

高密度核物質と 高エネルギー一天体現象

中里 健一郎

(東京理科大・理工・物理)

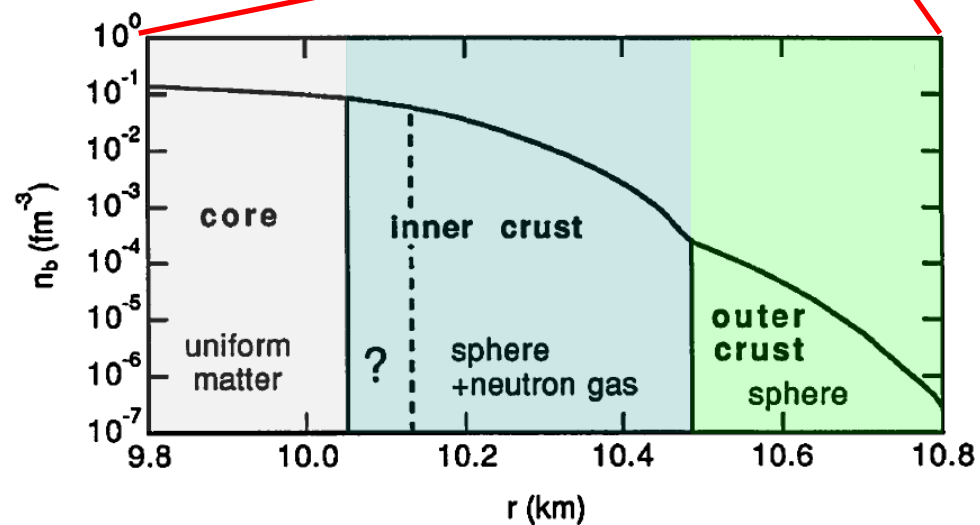
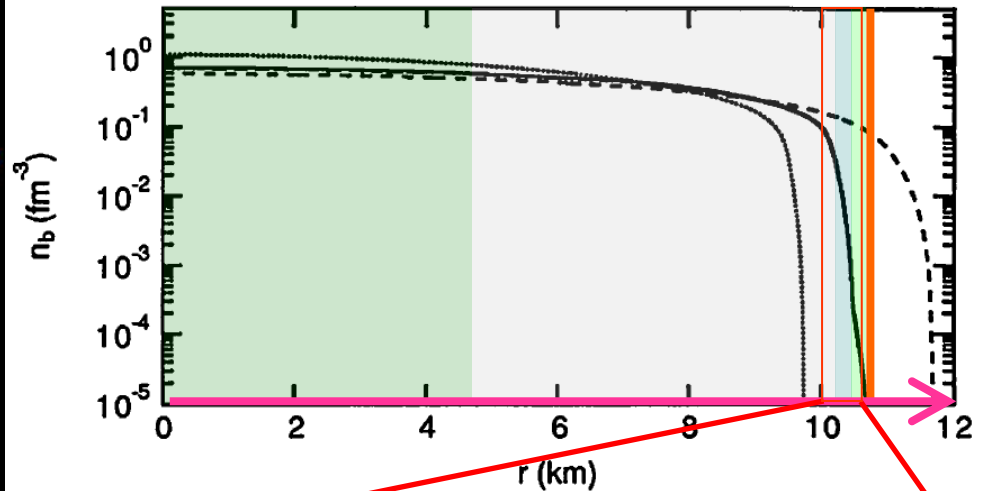
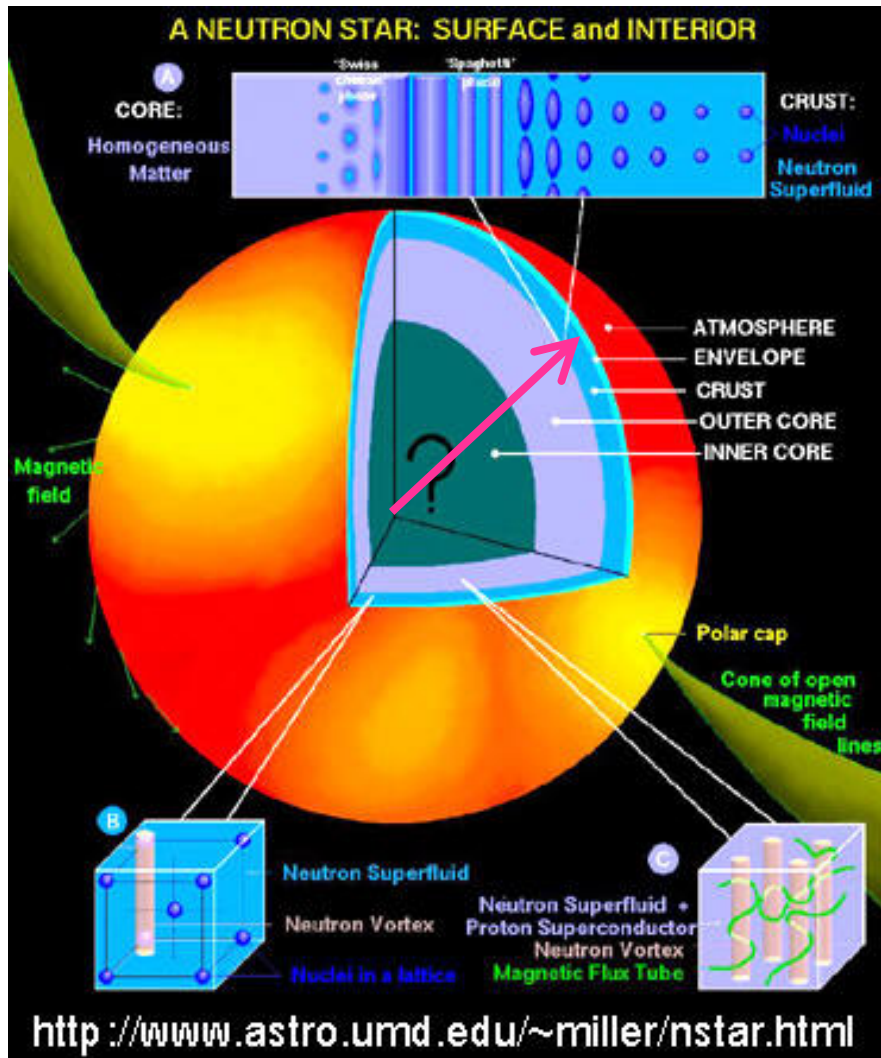
Talk Plan

- Introduction
 - 中性子星の構造と状態方程式
 - 太陽質量の2倍の中性子星
- 準周期的振動で探る中性子星クラスト
 - 軟 γ 線リピーターの巨大フレア現象
- 新しい天文学から迫る高密度核物質
 - ブラックホール形成時のニュートリノ放出

Introduction

中性子星の内部

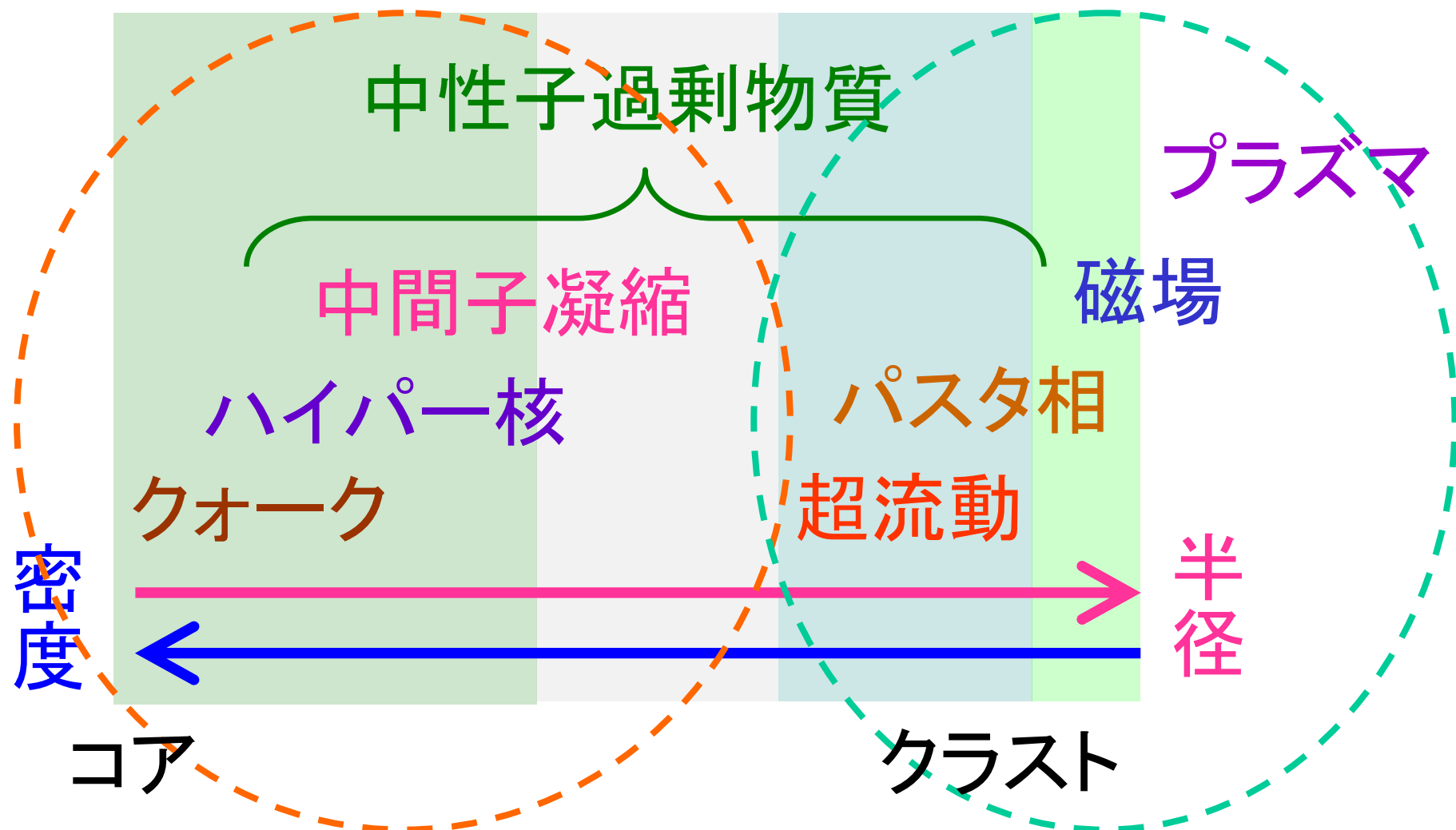
- ぎっしり詰まったコア + 薄皮1枚のクラスト



中性子星をとりまく物理

質量・半径の決定に重要

電磁放射に影響



中性子星の構造計算(1)

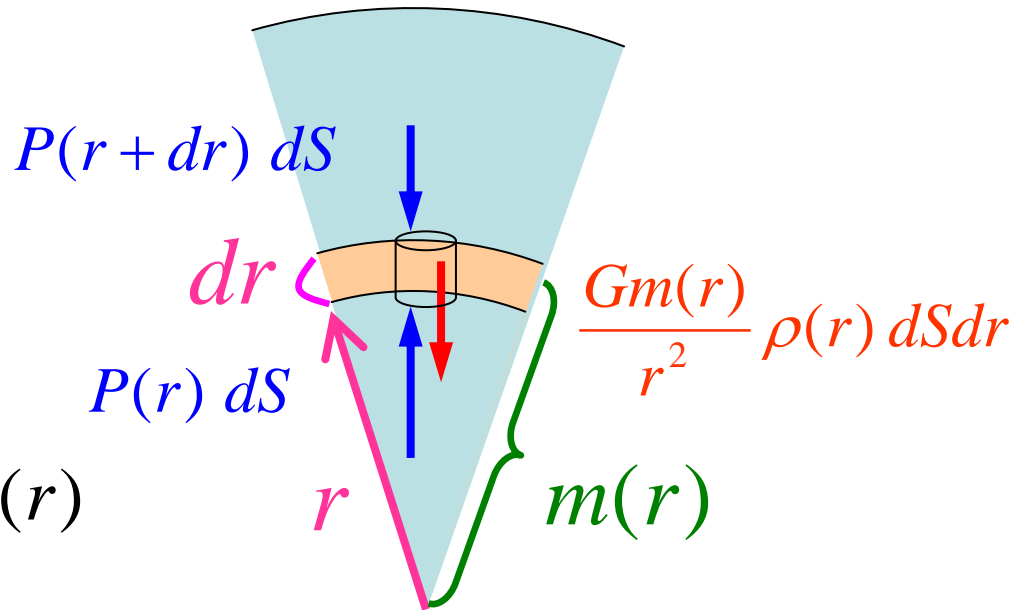
- ニュートン力学の場合

- 連続の式

$$m(r + dr) - m(r)$$

$$= 4\pi r^2 dr \rho(r)$$

$$\Rightarrow \frac{dm(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r)$$



- 力のつりあい

$$\{P(r + dr) - P(r)\} dS + \frac{Gm(r)}{r^2} \rho(r) dS dr = 0$$

$$\Rightarrow \frac{dP(r)}{dr} = -\frac{Gm(r)}{r^2} \rho(r)$$

中性子星の構造計算(2)

