

# 重力波天体からの マルチメッセンジャー

京都大学理学部 天体核研究室  
久徳浩太郎

# 地上重力波検出器ネットワーク

[http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/wp-content/themes/lcgt/images/img\\_abt\\_lcgt.jpg](http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/wp-content/themes/lcgt/images/img_abt_lcgt.jpg)

Advanced LIGO  
(アメリカ・Hanford/Livingston)

<https://www.advancedligo.mit.edu/graphics/summary01.jpg>

KAGRA (日本・神岡)

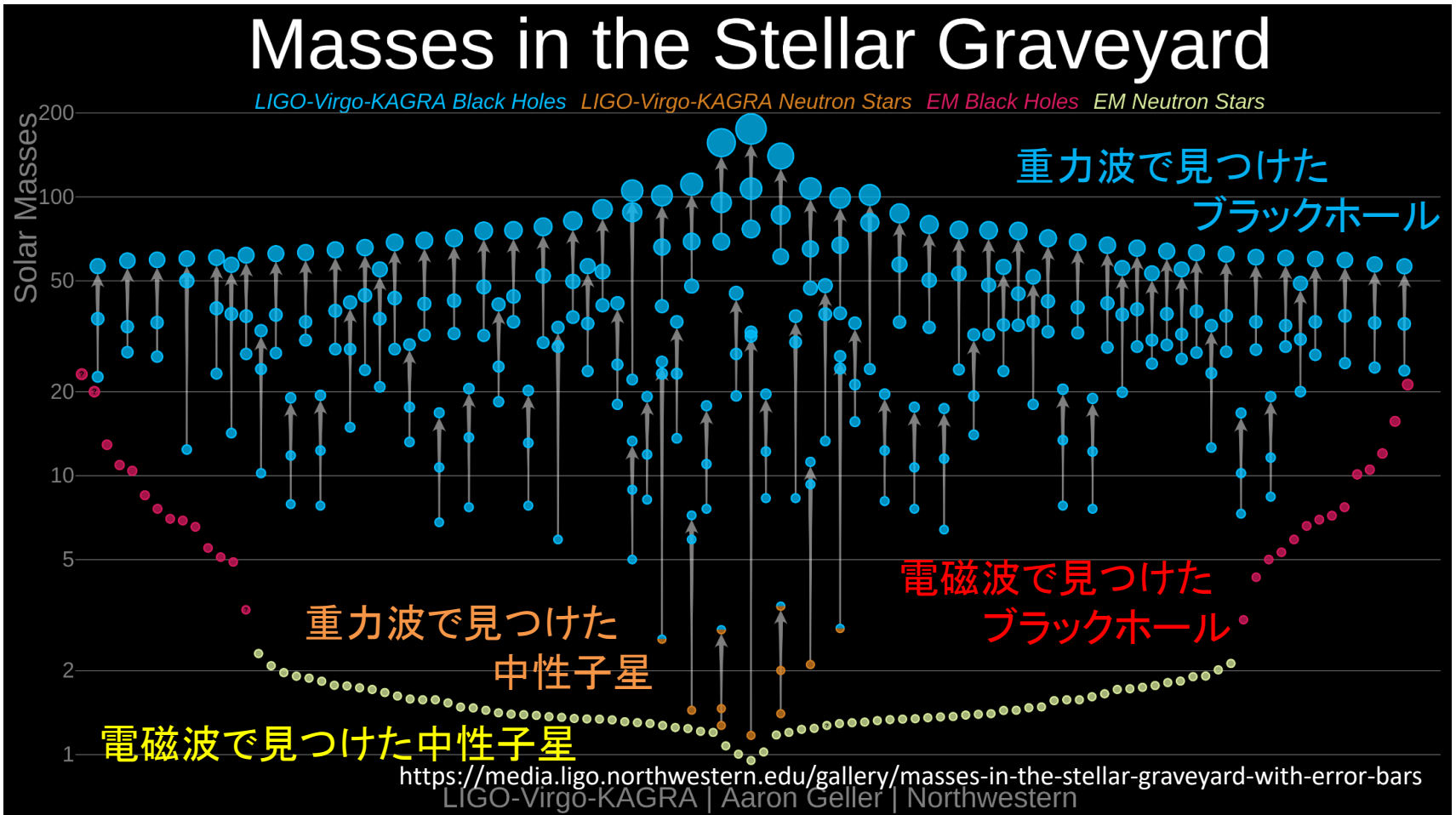


Advanced Virgo  
(ヨーロッパ・イタリアPisa)

<http://virgopisa.df.unipi.it/sites/virgopisa.df.unipi.it.virgopisa/files/banner/virgo.jpg>

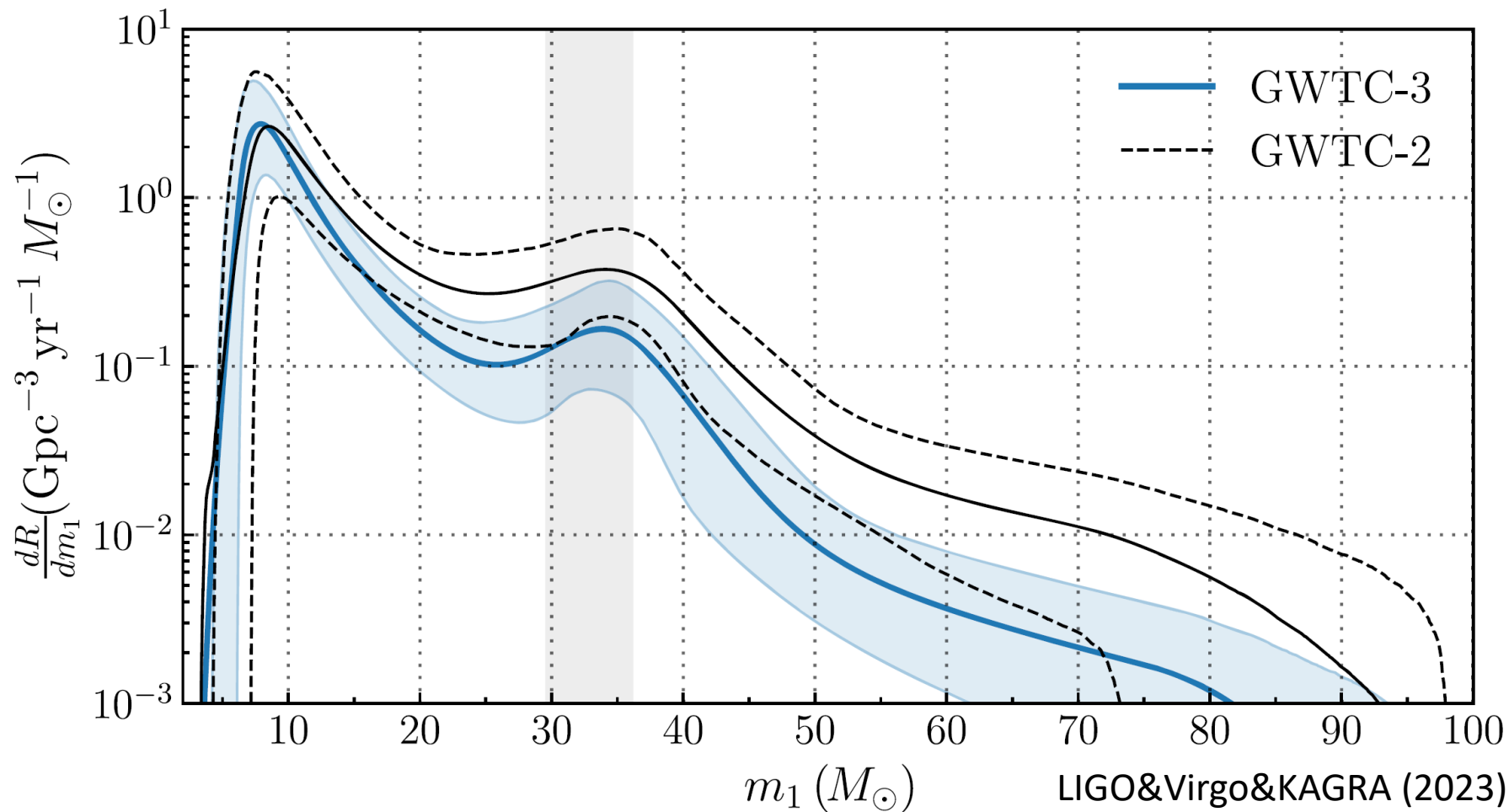
# ブラックホールは重力波で探す時代

恒星質量ブラックホールは日常的に見つかっている



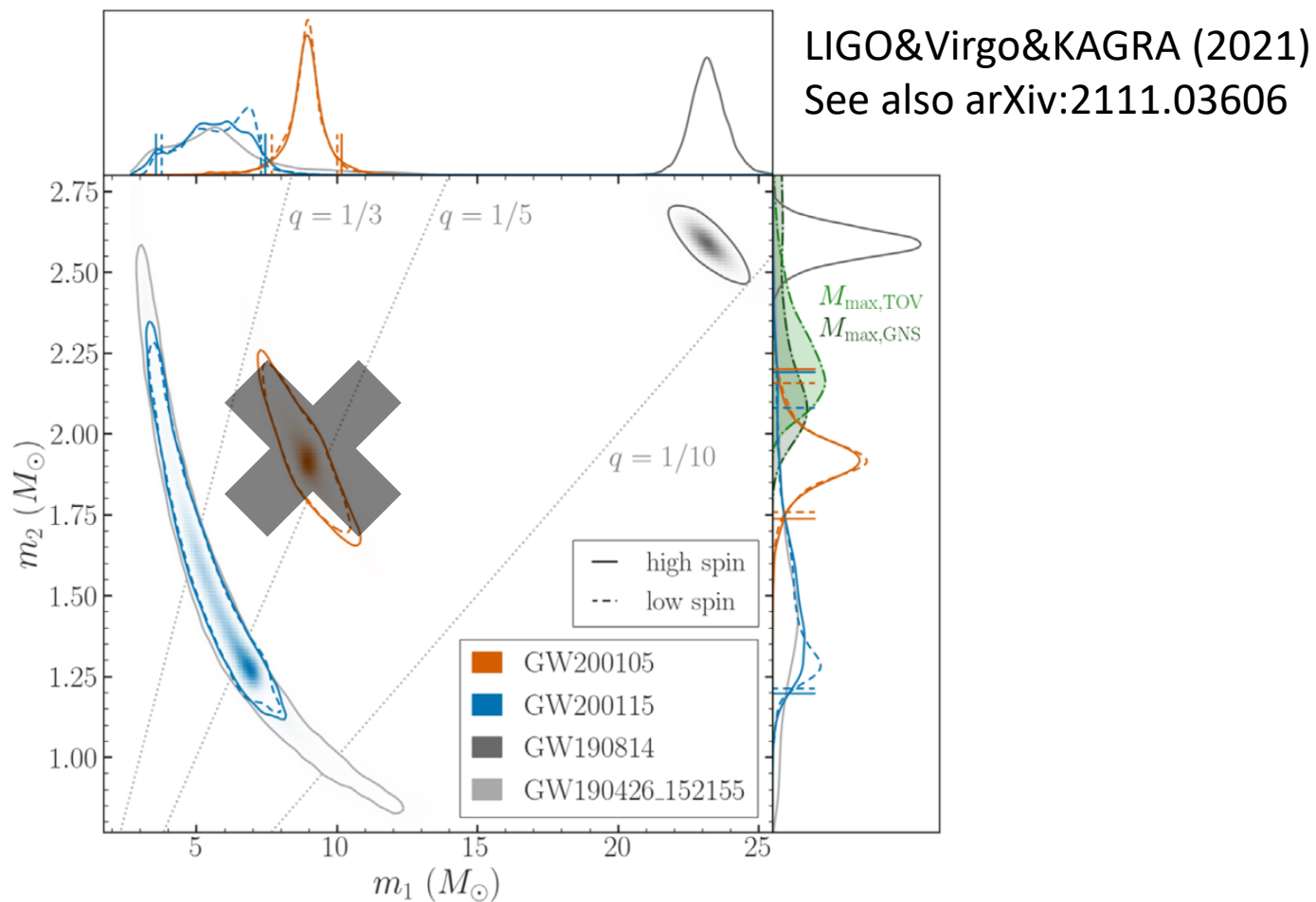
# ブラックホールの質量分布

これはprimaryの分布であることには注意が必要かも



# ブラックホール・中性子星連星

GW200115 (GW200105はsubthresholdイベントに)



# 連星中性子星合体GW170817

2つの中性子星が合体し、重力波・電磁波が両方検出

<https://www.ligo.org/detections/GW170817/images-GW170817/gatech-moviestill2.png>

**FIRST COSMIC EVENT OBSERVED  
IN GRAVITATIONAL WAVES AND LIGHT**  
Colliding Neutron Stars Mark New Beginning of Discoveries

Collision creates light across the entire electromagnetic spectrum. Joint observations independently confirm Einstein's General Theory of Relativity, help measure the age of the Universe, and provide clues to the origins of heavy elements like gold and platinum

Gravitational wave lasted over 100 seconds

On August 17, 2017, 12:41 UTC, LIGO (US) and Virgo (Europe) detect gravitational waves from the merger of two neutron stars, each around 1.5 times the mass of our Sun. This is the first detection of spacetime ripples from neutron stars.

