

# 多粒子観測から 原子核物理へ

ブラックホール・中性子星連星を例に

京都大学理学研究科 久徳浩太郎

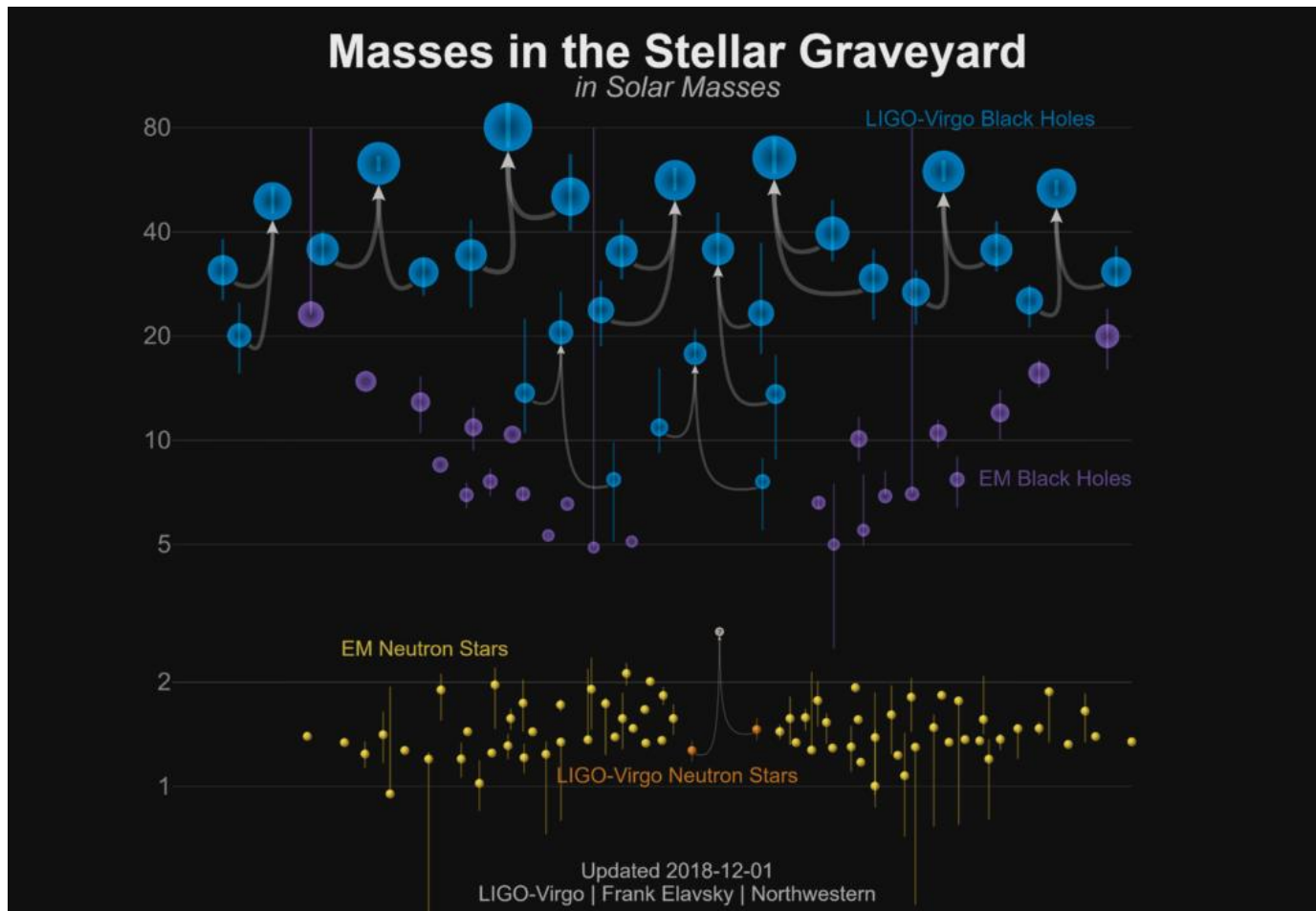
# 内容

1. 導入
2. 今までにわかったこと
3. 今後に期待されること
4. まとめ

# 1. 導入

# 重力波天文学の時代

LIGO O2で連星ブラックホール10、連星中性子星1



# LIGO-Virgo O3 from April

週に1個どころかこのところ1日1個ペース  
5/17, 5/18, 5/19, 5/21に2つ (FARは1年1個以下)

## GraceDB – Gravitational Wave Candidate Event Database

HOME	SEARCH	LATEST	DOCUMENTATION	LOGIN
------	--------	--------	---------------	-------

Latest – as of 21 May 2019 16:59:22 UTC

Test and MDC events and superevents are not included in the search results by default; see the [query help](#) for information on how to search for events and superevents in those categories.

Query:

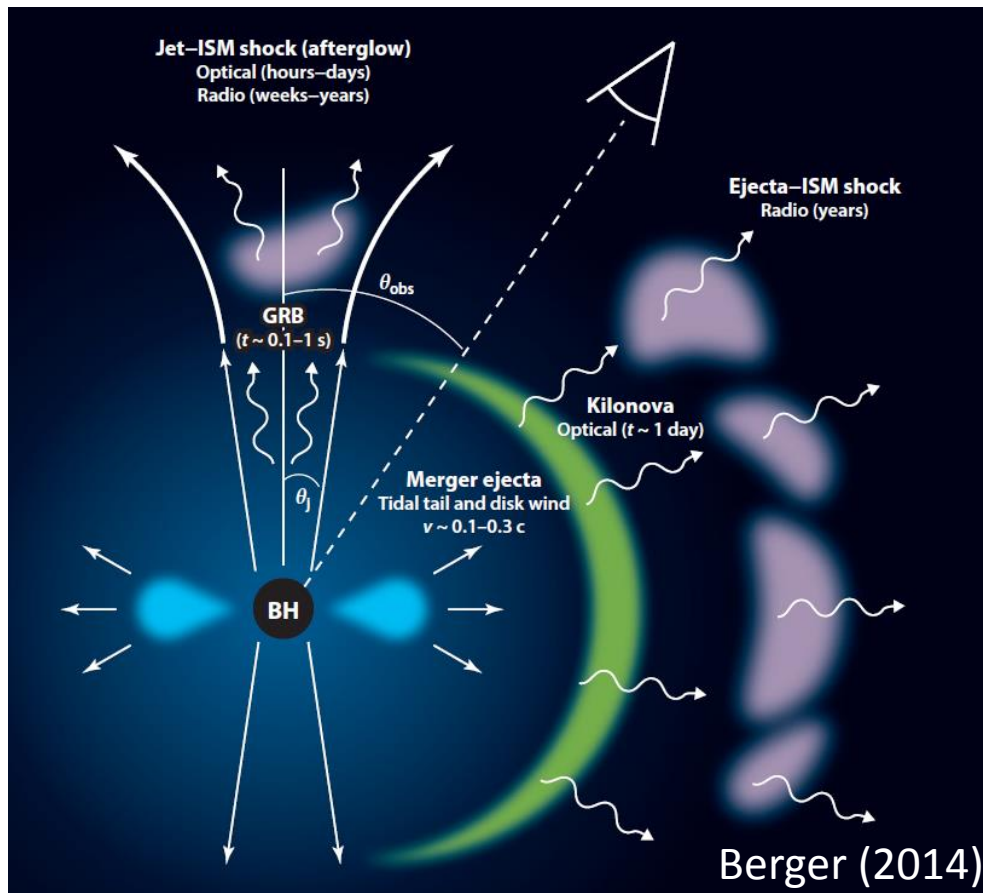
Search for:

UID	Labels	t_start	t_0	t_end	FAR (Hz)	UTC Created
<a href="#">S190521r</a>	ADVOK SKYMAP_READY EMBRIGHT_READY PASTRO_READY DQOK GCN_PRELIM_SENT	1242459856.453418	1242459857.460739	1242459858.642090	3.168e-10	2019-05-21 07:44:22 UTC
<a href="#">S190521g</a>	PE_READY ADVOK SKYMAP_READY EMBRIGHT_READY PASTRO_READY DQOK GCN_PRELIM_SENT	1242442966.447266	1242442967.606934	1242442968.888184	3.801e-09	2019-05-21 03:02:49 UTC
<a href="#">S190519bj</a>	ADVOK SKYMAP_READY EMBRIGHT_READY PASTRO_READY DQOK GCN_PRELIM_SENT	1242315361.378873	1242315362.655762	1242315363.676270	5.702e-09	2019-05-19 15:36:04 UTC
<a href="#">S190518bb</a>	ADVNO SKYMAP_READY EMBRIGHT_READY PASTRO_READY DQOK GCN_PRELIM_SENT	1242242376.474609	1242242377.474609	1242242380.922655	1.004e-08	2019-05-18 19:19:39 UTC
<a href="#">S190517h</a>	PE_READY ADVOK SKYMAP_READY EMBRIGHT_READY PASTRO_READY DQOK GCN_PRELIM_SENT	1242107478.819517	1242107479.994141	1242107480.994141	2.373e-09	2019-05-17 05:51:23 UTC
<a href="#">S190513bm</a>	ADVOK SKYMAP_READY EMBRIGHT_READY PASTRO_READY DQOK GCN_PRELIM_SENT	1241816085.736106	1241816086.869141	1241816087.869141	3.734e-13	2019-05-13 20:54:48 UTC
<a href="#">S190512at</a>	PE_READY ADVOK SKYMAP_READY EMBRIGHT_READY PASTRO_READY DQOK GCN_PRELIM_SENT	1241719651.411441	1241719652.416286	1241719653.518066	1.901e-09	2019-05-12 18:07:42 UTC
<a href="#">S190510g</a>	ADVOK SKYMAP_READY EMBRIGHT_READY PASTRO_READY DQOK GCN_PRELIM_SENT	1241492396.291636	1241492397.291636	1241492398.293185	8.834e-09	2019-05-10 03:00:03 UTC
<a href="#">S190503bf</a>	ADVOK SKYMAP_READY EMBRIGHT_READY PASTRO_READY DQOK GCN_PRELIM_SENT	1240944861.288574	1240944862.412598	1240944863.422852	1.636e-09	2019-05-03 18:54:26 UTC
<a href="#">S190426c</a>	PE_READY ADVOK SKYMAP_READY EMBRIGHT_READY PASTRO_READY DQOK GCN_PRELIM_SENT	1240327332.331668	1240327333.348145	1240327334.353516	1.947e-08	2019-04-26 15:22:15 UTC
<a href="#">S190425z</a>	ADVOK SKYMAP_READY EMBRIGHT_READY PASTRO_READY DQOK	1240215502.011549	1240215503.011549	1240215504.018242	4.538e-13	2019-04-25 08:18:26 UTC
<a href="#">S190421ar</a>	PE_READY ADVOK SKYMAP_READY EMBRIGHT_READY PASTRO_READY DQOK GCN_PRELIM_SENT	1239917953.250977	1239917954.409180	1239917955.409180	1.489e-08	2019-04-21 21:39:16 UTC
<a href="#">S190412m</a>	PE_READY ADVOK SKYMAP_READY EMBRIGHT_READY PASTRO_READY DQOK GCN_PRELIM_SENT	1239082261.146717	1239082262.222168	1239082263.229492	1.683e-27	2019-04-12 05:31:03 UTC
<a href="#">S190408an</a>	PE_READY ADVOK SKYMAP_READY EMBRIGHT_READY PASTRO_READY DQOK GCN_PRELIM_SENT	1238782699.268296	1238782700.287958	1238782701.359863	2.811e-18	2019-04-08 18:18:27 UTC
<a href="#">S190405ar</a>	ADVNO SKYMAP_READY EMBRIGHT_READY PASTRO_READY DQOK	1238515307.863646	1238515308.863646	1238515309.863646	2.141e-04	2019-04-05 16:01:56 UTC



# 質量放出と電磁波対応天体

中性子星を含む連星合体には電磁波放射が伴う



## 位置決定

- 母銀河の決定
- 宇宙論的赤方偏移

## エジェクタの性質

- 質量放出の物理
- r過程元素の起源

# 中性子星関連イベント

S190425z: 割と確実な連星中性子星、156Mpc

S190426: ブラックホール・中性子星連星？377Mpc  
連星中性子星、ノイズの可能性もむしろ高い

S190510g: 最初は連星中性子星と言われていたが  
その後の解析ではむしろノイズっぽいとの示唆

知る限り、どれも確実な電磁波検出の報告はない  
- 距離が遠いので暗い + 位置が決まらず探せない

# この先の見通し

今後も連星中性子星は見つかり続けるのは確実

一方で原子核のことを知りたいと思えば話は別で有益な情報をもたらすものは近いものに限られる

- 重力波で性質がよくわかるのは近いイベント
- 電磁波が詳細に観測できるのも近いイベント
  - 特に170817のように40Mpcというのはきっと希少

しばらくは個々の近傍イベントで一喜一憂できそう



# 2. 今までに わかったこと

# 原子核物理に対してできそうな貢献

中性子星の状態方程式は？

- 合体に至るまでの重力波を解析すればいい

高温・高密度・強磁場での性質や自由度は？

- 合体後の重力波が見えれば...将来目標(略)

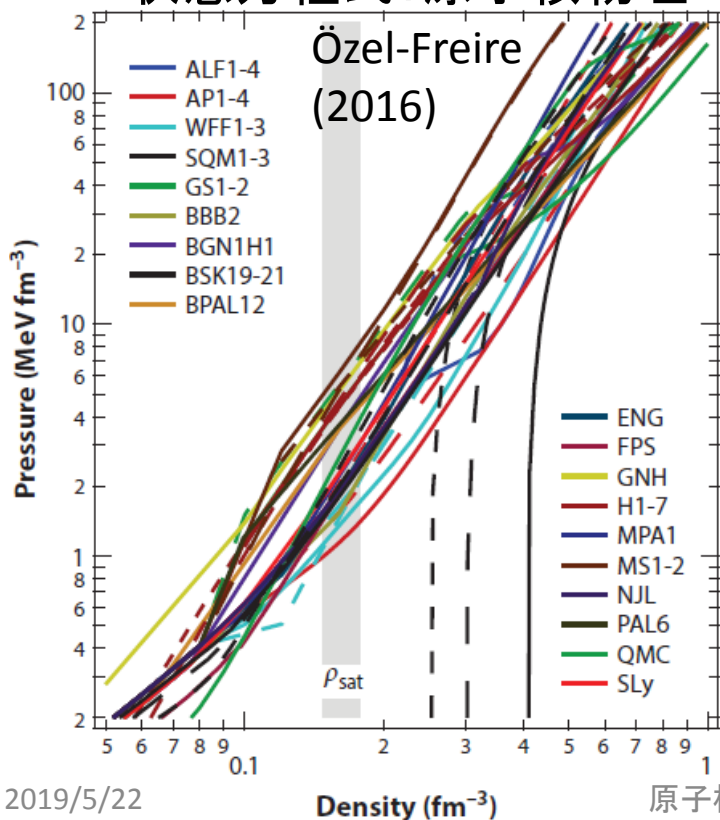
重元素合成の進み方や重元素自体の性質は？

- キロノヴァ/マクロノヴァを見ることで進むはず

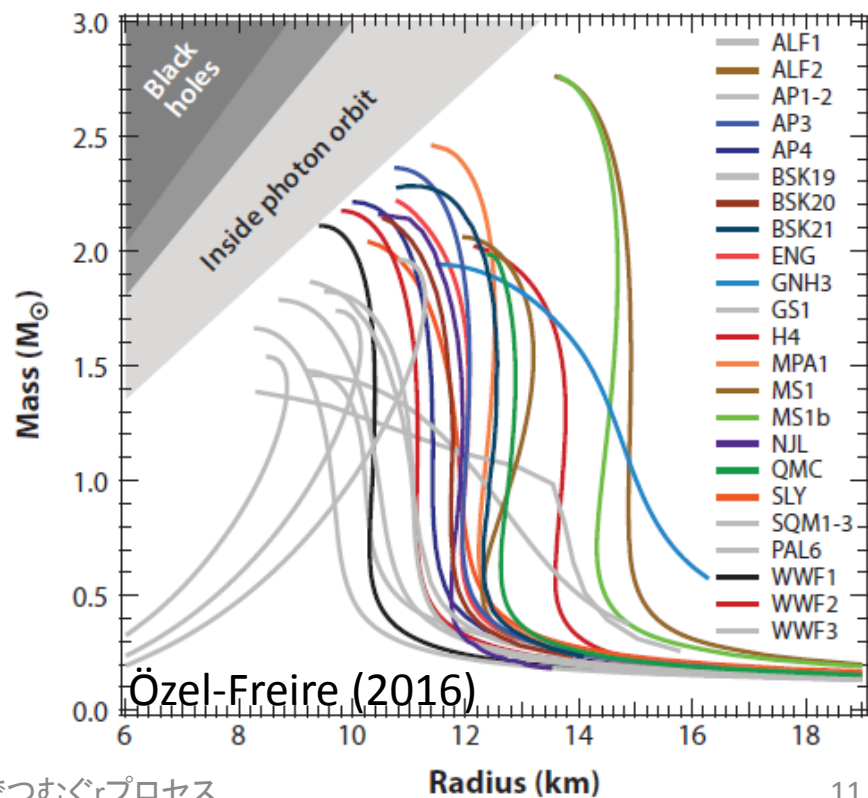
# 中性子星の状態方程式

中性子星の質量・半径関係と一対一に対応する  
合体のダイナミクスや質量放出過程を影響する

状態方程式: 原子核物理



質量・半径関係: 宇宙物理



# 潮汐変形率

流体が軌道進化に及ぼす影響を特徴づける量  
星の潮汐力への線形応答を表す、半径と強く相関

$$\Lambda = G\lambda \left( \frac{c^2}{GM} \right)^5 = \frac{2}{3} k \left( \frac{c^2 R}{GM} \right)^5 \propto R^5$$

