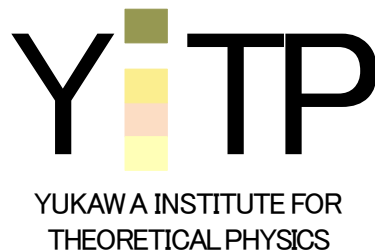
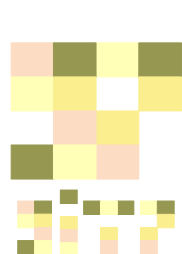


中性子星の星震と核密度状態方程式に関する数値的研究

D01班 公募研究採択課題

木内建太

連携研究者: 関口雄一郎



はじめに

(1)研究目的等

新学術（公募）－2、3（研究目的）、6（今回の研究計画を実施するに当たっての準備状況及び研究成果を社会・国民に発信する方法）、7（これまでに受けた研究費とその成果等）の内容を簡潔にまとめて記述してください。

本研究は、中性子星振動（星震）による中性子星物質の解明を第一目標とする。連星中性子星合体後に誕生すると考えられている大質量中性子星と強磁場中性子星（マグネター）を研究対象とする。各々の対象について星震と核密度状態方程式の相関に関して系統的な研究を行い、前者については重力波観測に先立った予言を与え、後者についてはマグネターの電磁波観測と比較する。

大質量中性子星を高温・高速回転中性子星の平衡形状でモデル化し、平衡形状を初期条件とした一般相対論的シミュレーションを行う。シミュレーション結果から振動モードと有限温度核密度状態方程式の関係性を確立し、重力波による中性子星物質のプローブを議論する。

マグネターについては、零温度核密度状態方程式を採用し、既存の研究と比較してより現実的な磁場構造を考える。具体的にはポロイダルとトロイダル両成分を有する磁場配位でマグネター磁場をモデル化する。これらのモデルを初期条件とした一般相対論的磁気流体シミュレーションを実行し、マグネター星震を線形相から非線形相まで調べる。さらに、電磁波観測されているマグネターの準周期的振動を説明可能なモデルを明確にし、観測的に支持される核密度状態方程式を選別する。

