

# 重力波天文学と数値相対論

柴田 大

Max Planck Institute for Gravitational  
Physics at Potsdam

& 京都大学基礎物理学研究所



July 30th 2019



# Outline

- I. はじめに: 重力波イベントの現状
- II. 2014年(5年前)と現在
- III. 連星ブラックホールの合体
- IV. 連星中性子星の合体、 $\gamma$ 線バースト、元素合成
- V. まとめ

# I はじめに: 重力波イベント

## O1+O2 data('15—17)

- GW150914
- GW151012

## O3 data ('19—)

- GW190408
- GW190412
- GW190421

重力波観測数は~5/month程度で増加  
→ 重力波天文学の確立へ

- GW170608
- GW170729
- GW170809
- GW170814
- **GW170817**
- GW170818
- GW170823
- more

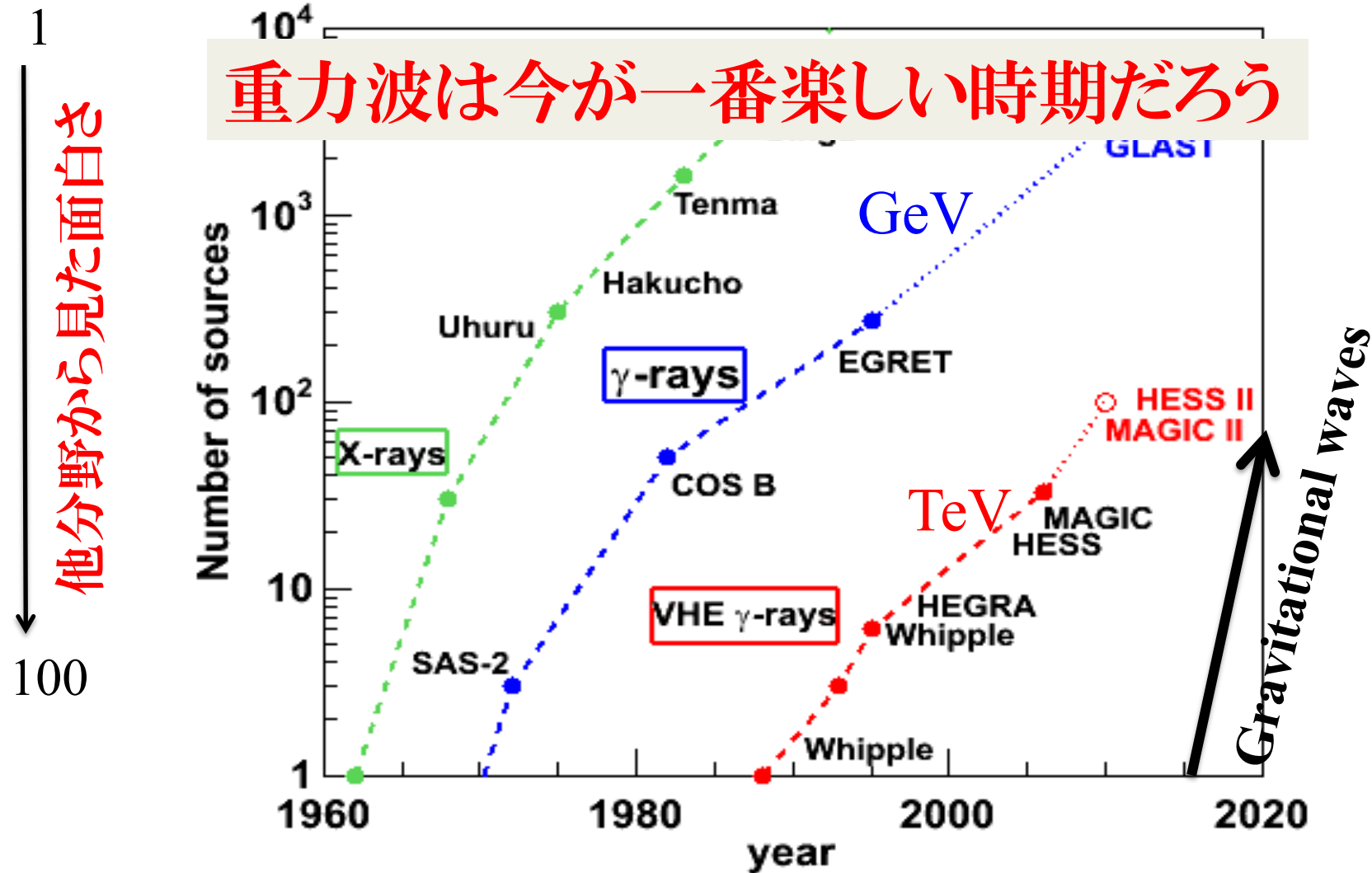
More candidates  
found by IAS group

赤が連星中性子星  
その他BH-BH

- GW190510 ?
- GW190512
- GW190513
- GW190517
- GW190519
- GW190521
- GW190602
- GW190630
- +5 in July

# 天体観測数は大抵、飛躍的に増える

## Kifune Plot



Courtesy Ioka



## II 2014年と現在

# 2014年

- Initial LIGOは完成し, Advanced LIGOが構築途上
- 重力波研究は将来有望になっていた。ただし、将来はまだ不透明な状態
- ✓ 将来を期待し、重力波研究は理論が先行(1990年代の宇宙論と良く似た状況)
- ✓ 数値相対論、解析的研究の両方で、定量的な研究が活性化
- ✓ 電磁波対応天体の研究も活性化しつつあった
- 今から思えば、うまい具合に準備が進んでいた

# 数値相対論の紹介

柴田 大

京都大学 基礎物理学研究所



2014/4/18:東大ビッグバンセンター

# 一般相対論的天体物理学の未解決問題

- 重力波は直接的には未検証 → **KAGRAに期待**
- 種々のブラックホールの誕生過程は未説明
- ブラックホールの存在は、直接的には未検証：  
ブラックホール近傍の曲がった時空は未検証
- 2つのブラックホールやブラックホールと中性子星からなる連星は未発見：連星中性子星は発見済
- 中性子星の内部状態/状態方程式はよく判っていない
- 中性子星の磁場の強度はなぜ典型的に $10^{12}$ ガウス？
- 中性子星磁場の進化の起源は未説明
- ジェットの発生機構は長年の問題
- 継続時間の短いガンマ線バーストの起源は？
- 超新星爆発のメカニズムの解明も道半ば
- 金、銀、プラチナなどの重元素の起源は？
- そもそも一般相対論は常に正しいのか？

2014/4/18:  
8

# 今日の結論(予定)

未解決問題の解決に、  
重力波観測や数値相対論  
は大いに寄与するだろう

数年経つと

「重力波を検出して満足するつもりだったが、それだけではなく元素合成の大問題が解決した」となるかもしれない。

これが宇宙物理学の醍醐味

2014/4/18:

# 一般相対論的天体物理学の未解決問題

- 重力波は直接的には未検証 → KAGRAに期待
- 種々のブラックホールの誕生過程は未解明
- ブラックホールの存在は、直接的には未検証：  
ブラックホール近傍の曲がった時空は未検証
- 2つのブラックホールやブラックホールと中性子星からなる連星は未発見：連星中性子星は発見済
- 中性子星の内部状態/状態方程式はよく判っていない
- 中性子星の磁場の強度はなぜ典型的に $10^{12}$ ガウス？
- 中性子星磁場の進化の起源は未解明
- ジェットの発生機構は長年の問題
- 継続時間の短いガンマ線バーストの起源は？
- 超新星爆発のメカニズムの解明も道半ば
- 金、銀、プラチナなどの重元素の起源は？
- そもそも一般相対論は常に正しいのか？

2014/4/18:  
11

# 一般相対論的天体物理学の未解決問題

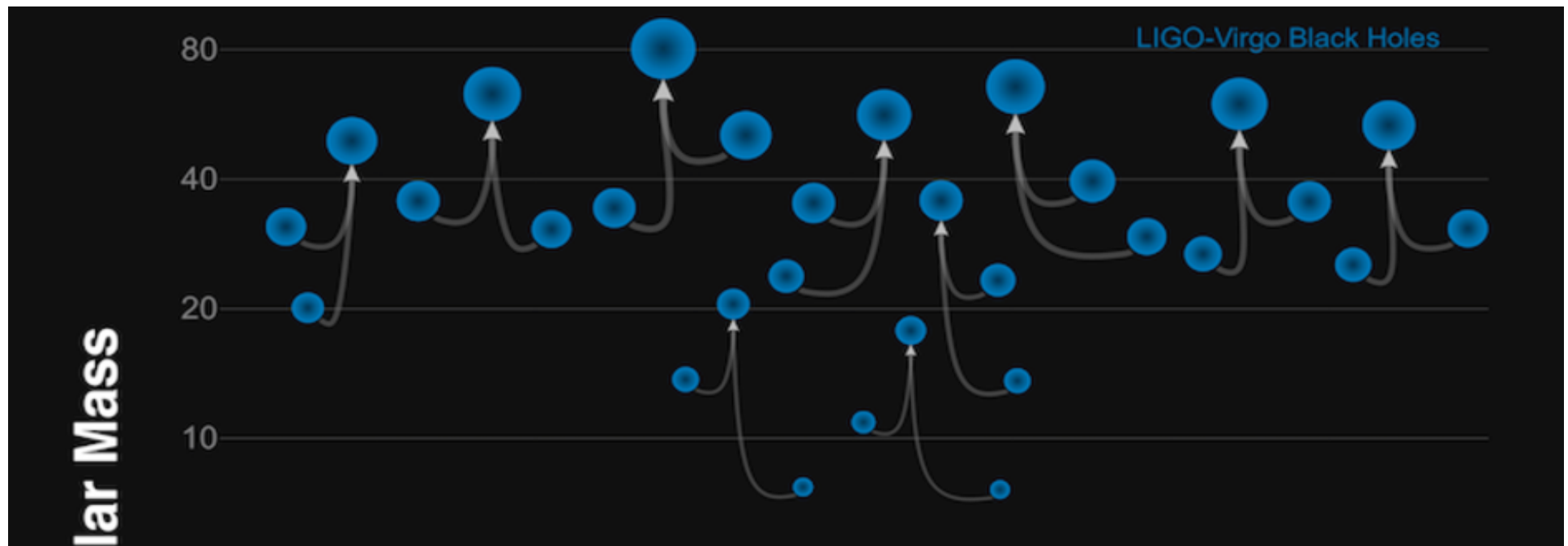
- 重力波は直接的には未検証 → Advanced LIGOが解決
- 種々のブラックホールの誕生過程は未説明：ヒント得る
- ブラックホールの存在は、直接的には未検証：解決  
ブラックホール近傍の曲がった時空は未検証
- 2つのブラックホールやブラックホールと中性子星からなる連星は未発見：連星中性子星は発見済
- 中性子星の内部状態/状態方程式はよく判っていない 重力波が有力な探求手段に
- 中性子星の磁場の強度はなぜ典型的に $10^{12}$ ガウス？
- 中性子星磁場の進化の起源は未説明 重力波観測とは直接関係しない
- ジェットの発生機構は長年の問題
- 継続時間の短いガンマ線バーストの起源は？ → 少なくとも一部は連星中性子星
- 超新星爆発のメカニズムの解明も道半ば
- 金、銀、プラチナなどの重元素の起源は？
- そもそも一般相対論は常に正しいのか？

2019/7/29:

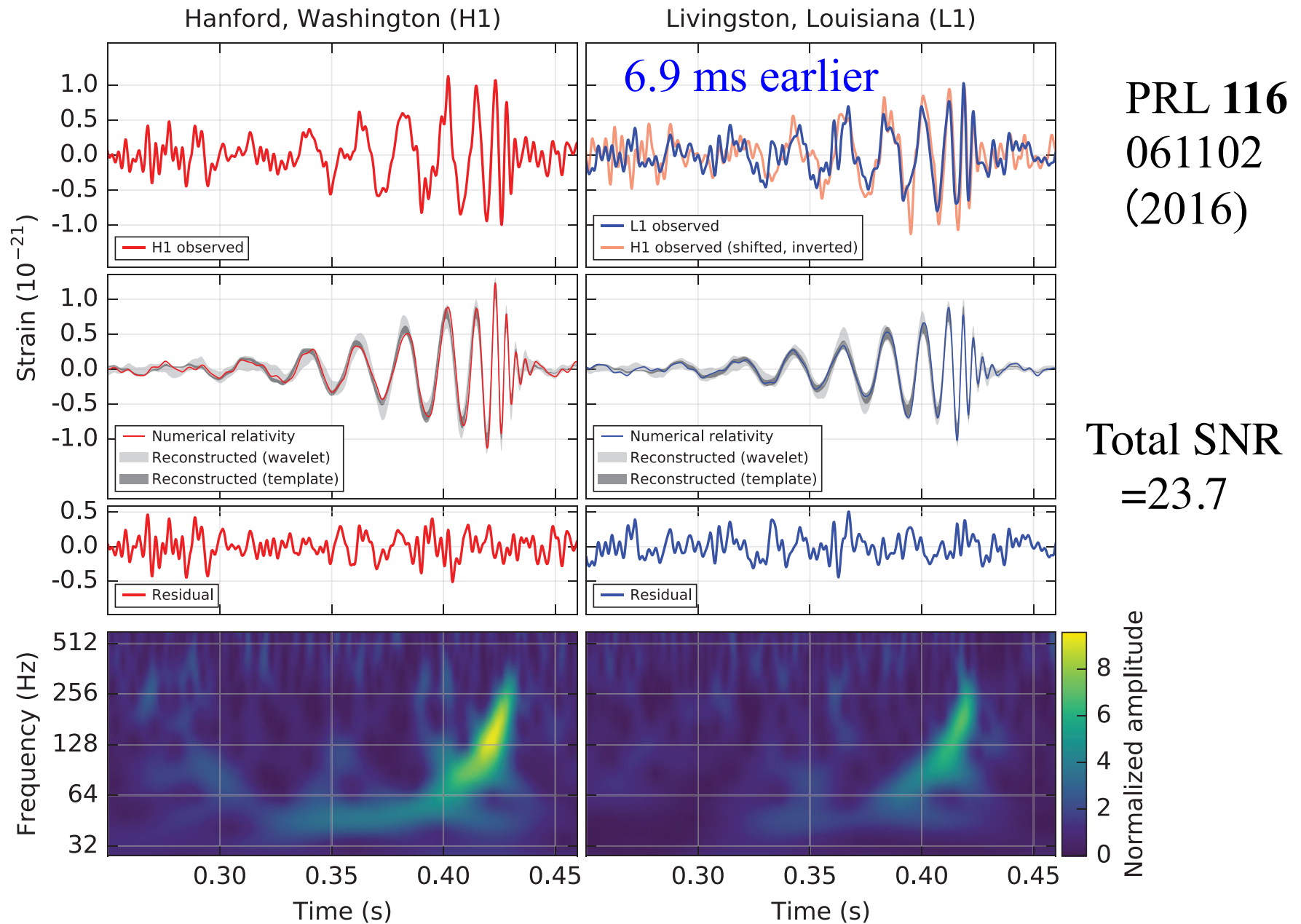


# III 連星ブラックホールの合体

- 連星ブラックホールの**初めての発見**(GW150914)
- ブラックホール近傍の**曲がっていて、しかも変化している時空**を初めて観測
- すでに20以上観測(今年4月からさらに急増)
- 多様なブラックホール質量: 7—50 太陽質量



