

重力波天文学の 現状と将来展望

高エネルギー加速器研究機構
素粒子原子核研究所 久徳浩太郎

内容

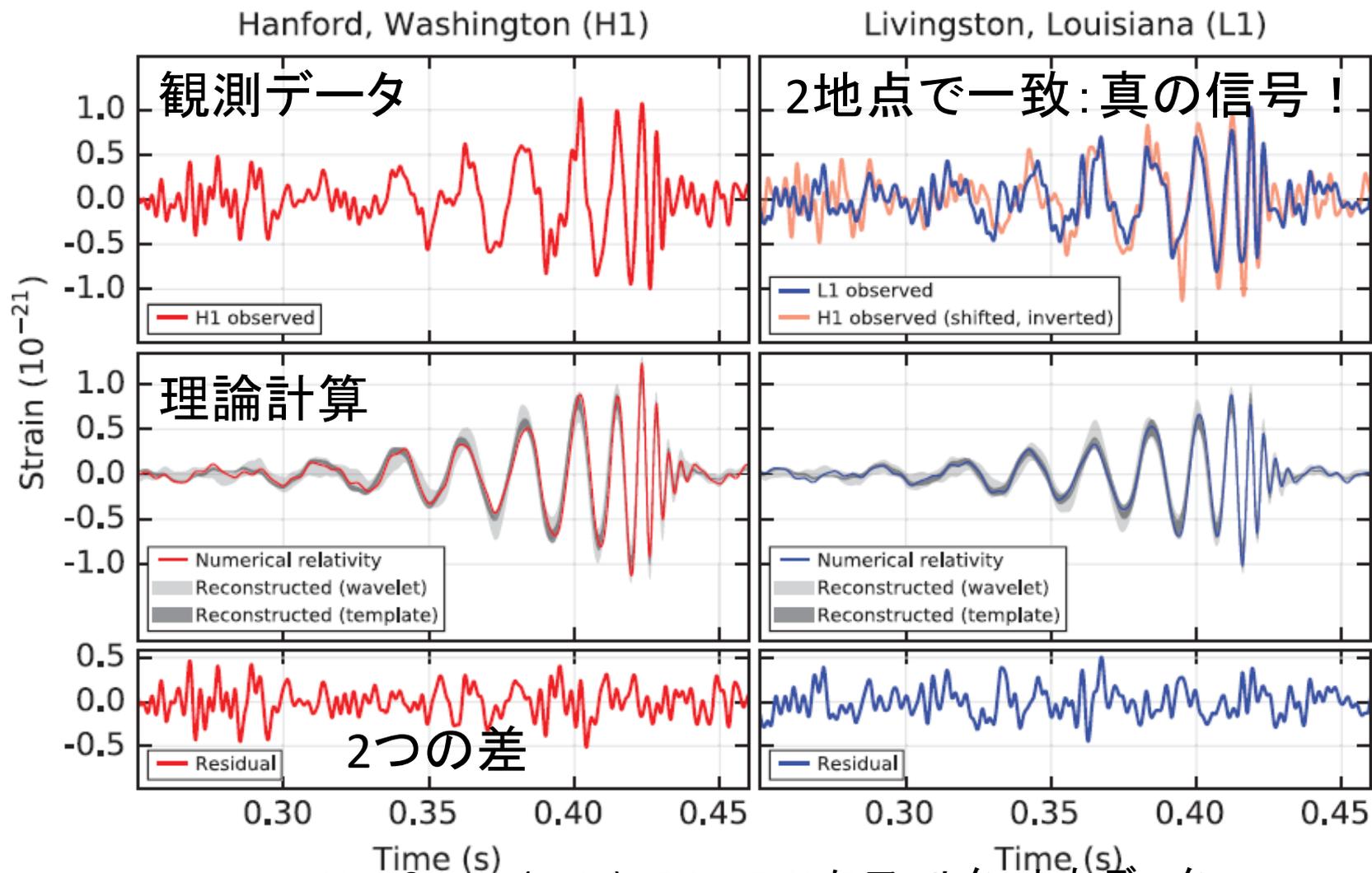
1. 連星ブラックホール
2. 連星中性子星
3. 地上重力波望遠鏡の将来展望
4. 宇宙重力波検出の将来展望
5. まとめ

1. 連星ブラックホール

重力波検出器ネットワーク



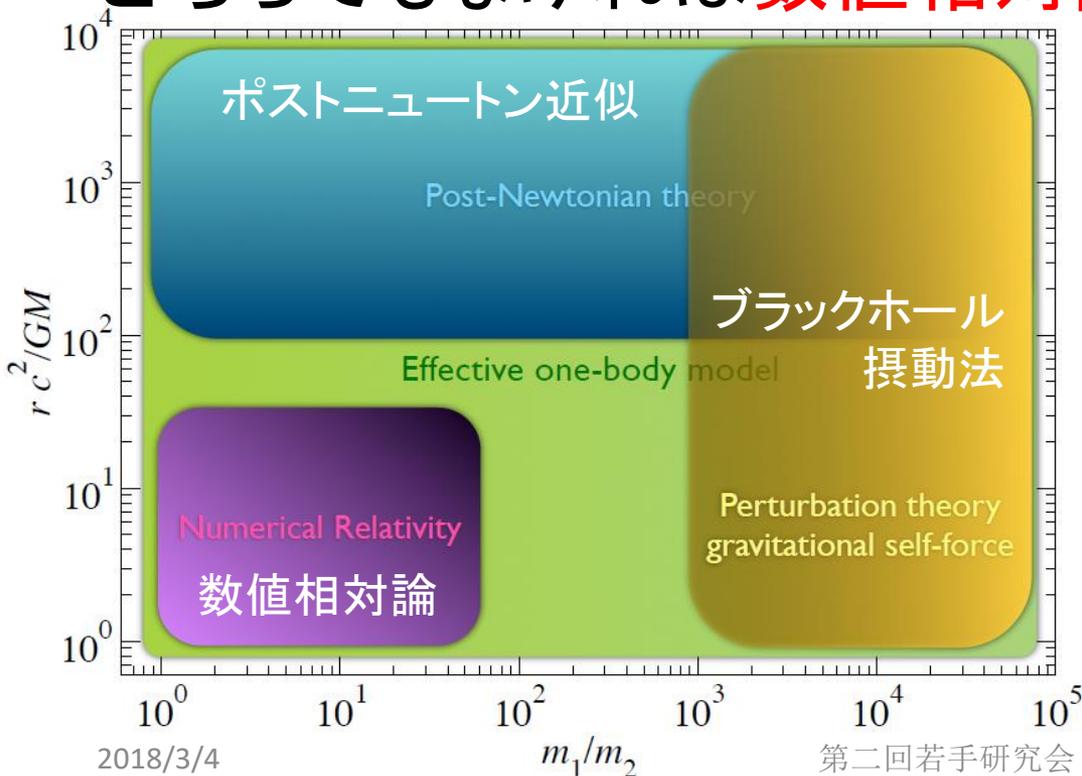
GW150914



LIGO&Virgo (2016) 35Hz-350Hzにフィルターしたデータ

一般相対論での二体問題

連星が遠い場合はpost-Newton近似で解ける
巨大BH + 軽い天体ならブラックホール摂動法
どちらでもなければ数値相対論



effective one bodyが
PN近似 + BH摂動の
(NRを使うことも)
統合を試みている

Buonanno-Sathyaprakash (2014)

重力波でわかること

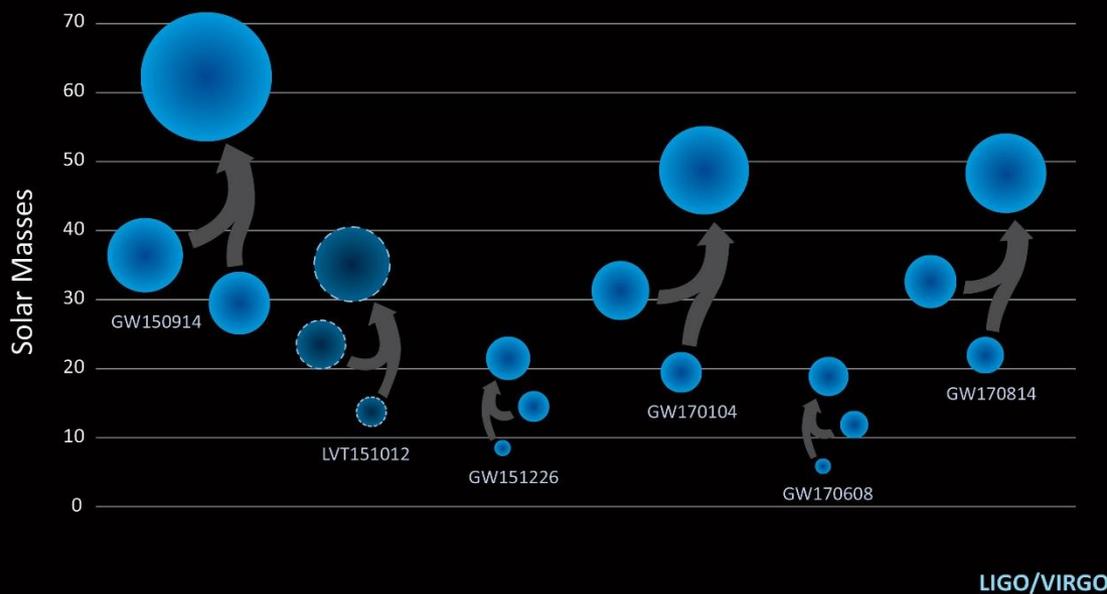
- **連星のそれぞれの質量**が測れる
 - 400Mpc先にも関わらず(天の川銀河は10kpc)
- **光度距離**が直接測れる

Primary black hole mass	$36^{+5}_{-4} M_{\odot}$
Secondary black hole mass	$29^{+4}_{-4} M_{\odot}$
Final black hole mass	$62^{+4}_{-4} M_{\odot}$
Final black hole spin	$0.67^{+0.05}_{-0.07}$
Luminosity distance	$410^{+160}_{-180} \text{ Mpc}$
Source redshift z	光度距離から宇宙論を仮定して(Planck) 求めており、特に有意義ではない $0.09^{+0.03}_{-0.04}$

連星ブラックホールの質量

重い連星ブラックホールは結構たくさんあるらしい
数としては軽いものが多いそう(検出率は $\propto M^{2.5}$)

Black Holes of Known Mass



低金属のpop I/II

単独の連星

力学的形成

pop III(初代星)

原始ブラックホール

<https://3c1703fe8d.site.internapcdn.net/newman/gfx/news/hires/2017/3-ligoandvirgo.jpg>

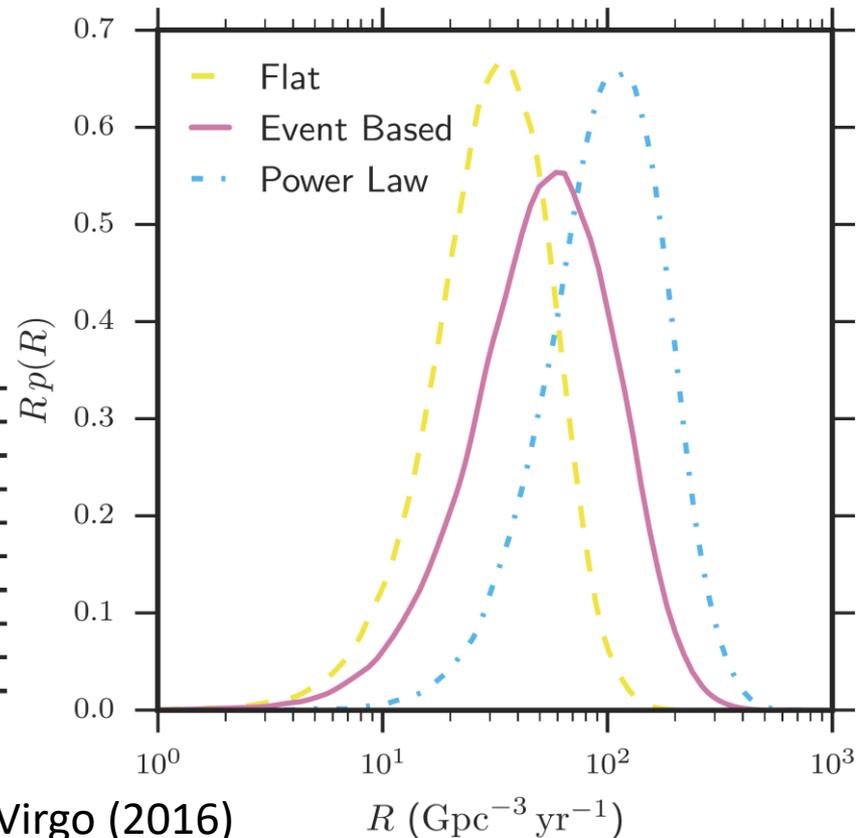
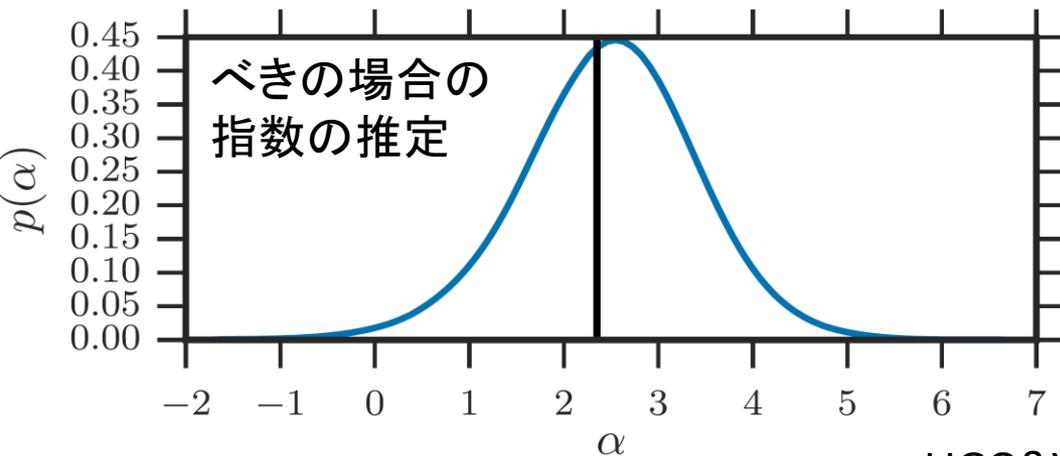
2018/3/4

第二回若手研究会

質量分布

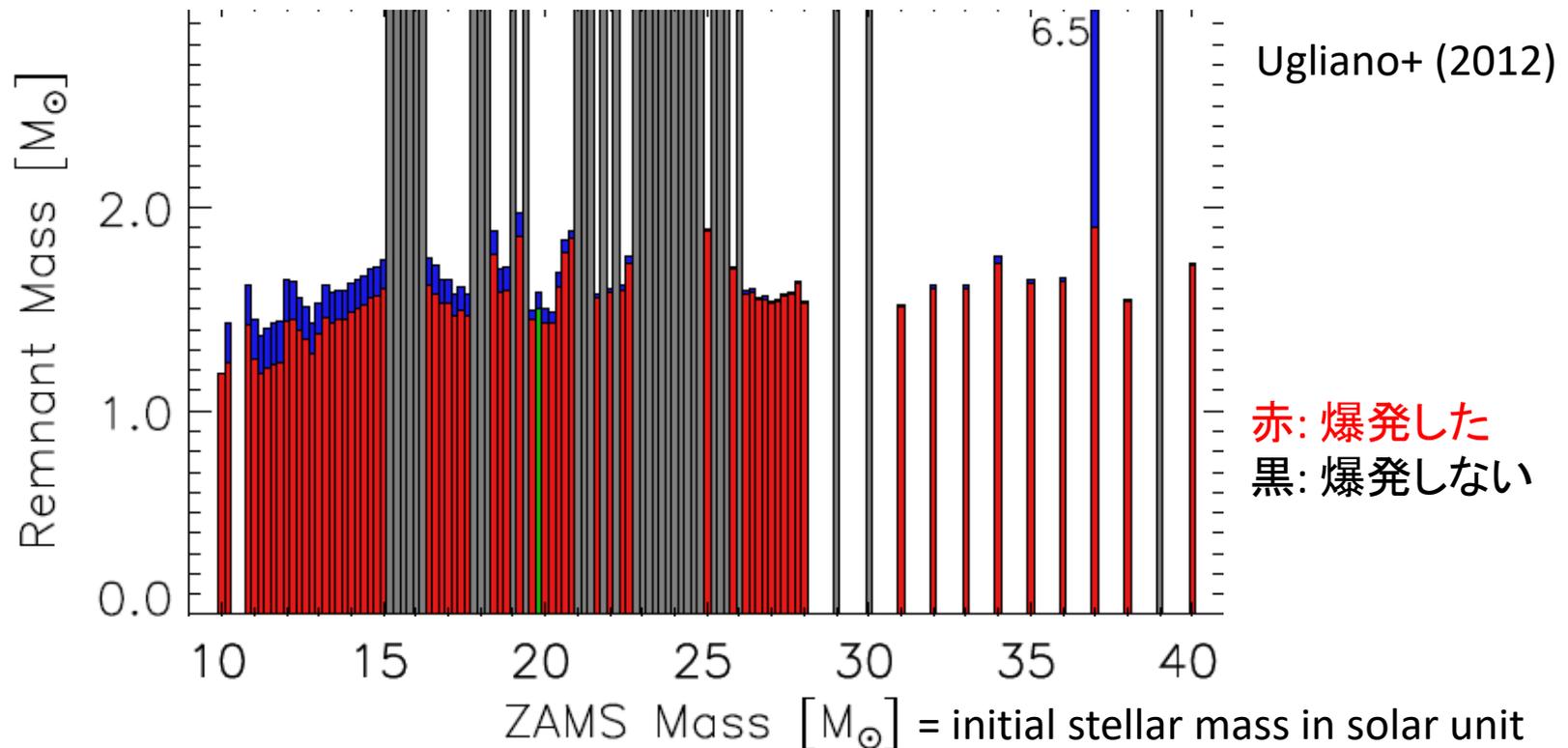
星の初期質量がべき乗に従うからといって、特にべき乗になる理由はない、多成分的にもなりうる

合体レートの見積もりは分布の仮定に依存する



超新星爆発とブラックホール形成

初期質量が重い星ならブラックホールになるという話ですらない(金属量にも依存する)



重力波による距離測定

観測される重力波波形は大雑把には

$$h(t) = F(\theta, \varphi, \iota, \psi) \frac{\mathcal{M}^{5/3} f^{2/3}}{D} \cos[\Phi(t)]$$

$$\Phi(t) \simeq 2\pi(ft + \dot{f}t^2/2 + \dots)$$

$$\dot{f} = (96/5)\pi^{8/3} \mathcal{M}^{5/3} f^{11/3}$$

- 位相を見ると質量など系の物理量がわかる
- 振幅を予言できるので、距離 D が決まる
ただし方角・連星の向きと相関する: F

問題：赤方偏移との縮退

赤方偏移 z からの信号は $f/(1+z)$ に伸びる

一般相対論にはスケールがないので

$$t \rightarrow t(1+z), \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{M}(1+z), D \rightarrow D(1+z)$$

と変換すれば振幅・位相とも不変になってしまう

重くて遠い連星＝近くて軽い連星

- 光度距離は読み取ることができる
- 赤方偏移は原理的にわからない
- ただし中性子星を含む連星では縮退を解きうる

母銀河からの赤方偏移決定

赤方偏移は電磁波観測で母銀河から抜き出す
どうやって母銀河を当てるかが問題 [Schutz 1986]

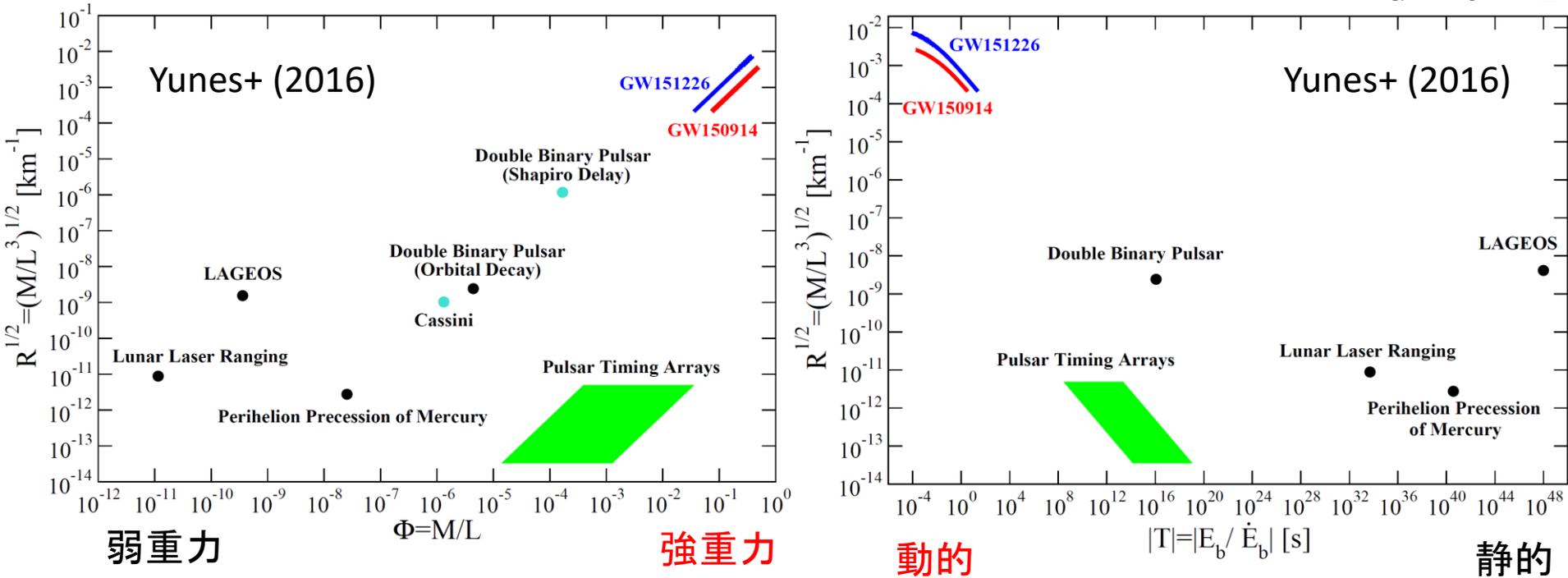
- 電磁波対応天体を見て位置を絞る
中性子星を含む連星ならSGRBやキロノヴァがある
恒星質量ブラックホール同士の場合は...
- 重力波観測で位置決定精度を出す
宇宙検出器だとそれなりに可能かもしれない

一般相対論のテスト

重力波は動的な強重力場を探るプローブ

曲率半径が小さい(量子論へ)

$G = c = 1$



曲率半径が大きい(古典論)

テストの概略

ポストニュートン(PN)補正を計算する

$$\frac{df}{dt} = \left(\frac{df}{dt} \right)_{\text{quadrupole}} [1 + a_2 v^2 + a_3 v^3 + \dots]$$

連星では以下のどれかが展開パラメータになる

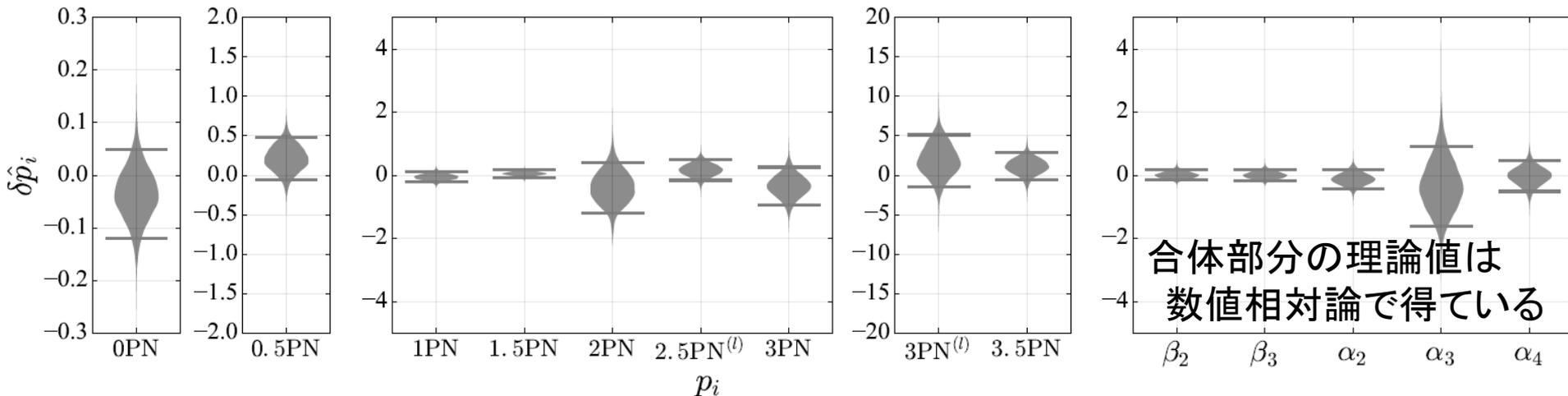
$$x = \left(\frac{v}{c} \right)^2 \equiv \left(\frac{G\pi f M}{c^3} \right)^{2/3}$$

Leadingに対して v^{2n} あるいは $f^{2n/3}$ の項が n 次の
ポストニュートン項と呼ばれる

ポストニュートン係数への制限

GW 150914, 151226, 170104を合わせた結果

- 全ての係数は一般相対論と無矛盾
- 今後もイベントが増えればより制限が厳しくなる



注: 0PN項 = 四重極放射は長く見ている連星パルサーでもっと厳しく制限されている

修正重力は制限できるのか

重力波の**生成**機構という意味では制限は強くない
(~1秒の一発芸だからだと理解している)

連星ブラックホールの合体の計算ができておらず
強重力場の重力波が存在しないことも大きな理由

Theoretical Mechanism	GR Pillar	PN	$ \beta $		Repr. Parameters	Example Theory Constraints		
			GW150914	GW151226		GW150914	GW151226	Current Bounds
Scalar Field Activation	SEP	-1	1.6×10^{-4}	4.4×10^{-5}	$\sqrt{ \alpha_{EdGB} }$ [km] $ \dot{\phi} $ [1/sec]	—	—	10^7 [56], 2 [57–59] 10^{-6} [60]
Scalar Field Activation	SEP, PI	+2	1.3×10^1	4.1	$\sqrt{ \alpha_{dCS} }$ [km]	—	—	10^8 [61, 62]
Vector Field Activation	SEP, LI	0	7.2×10^{-3}	3.4×10^{-3}	(c_+, c_-) $(\beta_{KG}, \lambda_{KG})$	(0.9, 2.1) (0.42, —)	(0.8, 1.1) (0.40, —)	(0.03, 0.003) [63, 64] (0.005, 0.1) [63, 64]
Extra Dimensions	4D	-4	9.1×10^{-9}	9.1×10^{-11}	ℓ [μm]	5.4×10^{10}	2.0×10^9	10 – 10^3 [65–69]
Time-Varying G	SEP	-4	9.1×10^{-9}	9.1×10^{-11}	$ \dot{G} $ [$10^{-12}/\text{yr}$]	5.4×10^{18}	1.7×10^{17}	0.1–1 [70–74]

Yunes+ (2016)

重力子のCompton波長・質量

質量があると分散関係が変わり、光よりも遅れる

$$\frac{v_g^2}{c^2} \simeq 1 - \frac{m_g^2 c^4}{E^2} = 1 - \frac{h^2 c^2}{\lambda_g^2 E^2}$$

重力波の位相は距離に比例して補正を受ける

Compton波長 $\lambda_g > 1.6 \times 10^{13}$ km

重力子の質量 $m_g < 7.7 \times 10^{-23}$ eV

- モデルによらない制限としては一番に近い

注: “重力子の質量”は理論的にはかなり非自明

連星ブラックホールの話のまとめ

ブラックホールの質量分布が理解されつつある(がスピンについては大した制限がついていない)

光度距離はわかるが赤方偏移がわからないのでHubbleパラメータなどを調べるのには使えない

一般相対論の破れはないが、修正重力がダメだと強く言える状況ではない...これは理論計算の問題

重力波の伝播が $\omega^2 = c_g^2 k^2$ 型であることは堅そう、ただし c_g が光速度である理由はこの時点ではない

2. 連星中性子星

連星中性子星の合体

- 重力波源
 - 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
 - 高温高密度の大質量中性子星・降着円盤形成
 - ショートガンマ線バーストの中心エンジン
 - 中性子過剰な物質の放出
 - r過程元素合成
 - 放射性崩壊によるキロノヴァ/マクロノヴァ
- これら全ては今や行われた/進行中のサイエンス

