

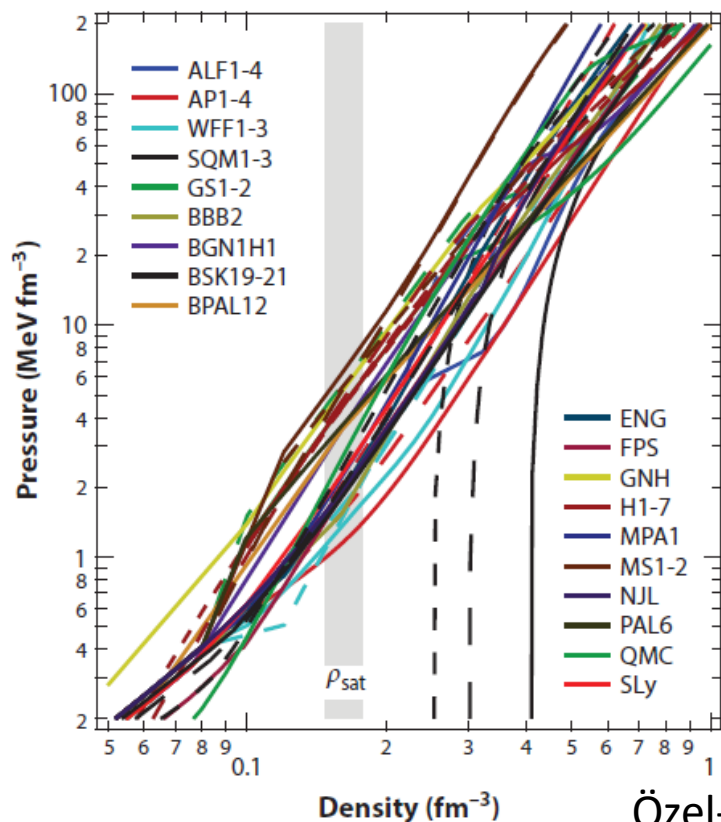
# 重力波天文学で 迫る状態方程式

京都大学理学研究科

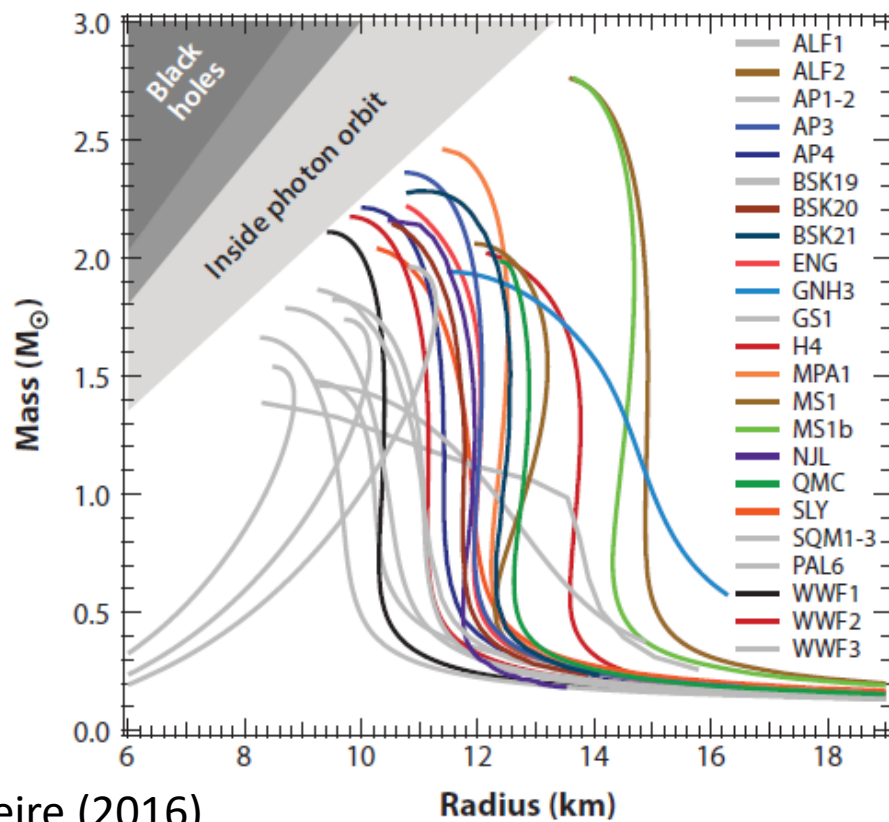
久徳浩太郎

# 状態方程式と質量-半径関係

真の状態方程式を知り、原子核物理を理解したい  
中性子星の質量-半径関係と一対一に対応している

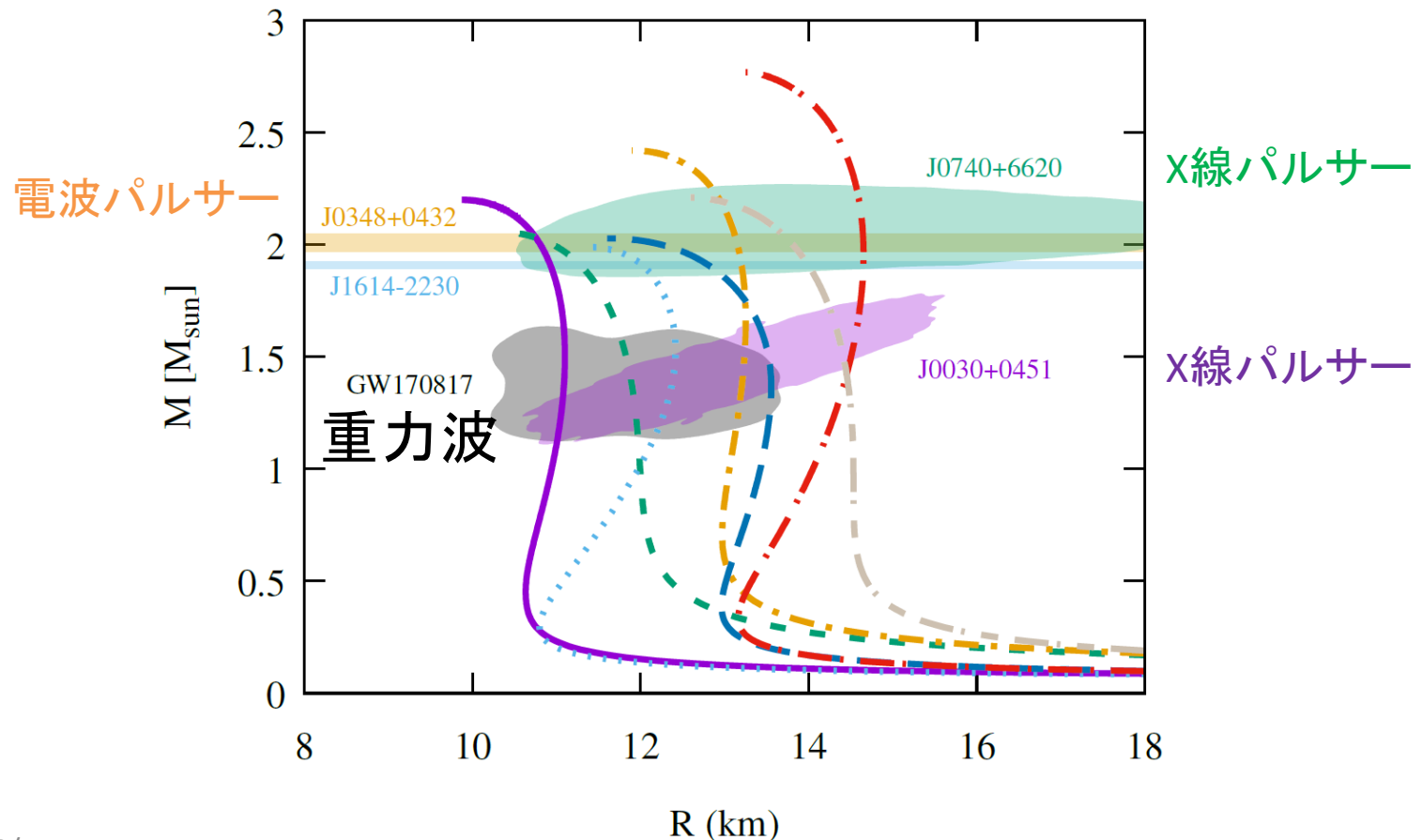


Özel-Freire (2016)



# 現状の質量-半径関係への理解

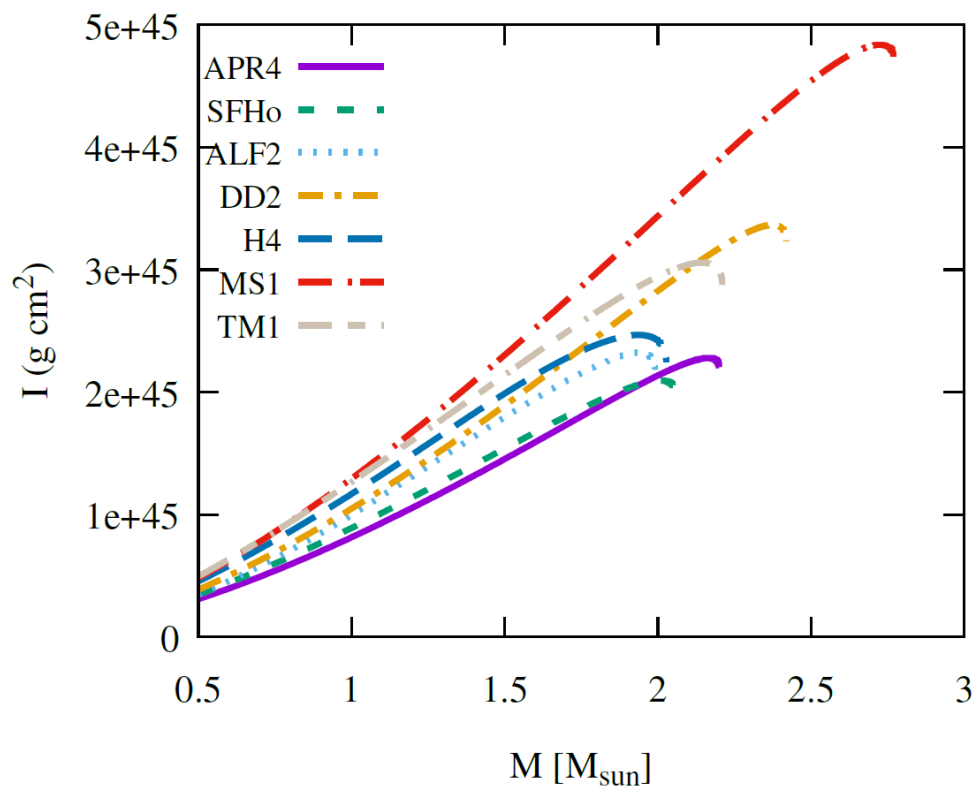
X線や電波によるパルサー観測からの制限も合わせ  
今後により詳細に状態方程式が決まっていくだろう



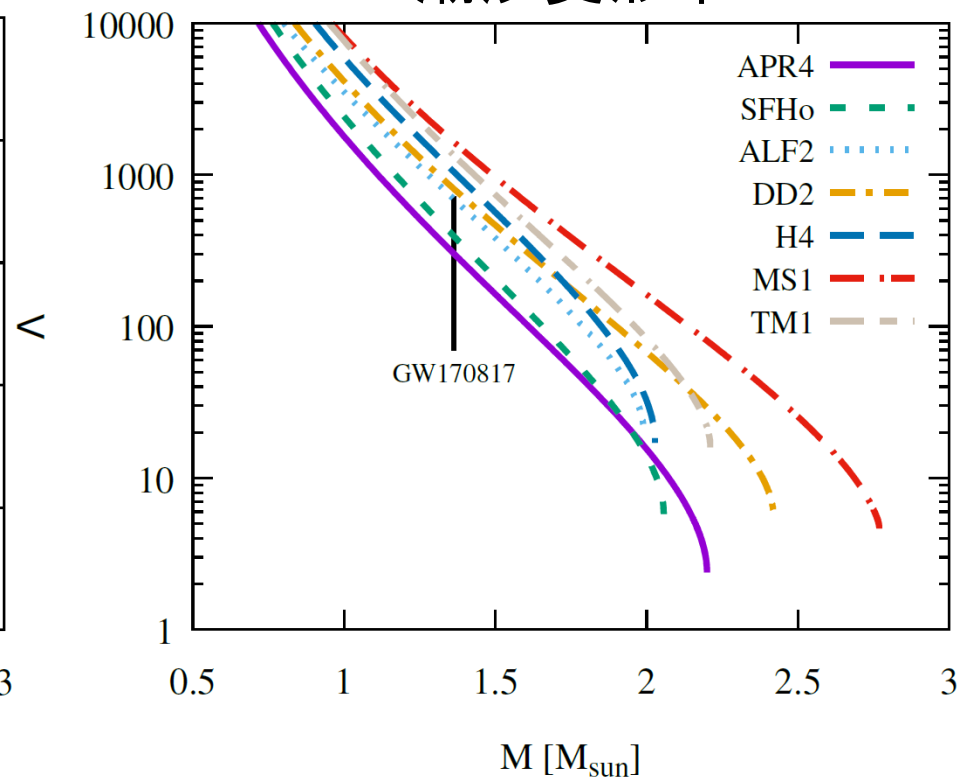
# 天体の大きさを表す物理量の数々

天体の運動をより直接的に影響する量は色々ある

## 慣性モーメント



## 潮汐変形率



# 有用な天体観測

電波パルサーで最大質量を測定する

J1614-2230, J3048+0432, J0740+6620

重力波で潮汐変形率を測定する

GW170817(, GW190425: not so informative)