最終的には、重力波と電磁波の多角的な観測による核密度状態方程式への制限を議論し、将来観測へ向けた提言を行う。

Contents

- ▶ 背景（連星中性子星合体を中心に）
- ▶ 研究計画
- ▶ まとめ



背景

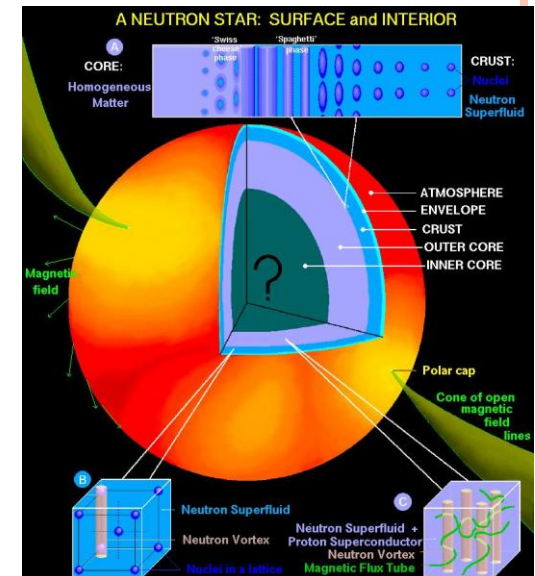
数値相対論

Einstein方程式、流体力学方程式、
ニュートリノ輻射場方程式をコンシステントに解き、
強重力場での現象を解明する。

コンパクト（中性子星／ブラックホール）連星合体

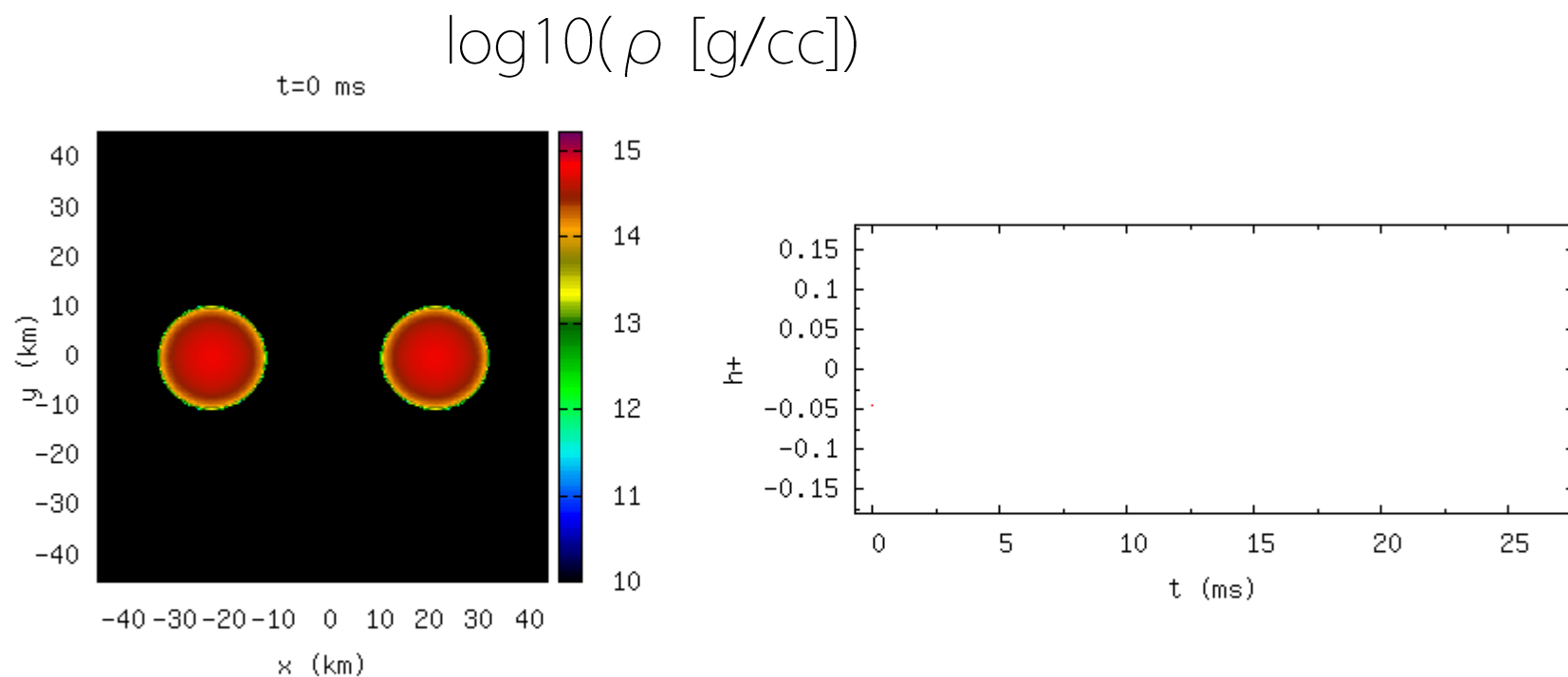
- ▶ 重力波の重要なターゲット
(KAGRA, adv. LIGO, adv, Virgo 2015年頃観測開始)
～10 event /yr (Binary Neutron Star (BNS)) KAGRA
～10 event /yr (BH-NS) adv. LIGO
- ▶ 強重力場における一般相対論の検証
- ▶ 核密度状態方程式
(GW $\Rightarrow$ 中性子星質量と半径 $\Rightarrow$ M-R関係の再構築)
- ▶ 理論波形の予測

重力波干渉計@神岡



背景

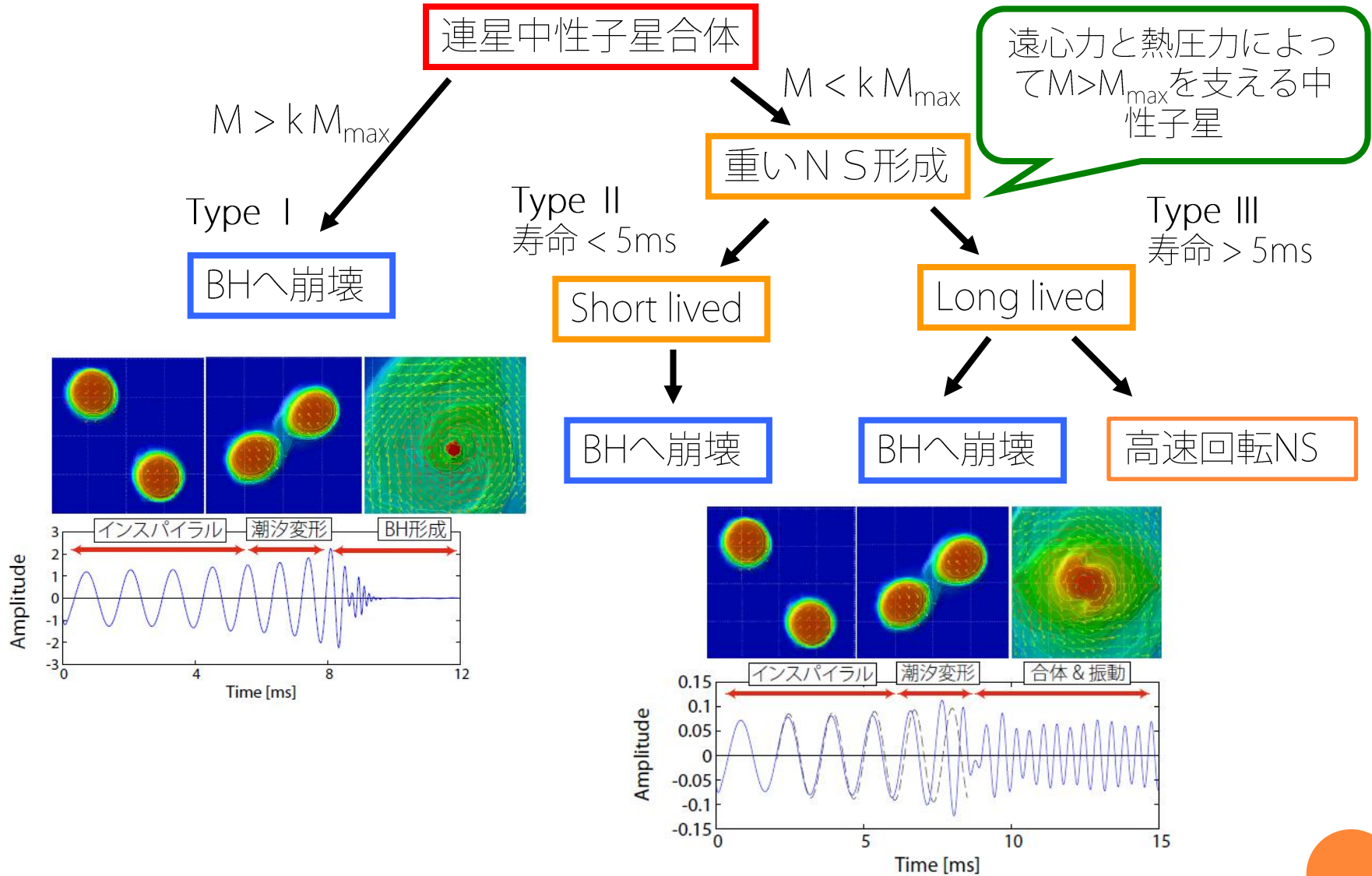
アニメーション (密度コントラスト@軌道面)



