

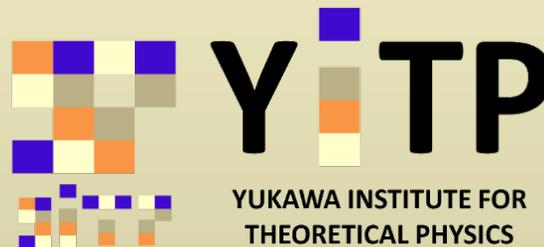
# 連星中性子星合体からの重力波による 状態方程式への制限

Phys. Rev. Lett. (2011) 107, 051102

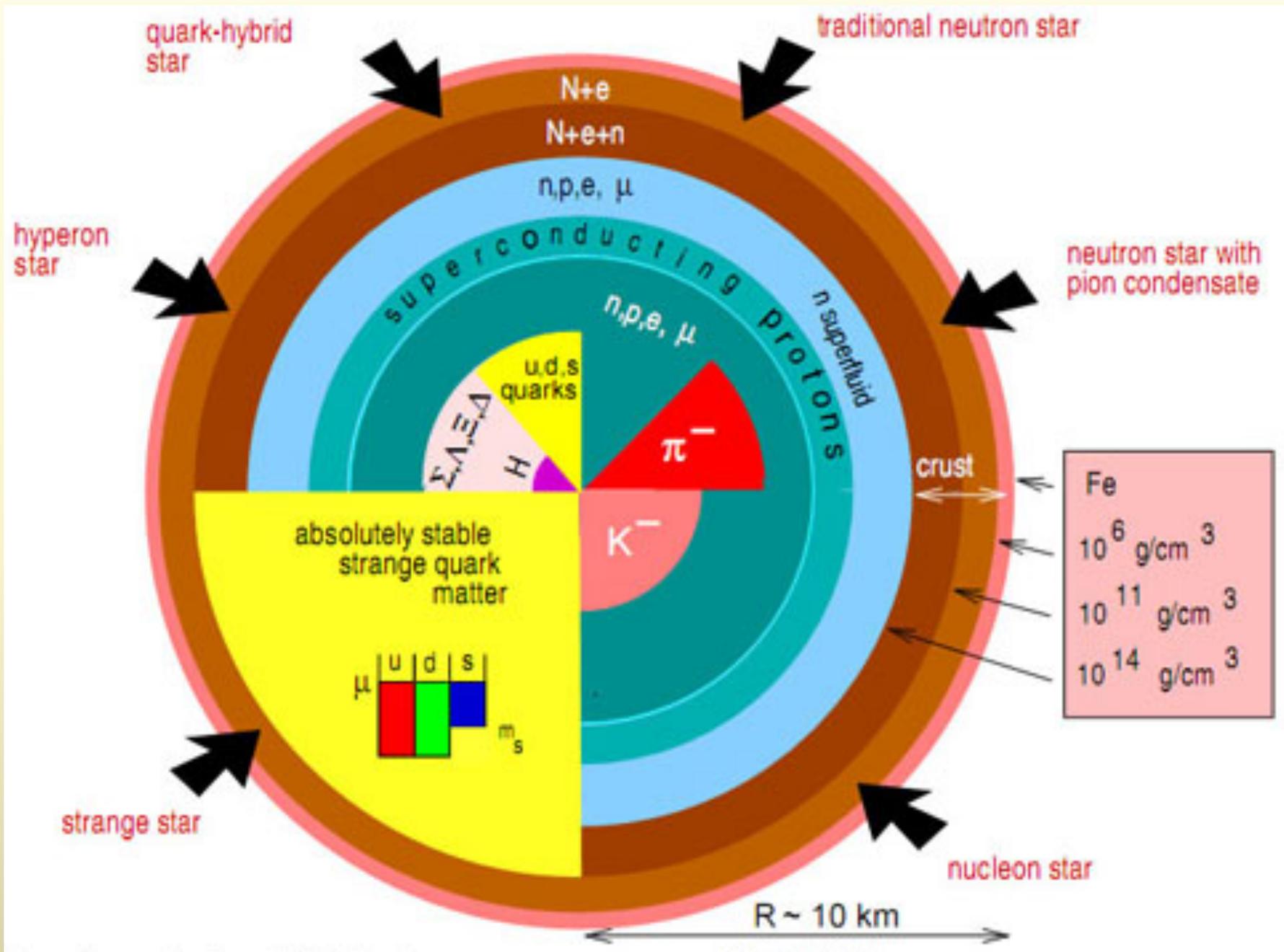
Phys. Rev. Lett. (2011) 107, 211101

京都大学基礎物理学研究所  
関口雄一郎

木内建太 久徳浩太郎 柴田大

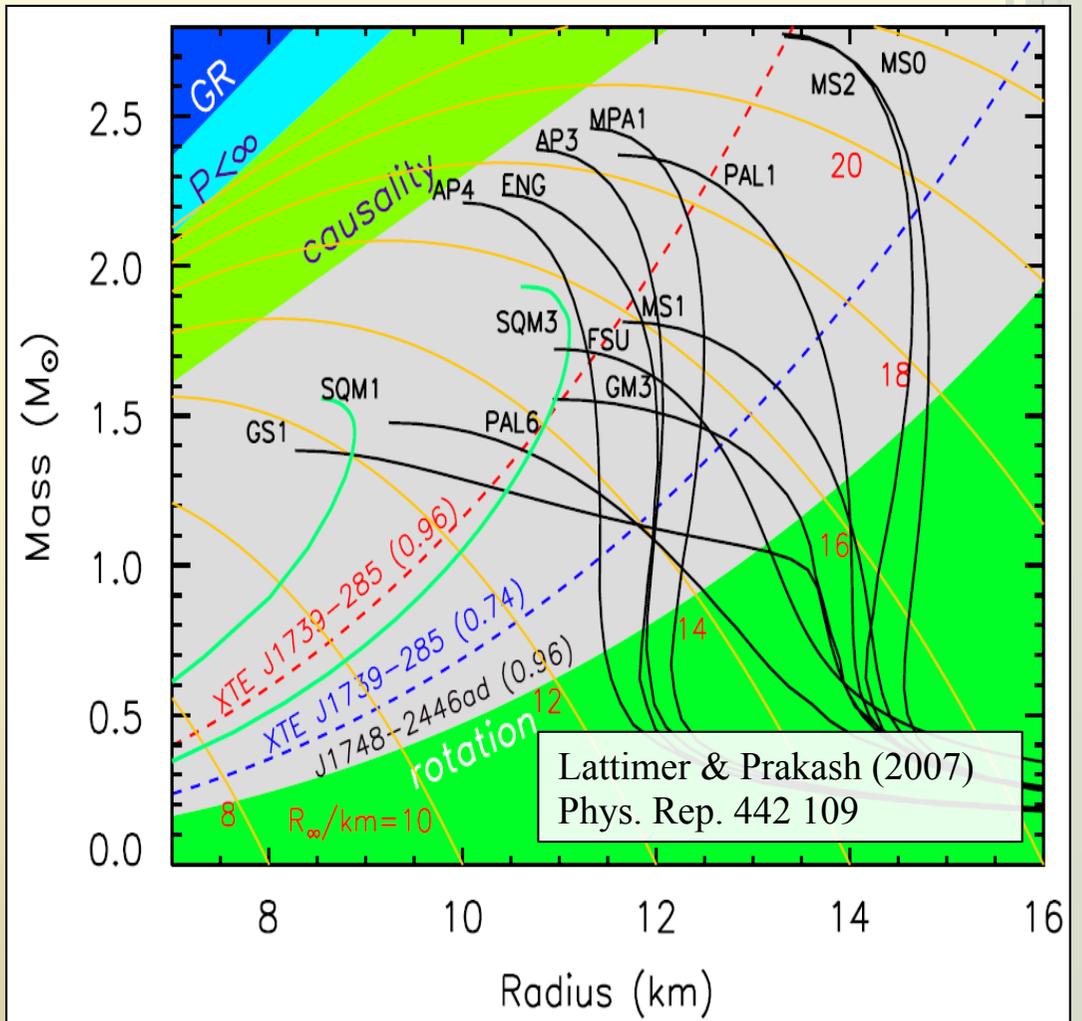
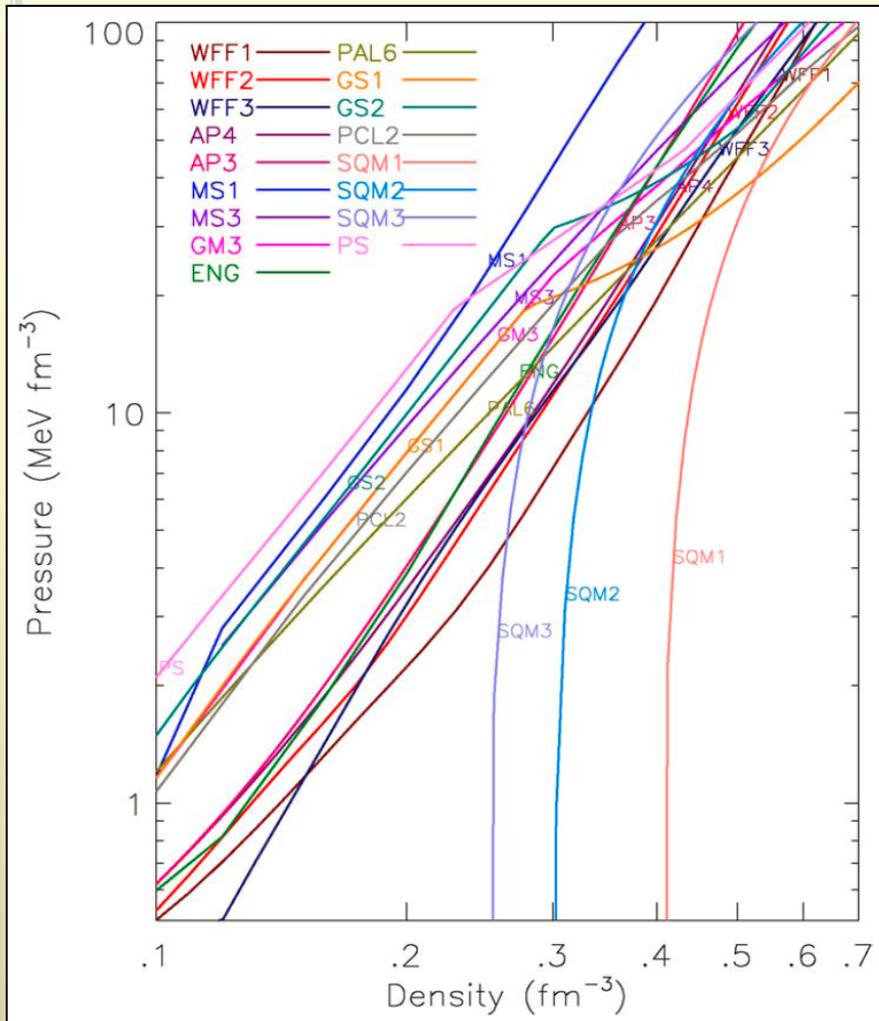