Within two seconds, NASA's Fermi Gamma-ray Space Telescope detects a short gamma-ray burst from a region of the sky overlapping the LIGO/Virgo position. Optical telescope observations pinpoint the origin of this signal to NGC 4993, a galaxy located 130 million light years distant.

LIGO Georgia Tech Center for Relativistic Astrophysics

# 連星中性子星合体に伴う現象

## 重力波の放射

物質のある＝非真空時空での重力理論のテスト

高密度物質への手がかり：状態方程式、QCD相構造...

## 中性子過剰な物質の放出

r過程元素合成：金、プラチナ、レアアース...

放射性崩壊に伴う増光現象キロノヴァ

## 高温大質量の降着円盤形成

ショートガンマ線バーストの駆動（+ロングも？）

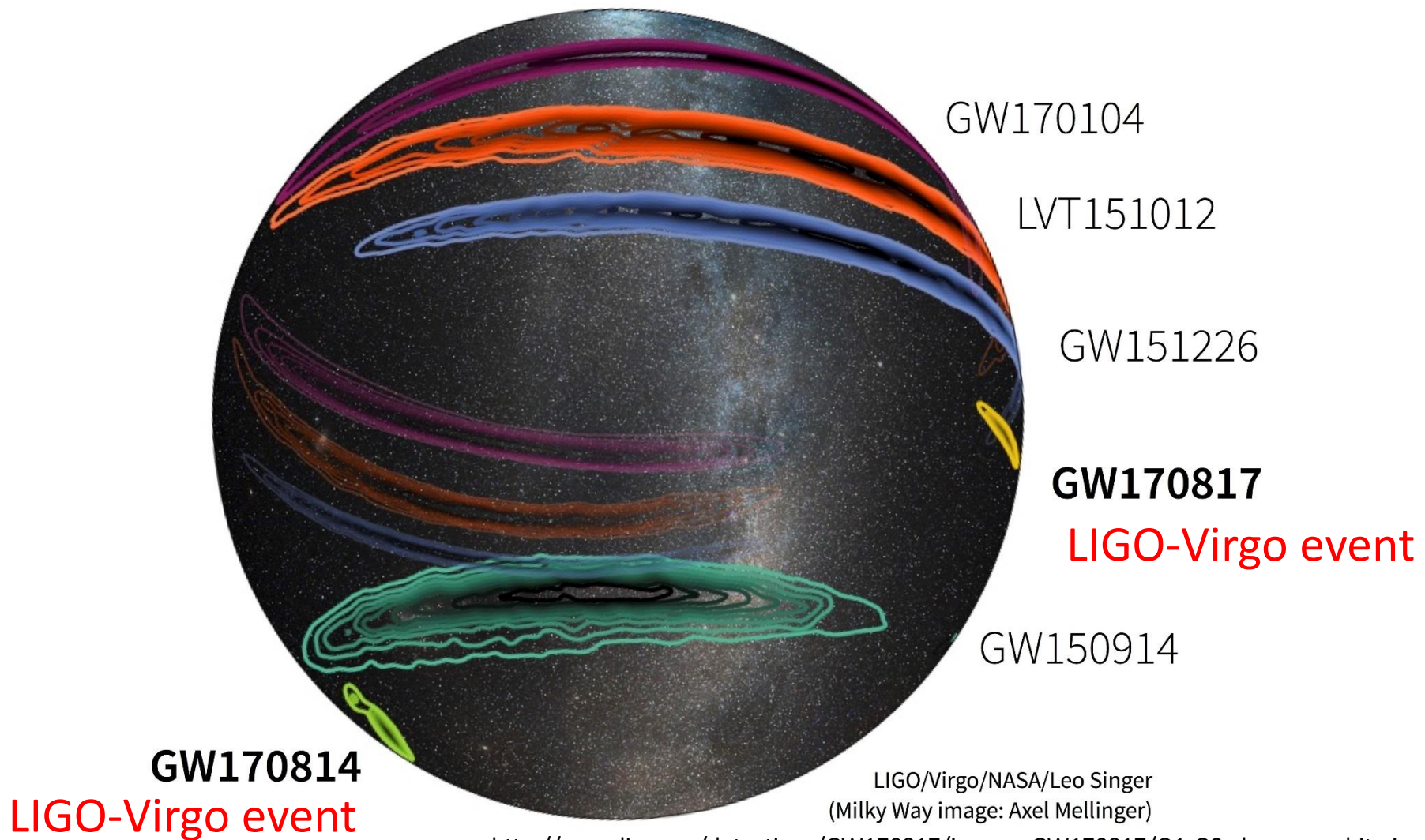
# キロノヴァAT 2017gfoと母銀河

母銀河が判明し、赤方偏移やHubble定数が測られた



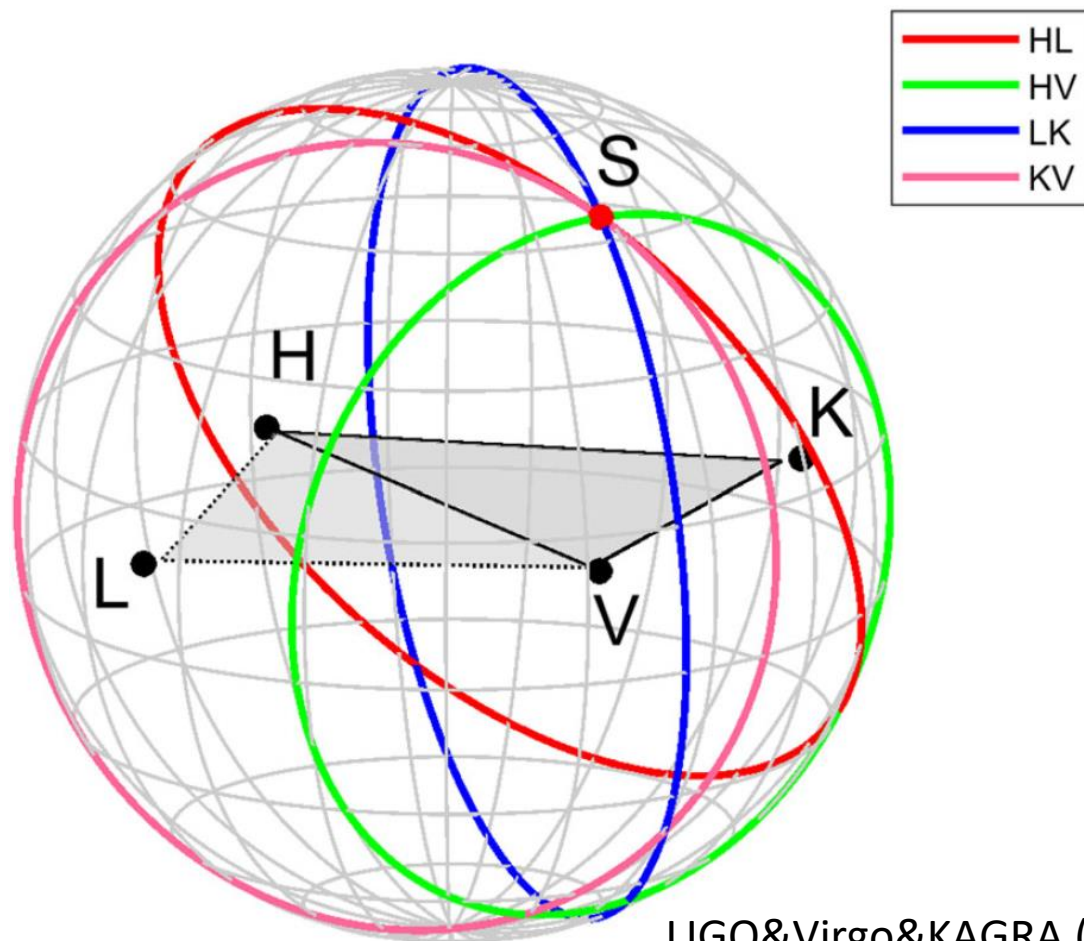


# 天球上に見る位置決定精度



# 重力波検出器での位置決定

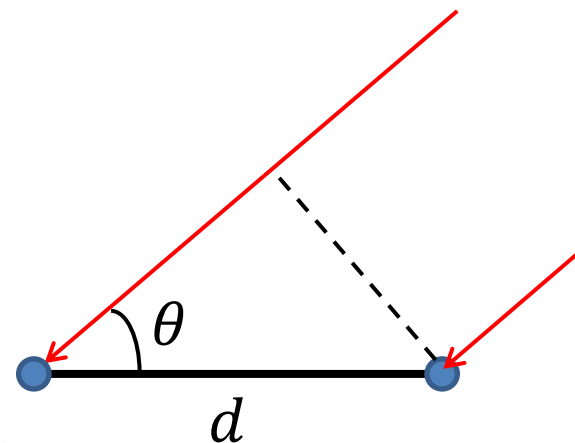
到来時刻差を用いた天球上の位置の三角測量



複数台が本質的

$$t_d = \frac{d \cos \theta}{c}$$

$d \sim O(1000) \text{ km}$



LIGO&Virgo&KAGRA (2020)

# 9/20の合体警報より

GraceDB | LVK Public Alerts

gracedb.ligo.org/superevents/public/O4/

Public Alerts Latest Search Documentation Login

Please log in to view full database contents.

SORT: EVENT ID (A-Z)

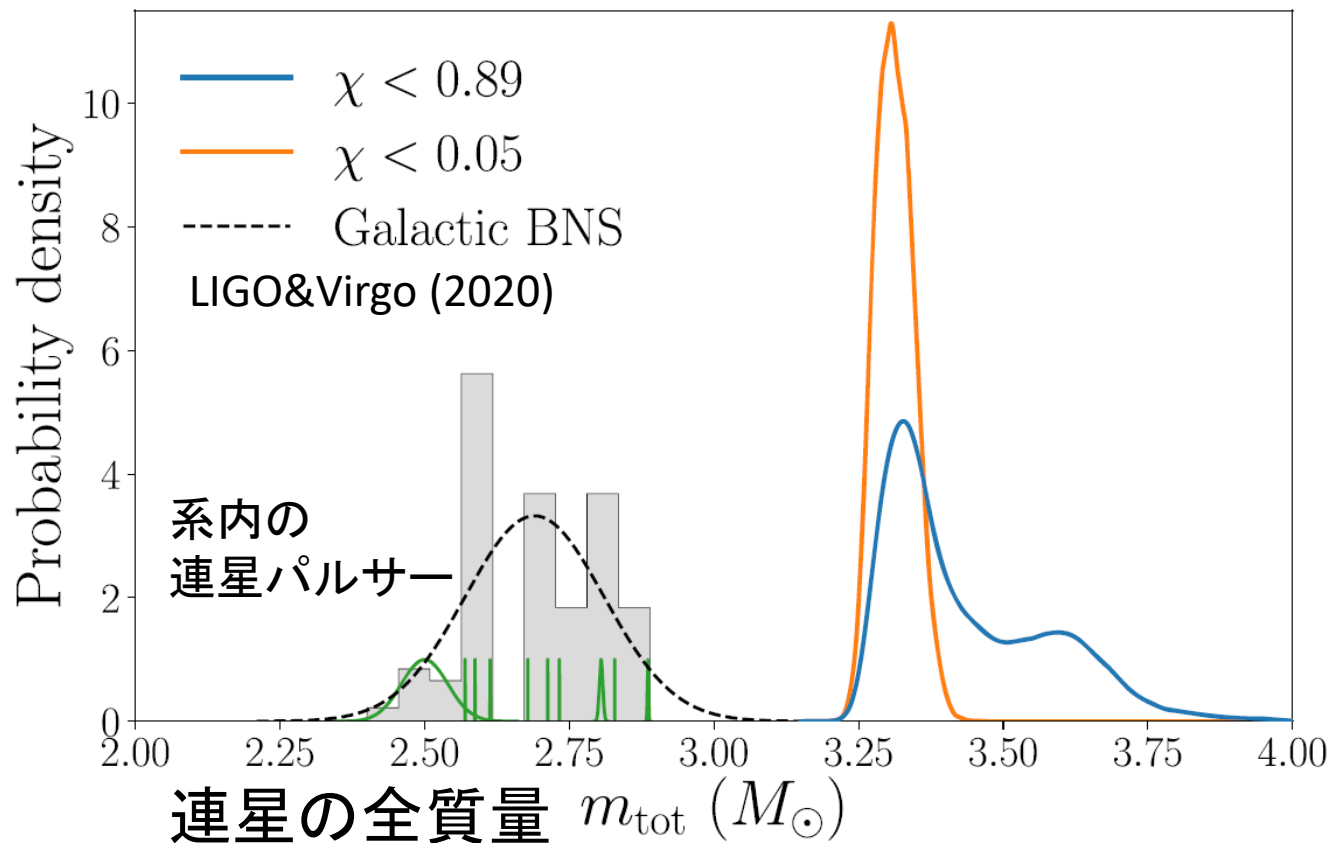
Event ID	Possible Source (Probability)	Significant	UTC	GCN	Location	FAR	Comments
S230918aq	BNS (79%), Terrestrial (21%)	Yes	Sept. 18, 2023 11:19:41 UTC	GCN Circular Query Notices   VOE		1.7099 per year	RETRACTED
S230914ak	BBH (99%)	Yes	Sept. 14, 2023 11:14:01 UTC	GCN Circular Query Notices   VOE		1 per 35,198 years	
S230911ae	BBH (>99%)	Yes	Sept. 11, 2023 19:53:24 UTC	GCN Circular Query Notices   VOE		1 per 16,769 years	
S230904n	BBH (91%), Terrestrial (9%)	Yes	Sept. 4, 2023 05:10:13 UTC	GCN Circular Query Notices   VOE		1 per 14,088 years	
S230831e	BBH (98%), Terrestrial (2%)	Yes	Aug. 31, 2023 01:54:14 UTC	GCN Circular Query Notices   VOE		1 per 1,6009 years	
S230830b	NSBH (80%), BBH (20%)	Yes	Aug. 30, 2023 04:21:58 UTC	GCN Circular Query Notices   VOE		1 per 275.98 years	RETRACTED
S230825k	BBH (>99%)	Yes	Aug. 25, 2023 04:13:34 UTC	GCN Circular Query Notices   VOE		1 per 13,272 years	
S230824r	BBH (>99%)	Yes	Aug. 24, 2023 03:30:47 UTC	GCN Circular Query Notices   VOE		1 per 1932.8 years	