• 微分方程式を解く

$$\begin{cases} \frac{dm(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r) \\ \frac{dP(r)}{dr} = -\frac{Gm(r)}{r^2} \rho(r) \end{cases}$$

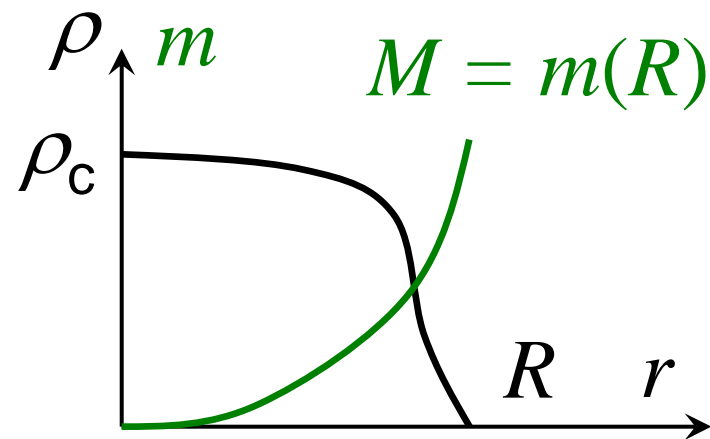
– 状態方程式

$$P = P(\rho)$$

– 境界条件

(中心 $r = 0$ で $m(r) = 0$
中心密度 ρ_c は仮定

($\rho(R) = 0$ が星の表面
半径 R 、質量 $M = m(R)$



中性子星の構造計算(3)

- 一般相対論の場合

- 相対論効果の強さ(コンパクトネス)

$$\frac{2GM}{Rc^2} \sim 0.4 \quad \begin{cases} R = 10 \text{ km} \\ M = 1.5M_{\odot} \text{ (太陽質量 } M_{\odot} = 2 \times 10^{33} \text{ g)} \end{cases}$$

→ $\frac{2GM}{Rc^2} = 1$ でブラックホール

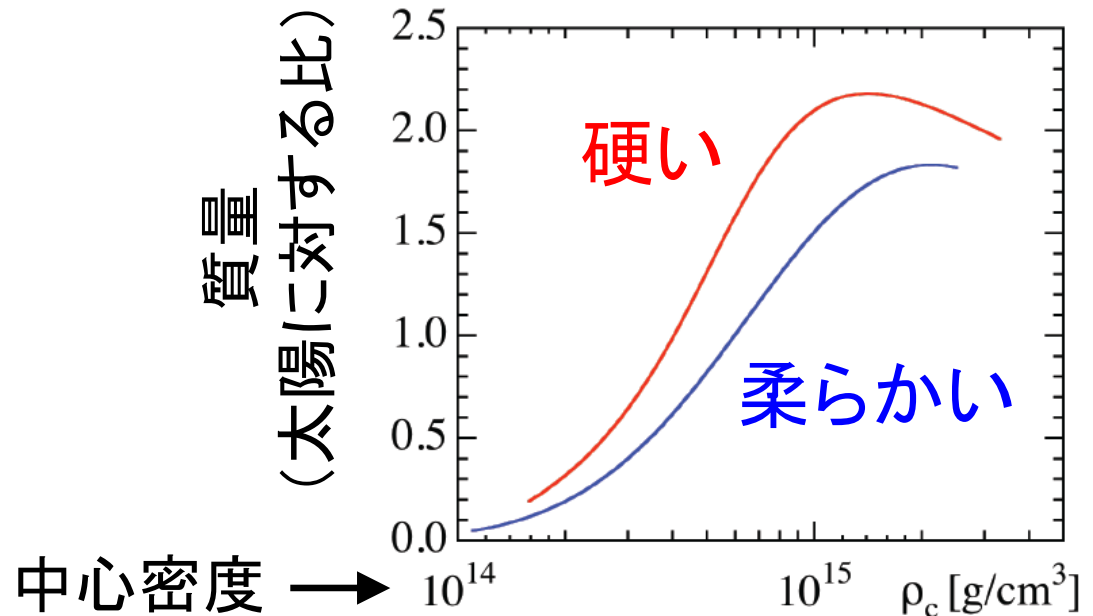
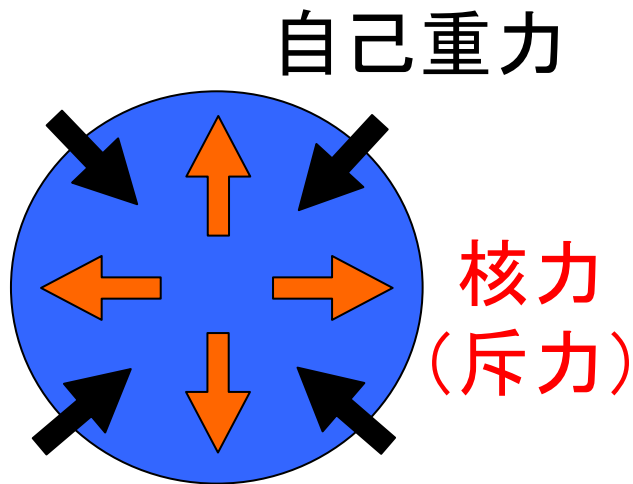
- TOV 方程式

$$\frac{dP(r)}{dr} = - \frac{G \left\{ m(r) + 4\pi r^3 P(r) / c^2 \right\} \left\{ \varepsilon(r) + P(r) \right\}}{r^2 \left\{ 1 - 2Gm(r) / rc^2 \right\} c^2}$$

~ P(r)

中性子星の最大質量

- 平衡形状として支えられる質量には最大値が存在する。
 - 重すぎるとつぶれて、ブラックホールになる。
 - **状態方程式が硬いほど最大質量が大きい。**

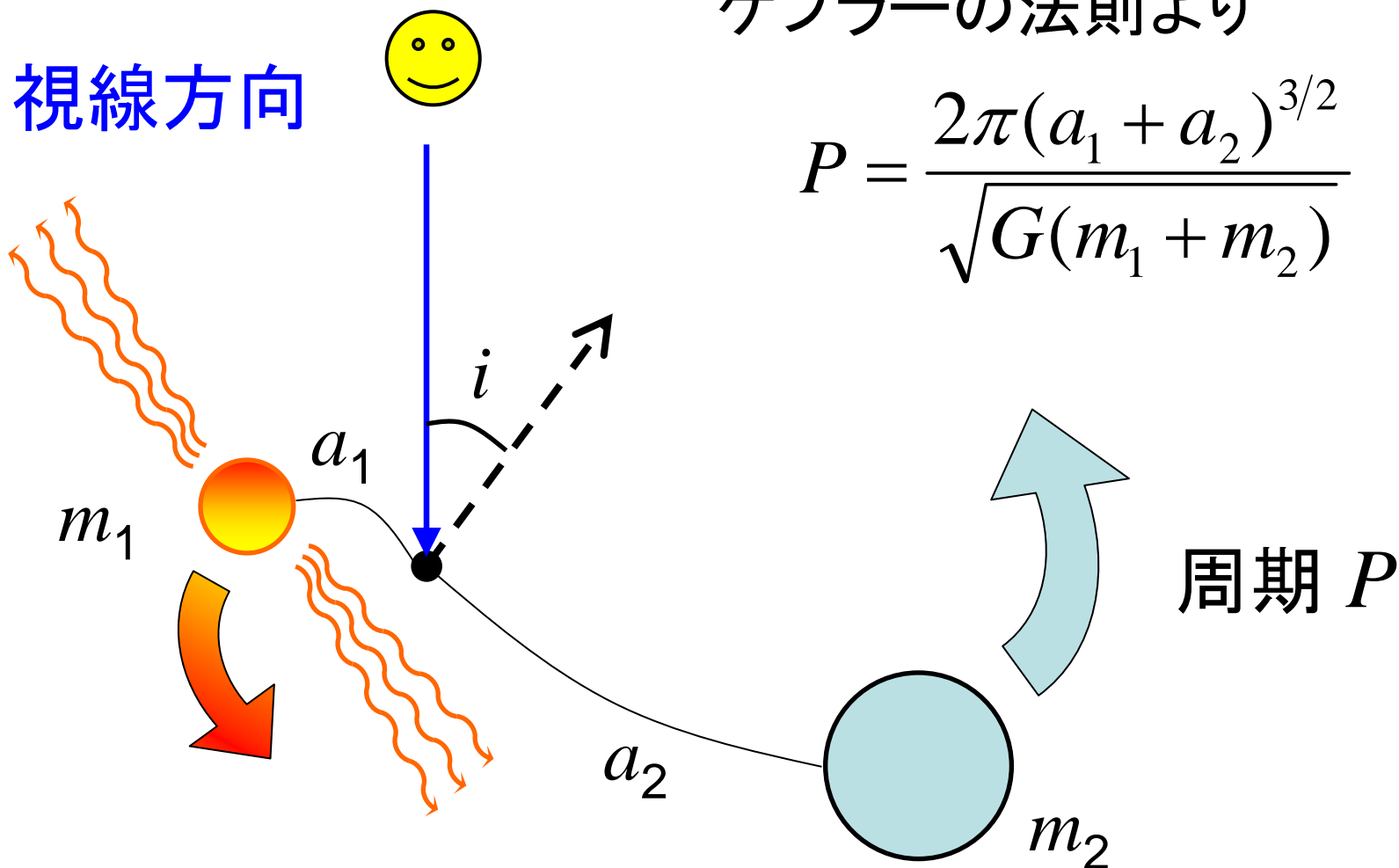


中性子星の質量観測(1)

- パルサーが連星を組んでいる場合

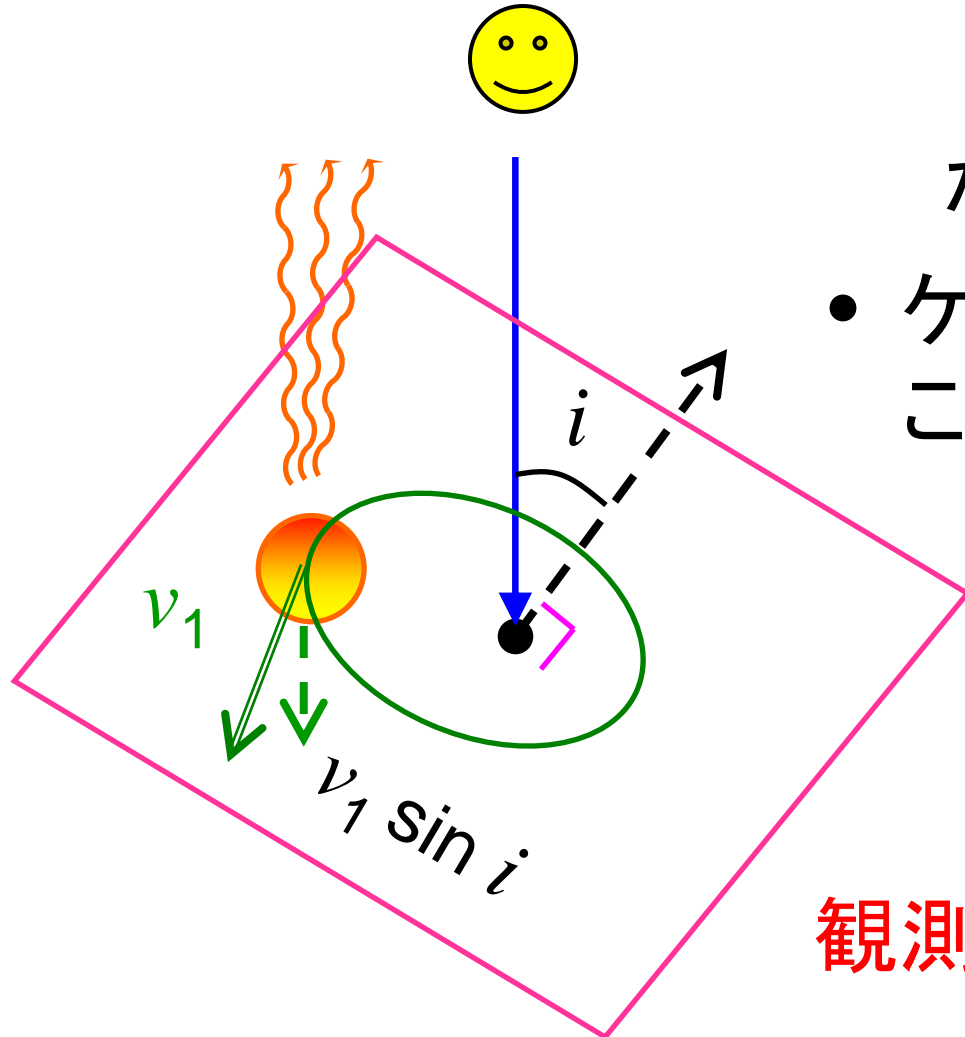
ケプラーの法則より

$$P = \frac{2\pi(a_1 + a_2)^{3/2}}{\sqrt{G(m_1 + m_2)}}$$



中性子星の質量観測(2)