# GW150914: Gravitational wave signal



# Gravitational-wave detectors: Advanced LIGO

## Simultaneous Detection *LIGO*



**LIGO: Hanford**

10

Distance = 3000km



10 light milliseconds



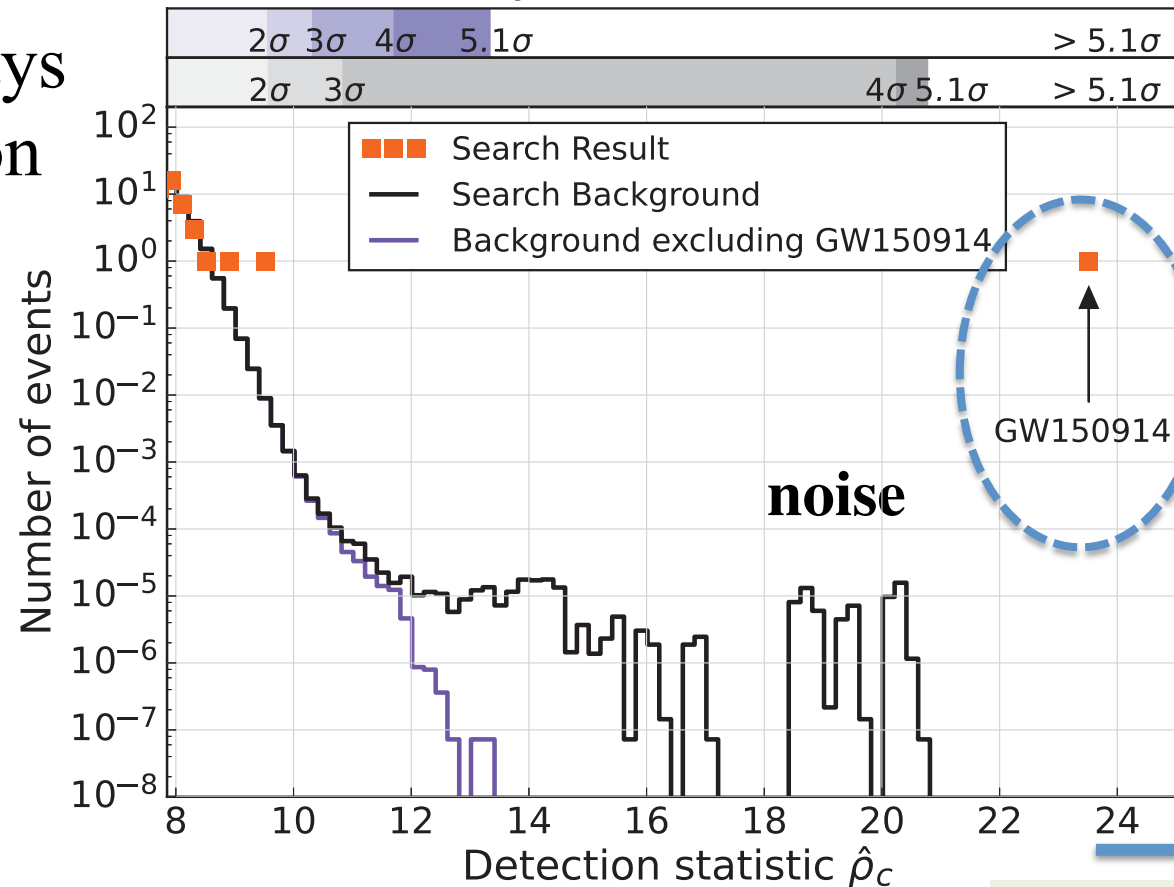
**LIGO: Livingstone**

# Noise vs signal

PRL 116, 2016, LIGO collaboration

Binary coalescence search

Per 16-days observation



非常に高い  
確からしさ

- $\rho_c < 9$  : low confidence level
- $\rho_c > 12$ : Significant confidence

$$\rho_c = \left( 4 \int_0^{f_{\max}} \frac{h_f g_f^*}{S_n} df \right)^{1/2}$$

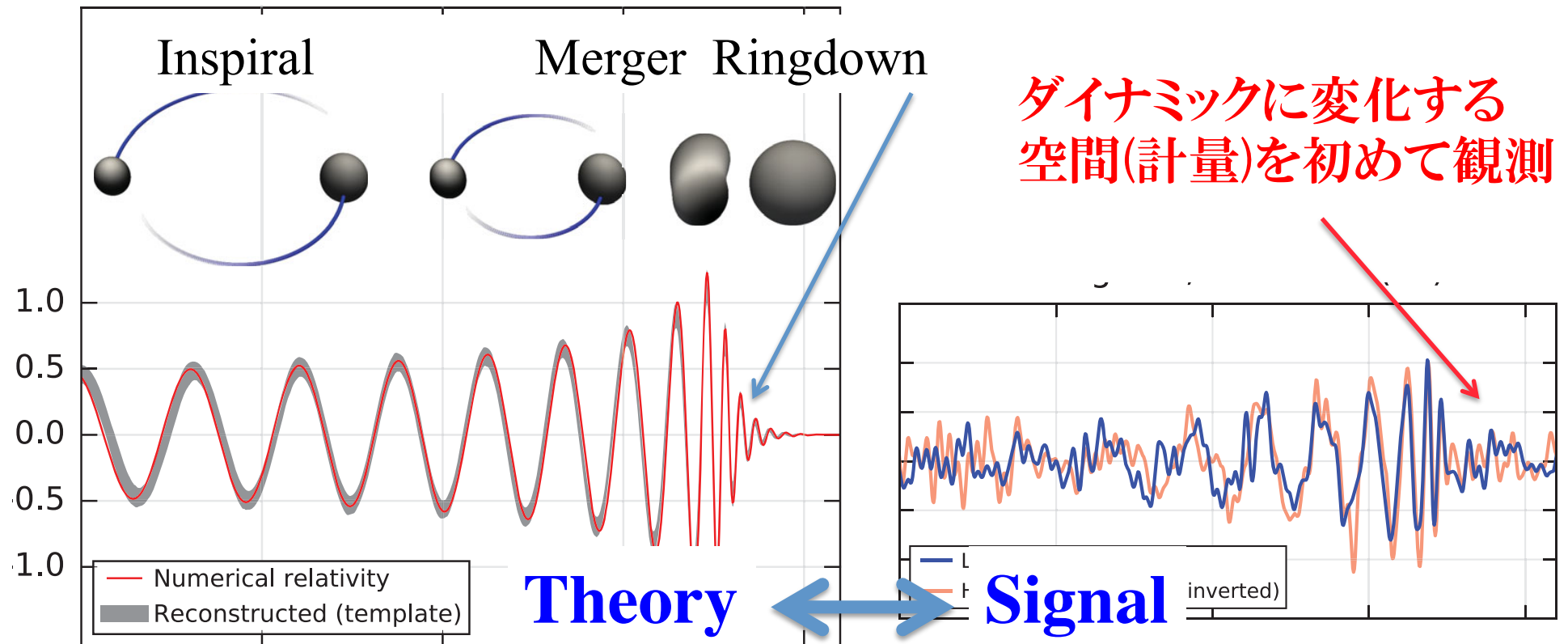
# **Numerical relativity simulation for binary black hole merger**

**Courtesy: Albert Einstein Institute/SXS:  
Grateful to Roland Haas & Alessandra Buonanno**





# Gravitational waveform by numerical relativity



Good agreement ! → Conformation

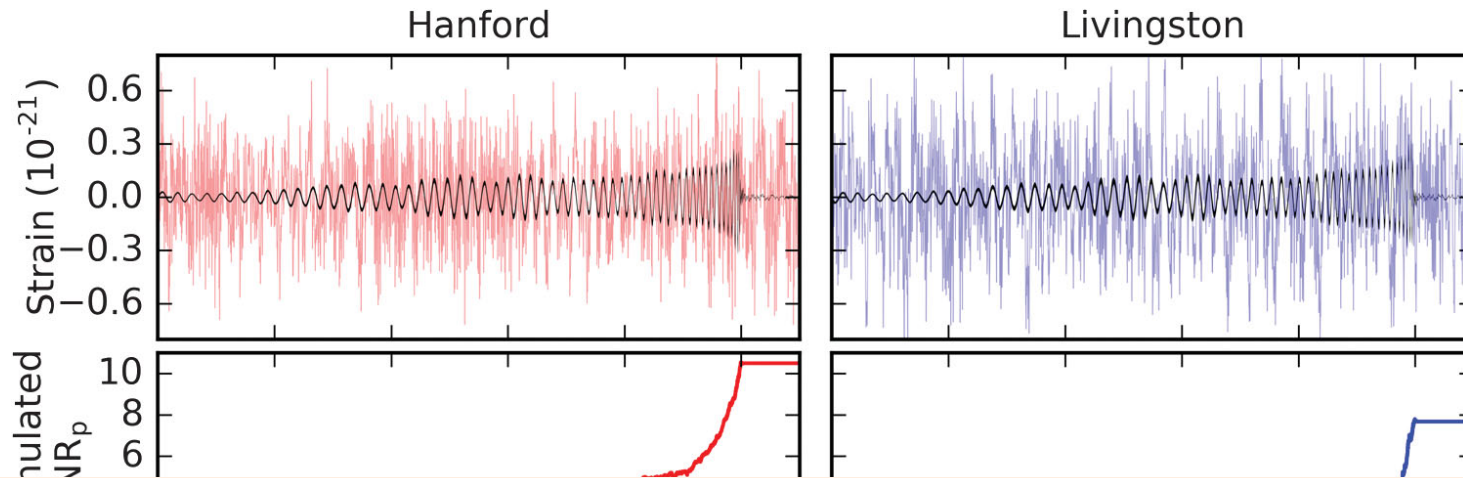


Parameter extraction

$$M_1 \sim 36 M_{\text{sun}} \quad M_2 \sim 29 M_{\text{sun}}$$

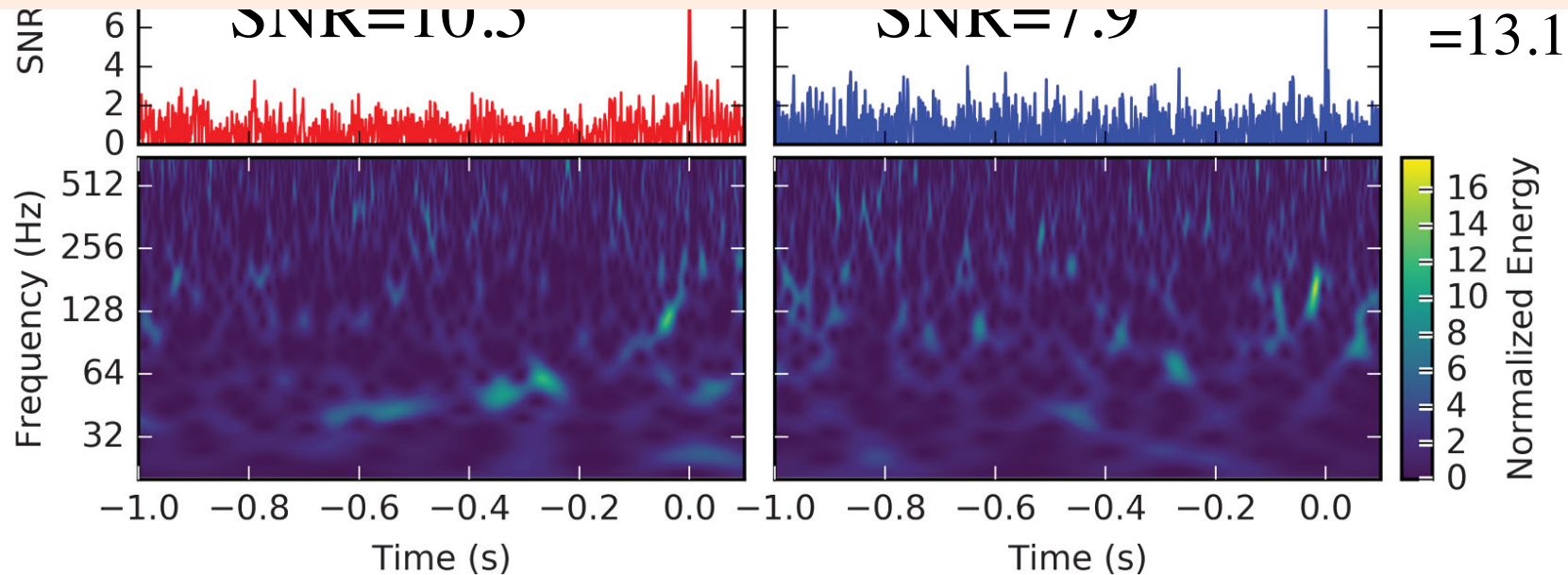
# GW151226

14+7.5 solar mass



PRL **116**,  
241103  
(2016)

個々の波形ははっきり見えない→正確な理論波形が鍵  
理論研究の役割が大きかった



NR

# その後の展開

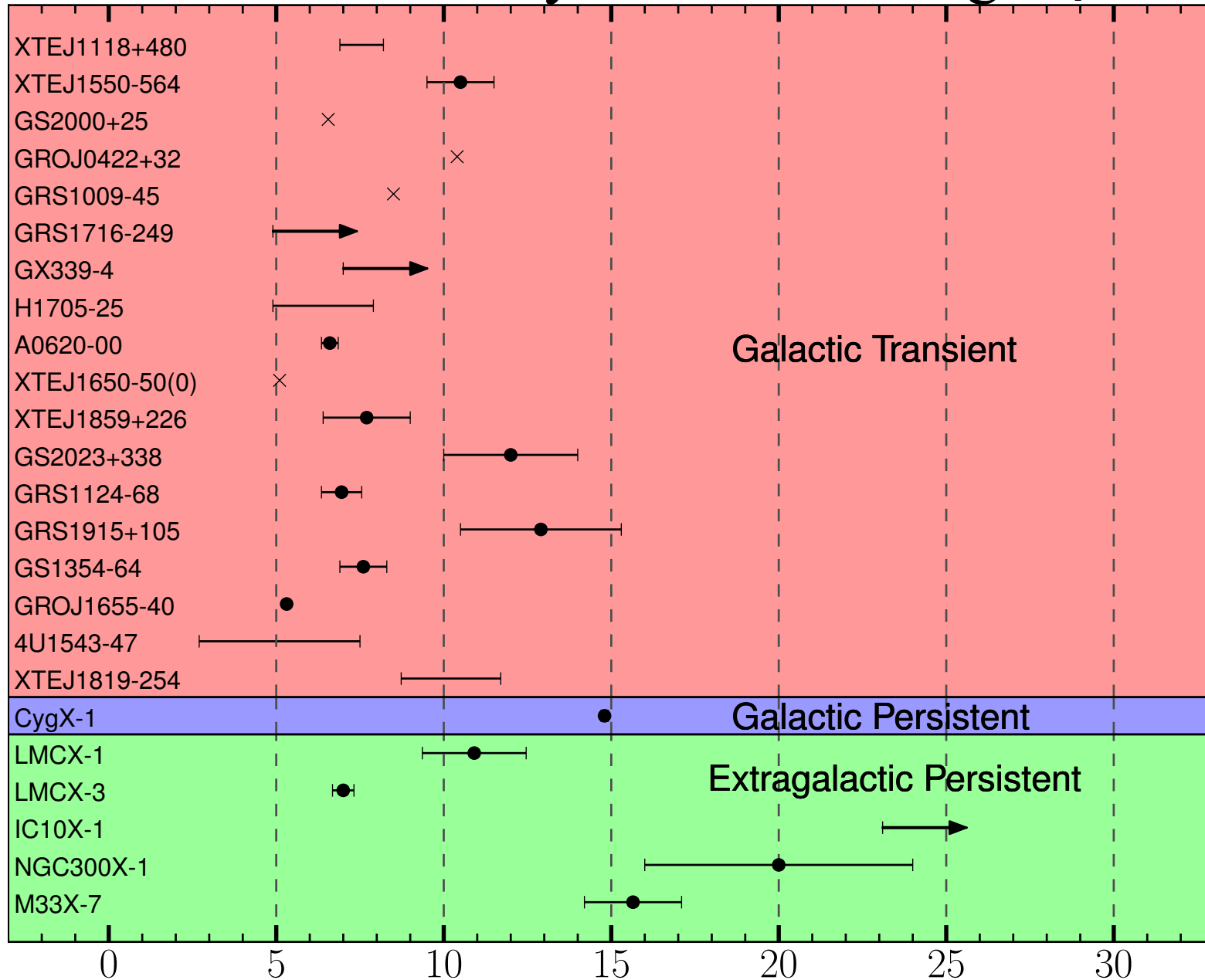
- 連星ブラックホールが多数観測される
- 多くの20太陽質量以上のブラックホール
- ✓ われわれの銀河や近傍銀河の中には、確実に20太陽質量以上のブラックホールはなかった



- 予想に反した理由は？



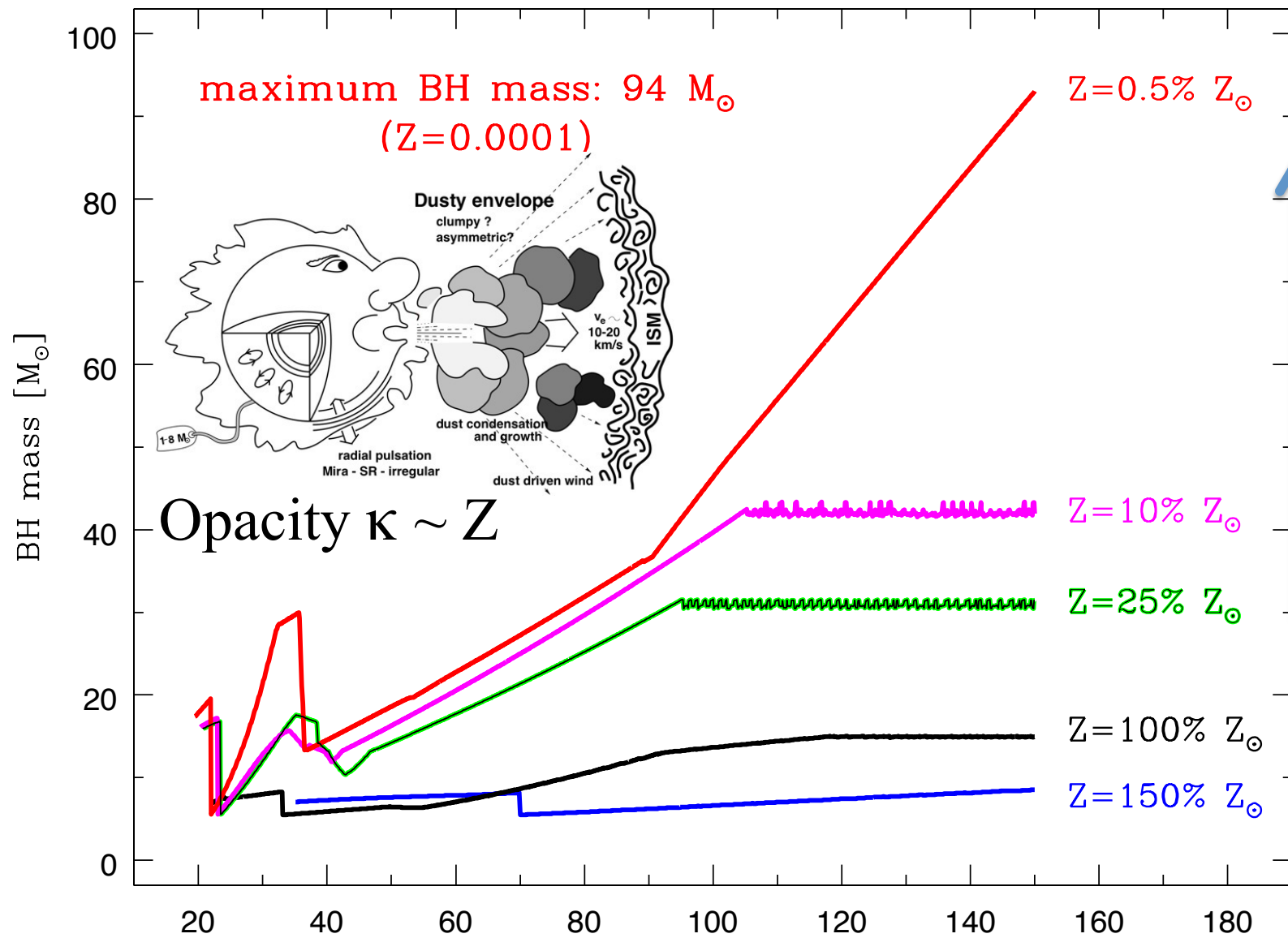
# Mass of BH in X-ray binaries of Aug. 2014



