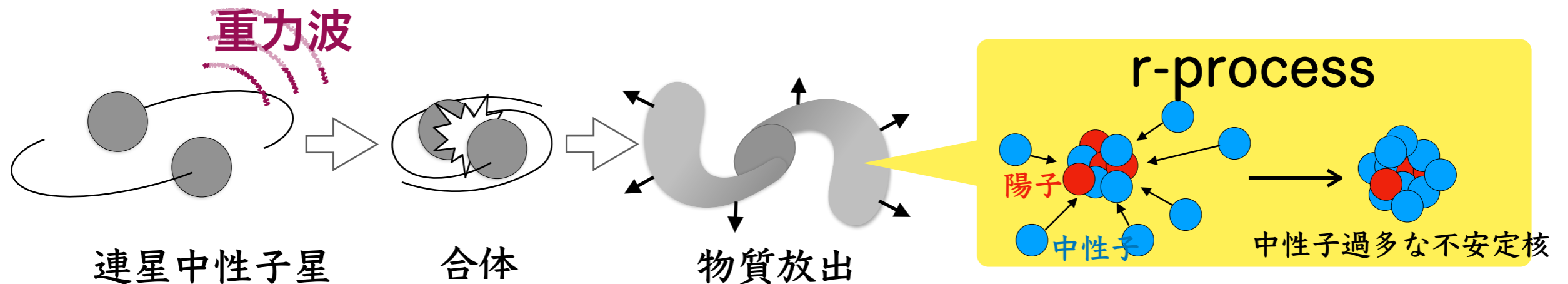


魔法数 (N=50, 82, 126) で安定化 \leftrightarrow ベータ崩壊しにくいので組成が集中する
その後崩壊してr-processのピーク形成

連星中性子星合体シナリオ

Lattimer & Schramm 74

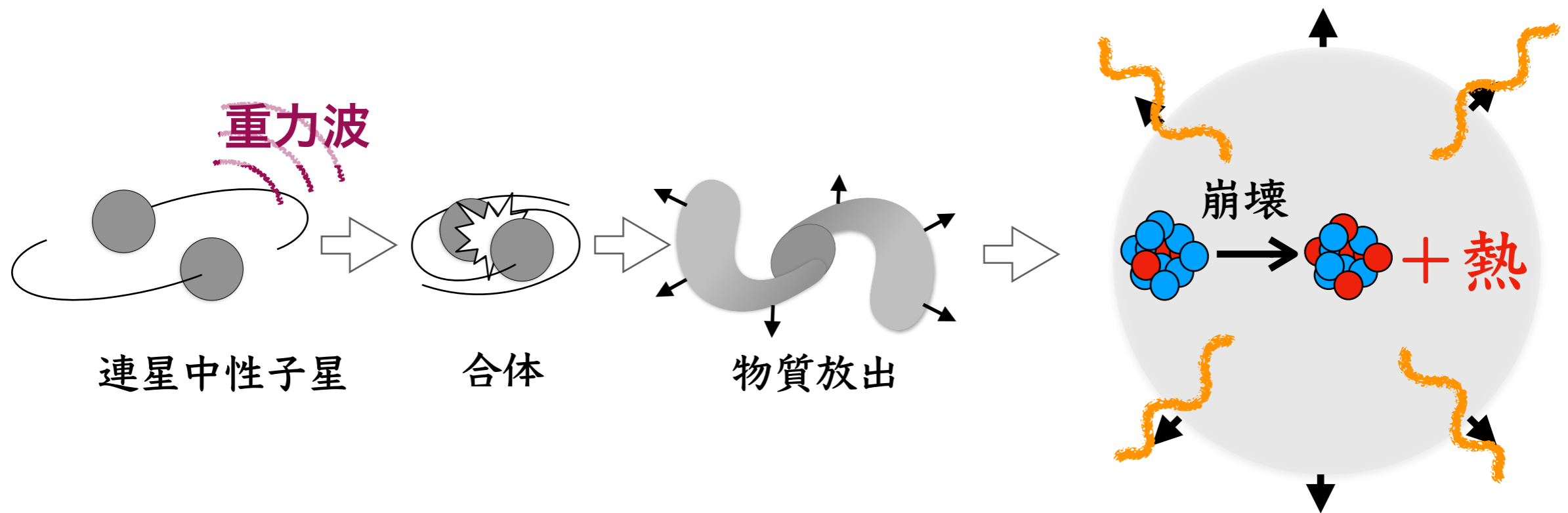
2つの中性子星から成る連星系が重力波放出で距離を縮め合体
多くの中性子から成る物質を撒き散らす



連星中性子星合体シナリオ

Li & Paczynski 98, Kulkarni 05, Metzger 08

2つの中性子星から成る連星系が重力波放出で距離を縮め合体
多くの中性子から成る物質を撒き散らす



合成された不安定核の崩壊熱で
電磁波放射が起こることが予言されてきた

電磁波放射
(kilonova)

Kilonova (及びI型超新星など) を特徴づけるもの

Li & Paczynski 98, Kulkarni 05, Metzger 08
cf. Arnett 82

$$\tau \simeq \rho \kappa R = \frac{3M\kappa}{4\pi R^2} \simeq 70 \left(\frac{M}{10^{-2}M_{\odot}} \right) \left(\frac{\kappa}{1 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}} \right) \left(\frac{v}{0.1c} \right)^{-2} \left(\frac{t}{1 \text{ day}} \right)^{-2}$$



$$R = vt$$

Kilonova（及びI型超新星など）を特徴づけるもの

Li & Paczynski 98, Kulkarni 05, Metzger 08
cf. Arnett 82

$$\tau \simeq \rho \kappa R = \frac{3M\kappa}{4\pi R^2} \simeq 70 \left(\frac{M}{10^{-2}M_{\odot}} \right) \left(\frac{\kappa}{1 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}} \right) \left(\frac{v}{0.1c} \right)^{-2} \left(\frac{t}{1 \text{ day}} \right)^{-2}$$

• 時間スケール

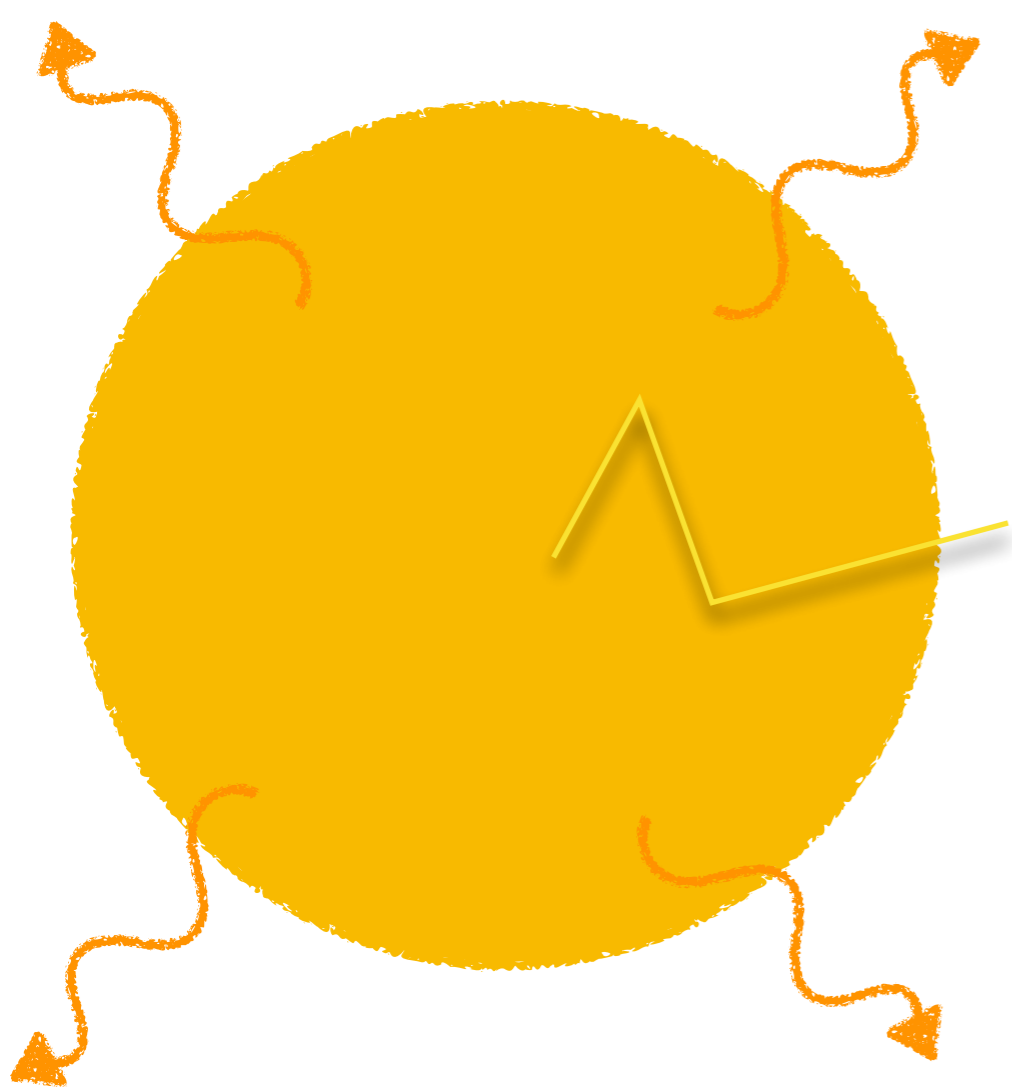
$$t_{\text{diff}} \sim \frac{R}{c} \tau = \frac{3M\kappa}{4\pi c R} \text{ と } t_{\text{dyn}} \sim \frac{R}{v} \text{ が同程度になると光度最大}$$

$$t_{\text{peak}} \approx 1.6 \text{ d} \left(\frac{M}{10^{-2}M_{\odot}} \right)^{1/2} \left(\frac{v}{0.1c} \right)^{-1/2} \left(\frac{\kappa}{1 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}} \right)^{1/2}$$

• 光度

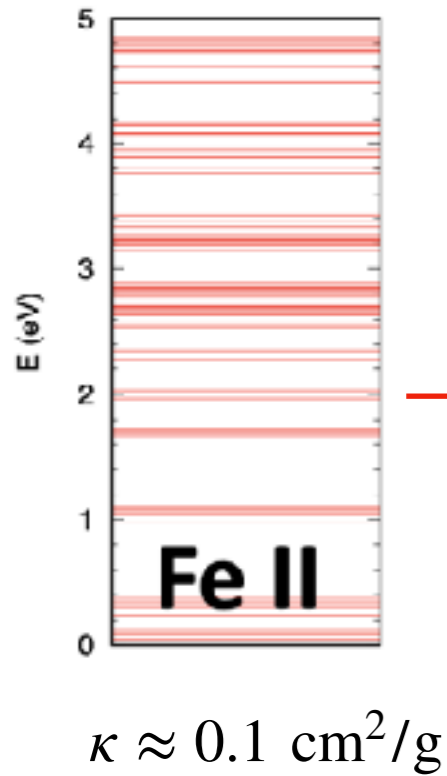
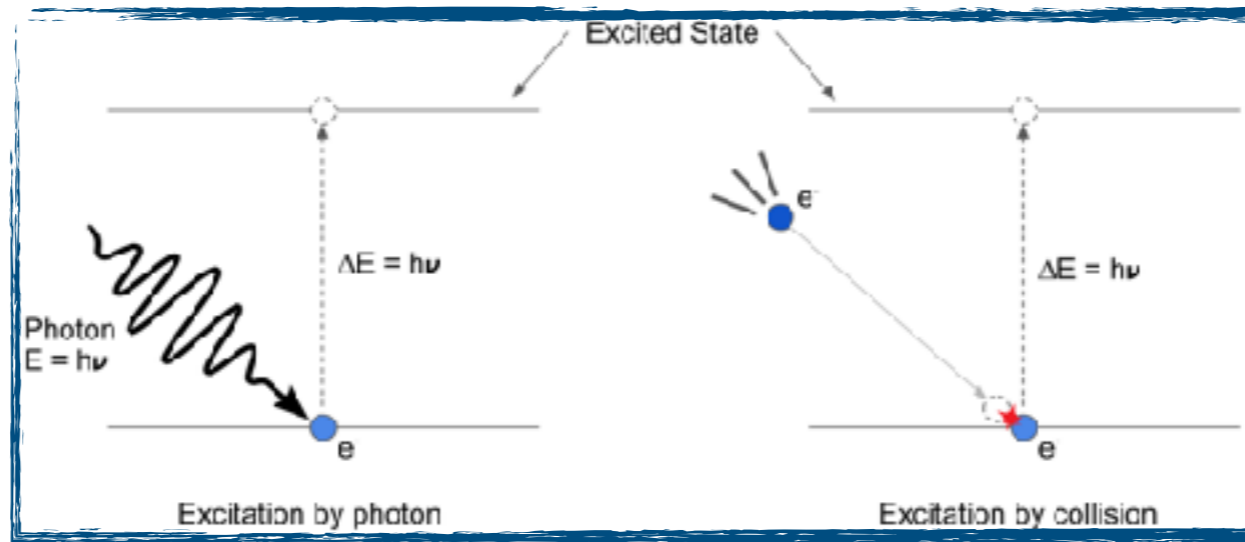
$$L_{\text{peak}} \approx \dot{Q}(t_{\text{peak}})$$

エジェクタの質量、速度、光学特性と加熱率(=組成)

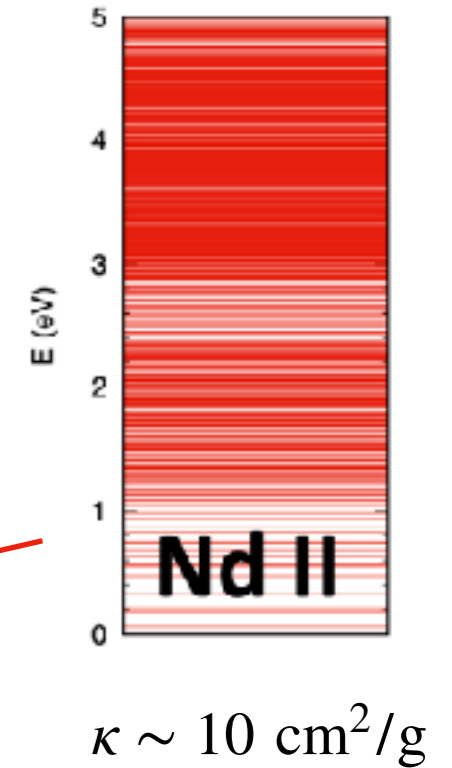


Opacity

束縛-束縛遷移



1 H Hydrogen 1,008																	18 He Helium 4,003
3 Li Lithium 6,941	4 Be Beryllium 9,012											5 B Boron 10,811	6 C Carbon 12,011	7 N Nitrogen 14,007	8 O Oxygen 15,999	9 F Fluorine 18,998	10 Ne Neon 20,180
11 Na Sodium 22,990	12 Mg Magnesium 24,305											13 Al Aluminum 26,982	14 Si Silicon 28,086	15 P Phosphorus 30,974	16 S Sulfur 32,065	17 Cl Chlorine 35,453	18 Ar Argon 39,948
19 K Potassium 39,098	20 Ca Calcium 40,078	21 Sc Scandium 44,956	22 Ti Titanium 47,867	23 V Vanadium 50,942	24 Cr Chromium 51,996	25 Mn Manganese 54,938	26 Fe Iron 55,845	27 Co Cobalt 58,933	28 Ni Nickel 58,693	29 Cu Copper 63,546	30 Zn Zinc 65,390	31 Ga Gallium 69,723	32 Ge Germanium 72,640	33 As Arsenic 74,922	34 Se Selenium 78,960	35 Br Bromine 79,904	36 Kr Krypton 83,800
37 Rb Rubidium 85,468	38 Sr Strontium 87,620	39 Y Yttrium 88,906	40 Zr Zirconium 91,224	41 Nb Niobium 92,906	42 Mo Molybdenum 94,938	43 Tc Technetium 98,000	44 Ru Ruthenium 101,070	45 Rh Rhodium 102,906	46 Pd Palladium 106,420	47 Ag Silver 107,868	48 Cd Cadmium 112,411	49 In Indium 114,818	50 Sn Tin 118,710	51 Sb Antimony 121,760	52 Te Tellurium 127,600	53 I Iodine 126,905	54 Xe Xenon 131,293
55 Cs Cesium 132,906	56 Ba Barium 137,327	57 La Lanthanum 138,906	58 Ce Cerium 140,116	59 Pr Praseodymium 140,908	60 Nd Neodymium 144,240	61 Pm Promethium 145,000	62 Sm Samarium 150,360	63 Eu Europium 151,964	64 Gd Gadolinium 157,250	65 Tb Terbium 158,925	66 Dy Dysprosium 162,500	67 Ho Holmium 164,930	68 Er Erbium 167,259	69 Tm Thulium 168,934	70 Yb Ytterbium 173,040	71 Lu Lutetium 174,967	
87 Fr Francium 223,000	88 Ra Radium 226,000	89-103 Actinides	104 Rf Rutherfordium 261,000	105 Db Dubnium 262,000	106 Sg Seaborgium 266,000	107 Bh Bohrium 264,000	108 Hs Hassium 277,000	109 Mt Meitnerium 278,000	110 Ds Darmstadtium 281,000	111 Rg Roentgenium 282,000	112 Cn Copernicium 285,000	113 Nh Nihonium 286,000	114 Fl Flerovium 289,000	115 Mc Moscovium 290,000	116 Lv Livermorium 293,000	117 Ts Tennessine 294,000	118 Og Oganesson 294,000

