

GW170817

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. 導入: 連星ブラックホールからの重力波
 2. 連星中性子星からの重力波 (GW170817)
 3. ショートガンマ線バースト (GRB 170817A)
 4. 将来展望とまとめ
- r過程元素合成、キロノヴァ/マクロノヴァ関連は以降の皆さんに任せたいと思います
 - 時間的に自分の研究の話もあまりしません
 - 気になっていることは直接でも聞いてください

1. 導入：連星ブラックホール からの重力波


2017年ノーベル物理学賞

"For the greatest benefit to mankind"
Alfred Nobel



The Royal Swedish Academy of Sciences has decided to award the

2017 NOBEL PRIZE IN PHYSICS



Illustrations: Niklas Elmehed, Nobel Prize Medal: © The Nobel Foundation, Photo: Lovisa Engblom.

Rainer Weiss
Barry C. Barish
Kip S. Thorne

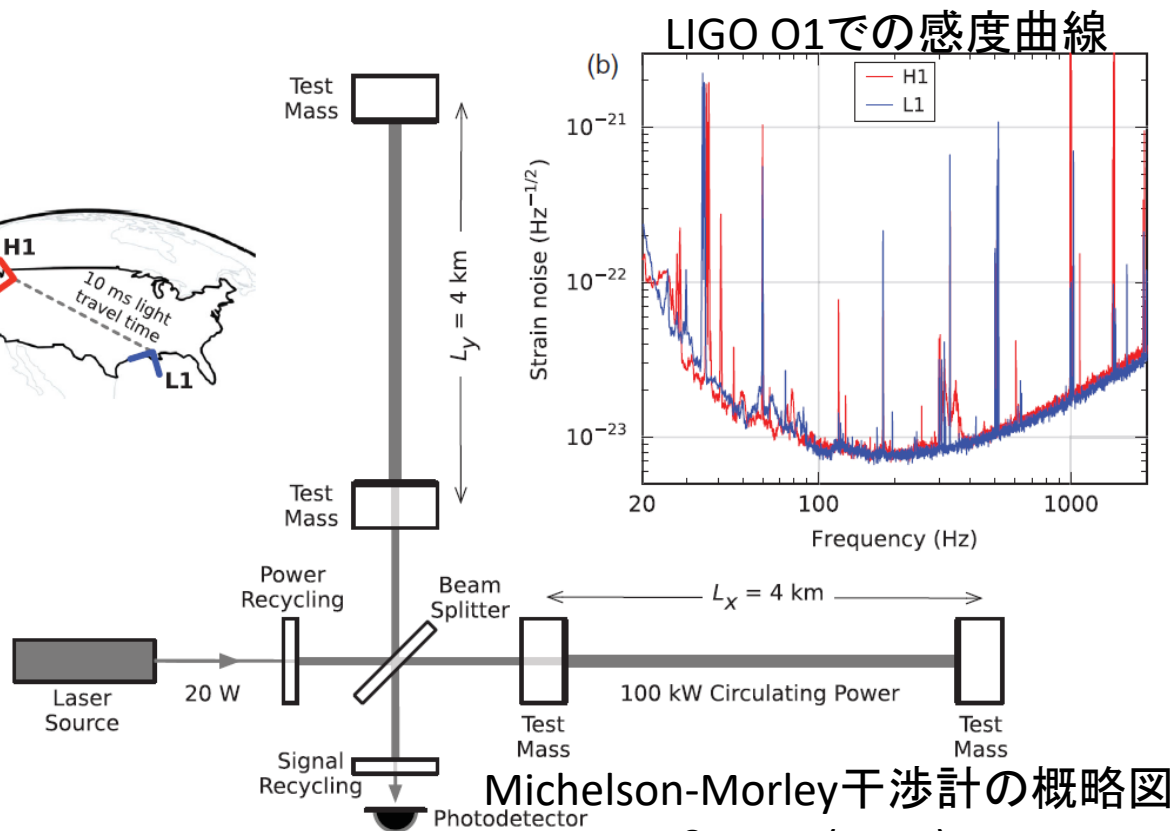
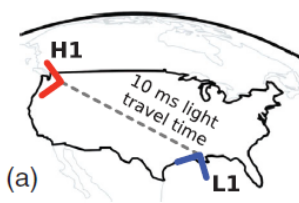
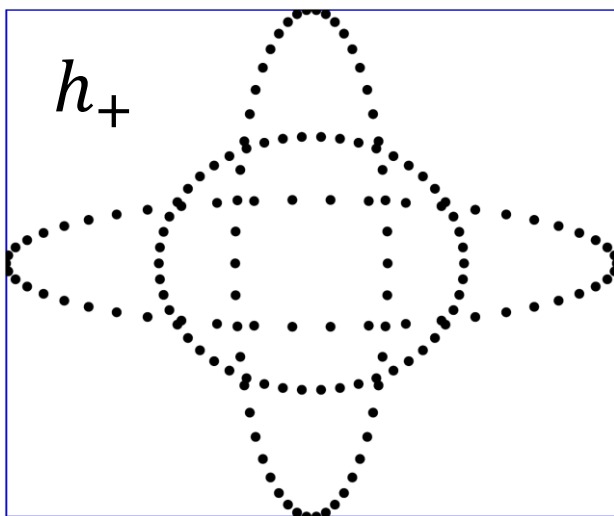
"for decisive contributions to the LIGO detector and the observation of gravitational waves"

Nobelprize.org

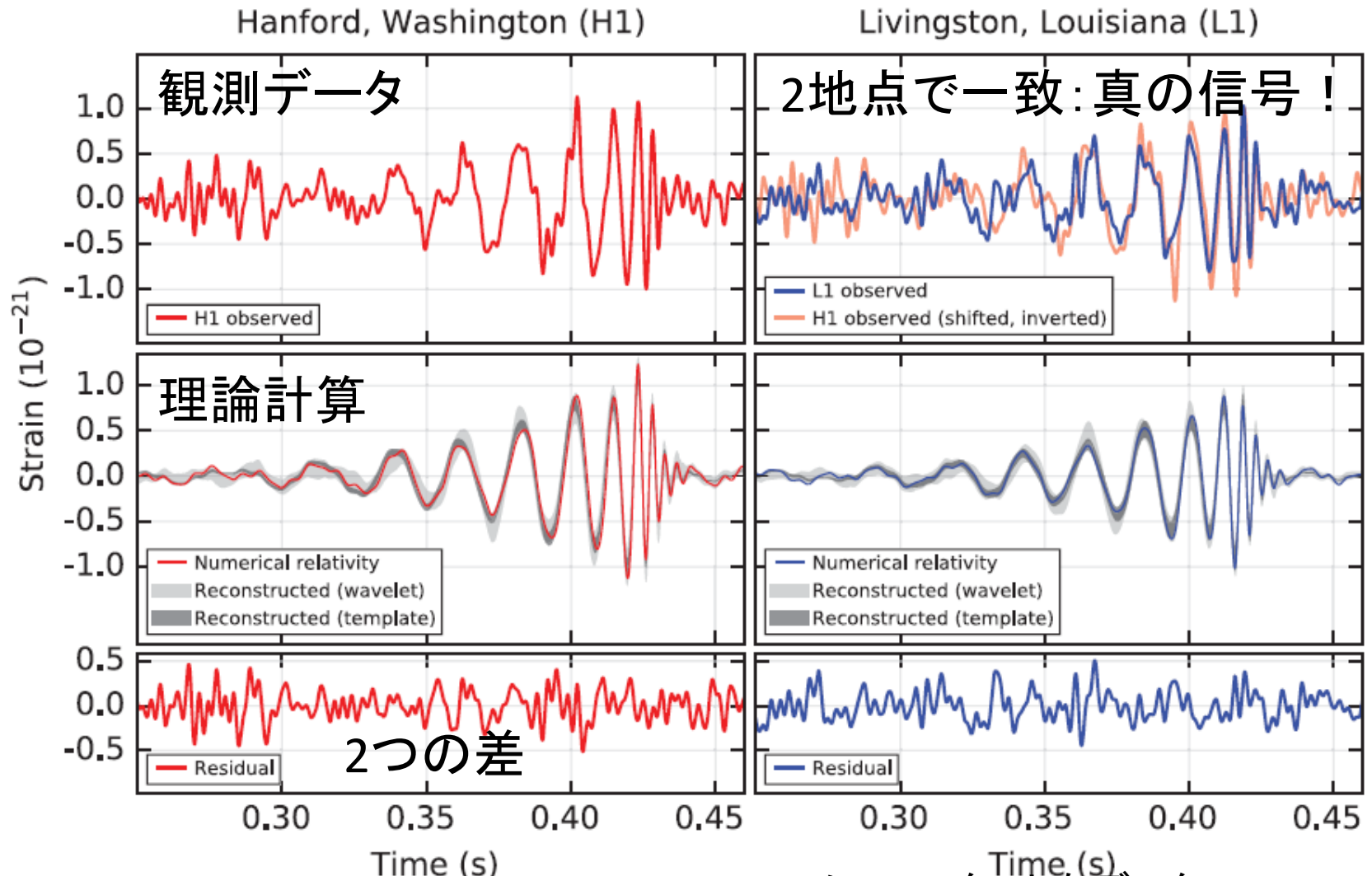
重力波検出器LIGO

直交する方向の距離の差分を $< 10^{-21}$ の精度で測り、時空の歪みの伝播＝重力波を検出する

2台ある
Hanford, WA
Livingston, LA



初の重力波検出: GW150914



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

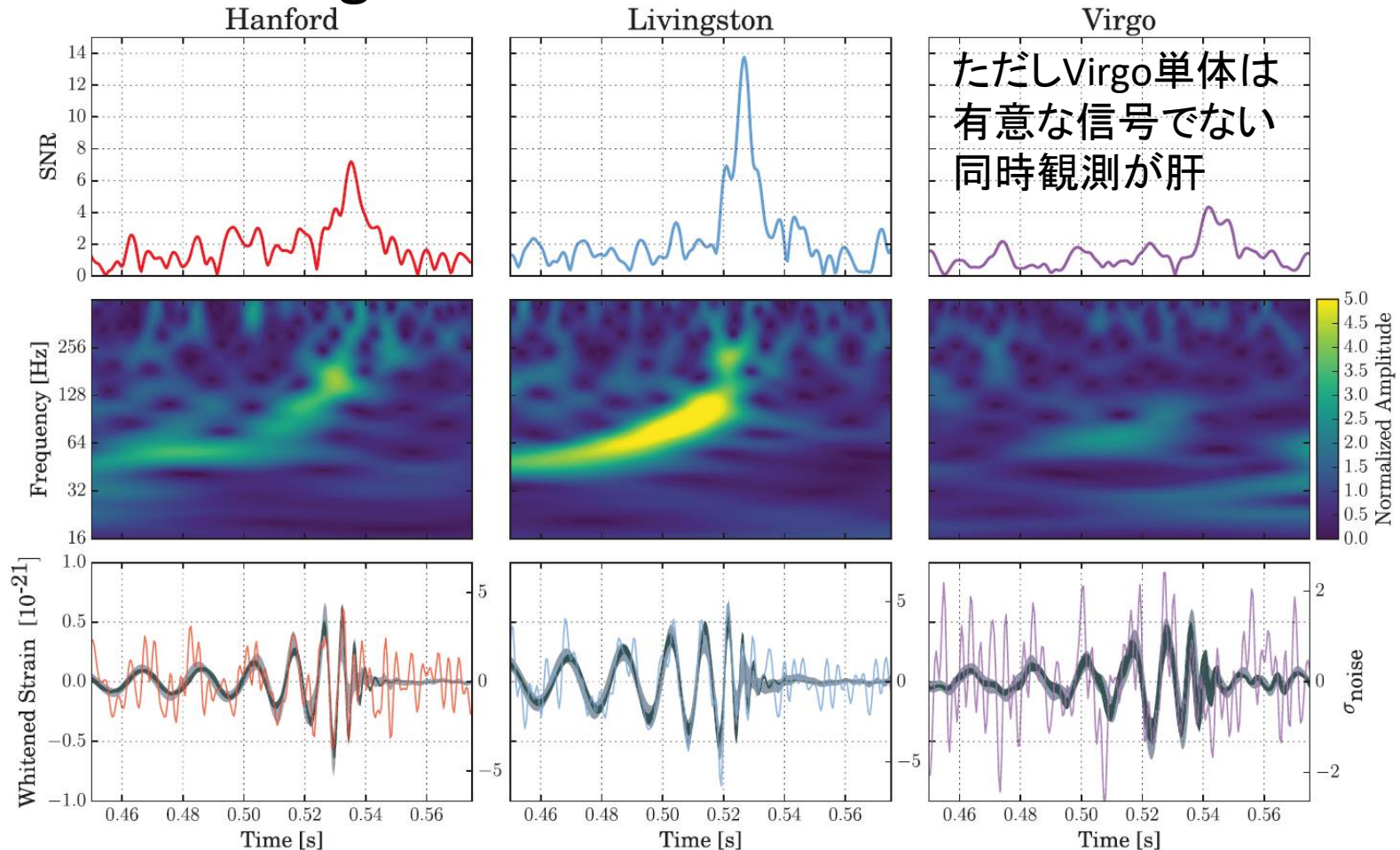
重力波でわかること

- **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、赤方偏移は困難

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

GW170814 (not 170817)

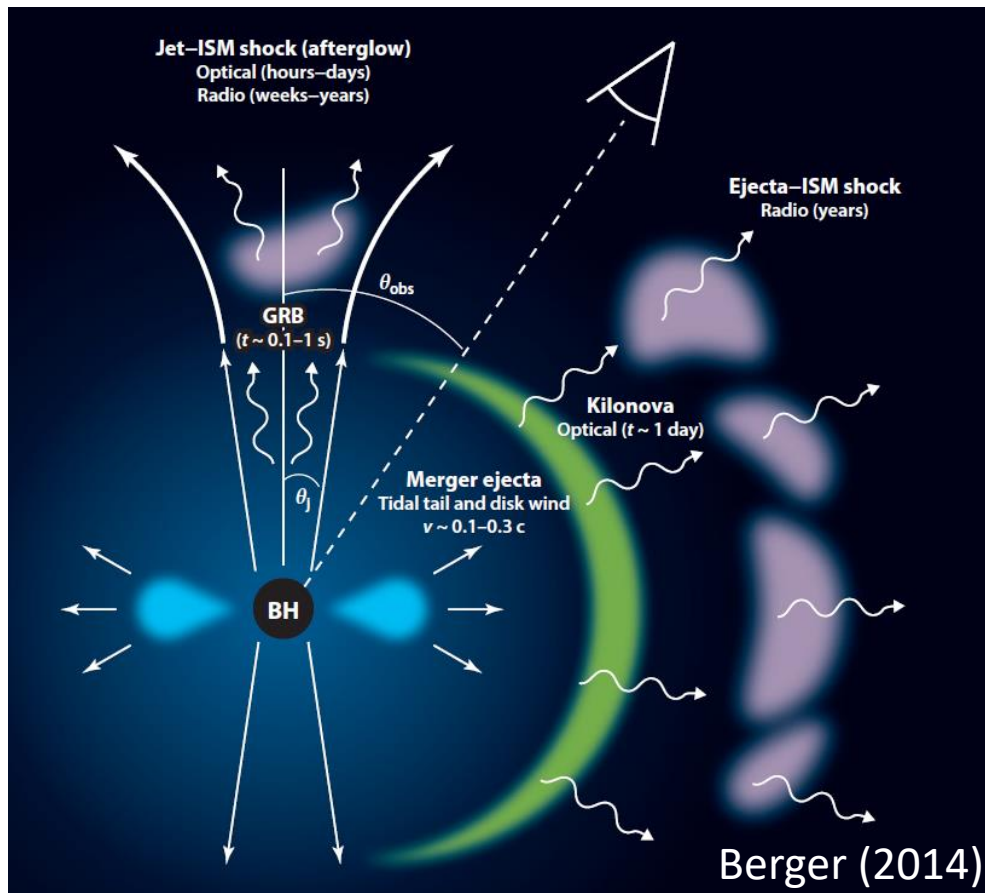
LIGO2台とVirgoとによる初めての同時観測



2. 連星中性子星 からの重力波 (GW170817)

多粒子天文学へ：電磁波対応天体

連星中性子星合体には多彩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

連星中性子星の合体(発見済！)

- **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 (略)**

- r過程元素合成、キロノヴァ/マクロノヴァ

和南城、藤林、松本、平居、小宮(P14)、石井(P50)

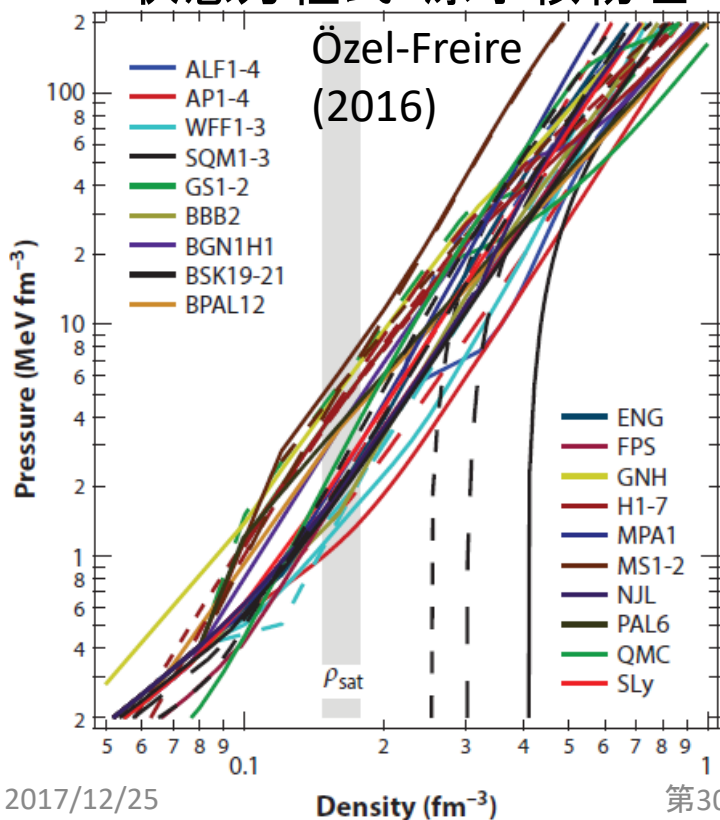
中性子星の状態方程式

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

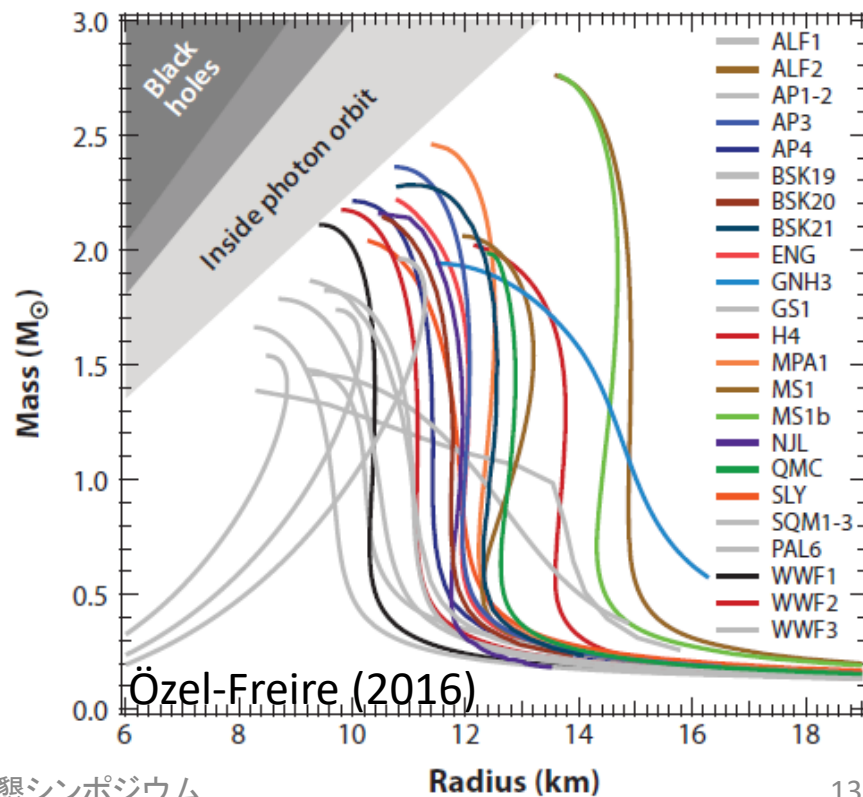
本当の状態方程式を知れば原子核物理がわかる

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

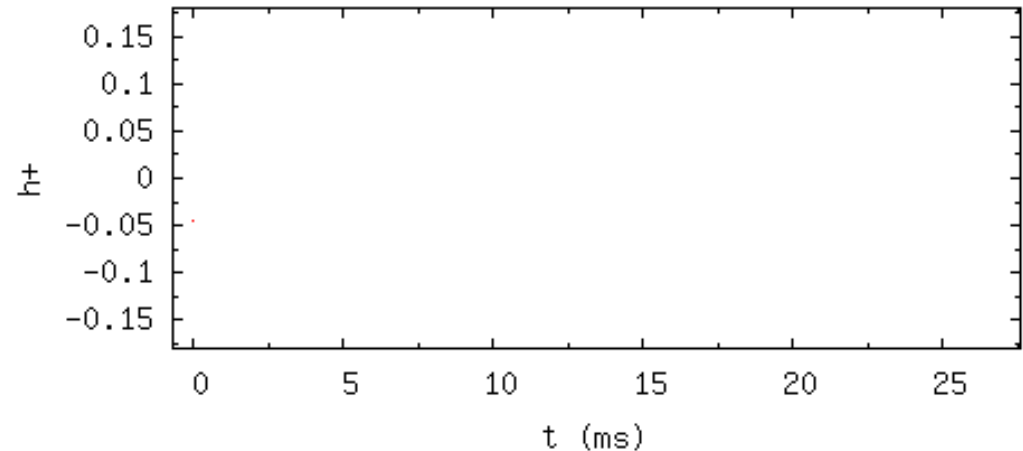
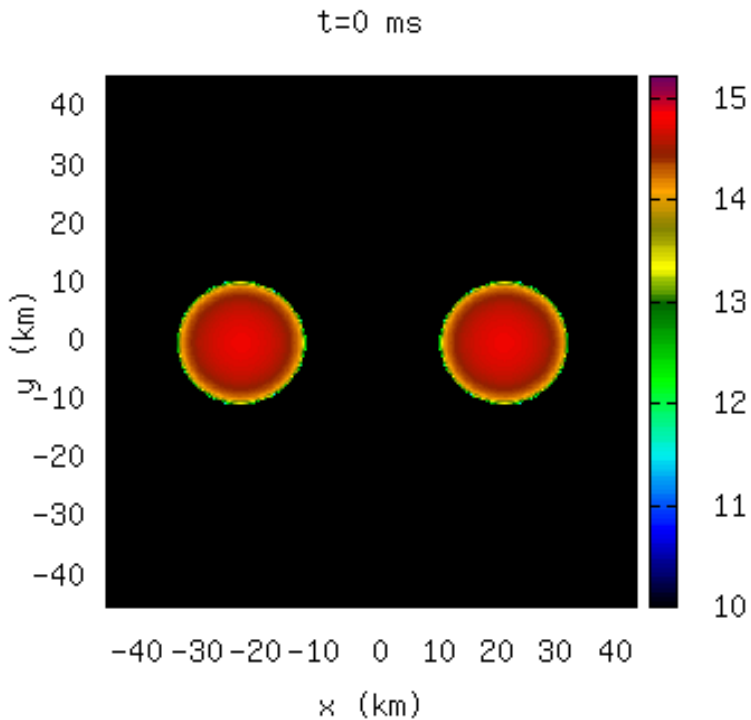


質量・半径関係: 宇宙物理



連星中性子星の合体

軌道運動が潮汐変形を通じて状態方程式に依存
合体した後にも重い中性子星が重力波を出しうる
(これも状態方程式に依存)

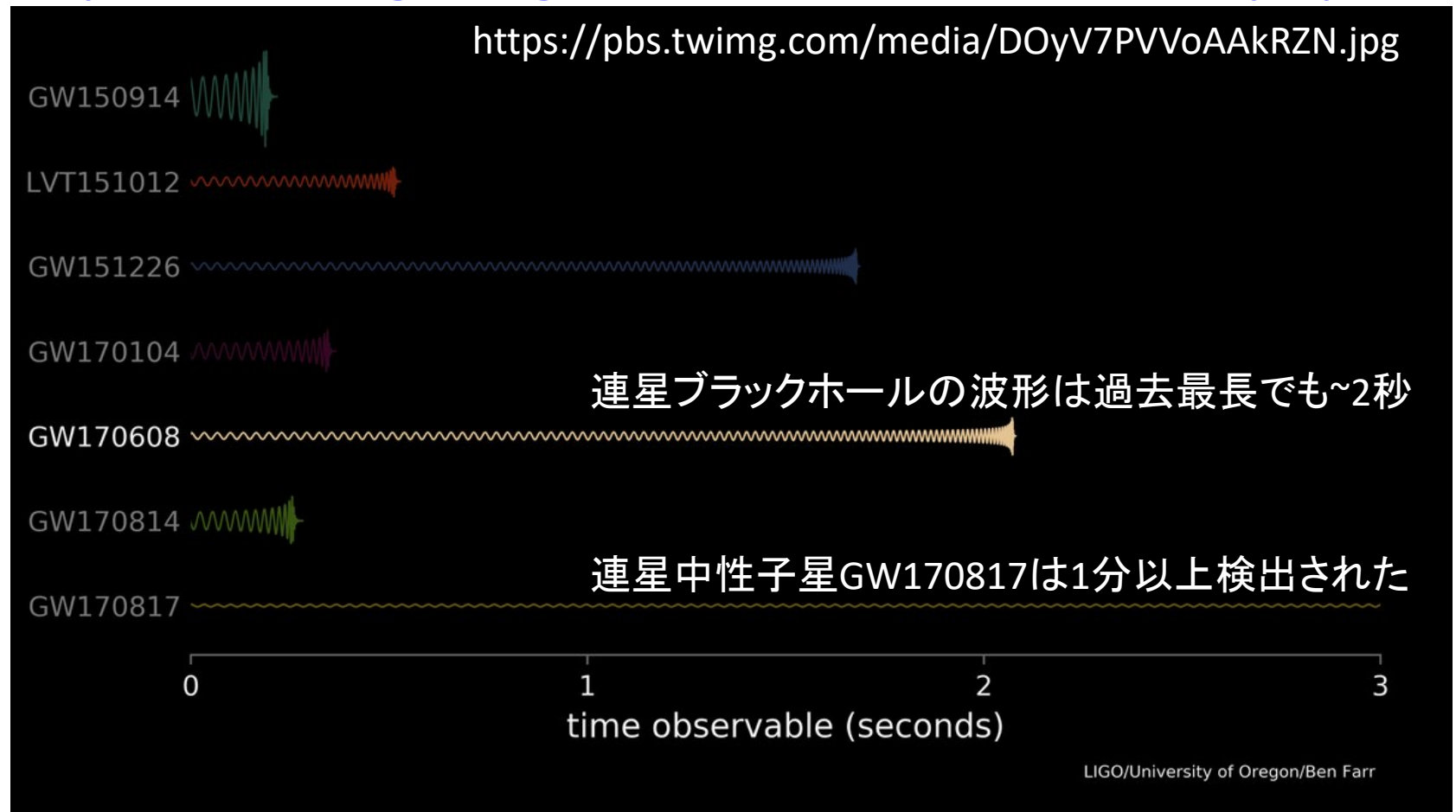


仏坂健太氏による(古い)アニメーション
From Hotokezaka, KK+ (2011)