$M_{\odot}$

<https://www.stellarcollapse.org/bhmasses>

# Predicted dependence of BH mass on metallicity

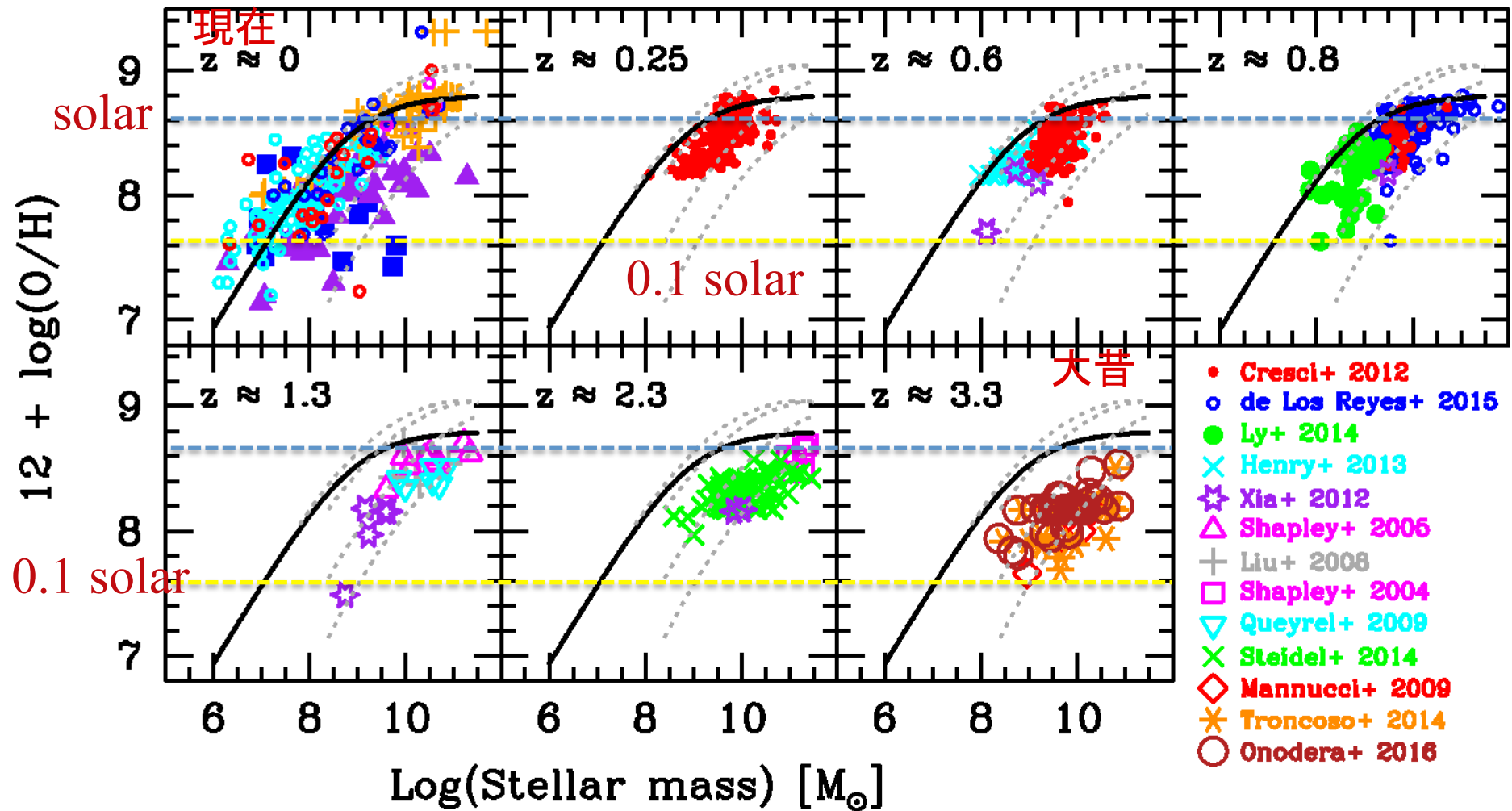


Smaller opacity, weaker stellar wind  
& Smaller mass loss

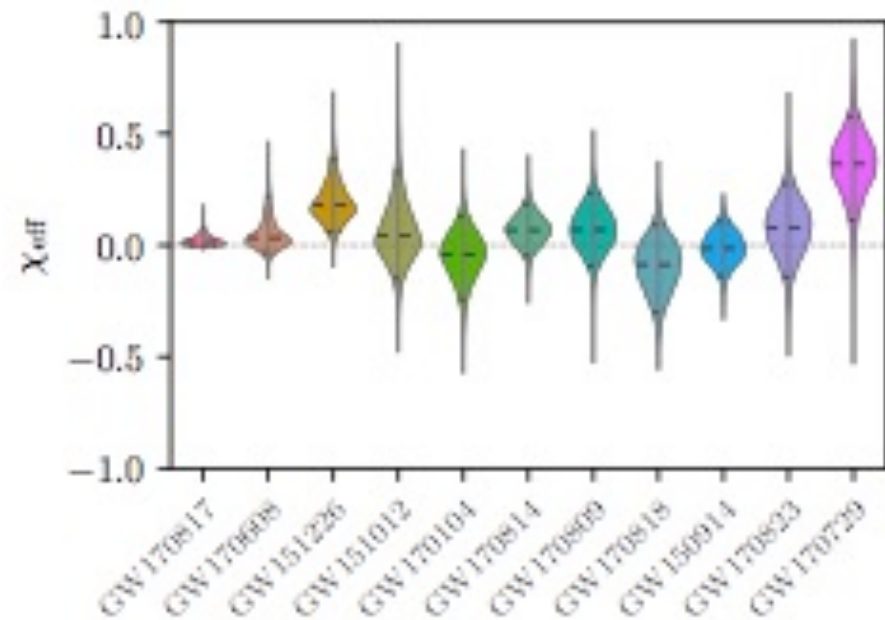
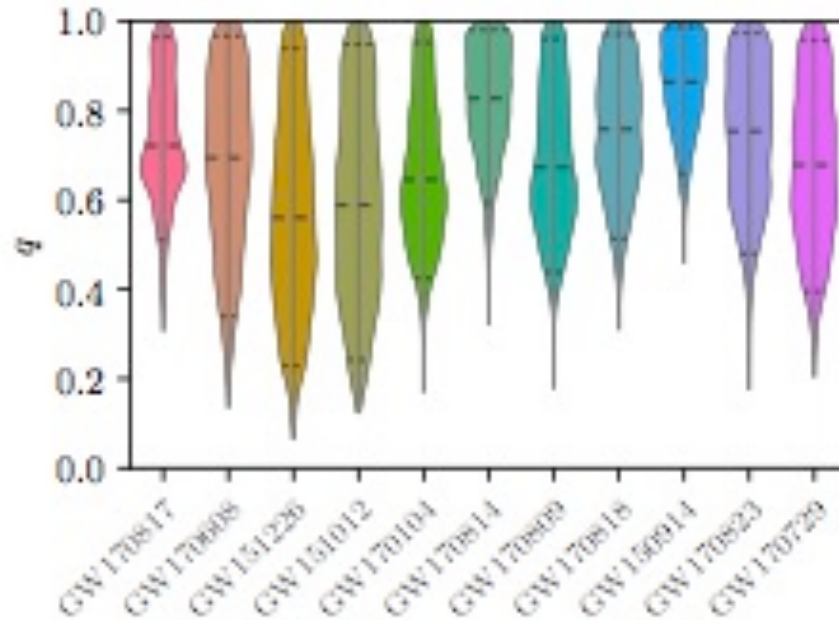
Belczynski et al. Nature 2016 initial (ZAMS) mass [ $M_{\odot}$ ]

# Metallicity evolution in the universe:

Small metallicity → 遠方宇宙か小さい銀河で重いBH



# 質量比とBHのスピパラメータ (O1, O2)

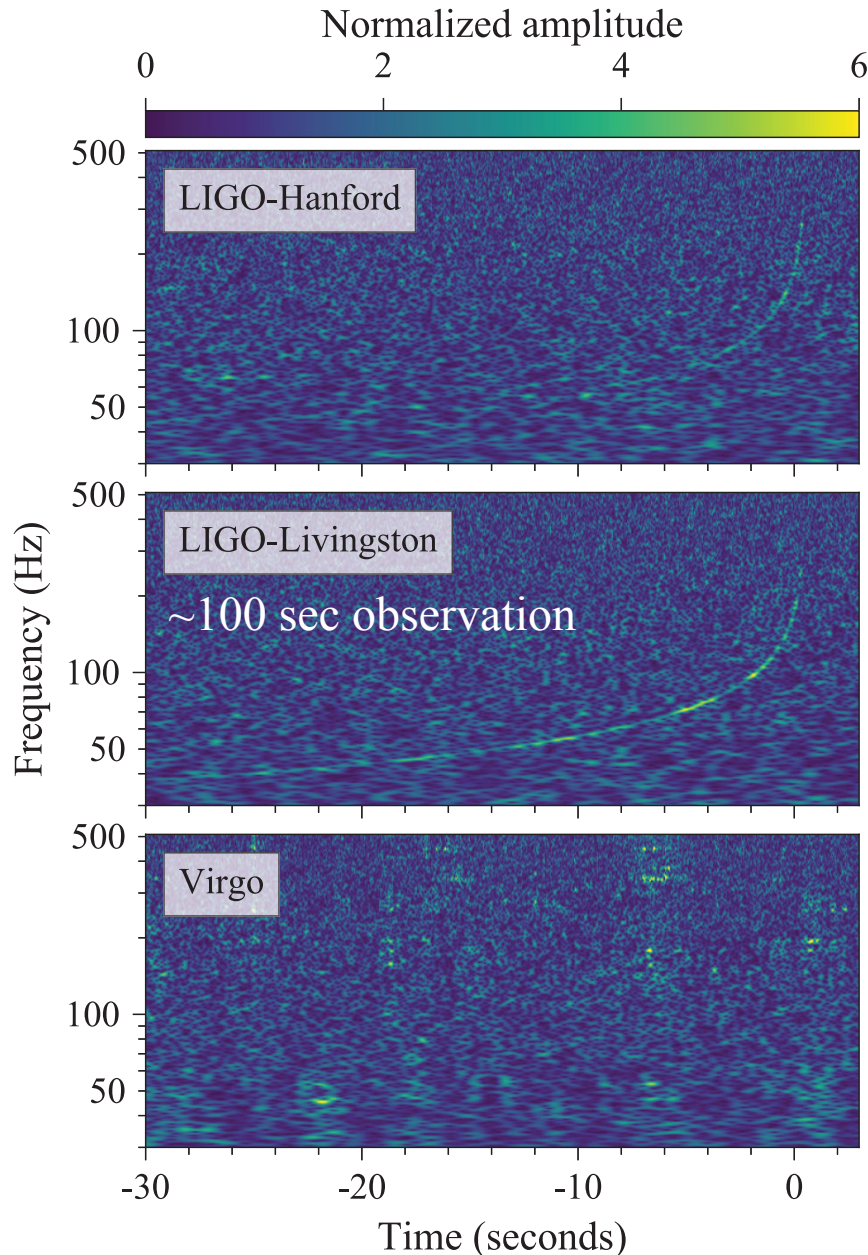


- 質量比は多様そう
- 回転しているBHの合体もありそう: 連星の進化起源か
- 今後、スピンの宇宙赤方偏移依存性がわかれば  
連星BHの形成過程の理解に寄与するだろう

# IV 連星中性子星の合体

- 今のところ、1+1(+1)例: 重力波観測が公表されたのも、電磁波観測されたのも、今のところGW170817のみ
  - ✓ 中性子星の半径(tidal deformability)に新たな制限
  - ✓ 重力波以外に多様な電磁波観測
  - ✓ 元素合成研究に大きな寄与
- 数値相対論、数値的研究の役割が非常に大きかった

# Brief summary of GW170817



## Key parameters:

- Chirp mass =  $1.188^{+0.004}_{-0.002} M_{\text{sun}}$  (90%CL)

$$\text{Chirp Mass} = m_1^{3/5} m_2^{3/5} (m_1 + m_2)^{-1/5}$$

- Assuming reasonable spin of NSs, **Mass ratio = 0.7–1.0** (90% CL)

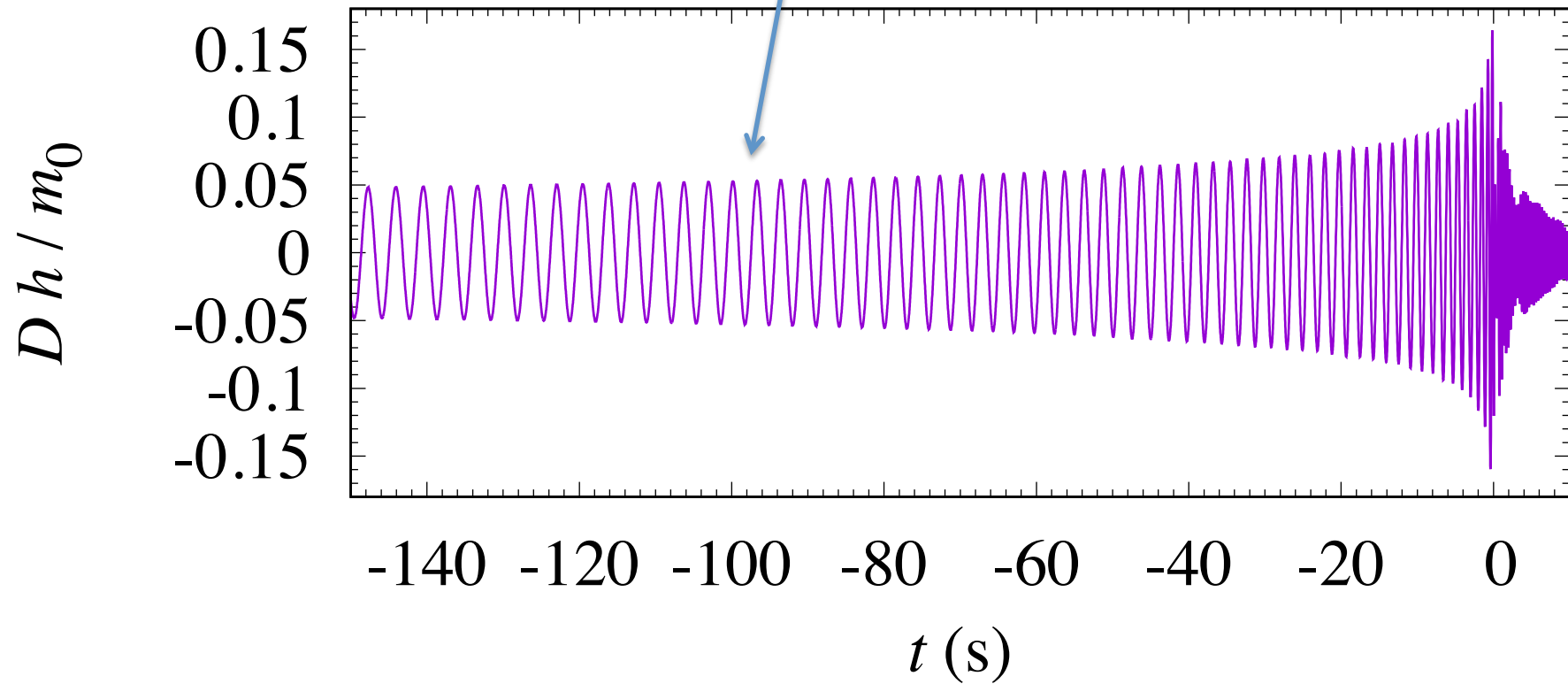
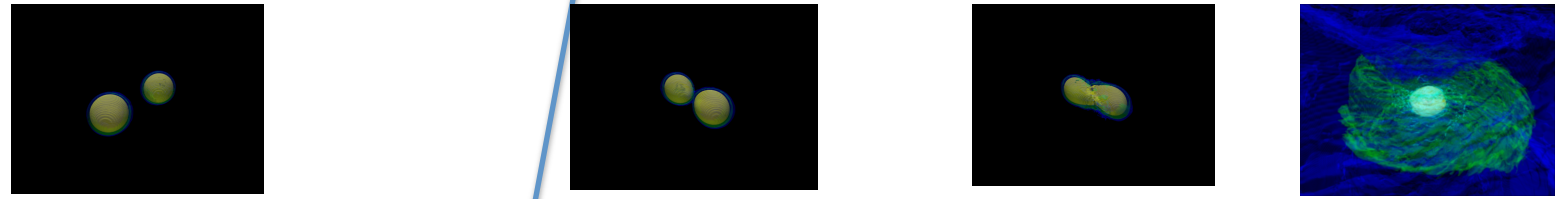
→ **Total mass = 2.73–2.78  $M_{\text{sun}}$**