<https://gracedb.ligo.org/superevents/public/O4/>

# GW190425と質量

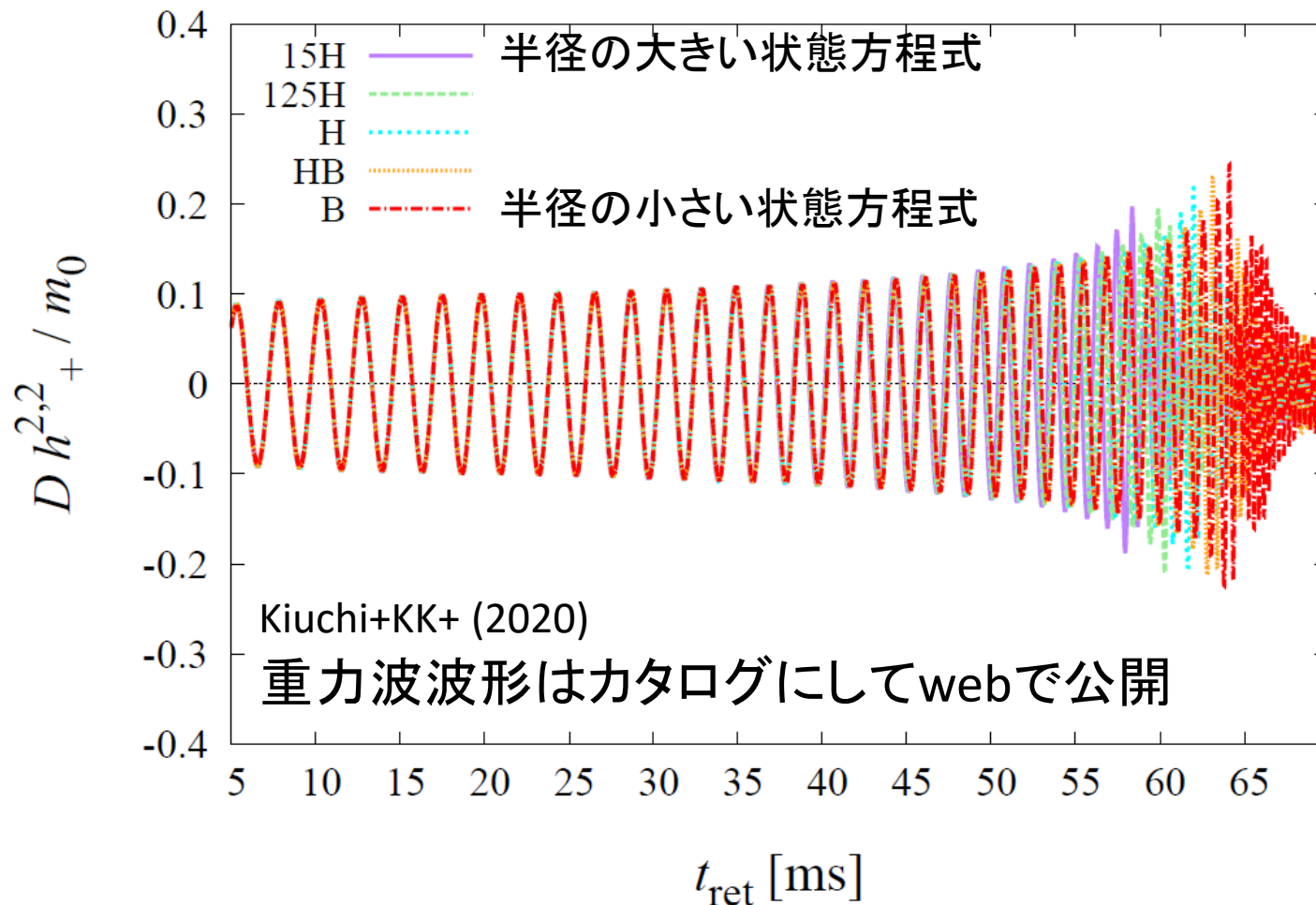
全質量  $m_{\text{tot}} = 3.4^{+0.3}_{-0.1} M_{\odot}$  (電磁波は未検出)