GW170817

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

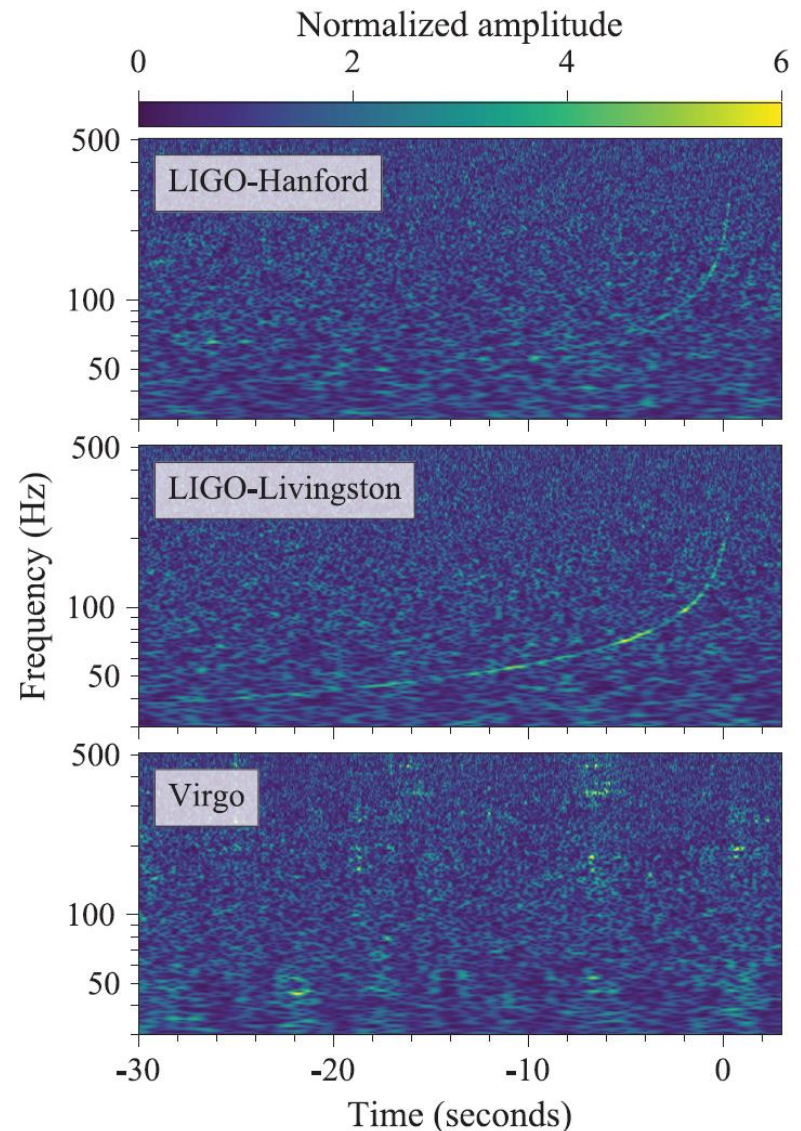
<https://pbs.twimg.com/media/DOyV7PVVoAAkRZN.jpg>



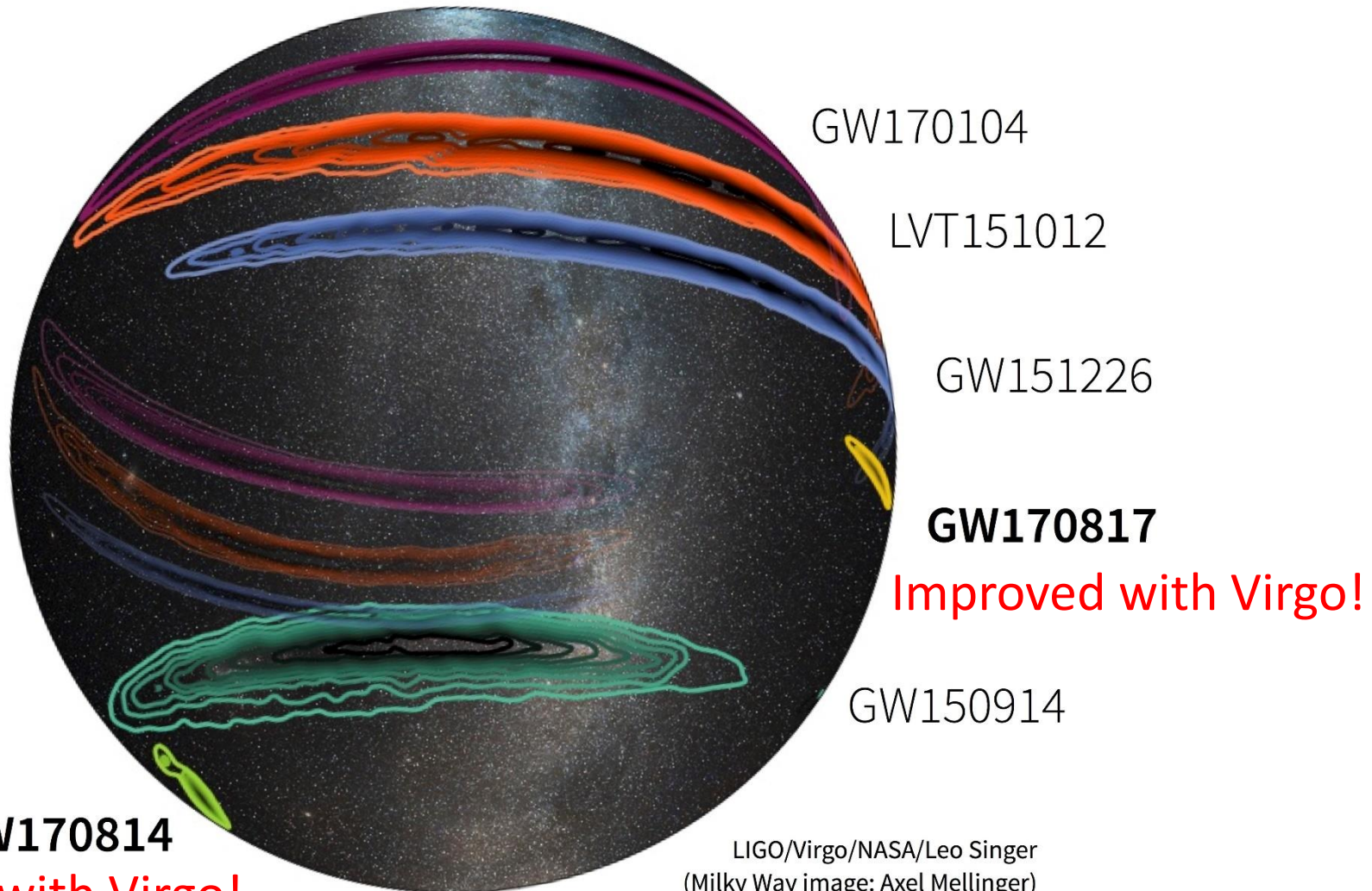
スペクトログラム

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>

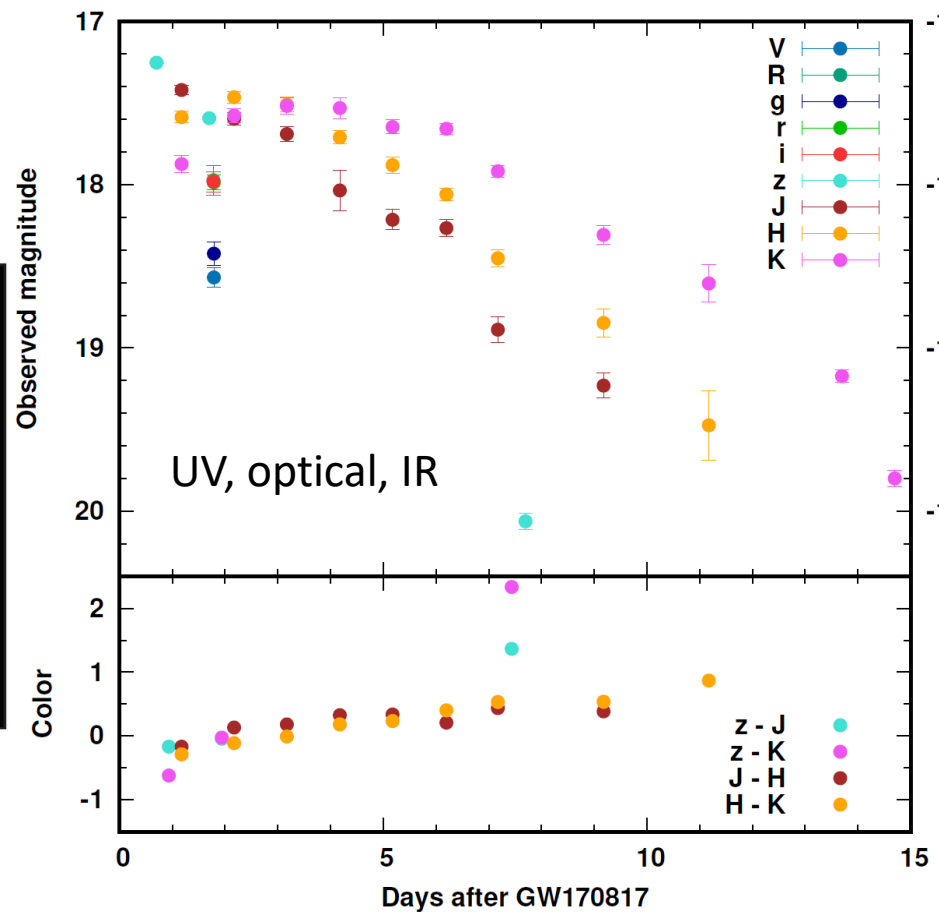
突発天体と母銀河

UVOIRの観測によりキロノヴァ/マクロノヴァを発見
母銀河NGC4993が同定
赤方偏移 $z \sim 0.01$

Day 1.17-1.70

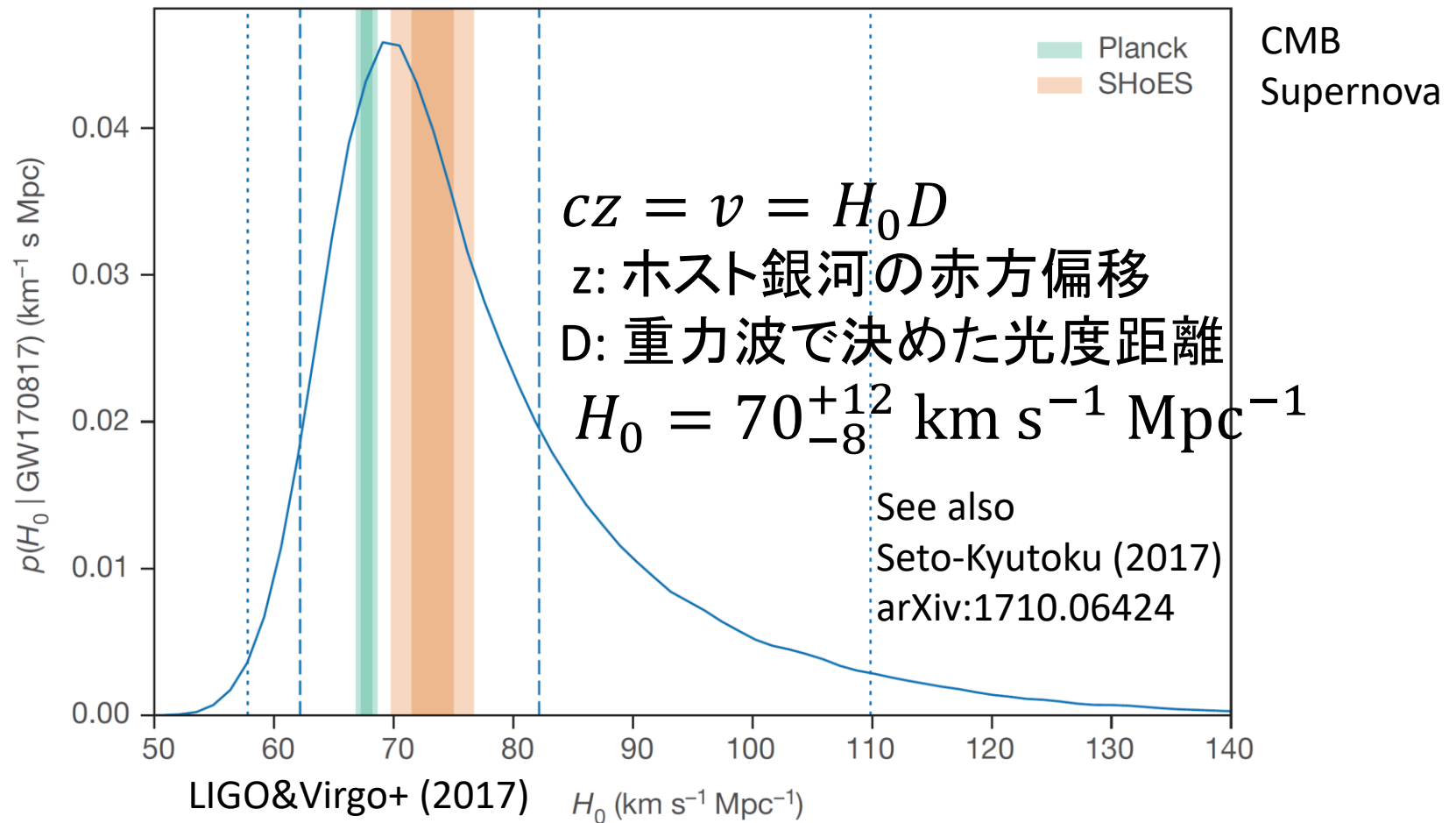
Day 7.17-7.70

Utsumi+ (2017)



重力波宇宙論

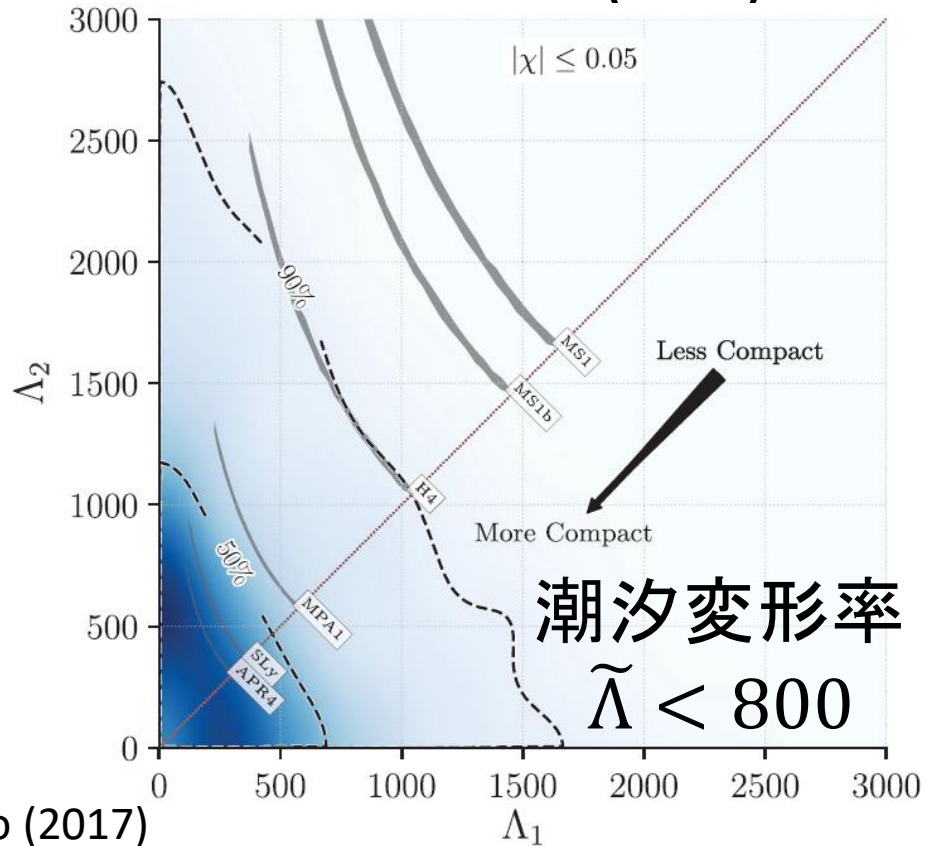
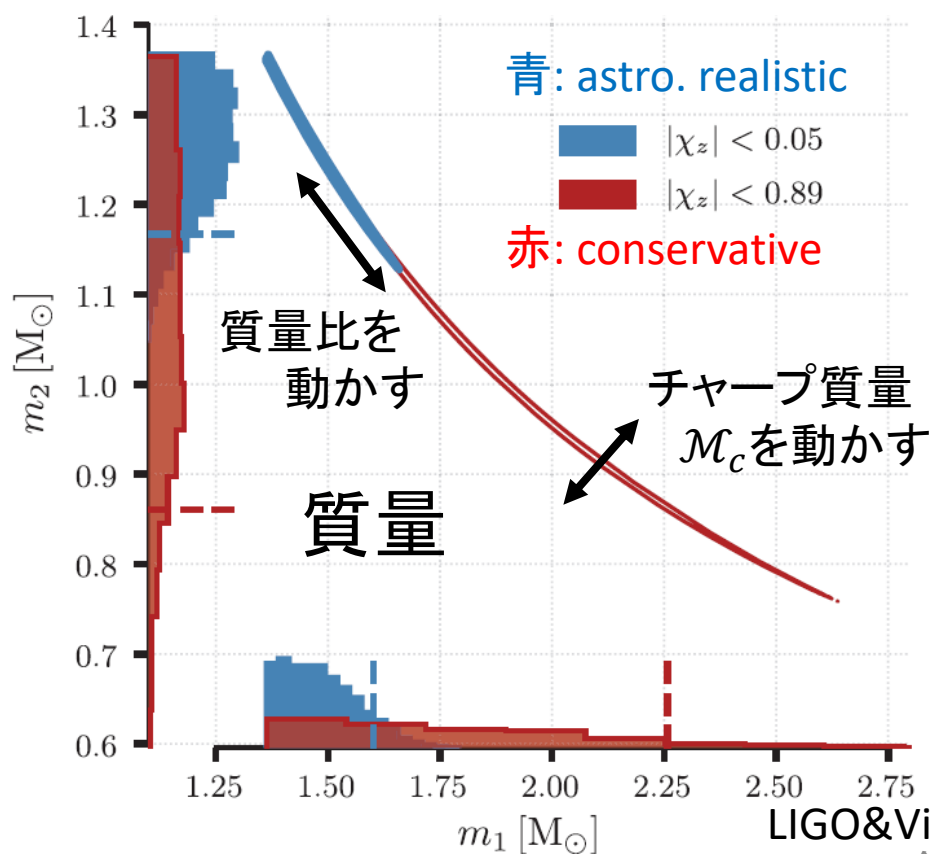
Hubble定数が新たな手法で独立に決められた



連星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

- 高精度波形を使えばより厳しい制限: 木内(P10)



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



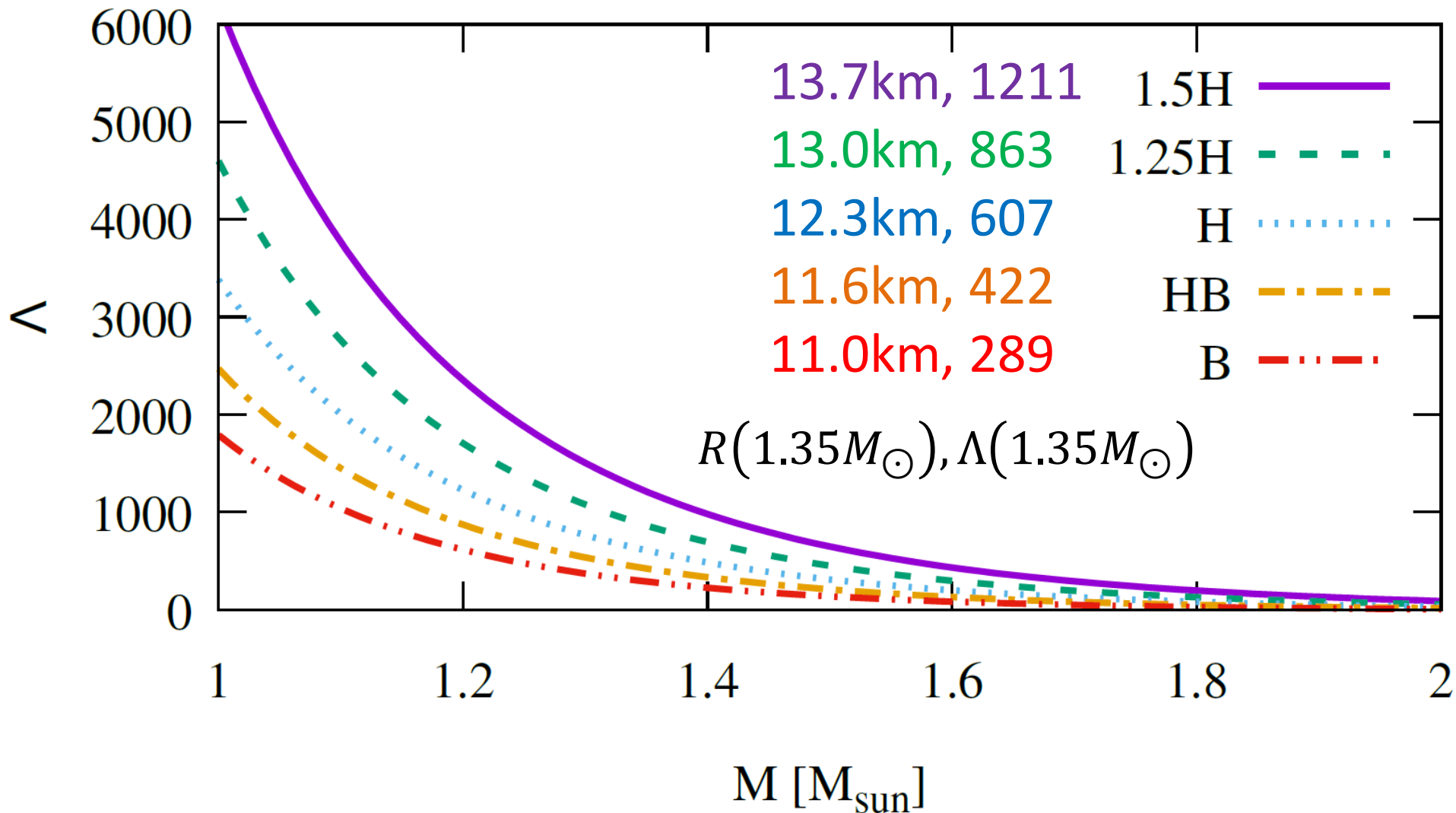
$$Q_{ij} = -\lambda \varepsilon_{ij}$$
$$\lambda \propto k R^5$$