# 重力波観測によって中性子星内部を探りたい



# 基本的アイデア

- 状態方程式  $\leftrightarrow$  中性子星の質量・半径の対応
  - Lindblom (1992) ApJ 398 569
- 中性子星の最大質量 ( $\sim 2M_{\text{solar}}$ )



# 連星中性子星合体からの重力波

## Inspiral phase

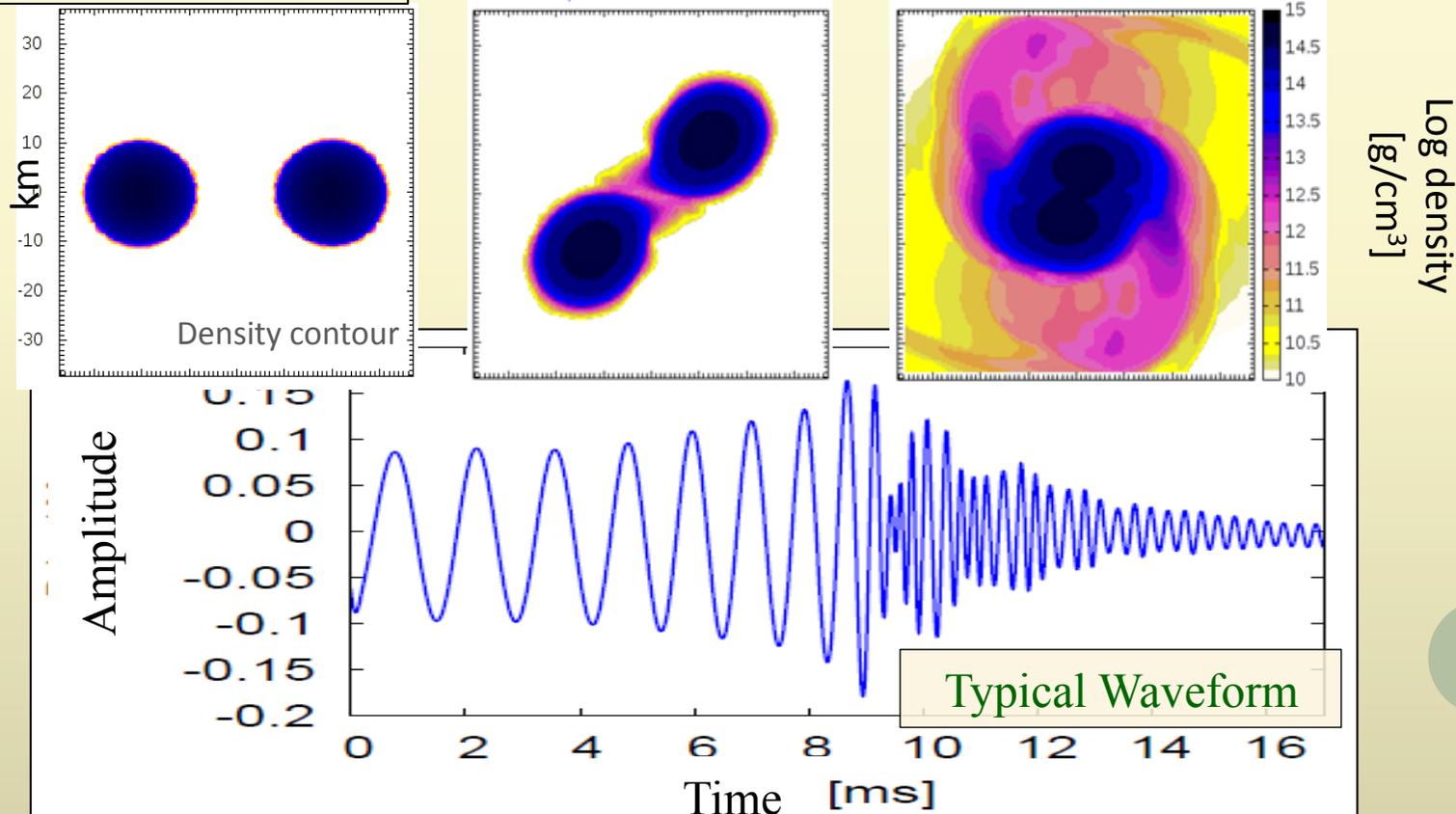
- 質点近似
- Information of orbits, neutron star mass etc.

## Tidal deformation

- 有限サイズ効果
- Information of radius (EOS)

## Merger and oscillation

- 振動モード, 最大質量
- Information of dense part of EOS



# 連星中性子星の合体からの重力波を用いる利点

- シンプル: 重力波～四重極公式

- ⇔ 電磁波学観測 (大気・クラスト組成、輻射輸送、複雑)

- 少ない不定パラメータ、特に質量: 合体前波形の

- ⇔ 単独中性子星の光学観測 (距離、質量の不定性、複)

- 物質の動的応答: 変形、振動

- ⇔ 単独中性子星 (静的)

- 多角的情報:

- 潮汐変形:

