

第31回 理論懇シンポジウム「宇宙物理の標準理論：未来へ向けての再考」

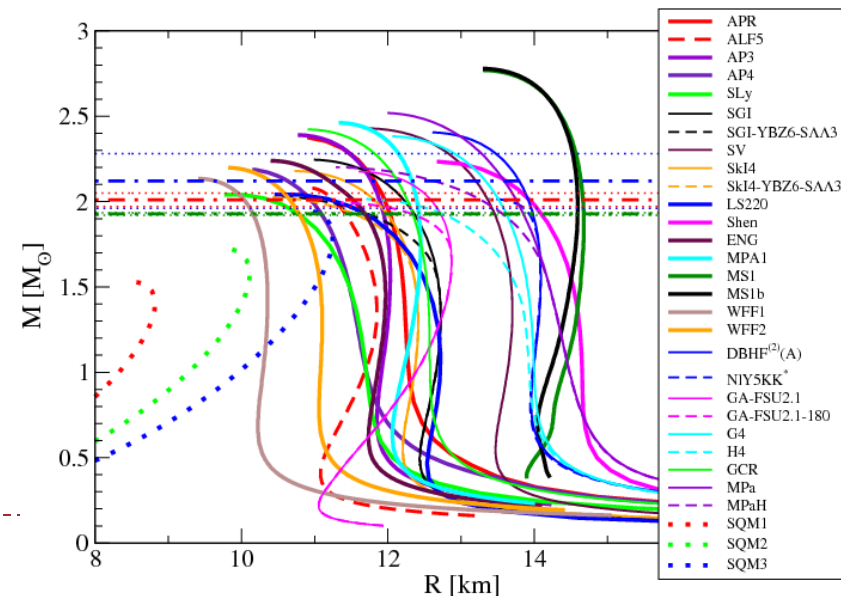
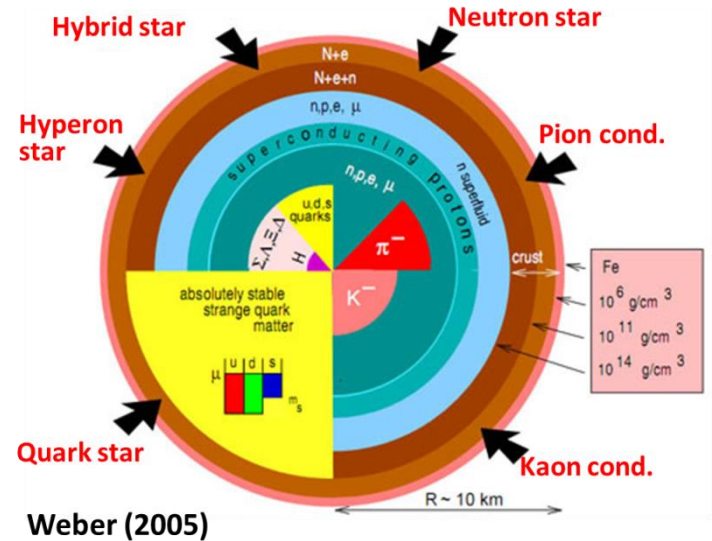
連星合体からの重力波で探る高密度天体

関口 雄一郎（東邦大学）

Major scientific achievements: GW170817 provided us clues to

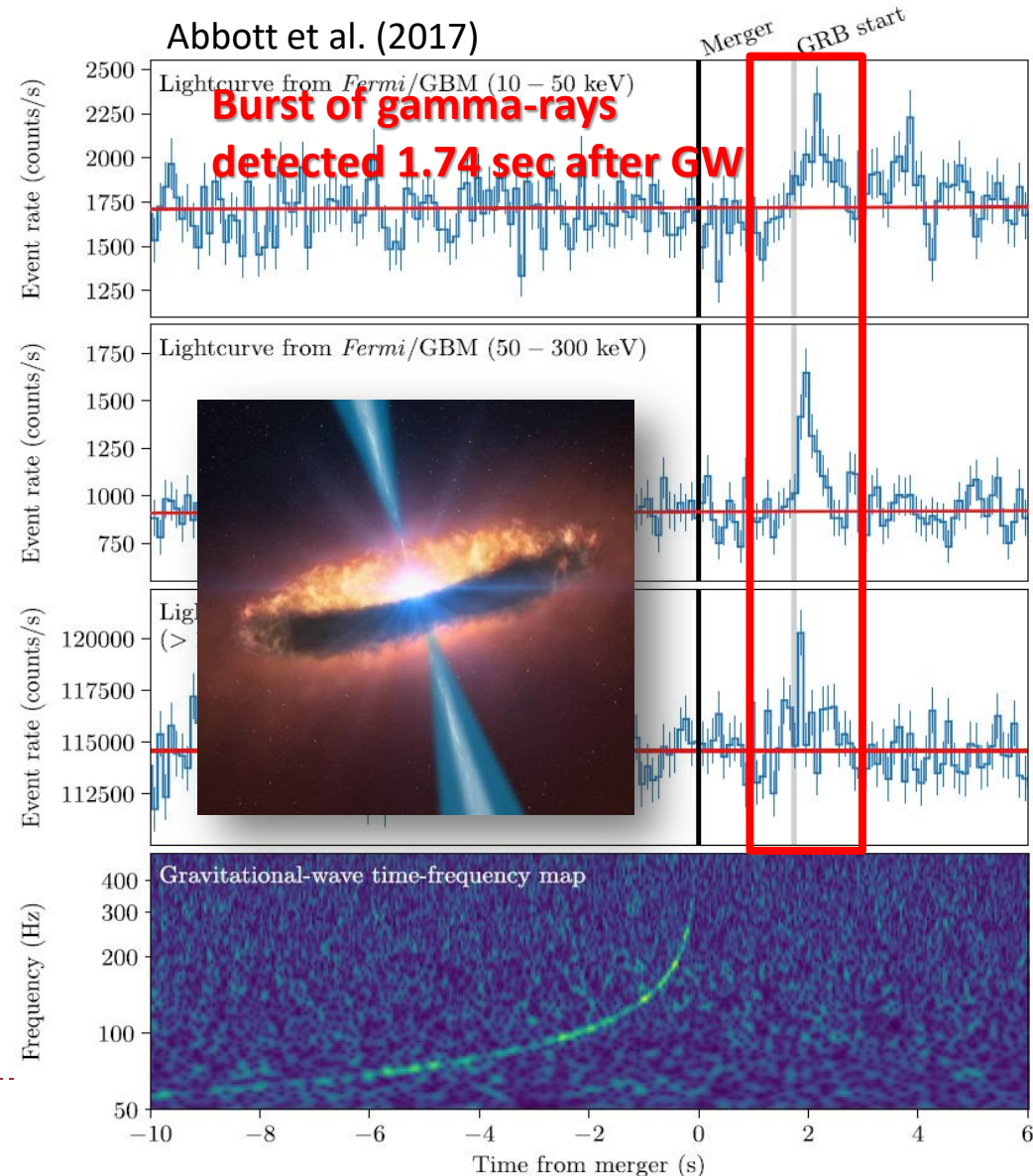
▶ NS matter EOS

- ▶ Tidal deformability extraction
- ▶ Maximum mass constraint
- ▶ Short gamma-ray bursts (SGRB) central engine
- ▶ Origin of heavy elements
 - ▶ r-process nucleosynthesis
 - ▶ kilonova/macronova from decay energy of the synthesized elements
- ▶ GW as standard siren
 - ▶ Hubble constant



Major scientific achievements: GW170817 provided us clues to

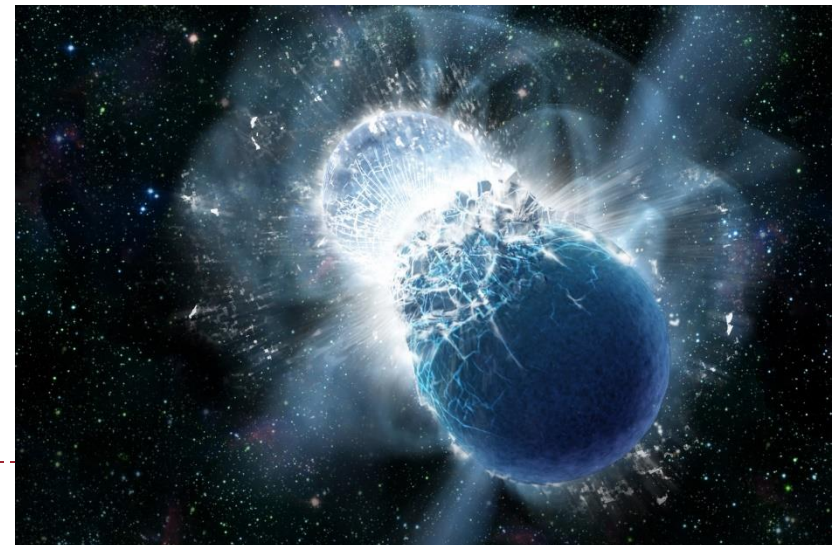
- ▶ NS matter EOS
 - ▶ Tidal deformability extraction
 - ▶ Maximum mass constraint
- ▶ **Short gamma-ray bursts (SGRB) central engine**
- ▶ Origin of heavy elements
 - ▶ r-process nucleosynthesis
 - ▶ kilonova/macronova from decay energy of the synthesized elements
- ▶ GW as standard siren
 - ▶ Hubble constant



Major scientific achievements: GW170817 provided us clues to

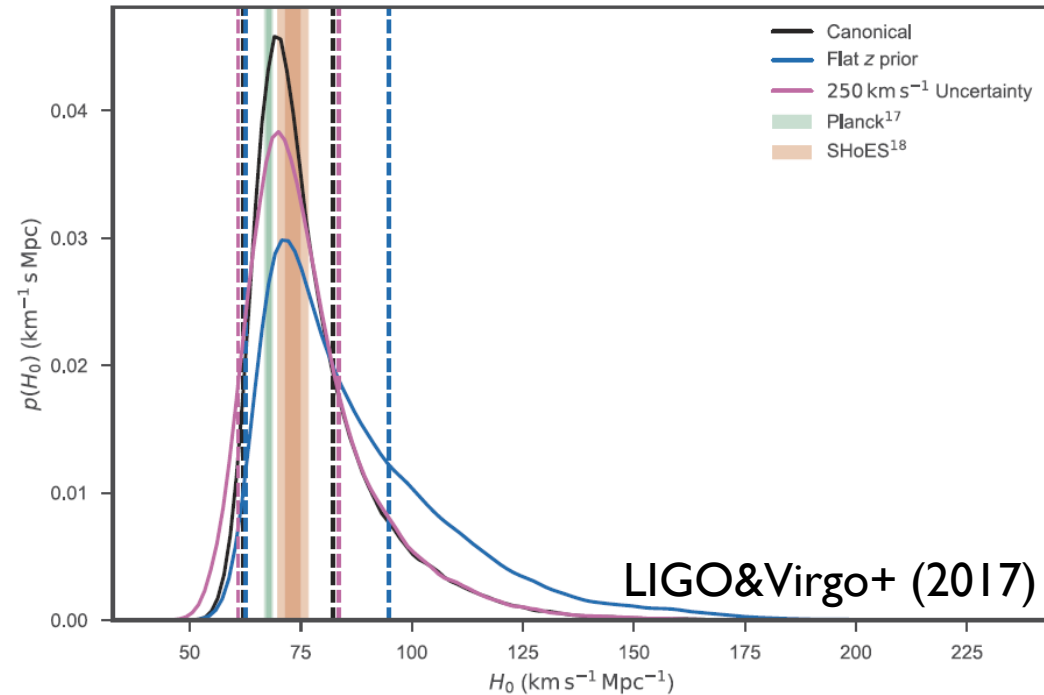
- ▶ **NS matter EOS**
 - ▶ Tidal deformability extraction
 - ▶ Maximum mass constraint
- ▶ **Short gamma-ray bursts (SGRB) central engine**
- ▶ **Origin of heavy elements**
 - ▶ r-process nucleosynthesis
 - ▶ kilonova/macronova : UV-Infrared from decay energy of the synthesized elements
- ▶ **GW as standard siren**
 - ▶ Hubble constant

The image shows a periodic table of elements with various color-coded groups. A red box highlights the transition metals and post-transition metals. Three callout boxes are present: one for Pt (Platinum) with a photo of a metal sample, one for Au (Gold) with a photo of a gold nugget, and one for U (Uranium) with a photo of a green crystalline sample. The legend at the top identifies groups: Alkali metals (yellow), Alkaline earth metals (orange), Transition elements (pink), Lanthanoids (light orange), Actinoids (light purple), Noble gases (light blue), and Non-metals (green). Physical states are indicated by icons: solid (C), liquid (Br), and gas (H). A note at the bottom left states: "Note: The subgroup numbers 1-10 were adopted in 1984 by the International Union of Pure and Applied Chemistry. The names of elements 112-118 are the Latin equivalents of those numbers."

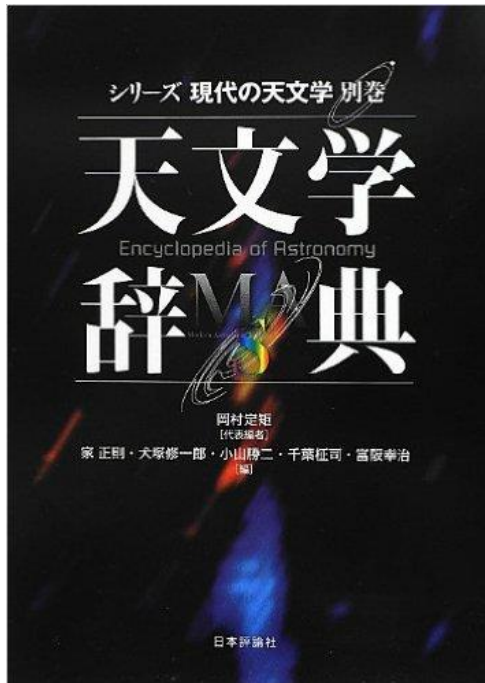


Major scientific achievements: GW170817 provided us clues to

- ▶ NS matter EOS
 - ▶ Tidal deformability extraction
 - ▶ Maximum mass constraint
- ▶ Short gamma-ray bursts (SGRB) central engine
- ▶ Origin of heavy elements
 - ▶ r-process nucleosynthesis
 - ▶ kilonova/macronova from decay energy of the synthesized elements
- ▶ **GW as standard siren**
 - ▶ **Hubble constant**



中性子星を支える力は何か？

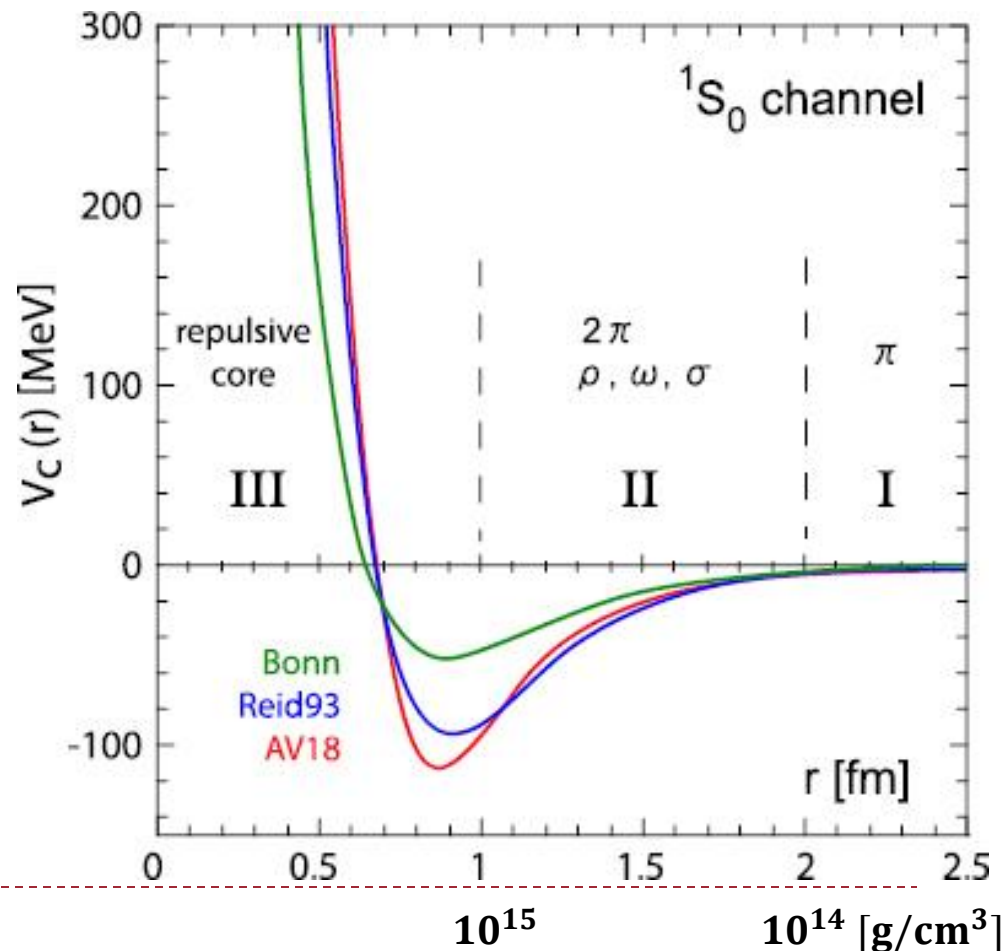


中性子星 neutron star

重い星の進化の最終段階で鉄のコアは約 $1.5M_{\odot}$ の質量を持つ。その後、重力収縮が進み温度が上昇し、温度が概ね 5×10^9 K を超えると鉄がヘリウムに分解する吸熱反応 ($\text{Fe} + \gamma \rightarrow 13\text{He} + 4\text{n} - 124.4 \text{ MeV}$) によって不安定領域に入り、超新星爆発*をおこす。密度の上昇と電子ニュートリノの放出にともなって電子捕獲*反応 $e^{-} + \text{p} \rightarrow \nu_e + \text{n}$ が進行し、中性子の縮退圧*で支えられる星が生成される。これを中性子星という。中性子星は $3 \times 10^{17} \text{ kg cm}^{-3}$ 程度の核子密度を持ち、 $1M_{\odot}$ 程度の質量で 10 km 程度の半径になる。

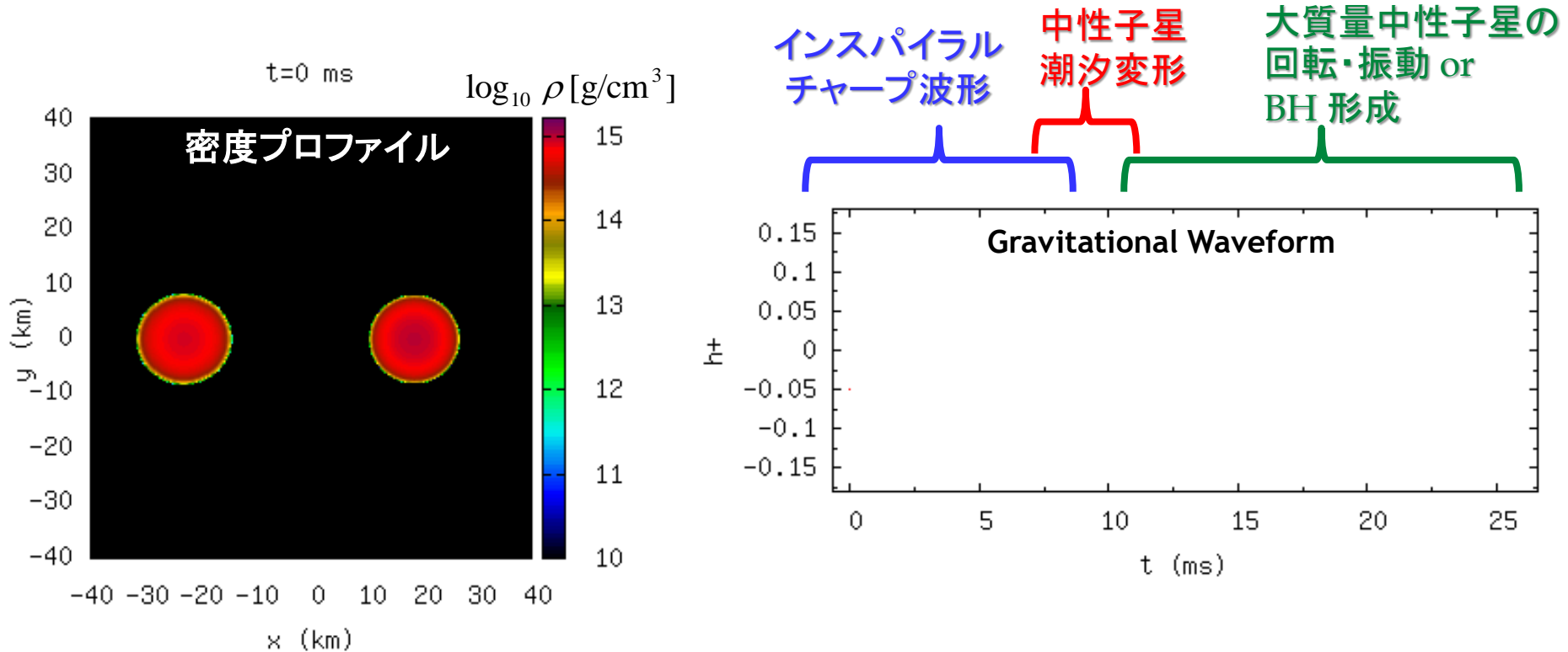
中性子星を支える力

- ▶ $2.0M_{\odot}$ もの大質量を支えるためには中性子の縮退圧では不十分
- ▶ 密度が核密度の5倍 $\sim 10^{15}\text{g/cm}^3$ を超える極限状況で効く圧力 \Rightarrow 核力
 - ▶ 核子同士が重なり合う高密度
 - ▶ 核力の斥力芯が働く領域
- ▶ 核力は未解明
 - ▶ 陽子/中性子間の2体力は実験・理論からある程度分かっている
 - ▶ 3体力およびハイペロンとの間に働く核力はあまりわかっていない
 - ▶ ハイペロン: ストレンジネスを含む
 - ▶ 斥力芯の強さはパウリ排他律だけでは説明できない (by 初田さん)
 - ▶ だから中性子星を調べると面白い



連星中性子星合体からの重力波

GW170817に近い場合の数値相対論シミュレーション



- 質点近似可能
- 連星パラメータ, 特に **中性子星質量** の情報

- 有限サイズ効果
- **中性子星潮汐変形率**
- **中性子星半径**

- BH or NS ⇒ **最大質量**
- GWs from massive NS ⇒ **NS radius of massive NS**

チャープ重力波による質量決定

▶ S/N = 33.0 (信号/雑音比)

▶ 仮定:

- ▶ 中性子星が(ブラックホールのように)高速回転していない
- ▶ 光学対応天体 SSS17a/AT2017gfo の位置を利用
 - Inclination angle : < 30 deg (非利用の場合)
- ▶ NGC 4993 の赤方偏移を利用

▶ チャープ質量 : $\frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}} = 1.186^{+0.001}_{-0.001} M_{\odot}$

▶ 総質量 : $2.74 M_{\odot}$ (1%)

