

重力波天文学の進展

仏坂健太

(東大ビッグバンセンター)

Artist's impression of the jet in GW170817 (credit: J. Josephides)

Main collaborators on this topic: M. Shibata (AEI/YITP), K. Kyutoku (Kyoto), K. Kiuchi (YITP), Y. Sekiguchi (Toho), M. Tanaka (Tohoku), S. Wanajo (AEI), A. Bamba (Tokyo), Y. Terada (Saitama), T. Piran (Hebrew), E. Nakar (Tel Aviv), P. Beniamini (Caltech), K. P. Mooley (Caltech), G. Hallinan (Caltech), S. Nissanike (Amsterdam), A. Deller (Swinburne), K. Masuda (Osaka), D. Radice (Penn state), J. Samsing (Niels Bohr Inst), M. Safarzadeh (Harvard)

はじめに、自己紹介

氏名 仏坂健太 (ホトケザカ と読みます)

専門は、コンパクト天体、特に重力波天体に関する主に理論研究。

略歴

東北大 (学部、明後日トークの飛岡さんと同級生) => 京大

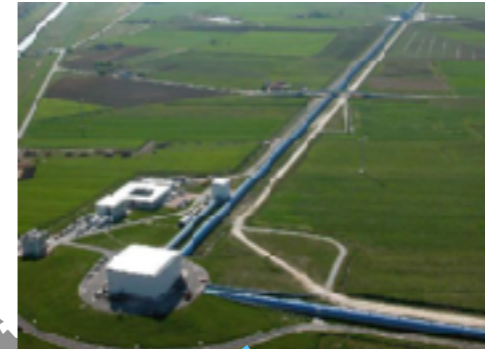
(PhD, '14) => ヘブライ大学 => サイモンズ財団 => プリンストン大学
=> 東大ビッグバンセンター ('19より)

Introduction: 大型重力波干涉計

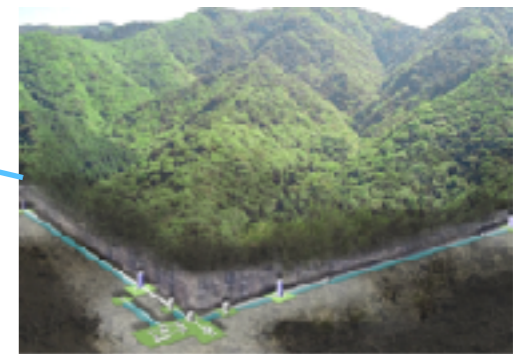
LIGO



Virgo



KAGRA



LIGO India (2025~)



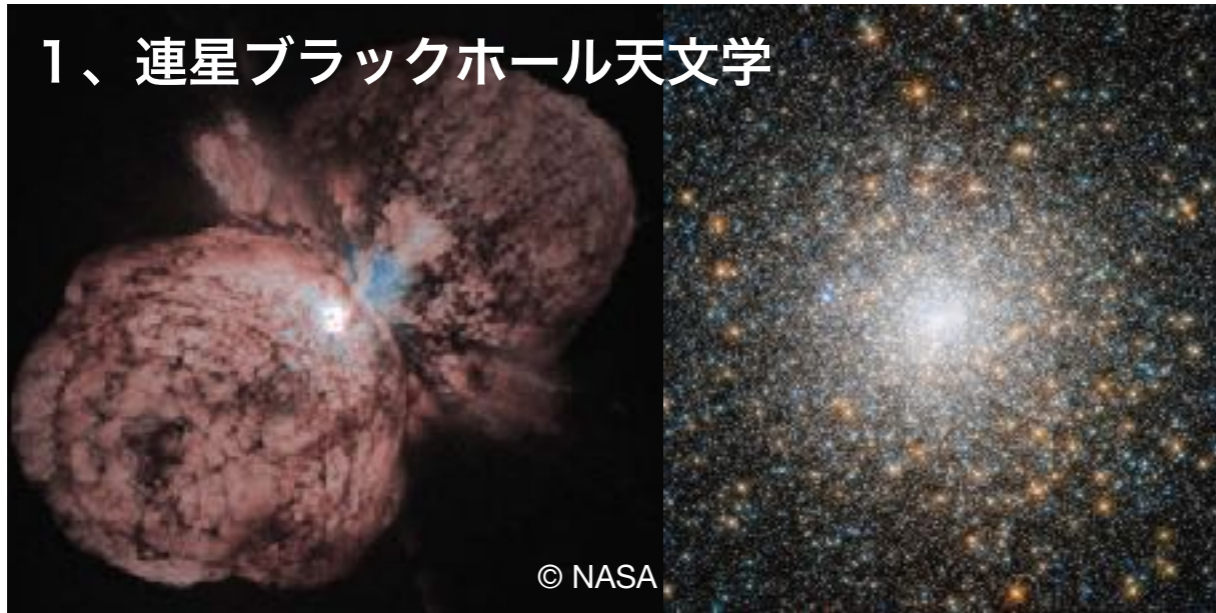
まとめ



- 現時点で、BBH : 48、NSBH:4、NSNS : 6 (候補天体含む)
- このうち、電磁波が付随したのは1天体
- 一般相対論と無矛盾

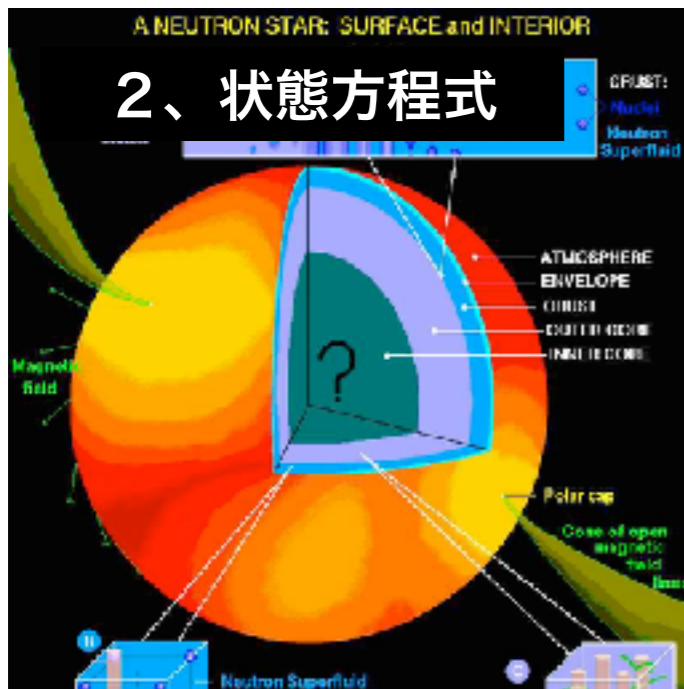
今日のテーマ

1、連星ブラックホール天文学

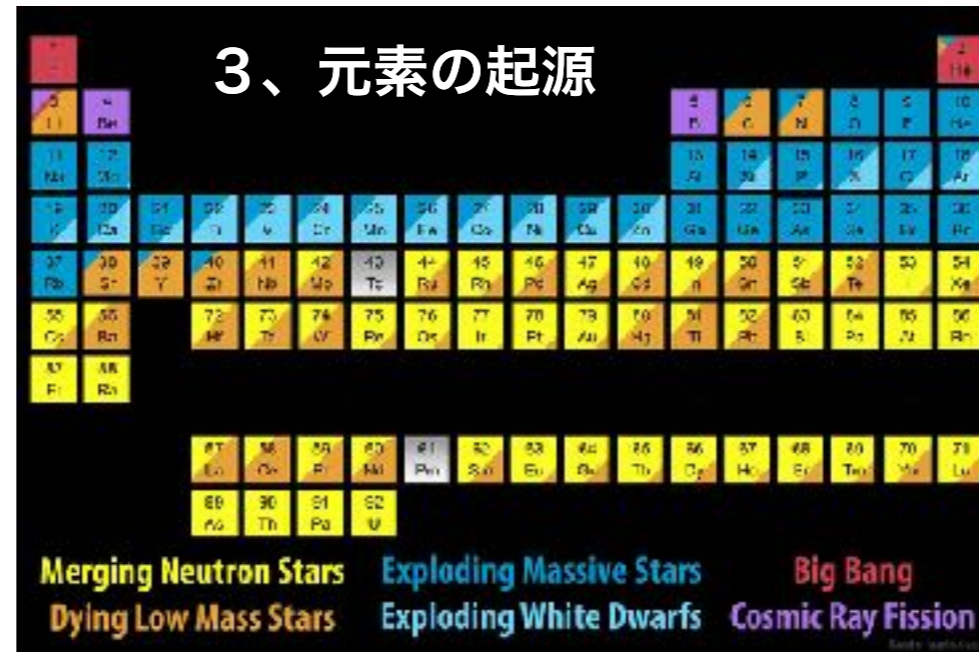


後半、中性子星連星合体

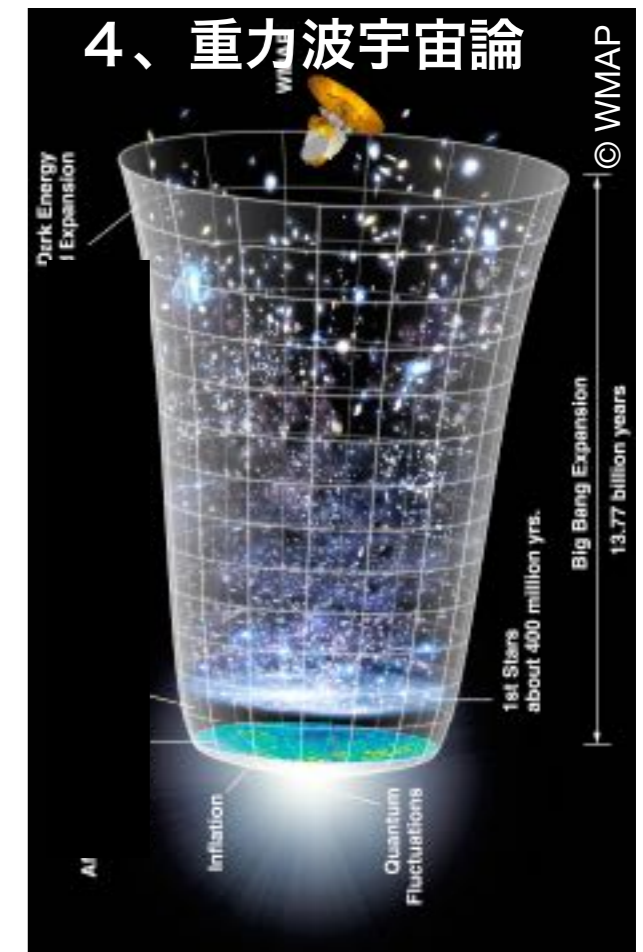
2、状態方程式



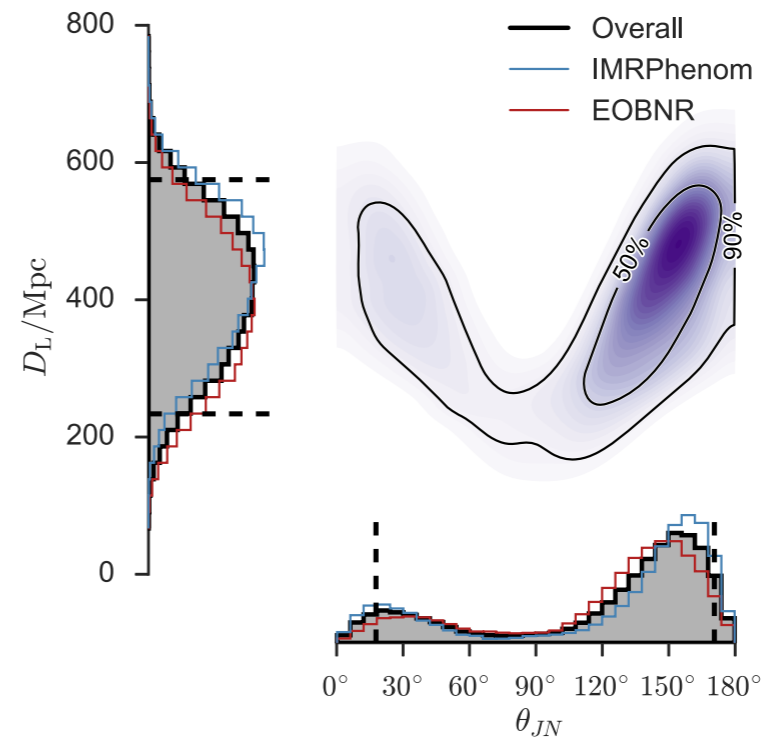
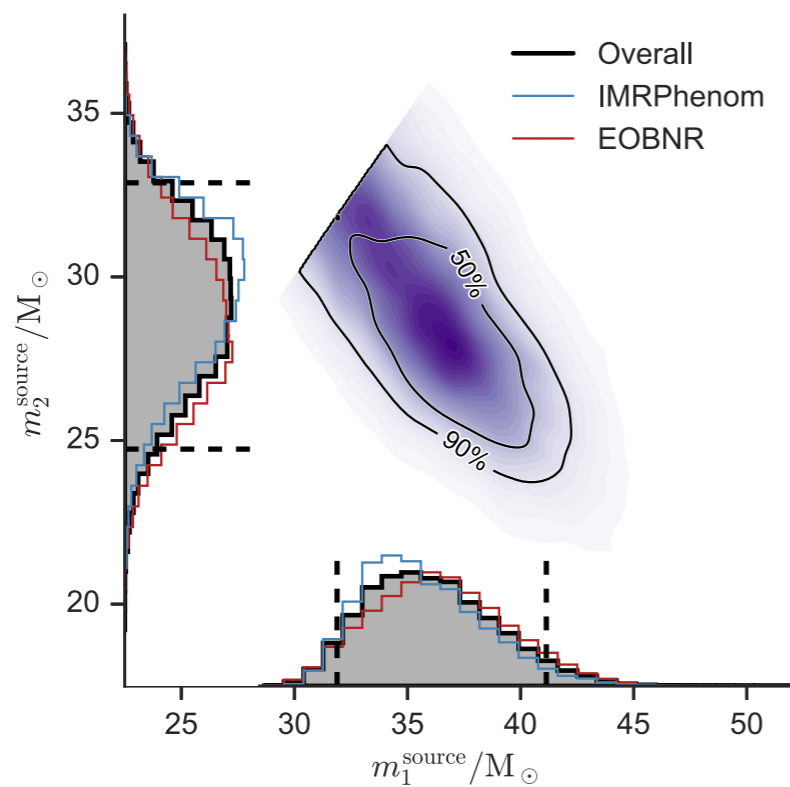
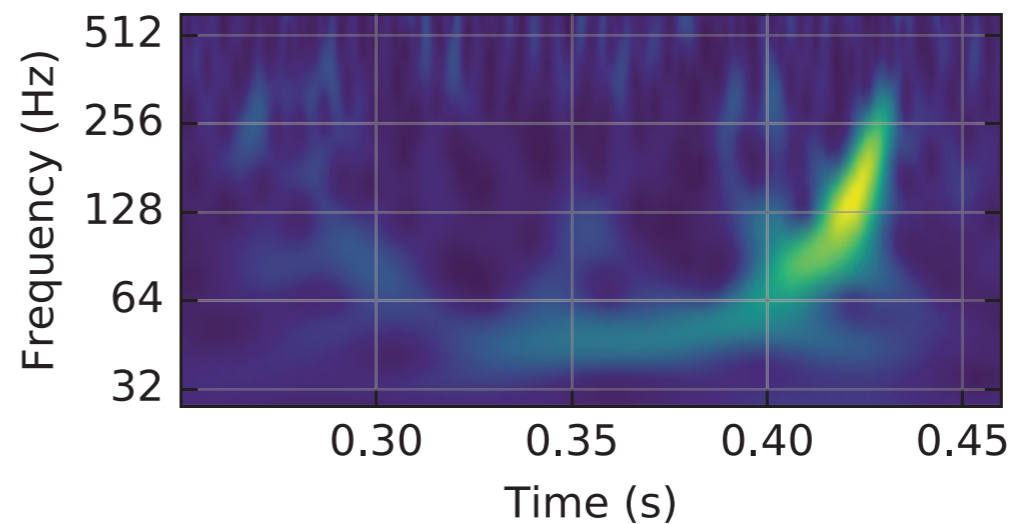
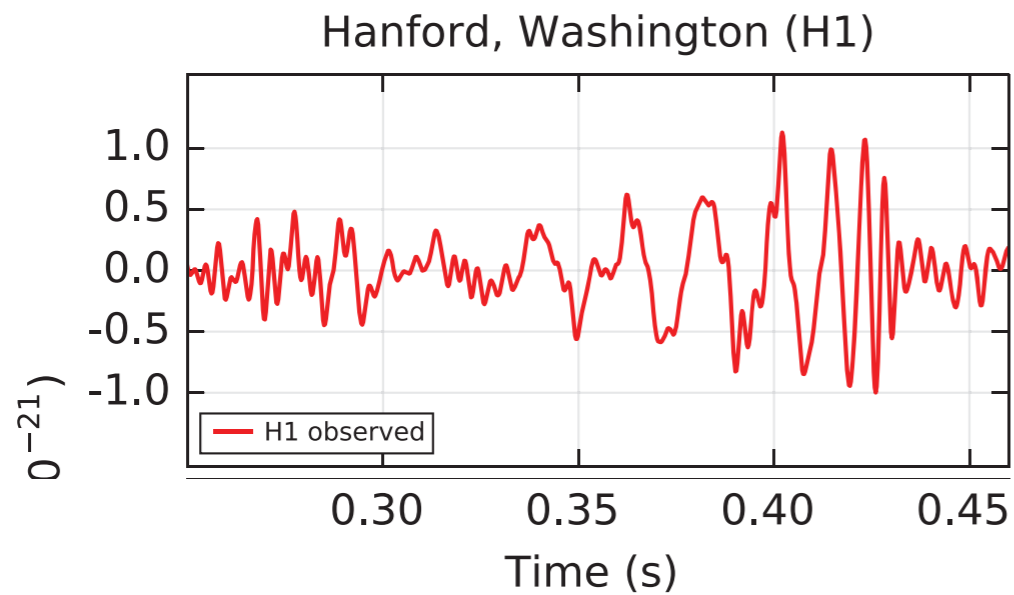
3、元素の起源



4、重力波宇宙論



最初の重力波信号 GW150914



連星ブラックホール (BBH) 天文学

Pros

発見と同時に、天体の質量と”自転角運動量”を力学的に測定できる極めて美しい天体。
(宇宙論的距離にある個別の天体の質量とスピンの測定できること自体が革新的)