中性子星

大質量星の死骸として
超新星爆発で生まれる
主に中性子でできた星

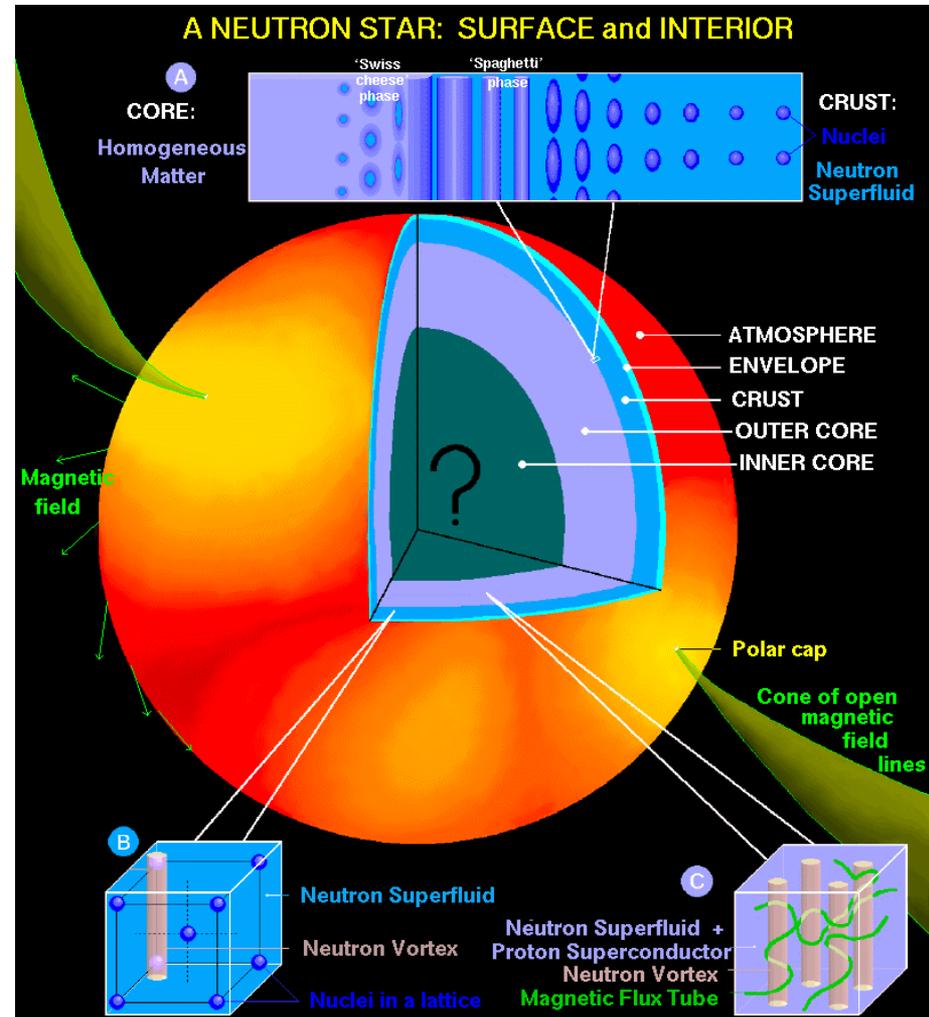
- 質量は太陽の~1.4倍

- 半径は10km程度

原子核の飽和密度以上

「巨大な原子核」

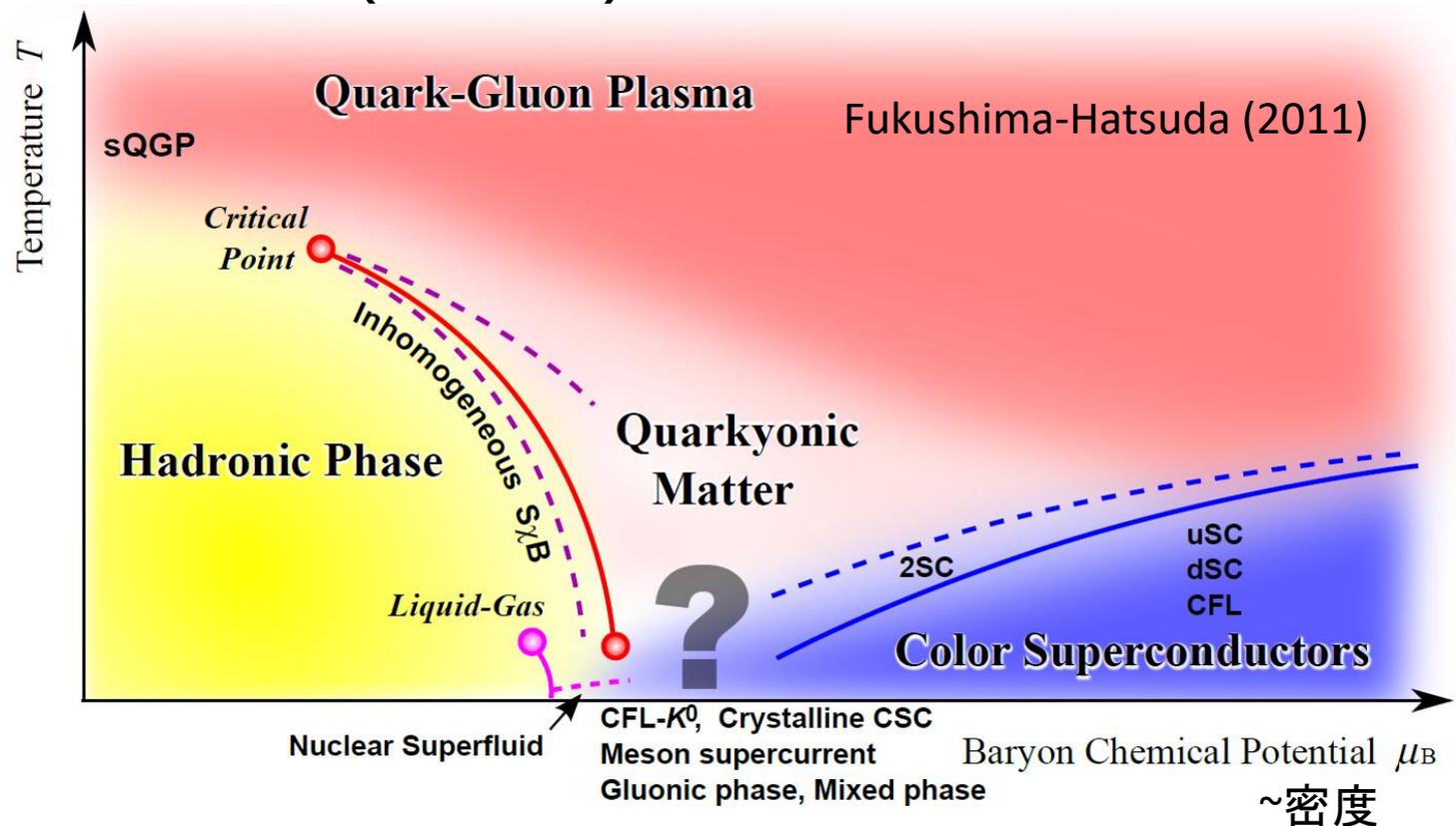
原子核物理の実験場



http://www.astroscu.unam.mx/neutrones/NS-Picture/NStar/NStar_l.gif

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



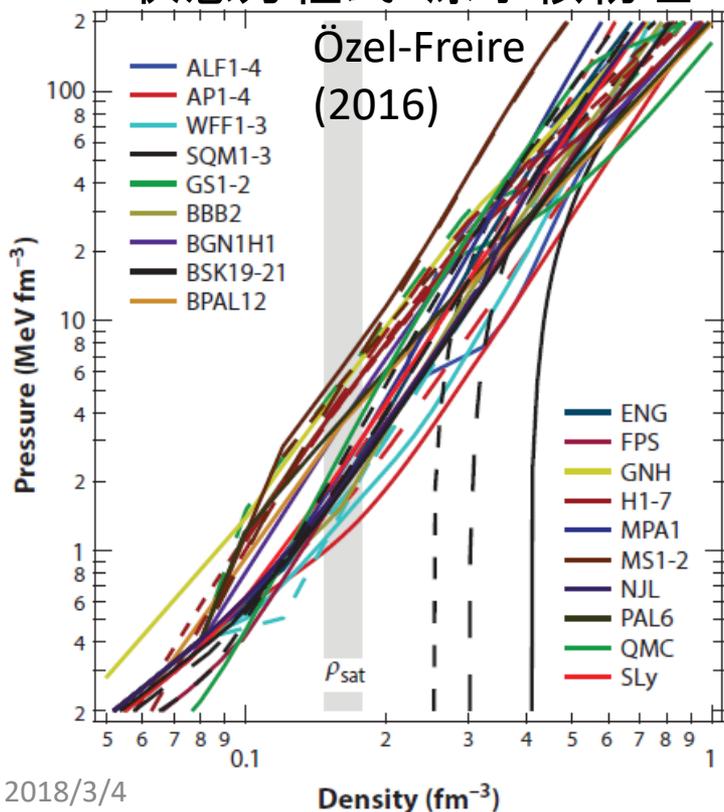
中性子星の状態方程式

注意: 状態方程式を知るために必要な量は半径に限られるわけではない

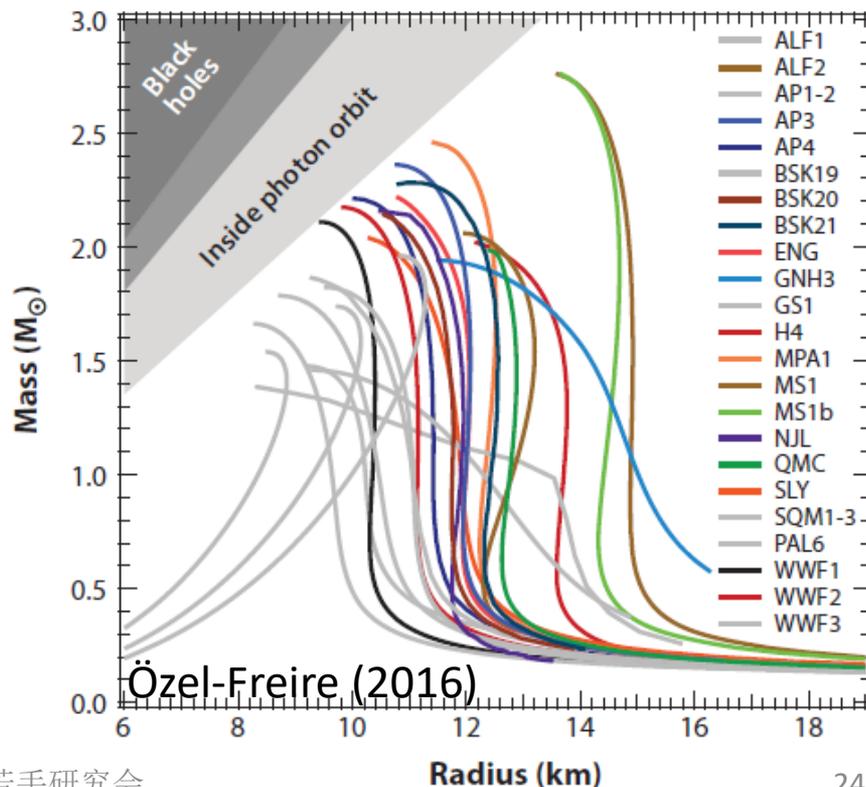
本当の状態方程式を知れば原子核物理がわかる

中性子星の質量・半径関係と一対一に対応する

状態方程式: 原子核物理

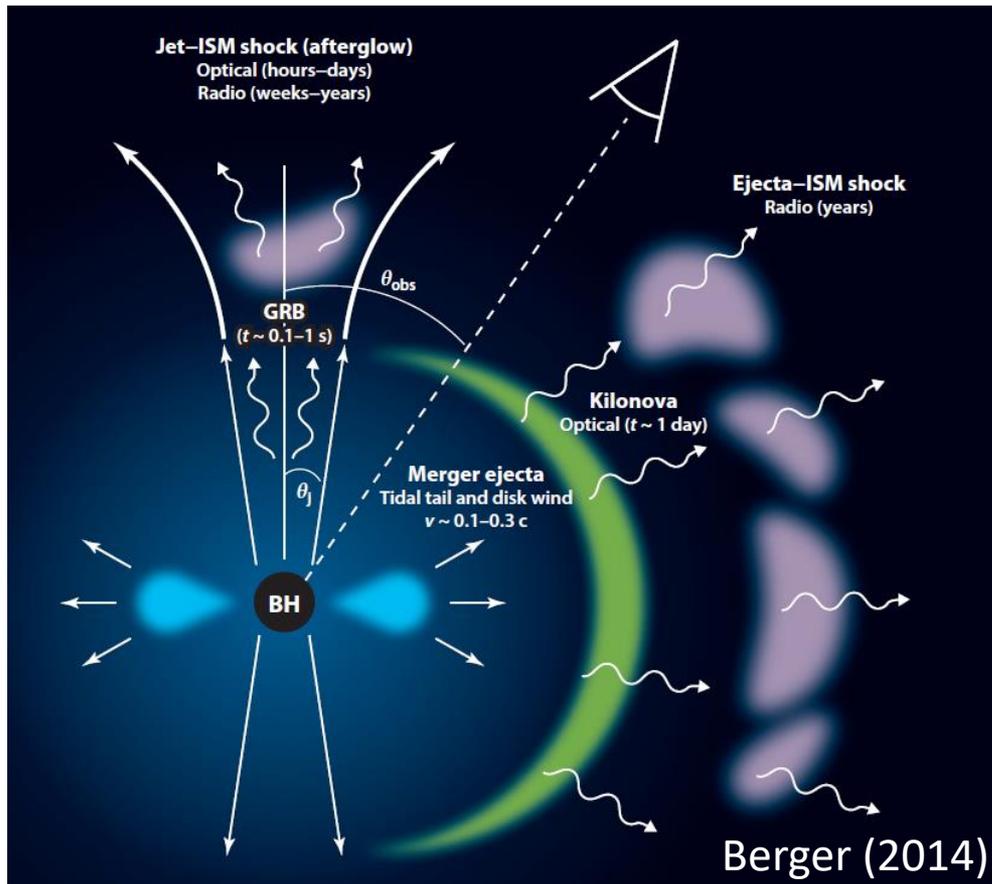


質量・半径関係: 宇宙物理



電磁波対応天体

連星中性子星合体には等方な電磁波放射が伴う



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

数値相対論

連星の合体段階ではほぼ唯一の定量的手法

Einstein方程式

$$G_{ab} = (8\pi G/c^4)T_{ab}$$

流体の方程式

$$\nabla_a(\rho u^a) = 0, \quad \nabla_b T^{ab} = 0$$

+状態方程式 $P = P(\rho, T, Y_e)$

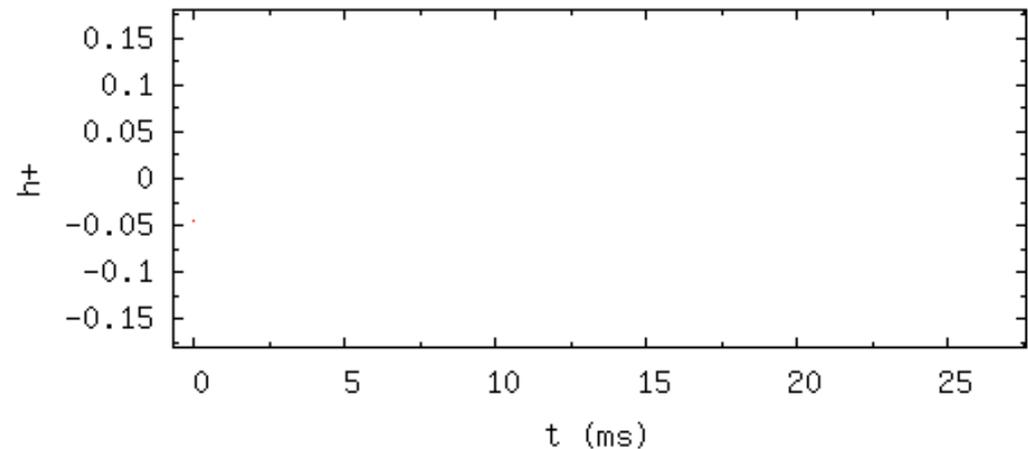
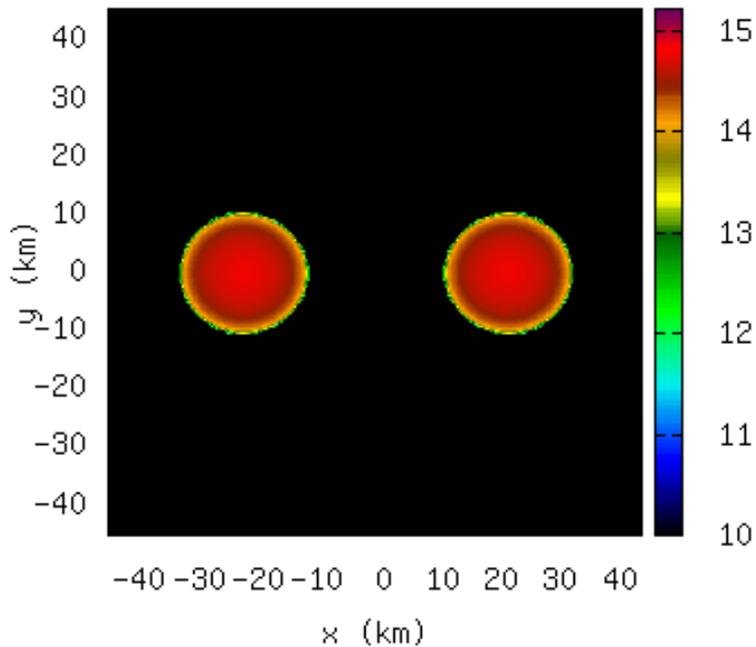
これらを計算機上で数値的に解く

他にもMaxwell方程式、ニュートリノ輸送...

連星中性子星の合体

合体した後には重い中性子星が残り高速回転
重力波を放射し、ブラックホールへと崩壊する

t=0 ms

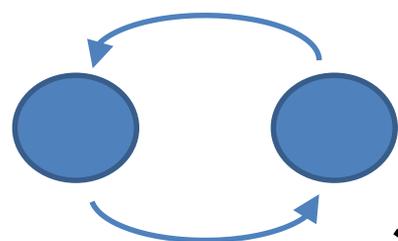


仏坂健太氏による(古い)アニメーション
From Hotokezaka, KK+ (2011)

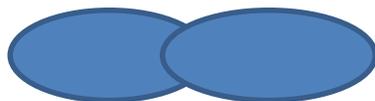
連星中性子星からの重力波

Early inspiral: 質量、スピン...

Postmerger: 高温高密度の物理？

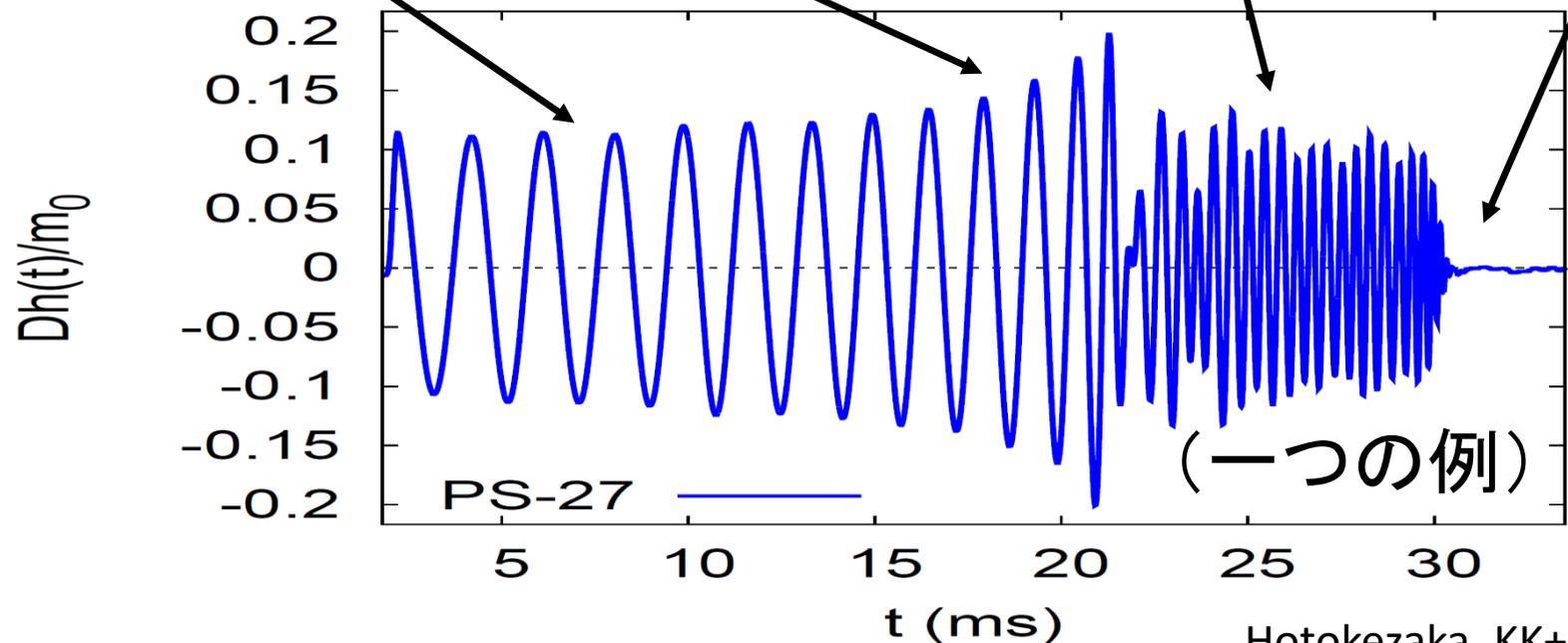
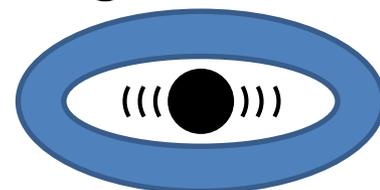


Late inspiral and merger:
潮汐変形、状態方程式



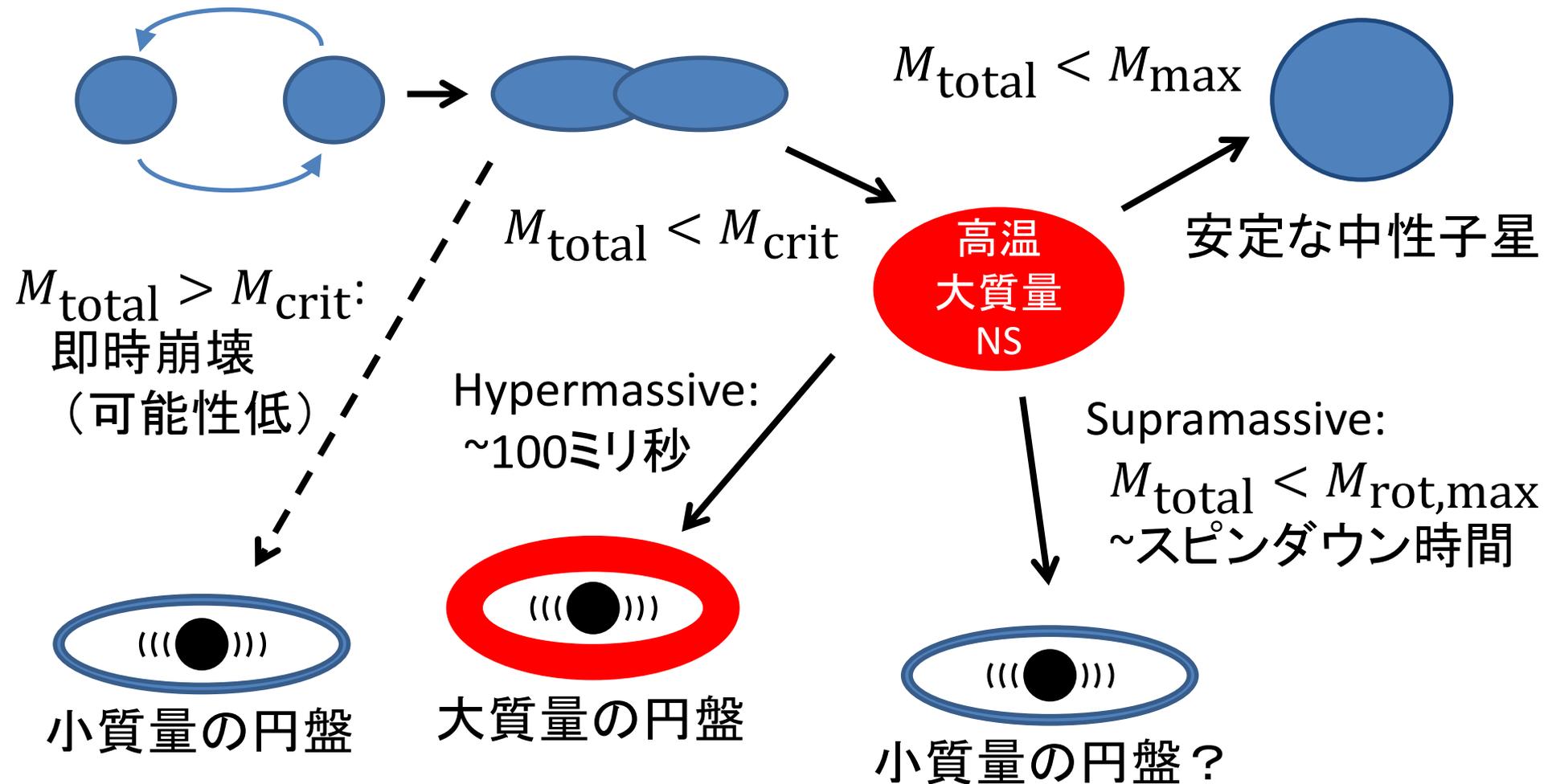
(H/S)
MNS

Ringdown: GR



Hotokezaka, KK+ (2011)

連星中性子星の辿る運命

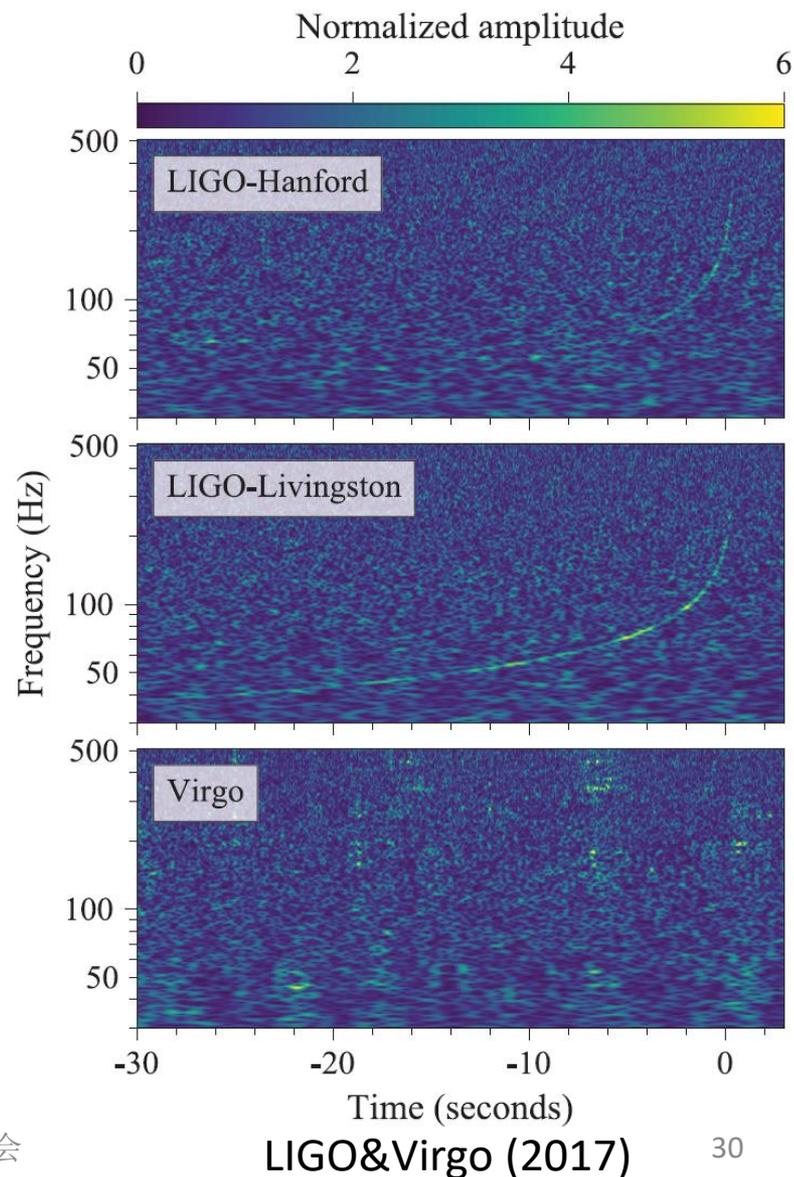


[See e.g., Hotokezaka+KK+ (2013)]

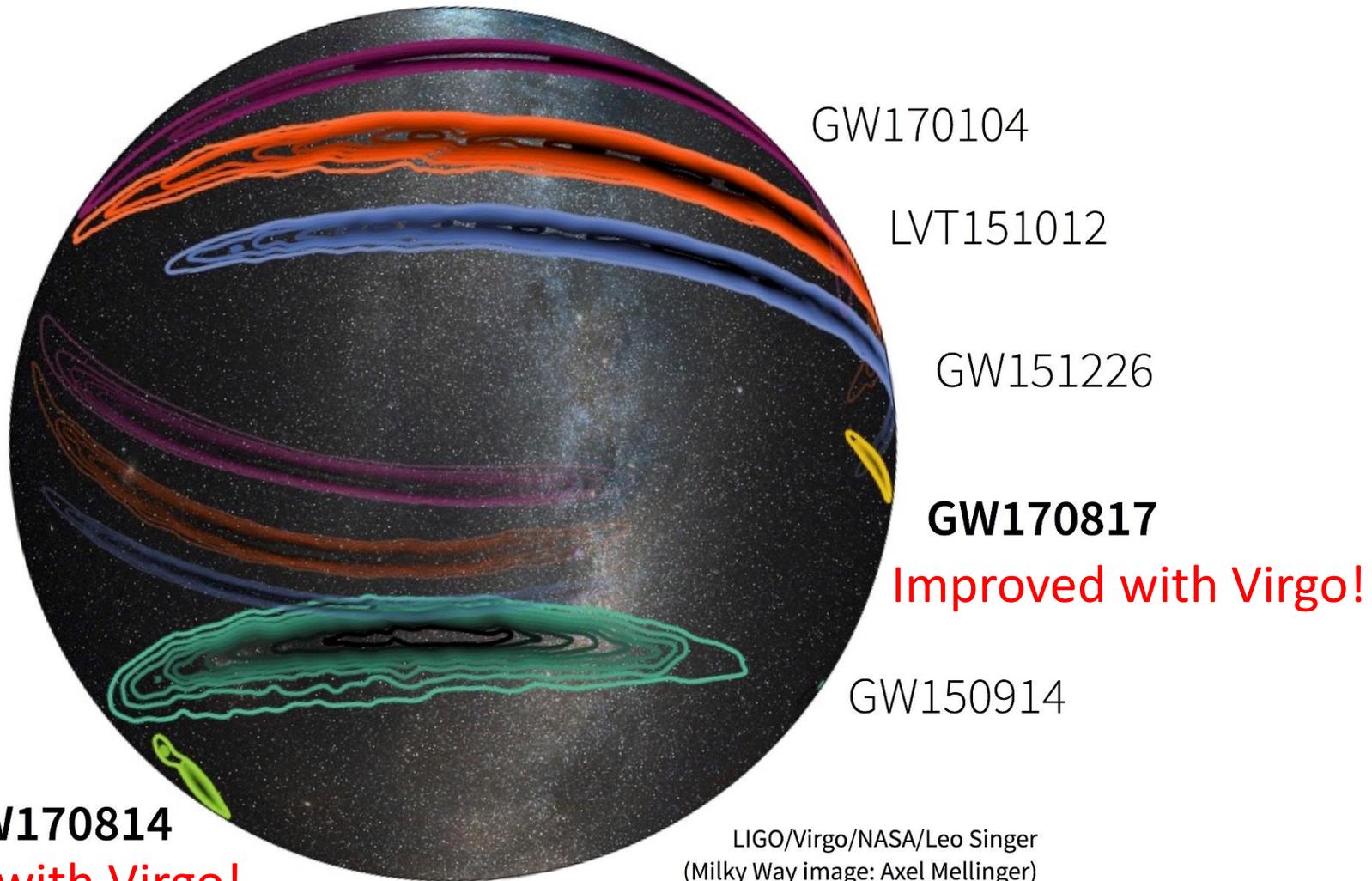
GW170817

LIGOはチャープ波形を観測
= 振動数・振幅が時間的に
単調に増大し、合体する
連星合体では普遍的な波形

Virgoでは見えなかった...
感度はそれなりにあった
-> この重力波は
Virgoの死角から来た！



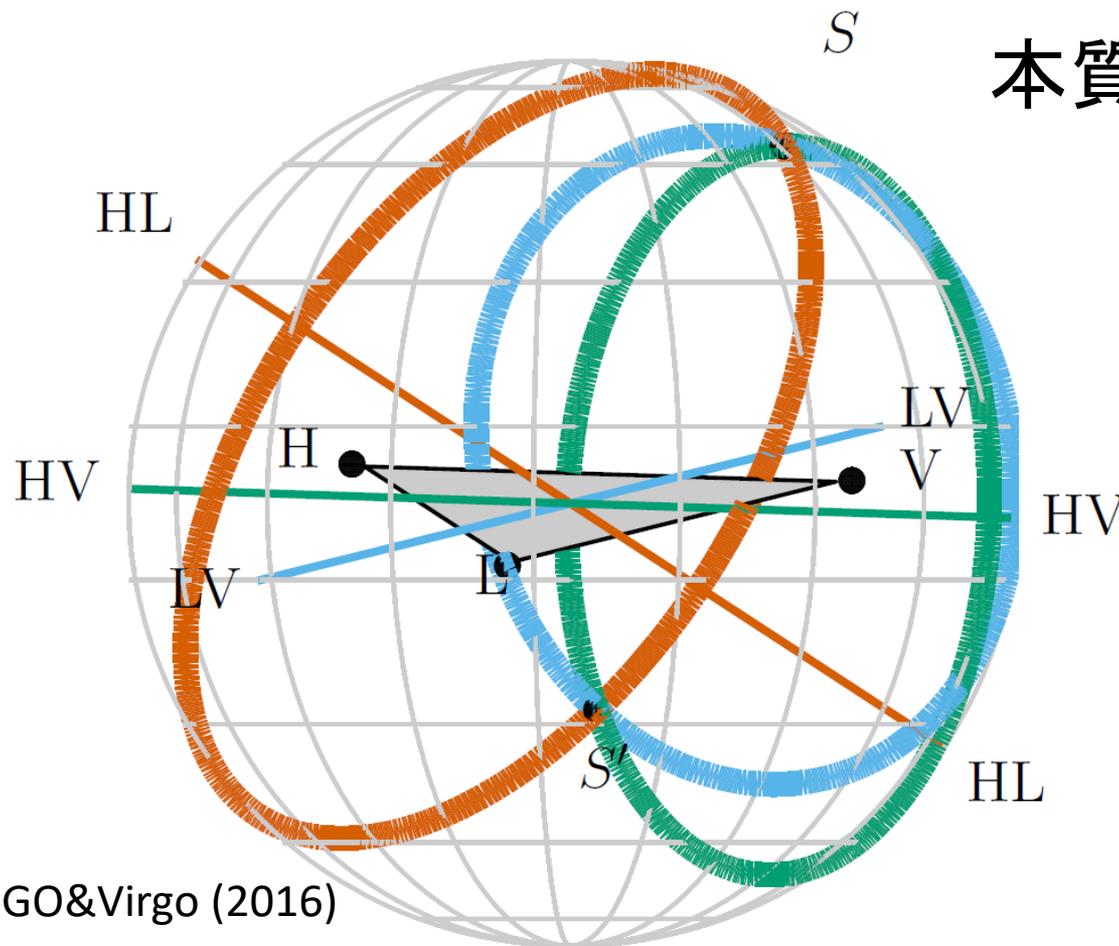
位置決定精度



<http://www.ligo.org/detections/GW170817/images-GW170817/O1-O2-skymaps-white.jpg>

重力波検出器での位置決定

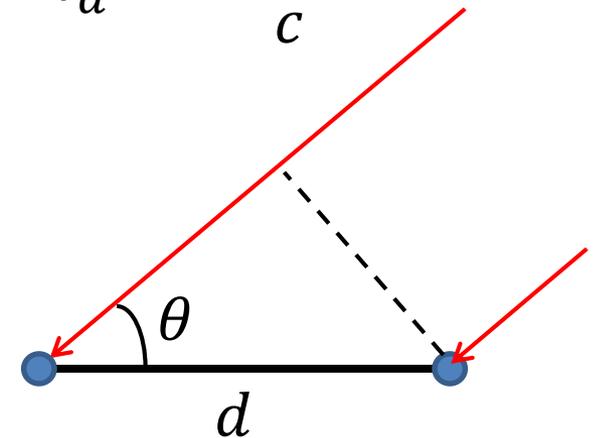
時間差を利用して天球上での位置を三角測量



本質的に複数台必要

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

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

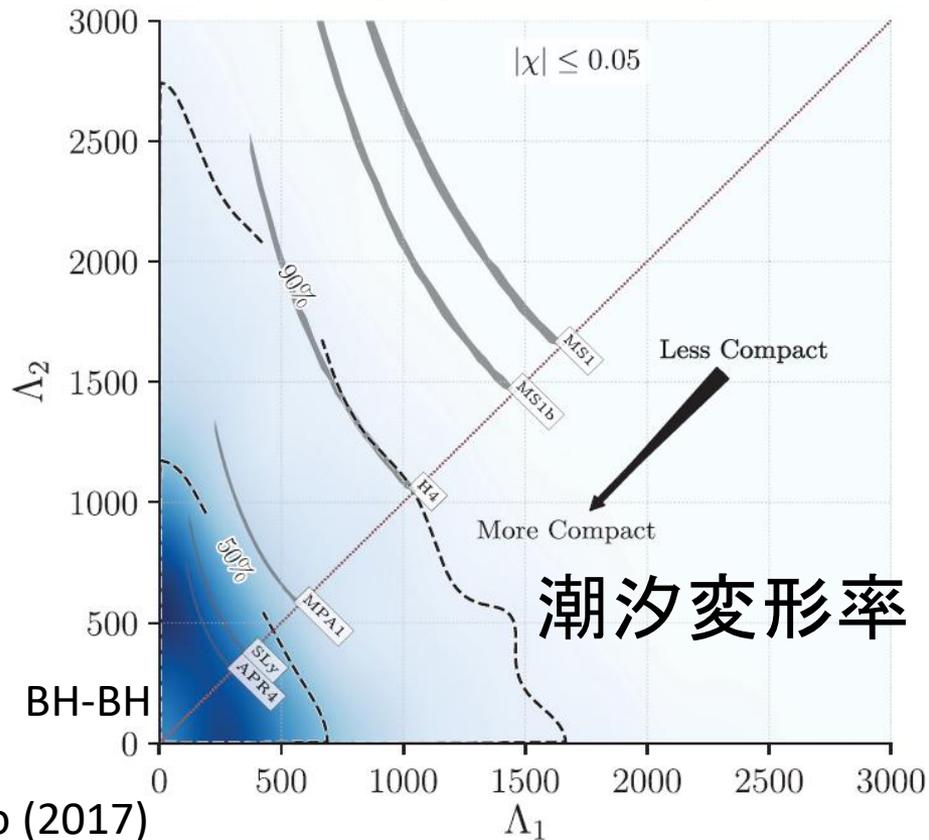
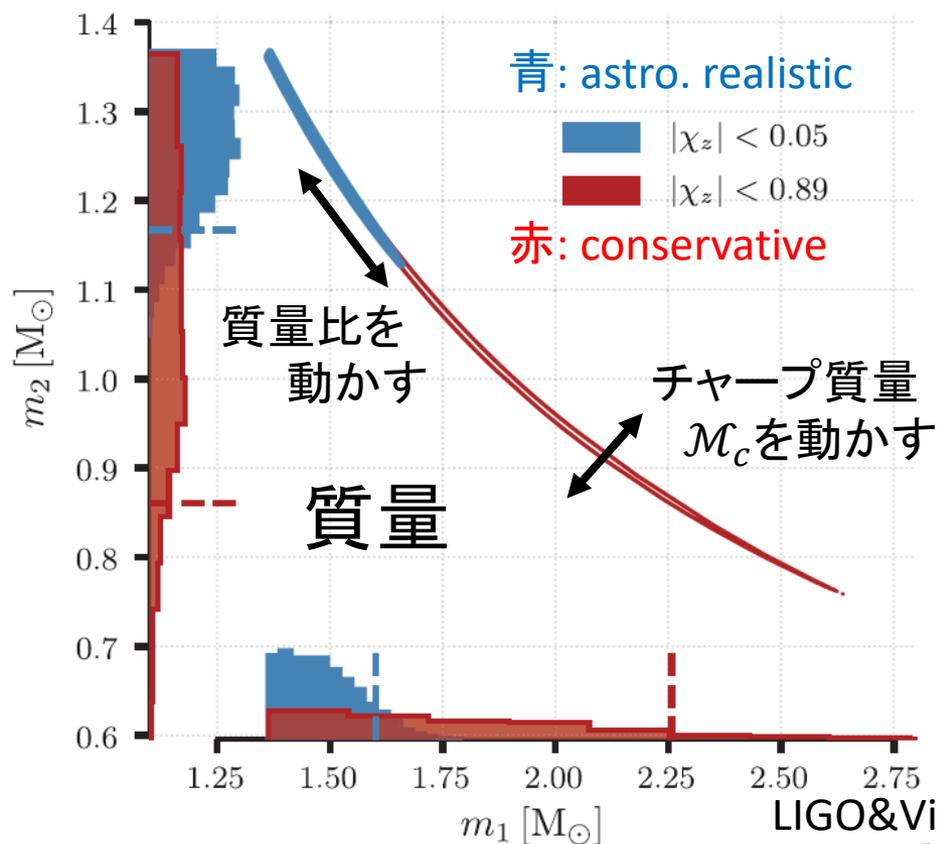


LIGO&Virgo (2016)

パラメータへの制限

中性子星の半径は~13-14kmよりは小さそう

- 高精度の波形を使えばもっと厳しく制限されそう



質量の制限に関する相関

重力波ではチャープ質量が最もよく制限される

$$\mathcal{M} = \frac{m_1^{3/5} m_2^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}} = \mu^{3/5} M^{2/5}$$

しかし質量比(例えば $q = m_2/m_1 < 1$)はスピンと縮退しやすい: 無次元スピンのよく使われる

$$\chi_i = \frac{cS_i}{Gm_i^2} \quad (i = 1, 2)$$

とりわけ連星中性子星のように等質量に近い系は q で見ると結構エラーが大きく見えてしまう

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



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

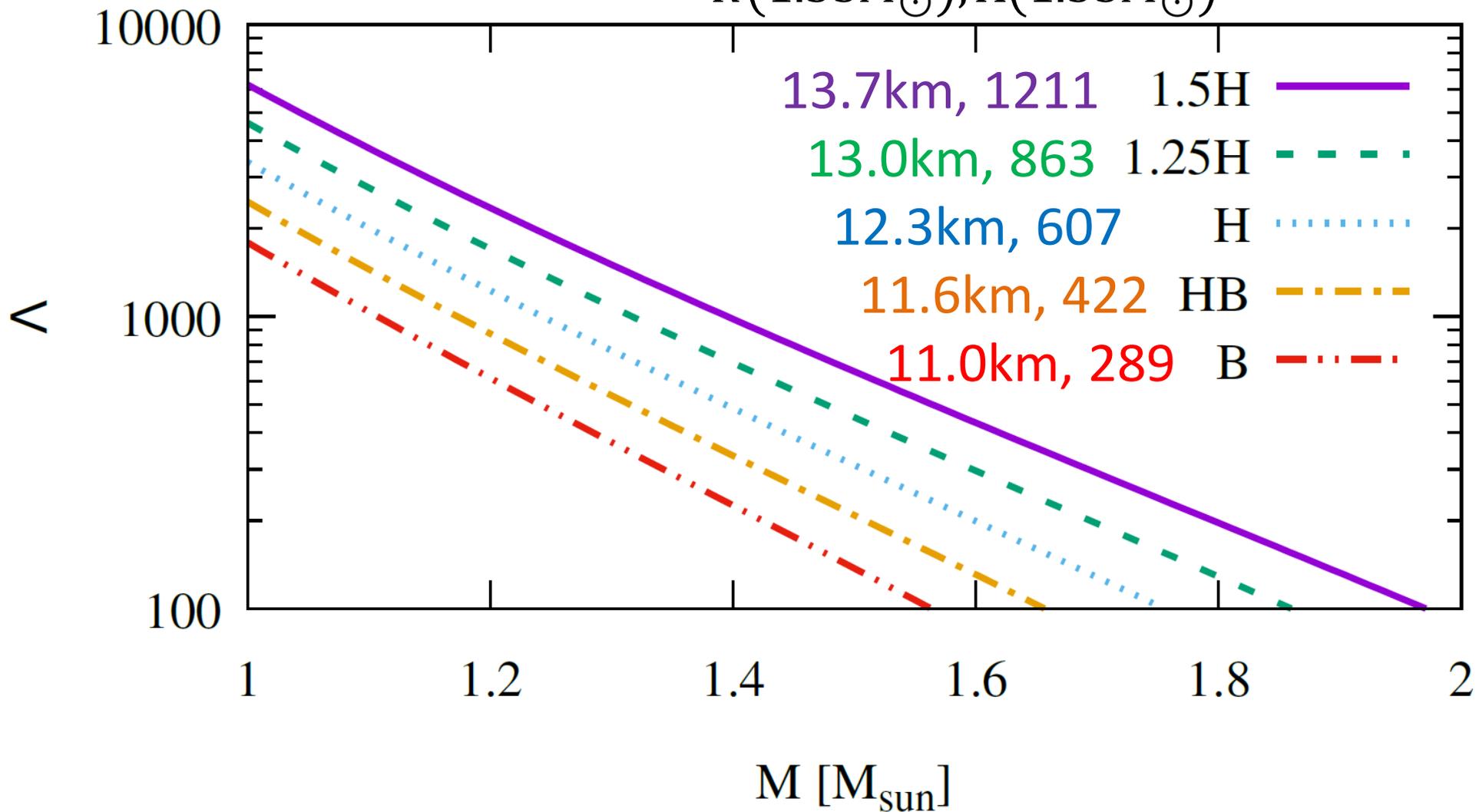


$$Q_{ij} \equiv \int \rho \left(x_i x_j - \frac{1}{3} x^2 \delta_{ij} \right) d^3 x$$