→ **Binary neutron stars**

- **Viewing angle  $< \sim 30^\circ$**
- **Tidal deformability  $< 800$**   
→ **NS radius  $< 13.5$  km**

PRL 119, 161101 (2017)

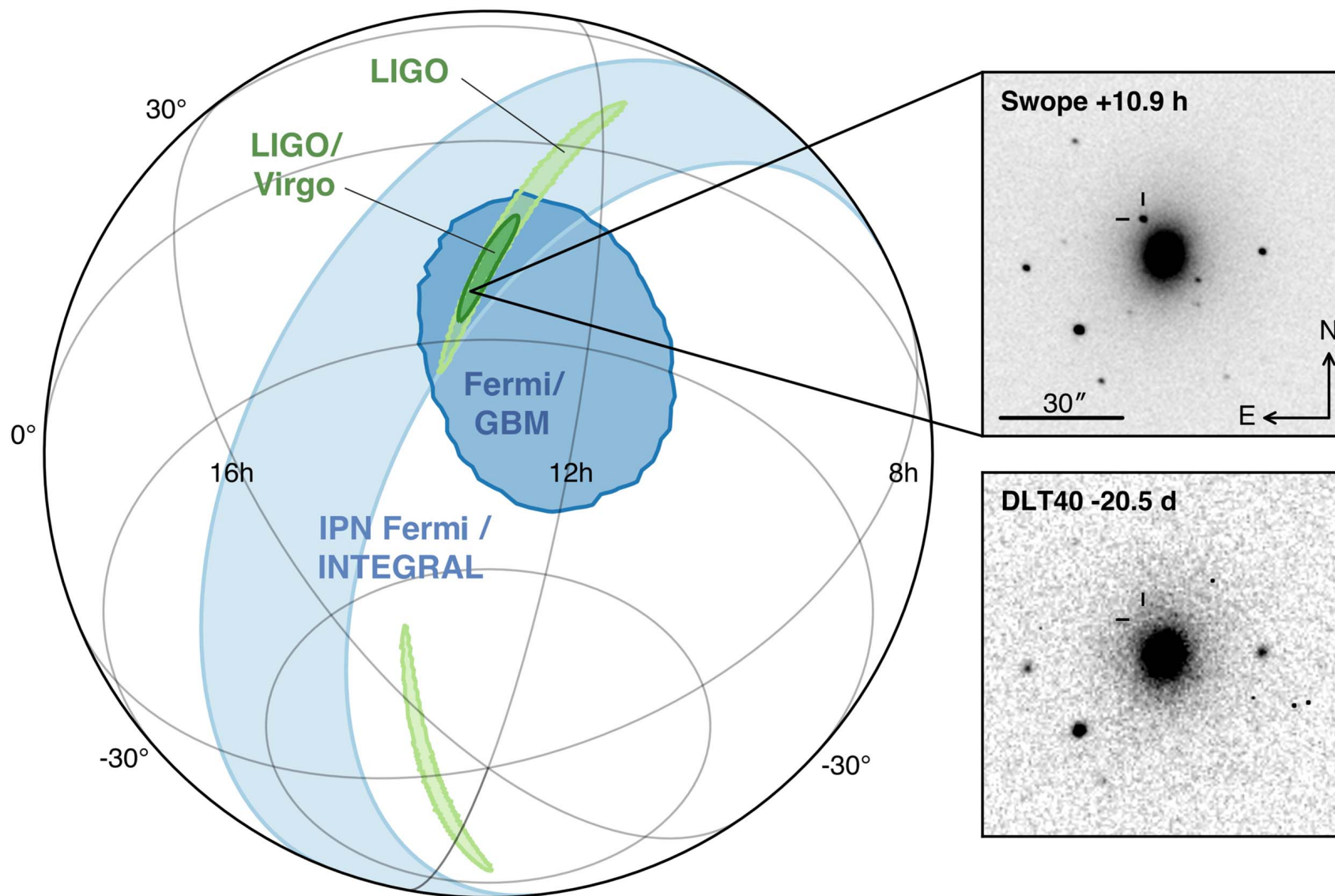
# Chirp signal





# GW observation determines the sky location within 30 square degree !

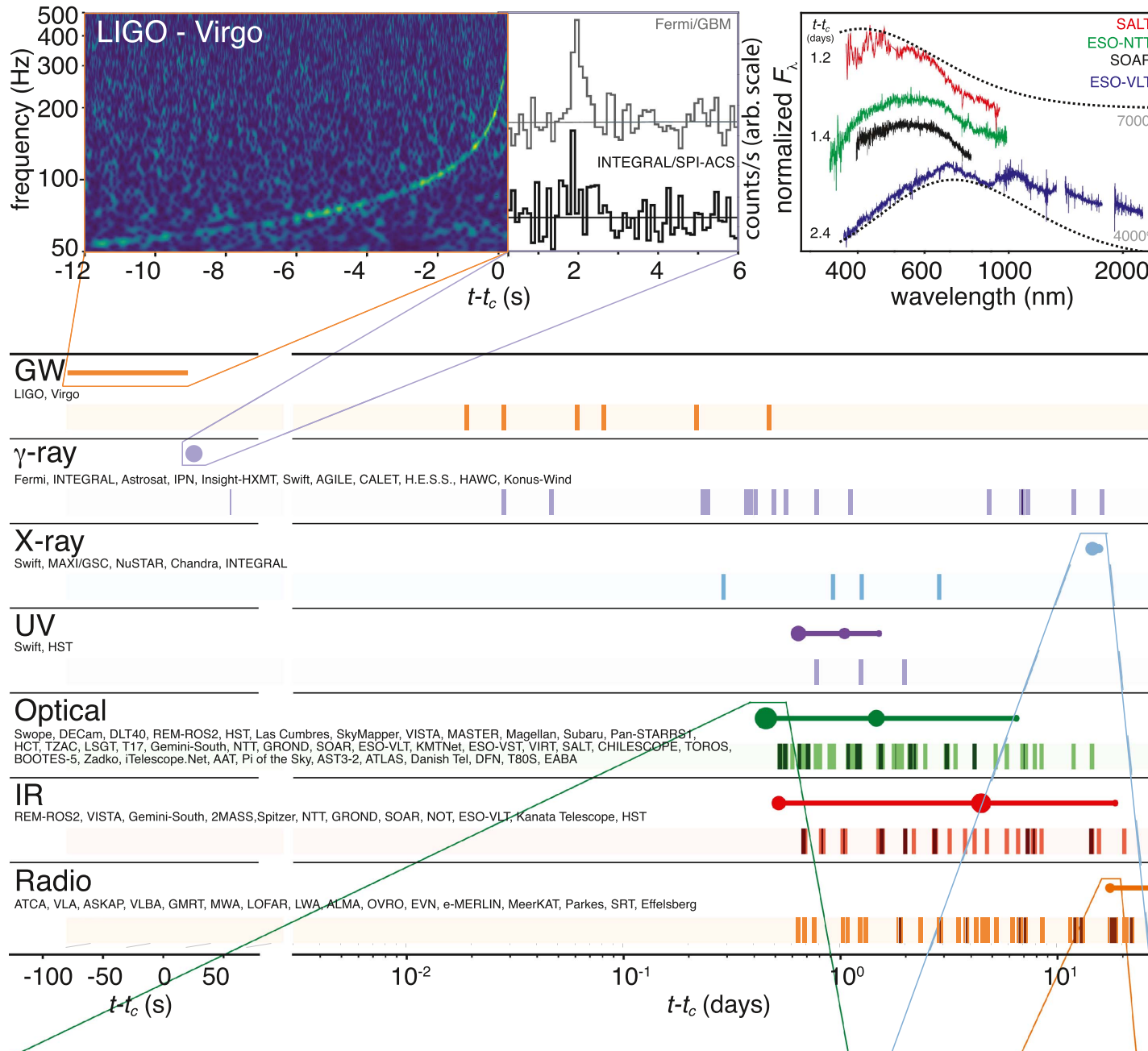
ApJ 848, 3000 authors 2017





# EM counterparts of GW170817

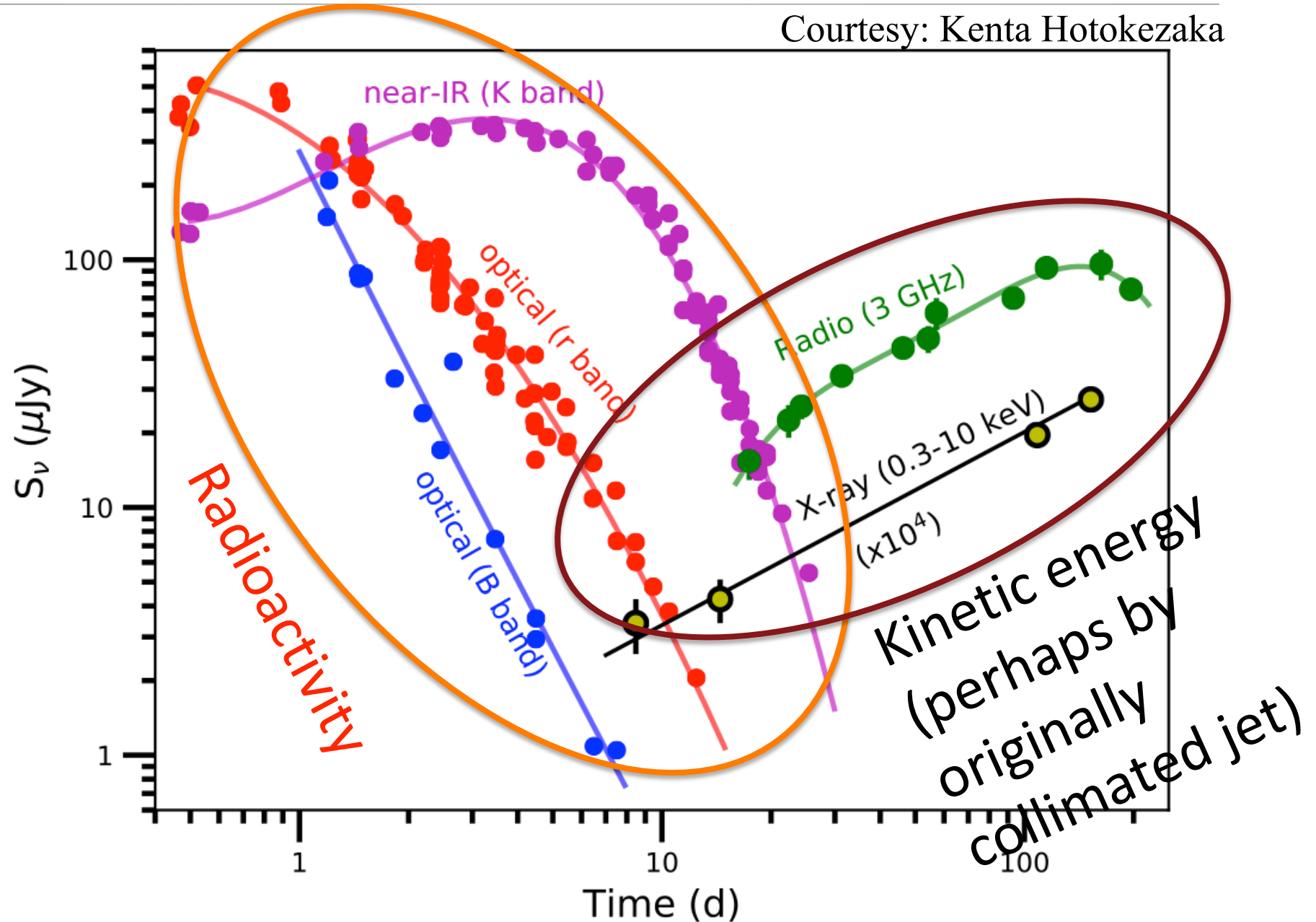