系内の連星パルサーの5 sigmaより重い...系外は別？



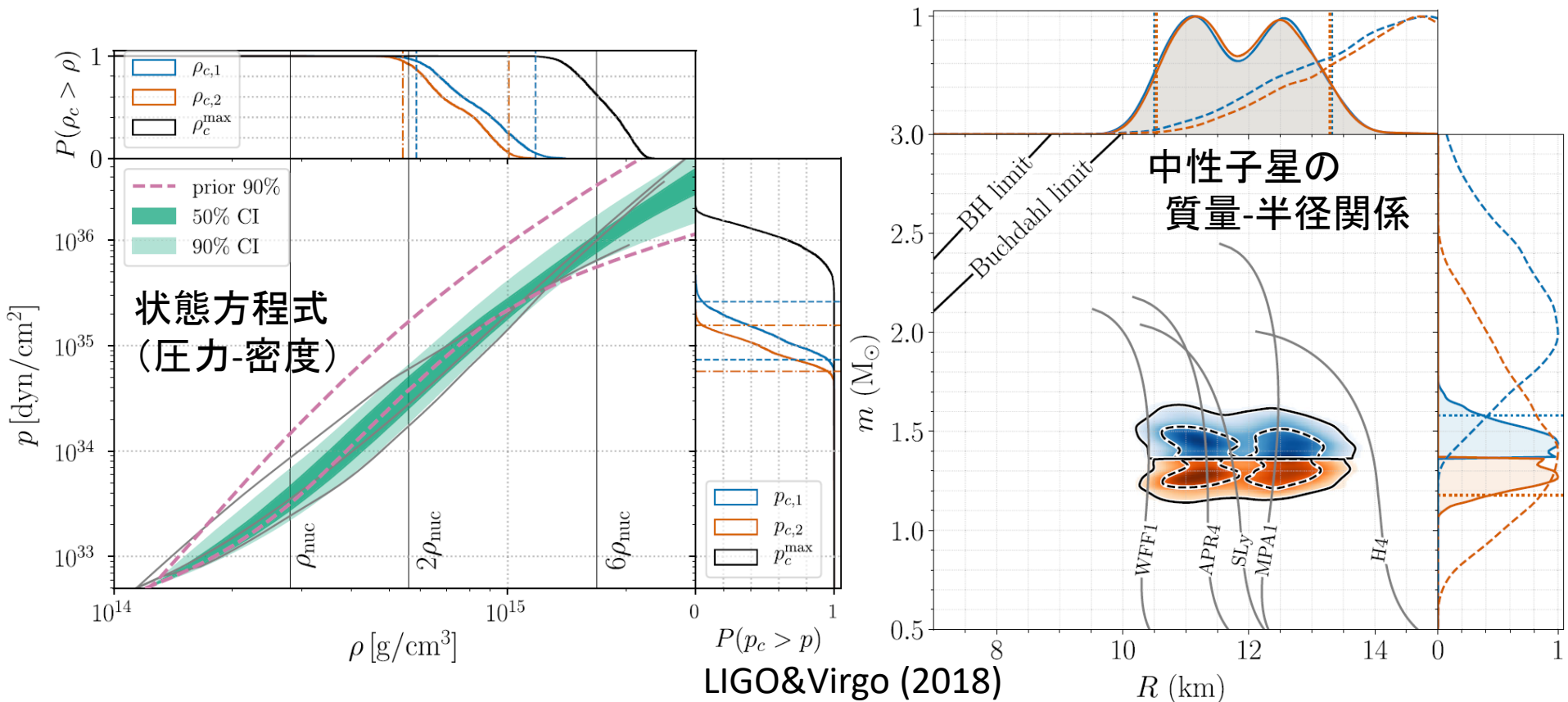
# 重力波波形と状態方程式

半径が大きいほど潮汐力が効き、早く合体する



# GW170817からの制限

典型的な中性子星の半径は10.5-13.5kmくらい  
 イベント数が増えるとより精度良く決まっていく、はず

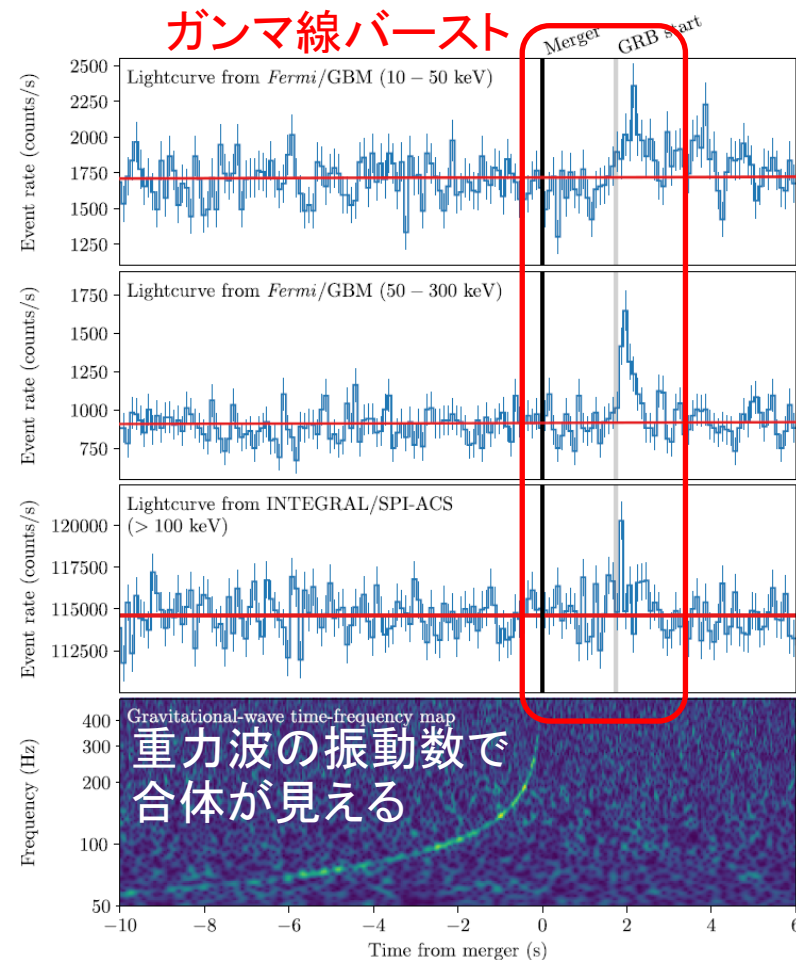


# まだよくわかっていないこと

合体した中性子星はブラックホールに崩壊したのか？

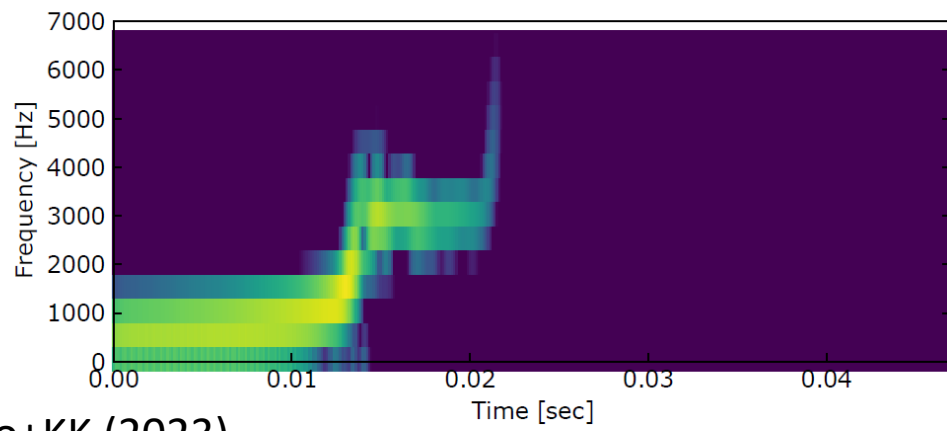
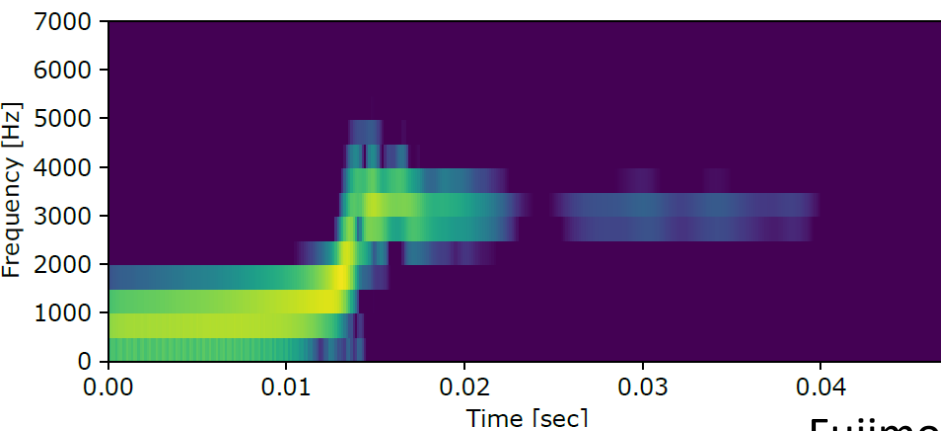
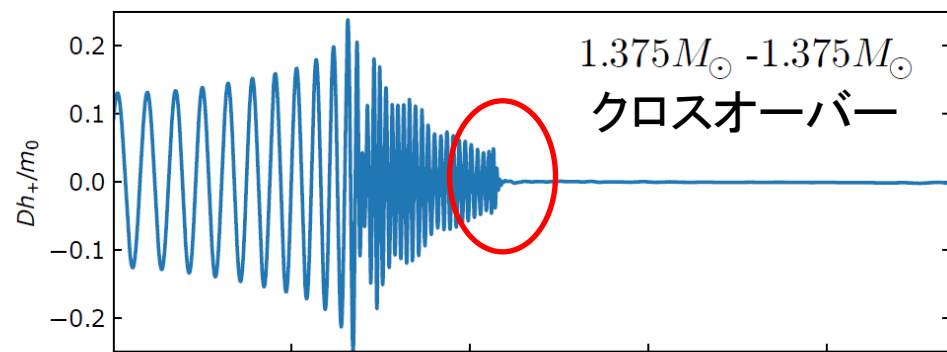
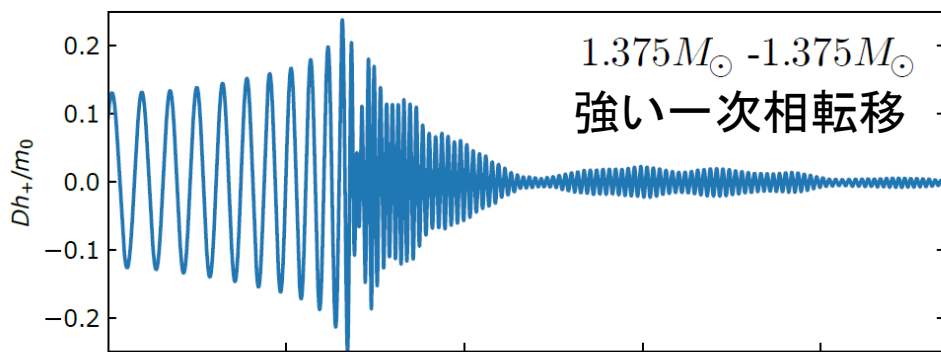
大質量中性子星は合体後  
10-100msくらいの期間に  
>kHzの重力波を出すので  
高振動数に感度があれば...

GW170817では決着つかず  
やはりO4よりも将来に期待  
[ニュートリノ? Kyutoku-Kashiyama 2018]



# 重力波とブラックホール形成

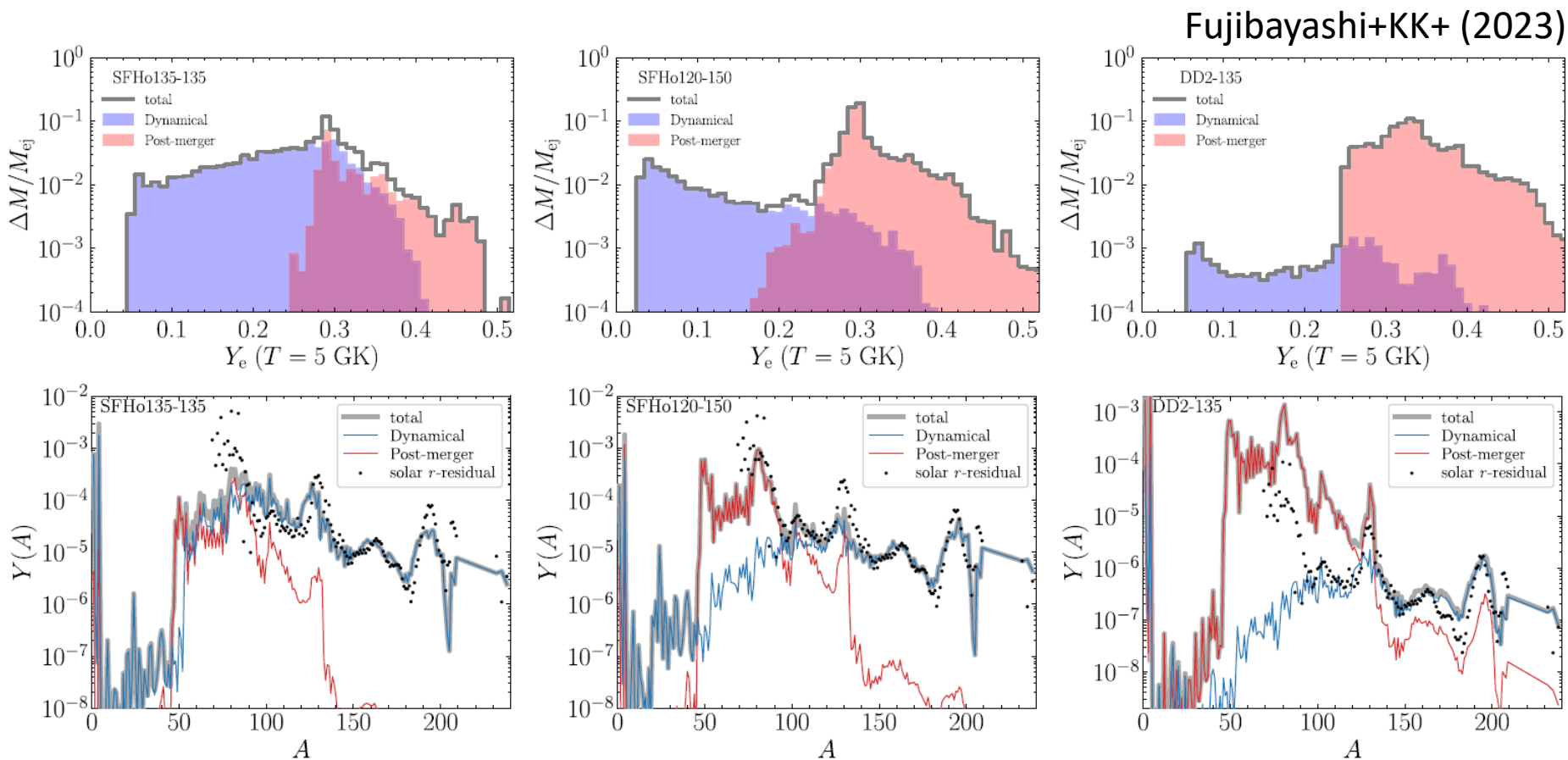
合体後の重力波が急に減衰すれば重力崩壊を示唆  
天体物理、重力理論、原子核物理...への豊かな情報





# 元素合成とブラックホール形成

短寿命でブラックホールに潰れると太陽系組成を再現



# r過程元素合成

金



From Wikipedia

鉄よりも重い  
重元素は宇宙の  
どこで作られた？

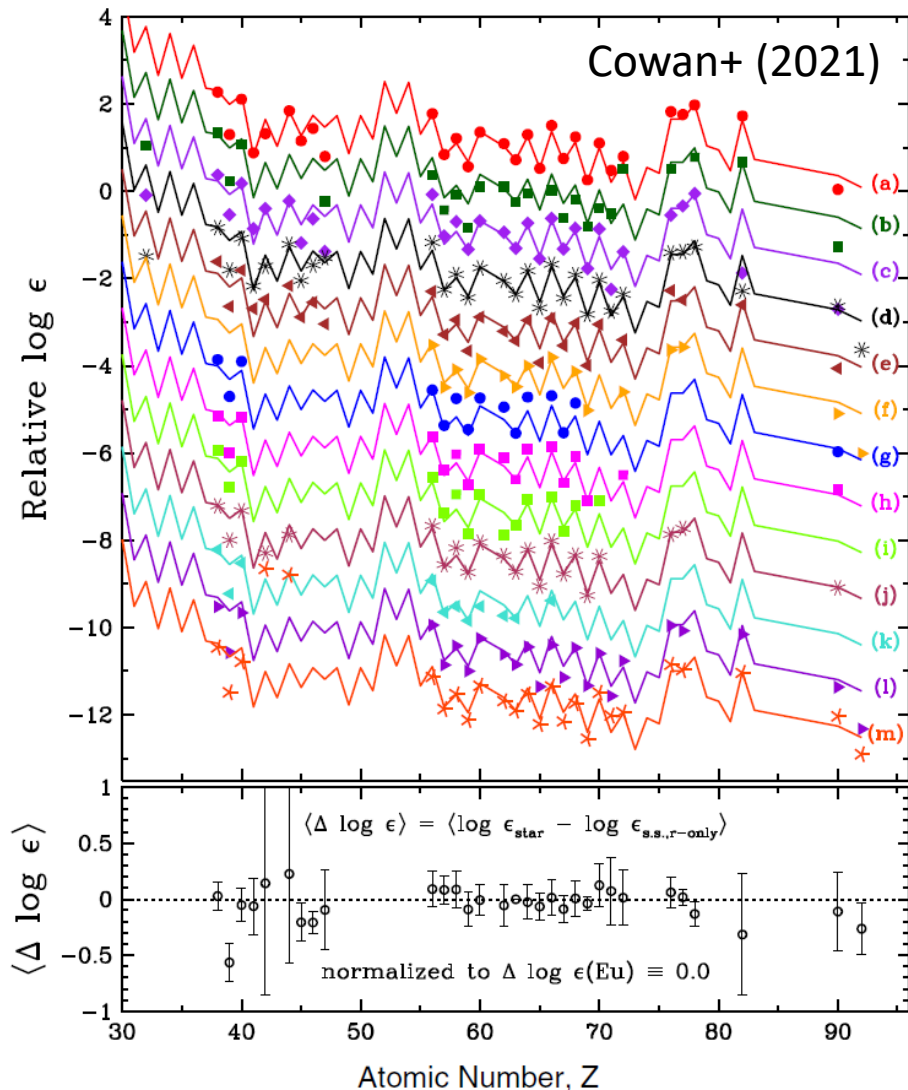
プラチナ



人類・社会にも重要(かも)