Animation by Kenta, Hotokezka

連星中性子星合体

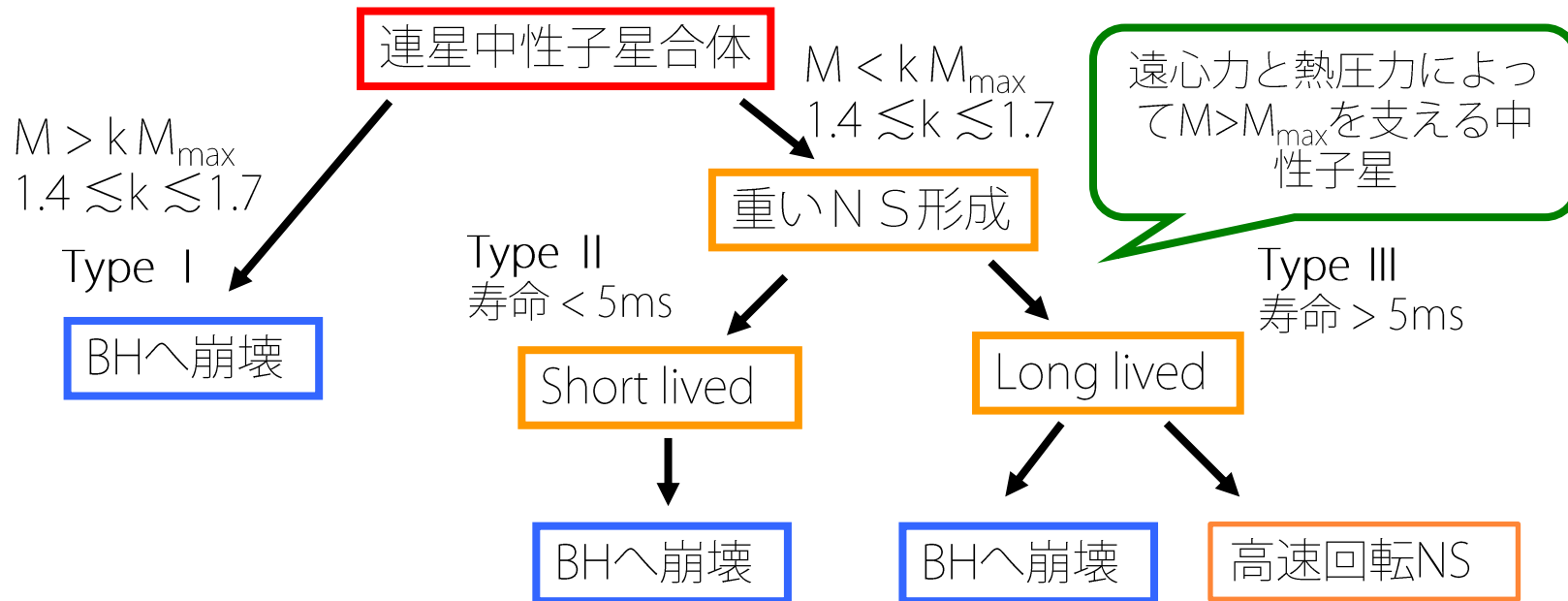
YITP, AEI, UIUC, Jena, MPA, many references



球対称星の最大質量 $M_{\max}$ が重く（軽く）、全質量 M が軽い（重い）NSはより右の進化をたどる。 $1.4 \lesssim k \lesssim 1.7$ (Hotokezaka+ 11)

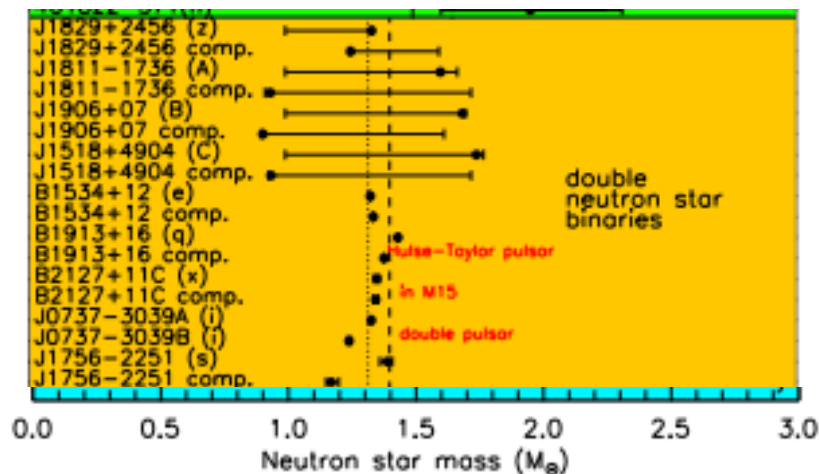
連星中性子星合体

YITP, AEI, UIUC, Jena, MPA, many references



どの進化がより現実的か？ ⇒ 右の進化がより現実的

観測されている中性子星質量 (Lattimer & Paraksh 06)