▶ 質量比 : $m_1/m_2 = 0.7 - 1.0$

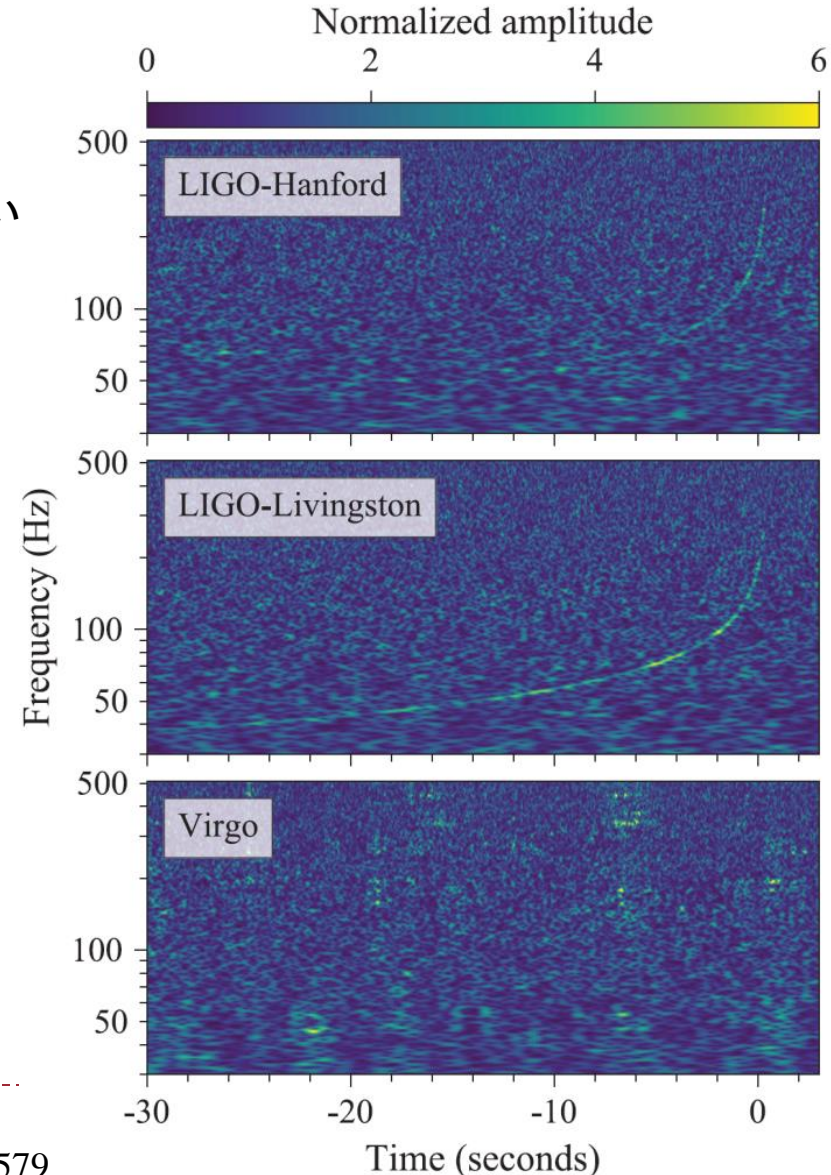
▶ **Primary mass (m1) : $1.46^{+0.12}_{-0.10} M_{\odot}$**

▶ **Secondary (m2) : $1.27^{+0.09}_{-0.09} M_{\odot}$**

▶ 光学距離 : 40^{+10}_{-10} Mpc

▶ LIGO-Virgo Collaboration GWTC-1 paper

See also Abbott et al. PRL 119, 161101 (2017); arXiv:1805.11579



宇宙で連星中性子星合体が起こっている割合：

110-3840 Gpc⁻³yr⁻¹

LIGO-Virgo Collaboration GWTC-1 paper

aLIGO detection rate => 0.1/yr 1/yr 10/yr

Population synthesis

Dominik et al. pop syn
de Mink & Belczynski pop syn

BNS = origin of
r-process

Vangioni et al. r-process

BNS = origin of SGRB

Jin et al. kilonova

Petrillo et al. GRB

Coward et al. GRB

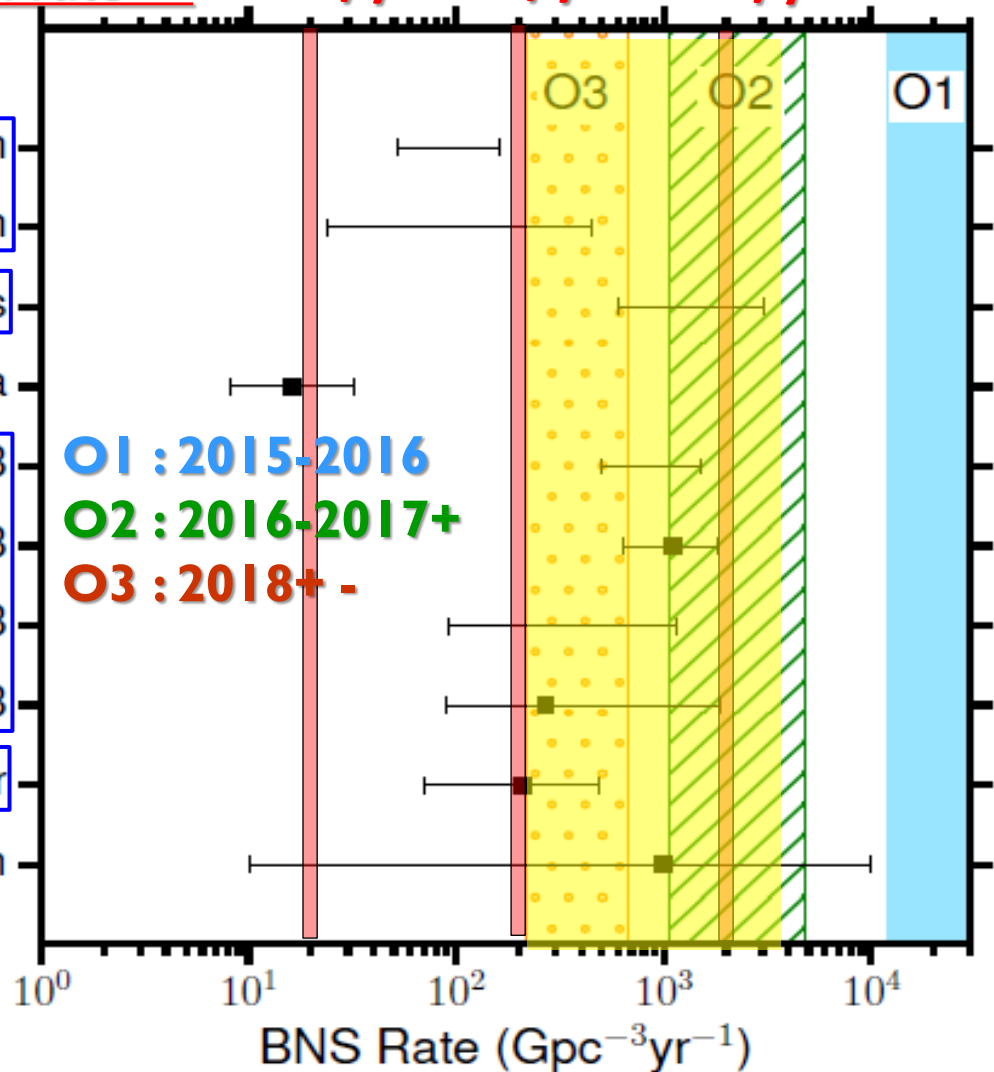
Siellez et al. GRB

Fong et al. GRB

Estimate from galactic
binary pulsar

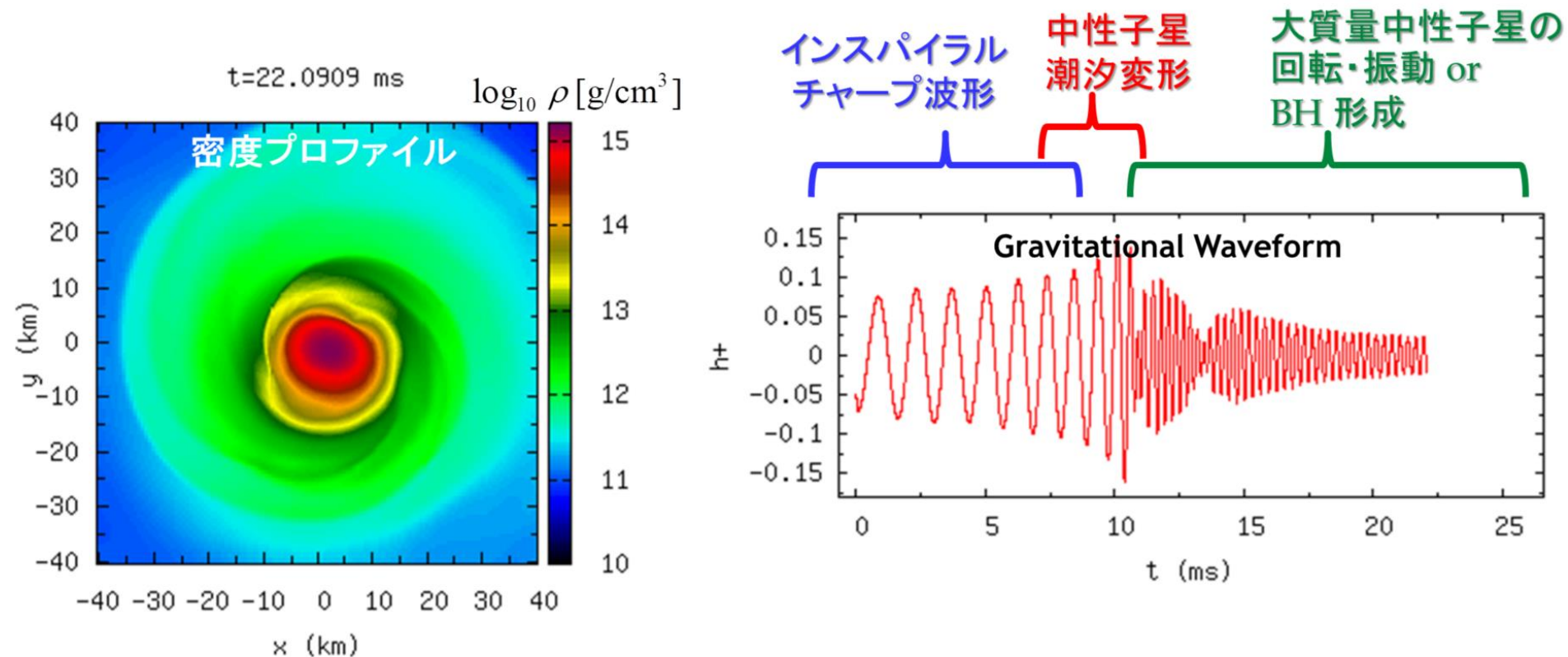
Kim et al. pulsar

aLIGO 2010 rate compendium



Abbott et al. (2016)

潮汐変形効果と中性子星状態方程式



- 質点近似可能
- 連星パラメータ, 特に **中性子星質量** の情報

- 有限サイズ効果
- **中性子星潮汐変形率**
- **中性子星半径**

- BH or NS \Rightarrow **最大質量**
- GWs from massive NS \Rightarrow **NS radius of massive NS**

潮汐変形率

▶ 潮汐 Love 数 : λ

- ▶ Response of quadrupole moment Q_{ij} to external tidal field E_{ij}

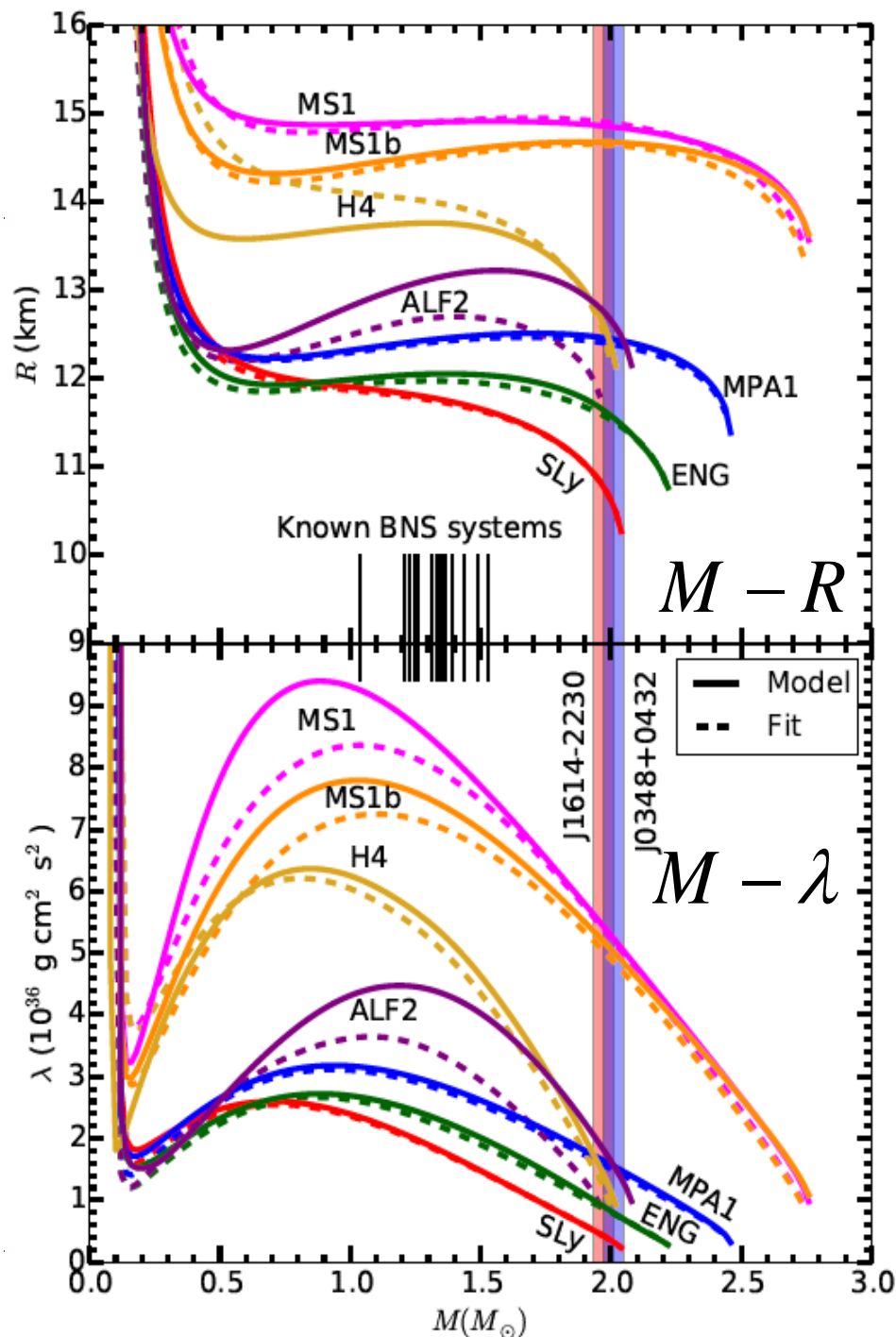
$$Q_{ij} = -\lambda E_{ij}$$

- ▶ 中性子星状態方程式が硬い \Rightarrow あまり収縮しなくても重力を支持 \Rightarrow 中性子星半径大 \Rightarrow 潮汐 Love 数大 \Rightarrow 軌道の質点からのずれ(潮汐効果) \Rightarrow 重力波波形に痕跡

- ▶ 潮汐変形率(無次元化): Λ

$$\lambda = \frac{C^5}{G} \Lambda R^5 \quad C = \frac{GM}{c^2 R}$$

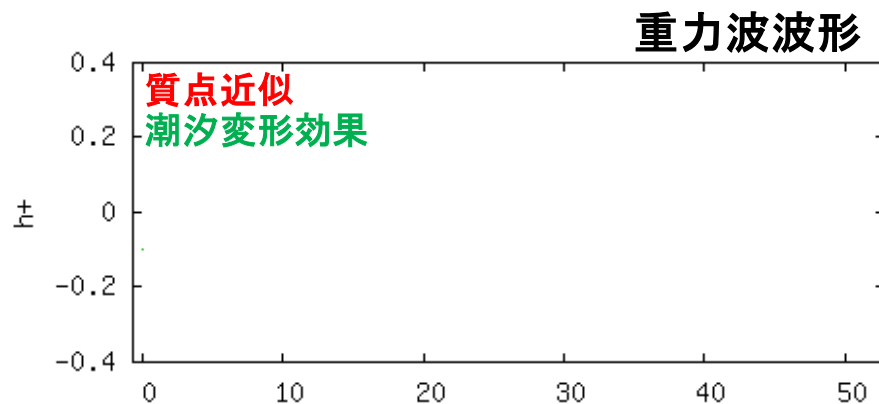
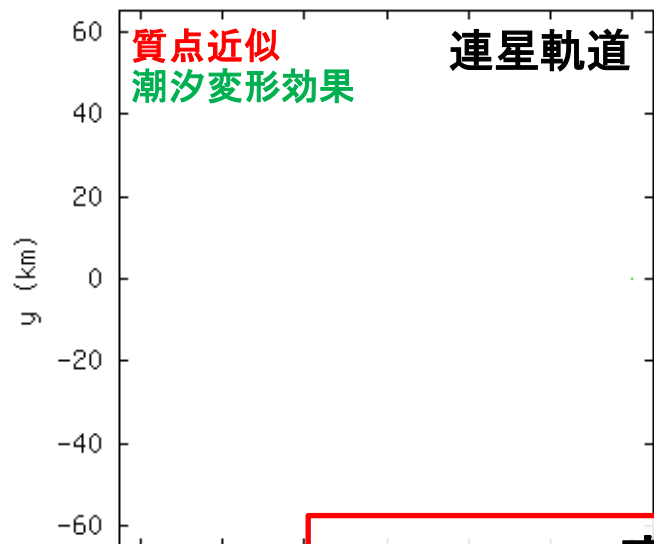
- ▶ Abbott et al. PRL (2017) でつけられた上限 $\tilde{\Lambda} \lesssim 800$ at 90% C.L.



t=0 ms

中性子星の半径が小さい(中性子星の圧力が小さい、柔らかい状態方程式)

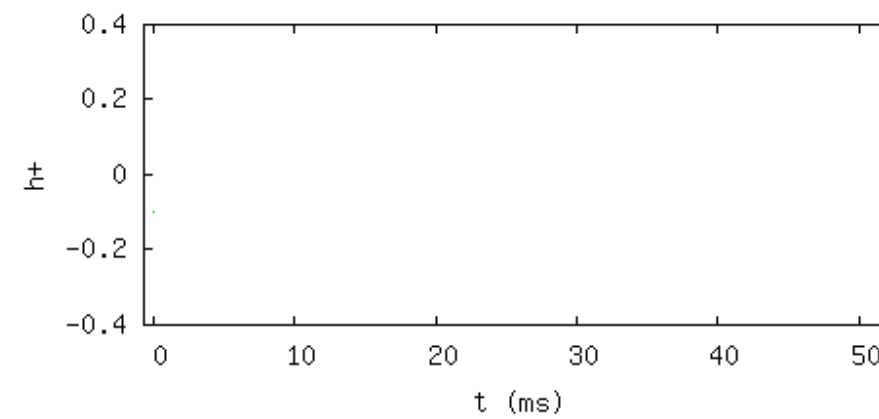
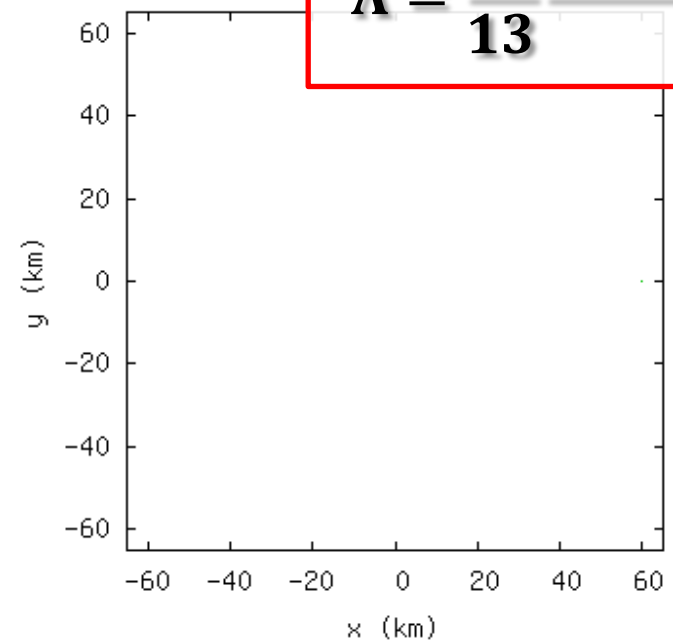
潮汐変形の効果は小さい



実際に制限がつけられるのは

$$\tilde{\Lambda}_{ms} = \frac{16(m_1 + 12m_2)m_1^4\Lambda_1 + (m_2 + 12m_1)m_2^4\Lambda_2}{(m_1 + m_2)^5}$$

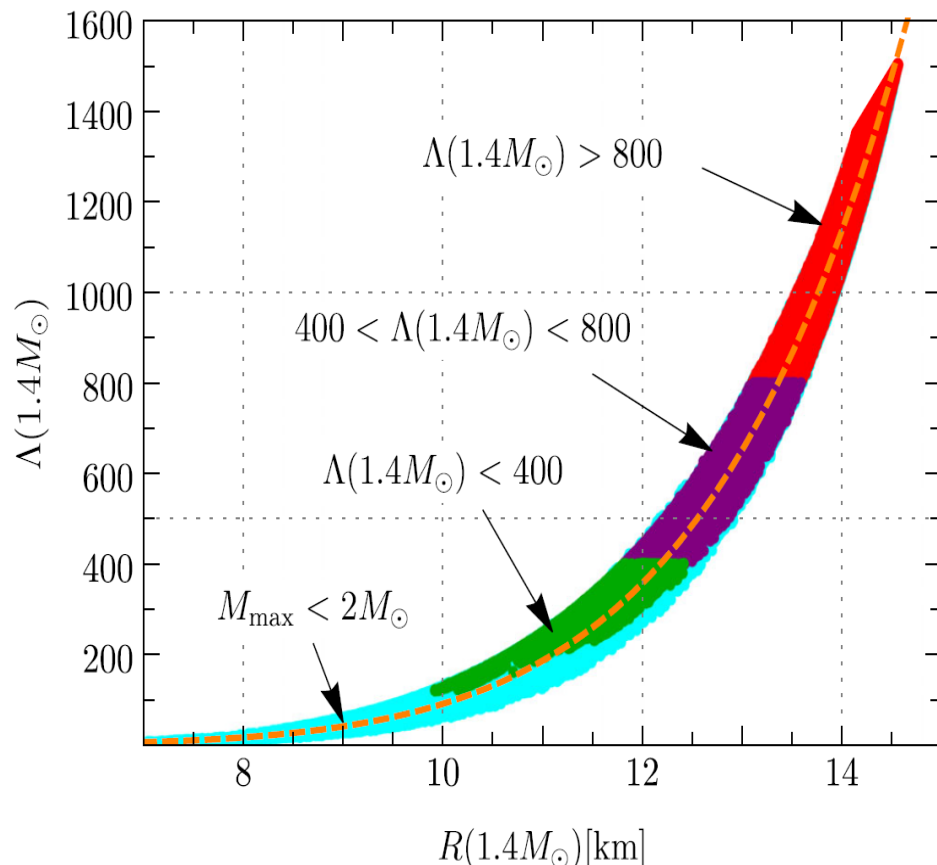
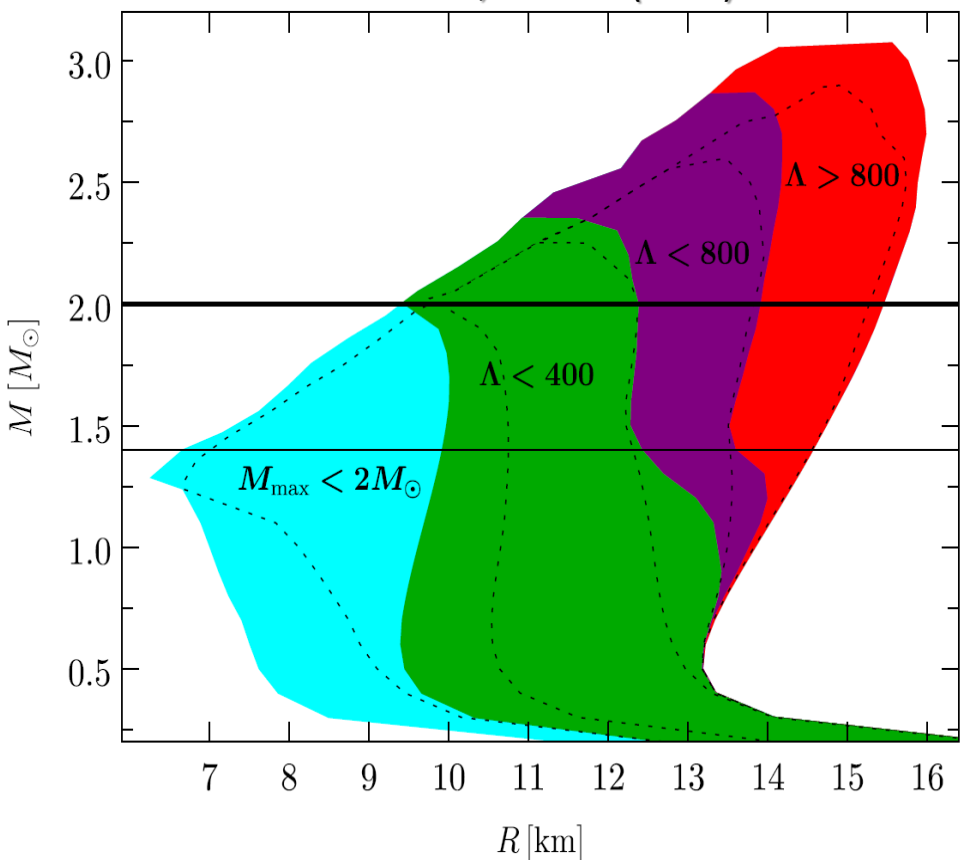
状態方程式) 効果は大きい