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

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

いくつかの状態方程式での例

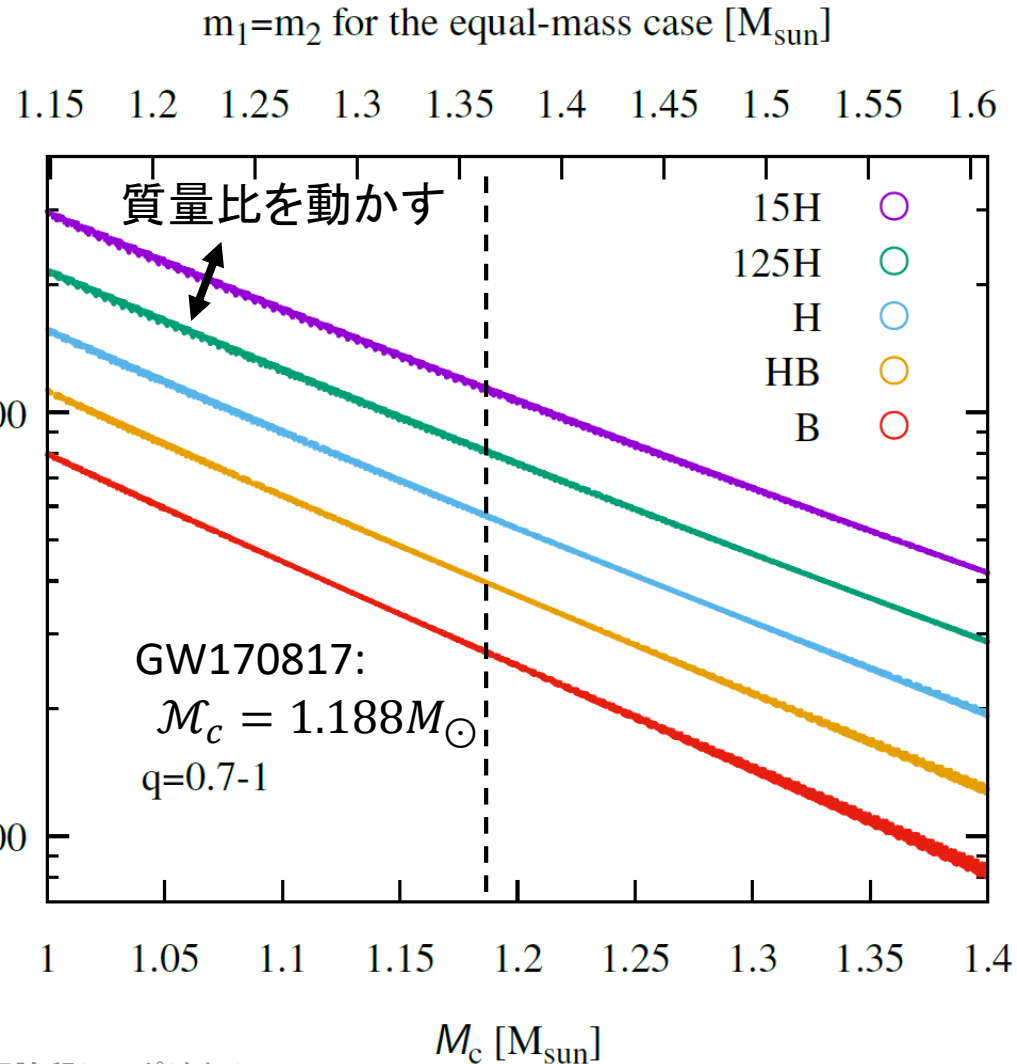


$\tilde{\Lambda} - \mathcal{M}_c$ の強い相関

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 $<$
実質的に制限される

$>13\text{km}$ はnot favored



3. ショートガンマ線バースト (GRB 170817A)

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

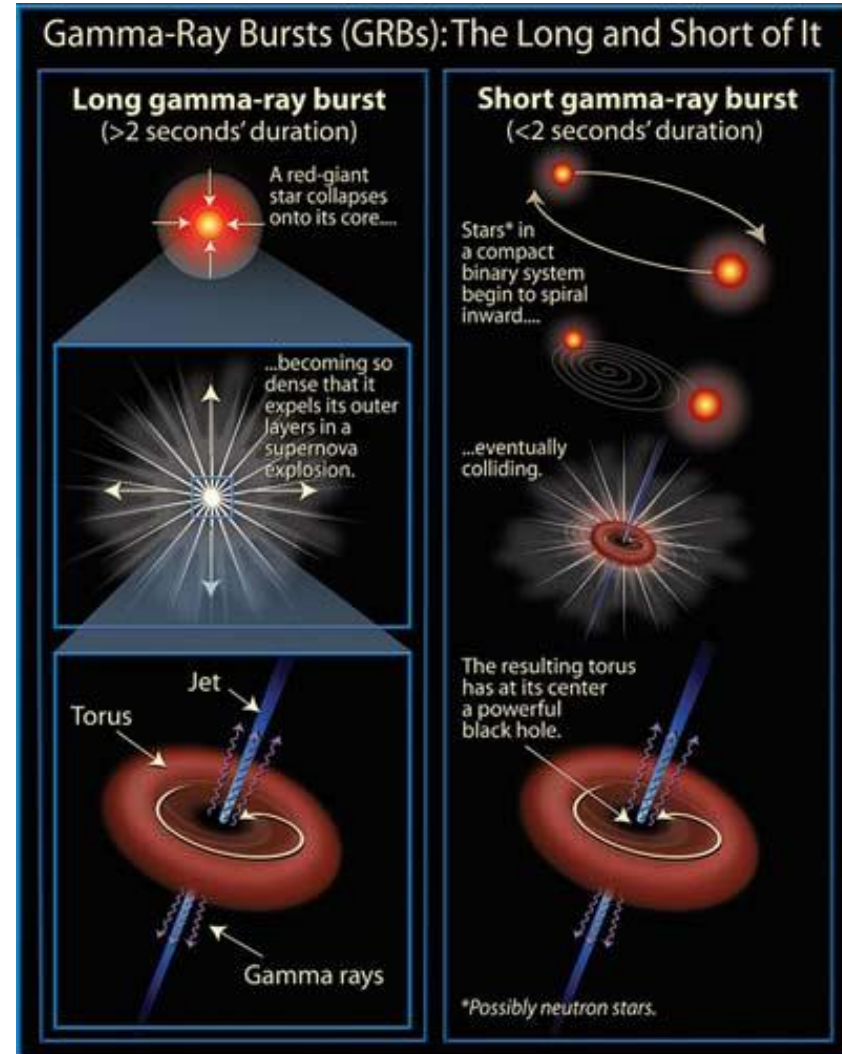
大質量星の崩壊が起源

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

起源を決定しうる

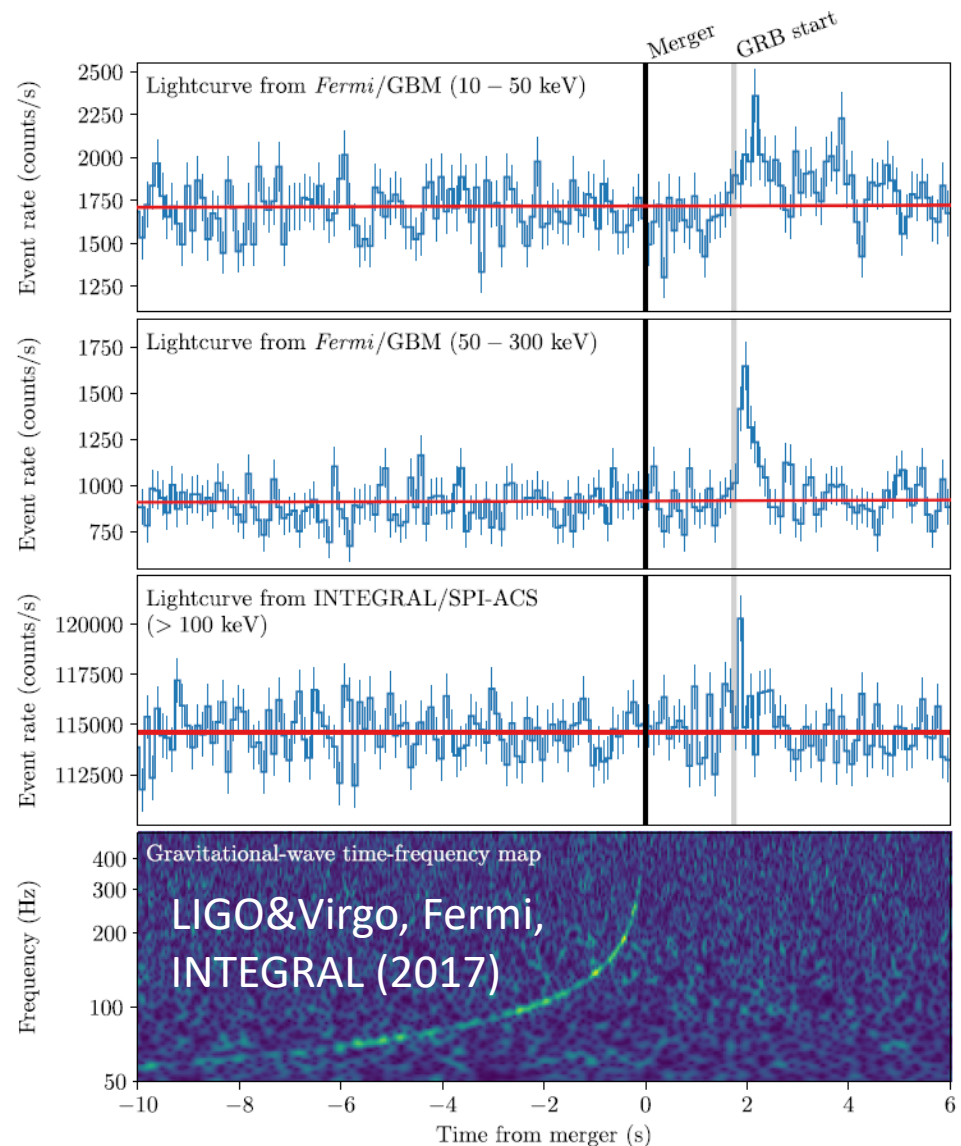


GRB 170817A

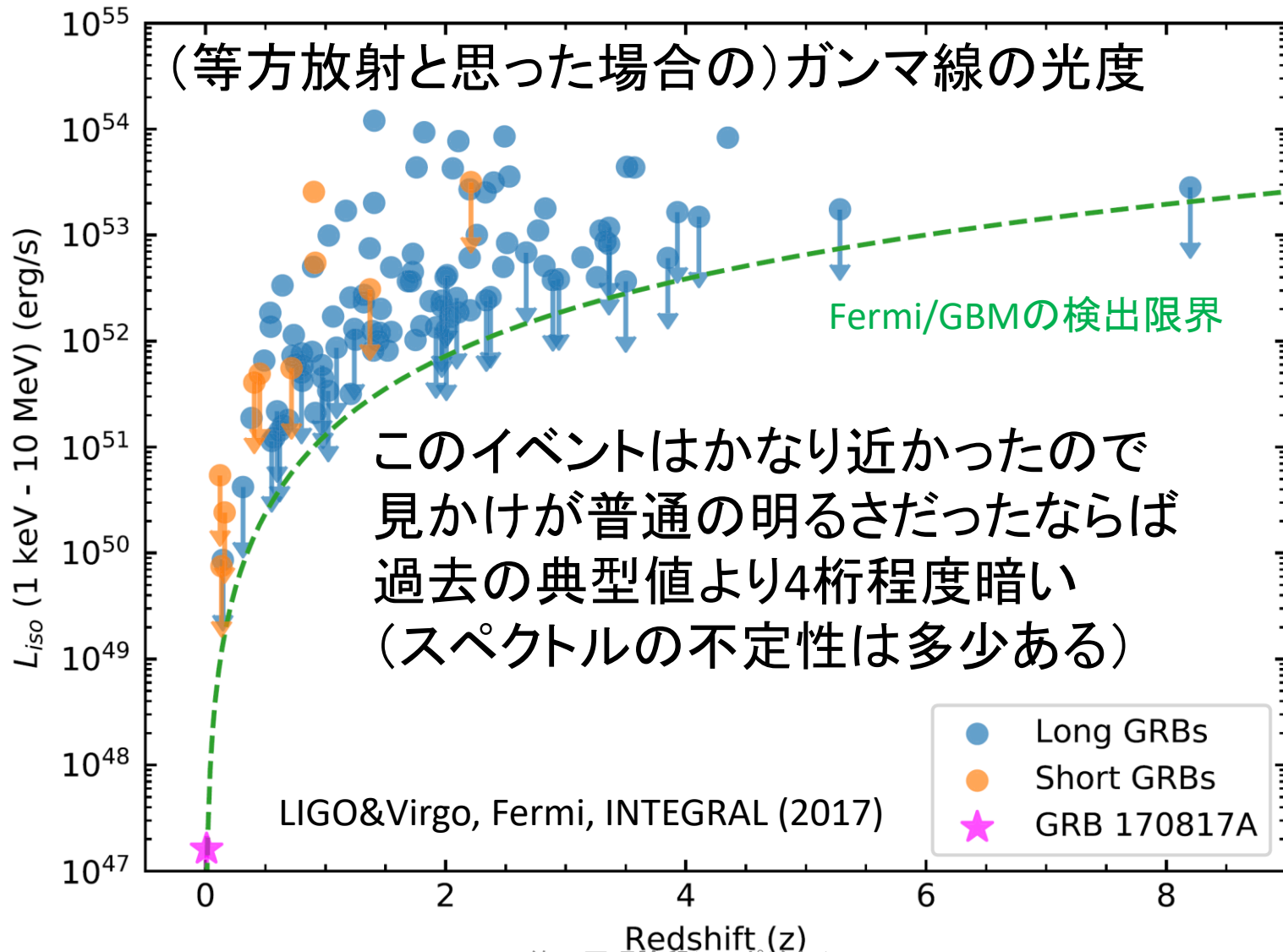
やや弱いバーストだが
FermiとINTEGRALとで
整合する観測結果

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

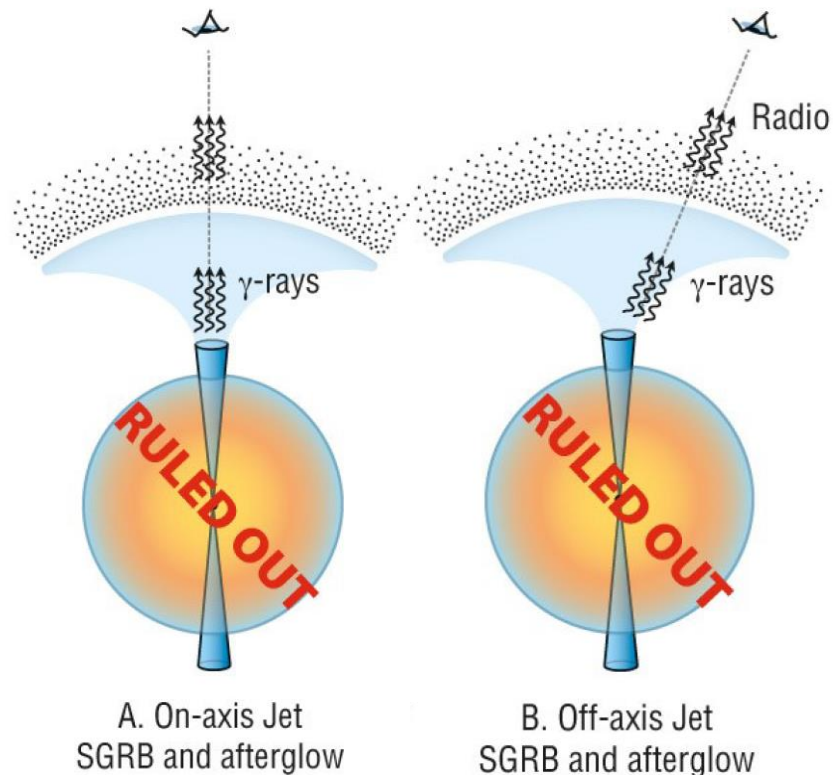
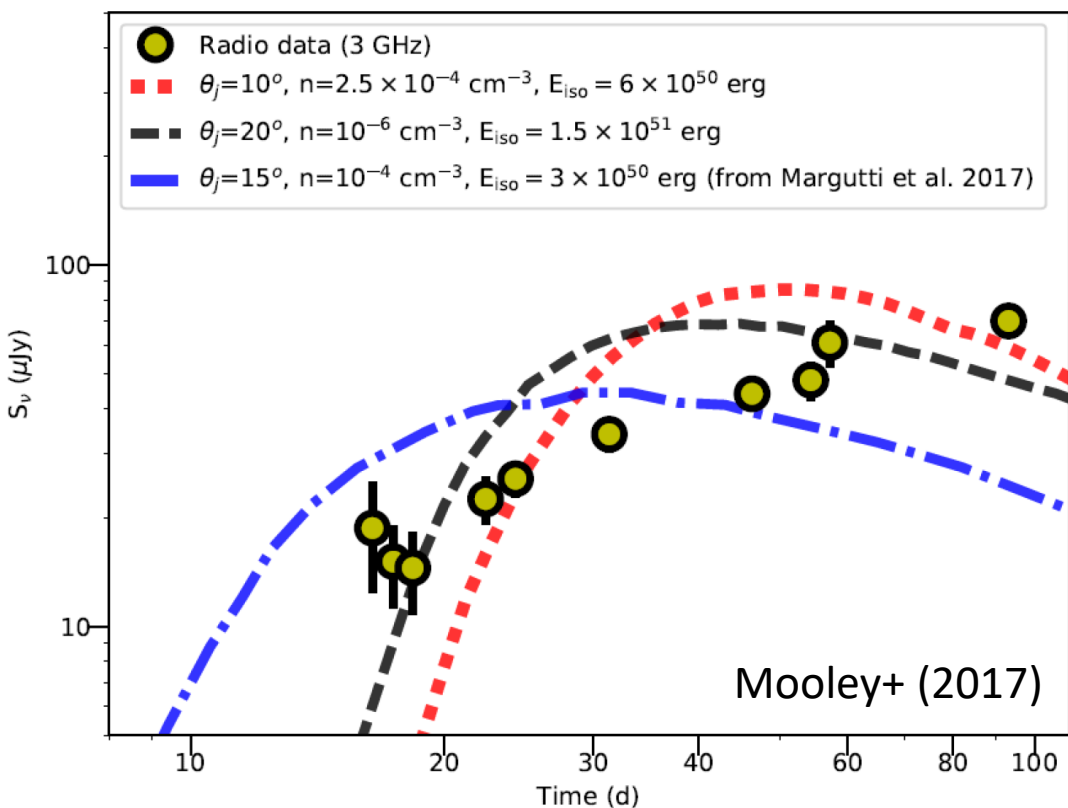


非常に暗いガンマ線バースト



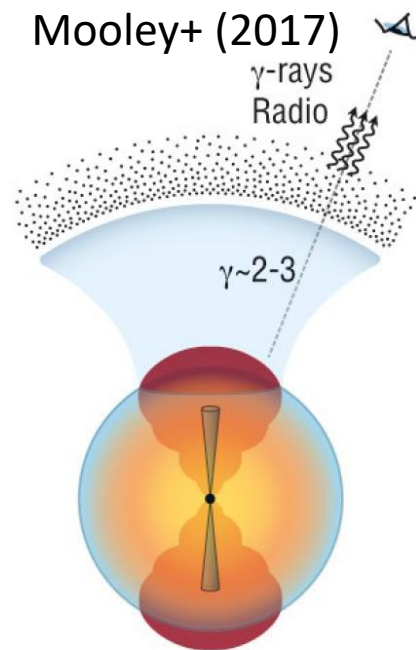
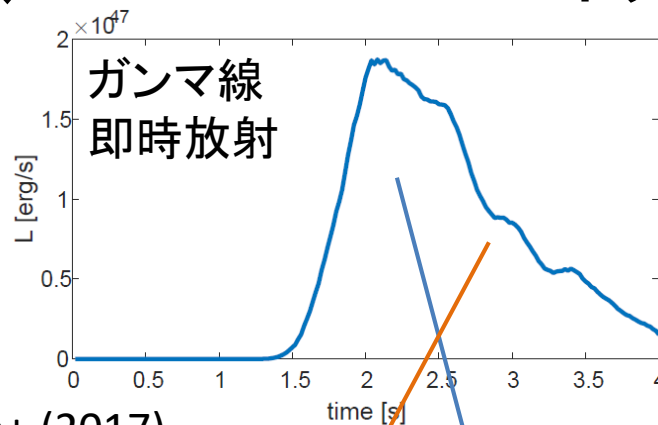
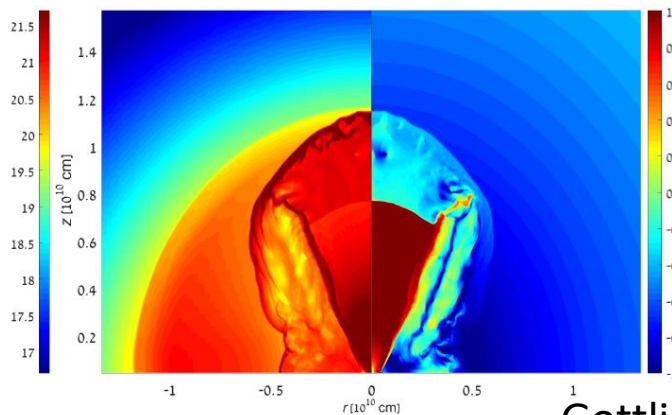
Jet seen off-axisではなさそう

単純な(top hat)超相対論速度のoff-axis ジェットは
100日間の電波増光観測とは整合しない

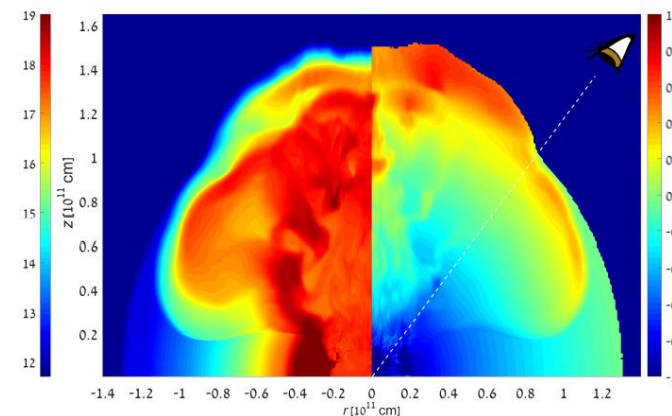
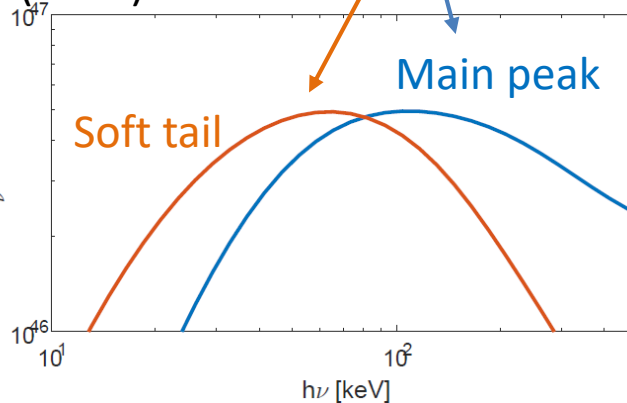


Jet-ejecta衝突によるコクーン？

ジェットがエジェクタ(キロノヴァになる)を進む際にエネルギーを散逸し、 $\Gamma \sim \text{a few}$ でブレイクアウト



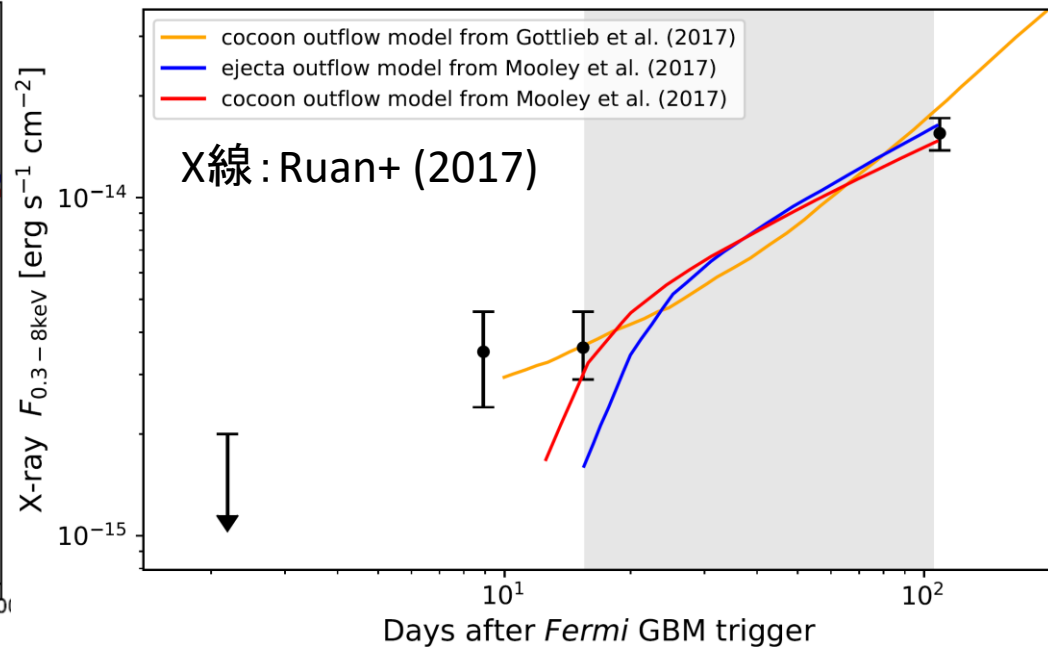
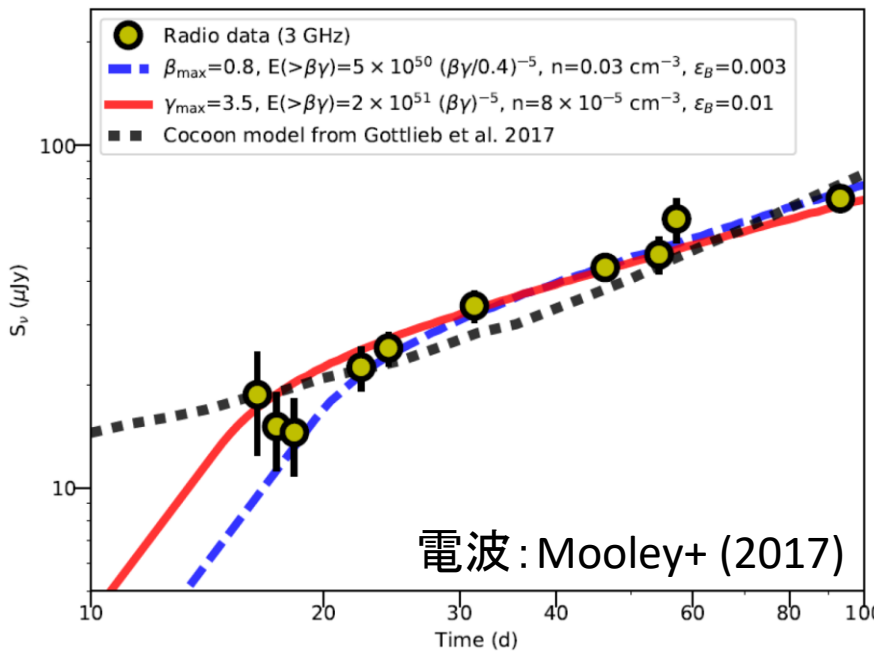
Gottlieb+ (2017)