Cons

星の頃の記憶はほとんど消えている。重力波の観測を組成、年齢、磁場などに結びつけることは極めて難しい。

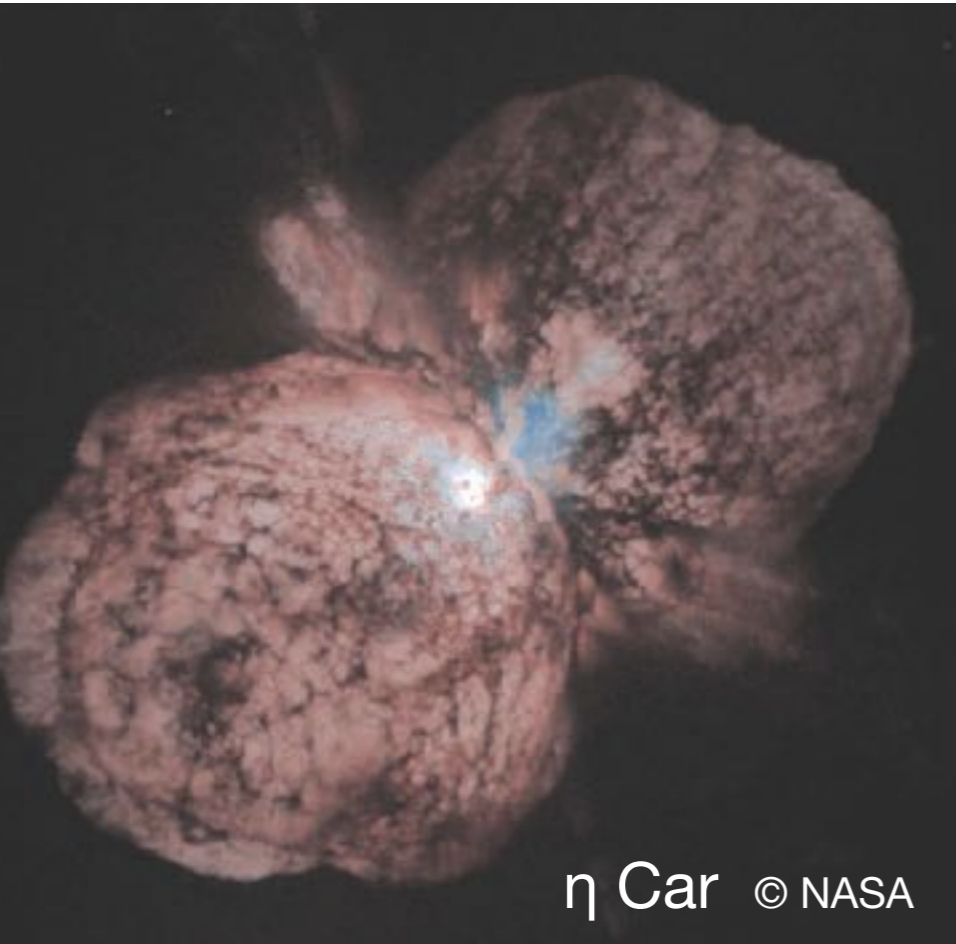
BBH天文学の現状

- 個々の天体の、質量・スピン
- 質量分布などの統計的性質
- 天文追観測はあまり行われていない。

これらに基づいて、連星ブラックホールの起源や恒星天文学に関する知見を得る。

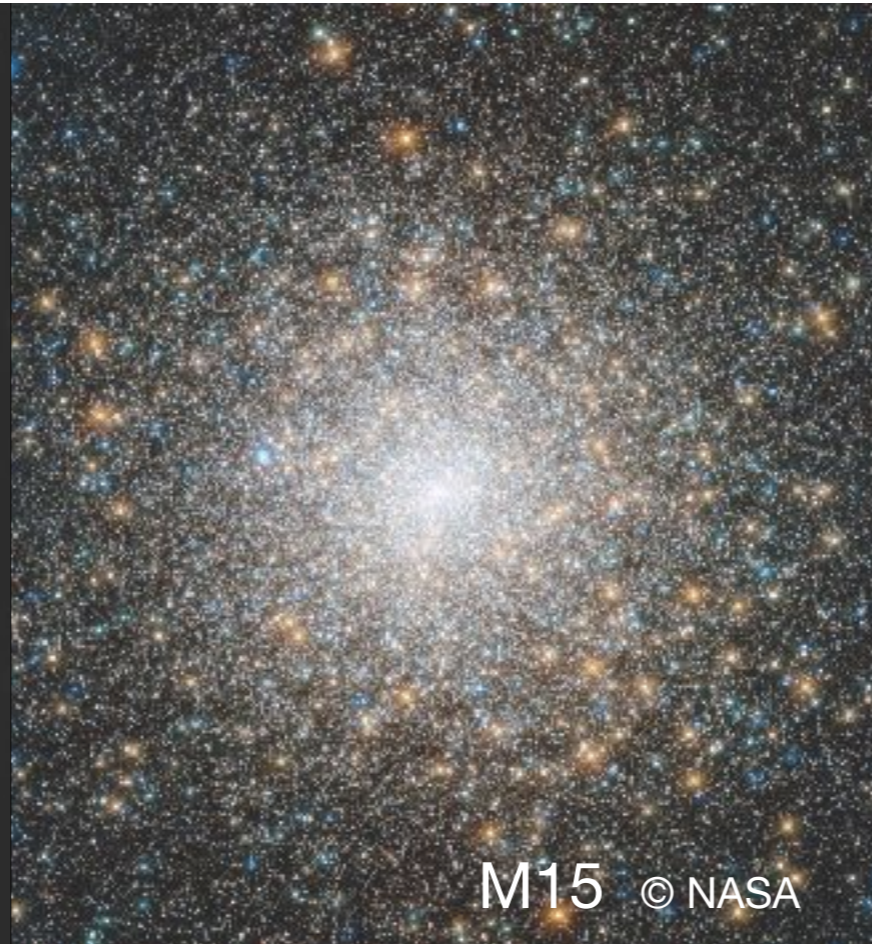
BBH合体の起源

大質量星連星シナリオ



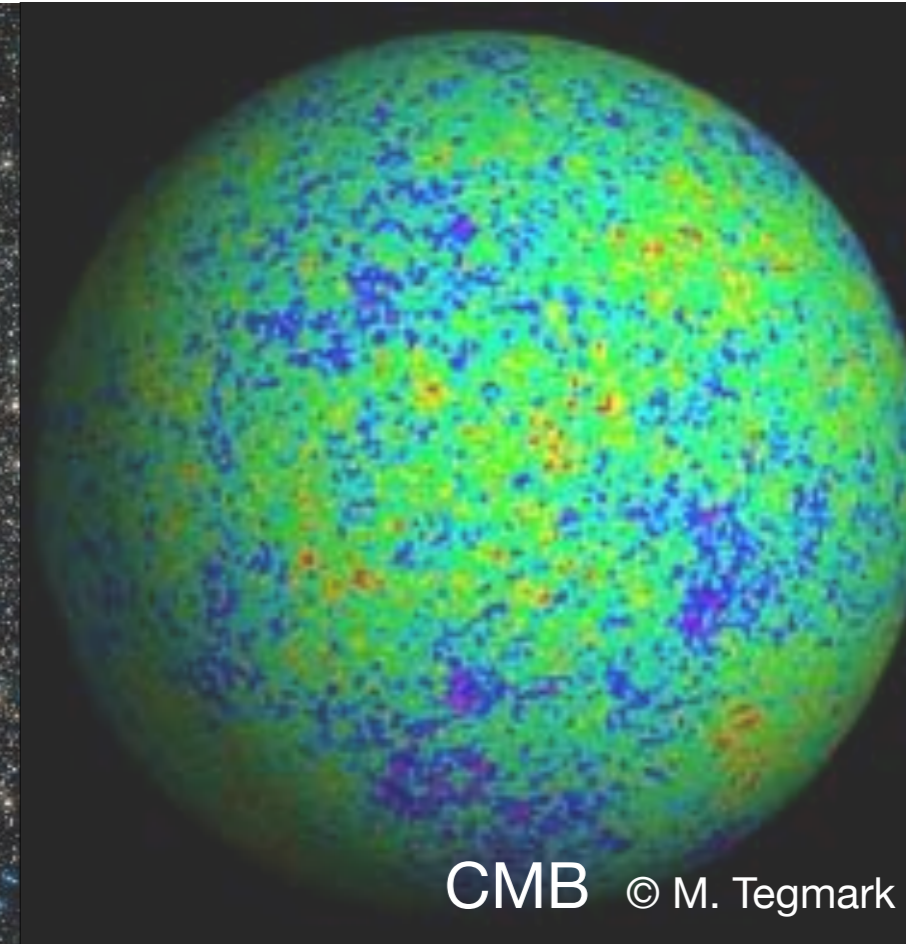
e.g., Belczynski et al 2016
Kinugawa, et al 2014
Eldridge et al 2016

星団シナリオ



e.g., Tanikawa 2013
Rodriguez, et al 2015
Samsing et al 2017

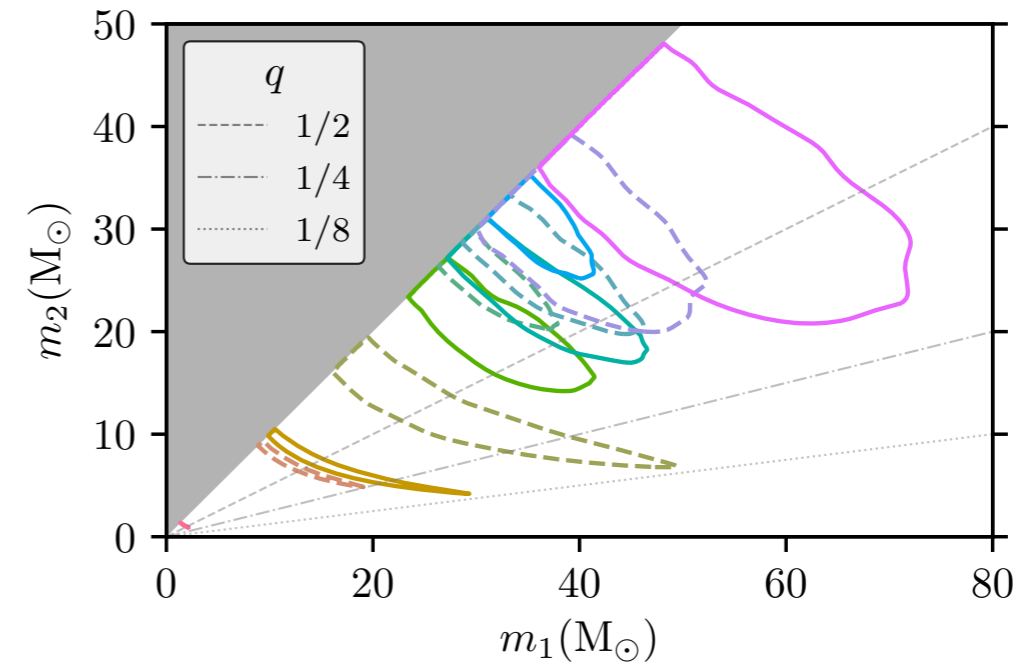
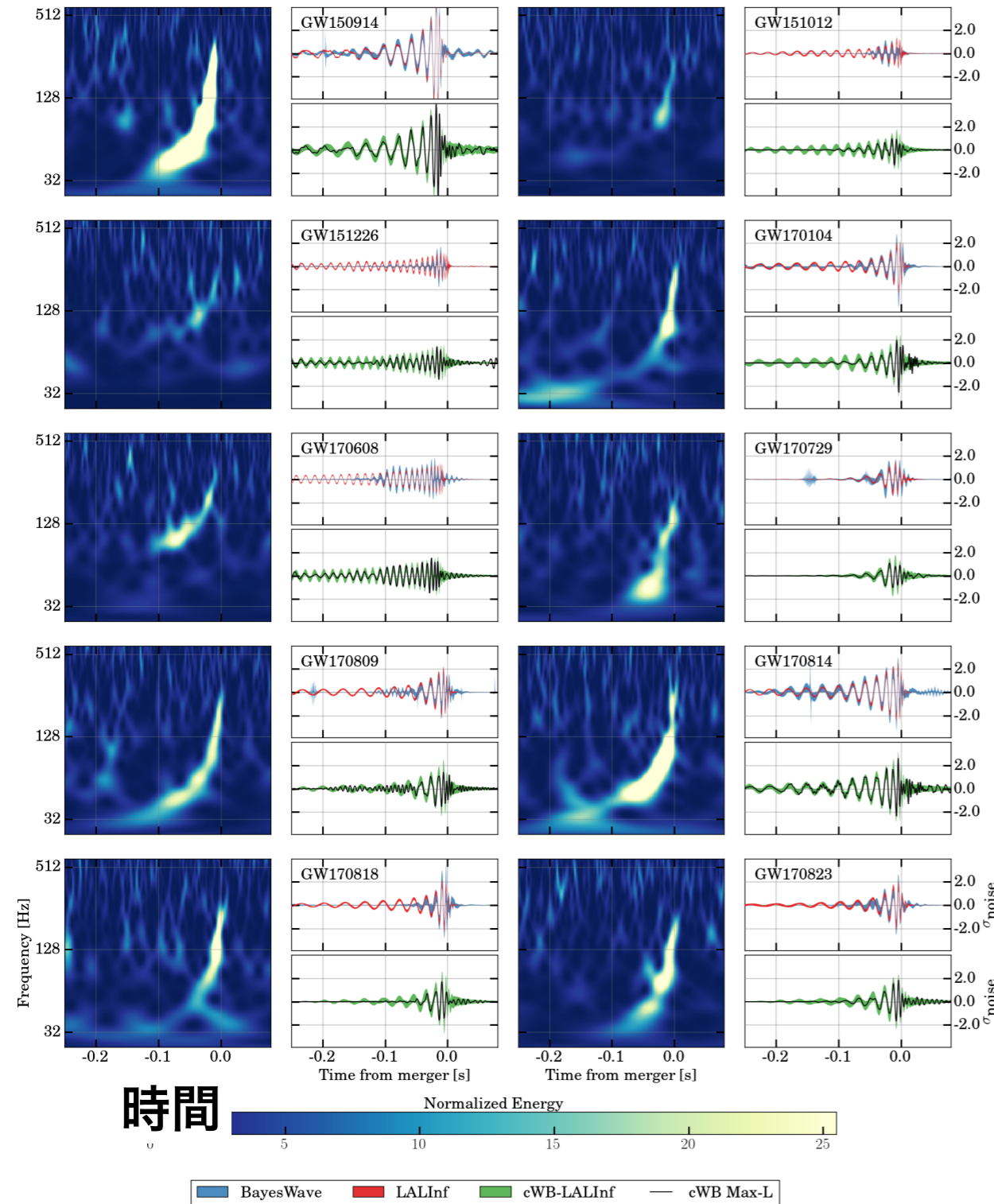
原始BHシナリオ



e.g., Ioka et al 1998
Sasaki, et al 2016

Observational runs 1 & 2

LVC 2018



BBH合体レート : 50 Gpc⁻³ yr⁻¹

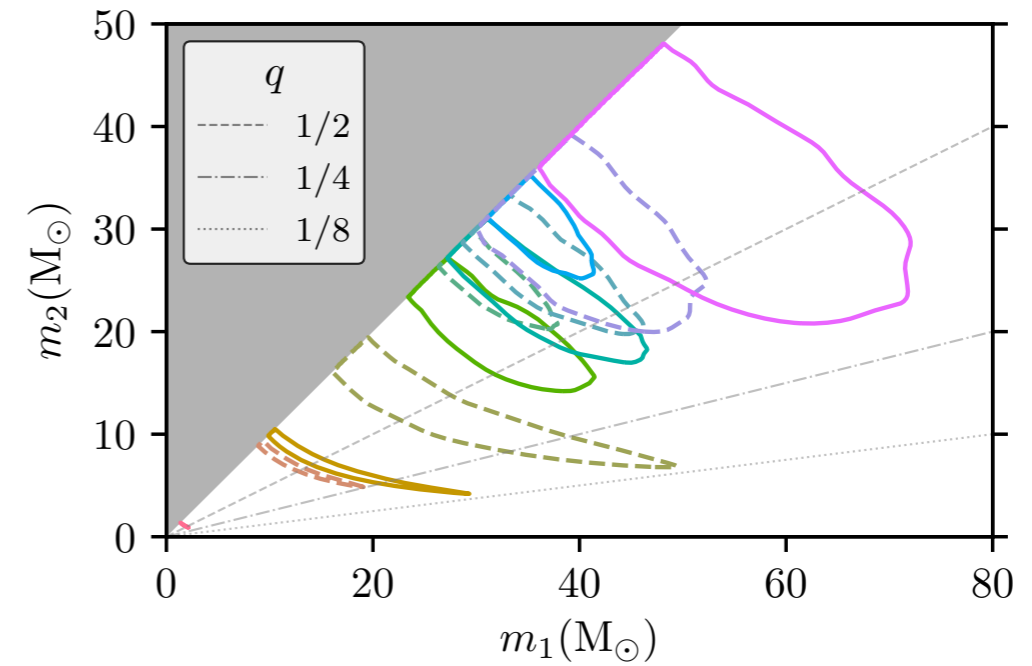
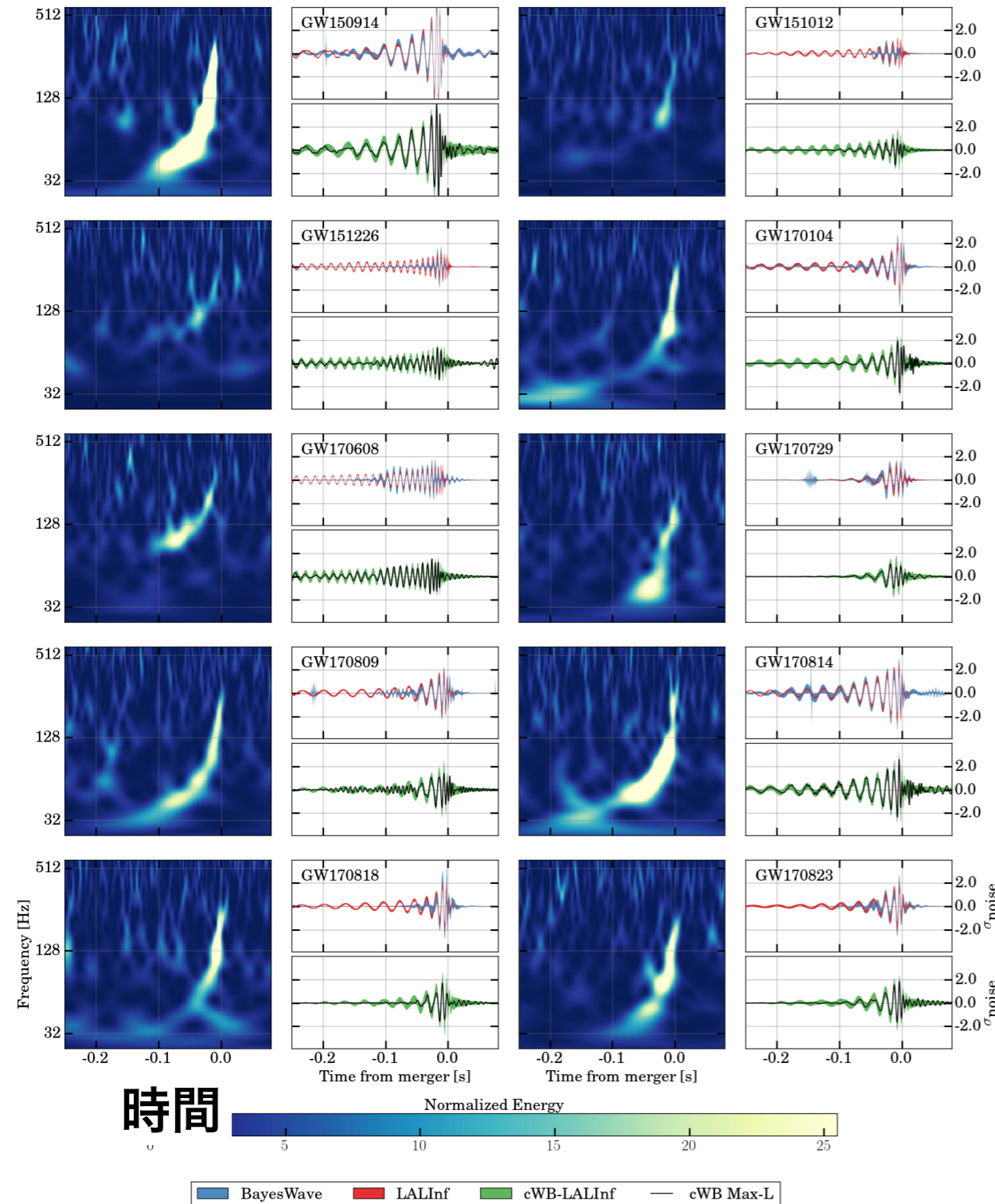
➡ 我々の銀河で100万年に~5回
超新星爆発 1万回に1回