潮汐変形率 $\tilde{\Lambda}$ への制限 : $\tilde{\Lambda} < 800$

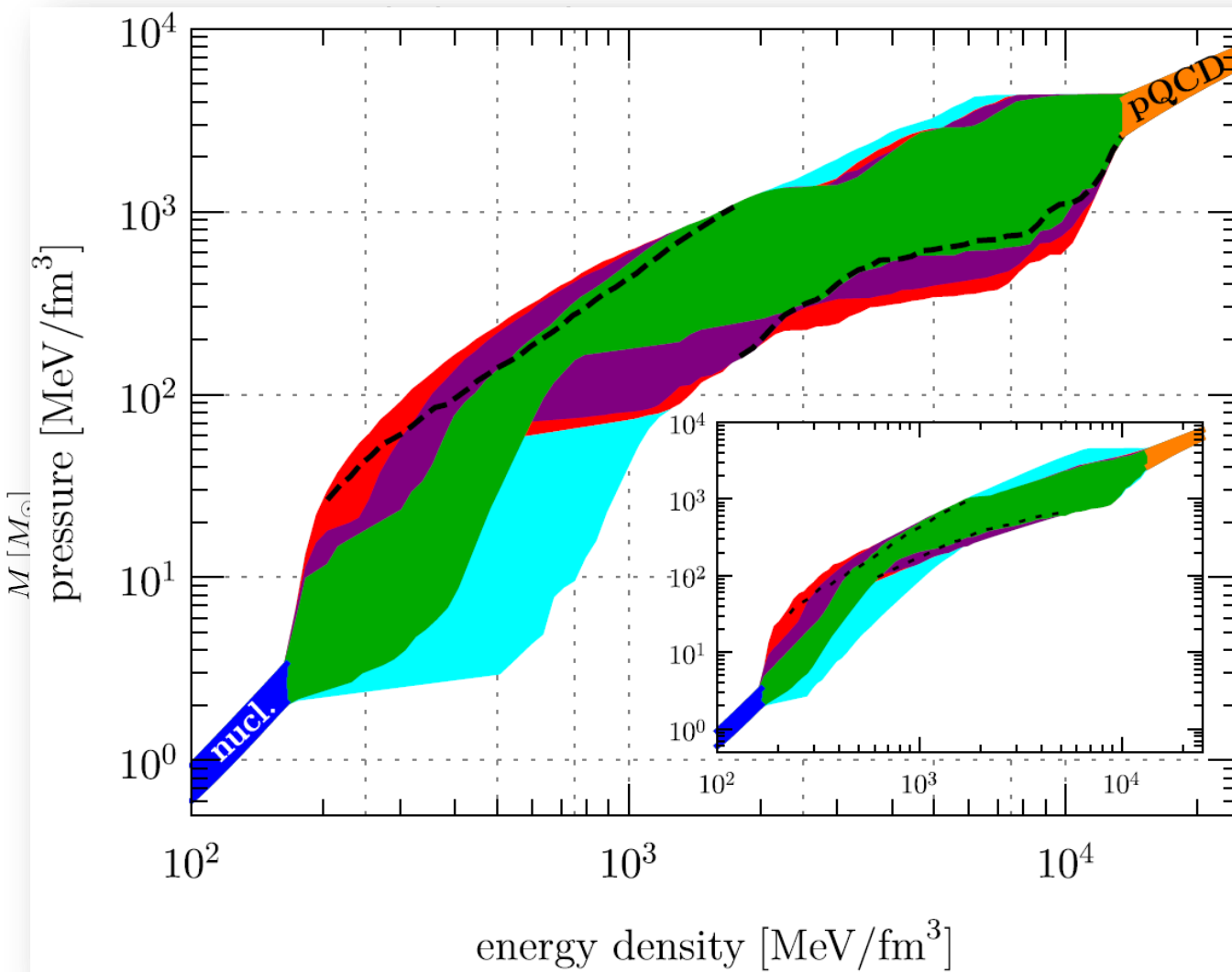
- ▶ $\tilde{\Lambda} < 800$: 中性子星の半径に焼き直すと $10 < R_{1.4M_\odot} < 13.5$ km
 - ▶ 因果律 (音速 < 光速) と $M_{\max} > 2M_\odot$ を満たし、pQCD EOS に接続する幅広い状態方程式群 (Hebeler et al. 2013) を用いた場合の解釈

Annala et al. PRL 120, 172703 (2018)

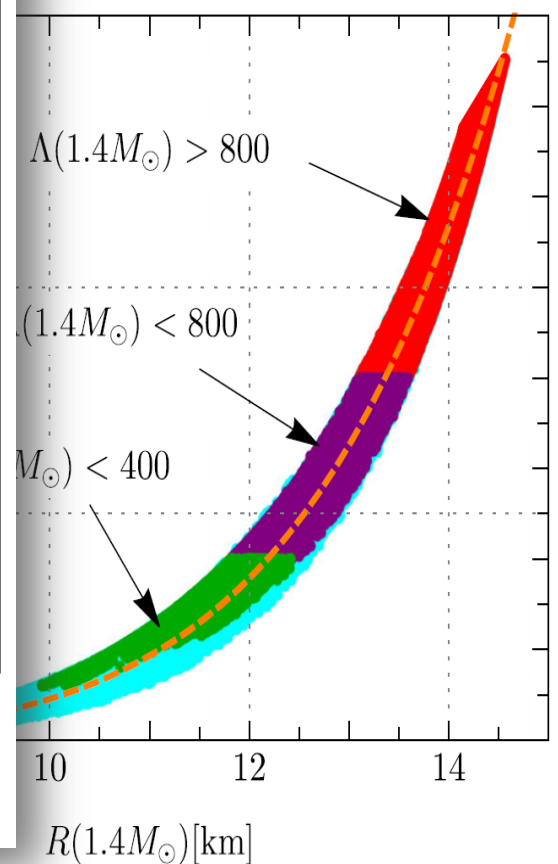


潮汐変形率 $\tilde{\Lambda}$ への制限: $\tilde{\Lambda} < 800$

- $\tilde{\Lambda} < 800$: 中性子星の半径に焼き直すと $10 < R_{1.4M_{\odot}} < 13.5$ km



Sに接続する幅広い



重力波以外のデータを用いた解析

▶ Abbott et al. PRL (2017) : 重力波データのみを用いた解析

- ▶ 状態方程式への因果律(音速が光速を超えない)
- ▶ 状態方程式への観測されている中性子星の最大質量 ($\approx 2M_{\odot}$) からの制限
- ▶ (クォーク相への相転移がない場合) 同一の状態方程式に従う
- ▶ 原子核データ(対象エネルギーなど)の利用
- ▶ 中性子星質量分布 prior に観測されている連星中性子星を利用
は考慮されていない

▶ De et al. PRL 121, 091102 (2018) : これらデータを利用した再解析

▶ 重力波データ解析で得られた $\tilde{\Lambda}$ 等のデータを状態方程式モデルを用いて再解釈した論文

- ▶ Annala et al. (2018) : chiral EFT (up to 1.1ns) + pQCD
 - ▶ $120 \lesssim \Lambda_{1.4} \lesssim 800$, $10 \lesssim R_{1.4} \lesssim 13.6$ km
- ▶ Tews et al. (2018) : chiral EFT (up to 2ns !!) + pQCD
 - ▶ $80 \lesssim \Lambda_{1.4} \lesssim 570$ (upper limit from EOS model, not from GW data)
- ▶ Fattoyev et al. (2018) : 原子核実験 PREX データの利用
 - ▶ $400 \lesssim \Lambda \lesssim 800$, $12 \lesssim R_{1.4} \lesssim 13.6$ km (lower limit from $R_{\text{skin}}^{208} \gtrsim 0.15\text{fm}$)
- ▶ Malik et al. (2018) : 原子核データ(対称エネルギー, incompressibility) と整合的な EOS
 - ▶ $11.82 \lesssim R_{1.4} \lesssim 13.72$ km



重力波以外のデータを用いた解析

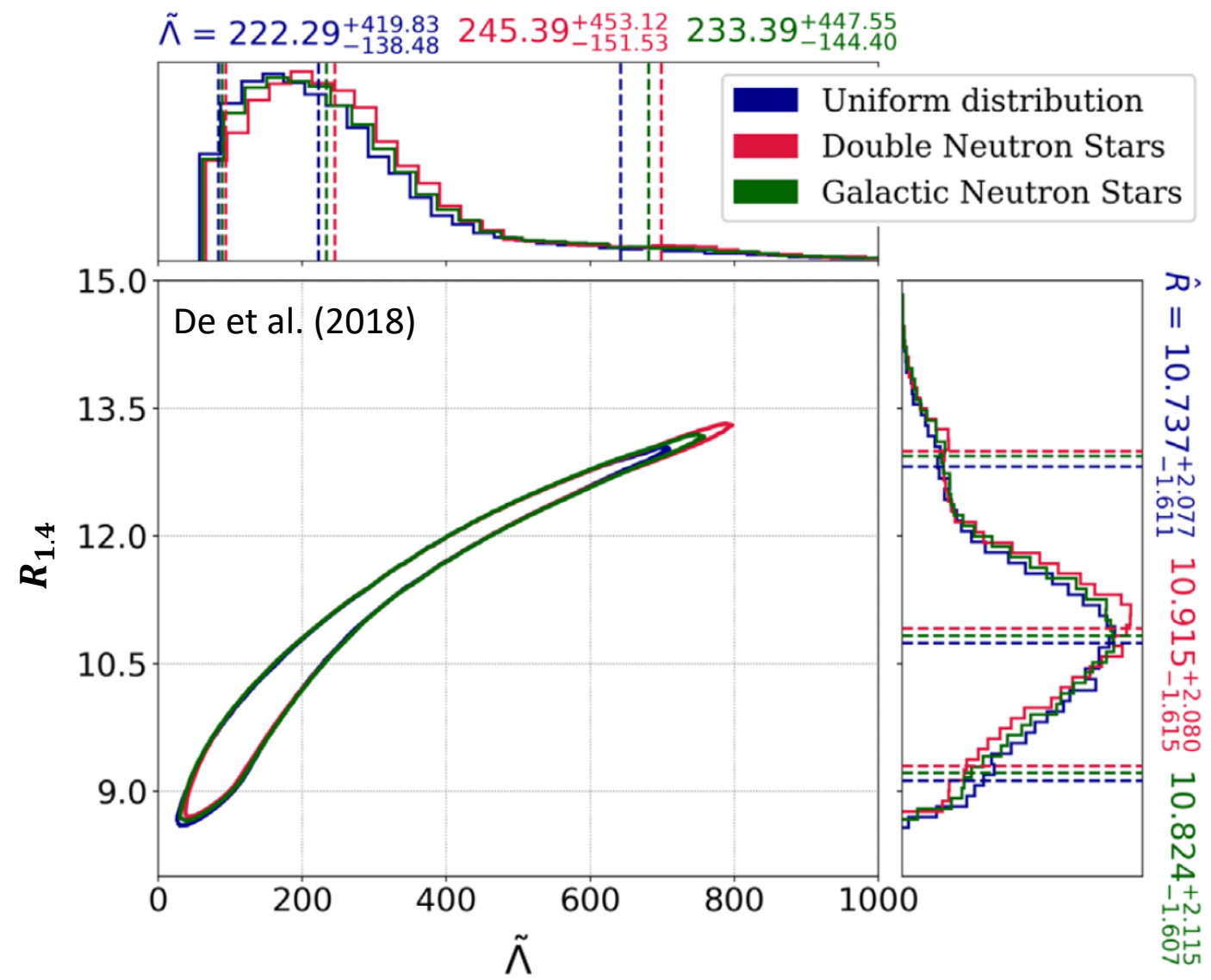
▶ [Abbott et al. PRL](#)

- ▶ 状態方程式への
 - ▶ 状態方程式への
 - ▶ (クオーク相への
 - ▶ 原子核データ(文
 - ▶ 中性子星質量分
- は考慮されていない

▶ [De et al. PRL 12](#)

▶ [重力波データ解析](#)

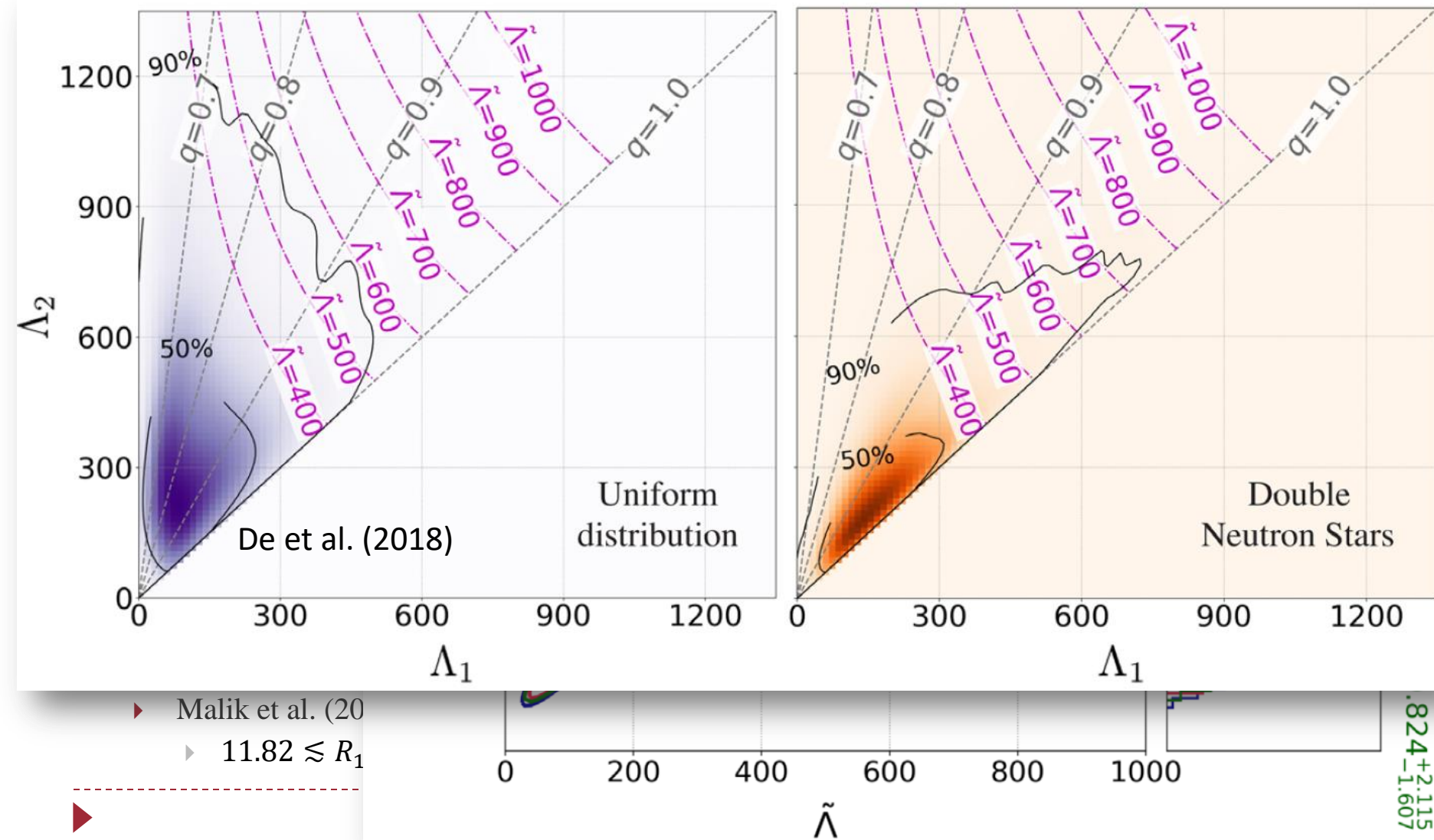
- ▶ Annala et al. (2017)
 - ▶ $120 \lesssim \Lambda_{1.4}$
- ▶ Tews et al. (2018)
 - ▶ $80 \lesssim \Lambda_{1.4} \lesssim 100$
- ▶ Fattoyev et al. (2018)
 - ▶ $400 \lesssim \Lambda \lesssim 600$
- ▶ Malik et al. (2018)
 - ▶ $11.82 \lesssim R_1$



重力波以外のデータを用いた解析

▶ Abbott et al. PR1

$\tilde{\Lambda} = 333 \pm 419.83$ $q = 0.45 \pm 0.453.12$ 333 ± 447.55



▶ Malik et al. (20

▶ $11.82 \approx R_1$

$824^{+2.115}_{-1.607}$

重力波テンプレートの重要性

- ▶ Abbott et al. PRL (2017) : PN波形の利用 (数値相対論は利用していない)
 - ▶ 3.5PN までの波形(TaylorF2) + 潮汐効果
 - ▶ 潮汐変形の効果効いてくるのは 5PN から
 - ▶ 5PN までの質点部分(非潮汐部分)がわかっていないと潮汐変形率を誤る
 - ▶ De et al. PRL (2018) も同様
- ▶ Abbott et al. PRL 121 161101 (2018) : 数値相対論の利用
 - ▶ See also LIGO-Virgo Collaboration GWTC-1 paper
 - ▶ 数値相対論を用いて解析的に求まっていない高次PN項を較正した波形の利用
 - ▶ データレンジ: 30-2048 Hz \Rightarrow 23-2048 Hz (約1500 cycle 増加)
 - ▶ 光学対応天体 SSS17a/AT2017gfo の位置を利用



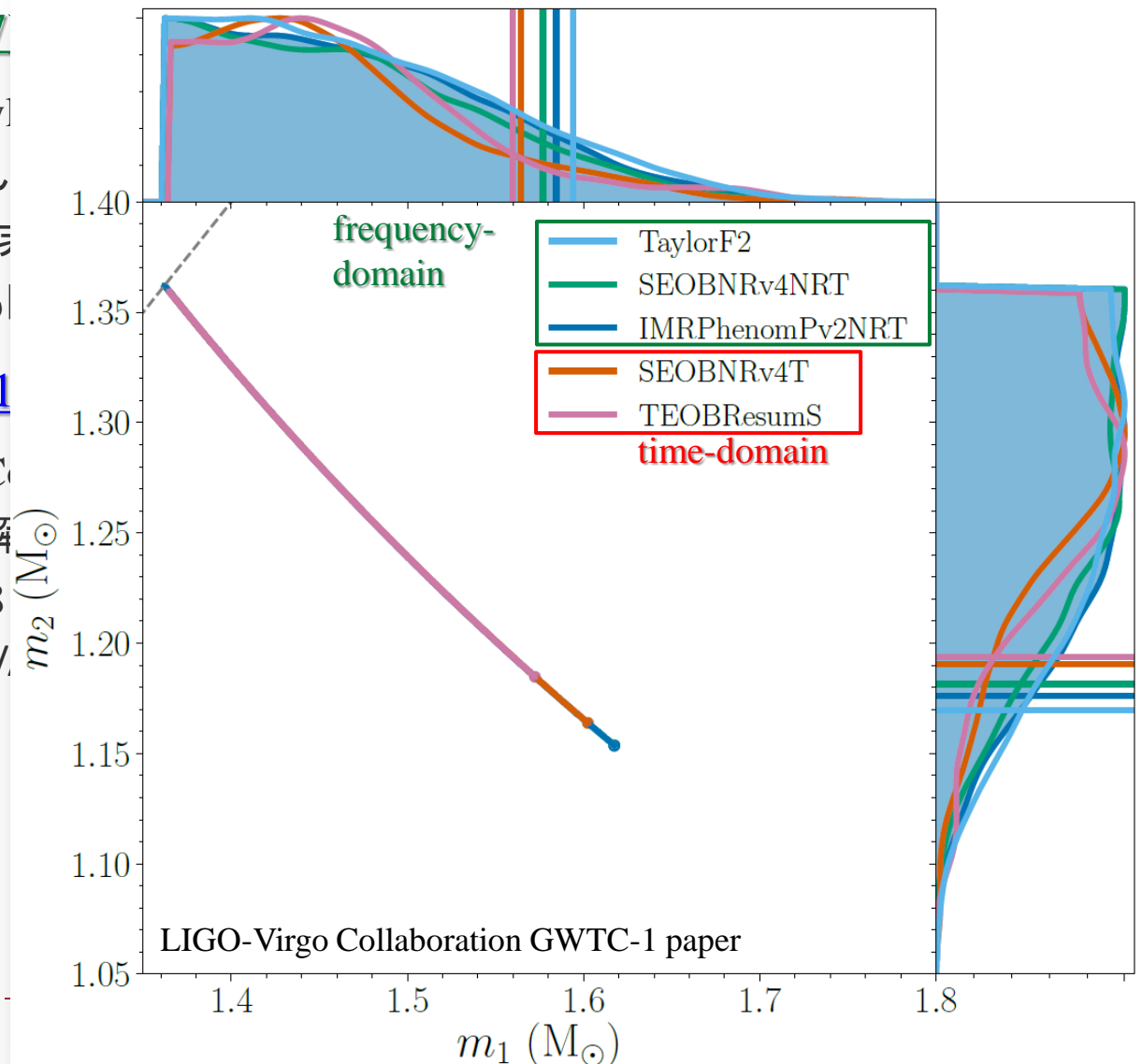
重力波テンプレートの重要性

▶ [Abbott et al. PRL \(2017\)](#)