- 半径～(比較的)低密度領域の情報

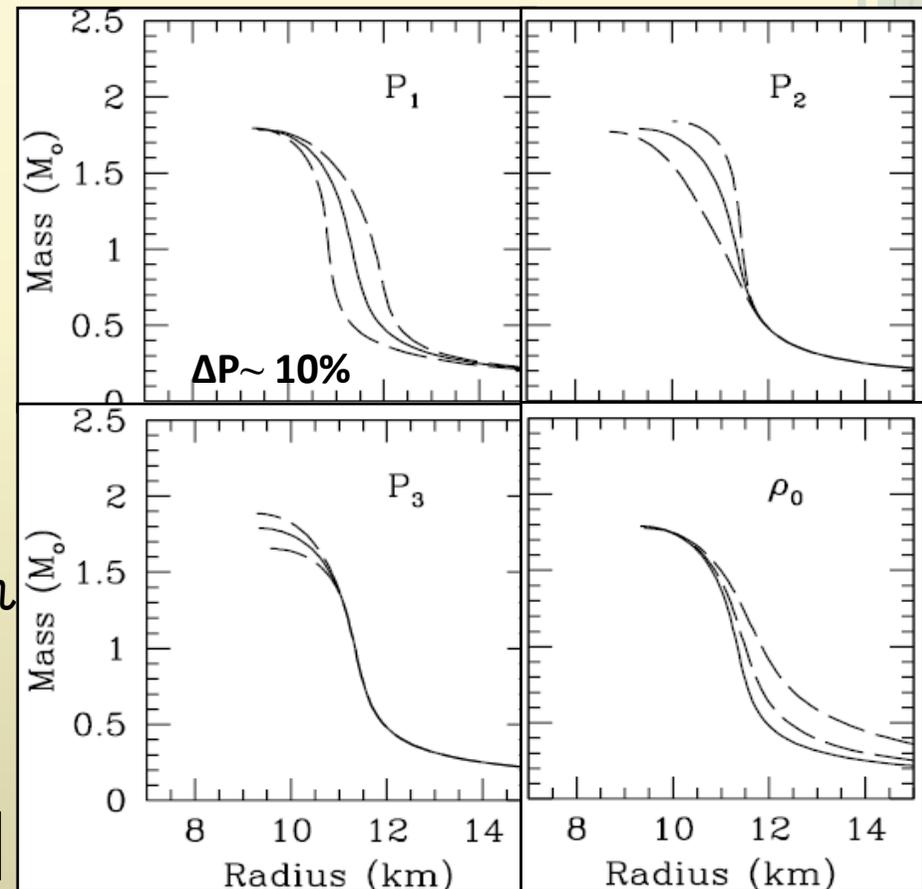
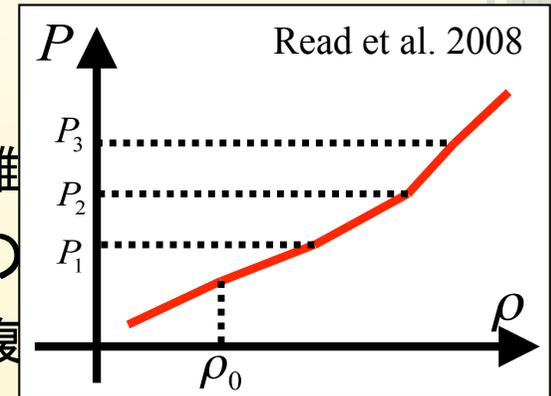
- 最大質量:

- 高密度領域の情報

⇔ 単独中性子星で重たいものはまれ

- 振動モード:

- 内部構造情報



Ozel & Psaltis 2009

# 中性子星内部にハイペロンは存在するか？

## ○ パルサー PSR J1614-2230 の衝撃 : $M = 1.97 M_{\text{solar}}$

- Shapiro time delay による重力質量の評価 (準力学的)
  - Demorest et al. (2010) Nature
- 従来の“柔らかい” Hyperon 状態方程式(EOS)を軒並排除

## ○ 「**柔らかい EOS は排除されたが、Hyperon, Quark などの**

**exotic matter の存在が排除されたわけではない**」 - Lattimer & Prakash (2011) “What 2Msolar NS really means”

## ○ $2M_{\text{solar}}$ を超える最大質量を持つ Hyperon EOS モデル

- Bednarek, Haensel+ (2011)
- Weissenborn, Schaffner-Bielich+ (2012)
- Meudec et al. (2012)

$$M_{\text{max}}(f_S) = M_{\text{max}}(0) - 6f_S \quad \text{in solar mass unit}$$

$$f_S(M_{\text{max}}) < 0.17 \quad \text{for } M_{\text{max}} > 2M_{\text{solar}} \quad (f_S : \# \text{ of strange quark / baryon})$$