# 様々な天体でのr過程元素組成

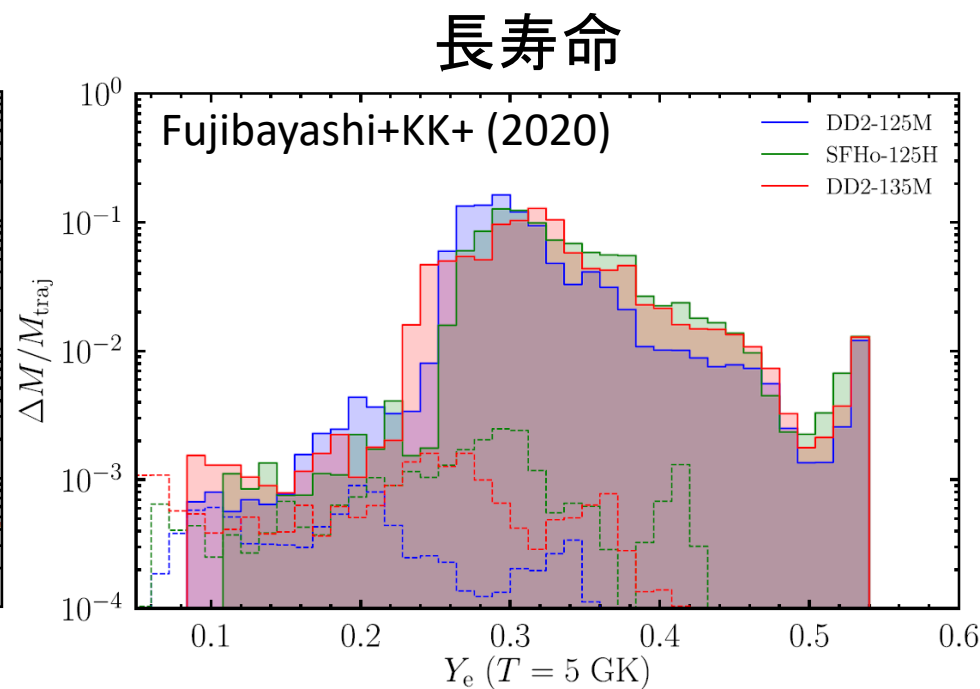
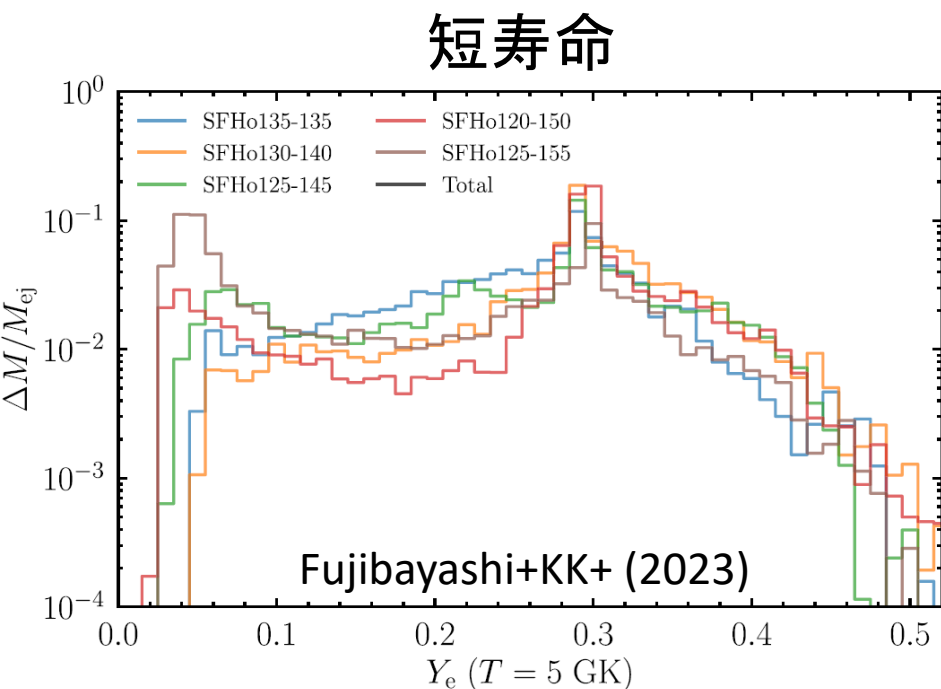
(色々例外はあるが)  
少数回のr過程元素合成を  
反映していそうな星では  
太陽系組成に近い分布  
ということは  
宇宙でのr過程元素合成は  
一つ一つが太陽系組成を  
概ね再現しているはず



# 比較: electron fraction

$$Y_e := \text{陽子数} / (\text{核子数} = \text{中性子数} + \text{陽子数})$$

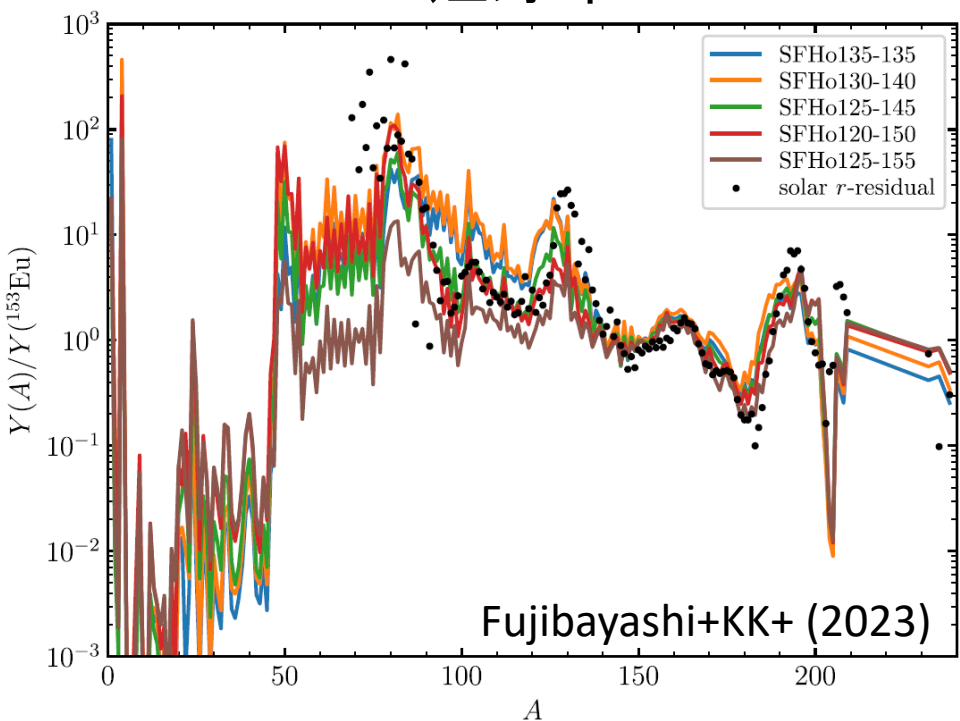
短寿命だと力学的質量放出によりlow  $Y_e$ の物質も多い  
長寿命では合体後の風が卓越し、 $Y_e > 0.25$ が大半に