- ドップラー効果から公転速度の視線方向成分



$$v_1 \sin i$$

がわかる。

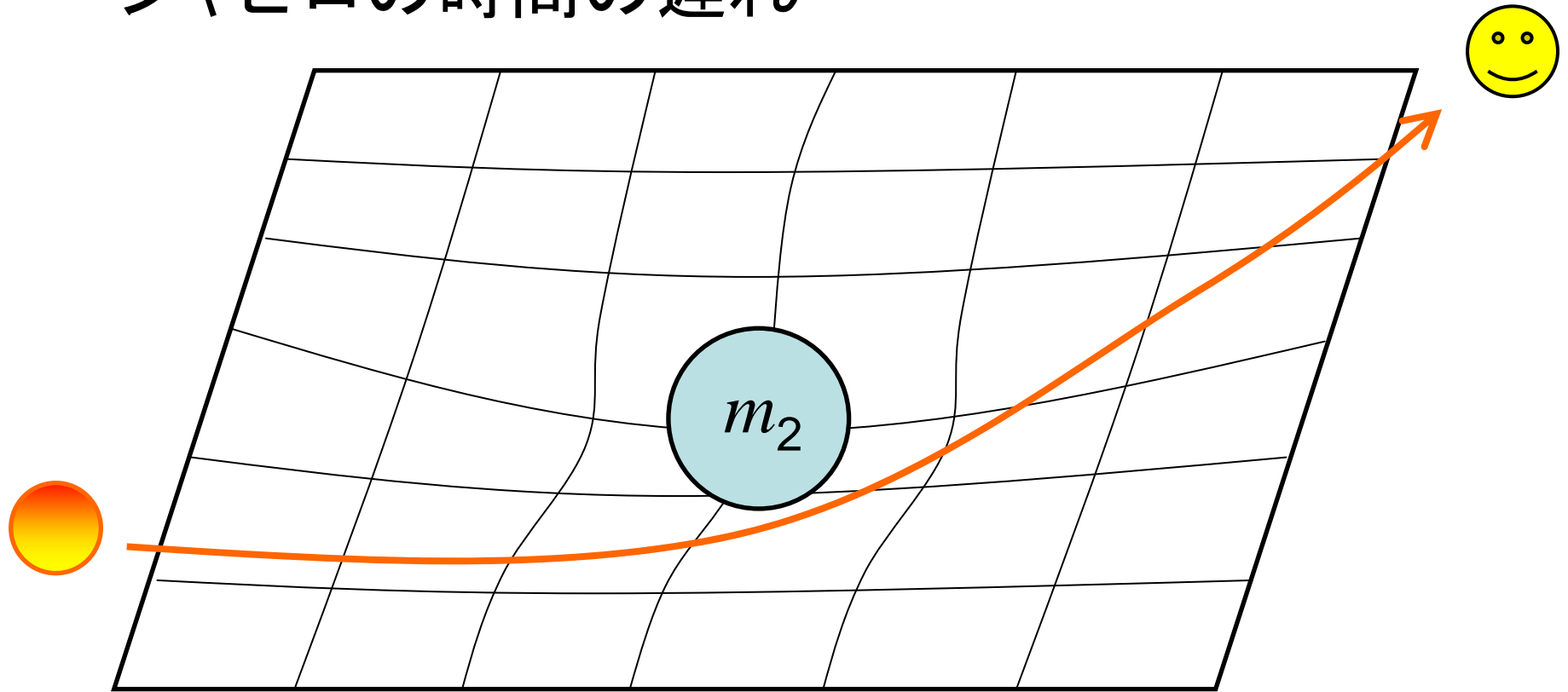
- ケプラー運動であることを使うと

$$f = \frac{(m_2 \sin i)^3}{(m_1 + m_2)^2} = \frac{4\pi^2 a_1^3 \sin^3 i}{GP^2}$$

観測量

中性子星の質量観測(3)

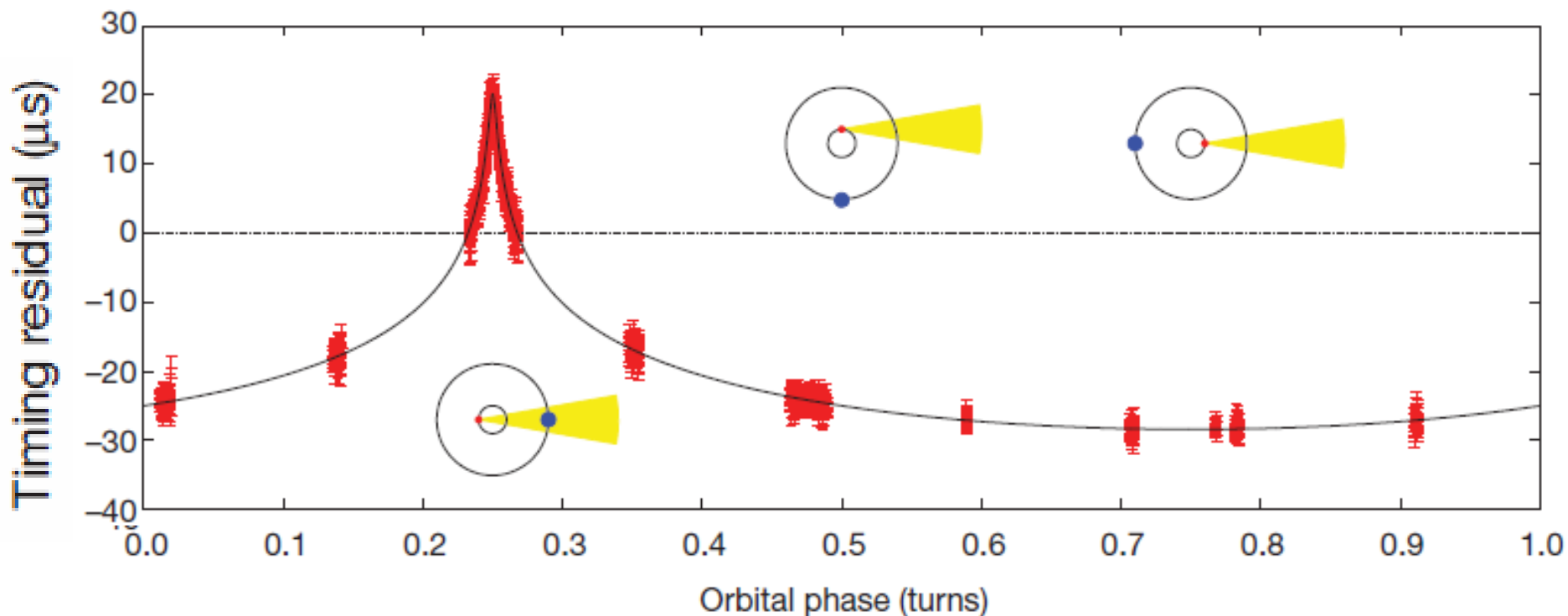
- シャピロ時間の遅れ



- 空間がたわんだ分、行路長が伸び、光が遅れる。
- m_2 , $\sin i$ に依存。 i が大きいほど顕著

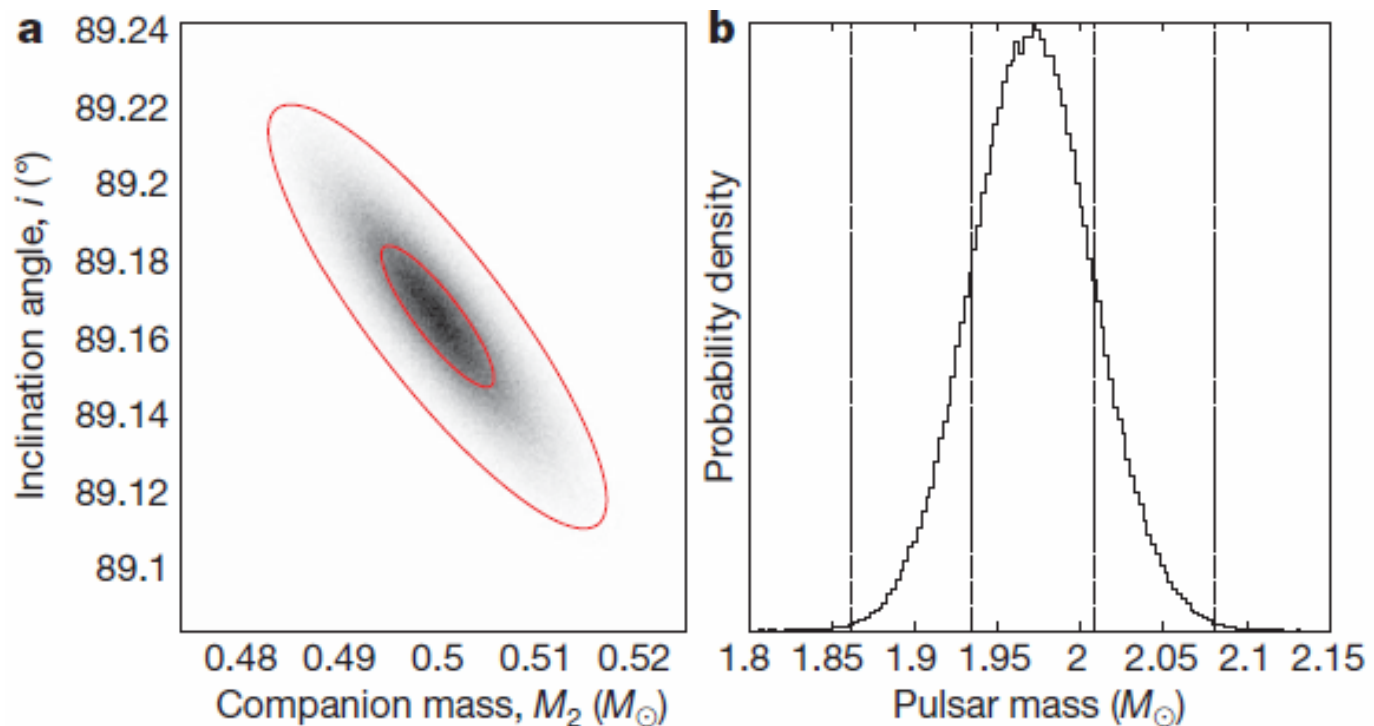
中性子星の質量観測(4)

- Demorest et al., Nature 467 (2010) 1081
 - パルサー J1614-2230 のシャピロ時間遅れを測った。
 - m_2 , $\sin i$ を fitting で決める。
→ f から m_1 も求まる。



中性子星の質量観測(5)