多い? 少ない? ガンマ線バーストと同等
BBH合体率の絶対値を理論的に予言するのは
極めて難しい。

➡ 合体率の絶対値ではなく、質量分布など
で天文学的知見を広げよう。

Observational runs 1 & 2

LVC 2018



BBH合体レート : 50 Gpc⁻³ yr⁻¹

➔ 我々の銀河で100万年に~5回
超新星爆発1万回に1回

BBH mass function (単位体積、dm当たりの数)

$$\frac{dN}{dm_1} \propto m_1^{-\alpha} \quad \alpha = 1.3^{+1.4}_{-1.7}$$

恒星の初期質量関数と無矛盾

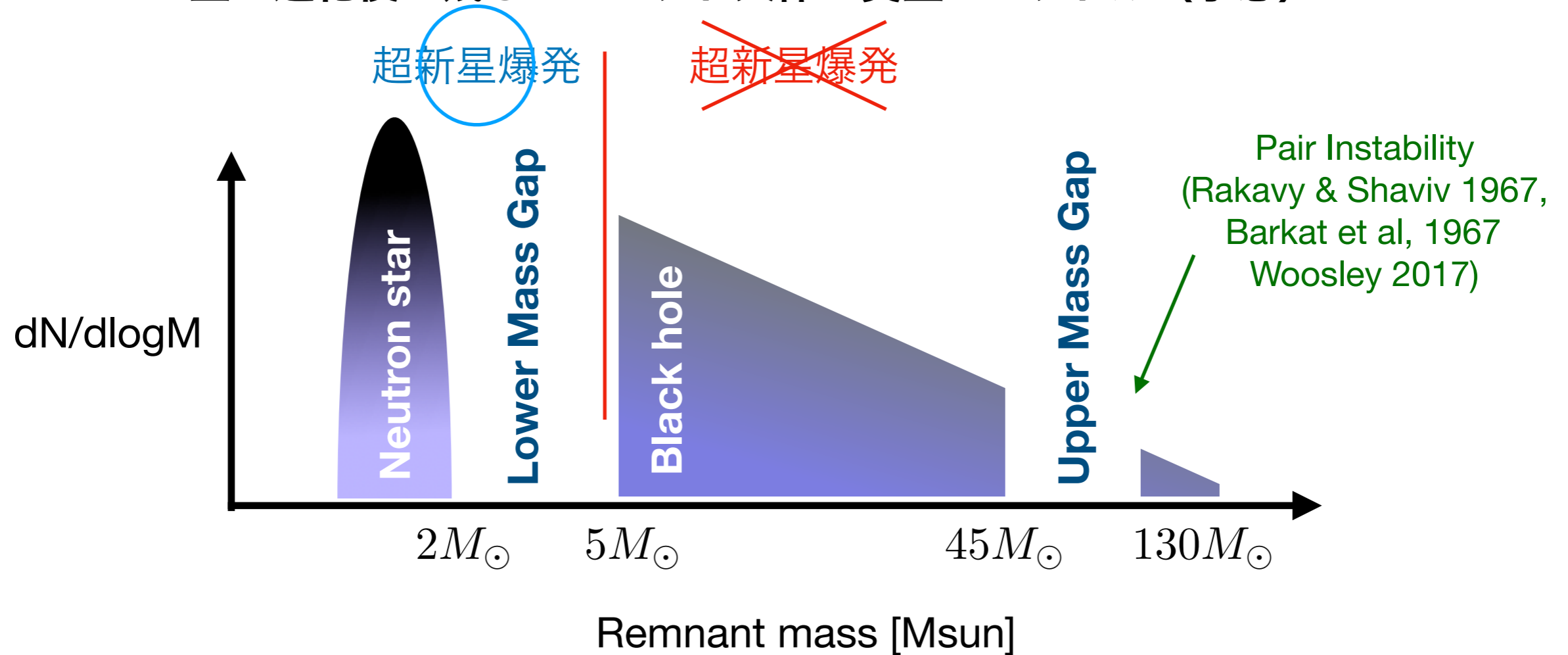
$$\alpha \approx 2.3$$

周波数

時間

BBH天文学：BH Mass Gap

星の進化後に残るコンパクト天体の質量スペクトル（予想）



謎の連星合体：GW190814

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 896:L44 (20pp), 2020 June 20

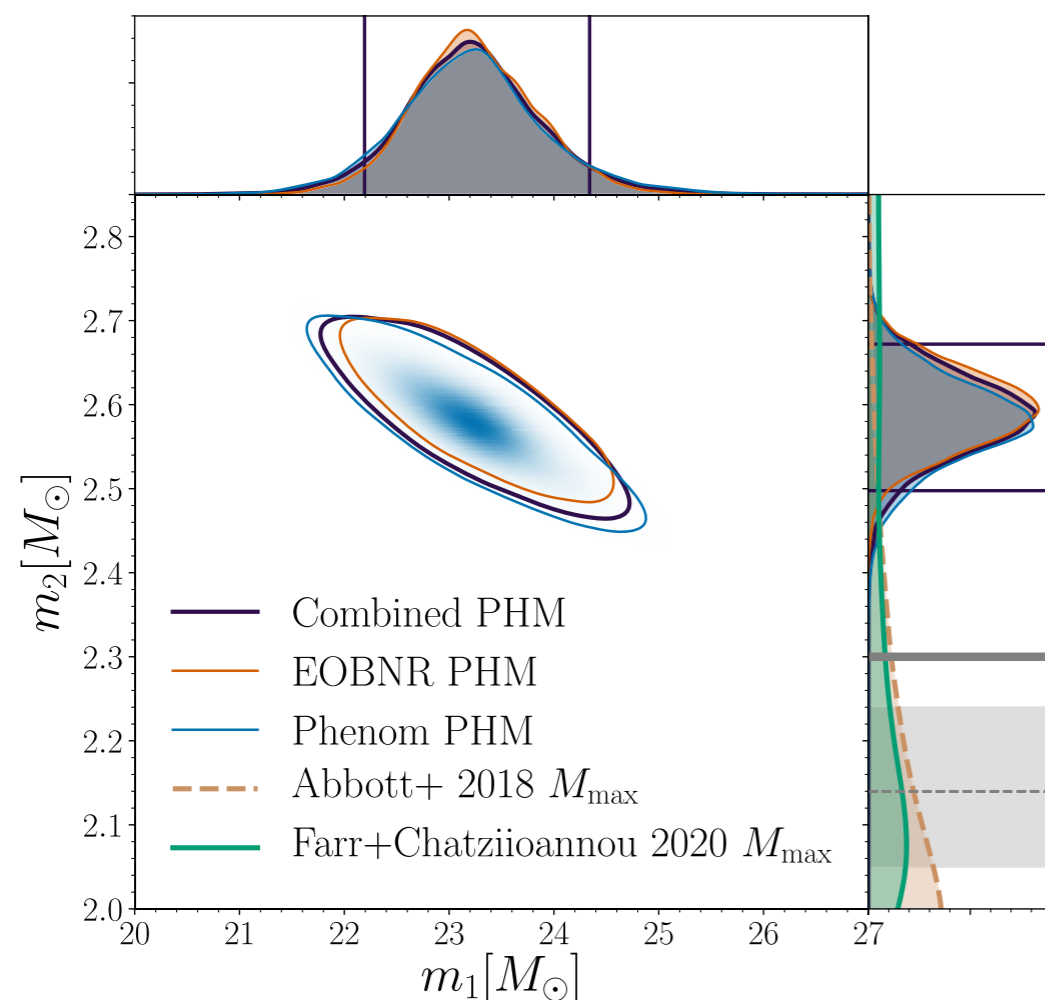
© 2020. The American Astronomical Society.

OPEN ACCESS

<https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab960f>



GW190814: Gravitational Waves from the Coalescence of a 23 Solar Mass Black Hole with a 2.6 Solar Mass Compact Object



この質量を持つコンパクト天体は、
見たことがない！（既知の中性子星 < 2 Msun）
そもそも中性子星なのか、ブラックホールなのか？

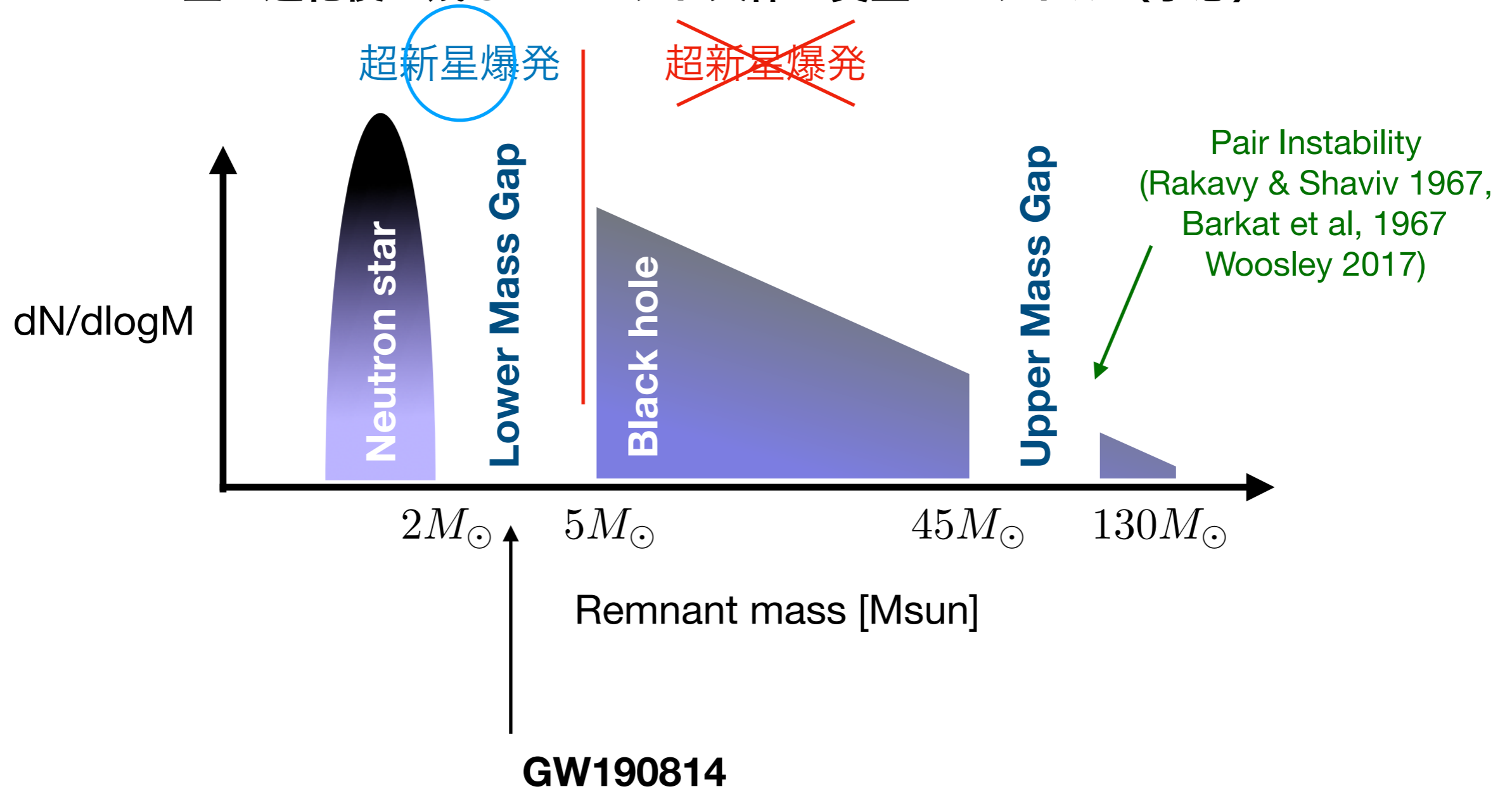
1. 物理的には中性子星という解は禁じられていない。
2. 電磁波追観測はすべて上限。

Andreoni,..KH+20, Dobie,..KH+19

多くの天文学者は、
（たぶん）ブラックホールだと思っている。

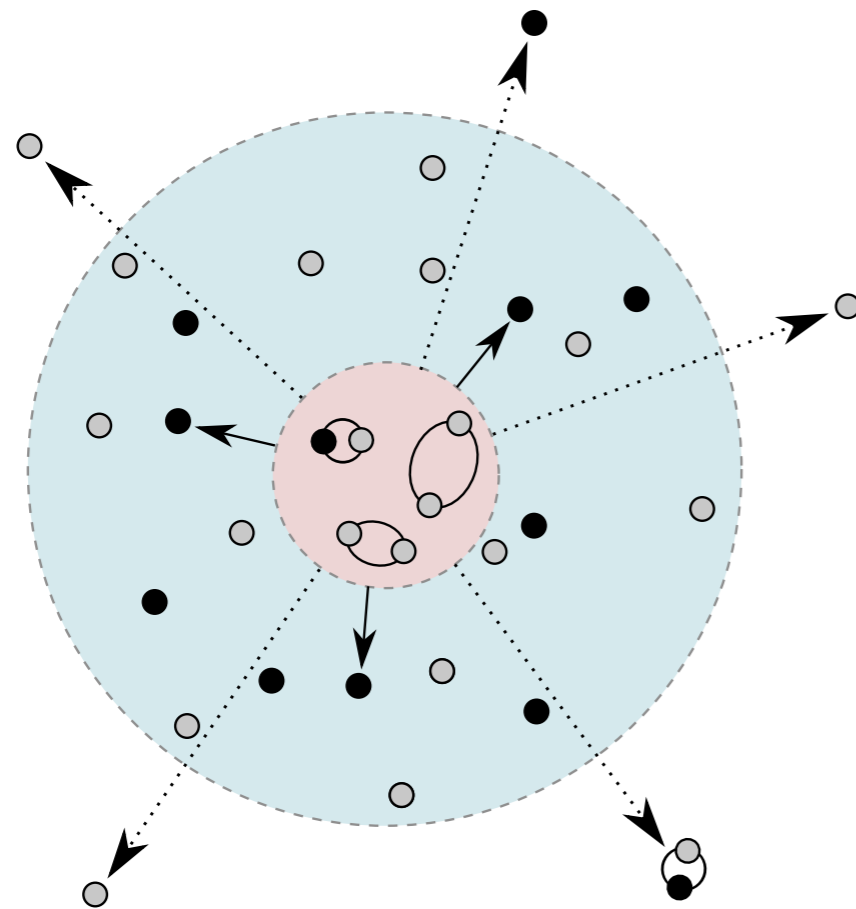
BBH天文学：BH Mass Gap

星の進化後に残るコンパクト天体の質量スペクトル（予想）



Filling the Mass Gap in Stellar Cluster

星団の概念図



-
- | | |
|--------------------|------------------|
| ○ 1G object | → ○ S-ejection |
| ● 2G object | → ☿ B-ejection |
| ☿ Binary | → ● 2G-formation |
| ● Halo (reservoir) | ● Core (reactor) |

球状星団など星が密に存在する状況では、

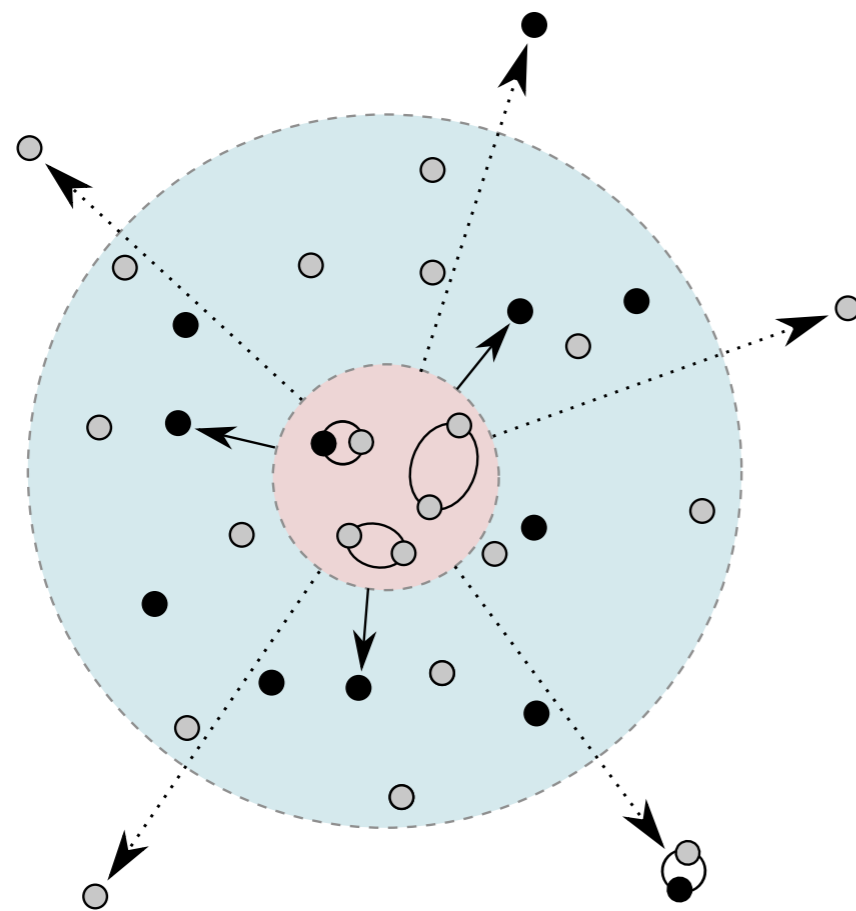
- 1) 星の進化 => 第一世代 BH, NS
- 2) 第一世代BBH & NSNS => 第二世代 BH
- 3) 第二世代 BH が連星を組んで合体
-

ということが起こりうる。

第二世代以降のBHはMass Gapにも存在可能？

Filling the Mass Gap in Stellar Cluster

星団の概念図



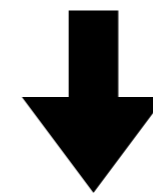
- | | |
|--------------------|------------------|
| ○ 1G object | → ○ S-ejection |
| ● 2G object | → ☿ B-ejection |
| ☿ Binary | → ● 2G-formation |
| ● Halo (reservoir) | ● Core (reactor) |

球状星団など星が密に存在する状況では、

- 1) 星の進化 => 第一世代 BH, NS
- 2) 第一世代BBH & NSNS => 第二世代 BH
- 3) 第二世代 BH が連星を組んで合体
-

ということが起こりうる。

第二世代以降のBHはMass Gapにも存在可能？

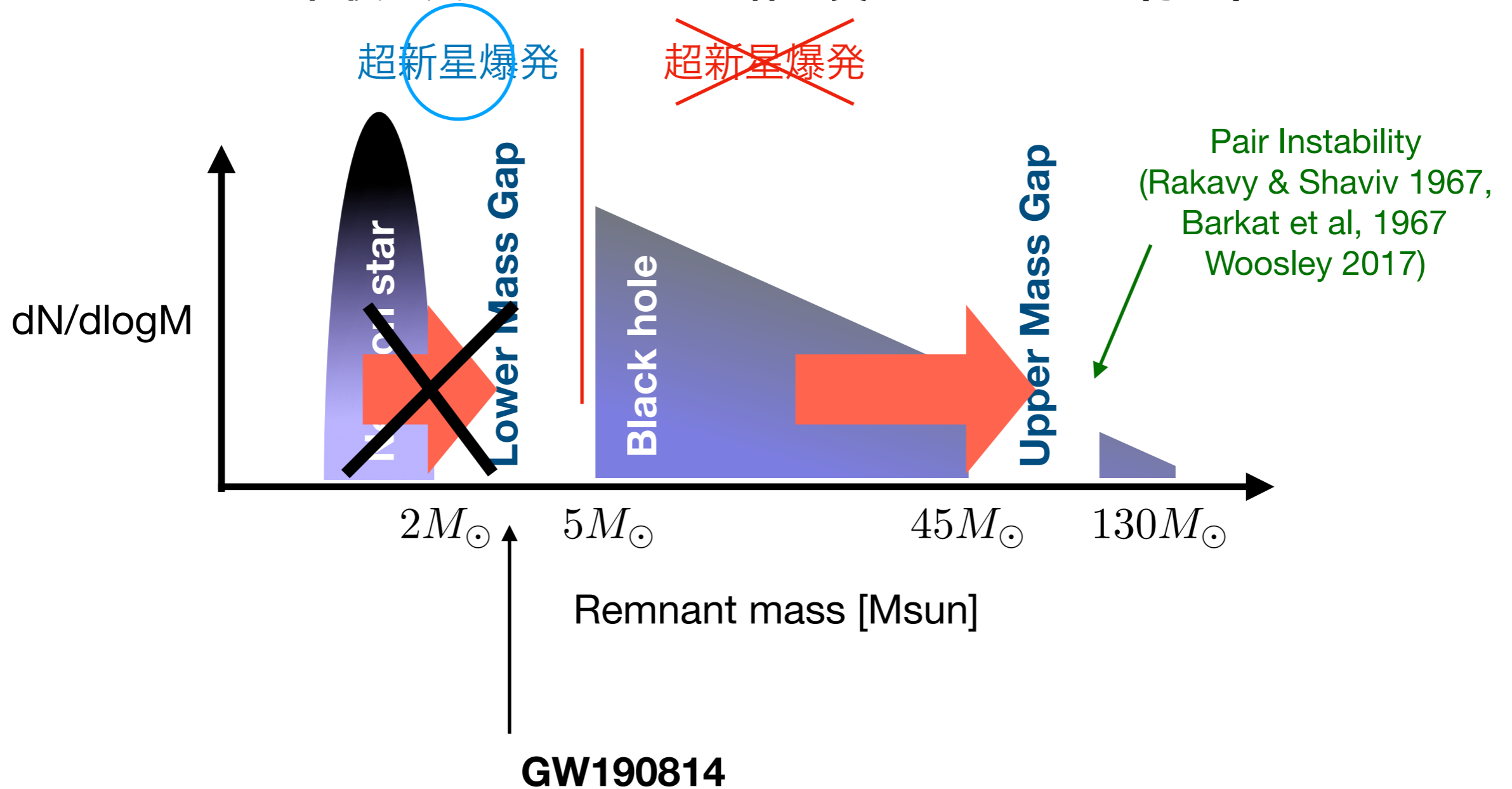


**しかし、現実的な星団では、
中性子星合体 -> 第二世代の合体
という過程はほとんど起こらない。**

Samsing & Hotokezaka 2020

BBH天文学：BH Mass Gap

星の進化後に残るコンパクト天体の質量スペクトル（予想）



星団では、Upper Mass Gapは埋めることが可能

連星ブラックホールのまとめ

- BBH合体レートは超新星の1万分の1
- ブラックホールのMass Gapに注目が集まっている。
- χ_{eff} はBBH合体の起源を迫る重要な手がかり。
 - 連星シナリオ：Bimodal distribution
 - 星団シナリオ：Isotropic distribution