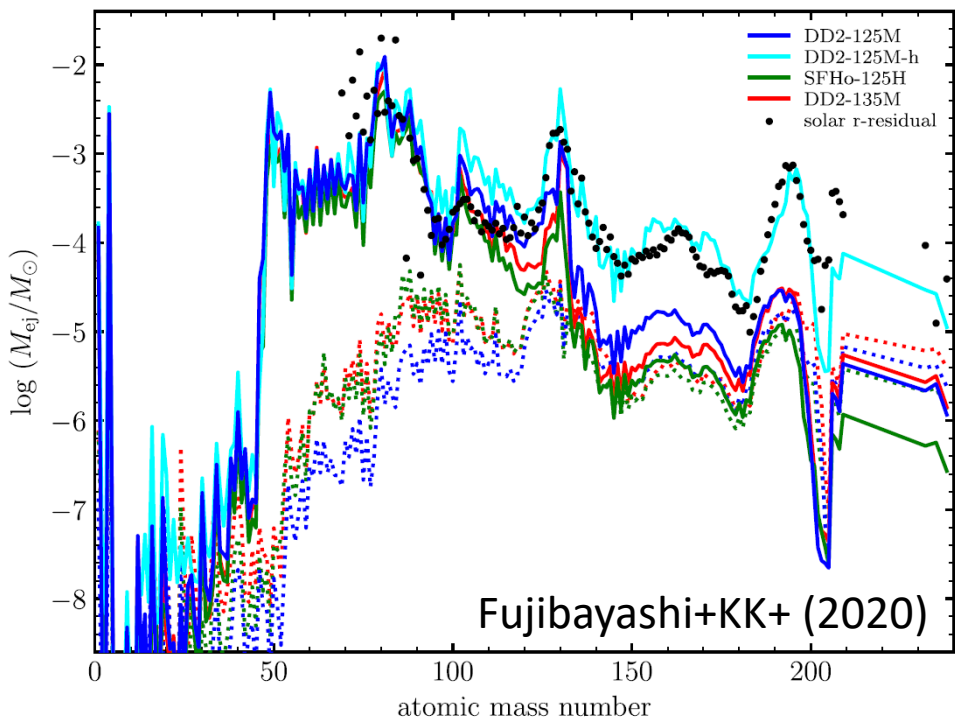
# 比較:r過程元素合成

短寿命なら軽いr過程元素を作りすぎず太陽系組成に  
- ただし粘性が強く放出が早ければ長寿命でもOK

短寿命



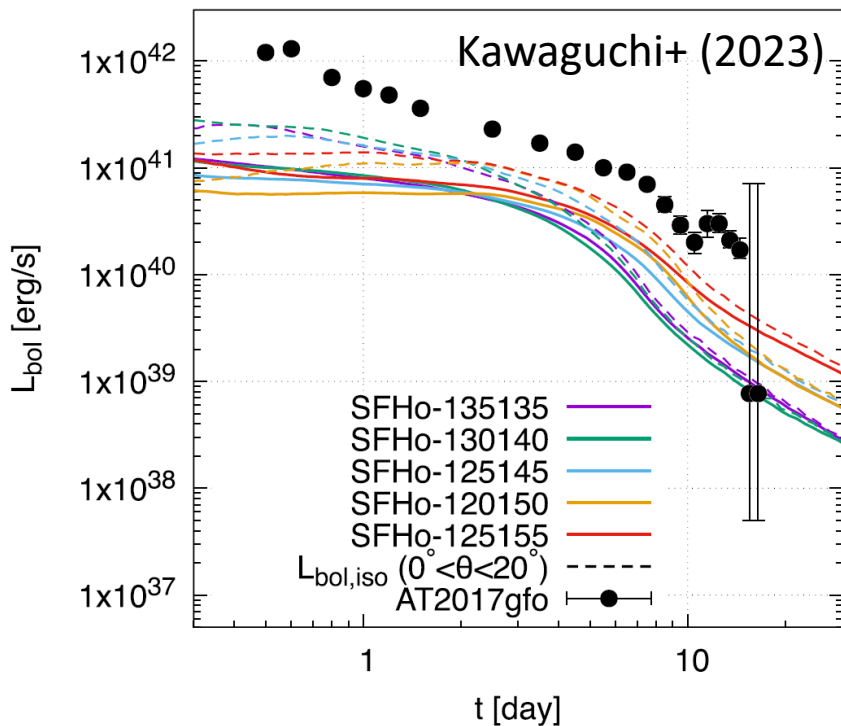
長寿命



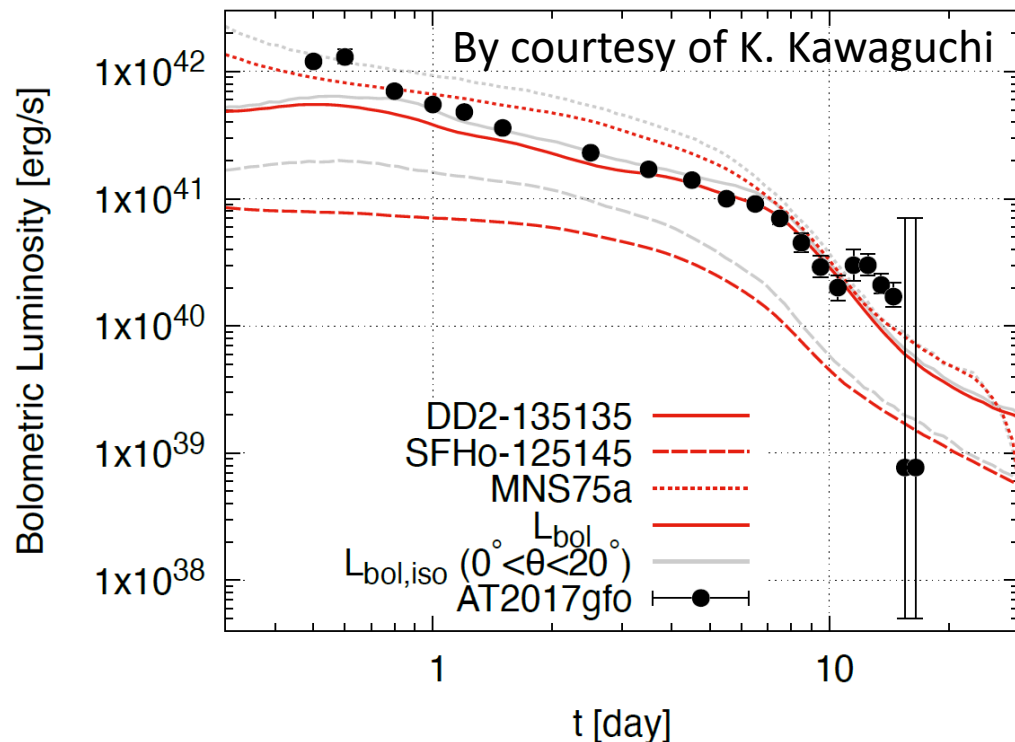
# 比較: キロノヴァ

AT 2017gfoは大質量を要求するので**長寿命**がベター  
GW170817が例外的？実効粘性(磁場)は強い？

短寿命



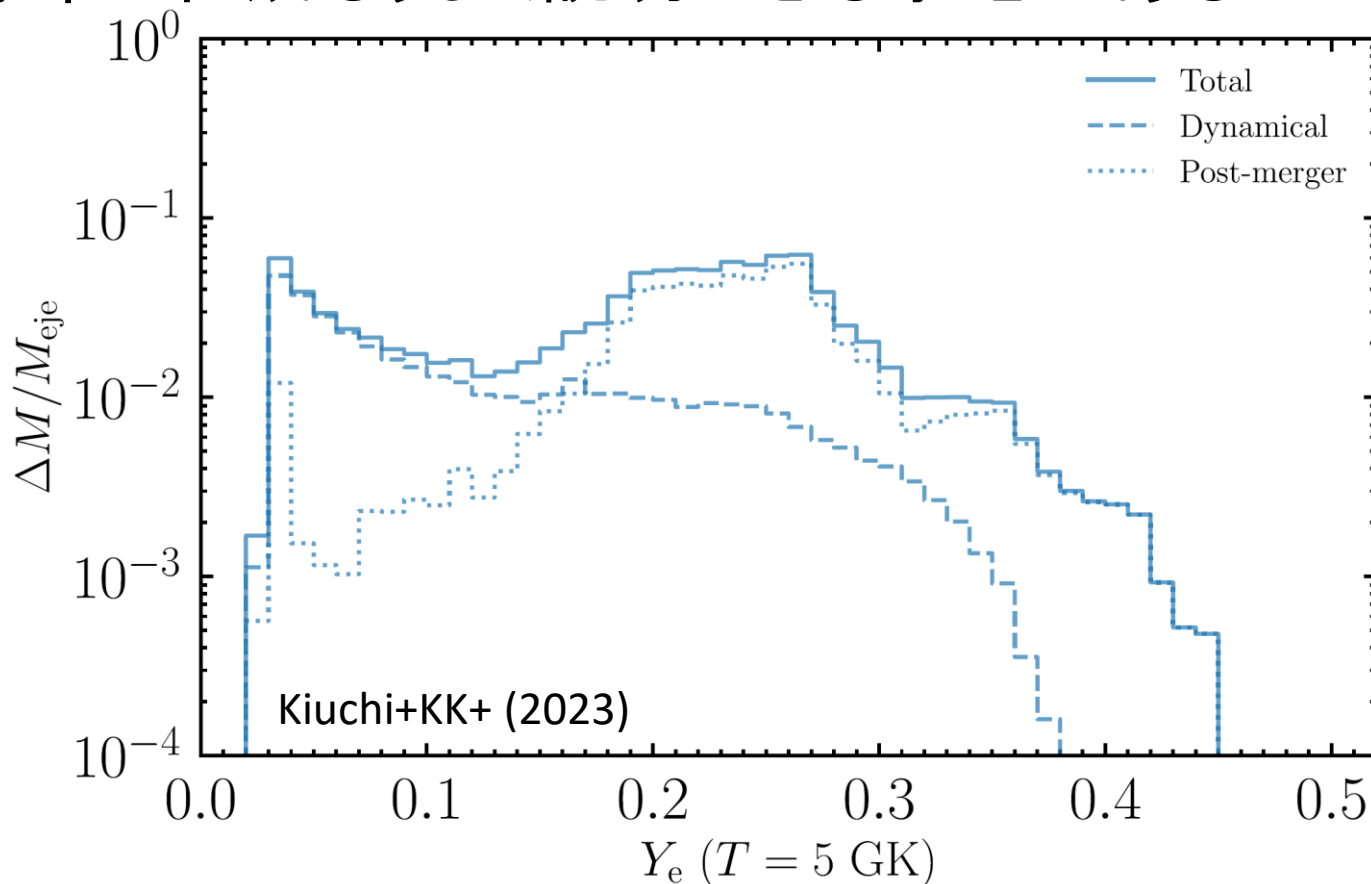
長寿命



# 磁気流体計算の結果(短寿命)

降着円盤風は粘性計算よりも中性子過剰かも？

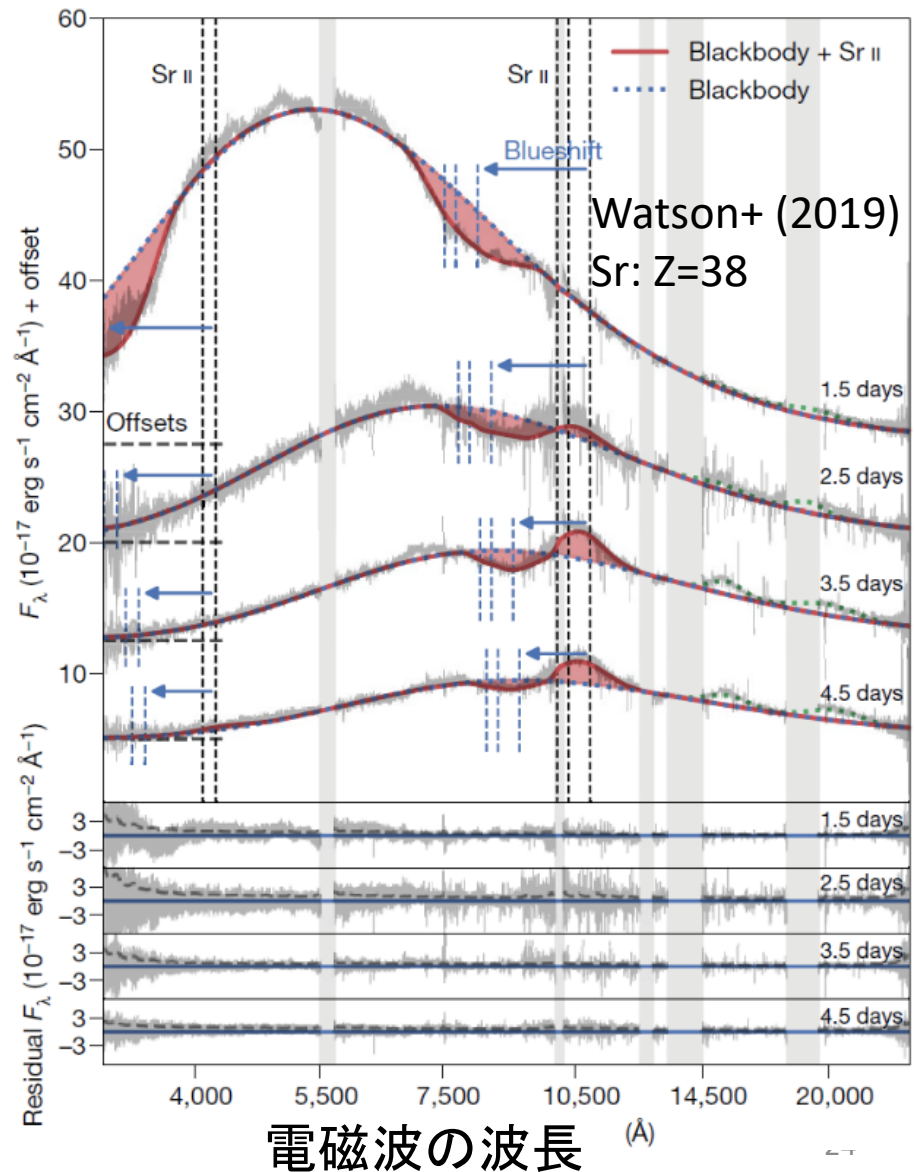
長寿命で組成もうまく説明できる余地はある



# ストロンチウムの吸収線

元素を同定するには  
スペクトルを分光観測して  
固有の輝線や吸収線を  
検出する必要がある

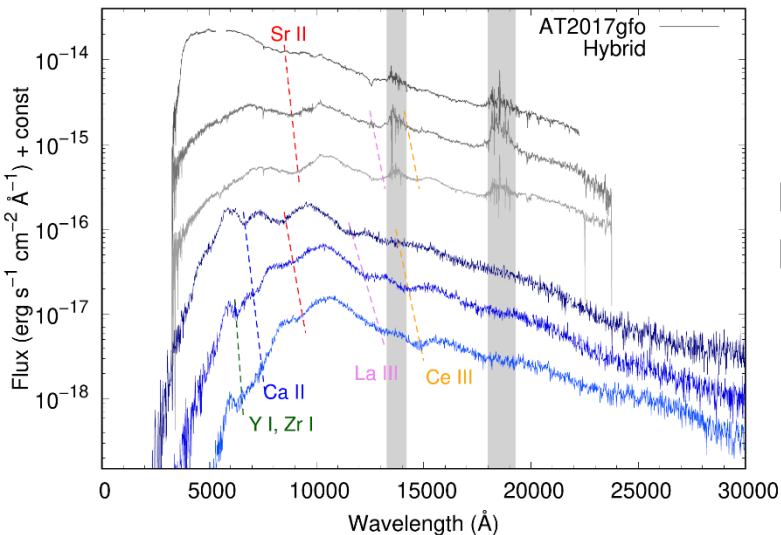
キロノヴァでは元素が多く  
混ざって分離が大変だが  
理論研究の進展により  
解釈が進められている





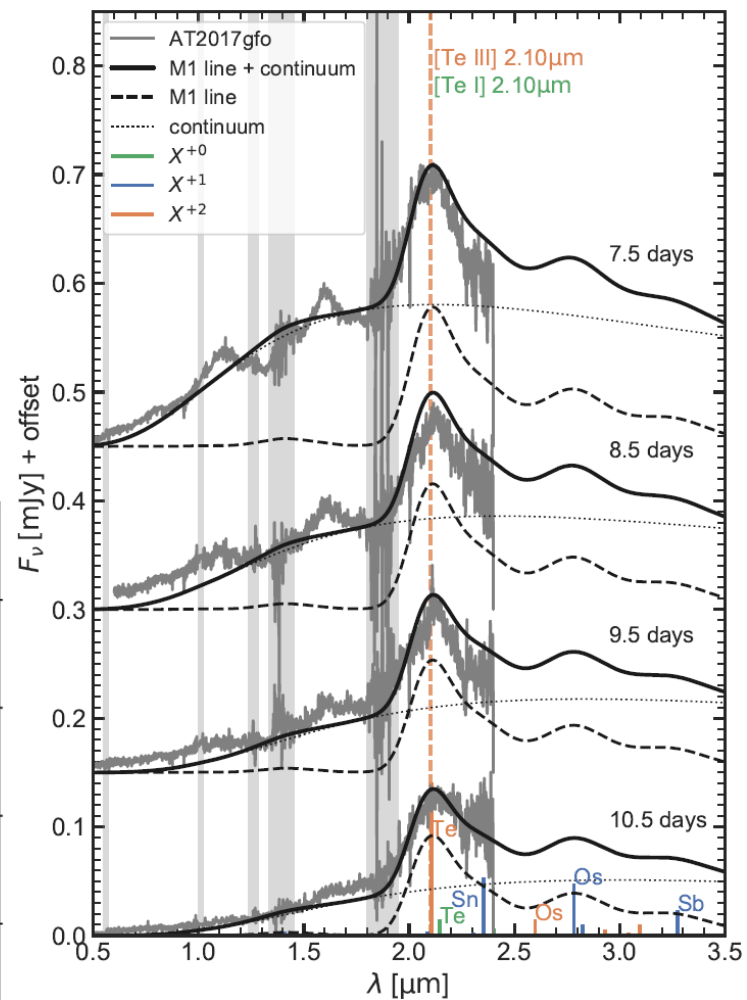
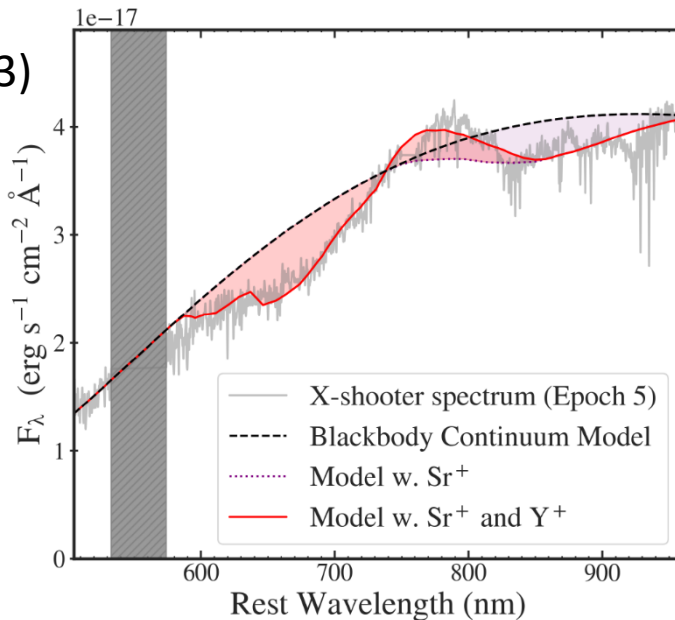
# さらなる重元素検出の報告