X線パルスでコンパクトネス=質量/半径を測定する

J0030+0451, J0740+6620

+ 将来的な電波パルサーによる慣性モーメント測定？

# NICERによるX線パルス観測

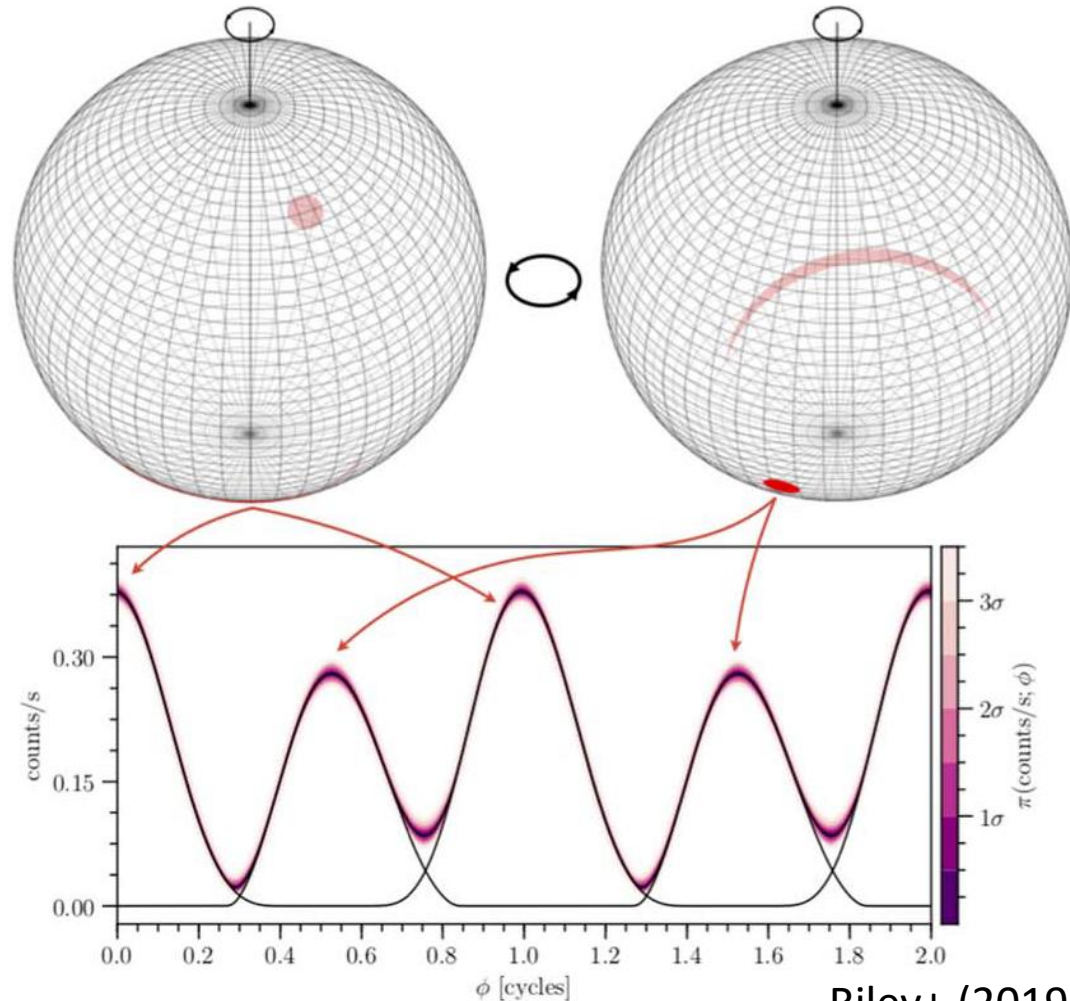
回転して裏に回った光も重力場で曲げられて届く

重力の効果:

コンパクトネス  
(ポテンシャル)

$$\Phi \sim M/R$$

がよく決まる



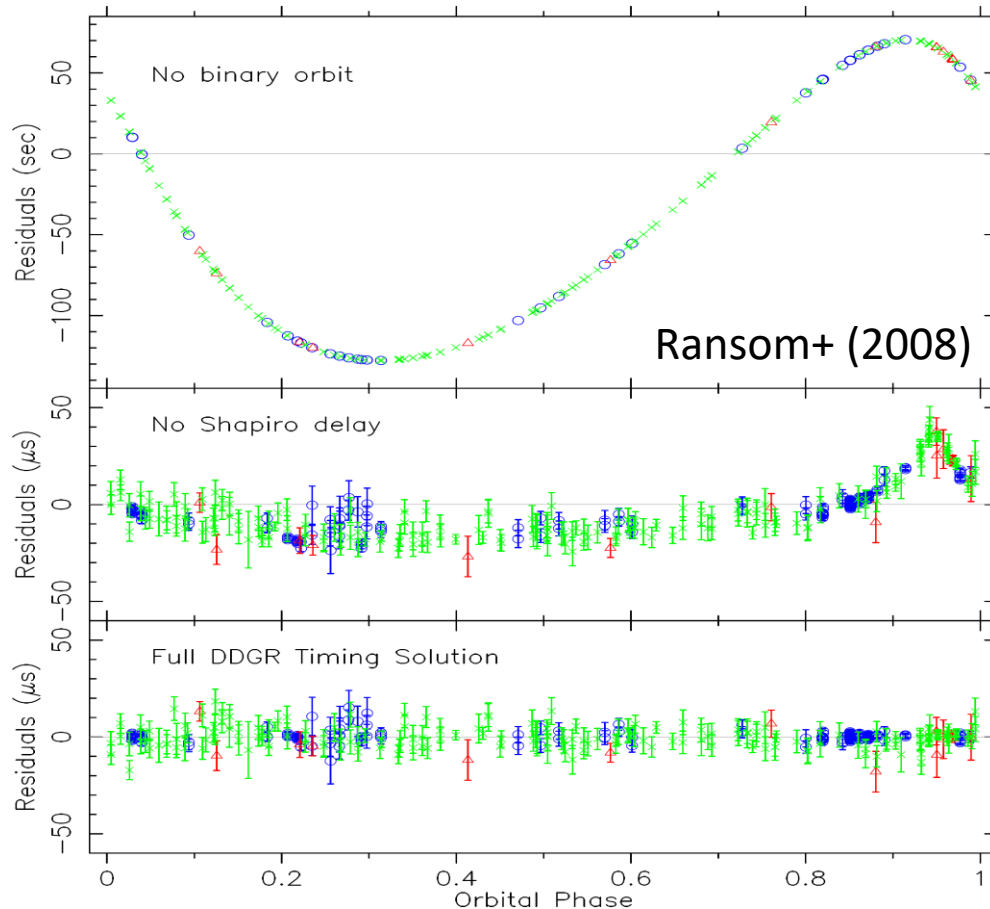
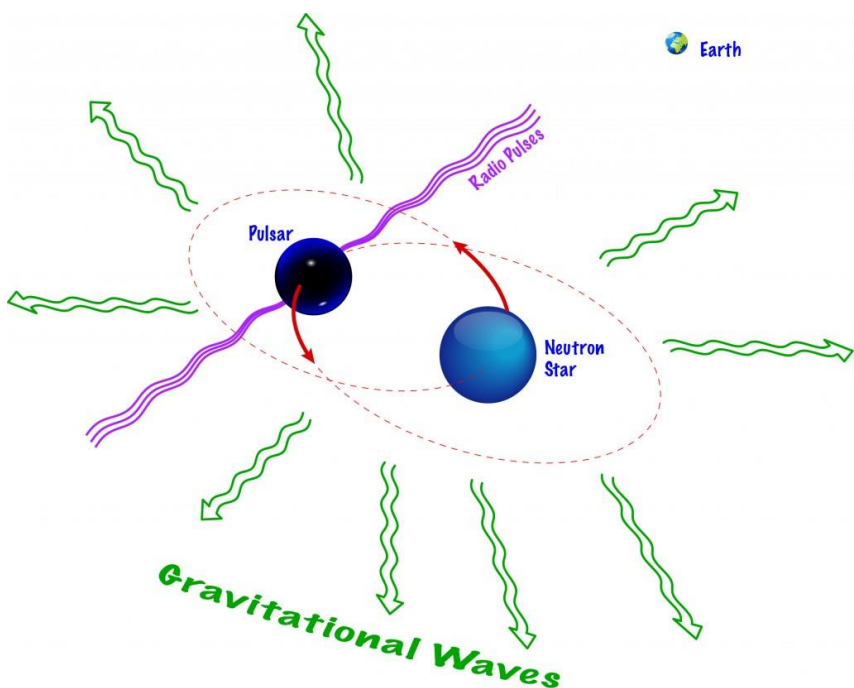
# 信頼性？

原理的には信頼できそうだが、放射領域の形状は謎



# 二体問題としての連星運動

重力波も電波も基本的には二体問題を解析している

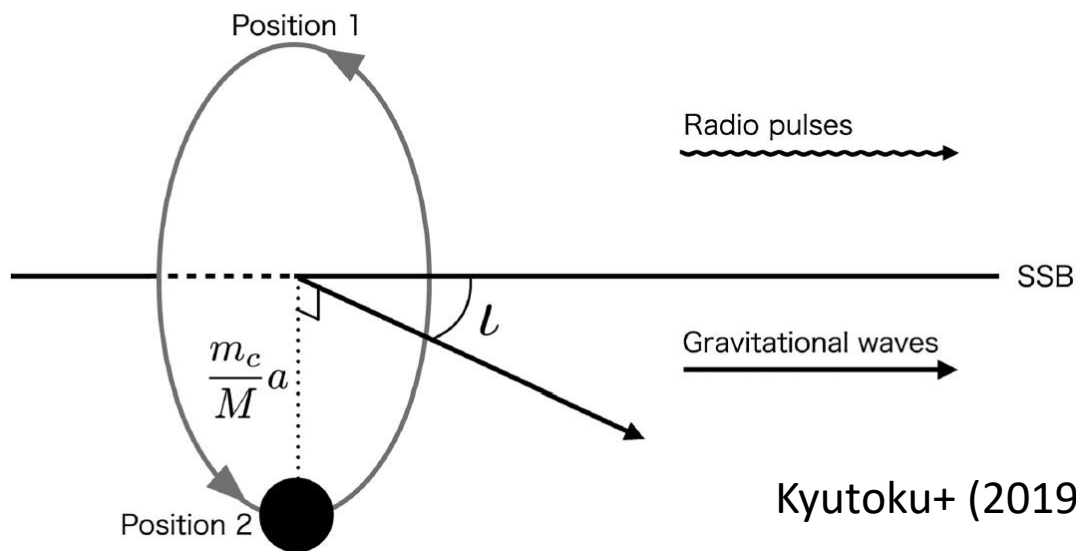
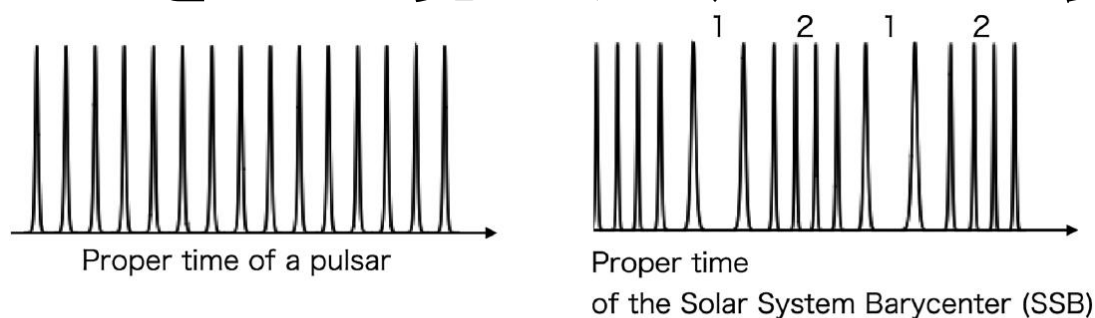


<http://asd.gsfc.nasa.gov/blueshift/wp-content/uploads/2016/02/htbinarypulsar-1024x835.jpg>



# 余談：LISA-SKAと連星パルサー

電波だけでは探すのが難しい軌道周期~10分くらいの連星パルサーをLISAで見つけて、SKA etc.で長期観測



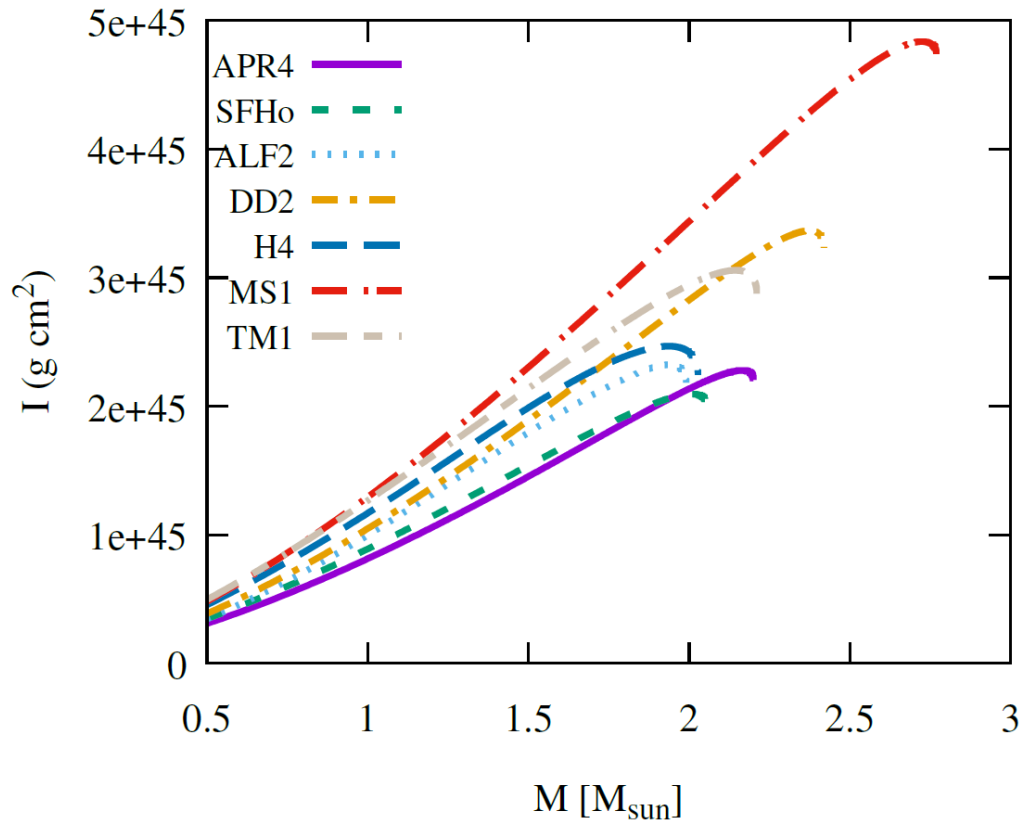
Kyutoku+ (2019)