$k \sim 0.1$ : (second/electric) tidal Love number



$$Q_{ij} = -\lambda \varepsilon_{ij}$$

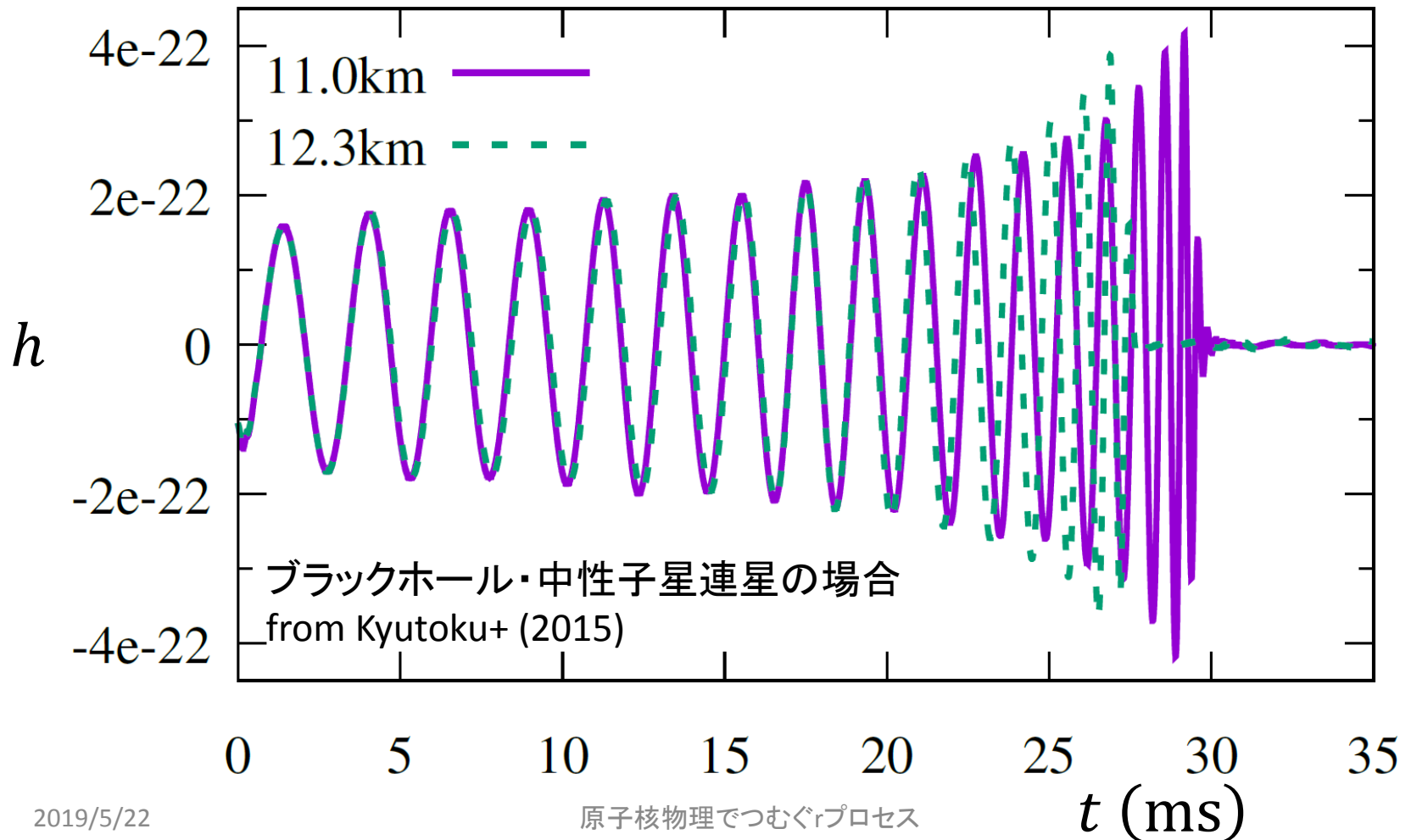


$$Q_{ij} \equiv \int \rho \left( x_i x_j - \frac{1}{3} x^2 \delta_{ij} \right) d^3 x$$

$$\varepsilon_{ij} \equiv \frac{\partial^2 \Phi_{\text{ext}}}{\partial x^i \partial x^j}$$

# 波形への影響

半径が大きい~潮汐変形率が大きいと早く合体



# GW170817からの制限

半径だと大雑把に10km以上13km以下くらい

- 波形

解析計算ベース

数値相対論ベース

- 仮定

どんなpriorを課すか

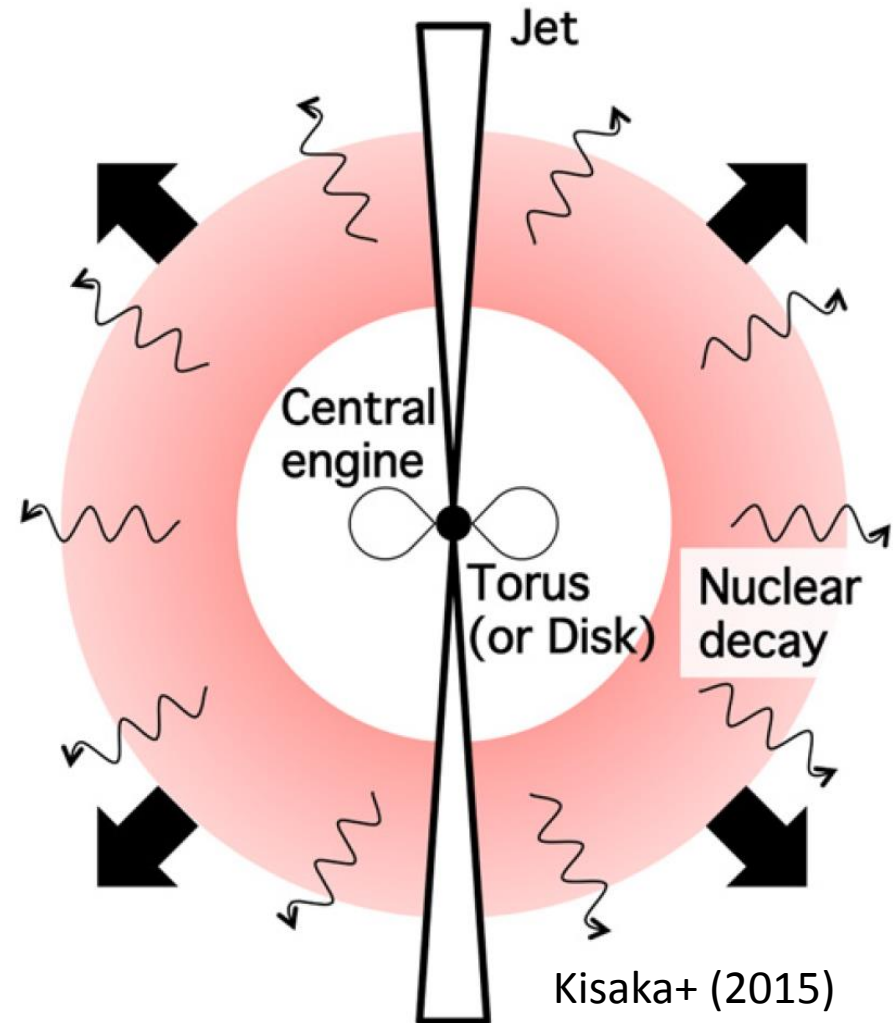
両方の星に共通の

状態方程式を課すか

Preliminary

# キロノヴァ/マクロノヴァ

放出された物質には  
放射性のr過程元素も  
崩壊により自身を加熱  
熱的放射は物質から  
拡散して抜け出してくる  
しかしr過程元素は  
光を簡単に逃がさない  
特徴的な「キロノヴァ」へ

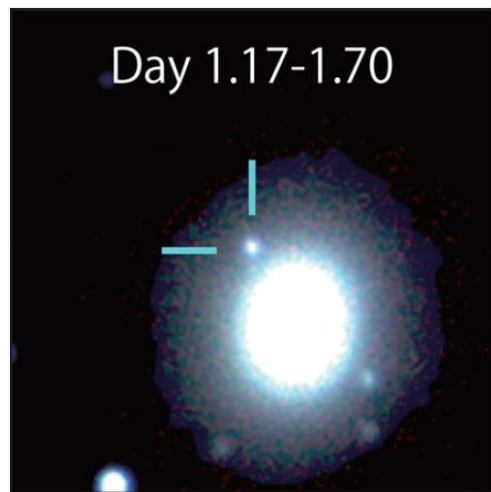


# AT 2017gfo

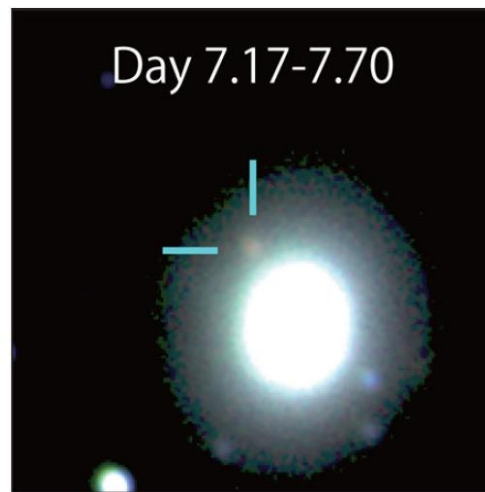
0.05太陽質量程度の放出があれば説明可能

特に後期の赤外線はランタノイドを必要とする

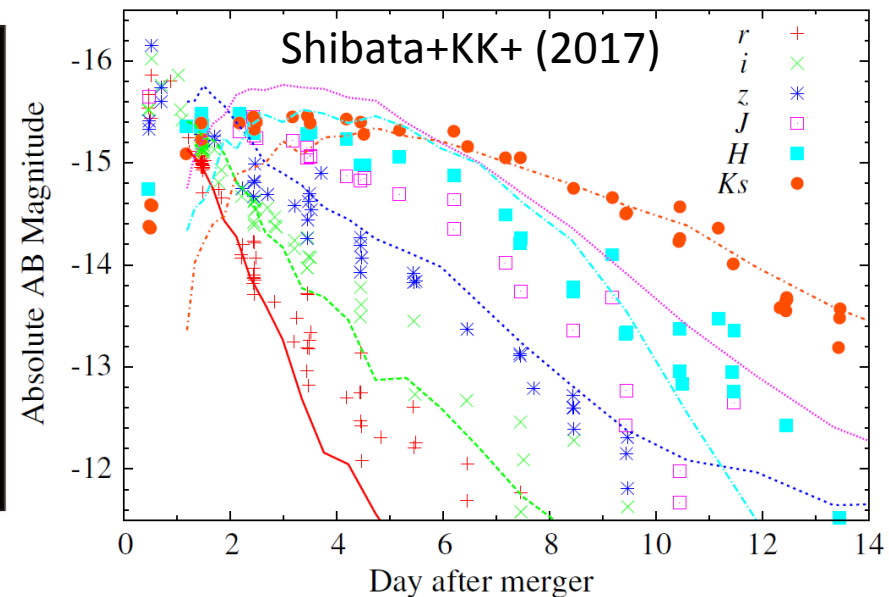
- 理論解釈は信頼性の高低を含め乱立している
- 特に球対称モデルの安易な足し算はかなり疑問



Utsumi+ (2017)