ApJ 848, 3000 authors 2017



MORE up to > 300 days

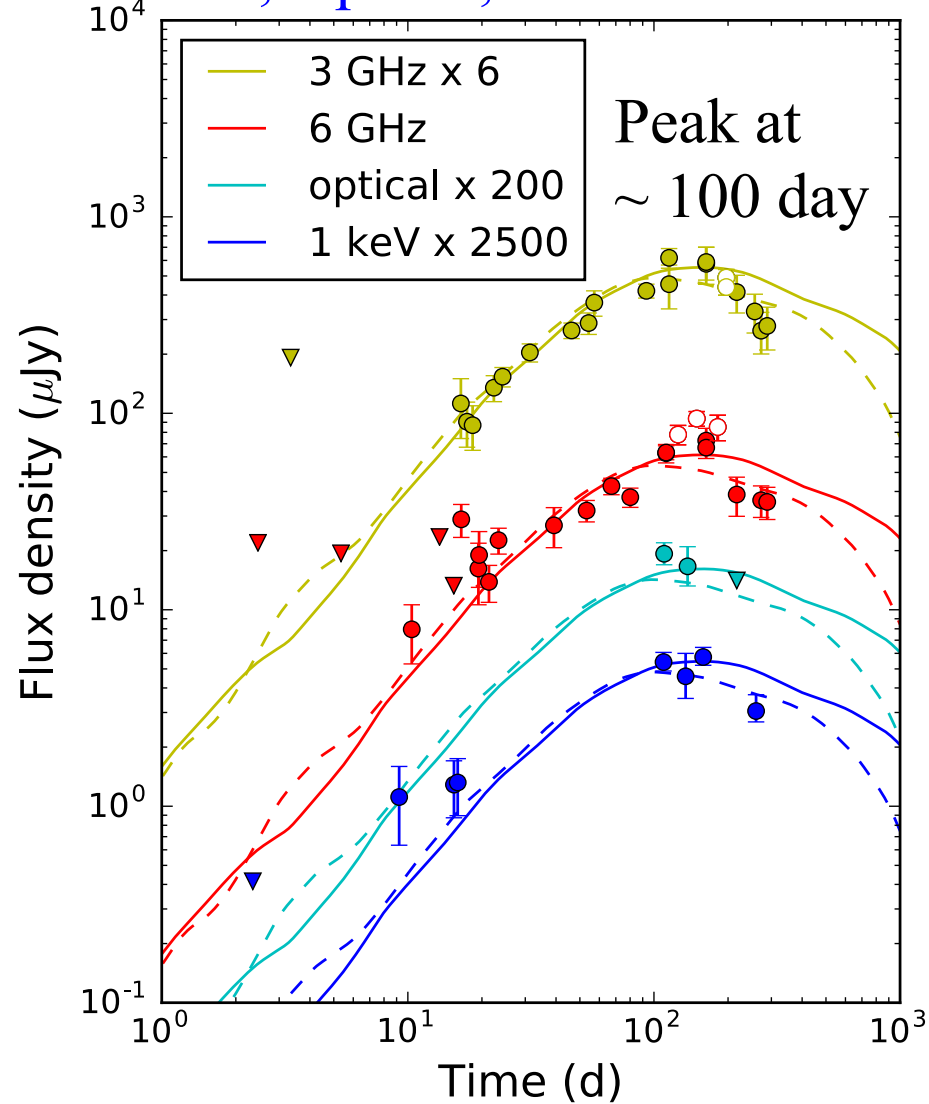
# Kilonova & (off-axis) afterglow

Courtesy: Kenta Hotokezaka

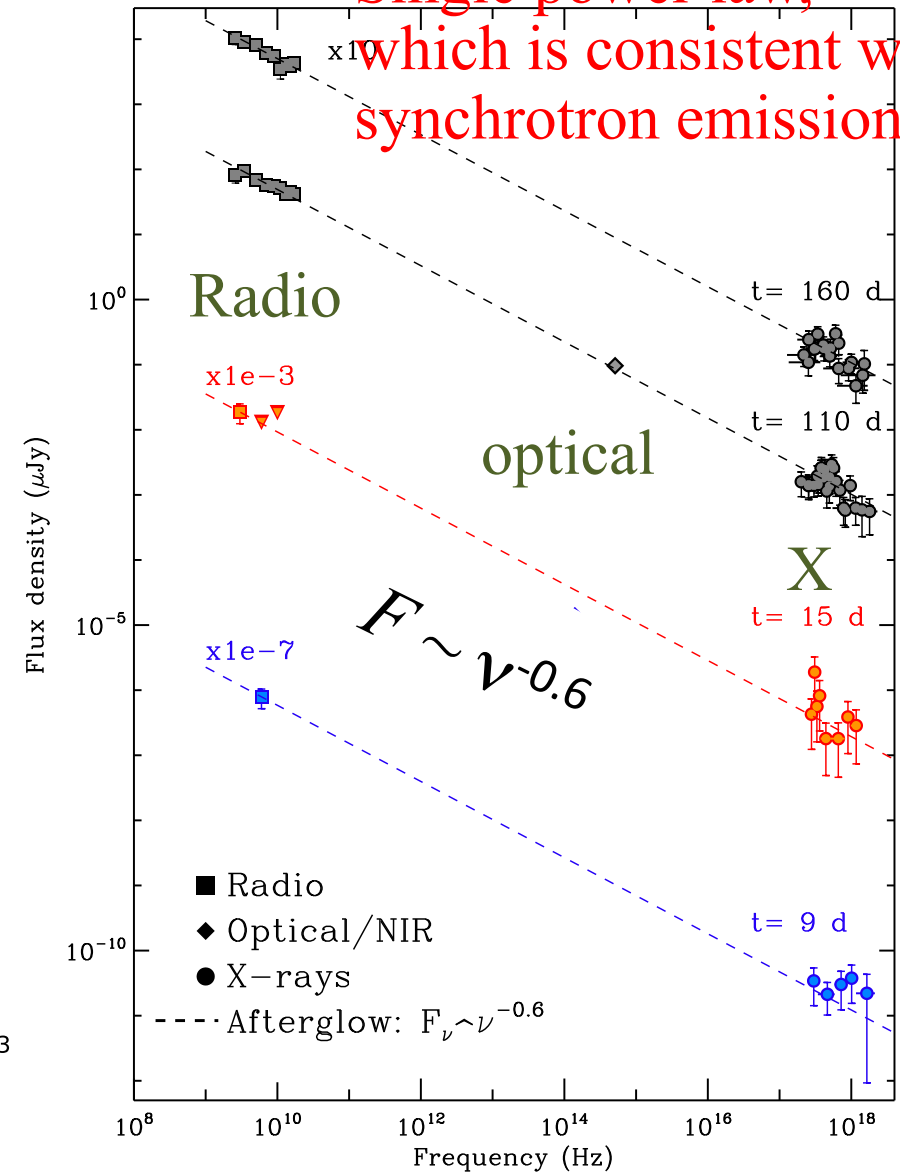


# Synchrotron emission from relativistic outflow

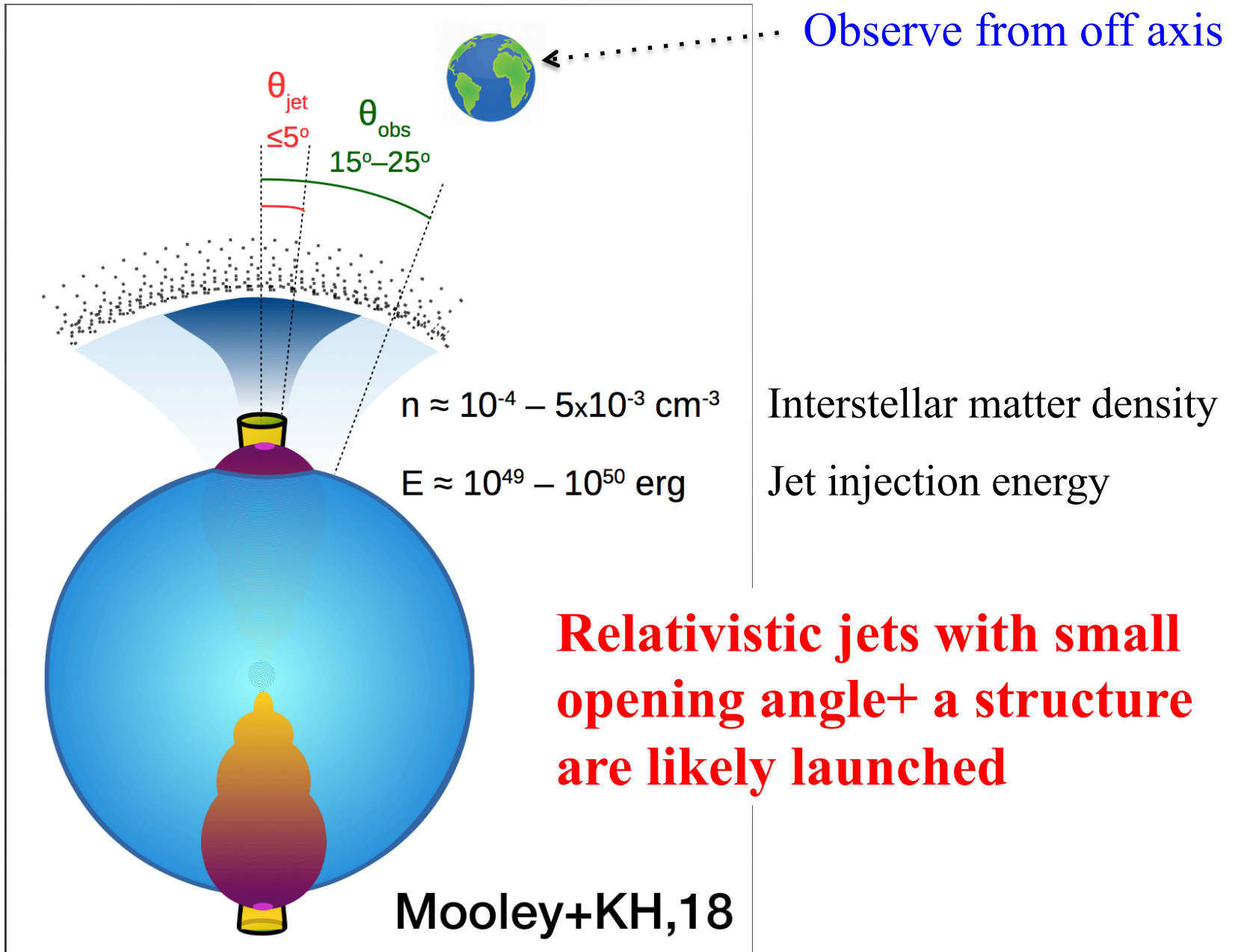
Radio, Optical, X observations



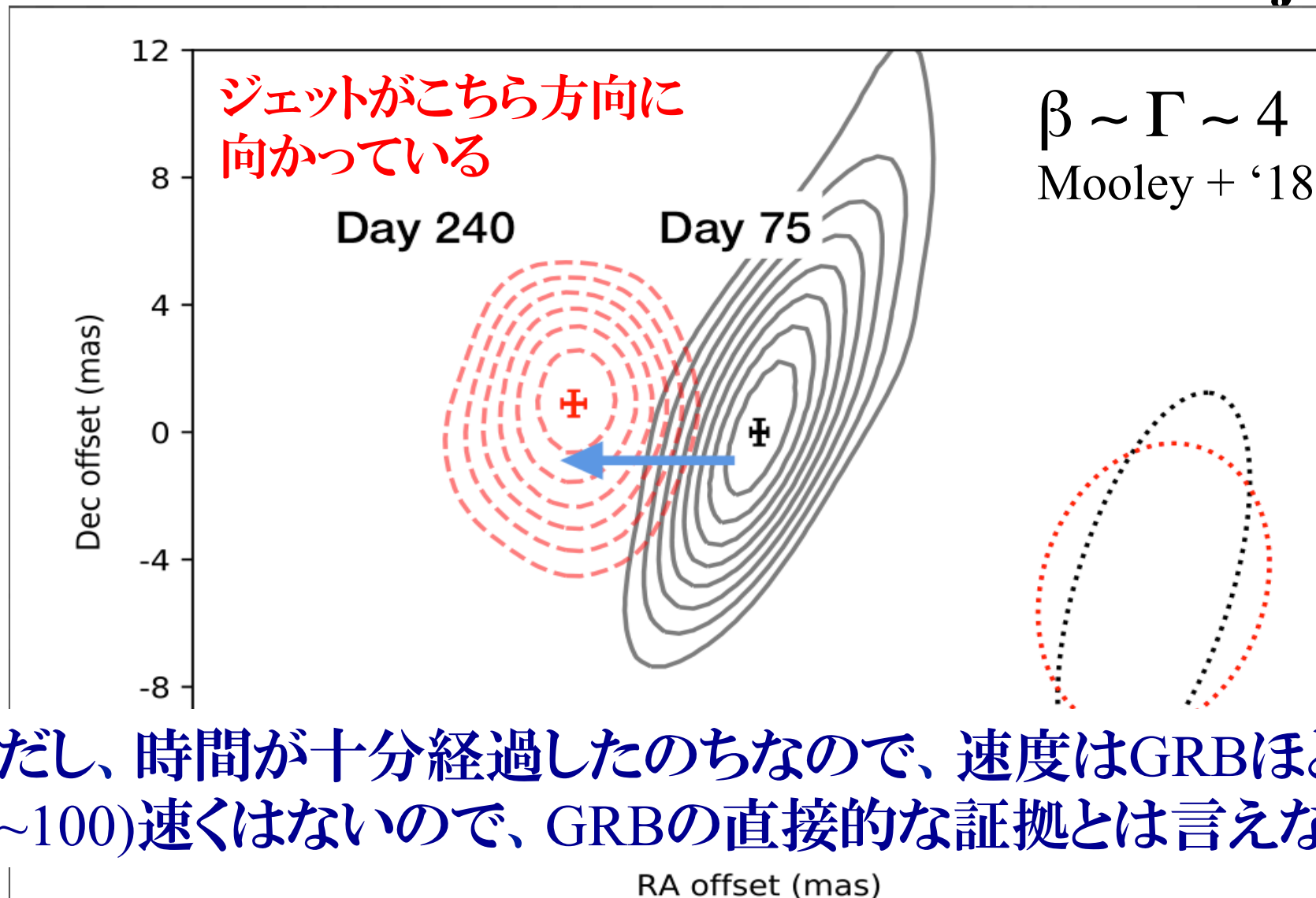
Single power law,  
which is consistent with  
synchrotron emission