# 自転角運動量と慣性モーメント

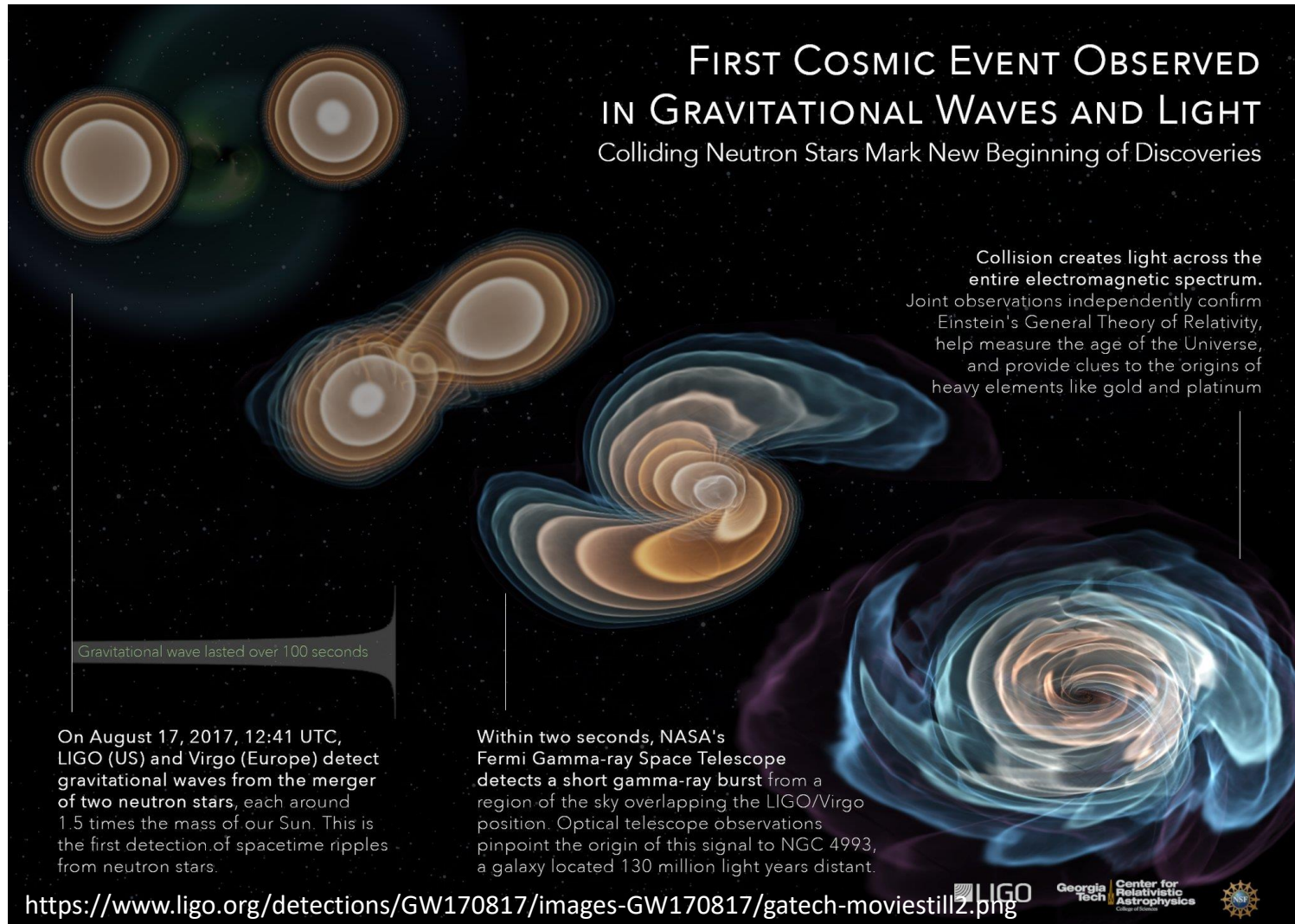
角運動量は軌道傾斜角や近点の歳差運動から求まる  
慣性モーメントは  $I = JP / (2\pi)$  で求められる

将来、J0737-3039などで  
測定が期待されている

重力波やX線ほどには  
精度が出ないだろうが  
独立な検証にはなる



# 重力波による測定：GW170817



**FIRST COSMIC EVENT OBSERVED  
IN GRAVITATIONAL WAVES AND LIGHT**  
Colliding Neutron Stars Mark New Beginning of Discoveries

Collision creates light across the entire electromagnetic spectrum. Joint observations independently confirm Einstein's General Theory of Relativity, help measure the age of the Universe, and provide clues to the origins of heavy elements like gold and platinum

Gravitational wave lasted over 100 seconds

On August 17, 2017, 12:41 UTC, LIGO (US) and Virgo (Europe) detect gravitational waves from the merger of two neutron stars, each around 1.5 times the mass of our Sun. This is the first detection of spacetime ripples from neutron stars.

Within two seconds, NASA's Fermi Gamma-ray Space Telescope detects a short gamma-ray burst from a region of the sky overlapping the LIGO/Virgo position. Optical telescope observations pinpoint the origin of this signal to NGC 4993, a galaxy located 130 million light years distant.

<https://www.ligo.org/detections/GW170817/images-GW170817/gatech-moviestill2.png>

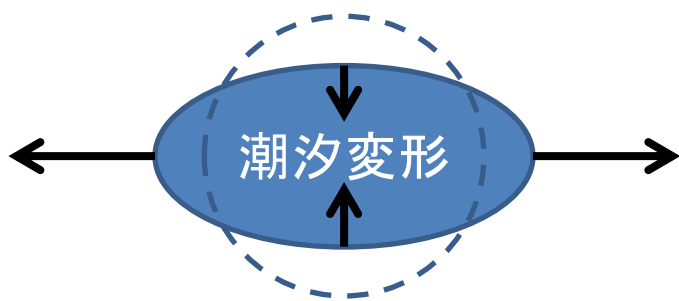
LIGO  
Georgia Tech  
Center for Relativistic Astrophysics

# 潮汐変形と潮汐変形率

流体が軌道進化に及ぼす影響を特徴づける量  
潮汐力への星の線形応答を表し、半径と強く相関する

$$\Lambda = G\lambda \left( \frac{c^2}{GM} \right)^5 = \frac{2}{3} k \left( \frac{c^2 R}{GM} \right)^5 \propto kR^5$$

$k \sim 0.1$ : (second/electric) tidal Love number



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

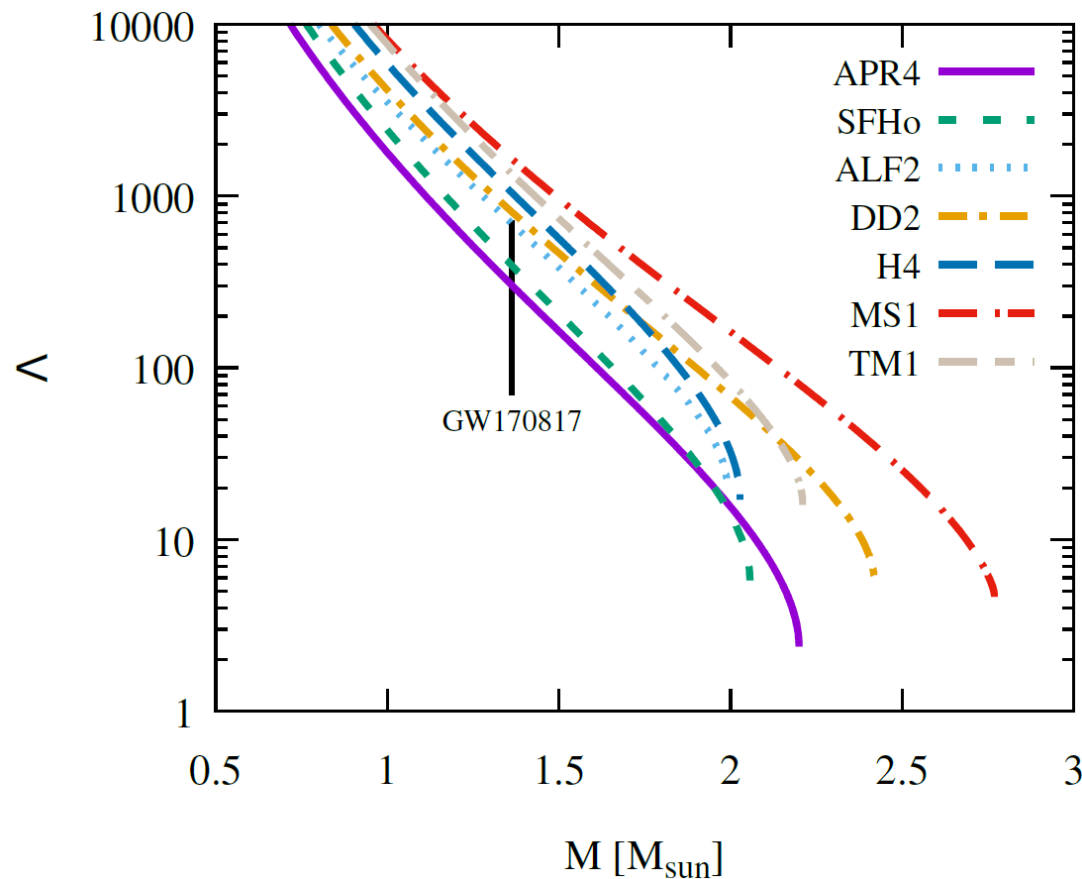


$$Q_{ij} \equiv \int \rho \left( x_i x_j - \frac{1}{3} x^2 \delta_{ij} \right) d^3 x$$

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

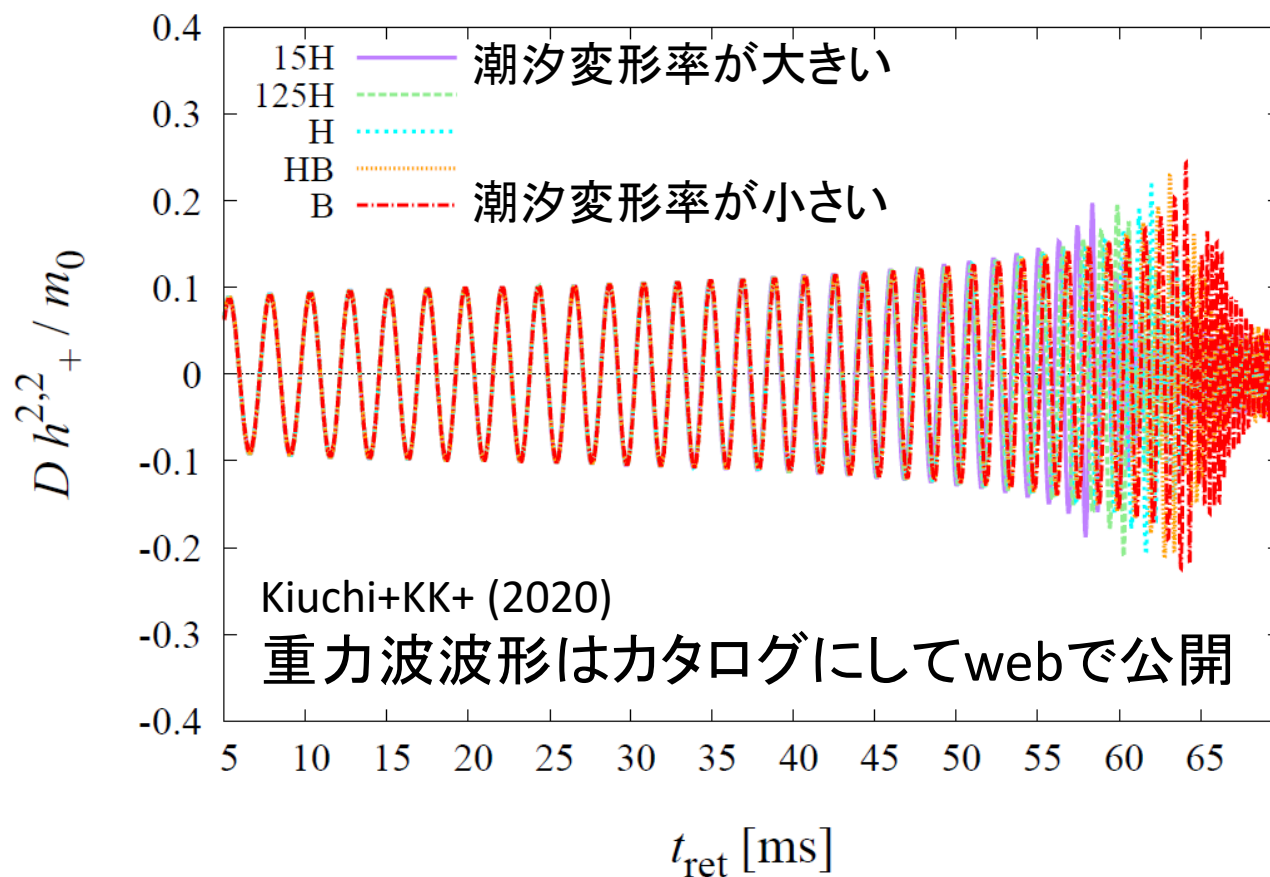
# 潮汐変形率の典型的な値

典型的な質量の中性子星では100-1000くらいになる  
最大質量付近では10を切り、ほぼ検出不可



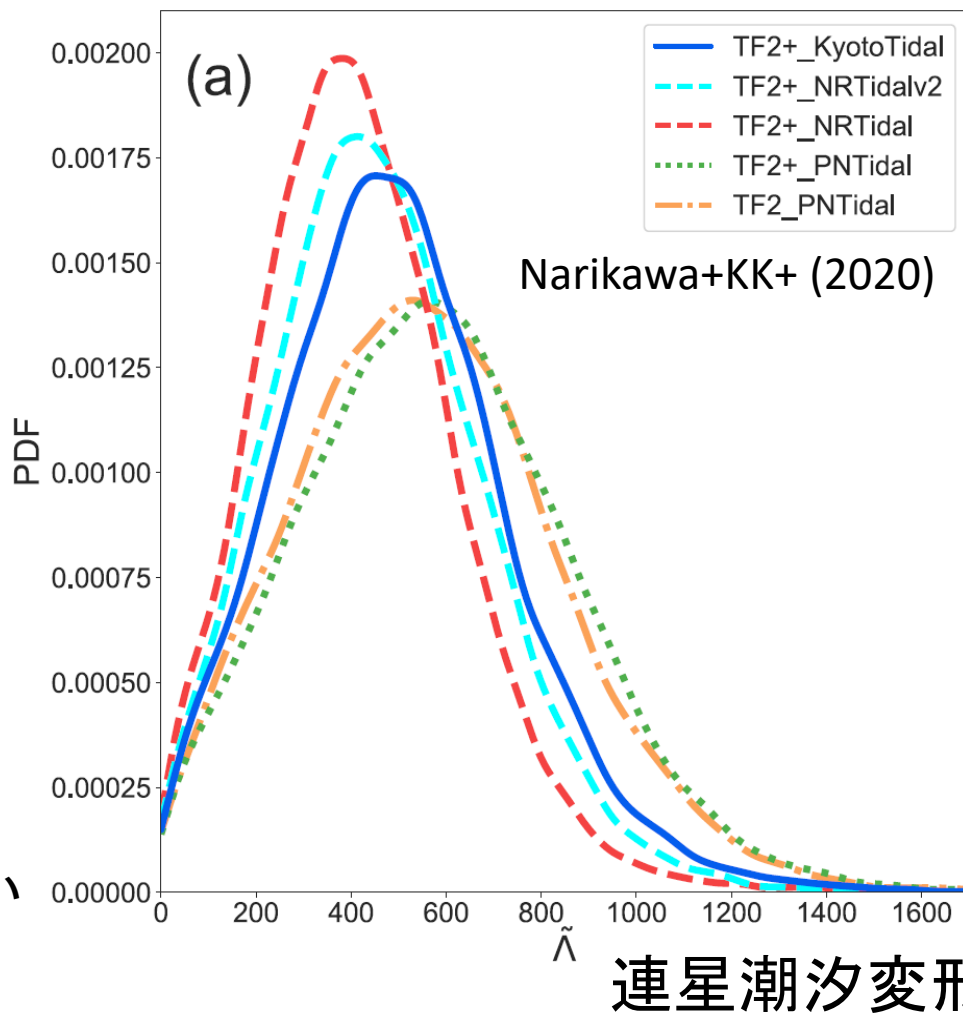
# 潮汐変形率と重力波

半径が大きいほど潮汐力が効き、早く合体する  
準備できる波形の正確さが系統誤差を決める



# GW170817からの制限

現在の精度では大差ないが、現状でも差は見える



様々な波形モデル

KyotoTidalが  
我々の作った波形:  
Kawaguchi+KK+ (2018)