原子核物理でつむぐrプロセス





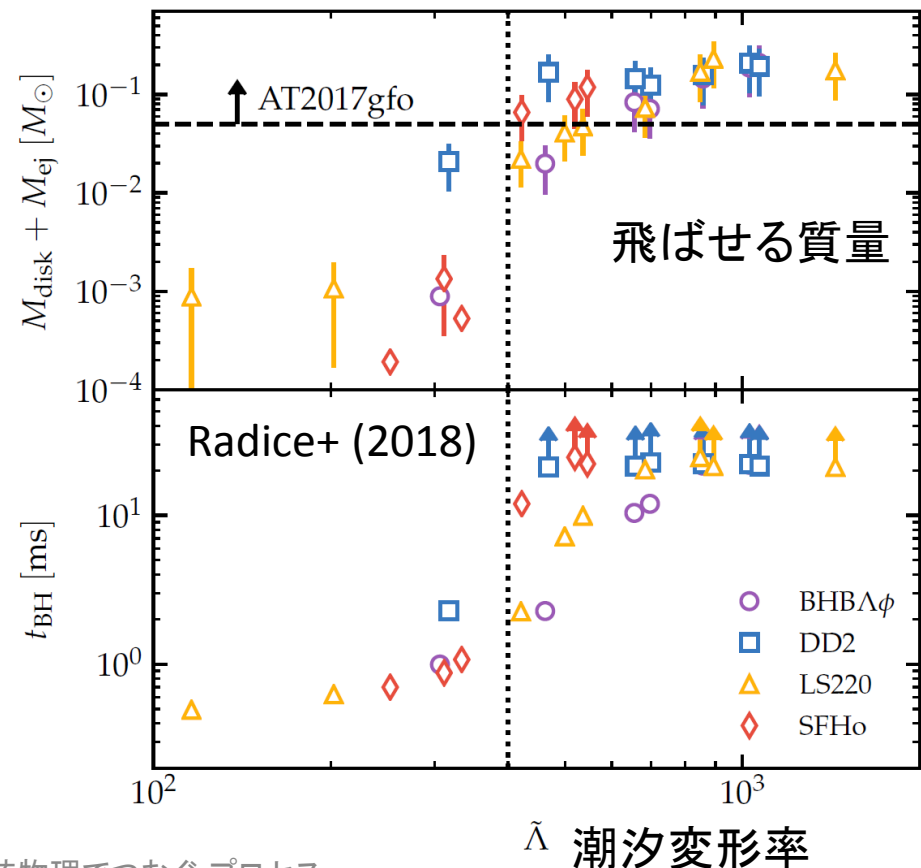
# 潮汐変形率に下限がつく？

AT 2017gfoの明るさを説明する質量を飛ばすには  
潮汐変形率 $>400$ (半径 $\sim 11.5\text{km}$ 以上)という議論が

数値相対論計算に  
基づいてなされた

重力波の下限は緩く  
本当だったら面白い

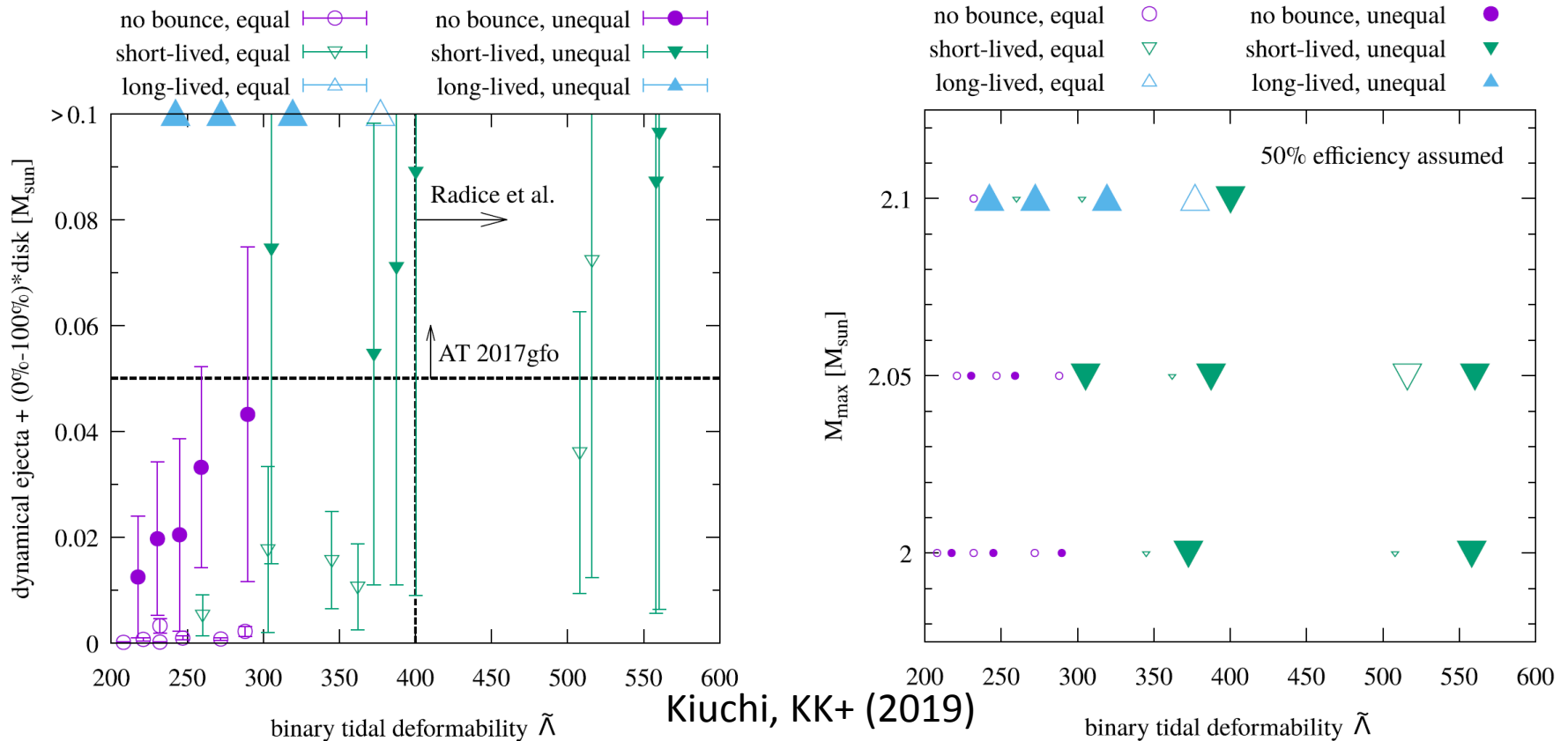
本当？



# 反例

最大質量が大きく、非対称な連星なら問題ない

中性子星の物理(状態方程式)の不定性は大きい



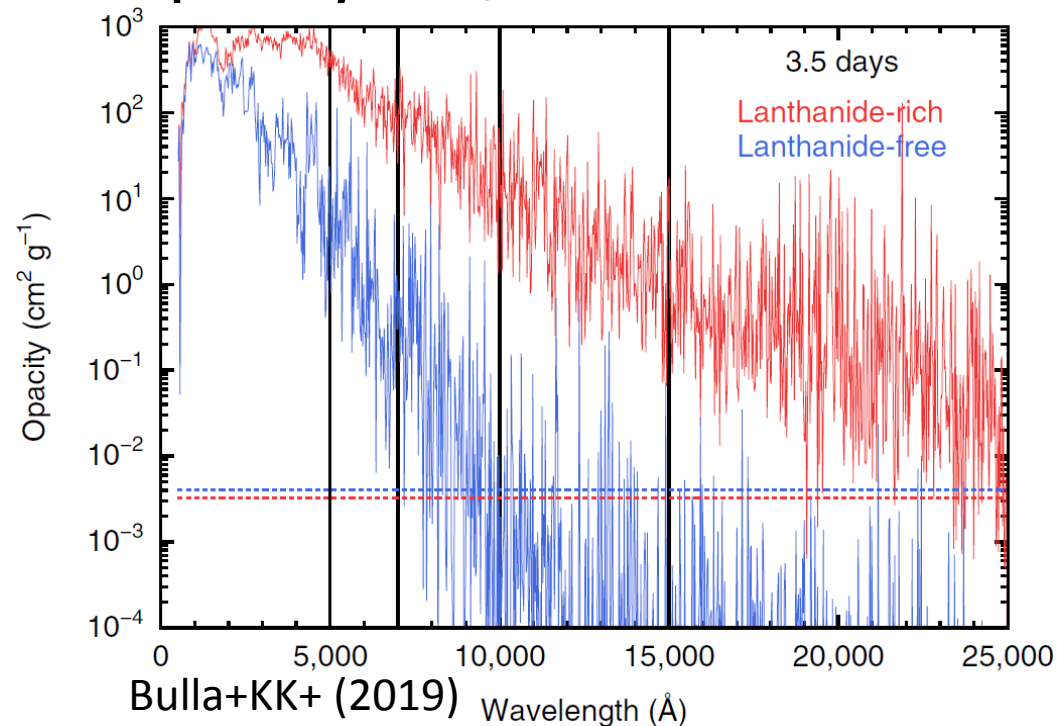
# 気を取り直してキロノヴァ

ランタノイドがどのくらいできているかがかなり重要  
それ次第で光の吸収係数 (opacity) が桁で変わる  
光度やピーク時刻は大体opacityの1/2乗に依存

Electron fraction

$Y_e > 0.25$ だとできない

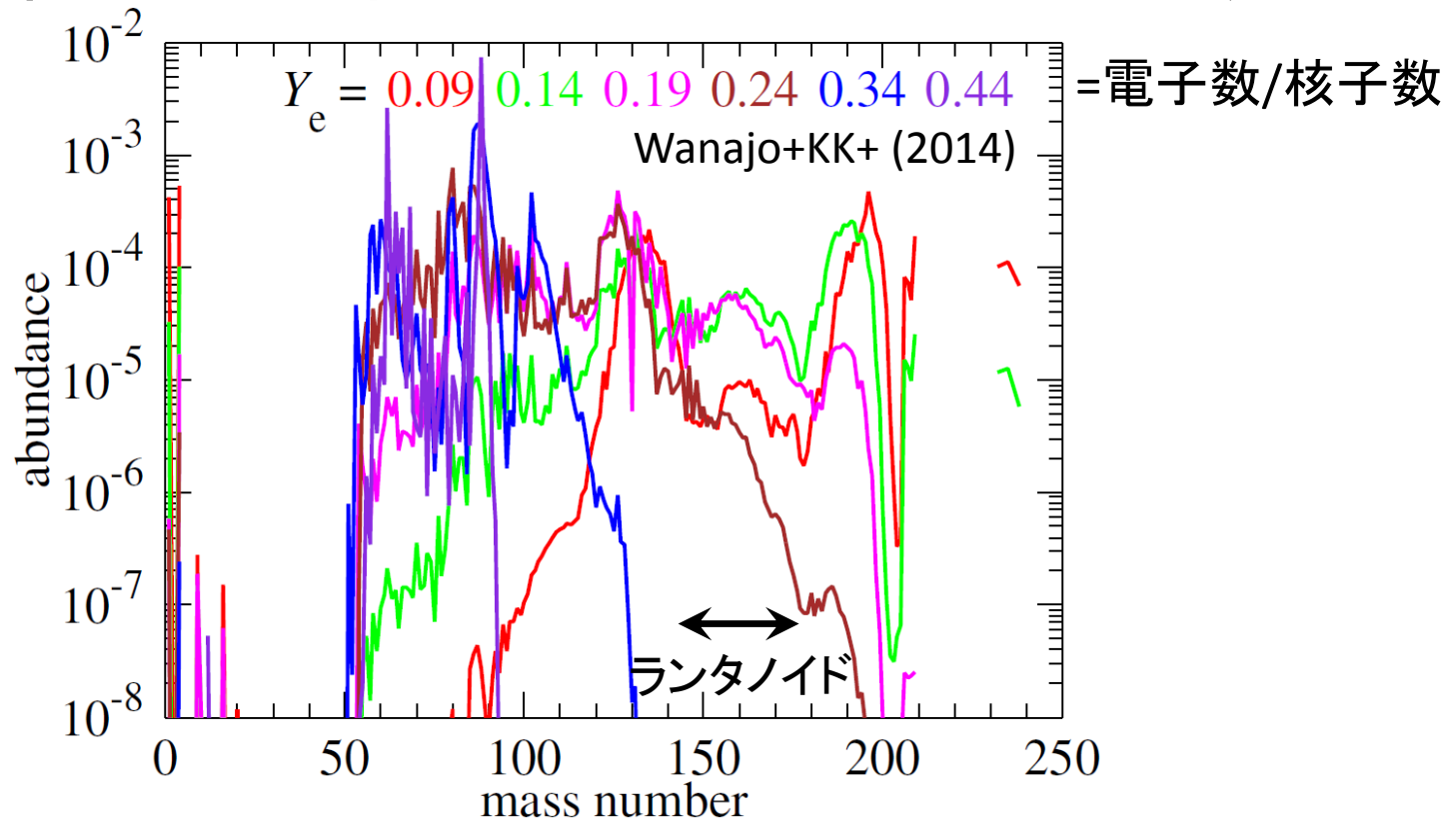
$Y_e < \sim 0.25$ だとできる



# 元素合成

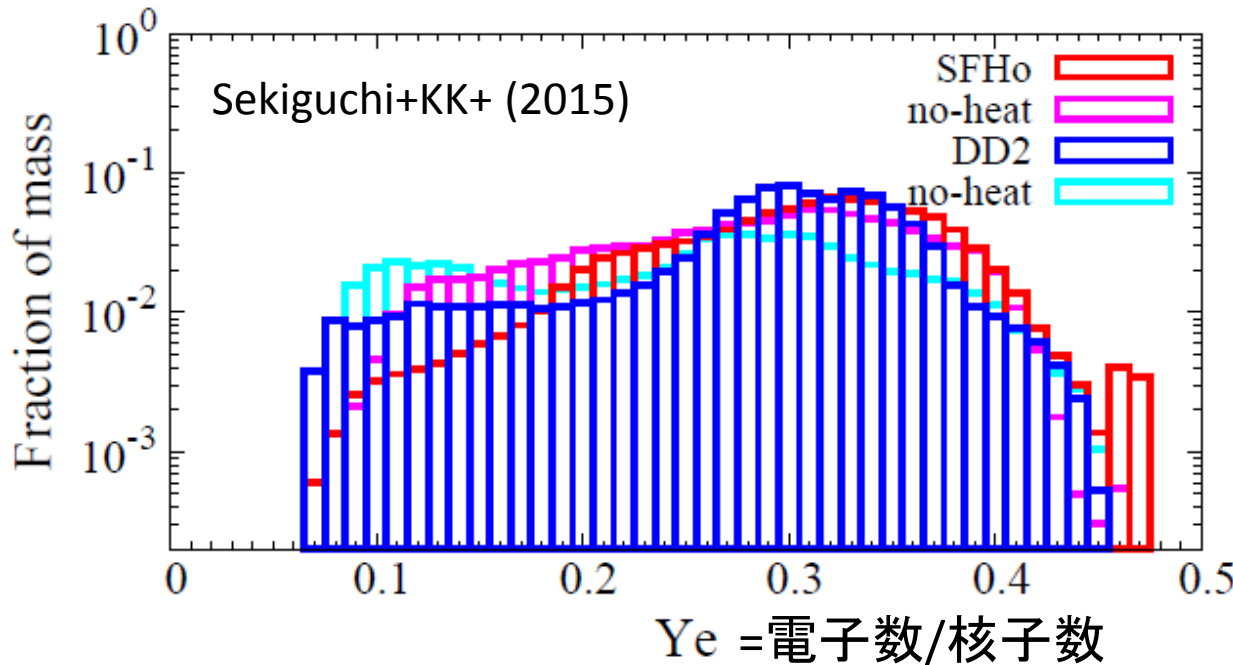
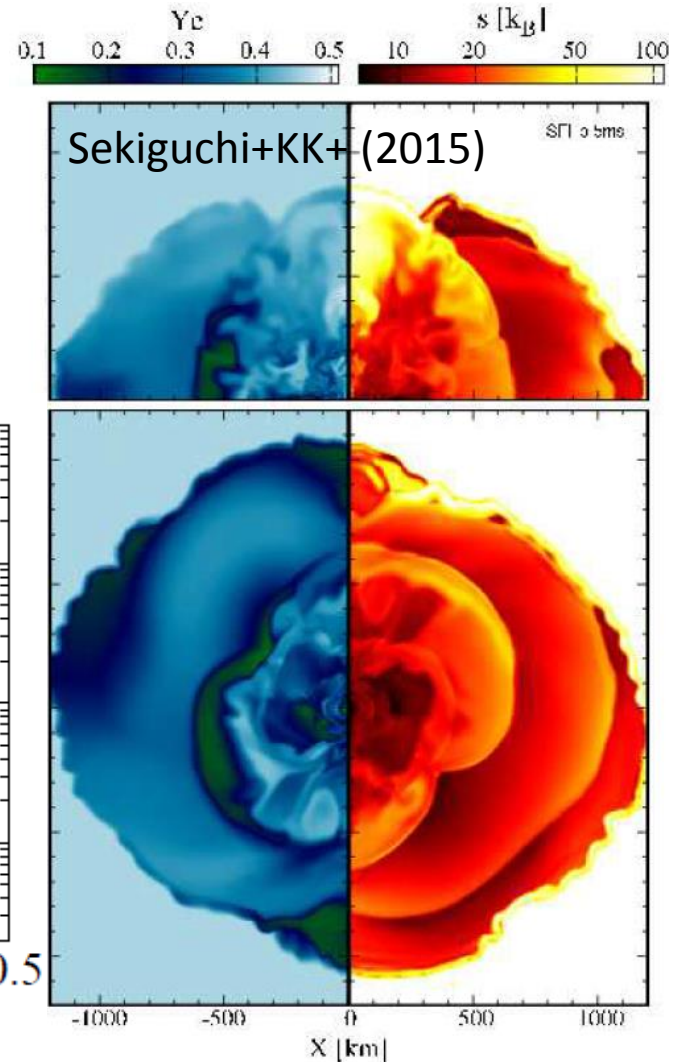
Electron fraction  $Y_e = n_p / (n_p + n_n)$  が重要