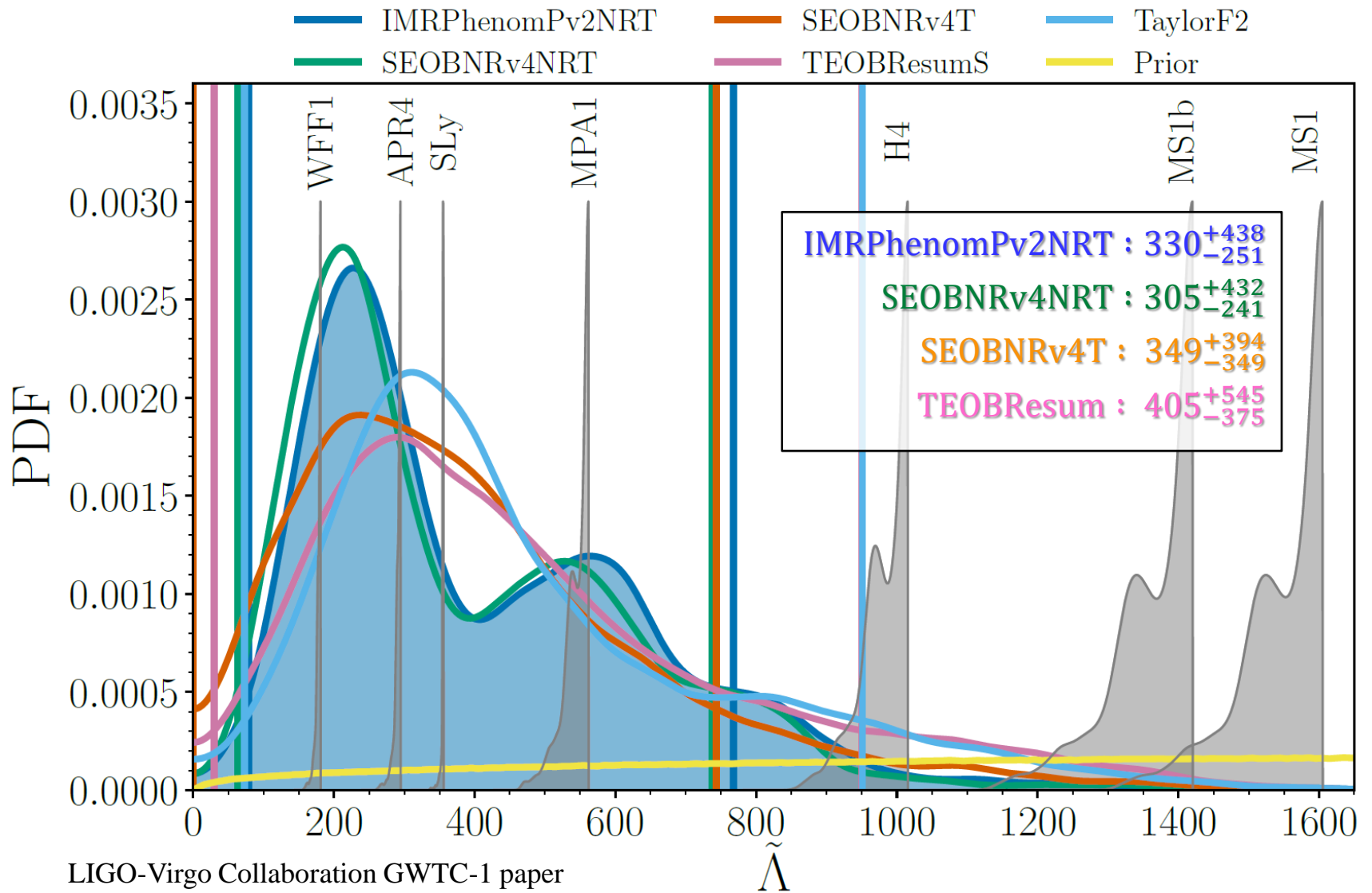
- ▶ 3.5PN までの波形(TaylorF2)
- ▶ 潮汐変形の効果効し
- ▶ 5PN までの質点部分(TEOBResumS)
- ▶ De et al. PRL (2018) も

▶ [Abbott et al. PRL 121 1](#)

- ▶ See also LIGO-Virgo C
- ▶ 数値相対論を用いて解
- ▶ データレンジ: 30-2048
- ▶ 光学対応天体 SSS17a/



重力波テンプレートの重要性



重力波テンプレートの重要性

- ▶ Abbott et al. PRL (2017) : PN波形の利用 (数値相対論は利用していない)
 - ▶ 3.5PN までの波形(TaylorF2) + 潮汐効果
 - ▶ 潮汐変形の効果効いてくるのは 5PN から
 - ▶ 5PN までの質点部分(非潮汐部分)がわかっていないと潮汐変形率を誤る
 - ▶ De et al. PRL (2018) も同様
- ▶ Abbott et al. PRL 121 161101 (2018) : 数値相対論の利用
 - ▶ See also LIGO-Virgo Collaboration GWTC-1 paper
 - ▶ 数値相対論を用いて解析的に求まっていない高次PN項を較正した波形の利用
 - ▶ データレンジ: 30-2048 Hz \Rightarrow 23-2048 Hz (約1500 cycle 増加)
 - ▶ 光学対応天体 SSS17a/AT2017gfo の位置を利用
- ▶ De et al. PRL (2018) と同様の解析
 - ▶ 状態方程式への因果律(音速が光速を超えない)
 - ▶ 状態方程式への観測されている中性子星の最大質量 ($\approx 2M_{\odot}$) からの制限

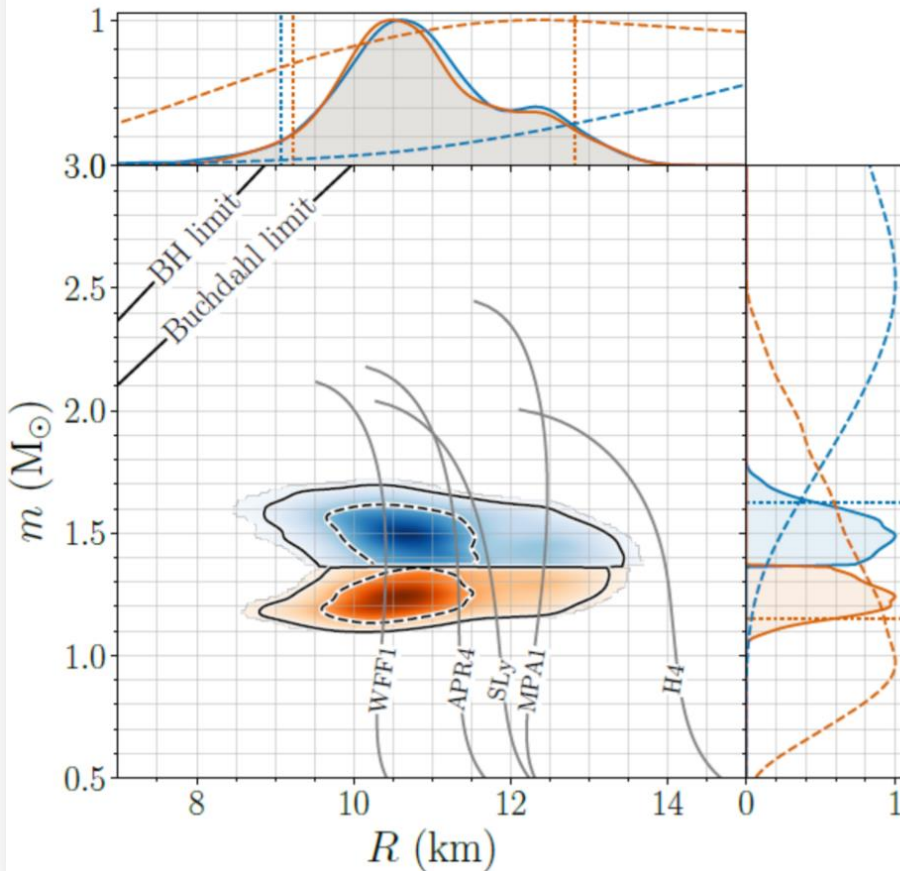


重力波テンプレートの重要性

▶ Analysis without $2M_{\odot}$ constraint

▶ $R_1 = 10.8_{-1.7}^{+2.0}$ km

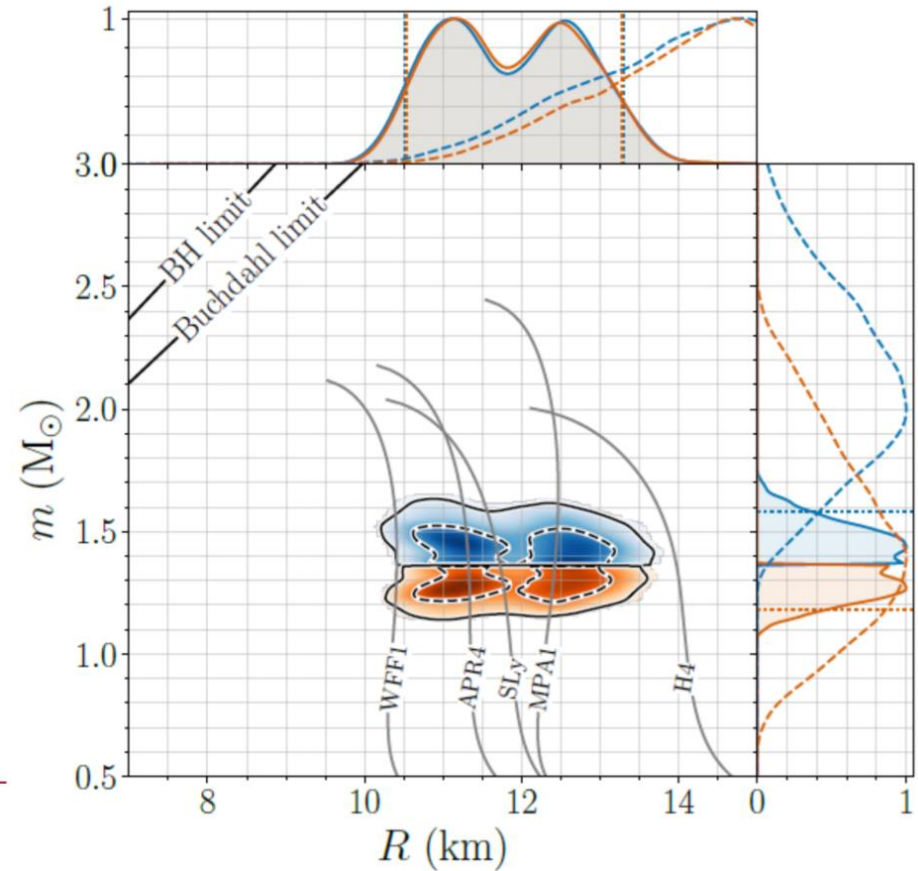
▶ $R_2 = 10.7_{-1.5}^{+2.1}$ km



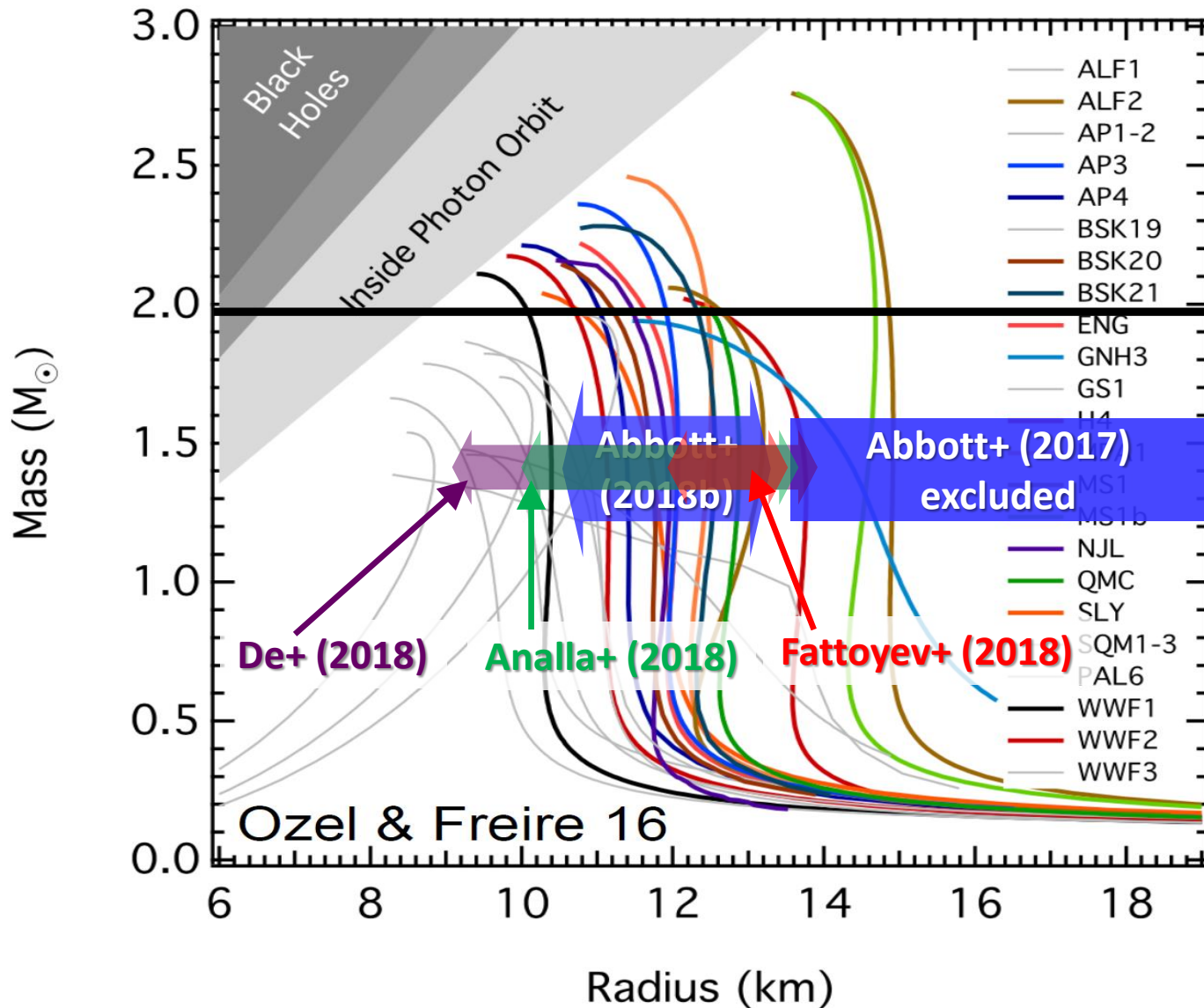
▶ Analysis with $2M_{\odot}$ constraint

▶ $R_1 = 11.9_{-1.4}^{+1.4}$ km

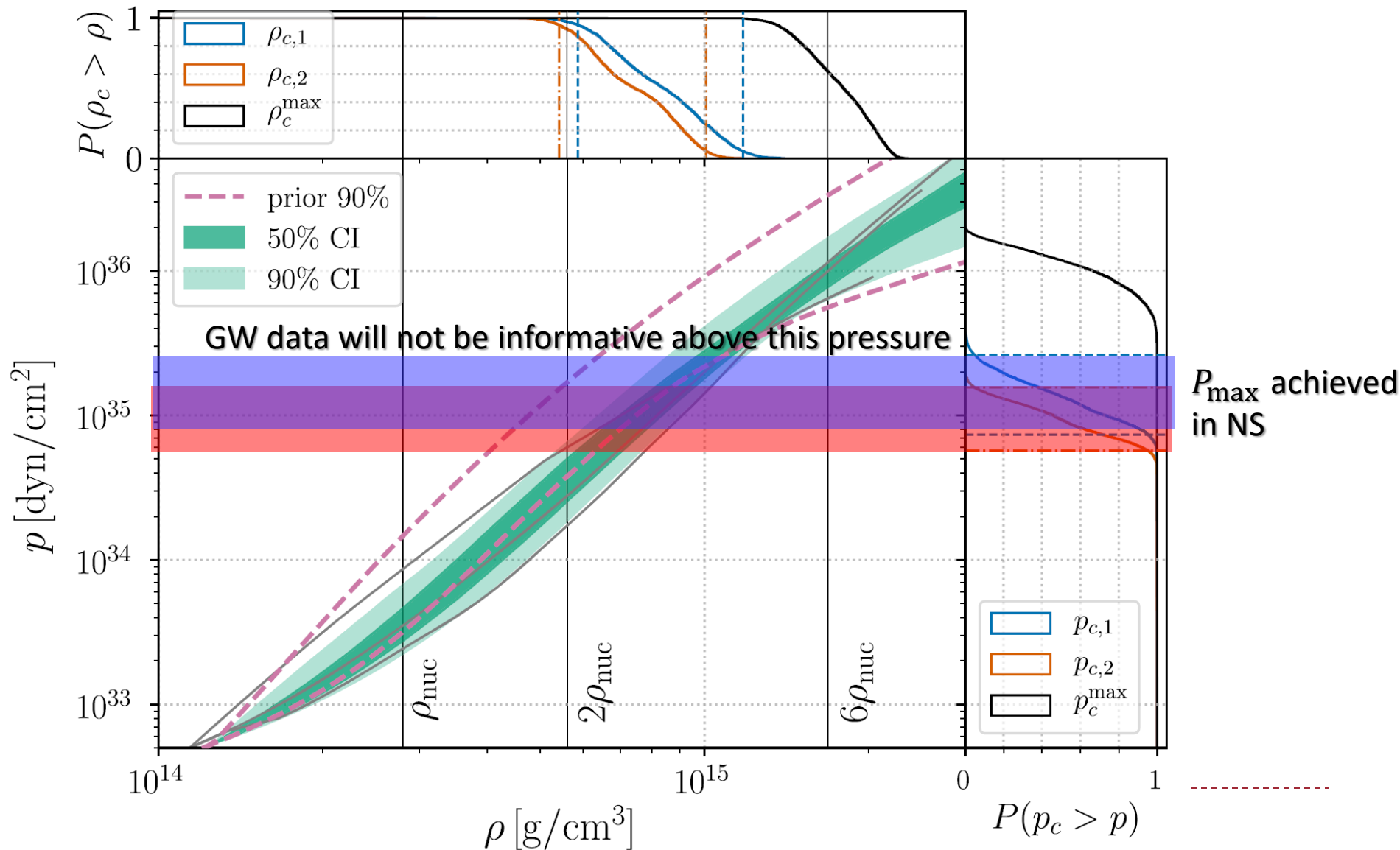
▶ $R_2 = 11.9_{-1.4}^{+1.4}$ km



重力波による潮汐変形率の抜き取りによる 中性子星半径への制限



中性子星状態方程式への制限



Massive NS is necessary to explore high density region

▶ 超新星コアバウンス

- ▶ mass: 0.5~0.8Msun
- ▶ ρ_c : a few ρ_s

▶ 典型的な中性子星

- ▶ mass: 1.35-1.4Msun
- ▶ ρ_c : several ρ_s

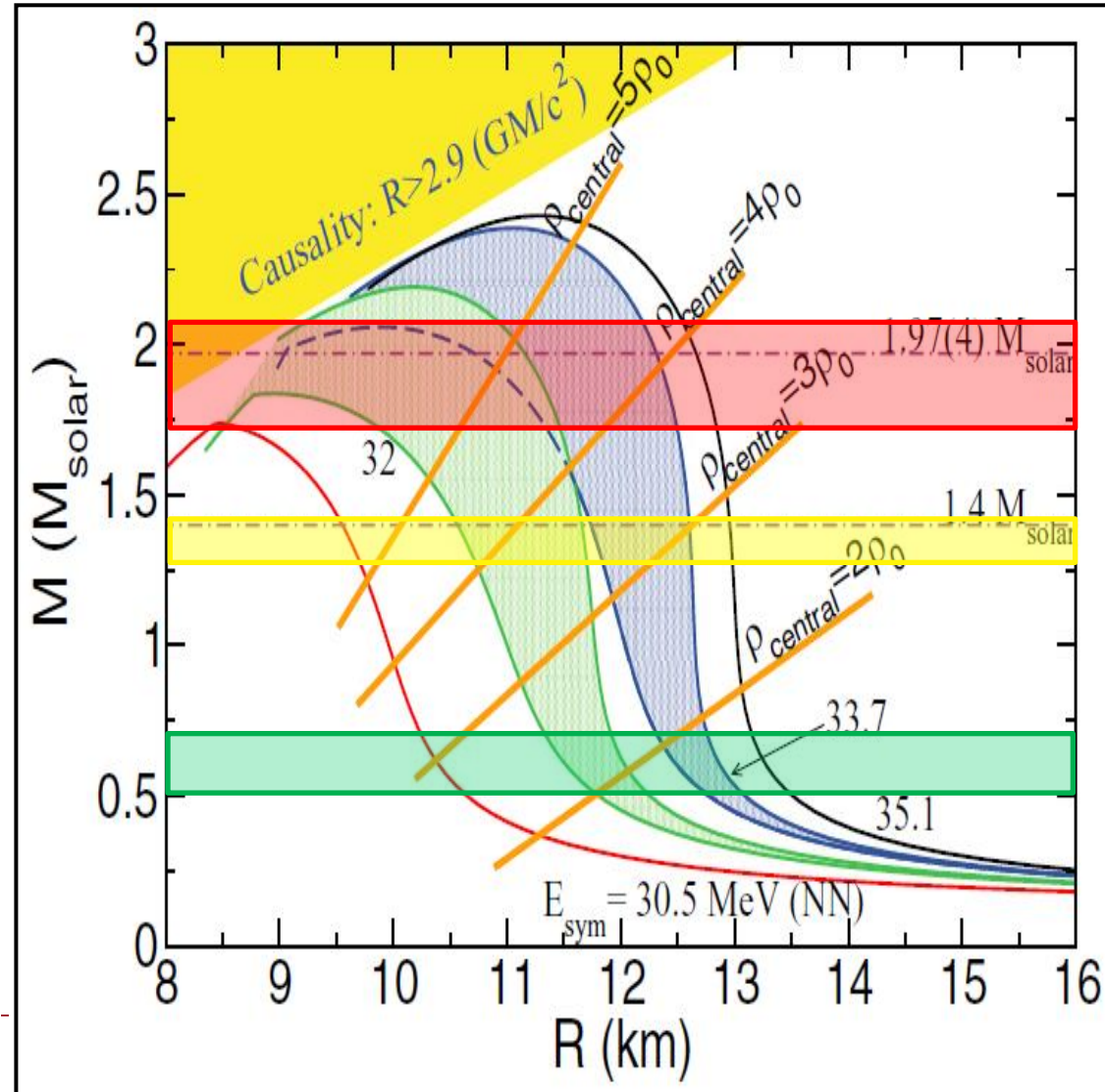
▶ 大質量中性子星 (> 1.6 Msun)