# 重力波観測からハイペロンの存在を決められるか？

## ○ Isolated neutron star の観測

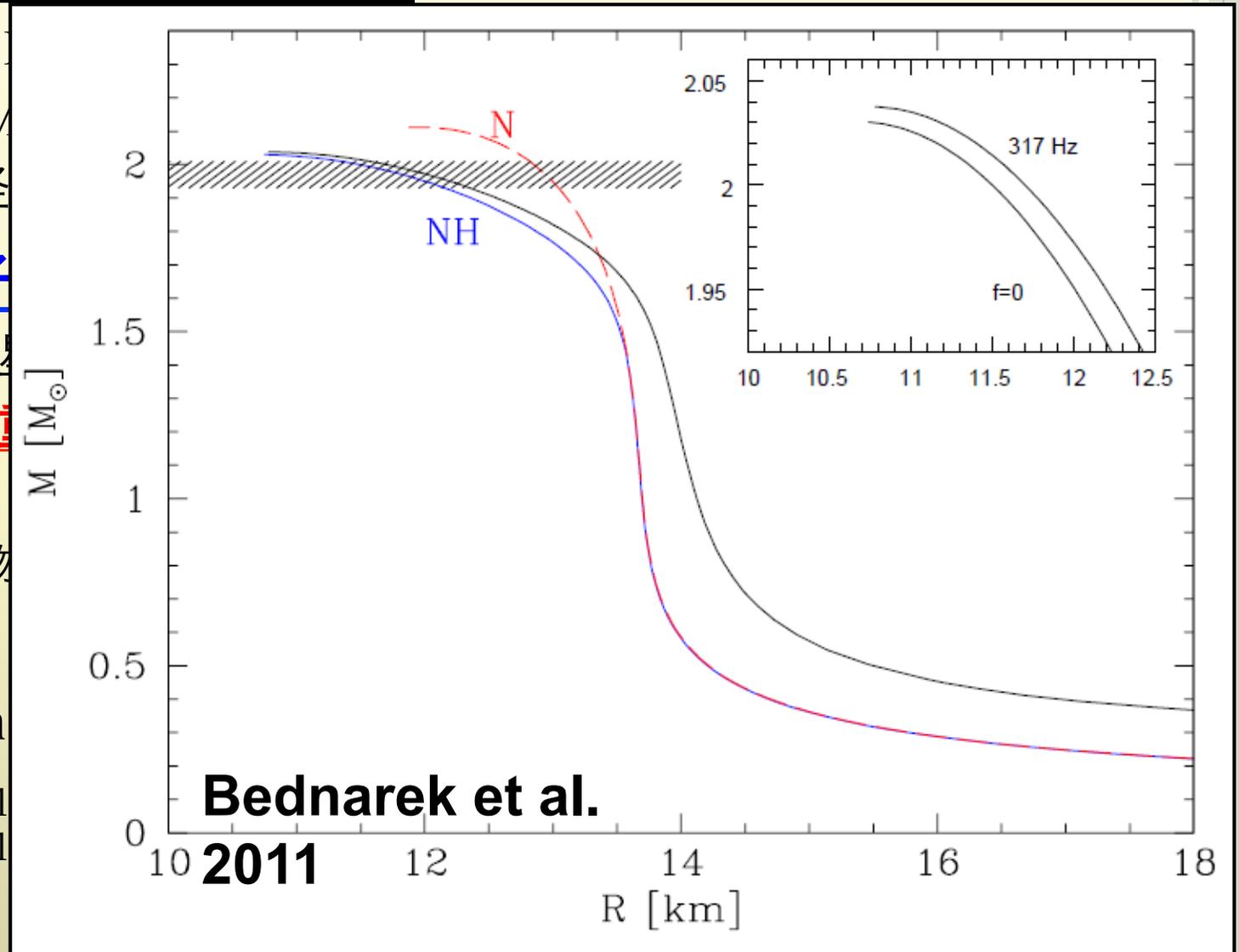
- “かたい”
- 多数の ‘M
- 質量/半径

## ○ 連星中性子

- 典型的連星
- **合体前の**
- シンプル
  - 不定の物

## ○ 本研究の結果： 「exotic ph

Sekiguchi et al  
Sekiguchi et al



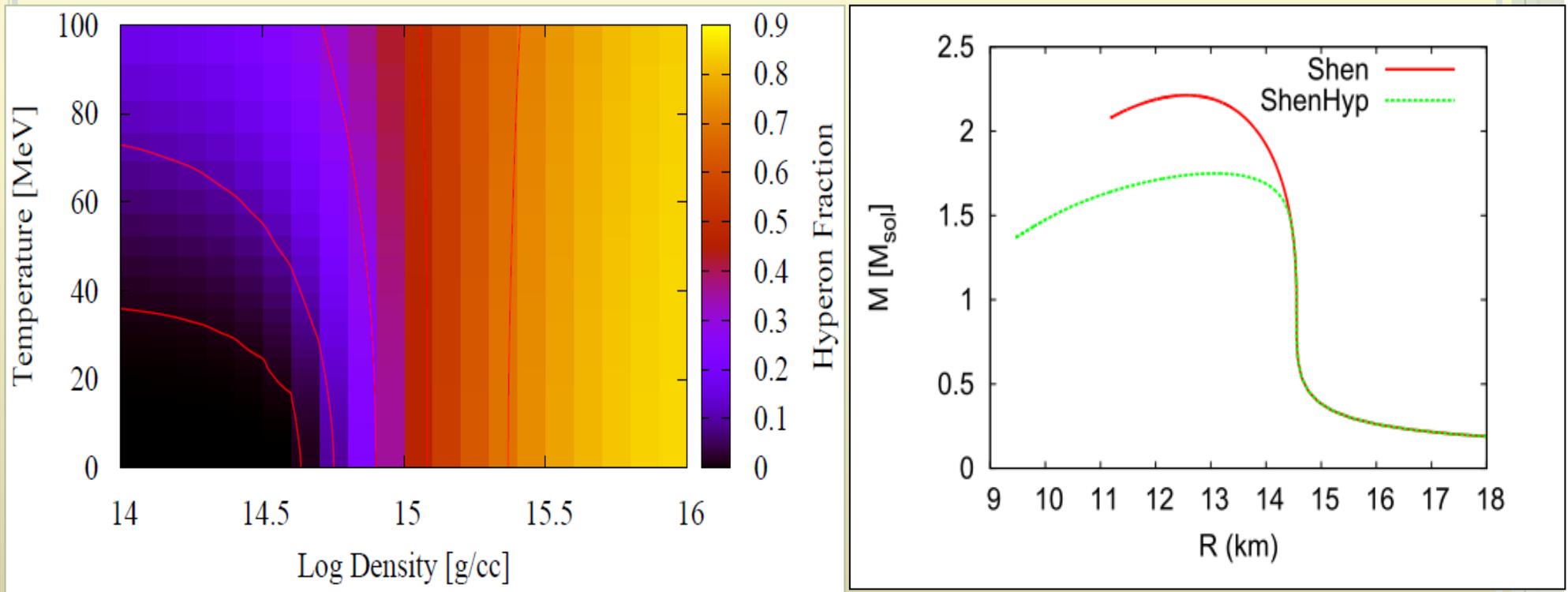
# やったこと

- Einstein 方程式 を解く (数値相対論) :
  - Shibata-Nakamura (BSSN) formalism
- GR Lepton-ν-Hydrodynamics 方程式 を解く
  - 有限温度高密度核物質状態方程式
  - 弱い相互作用 (電子捕獲反応/ ニュートリノ対生成・散乱)
  - ニュートリノ冷却 (GR leakage (Sekiguchi 2010))
- 二つの状態方程式で重力波を計算
  - S-EOS: Shen et al. (1998) による 通常核物質EOS
  - H-EOS: Shen et al. (2011) による Hyperon EOS
    - 相対論的平均場理論,  $\Lambda$  Hyperon のみ考慮
  - 2つの状態方程式を重力波で区別できますか?
- 初期条件
  - 等質量中性子星の連星 : 1.35, 1.5, 1.6 Msolar binary



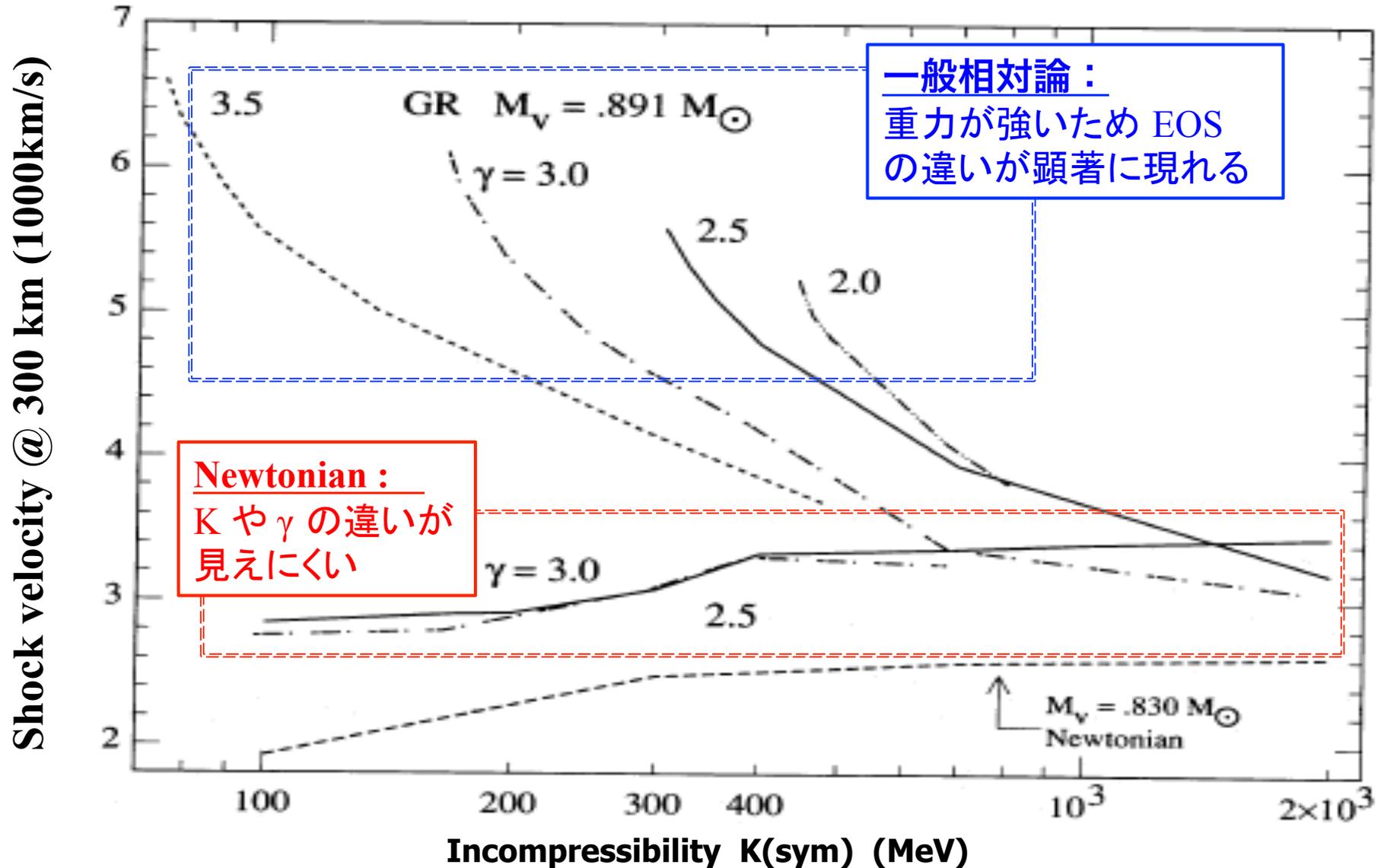
# 状態方程式 (EOS)

- **S-EOS: 通常核物質** EOS (Shen+ 1998)
- **H-EOS:  $\Lambda$  hyperon** を考慮した EOS (Shen+ 2011: ShenHyp)
  - $\rho \sim \text{a few } \rho_{\text{nuc}}$  で  $\Lambda$  hyperon 出現 ( $T = 0$ )
  - $X_{\Lambda}$  は密度と温度の増加とともに上昇
  - $\Lambda_{\text{hyperon}}$  の出現に伴い状態方程式は柔らかくなり、中性子星の最大質量は小さくなる