連星合体でのr過程元素合成はほぼこれで決まる



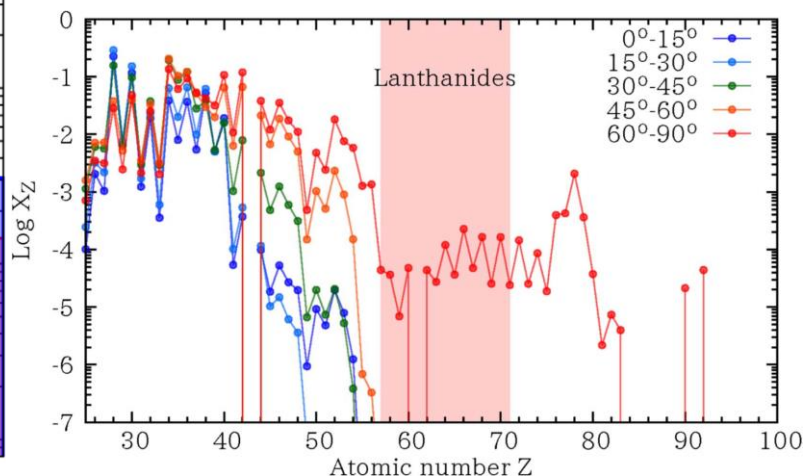
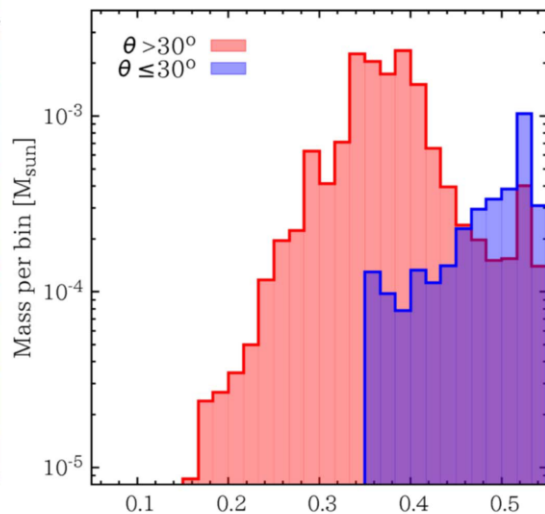
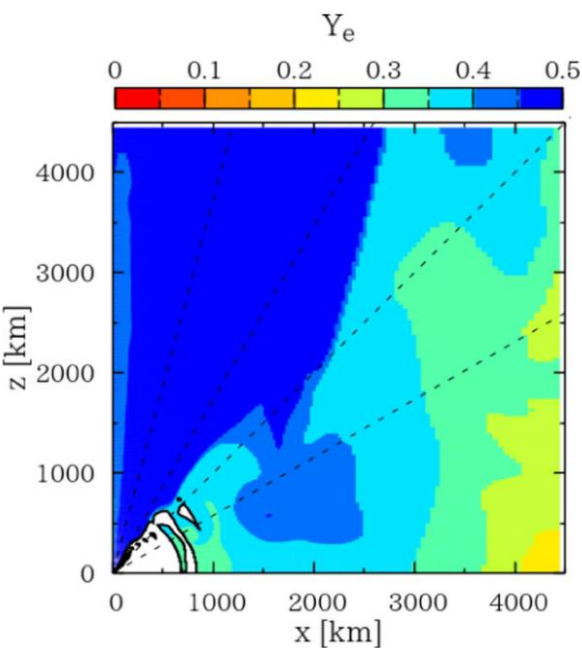
# 力学的質量放出

幅広い中性子過剰度の物質が合体時の衝撃波や潮汐力で太陽質量の~1%が飛ばされる



# 合体後の質量放出

赤道面では中性子過剰、極ではそこまですでもない  
- ニュートリノ照射が極方向で特に強いため  
とはいえ赤道面でも軽い元素がそれなりにできる



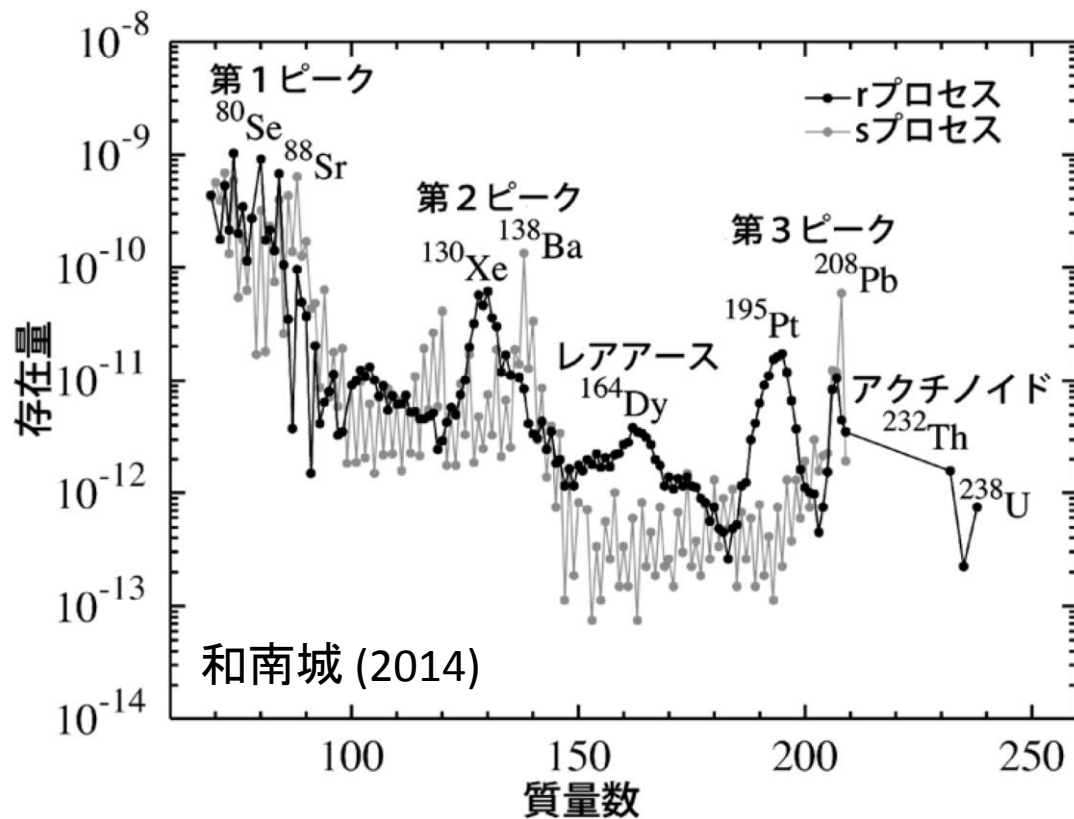
$Y_e$  = 電子数/核子数

Fujibayashi+ (2018)

# 超新星爆発との違い

多種類の元素・原子核が関与する

- 超新星なら主な熱源はNi->Co->Fe



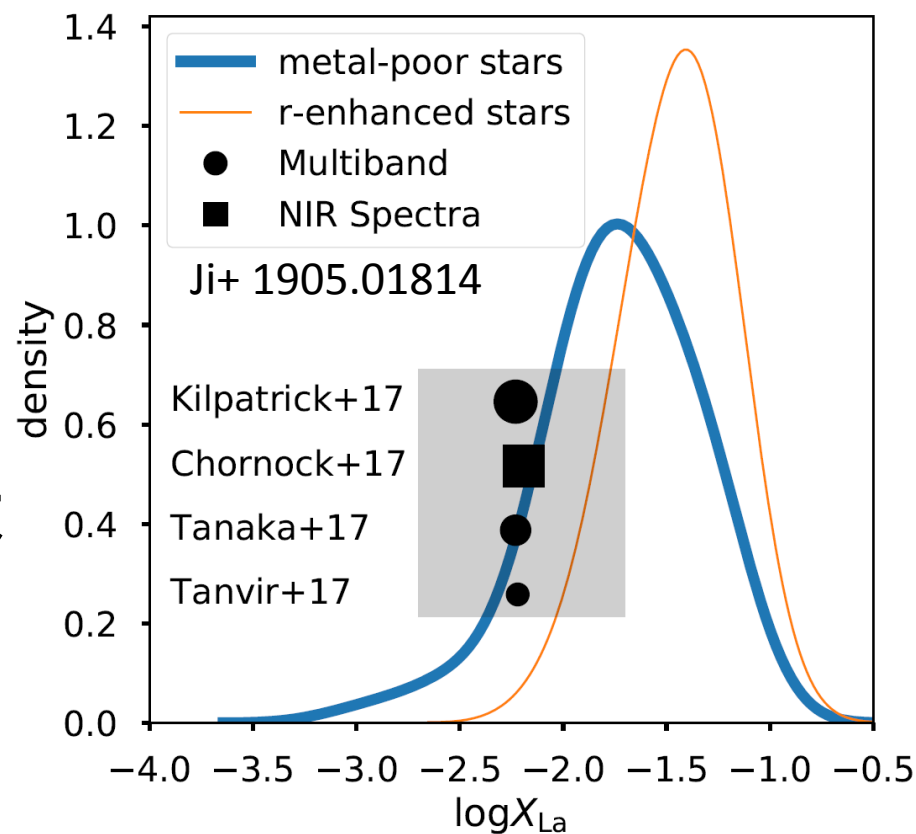
熱源は基本的に  
多核種の混合  
凡そ冪乗で減衰  
opacityは様々な  
元素が関与し、  
ランタノイドが重要