- ▶ ρ_c : > 4 ρ_s

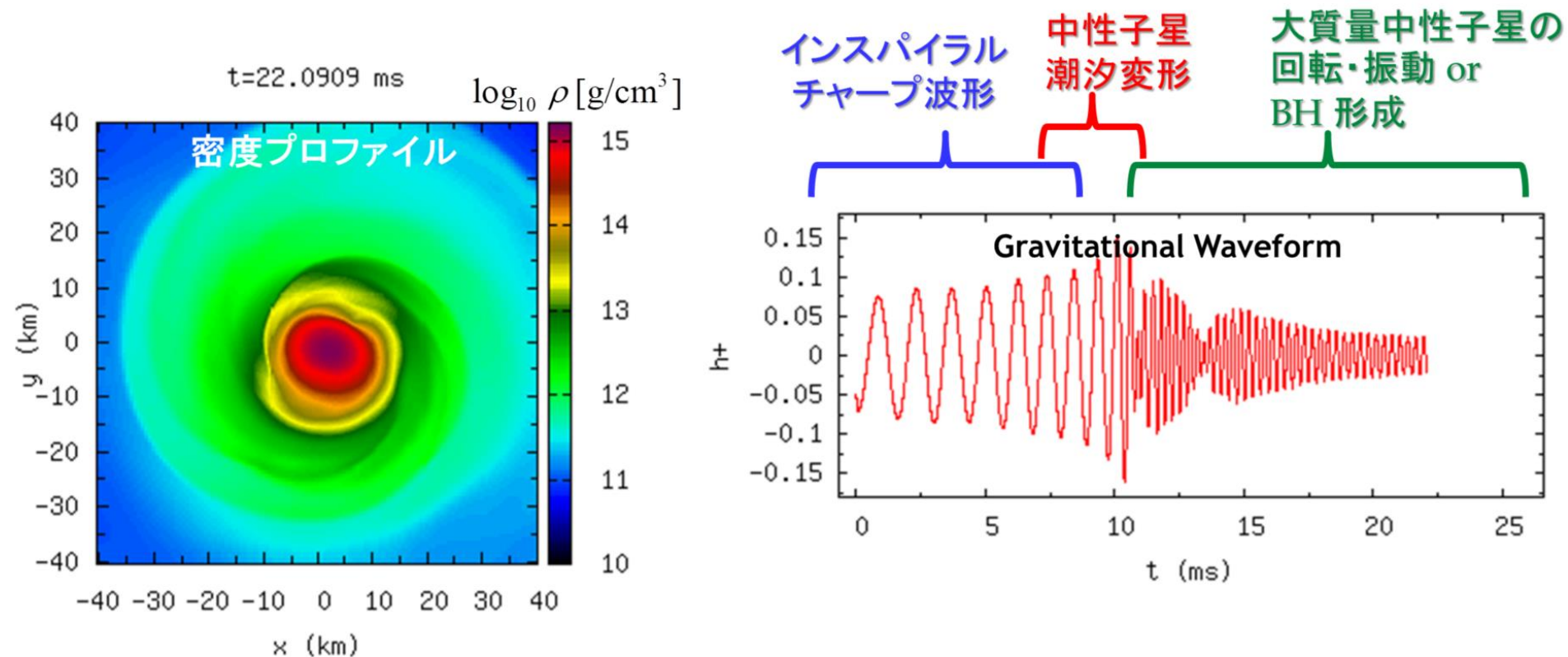
▶ 超高密度領域を探るには 重い中性子星が必要

- ▶ 合体後の中性子星からの重力波
- ▶ ブラックホール形成による最大質量の上限

Gandolfi et al. (2012) PRC 85 032801(R)



潮汐変形効果と中性子星状態方程式



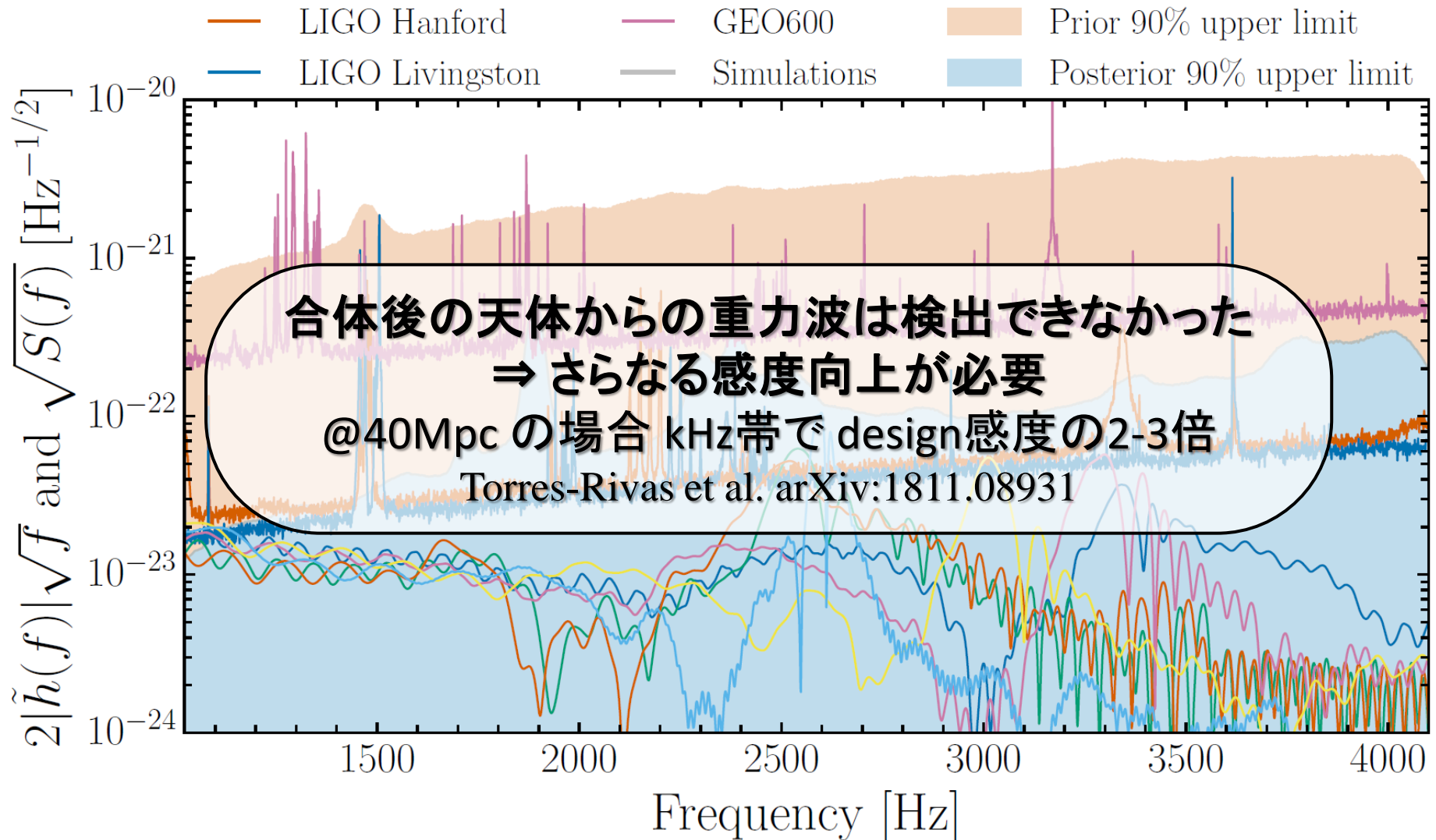
- 質点近似可能
- 連星パラメータ, 特に **中性子星質量** の情報

- 有限サイズ効果
- **中性子星潮汐変形率**
- **中性子星半径**

- BH or NS ⇒ **最大質量**
- GWs from massive NS ⇒ **NS radius of massive NS**

No GW from merger remnant detected

Abbott et al. ApJL 851, L16 (2017); arXiv:1805.11579; see also arXiv:1810.02581



電磁波観測による状態方程式への制限

- ▶ 合体後ブラックホールが形成されたかどうかを電磁波観測から制限することで、中性子星最大質量(つまりは状態方程式)に制限を与える
- ▶ ブラックホール形成の閾値となる質量

$$M_{\text{crit}} = M_{\text{max,sph}} + \Delta M_{\text{rot,rig}} + \Delta M_{\text{rot,diff}} + \Delta M_{\text{therm}}$$

- ▶ $M_{\text{max,sph}}$: 球対称の冷たい中性子星の最大質量
- ▶ $\Delta M_{\text{rot,rig}}$: 一様回転による底上げ
- ▶ $\Delta M_{\text{rot,diff}}$: 差動回転(中心ほど高速)による追加効果
 - 磁気乱流粘性等で短時間で失われると考えられる
- ▶ ΔM_{therm} : 熱エネルギーの寄与
 - ニュートリノ放射によって短時間で失われると考えられる



電磁波観測による状態方程式への制限

▶ ブラックホール形成の閾値となる質量

$$M_{\text{crit}} = M_{\text{max,sph}} + \Delta M_{\text{rot,rig}} + \Delta M_{\text{rot,diff}} + \Delta M_{\text{therm}}$$

▶ 制限1: ブラックホールが直ちに形成されてはならない:

- ▶ (可視赤外観測の起源をキロノバに求めるならば) $M \geq 0.01M_{\odot}$ の質量放出が必要

$$M_{\text{crit}} \gtrsim M_{\text{GW170817}} = 2.74M_{\odot}$$

- ▶ 中性子星の状態方程式が柔らかすぎてはならない (e.g., Bauswein et al. 2017)

▶ 制限2: 合体後の大質量中性子星は長寿命ではない:

- ▶ 長寿命だとすると回転エネルギー起源の活動が観測されるはず (e.g. Sun et al. 2017)

$$M_{\text{max,sph}} + \Delta M_{\text{rot,rig}} \lesssim 2.74M_{\odot}$$

Shibata et al. 2017)

- ▶ 状態方程式は硬すぎてはならない (Margalit & Metzger 2017; Rezzolla et al. 2018)

- ▶ 弱磁場 ($B_p \sim 10^9\text{--}10^{10}G$) であれば長寿命も可能 (Ai+ 2018), フレア?の起源 (Piro+ 2018)

- ▶ 観測されている SGRB を作れるモデル ($B_p > 10^{14}G$) との整合性

- ▶ $R_{1.4} \sim 11\text{km}$ とすると中性子星モデル的に困難

- ▶ 数値相対論シミュレーション結果 (Kiuchi et al. 2015; 2018) の示唆と不適合

電磁波観測による状態方程式への制限

▶ ブラックホール形成の間

$$M_{\text{crit}} = M_{\text{m}}$$

▶ 制限1: ブラックホール

- ▶ (可視赤外観測の起源:

M

- ▶ 中性子星の状態方程式

▶ 制限2: 合体後の大質

- ▶ 長寿命だとすると回転:

M

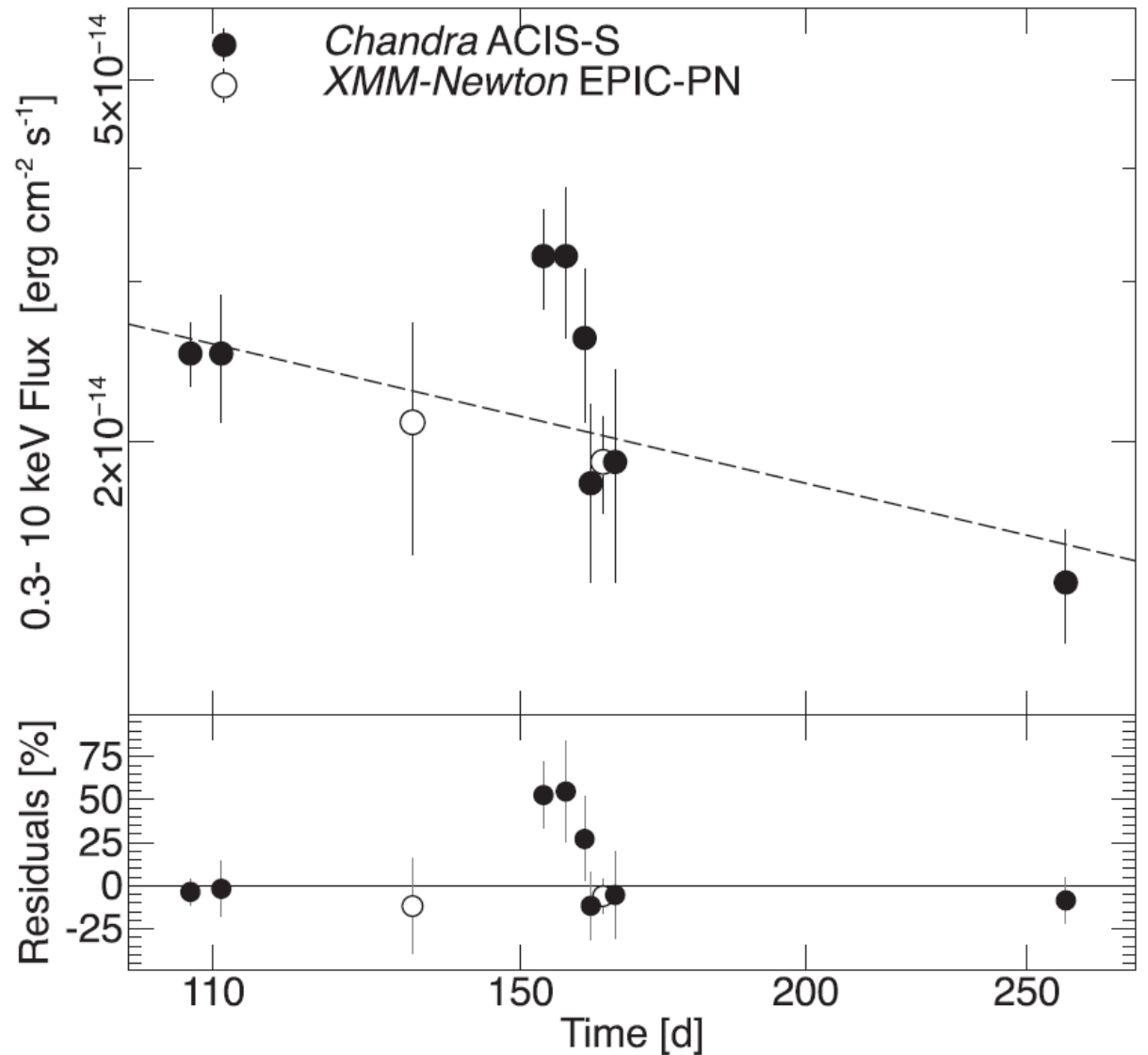
- ▶ 状態方程式は硬すぎて

- ▶ 弱磁場 ($B_p \sim 10^9 - 10^{10} G$) で

- ▶ 観測されている SGRB

- ▶ $R_{1.4} \sim 11 \text{ km}$ とすると

- ▶ 数値相対論シミュレ



電磁波観測による状態方程式への制限

▶ ブラックホール形成の閾値となる質量

$$M_{\text{crit}} = M_{\text{max,sph}} + \Delta M_{\text{rot,rig}} + \Delta M_{\text{rot,diff}} + \Delta M_{\text{therm}}$$

▶ 制限1: ブラックホールが直ちに形成されてはならない:

- ▶ (可視赤外観測の起源をキロノバに求めるならば) $M \geq 0.01M_{\odot}$ の質量放出が必要

$$M_{\text{crit}} \gtrsim M_{\text{GW170817}} = 2.74M_{\odot}$$

- ▶ 中性子星の状態方程式が柔らかすぎてはならない (e.g., Bauswein et al. 2017)

▶ 制限2: 合体後の大質量中性子星は長寿命ではない:

- ▶ 長寿命だとすると回転エネルギー起源の活動が観測されるはず (e.g. Sun et al. 2017)

$$M_{\text{max,sph}} + \Delta M_{\text{rot,rig}} \lesssim 2.74M_{\odot}$$

Shibata et al. 2017)

- ▶ 状態方程式は硬すぎてはならない (Margalit & Metzger 2017; Rezzolla et al. 2018)

- ▶ 弱磁場 ($B_p \sim 10^9\text{--}10^{10}G$) であれば長寿命も可能 (Ai+ 2018), フレア?の起源 (Piro+ 2018)

- ▶ 観測されている SGRB を作れるモデル ($B_p > 10^{14}G$) との整合性

- ▶ $R_{1.4} \sim 11\text{km}$ とすると中性子星モデル的に困難

- ▶ 数値相対論シミュレーション結果 (Kiuchi et al. 2015; 2018) の示唆と不適合

電磁波観測による状態方程式への制限

▶ ブラックホール形成の閾値と最大質量

$$M_{\text{crit}} = M_{\text{max, sph}}$$

▶ 制限1: ブラックホールが直

- ▶ (可視赤外観測の起源をキ

$$M_{\text{crit}} \gtrsim$$

- ▶ 中性子星の状態方程式が柔

▶ 制限2: 合体後の大質量中

- ▶ 長寿命だとすると回転エネル

$$M_{\text{max, sph}}$$

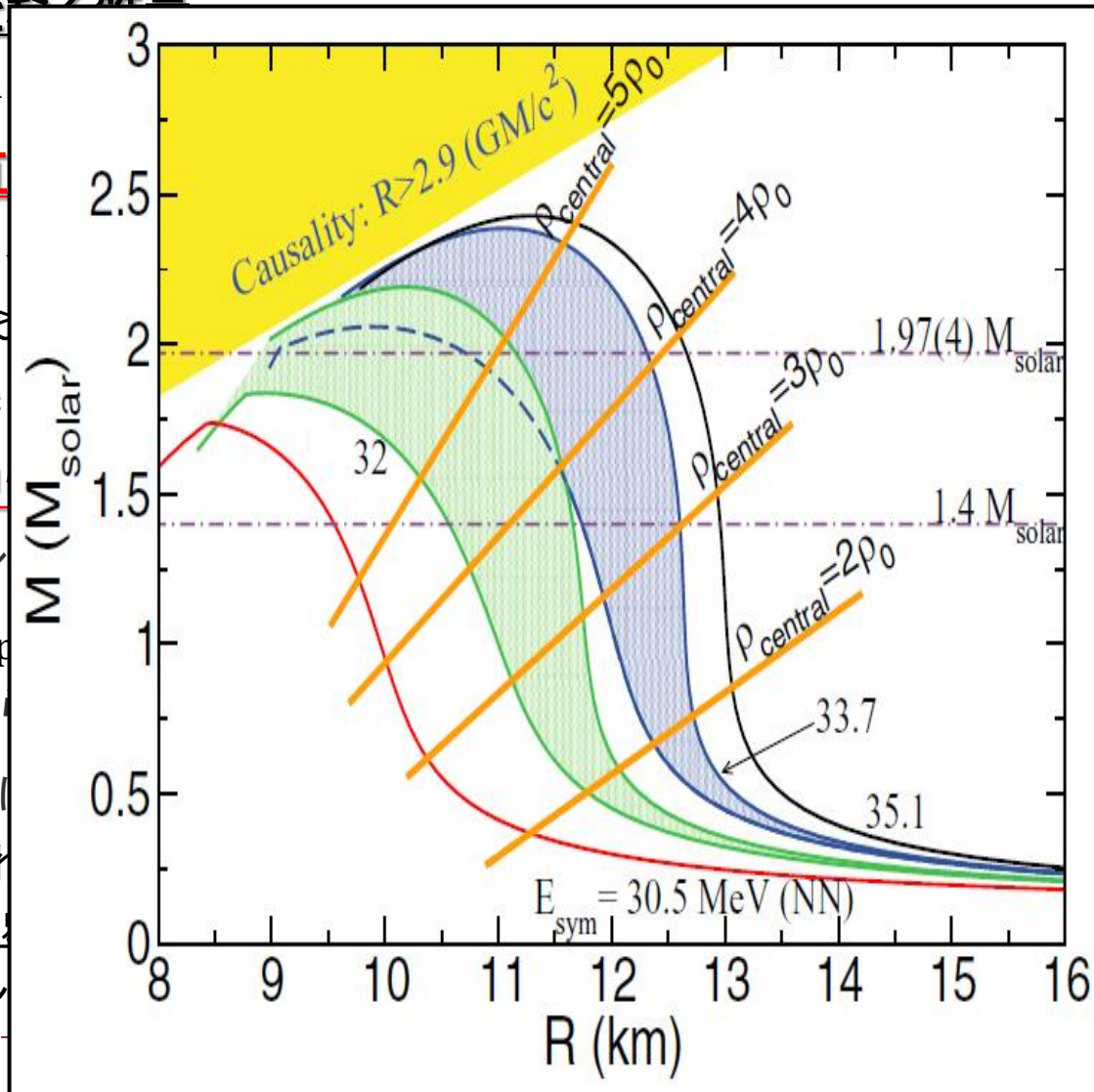
- ▶ 状態方程式は硬すぎてはな

- ▶ 弱磁場 ($B_p \sim 10^9 - 10^{10} G$) であれ

- ▶ 観測されている SGRB を作り

- ▶ $R_{1.4} \sim 11 \text{ km}$ とすると中性子

- ▶ 数値相対論シミュレーション



電磁波観測による状態方程式への制限

▶ ブラックホール形成の閾値となる質量

$$M_{\text{crit}} = M_{\text{max,sph}} + \Delta M_{\text{rot,rig}} + \Delta M_{\text{rot,diff}} + \Delta M_{\text{therm}}$$

▶ 制限1: ブラックホールが直ちに形成されてはならない:

- ▶ (可視赤外観測の起源をキロノバに求めるならば) $M \geq 0.01M_{\odot}$ の質量放出が必要

$$M_{\text{crit}} \gtrsim M_{\text{GW170817}} = 2.74M_{\odot}$$

- ▶ 中性子星の状態方程式が柔らかすぎてはならない (e.g., Bauswein et al. 2017)

▶ 制限2: 合体後の大質量中性子星は長寿命ではない:

- ▶ 長寿命だとすると回転エネルギー起源の活動が観測されるはず (e.g. Sun et al. 2017)

$$M_{\text{max,sph}} + \Delta M_{\text{rot,rig}} \lesssim 2.74M_{\odot}$$

Shibata et al. 2017)

- ▶ 状態方程式は硬すぎてはならない (Margalit & Metzger 2017; Rezzolla et al. 2018)

- ▶ 弱磁場 ($B_p \sim 10^9\text{--}10^{10}G$) であれば長寿命も可能 (Ai+ 2018), フレア?の起源 (Piro+ 2018)

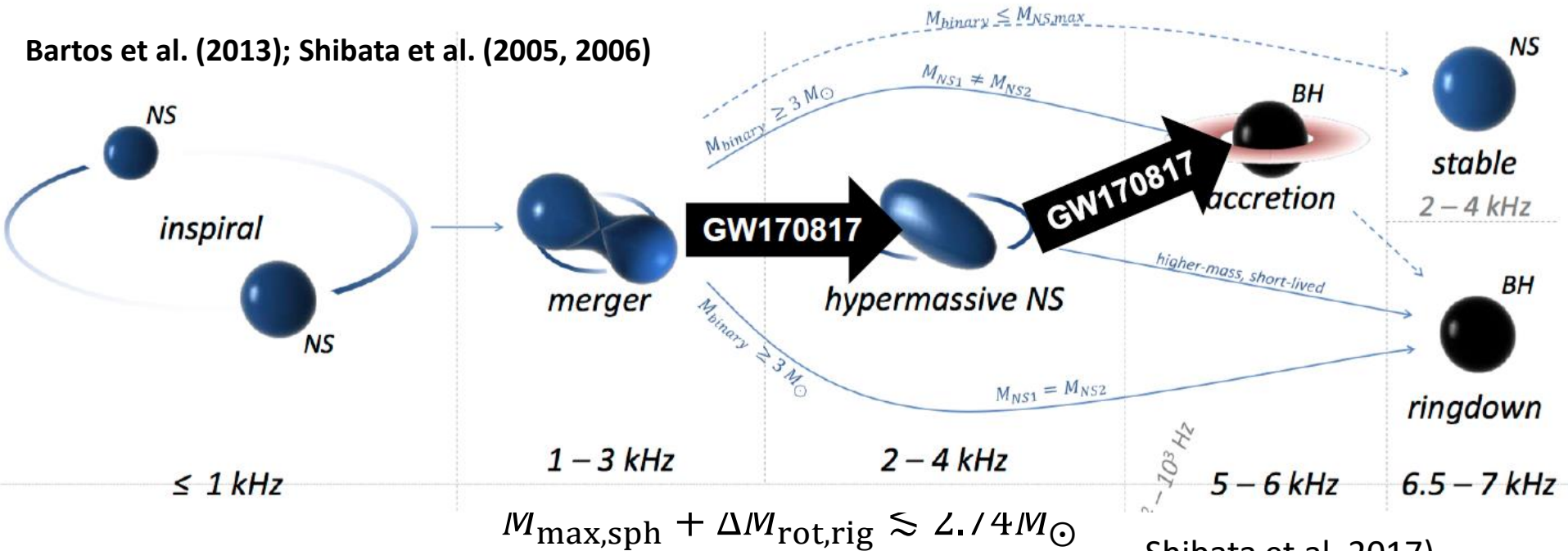
- ▶ 観測されている SGRB を作れるモデル ($B_p > 10^{14}G$) との整合性