時間の都合上、省略
- 今後、 $O(100)$ のBBH合体から様々な理解が進むと期待。

例、高速回転BH、楕円軌道BBH合体、重力波重力レンズ etc

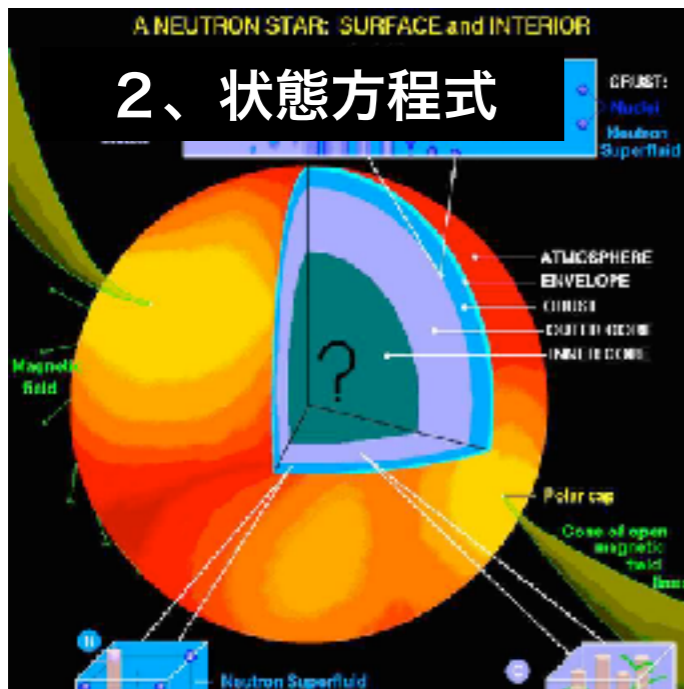
今日のテーマ

1、連星ブラックホール天文学

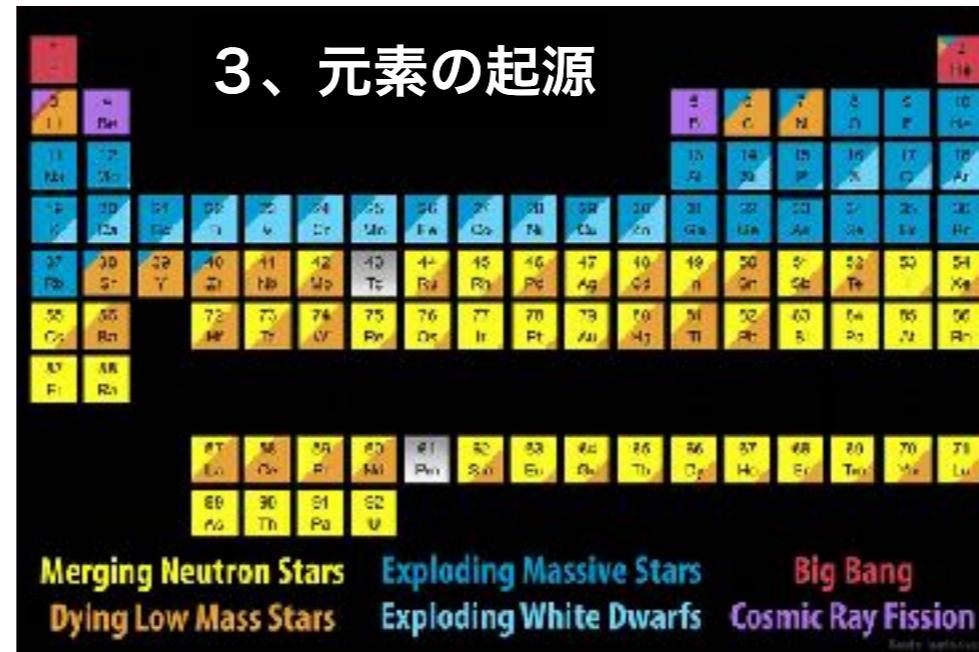


後半、中性子星連星合体

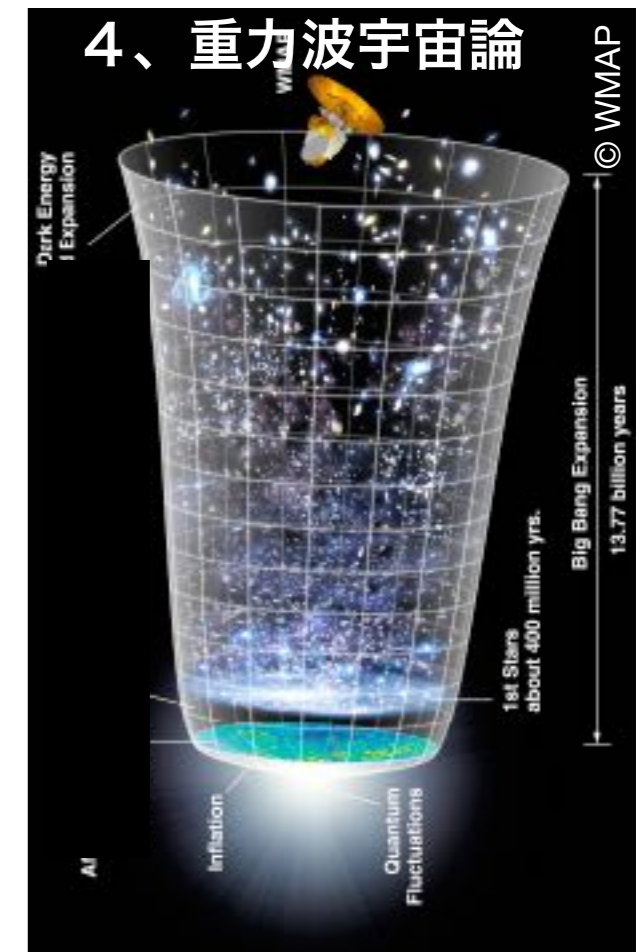
2、状態方程式



3、元素の起源

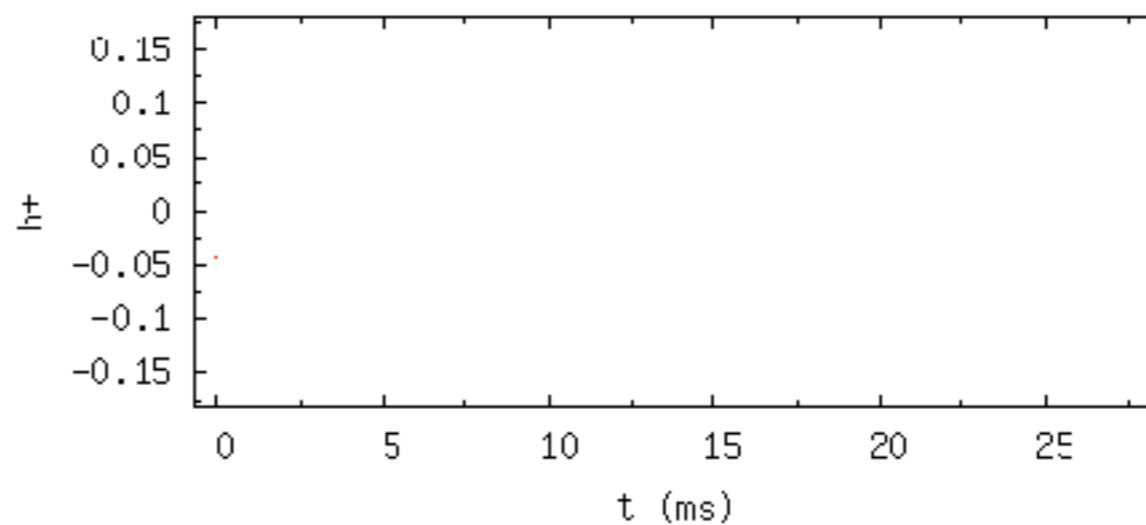
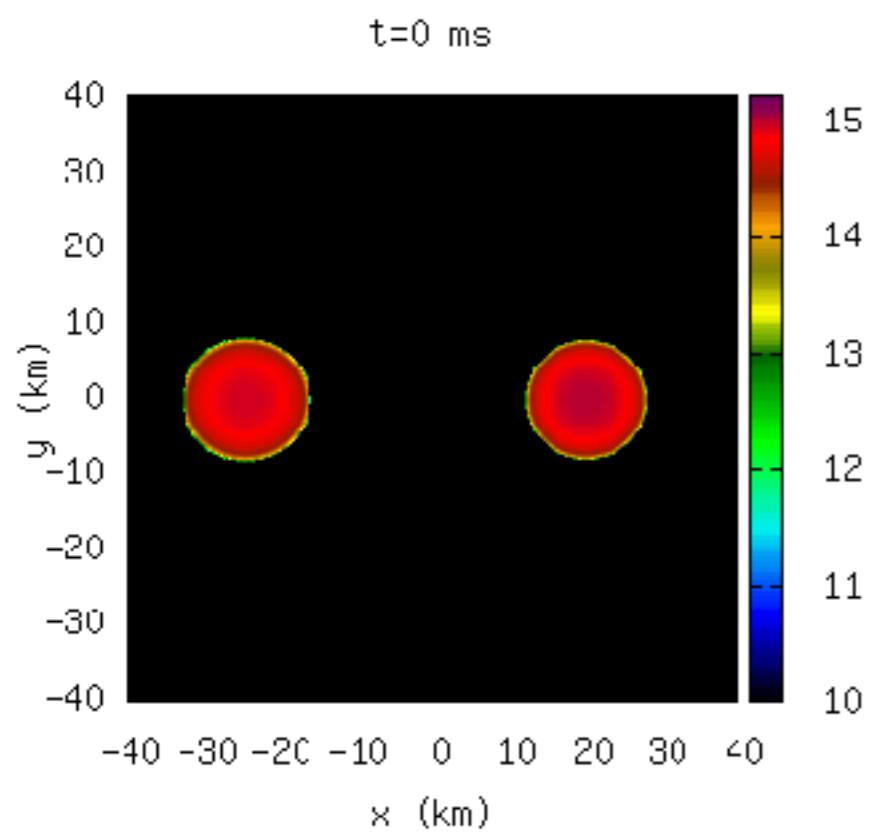


4、重力波宇宙論



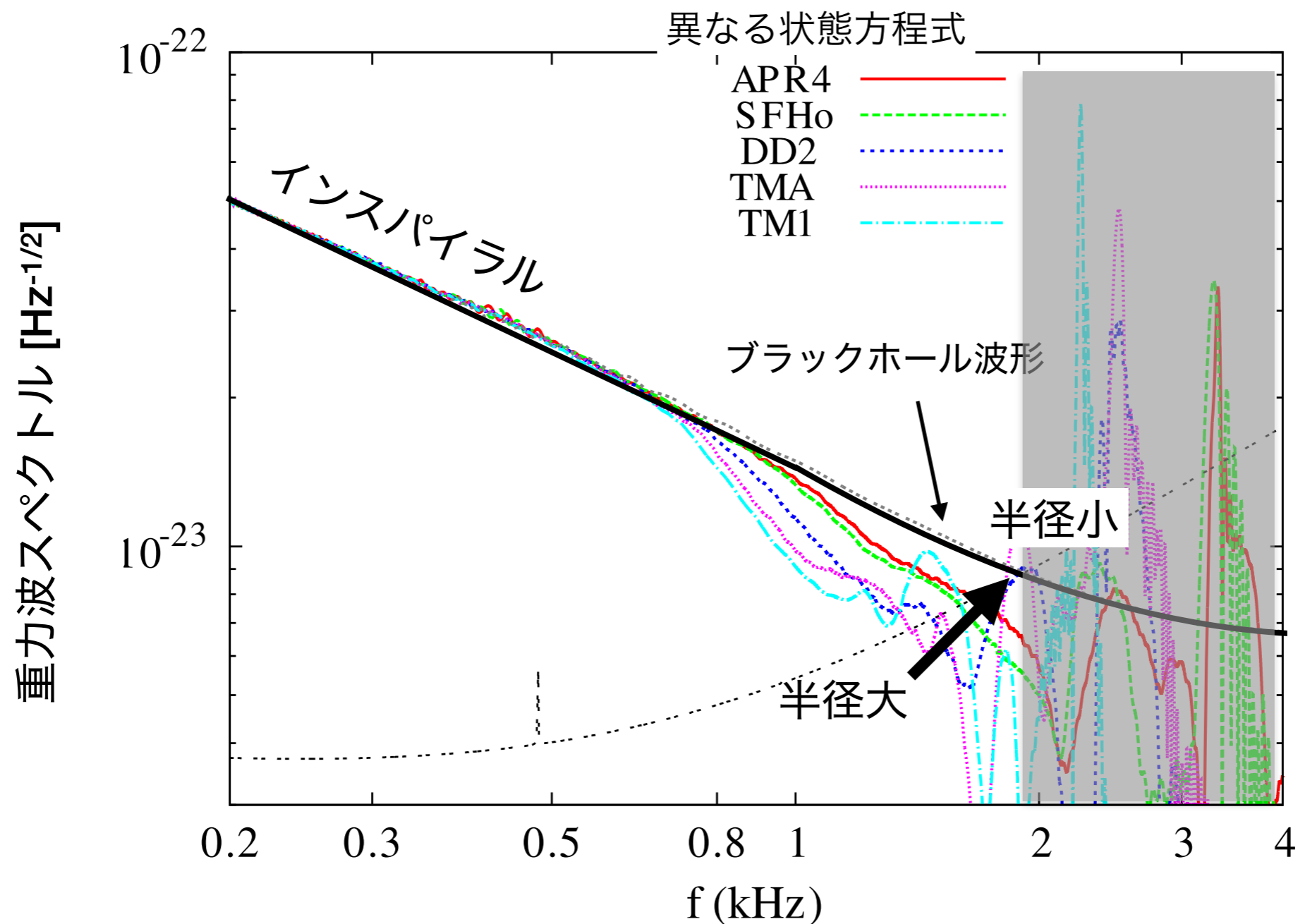
連星中性子星合体の最後の瞬間

Hotokezaka et al 2013



中性子星合体の重力波と潮汐効果

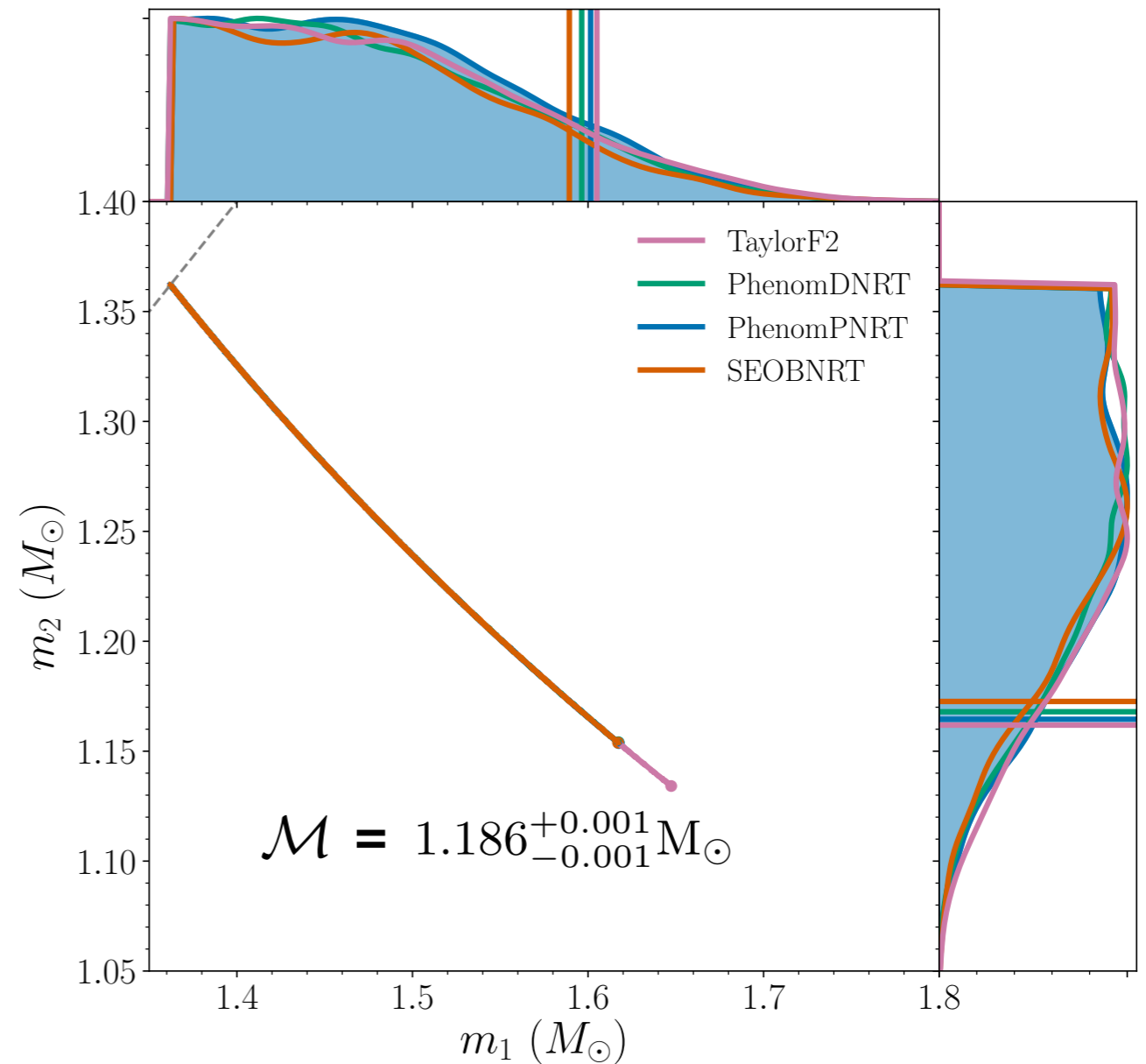
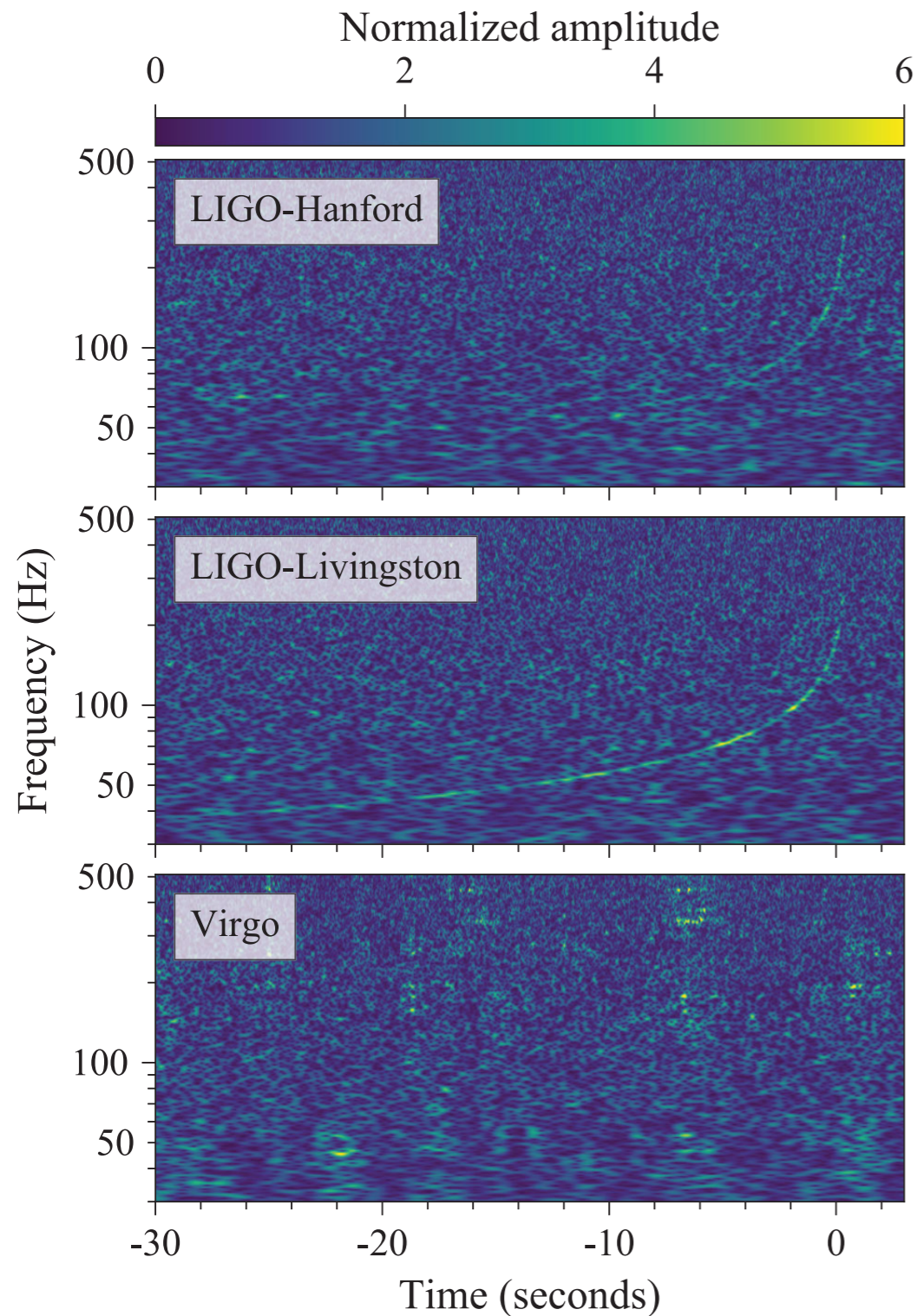
Hotokezaka+13, 15, 16 (see also Radice+14, Haas+16, Dietrich+17, Kiuchi+17)