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

いくつかの状態方程式での例

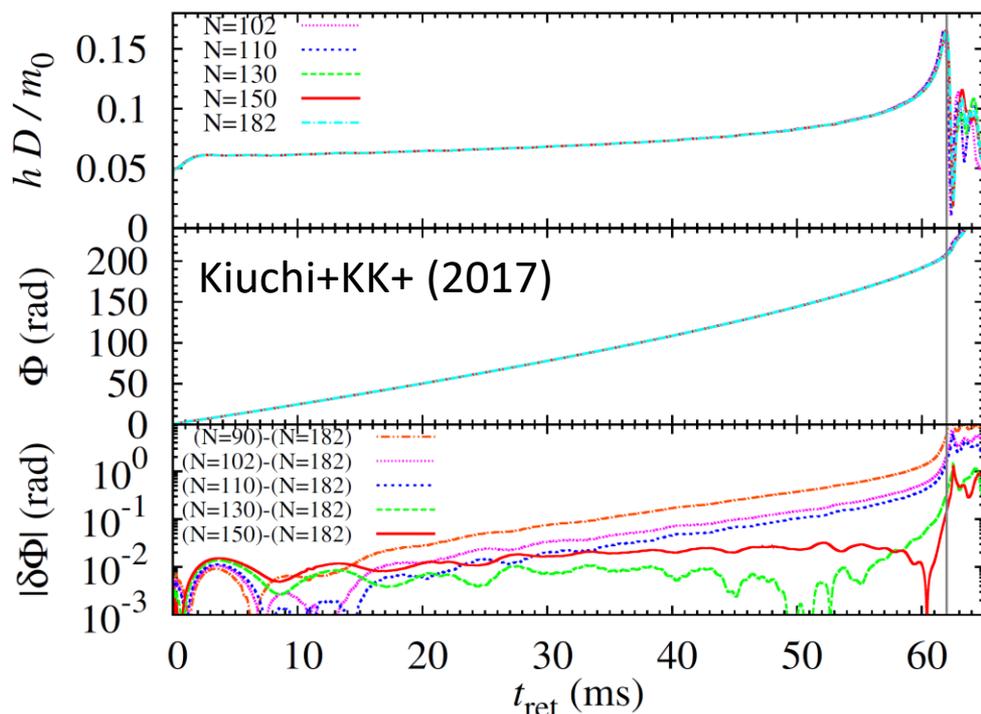
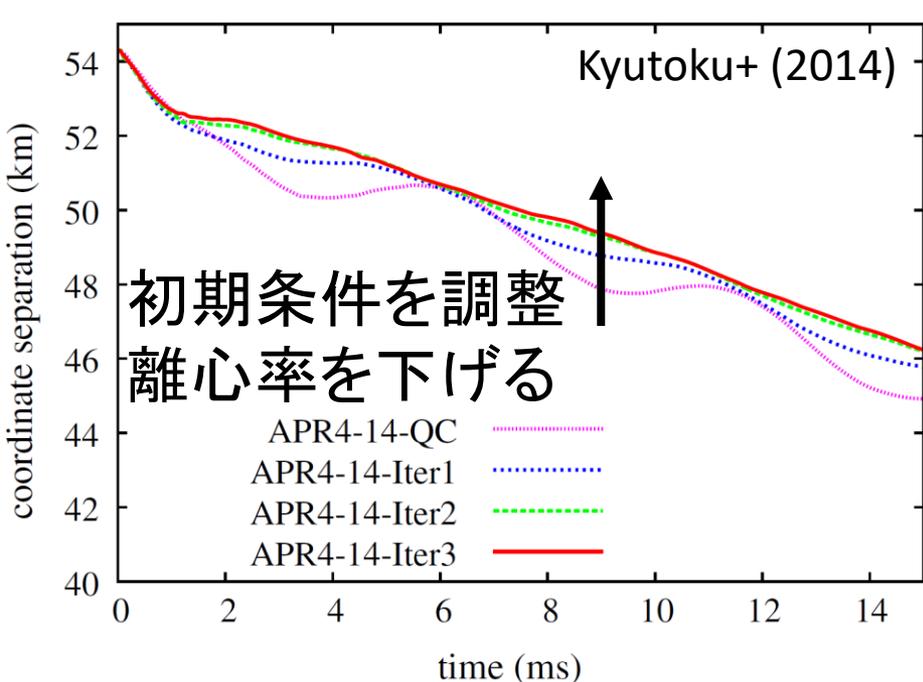
$R(1.35M_{\odot}), \Lambda(1.35M_{\odot})$



重力波波形の数値相対論計算

潮汐変形率を正しく読み取るには高精度の重力波、特に十分に離心率の低い連星の計算が必要

今は合体時まで $<1\text{rad}$ の誤差で重力波を計算可能

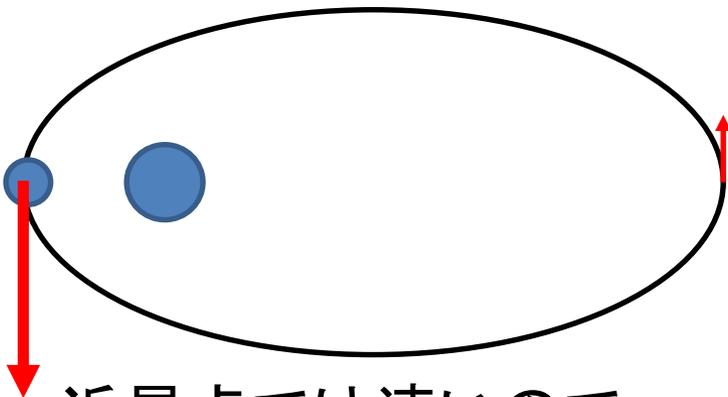


軌道離心率について

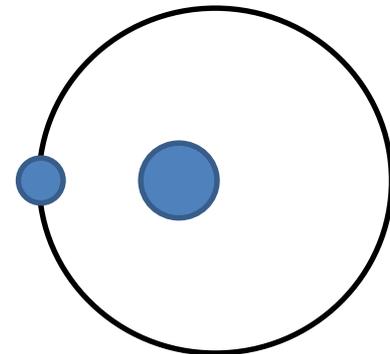
$e \propto f^{-19/18}$ でどんどん減衰していく(最大でも1)

高振動数の地上検出器ではほぼ検出不可能

遠星点では遅いので
重力波放射が弱い

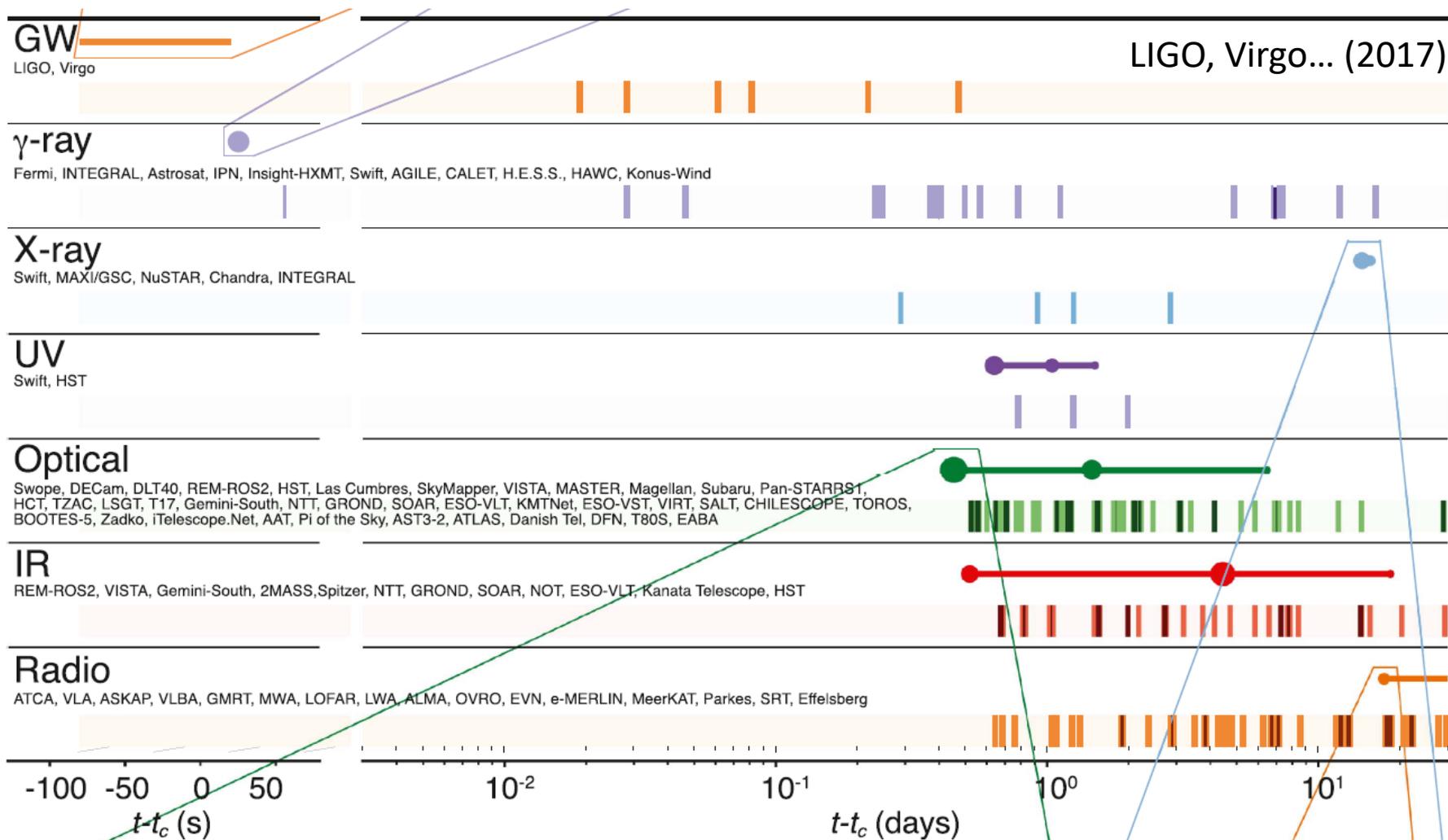


近星点では速いので
重力波を大量に放射
エネルギーを失う



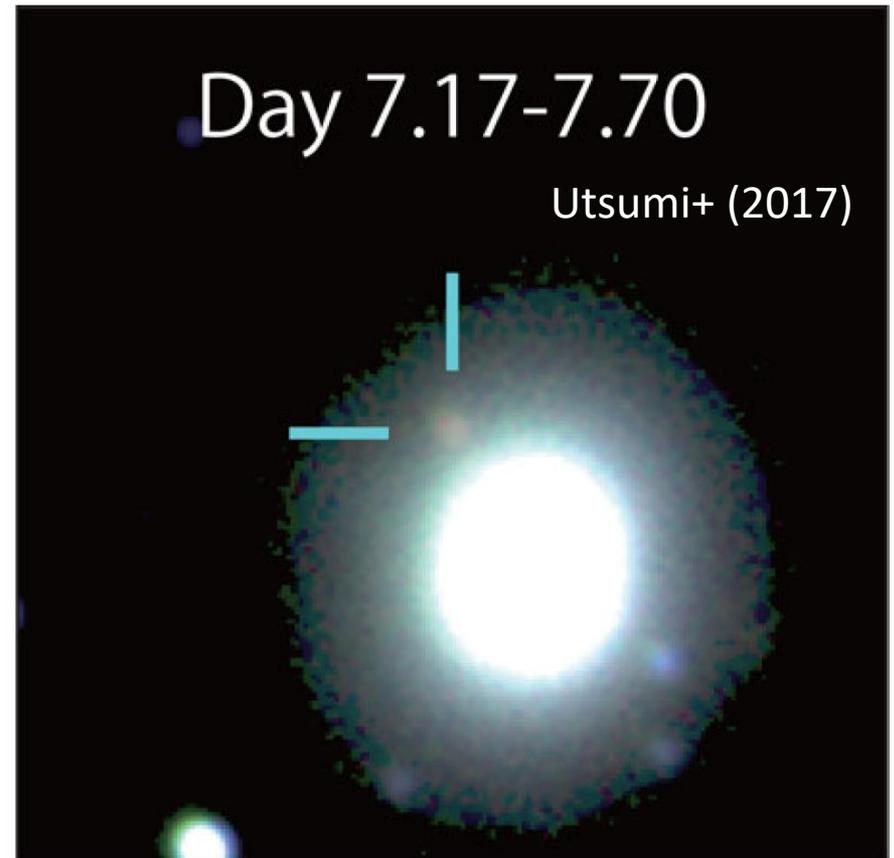
元の遠星点に戻れないので
円軌道に近づく=離心率減

電磁波追観測



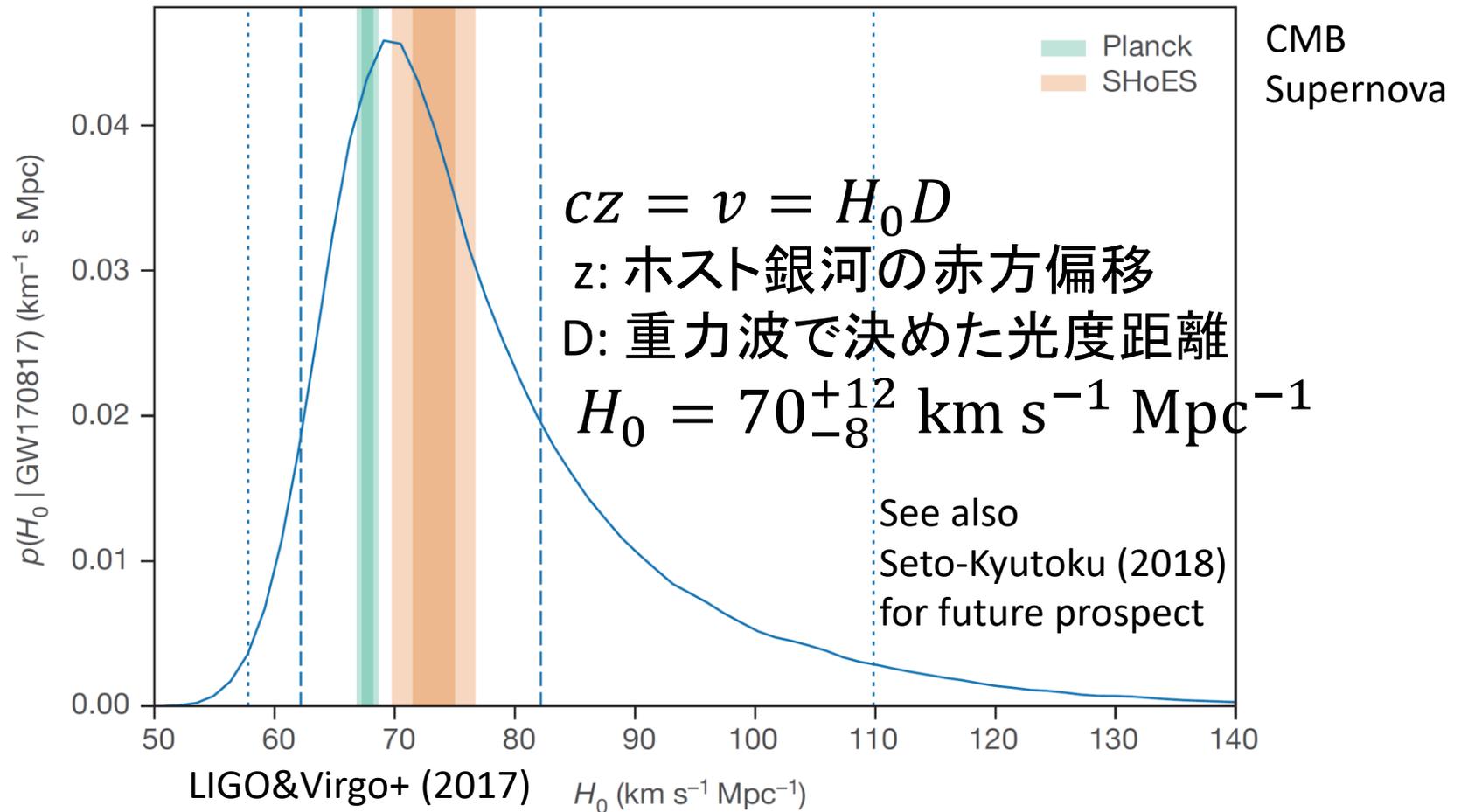
突発天体と母銀河

母銀河がわかると赤方偏移がわかる ($z \sim 0.01$)



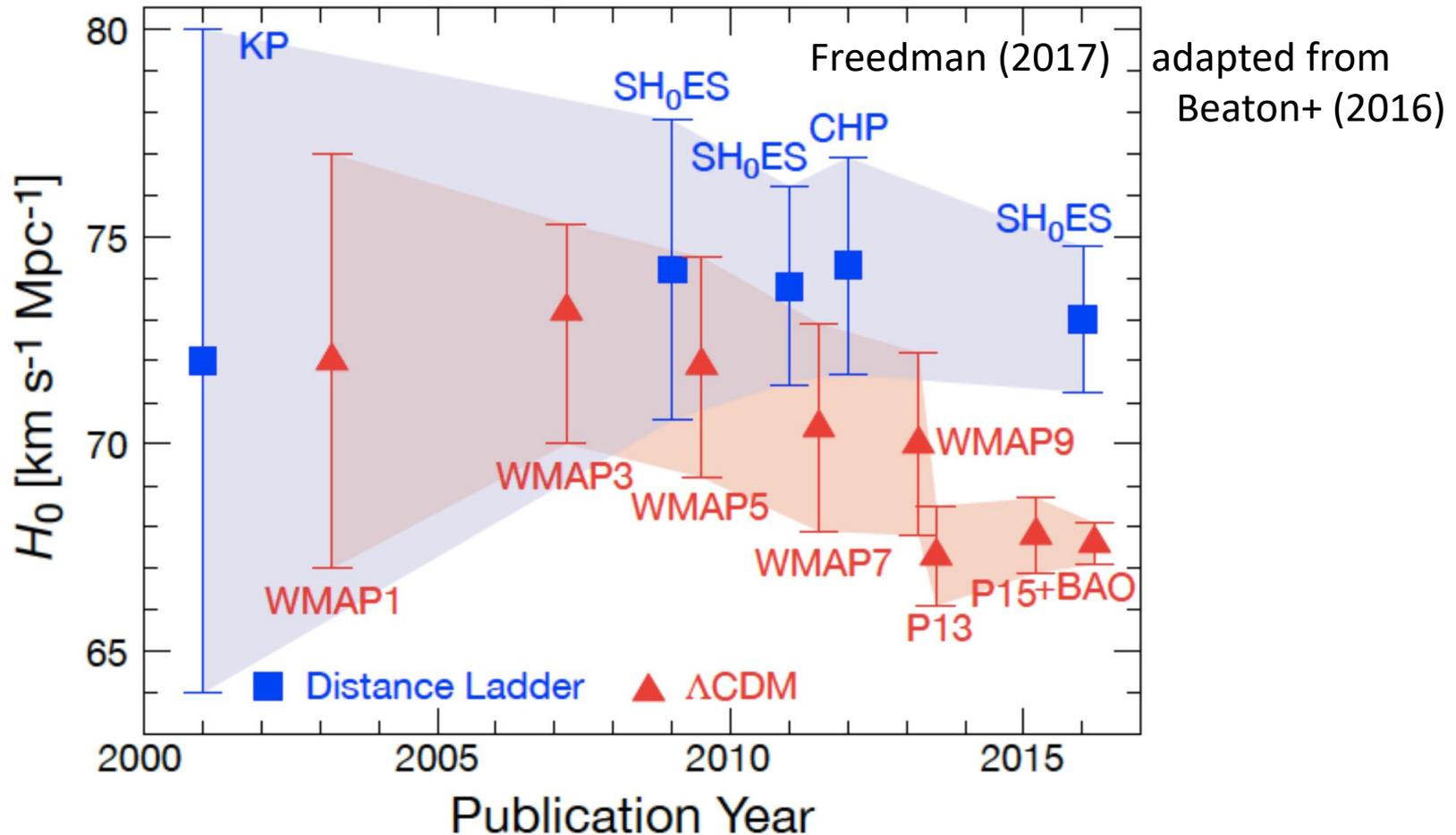
重力波宇宙論

Hubble定数が新たな手法で独立に決められた

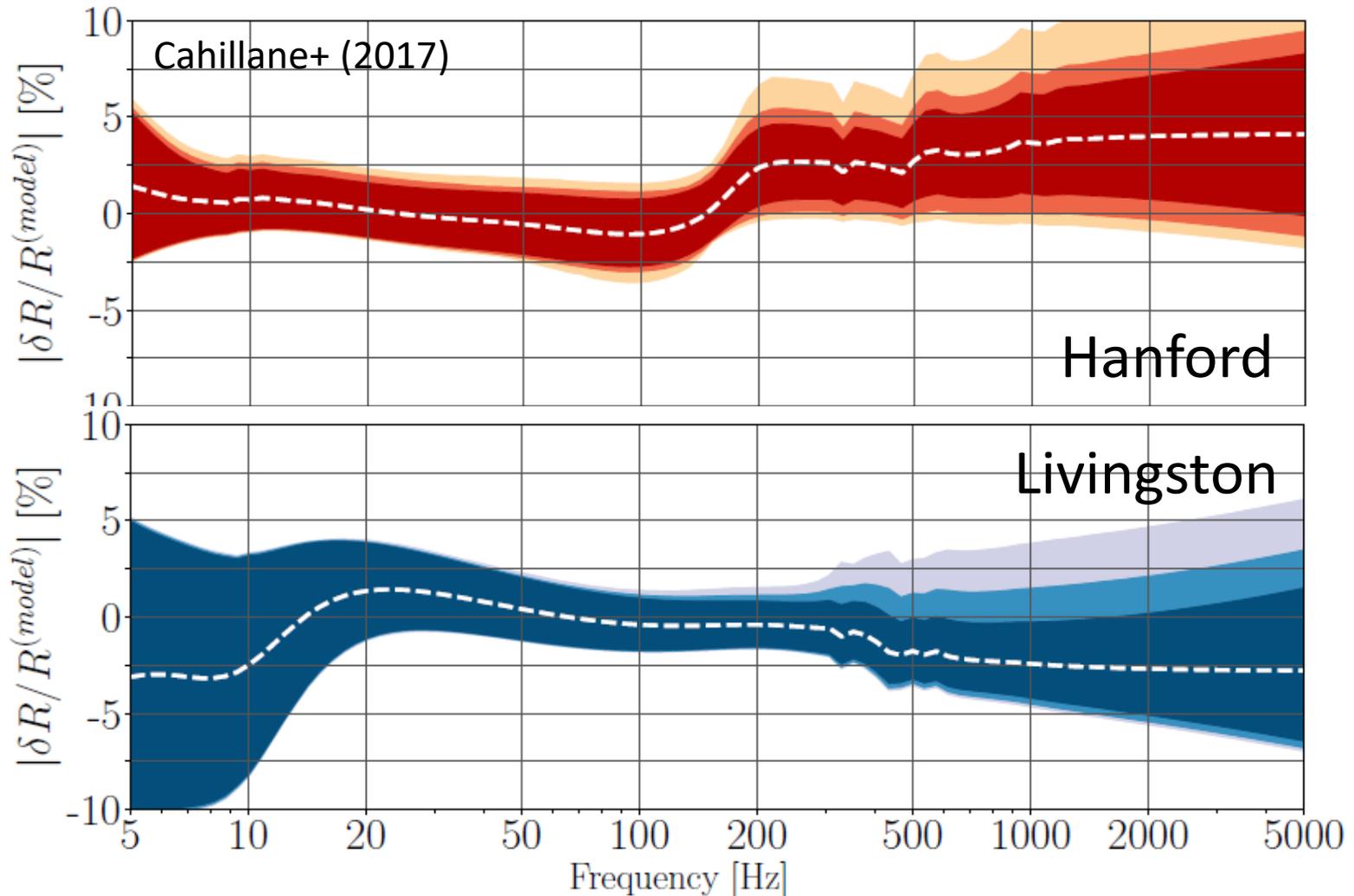


Hubble tension?

GW+EMでこの3.4シグマの差を独立に調べる



懸念：LIGOの振幅測定精度



r過程元素合成

<https://en.wikipedia.org/wiki/Gold#/media/File:Gold-crystals.jpg>

1/16"
2mm

金



鉄より重い元素の
約半分を作る過程
(他は主にs過程)

宇宙のどこで作られた？
人類・社会にも重要(かも)

プラチナ

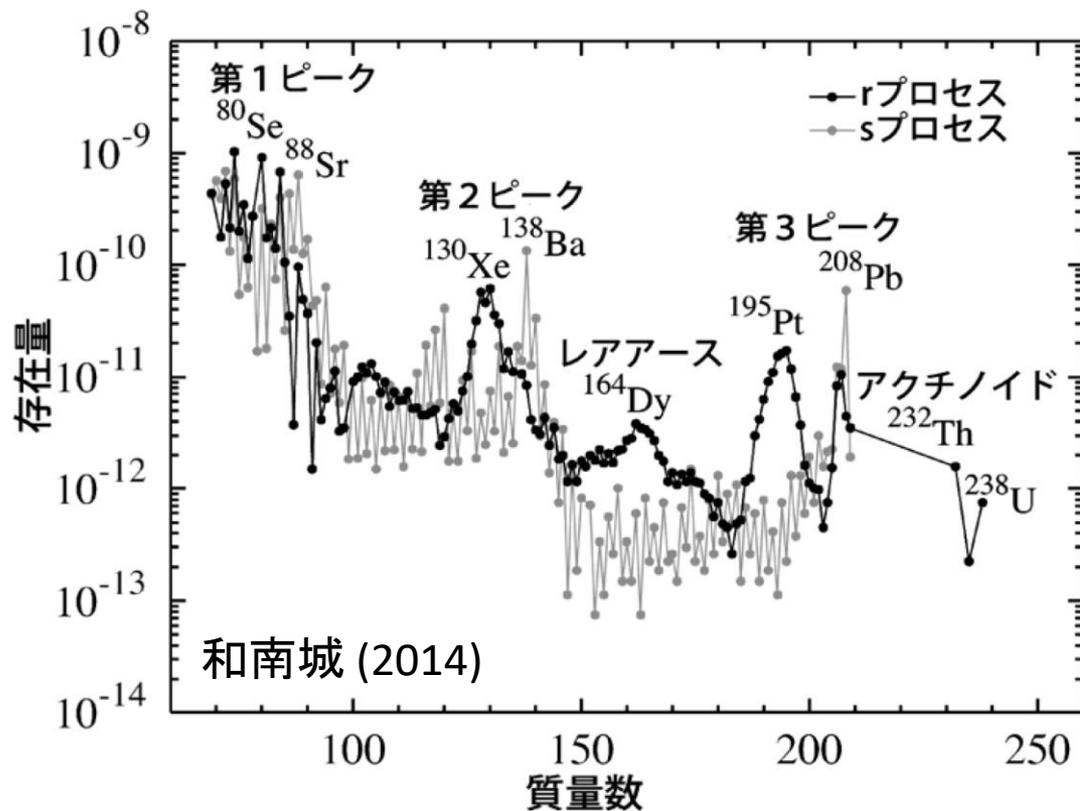


https://en.wikipedia.org/wiki/Platinum#/media/File:Platinum_crystals.jpg

r過程元素合成

重い中性子過剰核：金、プラチナ、レアアース...

“rapid”： β 崩壊より早く中性子を捕獲する反応



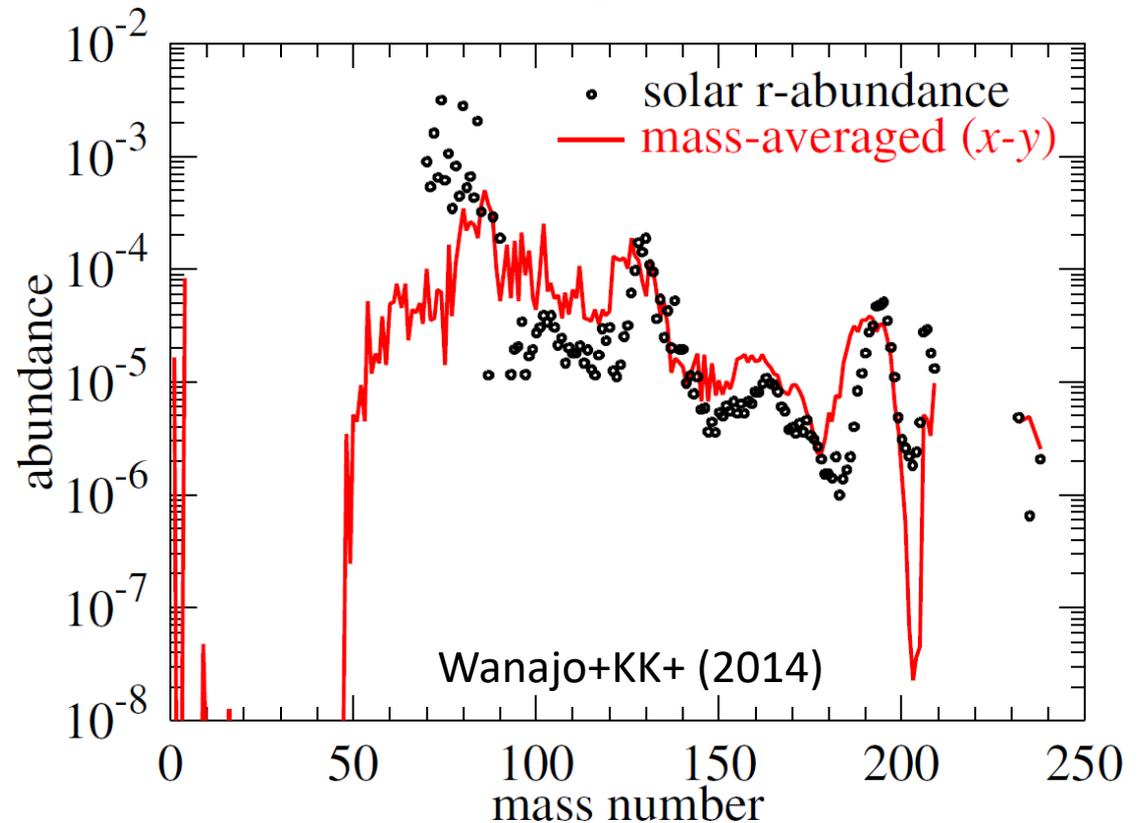
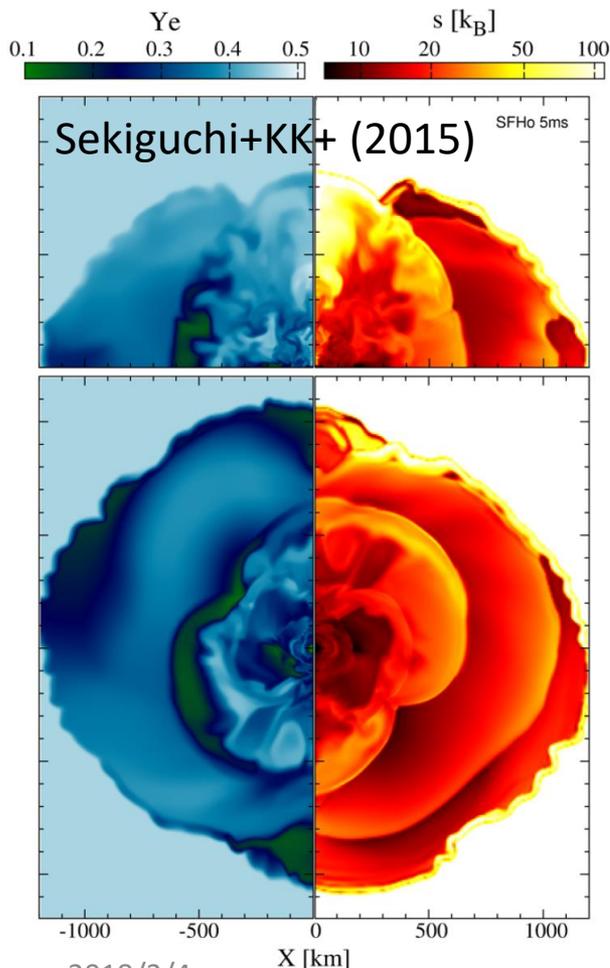
中性子過剰な
爆発的天体現象

超新星爆発では
無理そうだという
理論研究の状況

連星合体からの質量放出

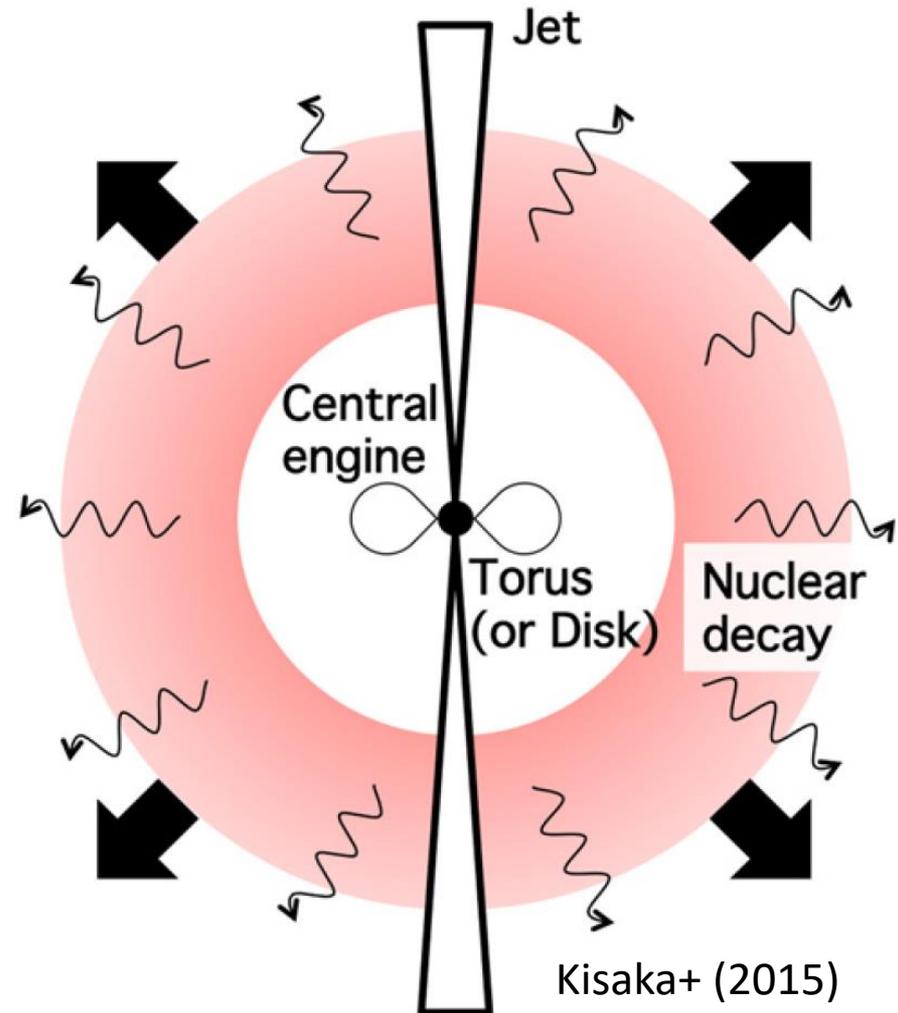
連星パラメータによってr過程元素合成がうまくいく

観測的に検証するには？



キロノヴァ/マクロノヴァ

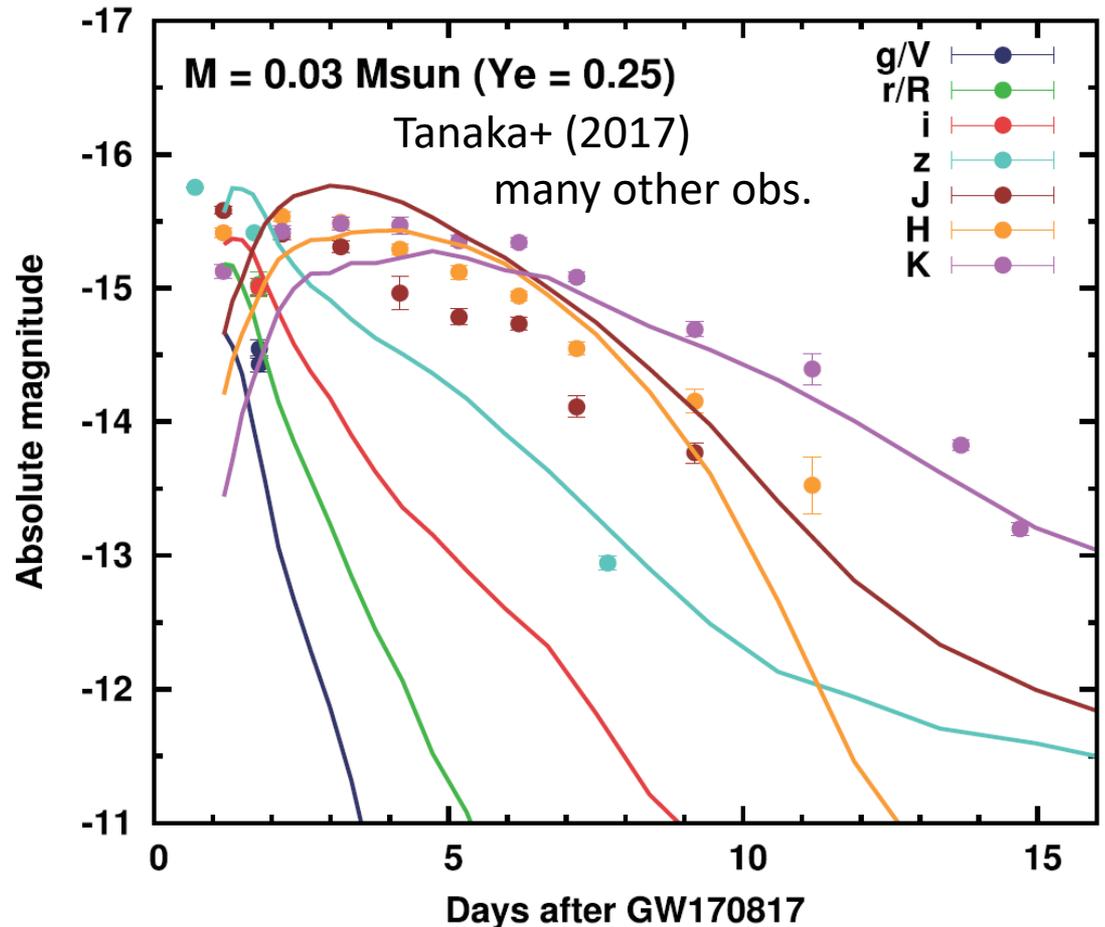
放出された物質には
放射性のr過程元素も
崩壊により自身を加熱
熱的放射は物質から
拡散して抜け出してくる
しかしr過程元素は
光を簡単に逃がさない
特徴的な「キロノヴァ」へ