# Popular model

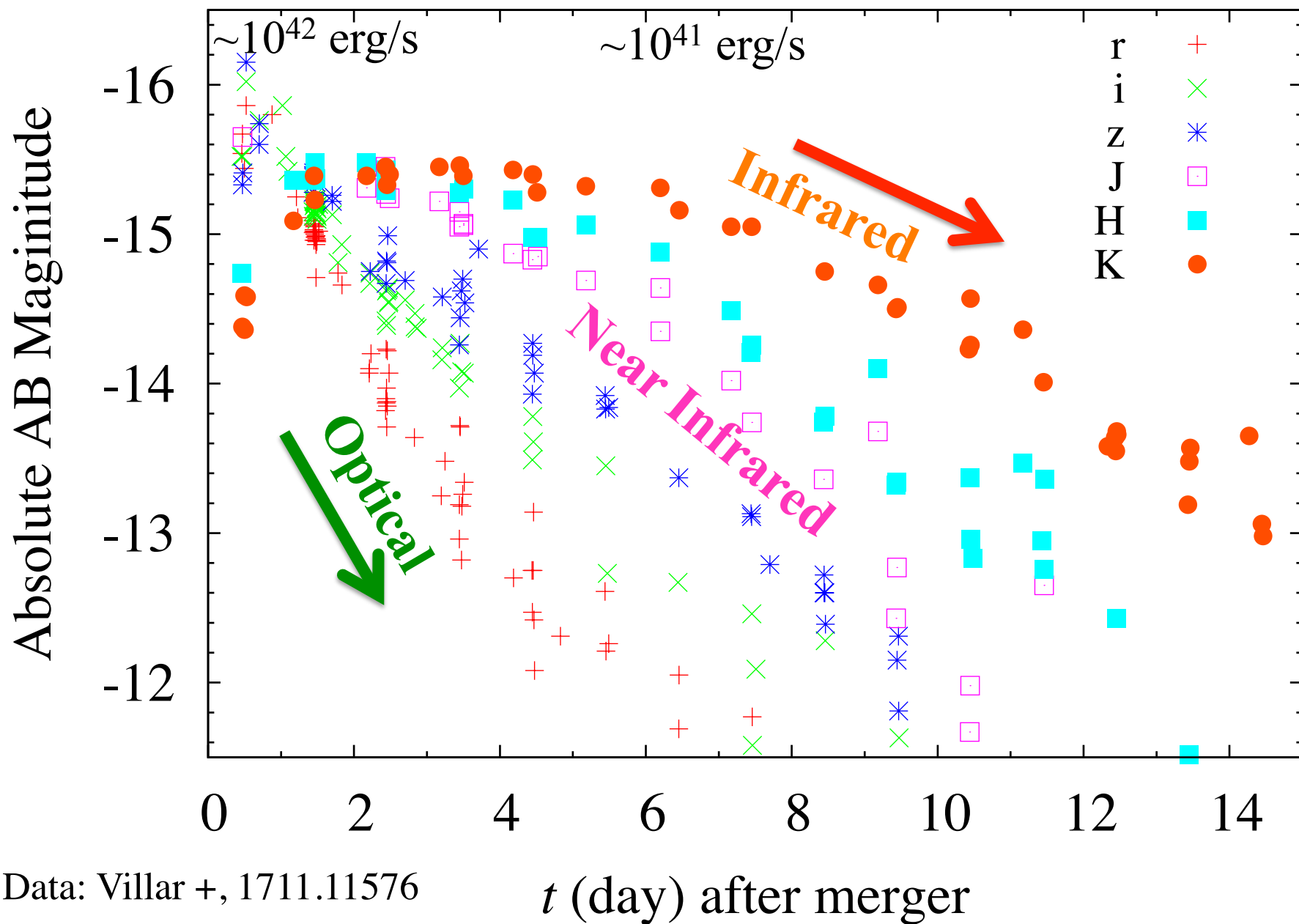


# Superluminal motion of radio counterpart of GW170817: an evidence for relativistic jet

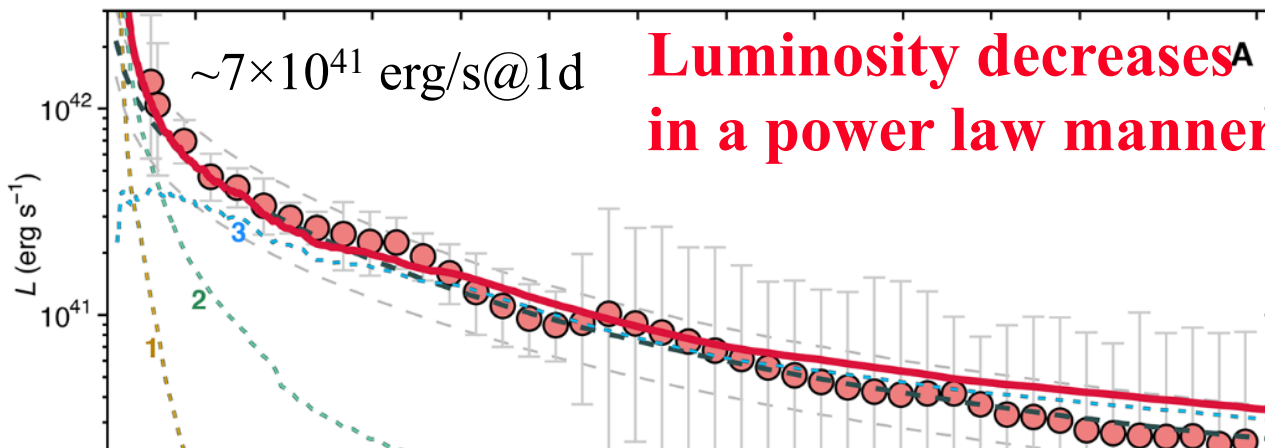


ただし、時間が十分経過したのちなので、速度はGRBほど ( $\Gamma \sim 100$ ) 速くはないので、GRBの直接的な証拠とは言えない。

# Optical-IR EM counterparts of GW170817



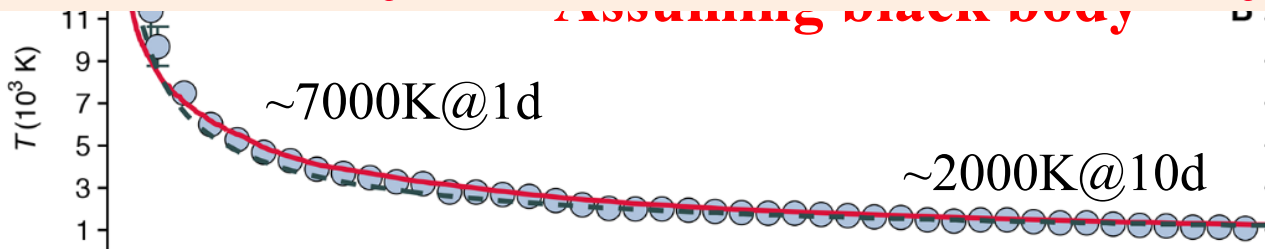
Luminosity



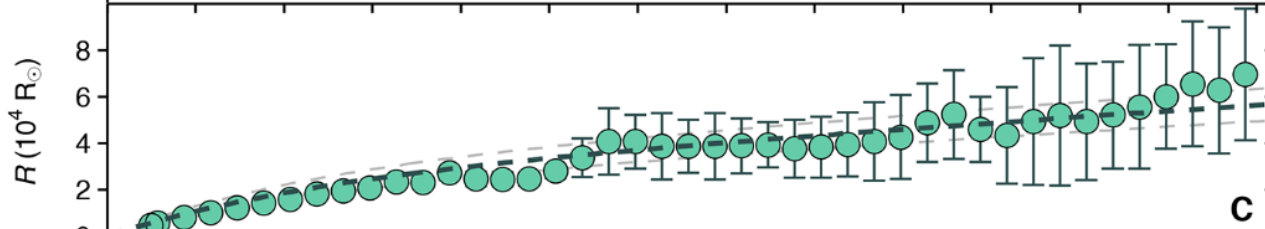
Kasliwal et al.  
Science 2017

**Agree broadly with the kilonova hypothesis**

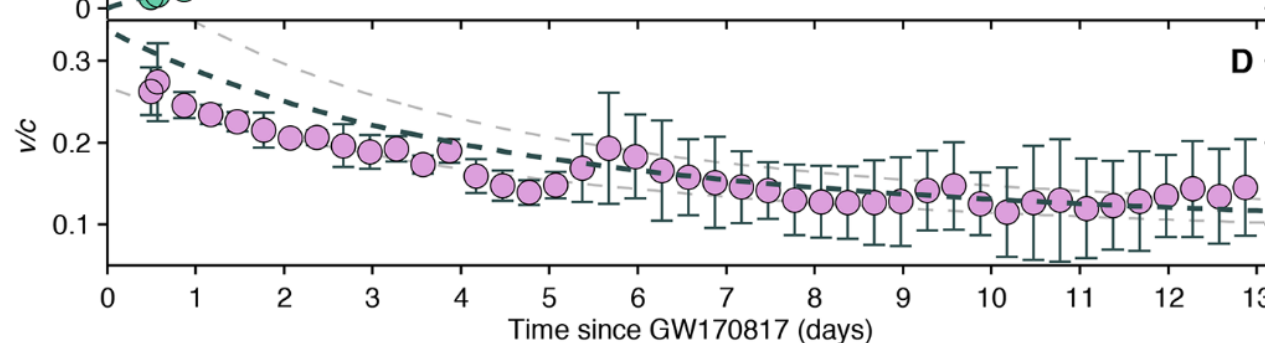
Temperature



Radius



Velocity



$$L = 4\pi\sigma R^2 T^4$$

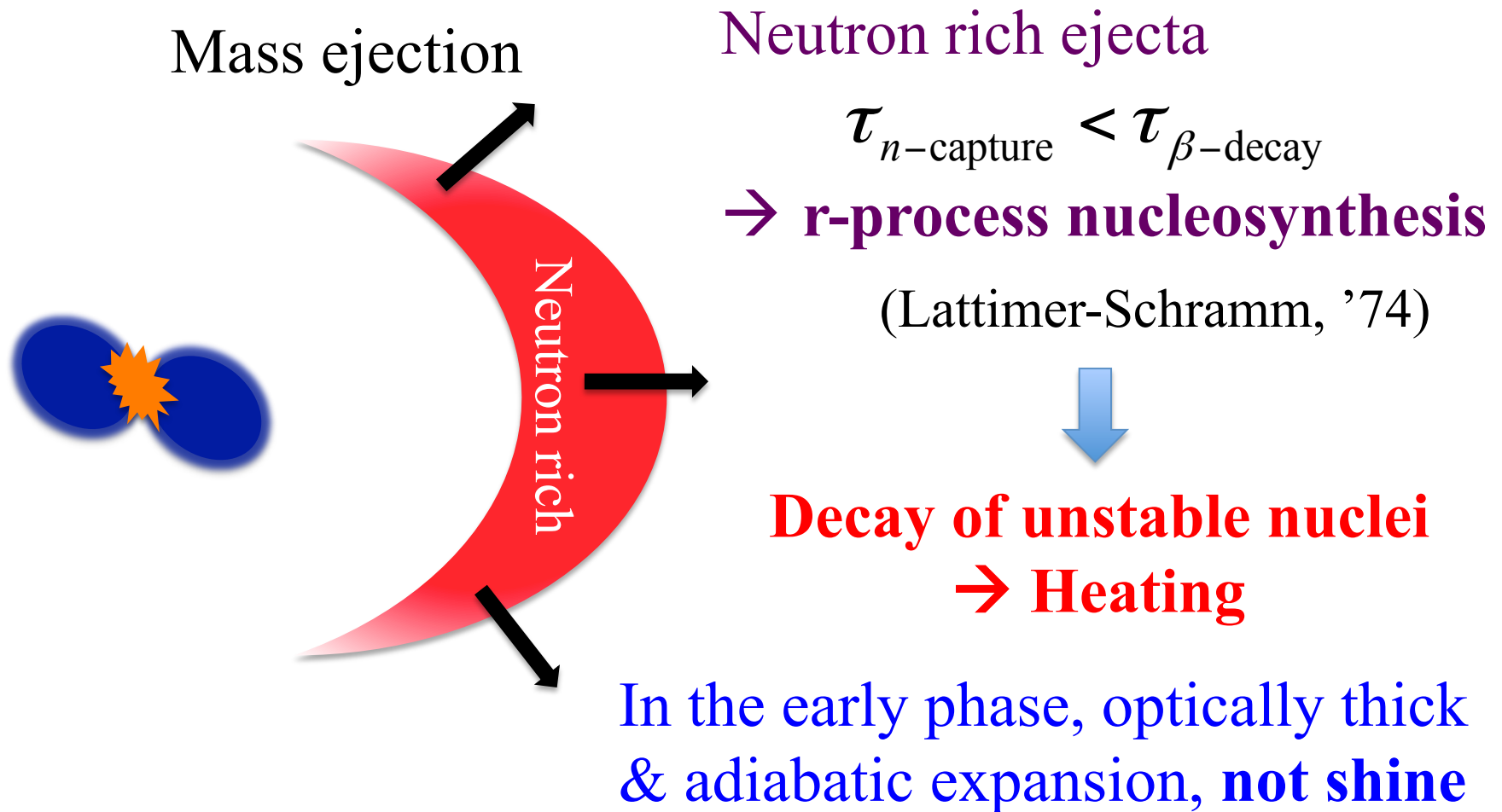
$$v = R / t$$

~0.25c @ 1d

~0.1c @ 10d

# Kilonova scenario

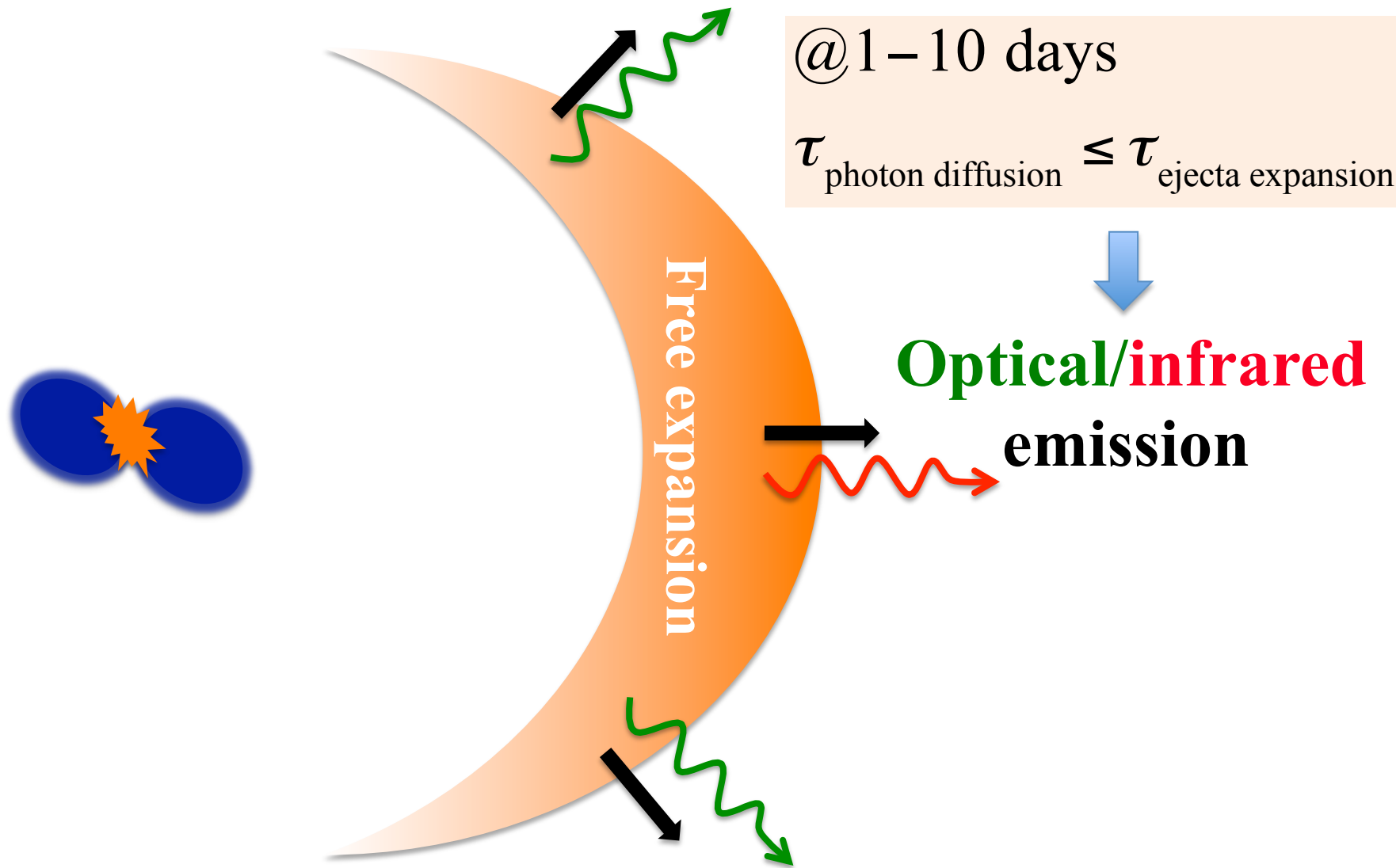
(Li-Paczyski 1998, Metzger et al. 2010)





# Kilonova/Macronova model

(Li-Paczynski 1998, Metzger et al. 2010)



# Peak luminosity & time of kilonova/macronova

(Li-Paczynski 1998, Metzger et al. 2010)

$$\tau_{\text{photon diffusion}} \sim \tau_{\text{ejecta expansion}}$$

10<sup>-6</sup> at ~ 1 day:  
Depends on time

$$L_{\text{peak}} \sim 2 \times 10^{41} \text{ ergs/s} \left( \frac{M}{0.01 M_{\odot}} \right)^{1/2} \left( \frac{v}{0.2c} \right)^{1/2} \left( \frac{\kappa}{1 \text{ cm}^2 / \text{g}} \right)^{-1/2} \left( \frac{f_{\text{r-proc}}}{1 \times 10^{-6}} \right)$$

$$\text{at } t \sim 1 \text{ days} \left( \frac{M}{0.01 M_{\odot}} \right)^{1/2} \left( \frac{v}{0.2c} \right)^{-1/2} \left( \frac{\kappa}{1 \text{ cm}^2 / \text{g}} \right)^{1/2}$$

**Agree broadly with GW170817 for typical mass, velocity and opacity of merger ejectra**

**Uncertainty of opacity: ~ 2 orders of magnitude which is determined by *lanthanide fraction***

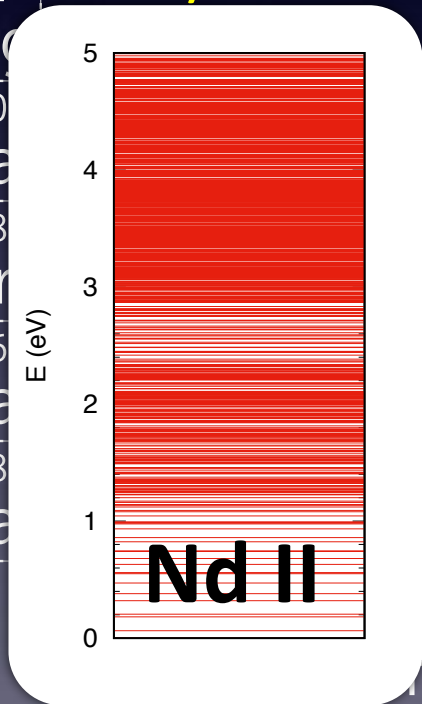
Courtesy M. Tanaka

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E}$$

open s shell  
(l=1)

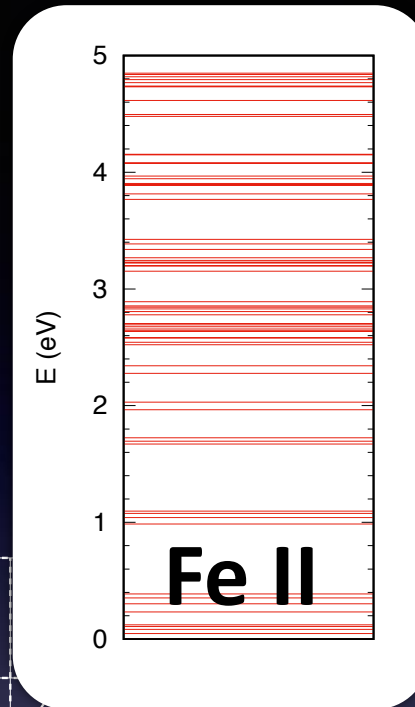
|    |    |
|----|----|
| 1  | H  |
| 3  | Li |
| 4  | Be |
| 11 | Na |
| 12 | Mg |
| 19 | K  |
| 20 | Ca |
| 37 | Rb |
| 38 | Sr |
| 55 | Cs |
| 56 | Ba |
| 87 | Fr |
| 88 | Ra |

Many levels !



open d-shell  
(l=3)

|     |    |     |    |     |    |
|-----|----|-----|----|-----|----|
| 25  | Mn | 26  | Fe | 27  | Co |
| 43  | Tc | 44  | Ru | 45  | Rh |
| 75  | Re | 76  | Os | 77  | Ir |
| 107 | Bh | 108 | Hs | 109 | Mt |



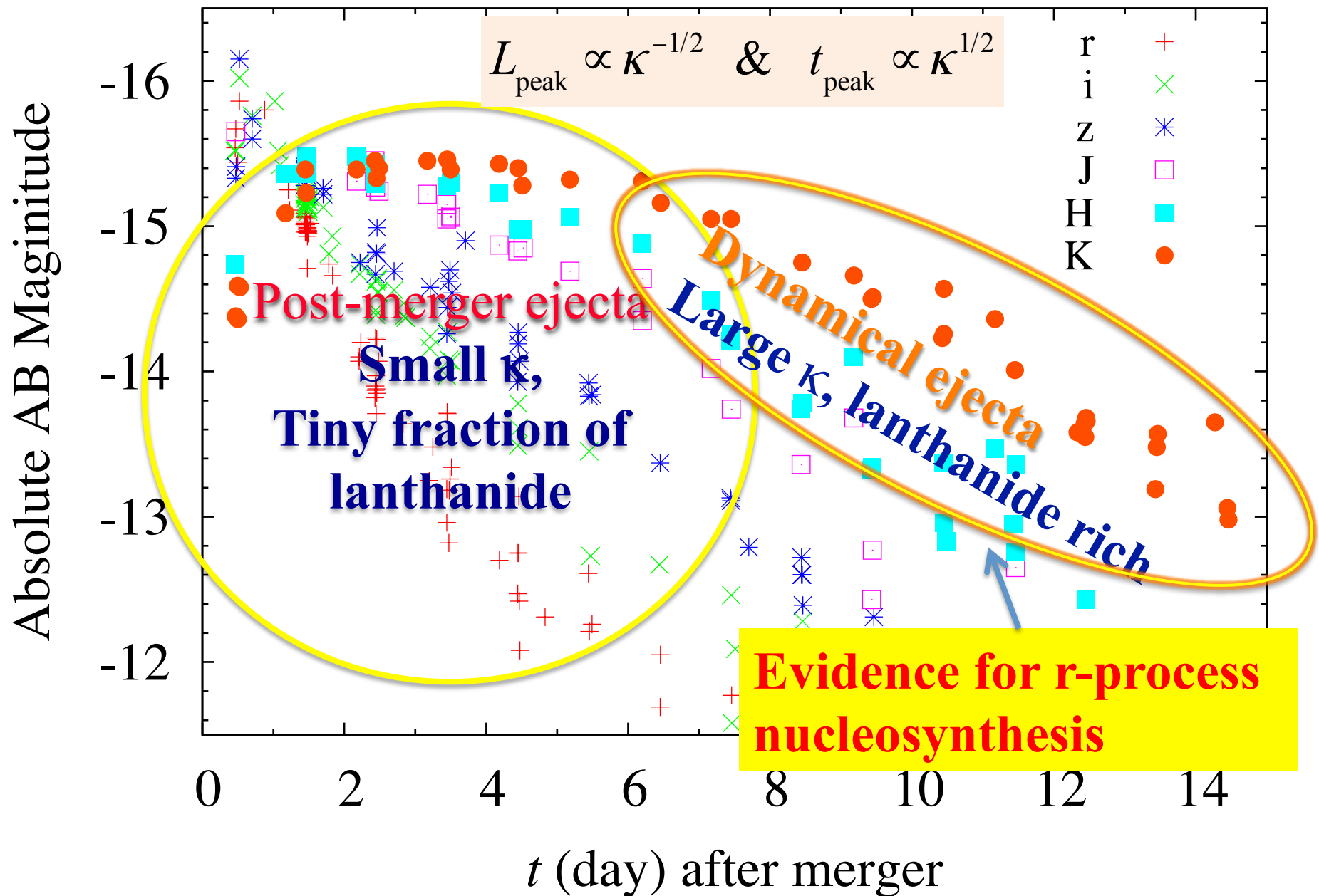
open p-shell  
(l=2)

|     |    |     |     |     |    |     |     |     |     |
|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|
| 6   | C  | 7   | N   | 8   | O  | 9   | F   | 10  | Ne  |
| 14  | Si | 15  | P   | 16  | S  | 17  | Cl  | 18  | Ar  |
| 32  | Ge | 33  | As  | 34  | Se | 35  | Br  | 36  | Kr  |
| 50  | Sn | 51  | Sb  | 52  | Te | 53  | I   | 54  | Xe  |
| 82  | Pb | 83  | Bi  | 84  | Po | 85  | At  | 86  | Rn  |
| 114 | Fl | 115 | Uup | 116 | Lv | 117 | Uus | 118 | Uuo |