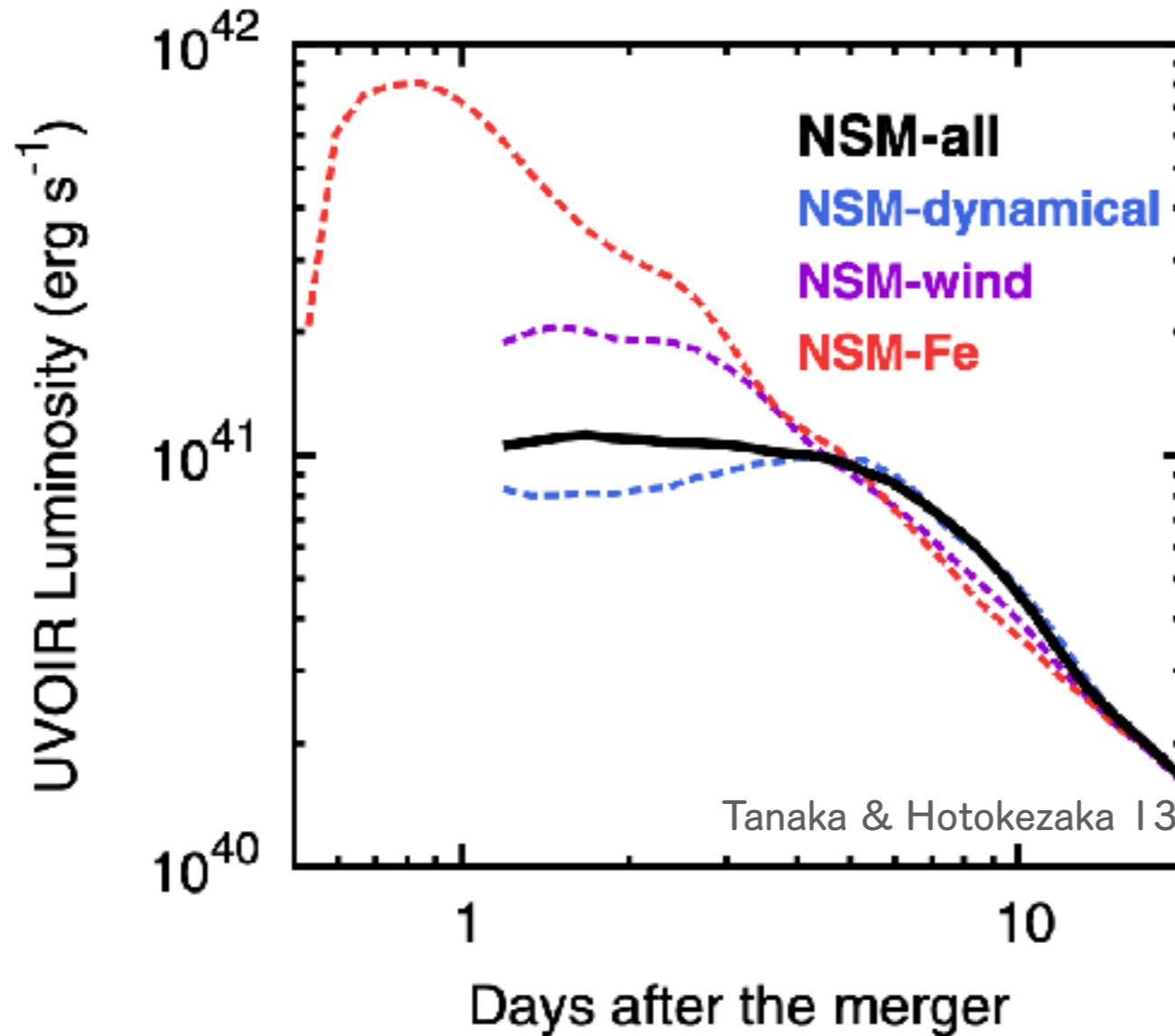


www.periodictable.co.za | Designed by Mia Viljoen

ランタノイド元素 (La-Lu) はとても大きいbound-bound opacityを持つ。

Adopted from M. Tanaka's slide

観測的特徴

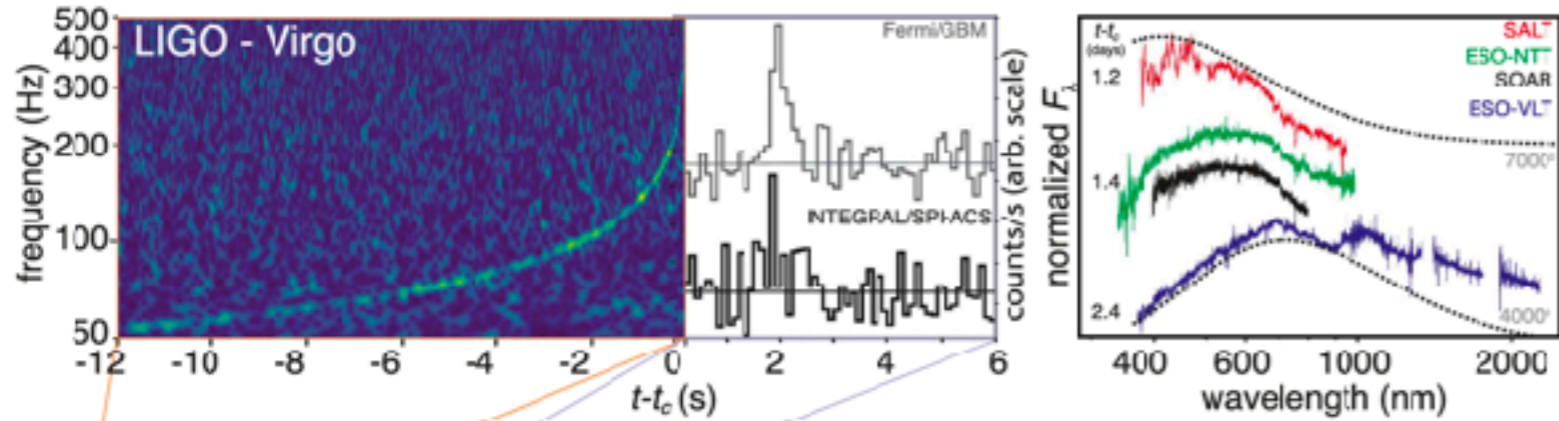


$$t_{\text{peak}} \approx \frac{6}{0.6} d \left(\frac{M_{\text{ej}}}{0.01 M_{\odot}} \right)^{1/2} \left(\frac{v_{\text{ej}}}{0.2c} \right)^{-1/2} \left(\frac{\kappa}{10 \cdot 0.1 \text{ cm}^2/\text{g}} \right)^{1/2}$$

Kilonovaは思っていたより暗く、時間スケールは長く、そして“赤い”のでは？

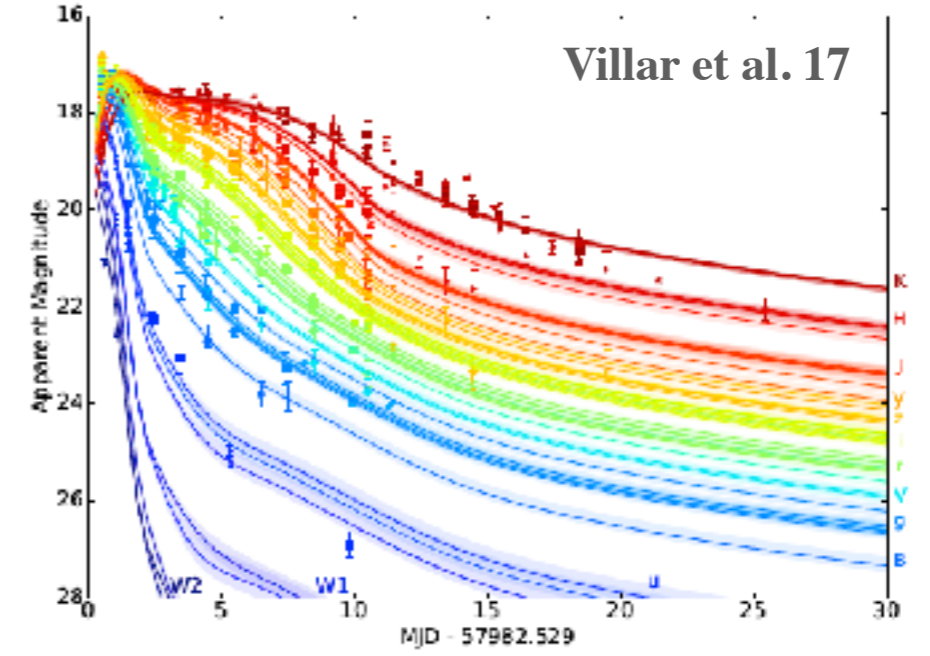
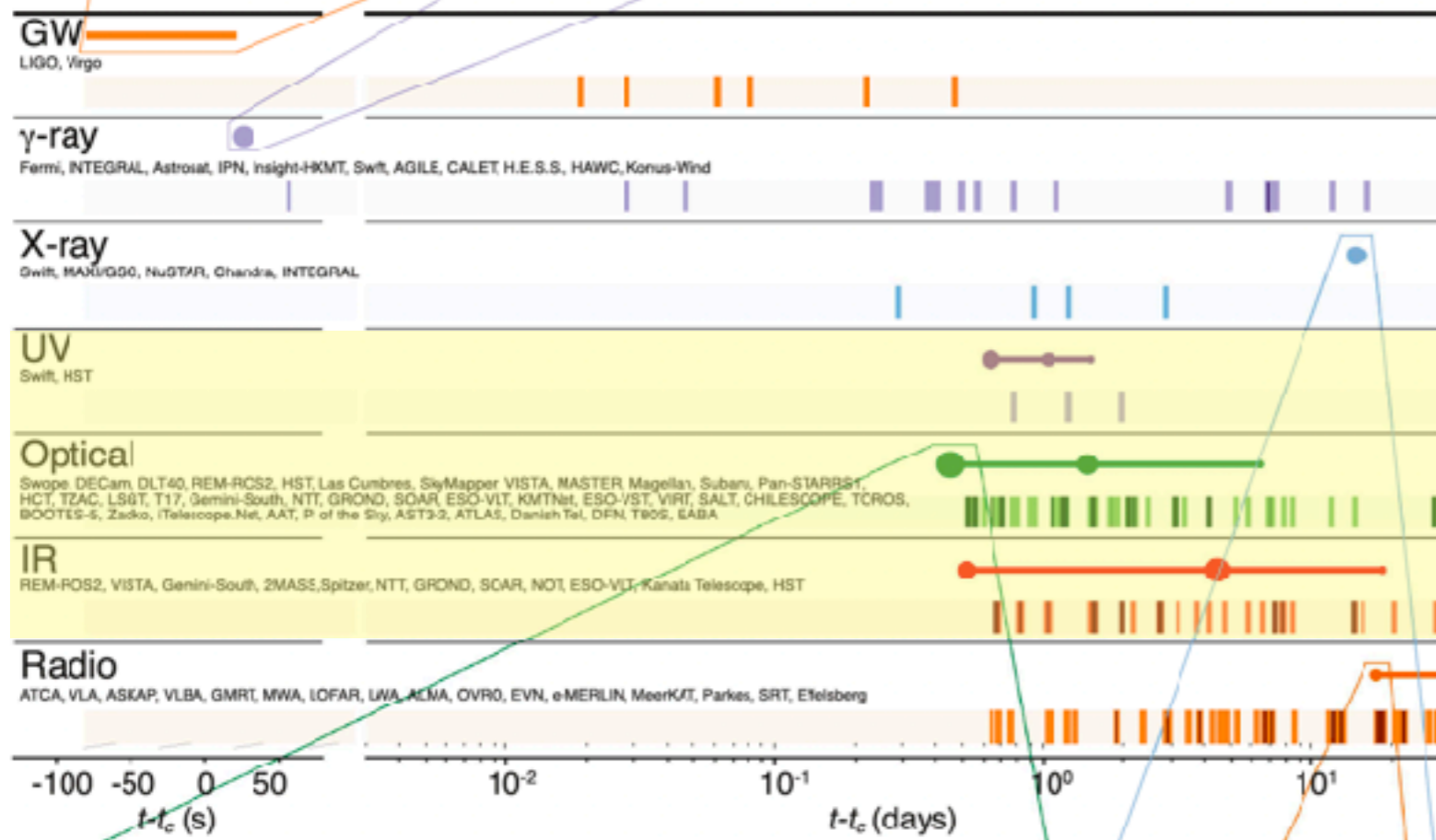
GW170817

Abbott+ 2017

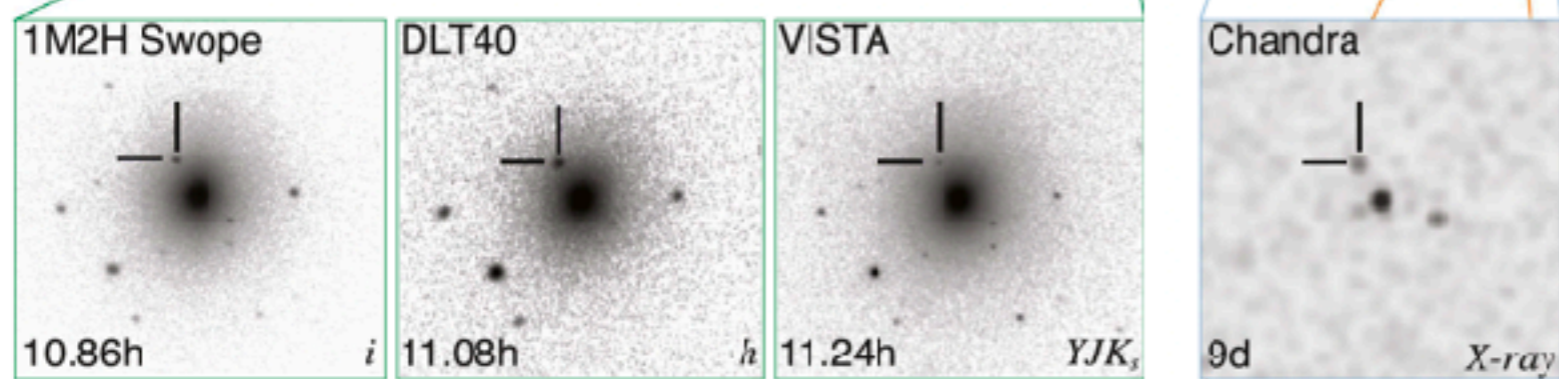


連星中性子星合体からの重力波の初検出

多彩な波長の電磁波観測も行われた



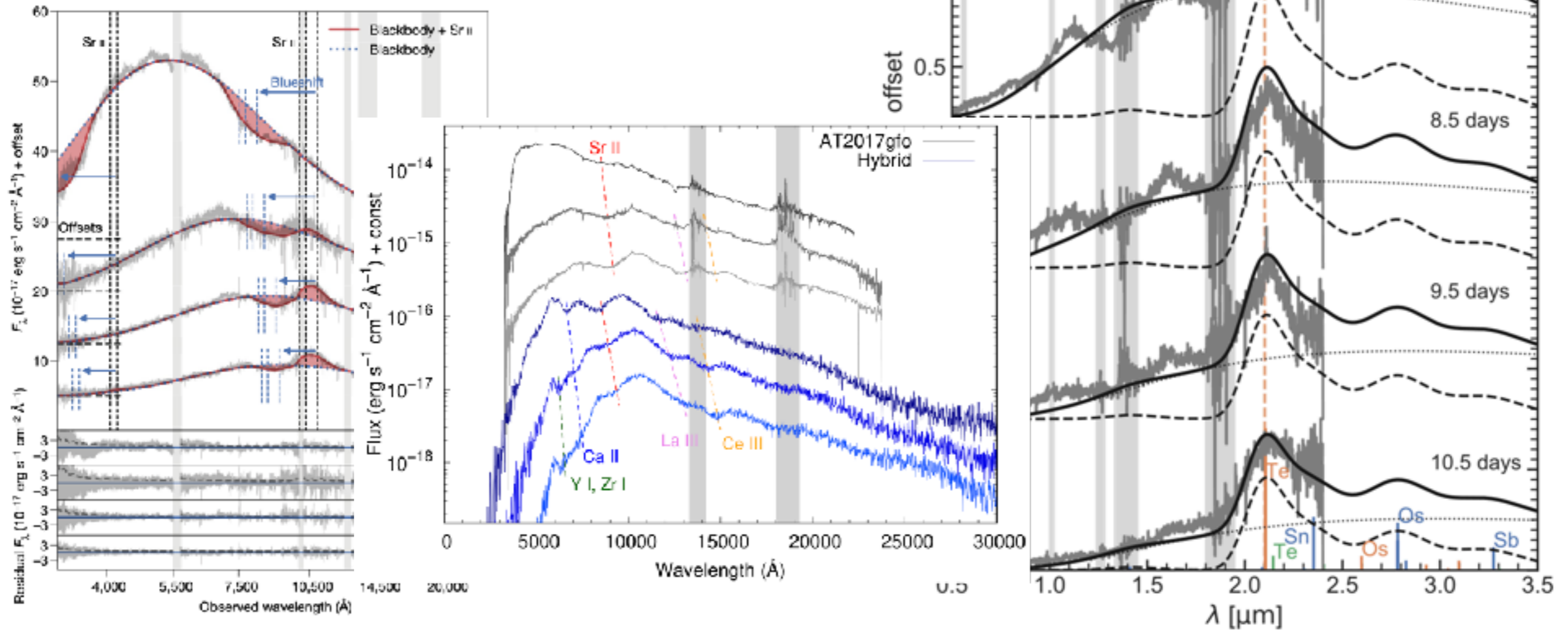
可視光周辺の電磁波放射は概ね理論予測とコンシステント
連星中性子星合体でr-processが起きるのはほぼ確定