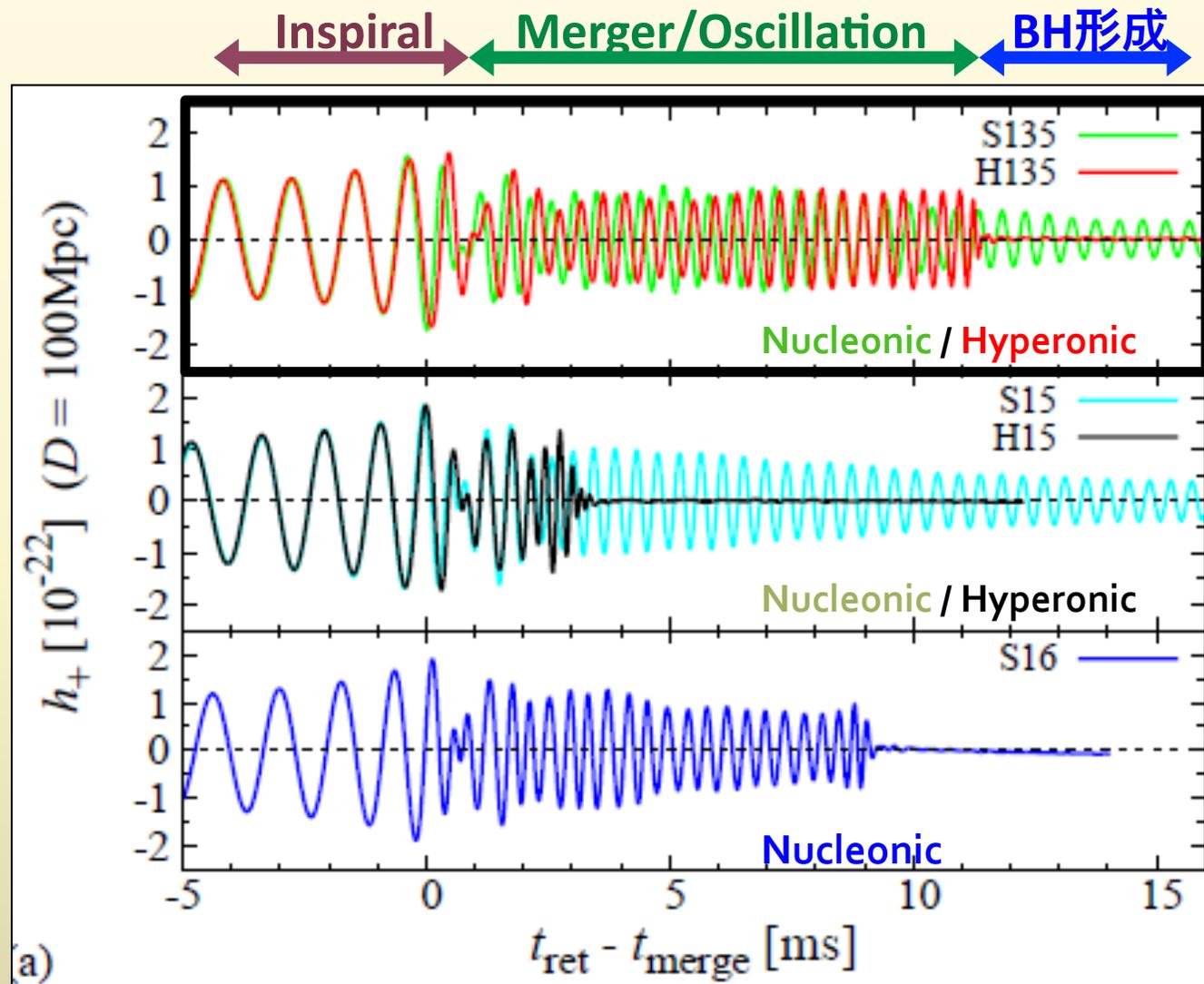


# 一般相対性理論の重要性

Van Riper (1988) ApJ 326,  
235



# 重力波波形：HYPERONIC VS NUCLEONIC



# 合体後の連星中性子星の運命

○ 中性子星の最大質量 : 
$$M_{NS,max} = M_{NS,max}^{cold} + \Delta M_{rot}^{rigid} + \Delta M_{rot}^{diff} + \Delta M^{th}$$

- $M_{NS,max}^{cold}$  : maximum mass of spherical NS at  $T = 0$ , depends on EOS
  - 観測されているNSの最大質量 : 1.97 Msolar (Demorest et al. 2010)

- $\Delta M_{rot}^{rigid}$  : effects of rigid rotation  $\sim O(10\%)$

- $\Delta M_{rot}^{diff}$  : effects of differential rotation typically  $\sim O(10\%)$

- 中性子星の半径 (EOS依存) によって回転の効果は異なる
- 半径大  $\Rightarrow$  早く合体  $\Rightarrow$  inspiral GW 放出 小  $\Rightarrow$  高速回転 NS
- GW 放出 or 磁場による角運動量輸送によって BH  $\rightarrow$  崩壊  $\sim O(100 \text{ ms})$

- $\Delta M^{th}$  : effects of finite temperature  $\sim O(10\%)$

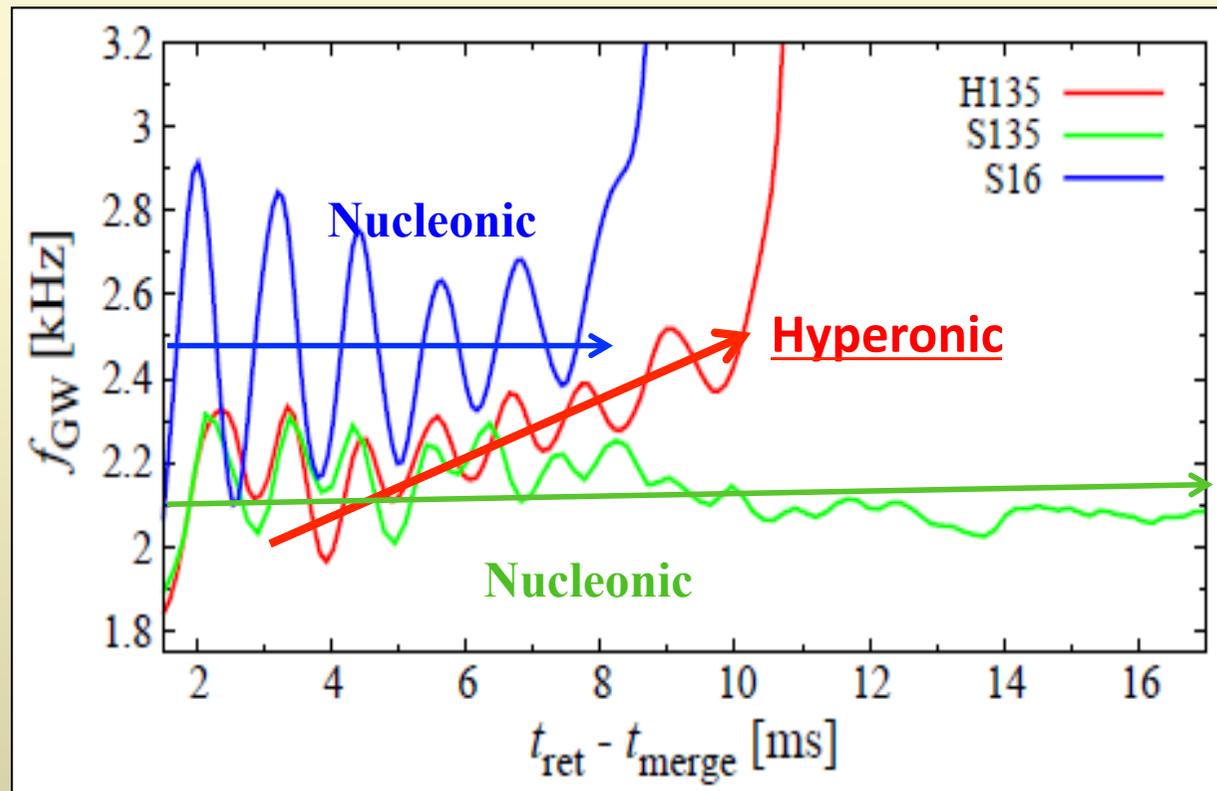
- ニュートリノの放出によって BH  $\rightarrow$  崩壊  $\sim O(1 \text{ s})$