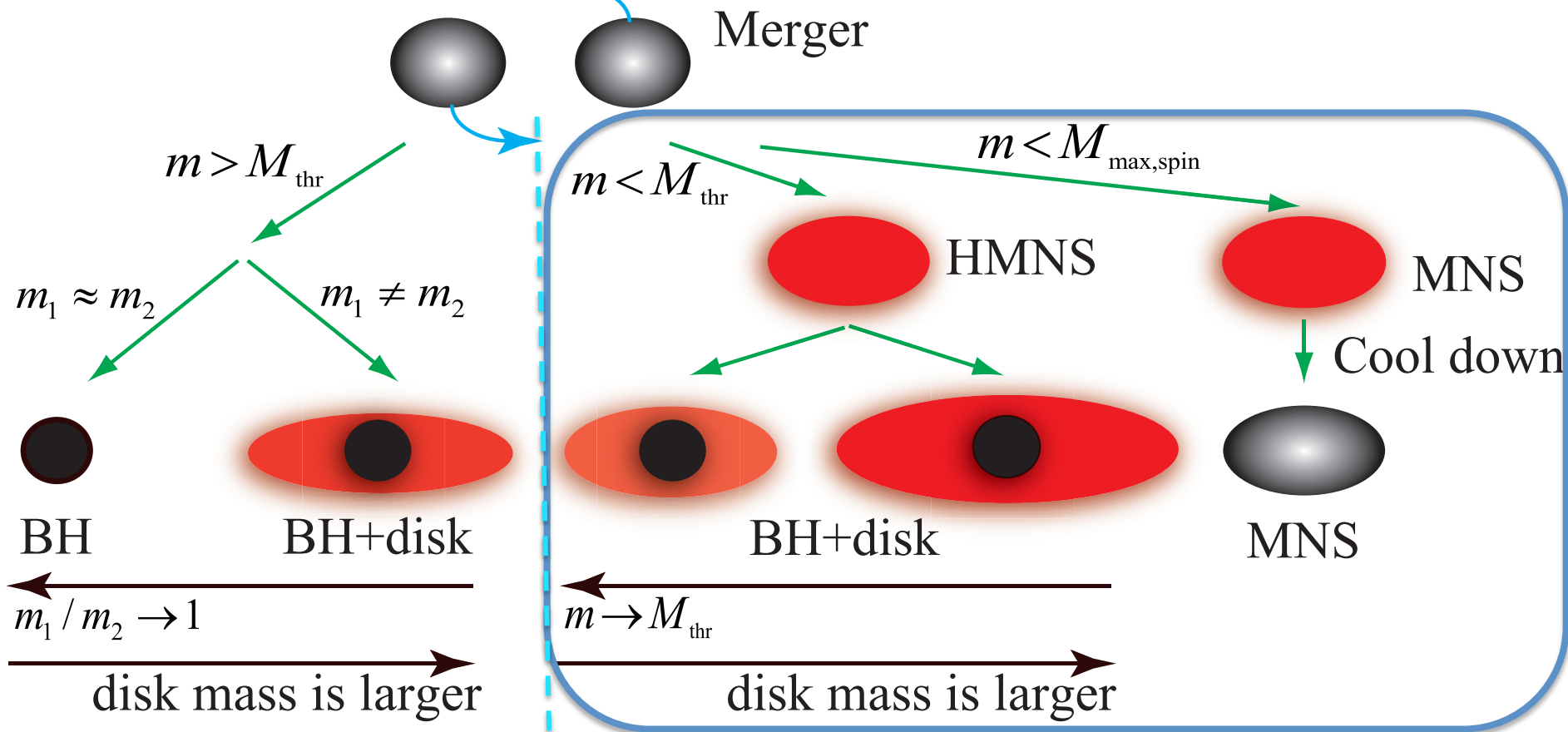
open f shell  
(l=4)

|    |    |    |    |    |    |    |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |    |     |    |     |    |     |    |
|----|----|----|----|----|----|----|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|----|-----|----|-----|----|-----|----|
| 89 | Ac | 90 | Th | 91 | Pa | 92 | U | 93 | Np | 94 | Pu | 95 | Am | 96 | Cm | 97 | Bk | 98 | Cf | 99 | Es | 100 | Fm | 101 | Md | 102 | No | 103 | Lr |
|----|----|----|----|----|----|----|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|----|-----|----|-----|----|-----|----|

# Two components model for GW170817



# 観測解釈への数値相対論の貢献： 定量的なモデル化



Minority but  
could occur

$$M_{thr} > \sim 2.8 M_{sun}$$

Depends on EOS

Typical Cases:  $m = 2.5 - 2.8 M_{sun}$

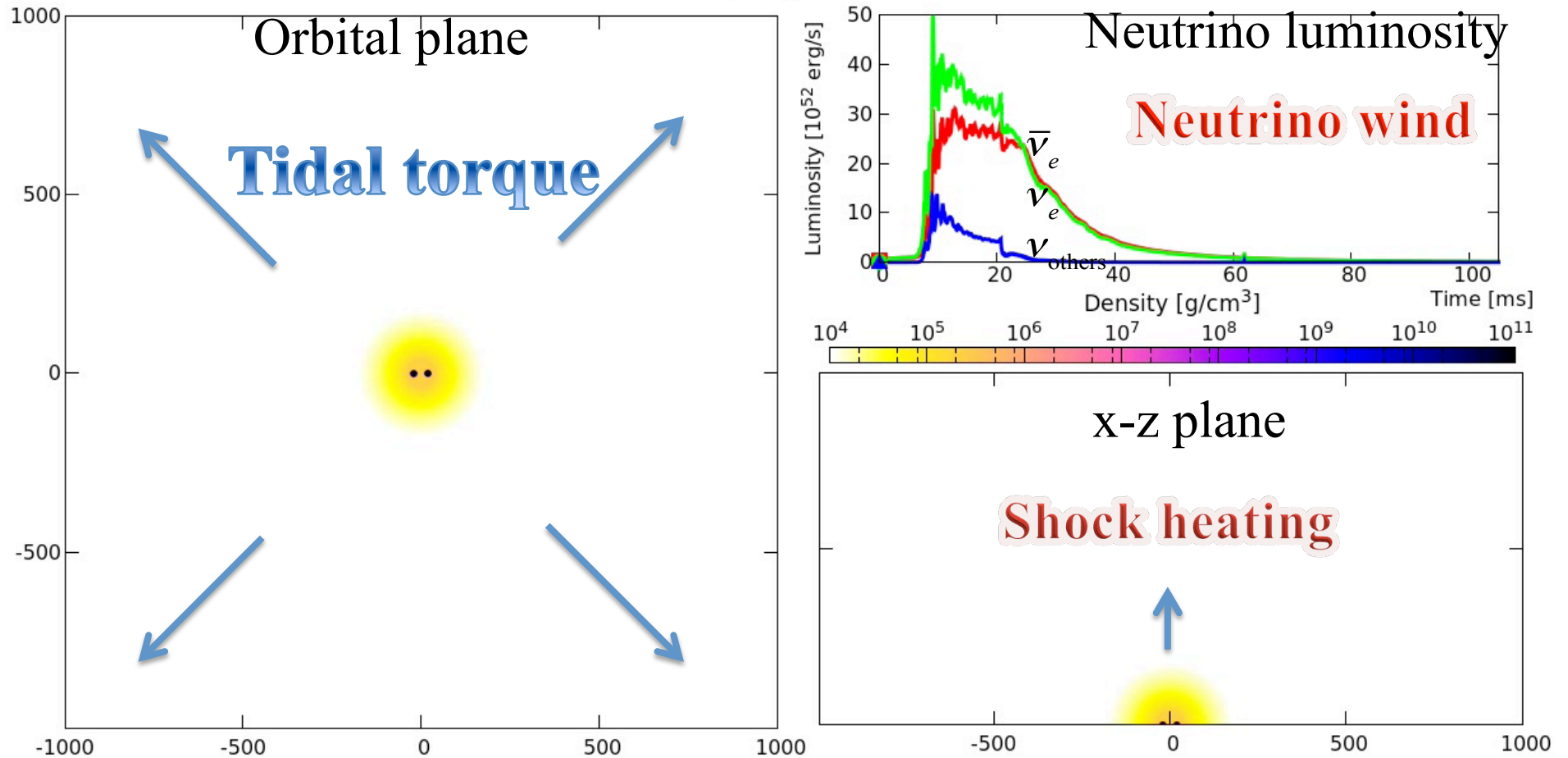
(e.g., GW170817)

# Mass ejection from neutron-star merger

Animation=Soft EOS (SFHo,  $R \sim 12$  km) &  $1.30$ - $1.40 M_{\text{sun}}$

Rest-mass density

0.007 [ms]



Sekiguchi et al. 2016

# Viscous-rad hydrodynamics for post-merger MNS

(S. Fujibayashi et al. ApJ 2018)

$M \sim 0.05$  solar mass,  $v \sim 0.05 c$

合体後にさらに大きな質量放出:これが重要



Electron fraction

Density



# 数値相対論の貢献：正確な重力波波形の導出

Early Inspiral

$$(r_{\text{orb}} \gg R_{\text{NS}})$$

Late inspiral

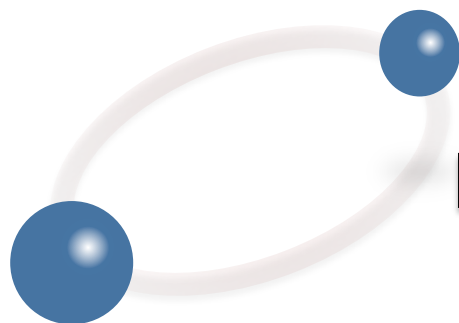
$$(r_{\text{orb}} \leq 5R_{\text{NS}})$$