- Demorest et al., Nature 467 (2010) 1081
 - goodness of fit

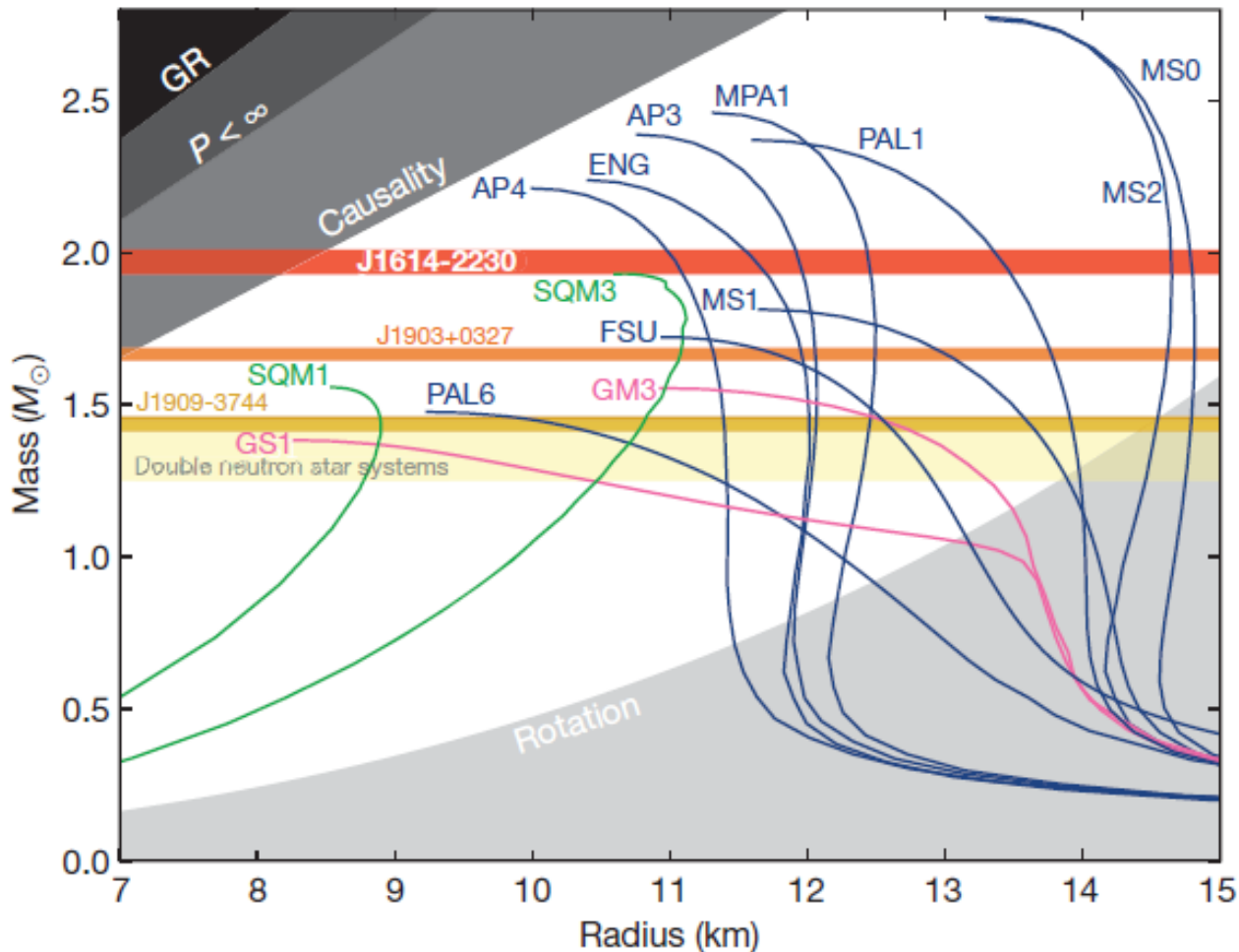


- パルサー質量 $m_1 \sim 2 M_\odot$
 - 最大質量がこれを超えない状態方程式は棄却。

中性子星の質量：理論と観測

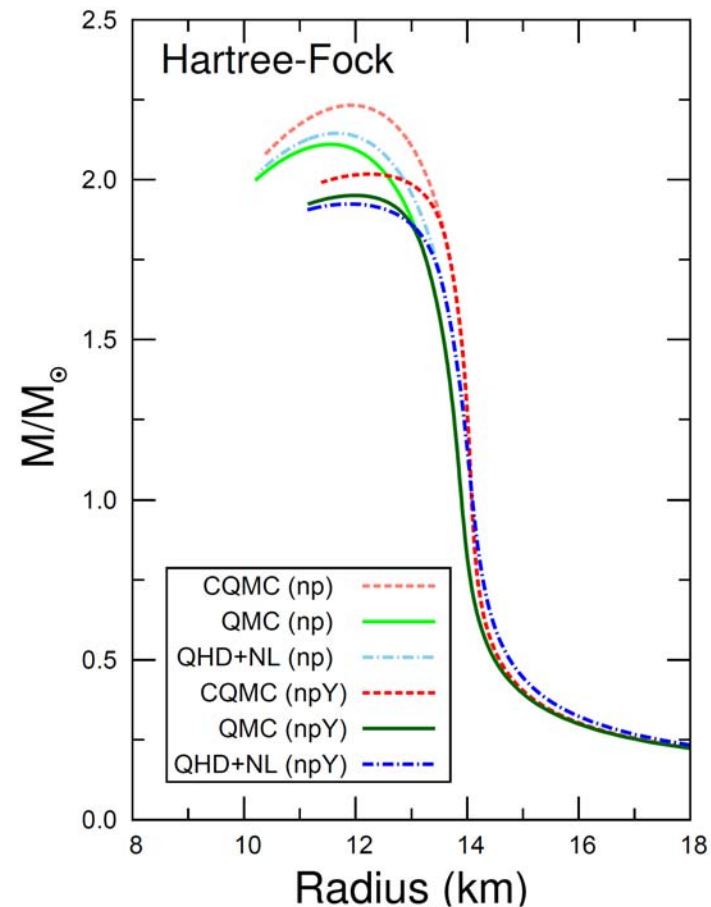
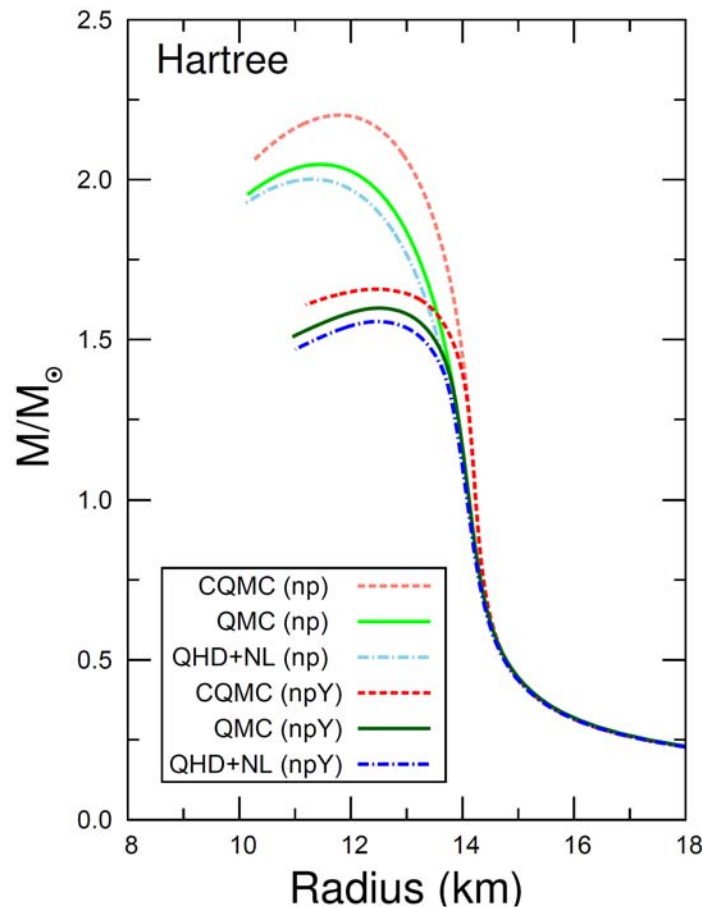
- ハイペロンを入れると $2M_{\odot}$ を支えられない！
 - クォークの存在？

Demorest et al., Nature 467 (2010) 1081



$2M_{\odot}$ を支えられるモデル

- Miyatsu et al., PLB 709 (2012) 242
 - Fock 項まで考慮するとテンソル斥力により、ハイペロン生成が抑制される。



つまり、、、

- 中性子星を見れば高密度核物質が分かる！？
- ただし、観測されるのは積分量！

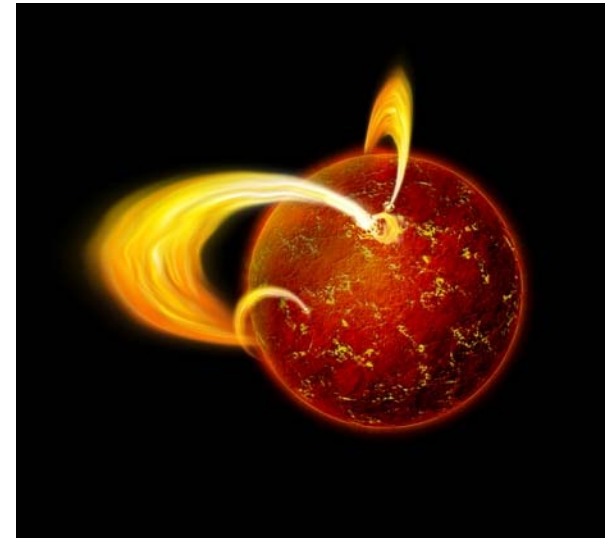
$$\int (\text{ハイパー核} \cdot \text{クォーク} \cdot \text{パスタ相} \cdots) dr$$

- 他の地上実験や理論による補完が不可欠
- 本日は以上のことを念頭におきつつ、最近の自らの研究を中心にいくつかのトピックスを紹介させていただきます。

準周期的振動で探る 中性子星クラスト

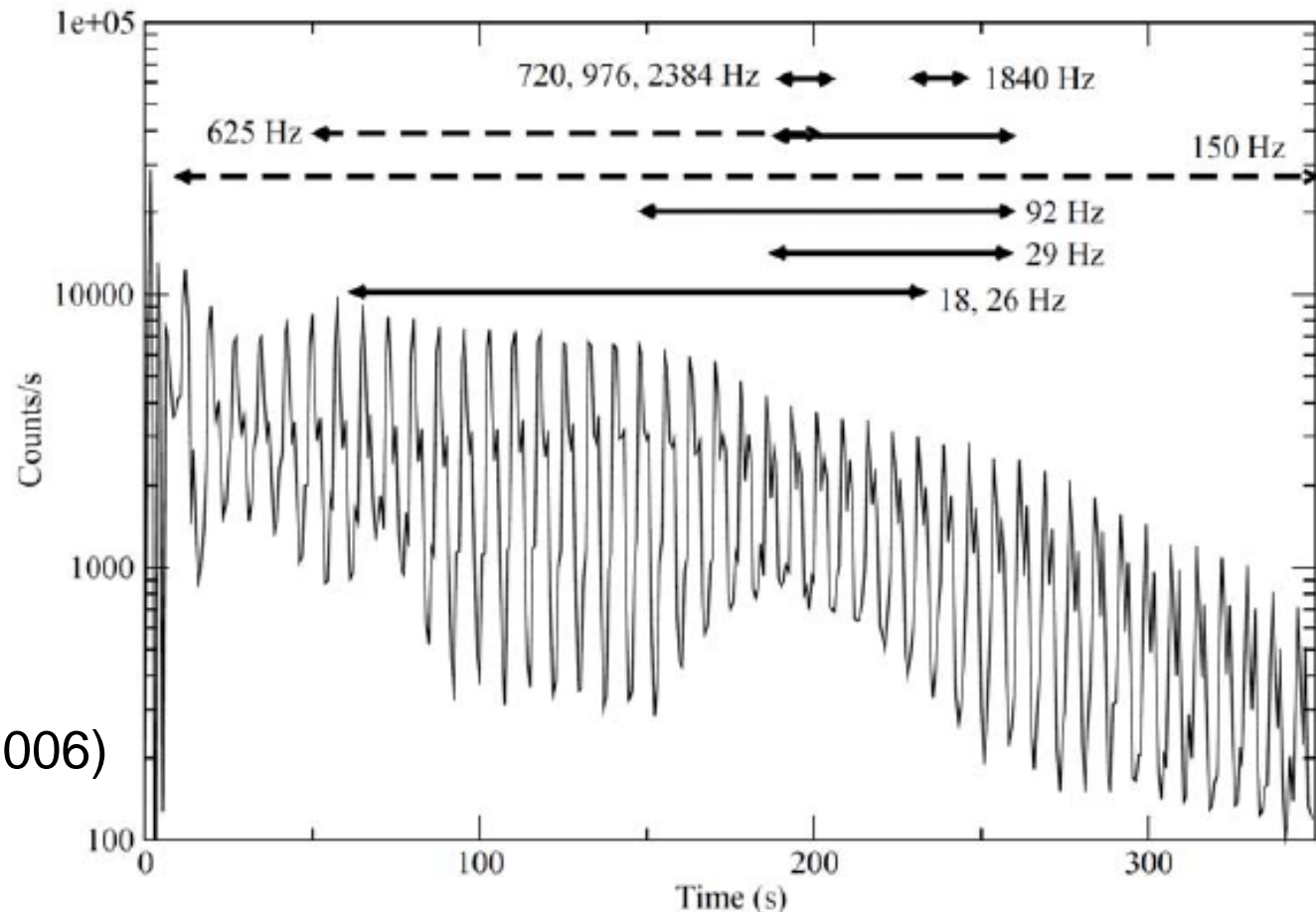
中性子星の巨大フレア現象

- Soft gamma-ray repeater (SGR)
 - 強磁場中性子星 ($>10^{14}\text{G}$)
 - 散発的に X 線や γ 線を放出
- まれに巨大フレアを起こす
 - SGR 0526–66 (1979)
 - SGR 1900+14 (1998)
 - SGR 1806–20 (2004)
- 減衰過程 (SGR 1806–20) が観測されている。
 - Rossi X-ray Timing Explorer (RXTE)
 - Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI)



準周期的振動 (QPO)