柔らかく半径が小さい

硬く半径が大きい

# GW190425の場合

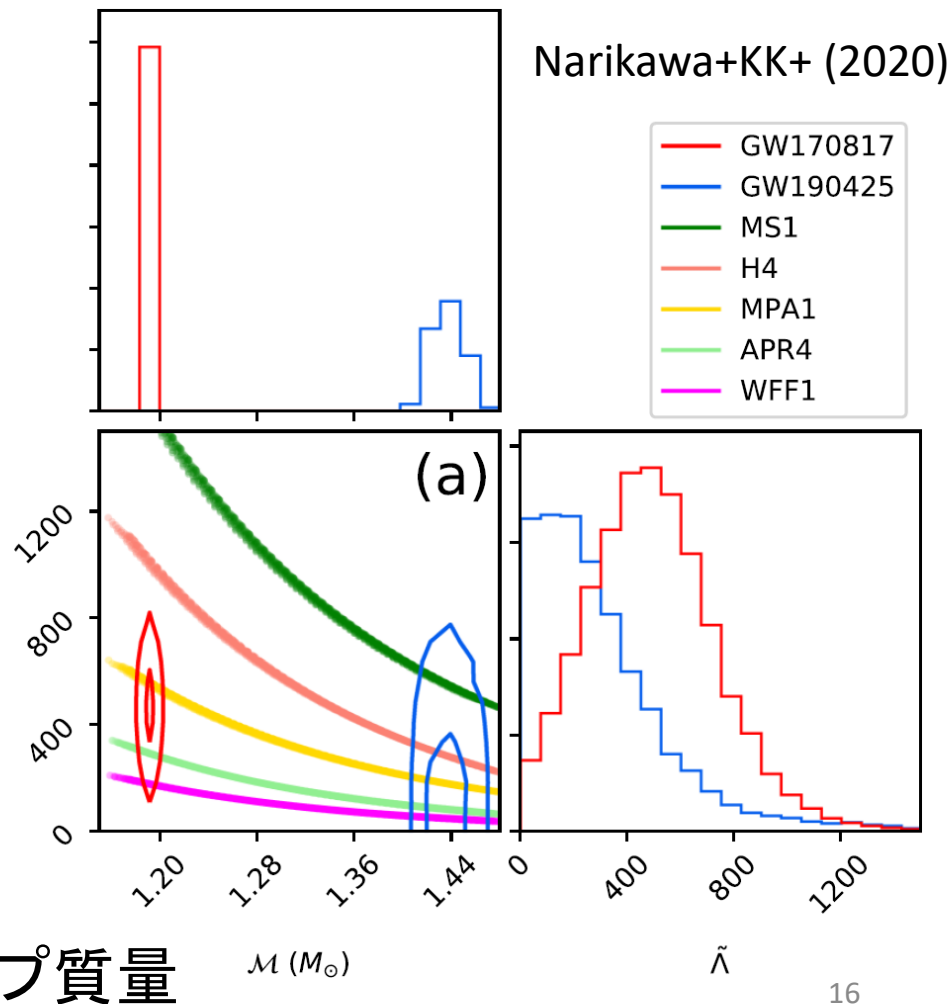
全質量 $3.4M_{\odot}$ と重く距離も $\sim 150-250\text{Mpc}$ と遠目なので  
制限が弱い

特にゼロを棄却しづらく  
ブラックホールでもよい

[see also Kyutoku+ (2020)]

むしろGW170817が幸運

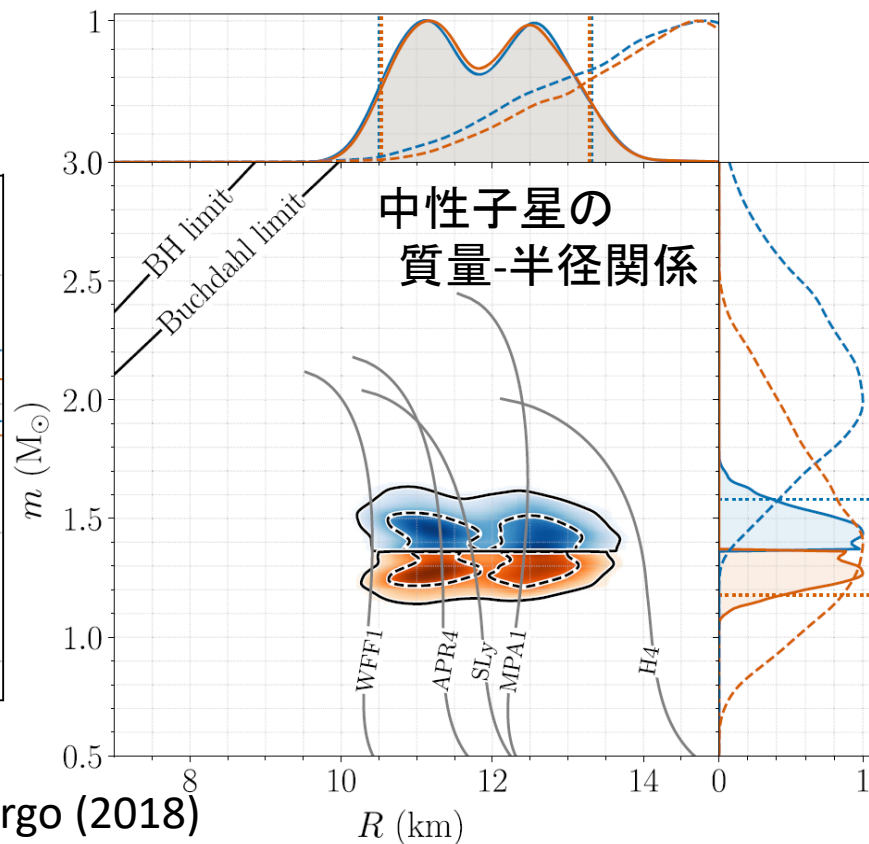
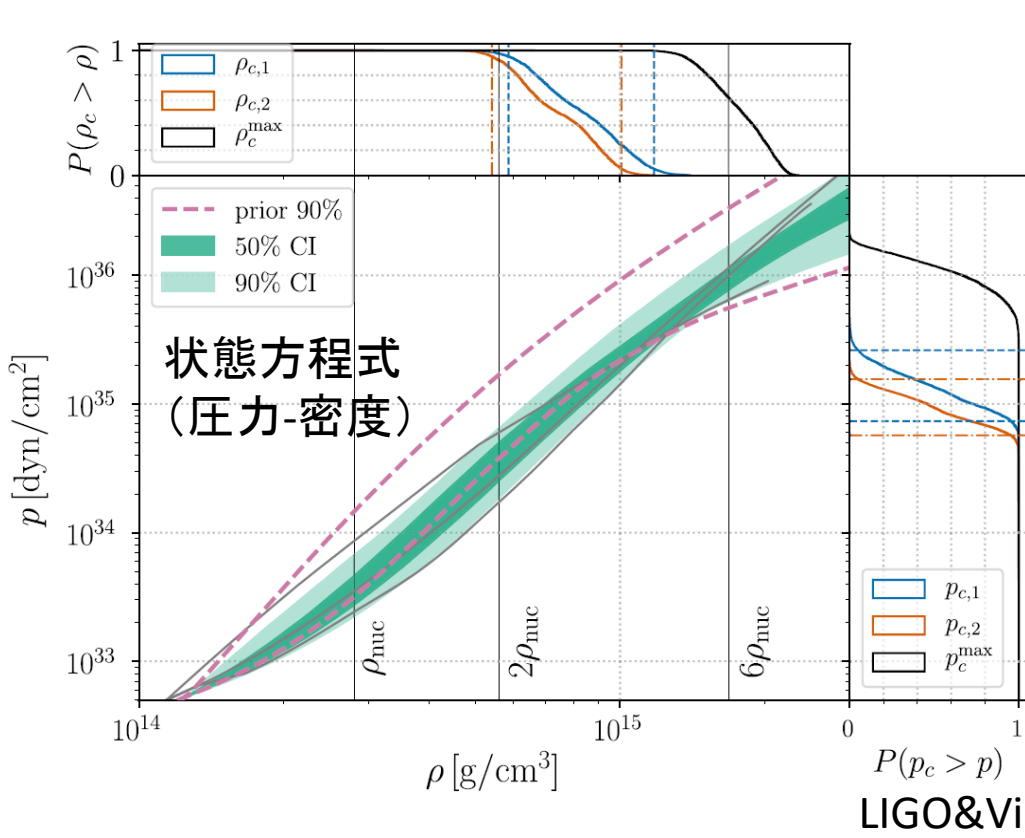
連星潮汐変形率  $\lambda$





# 重力波だけで得られている制限

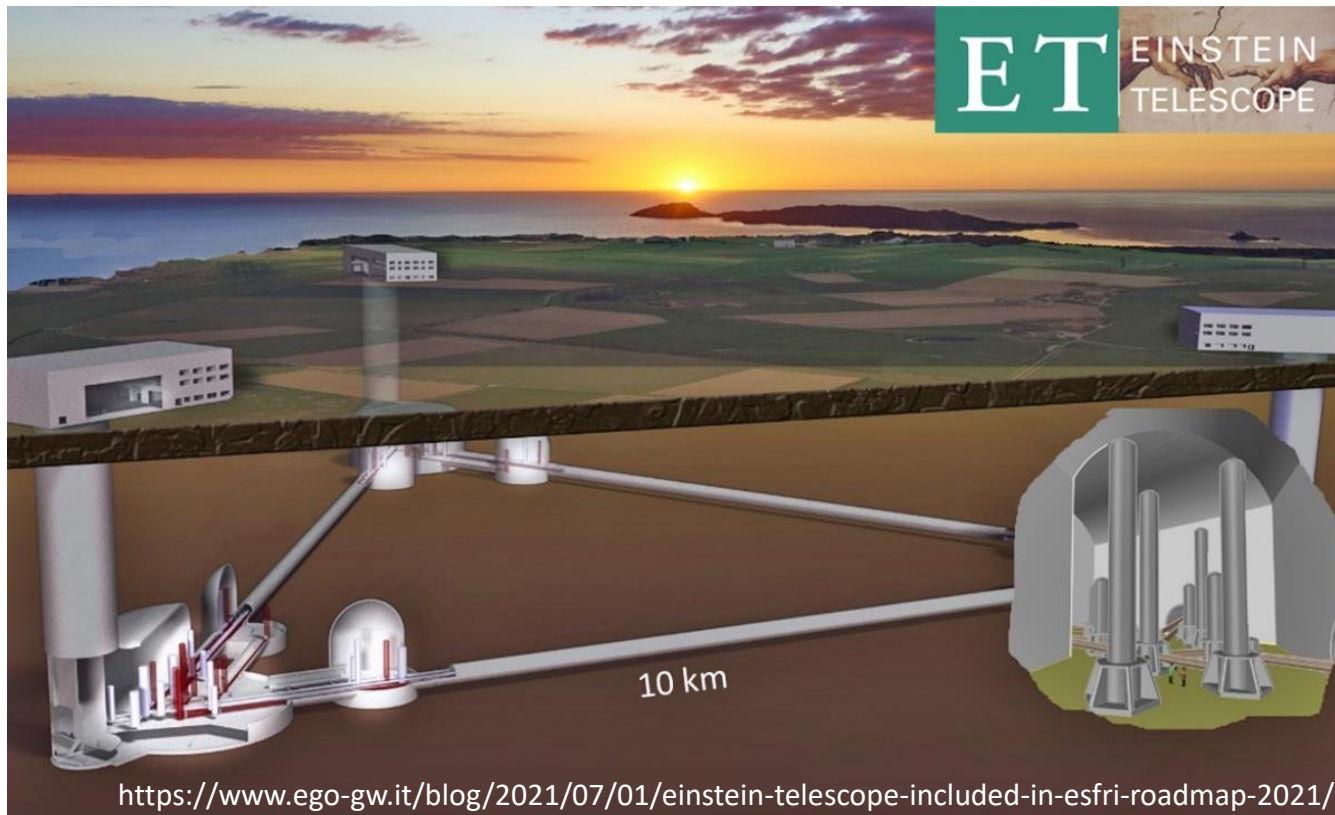
潮汐変形率から中性子星の状態方程式に制限がつく  
それを用いて質量-半径関係にも制限がつけられる



# 第三世代重力波検出器

高感度化: Einstein Telescope, Cosmic Explorer

既に検出された連星合体のより精緻な理解を目指す

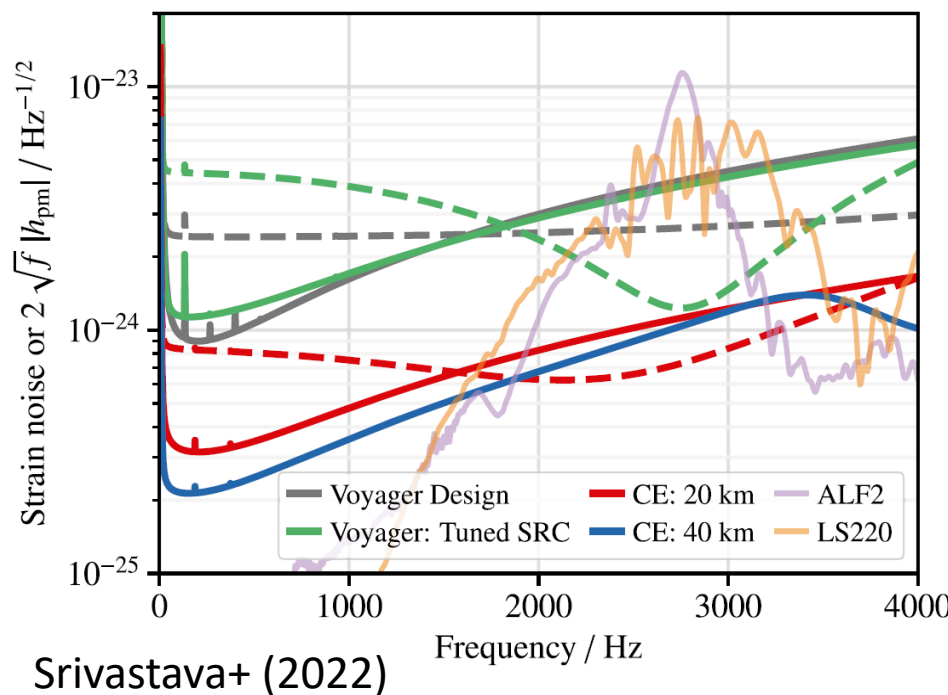
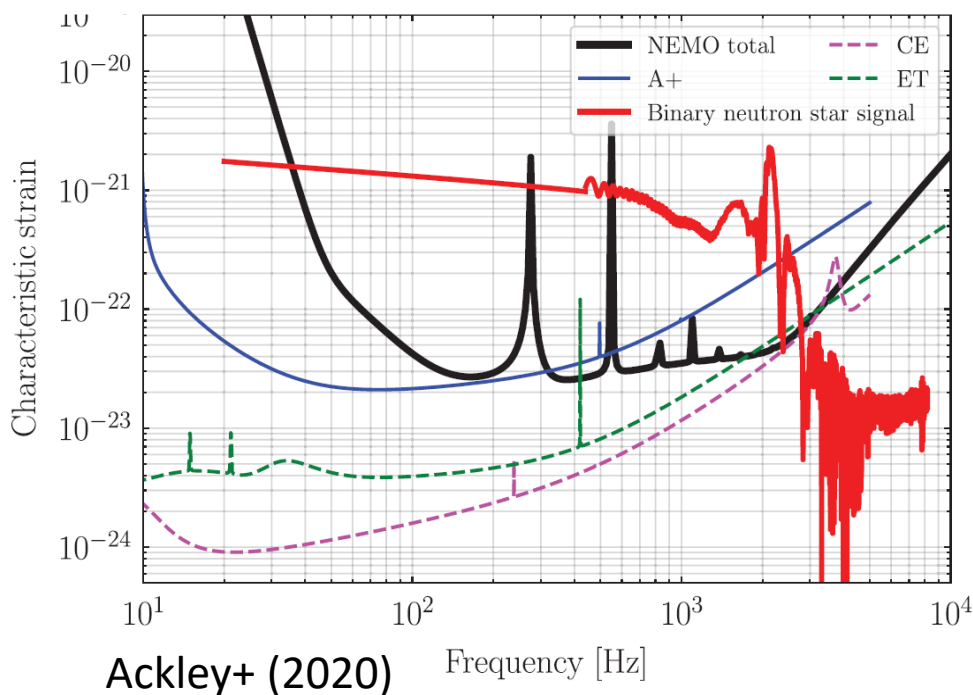