- 最大質量は 30 — 70 % 増大する

- 半径の大きい EOS 程、ゼロ温度球対称からの増加率は大きい傾向

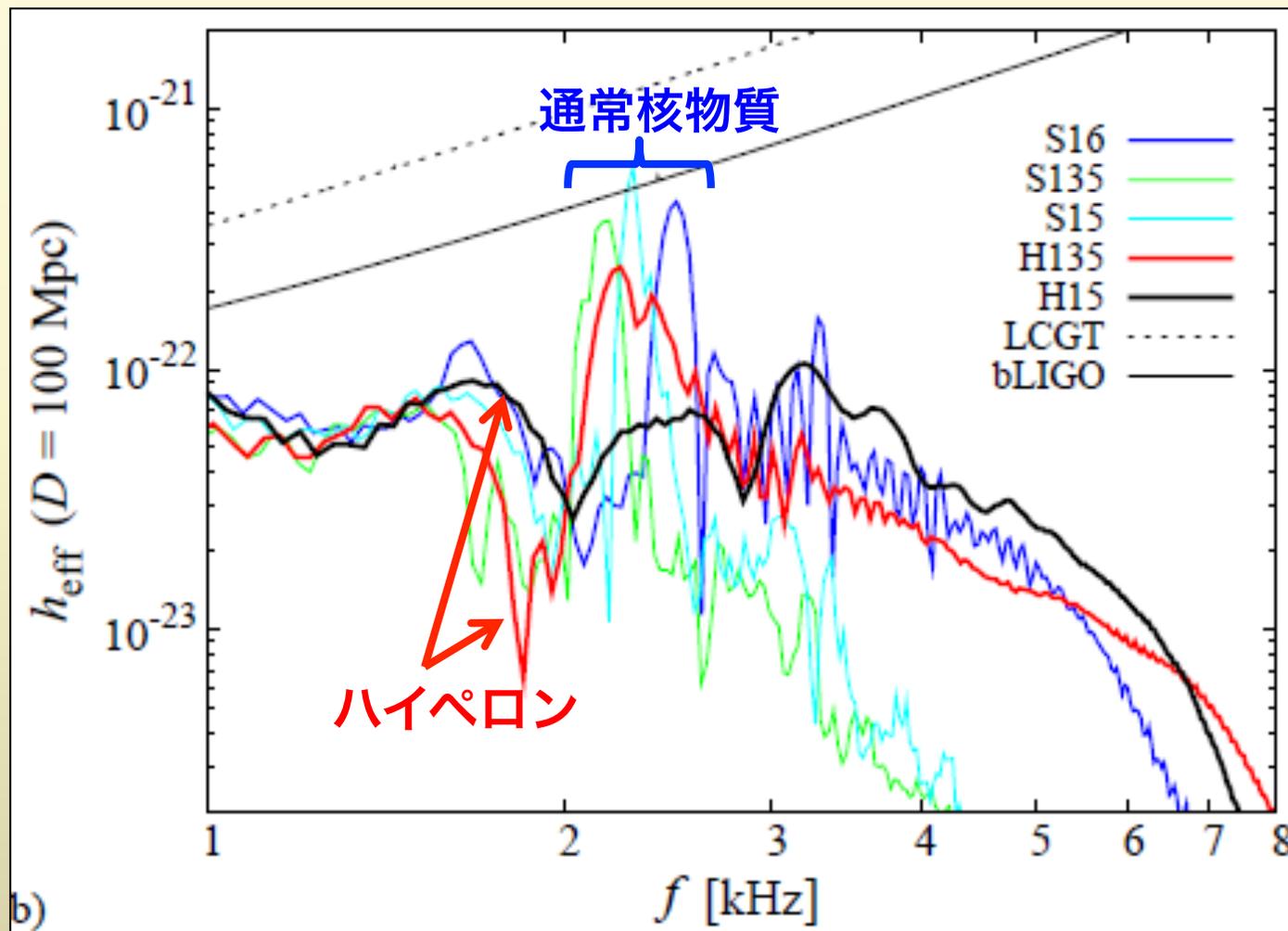
# 重力波に埋め込まれたハイペロンの出現情報

- Hyperon EOS では典型的な重力波周波数が時間進化
- 合体後の中性子星のダイナミクス
  - 通常核物質 : 重力波/ニュートリノの放射に伴い徐々に収縮
  - ハイペロン : 重力波放射による収縮  $\Rightarrow$   
密度増大によりハイペロンがさらに出現  $\Rightarrow$   
ハイペロンの出現により中性子星がさらに収縮



# 重力波スペクトルと観測可能性

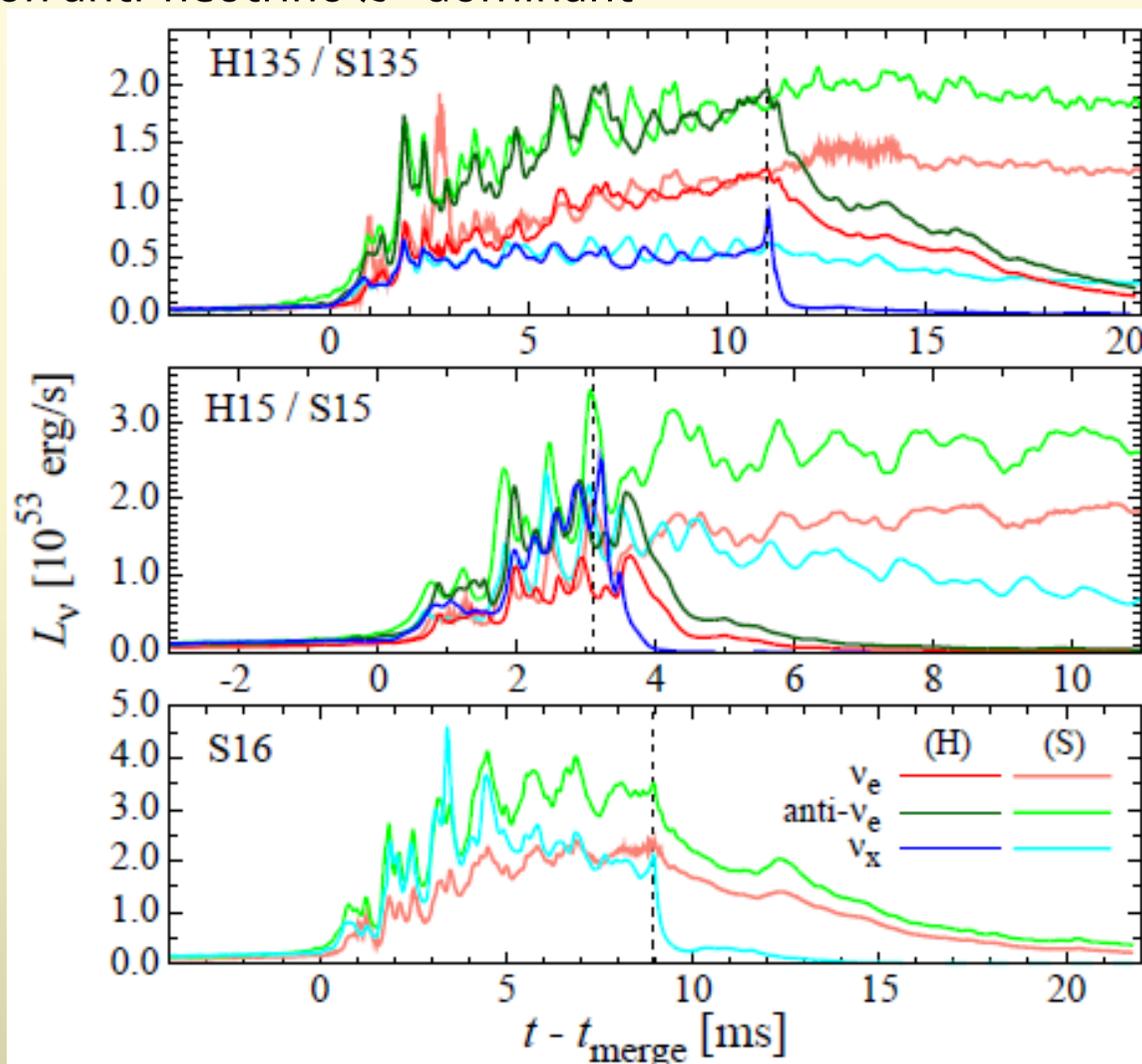
- 通常核物質では中性子星振動に付随したピーク (EOS情報含)
- ハイペロン状態方程式では広がった弱いピーク
- 我々の銀河が属する乙女座銀河団くらいの合体でないと厳しい