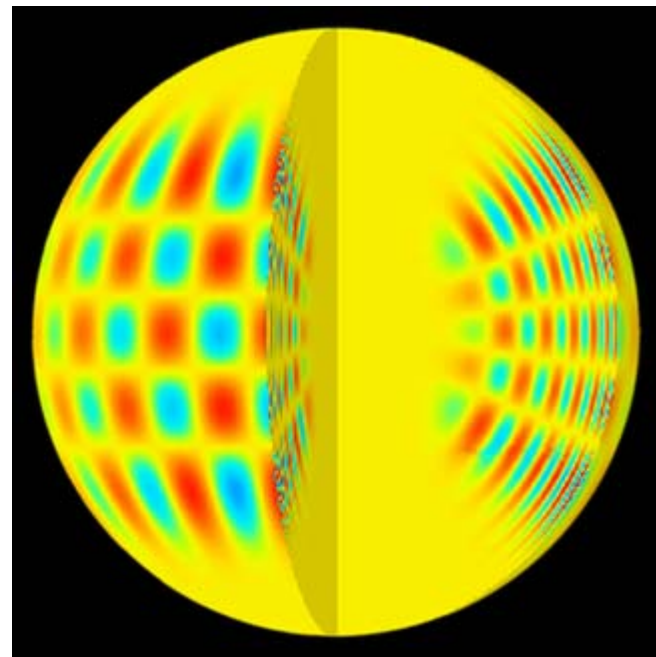
- 巨大フレアの減衰過程に準周期振動 (quasi-periodic oscillation: QPO) を発見



(Strohmayer & Watts 2006)

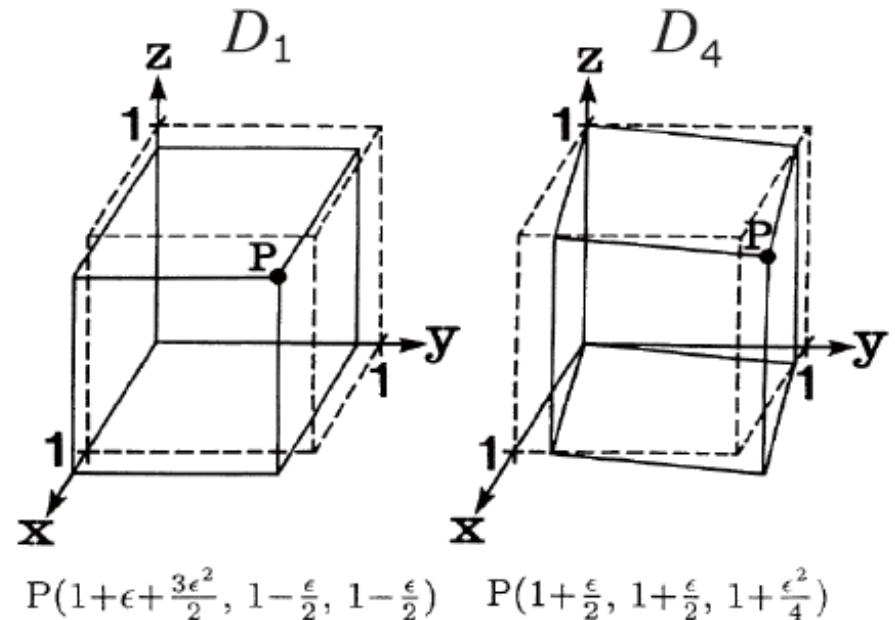
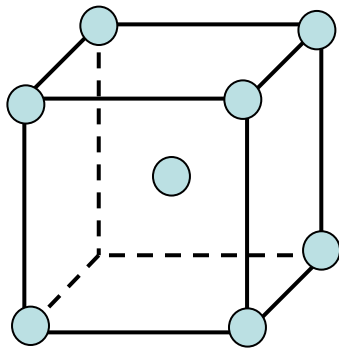
星震学

- 地震波から地球内部を探る。
→ 地震学
- 太陽表面の固有振動モード観測による、太陽内部診断。
→ 日震学
- QPO から中性子星内部を探る。
→ 星震学



クラストでのねじれ振動

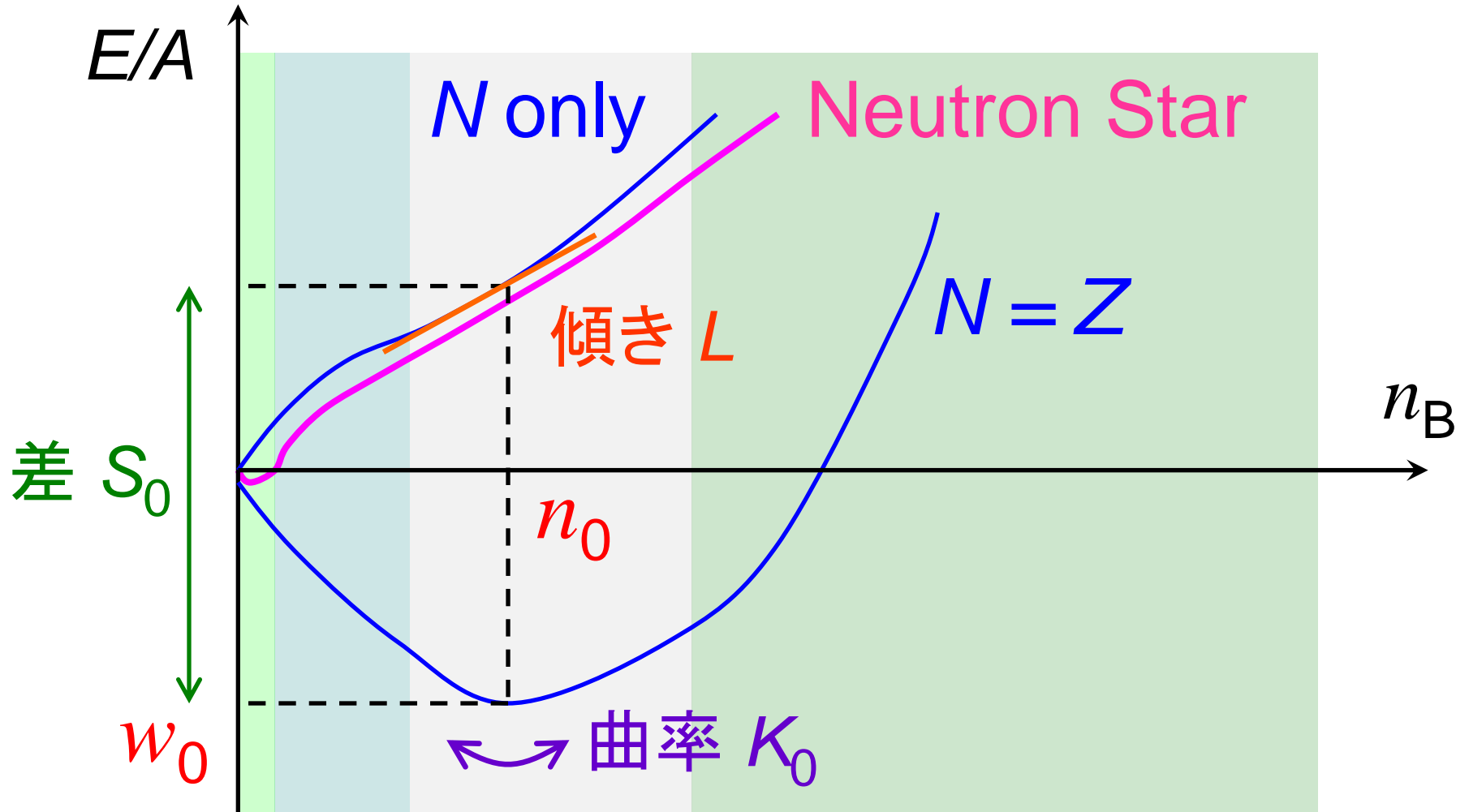
- 観測された QPO の起源？
 - 別の説: コアにおける磁気流体的振動
- クラストでは原子核は bcc lattice を組む。
 - shear modulus: $\mu = 0.1194n_i(Ze)^2/a$
 - Z : 陽子数



(Ogata and Ichimaru, 1990)

飽和密度付近の状態方程式

Oyamatsu and Iida Phys. Rev. C 75 (2007) 015801



- クラストでの原子核サイズの計算に適用。

Thomas-Fermi 計算

- 一様核物質状態方程式

$$w = w_0 + \frac{K_0}{18n_0^2}(n - n_0)^2 + \left[S_0 + \frac{L}{3n_0}(n - n_0) \right] \alpha^2$$

- 原子核質量や半径のデータを再現するようにパラメータを決める。

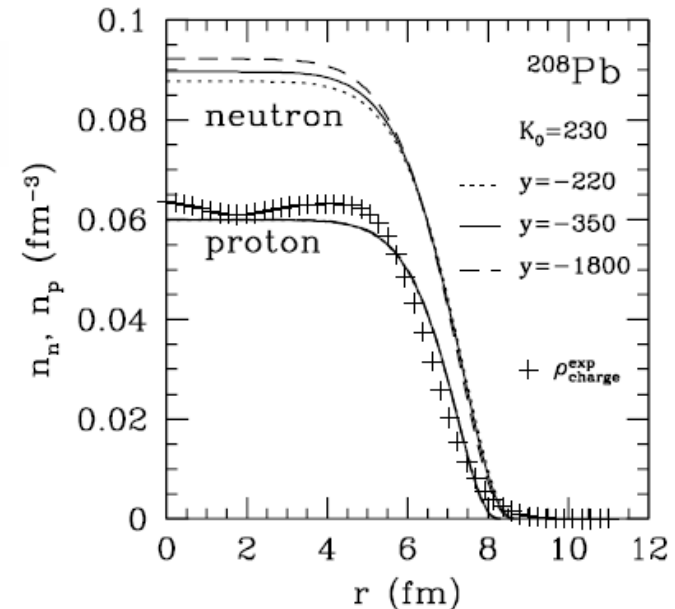
非対称度

$$E = E_b + E_g + E_C + Nm_n + Zm_p,$$

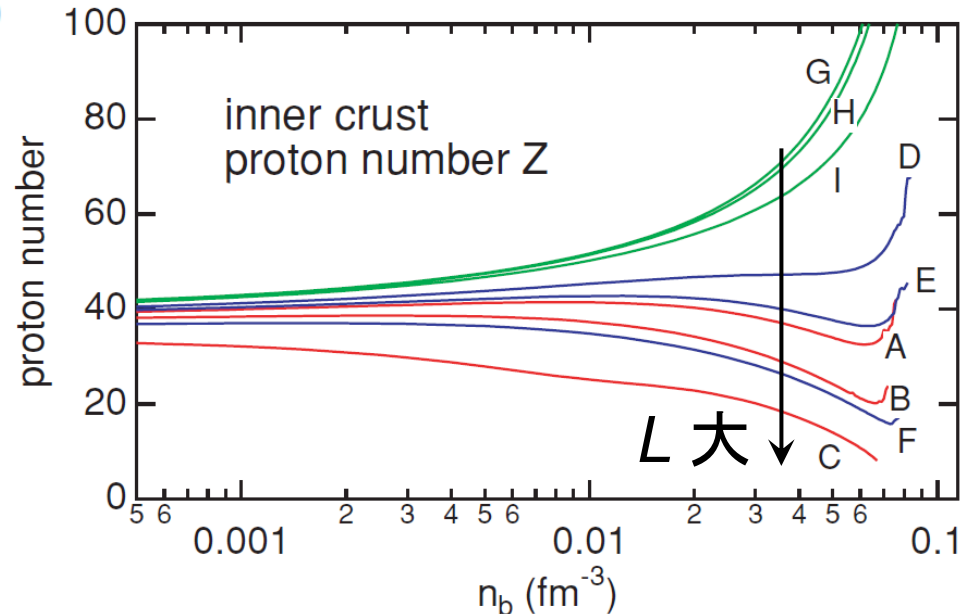
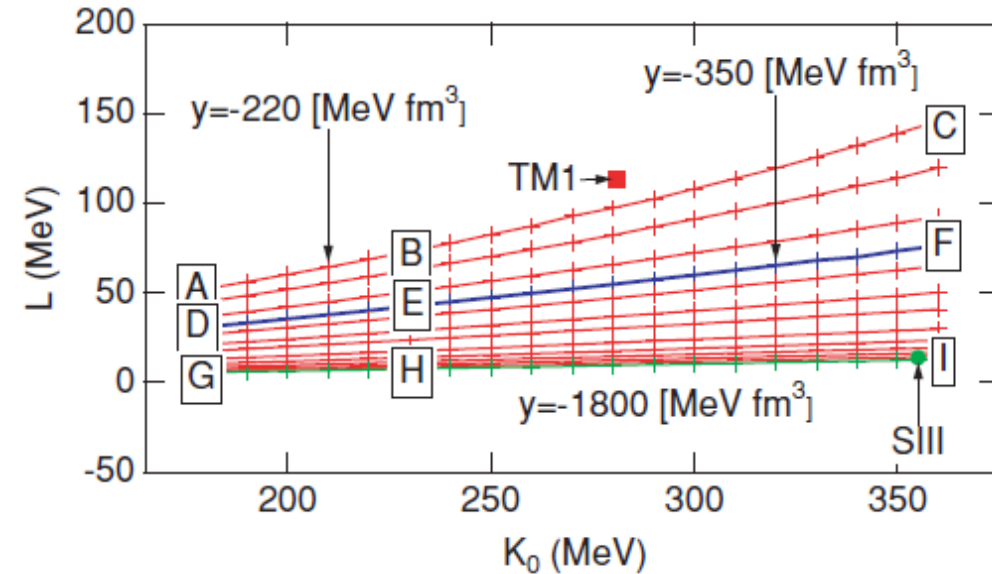
$$E_b = \int d^3r n(\mathbf{r}) w(n_n(\mathbf{r}), n_p(\mathbf{r}))$$

$$E_g = F_0 \int d^3r |\nabla n(\mathbf{r})|^2$$

$$E_C = \frac{e^2}{2} \int d^3r \int d^3r' \frac{n_p(\mathbf{r})n_p(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}$$