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

電波・X線の長期観測との整合性

GRB 170817Aは典型的なショートGRBではなさそう、
 少なくとも超相対論的速度のジェットは必要ない
 (初期のキロノヴァ/マクロノヴァにも都合がいい)



要請：エジェクタの高速成分

ガンマ線放射を説明するには $\sim 10^{-7} - 10^{-6} M_{\odot}$ 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)

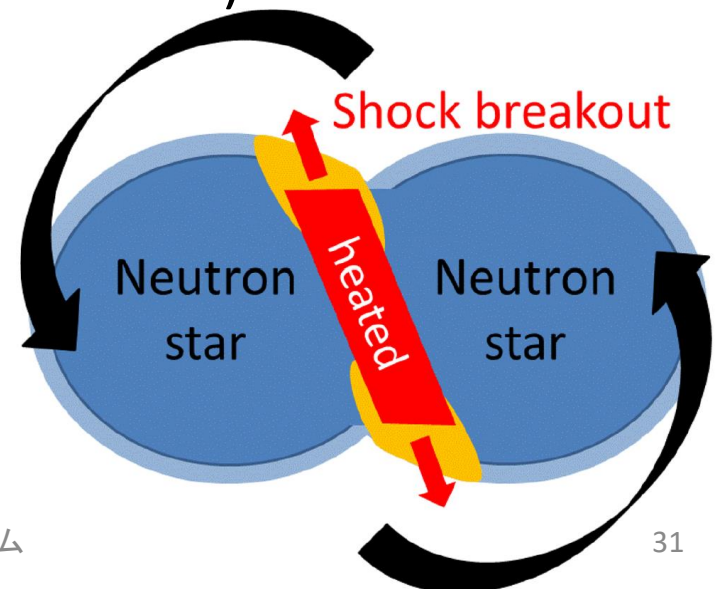
状態方程式次第で説明可能、数値誤差には注意

- 合体ブレイクアウト？ (Kyutoku+ 2014)

比較的よくわからないもので

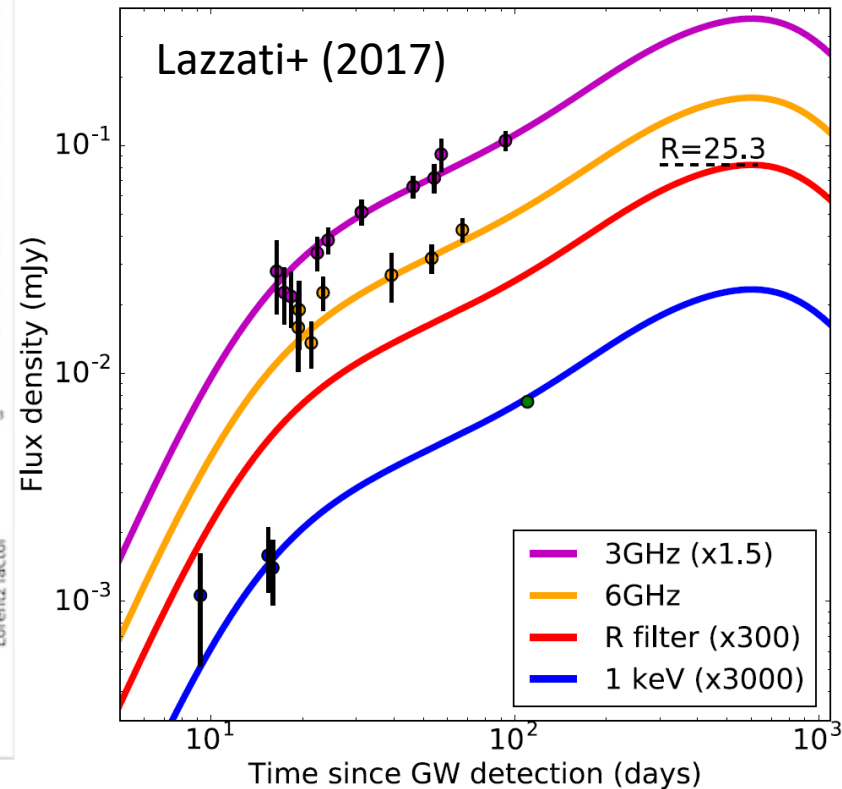
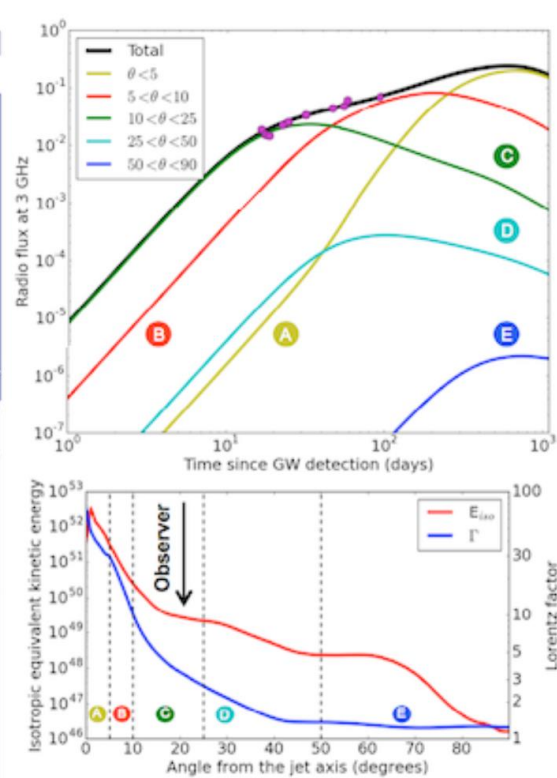
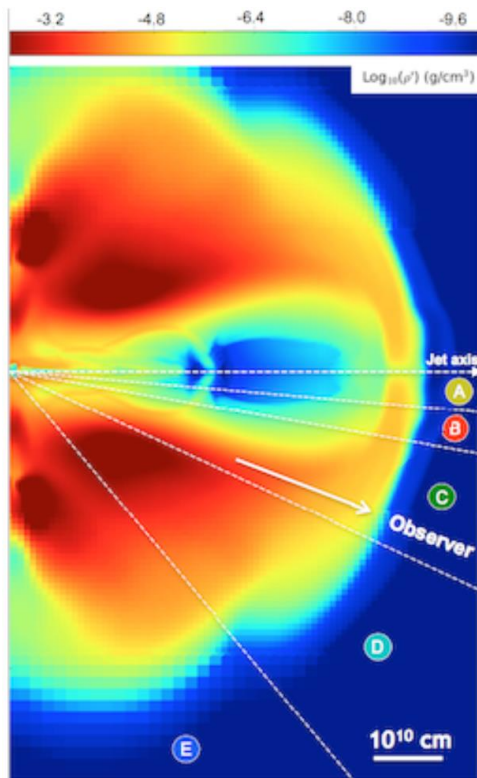
よくわからないものを説明...

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にせよ必要)



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？
- 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

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

- このイベントの長期観測も多分重要（解像など）

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

例：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

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

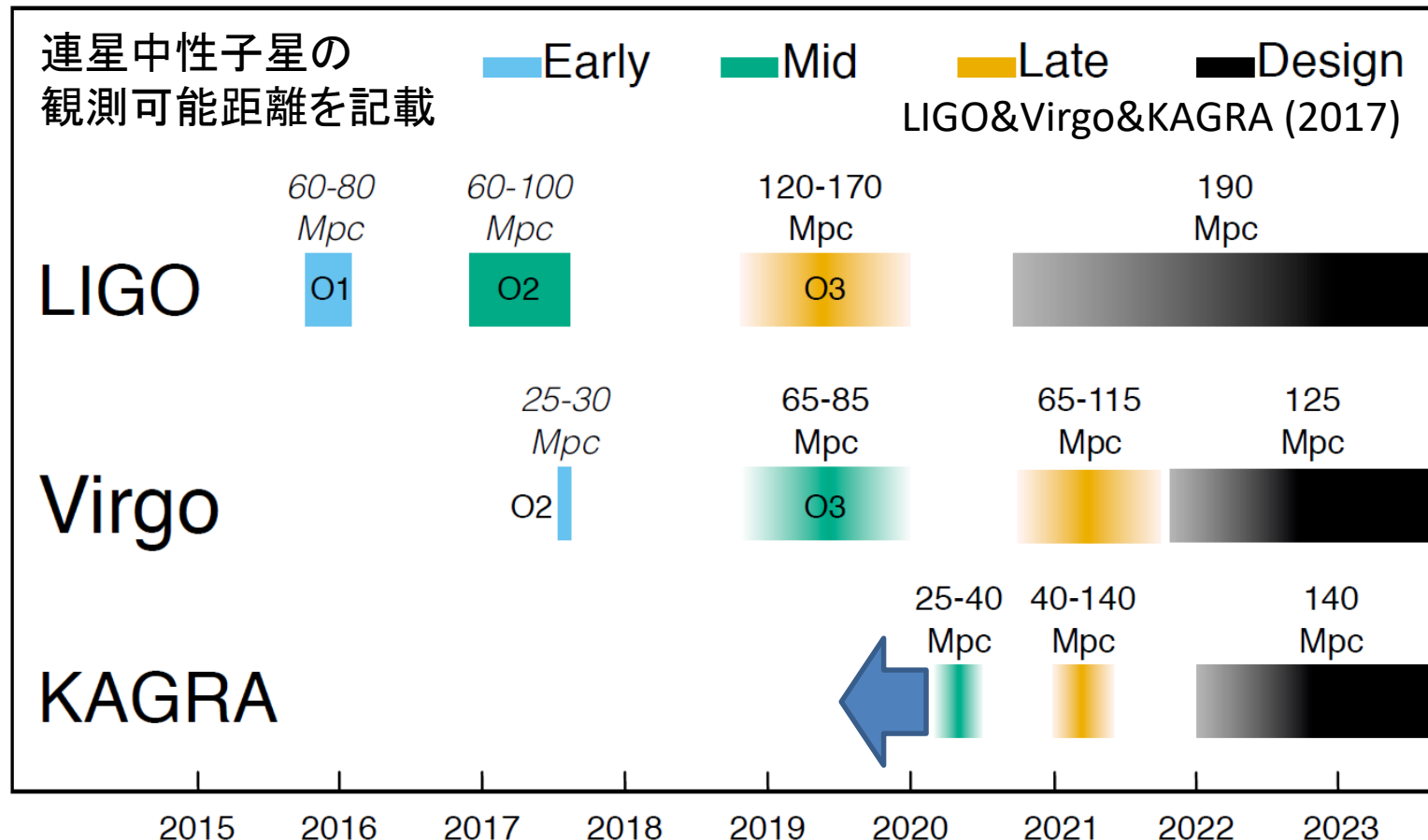
が要請される

- 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

4. 将来展望と まとめ

今後の稼働スケジュール

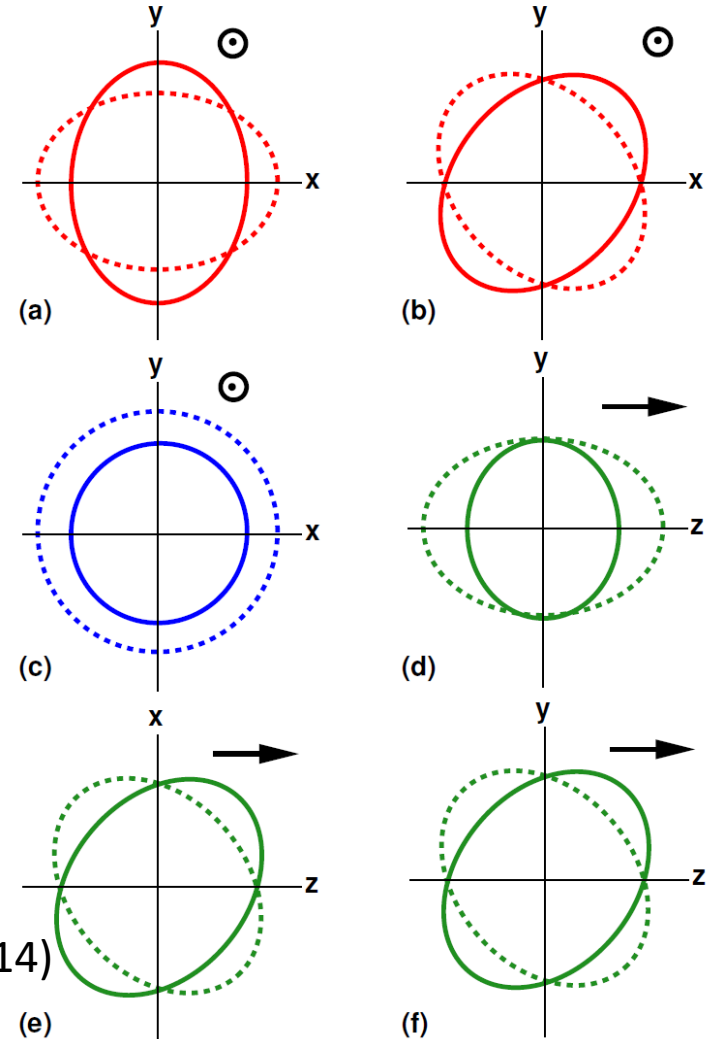
KAGRAはLIGO/Virgo O3への参加を目指す(らしい)



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)

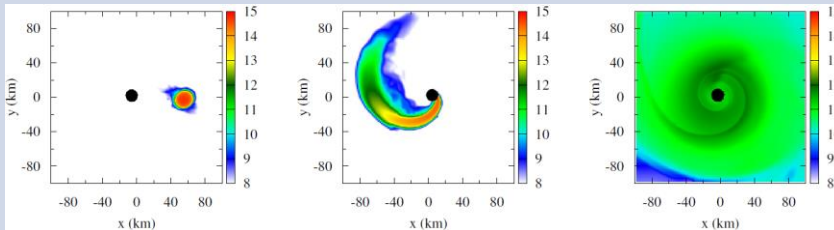
地上検出器の残ったターゲット

突発的 (transient)

定常的 (persistent)

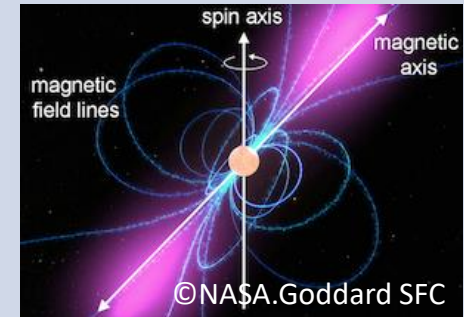
波形が
既知

inspiral: コンパクト連星合体
ブラックホール・中性子星連星



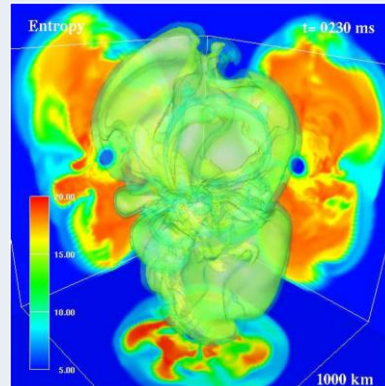
Kyutoku+ (2015)

continuous:
中性子星 (パルサー)



波形が
未知

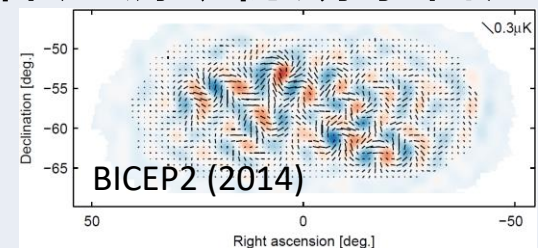
burst:
超新星爆発
宇宙(超)弦
...



Takiwaki+ (2014)

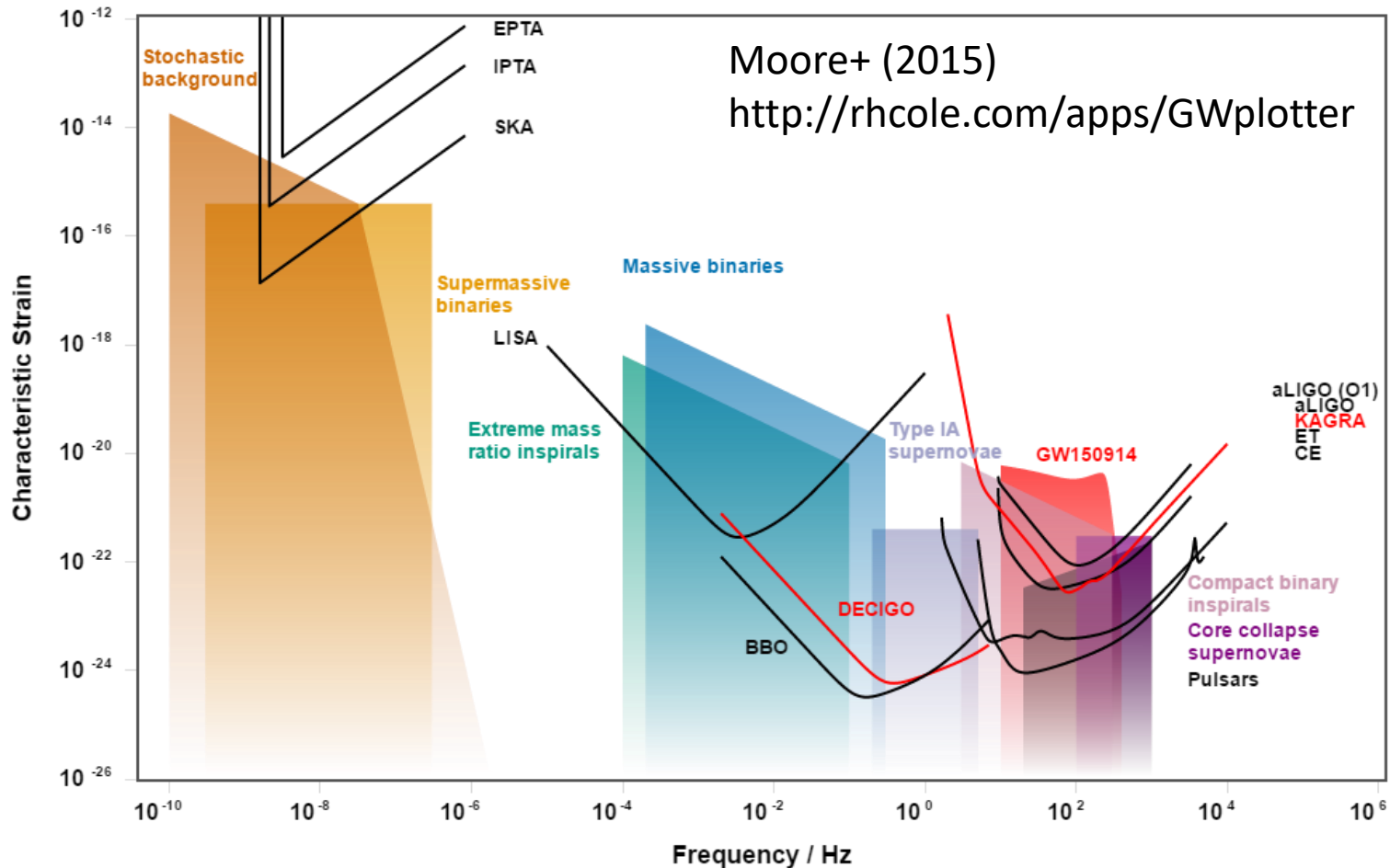
unknown unknown?

stochastic: 背景放射
弱い波源の重ね合わせ
天体起源、初期宇宙起源



多波長重力波天文学

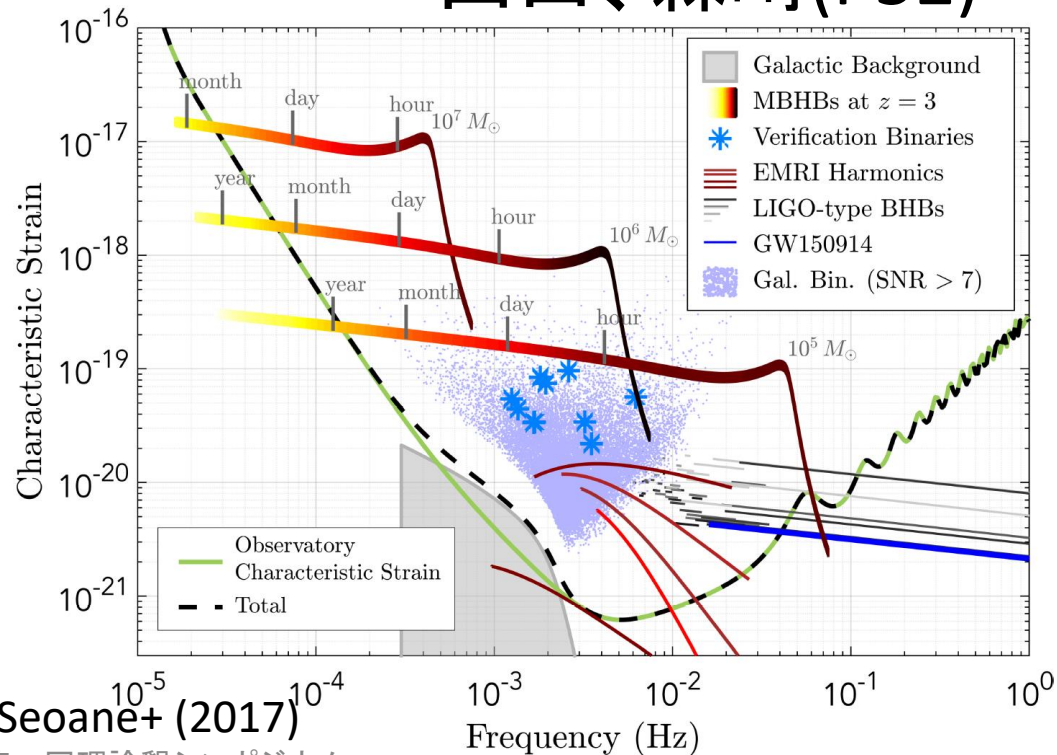
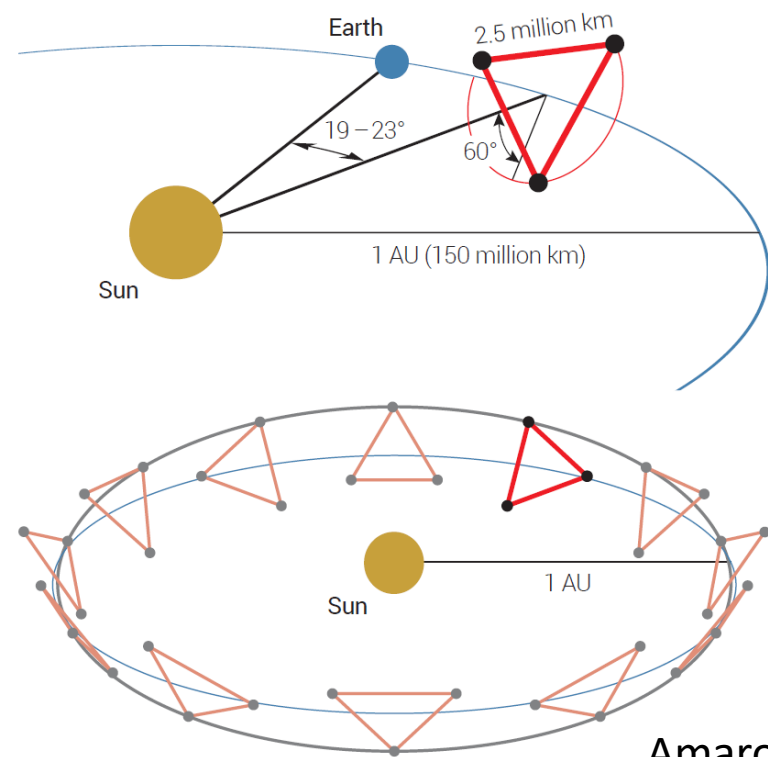
個人的には連星合体以外の何かを探したい



宇宙重力波検出器LISA

250万km離れた3衛星、4年計画、mHz帯に感度
 超大質量BH合体やextreme mass ratio inspiral

山田、森崎(P52)



Amaro-Seoane+ (2017)

まとめ

- 連星中性子星からの重力波が観測され、さらに電磁波の追観測で真のイベントと確信できた
- 中性子星の潮汐変形率は800以下に制限され半径で言うと概ね13-14km以下と考えられる
- Hubble定数が過去の手法と独立に決まった
- ショートガンマ線バーストはやや普通と違って、軸からずれた方向からコクーンを見たのかも？
- 将来的に地上検出器で連星合体以外を見たり宇宙重力波観測でもっと色々なことを探りたい

Appendix

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

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)

- 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
- 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...