元素の同定

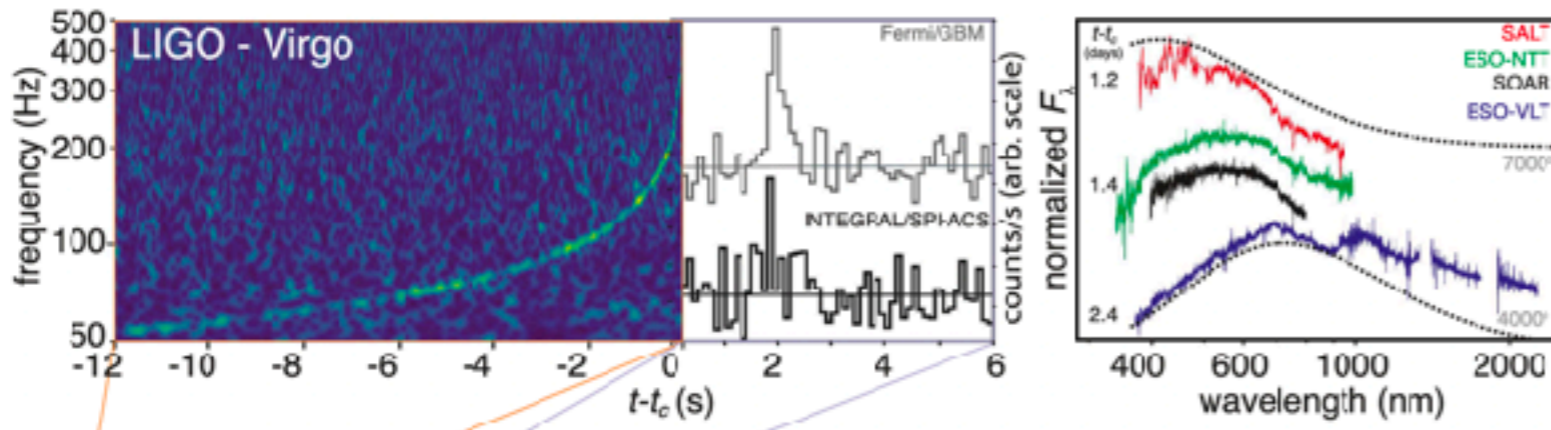
Claimed identification of elements :

ストロンチウム (He?), イットリウム、ランタン、セリウム、テルル



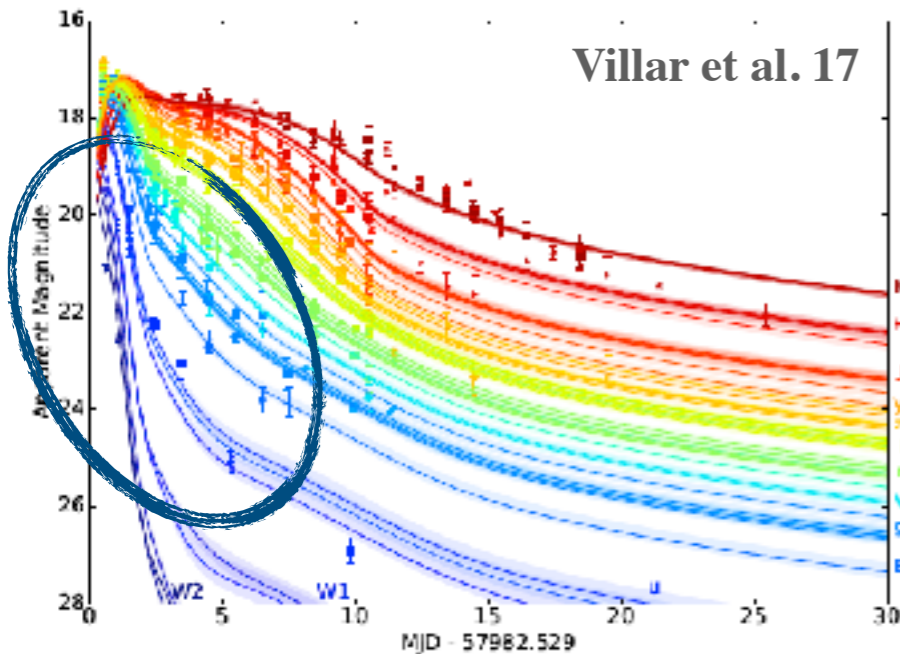
分かっていない所

Abbott+ 2017



- 何がGRBを駆動するのか
BH or 磁化した中性子星？
 - いつBHが形成したか？
→中性子星の状態方程式への制限
- [Next generation GW detector]

Villar et al. 17



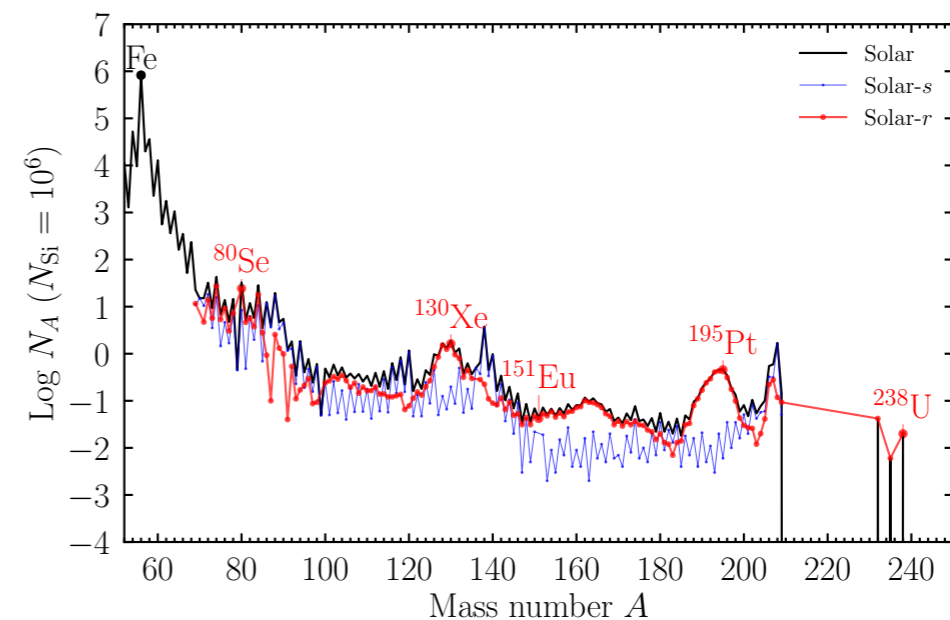
思ったより初期に”青い”

- 低オパシティ, 高速の成分？
 - 多次元効果？
- 合体・合体後のダイナミクスへの制限

[Next events, more sophisticated modeling]

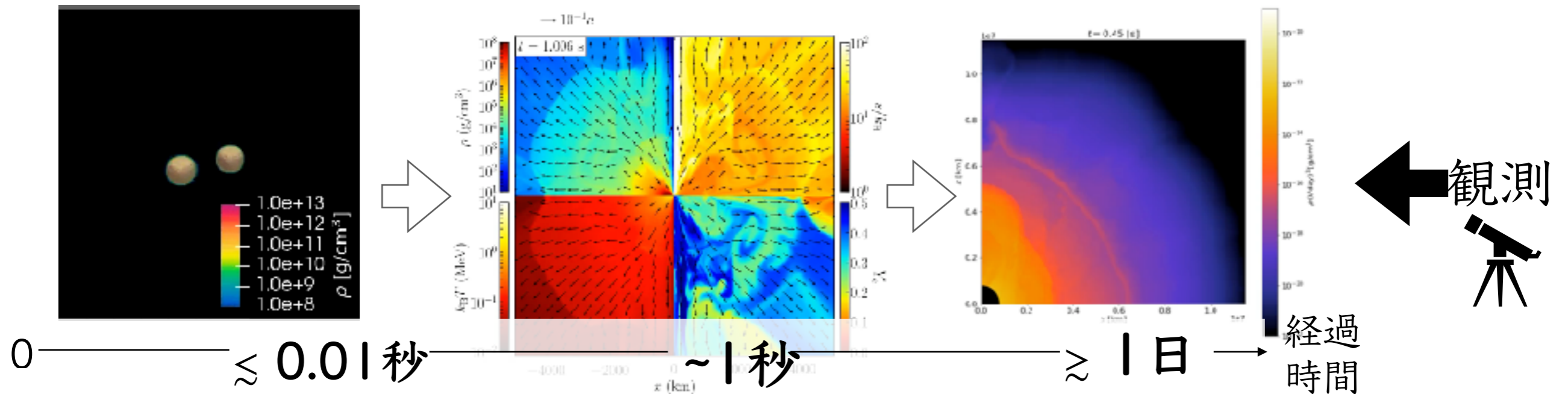
結局どのくらいのr-process元素が
 どういう組成で出来たか
 (宇宙のr-process元素に寄与するのか?)

[Next events]



連星中性子星合体の 数値モデリング

数値モデリングの役割



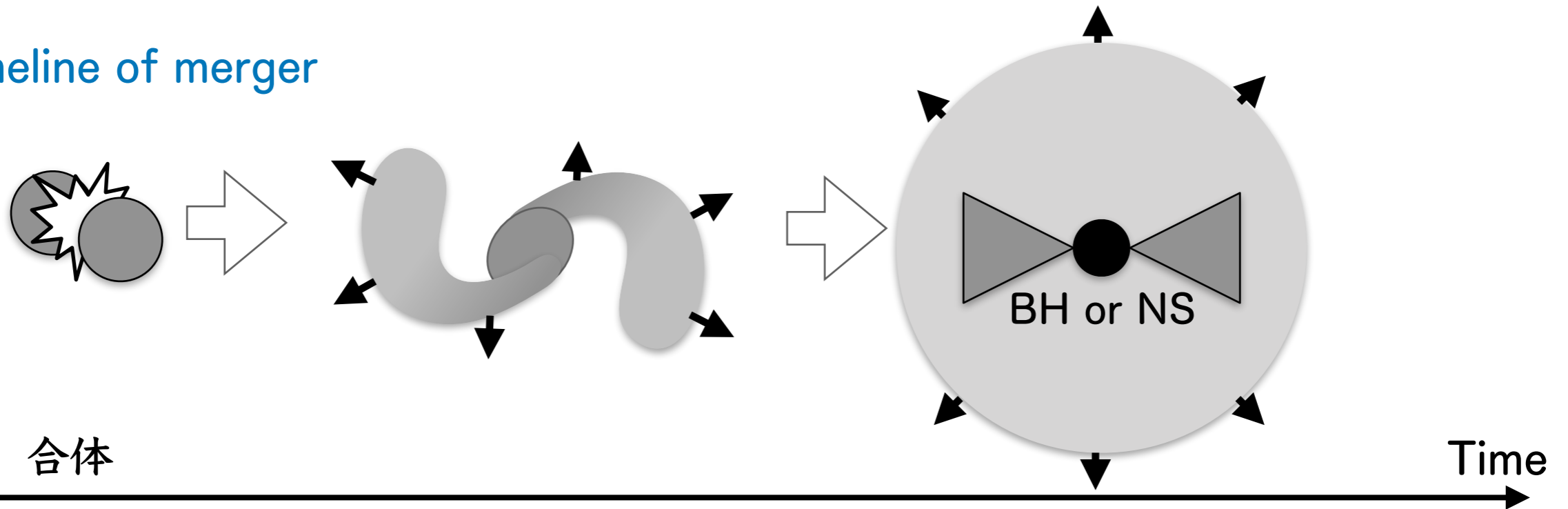
合体と質量放出自体は10秒もあれば終わるプロセス

\leftrightarrow 観測は \sim 1日ほどから & 合体の中身 (ブラックホール付近) は見通せない
これだけではどういう連星が合体したのかわからない

連星を初期条件とした数値シミュレーションでkilonovaを”予言”
観測と比較して、系の情報を引き出す

合体での質量放出過程

Timeline of merger



合体

0

~10 ms

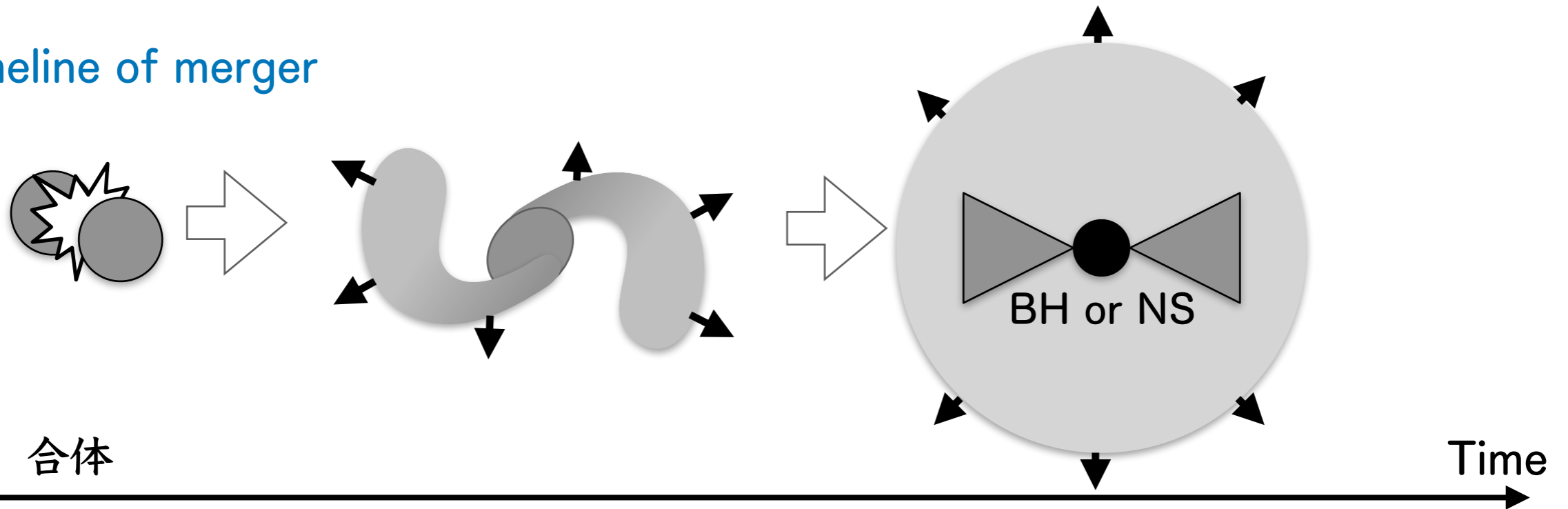
~1 s

Dynamical mass ejection

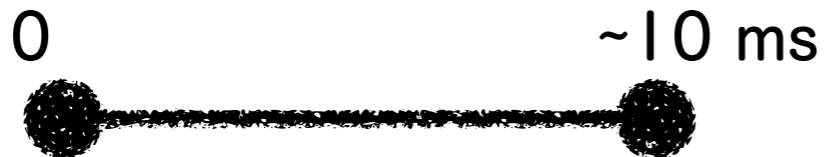
(潮汐力・衝撃波加熱) ~ 10 ms

合体での質量放出過程

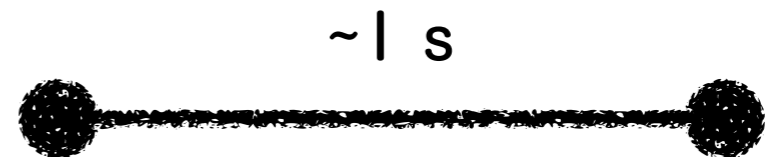
Timeline of merger



合体



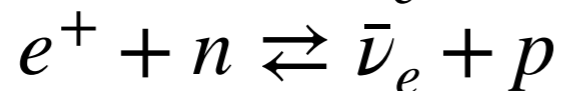
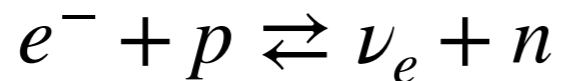
Dynamical mass ejection



Post-merger mass ejection
(with 磁場/粘性) ~ seconds

合体後の系 . . .

- 高温 → 弱い相互作用が重要となる



$$t_{\text{weak}} \sim 1 \text{ ms} \left(\frac{kT}{5 \text{ MeV}} \right)^{-5} \sim \text{系の力学時間}$$

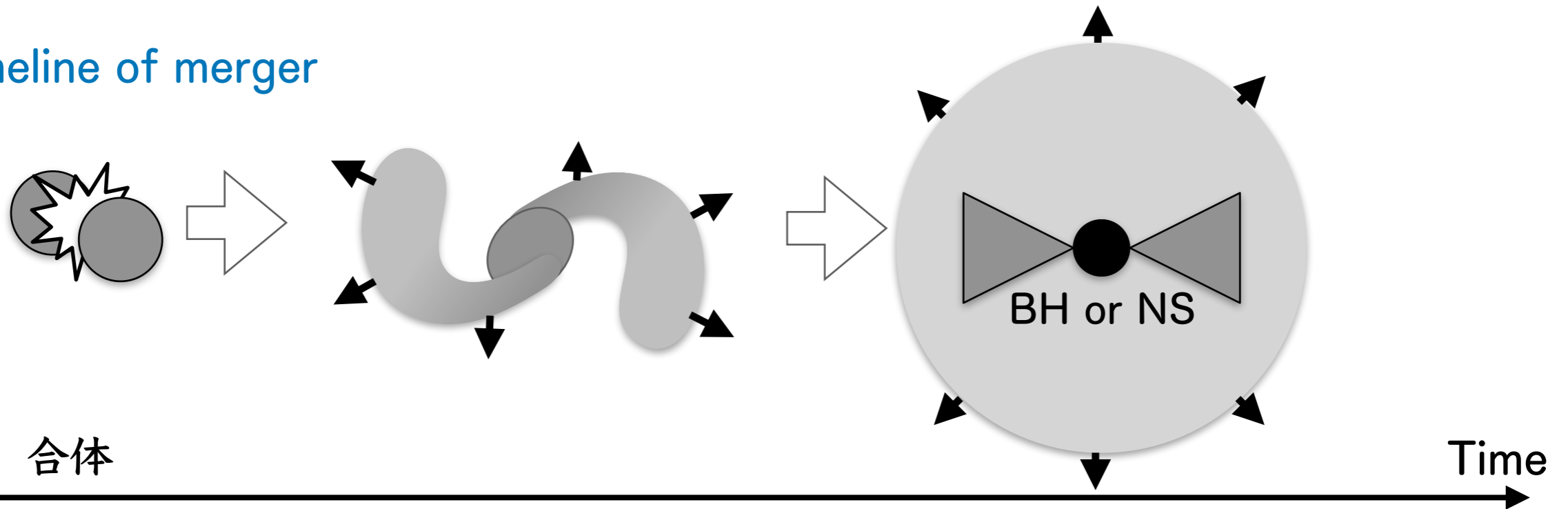
(e.g., ケプラー時間)

- ニュートリノ冷却：系の時間進化
- 中性子の割合 ↔ 合成される元素を決める

$$t_{\text{weak}} = \frac{1}{n\sigma v} \quad \begin{array}{l} n_e \propto T^3 \\ \sigma \propto T^2 \\ v \sim c \end{array}$$

合体での質量放出過程

Timeline of merger



合体

0

~10 ms

~1 s

Dynamical mass ejection

Post-merger mass ejection
(with 磁場/粘性) ~ seconds

合体後の系 . . .