クラストにおける原子核サイズ

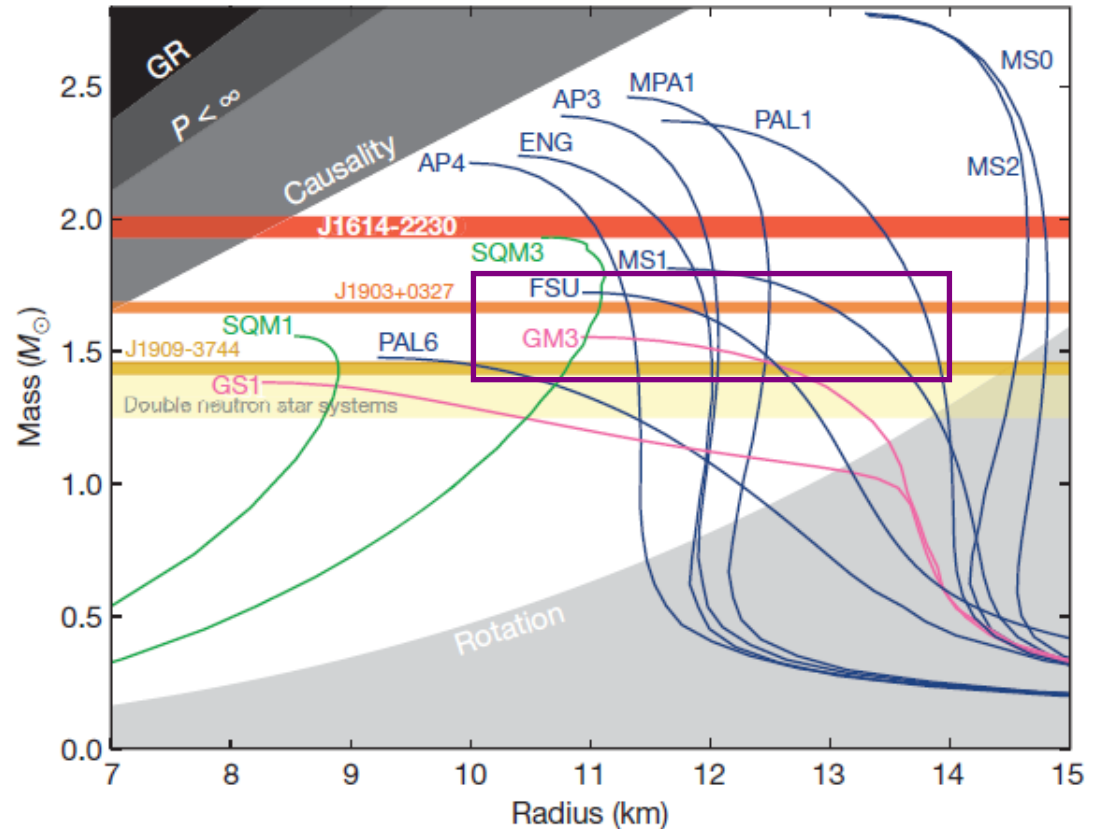


- 主に L に依存する。

クラスト振動の計算

Sotani, Nakazato, Iida and Oyamatsu
Phys. Rev. Lett. **75** (2012) 201101

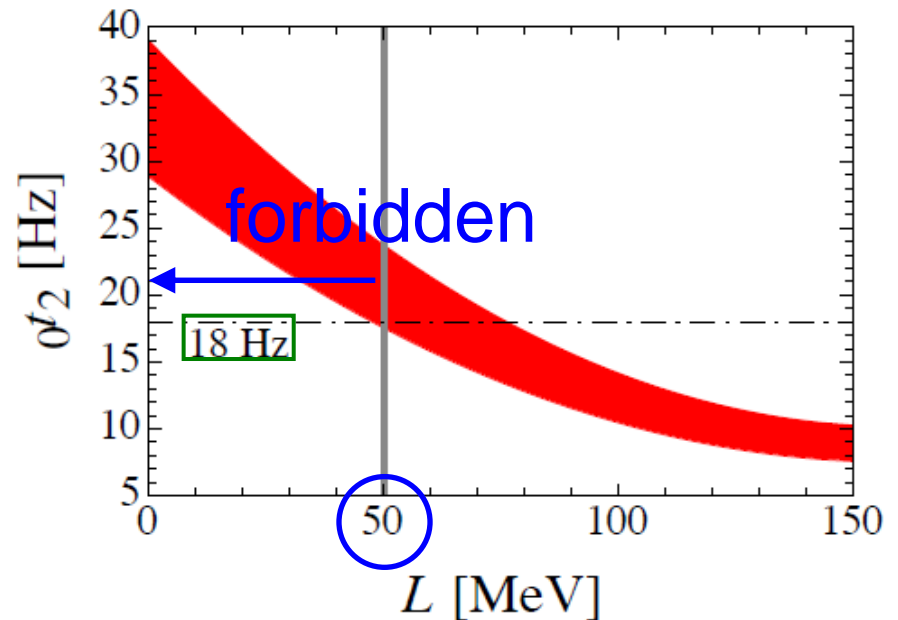
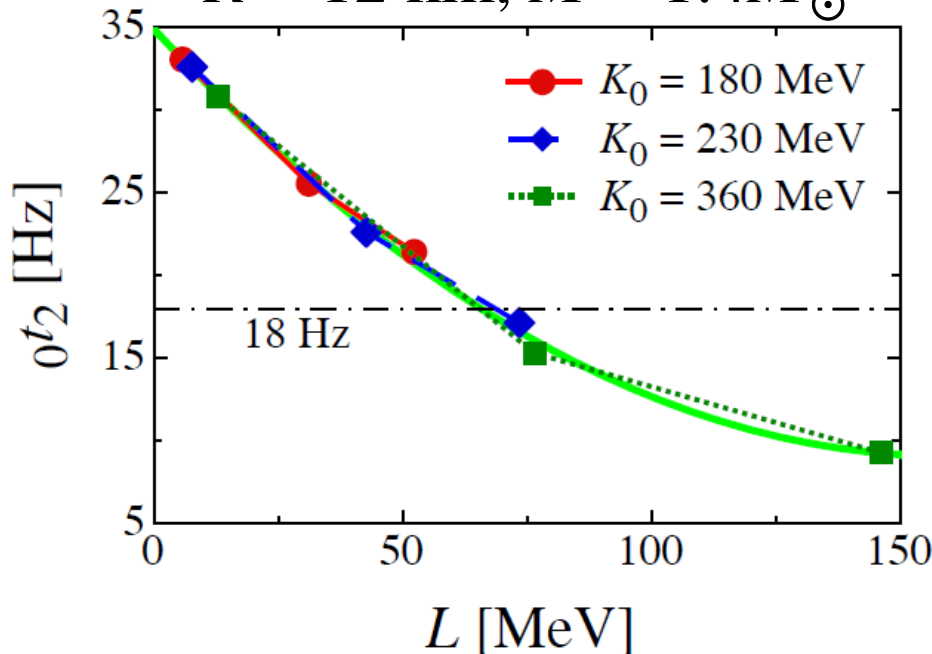
- 一般相対論的摂動計算
- TOV 方程式から中性子星の構造を計算。
 - M, R を固定して外側から解く。
- 基準振動数 ${}_0t_2$ を求める。



パラメータ L への制限

- クラスト振動の振動数は L に強く依存し、 K_0 にはあまり依存しない。
 - 陽子数が主に L で決まるため。
- 18 Hz の QPO を説明するには $L > 50$ MeV

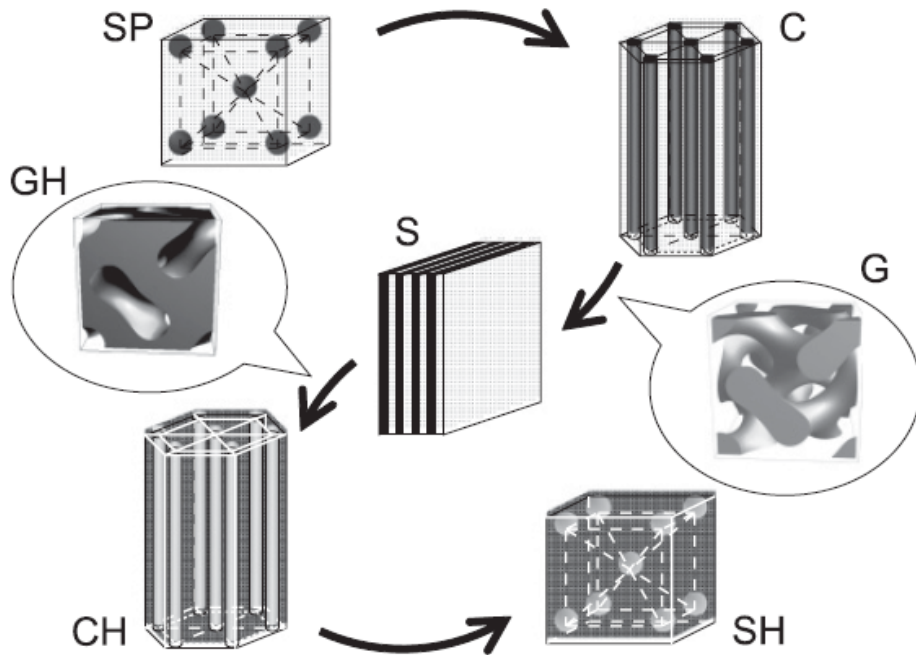
$R = 12$ km, $M = 1.4M_{\odot}$



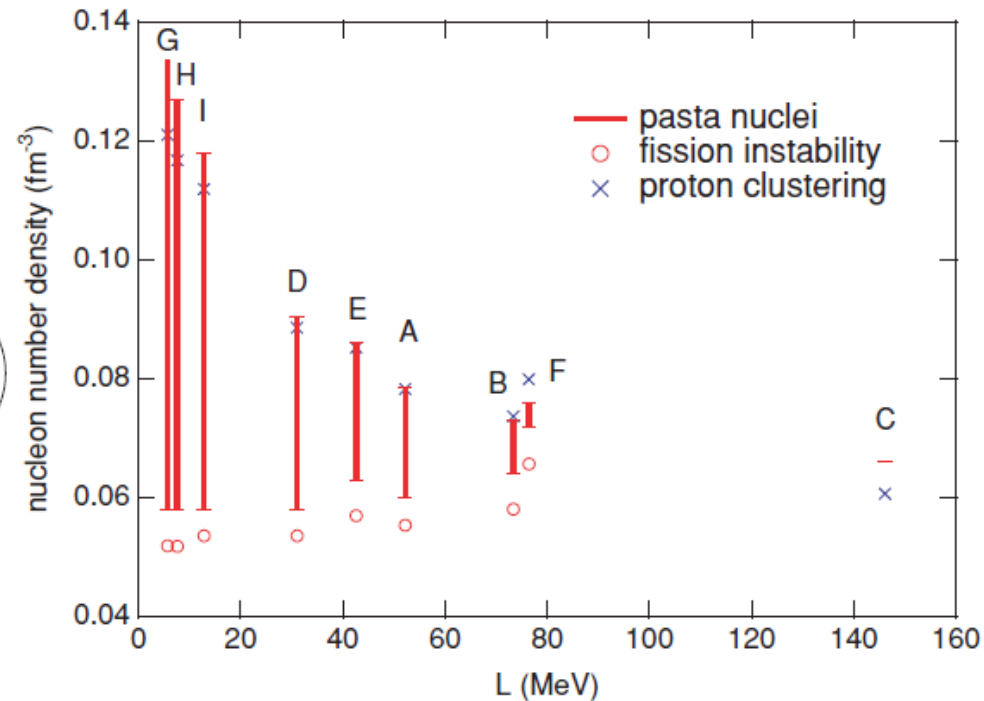
関連する話題(1)