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

わかったこと

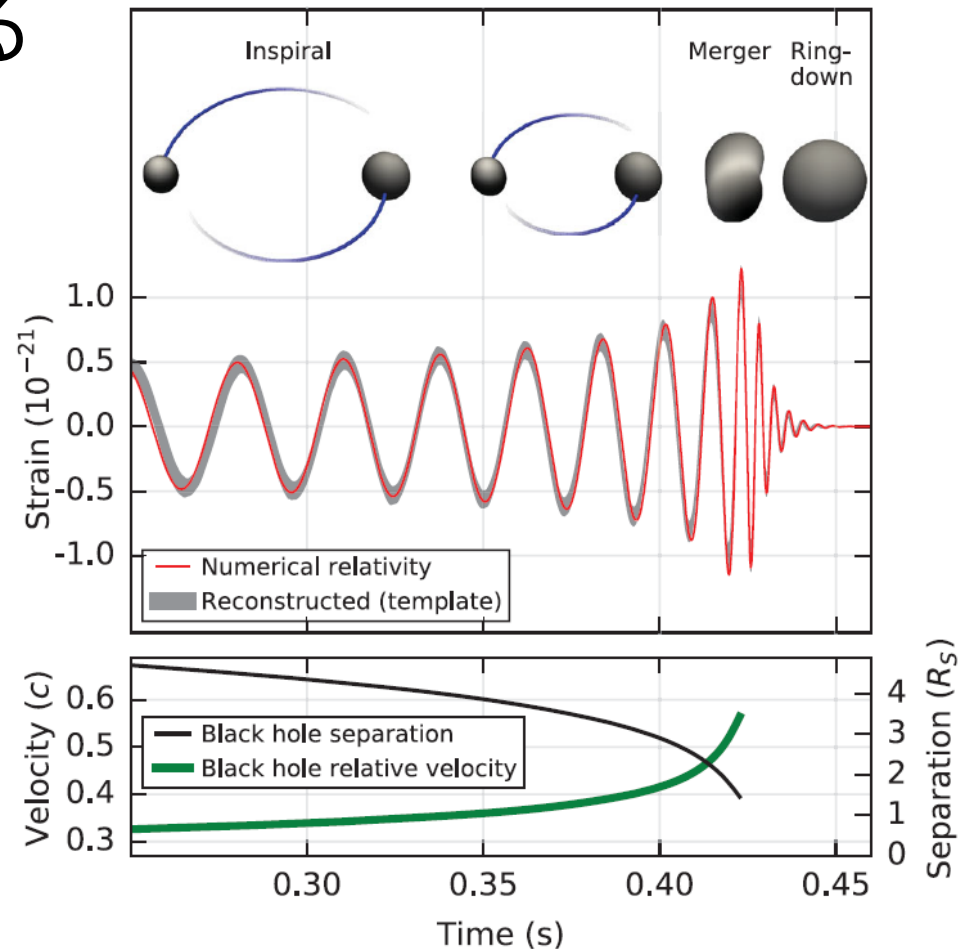
重力波は本当に伝播する

ブラックホールはある
(一番確実な証拠！)

その連星があって
さらに合体している

一般相対論は
まだまだ全く正しい

LIGO&Virgo (2016)



よくわからないこと

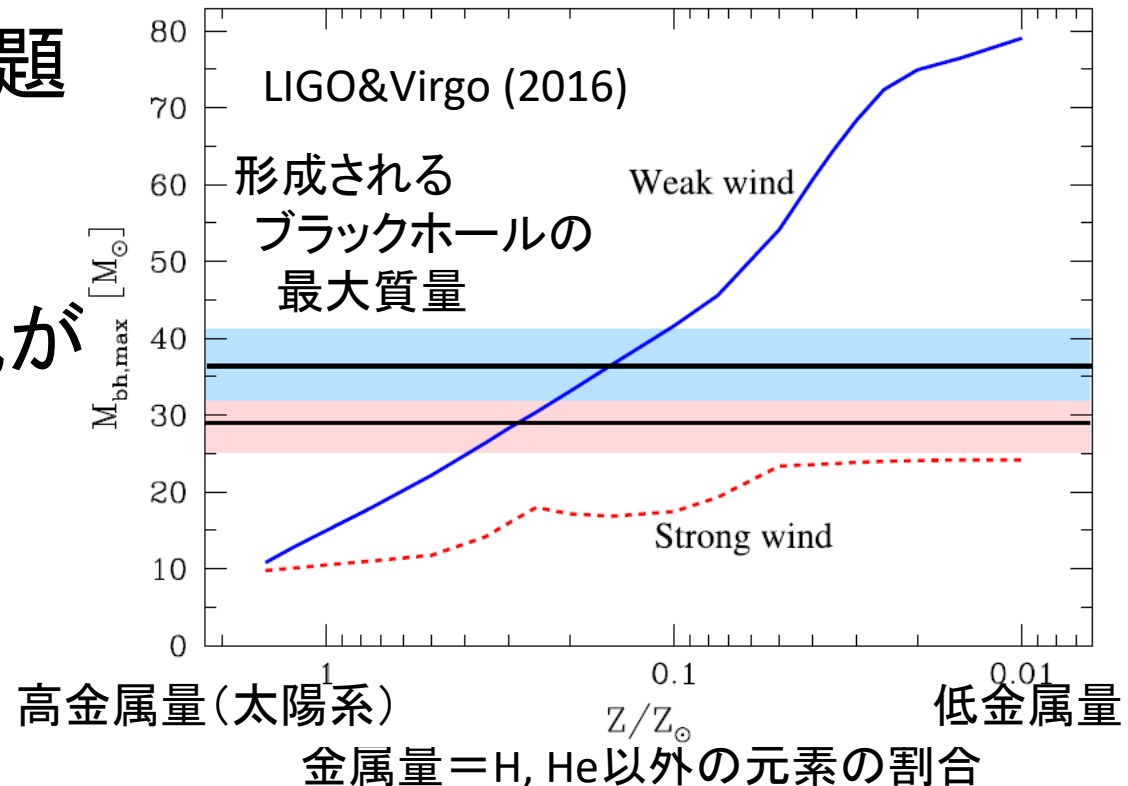
ブラックホールが妙に重い: 太陽の30倍程度

星は寿命のうちに恒星風で痩せ細ってしまうはず

恒星進化論への課題

普通に作るなら

低金属 + 弱恒星風が
必須なようである

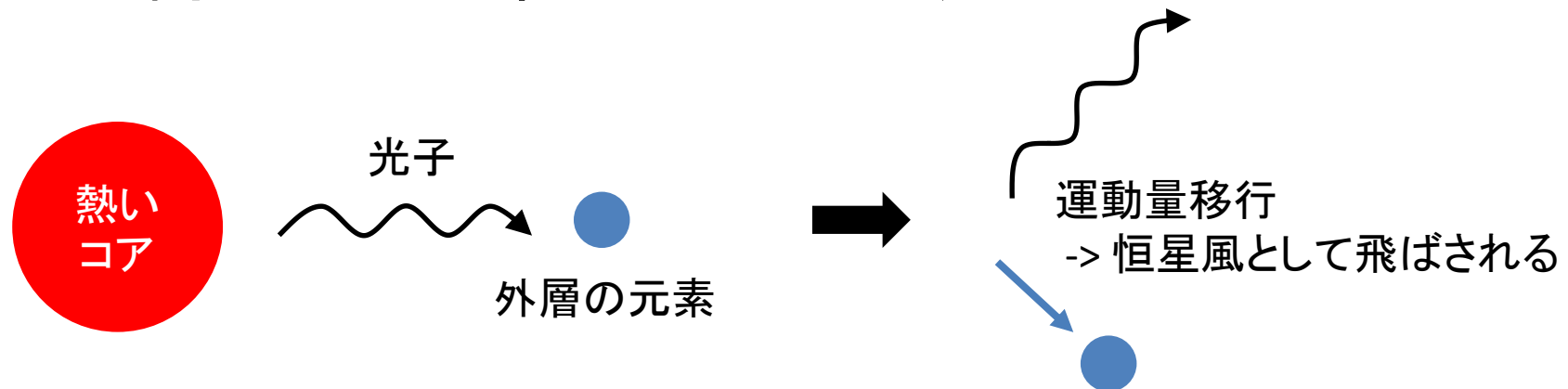


放射圧による恒星風

中心部から放射された光子は、原子の準位構造を通して外挿の物質と相互作用し、力を及ぼす

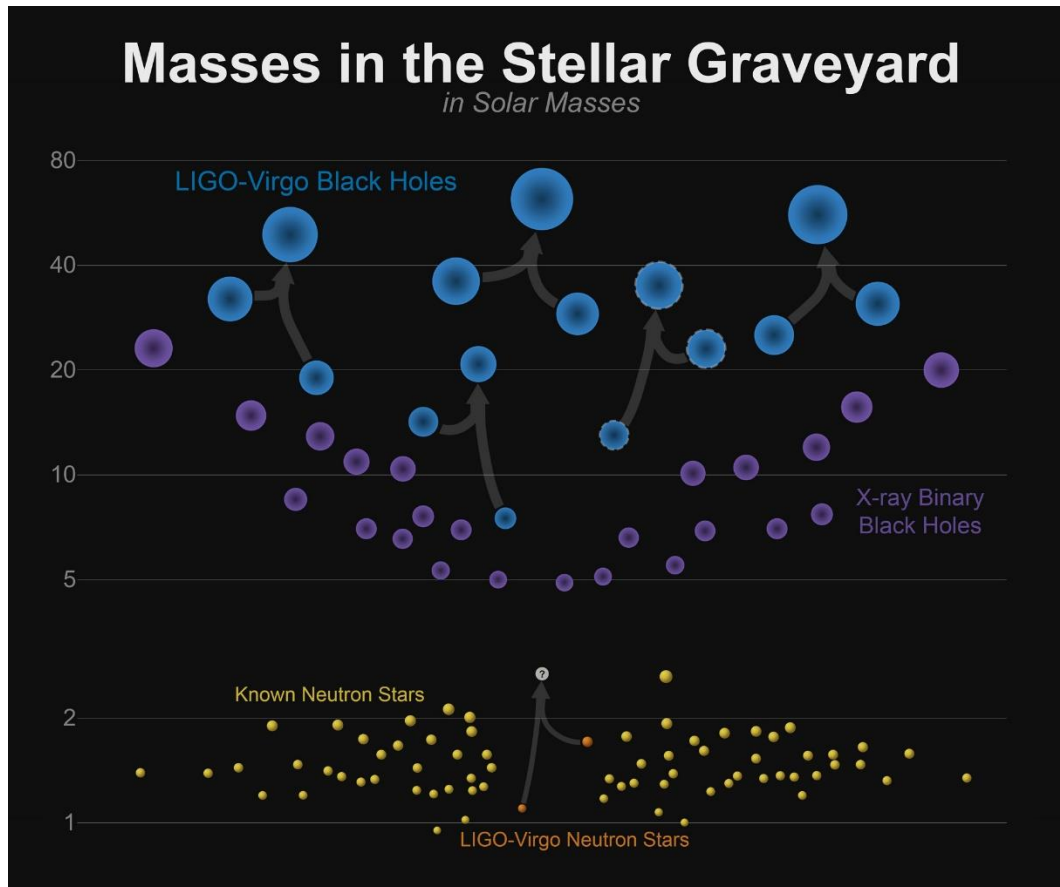
重元素では準位構造が豊富で相互作用が頻繁に起こるため、恒星風が強くなりやすい

逆に金属欠乏性は恒星風が弱く、重くいられる



連星ブラックホールのまとめ

重い連星ブラックホールは結構たくさんある



低金属のpop I/II

単独の連星

力学的形成

pop III

=宇宙の一番星

原始ブラックホール

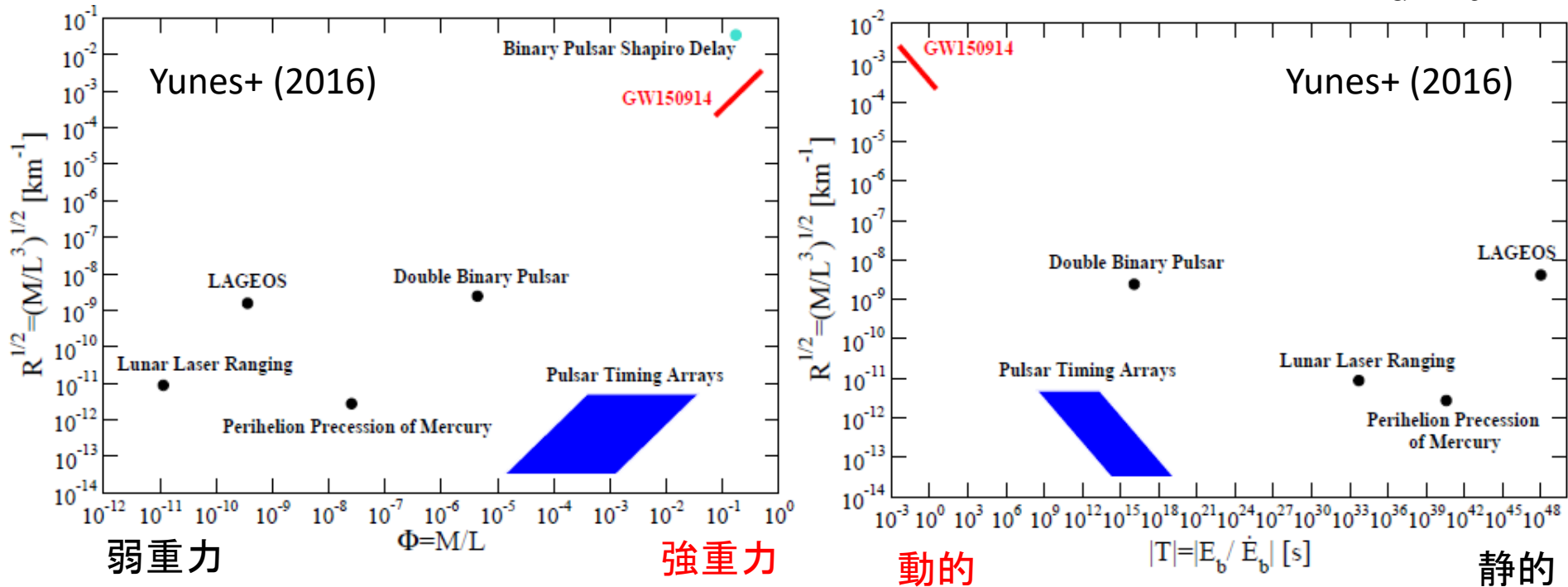
(インフレーション)

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

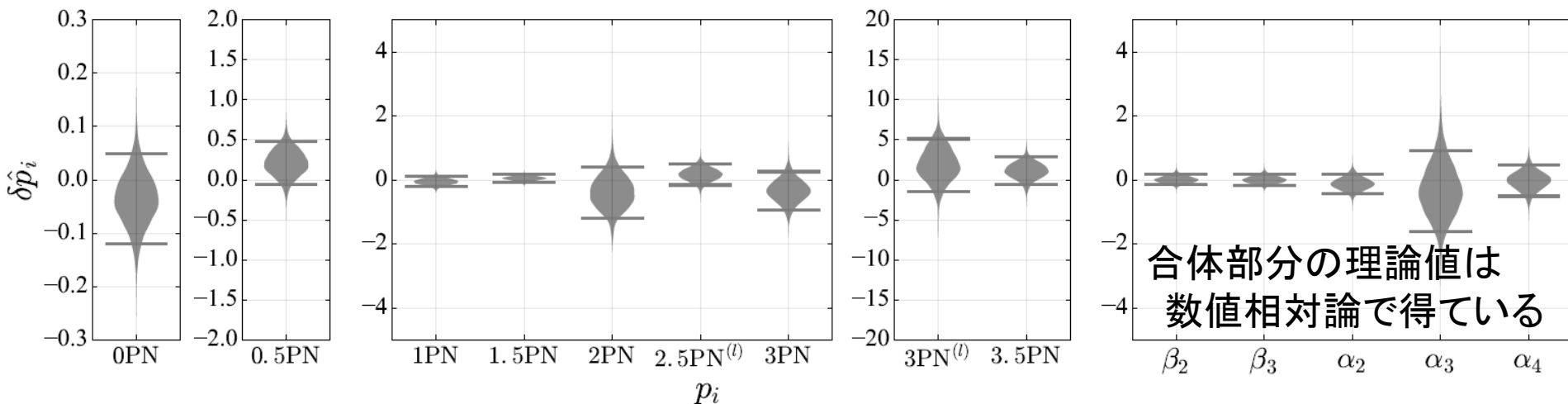
$$x = \left(\frac{v}{c} \right)^2 \equiv \left(\frac{G\pi f M}{c^3} \right)^{2/3}$$

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を合わせると改善

- 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

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

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

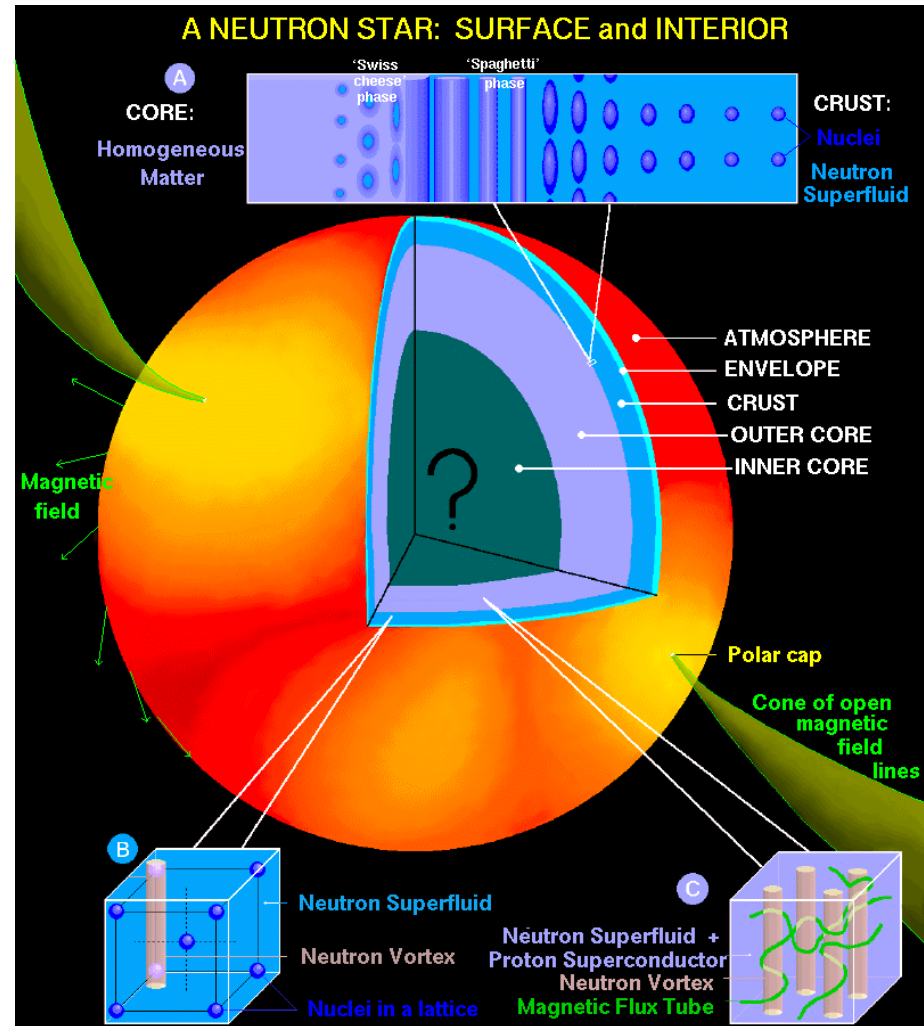
- 質量は太陽の~1.4倍

- 半径は10km程度

原子核の飽和密度以上

「巨大な原子核」

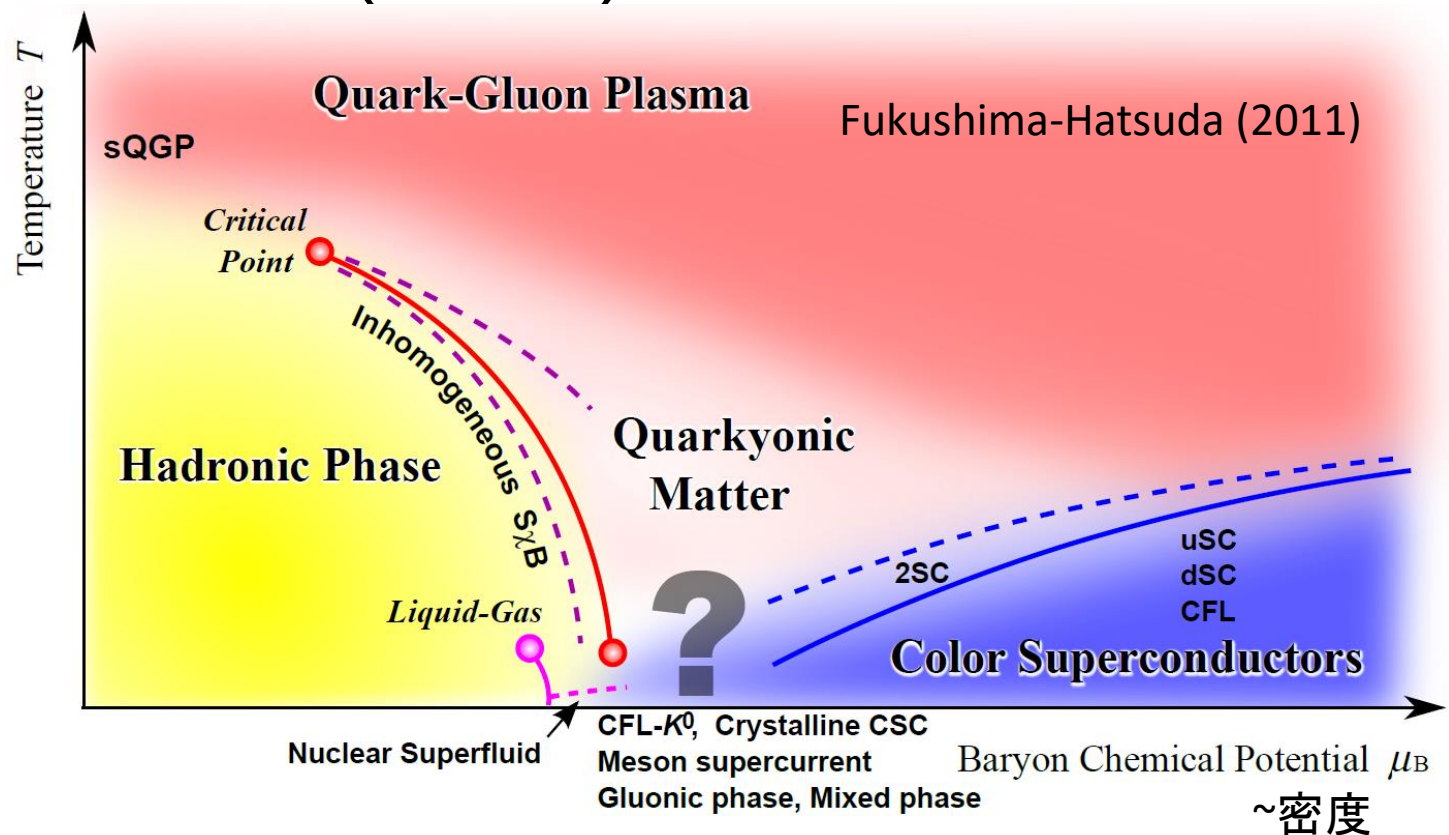
原子核物理の実験場



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

中性子星物質

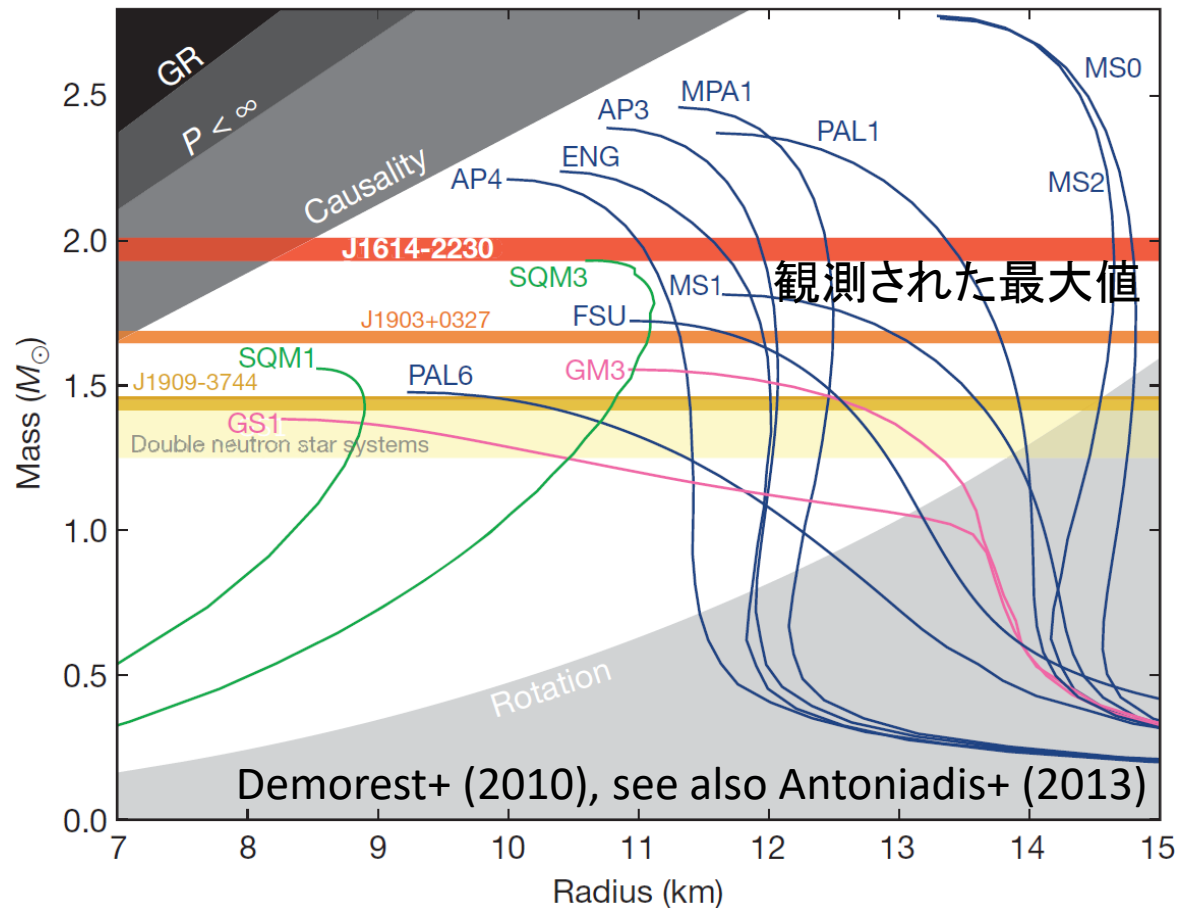
冷たく、高密度で、中性子過剰...地上で作れない
さらに $\sim 10^{17}$ G (10^{13} T)まで磁化していることもある