AT 2017gfo

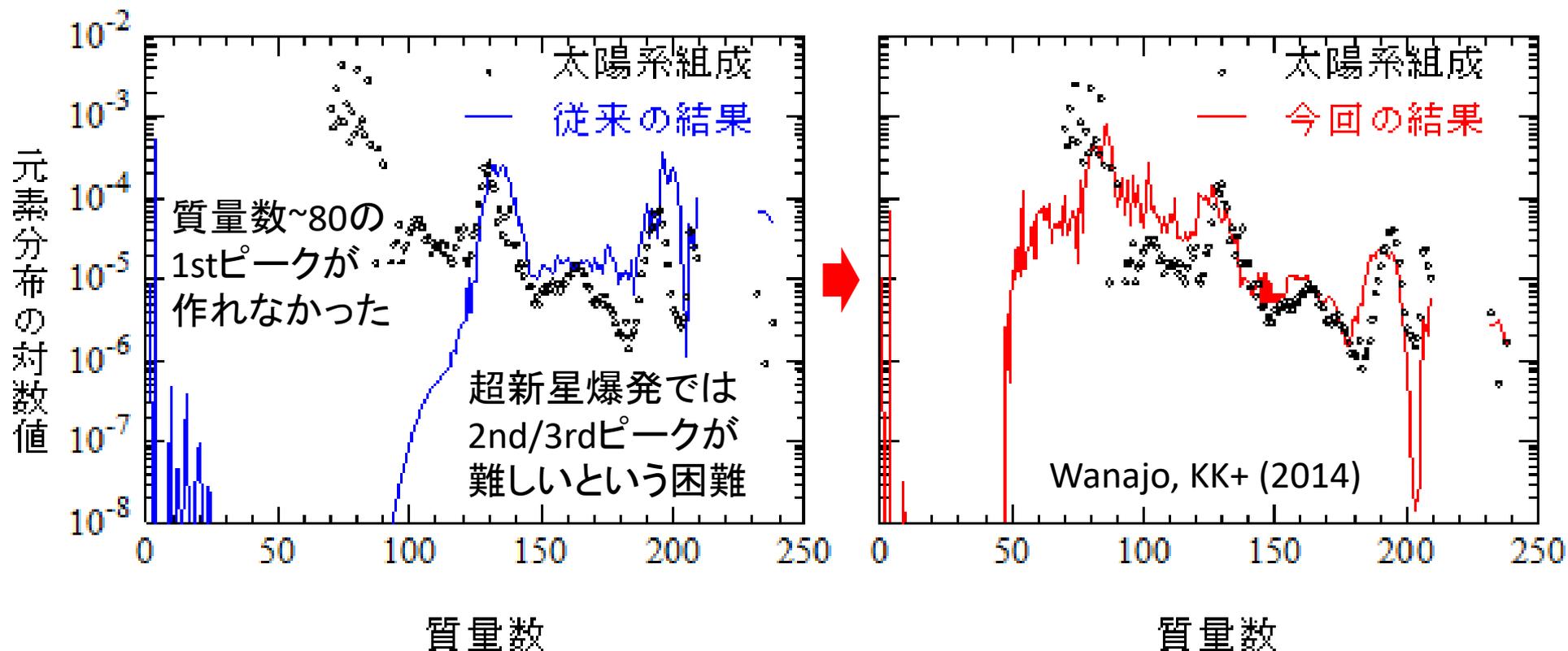
理論モデルと全体的には整合している

- 特に後期近赤外
超新星と比べて
- 質量が小さい
 - 速度が大きい
 - 不透明度が高い
 - 加熱に特徴的な時間スケールなし



r過程と数値相対論

一般相対論による連星中性子星の合体計算だと
太陽系組成の全体をうまく再現できる(こともある)



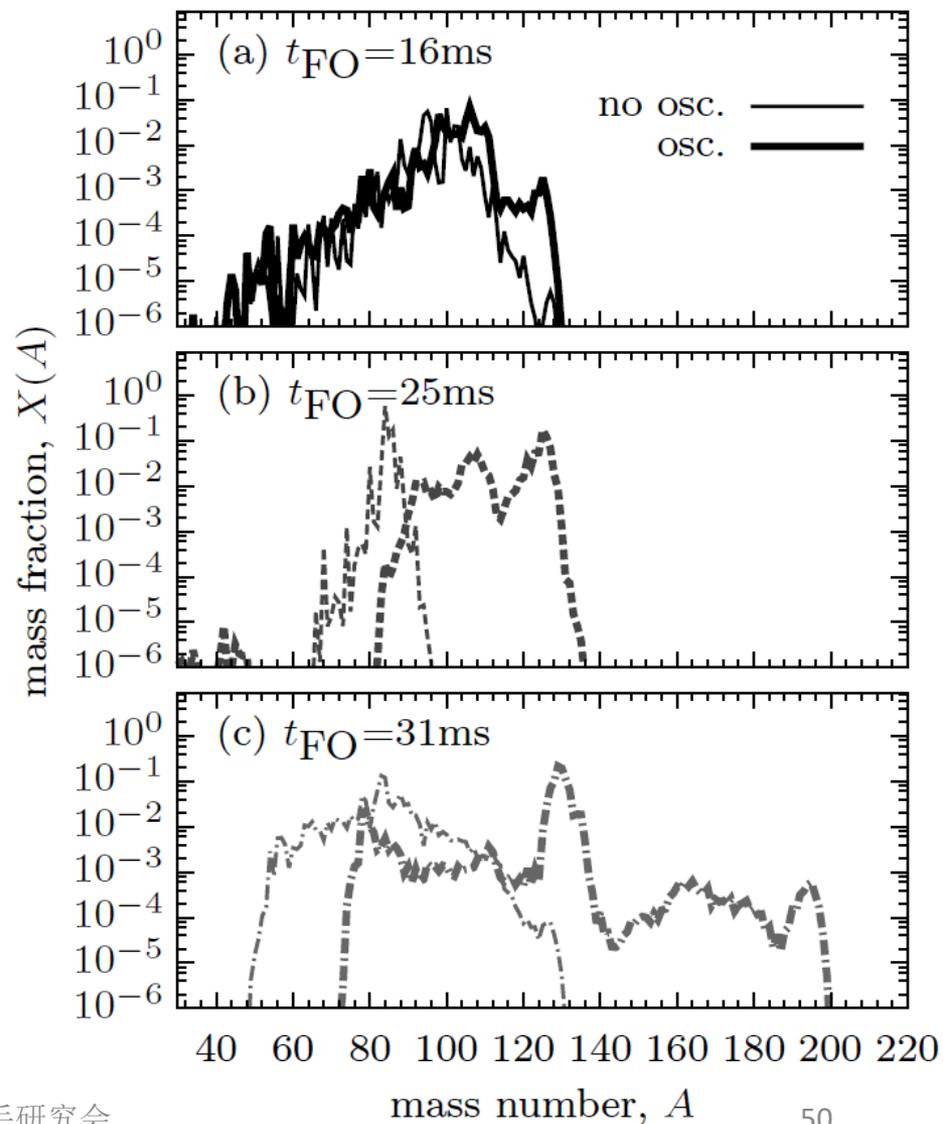
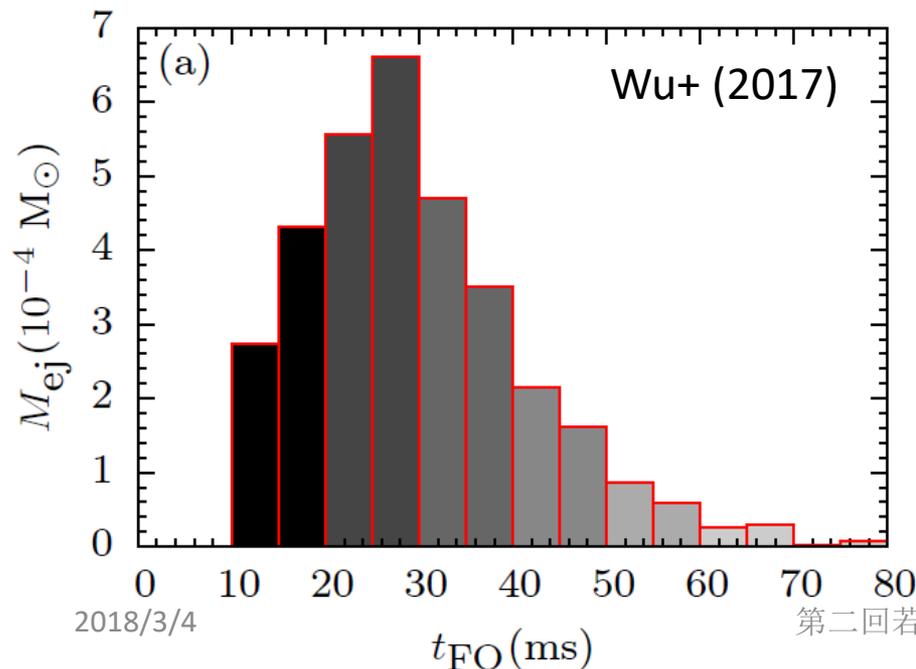
http://www.riken.jp/pr/press/2014/20140717_2/

将来的な課題：ニュートリノ振動

ニュートリノ輸送すら難儀

- 運動量空間も解く
- 空間スケールが短い

数値相対論では未着手



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: ≥ 2 s

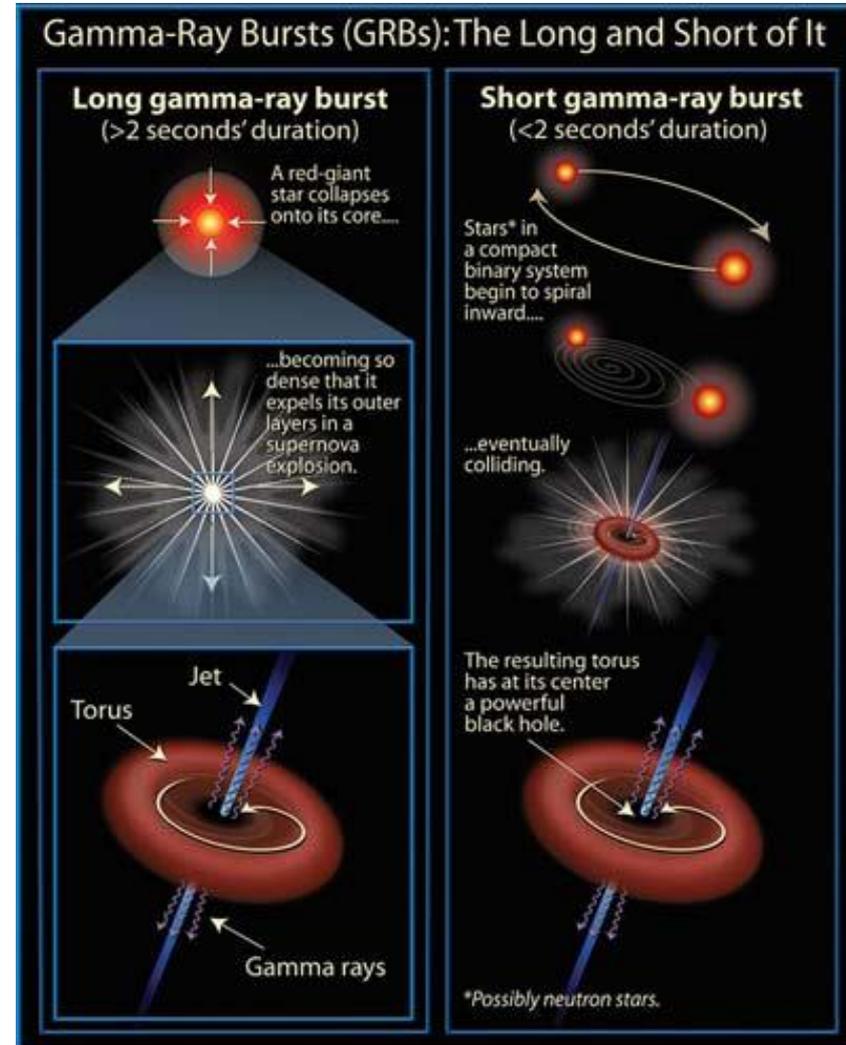
大質量星の崩壊が起源

ショート・ハードGRB: ≤ 2 s

中性子星連星の合体?

重力波との同時観測で

起源を決定する



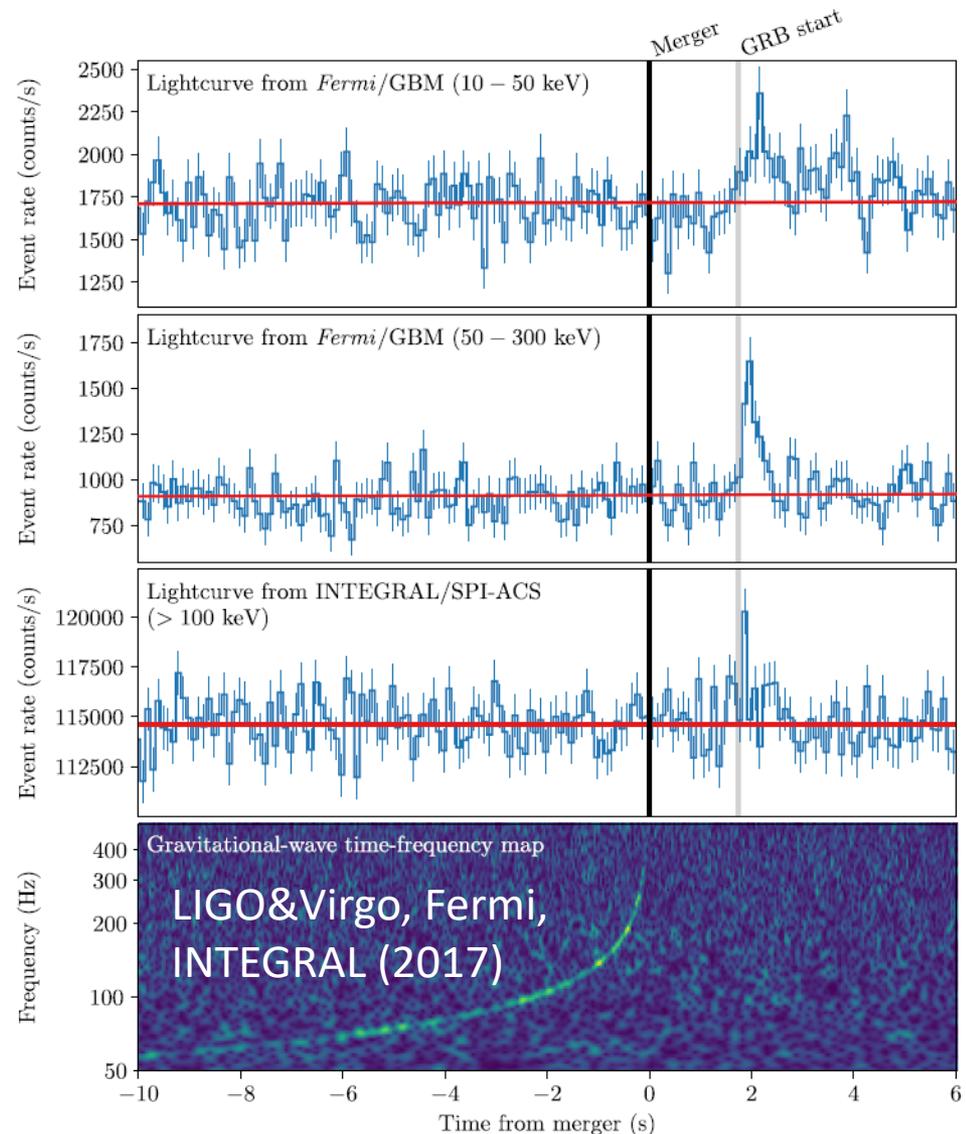
http://www.daviddarling.info/images/gamma-ray_bursts.jpg

GRB 170817A

やや弱いバーストだが
FermiとINTEGRALとで
整合する観測結果

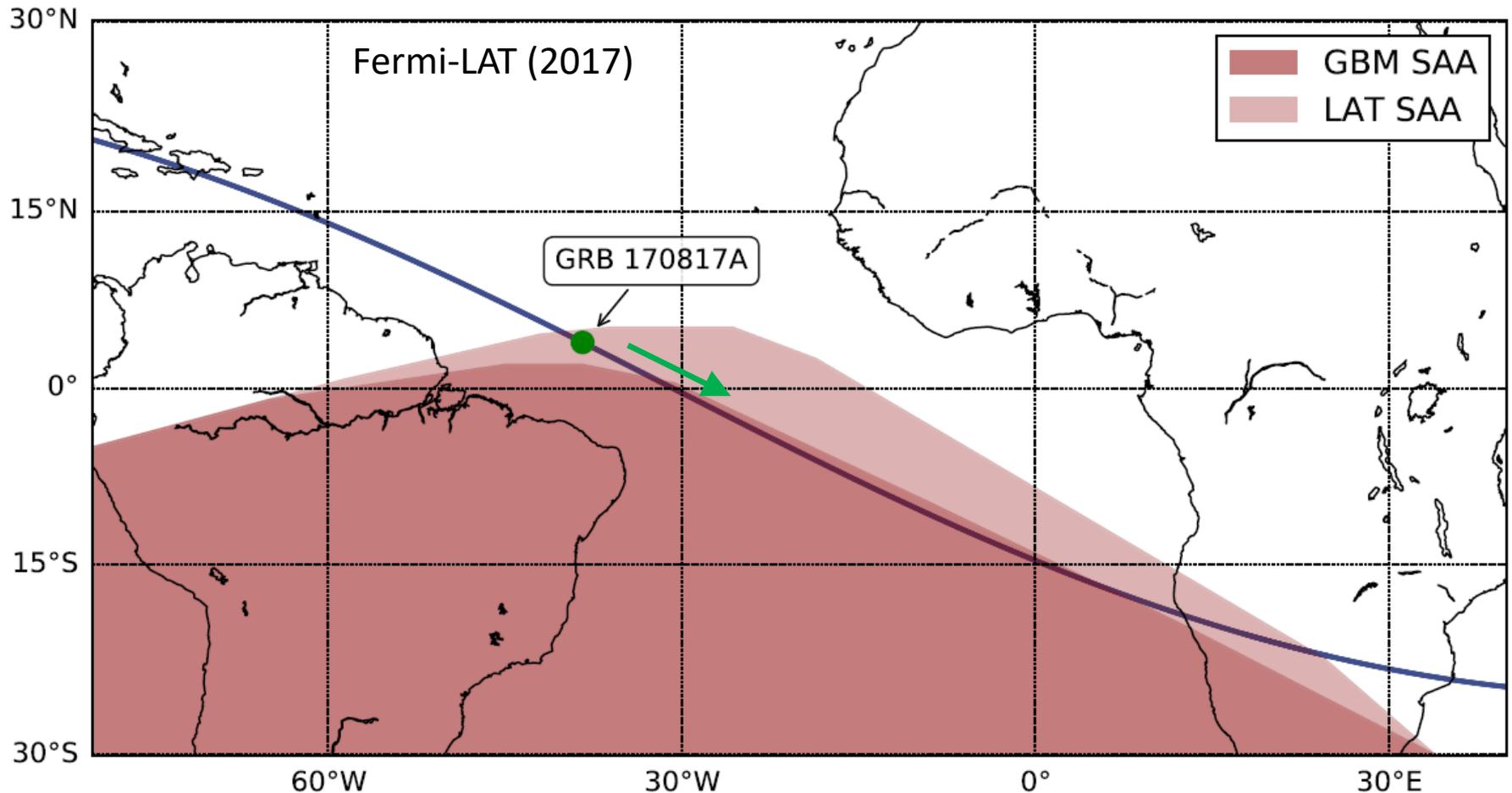
重力波から1.7秒の遅れ

- ジェットの駆動まで
- 周りの物質を
ジェットが突き破る
- ジェットの晴れ上がり

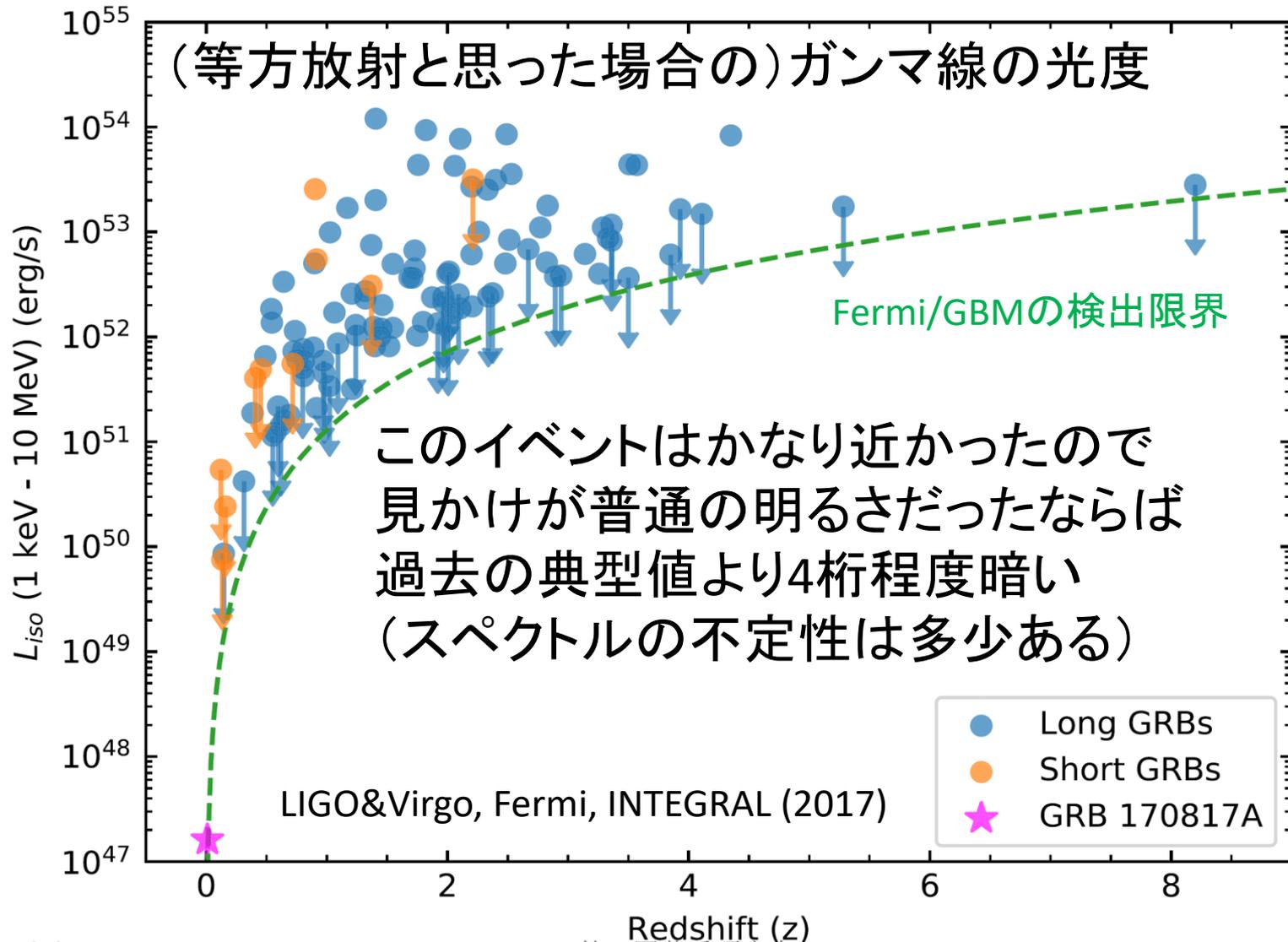


South Atlantic Anomaly

背景粒子が多く感度が悪い、特にLATは使用不可



実際は暗いガンマ線バースト



ショートガンマ線バーストはどこに？

GRB 170817Aのガンマ線放射が超相対論速度のジェットによるものだった証拠はなさそう

- 今回が既に超相対論速度のstructured jet？
- ジェットから遠すぎて完全に見逃している？
- 連星中性子星のパラメータ依存？（質量比など）
- ブラックホール・中性子星連星が本当の起源？

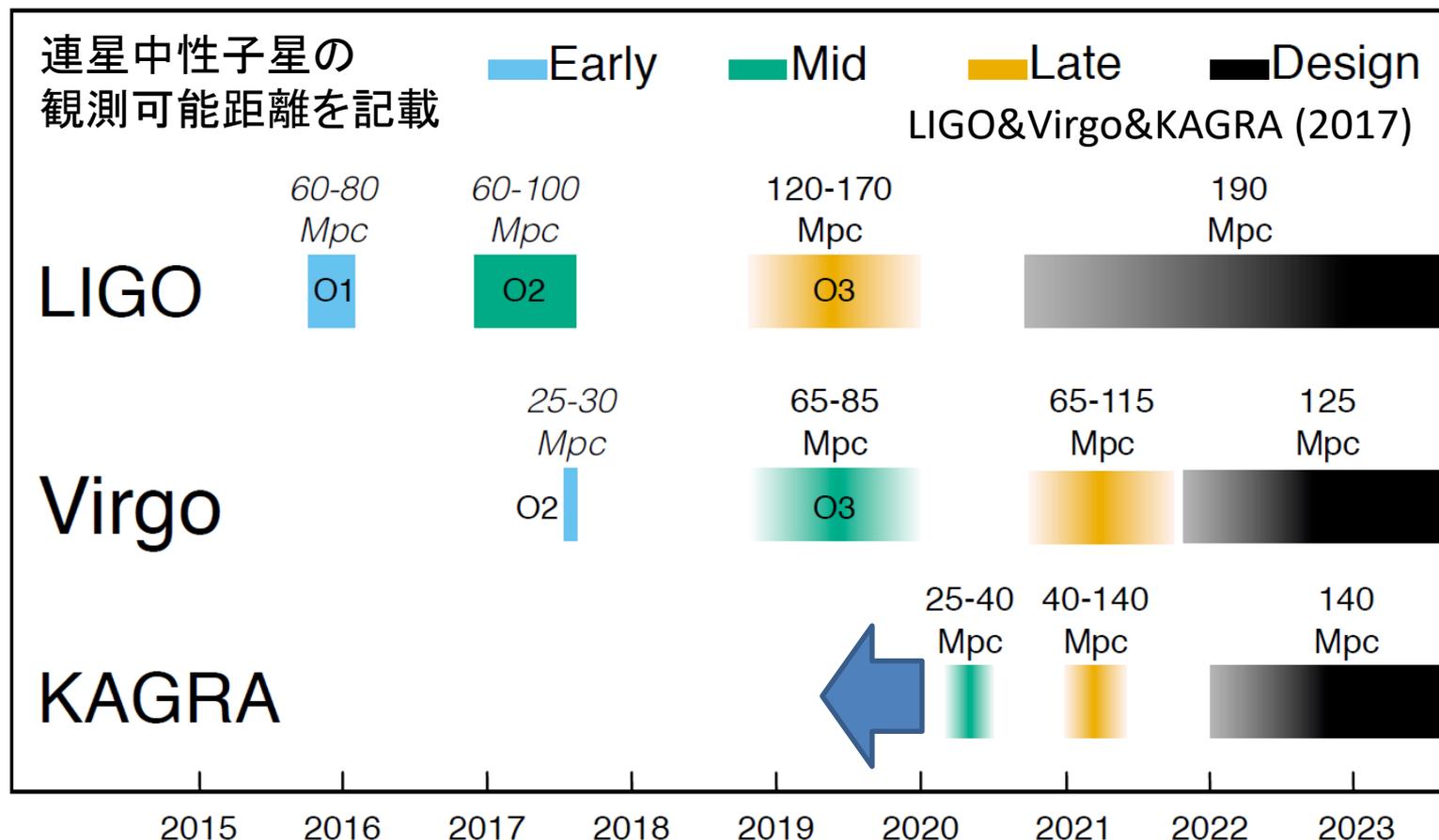
全貌解明には何にせよ多数イベントが必要だろう

- このSGRBの長期観測もおそらく有益（解像など）

3. 地上重力波望遠鏡の 将来展望

今後の稼働スケジュール

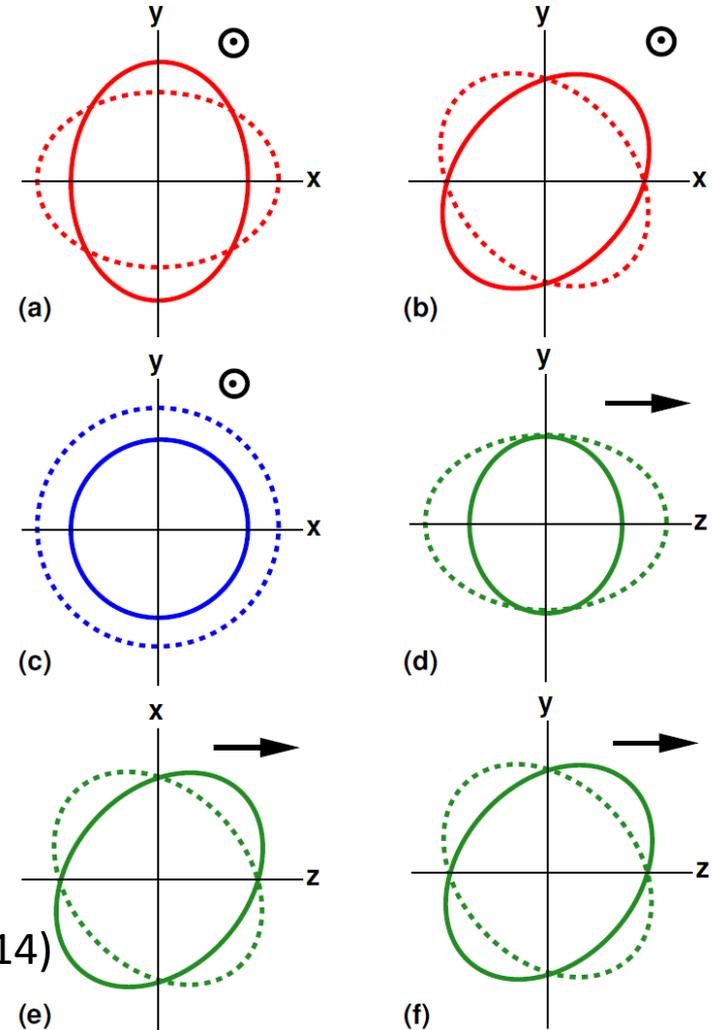
KAGRAは2020年に本格参加の予定...前倒し？



重力波の偏光

一般相対論で予言される通り
重力波が本当に横波なのか
検証するにはKAGRAが重要
使える検出器の数が増えると
解ける自由度が増えるので
色々な偏光を分離できる
電磁波での位置決定も有益

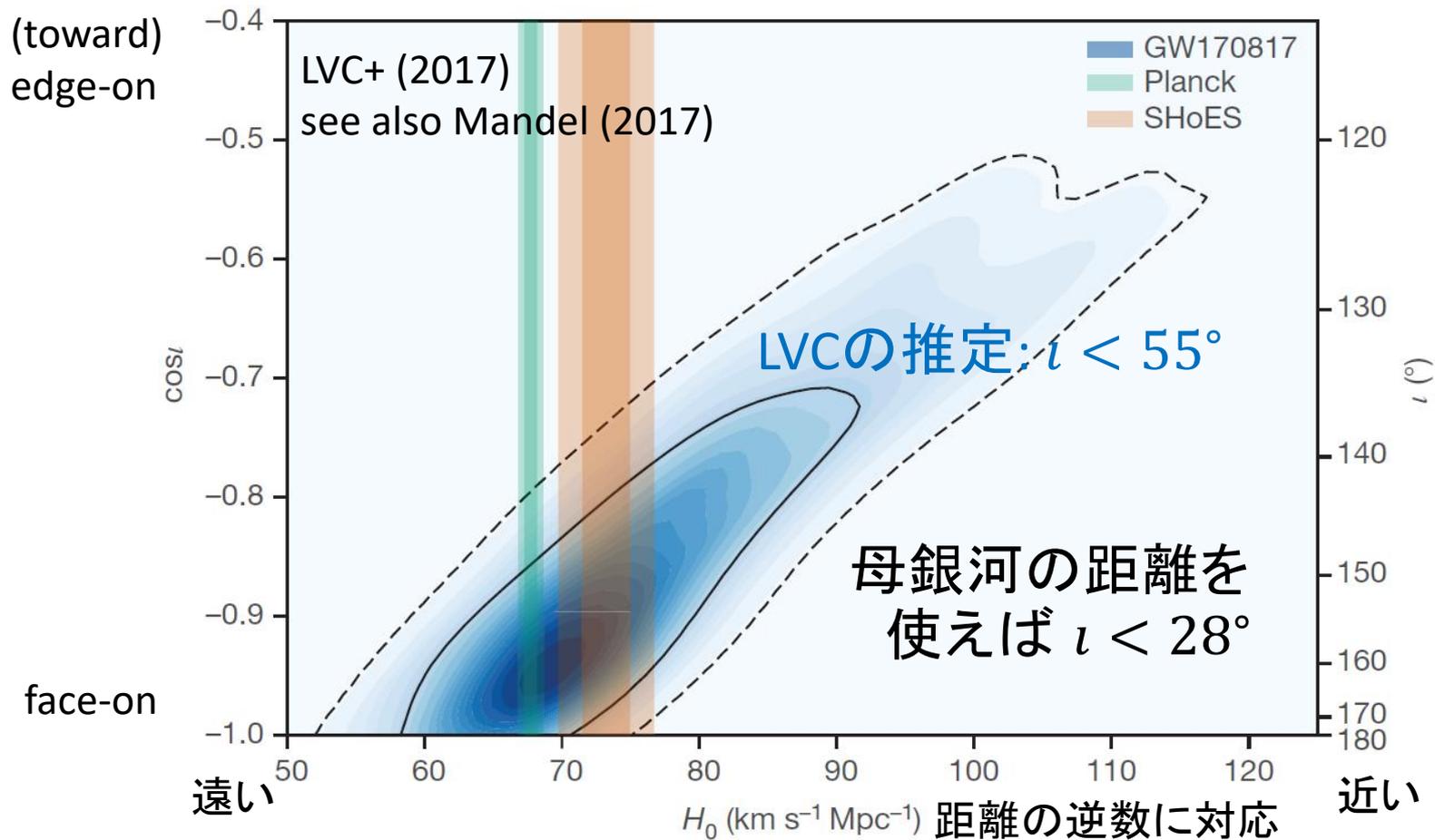
Gravitational-Wave Polarization



Will (2014)

距離-軌道傾斜角の縮退

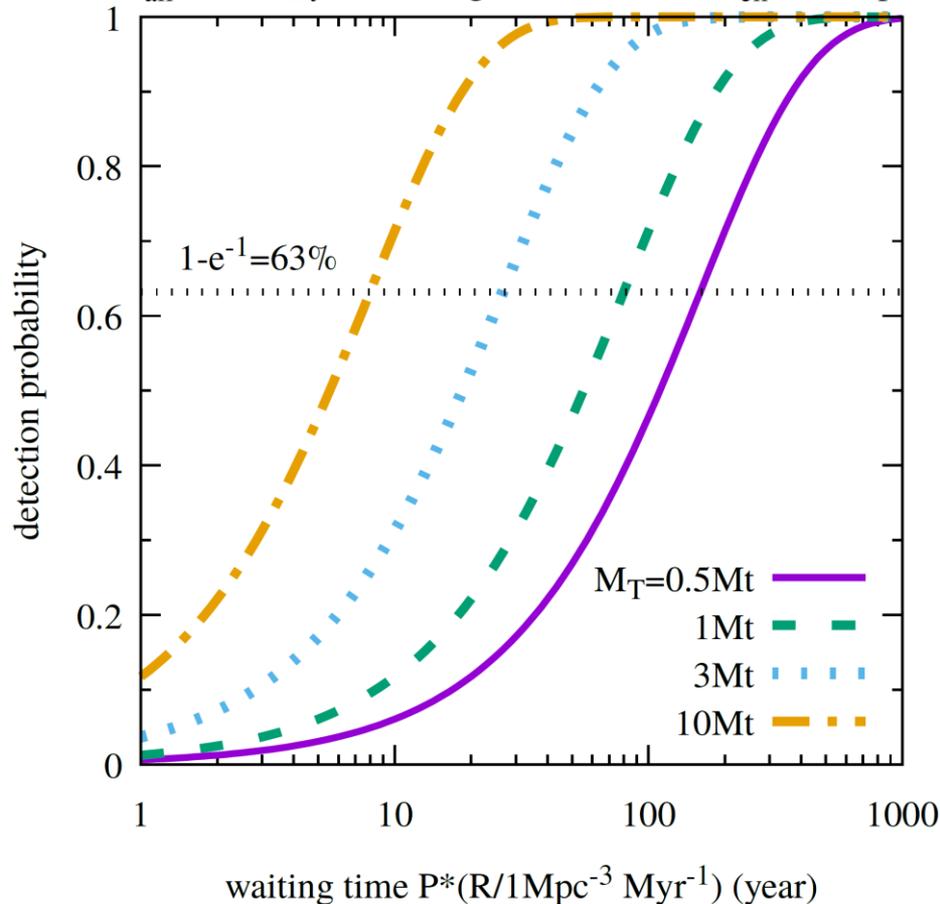
VirgoかKAGRAがあれば $\Delta i < 5^\circ$ も可能 (Arun+ 2014)



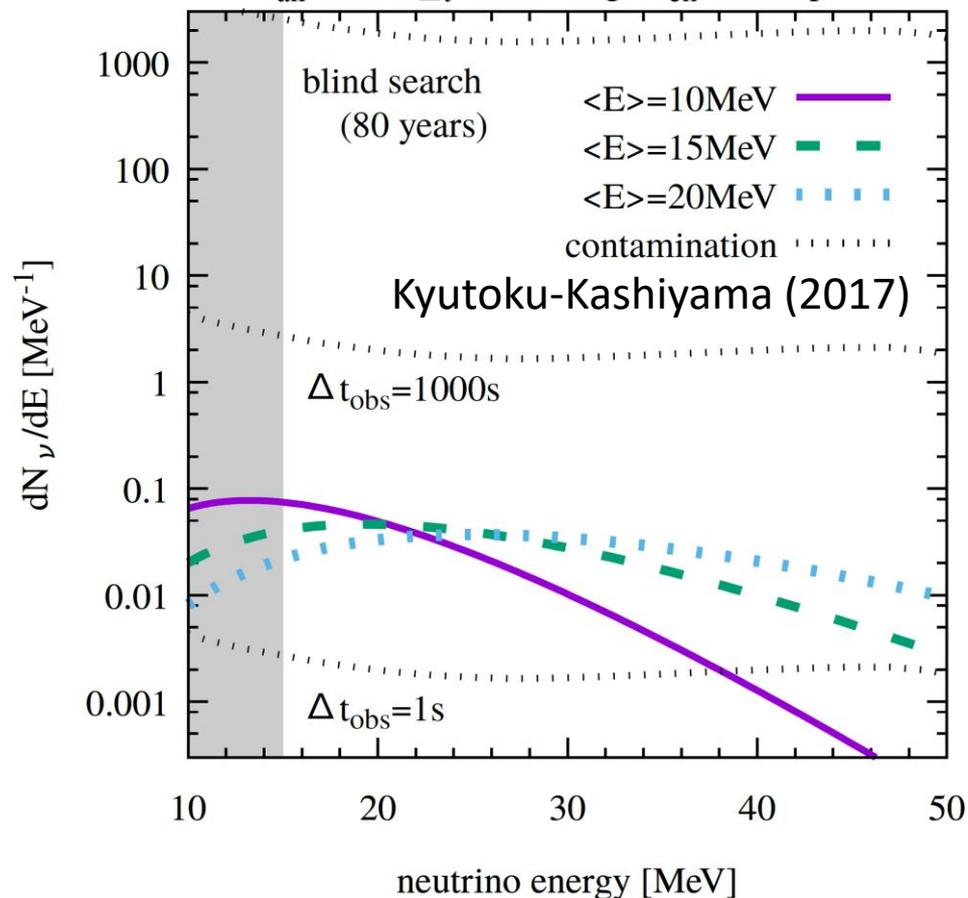
熱的ニュートリノの観測可能性

重力波で時刻を絞れば有意に見える (80Mt years)