中性子星は有限のサイズを持つ：質量 M 、自転角運動量 a に加えて、潮汐変形率 Λ によって、軌道と重力波波形が特徴づけられる。

中性子星合体GW170817

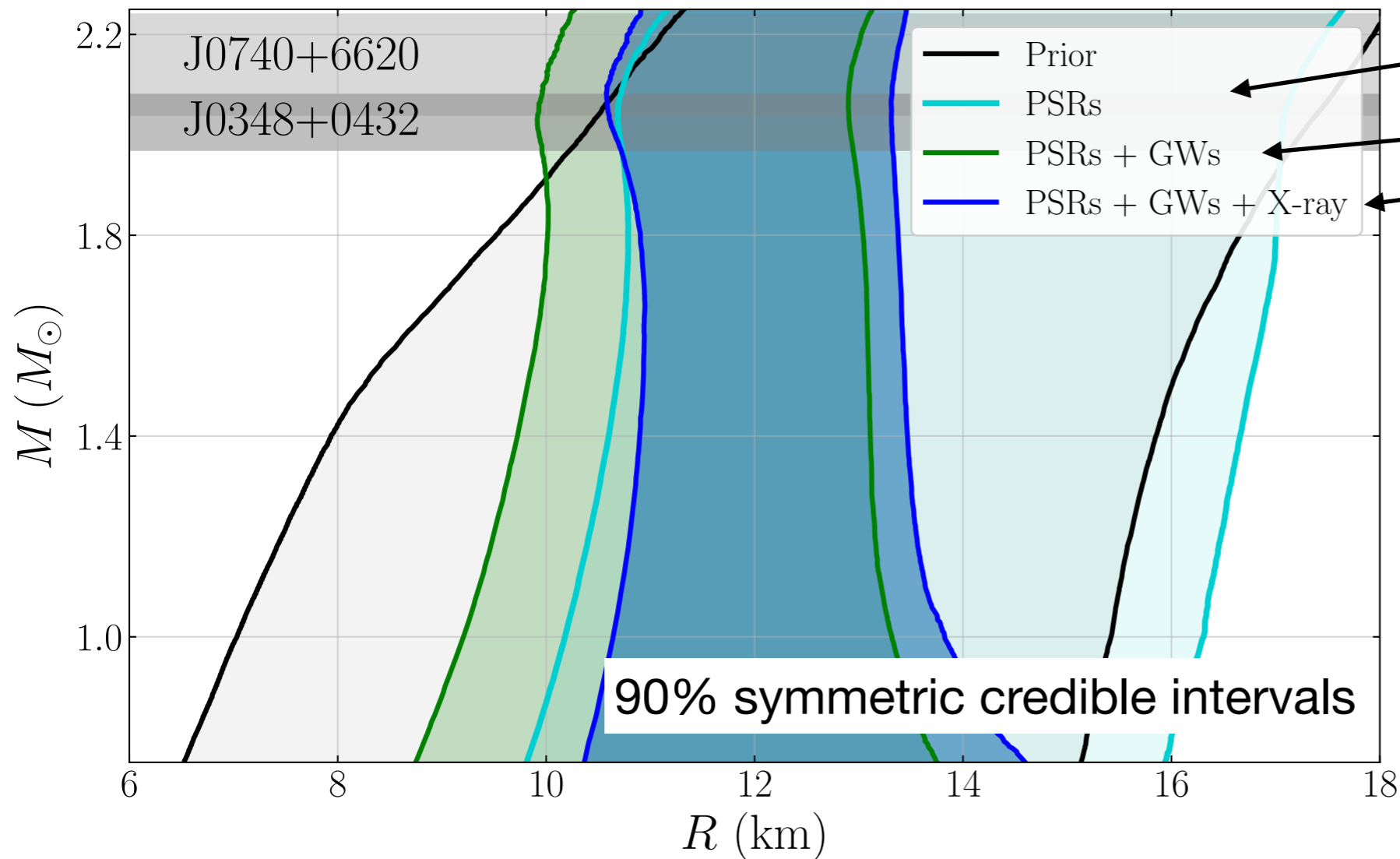
LVC 2017, 2018



銀河系で観測されている中性子星連星の質量と同等

Neutron Star EOS from Multi-messenger

Landry et al 2020



(i) 最大質量 < 2Msun

(ii) + GW170817

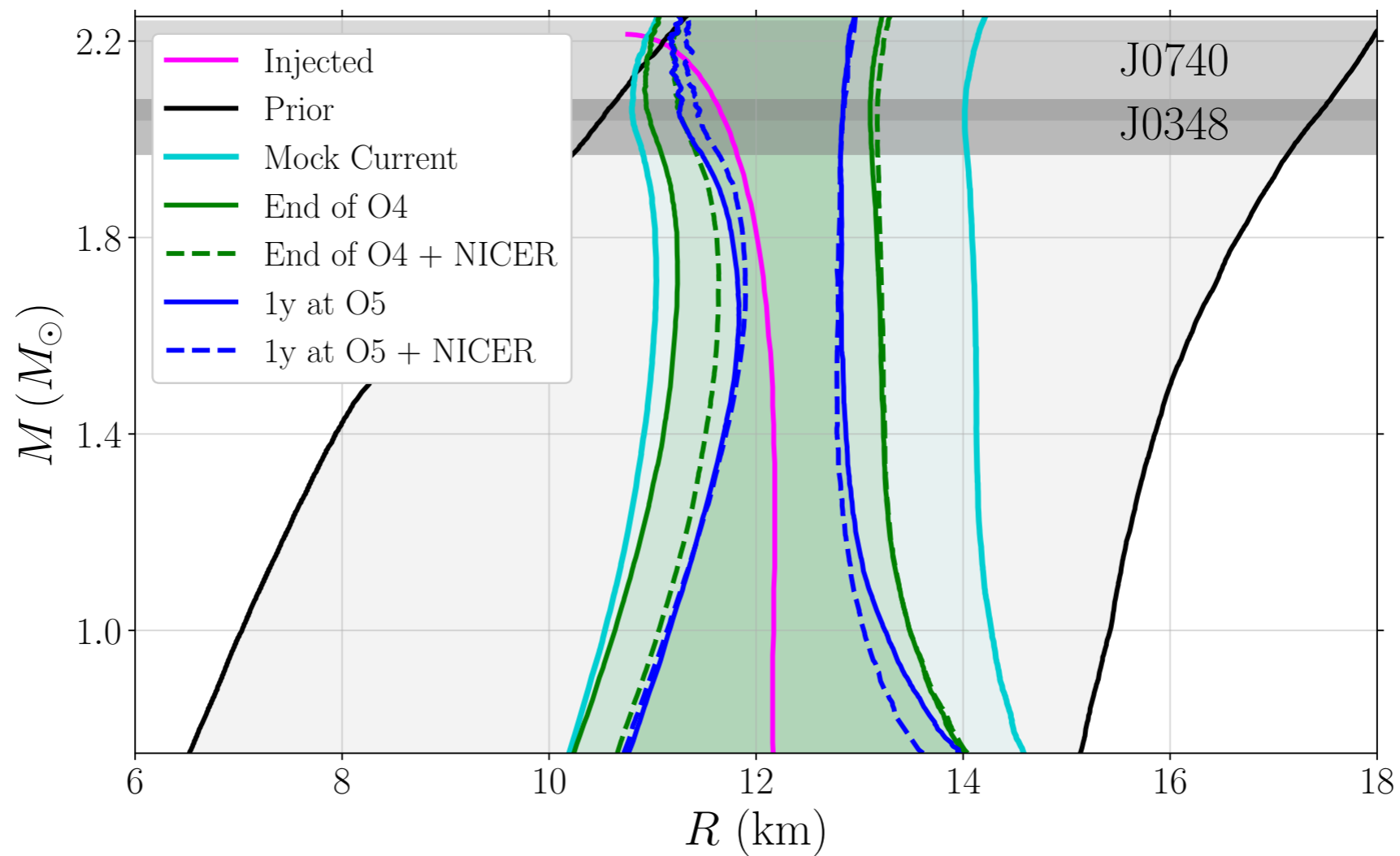
(iii) + NICER (X-ray)

注) NICERの半径の測定には、
モデルの系統誤差あり。

11 km \sim < R \sim < 14 km at 1.4Msun

Neutron Star EOS from Multi-messenger

Landry et al 2020



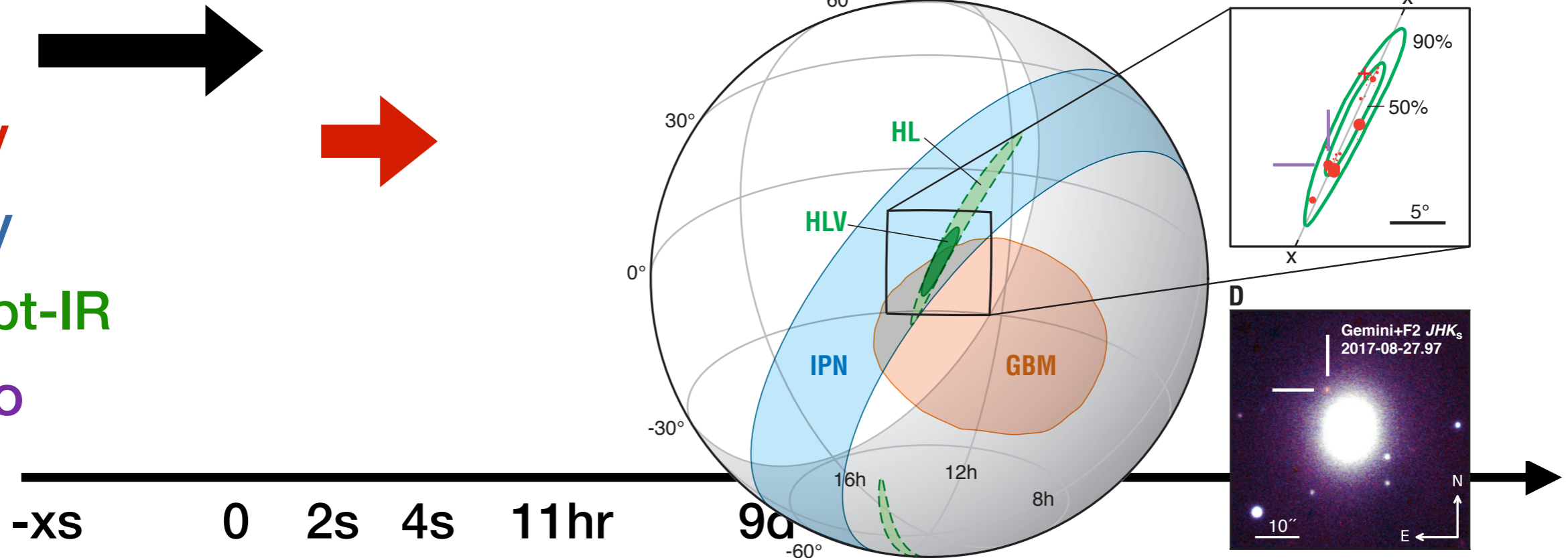
将来的には、1 kmほどの精度が可能 (重力波20イベント)

重力波-電磁波観測：GW170817

Abbott et al 2017

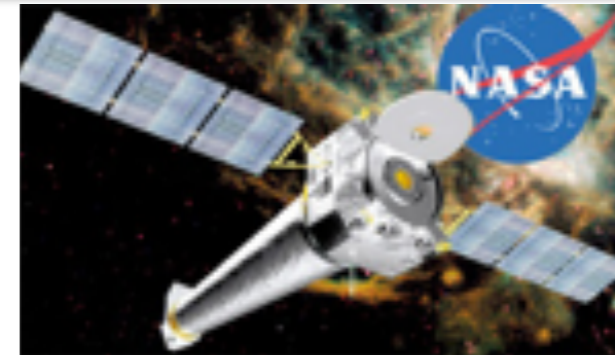
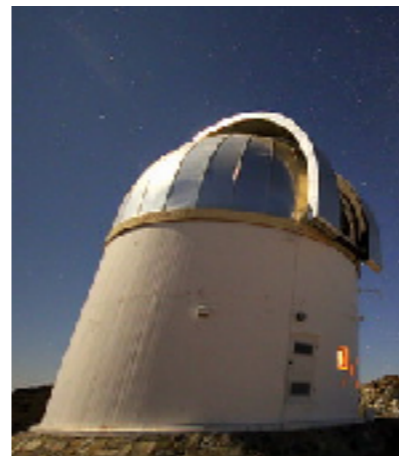
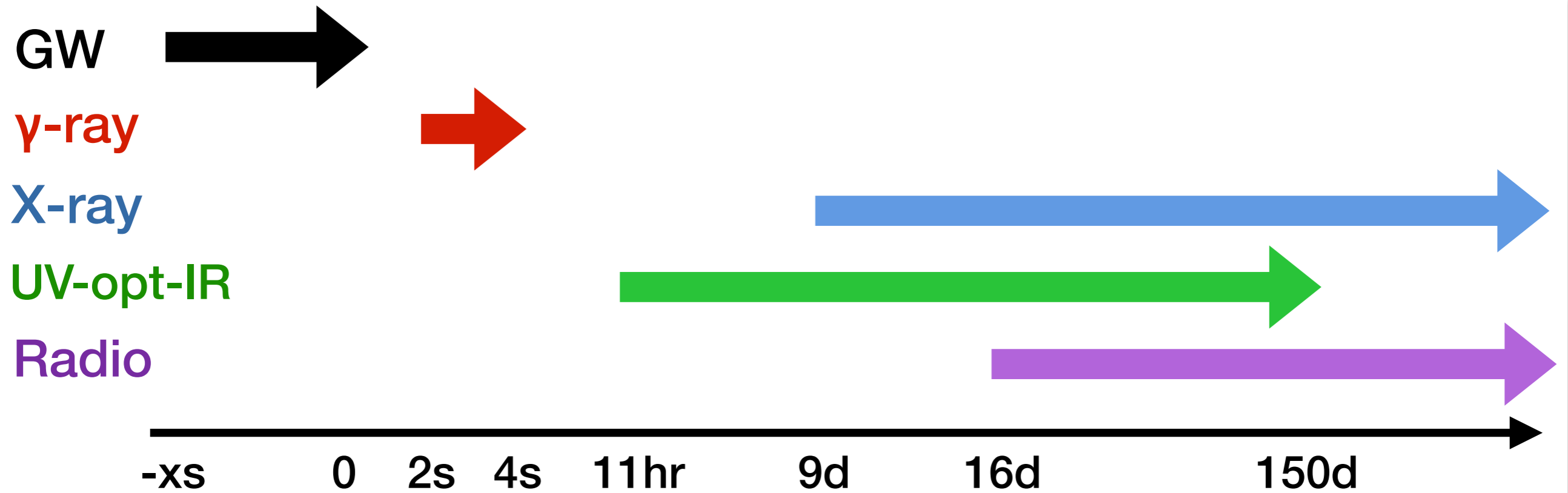
Kasliwal et al 2017

GW
 γ -ray
X-ray
UV-opt-IR
Radio



重力波-電磁波観測：GW170817

Abbott et al 2017



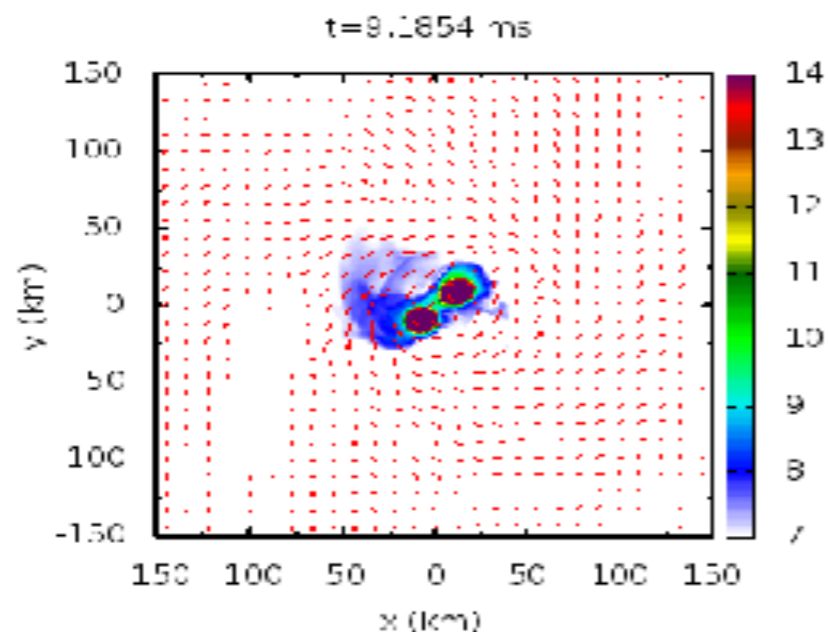
エネルギー

重力波 ($\sim 10^{53}$ erg) \gg ガンマ線 \sim 可視 \sim X線 (10^{46} erg)