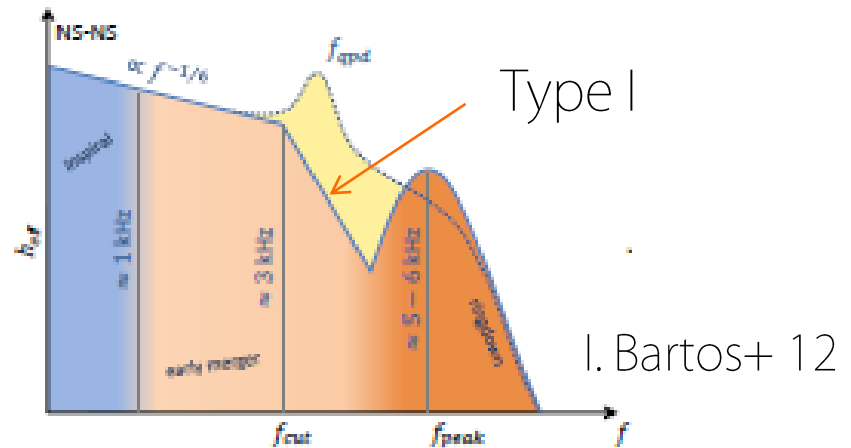
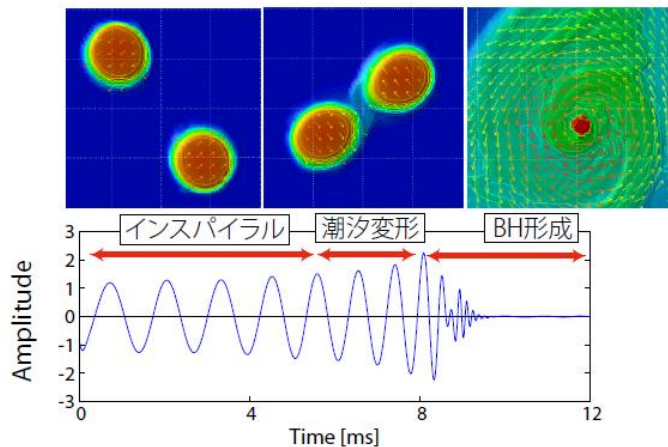


- ▶ Canonical $M = 2.7-2.8 M_{\odot}$
- ▶ $M_{\max} = 1.97 \pm 0.04 M_{\odot}$ (PSRJ1614-2230 (Demorest+ 10))

↓
 $M_{\max} = 2.01 \pm 0.04 M_{\odot}$
(PSR J0348+0432 (Antoniadis+13))

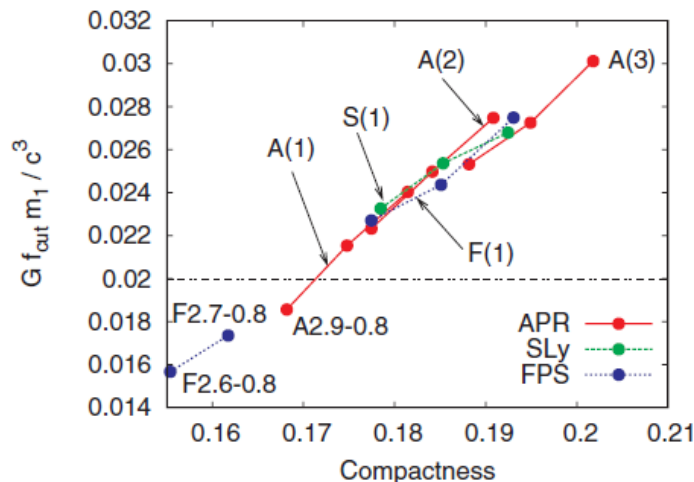
連星中性子星合体

Type I: ブラックホール直接崩壊の場合



カットオフ周波数 f_{cut} は合体を反映
 → 中性子星半径の情報は f_{cut} に刻印

▶ 様々な核密度状態方程式に対する系統的サーチ (KK+10)



f_{cut} — コンパクトネス (M/R) に相関

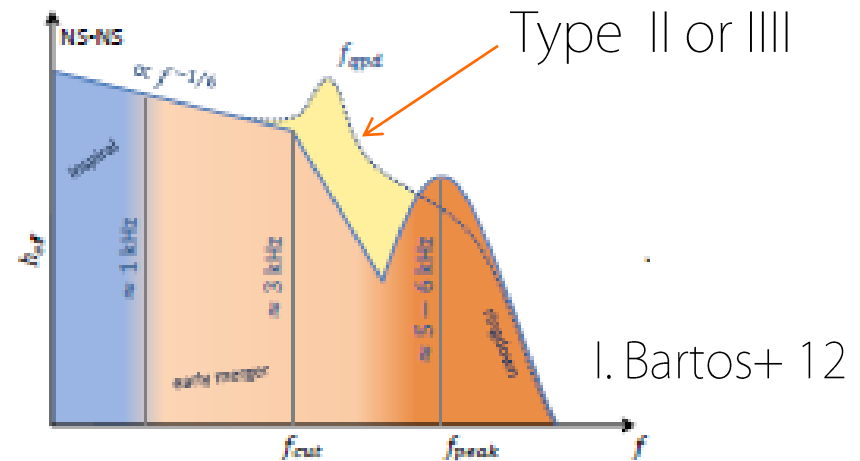
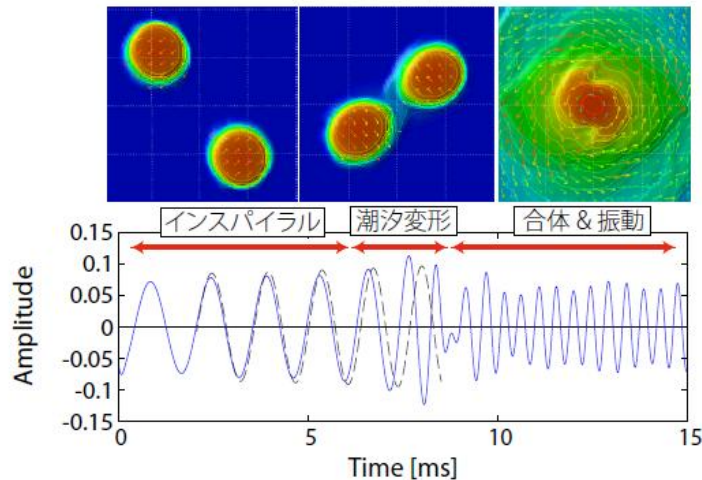
▶ インスパイラル波形から m_1, m_2 を決定