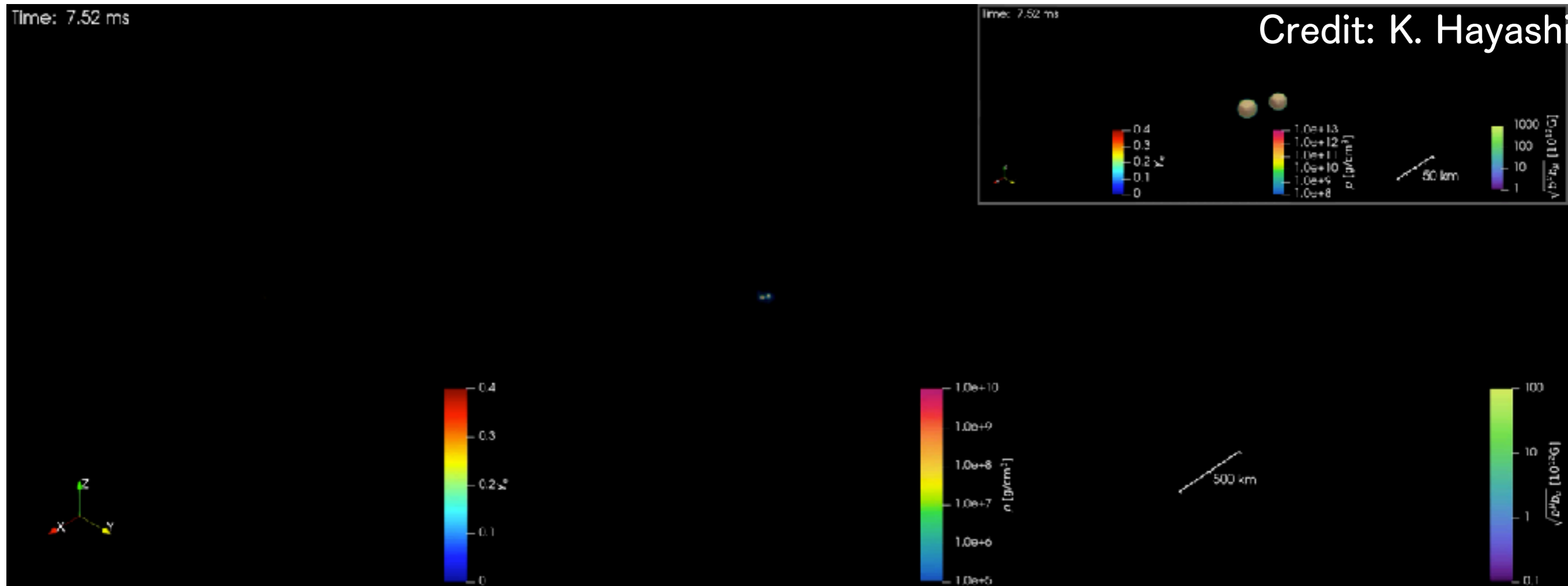
- MHD不安定によって磁場が成長
- 特に円盤内の磁気回転不安定 (MRI) → 乱流 → 実効的な粘性
- 粘性による角運動量輸送・加熱 → 質量放出

$$t_{\text{vis}} \sim 1 \text{ s} \left(\frac{\alpha_{\text{vis}}}{0.03} \right)^{-1} \left(\frac{R_{\text{disk}}}{50 \text{ km}} \right)^{3/2} \left(\frac{M_*}{3M_{\odot}} \right)^{1/2} \left(\frac{3H_{\text{scale}}}{R_{\text{disk}}} \right)^{-2} \quad (\text{assuming standard disk})$$

- 大スケールの磁場による質量放出も

合体での質量放出過程（最近の3Dシミュレーションから）

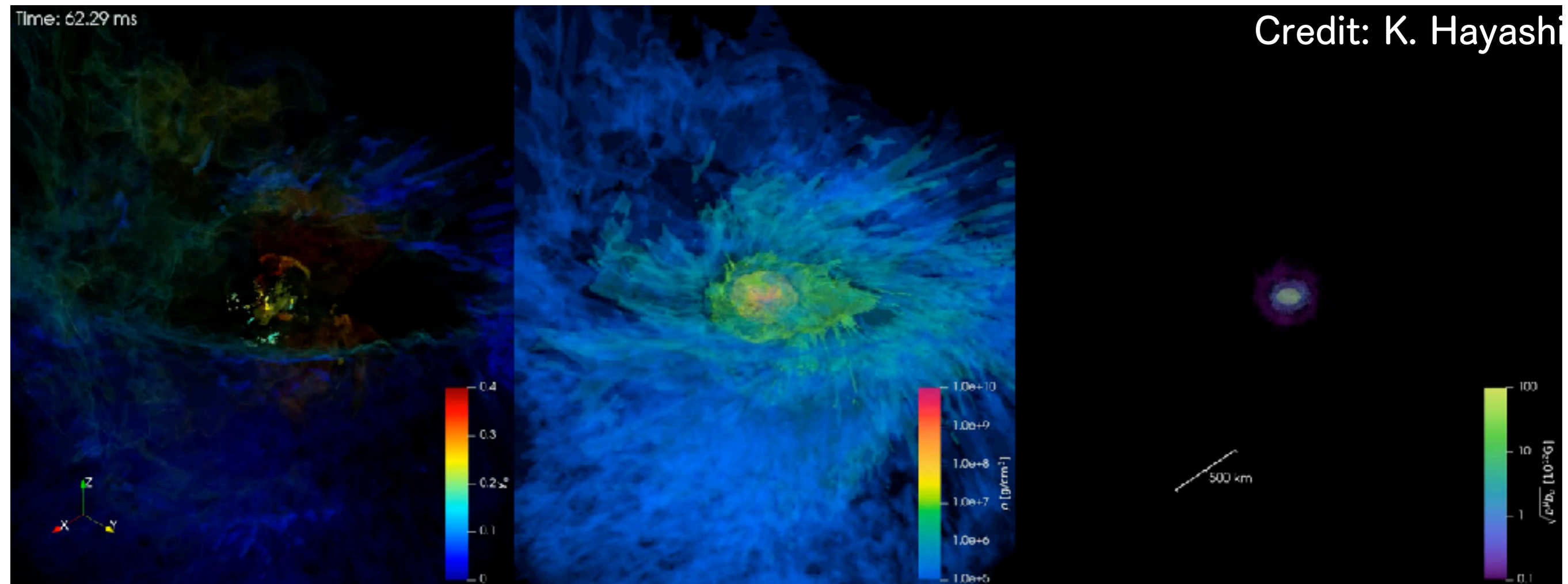
Full GR ν RMHD simulation of a binary neutron star merger
from 15 ms before to 1.1 s after the merger (Kiuchi, SF, et al. 2023)



Dynamical mass ejection
(tidal force, shock heating) \sim 10 ms

→ Disk formation

合体での質量放出過程（最近の3Dシミュレーションから）



Post-merger mass ejection
(with 磁場/粘性) ~ seconds

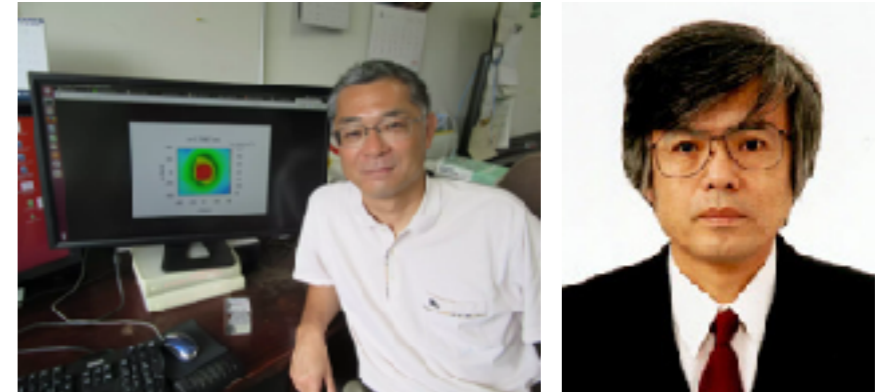
方程式系

- アインシュタイン方程式

BSSN formalism

Nakamura & Shibata 95
Baumgarte & Shapiro 99

$$G_{ab} = 8\pi T_{ab}$$



- ニュートリノの輸送方程式

Sekiguchi 15 Thorne 81, Shibata et al. 11

$$p^\mu \frac{\partial f}{\partial x^\mu} + \frac{dp^i}{d\tau} \frac{\partial f}{\partial p^i} = \left(\frac{\delta f}{\delta \tau} \right)_{\text{col}}$$