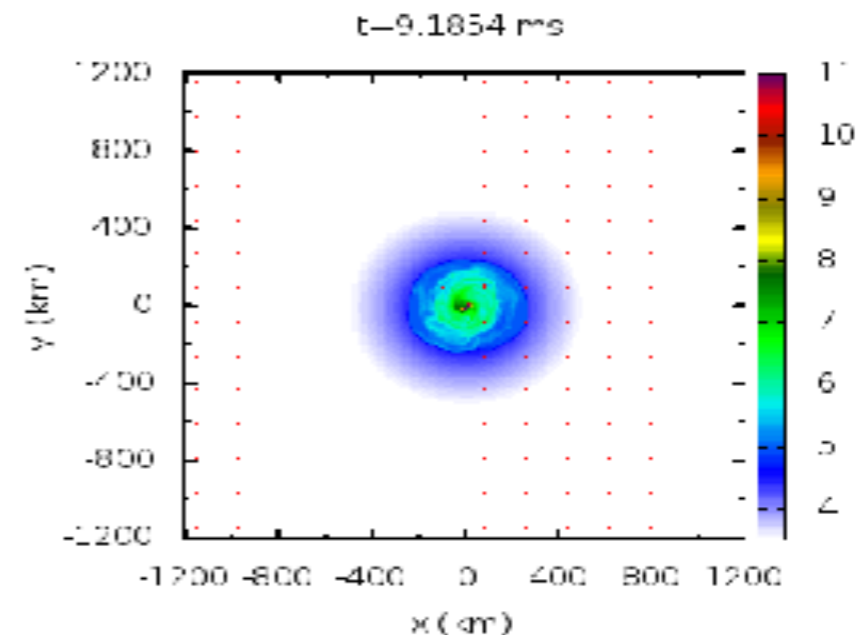
中性子星合体から飛び出す物質

KH + 13, also Shibata & KH 19

300 km x 300 km



2400 km x 2400 km



合体時に、太陽質量の $O(0.01)$ 倍の物質が光速の10-30%で放出される。

=>これらが望遠鏡で観測可能な電磁波放射を生成

also Bauswein + 13, Piran + 13, Rosswog 2013, Kyutoku+15, Sekiguchi + 15, 16, Radice+16, 18, Kawaguchi+15 and more

元素の起源とキロノバ

Element Origins

1 H																	2 He	
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
55 Cs	56 Ba			72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra																	
		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu		
		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U													

Merging Neutron Stars
Dying Low Mass Stars

Exploding Massive Stars
Exploding White Dwarfs

Big Bang
Cosmic Ray Fission

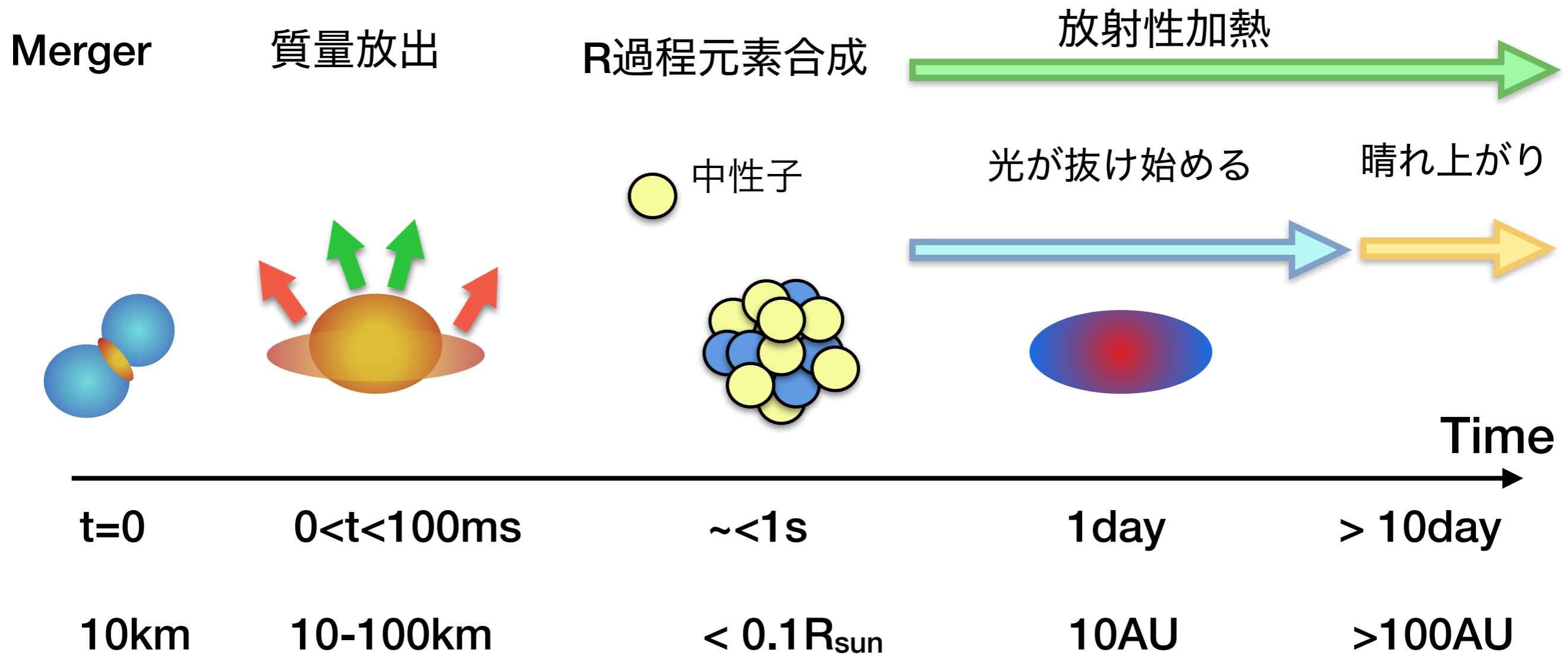
Based on graphic created by Jennifer Johnson

本当に金・プラチナは中性子星合体で作られたのか？

キロノバとは

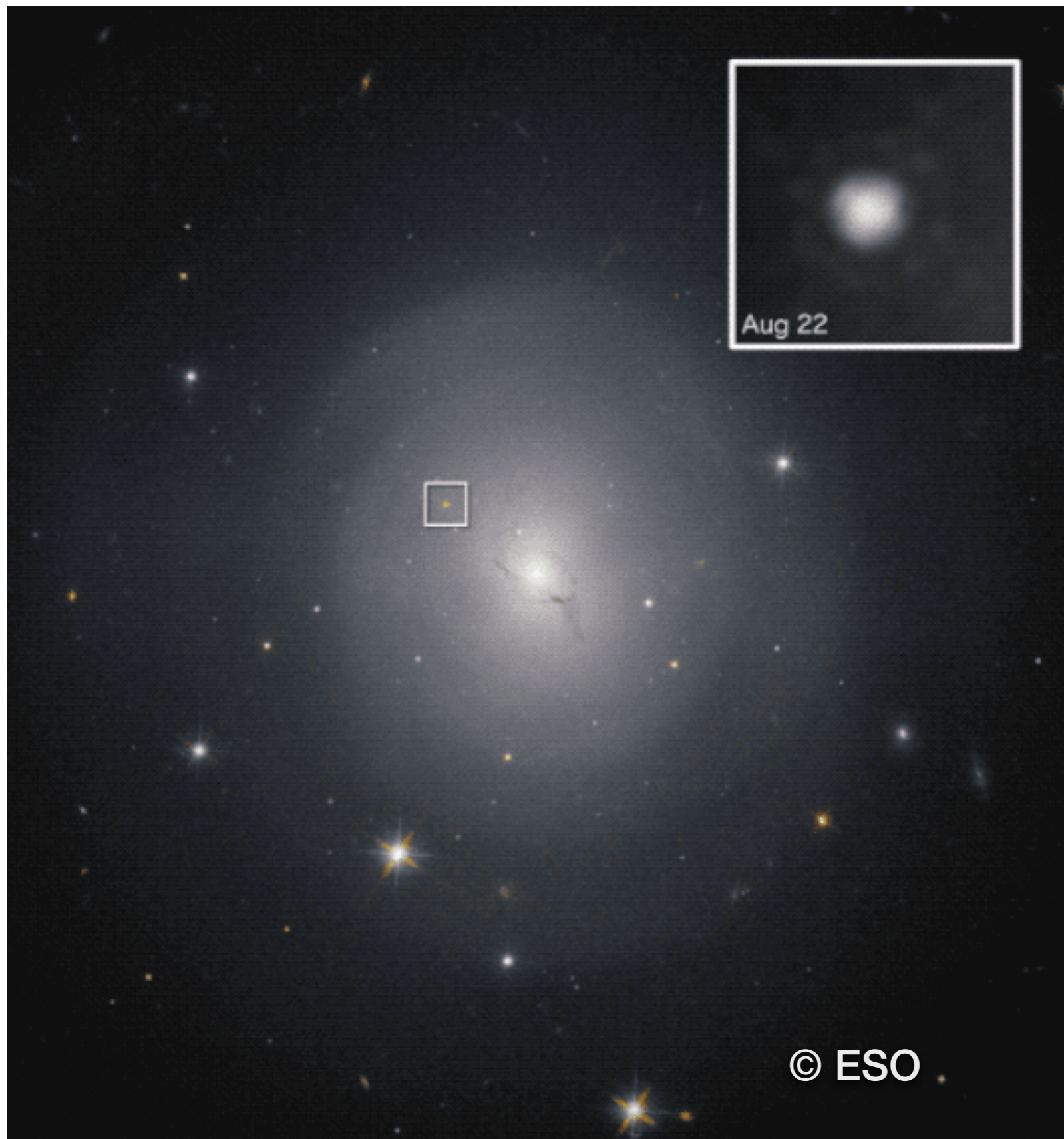
中性子星合体の放出物が、放射性崩壊によって熱的に輝く現象。（超新星に似ているが暗い）

Li & Paczynski 1998, Kulkarni 2005, Metzger + 2010



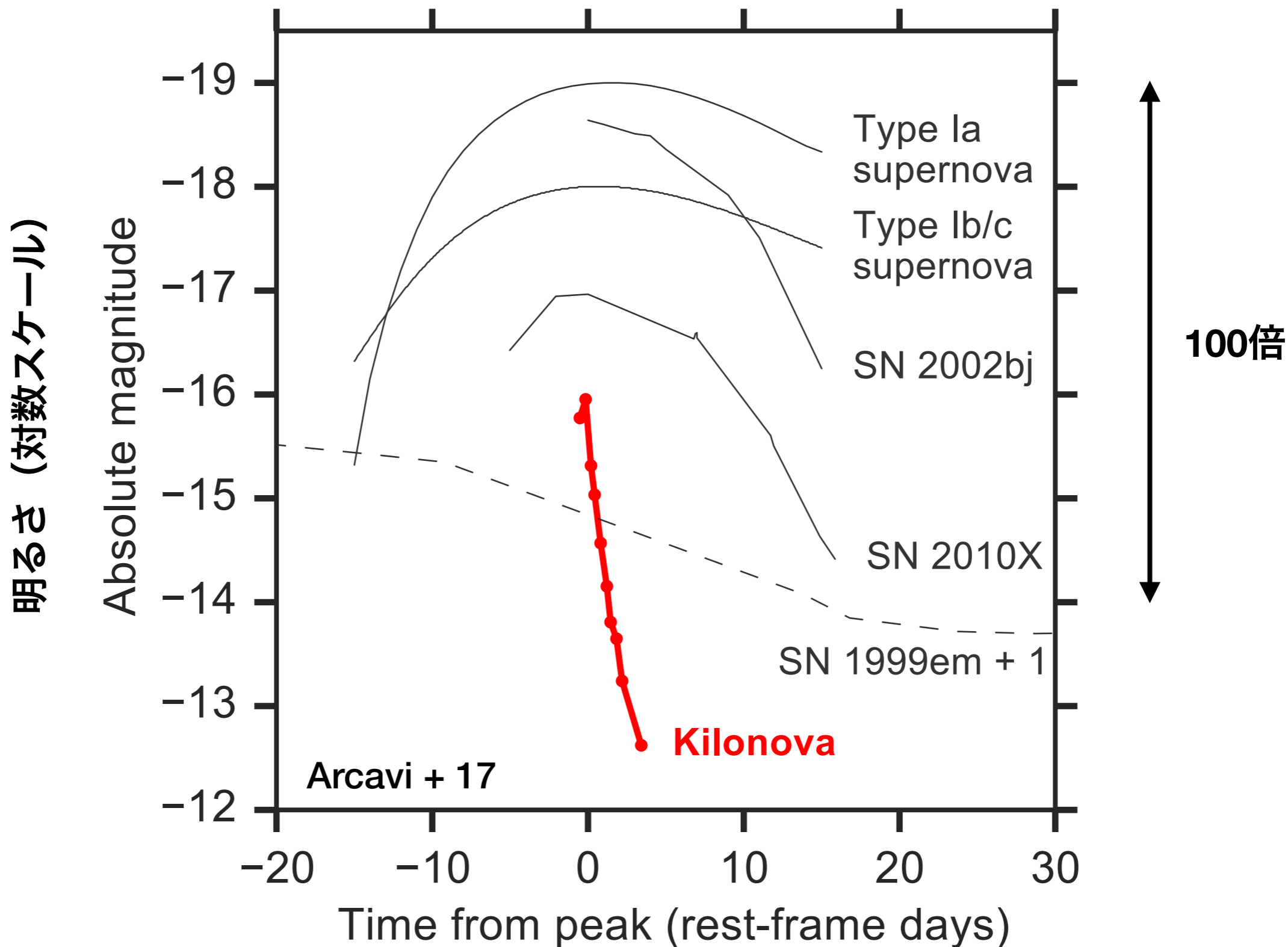
観測的に”キロノバ”と確定されているのは、GW170817に付随した1天体のみ。

キロノバ GW170817

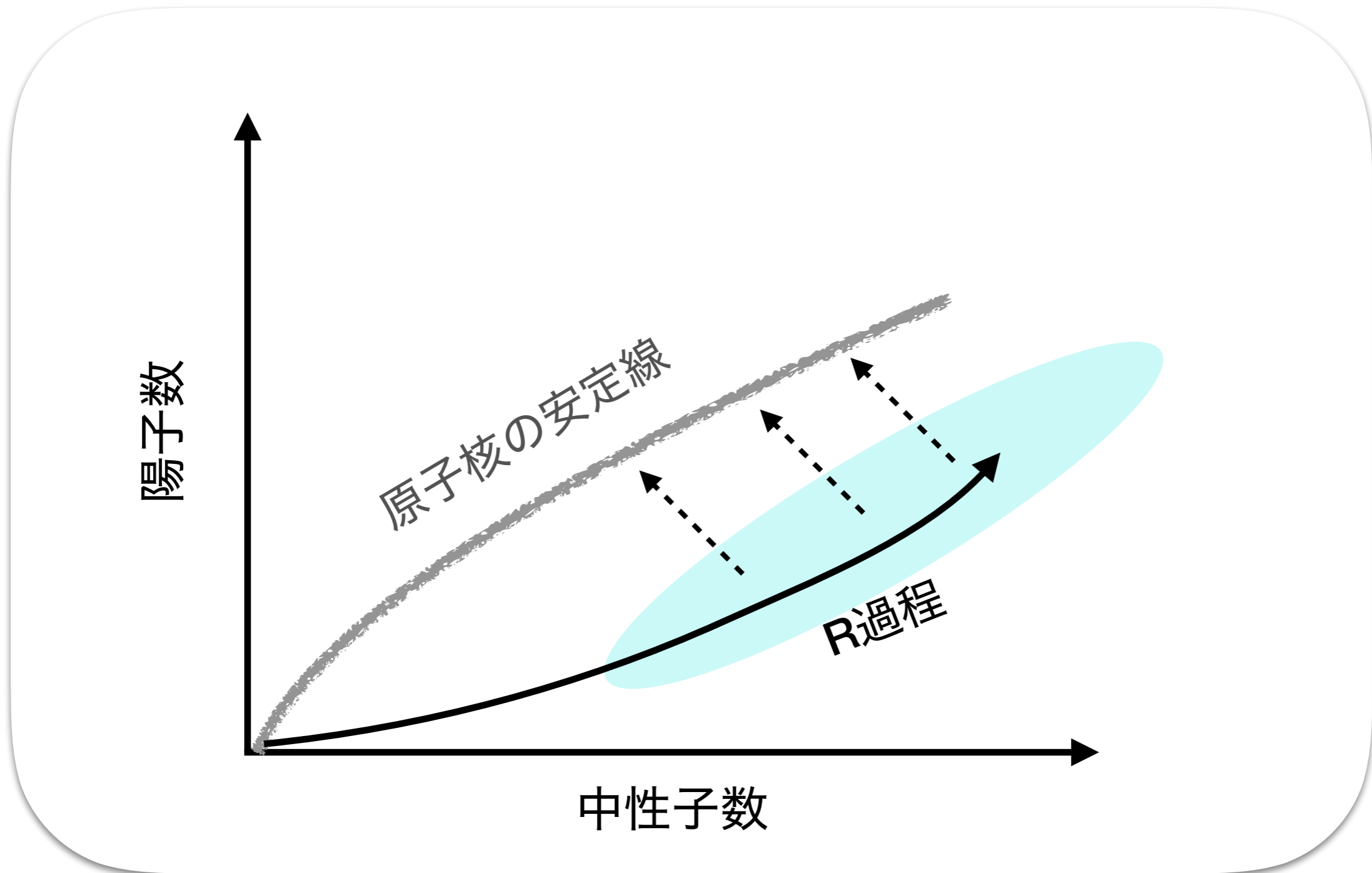


キロノバ in GW170817

Arcavi+17, Coulter+17, Lipunov+17, Soares-Santos+17, Tanvir+17, Valenti+17, Kasliwal+17, Drout+17, Evans+17, Utsumi+17