Hotokezaka+ arXiv:2307.00988, Te: Z=52



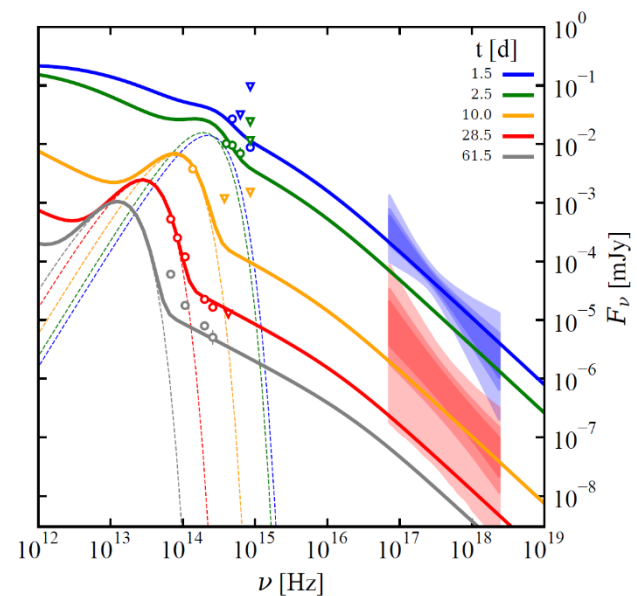
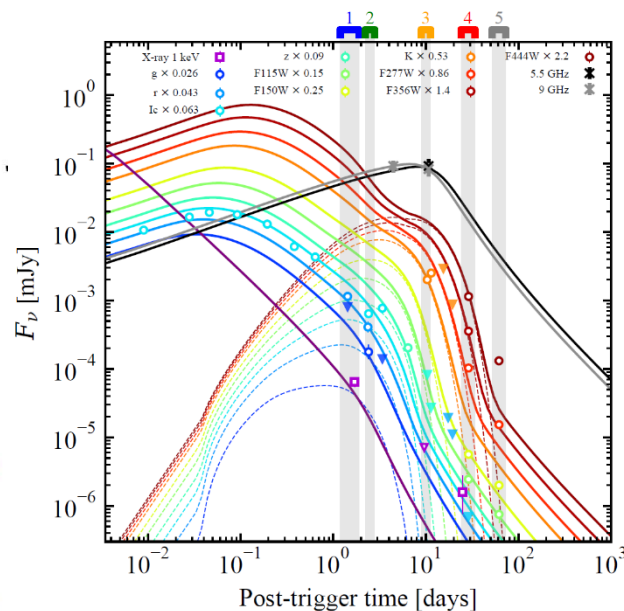
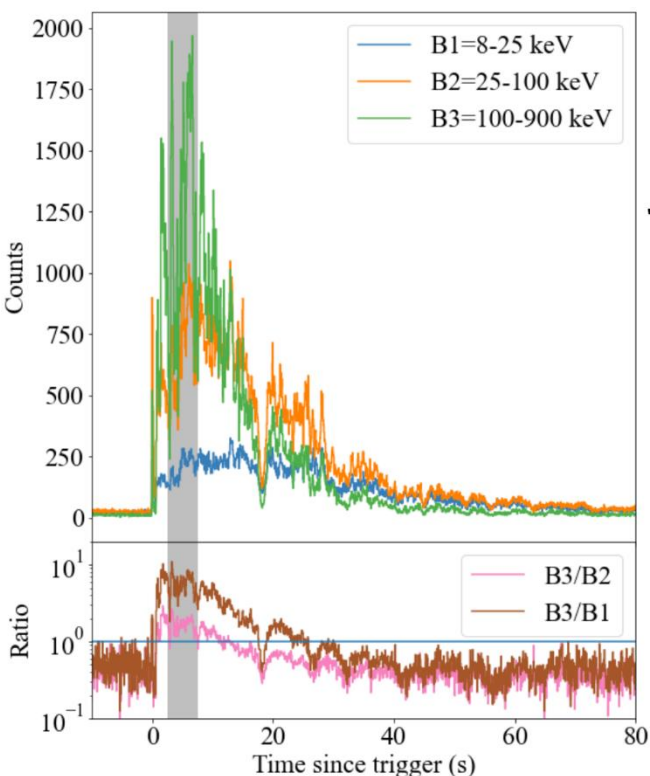
Domoto+ (2022)  
La: Z=57, Ce: Z=58

Sneppen-Watson (2023)  
Sr: Z=38, Y: Z=39



# GRB 230307Aからのキロノヴァ？

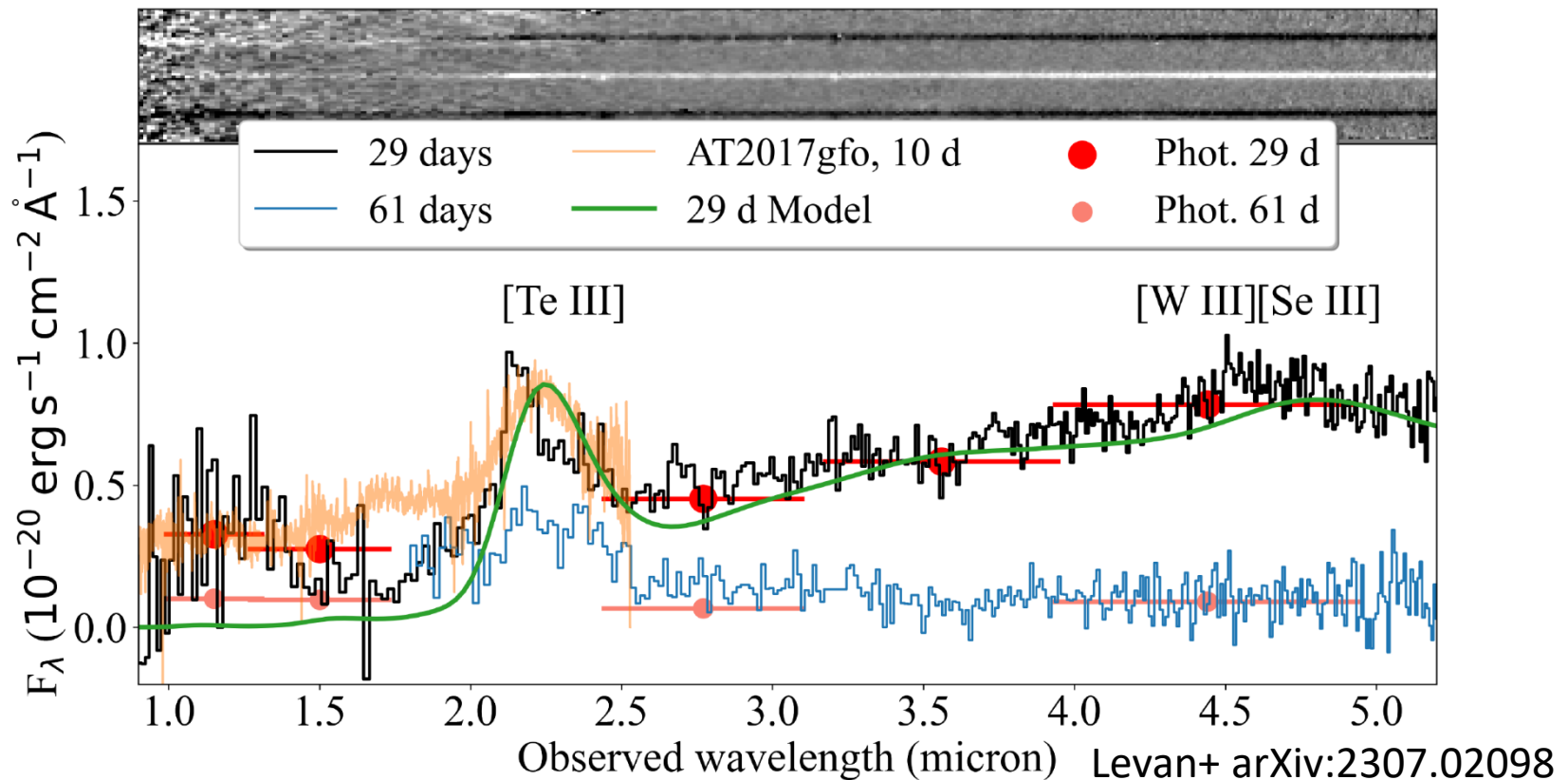
ロングガンマ線バーストからのキロノヴァも複数報告  
これは近く、非常に明るいバーストでもあった



Levan+ arXiv:2307.02098

# テルルの輝線？

ロングガンマ線バーストでもr過程元素が合成される？  
連星合体+ロングガンマ線バーストを重力波で探す



# まとめ

- マルチメッセンジャー観測が進むにはLIGOに加えてVirgoやKAGRAが観測に加わる必要がある
- 重力波で質量がわかるだけでも面白いことはある
- GW170817より状態方程式を有意に強く制限したり合体後のブラックホール形成判定はまだ難しそう
- r過程元素の理論計算は連星中性子星の合体後に短時間でブラックホールに潰れることを示唆する
- しかしキロノヴァを説明するには質量が足りない...
- 色々な方向からの観測で理解が進むかもしれず、そのためにも3台目、4台目の検出器が重要