- 磁気流体 / 理想流体 / 粘性流体 方程式

$$\nabla_\mu T^\mu{}_\nu = 0 \quad \nabla_\mu F^{\mu\nu} = -4\pi j^\nu,$$

$$\nabla_\mu {}^*F^{\mu\nu} = 0.$$

いくつかは近似的に解く

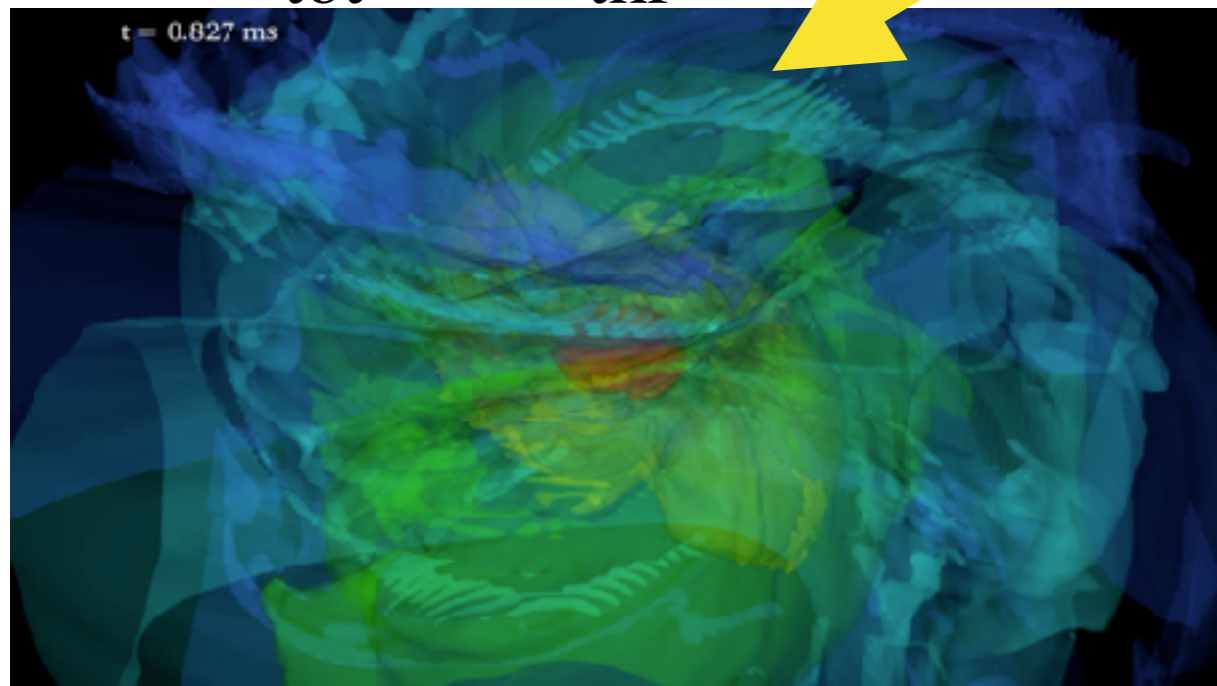
合体後の系の進化

中性子星の
(原子核より高密度な)
物質の性質は理論的に未知

様々な状態方程式 (EOS)
が提案されている

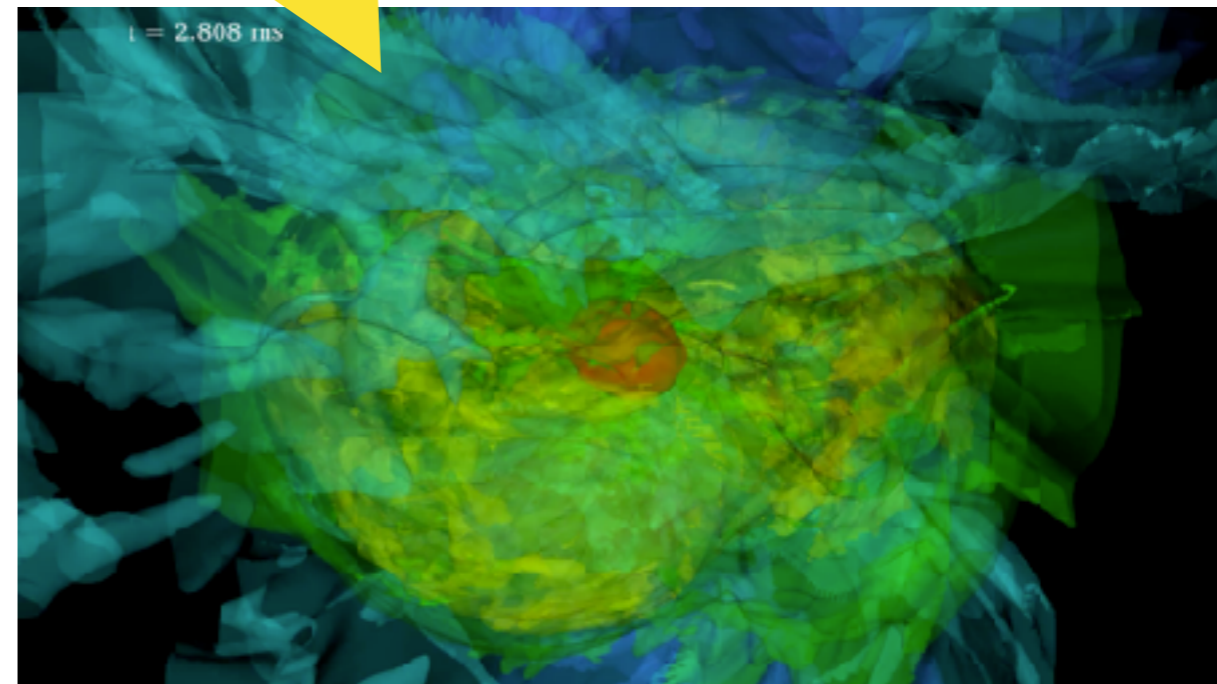


$$M_{\text{tot}} < M_{\text{thr}} (\text{given EOS})$$



long-lived massive NS

$$M_{\text{tot}} > M_{\text{thr}}$$



BH formation

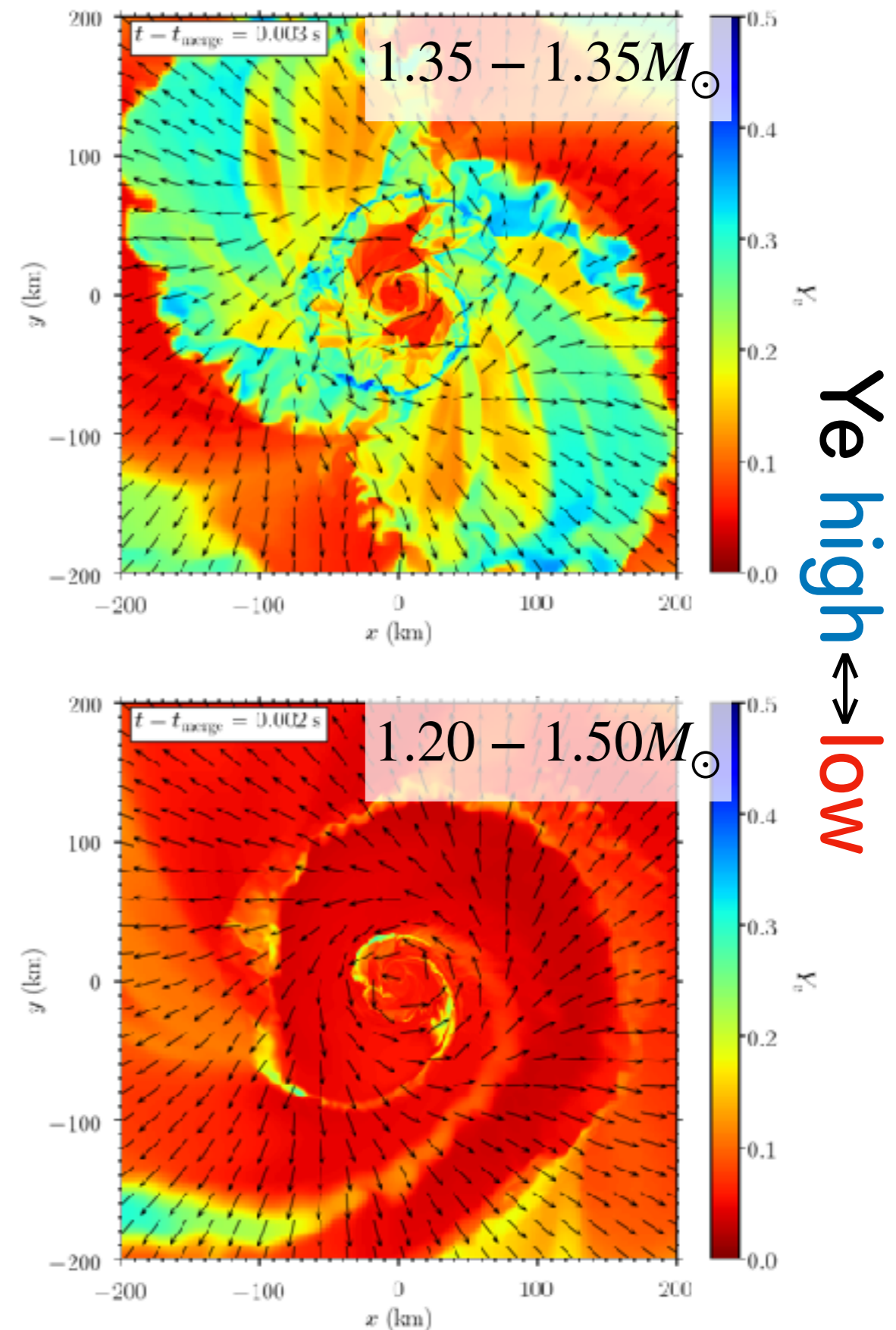
Dynamical ejectaの質量比依存性

SFHo EOS, 連星総質量 $2.7 - 2.8M_{\odot}$

連星質量比が異なる

合体後、大質量中性子星は $\sim 10-20$ ms程度でブラックホールに崩壊する

連星の回転面でのYe分布



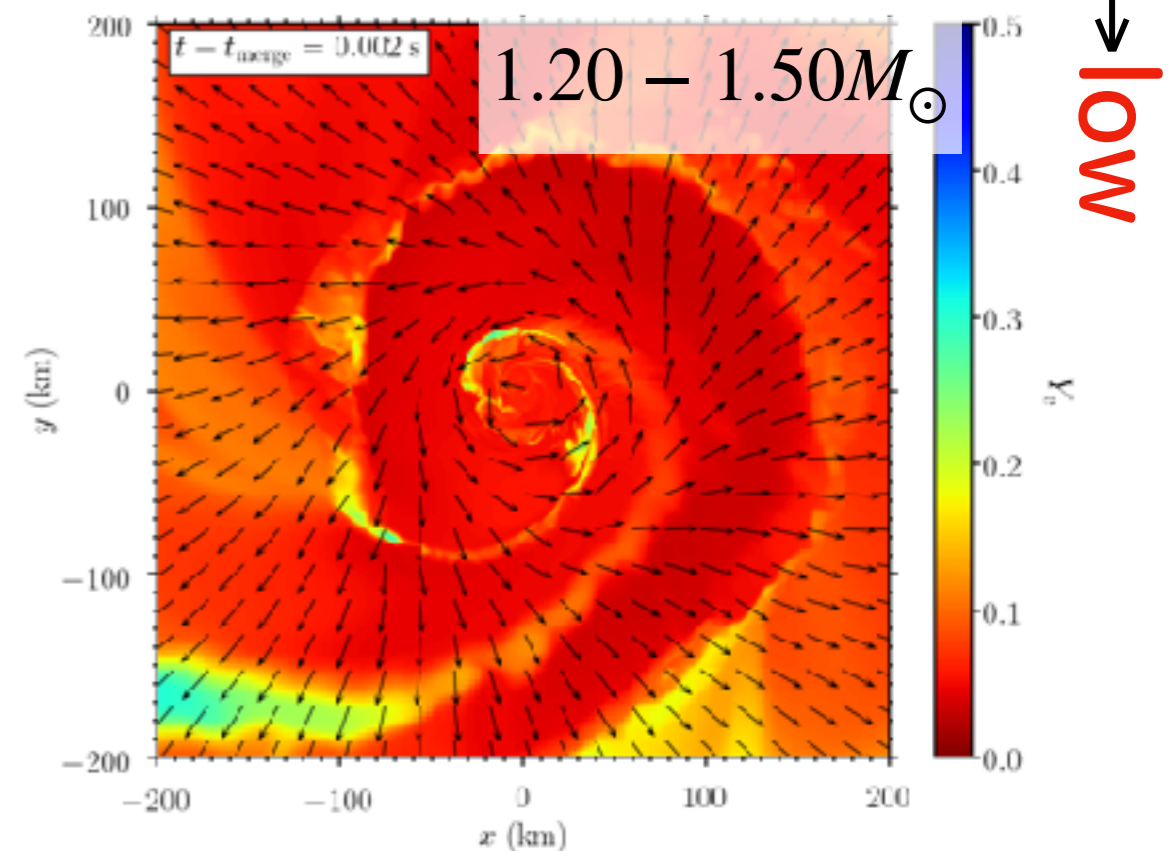
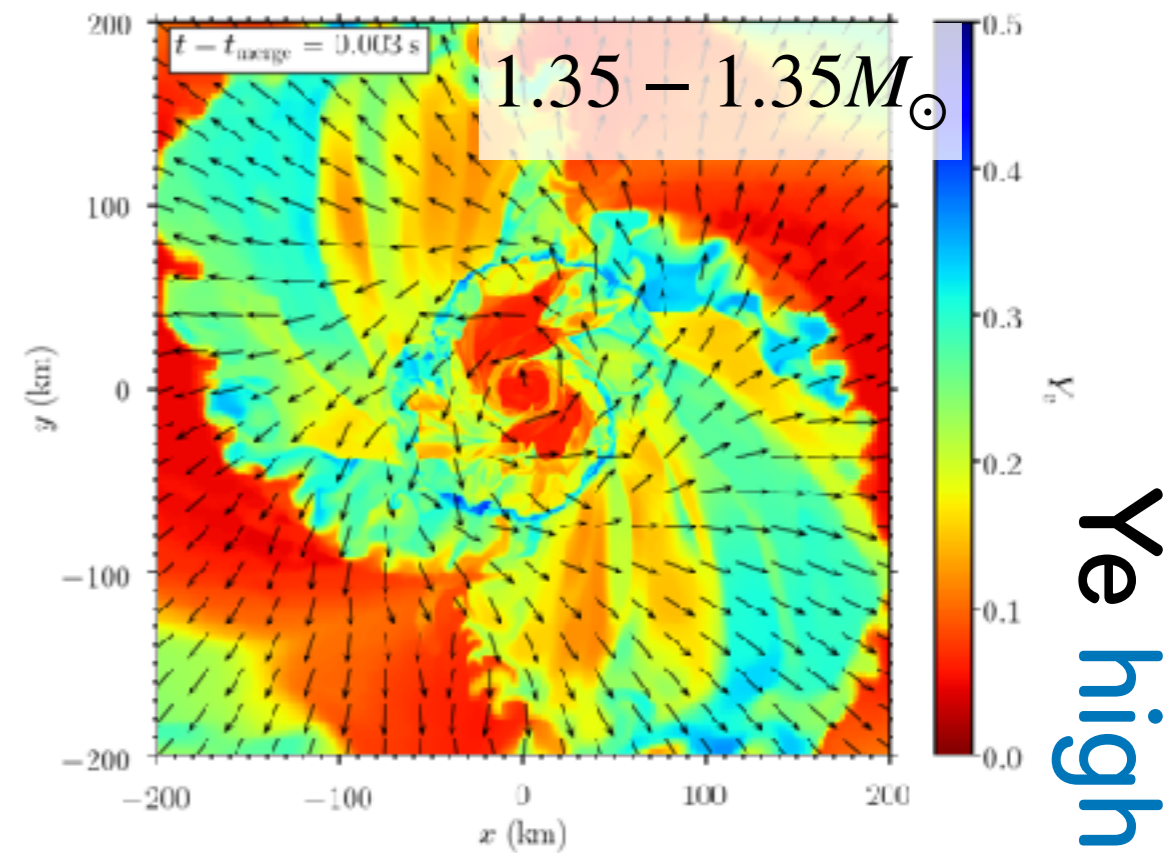
Dynamical ejectaの質量比依存性

エジェクタの中性子の割合

Electron fraction

$$Y_e := \frac{n_e}{n_B} = 1 - \frac{n_n}{n_B}$$

連星の回転面でのYe分布

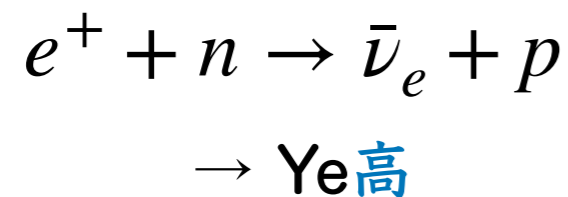


Dynamical ejectaの質量比依存性

エジェクタの中性子の割合

- 等質量：主に衝撃波による質量放出

衝撃波によって高温かつ低電子縮退度を経験
陽電子(e^+)が存在できる



- 非等質量：潮汐力が効く

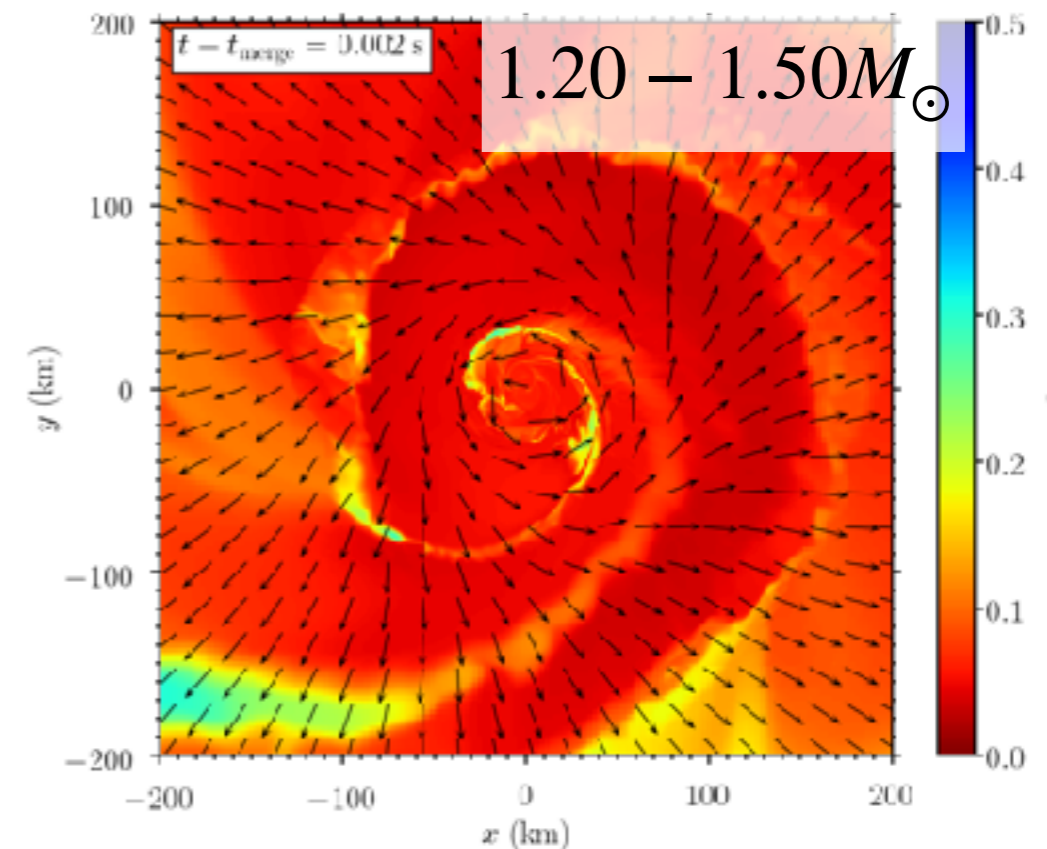
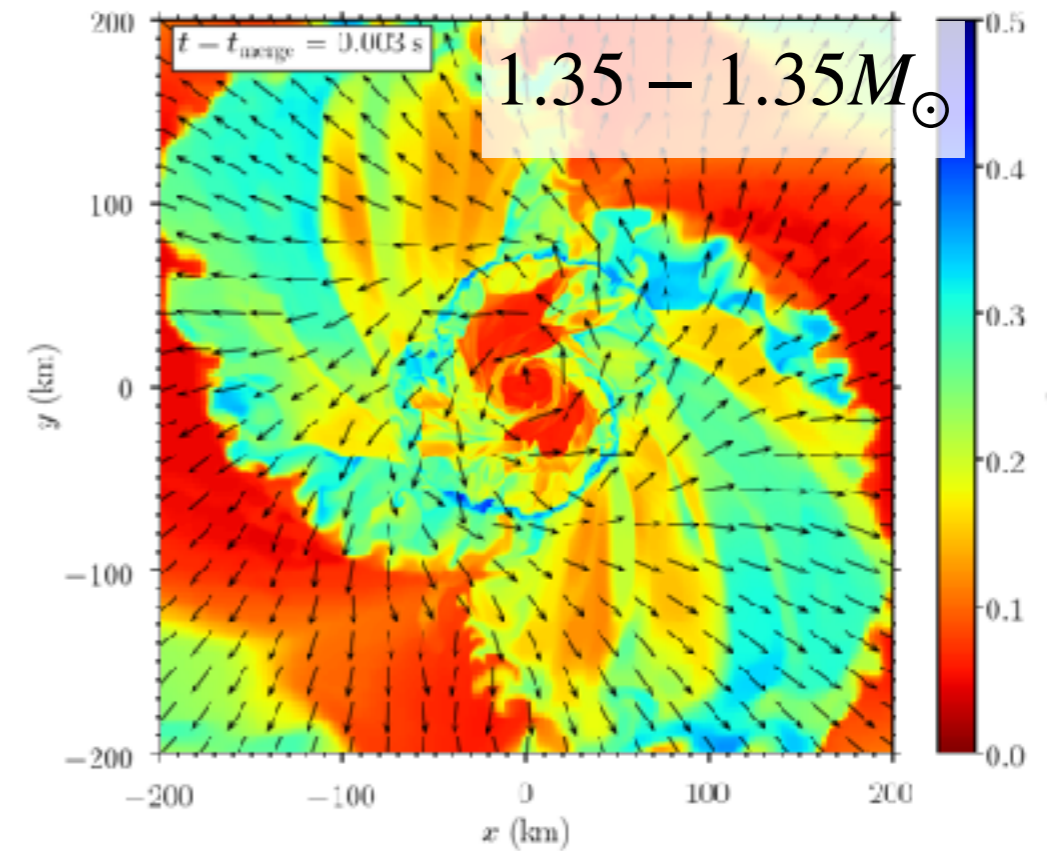
衝撃波の影響が弱く、高い縮退度を維持
弱い相互作用の影響が弱い

→ Ye低

(極端には元々中性子星が持っていたYeが出てくる)

(極限→ブラックホールー中性子星合体)