# ランタノイドが足りない？

AT 2017gfoにより示唆されるランタノイド組成比は  
金属欠乏星の典型的な値よりも少ない？

r過程過剰星とはもった？

キロノヴァにも星観測にも  
不定性は極めて大きい  
が比較するための量としては  
可能な部類かもしれない

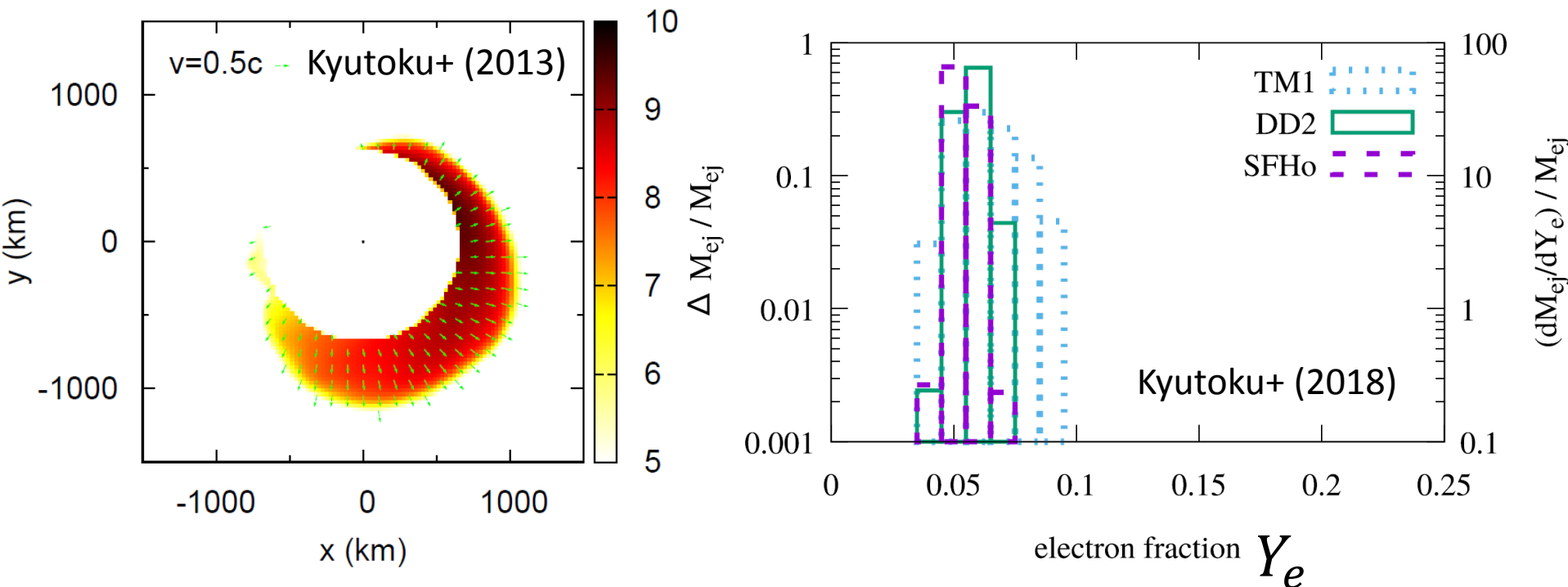




# 3. 今後に期待 されること

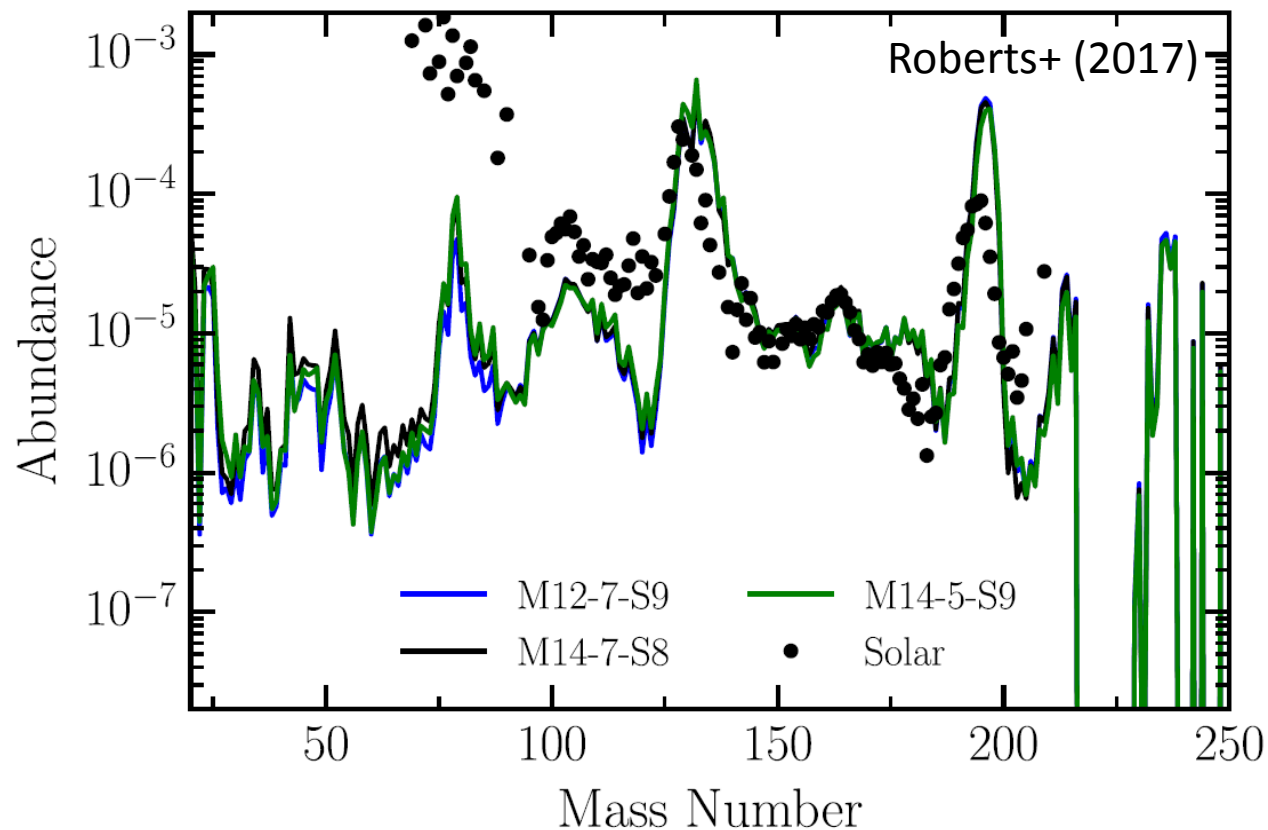
# ブラックホール・中性子星連星

連星が非対称なので、質量放出も非対称に進む  
衝撃波が効かないのでは $Y_e$ は低いまま



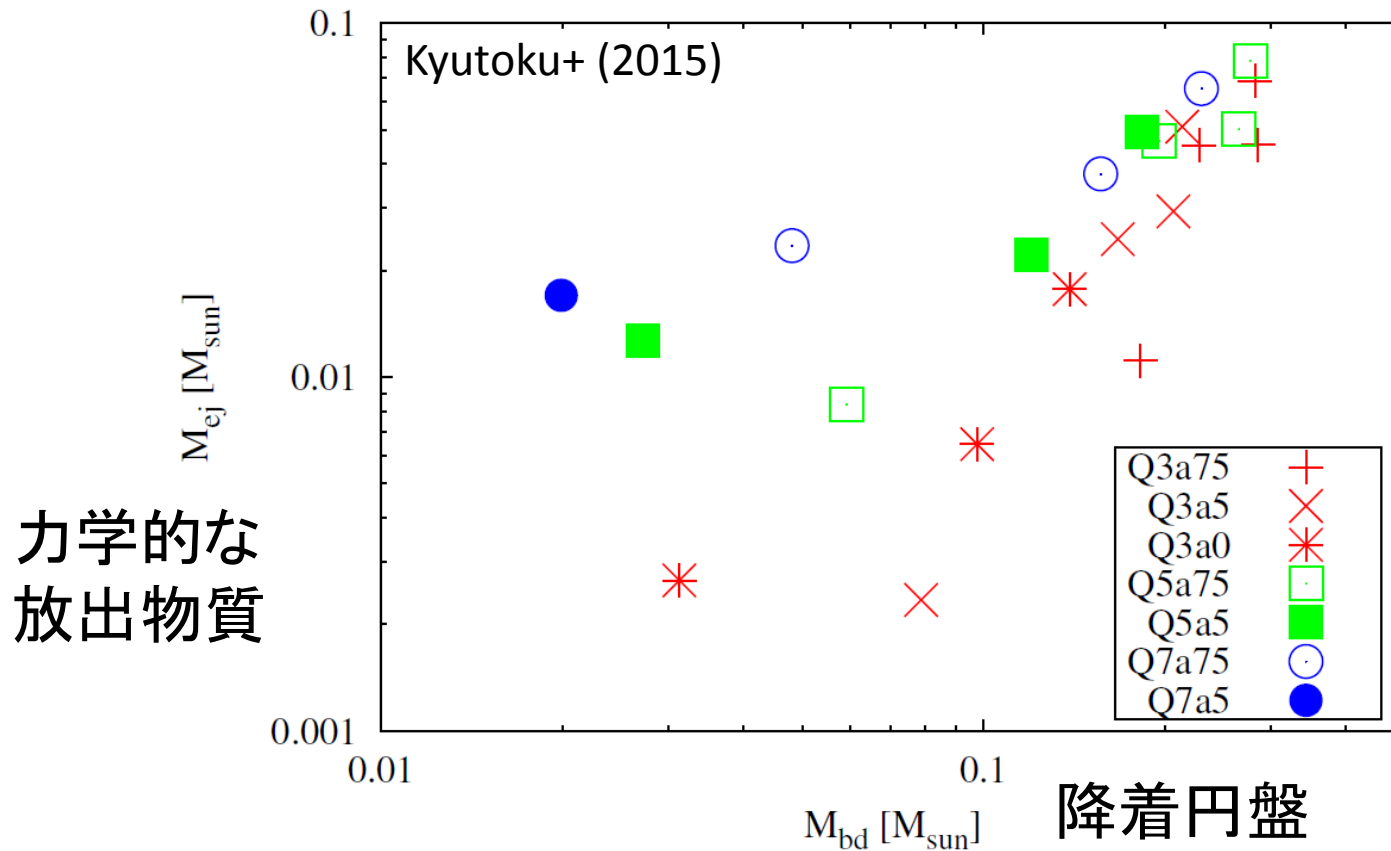
# 予想される元素合成パターン

核分裂サイクルが効き、2nd/3rdピークができそう  
- 最終的には降着円盤からの物質と重ね合わせ



# 力学的質量放出 vs 降着円盤

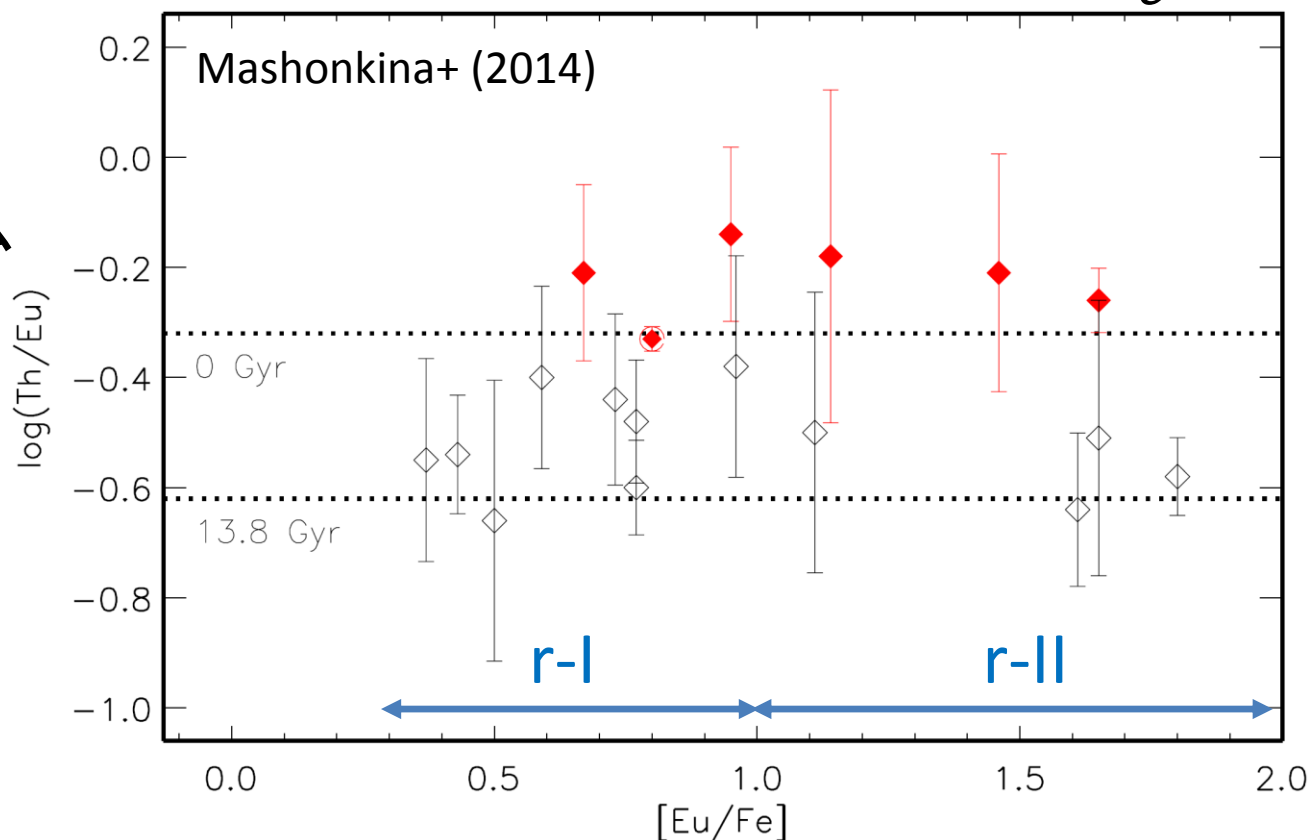
ブラックホールがそこそこ重い場合は(要スピン)  
力学的には物質を飛ばしても降着円盤が少なめ



# アクチノイドブースト？

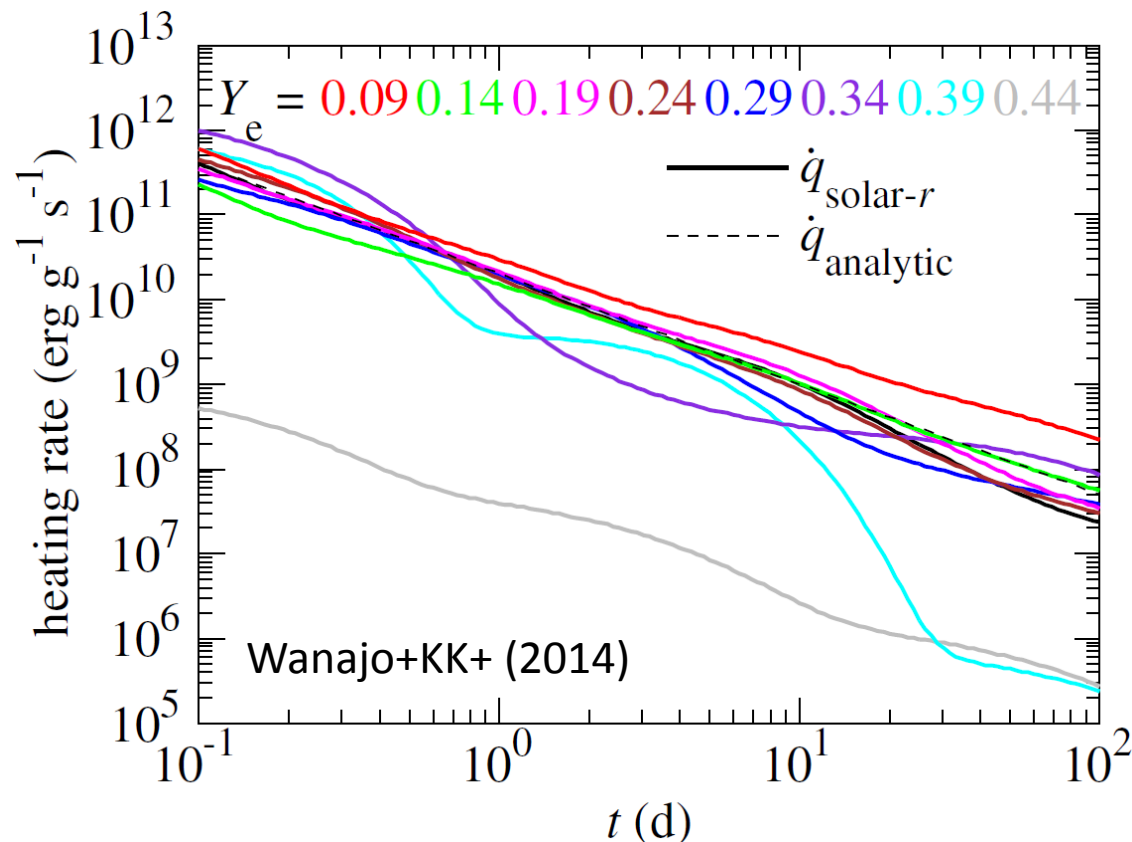
r過程超過星の中にはアクチノイドが多いものも  
ブラックホール・中性子星連星のlow  $Y_e$  由来？

トリウム  
Z=90



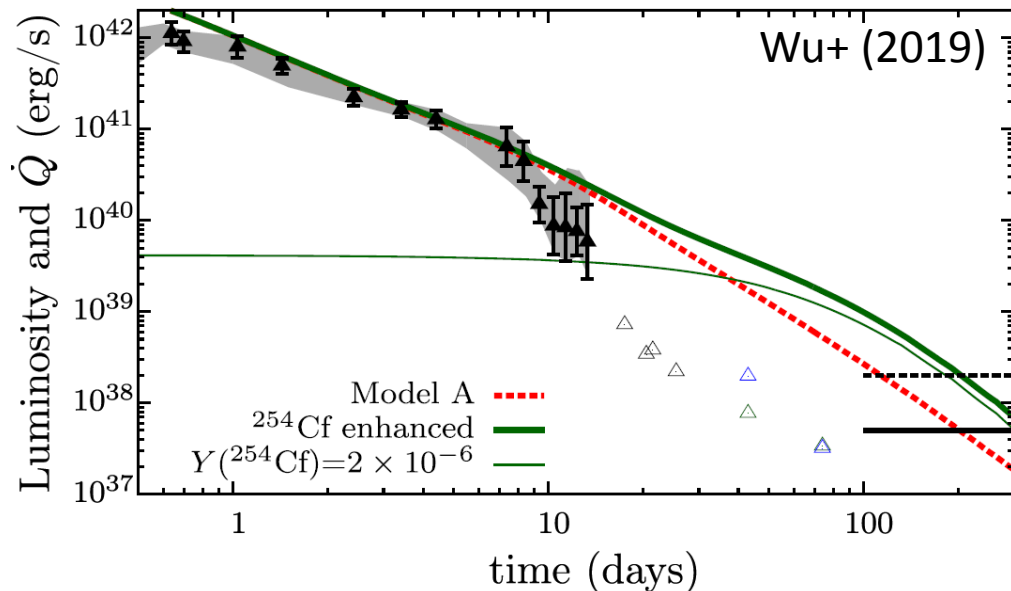
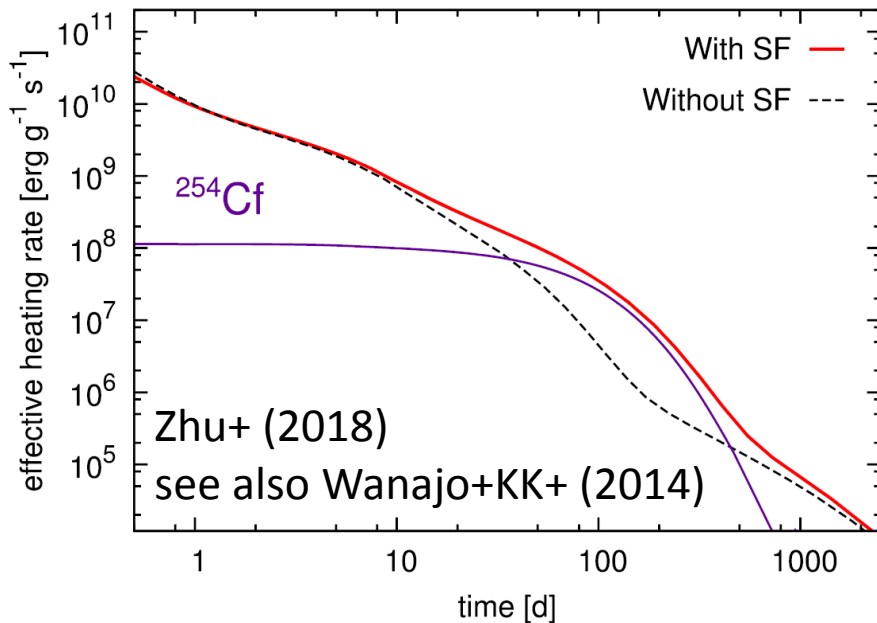
# 熱源としての特性

Opacityよりも個別核種の性質が見えやすいだろう  
特に後期のキロノヴァ光度は熱源を直接的に反映



# Cf254の自発核分裂

半減期60.5日と長い間熱源として寄与しうる  
Yeが低い場合にはそれなりに効くかもしれない  
- Fm258からの $\alpha$ 崩壊があるかなどが不定性



# translead元素の $\alpha$ 崩壊

Translead元素が多ければ  
後期まで光度が持続

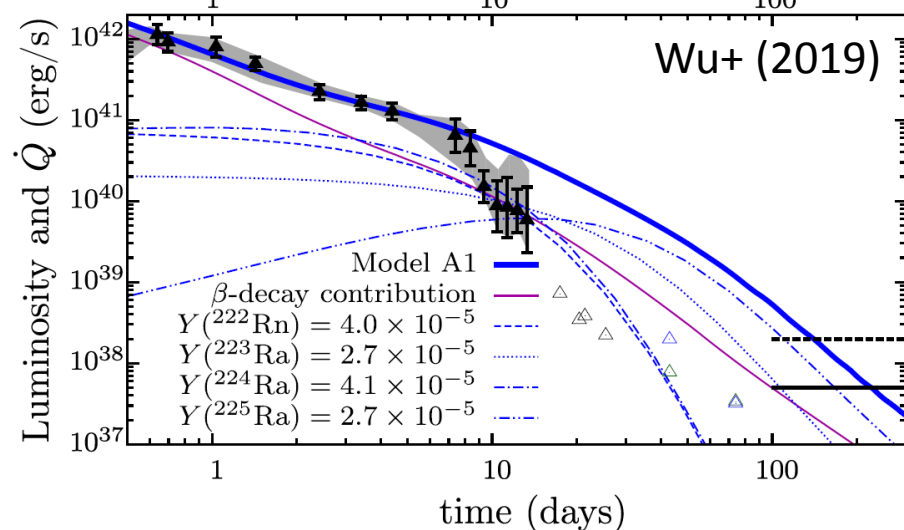
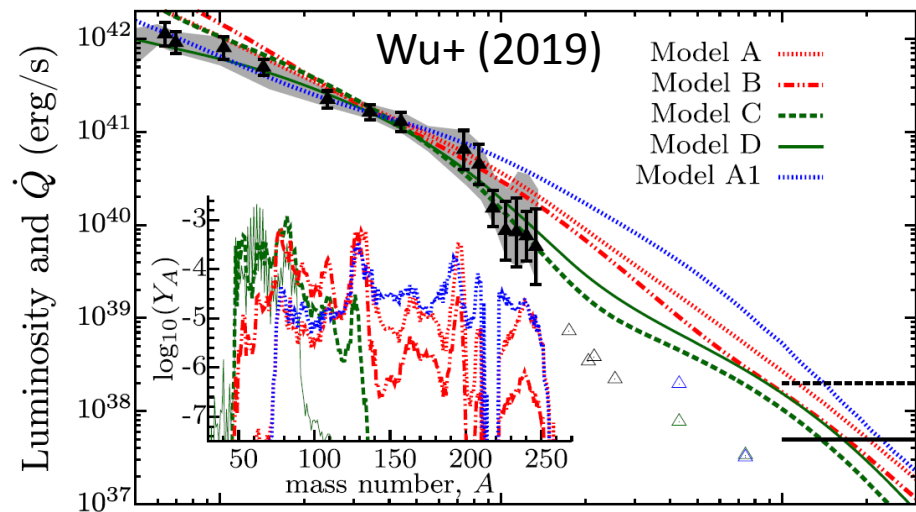
逆に $Y_e > 0.3$ くらいだと