中性子星の最大質量

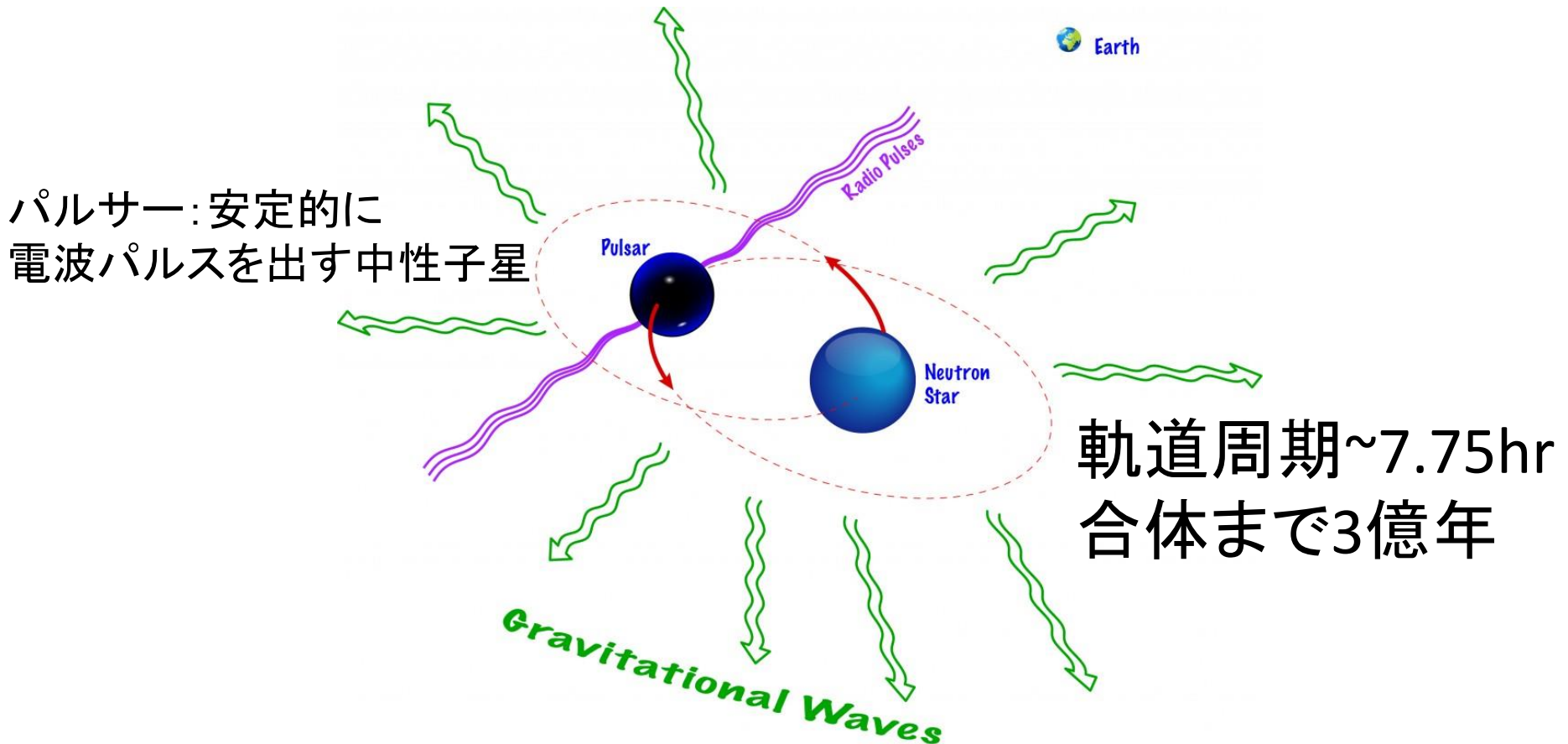
状態方程式のモデルに厳しい制限を課している

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>

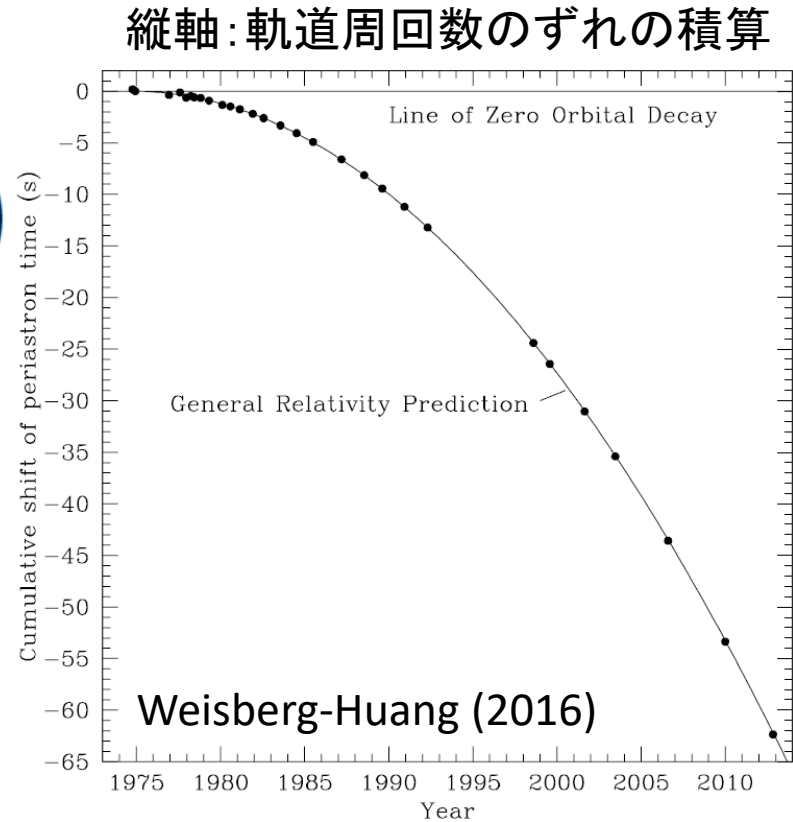
重力波放射の観測的証拠

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

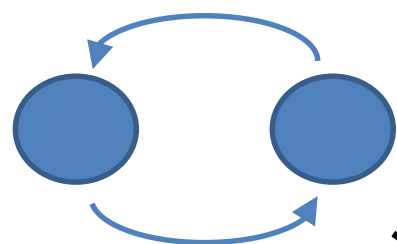
ただし重力波の伝播の確認には直接検出が必須



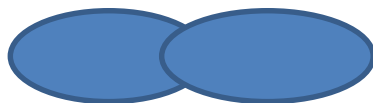
連星中性子星からの重力波

Early inspiral: 質量、スピン...

Postmerger: 高温高密度の物理？

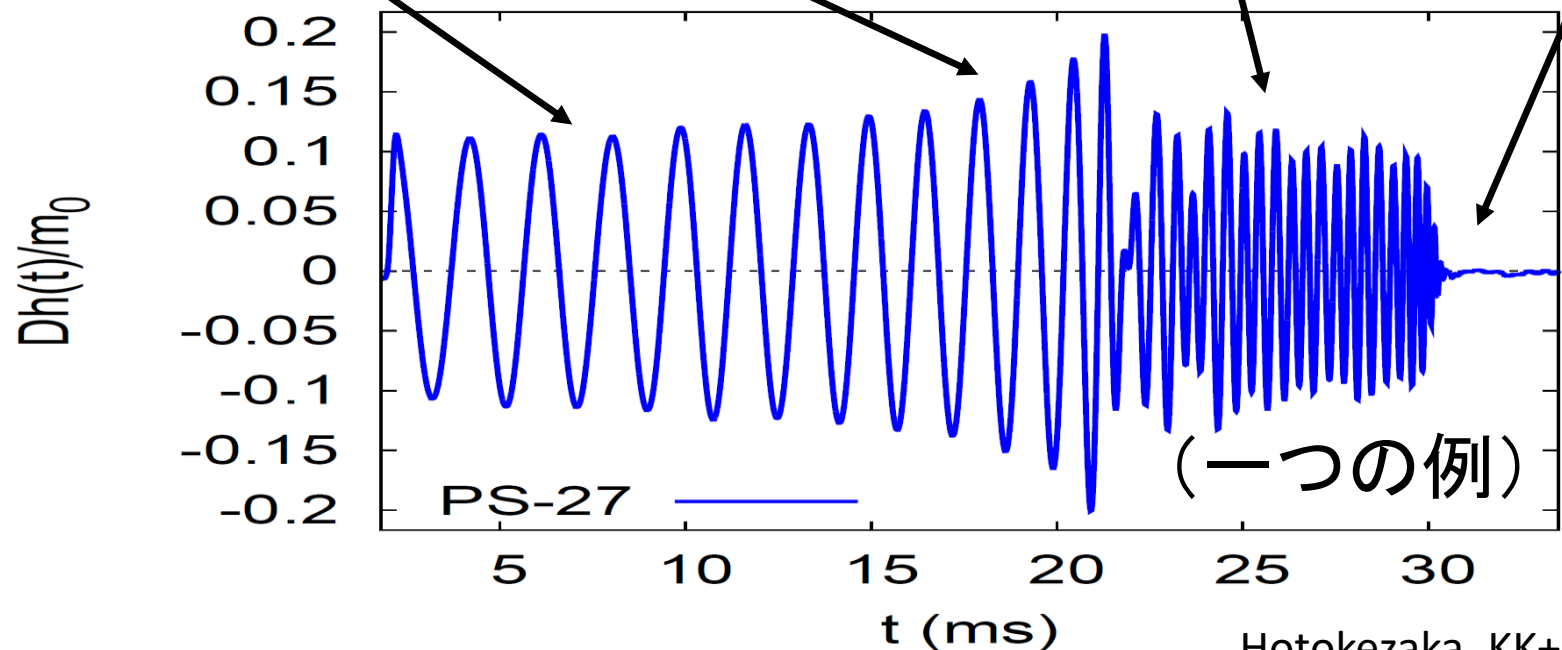
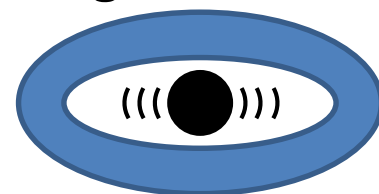


Late inspiral and merger: 潮汐変形、状態方程式



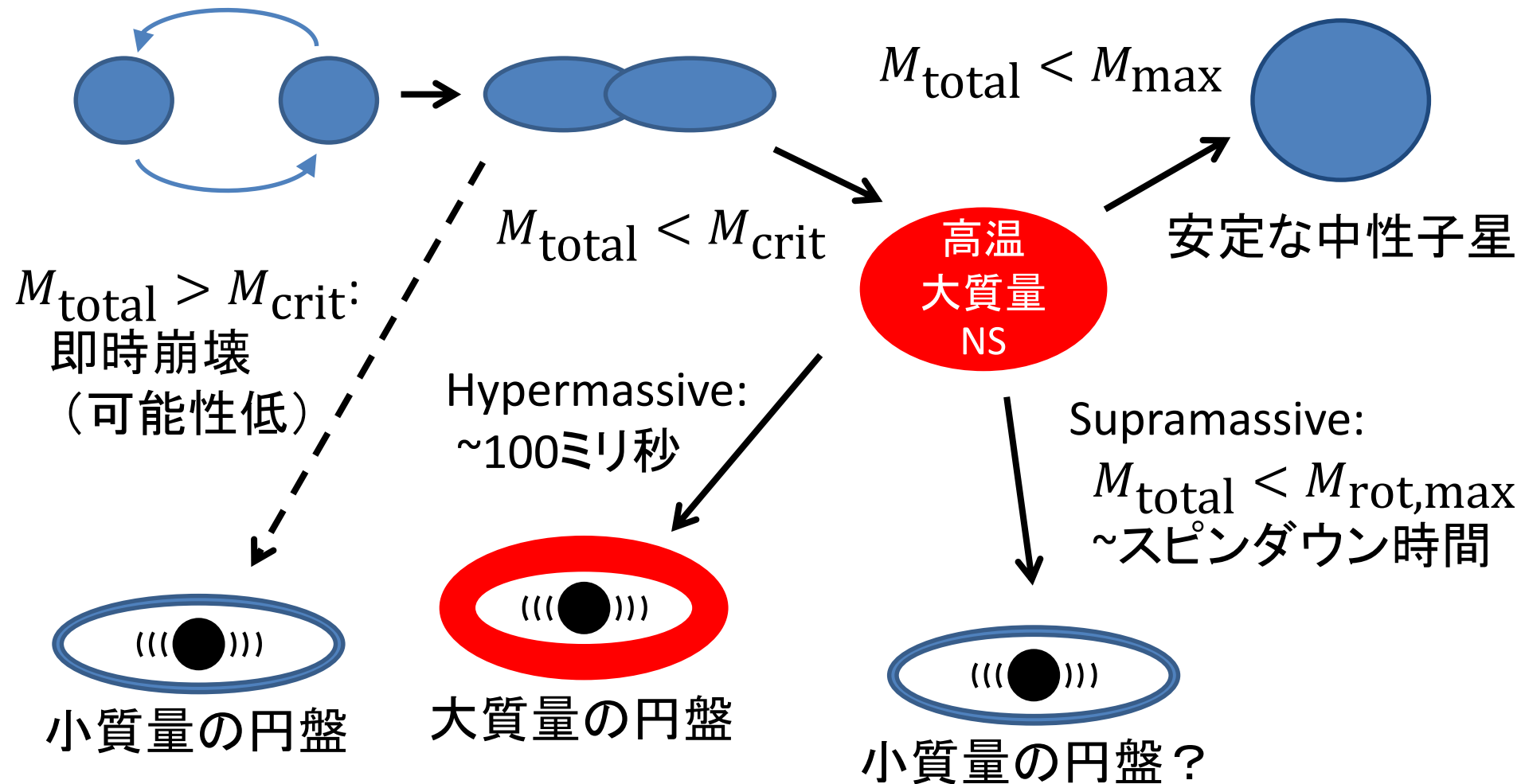
(H/S)
MNS

Ringdown: GR



Hotokezaka, KK+ (2011)

連星中性子星の辿る運命



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

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

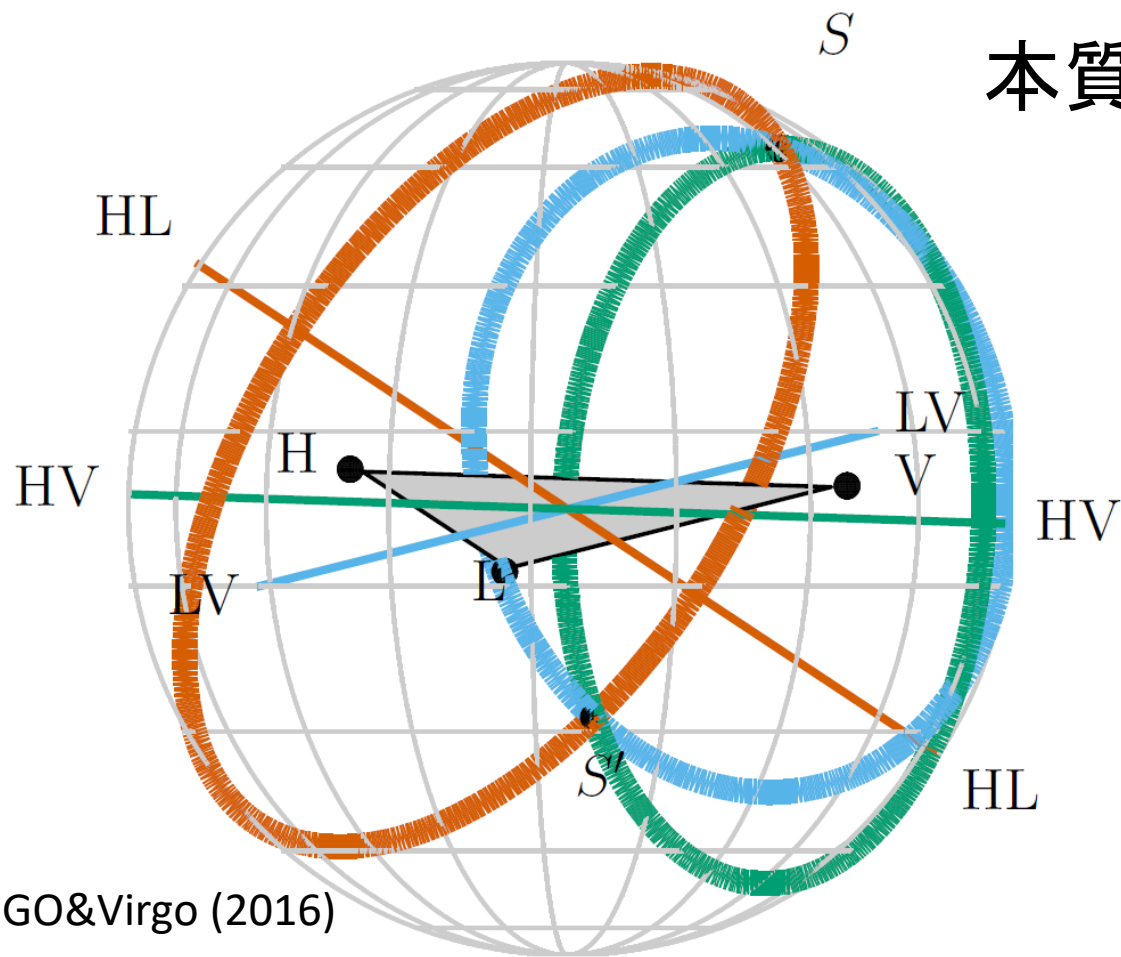
- 磁場が合体後の系の運動や放射を影響する

- 高温になった物質がニュートリノで冷却される

重力波検出器での位置決定

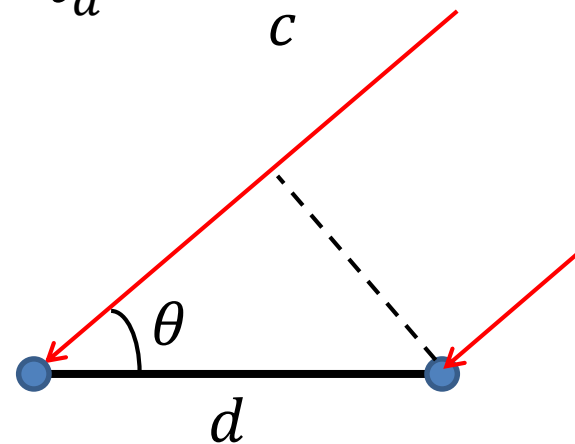
時間差を利用して天球上での位置を三角測量

本質的に複数台必要



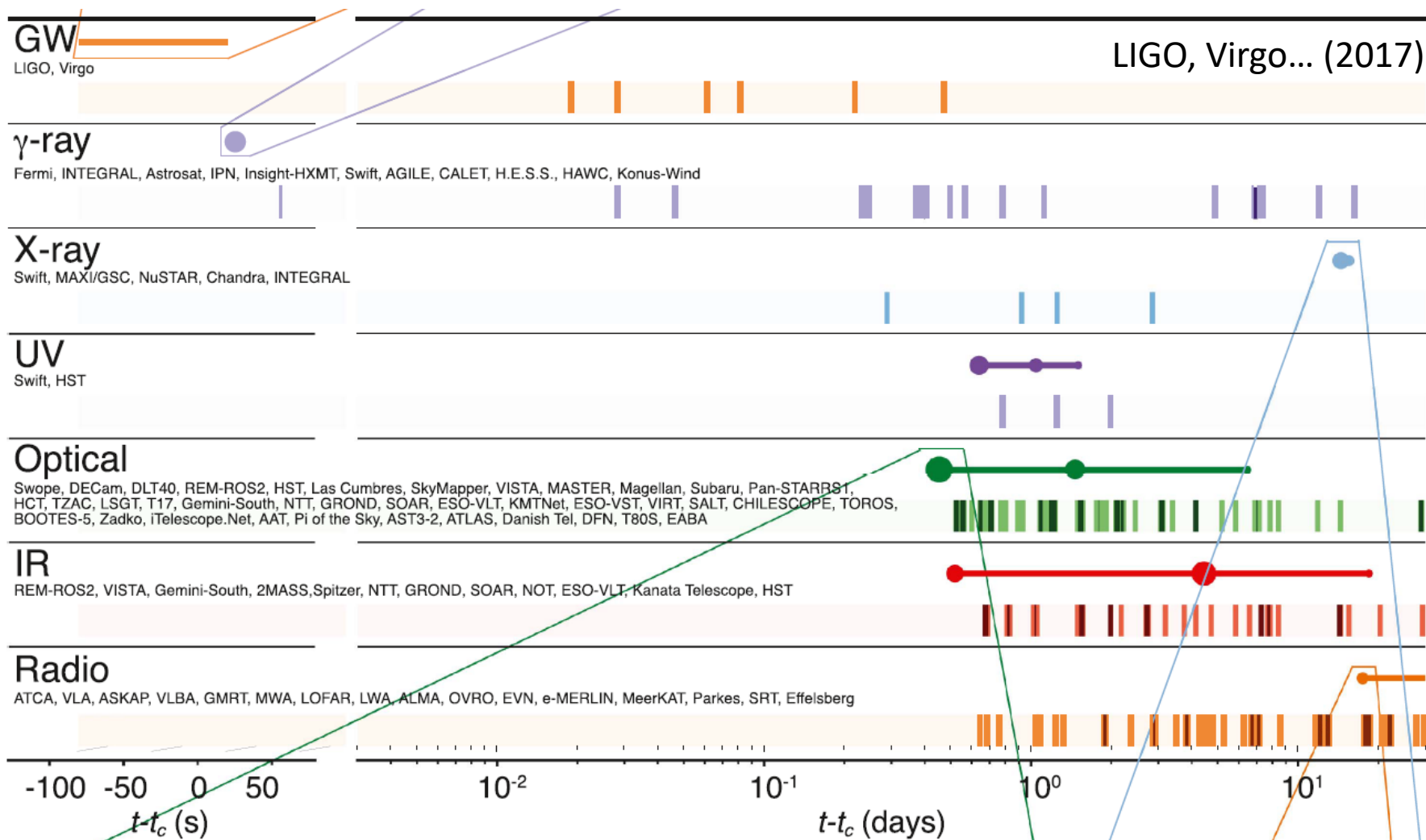
$d \sim O(1000\text{km})$

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



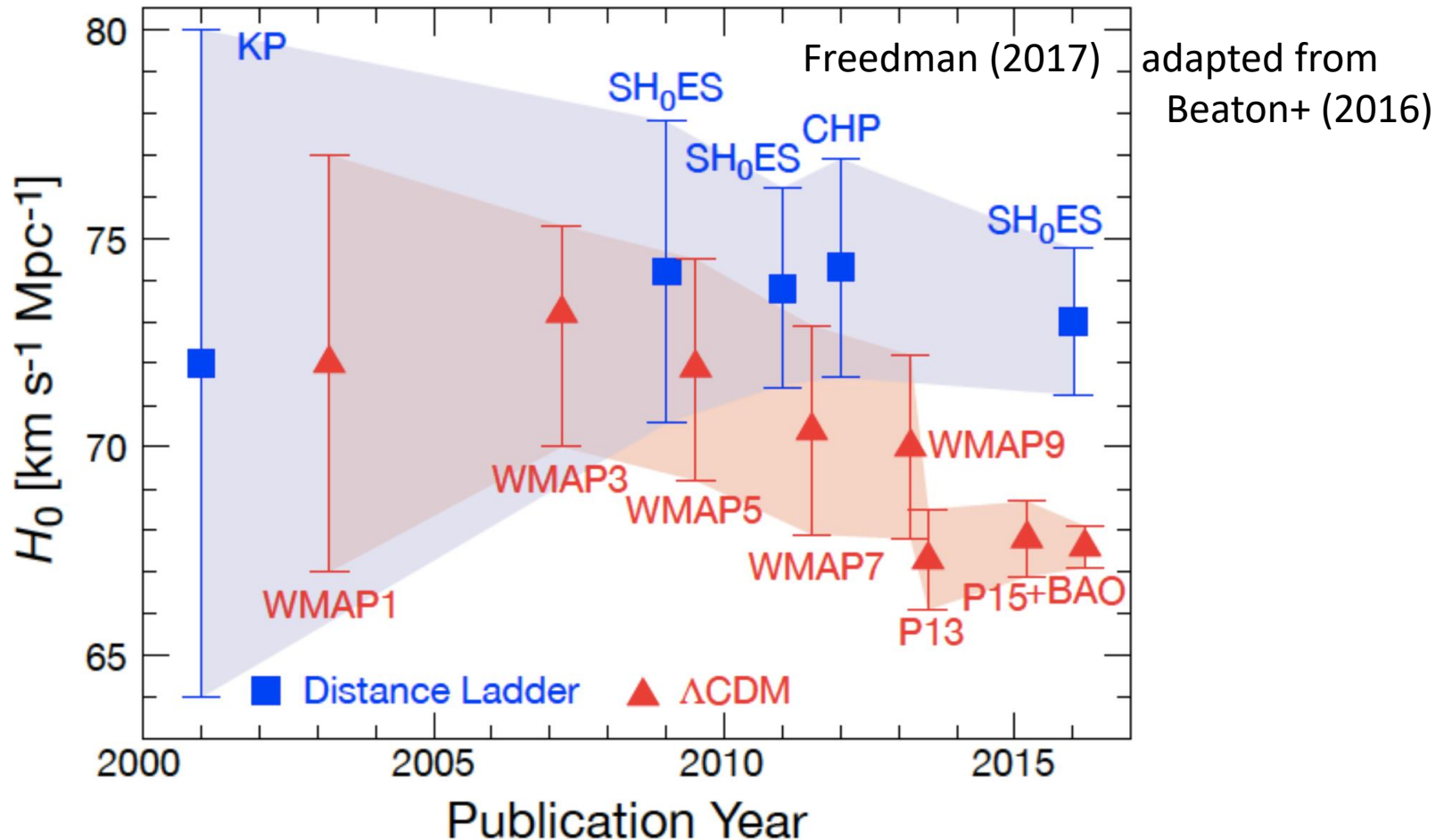
LIGO&Virgo (2016)

電磁波追観測



Hubble tension?