$f_{\text{all}}=0.5, E_{\Delta t}=3 \times 10^{52} \text{erg}, \langle E \rangle=10 \text{MeV}, D_{\text{eff}}=200 \text{Mpc}$

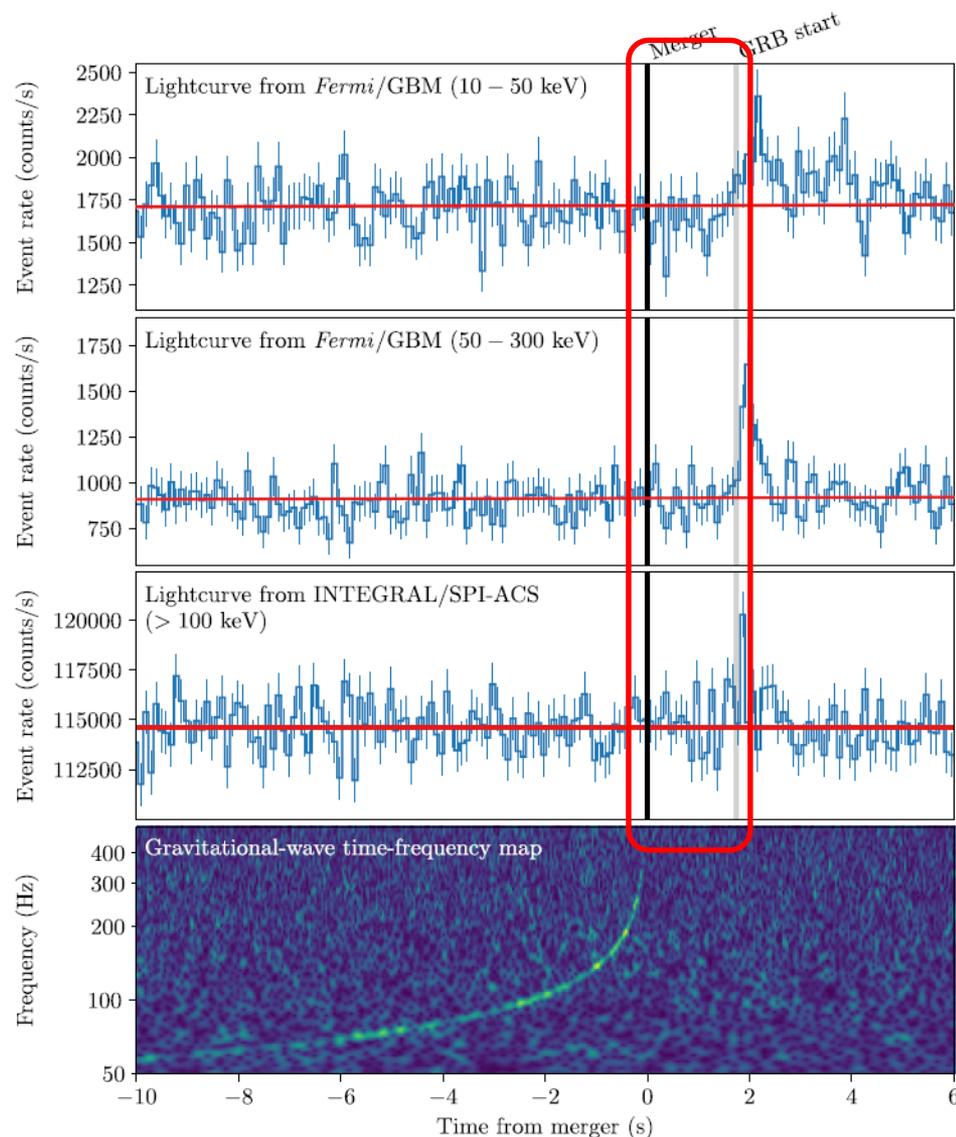


$f_{\text{all}}=0.5, E_{\Delta t}=3 \times 10^{52} \text{erg}, D_{\text{eff}}=200 \text{Mpc}$

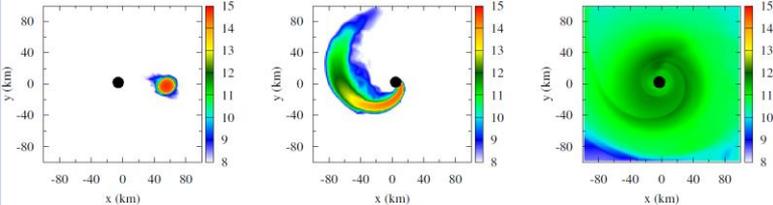
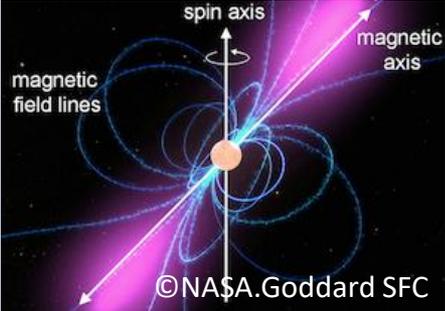
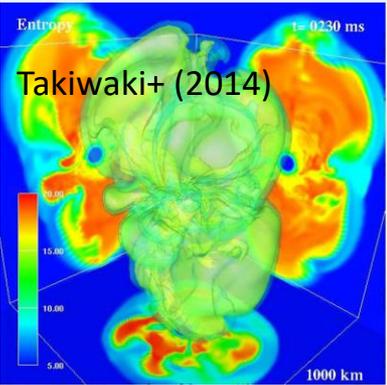
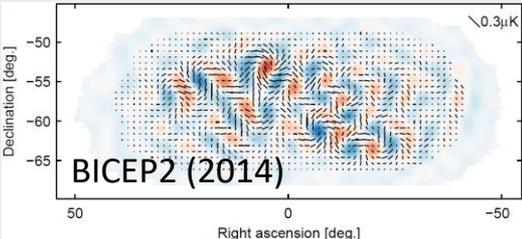


暗黒の1.7秒間

重力波からガンマ線の
1.7秒の遅れの間には
何があったのか？
- ブラックホール形成？
- マグネター？
ここを探るにはおそらく
熱的ニュートリノが
唯一のメッセンジャー



重力波源の分類

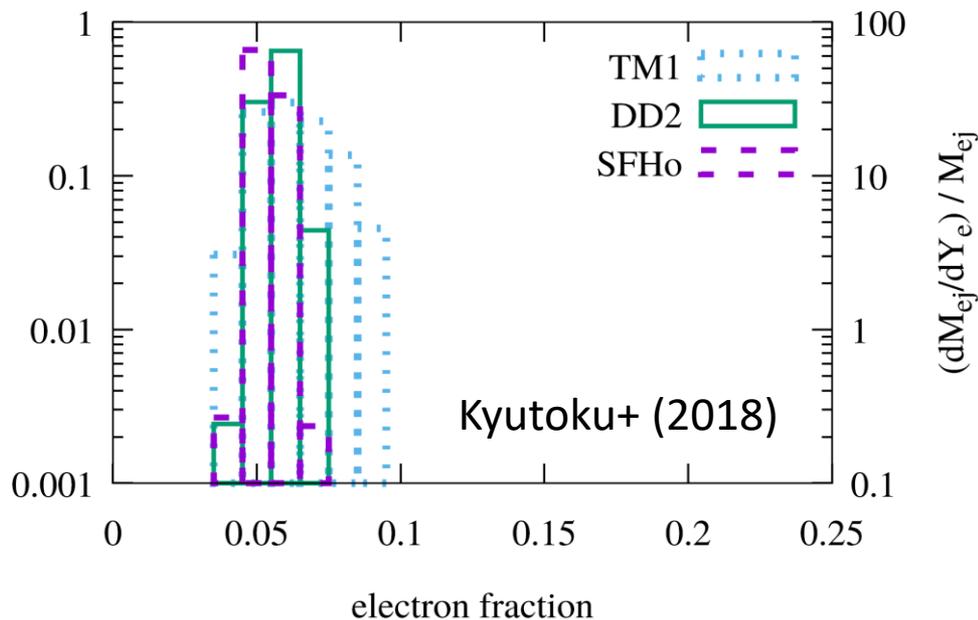
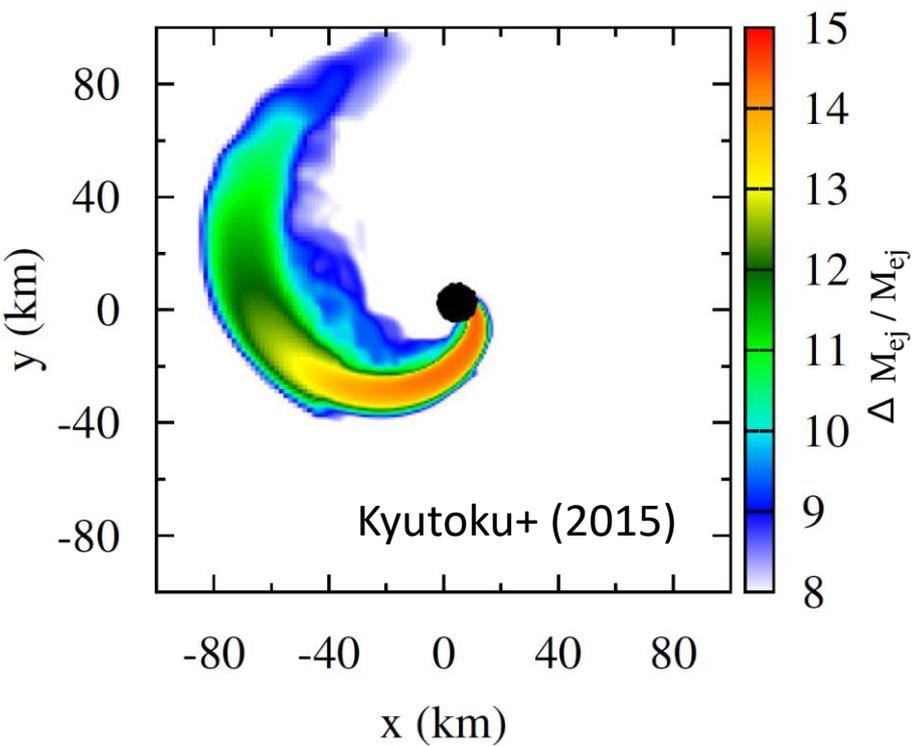
	突発的 (transient)	定常的 (persistent)
<p>波形が 既知</p>	<p>inspiral: コンパクト連星合体 BH-BH, BH-NS, NS-NS ...</p>  <p>Kyutoku+ (2015)</p>	<p>continuous: 中性子星 (パルサー)</p> 
<p>波形が 未知</p>	<p>burst: 超新星爆発 宇宙(超)弦 ...</p>  <p>unknown unknown?</p>	<p>stochastic: 背景放射 弱い波源の重ね合わせ inflation、相転移...</p>  <p>BICEP2 (2014)</p>

ブラックホール・中性子星連星

地上で見えるであろう最後のコンパクト連星合体
重元素合成を含め連星中性子星とは微妙に違う

27.31ms $\log \rho \text{ (g/cm}^3\text{)}$

ガンマ線バースト？



全体的な雑感

一つ一つの波源には今日は深入りしないとして
「コンパクト連星合体はたくさん見えるようになって
でも他の重力波は全然見つからない」

というのが(現時点で)考えられる最悪の将来展望

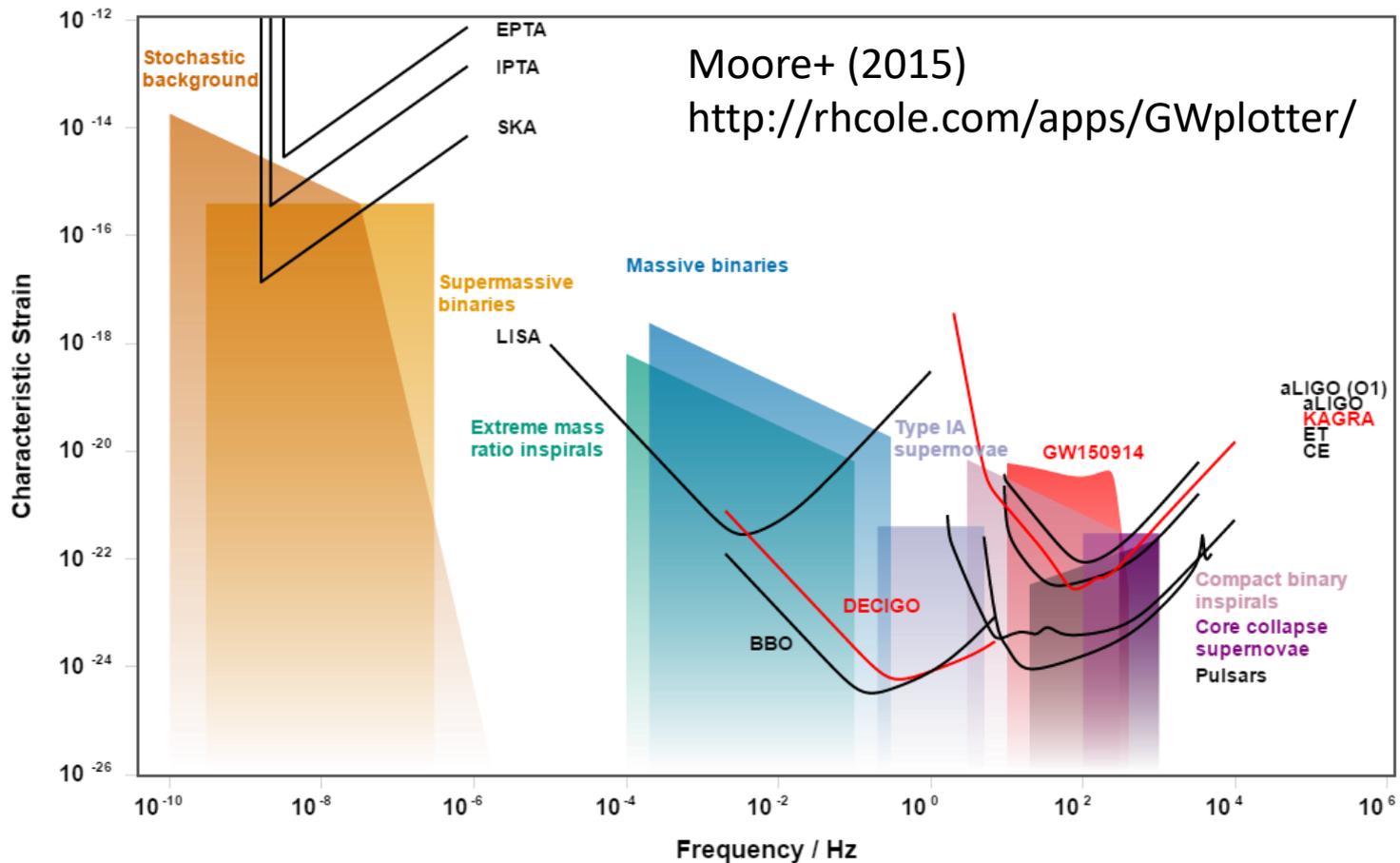
波形への理論的理解を深めればいい、というのは
コンパクト連星合体での例外的な事情に思える

検出のための解析法や検出技術がむしろ重要？
単独の重力波源だけを狙う、とかでもいいのかも

4. 宇宙重力波検出の 将来展望

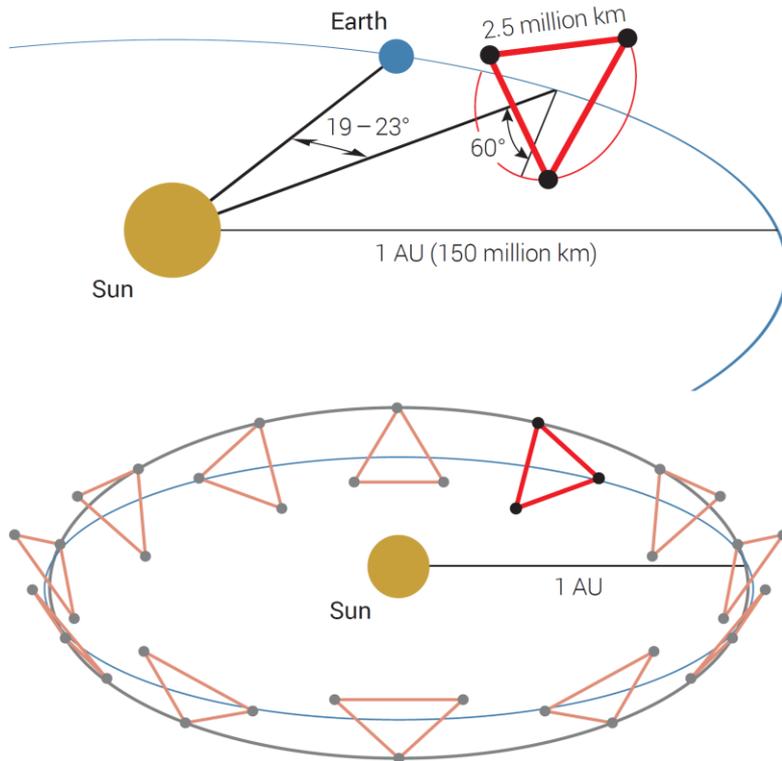
多波長重力波天文学

これ以外にもバー検出器、原子干渉計、CMB...



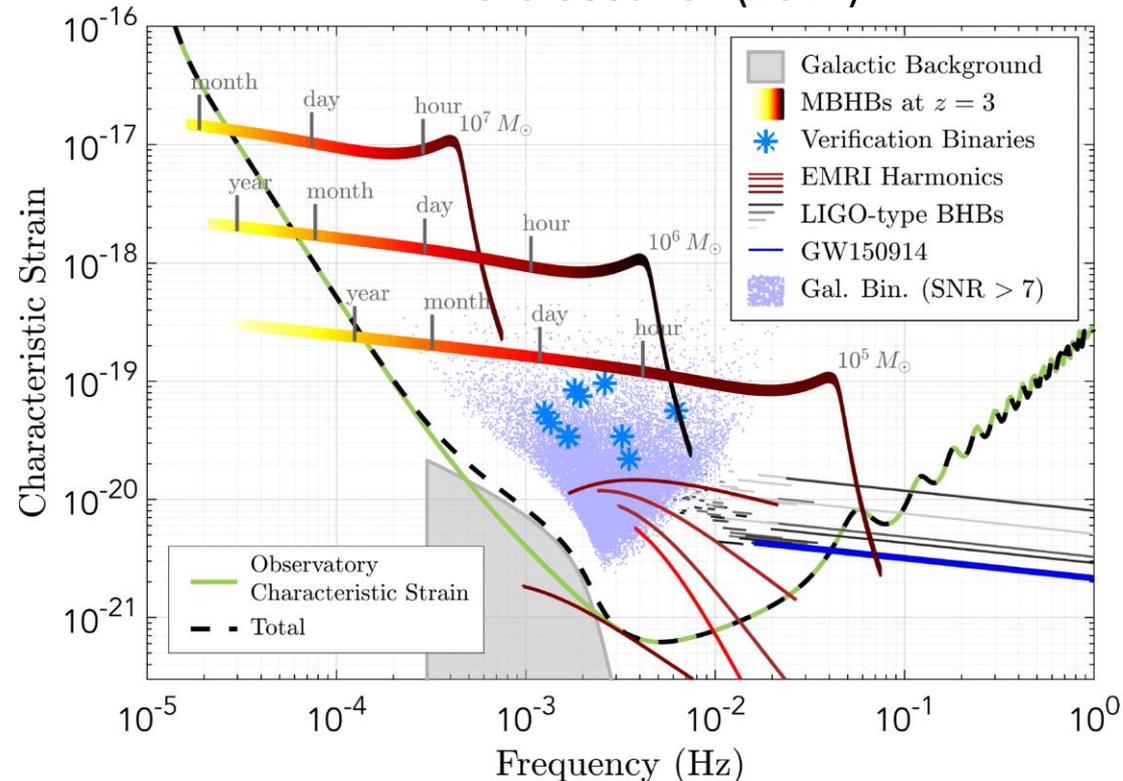
LISA

ESA/NASAによる宇宙重力波望遠鏡、mHzに感度
2030年前後の打ち上げが予定されている



2018/3/4

Amaro-Seoane+ (2017)

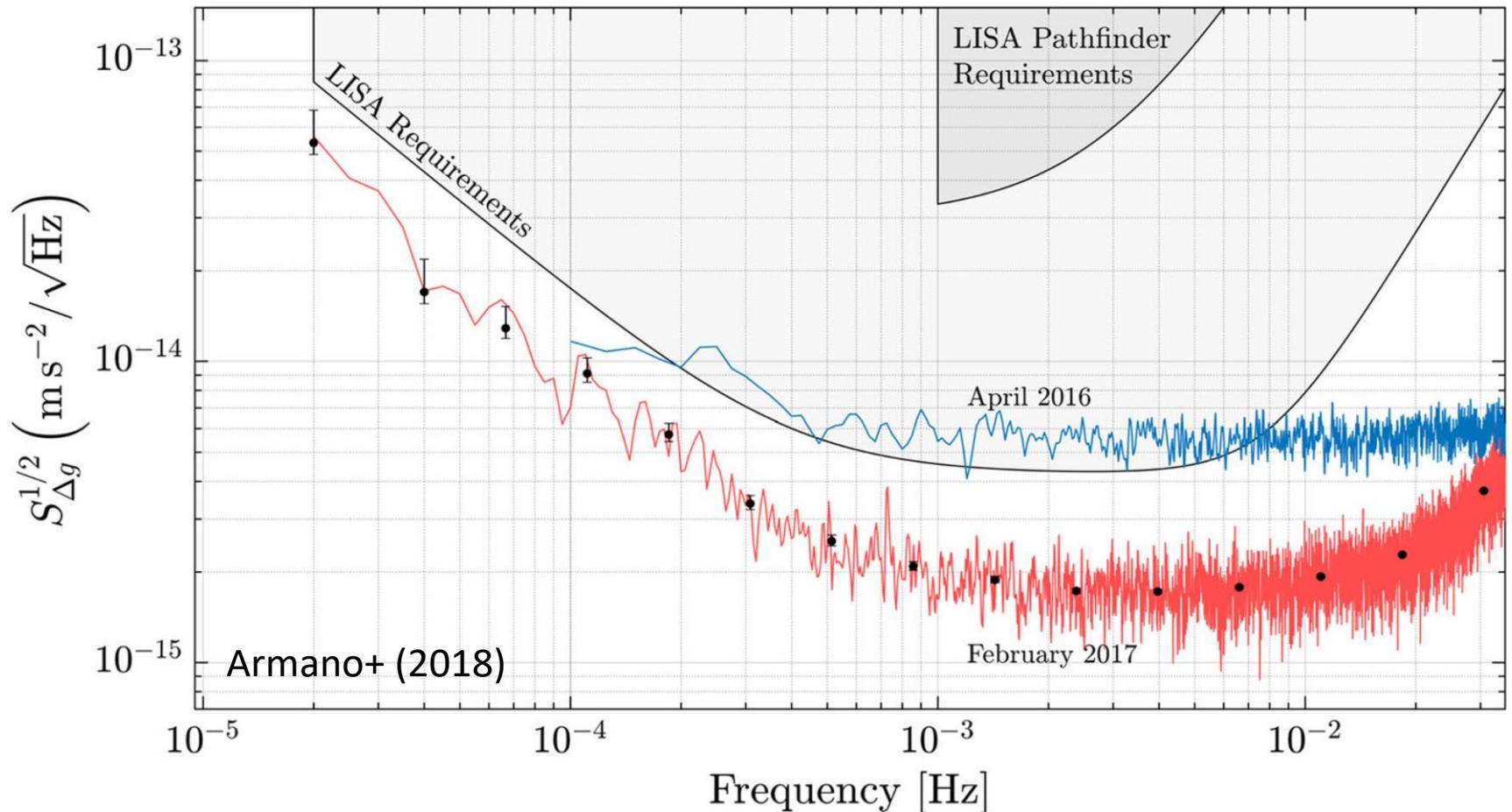


第二回若手研究会

67

技術検証衛星LISA Pathfinder

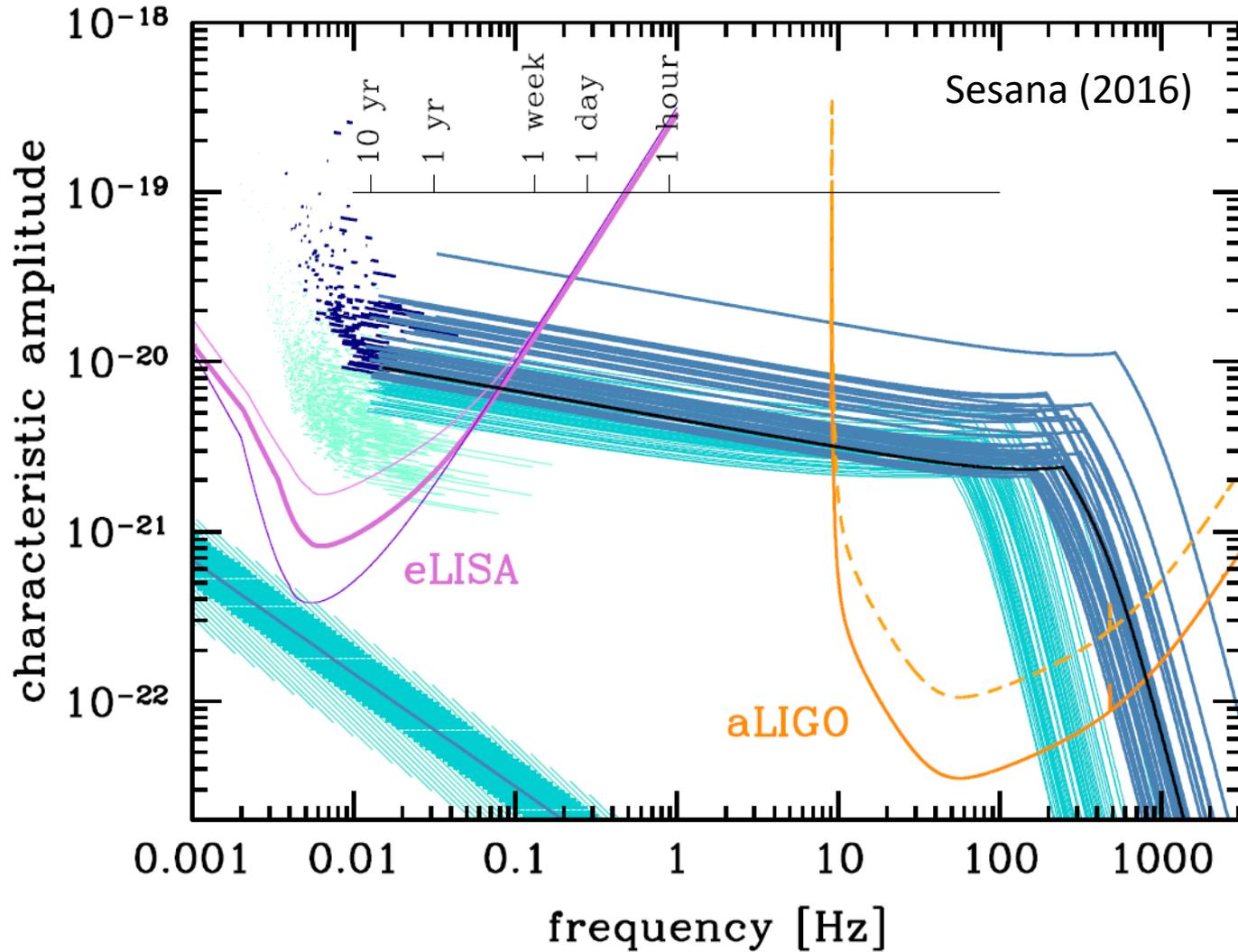
加速度雑音は既にLISA自体の要求を達成している



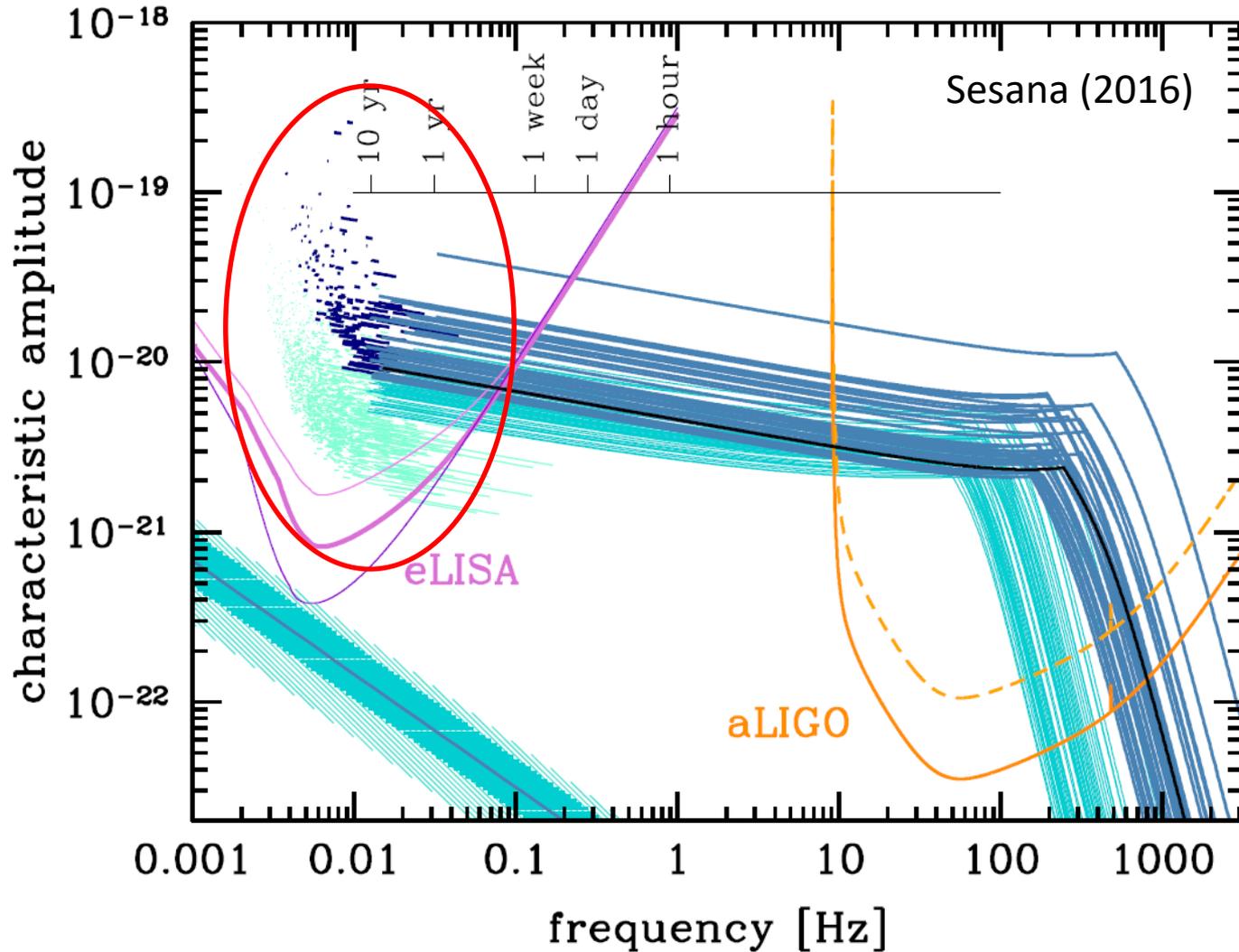
予想されるLISAの重力波源

- 系内の連星白色矮星(ノイズにもなる)
恒星・連星進化、Ia型超新星爆発なども?
- 超大質量ブラックホールの合体
相対論の精密テスト(SNR>1000)、大規模構造形成
- Extreme mass ratio inspiral(藤田さん)
Kerr時空の精密観測、no hairのテスト、暗黒物質...
- 恒星質量の連星ブラックホール
ブラックホールが重くて多いので観測できそう

多波長重力波天文学?



多波長重力波天文学?

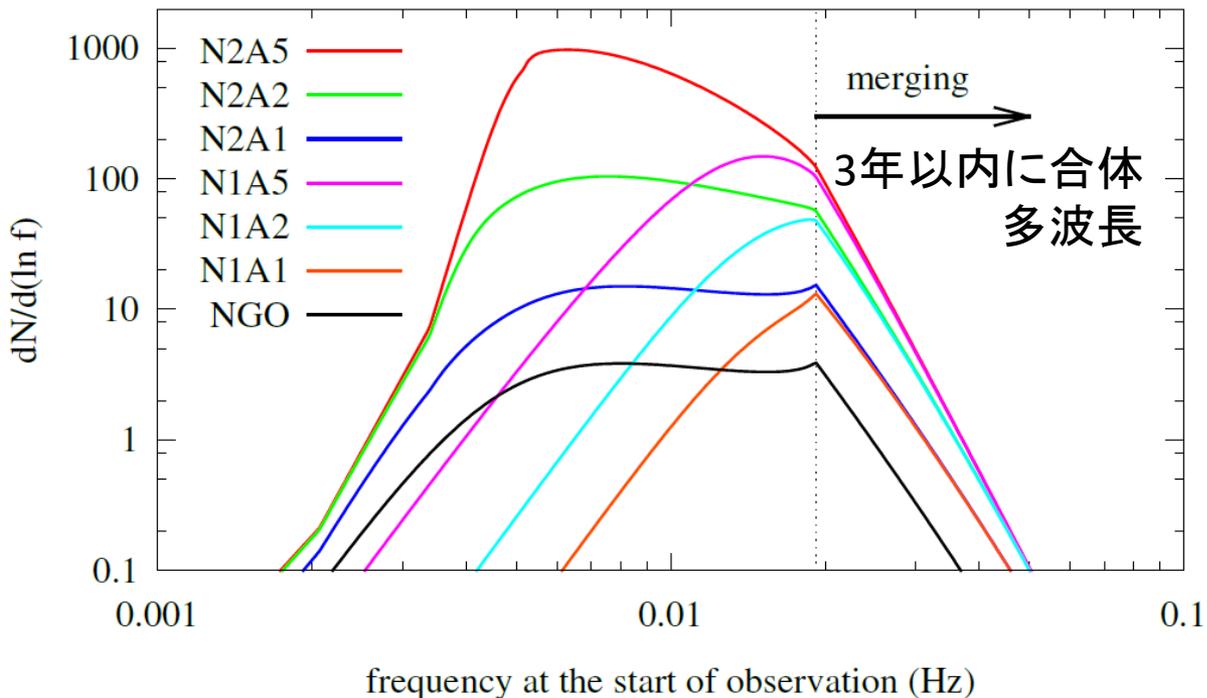


合体しない連星

合体しないで延々回っている連星が多数見える

- (準)単色波近似がよく通用する

- 検出数は概ねチャープ質量に対し $\mathcal{M}^{10/3}$

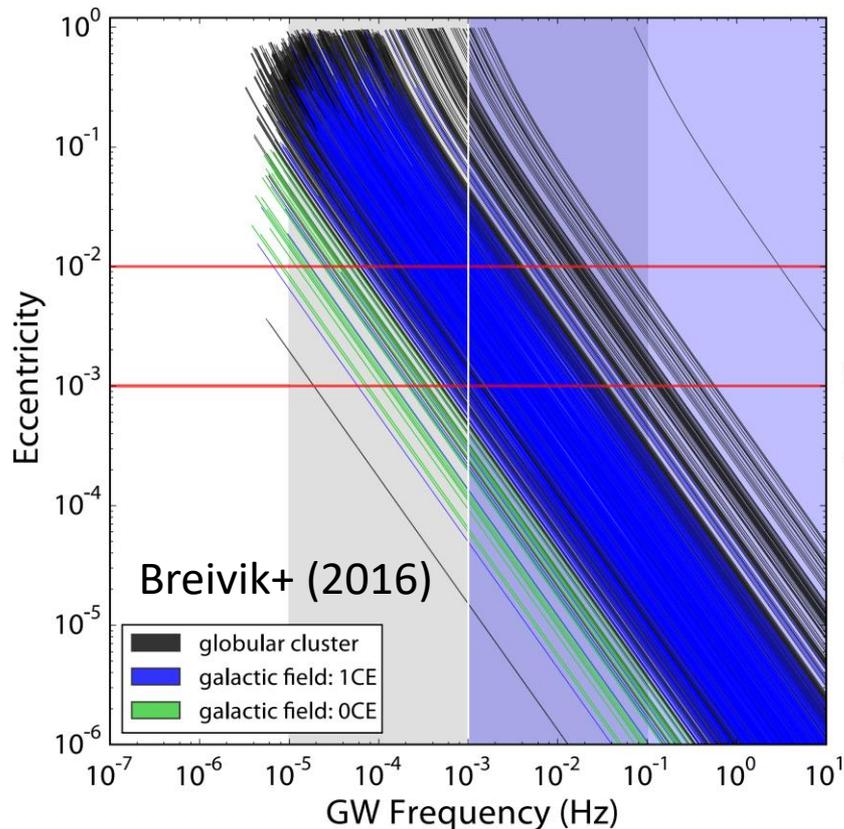


model	1 yr	2 yr	3 yr	4 yr	5 yr
NGO	1.2	3.4	6.2	9.5	13.2
(merge)	0.07	0.3	0.7	1.3	2.0
N1A1	1.4	3.7	6.5	9.6	13.0
(merge)	0.3	1.1	2.5	4.4	6.6
N1A2	6.0	16.5	29.5	44.3	60.3
(merge)	0.6	3.3	8.1	15.2	23.9
N1A5	22.2	61.9	112	170	235
(merge)	0.8	5.3	15.1	31.2	53.2
N2A1	4.7	13.2	24.0	36.6	50.8
(merge)	0.3	1.2	2.8	5.0	7.9
N2A2	27.6	77.6	142	217	302
(merge)	0.6	3.5	9.1	17.7	29.2
N2A5	174	492	903	1390	1940
(merge)	0.8	5.7	17.0	36.9	66.3

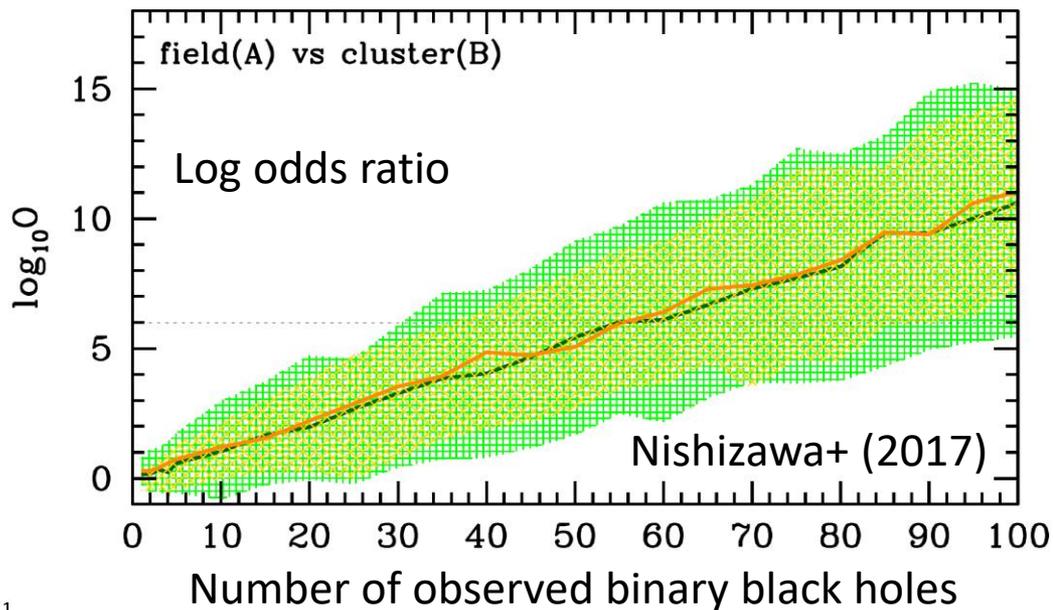
Kyutoku-Seto (2016)

離心率によるシナリオ判別

力学的形成だと離心率が大きくなる傾向がある、
モデルによるが100個くらい見れば判別できそう



pop III? primordial BHs?