# 将来的な高振動数の重力波観測

高密度を探るためには高振動数での観測が必要

$$f \sim \sqrt{G\rho}$$

合体後に対応: 色々な観測計画も提案されている

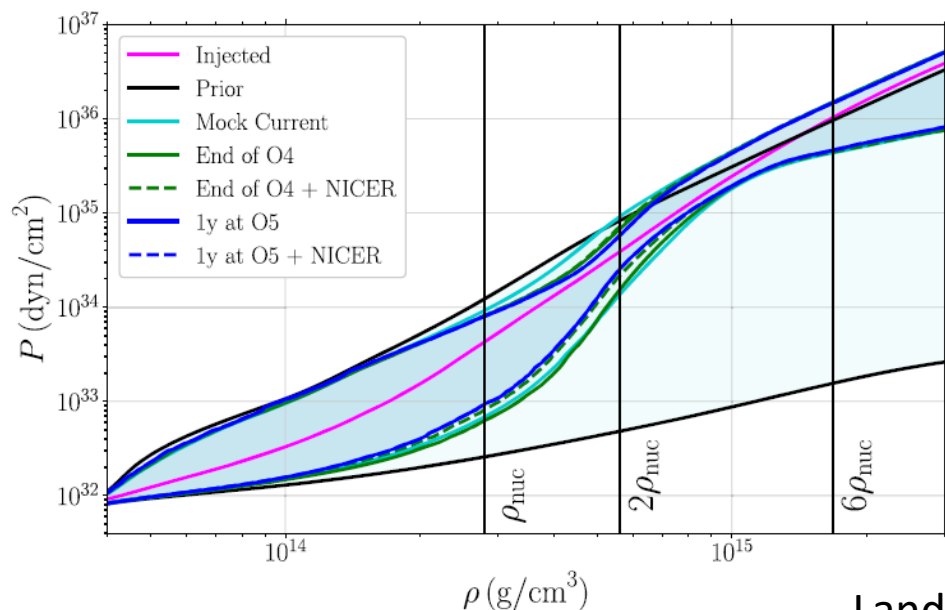


# その時代の問題設定は？

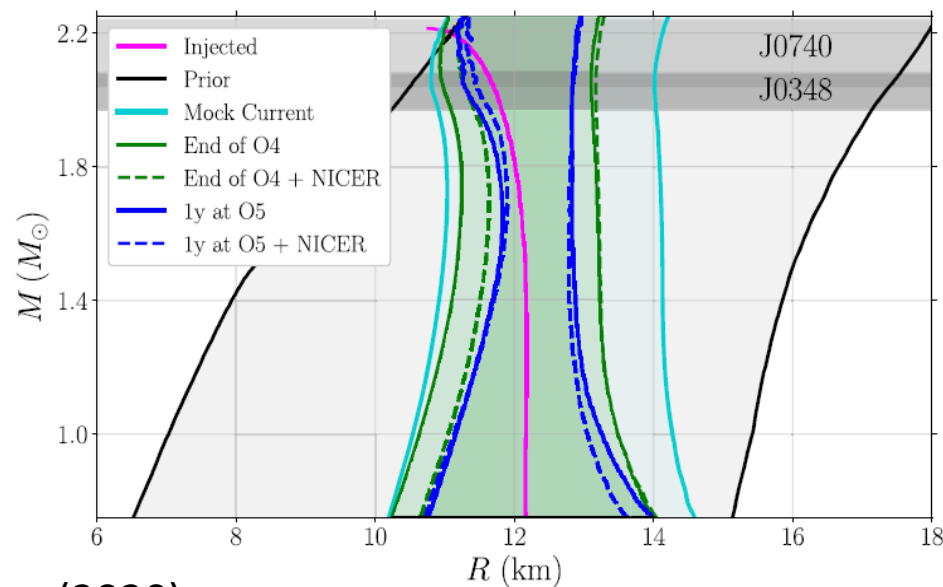
重力波イベントの数が増えて低密度はよく決まるはず

- 飽和密度の倍の密度あたりが精度よく決まる

これを前提に、高密度を決めに行く時代になるだろう

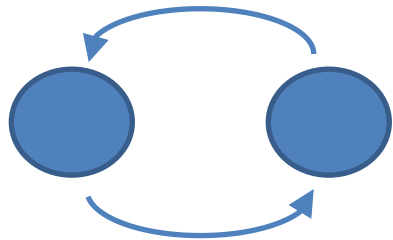


Landry+ (2020)

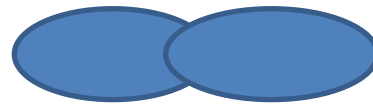


# 連星合体の様々な段階

Early inspiral: mass, spin



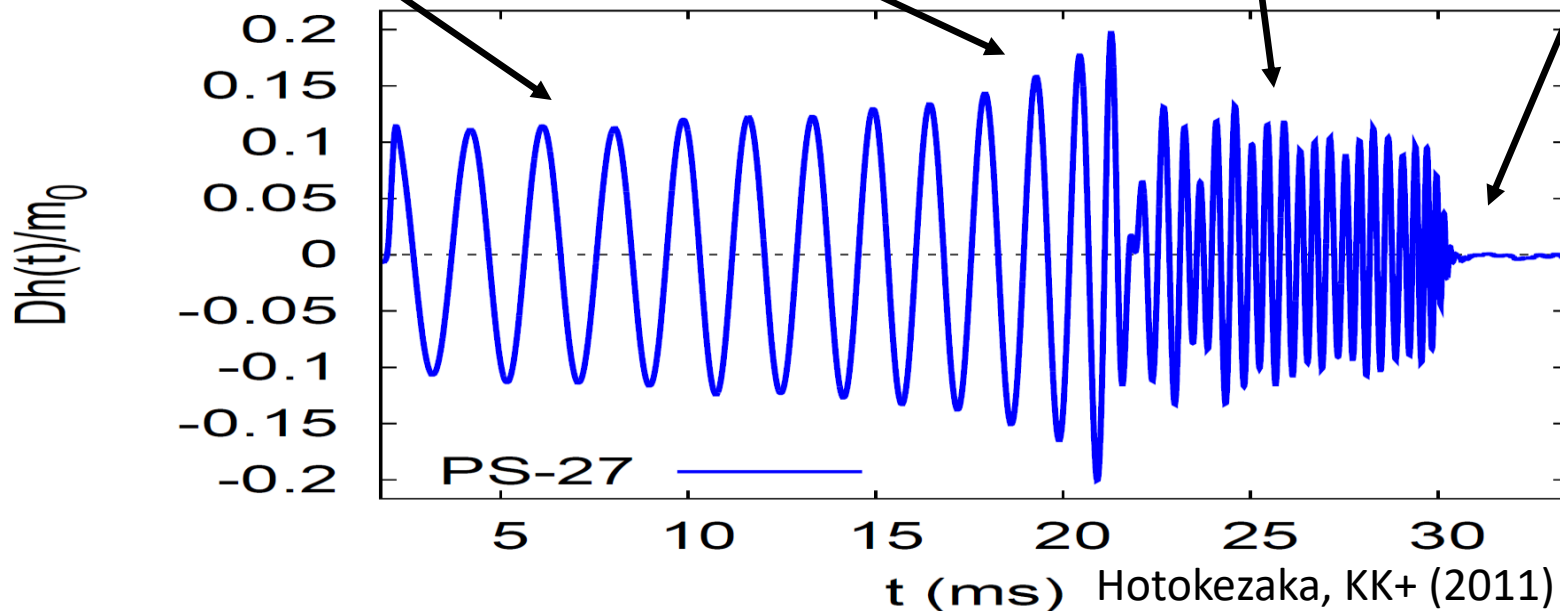
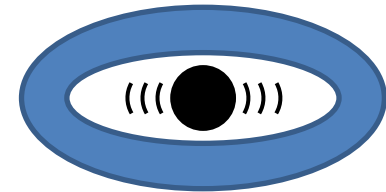
Late inspiral:  
tidal deformability



Remnant massive NS:  
extreme temperature/density

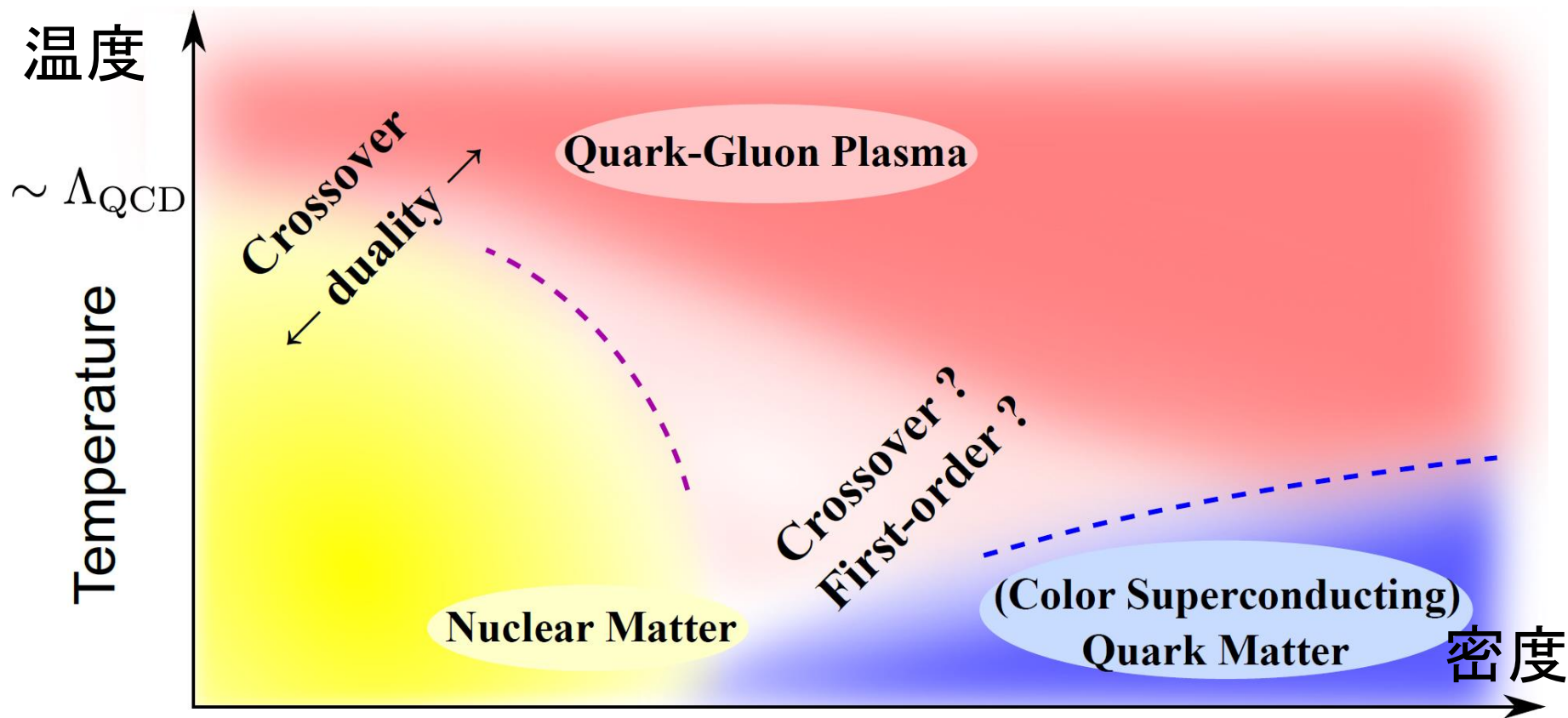


Ringdown: BH



# 将来展望：QCDの相図

QCDで支配される物質の自由度や性質、相構造は？



Fujimoto+KK+ (2023)