- ▶ $R_{1.4} \sim 11\text{km}$ とすると中性子星モデル的に困難

- ▶ 数値相対論シミュレーション結果 (Kiuchi et al. 2015; 2018) の示唆と不適合

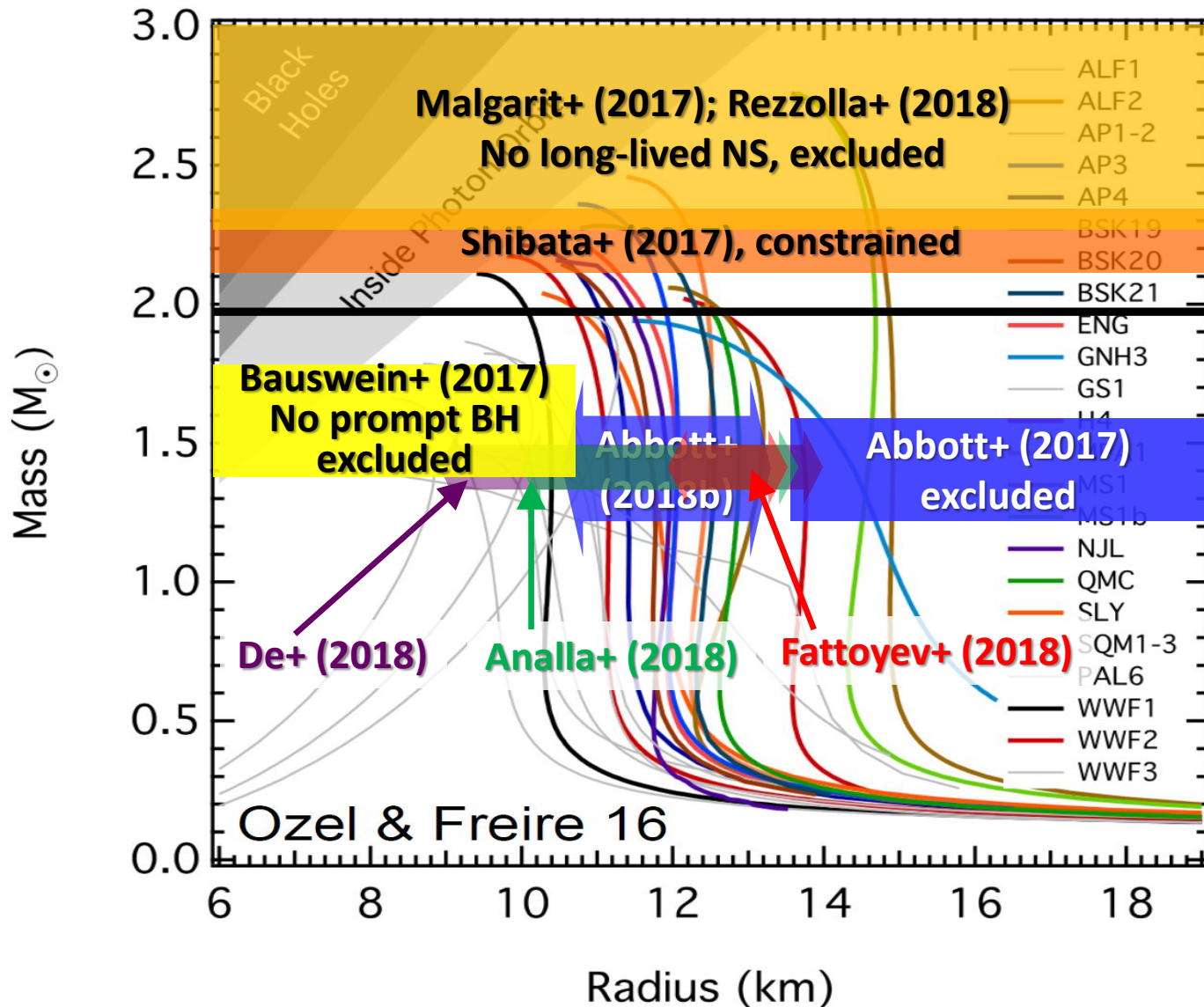
電磁波観測による状態方程式への制限

Bartos et al. (2013); Shibata et al. (2005, 2006)



- ▶ 状態方程式は硬すぎではない (Margalit & Metzger 2017; Rezzolla et al. 2018)
- ▶ 弱磁場 ($B_p \sim 10^{9-10} G$) であれば長寿命も可能 (Ai+ 2018), フレア?の起源 (Piro+ 2018)
 - ▶ 観測されている SGRB を作れるモデル ($B_p > 10^{14} G$) との整合性
 - ▶ $R_{1.4} \sim 11\text{ km}$ とすると中性子星モデル的に困難
 - ▶ 数値相対論シミュレーション結果 (Kiuchi et al. 2015; 2018) の示唆と不適合

Summary on NS structure constraint using both GW and EM



原子核実験と中性子星状態方程式

- ▶ 核物質のエネルギー(状態方程式)

$$E(\text{nuclear matter}) = E(\text{symmetric } n_p = n_n \text{ matter}) + \Delta E^{(1)} + \Delta E^{(2)} + \dots$$

- ▶ 非対称度: $x = n_p / (n_p + n_n) = n_p / n$ (proton fraction)

$$E(n, x) = E(n, 1/2) + S(n)(1 - 2x)^2 + \Delta E^{(2)} + \dots$$

- ▶ $E(n, 1/2)$ と $S(n)$ (対称エネルギー) を saturation density n_0 周りで展開

$$E(n, 1/2) = B + \frac{K}{18}(1 - n/n_0)^2 + \dots \quad (\text{安定性から1次項は消える})$$

$$S(n) = S + \frac{L}{3}(n - n_0) + \dots$$

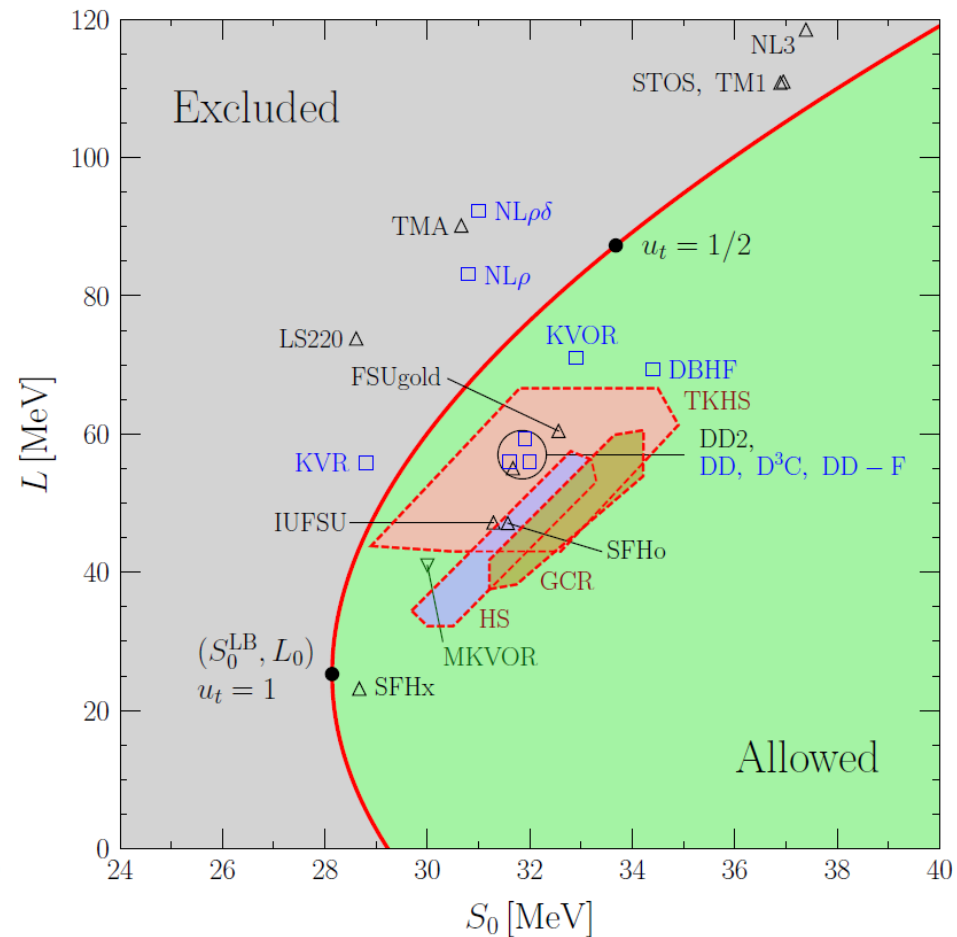
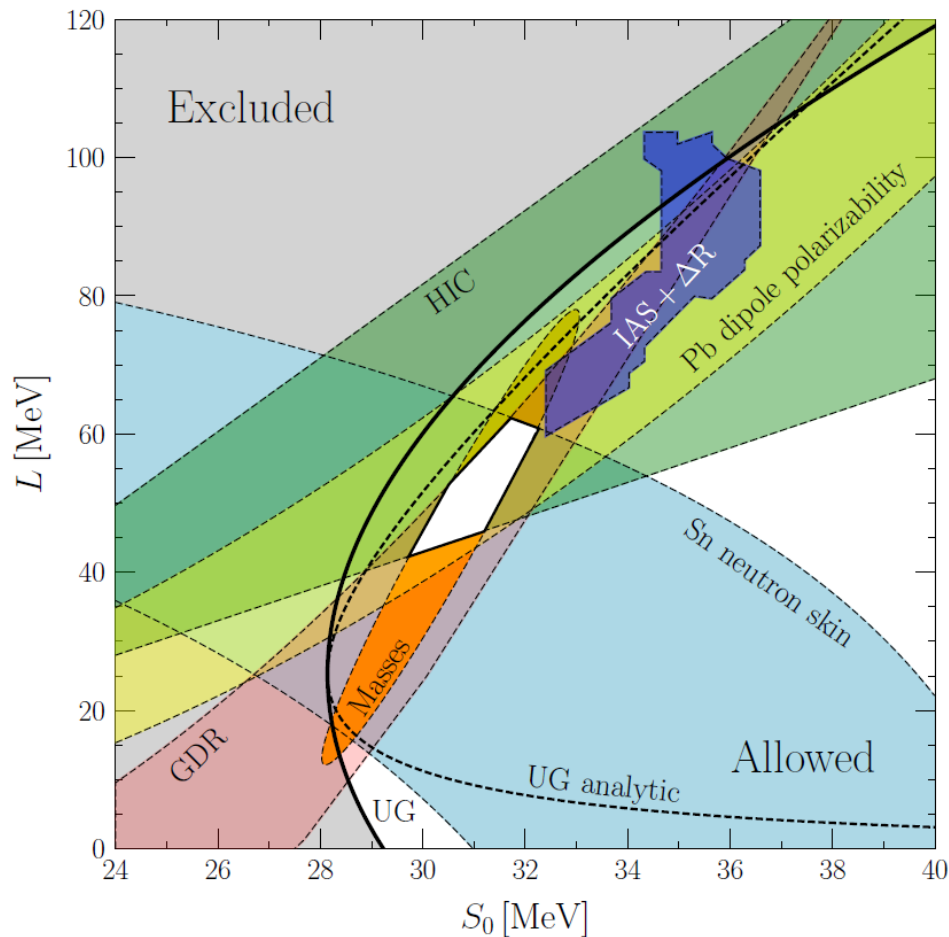
- ▶ B : the binding energy, K : the incompressibility,
- ▶ S : the symmetry energy, L : the symmetry energy slope
- ▶ これらの物理量が実験によって制限されている



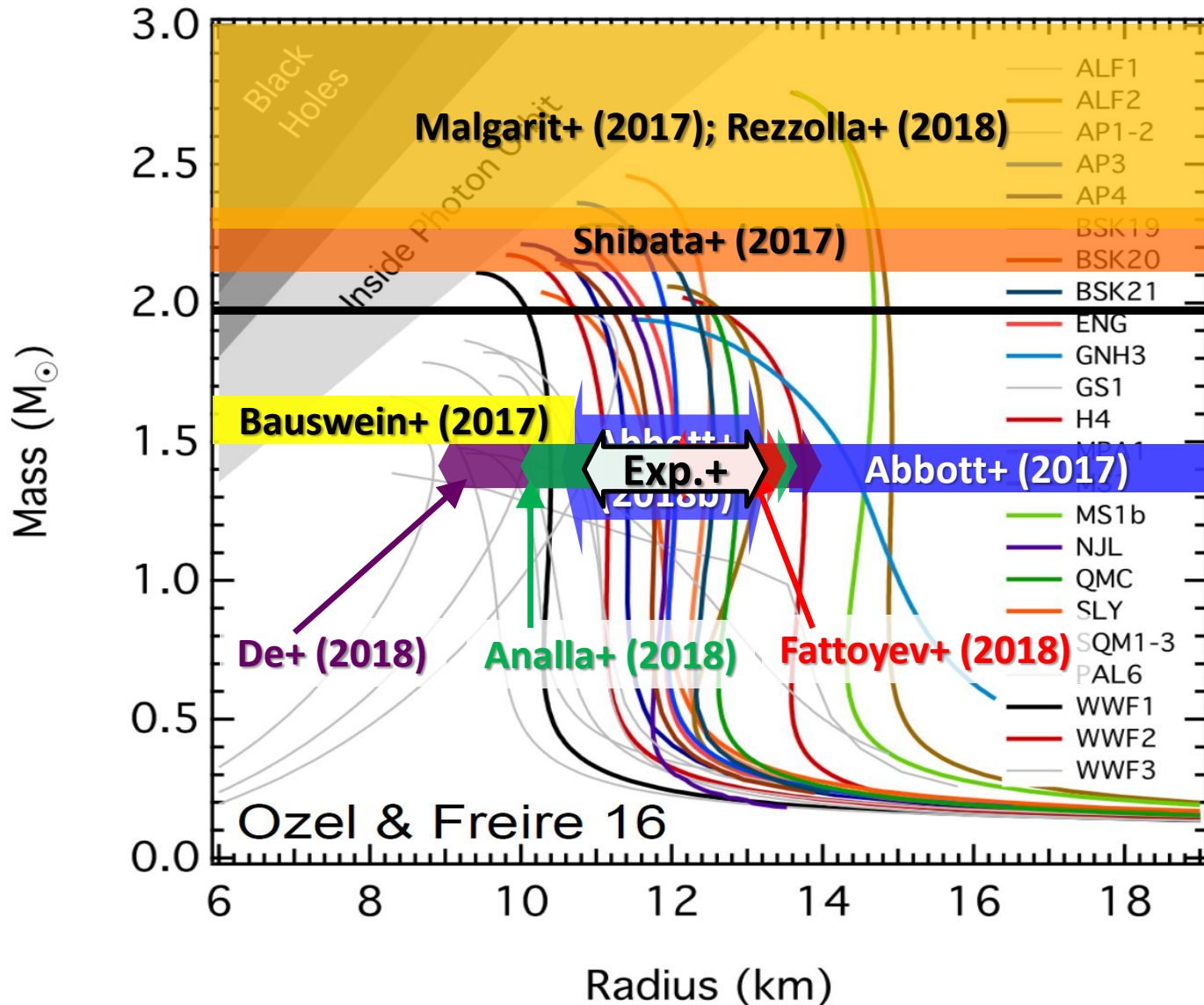
原子核実験と中性子星状態方程式

▶ 核物質のエネルギー(状態方程式)

$$E(\text{nuclear matter}) = E(\text{symmetric } n_p = n_n \text{ matter}) + \Delta E^{(1)} + \Delta E^{(2)} + \dots$$

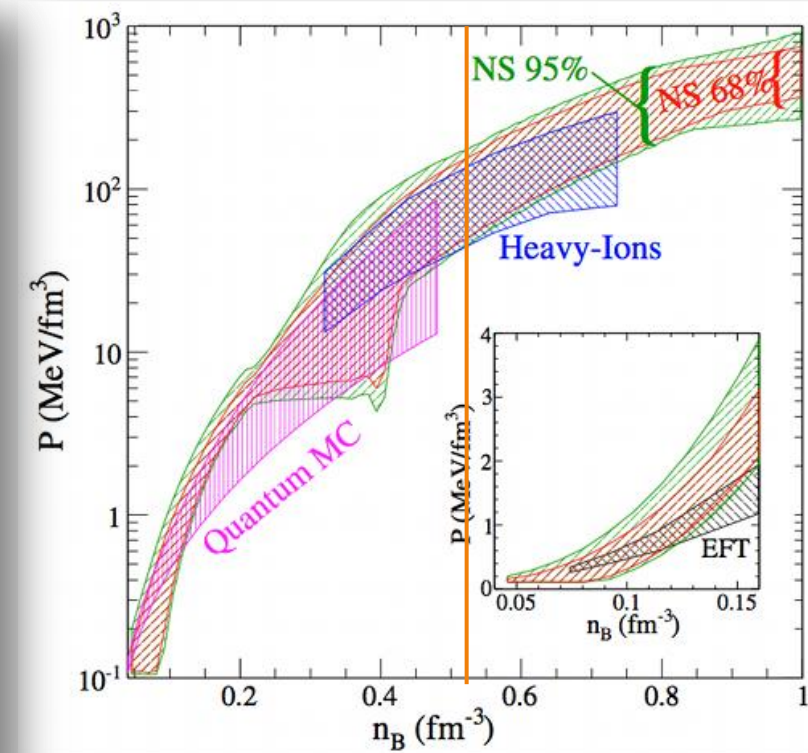
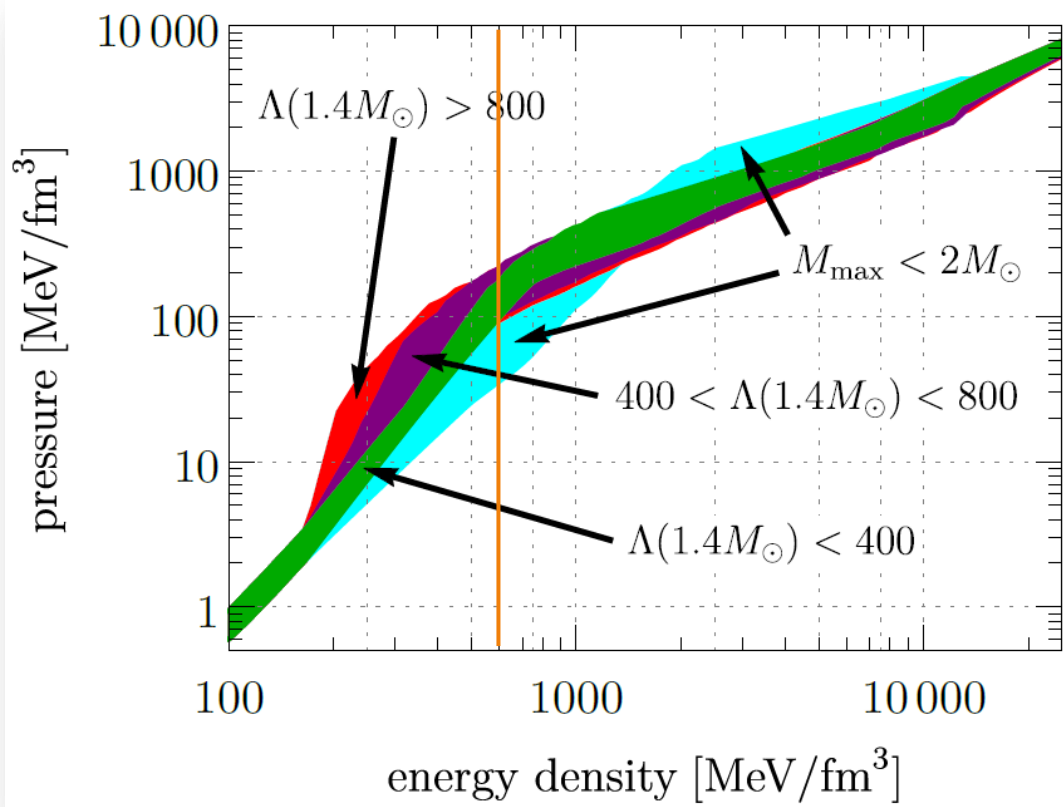


Summary on NS structure constraint using GW/EM and nuclear experiments



状態方程式へのインパクト

- ▶ $200 < \Lambda < 800$ を満たしうる状態方程式 (密度-圧力平面上で)
 - ▶ $P = 100 - 200 \text{ MeV/fm}^3$ at $n_B \sim 3n_0$?
 - ▶ 地上の加速器実験 (重イオン衝突) の制限と同等か



まとめと展望：中性子星構造(状態方程式)の標準理論

- ▶ $M = 1.4M_{\odot}$ の中性子星半径 : $10 \lesssim R_{1.4} \lesssim 13$ km
 - ▶ 重力波観測、原子核実験は整合的
 - ▶ 数値相対論波形を用いることが重要
 - ▶ frequency-domain 波形と time-domain 波形の違い：解析パイプライン依存性？
 - ▶ より高精度の波形の計算
- ▶ より高密度領域を探るためには大質量中性子星からの重力波
 - ▶ advanced LIGO の design 感度の数倍以上が必要 ⇒ 次世代重力波干渉計
 - ▶ 電磁波観測による合体後に形成される天体の制限が今後重要
 - ▶ Event rate は高い 1-10/year
 - ▶ 数値相対論シミュレーション + 理論的可能性の探求
- ▶ 半径の精密観測による新たな制限可能性
 - ▶ Stiffening vs. Softening



まとめと展望：中性子星構造(状態方程式)の標準理論

- ▶ $M = 1.4M_{\odot}$ の中性子星半径 : $10 \lesssim R_{1.4} \lesssim 13$ km
 - ▶ 重力波観測、原子核実験は整合的
 - ▶ 数値相対論波形を用いることが重要
 - ▶ frequency-domain 波形と time-domain 波形の違い：解析パイプライン依存性？