連星の回転面でのYe分布

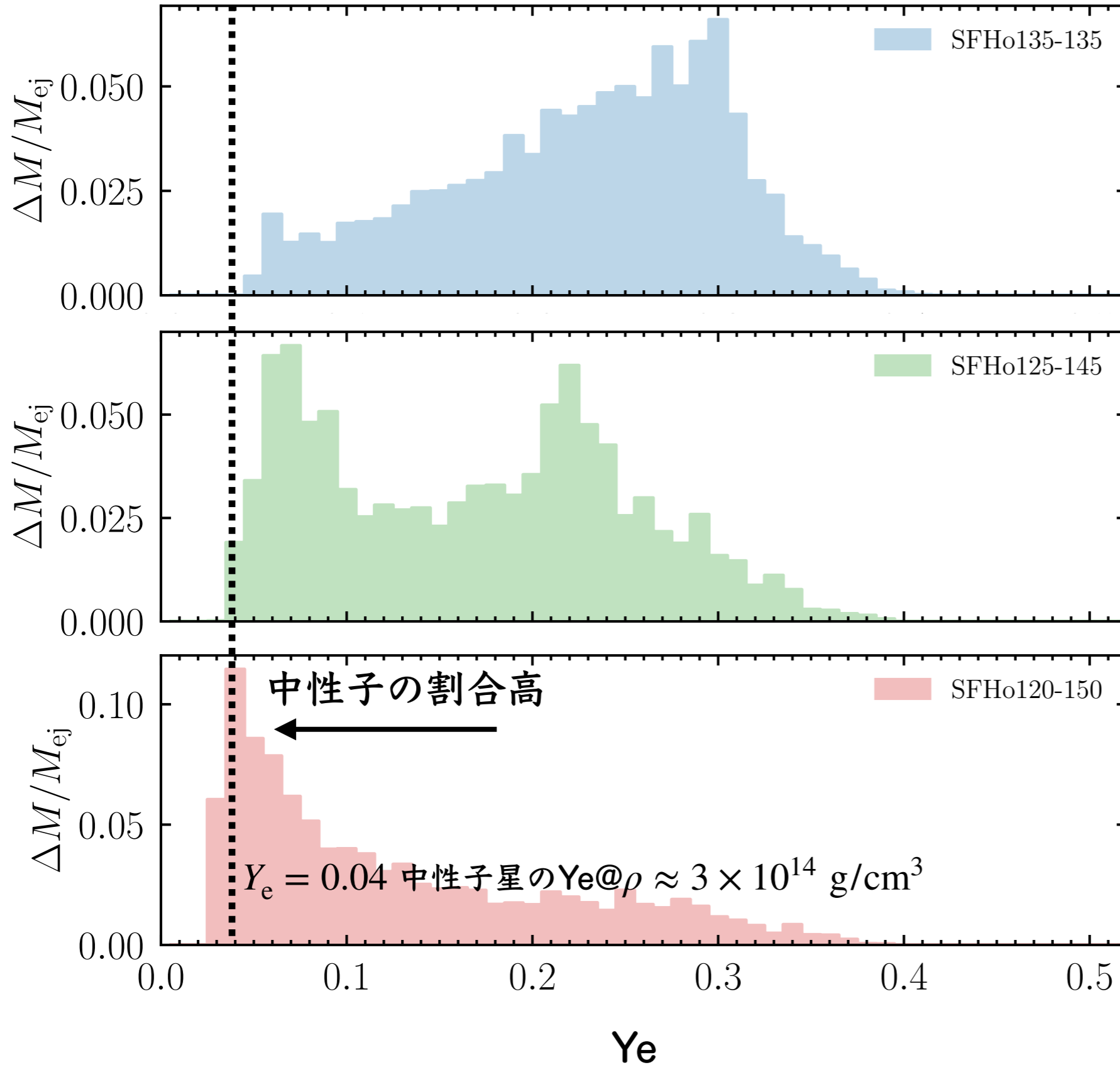


Ye high ↔ low

放出物質の中性子の割合

SF+23

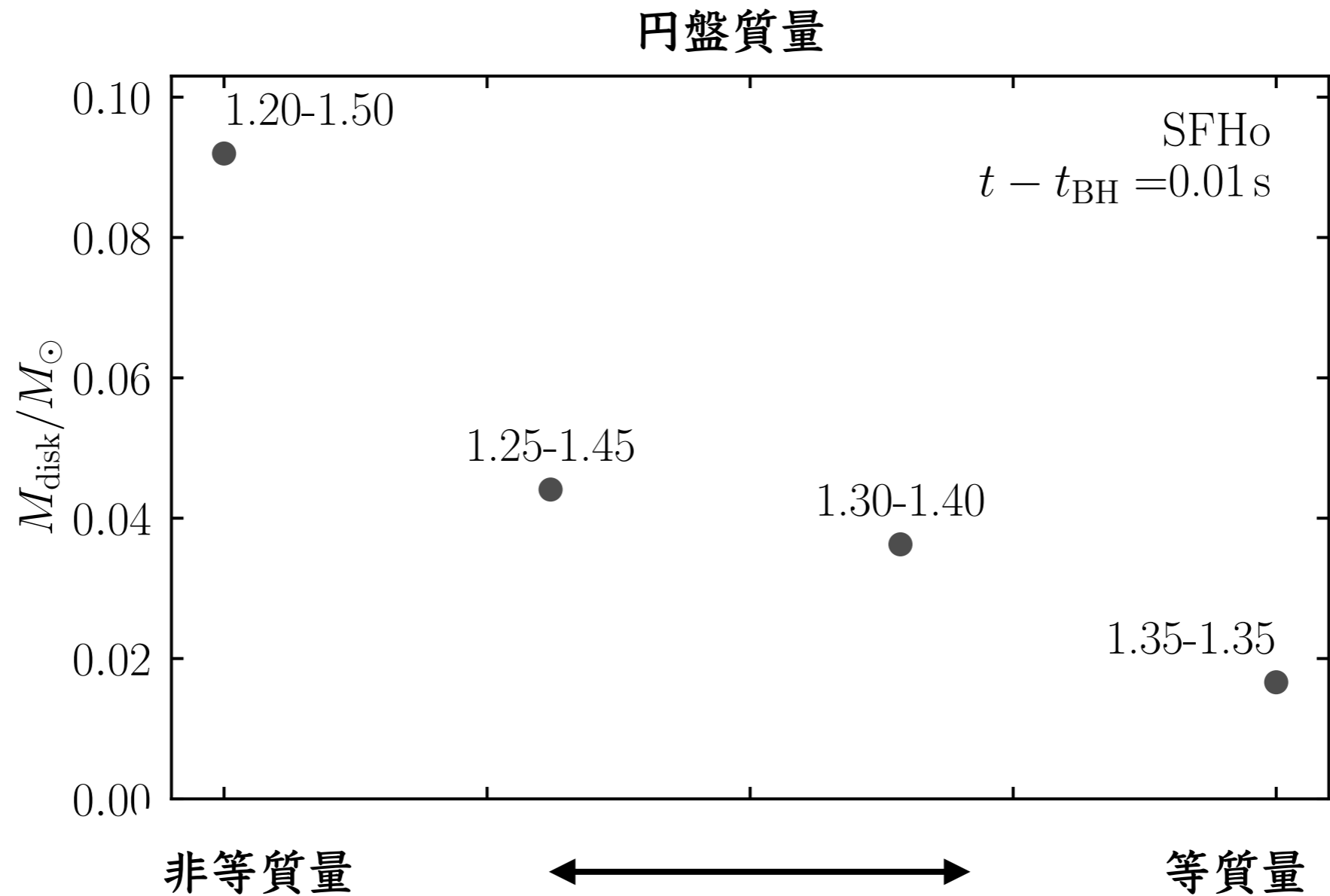
also Radice+18, Just+23



More asymmetric

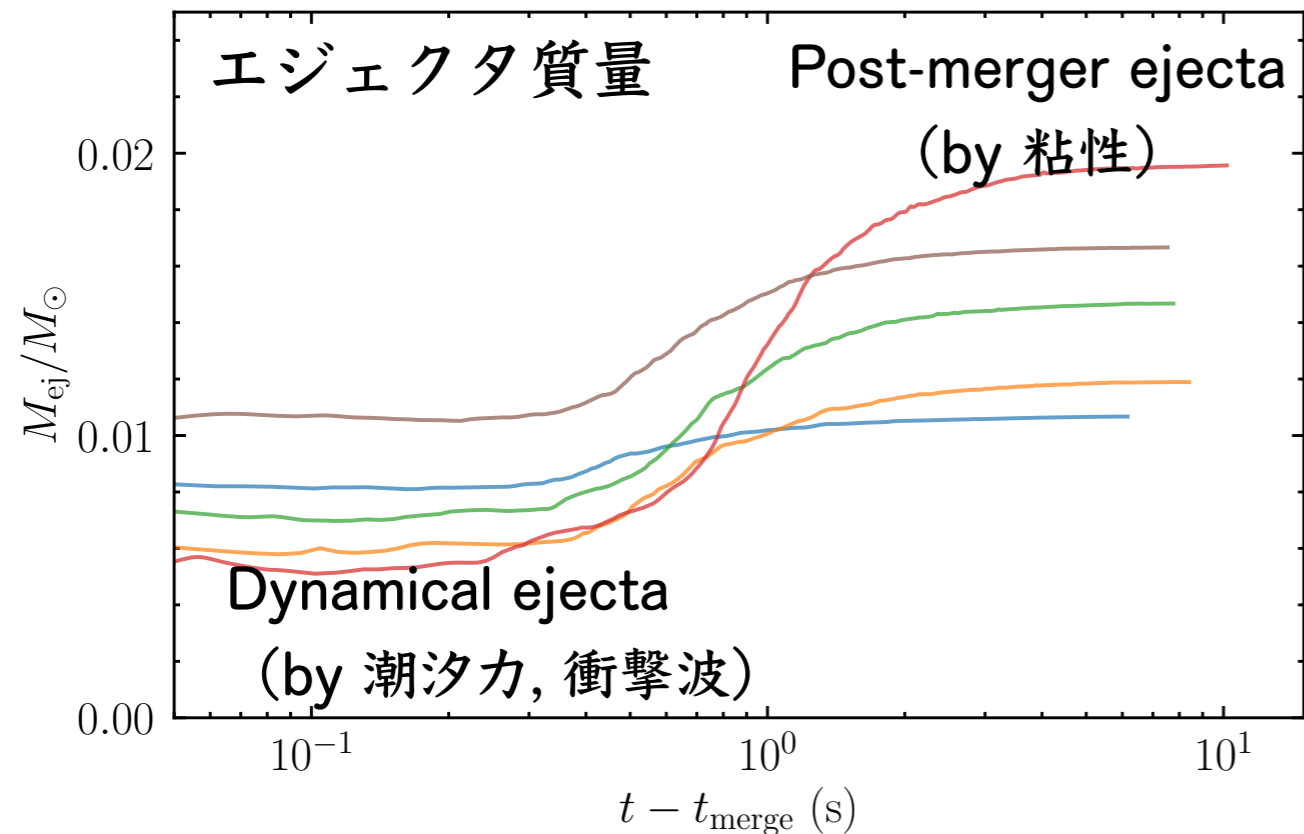
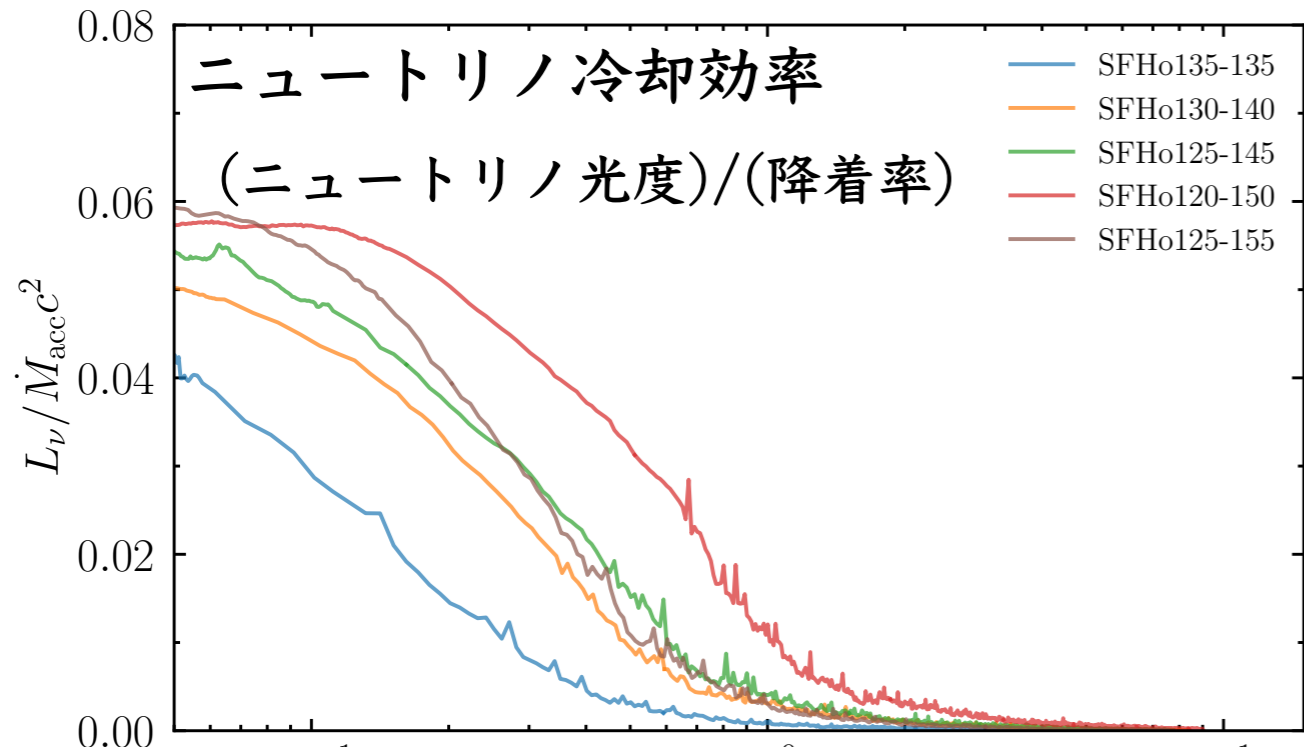


円盤質量の連星質量比依存性



円盤の質量 (\leftrightarrow Post-merger ejectaの重要さ)
は非対称な合体のケースでより大きい

Post-merger mass ejection



質量放出メカニズム：

ニュートリノ放射と

角運動量輸送で円盤が膨張して

温度が下がる $t_{\text{weak}} \sim 1 \text{ ms} \left(\frac{kT}{5 \text{ MeV}} \right)^{-5}$

ニュートリノ冷却効率が下がる

→粘性加熱で質量放出

質量比依存性：

等質量の合体だと円盤質量が小さい

→Dynamical ejectaが支配的

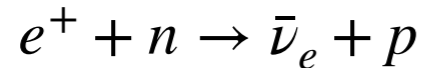
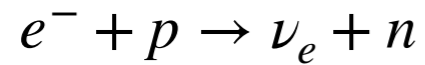
より非対称だと円盤質量が大きい

→Post-merger ejectaが支配的

放出物質の中性子の割合

SF+20, 23
see also Just+22

高温では



の平衡が中性子の割合を決める。

$$t_{\text{expansion}} \sim t_{\text{weak}} \quad (k_B T \sim 1 - 2 \text{ MeV})$$

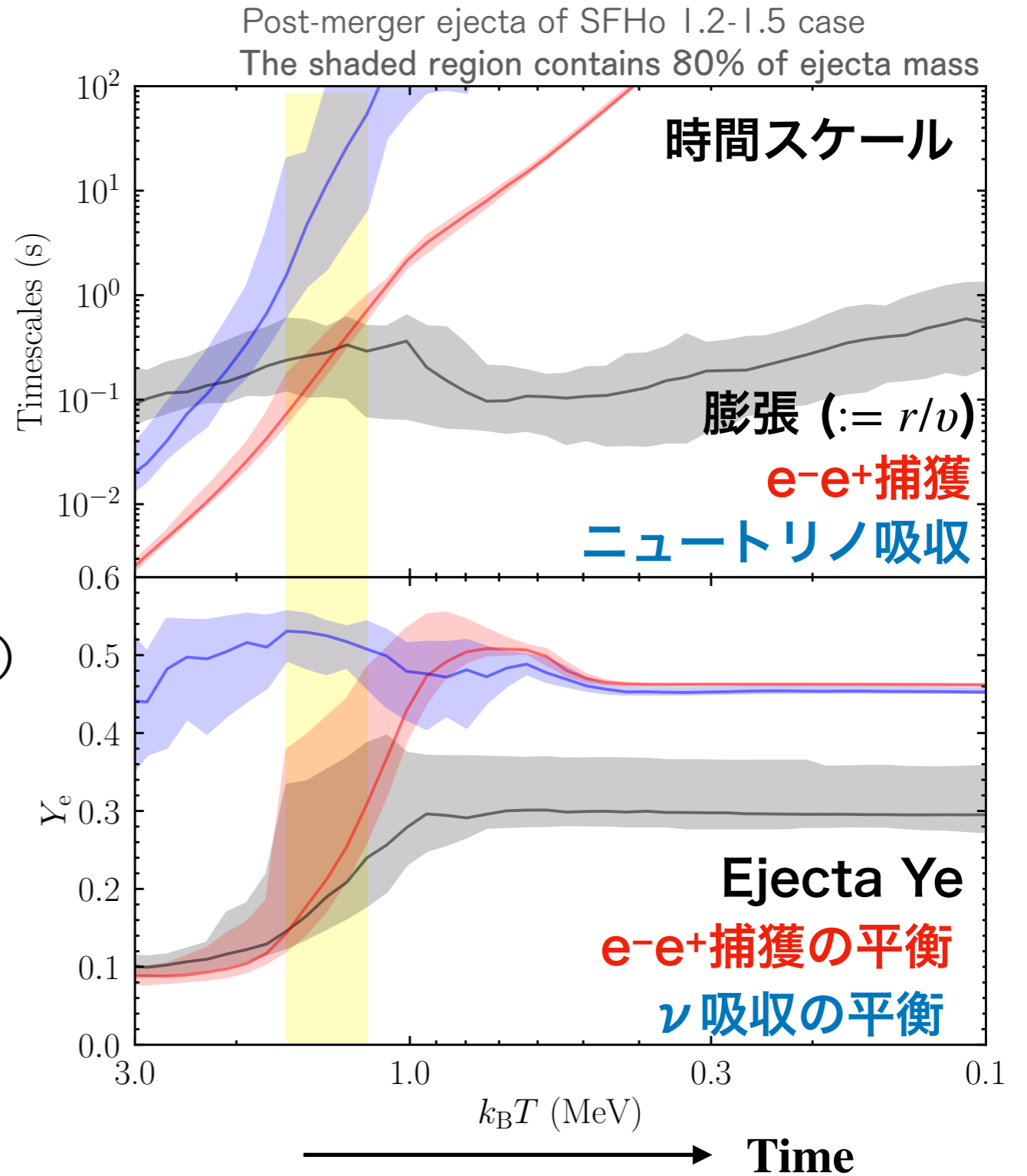
のときに凍結

(初期宇宙の中性子-陽子比が決まる話と類似)