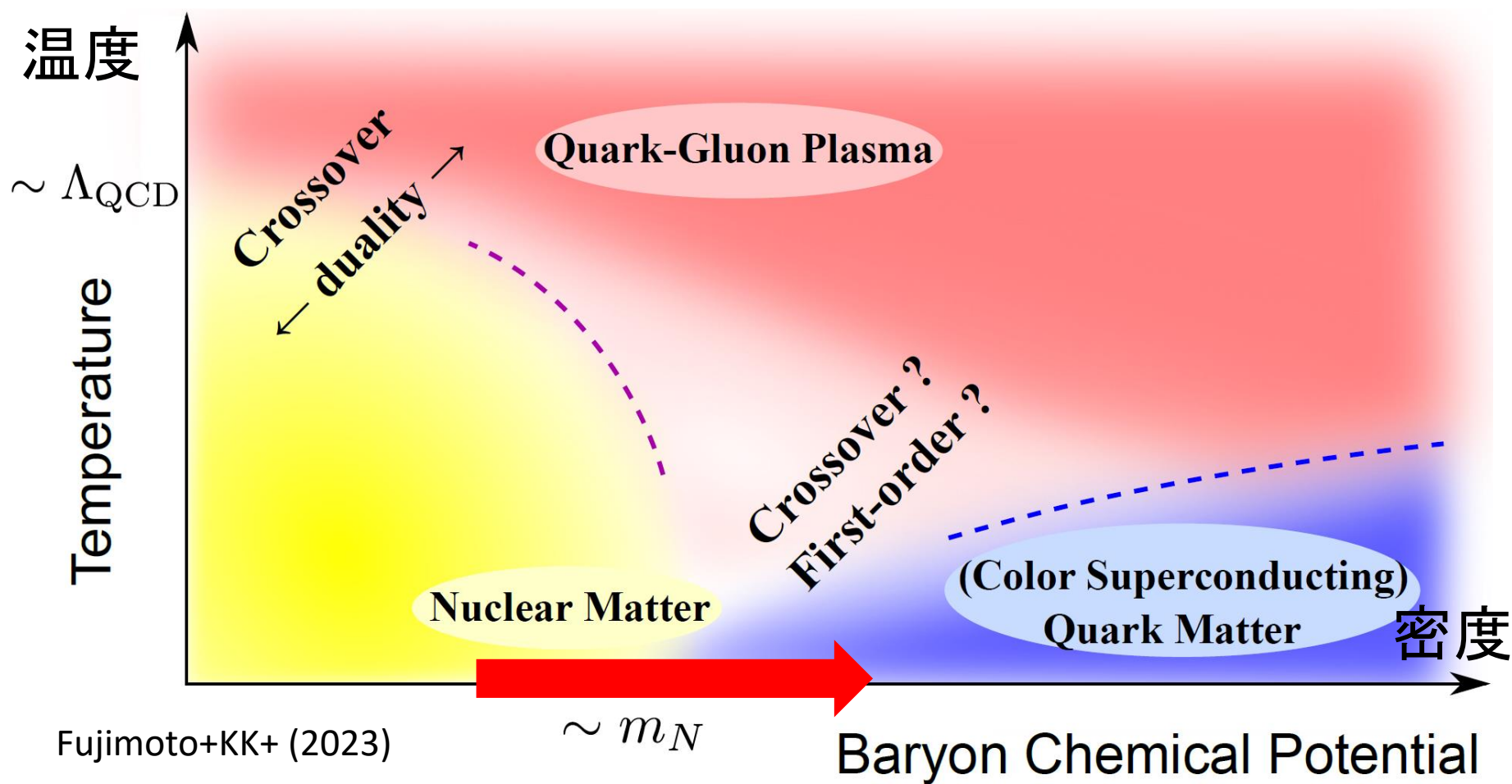
~  $m_N$

Baryon Chemical Potential



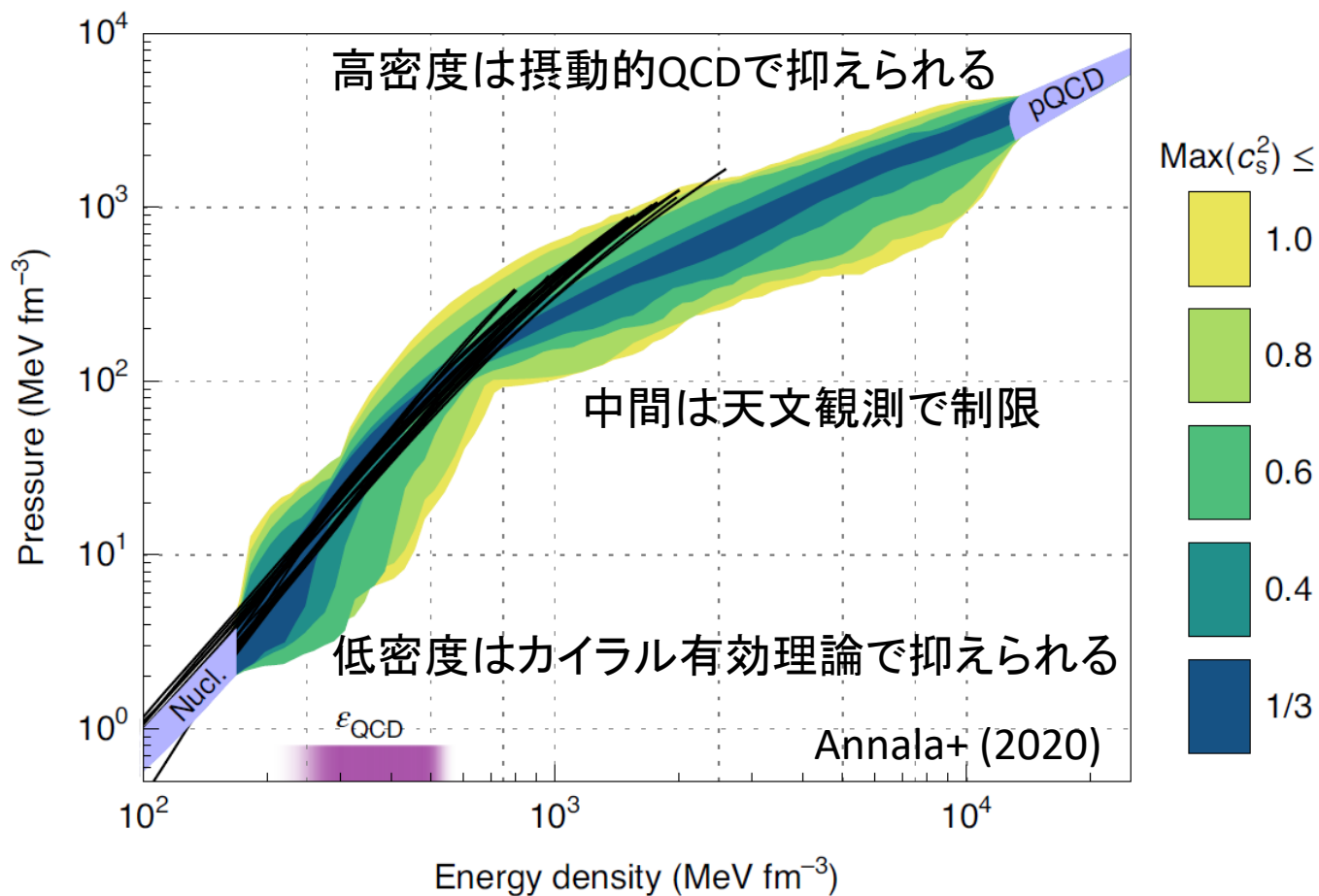
# 将来展望：QCDの相図

QCDで支配される物質の自由度や性質、相構造は？



# 状態方程式への昨今の制限

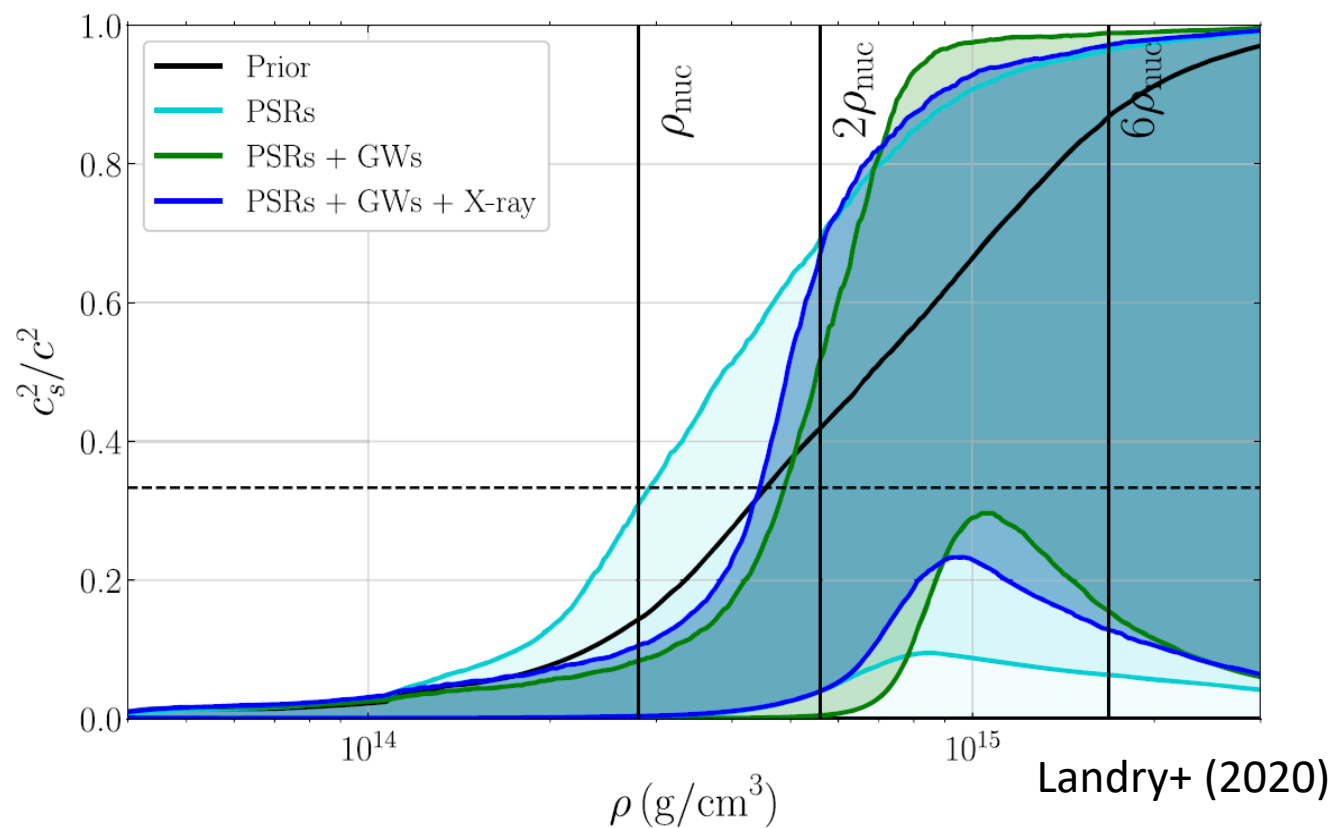
クロスオーバーで滑らかに遷移するのが現実的？





# 音速についての観測的示唆

低密度であり硬くないが、中性子星は2太陽質量...  
音速はconformal limit  $c_s^2/c^2 = 1/3$ を超えていそう



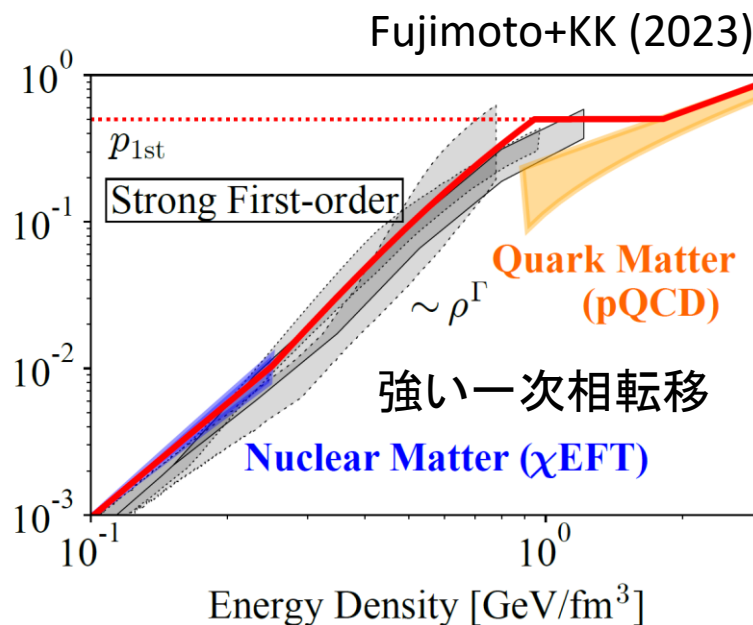
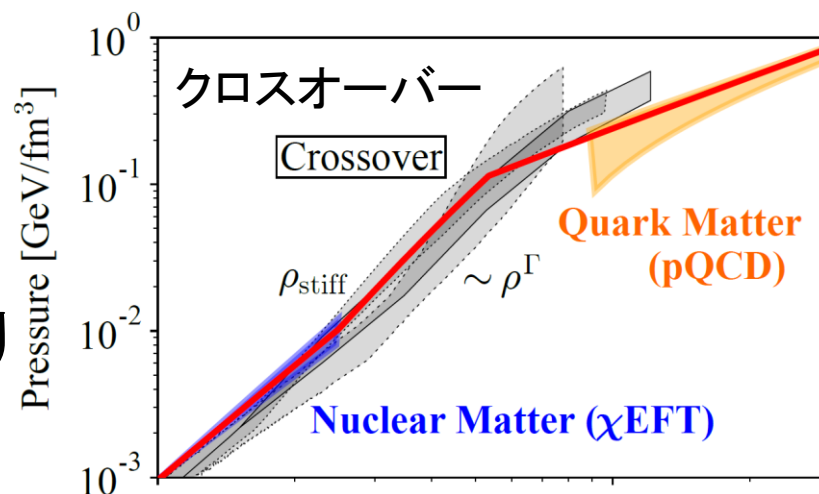
# クロスオーバー vs 一次相転移

## クロスオーバー

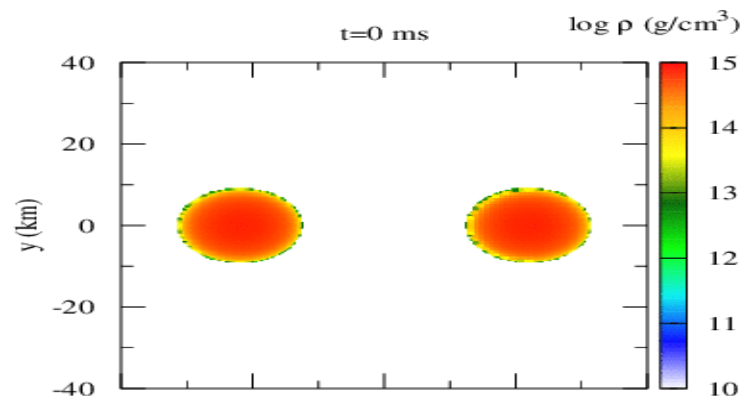
極限を素直に繋いでいそう  
2太陽質量は支える必要あり

## 強い一次相転移

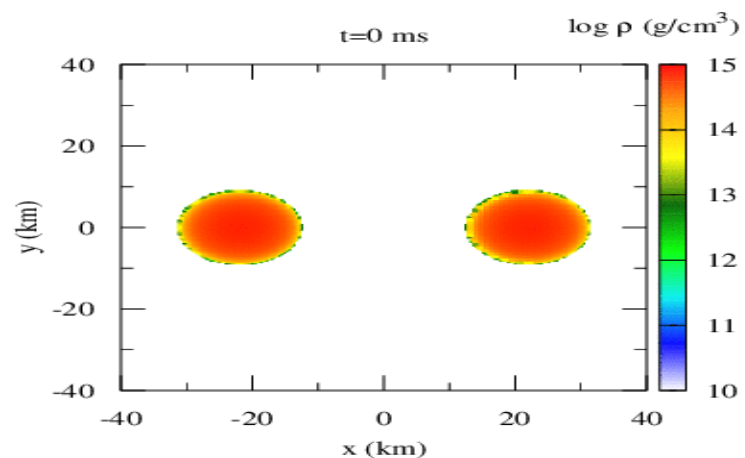
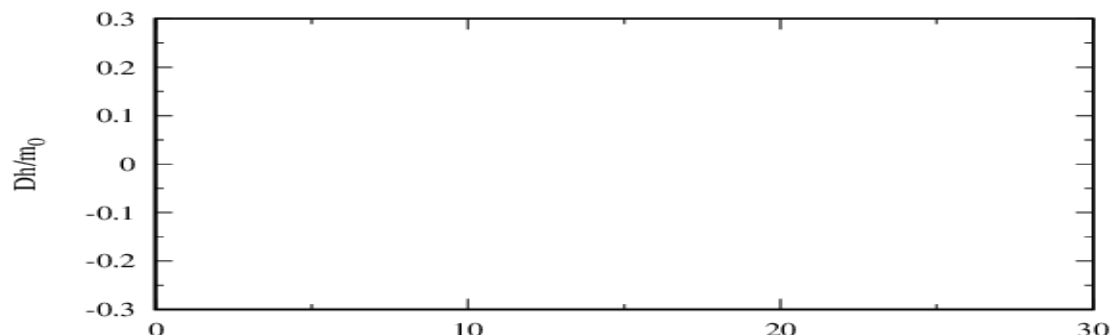
中間密度で起きることは  
もはや現実的でなさそう？  
起きるとすれば超高密度  
→天体にはほぼ影響しない