LISAの利点

Q. 他に宇宙で見るメリットはあるのか? A. ある

- 距離の決定精度がいい

検出器の較正精度がLIGOより高い(予定な)ので、
振幅、ひいては距離の系統誤差が小さくなる

- 方角の決定精度がいい

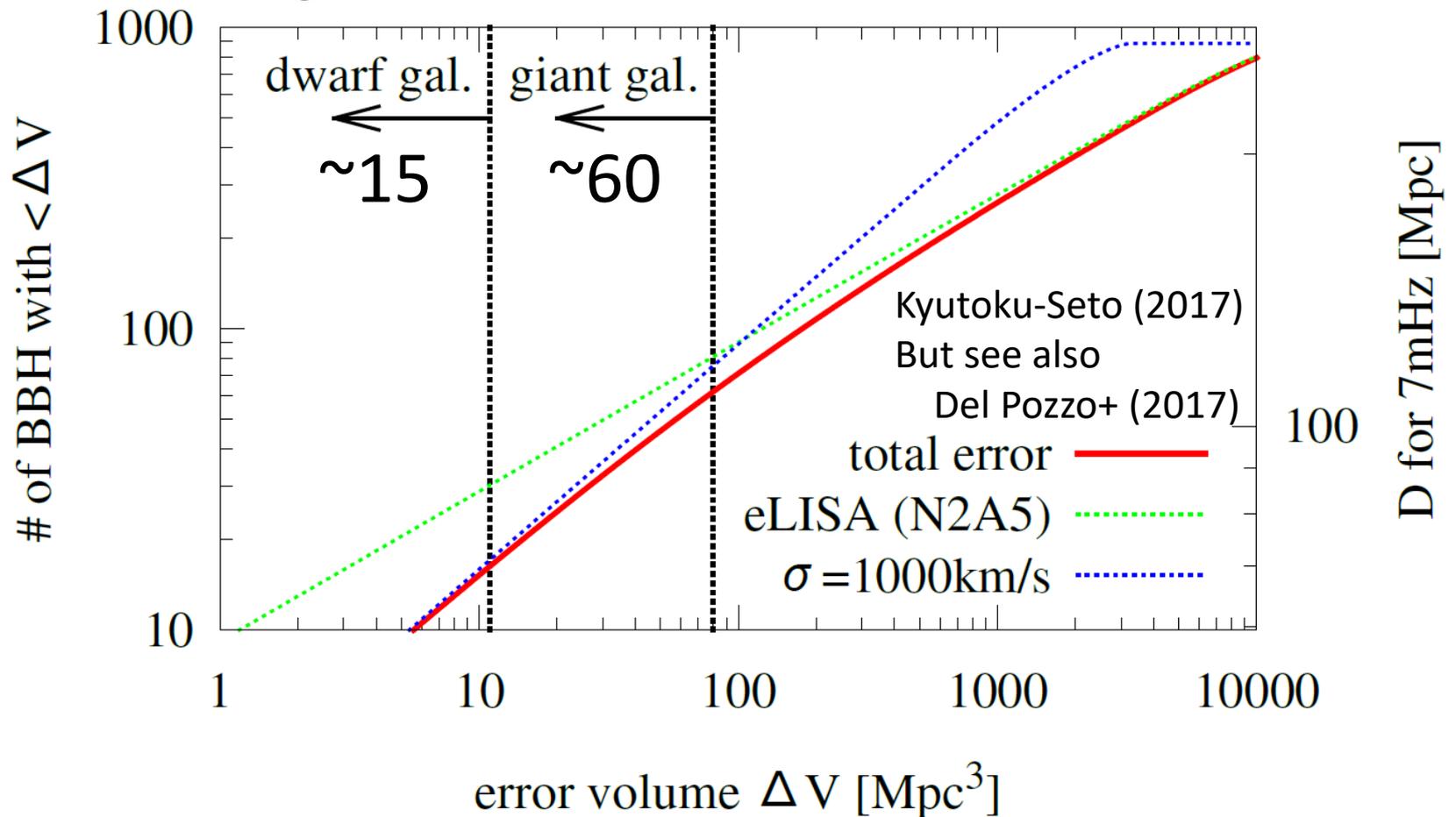
地上検出器は複数台で到来時刻の差を比較

宇宙検出器は自身の運動によるDopplerシフト

基線長 10,000km vs 1AU (~100,000,000km)

位置がよく決まる銀河の数

$\mathcal{M} = 28M_{\odot}, R = 100 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ を仮定



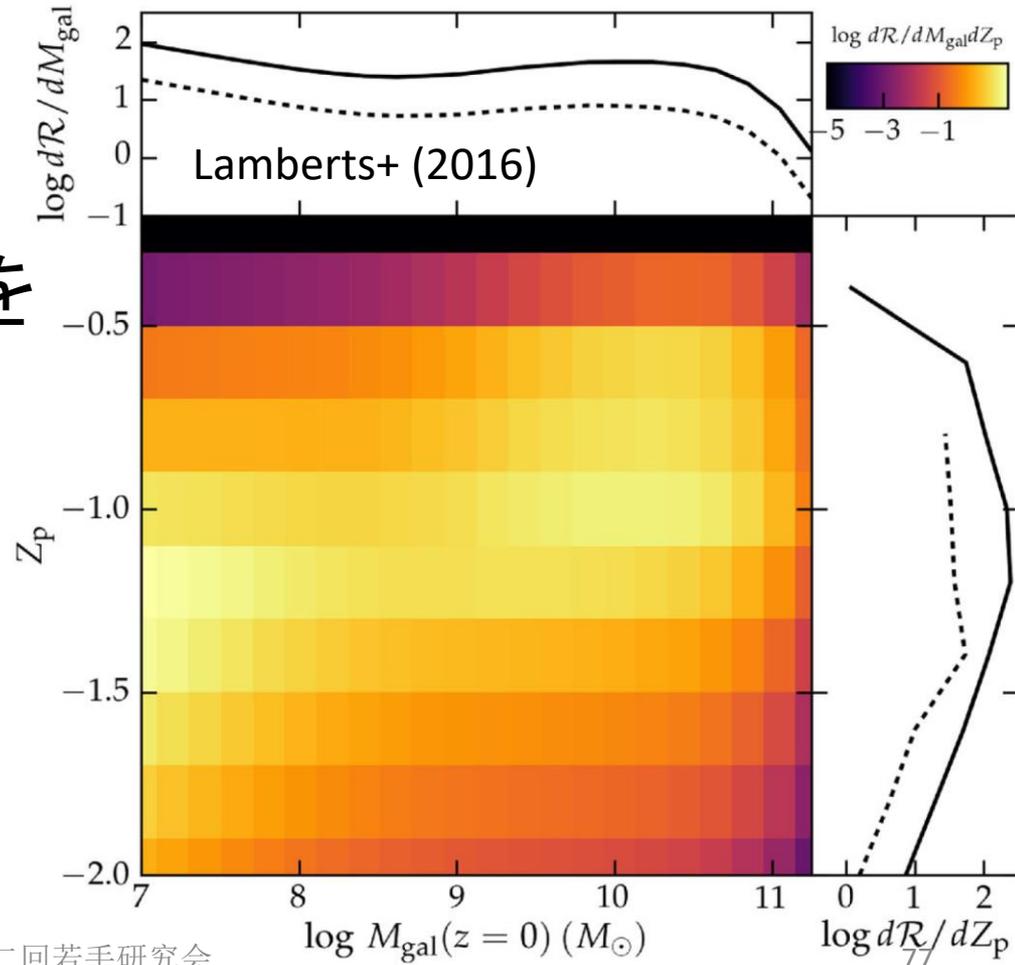
Hubble決定に伴う誤差

- 母銀河が大きめ($M_* > 10^9 M_\odot$)のとき
60個くらいの連星に対して母銀河が決まる
距離の統計誤差やショットノイズは問題なさそう
ボイドの影響は受ける (cosmic variance) 2-3%?
- これは今回見たい効果だと考えてもよい
- 母銀河が小さめ($M_* > 10^7 M_\odot$)のとき
15個くらいしか使えないので諸々厳しくなる
ただし連星の母銀河を調べること自体はできる

連星ブラックホールの母銀河

低金属量のものは軽い銀河が多いという話も...

典型的な母銀河を通して
ブラックホールの出自を
調べることも課題
LIGOでは難しいので
LISAで答える問題



他の重力波検出

- CMBのBモード偏光

$l > 100$ はほとんど重力レンズが作っているであろう
原始重力波には $l \sim 10$ が狙い目、宇宙...LiteBIRD?

- パルサータイミングアレイ

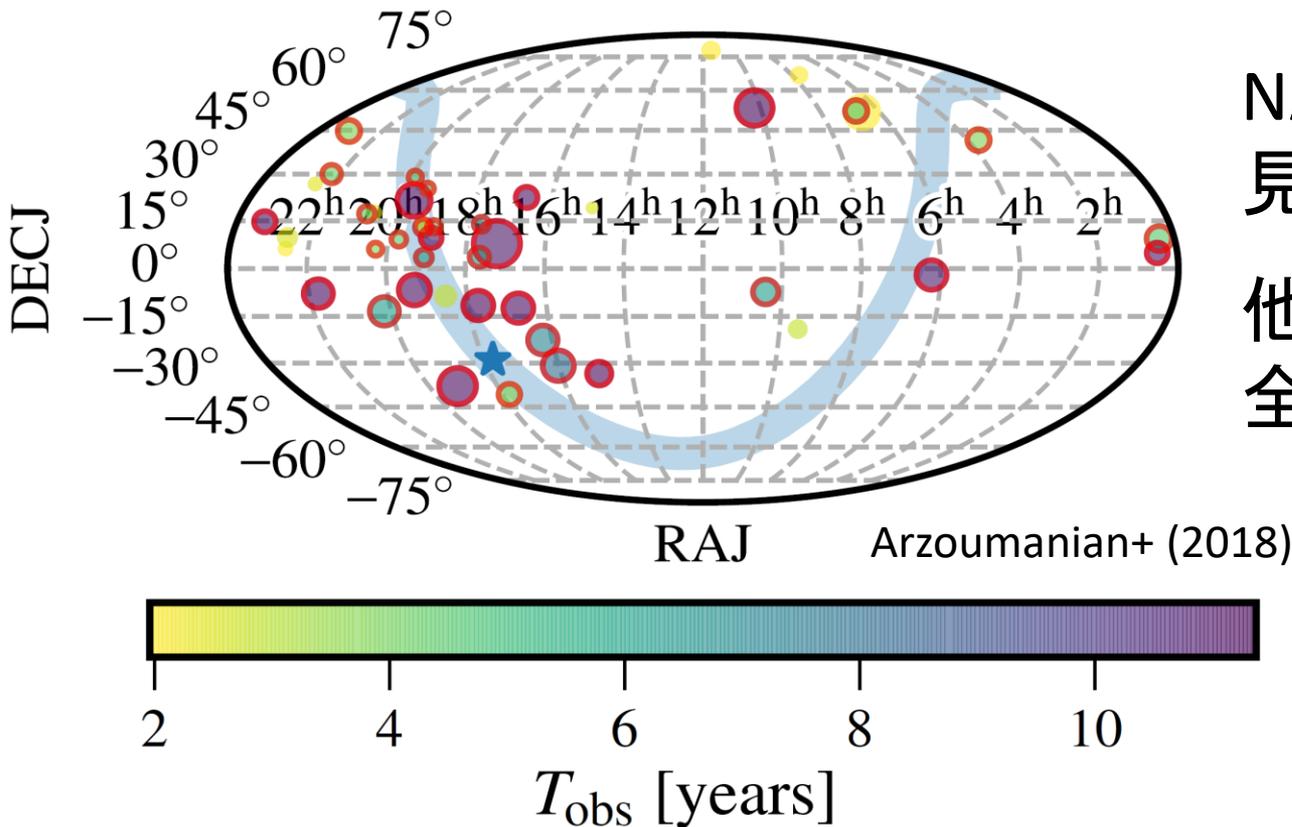
超大質量ブラックホール、宇宙(超)弦

- DECIGO/Big Bang Observatory

系内連星による雑音がなくなる0.1Hz付近を狙う
原始重力波の直接検出にはほぼ唯一の窓?

パルサータイミングアレイ

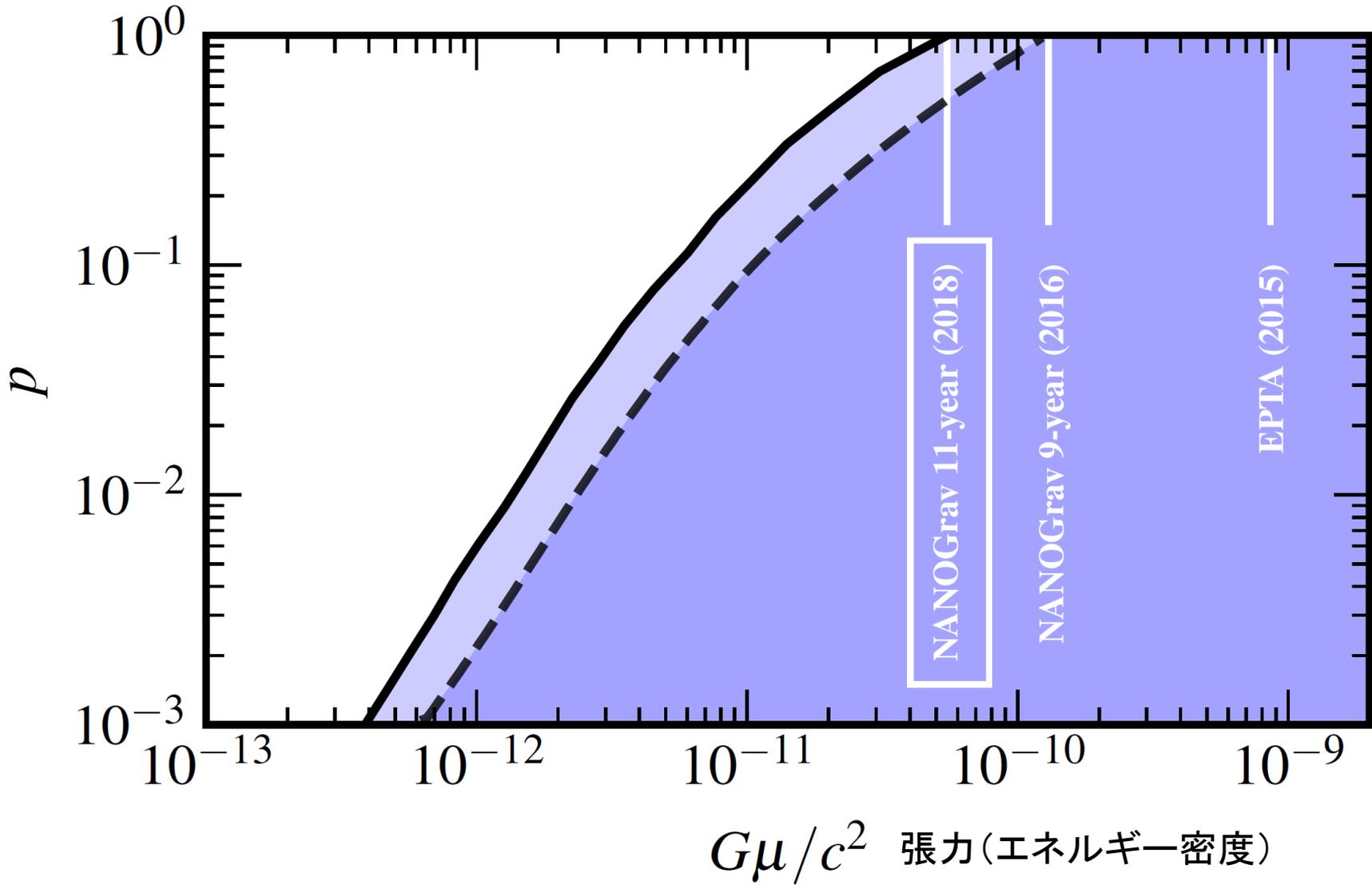
パルスの到来時刻が一斉に乱されるのを検出
観測期間の逆数 $\sim 1-10\text{nHz}$ の重力波に感度を持つ



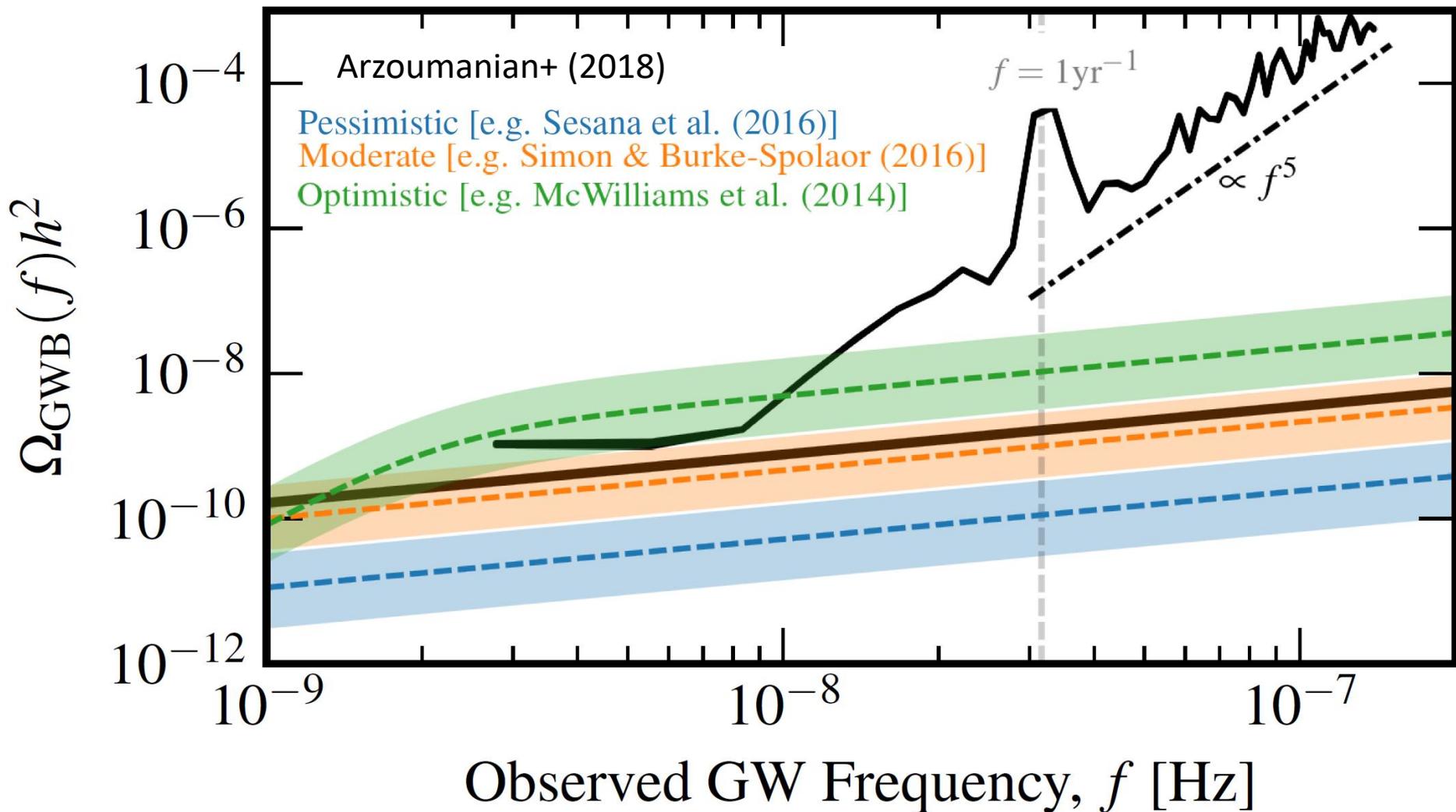
NANOGravの
見ているパルサー
他にEPTA, PPTA
全体のIPTAなど

宇宙(超)弦への制限

組み換え確率

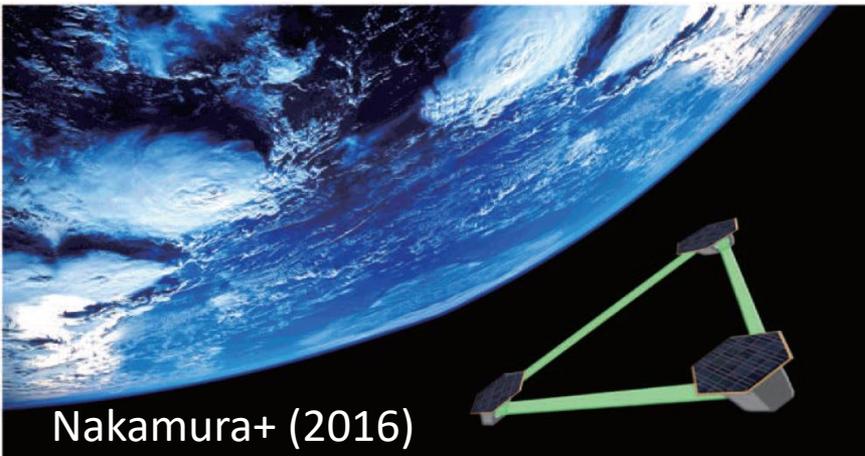


背景重力波への制限

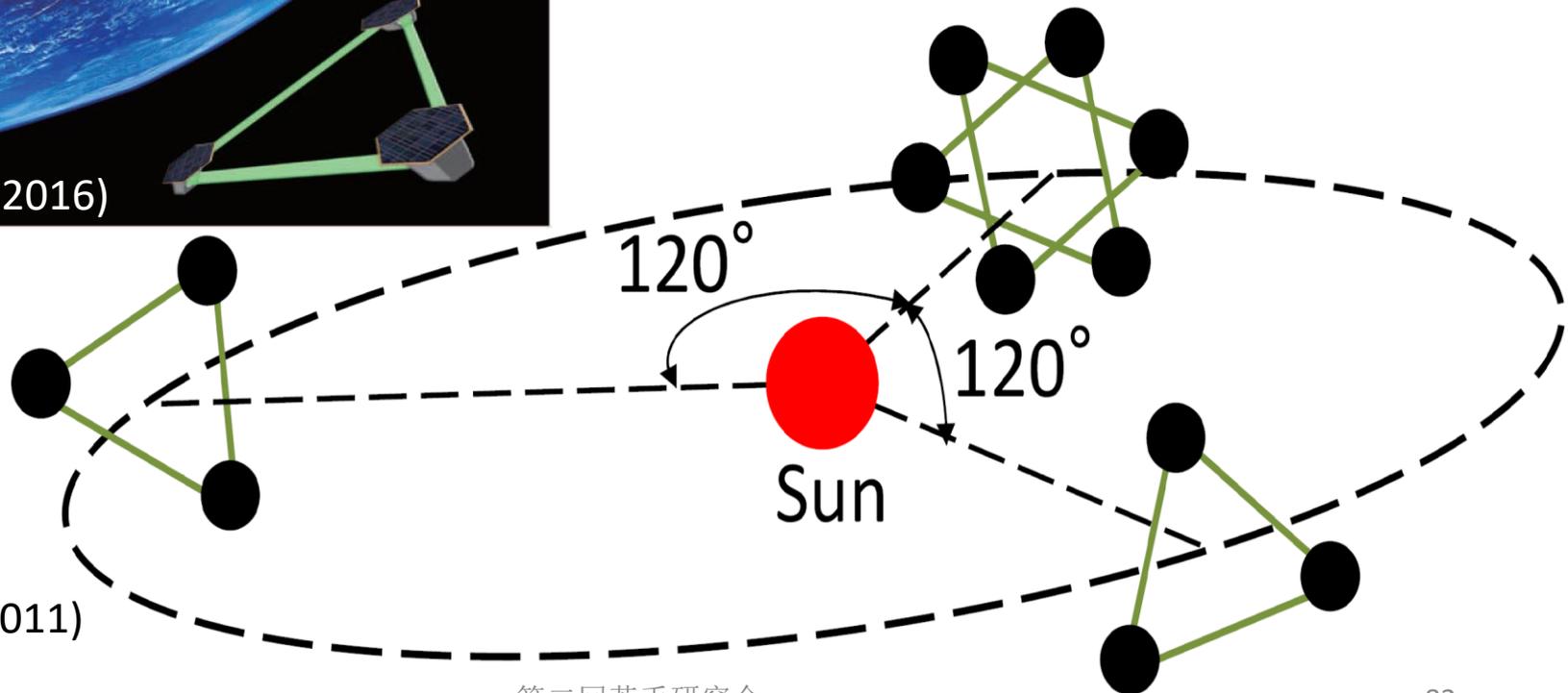


B-DECIGO/DECIGO

超高感度で $\sim 0.1\text{Hz}$ を狙う日本の計画 [Seto+ 2001]



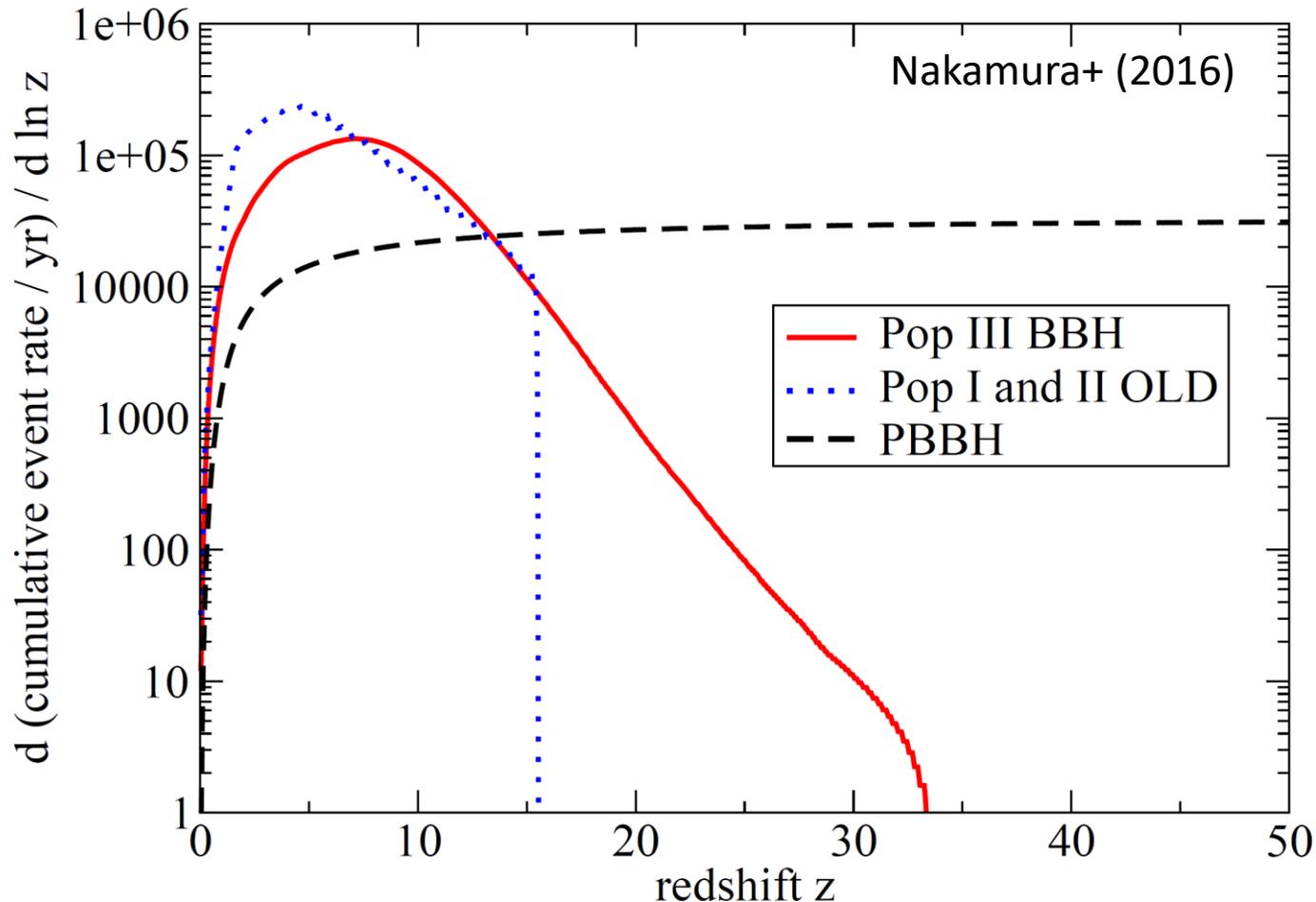
Nakamura+ (2016)



Yagi+ (2011)

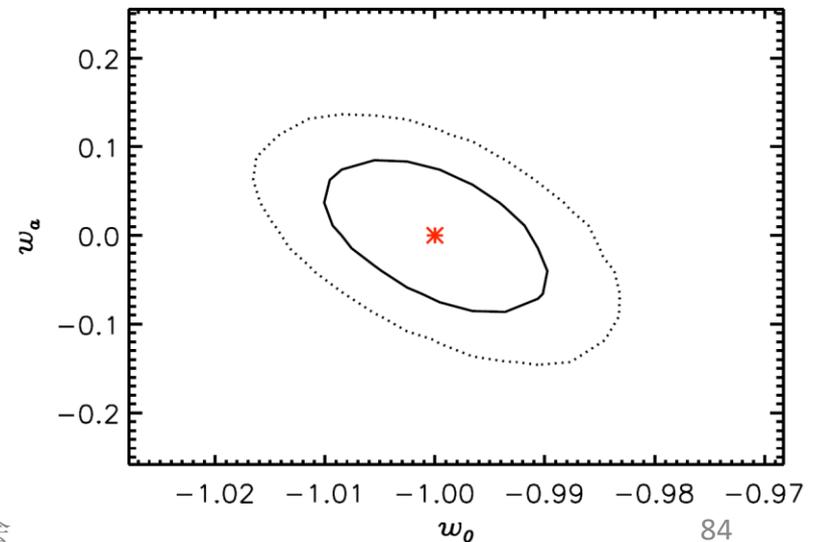
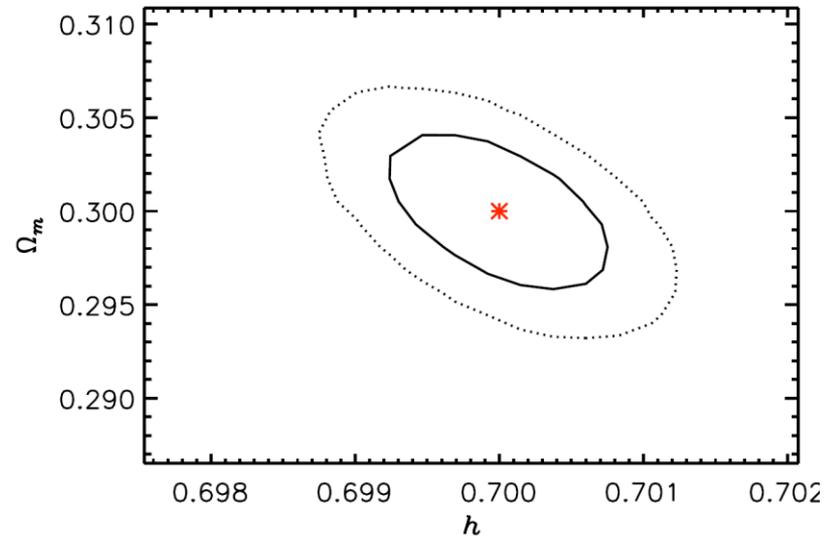
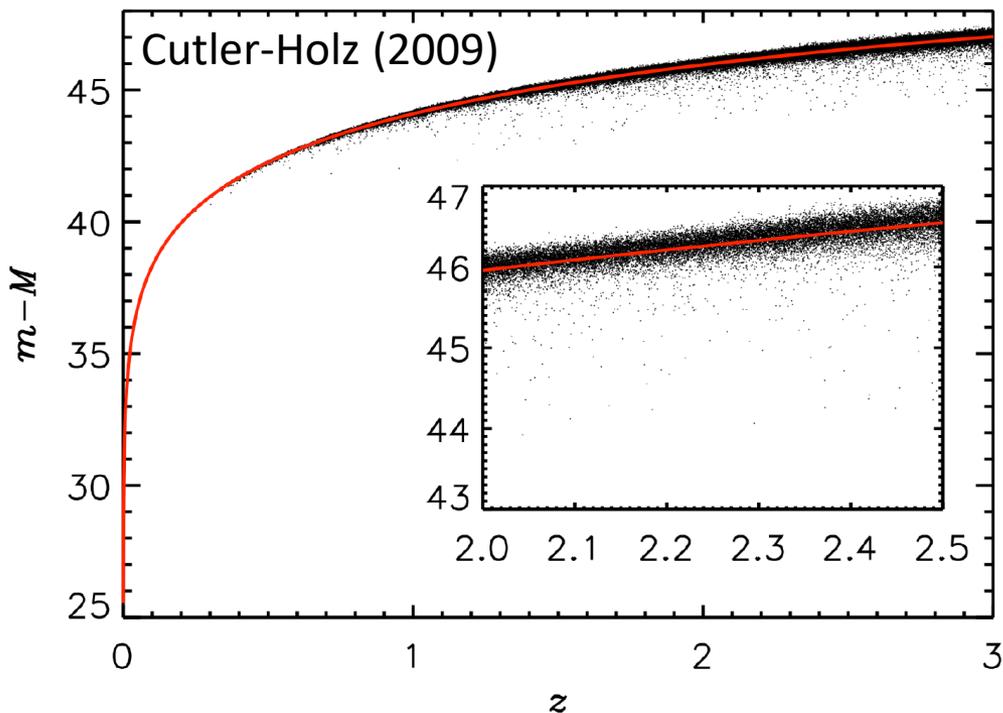
連星ブラックホールの赤方偏移分布

存在しさえすれば $z > 30$ の連星でさえも見える



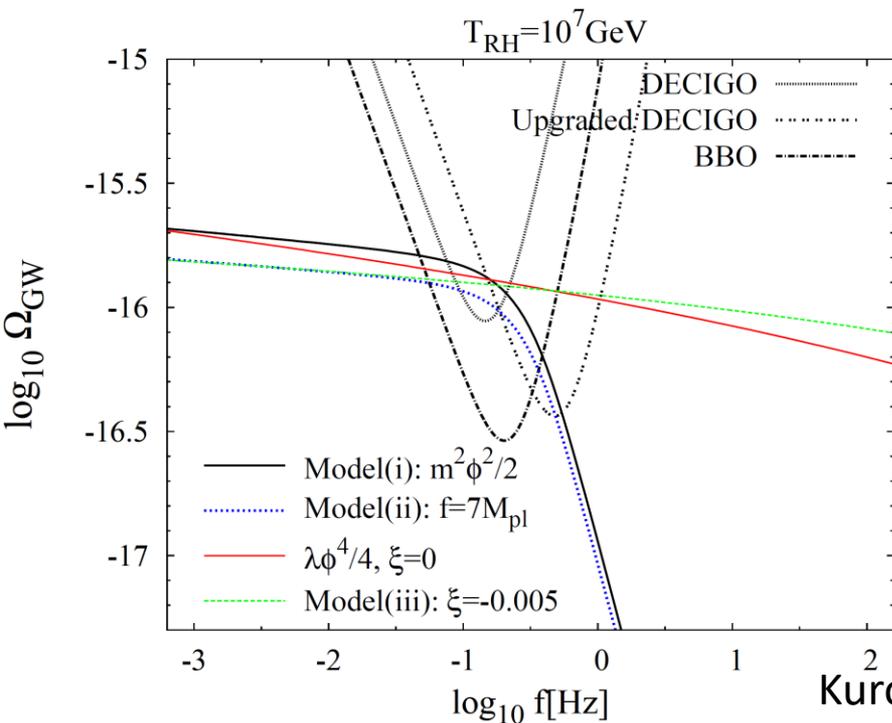
宇宙論パラメータ

大量のコンパクト連星を
高精度で検出できる
重力レンズで大規模構造も

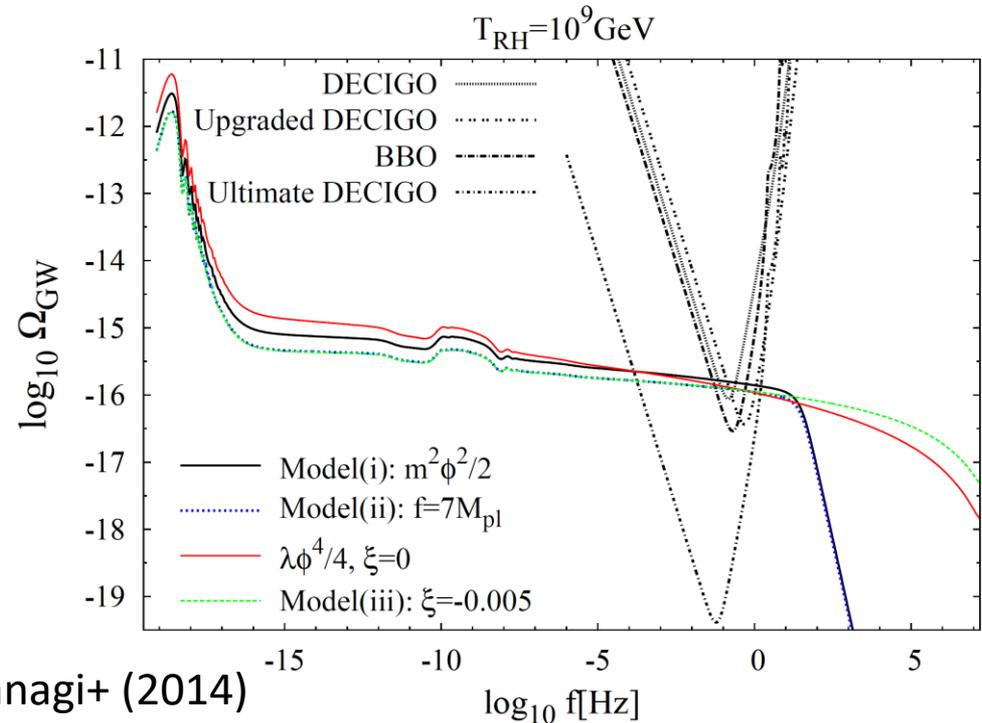


原始重力波

多波長で調べるならBモード+DECIGO/BBO？
 再加熱温度もわかるかもしれない



Kuroyanagi+ (2014)