このケースでは $Y_e \approx 0.3$ であった

Y_e の値は膨張時間スケールで決まる

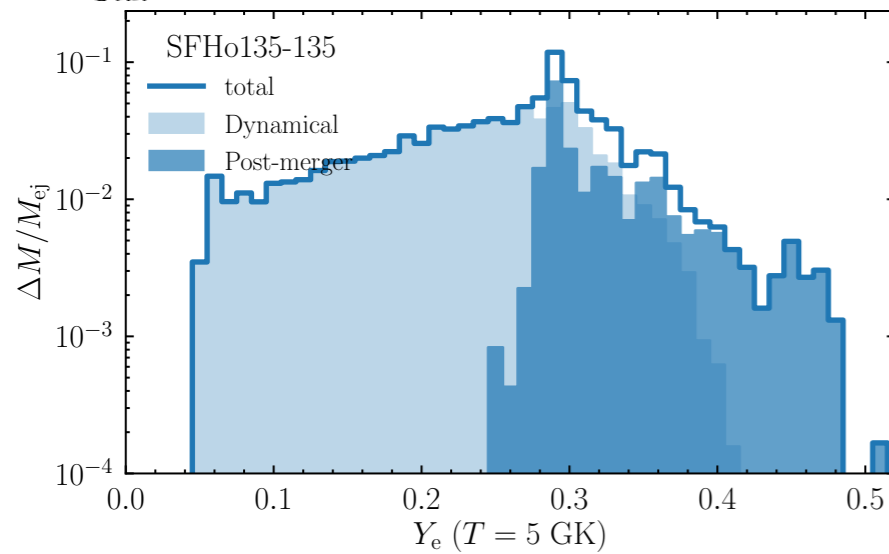
(つまり物質放出機構の詳細に敏感)。



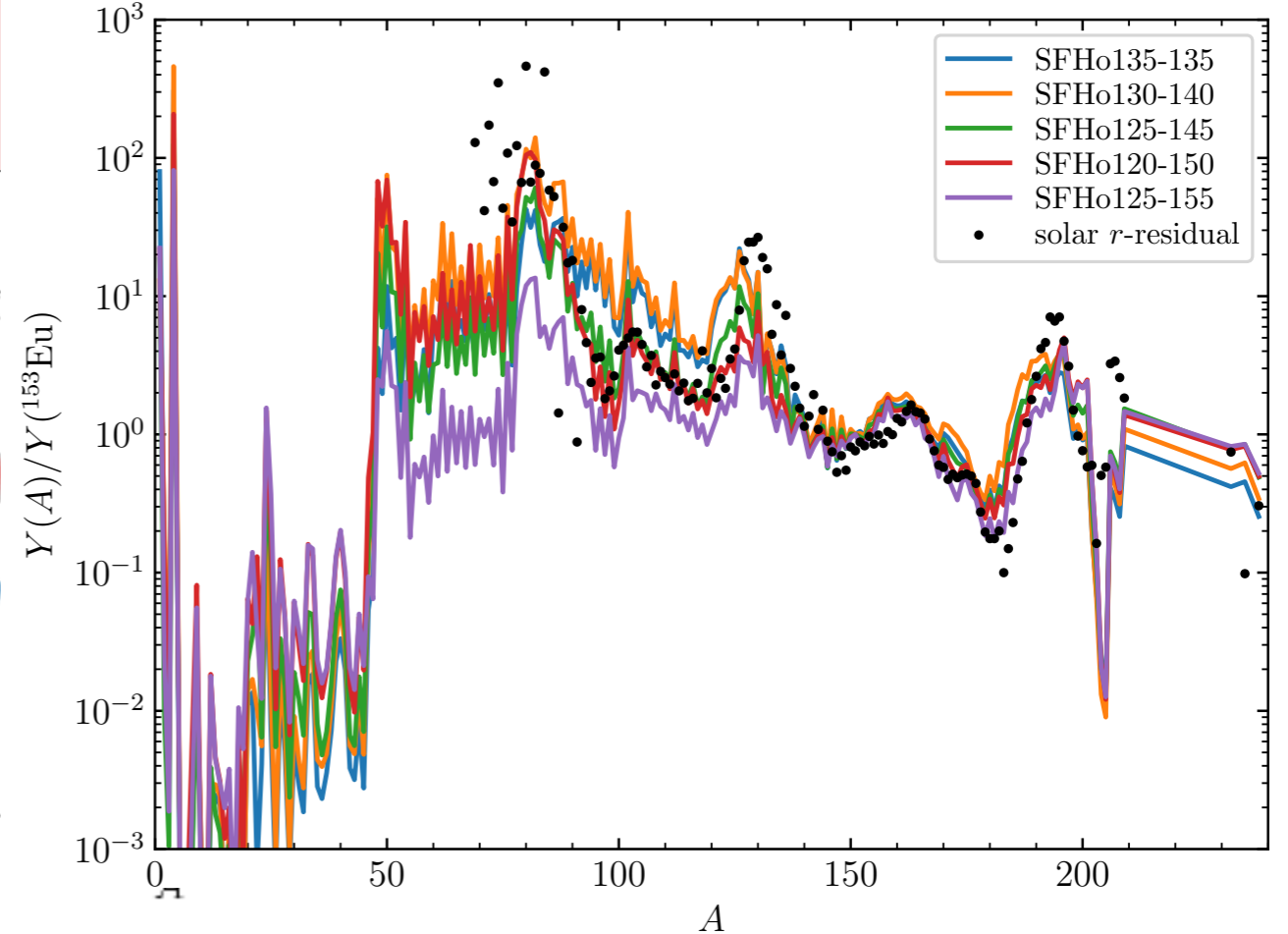
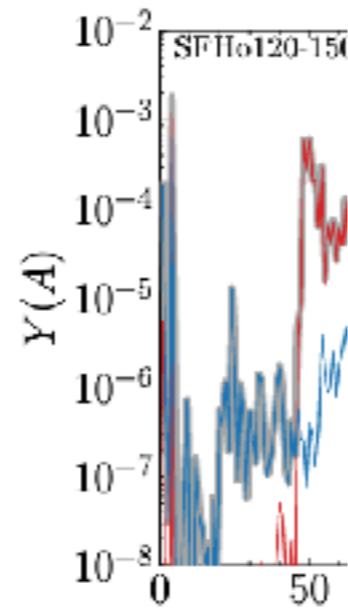
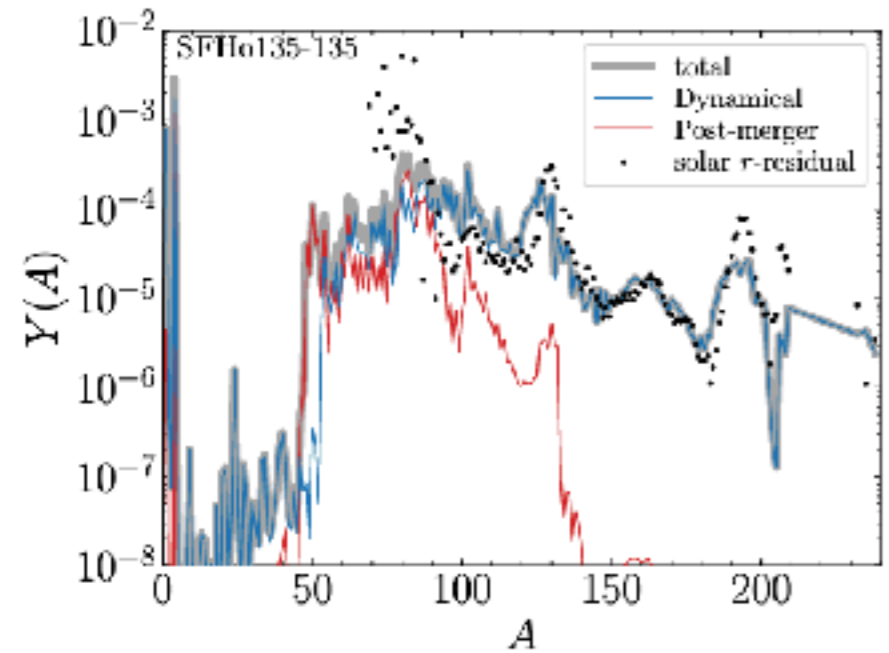
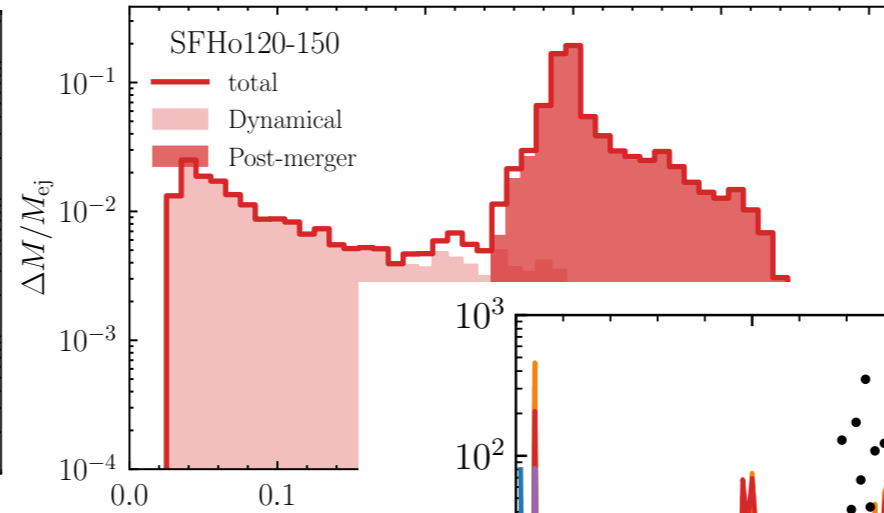
放出物質の組成

Short-lived massive NS

対称 (1.35-1.35)



非対称 (1.20-1.50)



Dynamical ejectaが支配的

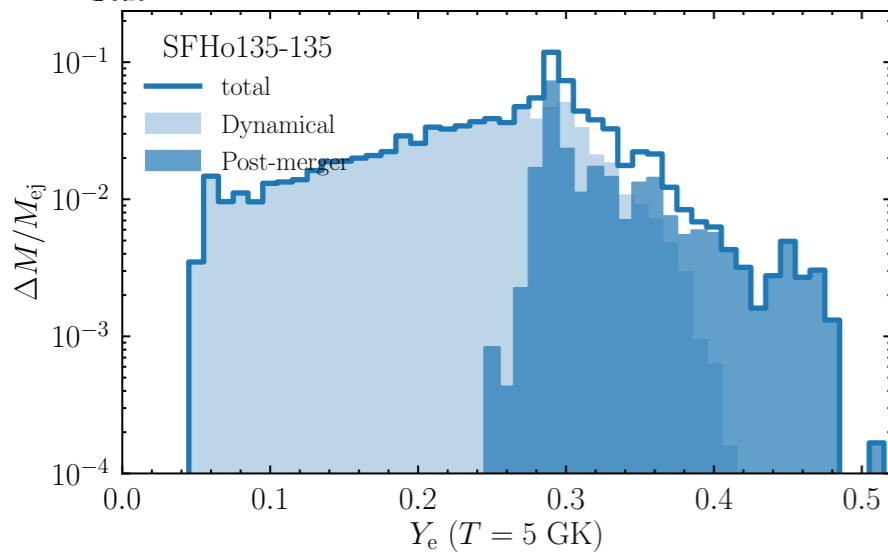
Dynamical ejectaは重い元素を作りすぎるが、Post-mergerが軽い元素を補填する

質量比に依らず太陽系組成が概ね再現される

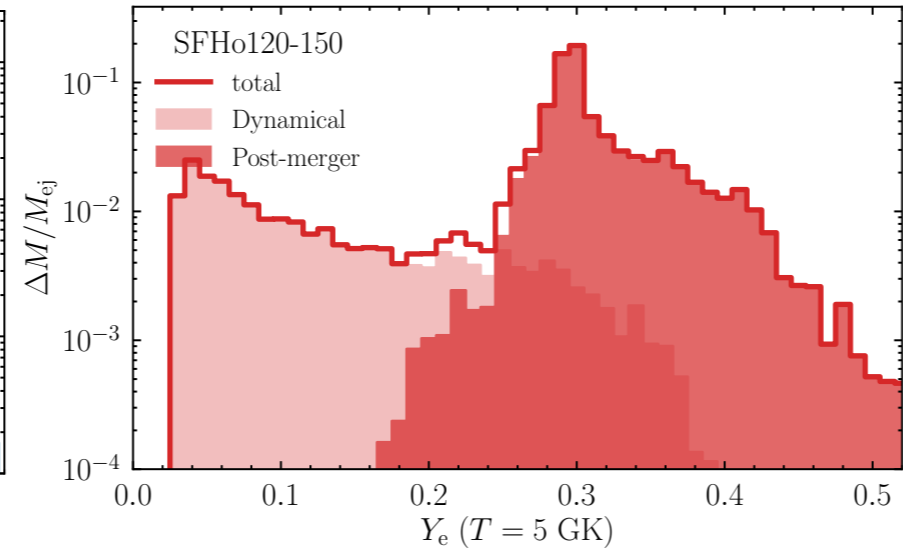
合体後中性子星の“寿命”が長い場合

Short-lived massive NS

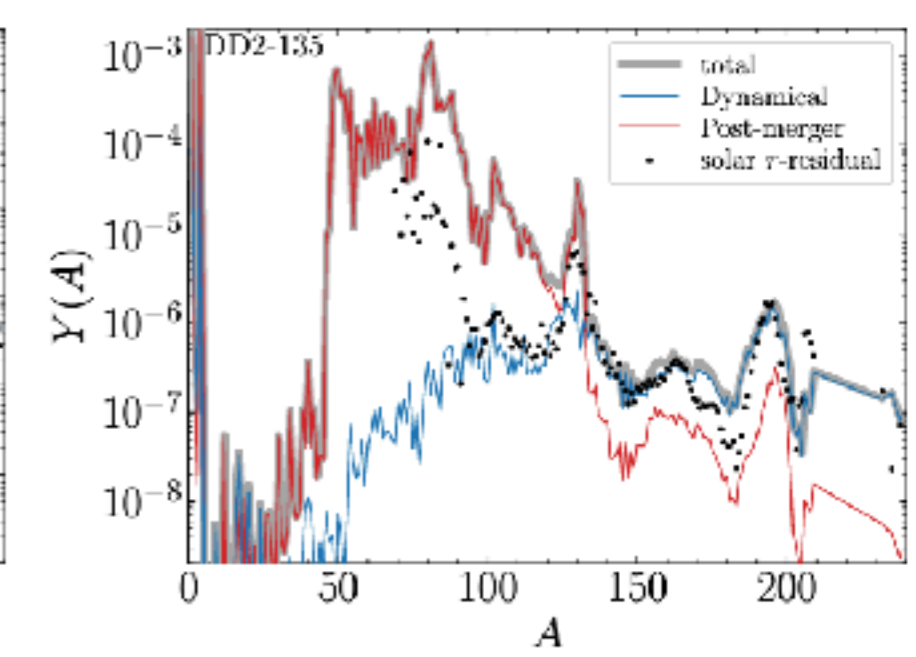
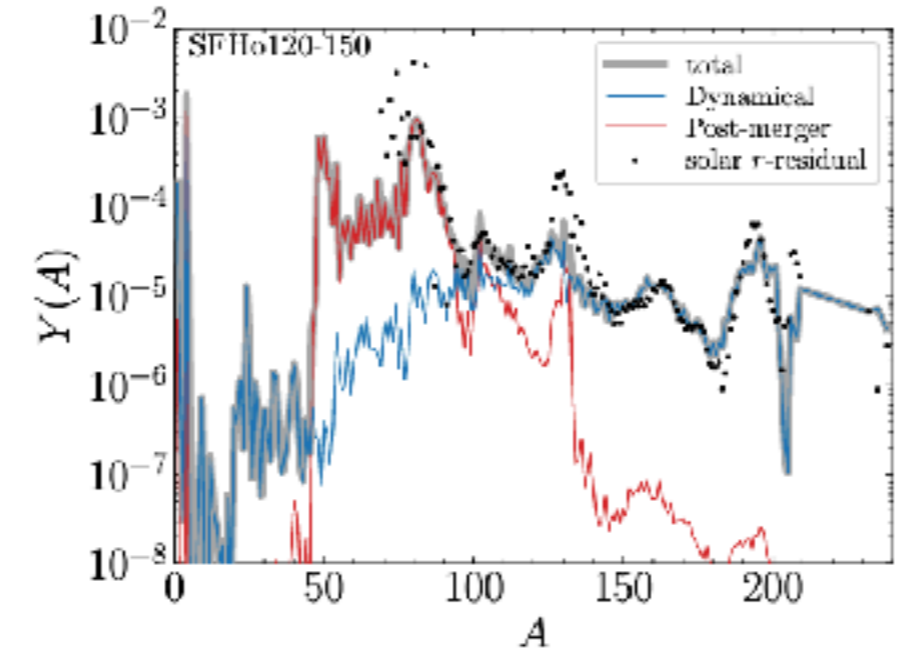
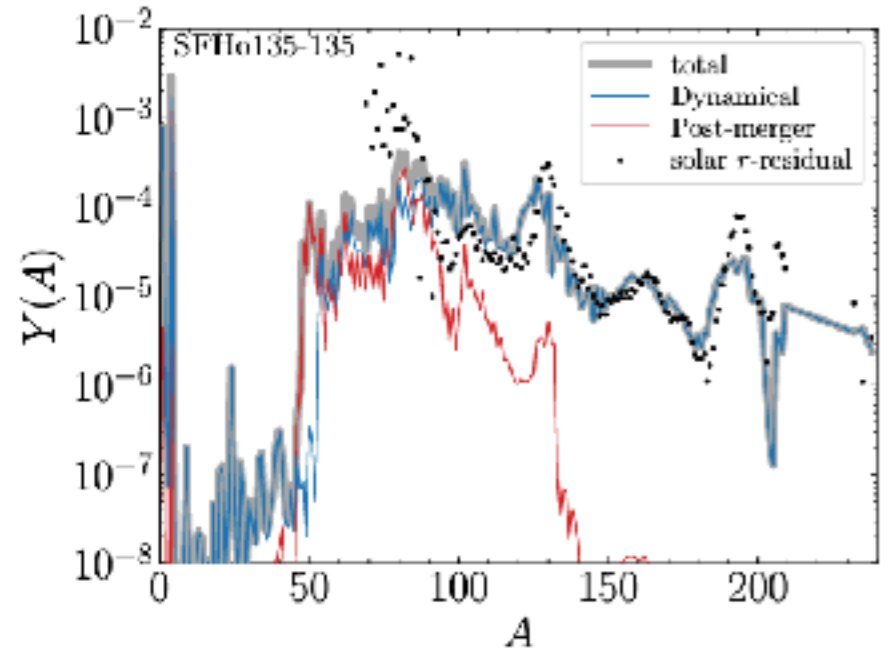
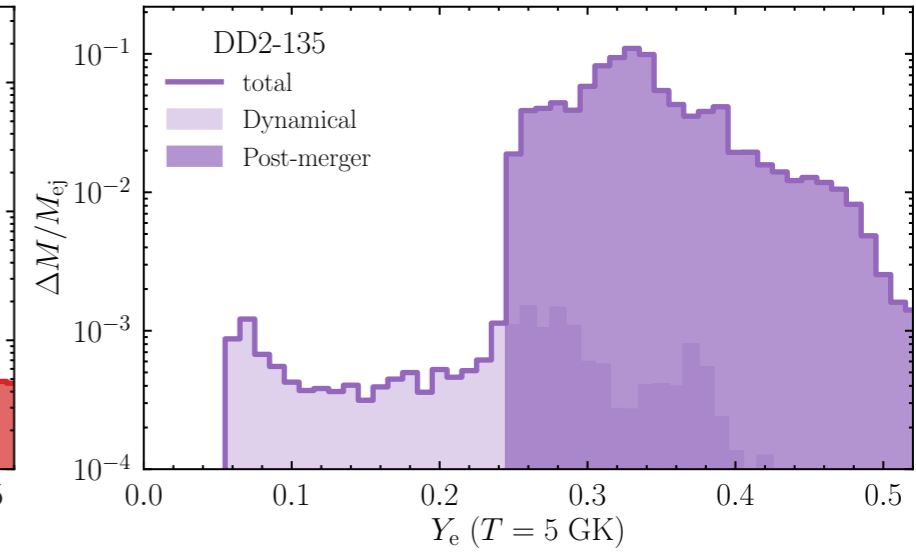
対称 (1.35-1.35)