▶ 合体波形から f_{cut} を決定

⇒ M - R 関係を観測的に確立

連星中性子星合体

Type II and III : 大質量中性子星形成



大質量星の構造はピーク周波数 f_{peak} に反映される。
 $\Rightarrow f_{\text{peak}}$ を観測出来れば EOS に制限

様々な連星モデルについて系統的サーチ (Sekiguchi, KK+11, Hotokezaka, KK+12,13, KK+ in prep., Bauswein & Janka 12)

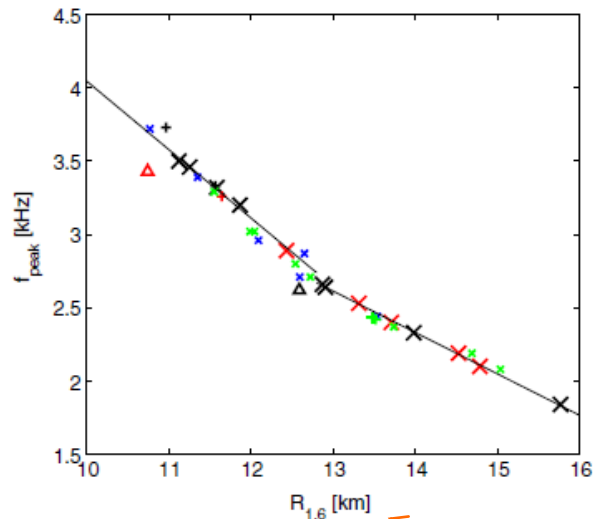
- ▶ 連星の全質量と質量比 ($0.8 \lesssim q \lesssim 1$ with total mass $2.7 M_{\odot}$, $2.8 M_{\odot}$)
- ▶ 核密度 EOS
 - ▶ 零温度 EOS (+thermal pressure) (many references)
 - ▶ 有限温度 EOS (+neutrino transfer) (Shen+98)



連星中性子星合体

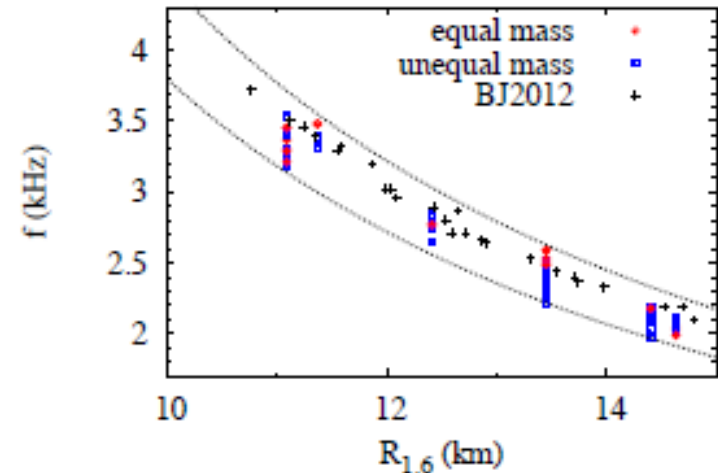
f_{peak} と中性子星半径 ($M_{\text{tot}} = 2.7 M_{\odot}$)

Bauswein & Janka (2012)



NS radius of $1.6 M_{\odot}$

Hotokezaka, KK+13



NS radius of $1.6 M_{\odot}$

▶ f_{peak} と中性子星半径に強い相関 (但し、分散あり)