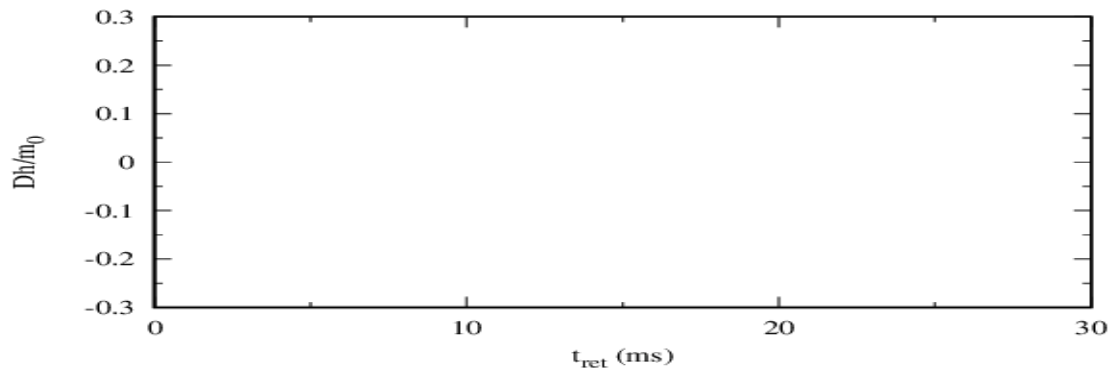
# 合体過程および重力波の比較



クロスオーバー

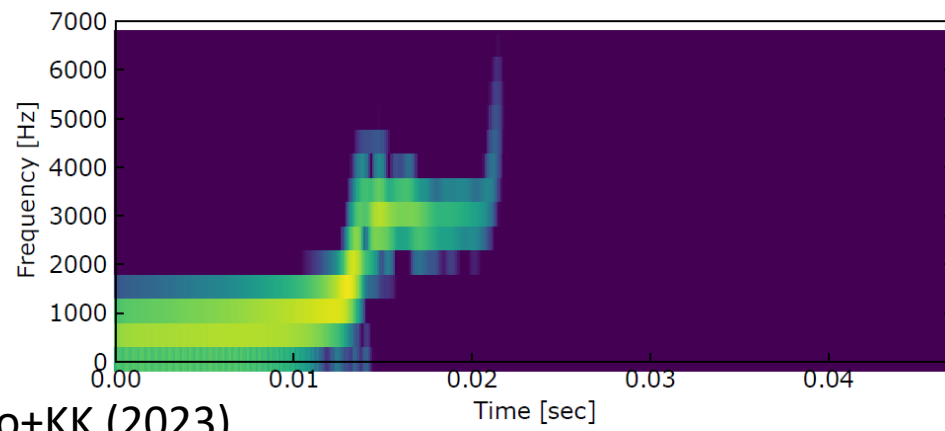
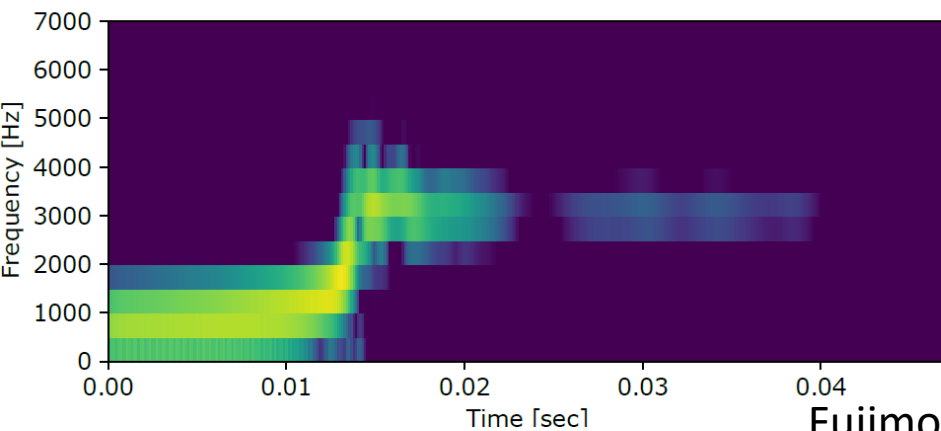
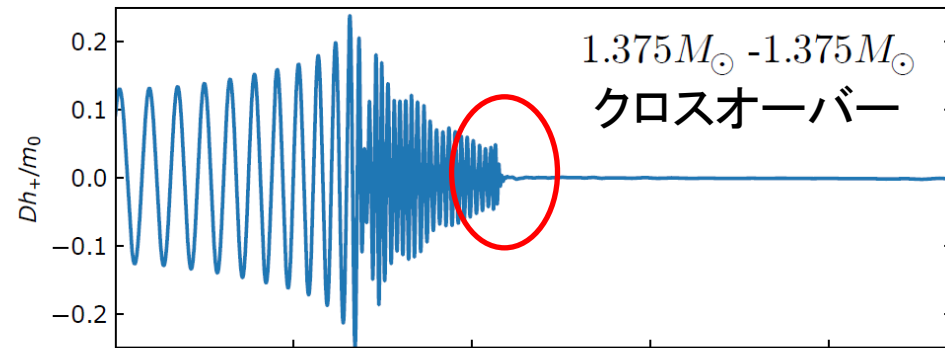
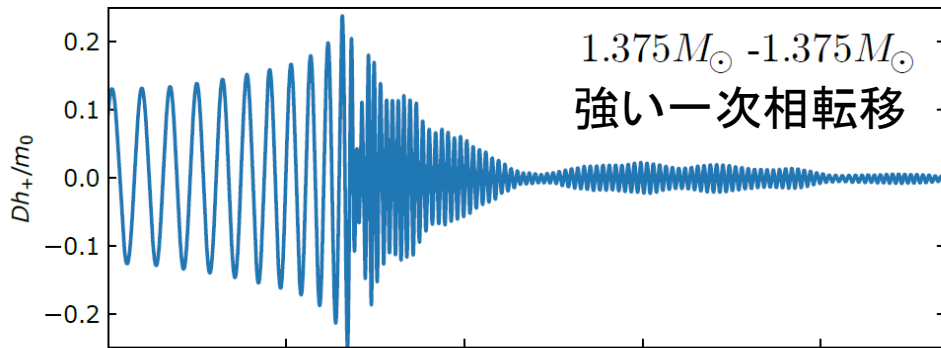


強い一次相転移



# ブラックホール形成による判別

クロスオーバーの場合は重力崩壊で急に終わる  
(偶然にも?) GW170817の質量で明確な違いが出る



Fujimoto+KK (2023)

# 実際の検出での判別可能性

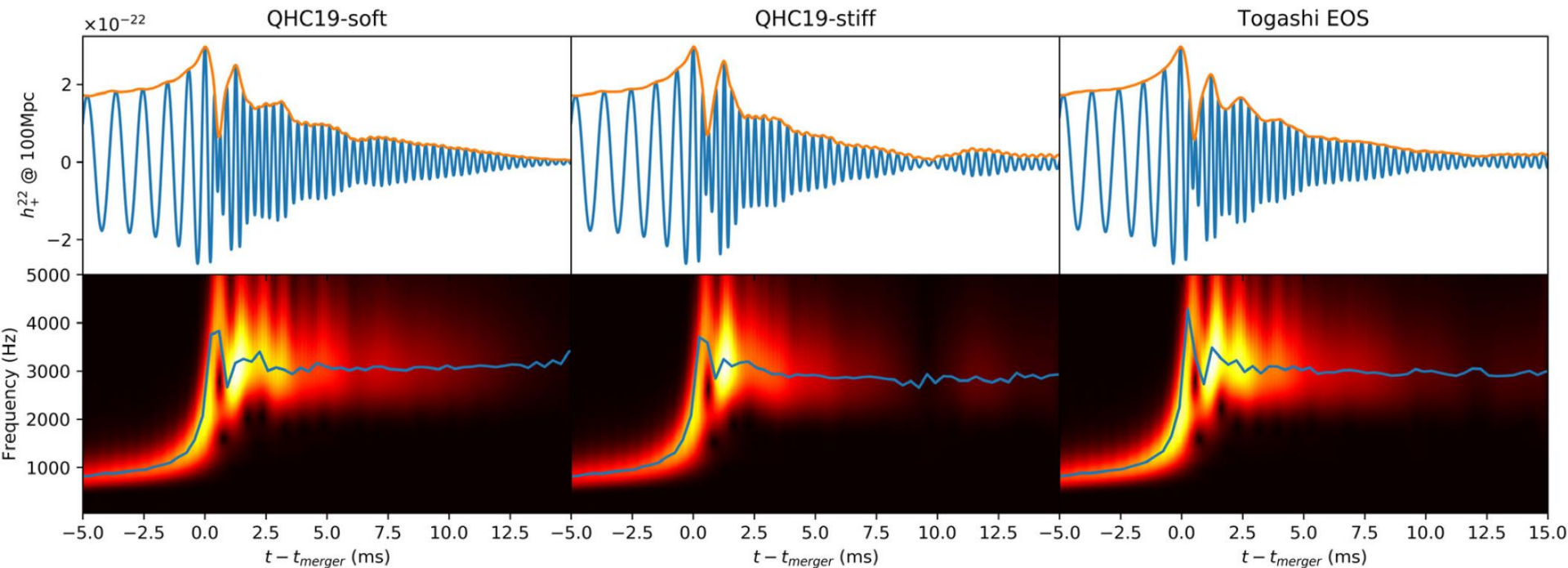
将来のAdvanced LIGO(左)だとGW170817でも厳しい  
第三世代検出器(右)なら $>100\text{Mpc}$ でも可能性あり

# 系の最大密度の時間発展

連星の全質量が重力崩壊までの時間を決める主要因  
具体的な閾値は状態方程式の詳細に依存する

# 同業：QHCによるシミュレーション

崩壊はせず重力波の振動数が差異という立場  
摂動的QCDには超高密度で繋がる想定(のはず)

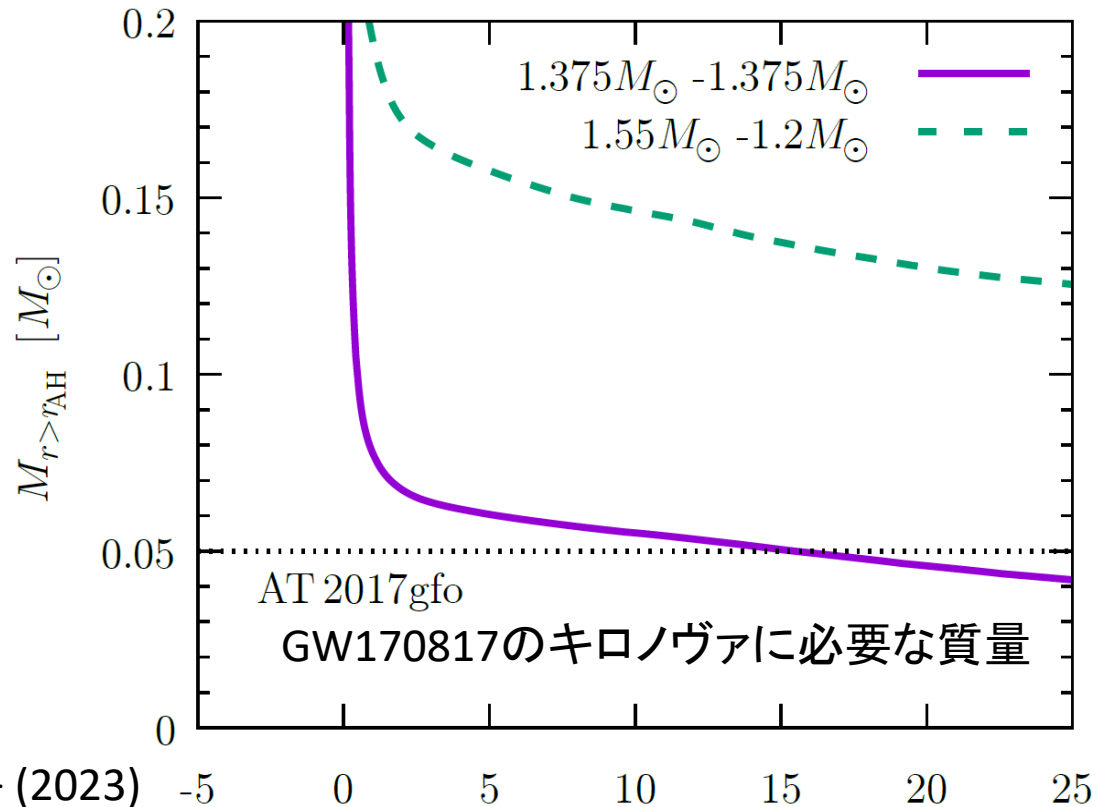


Huang+ (2022)

# 電磁波放射との合わせ技

あまり早期にブラックホールに潰れてしまう場合だと、特に等質量近い連星で物質を出せず、光れなくなる

ブラックホールの  
外に残った質量  
楽観的想定でも  
この半分以上は  
放出できない



Fujimoto+KK+ (2023)



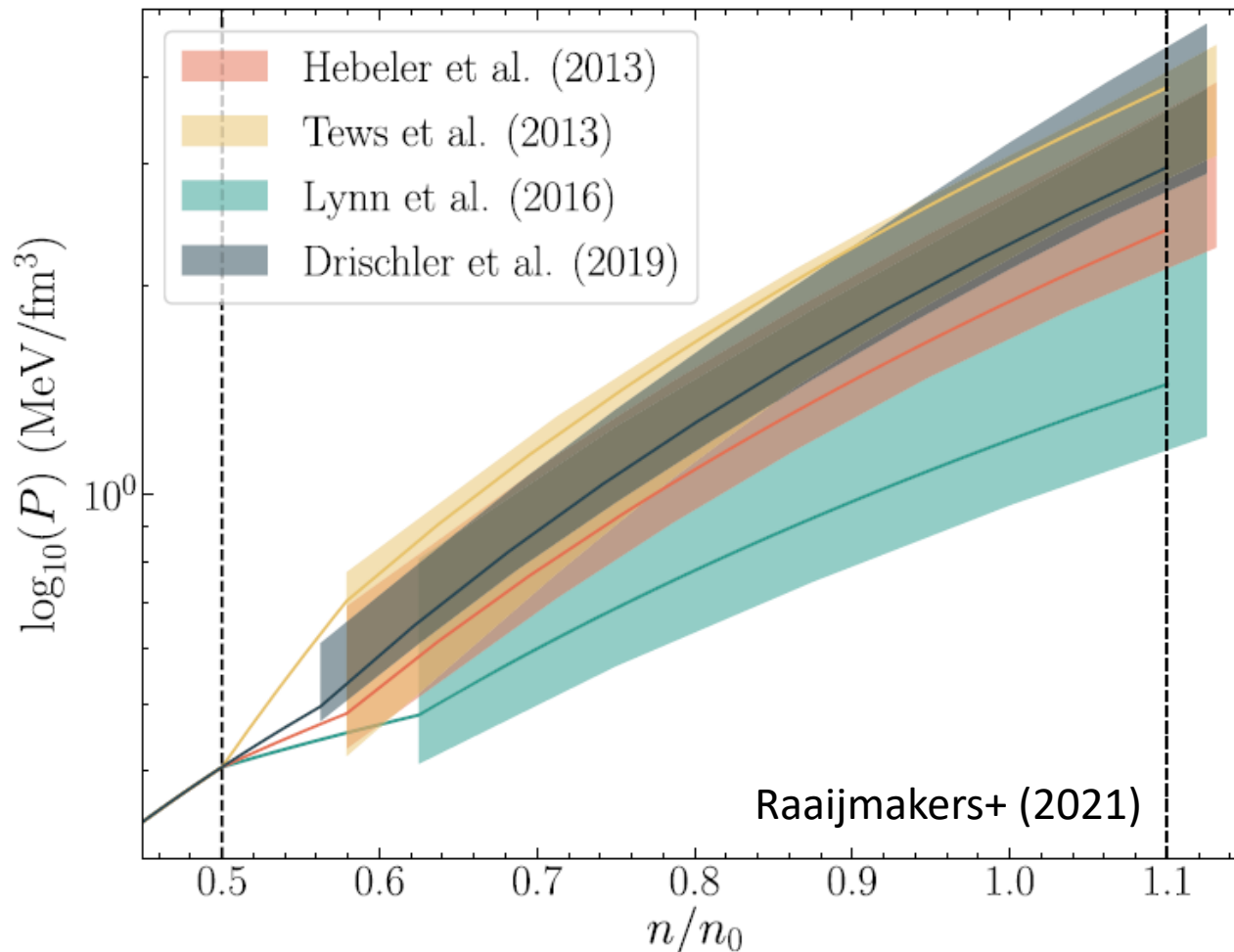
# まとめ

- 様々な天文観測によって中性子星の色々な性質や状態方程式が制限されつつあり、典型的な質量でおおよそ半径は10.5-13.5kmくらいだと見られる
- 慣性モーメントも将来的に観測されるかも？
- 低密度の状態方程式は順調に決まっていっくだろう
- 高密度物質の音速はconformal limitを超えている可能性が高そうという観測的示唆が現在でもある
- 将来的に連星中性子星が合体した後の重力波を観測して密度上昇によるハドロン・クォーク転移がクロスオーバーか一次相転移か見分けられるかも