非対称 (1.20-1.50)



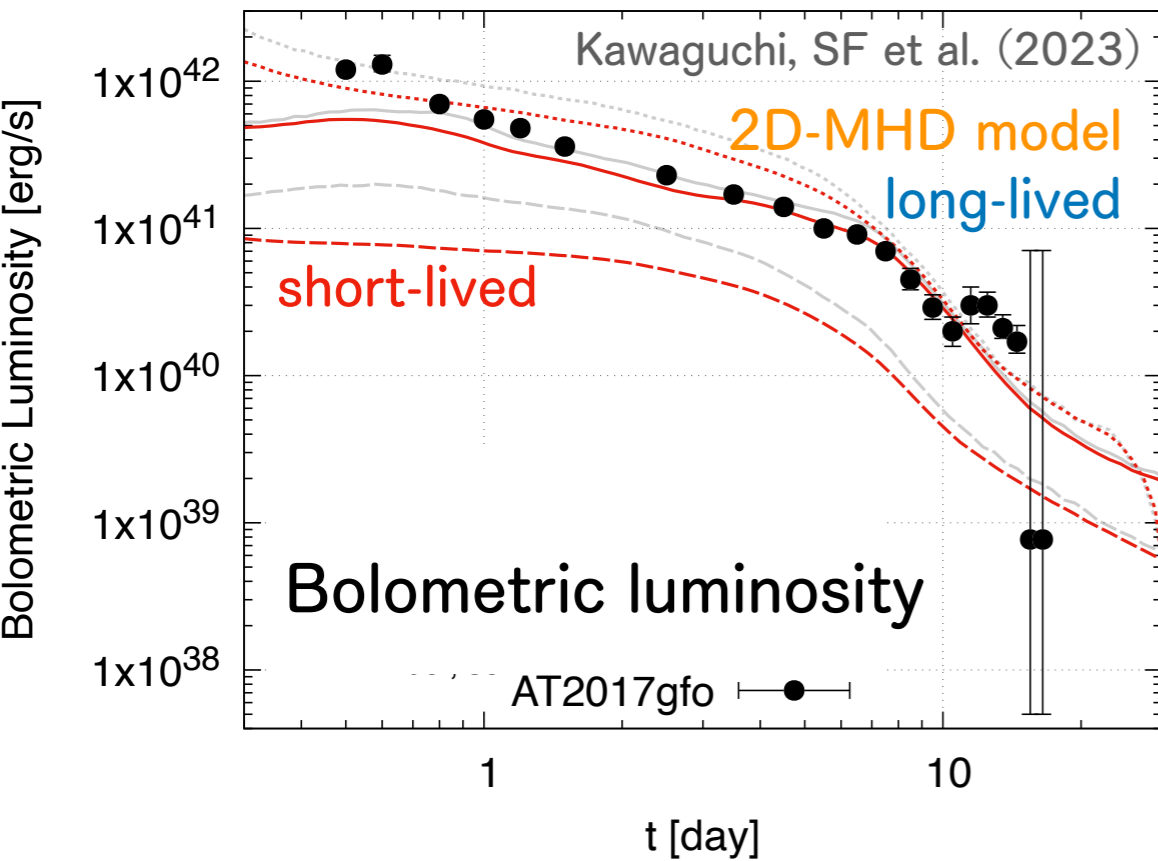
Long-lived massive NS
equal-mass (DD2 1.35-1.35)



Post-merger成分が多すぎる
軽い ($A < 140$) 元素を作りすぎる

Kilonova

Kawaguchi, SF+22, 23



Kilonova	Solar
GW170817?	r-process?

短寿命ケース:

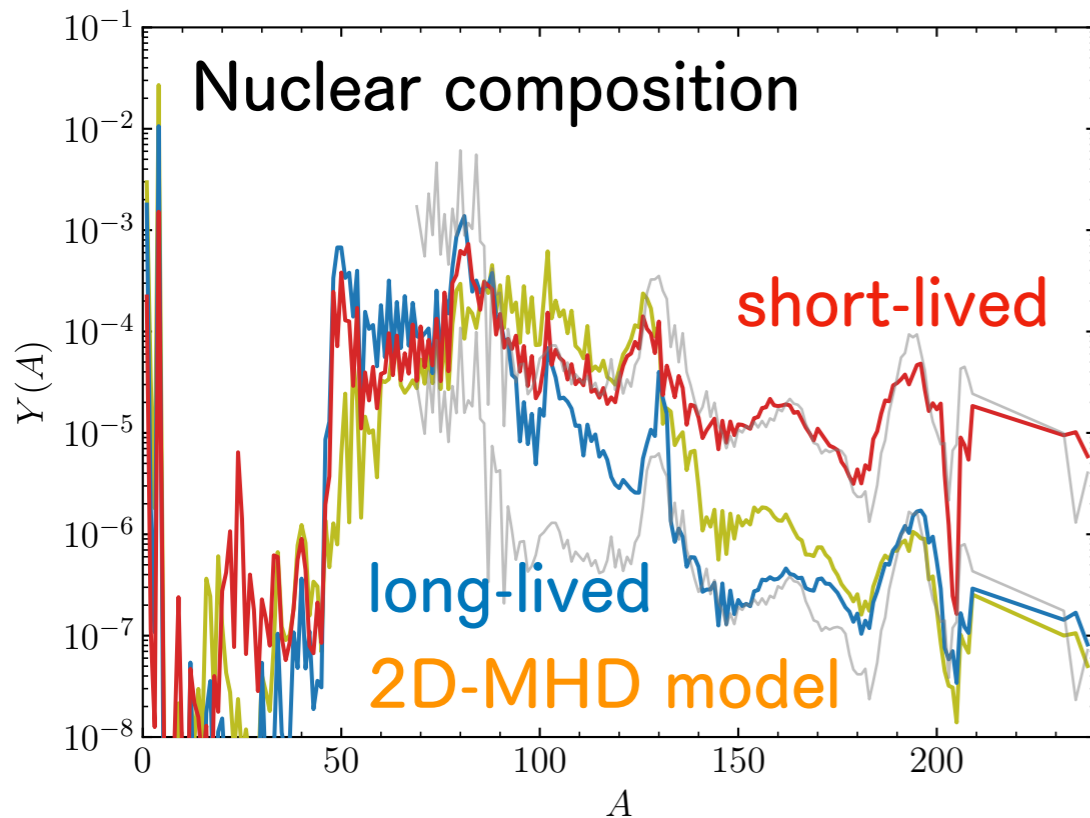
エジェクタ
質量小さい



長寿命ケース:



post-merger ejecta
多すぎる



1. GW170817はレアイベント?

(長寿命NS・明るいkilonova)

→ 大多数のkilonovaはもっと暗いかもしれない?

(今後、統計的に議論が可能になる)

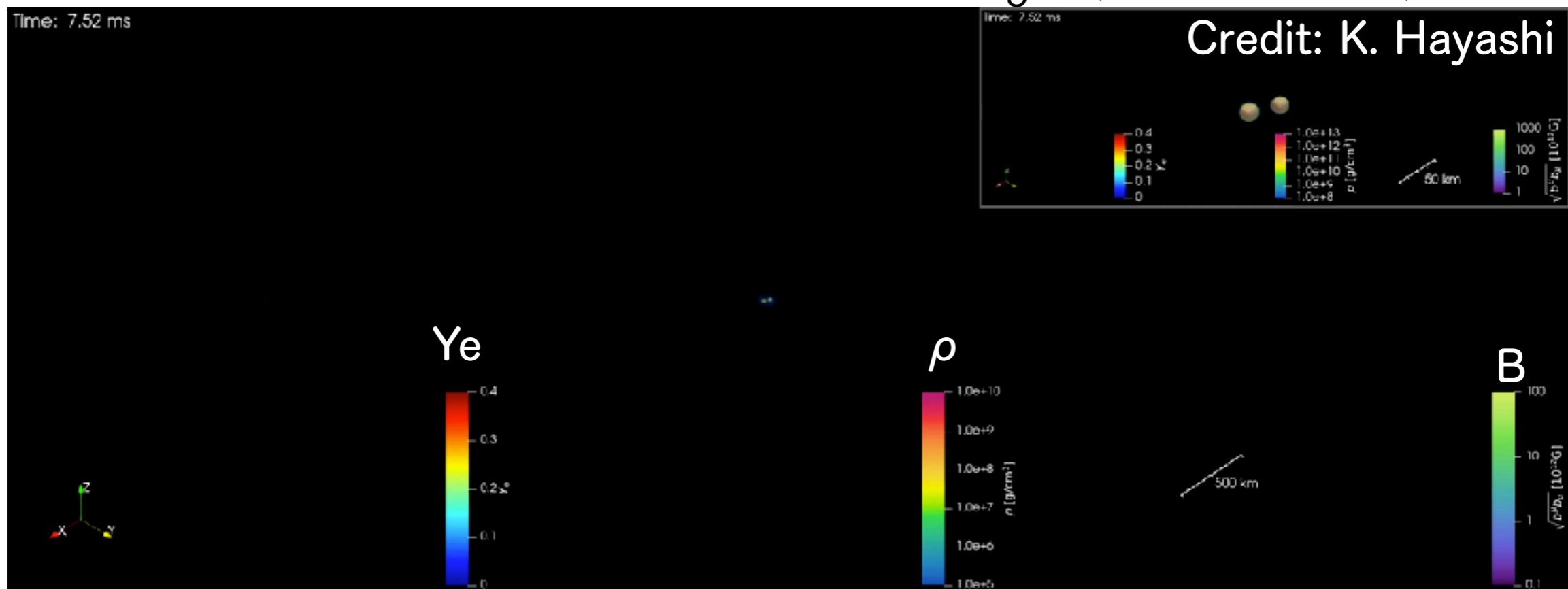
2. 何らかの効果が数値シミュレーションで考慮されていない (モデリングがまずい)?
実際は"寿命"が長いケースでも太陽系組成を再現できる?

より現実的なモデリング

- (粘性でなく) 磁気流体シミュレーションを行うのが
角運動量輸送・散逸機構を議論するうえで最もコンシステントなモデリング
- 円盤内については、粘性は磁気乱流を良く近似することは分かっている

e.g., Just+22, Fernandez+19,
Hayashi+22, Kiuchi, SF+23

GRRMHD model of 1.2-1.5Msun merger (短寿命のケース)



Dynamical + Post-mergerの質量放出がself-consistentに計算された最初の例

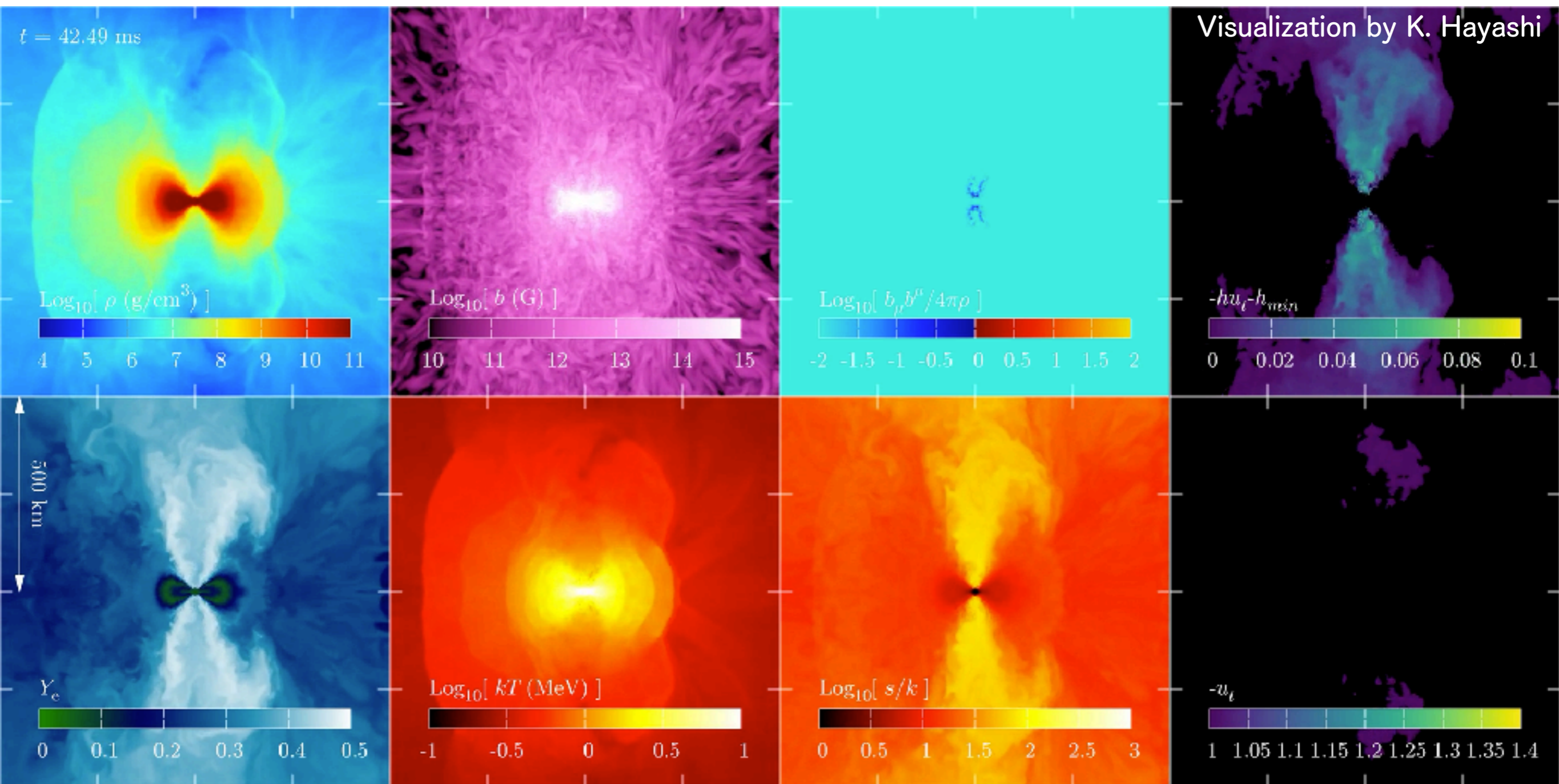
より現実的なモデリング

- (粘性でなく) 磁気流体シミュレーションを行うのが
角運動量輸送・散逸機構を議論するうえで最もコンシステントなモデリング
- 円盤内については、粘性は磁気乱流を良く近似することは分かっている
→MHDシミュレーションを用いて現象論的モデルの改善 e.g., Just+22, Fernandez+19,
Hayashi+22, Kiuchi, SF+23
- 磁気流体効果は長寿命の中性子星が残る場合に重要になる
- 強く磁化した中性子星が強いアウトフローを引き起こす
e.g., Ciolfi+17, Mösta+20, Shibata, SF+21, Combi & Siegel 23, Most & Quataert 23
- 放出物質の性質・空間分布を変える
kilonovaの性質に影響する Kawaguchi, SF+22
- 放出物質の中性子の割合はより大きくなるかも
速く膨張する→時間スケールが短い→より中性子の割合の凍結が早い

GRRMHD simulation of long-lived NS remnant

Kiuchi+24

DD2, $1.35\text{-}1.35M_{\odot}$ merger with MHD and approximated neutrino transfer



回転軸方向に強く磁化されたアウトフローが形成する

より現実的なモデリング

- ニュートリノ輸送

中性子の割合・生成元素・kilonovaの性質に影響する

現在の最先端はグレー（ニュートリノのエネルギーを分解しない）法
しかしニュートリノの反応率はエネルギー依存

MI法がひしやげた系で正しいか検証の余地あり

Radice+22, Post-mergerに限ればJust+23はmulti-E
cf. Sumiyoshi, SF+21

- ニュートリノ振動

ニュートリノのフレーバー（ $e \cdot \mu \cdot \tau$ ）を変える→中性子の...（以下略

集団振動の空間・時間スケール~ 1cm、ナノ秒（！）。現在分解不可能

サブグリッドモデルを使っのシミュレーションが始まっているが、
正しいか検証が必要

Just+22, Li & Siegel 22

まとめ

- 連星中性子星合体の数値モデリング→放出物質・電磁波放射（kilonova）の性質
- Dynamical ejecta：非対称な系ほど中性子の割合が大きく重い元素を多くつくる
- Post-merger ejecta：主に軽い元素を作る
 - 合体後残るのが寿命が短い（ ~ 10 ms）中性子星の場合：
 - Post-merger ejectaがうまい具合に軽い元素を補填し、連星の質量比によらず太陽系組成を概ね再現できる
 - 放出物質が少なく、GW170817のkilonovaは再現は難しい
 - 合体後残るのが寿命が長い（ $\gtrsim 1$ s）中性子星の場合：
 - Post-merger ejectaが多すぎ、太陽系組成は再現が難しい
 - GW170817のkilonovaは再現できそう
 - 磁気流体効果は未だ未解明

ご清聴ありがとうございました