f_{peak} が観測的に決められれば、 $R_{1.6}$ が推定できる。

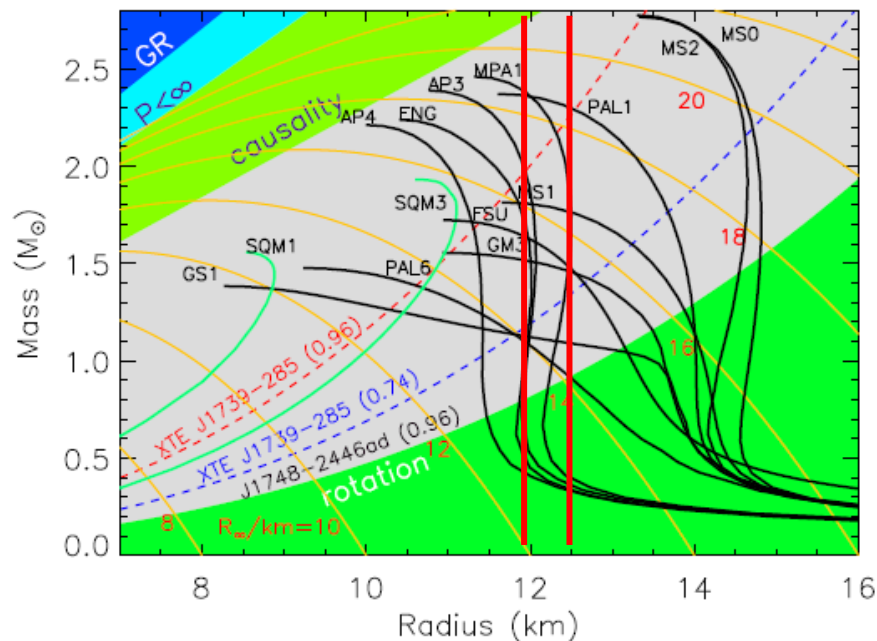
$\Delta f = 40$ Hzの精度で決められれば、 $\Delta R = 144 - 200$ m
但し、Adv. LIGOでのイベントレートは0.015-1.2 / yr
モデルも限定的



連星中性子星合体

さらに、

(Lattimer & Paraksh 06)



状態方程式の制限は可能 $\Rightarrow$ 真の状態方程式を決めるには付加的な情報が必要

重力波スペクトルのより詳細な形を解析 (Stergioulas et al. 2011)



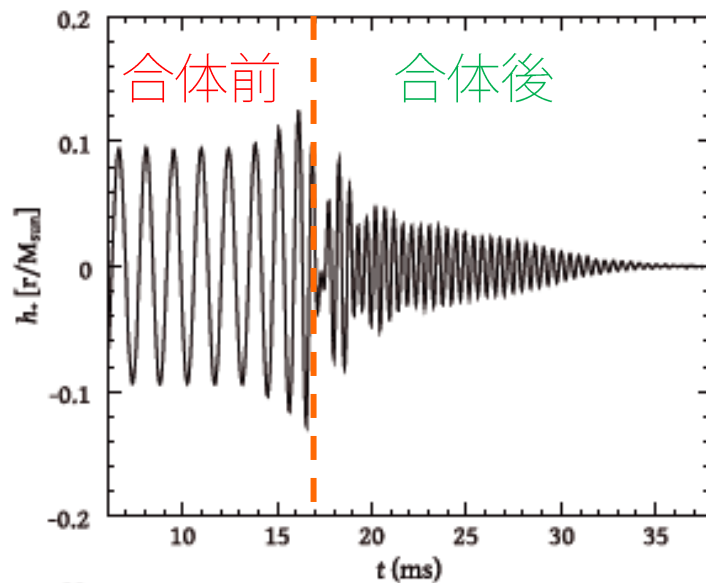
連星中性子星合体

固有モード解析

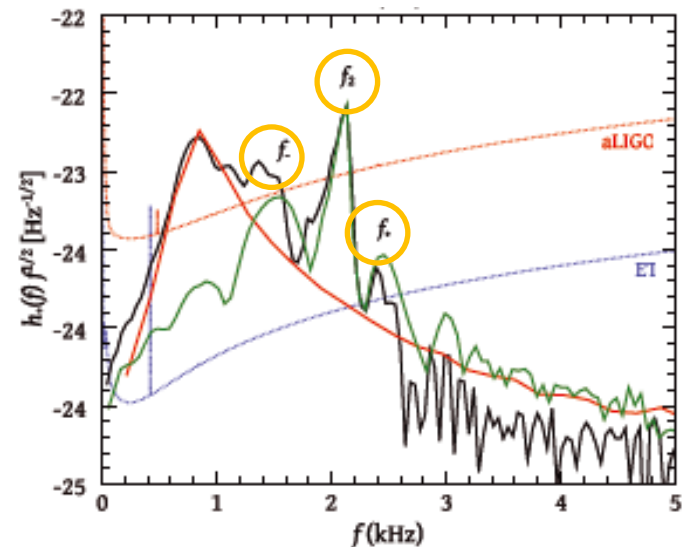
(Stergioulas et al. 2011)

Shen 1.2-1.35 $M_{\odot}$

重力波波形



重力波スペクトル(100Mpc)



合体後の波形スペクトルの構造は、ピーク(f_2)とサイドバンド($f_{\pm}$)という構造。

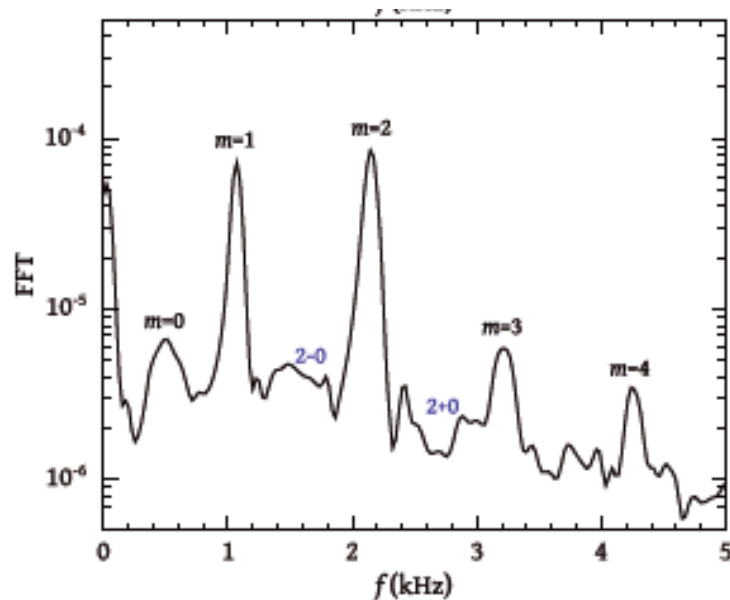


連星中性子星合体

固有モード解 (Stergioulas et al. 2011)