# カイラル有効場理論の不定性

どこの密度まで使えるかが制限の強さに直結してくる



# 半径 vs 対称エネルギーの微分

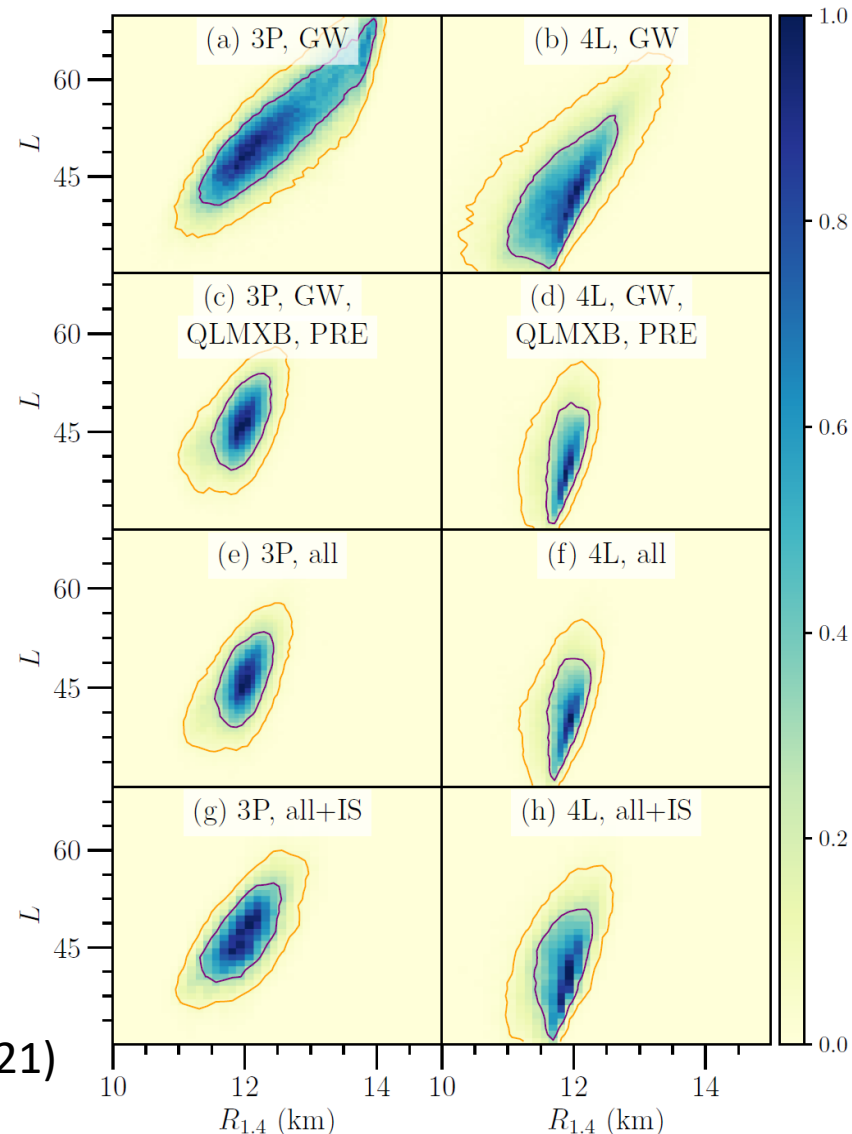
相関があるのは確かだが  
そんなに強いわけでもない

状態方程式の構成法にも  
依存していそう

左: ポリトロープを複数つなぐ

右: 音速一定を複数つなぐ

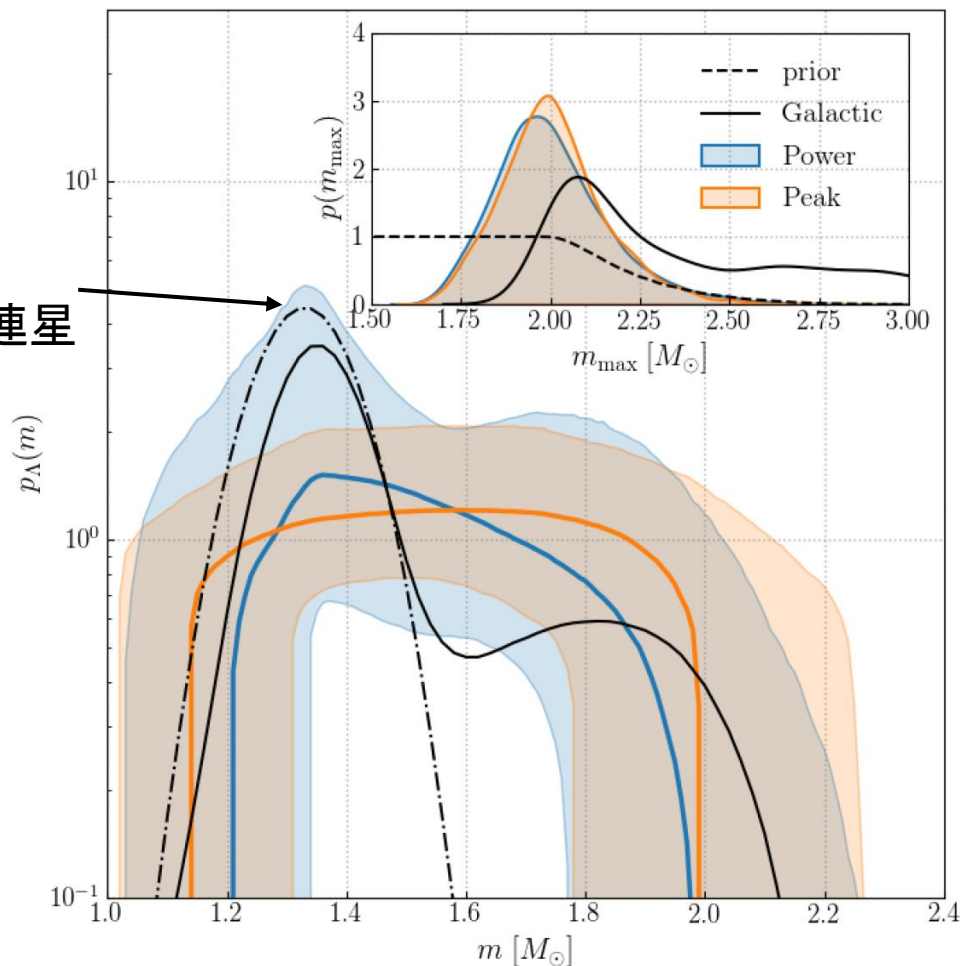
Al-Mamun+ (2021)



# 中性子星質量

系外では重い中性子星も合体している可能性はある

系内の連星中性子星  
= 重力波に関する連星

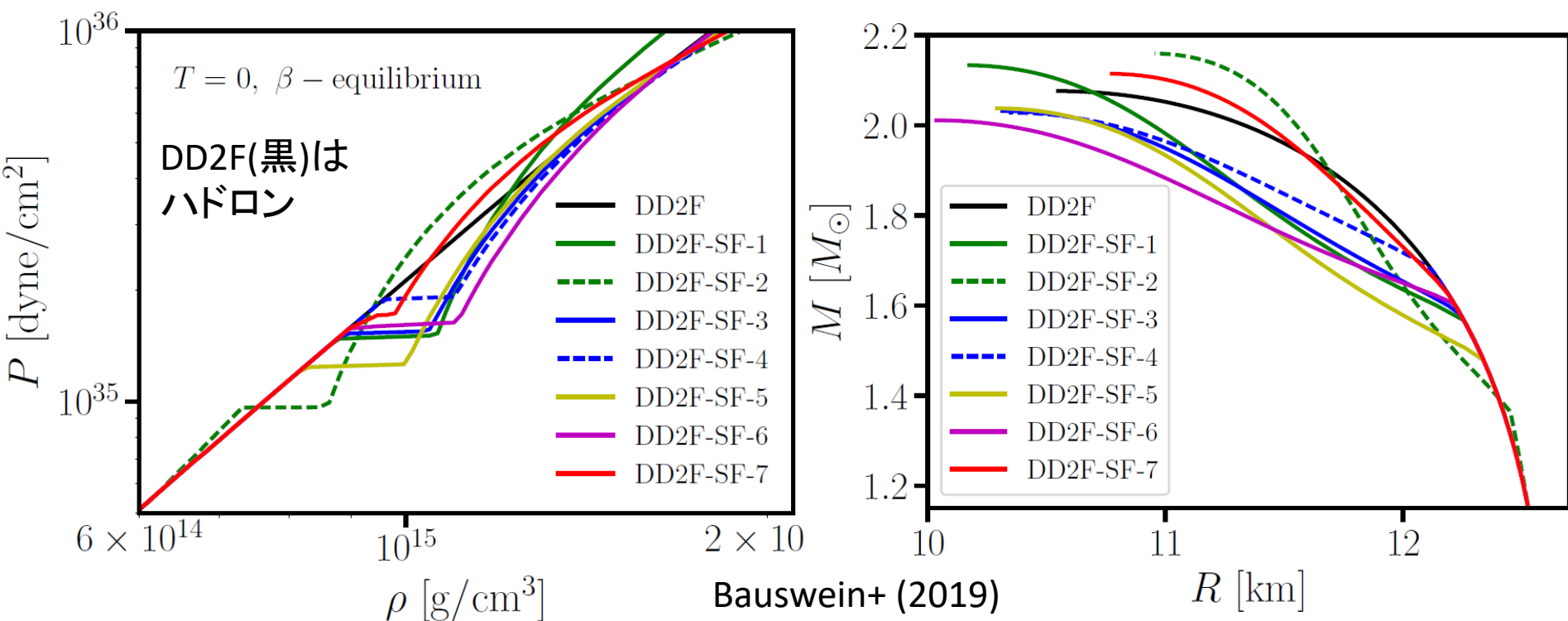


どこまでが本当に  
中性子星かは不明

LIGO&Virgo&KAGRA  
(2023)

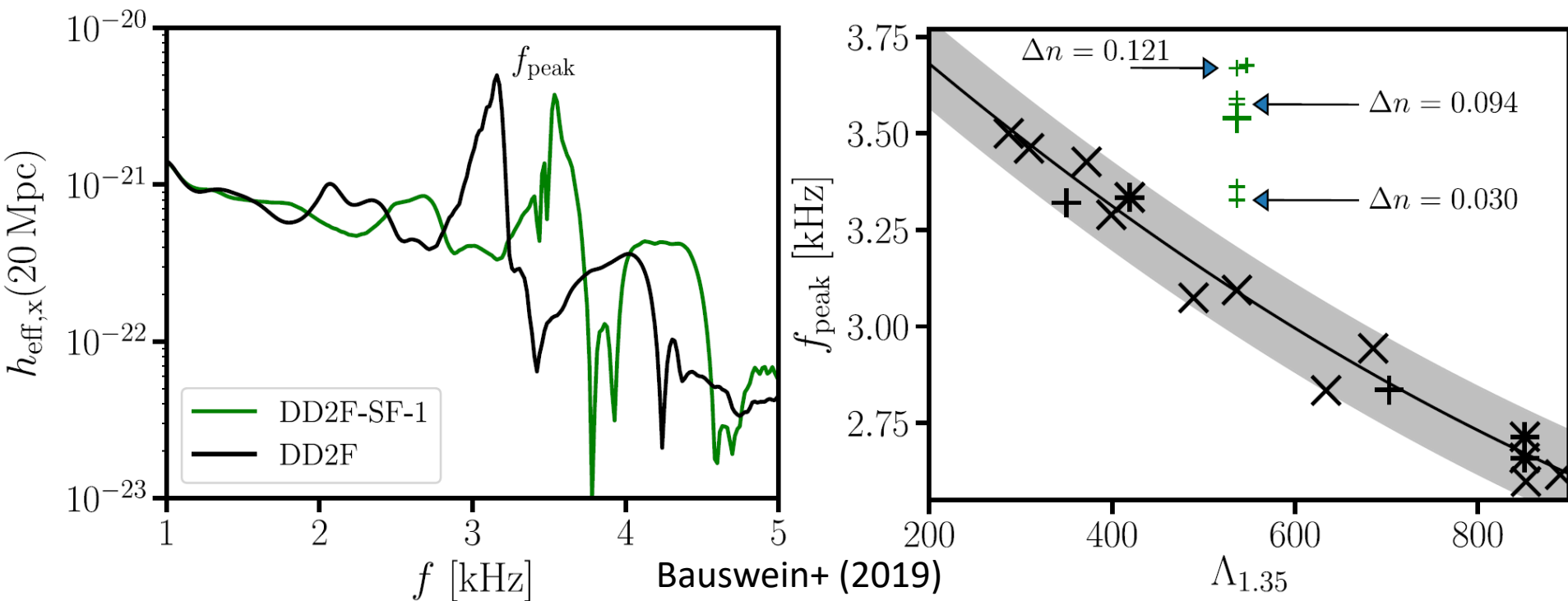
# 一次相転移

質量-半径関係で見ると途中でいきなり折れる  
極端なものはいわゆる“twin star”になる



# 強い一次相転移の場合

合体前の＝低密度の状態方程式から予想されるより高い振動数に合体後の重力波が出るので判別できる



# 合体後の中性子星の構造

密度や温度の構造はあまり変わらない

高密度のコア + 高温のやや外側でクォーク相出現

上:クォークあり 下:ハドロンのみ

最大密度・最大温度の時間進化