25日以降くらいで

崩壊で核がなくなるため

急激に暗くなる

質量モデルの依存性大



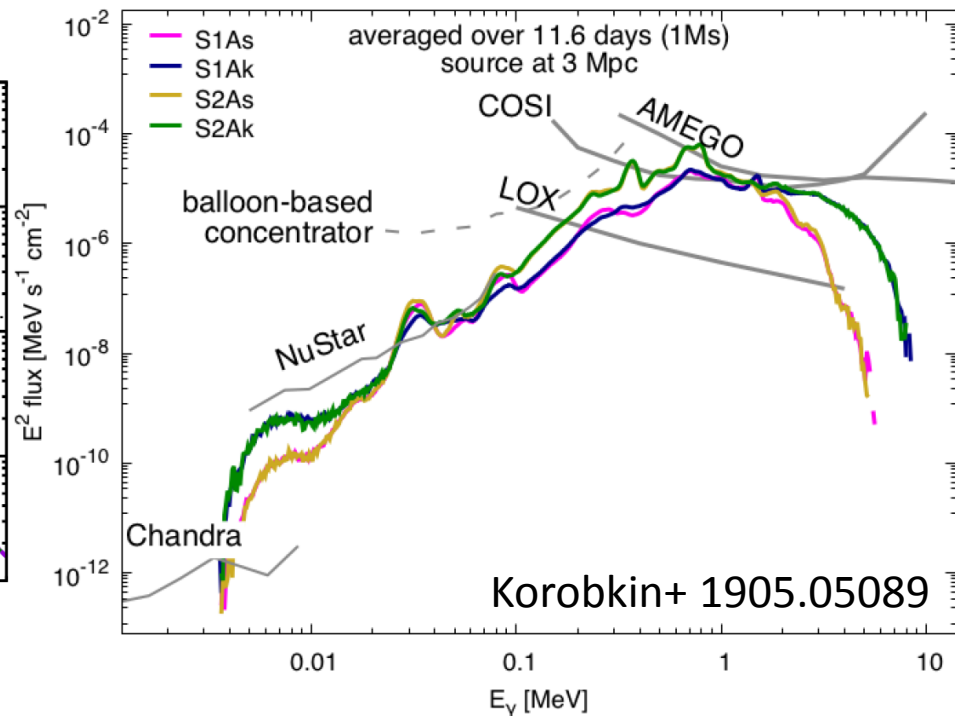
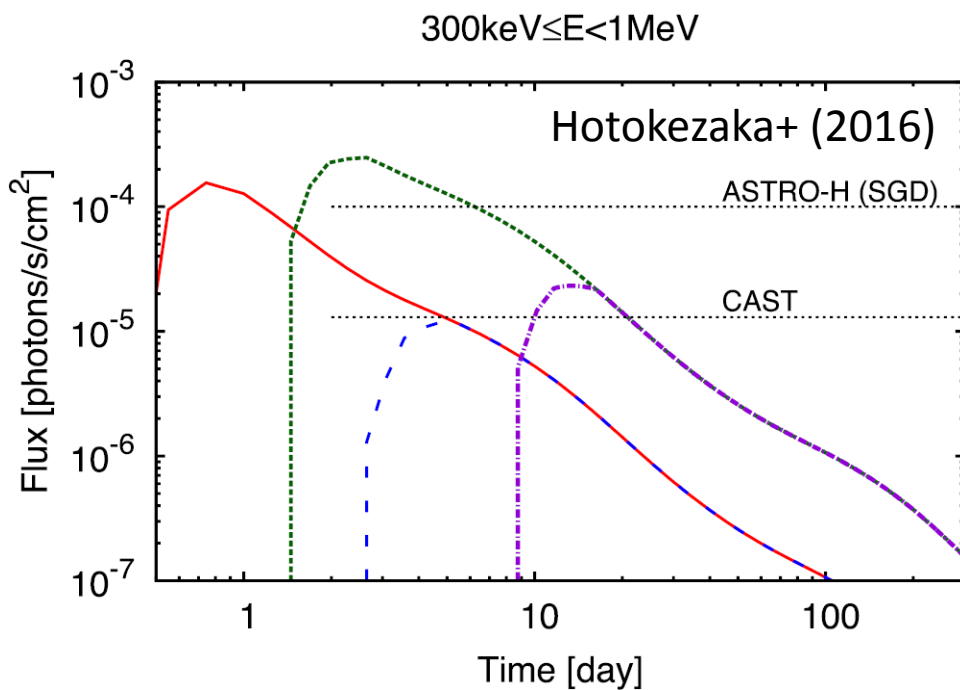


# キロノヴァからの核ガンマ線

原理的には $\beta$ 崩壊などのガンマ線が抜けてくる

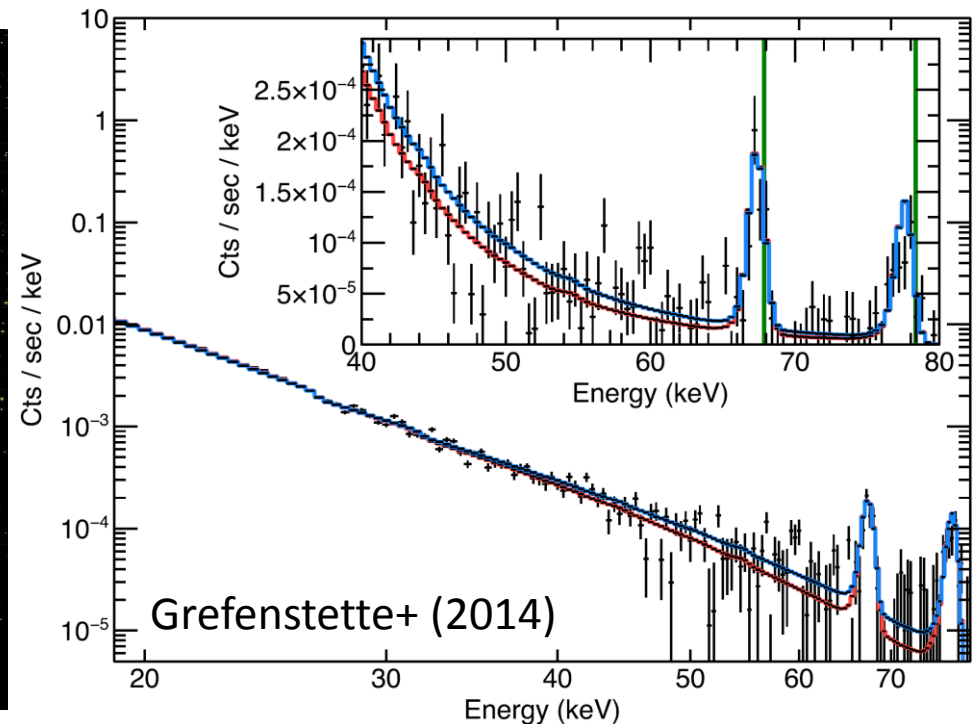
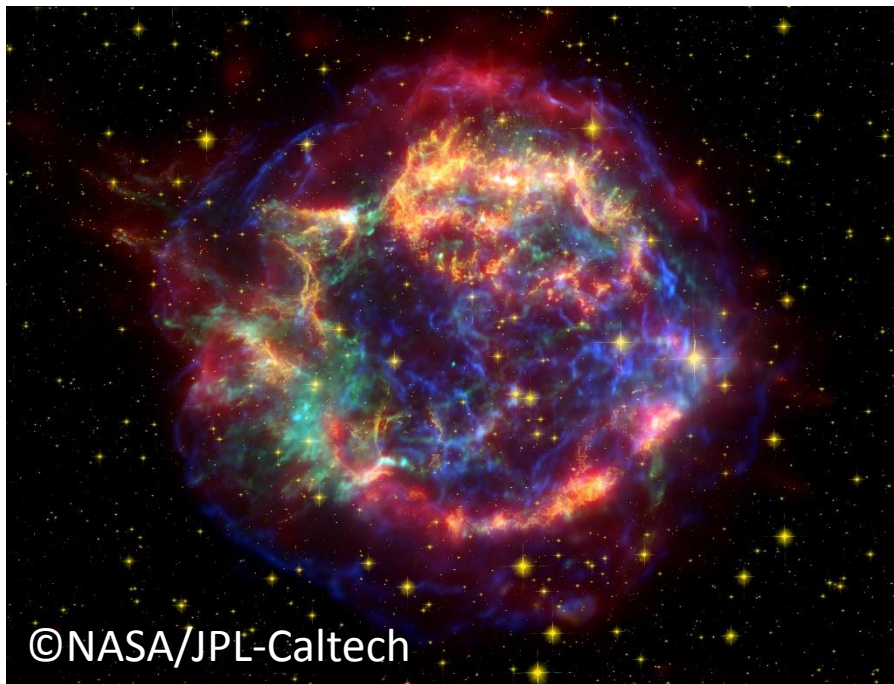
3Mpcくらいなら見えてもいい＝現実的にno chance

- Doppler broadeningにより核種の同定も困難



# 中性子星連星合体残骸

超新星爆発は長期的には超新星残骸を形成する  
特性X/ガンマ線で核種がわかることも (e.g. Ti44)  
同様に銀河系内には連星合体の残骸もいるはず



# 狙い目の年齢

宇宙における連星中性子星の合体率

$$\sim 0.1 - 1 \text{Mpc}^{-3} \text{Myr}^{-1}$$

- LIGO O2 (GW170817)ではもう少し高めの推定

天の川銀河くらいの銀河の密度  $\sim 0.01 \text{Mpc}^{-3}$

10,000~100,000年に一回合体 [cf. Kyutoku+ 2019]

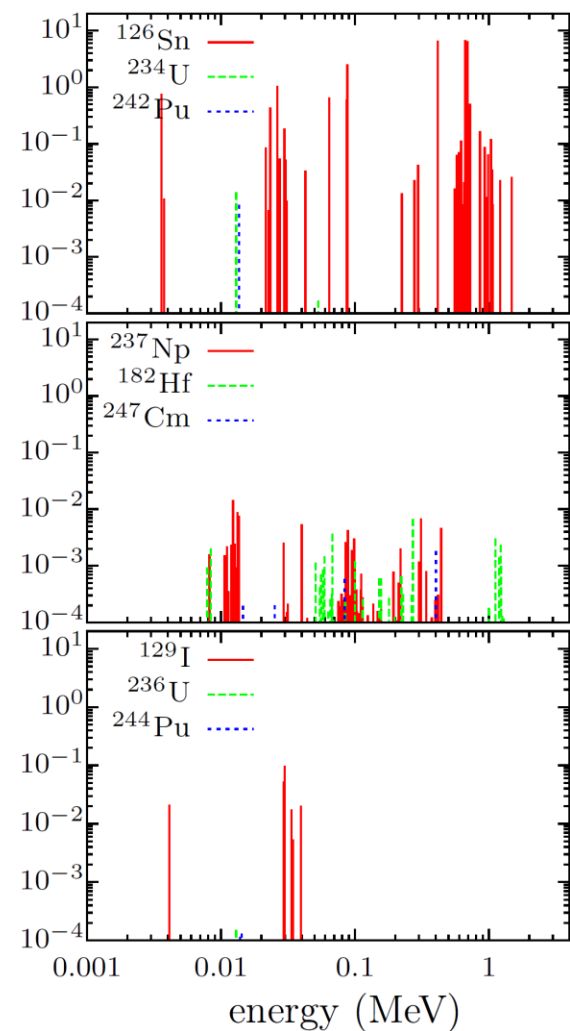
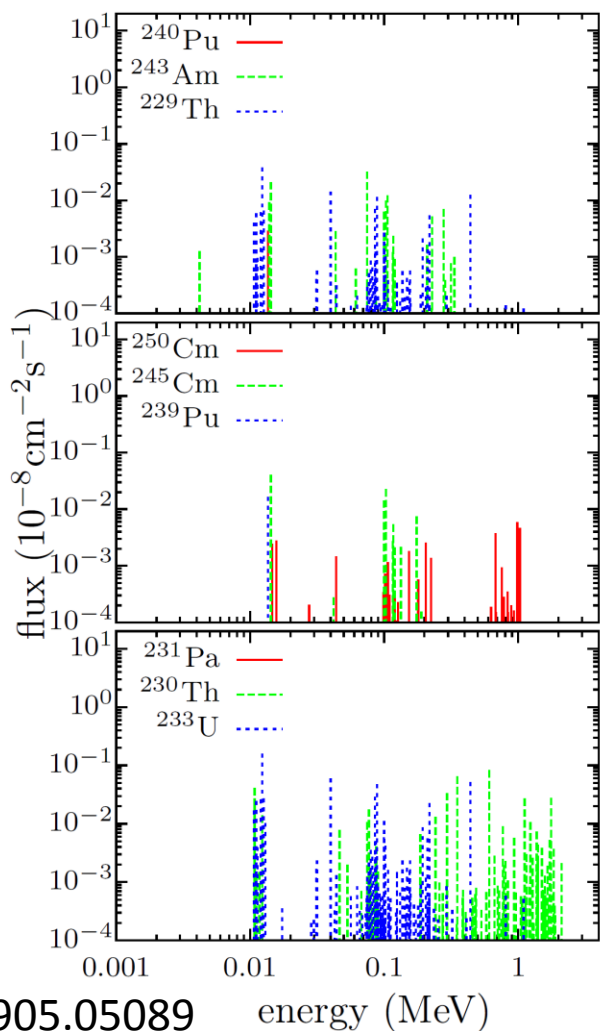
このくらいの寿命で崩壊してくれる核種が重要

# 期待される崩壊核種

Sn126が重要そう  
Sn->Sb->Teにより  
415, 666, 695keV  
Th230などの  
超重核も探せる  
詳細は詰める  
余地がありそう