Merger =>

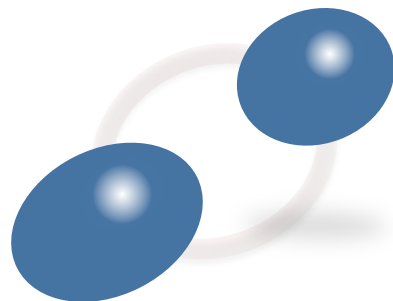
Massive NS

Black hole/MNS+  
torus → GRB&KN

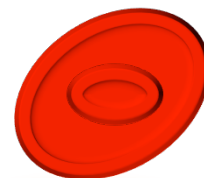
$$M \sim 2.5 - 2.8M_{\text{sun}}$$



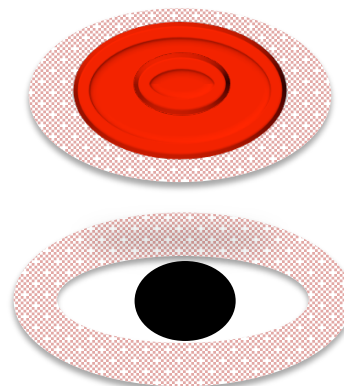
Point mass +  
adiabatic phase



Tidally deformed phase



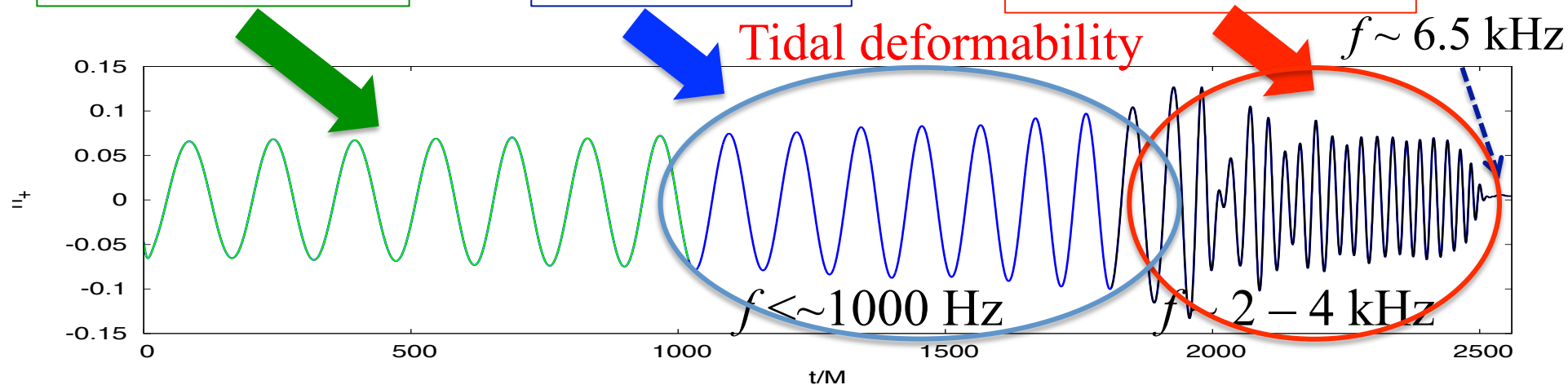
Dynamical & GR phase



Post-Newtonian

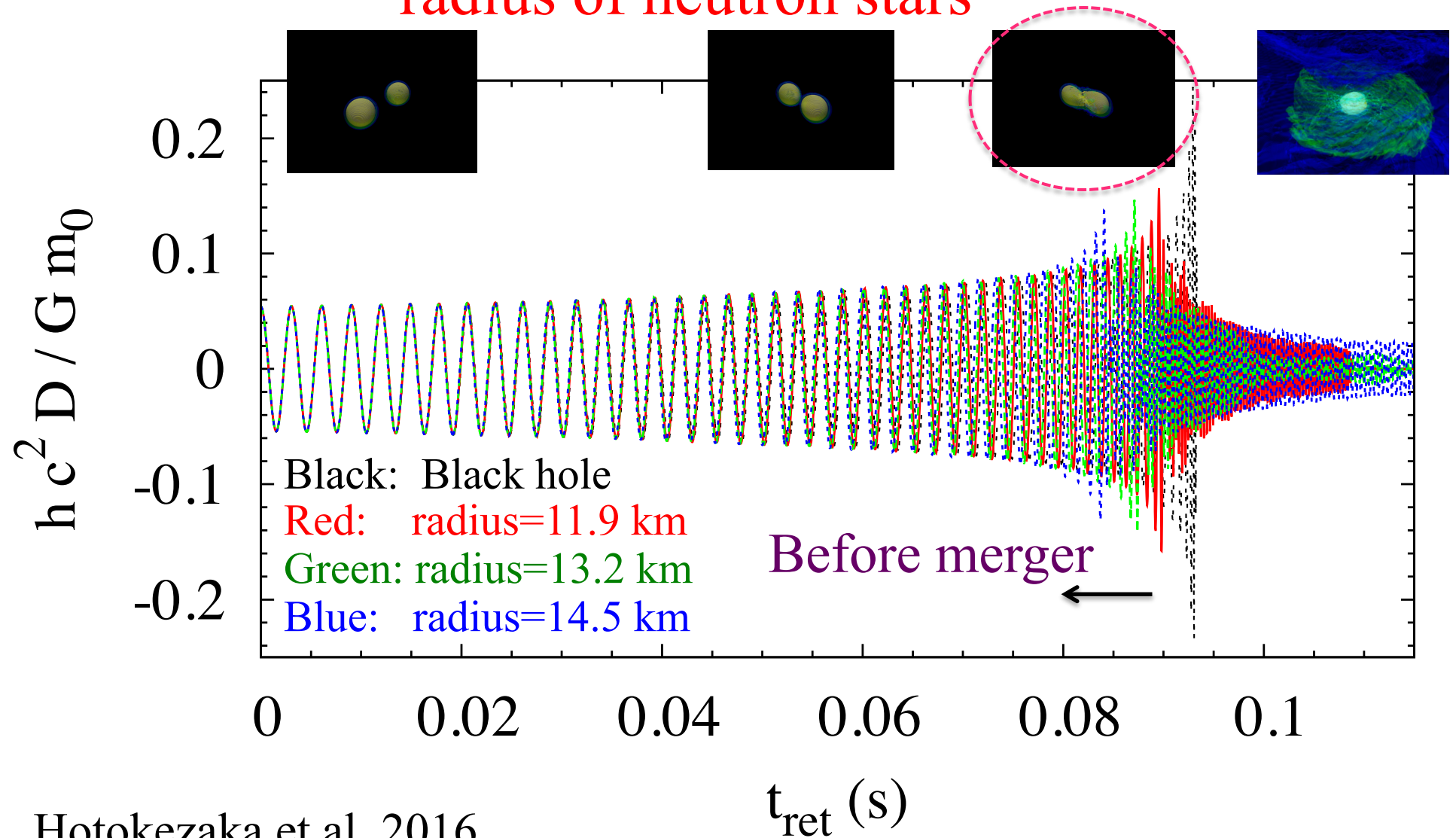
Late inspiral

Post merger  
Massive NS / BH



# Gravitational waves will tell us radius !!

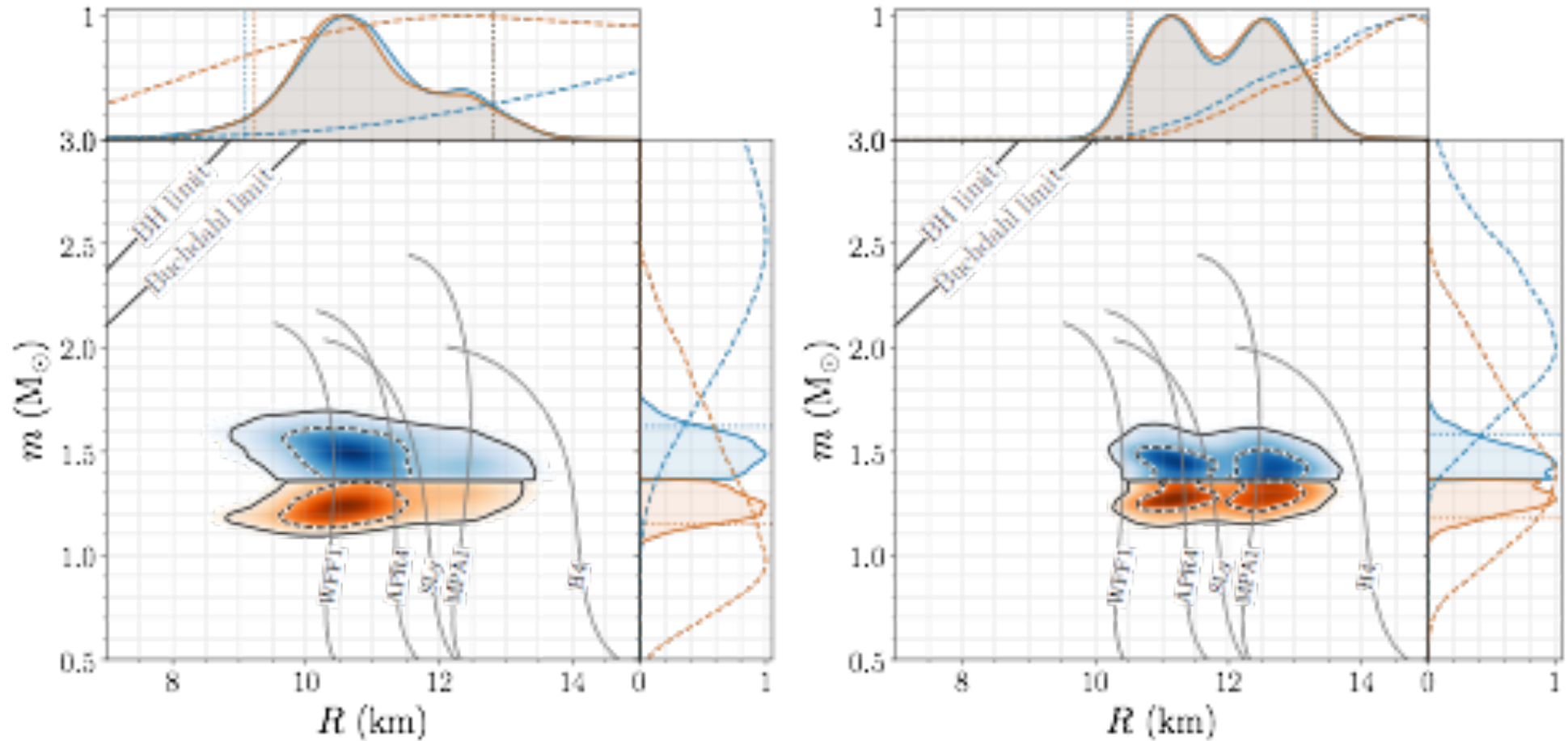
Gravitational waveforms depend on the  
radius of neutron stars



# NS Radius measurement from GW170817 event

Jim's nice talk for more details

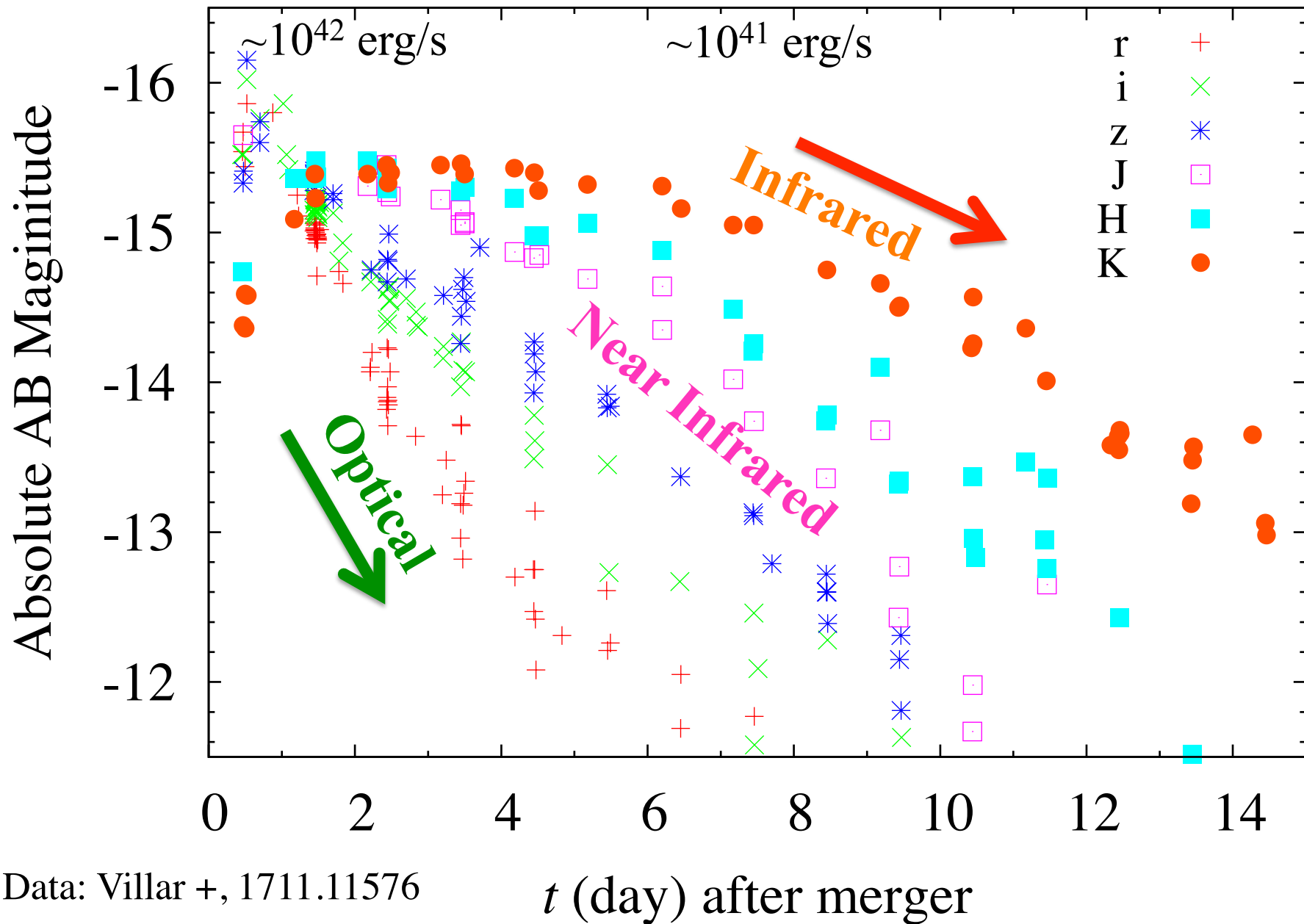
arXiv: 1805.11581



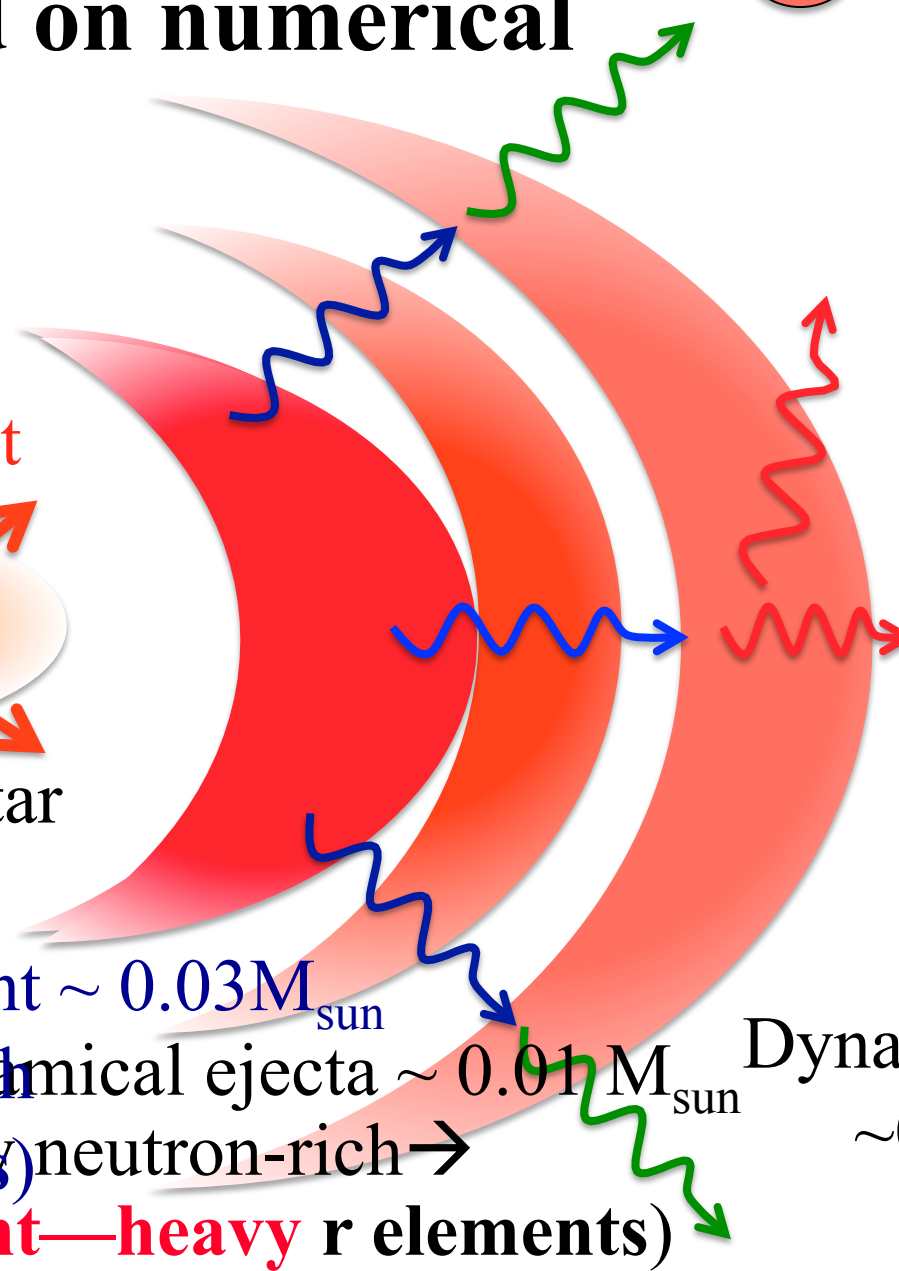
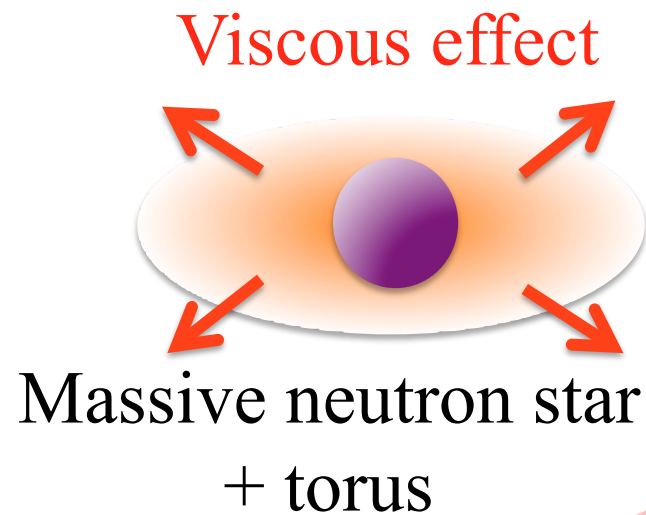
Radius = 10 ~ 13 km

Future higher SNR events will improve the measurement

# “Kilonova” of GW170817/AT2017gfo



# Mass ejection from GW170817 (scenario based on numerical relativity)



Ejecta from remnant  $\sim 0.03M_{\text{sun}}$   
(mildly neutron-rich)

Dynamical ejecta  $\sim 0.01M_{\text{sun}}$   
(very neutron-rich)

Dynamical ejecta  
 $\sim 0.01M_{\text{sun}}$

→ **light r elements**

**light—heavy r elements**



# しかしまだ1イベント

Many other phenomenological interpretations are possible.

Test by more events is obviously necessary !!



# Prediction for next events

|  | Dynamical ejection  | Post-merger ejection   |
|--|---|--|
| 1. Low-mass NS-NS<br>→ long-lived MNS                  | $M \sim 10^{-3} - 10^{-2.5} M_{\text{sun}}$<br>$Y_e \sim 0.05 - 0.5$<br><b>Red, luminous</b>          | $M \sim 10^{-2} - 10^{-1} M_{\text{sun}}$<br>$Y_e \sim 0.3 - 0.5$<br><b>Blue, very luminous</b>            |
| 2. NS-NS → HMNS<br>(e.g., GW170817)                    | $M \sim 10^{-3} - 10^{-2} M_{\text{sun}}$<br>$Y_e \sim 0.05 - 0.5$<br><b>Late Red, luminous</b>       | $M > 10^{-2} M_{\text{sun}}$<br>$Y_e \sim 0.2 - 0.5$<br><b>Early Blue, luminous</b>                        |
| 3. NS-NS → BH<br>(assume not very asymmetric)          | $M < \sim 10^{-3} M_{\text{sun}}$<br>$Y_e < \sim 0.1$<br><b>Faint Red</b>                             | $M < 10^{-3} M_{\text{sun}}$<br>$Y_e < \sim 0.1$<br><b>Faint Red</b>                                       |
| 4. BH-NS with tidal disruption and/or asymmetric NS-NS | $M \sim 10^{-3} - 10^{-1.5} M_{\text{sun}}$<br>$Y_e < \sim 0.1$<br><b>Late Red, Could be luminous</b> | $M \sim 10^{-3} - 10^{-1.5} M_{\text{sun}}$<br>$Y_e \sim 0.1 - 0.25$<br><b>Late Red, Could be luminous</b> |

# V まとめ

- 重力波観測が始まり、成果が出始めた。具体的には、
  1. 連星ブラックホールを多数発見、合体現象の観測
  2. ブラックホールの誕生過程に重要な示唆。長期的にはその質量分布が明らかに→星の進化の理解が進む。
  3. 連星中性子星合体も初観測
  4. 中性子星状態方程式の制限に将来有望な新手法
  5. 連星中性子星合体では多様な電磁波対応天体
  6. 少なくともショートガンマ線バーストの一部は連星中性子星合体起源であることが示唆された(talk by 井岡)。
  7. 元素合成研究に重要な示唆。今後の観測でさらに精査されるだろう。
  8. 数値相対論も重要になった。