軌道面のデータ (圧力) をFourier変換

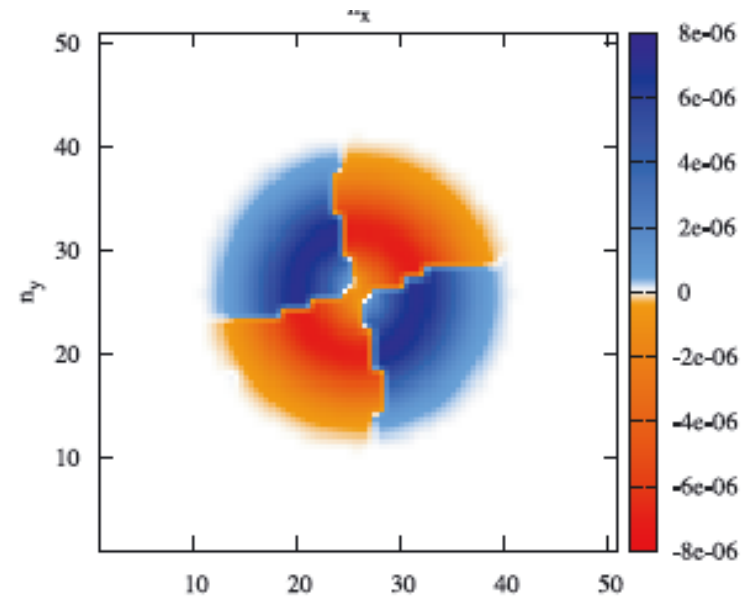
摂動 $\propto \exp(im\varphi)$



固有関数の
推定



m=2 の固有関数



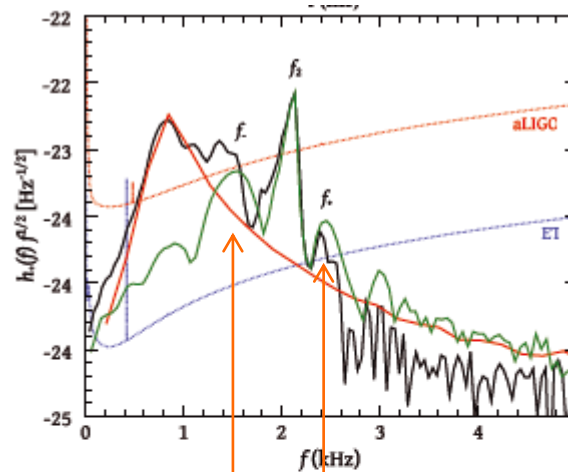
メインのピーク $m=0-4$ に加えて、サブピーク (非線形カップリング)

特に $m=2$ ピークの周りに、 $2-0(f_{m=2} - f_{m=0})$ 、 $2+0(f_{m=2} + f_{m=0})$



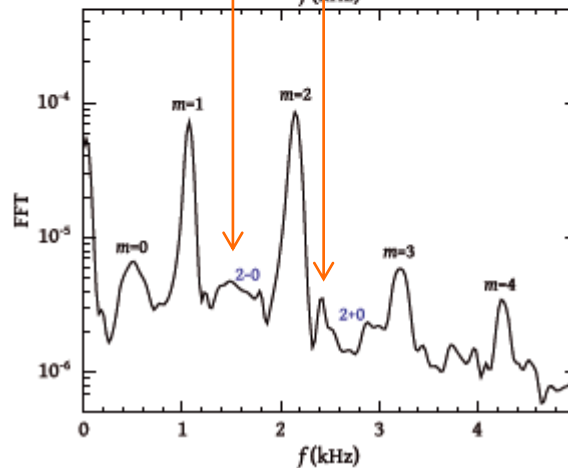
連星中性子星合体

重力波スペクトル



Model	$f_{m=0}$ (kHz)	$f_{m=1}$ (kHz)	$f_{m=2}$ (kHz)	$f_{m=3}$ (kHz)	$f_{m=4}$ (kHz)
Shen 12135	0.50	1.07	2.14	3.22	4.26
Shen 135135	0.46	–	2.24	–	4.11
LS 12135	1.10	1.55	3.12	4.66	–
LS 135135	0.98	–	3.30	–	–
MIT60 1111	1.56	–	2.92	–	5.94
MIT60 12135	1.24	1.72	3.26	–	–

モード解析



サイドバンドを観測できれば、 $f_{m=0}$ の情報も得られる。

Stergioulas et al.ではわずか6モデル⇒広範なパラメーターを調べる必要がある。さらに $f_{m=0}$ とEOSの相関関係を見出す必要性もあり。

研究

数値相対論シミュレーションは数値計算のコストが高い（特に有限温度EOSを実装した場合）

戦略

- ▶ 大質量中性子星を平衡形状でモデル化（様々な中心密度、温度、電子存在比、角速度分布に対して系統的に調べられる）
- ▶ 平衡形状(+摂動)を初期値にCowling近似でシミュレーションし、モード解析を行う

* Cowling近似=重力場の時間発展を解かない(Δt が大幅に大きく取れる)