# Appendix

# 質量放出機構

## 力学的質量放出 (dynamical ejecta)

合体直後に放出され、速く、中性子過剰度が高い

## 降着円盤風 (disk wind/outflow)

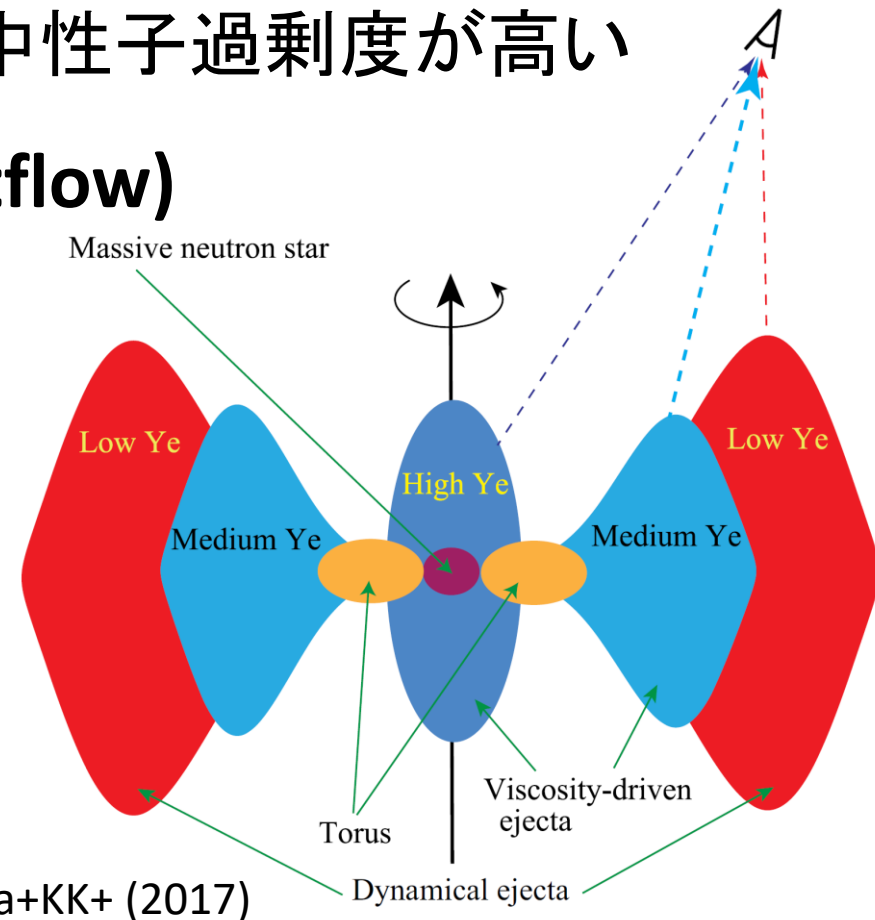
粘性の時間スケールである

~1秒くらいかけて徐々に飛び

遅く、中性子過剰度も中程度

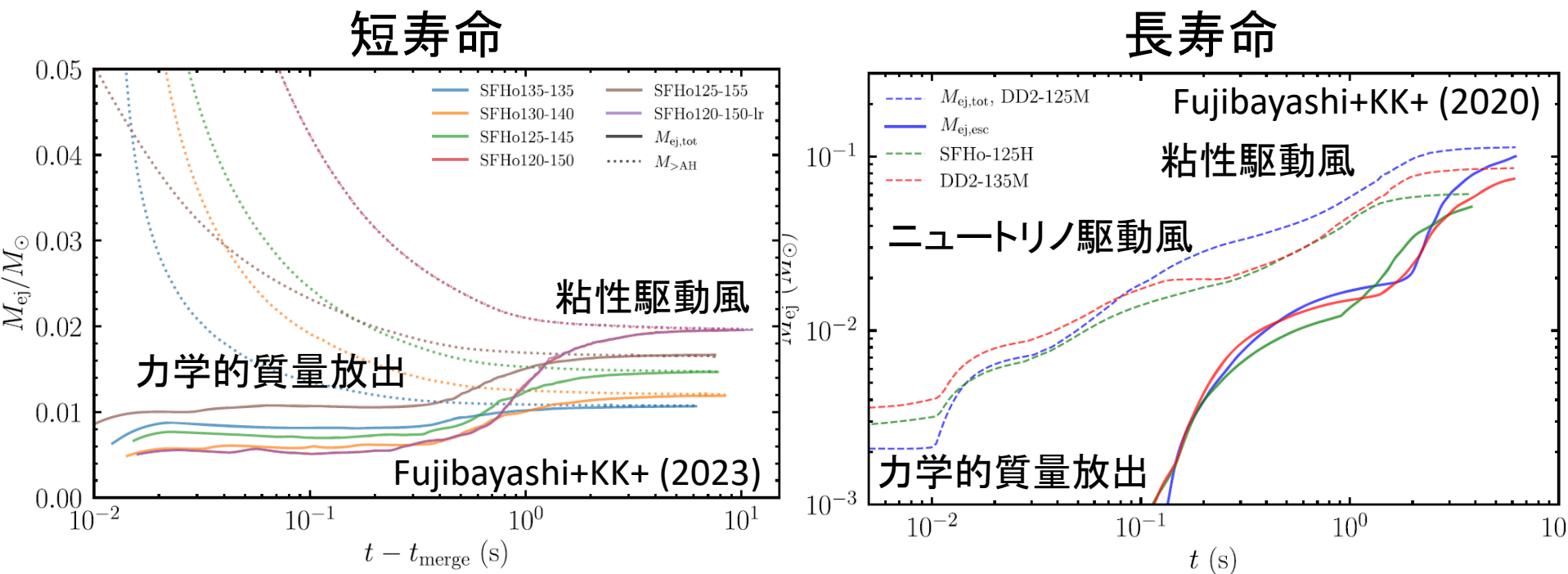
中性子星が生き残れば

より多くの質量が飛びうる



# 比較: 質量放出

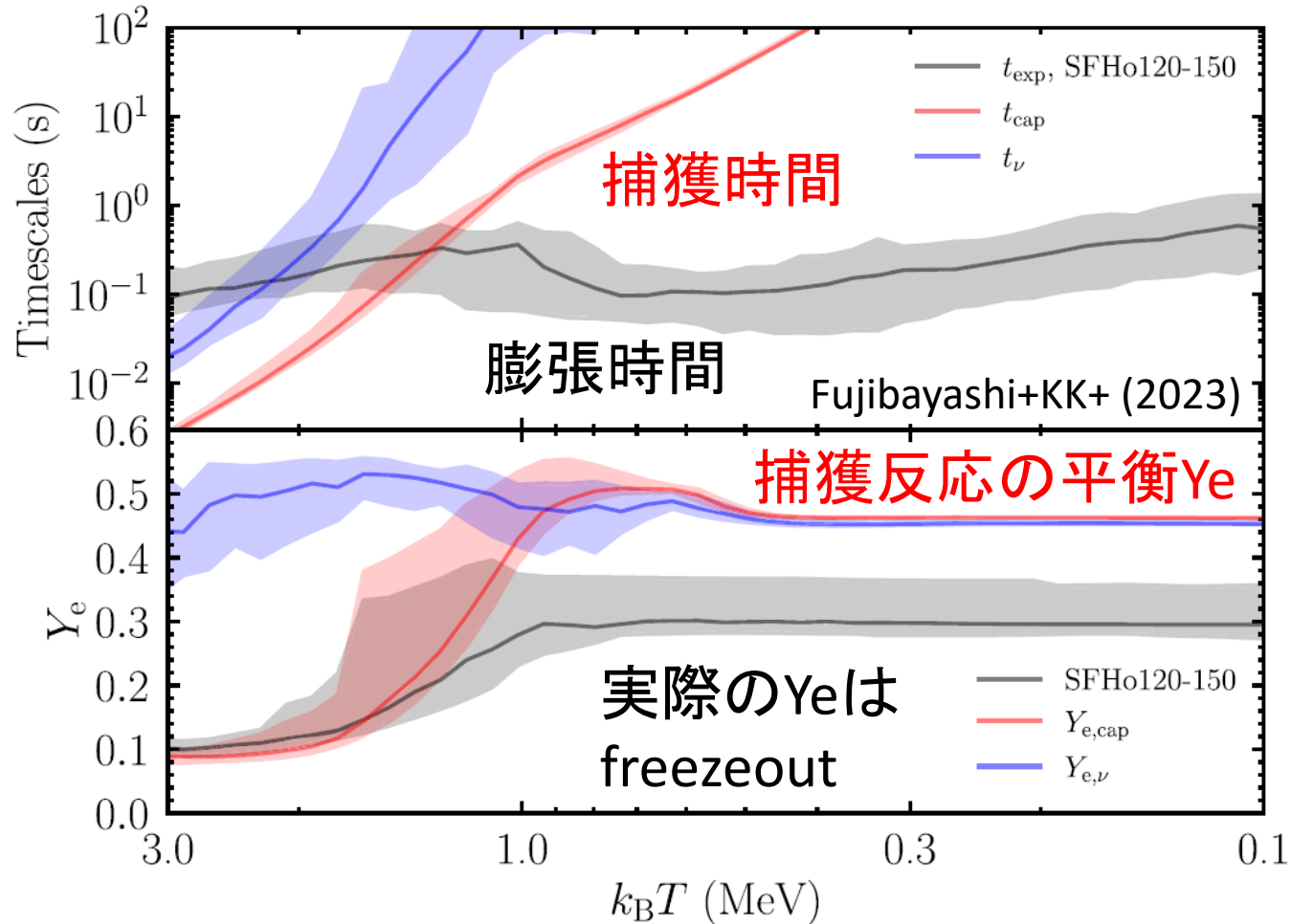
短寿命(<20ms)だと  $\sim 0.01M_{\odot}$ 、 $\sim 0.03M_{\odot}$  が限度?  
長寿命だと  $\sim 0.1M_{\odot}$  くらい飛んでもおかしくなさそう





# Electron fractionの決まり方

膨張が電子・陽電子捕獲より早くなると上昇が止まる



# ショートガンマ線バースト

連星中性子星合体が引き起こしているのか？

<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/~cta/images/GRB.jpg>



# ショートガンマ線バースト

$10^{51}$  erg/s くらいの爆発

- 太陽は  $\sim 4 \times 10^{33}$  erg/s

**ロング・ソフトGRB:  $\geq 2$ s**

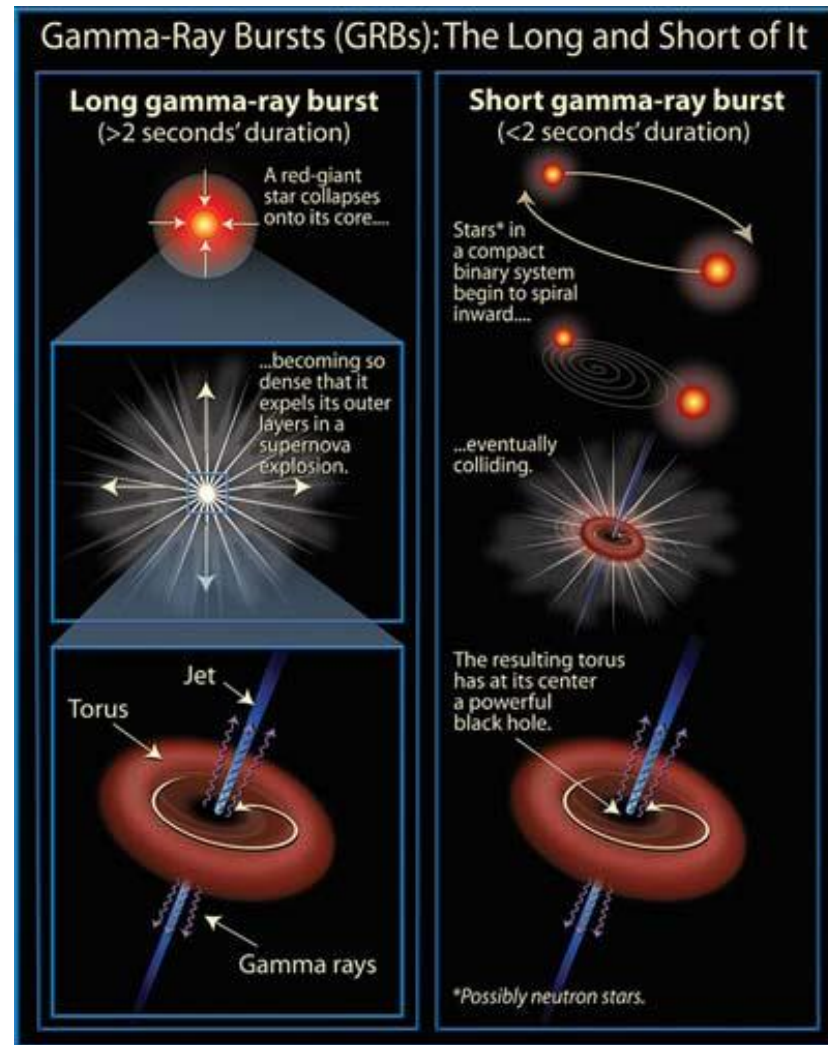
大質量星の崩壊が起源

(ただし最近色々議論あり)

**ショート・ハードGRB:  $\leq 2$ s**

中性子星連星の合体が起源

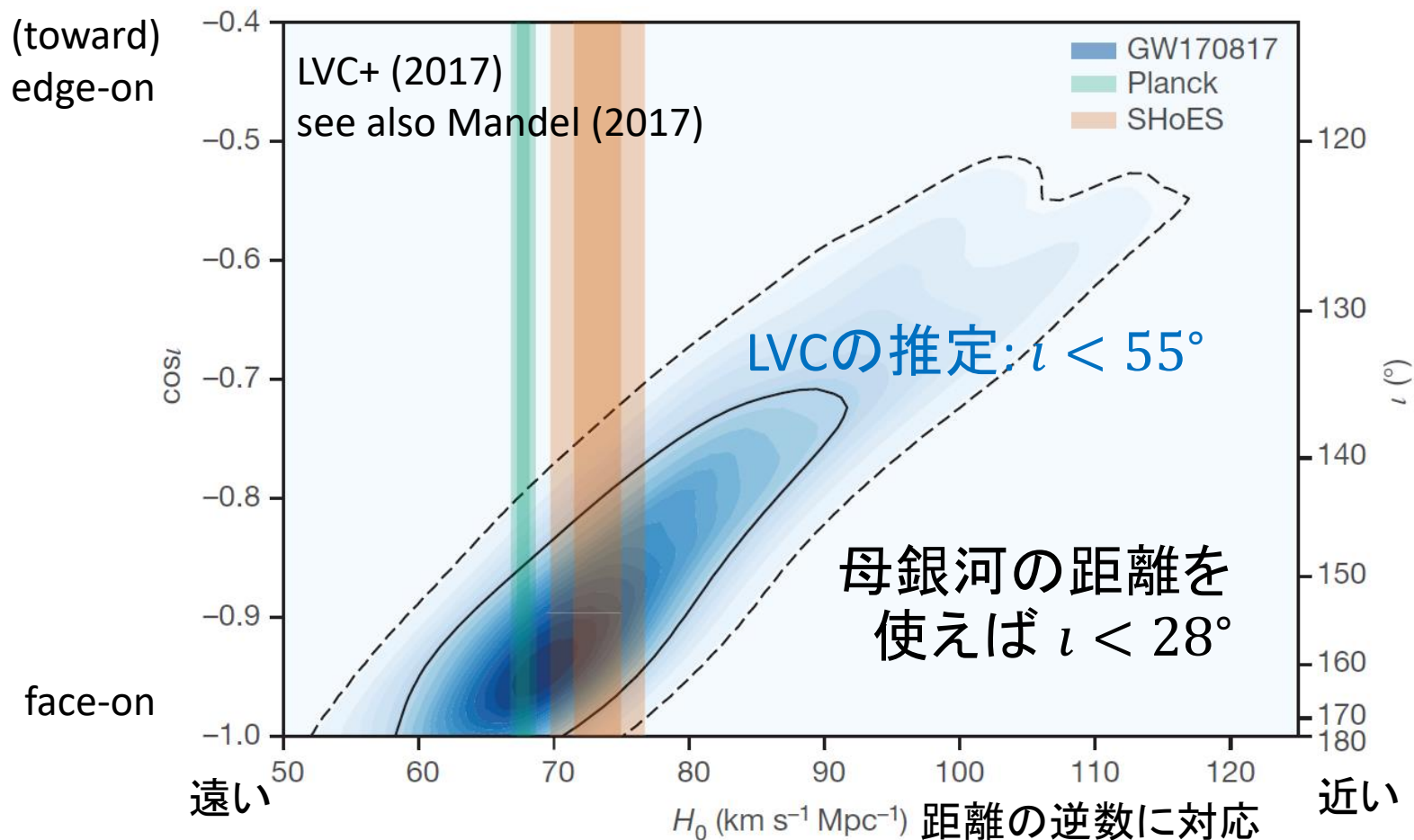
重力波との同時観測で支持



[http://www.daviddarling.info/images/gamma-ray\\_bursts.jpg](http://www.daviddarling.info/images/gamma-ray_bursts.jpg)

# 距離-軌道傾斜角の縮退

VirgoかKAGRAがあれば  $\Delta i < 5^\circ$  も可能 (Arun+ 2014)



# 軌道傾斜角測定の将来展望

母銀河から距離がわかれば(3D localizedに対応)重力波単独よりも2-3倍の改善が見込める

Network	No EM information	Direction known	3D localized
LHV	9.3 (41.5)	8.3 (34.4)	3.3 (8.6)
LHVK	7.1 (24)	6.5 (21.0)	2.7 (6.4)
LHVKI	5.8 (15.5)	5.5 (14.3)	2.2 (5.1)

L: LIGO Livingston, H: LIGO Hanford, V: Virgo Arun+ (2014)

K: KAGRA, I: LIGO India      BH-NS (NS-NS)@200Mpc