▶ **Newtonian** polytrope

$$P = K\rho^{1+1/n} = K\rho^{\Gamma}$$

$$R \propto M^{(1-n)/(3-n)} K^{n/(3-n)}$$

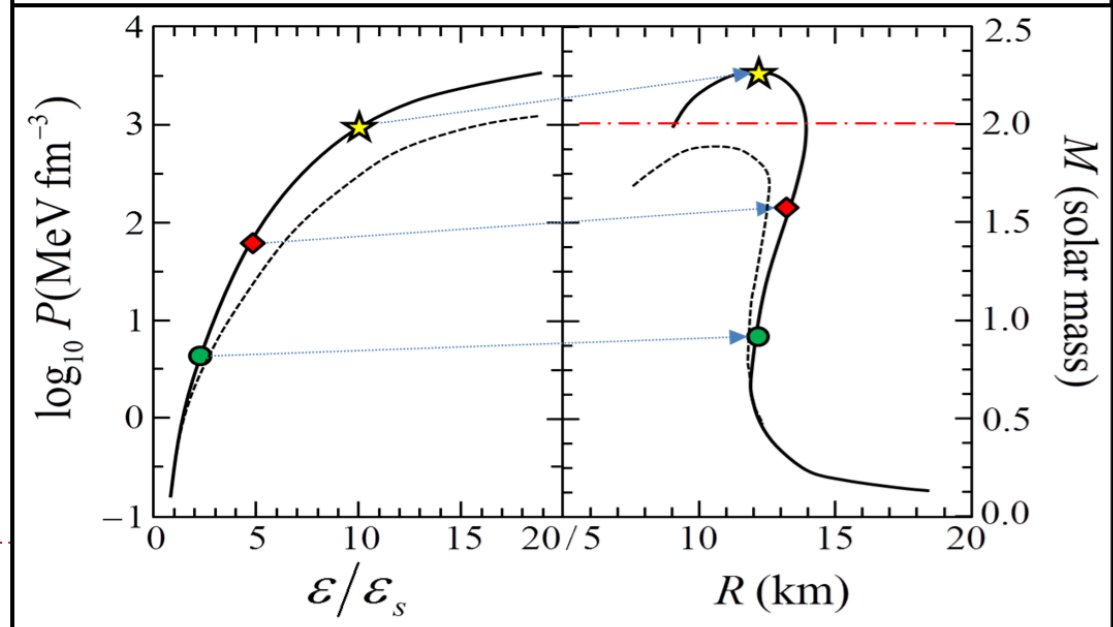
$$\Gamma > 2_{(n<1)} \Rightarrow dR/dM > 0$$

$$\Gamma > 4/3_{(n<3)} \Rightarrow dR/dK > 0$$

- ▶ Softening of EOS ($\Gamma < 2$, $K \downarrow$)
 \Rightarrow decrease of R
- ▶ dM/dR determination
 provides EOS information

Tolman-Oppenheimer-Volkov equations

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{Gm}{r^2} \left(1 + \frac{P}{\varepsilon c^2} \right) \left(1 + \frac{4\pi r^3 P}{mc^2} \right) \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r} \right)^{-1}, \quad \frac{dm}{dr} = 4\pi \frac{\varepsilon}{c^2} r^2$$





Taylor F2 waveform : 3.5PN GW phase

$$\phi_{\text{TF2}} = 2\pi f t_c - \varphi_c - \pi/4 + \frac{3}{128\eta} (\pi f M)^{-5/3} \sum_{i=0}^7 \varphi_i(\Xi) (\pi f M)^{i/3}$$

$$\varphi_0 = 1$$

$$\varphi_1 = 0$$

$$\varphi_2 = \frac{3715}{756} + \frac{55\eta}{9}$$

$$\varphi_3 = -16\pi + \frac{113\delta\chi_a}{3} + \left(\frac{113}{3} - \frac{76\eta}{3}\right)\chi_s$$

$$\varphi_4 = \frac{15293365}{508032} + \frac{27145\eta}{504} + \frac{3085\eta^2}{72} + \left(-\frac{405}{8} + 200\eta\right)\chi_a^2 - \frac{405}{4}\delta\chi_a\chi_s + \left(-\frac{405}{8} + \frac{5\eta}{2}\right)\chi_s^2$$

$$\varphi_5 = [1 + \log(\pi M f)] \left[\frac{38645\pi}{756} - \frac{65\pi\eta}{9} + \delta \left(-\frac{732985}{2268} - \frac{140\eta}{9} \right) \chi_a + \left(-\frac{732985}{2268} + \frac{24260\eta}{81} + \frac{340\eta^2}{9} \right) \chi_s \right]$$

$$\varphi_6 = \frac{11583231236531}{4694215680} - \frac{6848\gamma_E}{21} - \frac{640\pi^2}{3} + \left(-\frac{15737765635}{3048192} + \frac{2255\pi^2}{12} \right) \eta + \frac{76055\eta^2}{1728} - \frac{127825\eta^3}{1296}$$

$$- \frac{6848}{63} \log(64\pi M f) + \frac{2270}{3} \pi \delta \chi_a + \left(\frac{2270\pi}{3} - 520\pi\eta \right) \chi_s,$$

$$\varphi_7 = \frac{77096675\pi}{254016} + \frac{378515\pi\eta}{1512} - \frac{74045\pi\eta^2}{756} + \delta \left(-\frac{25150083775}{3048192} + \frac{26804935\eta}{6048} - \frac{1985\eta^2}{48} \right) \chi_a$$

$$+ \left(-\frac{25150083775}{3048192} + \frac{10566655595\eta}{762048} - \frac{1042165\eta^2}{3024} + \frac{5345\eta^3}{36} \right) \chi_s.$$

$$M = m_1 + m_2,$$

$$\eta = m_1 m_2 / M^2,$$

$$\delta = (m_1 - m_2) / M,$$

$$\chi_s = (\chi_1 + \chi_2) / 2,$$

$$\chi_a = (\chi_1 - \chi_2) / 2.$$

LIGO and Virgo Collaboration

1805.11579

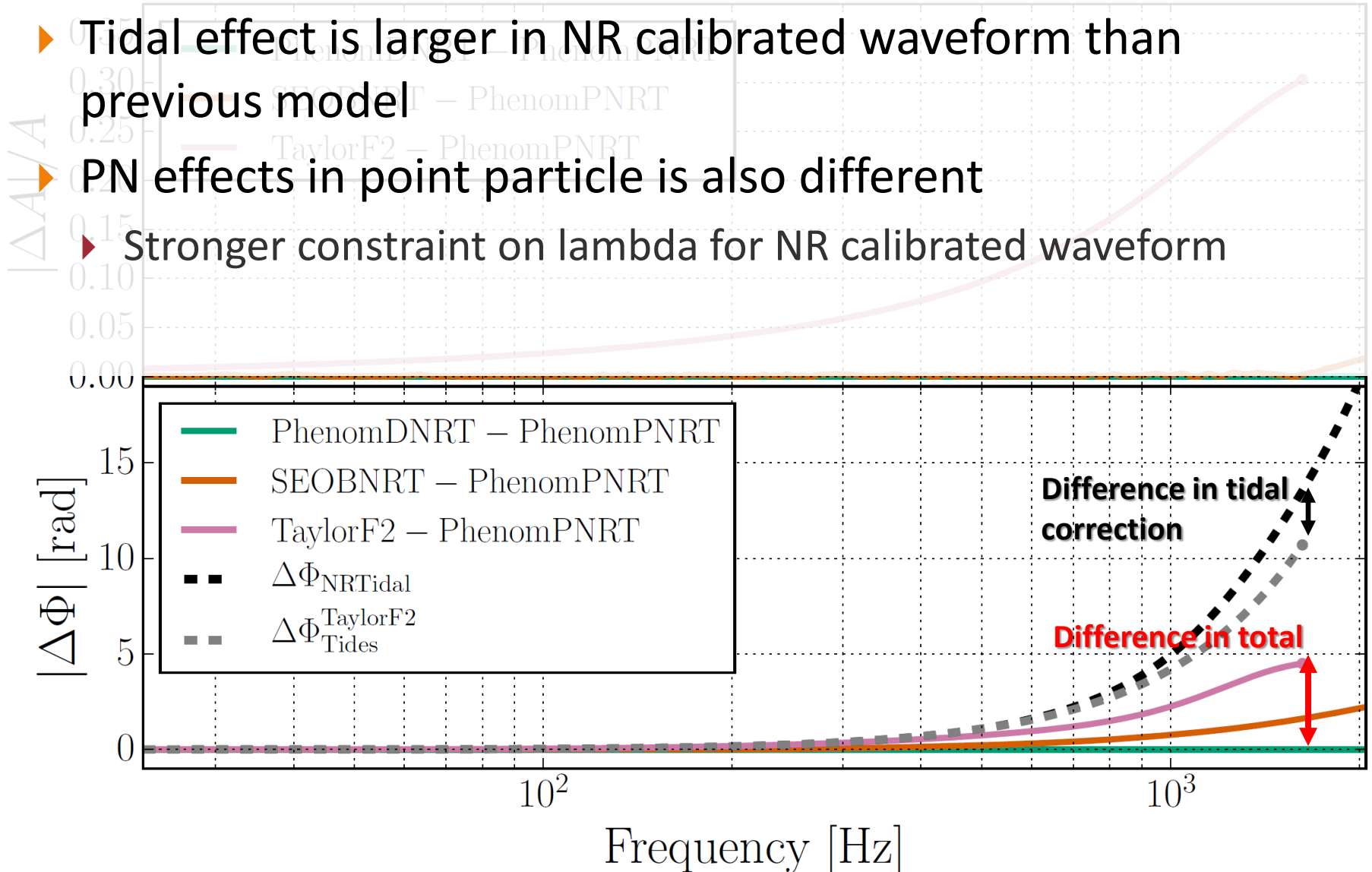
| | Low-spin prior ($\chi \leq 0.05$) |
|--|---|
| Binary inclination θ_{JN} | 146_{-27}^{+25} deg |
| Binary inclination θ_{JN} using EM distance constraint [104] | 151_{-11}^{+15} deg |
| Detector frame chirp mass \mathcal{M}^{det} | $1.1975_{-0.0001}^{+0.0001} M_{\odot}$ |
| Chirp mass \mathcal{M} | $1.186_{-0.001}^{+0.001} M_{\odot}$ |
| Primary mass m_1 | (1.36, 1.60) M_{\odot} |
| Secondary mass m_2 | (1.16, 1.36) M_{\odot} |
| Total mass m | $2.73_{-0.01}^{+0.04} M_{\odot}$ |
| Mass ratio q | (0.73, 1.00) |
| Effective spin χ_{eff} | $0.00_{-0.01}^{+0.02}$ |
| Primary dimensionless spin χ_1 | (0.00, 0.04) |
| Secondary dimensionless spin χ_2 | (0.00, 0.04) |
| Tidal deformability $\tilde{\Lambda}$ with flat prior | 300_{-190}^{+500} (symmetric) / 300_{-230}^{+420} (HPD) |

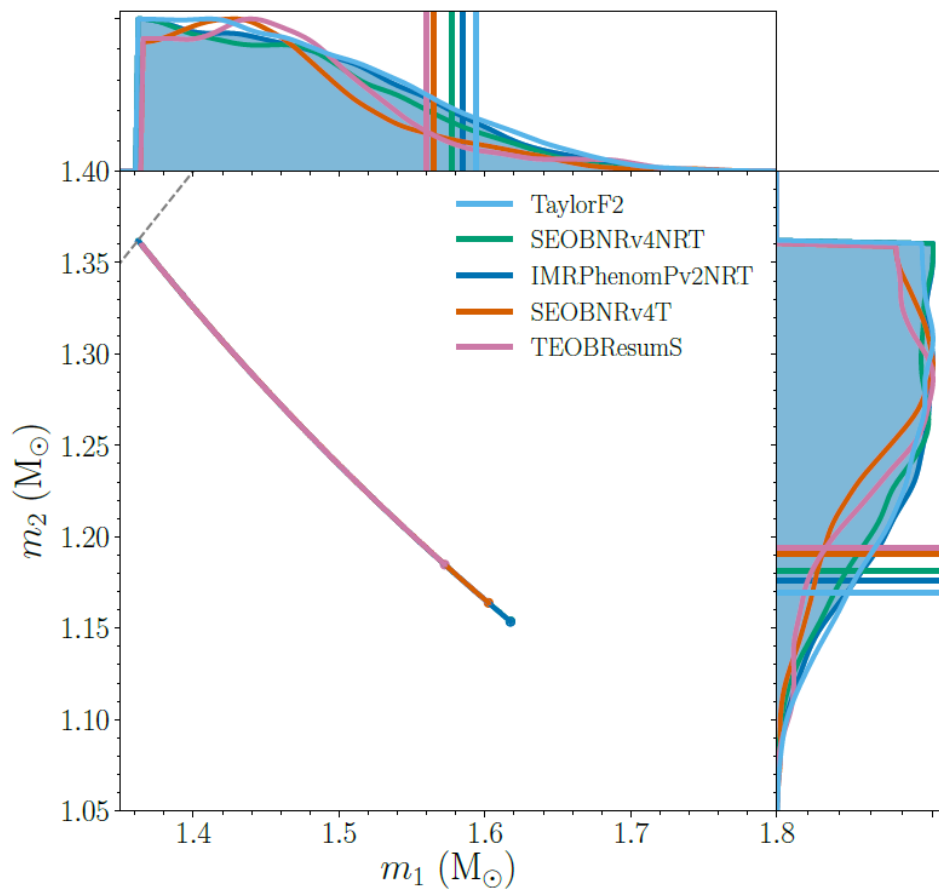
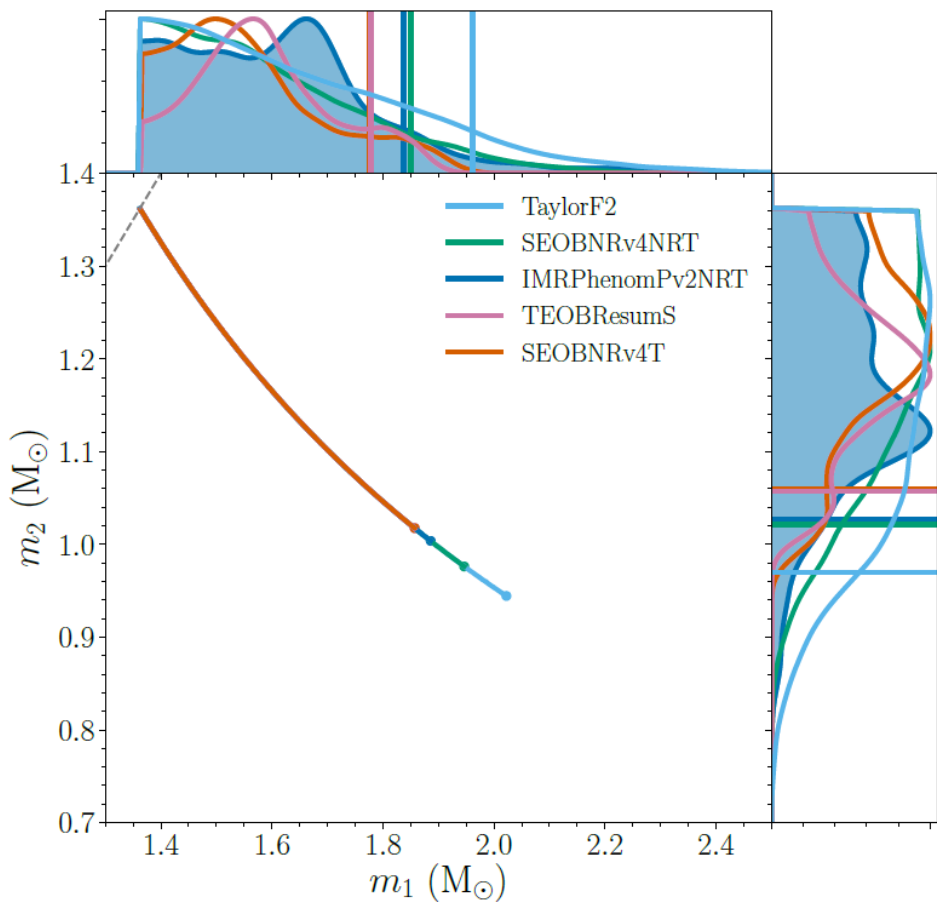


LIGO and Virgo Collaboration

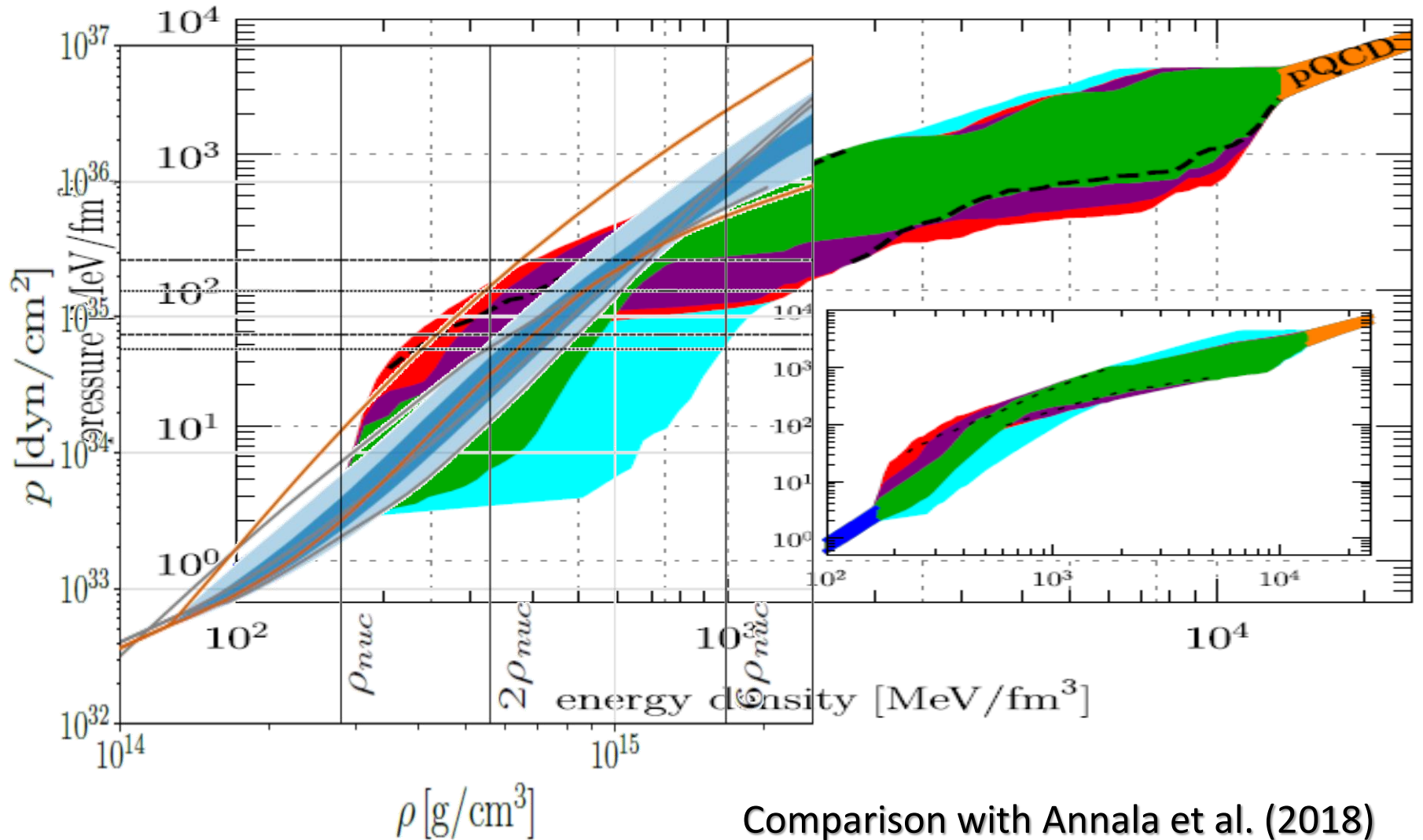
1805.11579

- ▶ Tidal effect is larger in NR calibrated waveform than previous model
- ▶ PN effects in point particle is also different
- ▶ Stronger constraint on lambda for NR calibrated waveform





Constraint on NS EOS

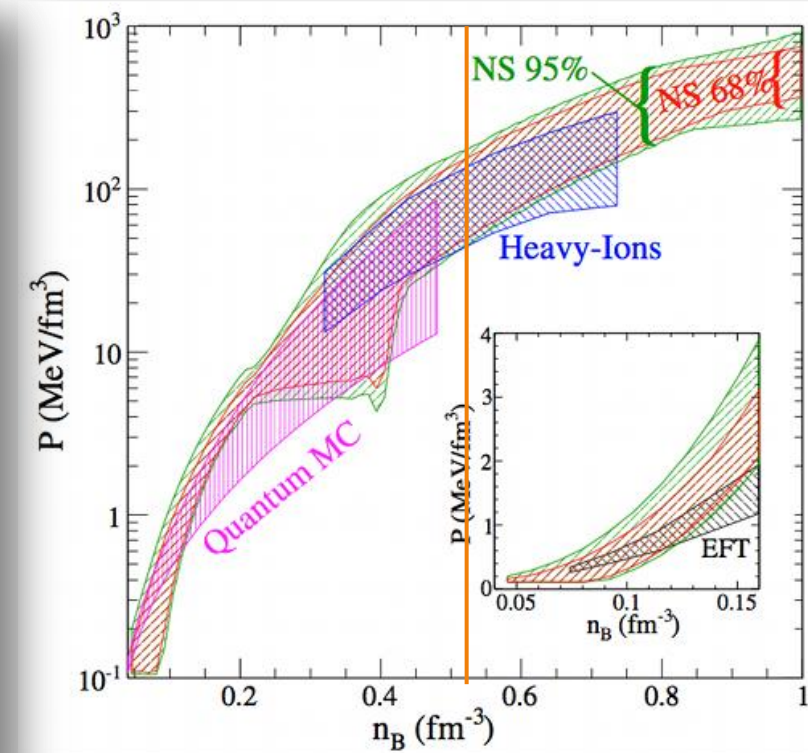
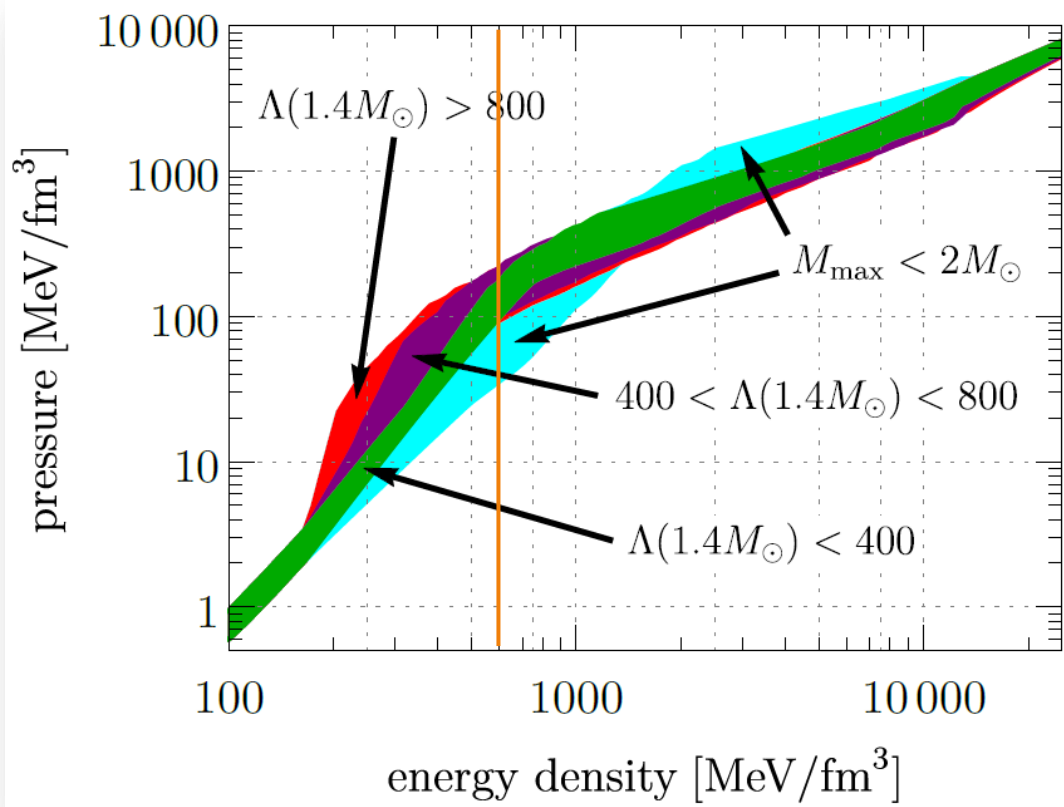