GW+EMでこの3.4シグマの差を独立に調べる



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

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

軌道・流体の作用

軌道運動

$$S_{\text{orb}} = \int \left[\frac{1}{2} \mu (\dot{r}^2 + r^2 \dot{\varphi}^2) + \frac{M\mu}{r} \right] dt$$

星の振動(モードごと)

$$S_{\text{osc}} = \int \frac{1}{4\lambda\omega^2} (\dot{Q}^{ij} \dot{Q}_{ij} - \omega^2 Q^{ij} Q_{ij}) dt$$

相互作用

$$S_{\text{int}} = -\frac{1}{2} \int Q^{ij} \varepsilon_{ij} dt$$

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 ($m_1 \leq m_2$)

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

GW170817から最大質量へ

仮定に応じて中性子星の最大質量にも制限

- 可視光がマグネターモデルっぽくないことから

Margalit-Metzger: $\leq 2.17 M_{\odot}$

Shibata+KK+: $2.15 - 2.25 M_{\odot}$

- GRBジェットはブラックホールからだろうと思えば

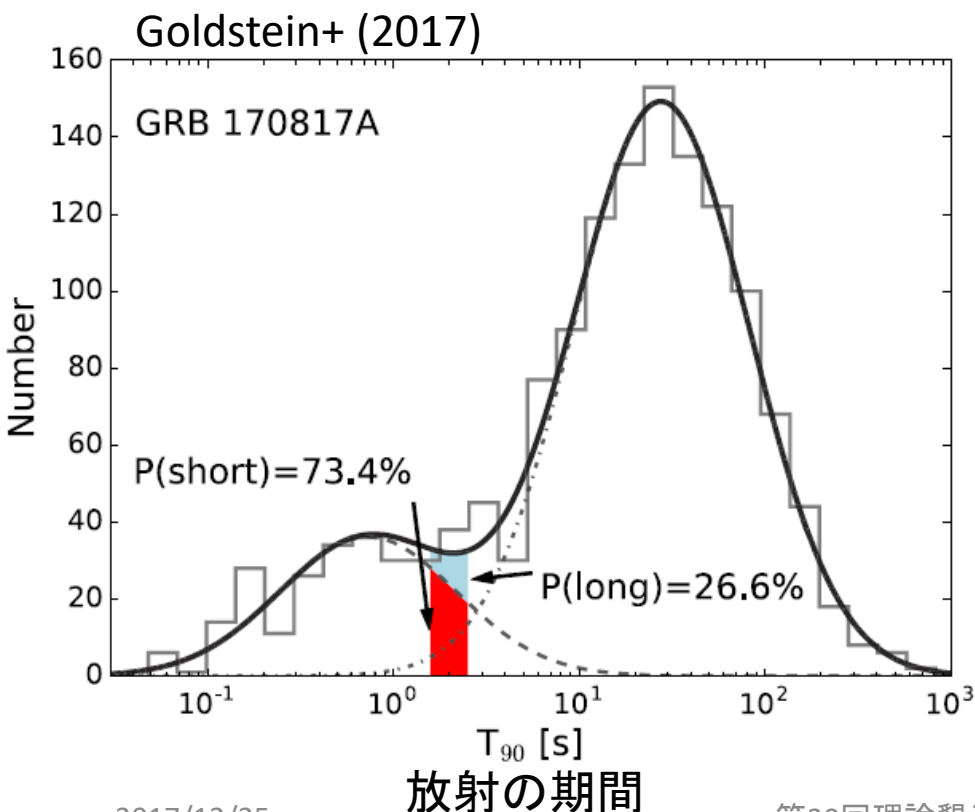
Rezzolla+, Ruiz+: $\leq 2.16 M_{\odot}$

個々の議論が必ずしも決定的なわけではないが、
同じような値が制限として導かれてはいる

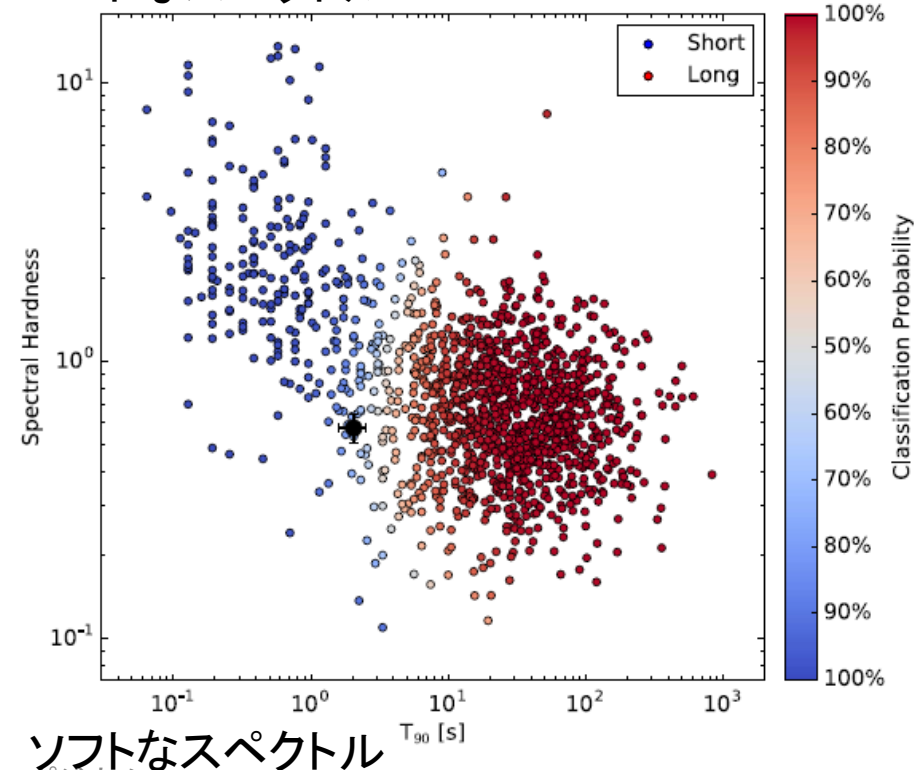
連星合体説の検証

ショートガンマ線バーストに見える (but not hard)

-> 本当に連星中性子星の合体が駆動していた！

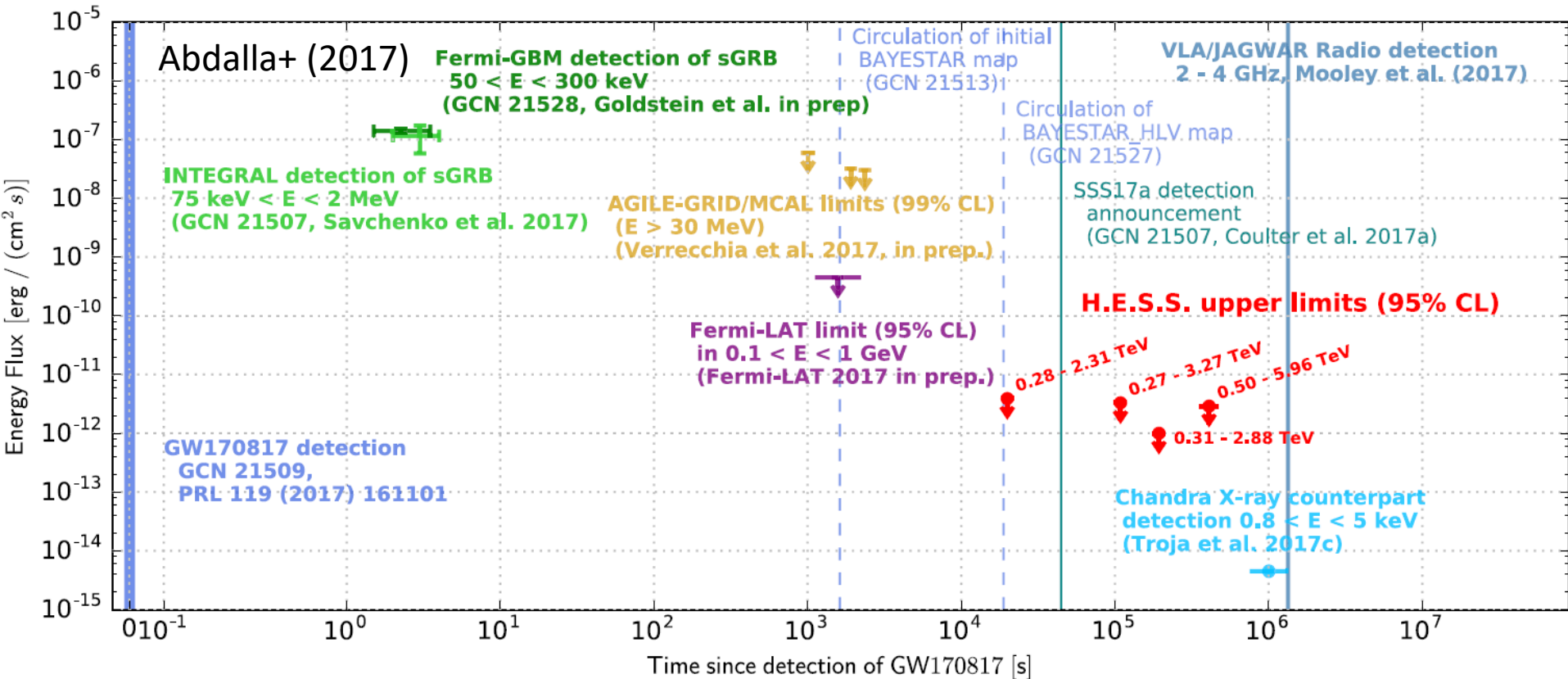


ハードなスペクトル



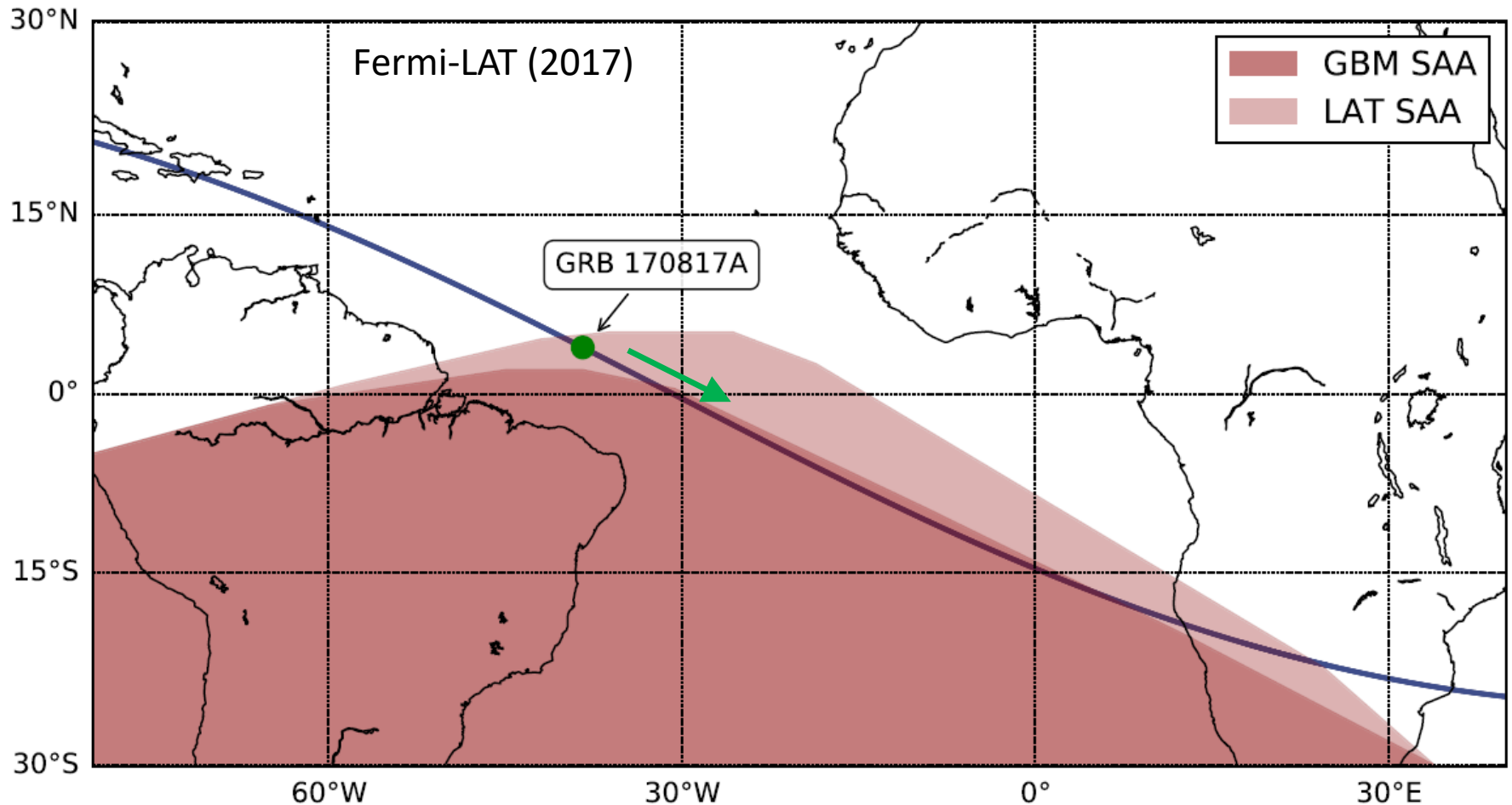
他の高エネルギーガンマ線

MeV以上のガンマ線やニュートリノは上限のみ、
Fermi/LATの上限もGBMからはかなり遅れた時期



FermiとSouth Atlantic Anomaly

背景粒子が多く感度が悪い、特にFermi/LATはoff



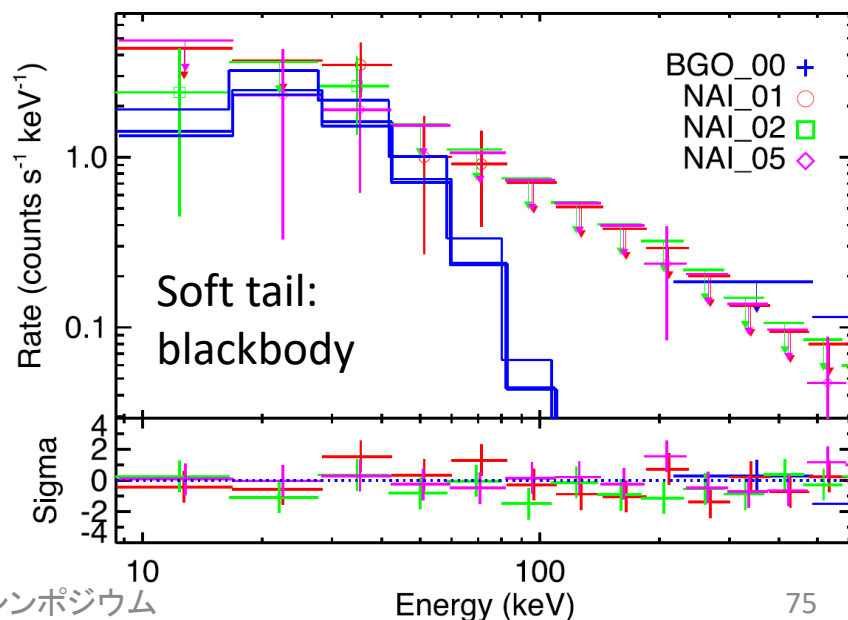
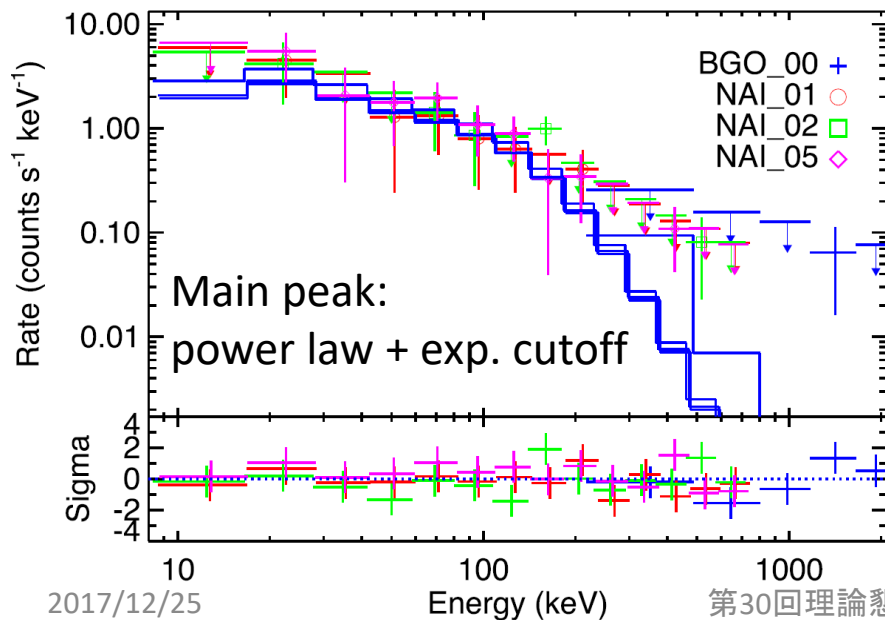
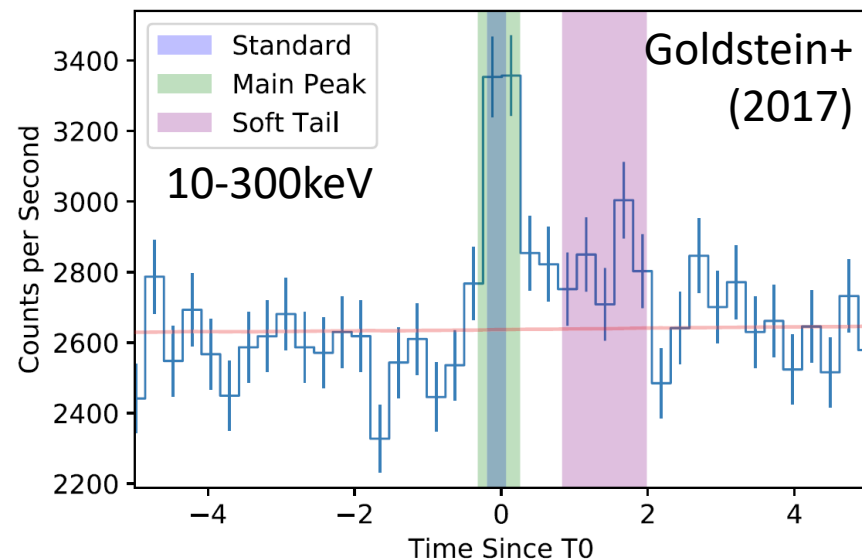
2成分の即時放射

Main peak: $E_p \approx 185$ keV

Soft tail: $k_B T \approx 10$ keV

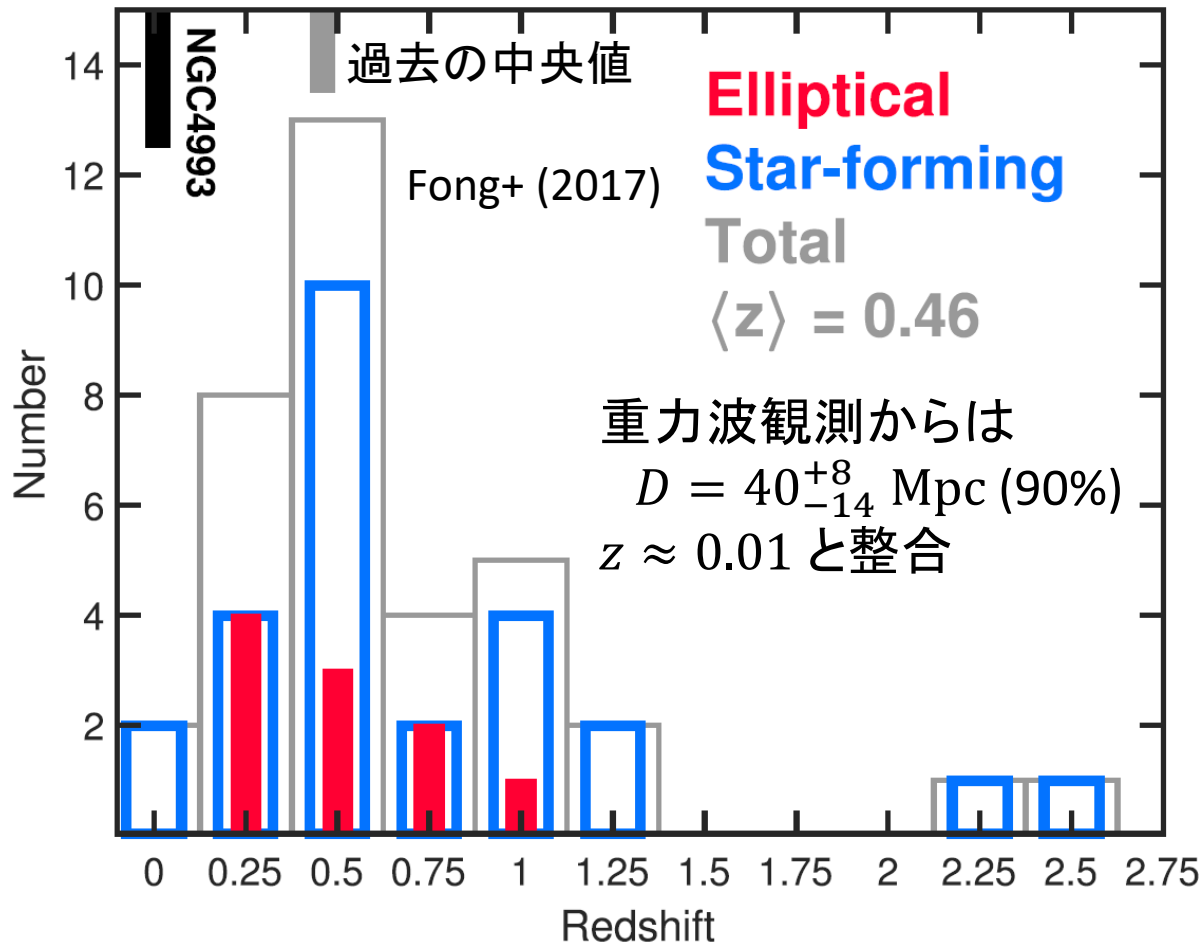
特に「コンパクト」でない

$\Gamma > 2 - 3$ で十分整合的



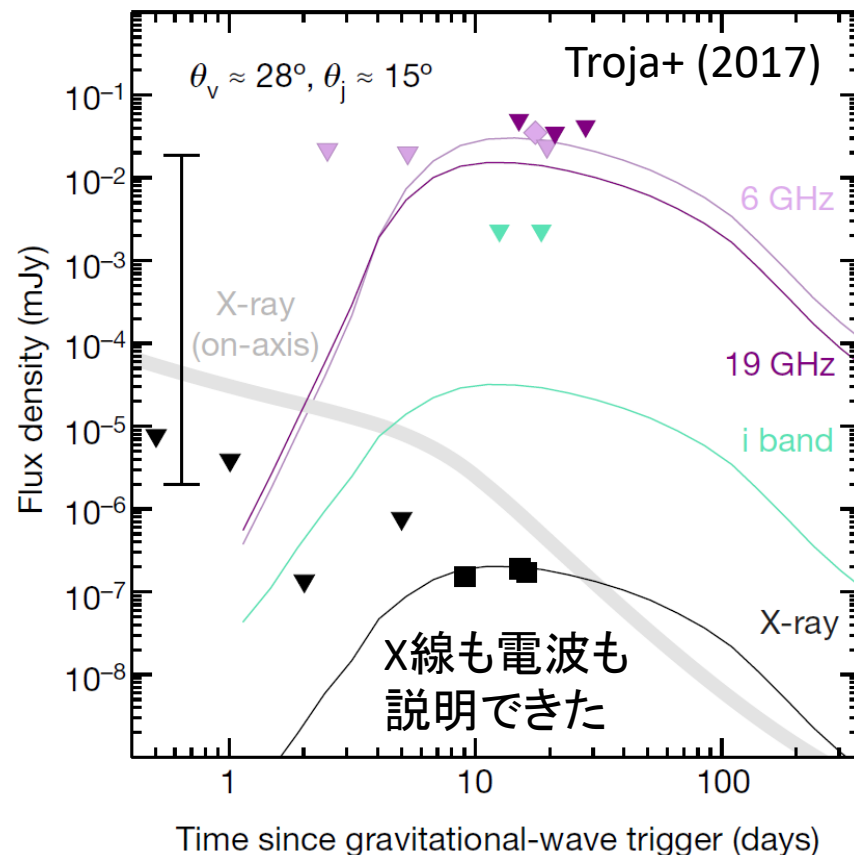
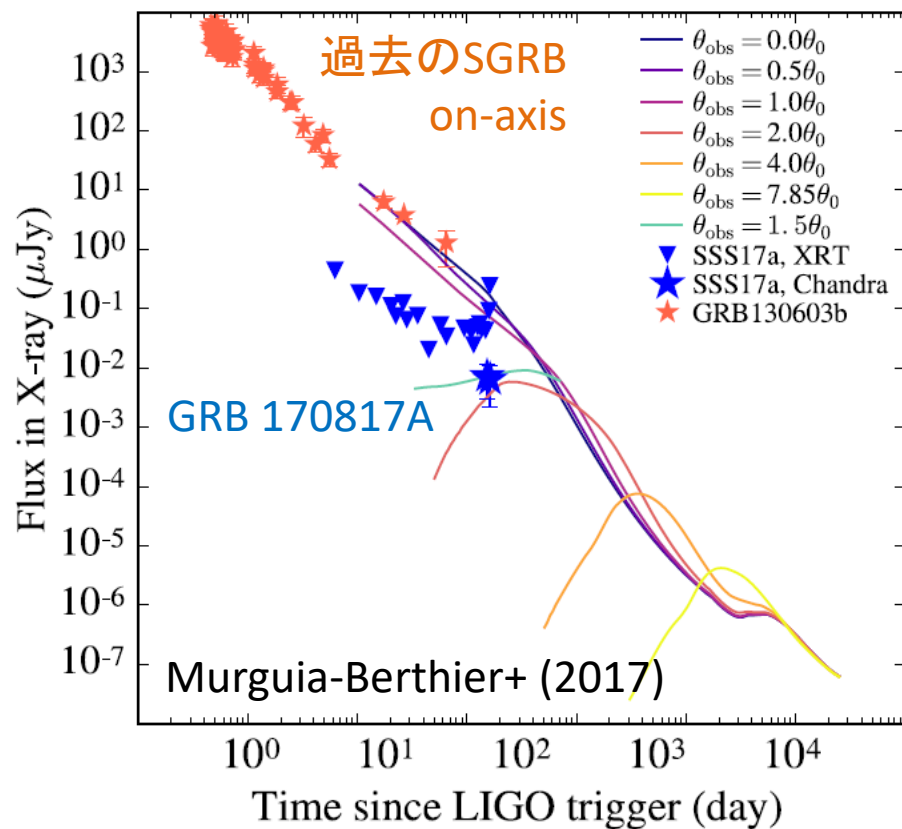
史上最最近接ショートガンマ線バースト