5. まとめ

まとめ

- 連星合体からの重力波は多数見つかった
- 連星中性子星では電磁波放射も見つかった
- 特に重力波の伝播に諸々の制限がついた
- 地上では今後もより精度を上げて連星合体の検出を続けると期待される
- 宇宙ではLISAが2030年頃に稼働する予定だがパルサータイミングアレイも期待されている
- 原始重力波はBモード偏光かDECIGO/BBO

Appendix

連星ブラックホールとの違い

物質の存在 : Einstein方程式の「右辺」

- 連星ブラックホールではただの $R_{\mu\nu} = 0$

流体の運動(流体力学)が本質的に重要

- 星の潮汐変形によって軌道運動が変わる

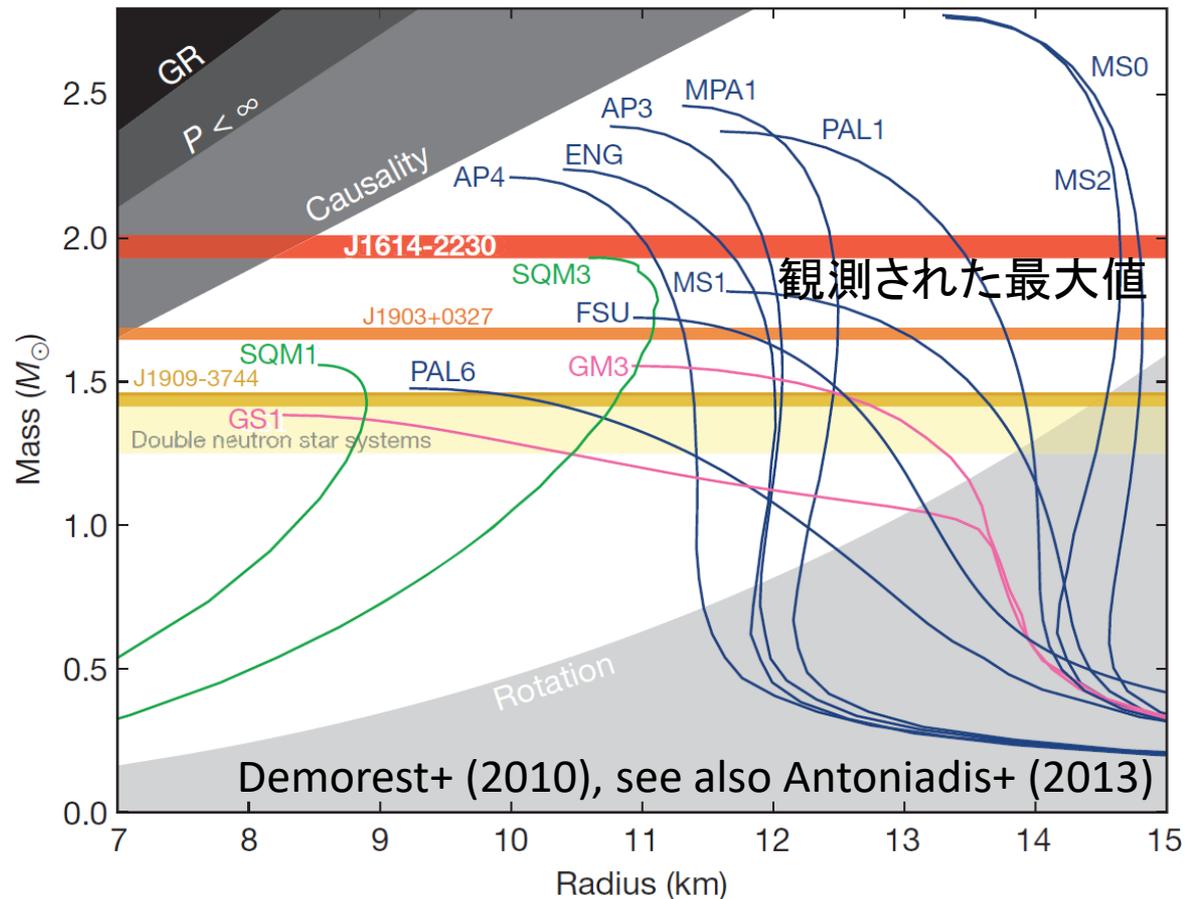
4つの相互作用全てが重要になる

- 核力が状態方程式を定めている
- 磁場が合体後の系の運動や放射を影響する
- 高温になった物質がニュートリノで冷却される

中性子星の最大質量

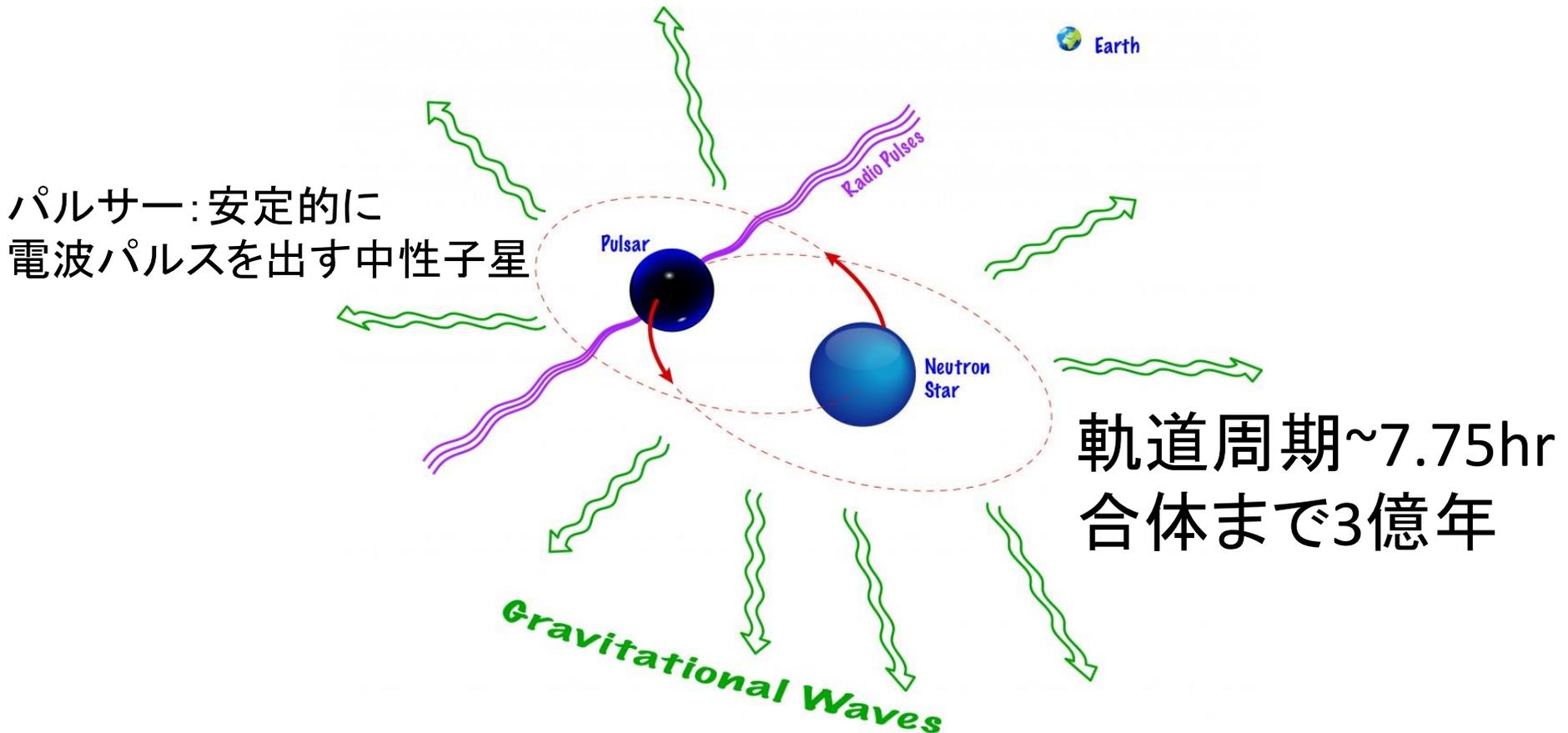
状態方程式のモデルに厳しい制限を課している

エキゾチックな
粒子の出現は
(quark, hyperon...)
最大質量を下げ
特に不利になる
傾向がある



PSR B1913+16によるテスト

Hulse-Taylorの連星パルサーとも(1974発見)



<http://asd.gsfc.nasa.gov/blueshift/wp-content/uploads/2016/02/htbinarypulsar-1024x835.jpg>

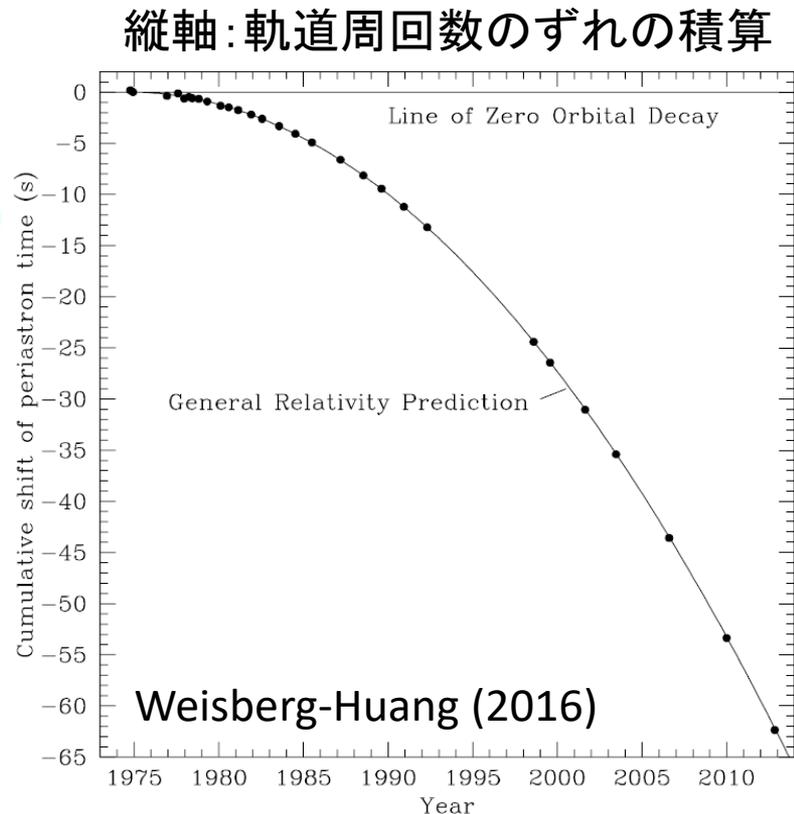
重力波放射の観測的証拠

PSR B1913+16の軌道減衰

$$\dot{P}_b^{\text{GR}} = -\frac{192 \pi G^{5/3}}{5 c^5} \left(\frac{P_b}{2\pi}\right)^{-5/3} \left(1 + \frac{73}{24} e^2 + \frac{37}{96} e^4\right) \times (1 - e^2)^{-7/2} m_1 m_2 (m_1 + m_2)^{-1/3}$$

1963年(!)に導かれている
一般相対論の予言と
~1シグマで40年間整合

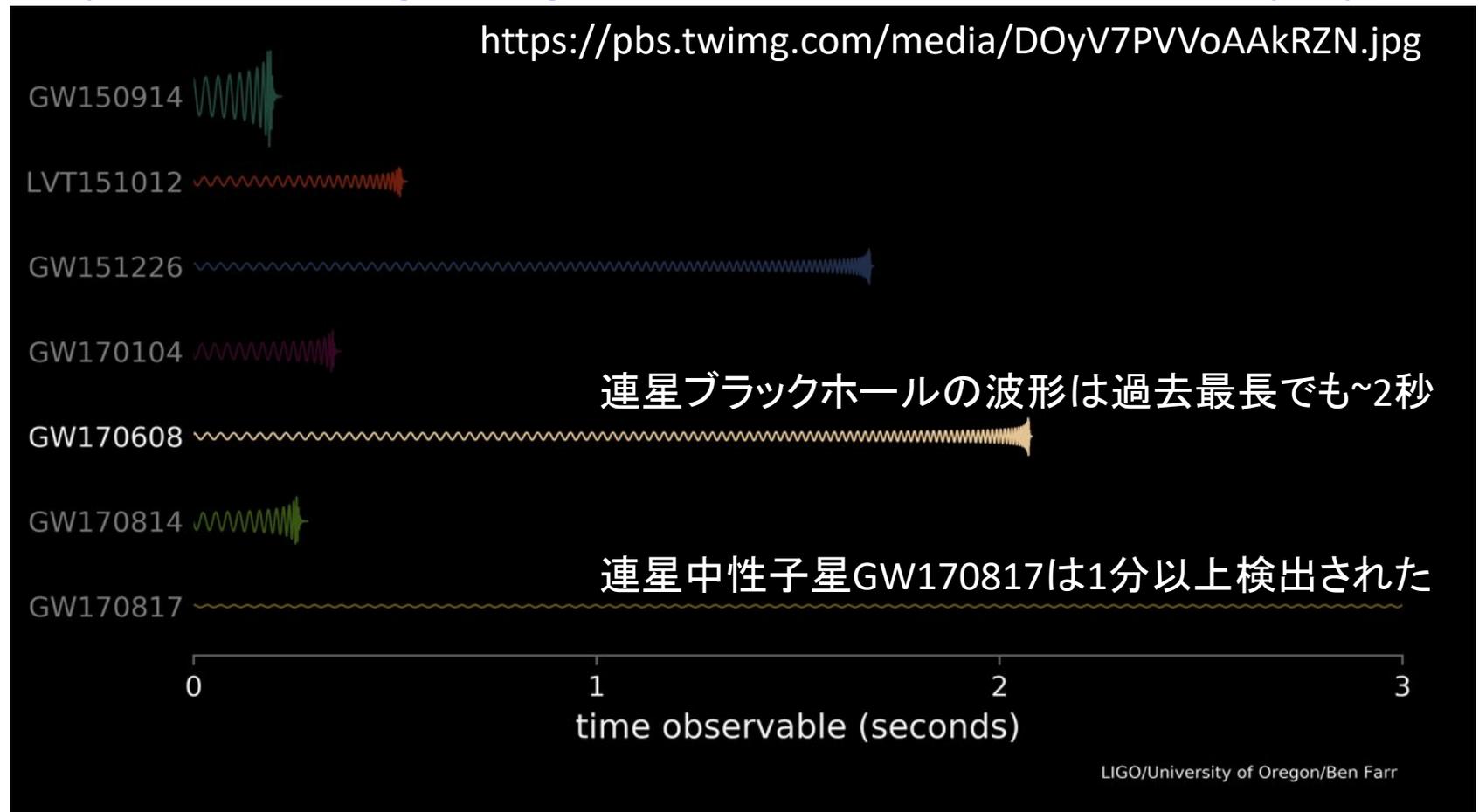
ただし重力波の伝播の確認には直接検出が必須



GW170817

<http://www.ligo.org/detections/GW170817.php>

<https://pbs.twimg.com/media/DOyV7PVVoAAkRZN.jpg>



GW170817のパラメータ

Low-spin: 銀河系で見つかっている、Hubble時間で合体する連星中性子星でのスピン程度に限定

High-spin: 重力波波形が通用する範囲で広く取る
(例えば軽いブラックホールなどはこちらが妥当)

LIGO&Virgo (2017)	Low-spin priors ($ \chi \leq 0.05$)	High-spin priors ($ \chi \leq 0.89$)
Primary mass m_1	1.36–1.60 M_\odot	1.36–2.26 M_\odot
Secondary mass m_2	1.17–1.36 M_\odot	0.86–1.36 M_\odot
Chirp mass \mathcal{M}	$1.188^{+0.004}_{-0.002} M_\odot$	$1.188^{+0.004}_{-0.002} M_\odot$
Mass ratio m_2/m_1	0.7–1.0	0.4–1.0
Total mass m_{tot}	$2.74^{+0.04}_{-0.01} M_\odot$	$2.82^{+0.47}_{-0.09} M_\odot$
Radiated energy E_{rad}	$> 0.025 M_\odot c^2$	$> 0.025 M_\odot c^2$
Luminosity distance D_L	40^{+8}_{-14} Mpc	40^{+8}_{-14} Mpc
Viewing angle Θ	$\leq 55^\circ$	$\leq 56^\circ$
Using NGC 4993 location	$\leq 28^\circ$	$\leq 28^\circ$
Combined dimensionless tidal deformability $\tilde{\Lambda}$	≤ 800	≤ 700
Dimensionless tidal deformability $\Lambda(1.4M_\odot)$	≤ 800	≤ 1400

パラメータの定義

全質量 $M = m_1 + m_2$

換算質量 $\mu = m_1 m_2 / M$

チャープ質量 $\mathcal{M}_c = \mu^{3/5} M^{2/5}$

対称質量比 $\eta = \mu / M$

連星の潮汐変形率 ($m_1 \leq m_2$)

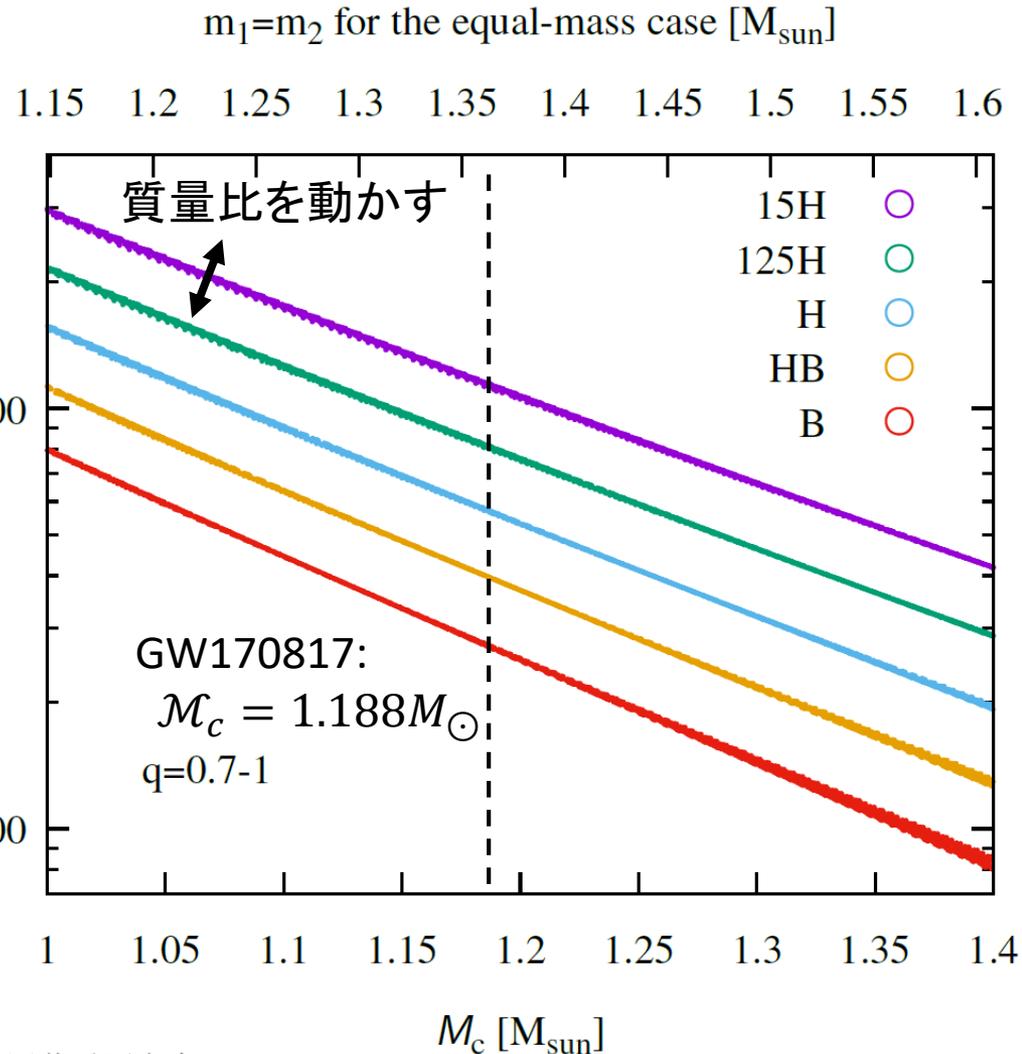
$$\tilde{\Lambda} = \frac{8}{13} [(1 + 7\eta - 31\eta^2)(\Lambda_1 + \Lambda_2) - \sqrt{1 - 4\eta}(1 + 9\eta - 11\eta^2)(\Lambda_1 - \Lambda_2)]$$

$\tilde{\Lambda} - \mathcal{M}_c$ の強い相関

重力波で測られる $\tilde{\Lambda}$ は
チャープ質量 \mathcal{M}_c と
強く相関している

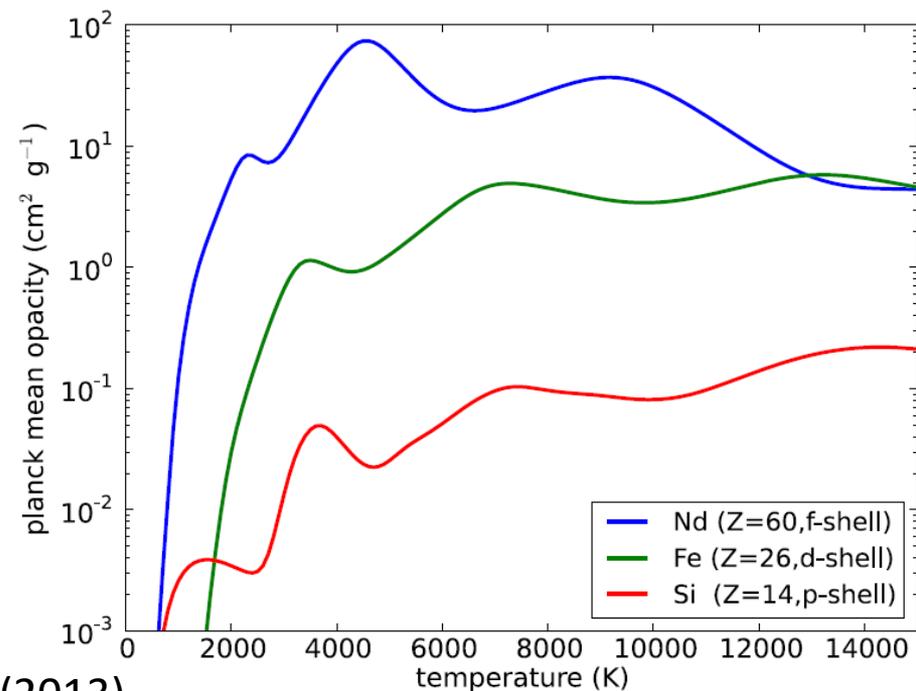
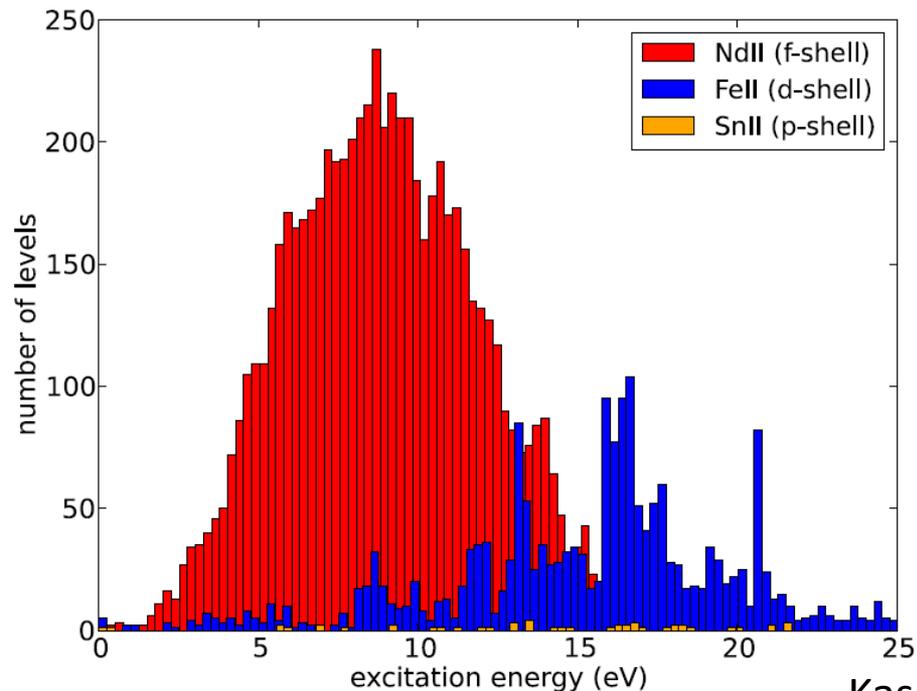
$\Lambda(M = 2^{1/5} \mathcal{M}_c)$ が \ll
実質的に制限される

>13kmはnot favored



ランタノイドの複雑な準位構造

エネルギー準位なり電子の配位が多いと吸収線が複雑になり、頻繁に当たるせいで光が抜けにくい
データは足りず、理論計算も困難(量子多体系)



Kasen+ (2013)

第二回若手研究会

可視突発天体としての独特さ

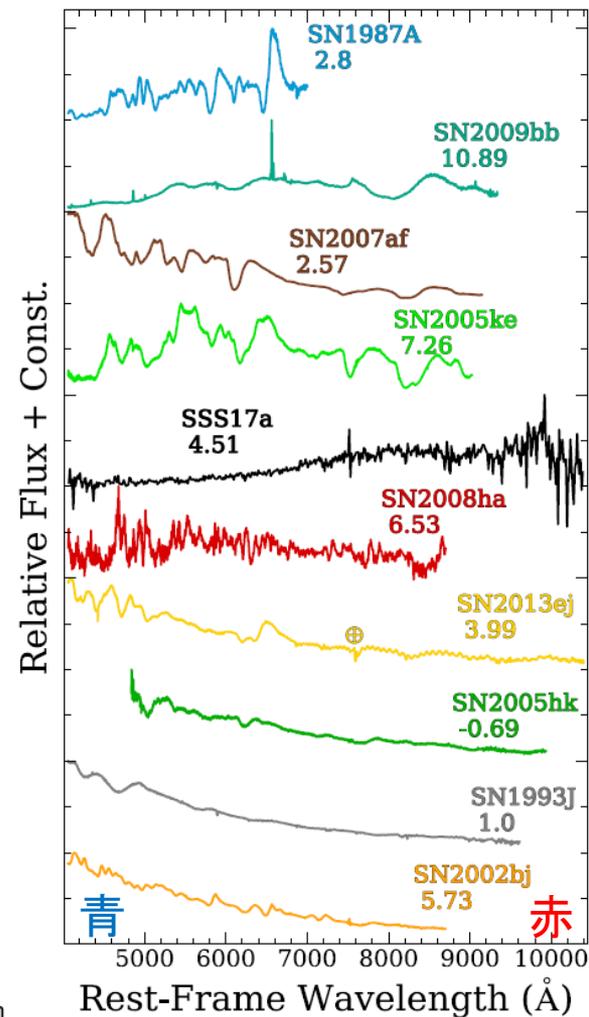
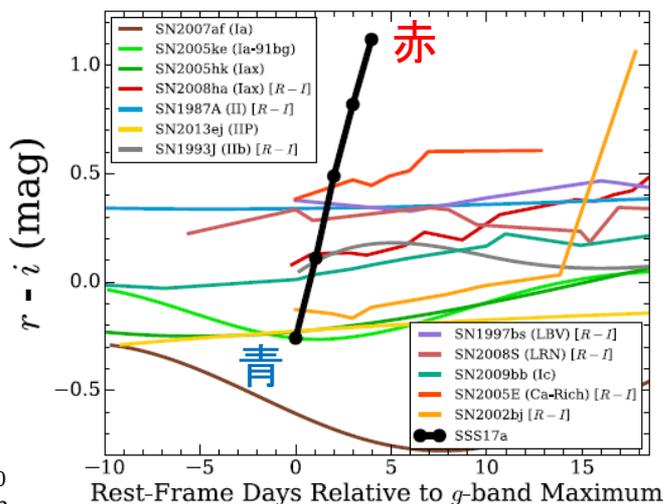
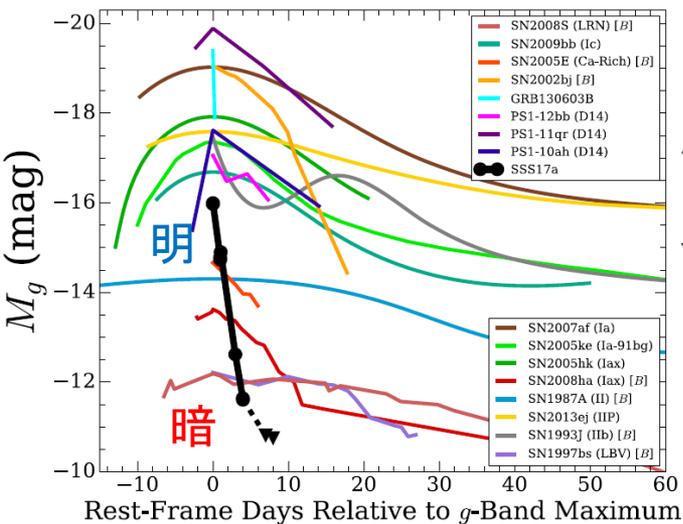
キロノヴァ(のみ)と整合する

黒 (SSS17a=AT 2017gfo): 今回のイベント
 色付き: 既知の可視突発天体

構造のない赤いスペクトル

早い減光

早い赤化



キロノヴァ/マクロノヴァの特性

球対称エジェクタ (Li-Paczynski 1998, also Arnett 1982)

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

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

加熱効率 f と不透明度 κ – microphysics

r過程元素が高い不透明度を持つのは特に重要

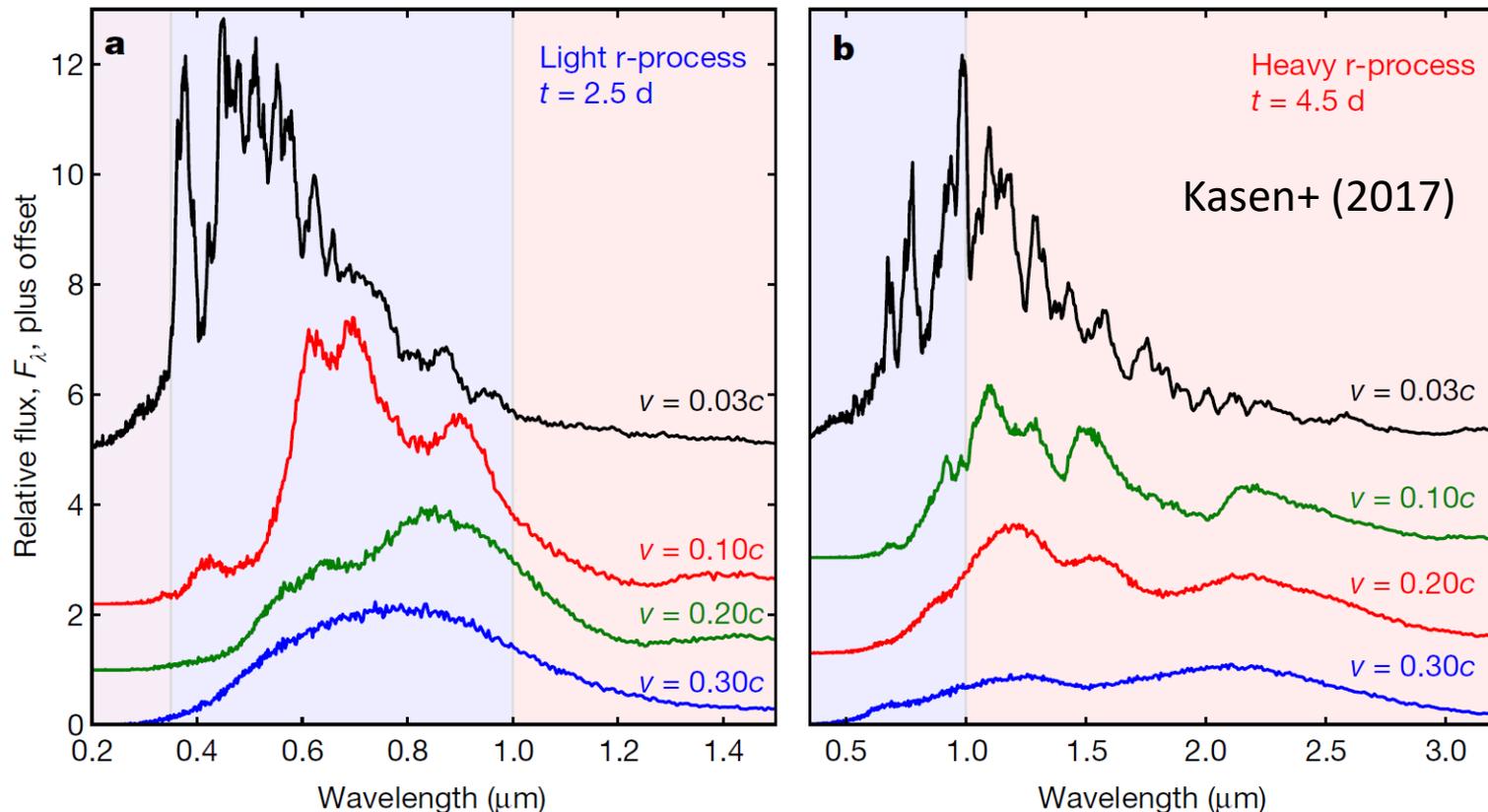
エジェクタ質量 M とエジェクタ速度 v – macrophysics

軽くて速い (例えば超新星爆発と比べて)

なぜ2成分？

初期のスペクトルは青く、特徴や構造がない

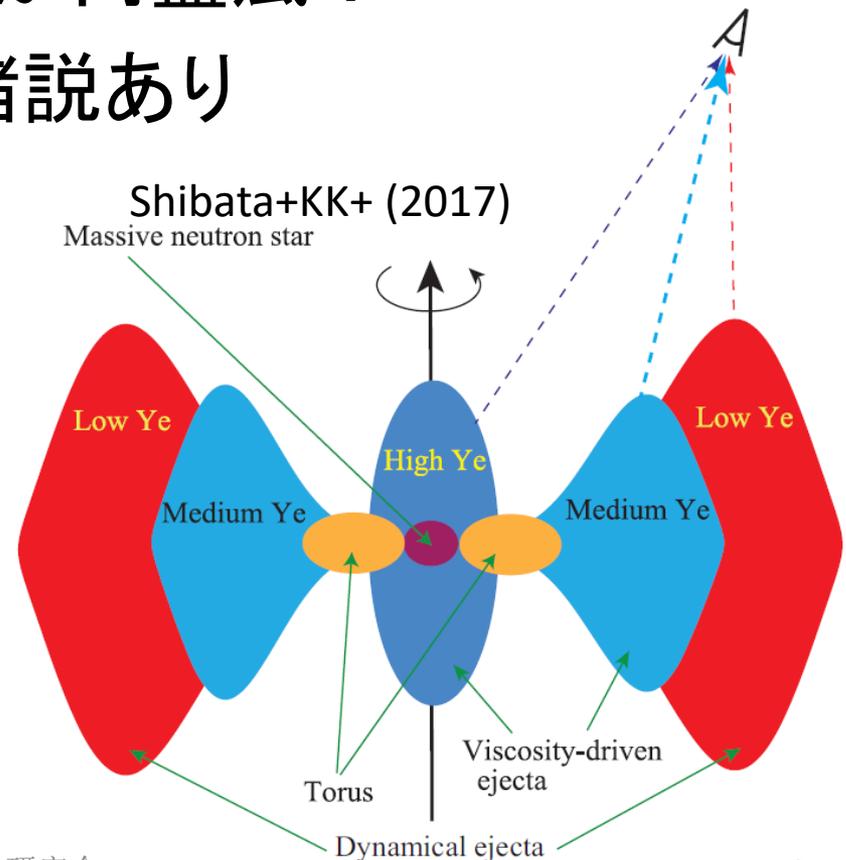
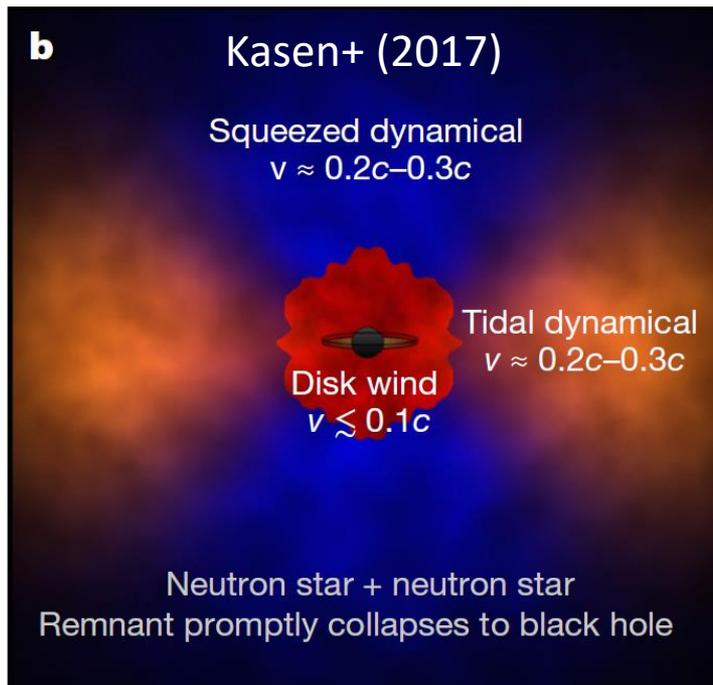
後期のスペクトルは赤く、幅広の構造がある