R過程とキロノバのエネルギー源

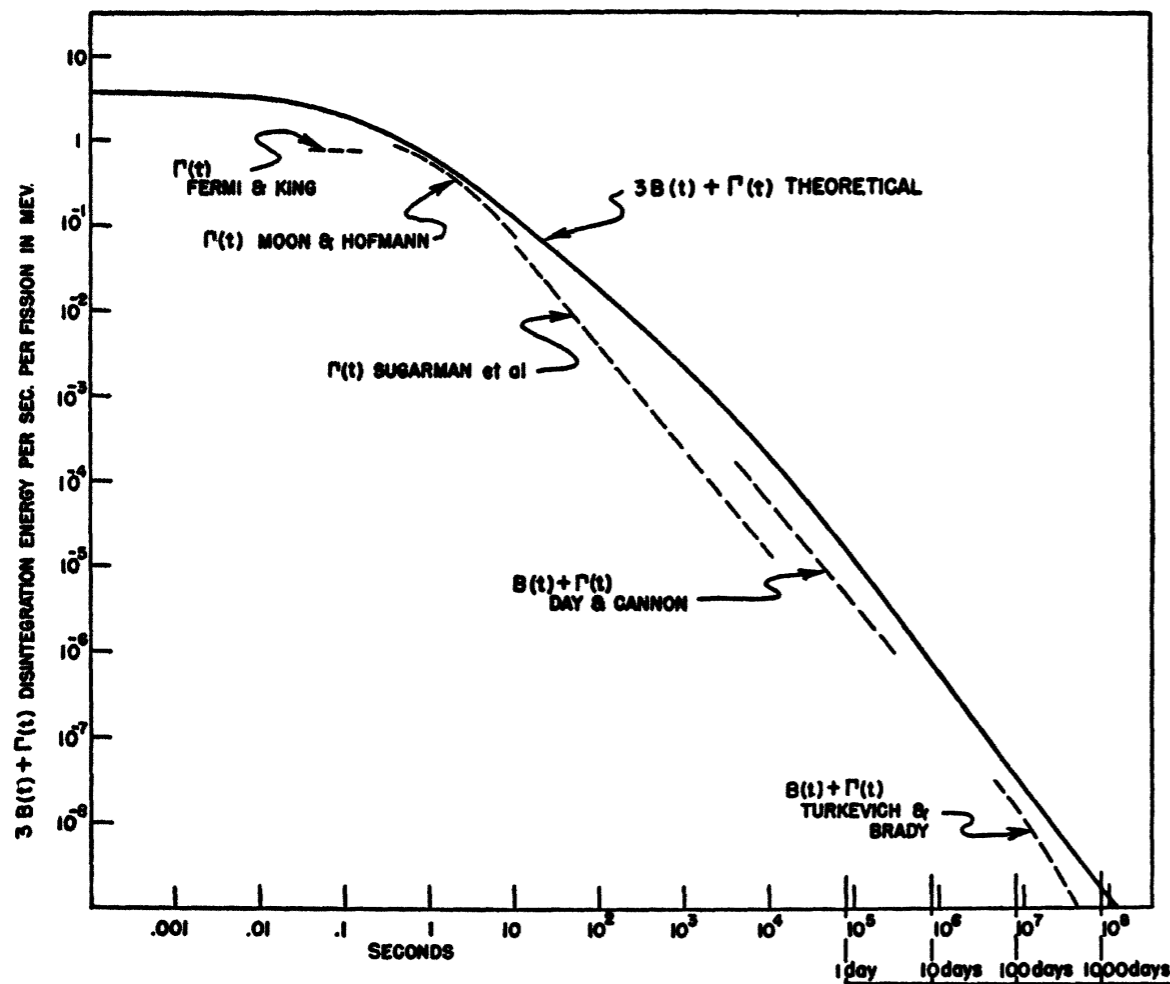


多くのベータ崩壊が統計的に加熱に参加

キロノバ: R過程元素の加熱

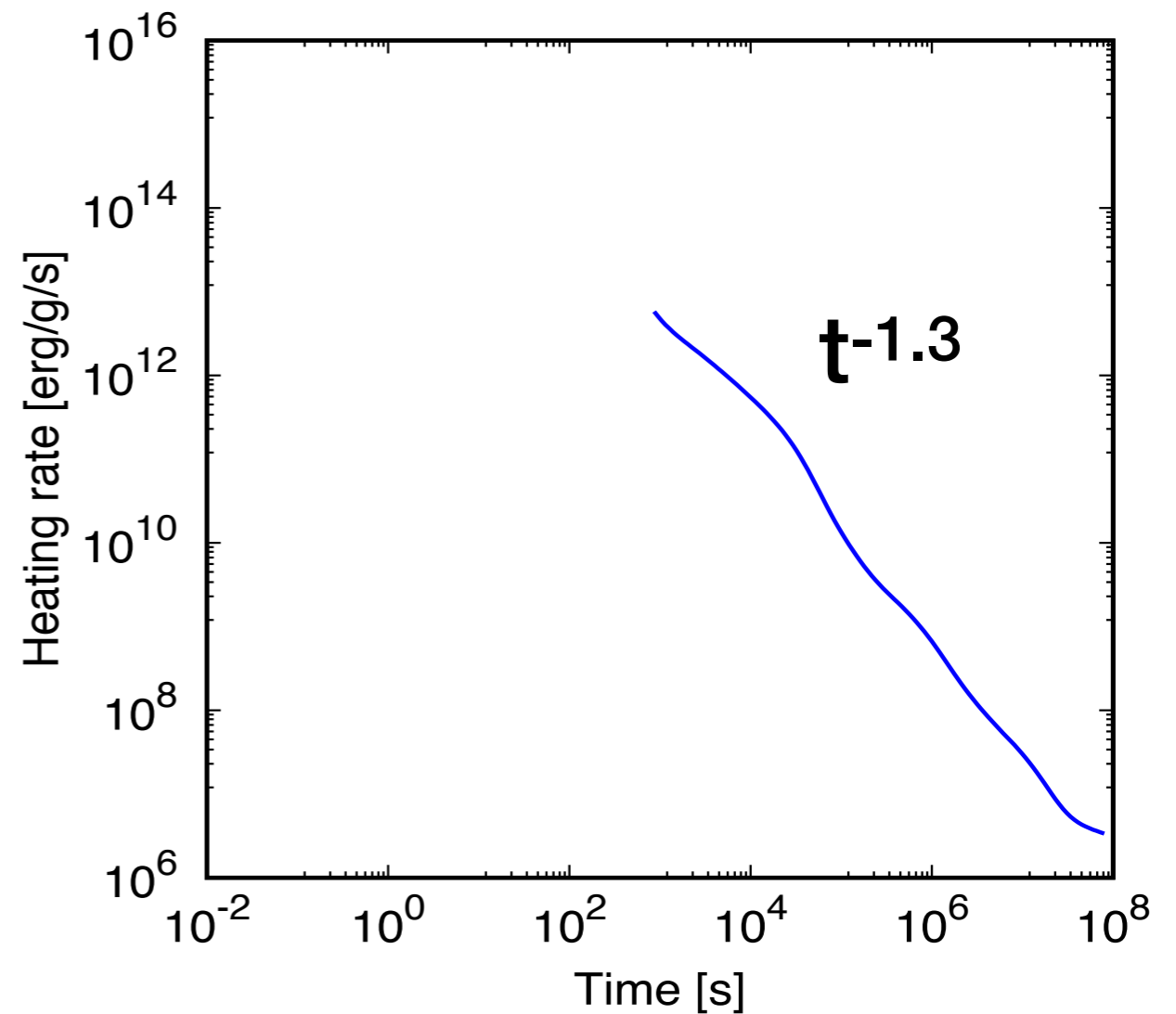
Way & Wigner 1948

Hotokezaka & Nakar 2020



(a)

核分裂後のベータ加熱 (原子炉)



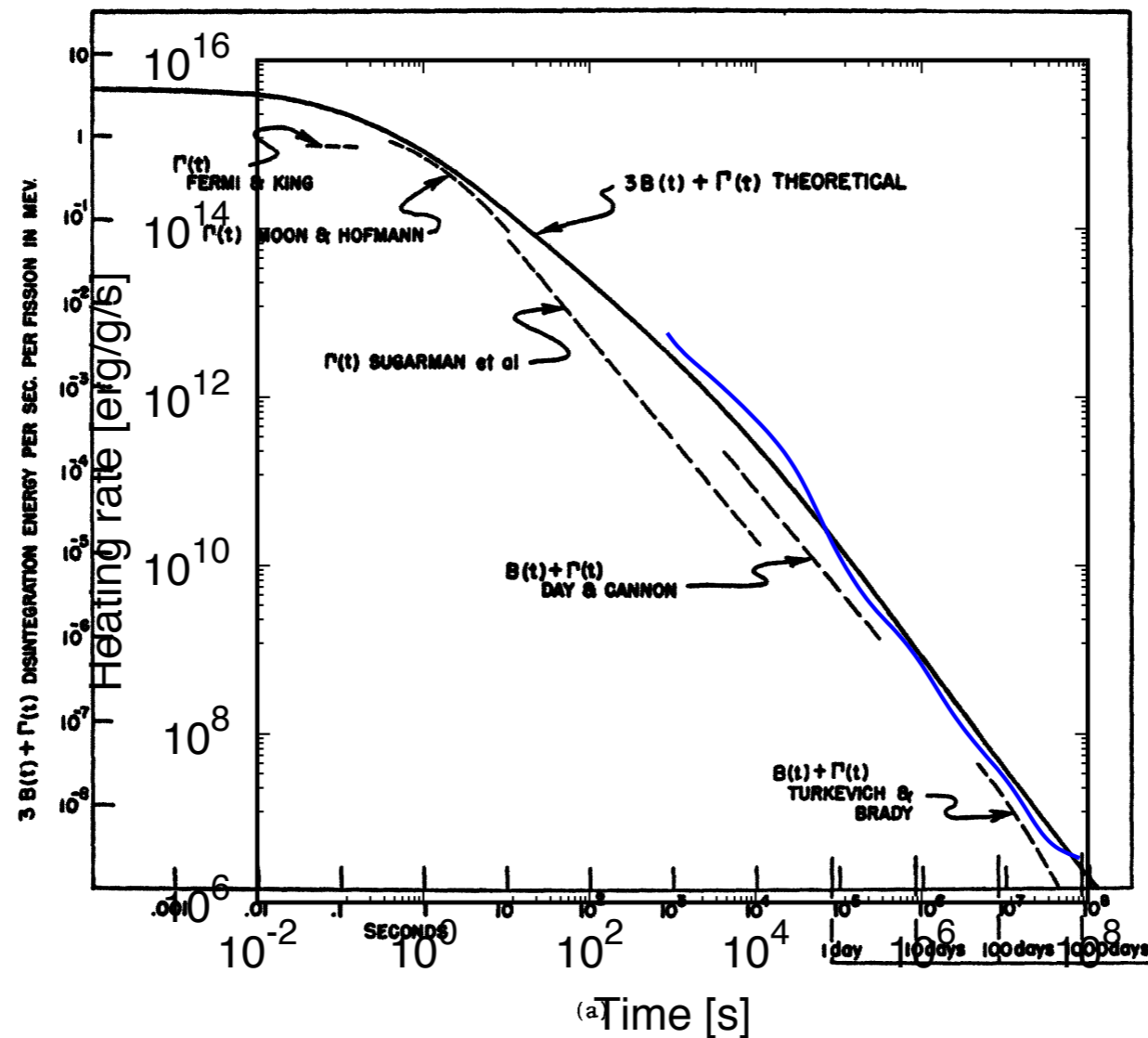
R過程後のベータ加熱 (キロノバ)

統計的ベータ崩壊加熱は、組成パターンの詳細には弱く依存。

キロノバ: R過程元素の加熱

Way & Wigner 1948

Hotokezaka & Nakar 2020



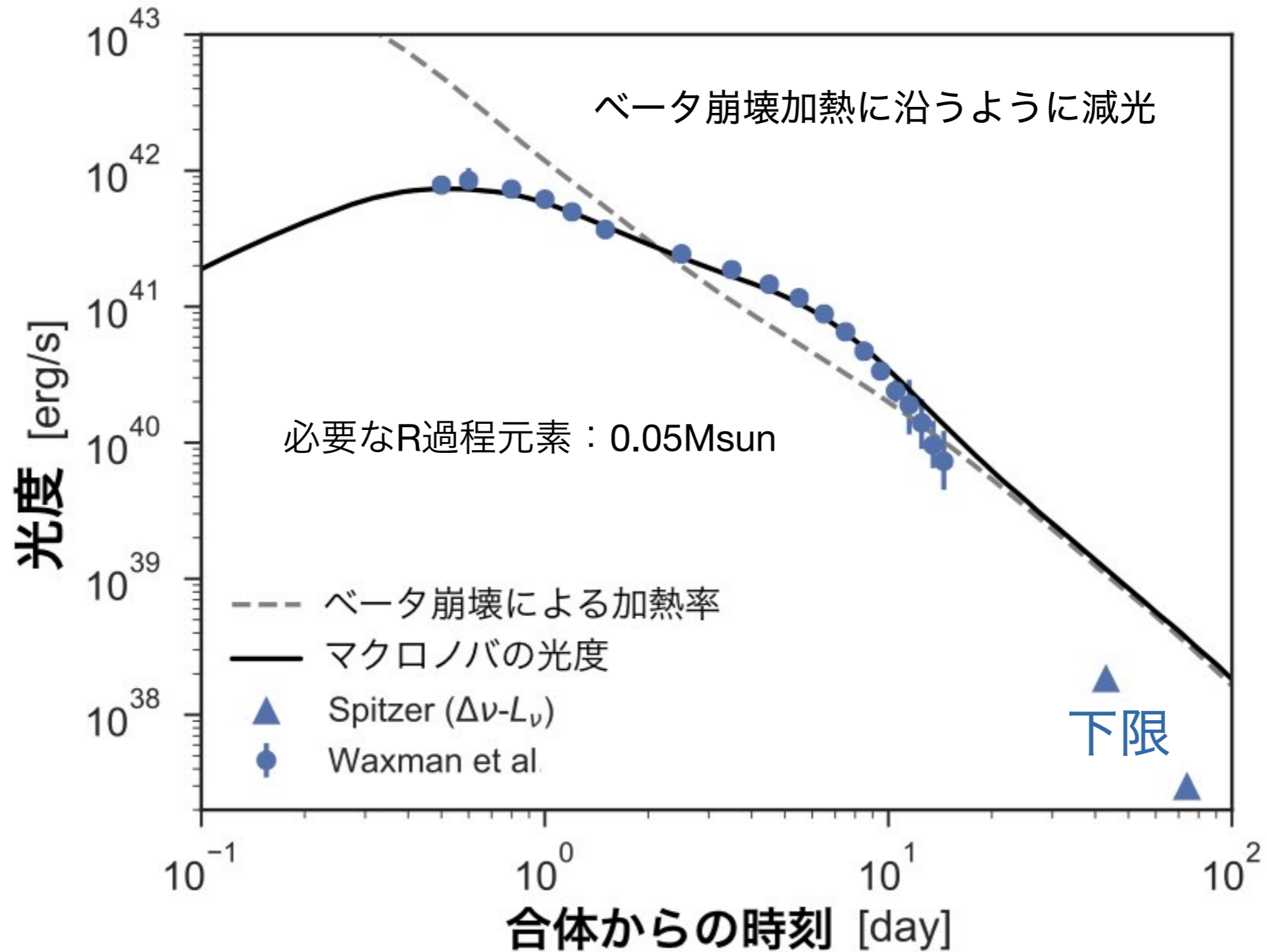
核分裂後のベータ加熱 (原子炉)

R過程後のベータ加熱 (キロノバ)

統計的ベータ崩壊加熱は、組成パターンの詳細には弱く依存。

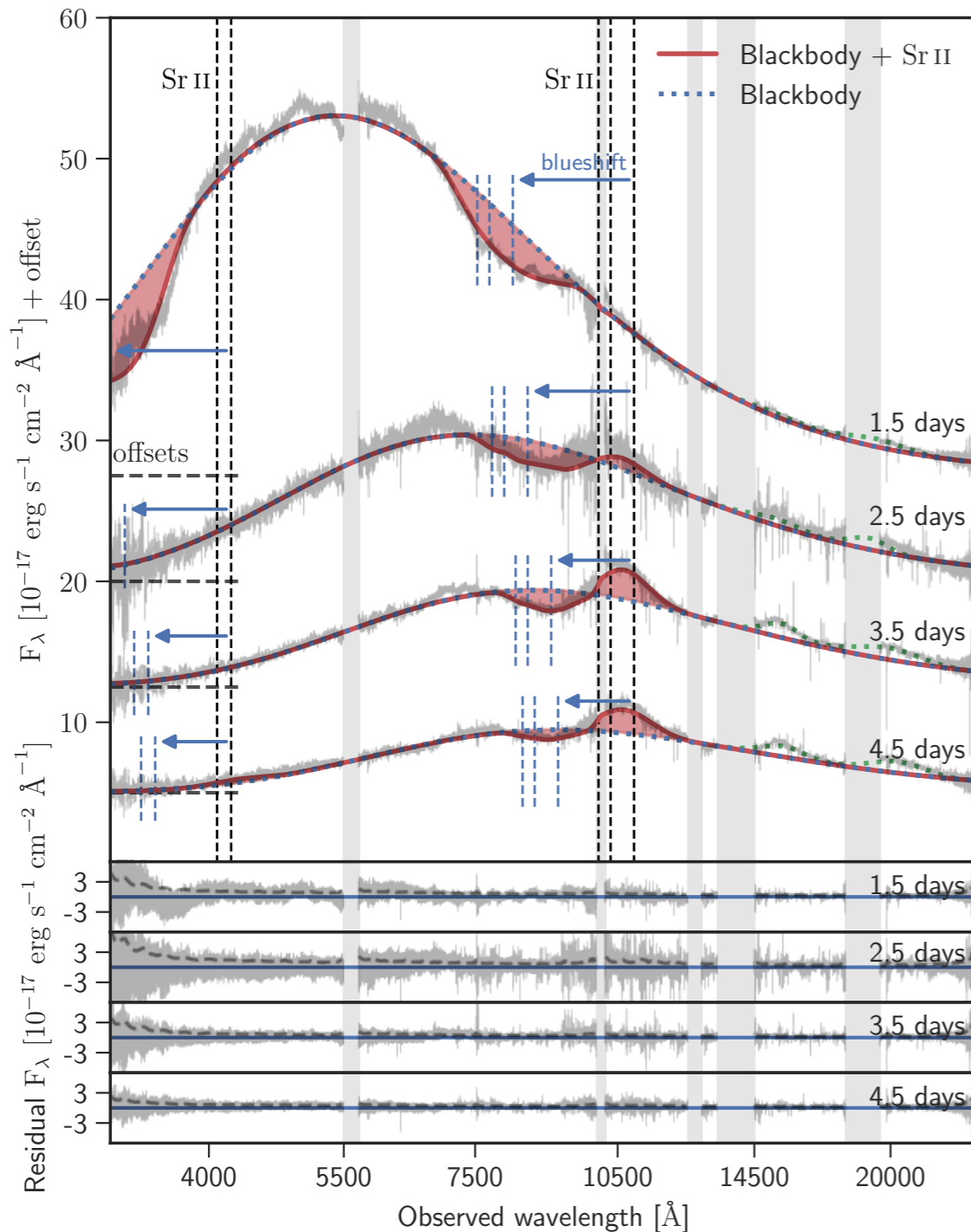
キロノバの光度曲線 (GW170817)

Hotokezaka & Nakar 2020



キロノバのスペクトル

Watson et al 2019



1.5日のスペクトルは、綺麗な黒体放射に吸収線。

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)