赤方偏移が測られたショートGRBの中での比較



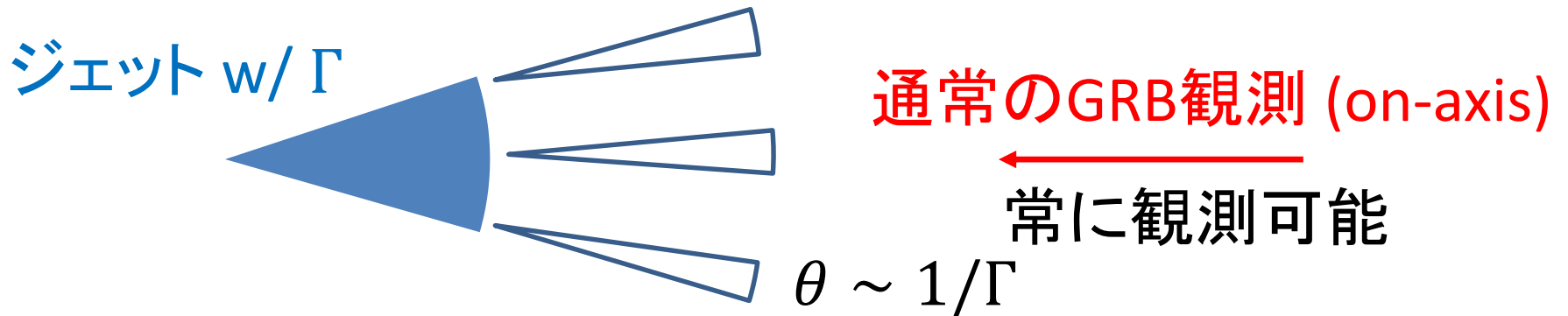
Off-axis? 初期のX線・電波残光

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



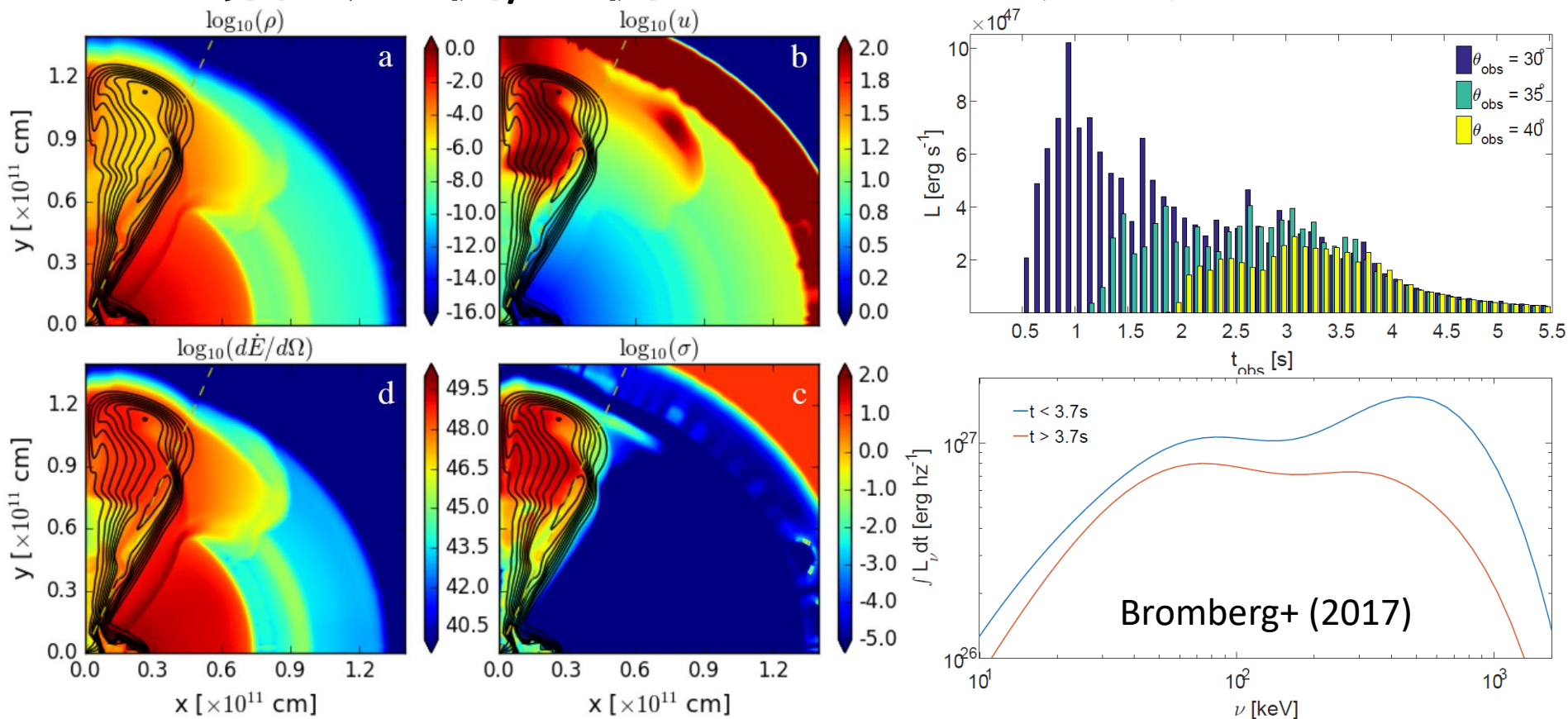
残光の放射過程は
ジェット vs 周囲の物質で
衝撃波を立てた末の
非熱的シンクロトロン
(電子加速・磁場増幅)

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

磁場ジェットの場合

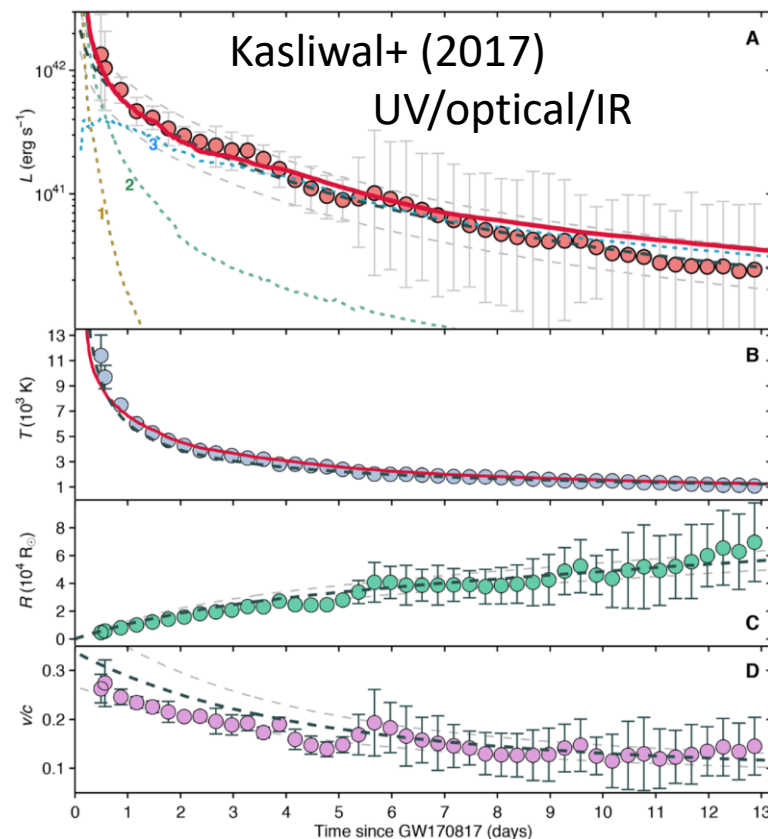
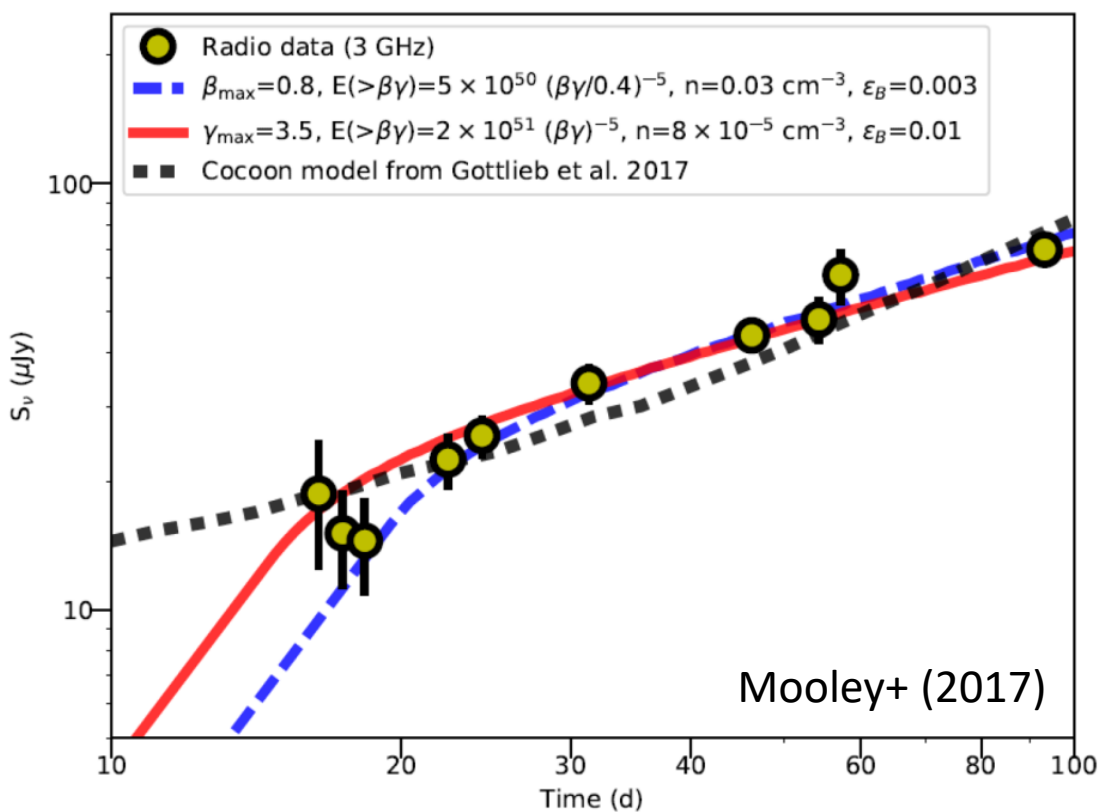
中心エンジンがマグネターでも同様の放射が可能
 この場合、内側/外側のコクーンは混ざりにくい



電波観測との整合性

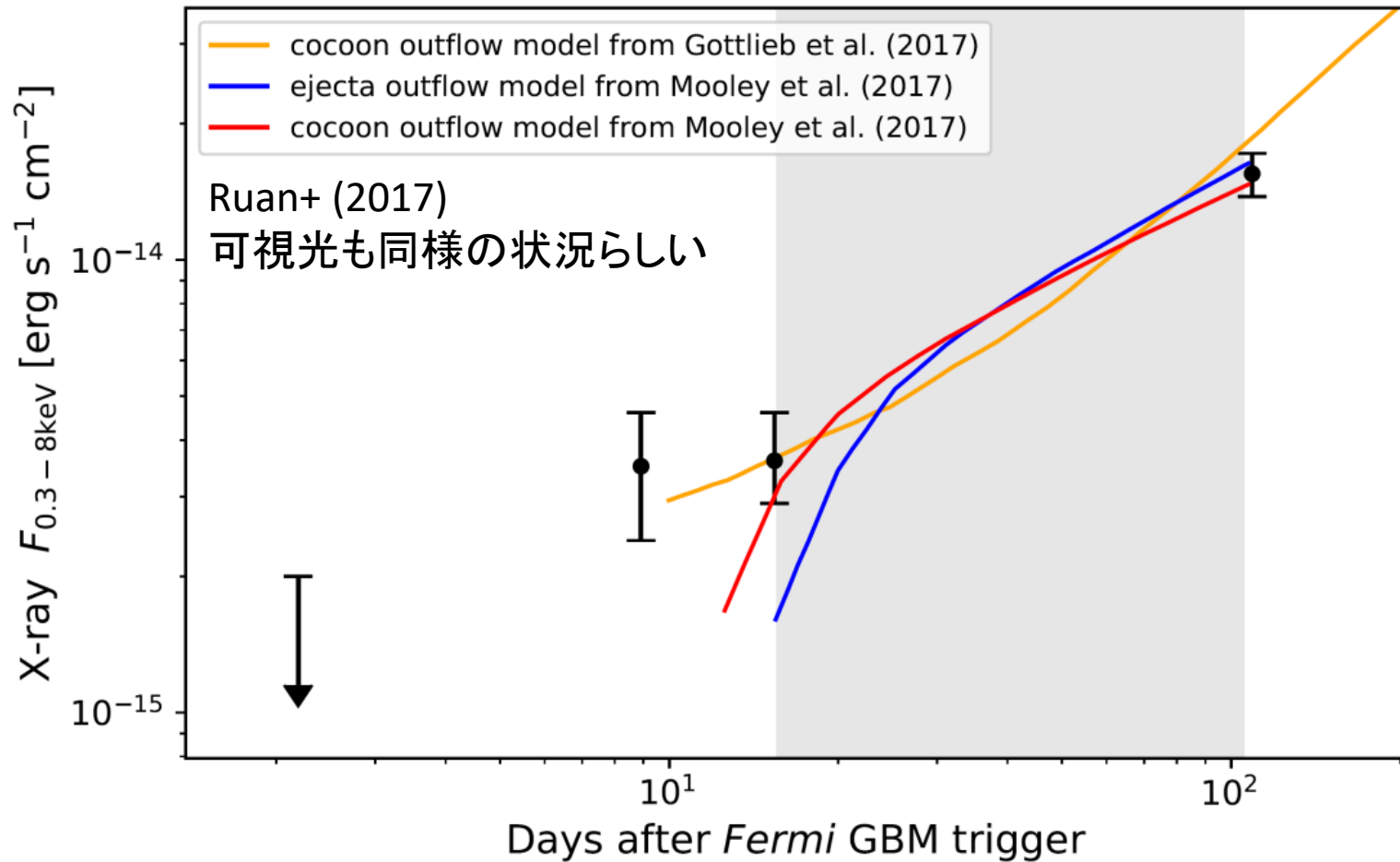
~1日後の青いキロノヴァを説明するにも好都合

→ GRB 170817Aは典型的なショートGRBではない



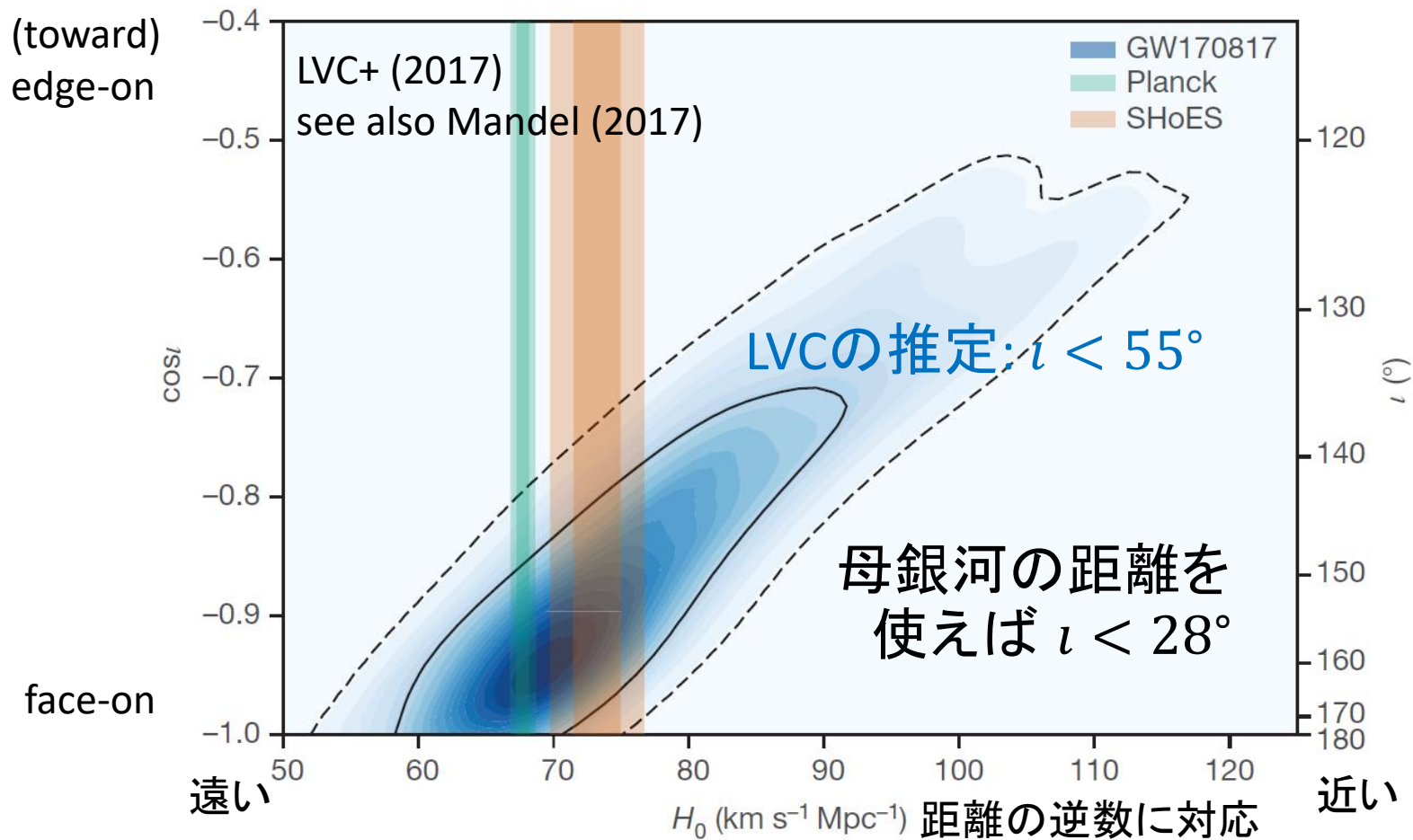
100日後のX線

電波観測と整合していて、ジェットの兆候はない



距離-軌道傾斜角の縮退

VirgoかKAGRAがあれば $\Delta l < 5^\circ$ 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)

Arun+ (2014)

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

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

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

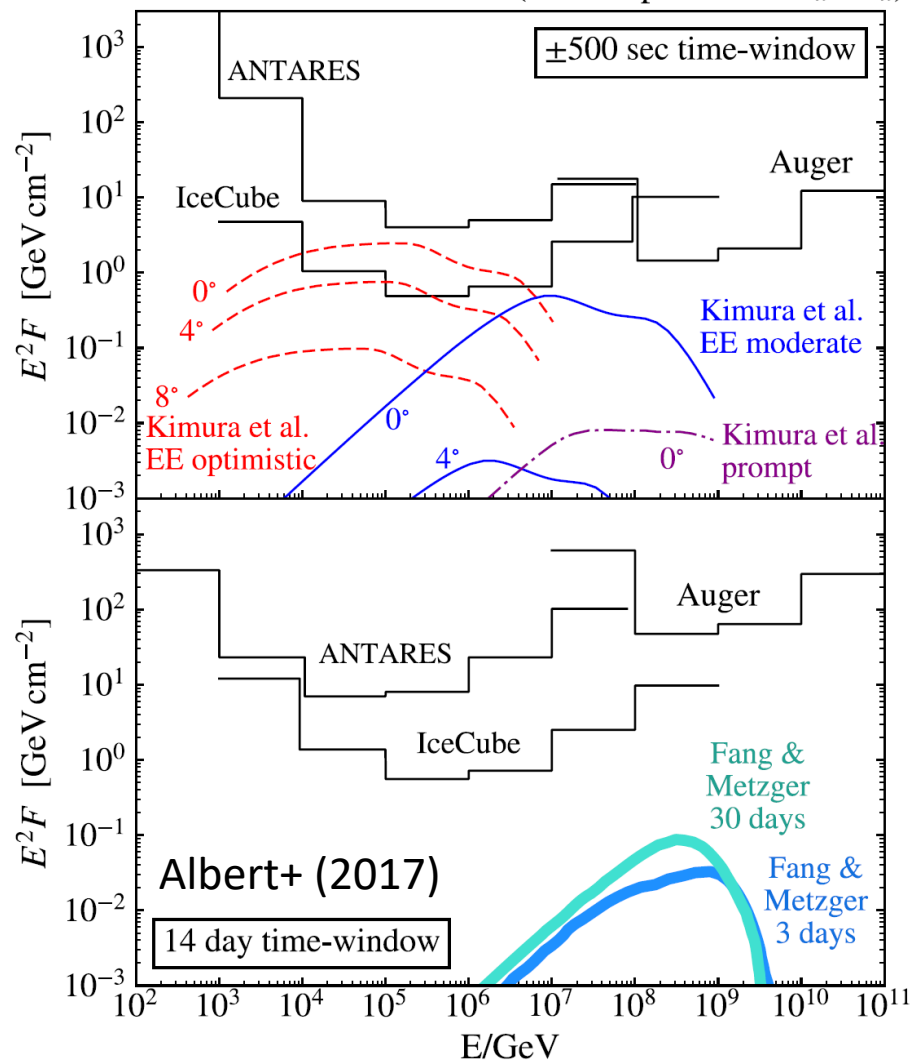
高エネルギーニュートリノの上限

時間・空間的に相関した
ニュートリノはなかった

モデルへの制限は弱い
(on-axisの一部くらい)

SK/KamLANDの解析が
進行しているらしい

GW170817 Neutrino limits (fluence per flavor: $\nu_x + \bar{\nu}_x$)



熱的ニュートリノの観測可能性

無茶は承知で Kyutoku-Kashiyama (2017) arXiv:1710.05922

Detectability of thermal neutrinos from binary-neutron-star mergers and implication to neutrino physics

Koutarou Kyutoku^{1,2,3,4} and Kazumi Kashiyama⁵

We propose a long-term strategy for detecting thermal neutrinos from the remnant of binary-neutron-star mergers with a future M-ton water-Cherenkov detector such as Hyper-Kamiokande. Monitoring $\gtrsim 2500$ mergers within $\lesssim 200$ Mpc, we may be able to detect a single neutrino with a human-time-scale operation of ≈ 80 Mt years for the merger rate of $1 \text{ Mpc}^{-3} \text{ Myr}^{-1}$, which is slightly lower than the median value derived by the LIGO-Virgo collaboration with GW 170817. Although the number of neutrino events is minimal, contamination from other sources of neutrinos can be reduced efficiently to ≈ 0.03 by analyzing only ≈ 1 s after each merger identified with gravitational-wave detectors if Gadolinium is dissolved in the water. The contamination may be reduced further to ≈ 0.01 if we allow the increase of waiting time by a factor of ≈ 1.7 . The detection of even a single neutrino can pin down the energy scale of thermal neutrino emission from binary-neutron-star mergers and could strongly support formation of remnant massive neutron stars. Because the mass of gravitons are now securely constrained to $\lesssim 10^{-22} \text{ eV}/c^2$ by binary-black-hole mergers, the time delay of a neutrino from gravitational waves can be used to put an upper limit of $\lesssim O(10) \text{ meV}/c^2$ on the absolute neutrino mass in the *lightest* eigenstate. Large neutrino detectors will enhance the detectability, and in particular, 5 Mt Deep-TITAND and 10 Mt MICA planned in the future will allow us to detect thermal neutrinos every ≈ 16 and 8 years, respectively, increasing the significance.

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