- パスタ相の寄与は？

- 今回は無視したが、振動数を上げる可能性あり。
- L によって、存在領域が異なる。



(Nakazato et al., 2011)



(Oyamatsu and Iida, 2007)

関連する話題(2)

- 超流動の効果は？

- ある割合で振動に寄与しない中性子が存在する。

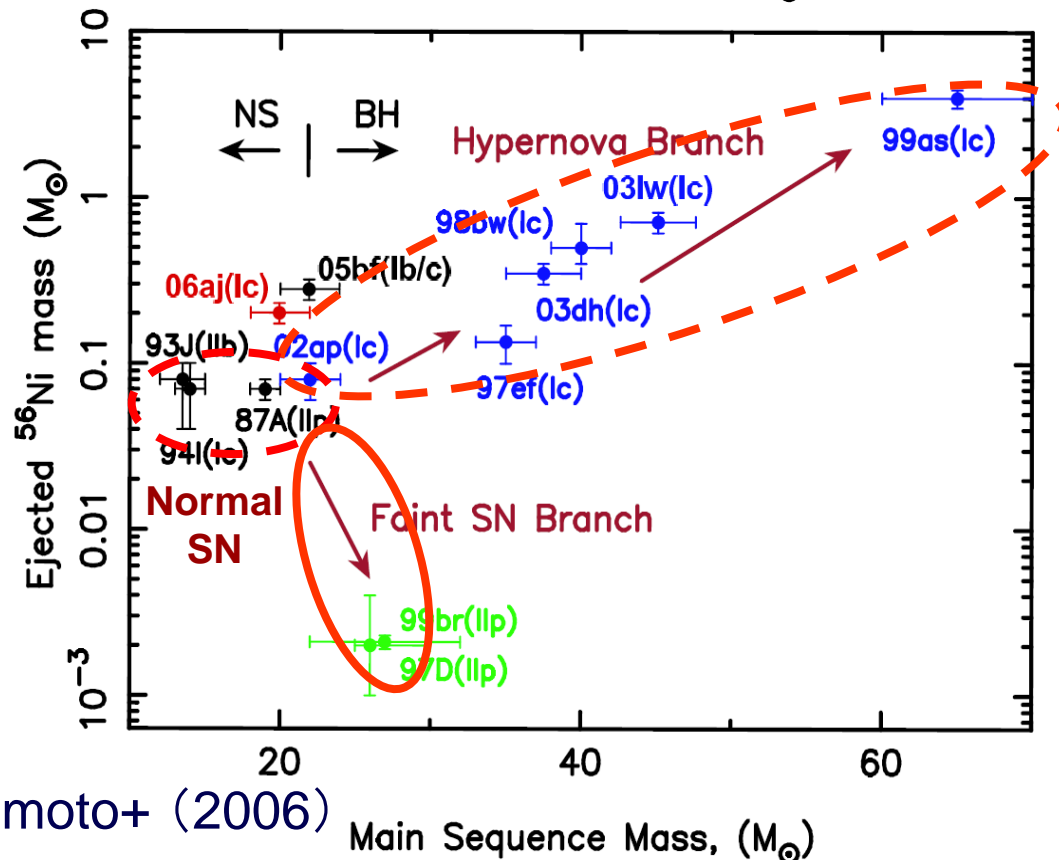
\bar{n} (fm ⁻³)	Z	A	n_n^f/n_n (%)	n_n^c/n_n^f (%)	m_n^*/m_n
0.0003	50	200	20.0	82.6	1.21
0.001	50	460	68.6	27.3	3.66
0.005	50	1140	86.4	17.5	5.71
0.01	40	1215	88.9	15.5	6.45
0.02	40	1485	90.3	7.37	13.6
0.03	40	1590	91.4	7.33	13.6
0.04	40	1610	88.8	10.6	9.43
0.05	20	800	91.4	30.0	3.33
0.06	20	780	91.5	45.9	2.18
0.07	20	714	92.0	64.6	1.55
0.08	20	665	104	64.8	1.54

(Chamel, 2012)

新しい天文学から
迫る高密度核物質

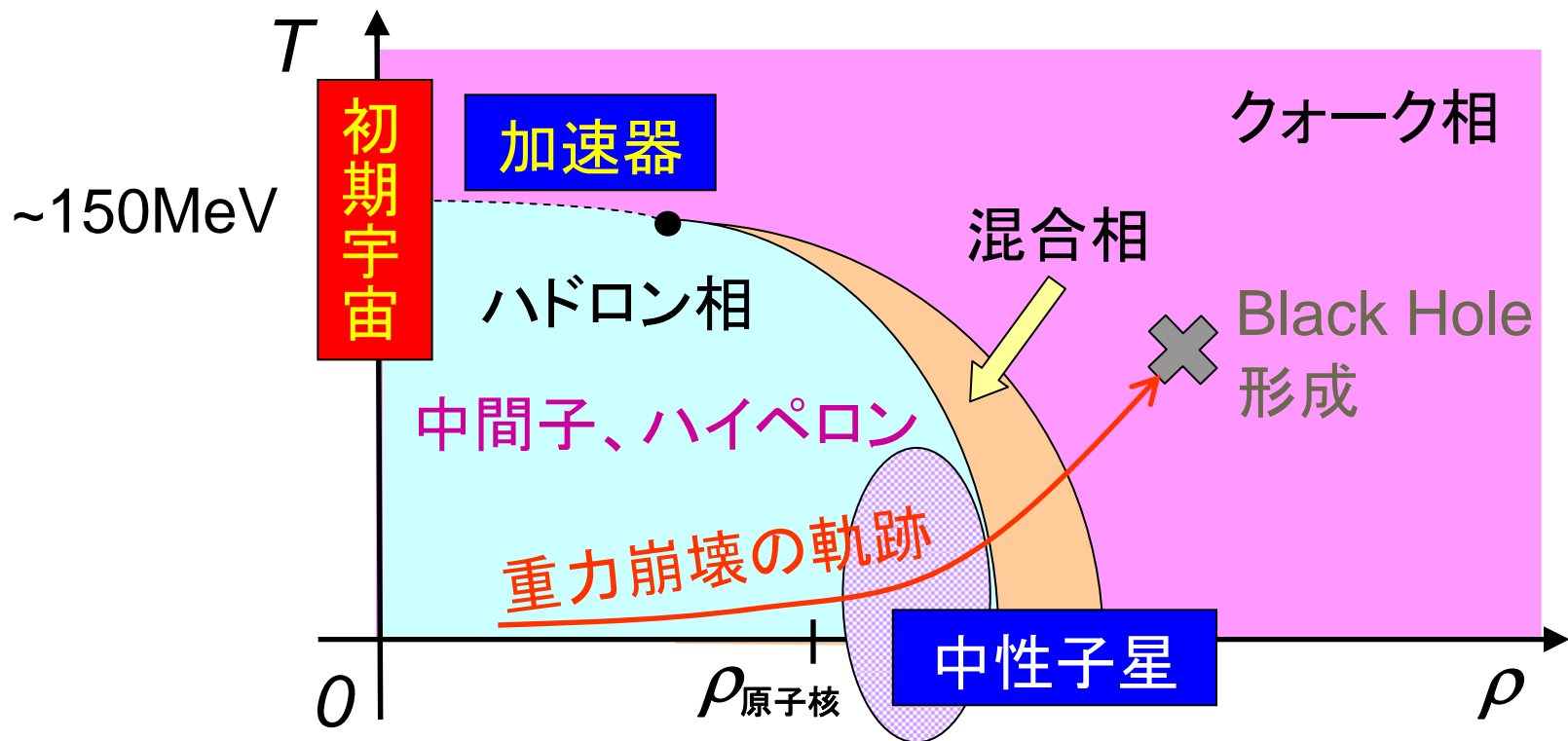
中性子星とブラックホール

- 中性子星は、 $10M_{\odot}$ 以上の恒星が進化の最後を起こす超新星爆発により形成。
- より重い ($>25M_{\odot}$) 星ではブラックホール形成？
- 観測的には2種類に分類
 - Hypernovae (強力な爆発)
 - Faint or Failed Supernovae (弱い爆発)



ブラックホール形成を考える利点

- 重力崩壊の過程でさまざまな**密度**・**温度**領域を経由する。



極限状態を探るためには…

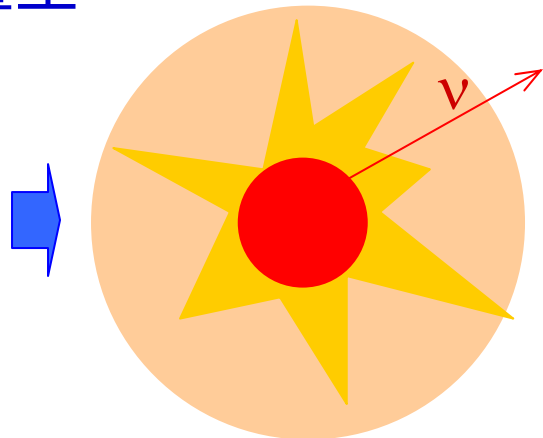
- 通常の光(電磁波)では困難
 - 周りの物質とよく相互作用して出てこられない。
- 星の重力崩壊に伴って、大量のニュートリノが放出される。
 - 有名な例: 超新星1987A

ニュートリノは相互作用が小さいため、星の中心に近い、より高温・高密度な領域の物理が探れる！！

重力崩壊 → ブラックホール形成シナリオ

- $40M_{\odot}$ の質量を持つ回転のない星の崩壊
 - 回転がないと、重すぎて超新星爆発を起こせない。
 - とは言っても、いったん核力によるバウンスを起こし、1秒程度ニュートリノを放出してから、ブラックホールになる。
→ 核密度以上の物理の「実験室」

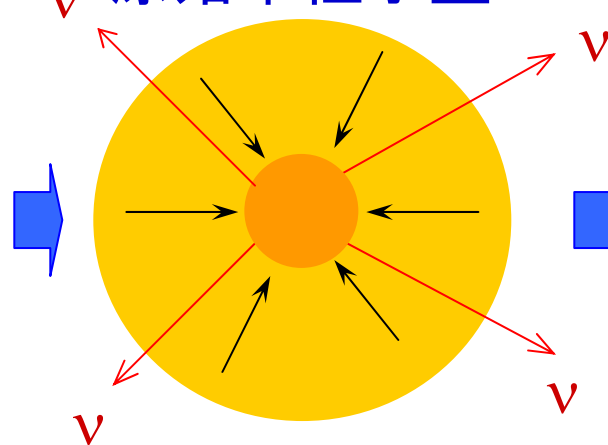
大質量星



重力崩壊

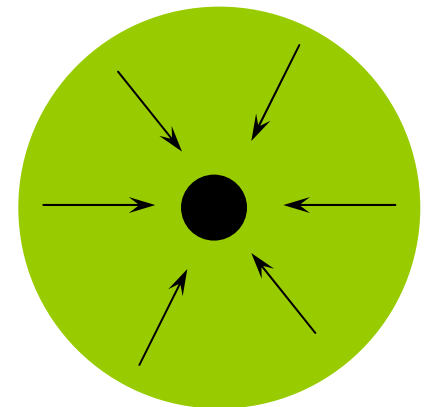
バウンス

原始中性子星



質量降着

ブラックホール



本研究の概要

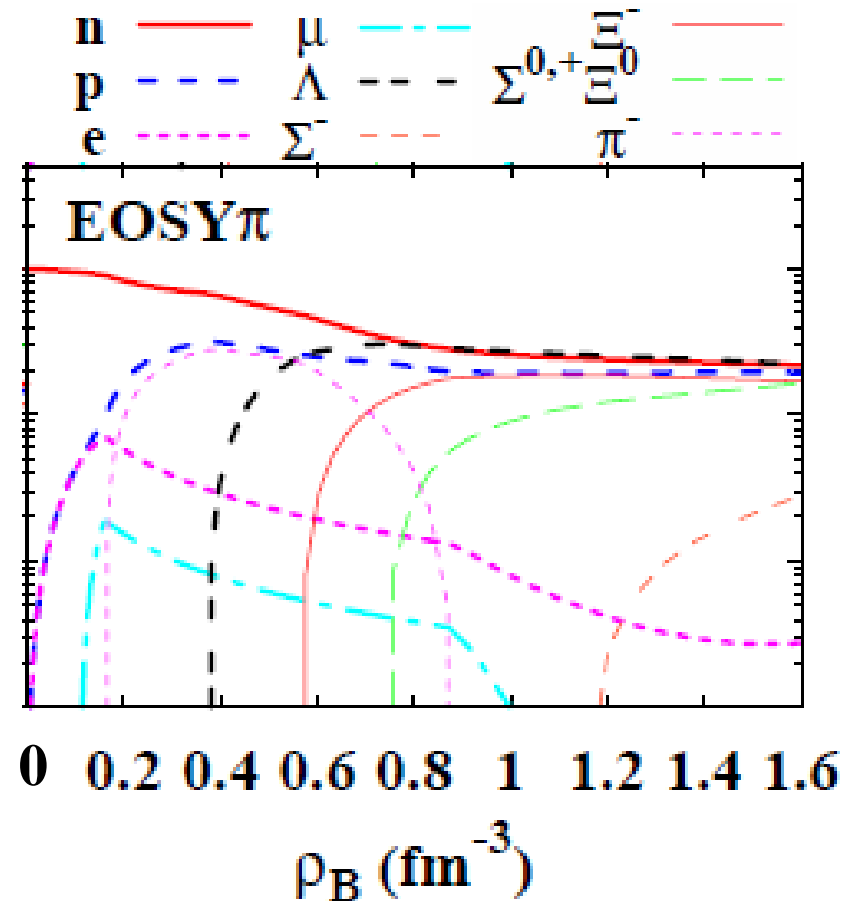
Nakazato et al. *Astrophys. J.* **745** (2012) 197