# ニュートリノによるEOSの制限は難しそう

## ○ ニュートリノ光度：継続時間は異なる

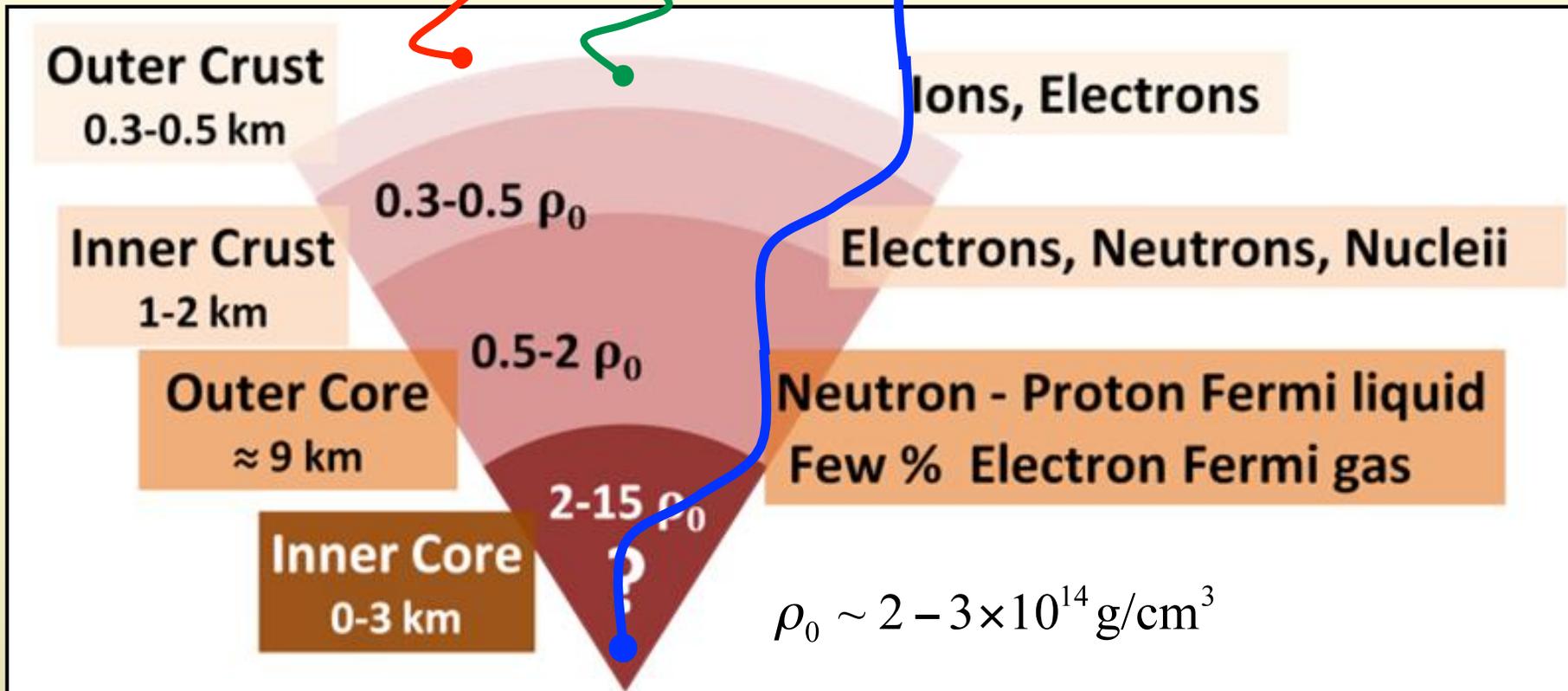
- ハイペロンが現れるのは中心領域 ⇒ すぐにBHに飲み込まれてしまう
- Electron anti-neutrino が dominant



光学観測

ニュートリノ  
観測

重力波観測

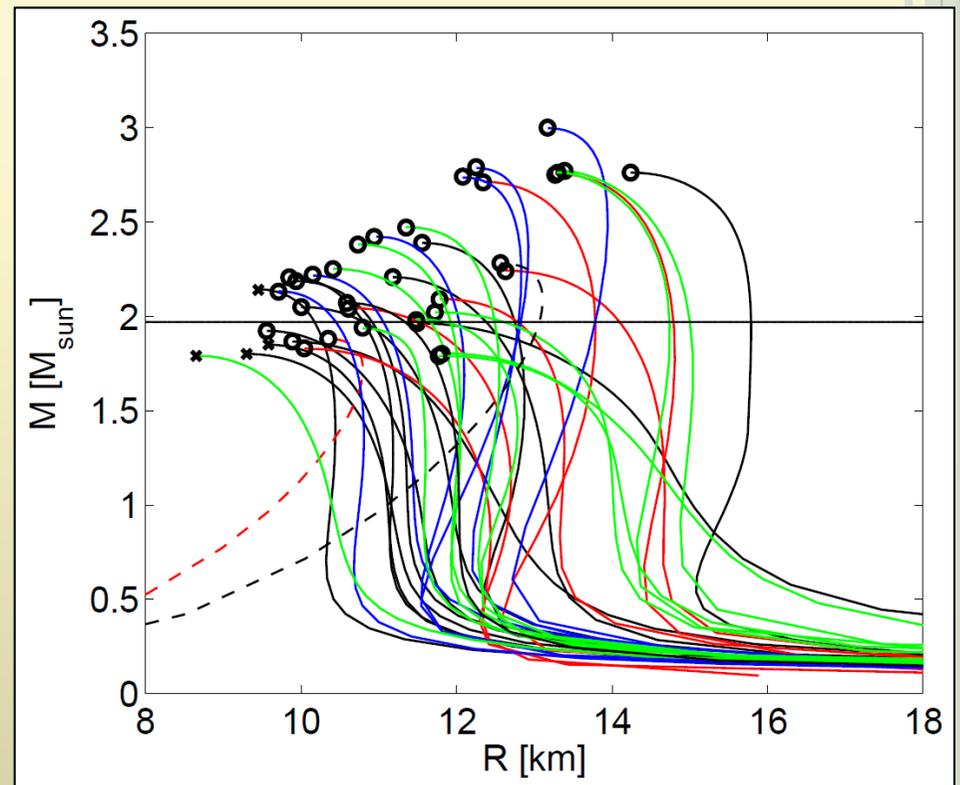
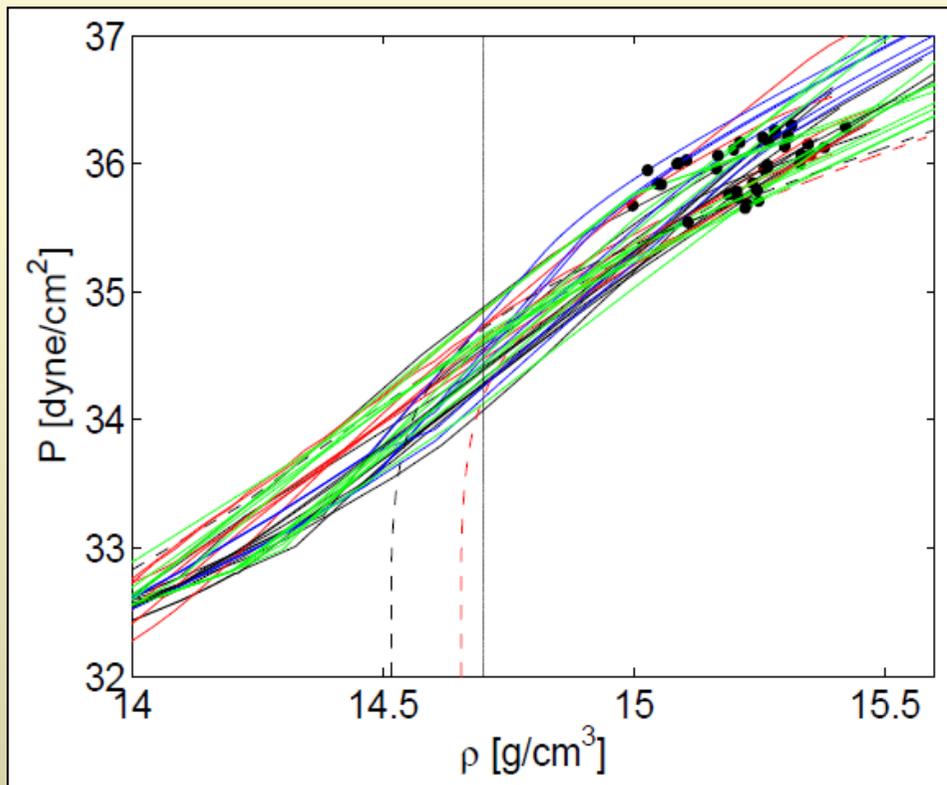