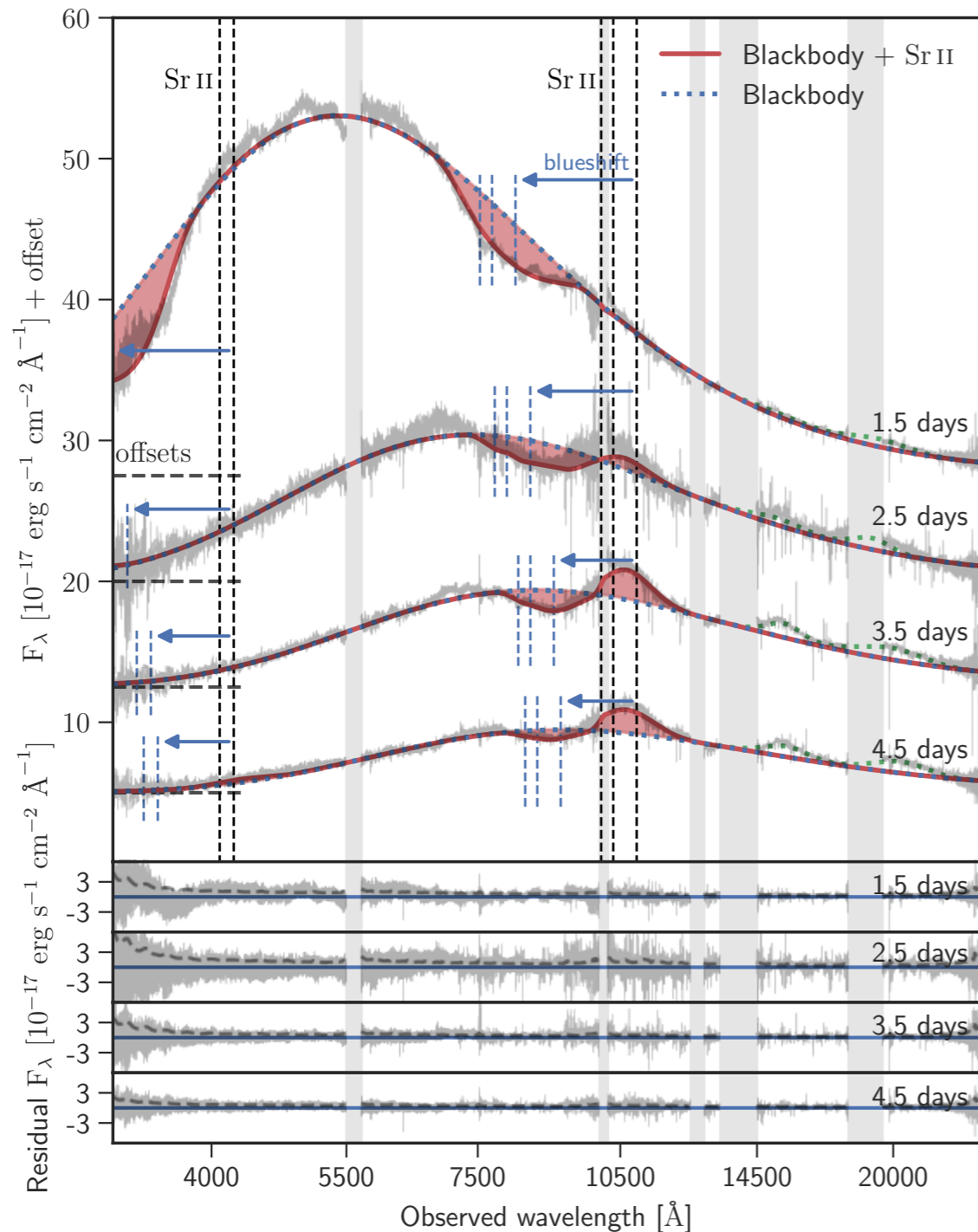
これらのラインはSr II と考えられる。

Resonance line: 4070, 4216 \AA

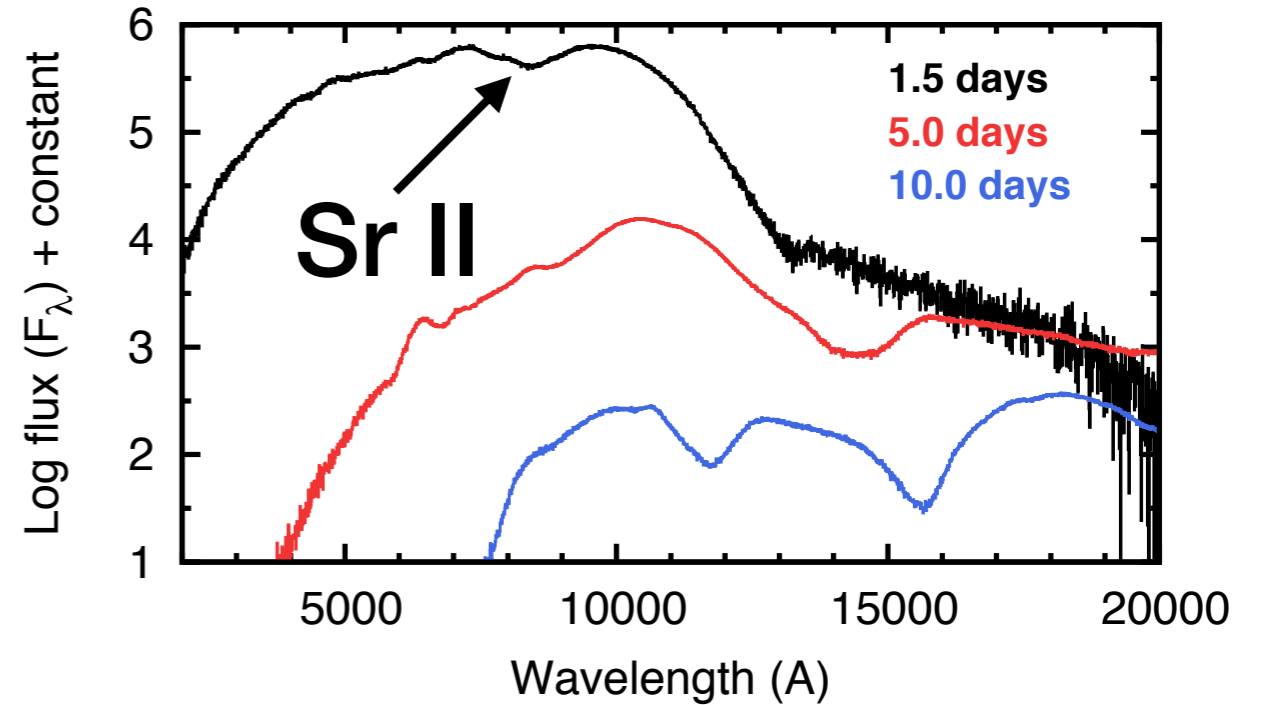
Permitted line: 10036, 10327, 10910 \AA

キロノバのスペクトル

Watson et al 2019



Tanaka & Hotokezaka 2013



理論計算でもSr IIの吸収線が1.5日に
見えていた。（確かに最も強い吸収線）

※実は、キロノバがどうして黒体スペクトルに非常に近いのか理解できていない。昔の太陽スペクトル問題に似ている。

キロノバと元素のまとめ

- 中性子星合体GW170817の後に可視光で明るいキロノバを確認。
- 観測された光度曲線は、多種の核種のベータ崩壊による加熱率に沿って減光 \Rightarrow R過程元素合成が起こったと考えられる。
- スペクトルにSr IIの強い吸収線と輝線が見られる。少なくとも1st peak付近の元素はある程度生成された。
- 3rd peak およびそれ以降（つまり金やプラチナ）が生成された証拠は今の所ない。

標準サイレンとしての中性子星合体

$$h_{ij} \sim 10^{-21} \left(\frac{\omega_{\text{GW}}}{100 \text{ Hz}} \right)^{2/3} \left(\frac{\mathcal{M}}{25 M_{\odot}} \right)^{5/3} \left(\frac{400 \text{ Mpc}}{d} \right)$$

重力波振幅の精密測定 \Rightarrow 重力波天体までの距離が測定できる。

宇宙論への応用が可能。

後退速度

電磁波追観測

によって母銀河から測る

$$v_r \approx H_0 d + v_p$$

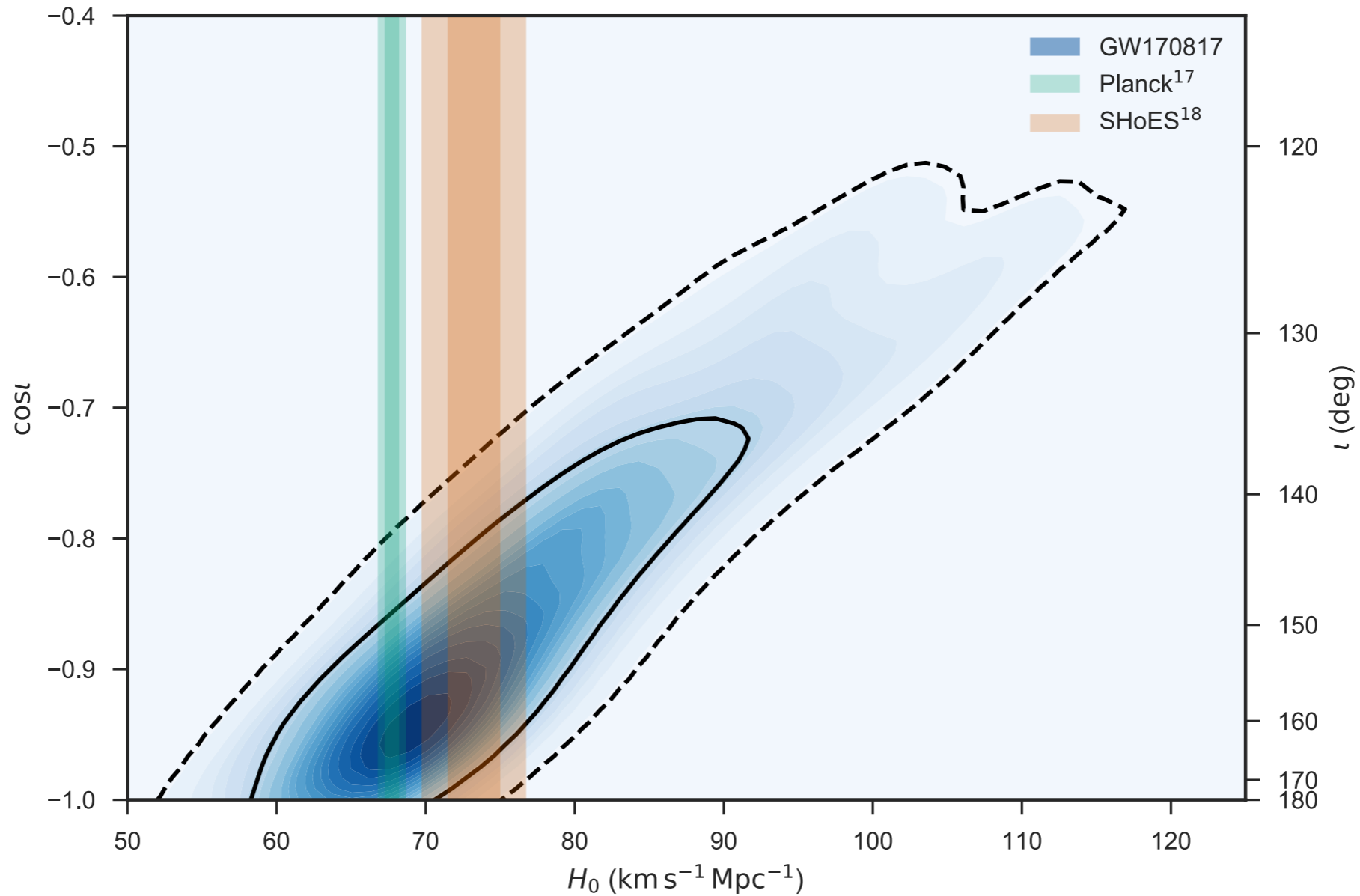
宇宙膨張率 (ハッブル定数)

銀河の固有運動

(educated guess)

標準サイレンとしての中性子星合体

GW170817 の重力波と母銀河を使った測定



Abbott et al 2017

標準サイレンとしての中性子星合体

$$h_{ij} \sim 10^{-21} \left(\frac{\omega_{\text{GW}}}{100 \text{ Hz}} \right)^{2/3} \left(\frac{\mathcal{M}}{25 M_{\odot}} \right)^{5/3} \left(\frac{400 \text{ Mpc}}{d} \right)$$

重力波振幅の精密測定 => 重力波天体までの距離が測定できる。

宇宙論への応用が可能。

後退速度

電磁波追観測

によって母銀河から測る

$$v_r \approx H_0 d + v_p$$

銀河の固有運動

(educated guess)

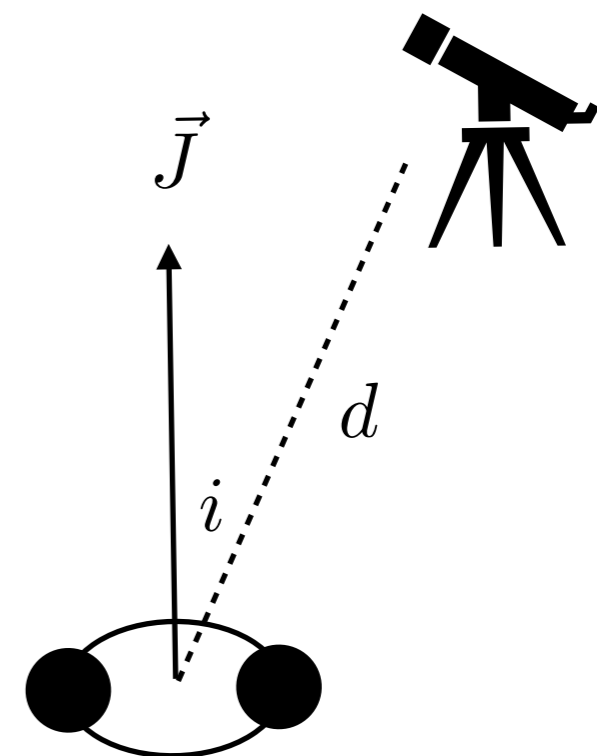
↑
宇宙膨張率 (ハッブル定数)

もう少し詳しく見ると、

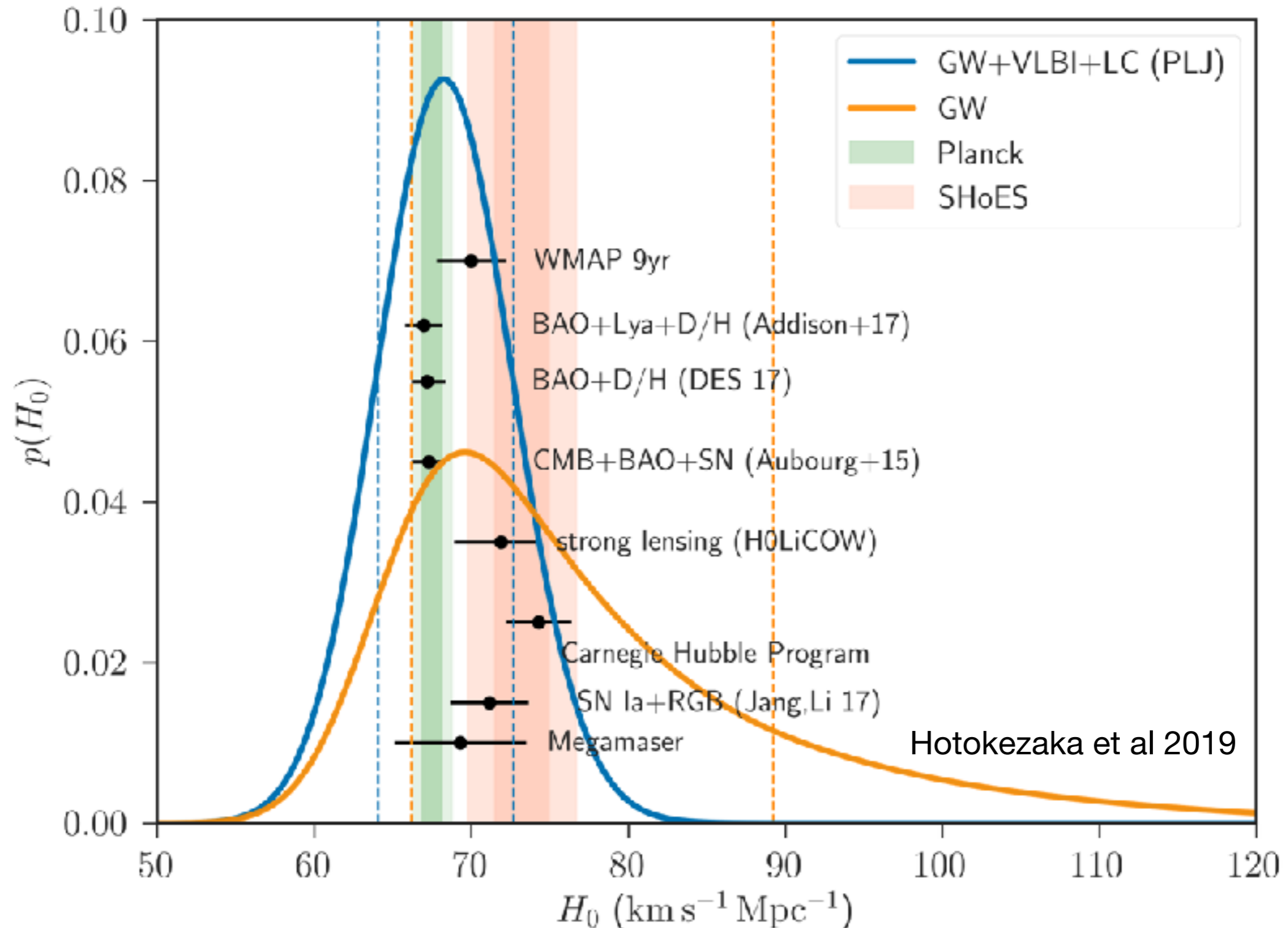
$$h_+ \propto 1 + \cos^2 i$$

$$h_{\times} \propto 2 \cos i$$

というように、重力波の振幅は連星に対する見込み角 i に依存。



電磁波からの情報=> H0

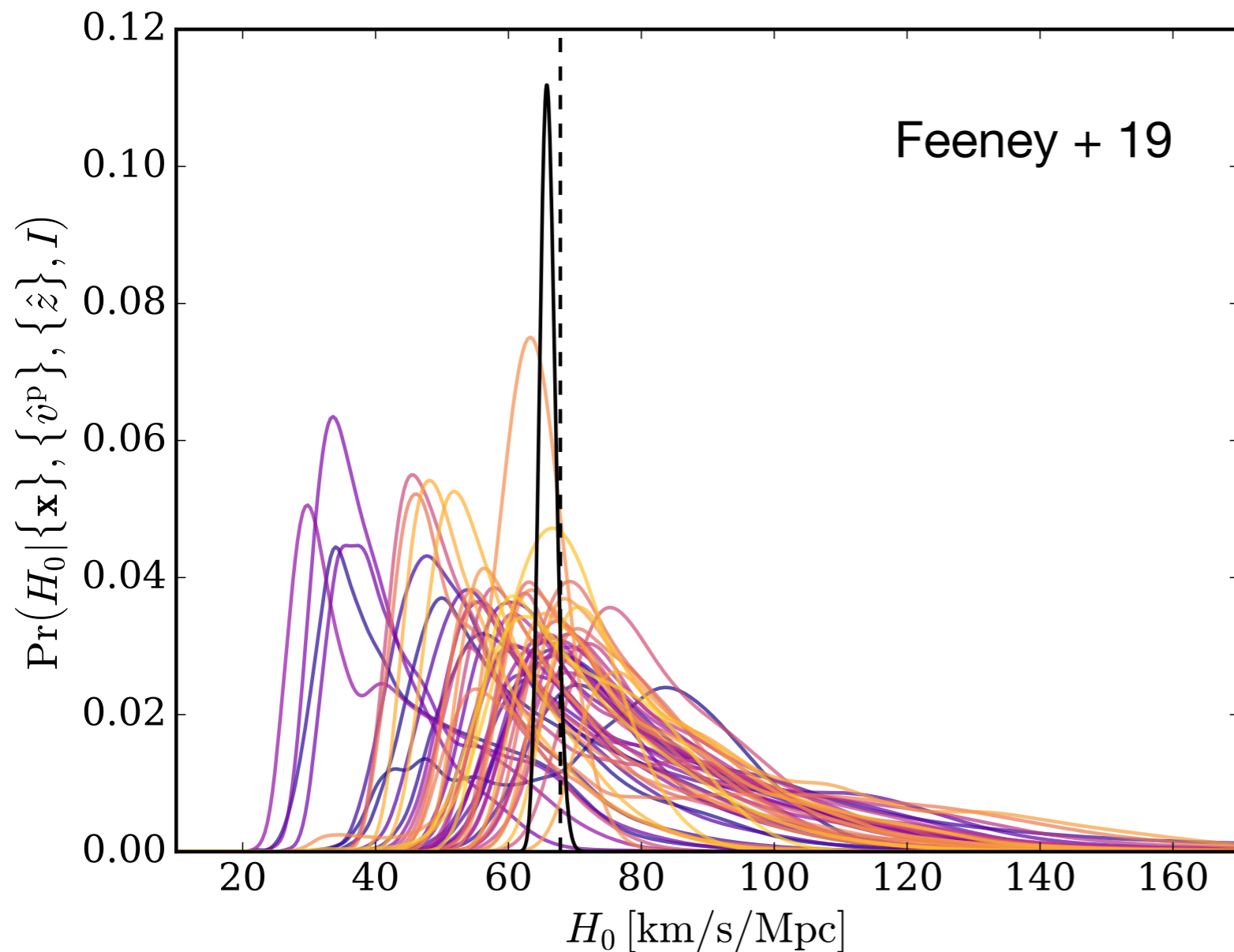


$68.1^{+4.5}_{-4.3} \text{ km/s/Mpc}$

3-4% ジェットのモデルの不定性

将来の展望

母銀河が決まる連星中性子星合体50イベント
(今のところ、1イベント)



**50天体あれば、Hubble Tension
を解決可能。**

ジェットを使えば、15天体ほど。

課題

LIGO/Virgo O3では、0イベント

遠い合体は、母銀河の決定が難しいので、
年間数イベント程度？

電磁波対応天体に対する、検出バイアス
がある？

中性子星合体のまとめ

- GW170817では、重力波と電磁波の同時検出に成功。（今のところ、唯一の例）
- 重力波波形から中性子星のサイズを測定： $\lesssim 13 \text{ km}$
- R過程元素の放射崩壊で輝くキロノバ。光度曲線とスペクトルから重元素ができた証拠（Sr）。しかし、金・プラチナが作られた証拠はまだない。
- この1イベントでハッブル定数が測定される。ジェット観測の情報を加えることで、（クリーンさは減るが）測定精度を向上できる。今後、重力波のみなら50天体ほどでテンション解決。

今後の展望

< 5yr

- BBH観測から、BH Mass GapやBBH形成の起源に進展。重力レンズイベント？
- BBHが作る重力波背景放射。
- 複数の中性子星合体から、中性子星の状態方程式がより良く決まる。
- 中性子星合体は、連星質量に対してどれくらいバリエーションがあるのか？中性子星の最大質量にも関係 (e.g. Shibata & Hotokezaka 2019)
- James Webb Space Telescope によって、キロノバのスペクトルから複数の重元素が特定できる？
- 複数の中性子星合体の距離を測ることで、ハッブル定数の測定精度が向上。50イベントほどでハッブルテンションも解決？

注：将来のイベントは平均的にはより遠方なので、天文追観測はより難しい。今後、どれくらいの割合で電磁波対応天体が受かるか非自明。専用の新しい望遠鏡や衛星も登場？

今後の展望

10yr or longer

- 地上干渉計：
 - 高赤方偏移まで見渡す。毎日いくつも重力波が観測される時代。宇宙論への応用には高い期待。
 - 全てのガンマ線バーストが重力波の視野に入る。重力波天体とのガンマ線バーストの関係がより明確に。
 - 中性子星合体から核ガンマ線の検出。Isotopeの特定と生成量の測定。
 - 系内超新星爆発からの重力波とニュートリノの同時検出。
- 宇宙干渉計：
 - 超大質量ブラックホール重力波天文学。より良い重力のテスト。
 - インフレーション起源の重力波背景放射。
 - Ia型超新星と連星白色矮星。