Comparison with Annala et al. (2018)



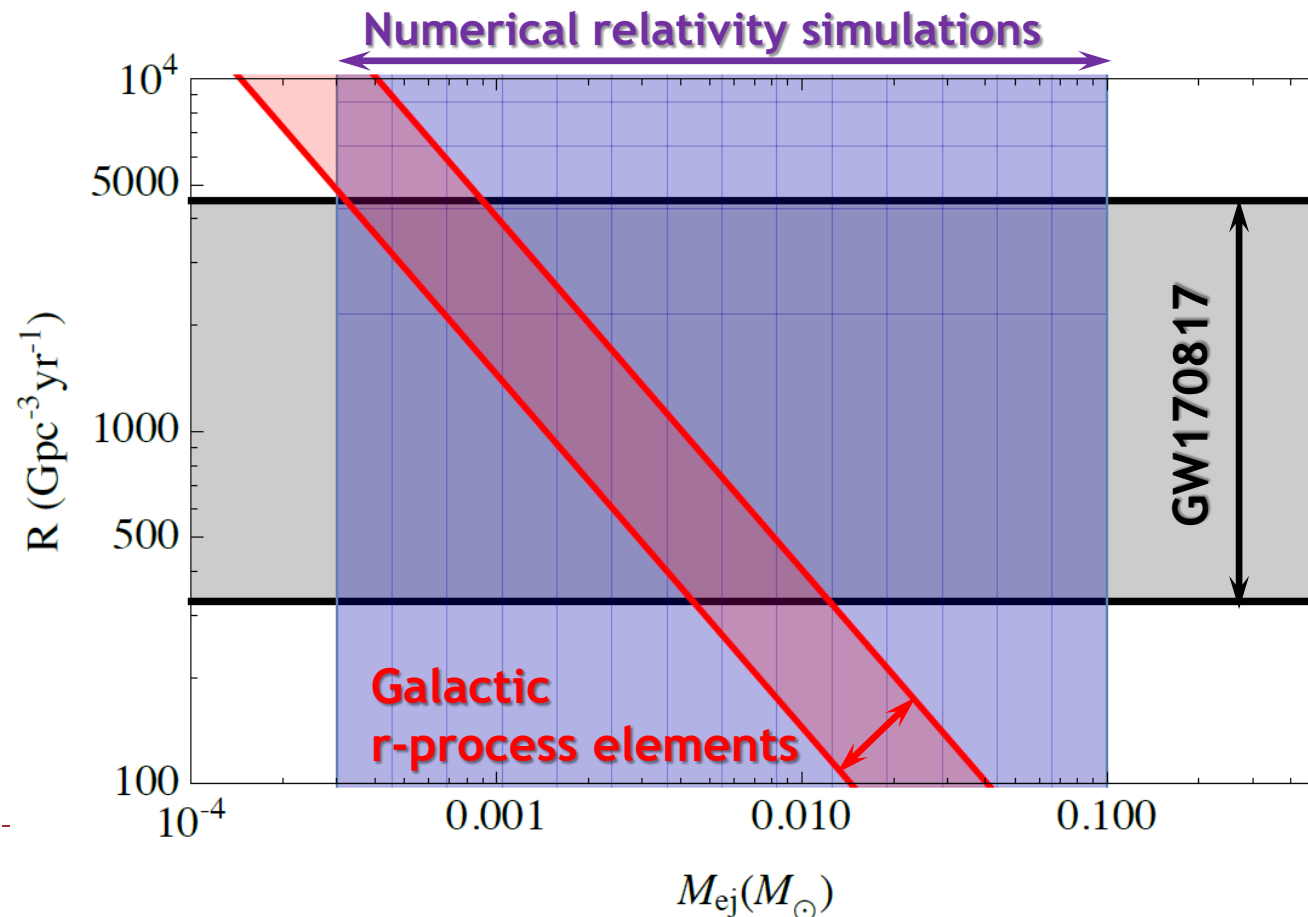
状態方程式へのインパクト

- ▶ $200 < \Lambda < 800$ を満たしうる状態方程式 (密度-圧力平面上で)
 - ▶ $P = 100 - 200 \text{ MeV/fm}^3$ at $n_B \sim 3n_0$?
 - ▶ 地上の加速器実験 (重イオン衝突) の制限と同等か



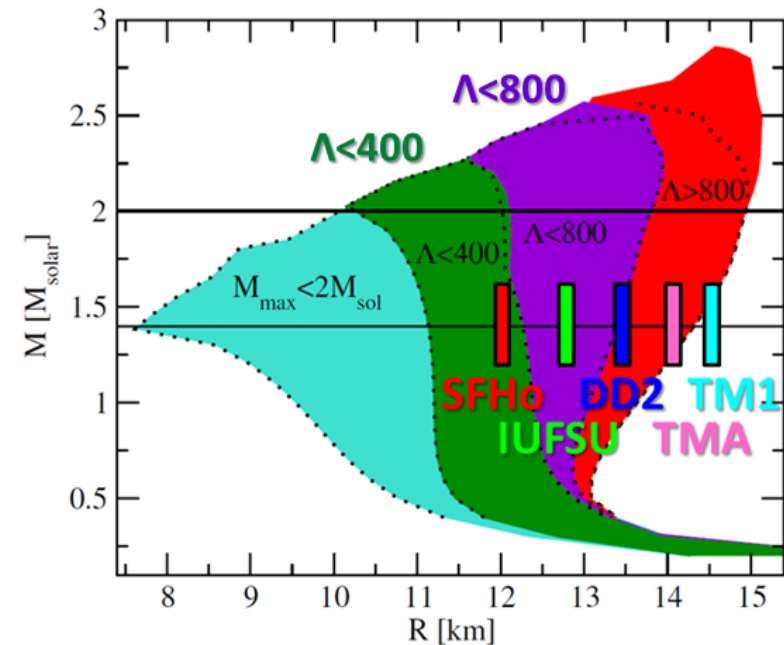
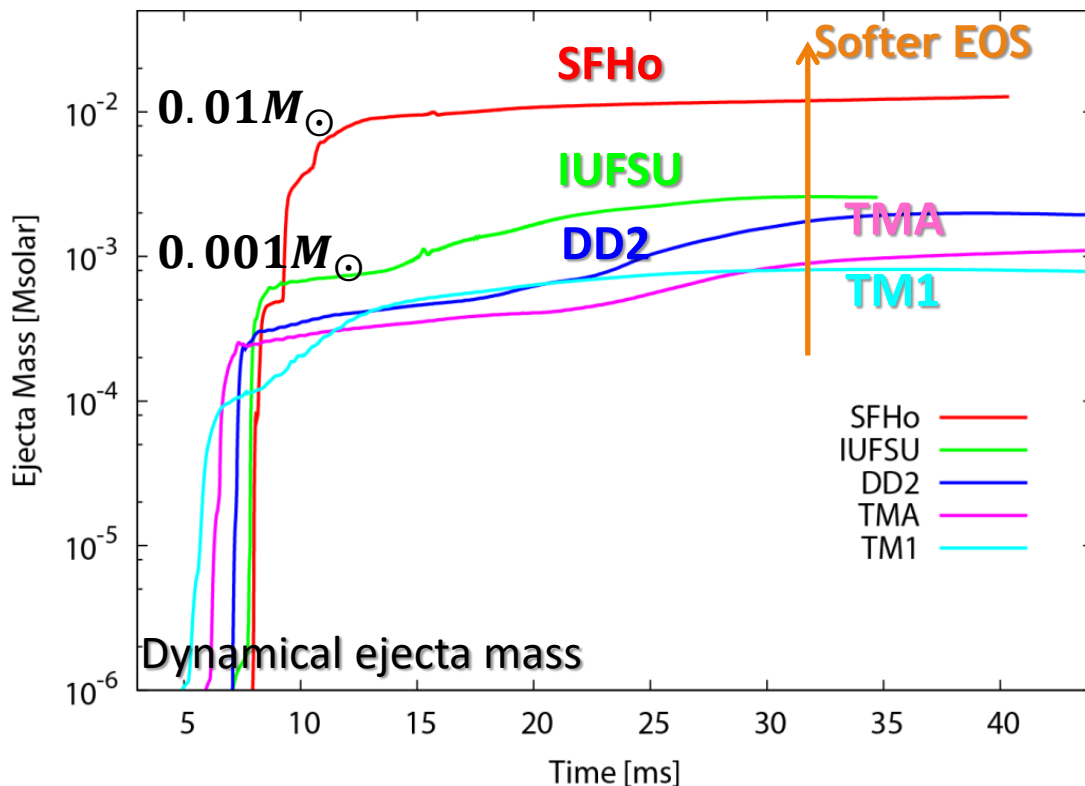
NS-NS merger as origin of r-process nucleosynthesis

- ▶ NS-NS rate from GW170817 : $320\text{-}4740 \text{ Gpc}^{-3}\text{yr}^{-1}$
 - ▶ $M_{\text{ej}} \sim 0.01 M_{\odot}$ is sufficient for NS-NS merger to be the origin of r-process elements ! (Abbott et al. 2017)



放出物質の質量の状態方程式依存性

- ▶ $M_{\text{ej,dyn}} \sim 0.001 - 0.01M_{\odot}$: **状態方程式に強く依存**
 - ▶ 質量放出に依存する電磁波の観測による状態方程式を制限
 - ▶ 柔らかい状態方程式ほど質量放出が大きい
 - SFHo 状態方程式のみ $0.01M_{\odot}$ の大質量
 - しかし柔らかすぎてブラックホールが直ちに形成されると極めて小さい



有限サイズ効果：連星軌道への伴星潮汐場の作用

- ▶ 質点近似を離れ、中性子星を流体として扱って連星系の運動を記述することで潮汐場の影響を取り入れることができる

- ▶ 完全流体(理想流体)を仮定: 基礎方程式は連続の式とオイラー方程式

$$\partial_t \rho + \partial_k (\rho v^k) = 0$$

$$\partial_t (\rho v^i) + \partial_k (\rho v^i v^k) = -\delta^{ij} \partial_j p + \rho \delta^{ij} \partial_j U$$

- ▶ 状態方程式を与えることで方程式系が閉じる: $p = p(\rho)$
- ▶ 重力ポテンシャルはポアソン方程式に従う: $\nabla^2 U = -4\pi G \rho$
- ▶ 中性子星 a ($a = 1, 2$) の質量と重心座標 (V_a volume occupied a)

$$m_a = \int_{V_a} d^3 x \rho(t, \mathbf{x}) \quad z_a^i(t) = \frac{1}{m_a} \int_{V_a} d^3 x \rho(t, \mathbf{x}) x^i$$

- ▶ 重心座標を2階微分して連続の式、オイラー方程式を利用

$$m_a \frac{d^2 z_a^i}{dt^2} = \int_{V_a} d^3 x (-\partial_i p + \rho \partial_i U)$$



軌道の運動方程式の導出

$$\begin{aligned}\frac{dz_a^i}{dt} &= \frac{1}{m_a} \int_{V_a} d^3x (\partial_t \rho) x^i = -\frac{1}{m_a} \int_{V_a} d^3x \partial_k (\rho v^k) x^i \\ &= -\frac{1}{m_a} \int_{V_a} d^3x \partial_k (\rho v^k x^i) + \frac{1}{m_a} \int_{V_a} d^3x \rho v^k \partial_k x^i = \frac{1}{m_a} \int_{V_a} d^3x \rho v^k \delta_k^i \\ &= \frac{1}{m_a} \int_{V_a} d^3x \rho v^i\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{d^2 z_a^i}{dt^2} &= \frac{1}{m_a} \int_{V_a} d^3x \partial_t (\rho v^i) = \frac{1}{m_a} \int_{V_a} d^3x [-\partial_k (\rho v^i v^k) - \delta^{ij} \partial_j p + \rho \delta^{ij} \partial_j U] \\ &= \frac{1}{m_a} \int_{V_a} d^3x [-\delta^{ij} \partial_j p + \rho \delta^{ij} \partial_j U] = \frac{1}{m_a} \int_{V_a} d^3x [-\partial_i p + \rho \partial_i U]\end{aligned}$$



自己重力は軌道の運動方程式に影響しない

- ▶ 重力ポテンシャルを自己重力ポテンシャルと伴星による外場に分離

$$U(t, \mathbf{x}) = G \int_{V_1} d^3x' \frac{\rho(t, \mathbf{x}')}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|} + G \int_{V_2} d^3x' \frac{\rho(t, \mathbf{x}')}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|} = U^{\text{self}} + U^{\text{ext}}$$

- ▶ 自己重力は次のようにして消える

$$\begin{aligned} F^{\text{self}} &= \int_{V_1} d^3x [-\partial_i p + \rho \partial_i U^{\text{self}}] = \int_{V_1} d^3x \rho \partial_i U^{\text{self}} \\ &= G \int_{V_1} d^3x \rho(t, \mathbf{x}) \frac{\partial}{\partial x^i} \int_{V_1} d^3x' \frac{\rho(t, \mathbf{x}')}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|} \\ &= -G \int_{V_1} d^3x \int_{V_1} d^3x' (x - x')^i \frac{\rho(t, \mathbf{x}) \rho(t, \mathbf{x}')}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|^3} = 0 \end{aligned}$$

- ▶ The integrand is odd under the exchange $x \leftrightarrow x'$, while the domain is symmetric
- ▶ Note that the two densities $\rho(t, x)$ and $\rho(t, x')$ are conceptually different
 - ▶ $\rho(t, x)$: passive gravitational mass density (charge that feels gravity)
 - ▶ $\rho(t, x')$: active gravitational mass density (charge that generates gravity)
- ▶ The vanishing of the self-force is rooted in the equality of two gravitational mass



外場の多重極展開(1)

- ▶ 主星の中心 \mathbf{z}_1 周りで伴星の外場を多重極展開する
 - ▶ 主星中心からの座標 $\mathbf{y} = \mathbf{x} - \mathbf{z}_1(t)$ を導入

$$\partial_i U^{\text{ext}}(t, \mathbf{y} + \mathbf{z}_1) = \partial_i U^{\text{ext}}(t, \mathbf{z}_1) + y^j \partial_j \partial_i U^{\text{ext}}(t, \mathbf{z}_1) + \frac{1}{2} y^k y^j \partial_k \partial_j \partial_i U^{\text{ext}}(t, \mathbf{z}_1) + \dots$$

- ▶ 運動方程式は

$$\begin{aligned} m_1 \frac{d^2 z_1^i}{dt^2} &= \int_{V_1} d^3 y \rho(t, \mathbf{x}) \partial_i U^{\text{ext}}(t, \mathbf{y} + \mathbf{z}_1) \\ &= \int_{V_1} d^3 y \rho(t, \mathbf{x}) \left[\partial_i U^{\text{ext}}(t, \mathbf{z}_1) + y^j \partial_j \partial_i U^{\text{ext}}(t, \mathbf{z}_1) + \frac{1}{2} y^k y^j \partial_k \partial_j \partial_i U^{\text{ext}}(t, \mathbf{z}_1) + \dots \right] \\ &= m_1 \partial_i U^{\text{ext}}(t, \mathbf{z}_1) + I_1^j \partial_j \partial_i U^{\text{ext}}(t, \mathbf{z}_1) + \frac{1}{2} I_1^{jk} \partial_k \partial_j \partial_i U^{\text{ext}}(t, \mathbf{z}_1) + \dots \end{aligned}$$

- ▶ ここで

$$I_1^j = \int_{V_1} d^3 y \rho(t, \mathbf{x}) y^j, \quad I_1^{jk} = \int_{V_1} d^3 y \rho(t, \mathbf{x}) y^j y^k$$



外場の多重極展開(2)

- ▶ 双極子モーメント I_1^j は次のようにして消える

$$\begin{aligned} I_1^j &= \int_{V_1} d^3y \rho(t, \mathbf{x}) y^i = \int_{V_1} d^3x \rho(t, \mathbf{x}) (x - z_1)^i \\ &= \int_{V_1} d^3x \rho(t, \mathbf{x}) x^i - \int_{V_1} d^3x \rho(t, \mathbf{x}) z_1^i = \int_{V_1} d^3x \rho(t, \mathbf{x}) x^i - m_1 z_1^i \\ &= \int_{V_1} d^3x \rho(t, \mathbf{x}) x^i - m_1 \frac{1}{m_1} \int_{V_1} d^3x \rho(t, \mathbf{x}) x^i = 0 \end{aligned}$$

- ▶ I_1^{jk} は四重極モーメントに変えることができる:

- ▶ $\delta^{jk} \partial_k \partial_j \partial_i U^{\text{ext}}(t, \mathbf{z}_1) = \partial_i \nabla^2 U^{\text{ext}}(t, \mathbf{z}_1) = \partial_i (-4\pi G \rho_2(t, \mathbf{z}_1)) = 0$ なので
- ▶ (主星1の位置における伴星2の密度はゼロ)

$$\begin{aligned} I_1^{jk} \partial_k \partial_j \partial_i U^{\text{ext}}(t, \mathbf{z}_1) &= \left(I_1^{jk} - \frac{1}{3} \delta^{jk} I_1^{ll} \right) \partial_k \partial_j \partial_i U^{\text{ext}}(t, \mathbf{z}_1) \\ &= Q_1^{jk} \partial_k \partial_j \partial_i U^{\text{ext}}(t, \mathbf{z}_1) \end{aligned}$$



連星軌道への伴星の潮汐場の影響

- ▶ 結局、運動方程式は

$$m_a \frac{d^2 z_a^i}{dt^2} = m_a \partial_i U^{\text{ext}}(t, z_a) + \frac{1}{2} Q_a^{jk} \partial_i \partial_j \partial_k U^{\text{ext}}(t, z_a) + \dots = F^{\text{Newt}} + F^{\text{induced}}$$

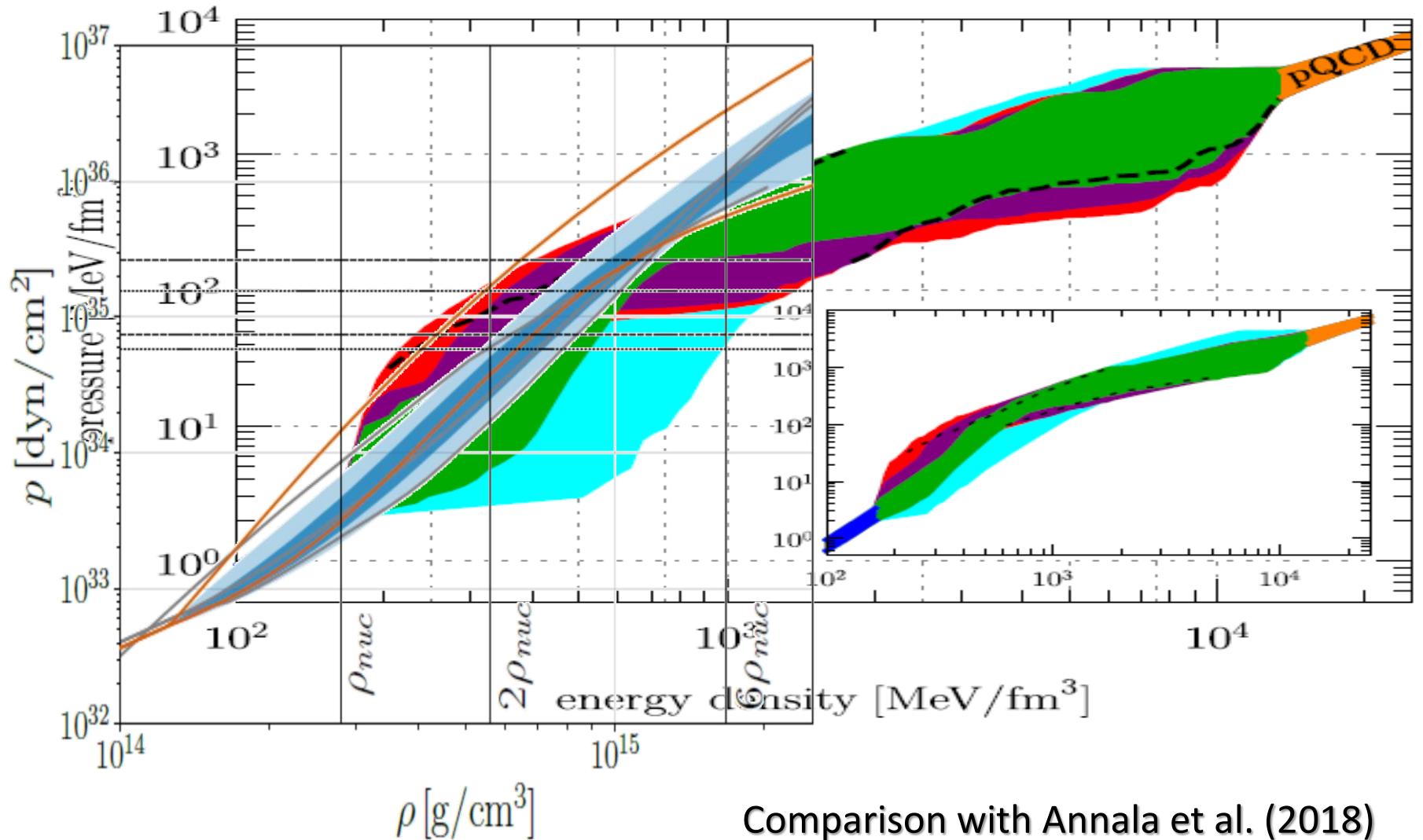
- ▶ 主星が伴星の潮汐場によって変形し四重極モーメントを持ったとすると、連星軌道が影響を受け、したがって重力波放射も影響を受ける
- ▶ 潮汐場による中性子星の変形は中性子星の構造、したがって状態方程式に依存するため、重力波の観測から状態方程式の情報を得ることができる
 - ▶ ただし、その効果は高次の補正項
 - ▶ 中性子星の変形率を λ とすると、四重極モーメントは $Q^{ij} \sim \lambda M R^2$
 - ▶ 変形度は $\varepsilon \sim F^{\text{tidal}} / F^{\text{self}} \sim (R/d)^3$, よって

$$F^{\text{induced}} \sim \frac{Q^{jk}}{M} \partial^2 F^{\text{Newt}} \sim \lambda R^2 \frac{F^{\text{Newt}}}{d^2} \sim \left(\frac{R}{d}\right)^5 F^{\text{Newt}} \sim \left(\frac{v}{c}\right)^{10} F^{\text{Newt}}$$

- ▶ ここで連星系では $\frac{GM}{d} \sim v^2$ であり、中性子星のような高密度天体では $R \sim \frac{GM}{c^2}$ であることを用いた

- ▶ 潮汐効果以外のすべての補正が $(v/c)^{10}$ (5次補正) までわかっていないと状態方程式の情報を重力波から得ることはできない

Constraint on NS EOS



Comparison with Annala et al. (2018)