理論解釈

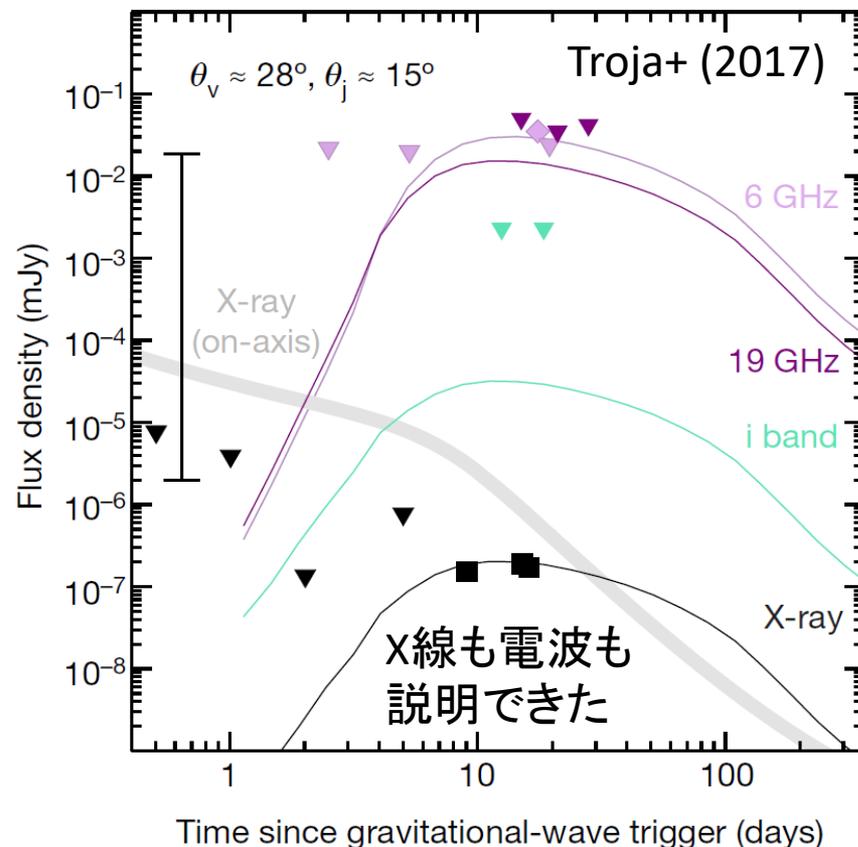
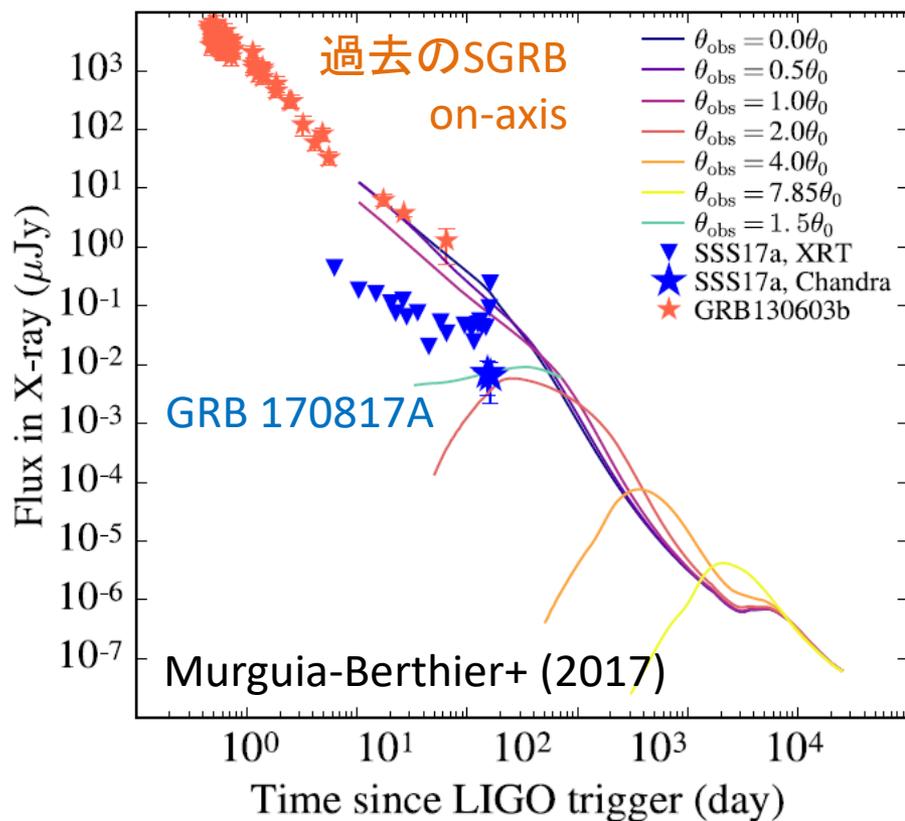
速い軽r過程元素 + 遅い重r過程元素が有力説

- 後者は力学的質量放出か円盤風？
- 前者はどこから来た？ 諸説あり



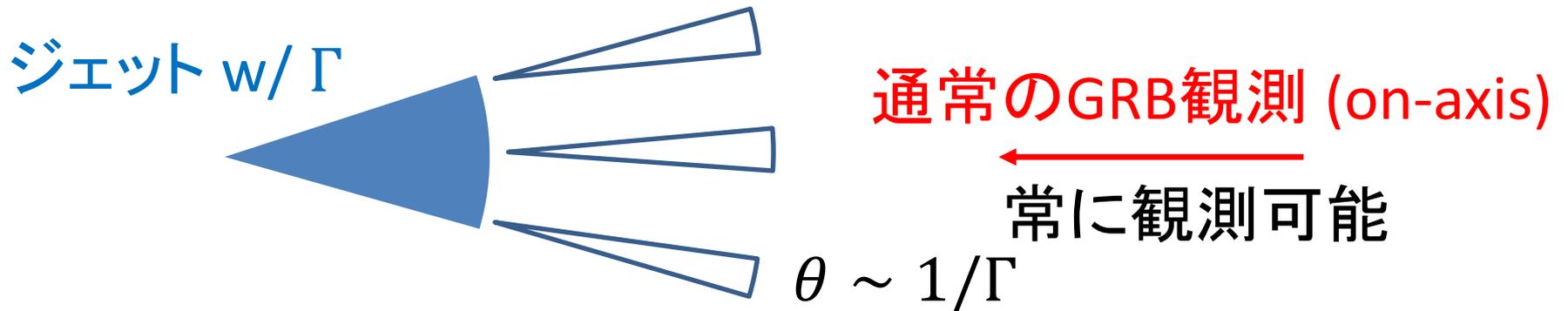
Off-axis? 初期のX線・電波残光

10/16の段階で正面から見た (on-axis) GRBは否定
 ジェットを斜めから見た解釈が自然だった (off-axis)



相対論的ビーミング

相対論的速度で運動している物体からの放射は前方の $\theta \sim 1/\Gamma$ 程度に集中する



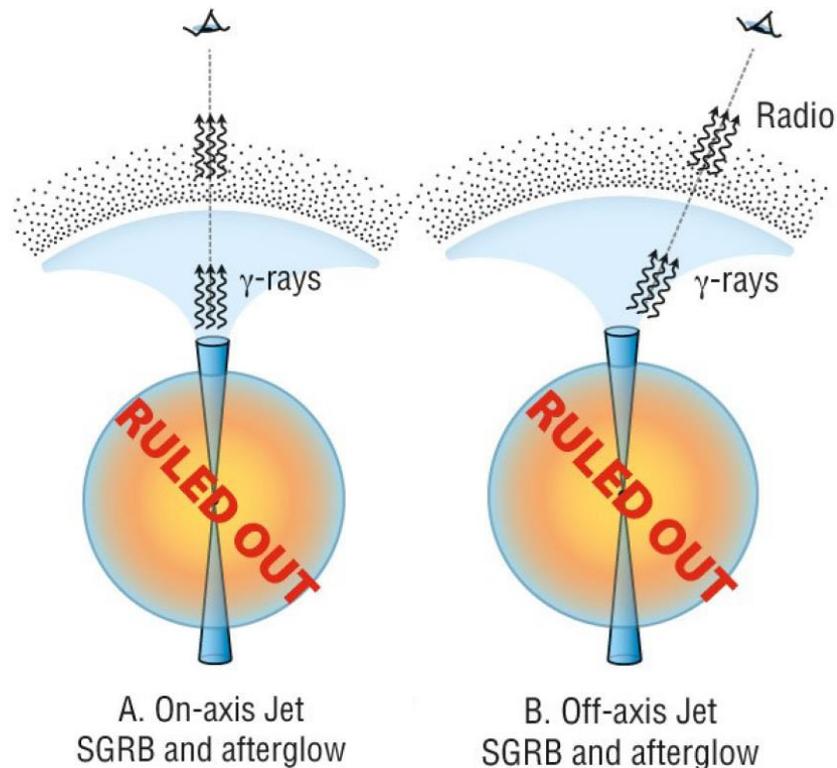
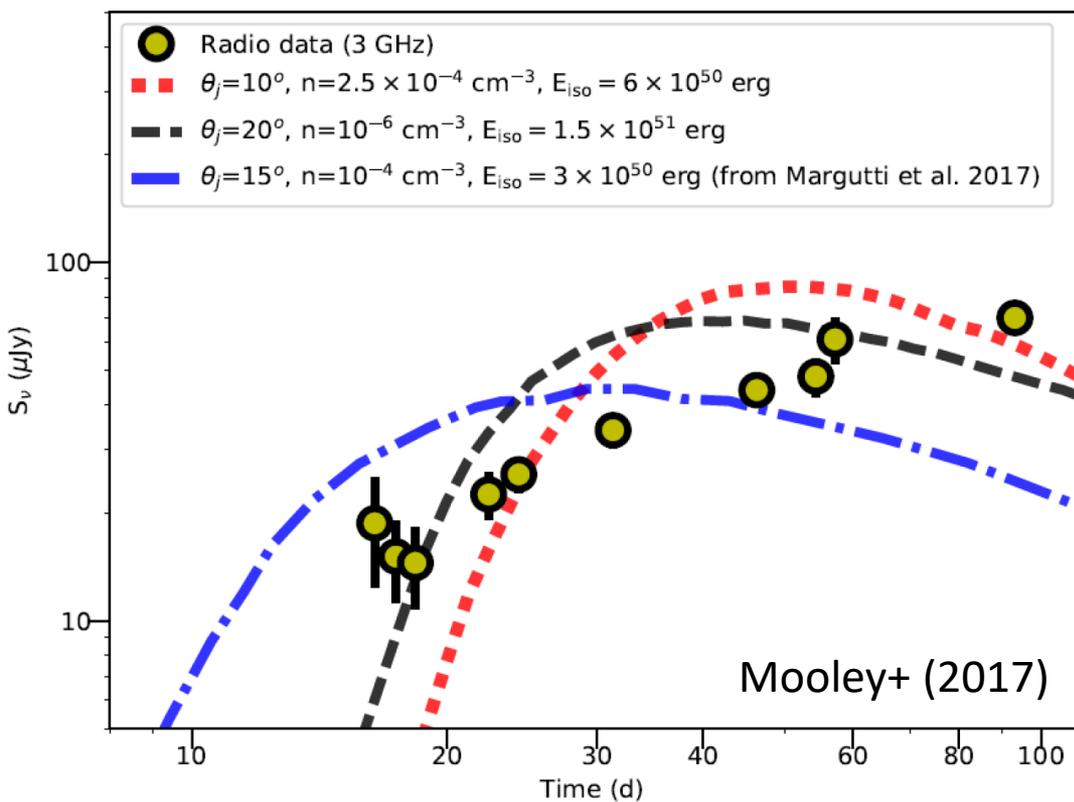
残光の放射過程は
ジェット vs 周囲の物質で
衝撃波を立てた末の
非熱的シンクロトロン
(電子加速・磁場増幅)

斜めから見た観測者 (off-axis)

ジェットが $\Gamma < 1/\theta_{\text{obs}}$
程度に減速して初めて
観測できるようになる

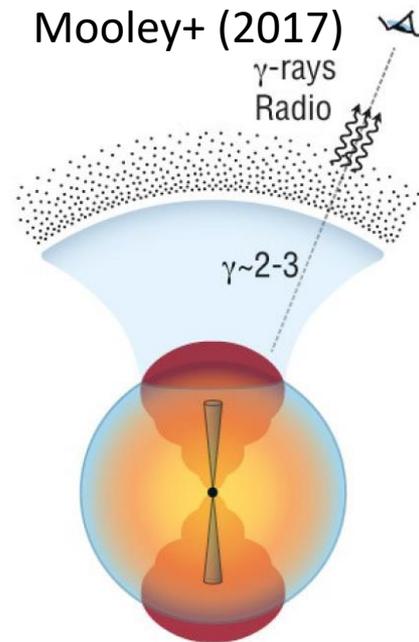
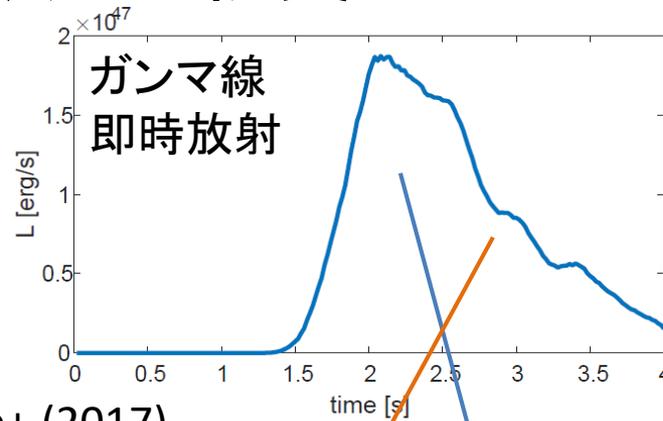
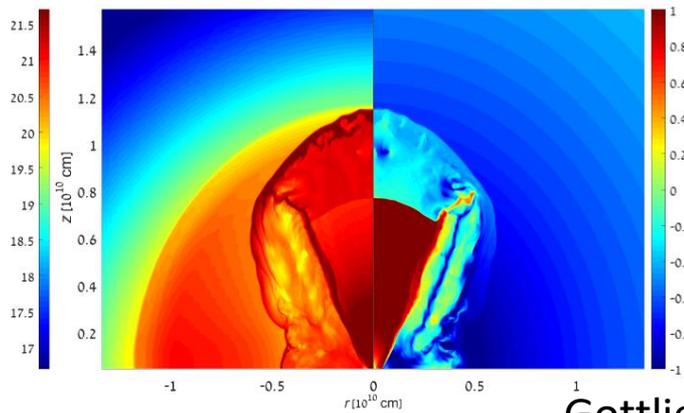
100日に渡る電波の観測

単純な (top hat) 超相対論速度のジェットは棄却
(ただしこの“rules out”は強すぎるように思う)

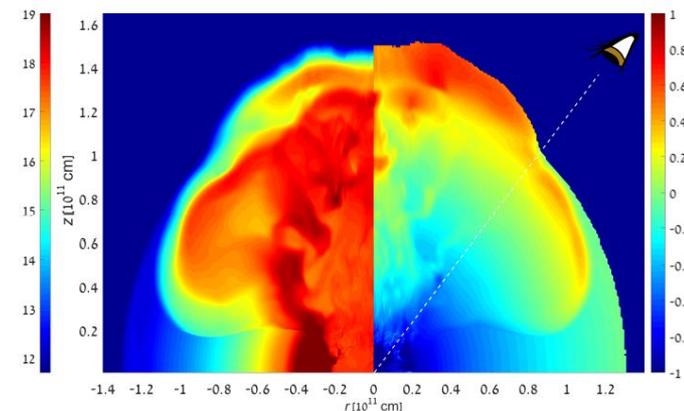
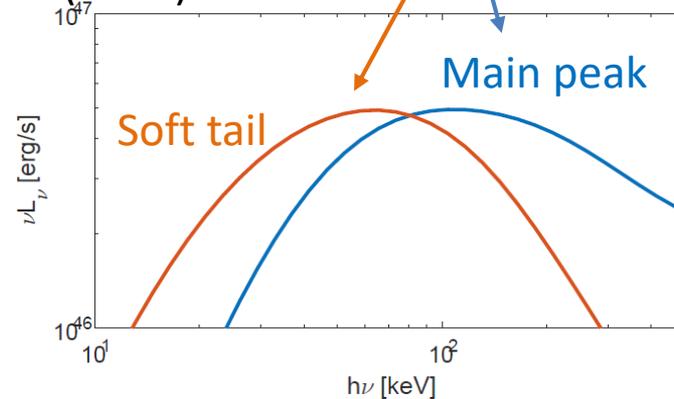


Chocked jetによるコクーン？

ジェットがエジェクタ(キロノヴァになる)に衝突してエネルギーを散逸し、熱い物質がブレイクアウト



Gottlieb+ (2017)

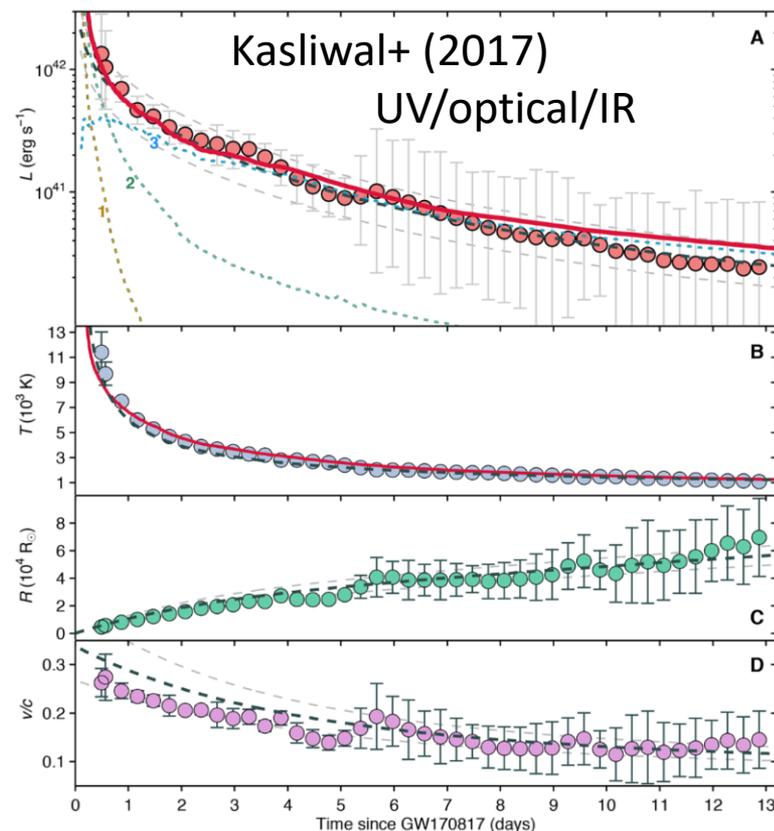
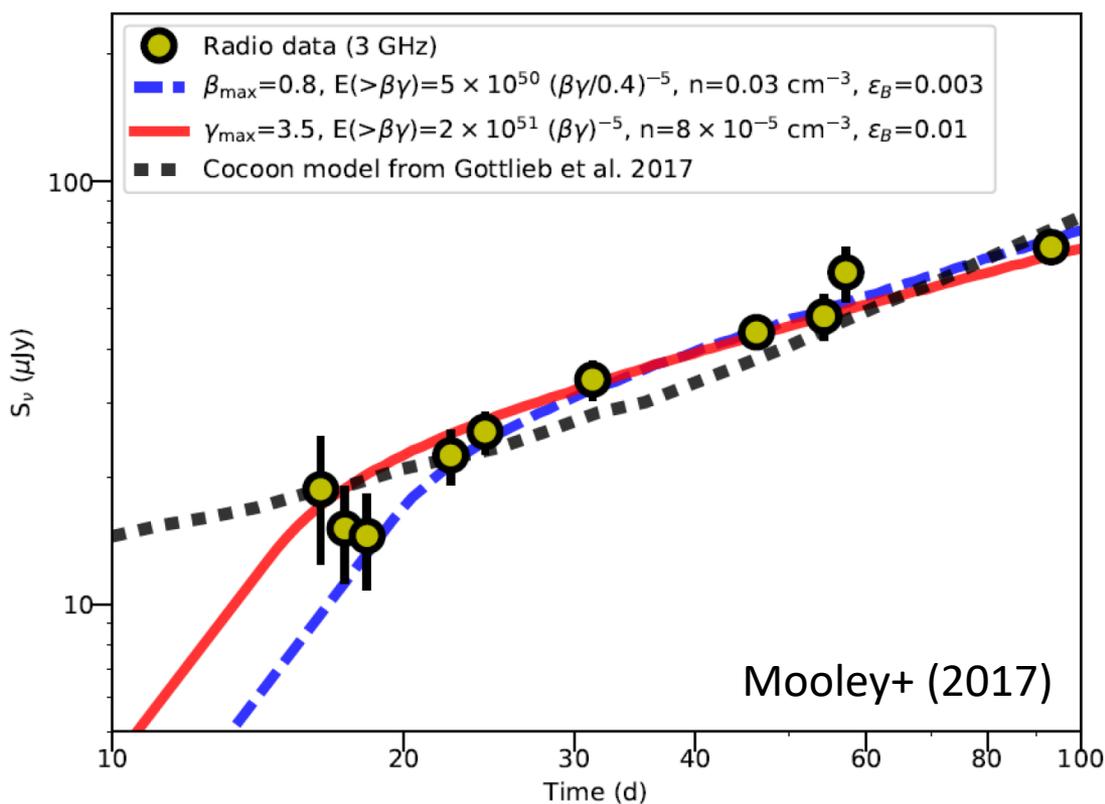


C. Choked Jet Cocoon γ -rays and afterglow (Most likely)

電波観測との整合性

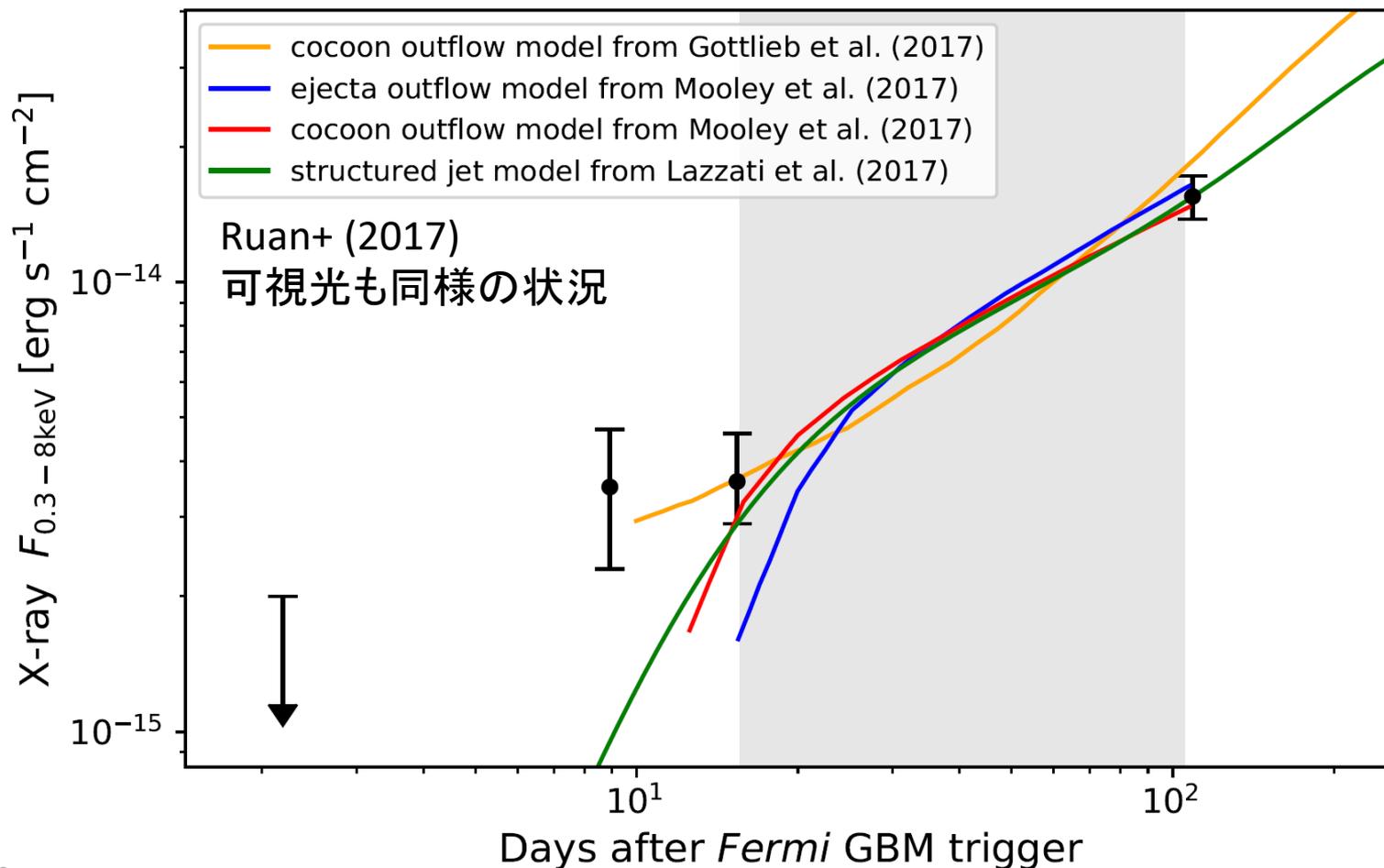
~1日後の青いキロノヴァを説明するにも好都合

→ GRB 170817Aは典型的なショートGRBではない



100日後のX線

電波観測と整合していて、ジェットが必要ではない



要請：エジェクタの高速成分

ガンマ線観測を説明するには $\sim 10^{-7} - 10^{-6} M_{\odot}$
が $> 0.5 - 0.6c$ で飛んでいる必要がある

- 力学的質量放出？ (e.g., Hotokezaka+KK+ 2013)

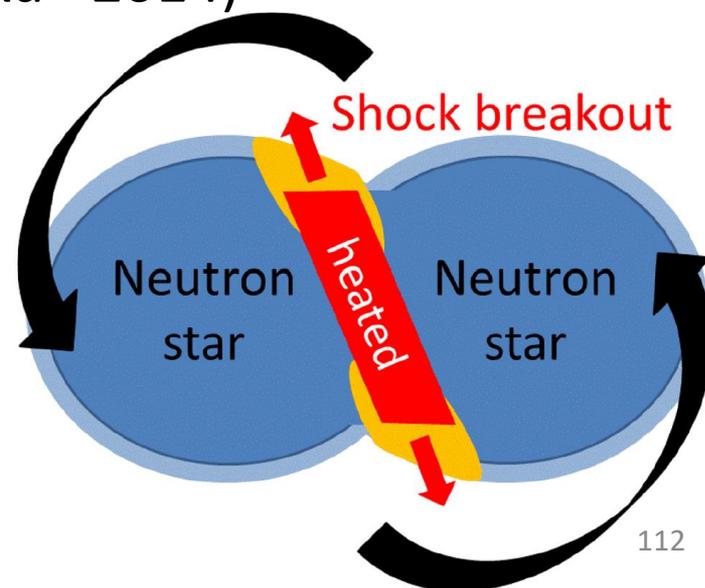
速い成分がこれだけ極方向に飛ばせるか不明

- 合体ブレイクアウト？ (Kyutoku+ 2014)

比較的よくわからないもので

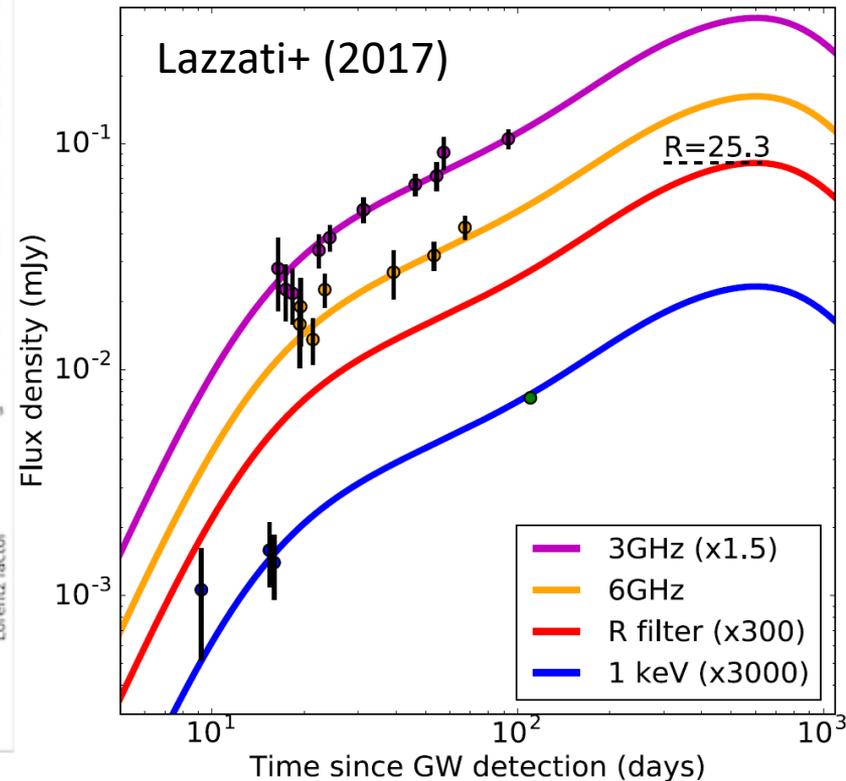
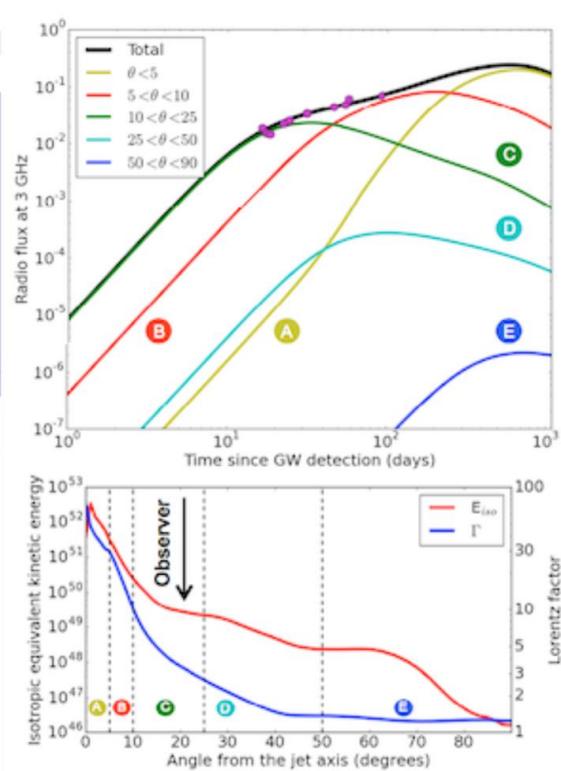
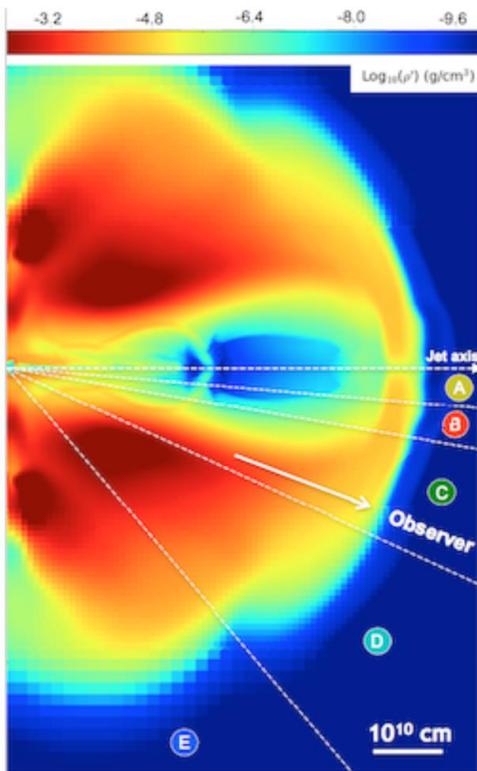
よくわからないものを説明...

X線・電波はこれだけでOK(?)



Structured jet?

超相対論的なジェットが棄却されるわけではない
(ただしコクーン的な成分はどちらかにせよ必要)



時間差による基礎物理

今回、重力波-ガンマ線の到来時刻差は1.7秒

- 40Mpcは概ね1億光年 $\sim 4e15$ 秒に対応

GRBのモデルに対する今回の仮定は

「ガンマ線は重力波の0-10秒後にしか出ない」

- 1000秒遅れるモデルがありえないことはない

→重力波-電磁波の伝播時間差に厳しい制限

「本当はすごく差があったが、偶然により1.7秒になった」は、今後違う距離で見えたとすぐに死ぬ

重力波・電磁波の速度差

時間差は $\Delta t = (D/v_{\text{GW}}) - (D/v_{\text{EM}})$ なので
速度差 $\Delta v := v_{\text{GW}} - v_{\text{EM}}$ に対して

$$-3 \times 10^{-15} \leq \frac{\Delta v}{v_{\text{EM}}} \leq 7 \times 10^{-16}$$

が要請される

- 下限は重力波が遅れたため10秒→1.7秒に
 - 上限は電磁波が遅れたため0秒→1.7秒に
- GRBモデルを緩めれば現状それだけ緩くなる

星取表？

色々な理論で抵触するらしい(パラメータ次第？)

$c_g = c$

$c_g \neq c$

Horndeski

General Relativity

quintessence/k-essence [42]

Brans-Dicke/ $f(R)$ [43, 44]

Kinetic Gravity Braiding [46]

quartic/quintic Galileons [13, 14]

Fab Four [15, 16]

de Sitter Horndeski [45]

$G_{\mu\nu}\phi^\mu\phi^\nu$ [47], Gauss-Bonnet

beyond H.

Derivative Conformal (20) [18]

Disformal Tuning (22)

DHOST with $A_1 = 0$

quartic/quintic GLPV [19]

DHOST [20, 48] with $A_1 \neq 0$

Viable after GW170817

Non-viable after GW170817

Ezquiaga-Zumalacarregui 1710.05901

(弱い?) 等価原理の破れ

重力ポテンシャルを通る際のシャピロ時間遅れが重力波と電磁波とで同程度ということから

$$-2.6 \times 10^{-7} \leq \gamma_{\text{GW}} - \gamma_{\text{EM}} \leq 1.2 \times 10^{-6}$$

この γ は「重力ポテンシャルにより空間がどのくらい曲がるか」を規定する量で、一般相対論なら1
弱い等価原理の破れへの制限だと言えるはず

過去の強い制限はCassiniによる電磁波への

$$\gamma_{\text{EM}} - 1 \leq (2.1 \pm 2.3) \times 10^{-5}$$

Shapiro時間遅れ

計量が (parametrized post-Newtonian)

$$g_{tt} = -(1 - 2U)$$

$$g_{ij} = (1 + 2\gamma U)f_{ij}$$

U は符号を逆にした重力ポテンシャル $\sim GM/r$

(特に高次効果を考える場合にはよく用いられる)

Shapiro時間遅れは

$$\delta t = -\frac{1 + \gamma}{c^3} \int U(\mathbf{r}) dl$$

一般相対論では全ての粒子に対して $\gamma = 1$

Lorentz不変性(方向依存性)

Lorentz不変性が重力・電磁気力のセクターで各々異なって破れていると、分散関係が方向依存し

$$\Delta v = -\sum_{lm, l \leq 2} Y_{lm}(\hat{n}) \left[\frac{1}{2} (-1)^{1+l} \bar{s}_{lm}^{(4)} - \bar{c}_{(I)lm}^{(4)} \right]$$

係数s,cは重力・電磁気力それぞれでの破れ

ℓ	Previous Lower	This Work Lower	Coefficient	This Work Upper	Previous Upper
0	-3×10^{-14}	-2×10^{-14}	$\bar{s}_{00}^{(4)}$	5×10^{-15}	8×10^{-5}
1	-1×10^{-13}	-3×10^{-14}	$\bar{s}_{10}^{(4)}$	7×10^{-15}	7×10^{-14}
	-8×10^{-14}	-1×10^{-14}	$-\text{Re } \bar{s}_{11}^{(4)}$	2×10^{-15}	8×10^{-14}
	-7×10^{-14}	-3×10^{-14}	$\text{Im } \bar{s}_{11}^{(4)}$	7×10^{-15}	9×10^{-14}
2	-1×10^{-13}	-4×10^{-14}	$-\bar{s}_{20}^{(4)}$	8×10^{-15}	7×10^{-14}
	-7×10^{-14}	-1×10^{-14}	$-\text{Re } \bar{s}_{21}^{(4)}$	2×10^{-15}	7×10^{-14}
	-5×10^{-14}	-4×10^{-14}	$\text{Im } \bar{s}_{21}^{(4)}$	8×10^{-15}	8×10^{-14}
	-6×10^{-14}	-1×10^{-14}	$\text{Re } \bar{s}_{22}^{(4)}$	3×10^{-15}	8×10^{-14}
	-7×10^{-14}	-2×10^{-14}	$-\text{Im } \bar{s}_{22}^{(4)}$	4×10^{-15}	7×10^{-14}

c=0に
している

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)

Arun+ (2014)

L: LIGO Livingston, H: LIGO Hanford, V: Virgo

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