目標

大質量星中性子星の星震と重力波スペクトルの構造の相関を明らかにする。

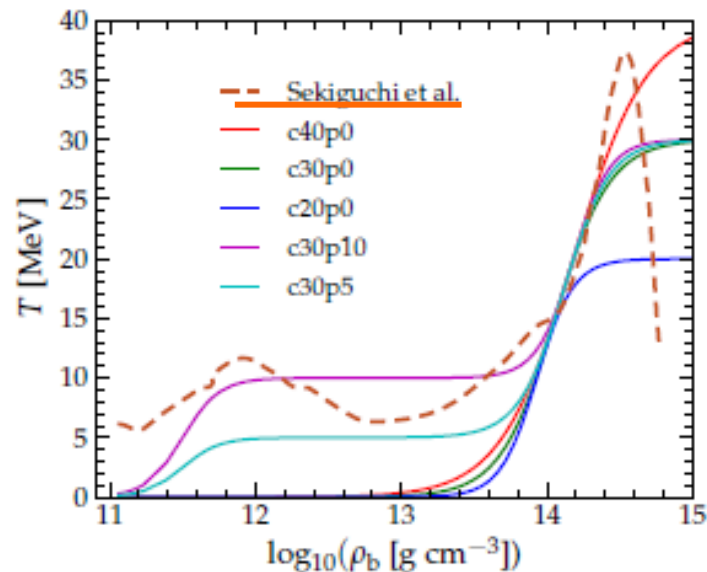


研究

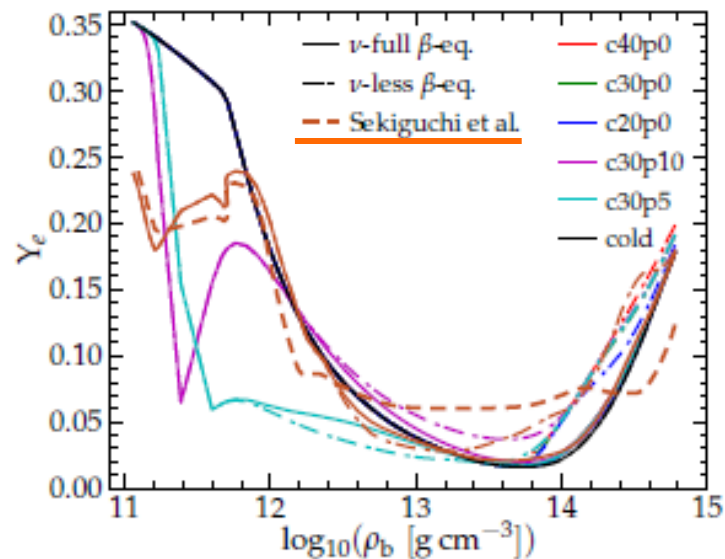
有限温度EOSを用いた回転星平衡形状 (Kaplan, Ott, O'Connor, Kiuchi, Roberts, and Duez 13 in submission)

平衡形状にはバロトロップ条件が必要 ; $Y_e(\rho), T(\rho)$

温度分布



電子存在比

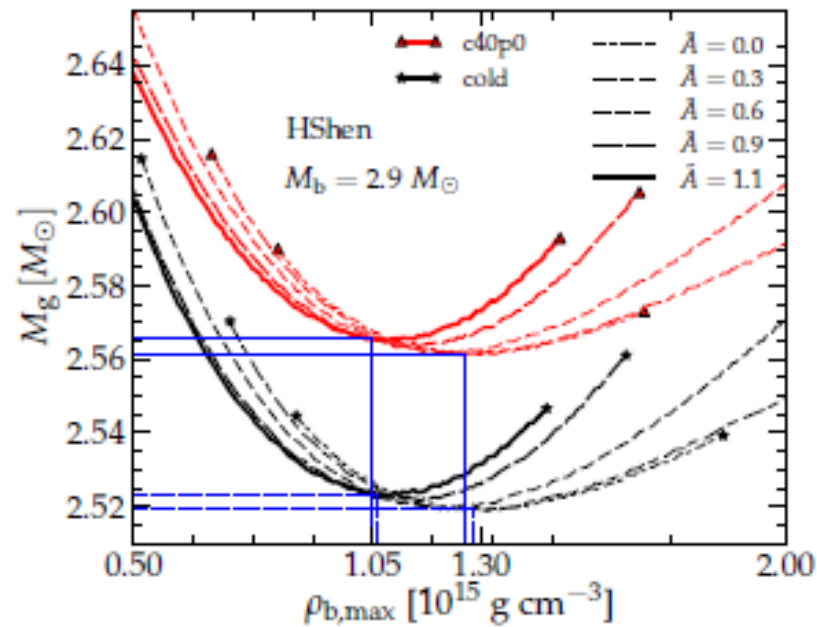


— Sekiguchi, KK et al. (2011)による連星中性子星合体の数値相対論シミュレーション



研究

有限温度EOSを用いた回転星平衡形状 (Kaplan, Ott, O'Connor, Kiuchi, Roberts, and Duez 13)



有限温度効果による最大質量増加は $\sim 0.04 M_\odot$ (但し、HShen)



まとめ

本研究の目的

重力波観測に向けて、連星中性子星合体後に過渡的に形成される大質量中性子星の振動モードを詳細に調べる。

戦略

- ▶ 回転星平衡形状の有限温度モデルの構築
- ▶ 初期条件にしたシミュレーションの実行とモード解析（数値コードは準備済み）

最終的には、重力波スペクトルと振動モードの相関を確立する。