Wu+ 1905.03793

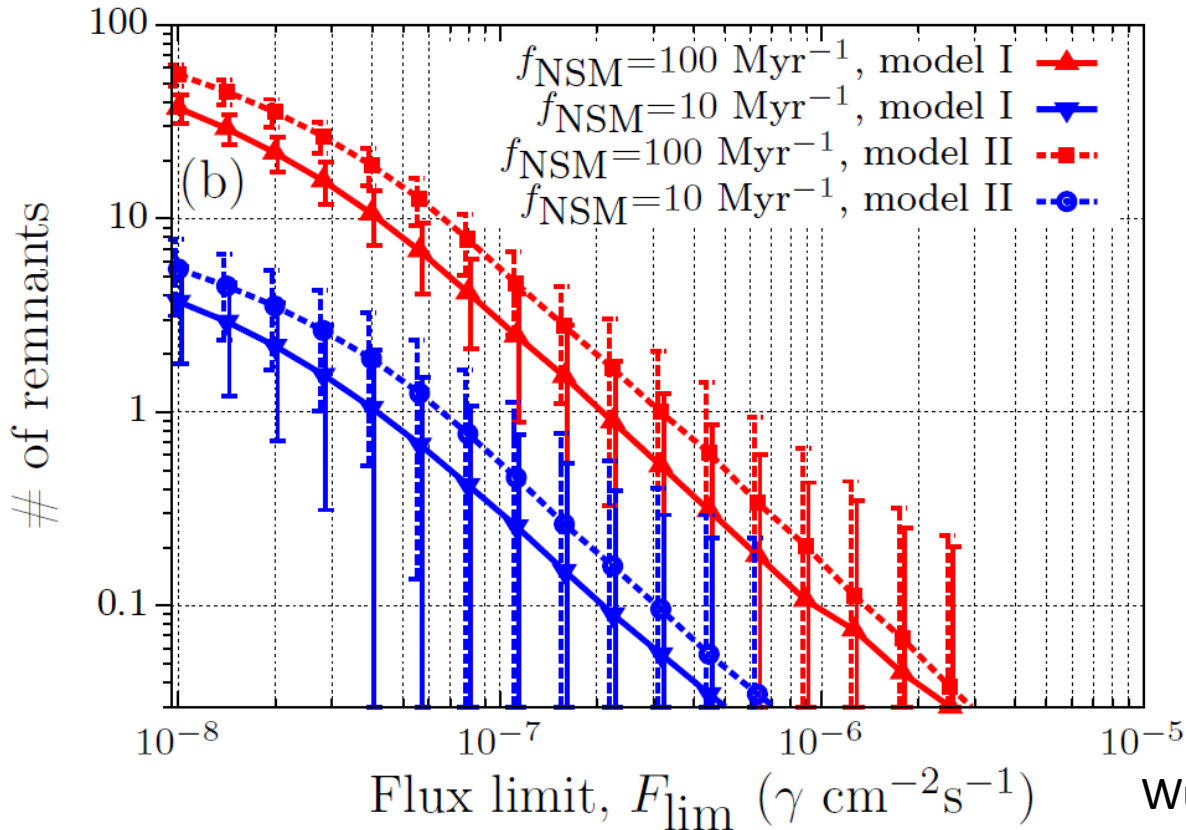
see also Korobkin+ 1905.05089



# 必要な検出器の感度

$10^{-7} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ くらい感度があると見えそう

- 次世代計画が狙っている程度の感度とのこと

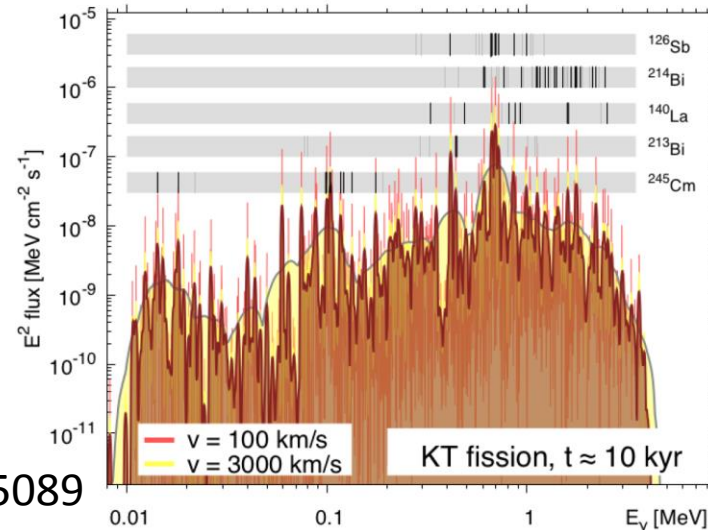
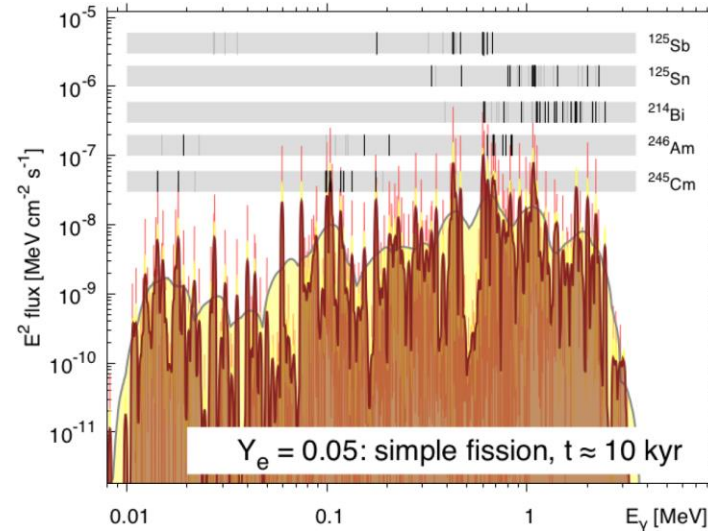


Wu+ 1905.03793

# 原子核物理への依存性

中性子過剰でfission cyclingが走り、超重核が多くできる場合  
詳細は核分裂モデルに依存  
もしこういう残骸が見つければ  
重r元素への知見に結びつく

連星合体だと言うのはまた別...



Korobkin+ 1905.05089

# 4. まとめ

# まとめ

- 連星中性子星合体で潮汐変形率が測られると状態方程式に制限がつくが、キロノヴァによって制限をつけようという話は筋が悪い
- キロノヴァAT 2017gfoからランタノイドはありそうだが定量的に金属欠乏星を賄えるかは未解明
- 超重元素関係では中性子過剰物質を放出するブラックホール・中性子星連星も面白いだろう
- キロノヴァの後期ではCf254の自発核分裂やtransleadの $\alpha$ 崩壊が面白いかもしれない





# Appendix

# シミュレーションで計算できるもの

- 質量

合成されるr過程元素の量(合体率との兼ね合い)  
キロノヴァの明るさ・時間スケールを決める

- 速度

元素合成自体にはマイナー、キロノヴァには重要

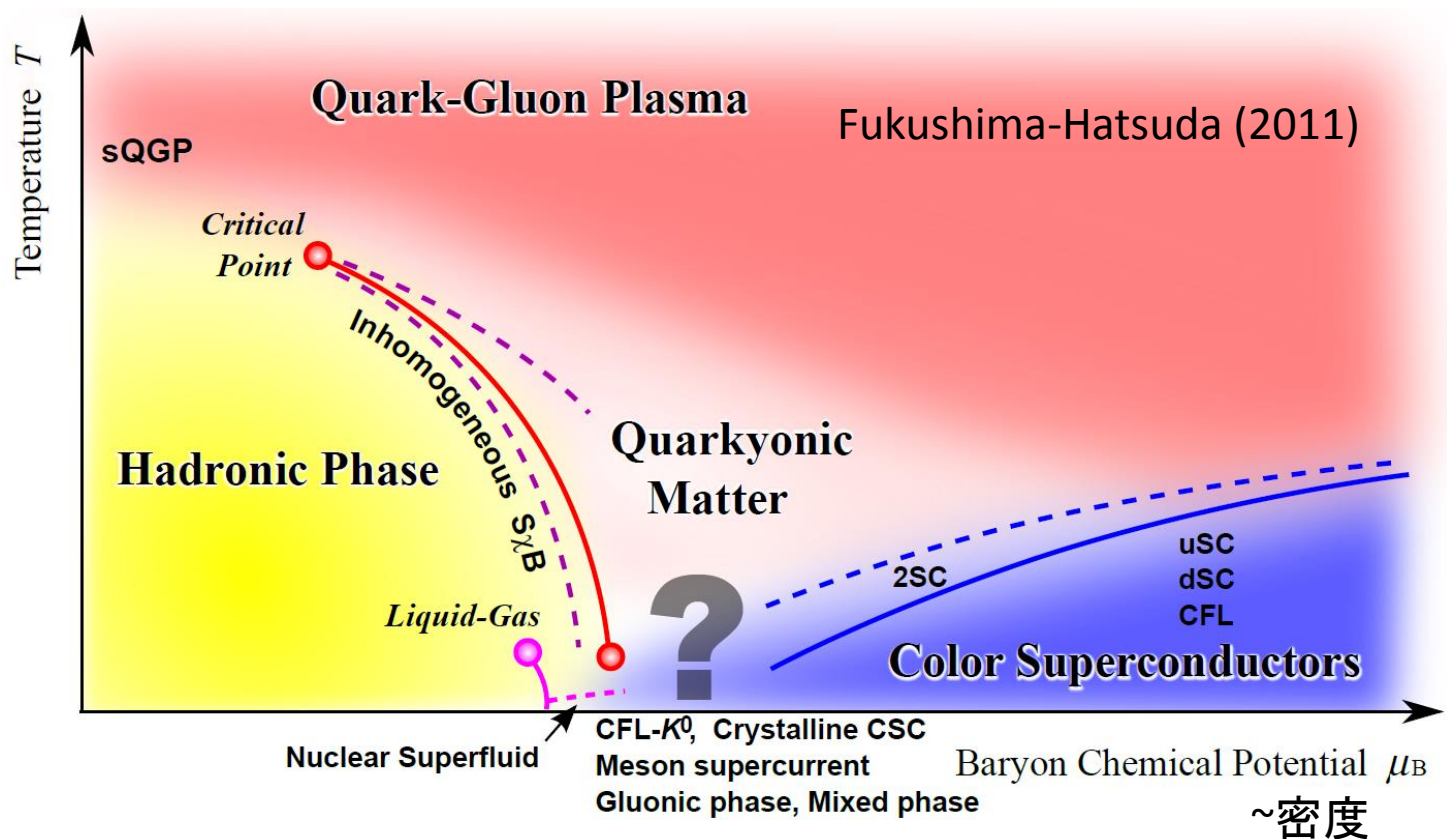
- (逆)中性子過剰度  $Y_e := n_e / (n_p + n_n)$

合成される(r過程)元素の種類を決める

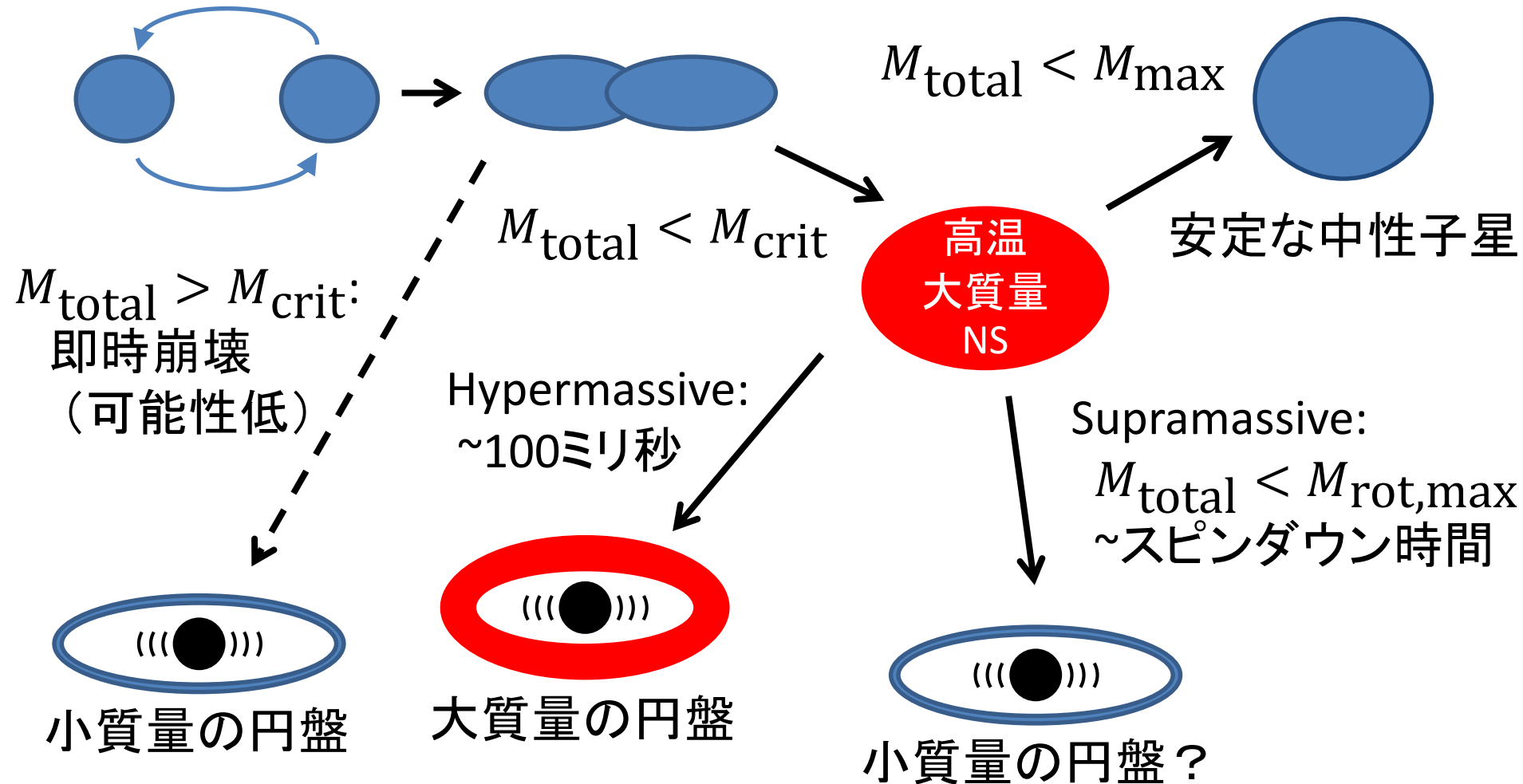
光の吸収係数や熱源を決め、キロノヴァを影響

# 中性子星物質

冷たく、高密度で、中性子過剰...地上で作れない  
さらに $\sim 10^{17}$  G ( $10^{13}$  T)まで磁化していることもある



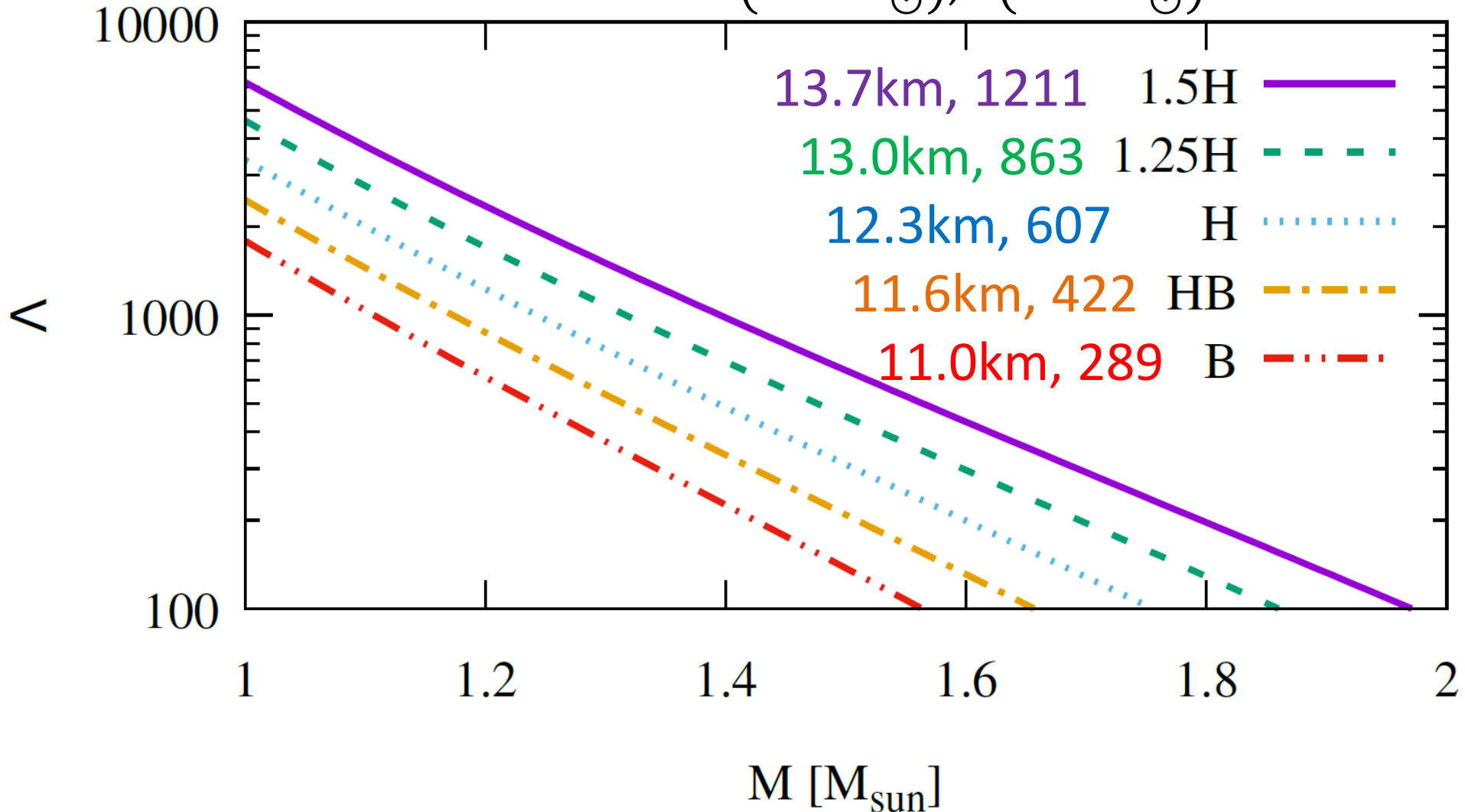
# 連星中性子星の分類



[See e.g., Hotokezaka+KK+ (2013)]