# 重力波スペクトルの特徴的なピークから 状態方程式の情報を抜き出せるか？

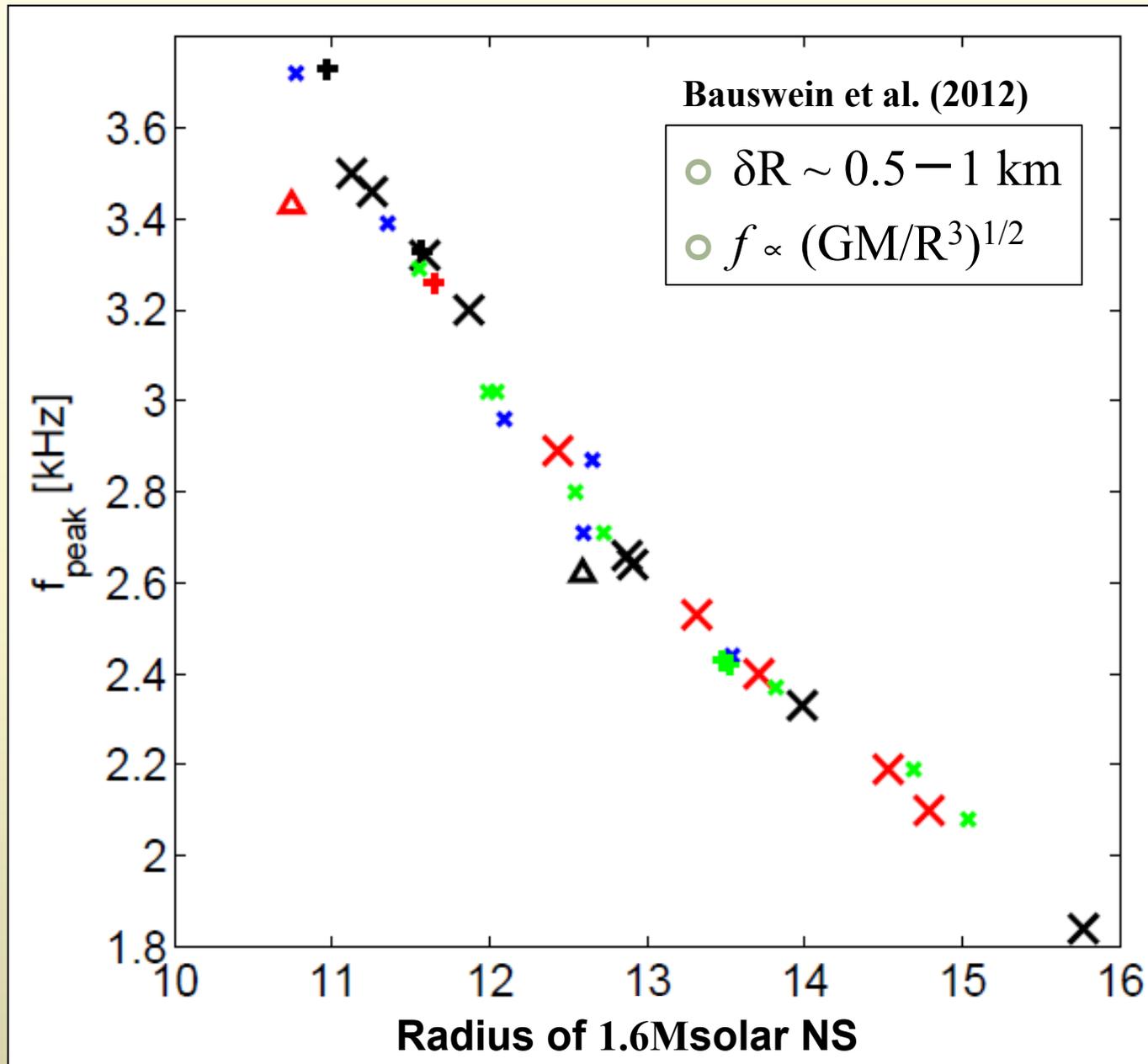
Bauswein & Janka (2012) PRL 108, 011101; **Bauswein et al. (2012) arXiv:1204.1888**

Hotokezaka et al., in prep

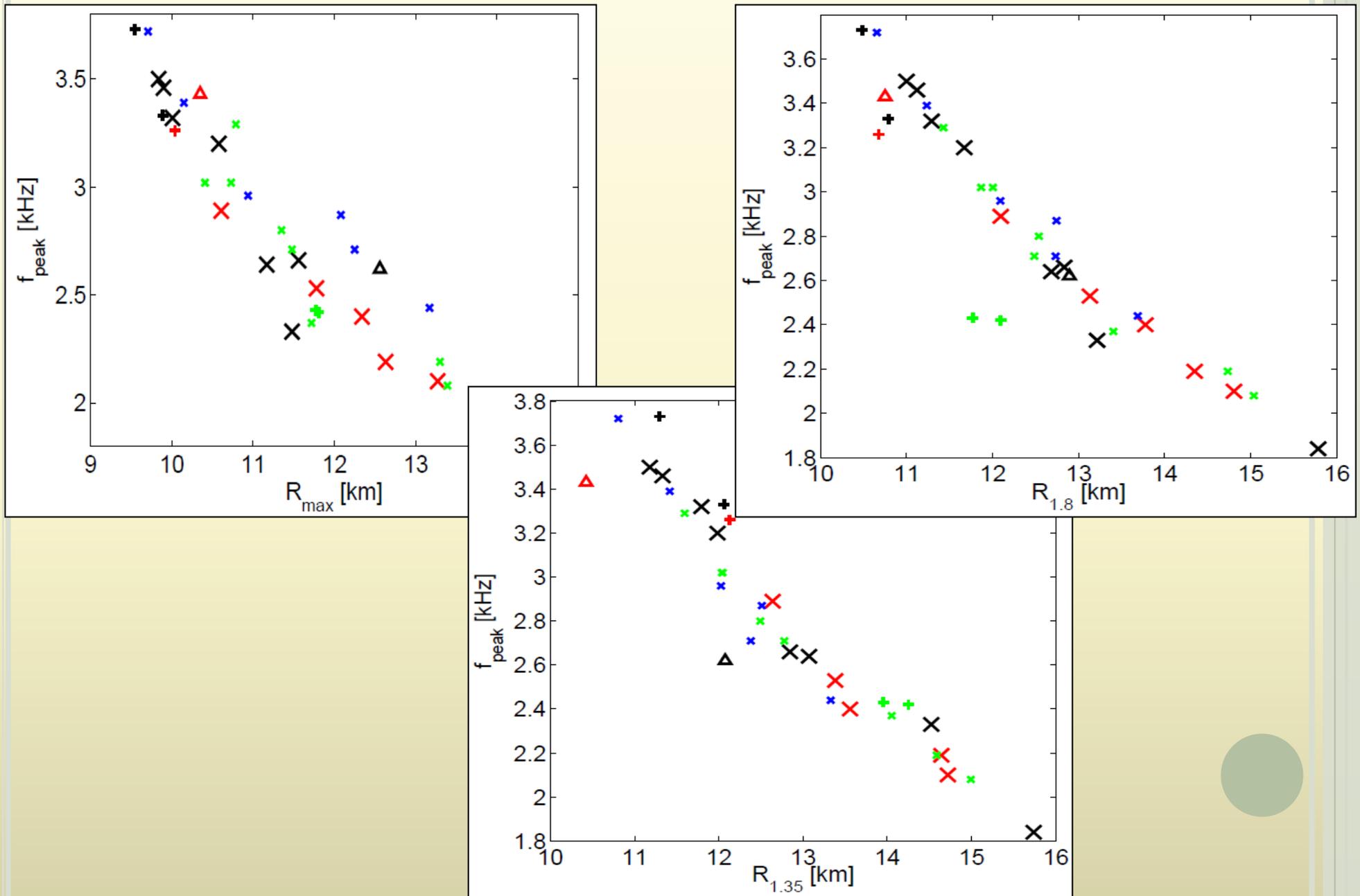
- 多数の状態方程式を採用して合体シミュレーション(近似的GR)
  - Lattimer-Swesty, Shen, APR, Sly, Glendenning, ALF, MITbag
  - Chiral effective field theory + higher density extension
    - Hebel et al. (2010) PRL 105 161102



# 重力波のピーク振動数 vs. 中性子星半径



# 重力波のピーク振動数 vs. 中性子星半径



## まとめ

- 今後、重力波天文学の時代へ
  - 連星中性子星合体は有望な重力波源
  - 重力波によって中性子星内部を観測できる可能性
- 連星中性子星合体からの重力波から状態方程式が制限可能
  - 通常核物質とハイペロン状態方程式では重力波スペクトルに違い
  - 通常核物質 ⇒ ハイペロン 相転移 に伴うダイナミクスに起因
- ニュートリノでは状態方程式の制限はやや難しいか
  - 放射継続時間(中性子星の寿命)は短くなる
  - 高密度領域のためBHに飲み込まれる