# 質量-潮汐変形率関係

$R(1.35M_{\odot}), \Lambda(1.35M_{\odot})$



# 重要な量

球対称エジェクタなら [Arnett 1982, Li-Paczynski 1998]

$$\text{ピーク光度: } L_{\text{peak}} \propto f \kappa^{-1/2} M^{1/2} v^{1/2}$$

$$\text{ピーク時刻: } t_{\text{peak}} \propto \kappa^{1/2} M^{1/2} v^{-1/2}$$

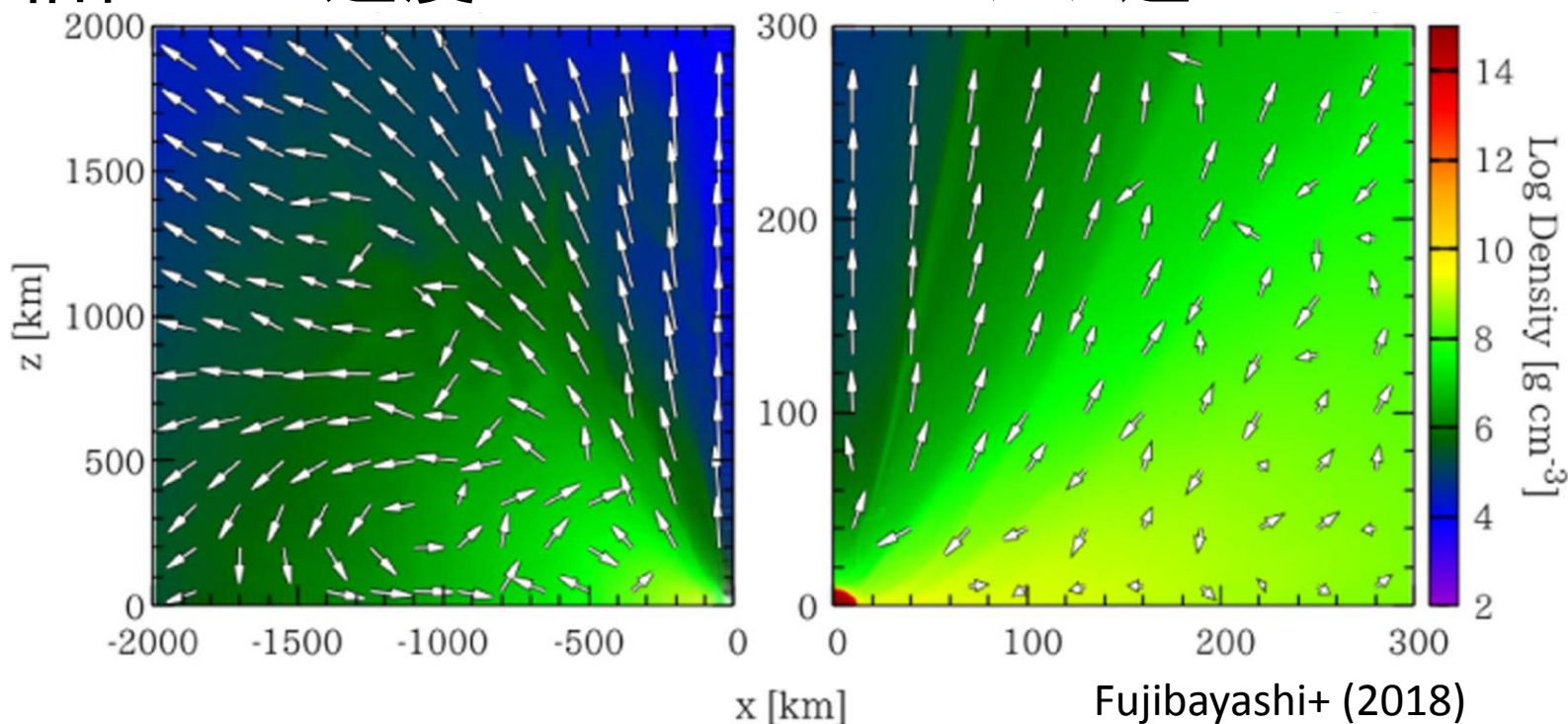
エジェクタ質量 $M$ 、速度 $v$ : 巨視的物理

加熱効率 $f$ 、光の吸収係数 $\kappa$ : 微視的物理

- (逆)中性子過剰度 $Y_e := n_e / (n_p + n_n)$ が重要  
数値相対論シミュレーションなどで求められる

# 合体後の質量放出

磁気乱流由来の粘性が大きな役割を果たしそう  
トーラスの20-40%程度...>0.05太陽質量もあり得る  
 $\alpha$ 粘性では速度は0.05-0.15cとやや遅め

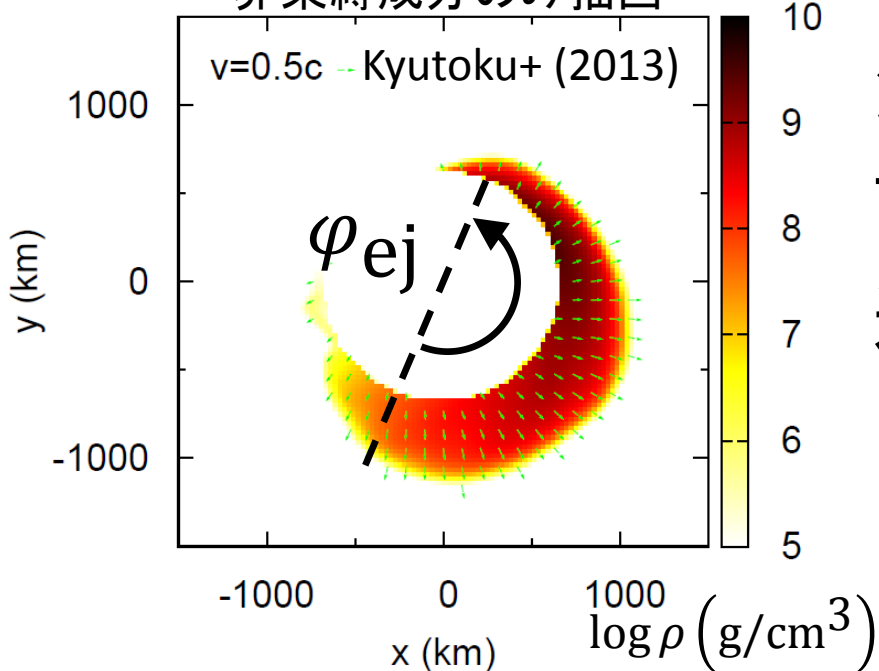


Fujibayashi+ (2018)

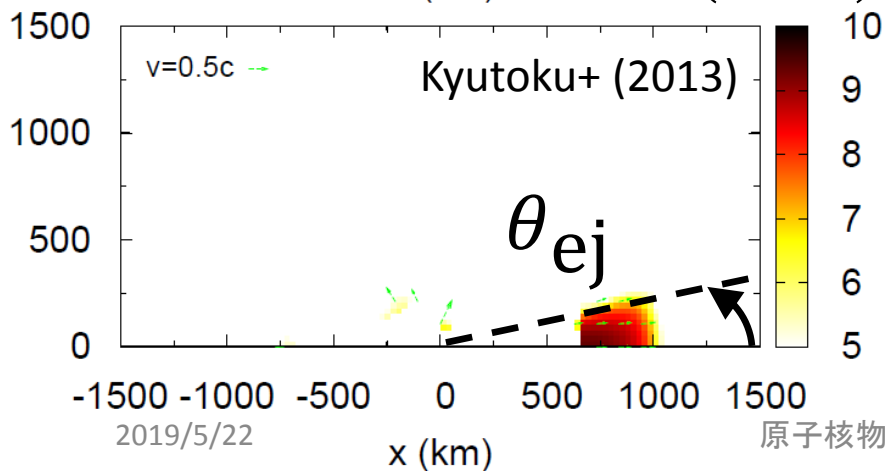


# 力学的質量放出

非束縛成分のみ描画



質量、速度などを系統的に  
計算 [Kyutoku+ 2013,2015]  
連星中性子星とは違って  
非等方性が高いために  
電磁波放射にも違いあり

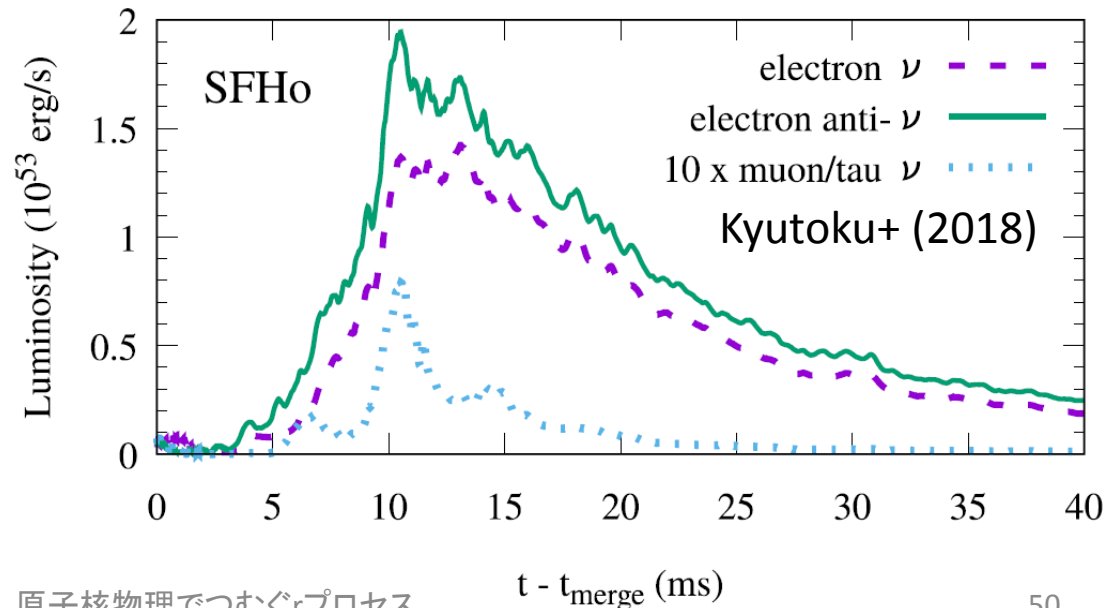
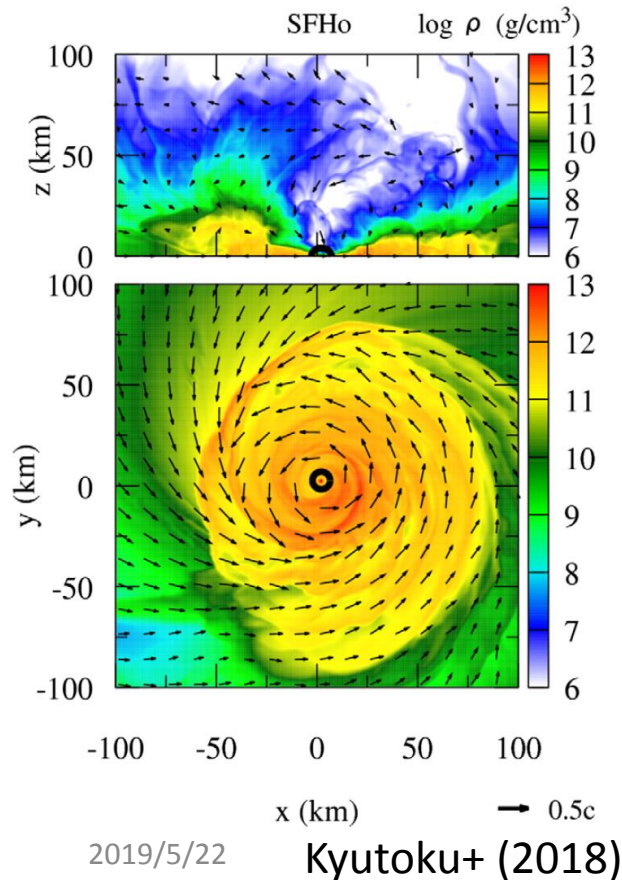


合体後の降着円盤からの  
質量放出は今後の課題

# 降着円盤からのニュートリノ放射

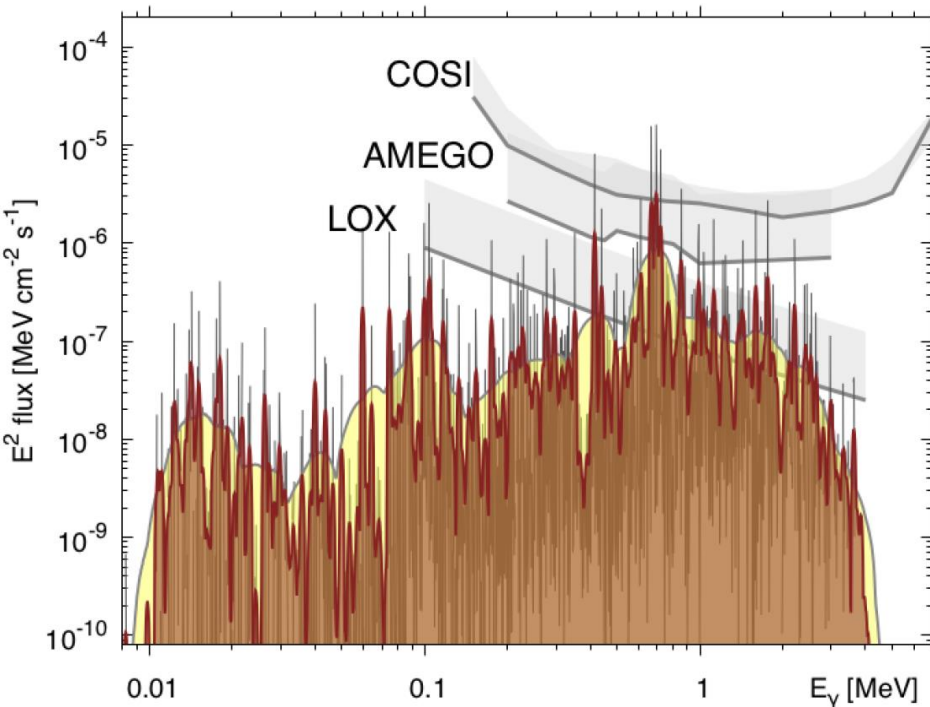
飛ばなかった物質は高温・大質量の降着円盤に  
ニュートリノを放射するが、降着円盤が重ければ

光度が高いというわけでもない  
ガンマ線バーストには磁場が必要



# 系内残骸の観測可能性

low Ye case



Korobkin+ 1905.05089

middle Ye case