- ハイペロンも含んだブラックホール形成の数値シミュレーションを行う。
 - ハイペロンポテンシャルの違いも考慮
- 同時に放出されるニュートリノの量を見積もり、観測的にどういった特徴が現れるか検討する。

ハイペロン入り状態方程式

Ishizuka et al. J. Phys. G **35** (2008) 085201

- 相対論的平均場近似
 - バリオン8重項
- ポテンシャル
 - $U_{\Lambda} = -30$ MeV
 - $U_{\Sigma} = 30$ MeV (repulsive)
or
– -30 MeV (attractive)
 - $U_{\Xi} = -15$ MeV
- 熱的なパイオンを含むデータセットもあり。



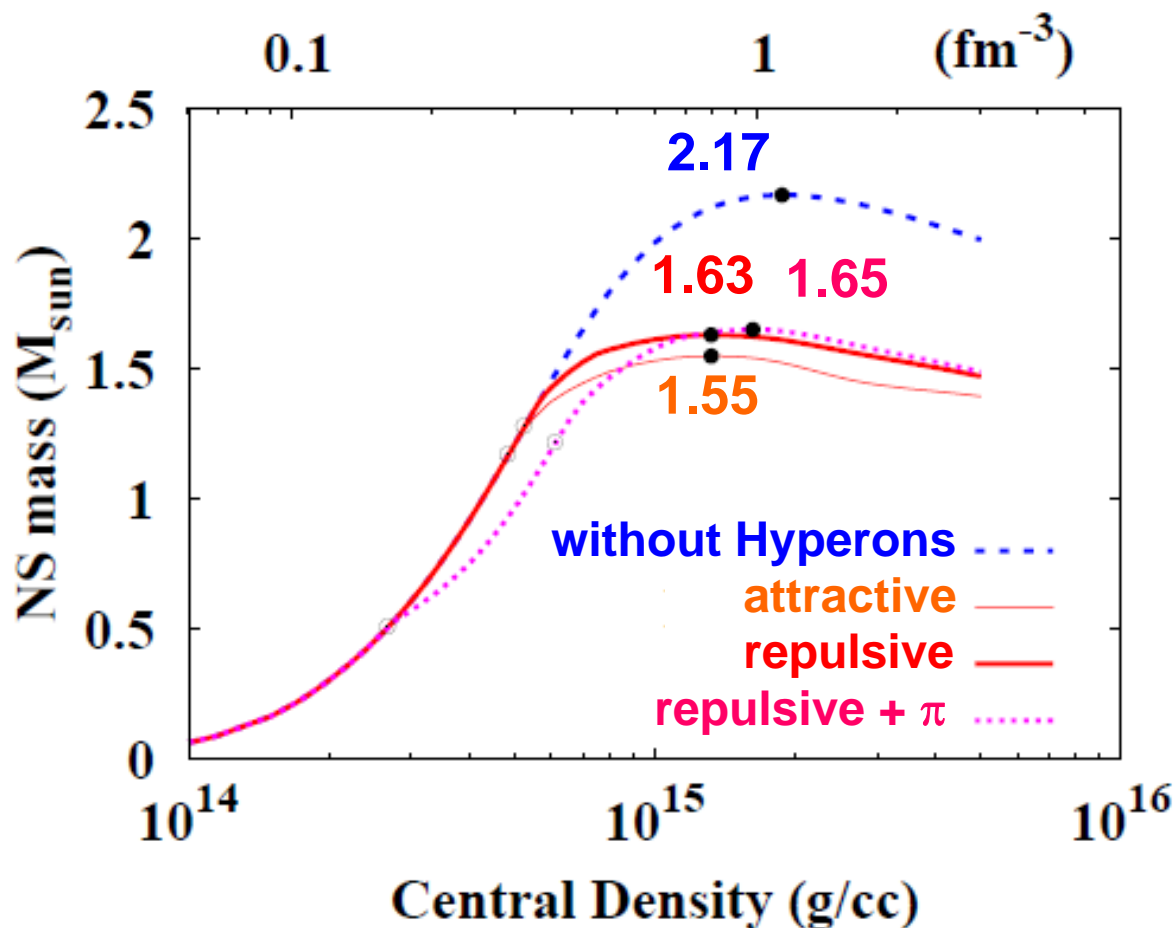
中性子星の最大質量

- ハイペロンにより状態方程式はやわらかくなり、最大質量は大きく減少。

- ポテンシャルが repulsive か attractive による差は $\sim 5\%$ 。
- この状態方程式は最大質量が $2M_{\odot}$ を超えない。

→ 今後の課題

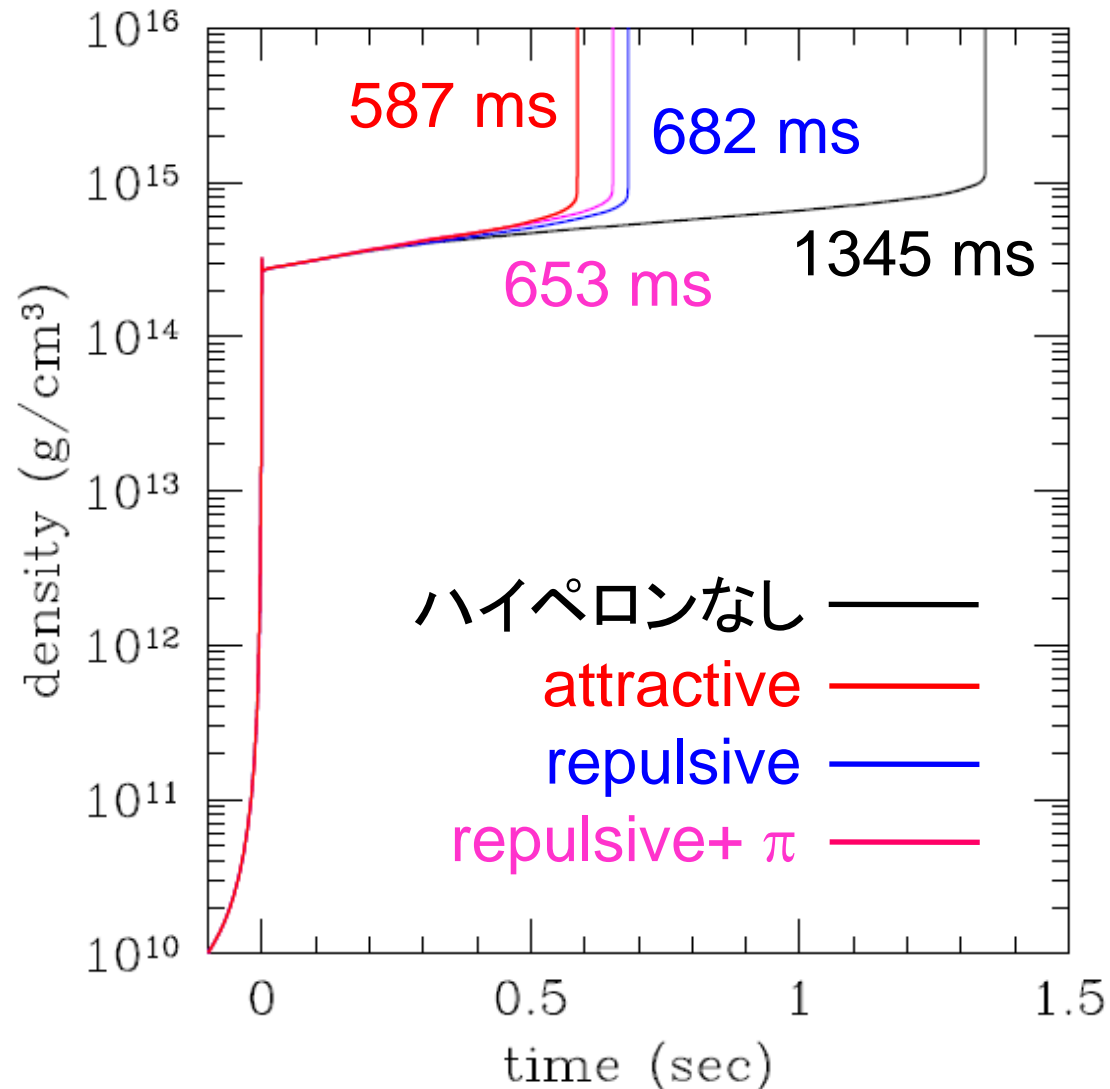
Ishizuka et al. (2008)



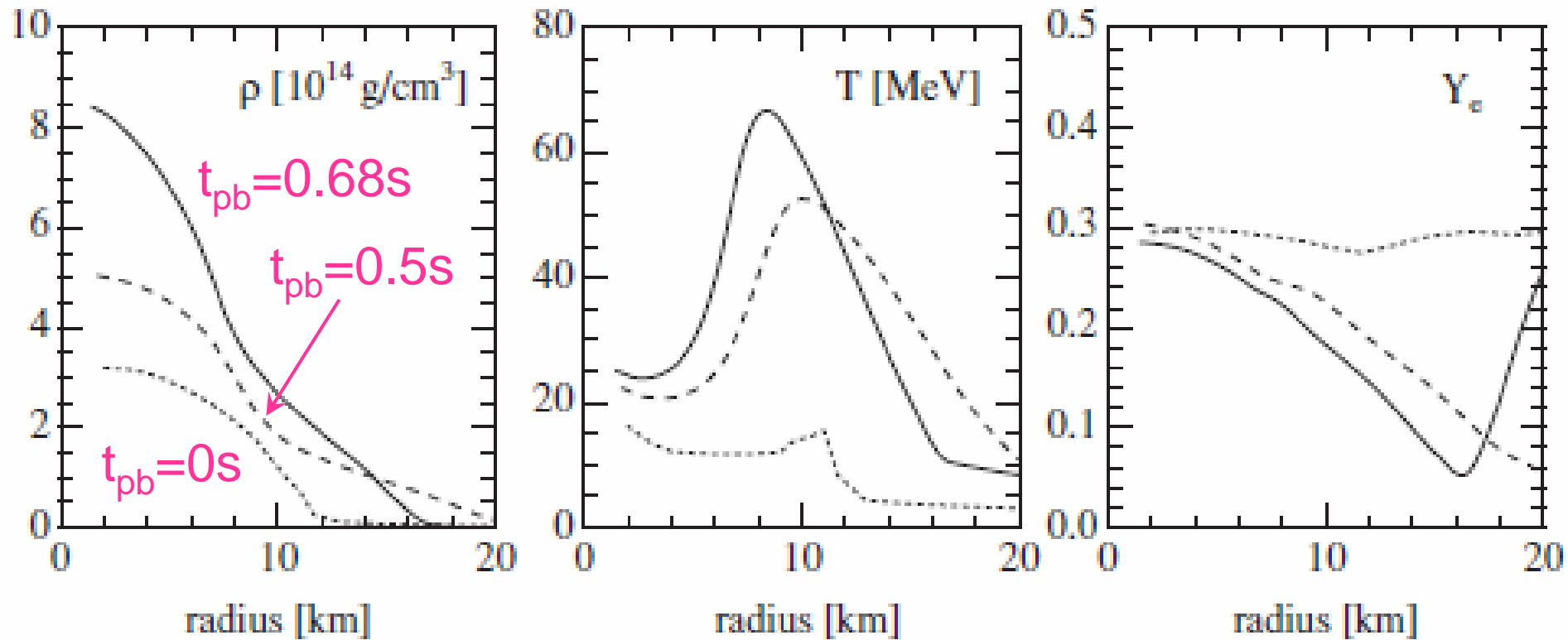
Repulsive vs. Attractive

Nakazato et al. *Astrophys. J.* **745** (2012) 197

- Hyperon, pion は崩壊時間を短縮する。
- attractive の方がより崩壊が加速され、**15% 程度**の違いが出る。
- pion を入れてもあまり変わらない。

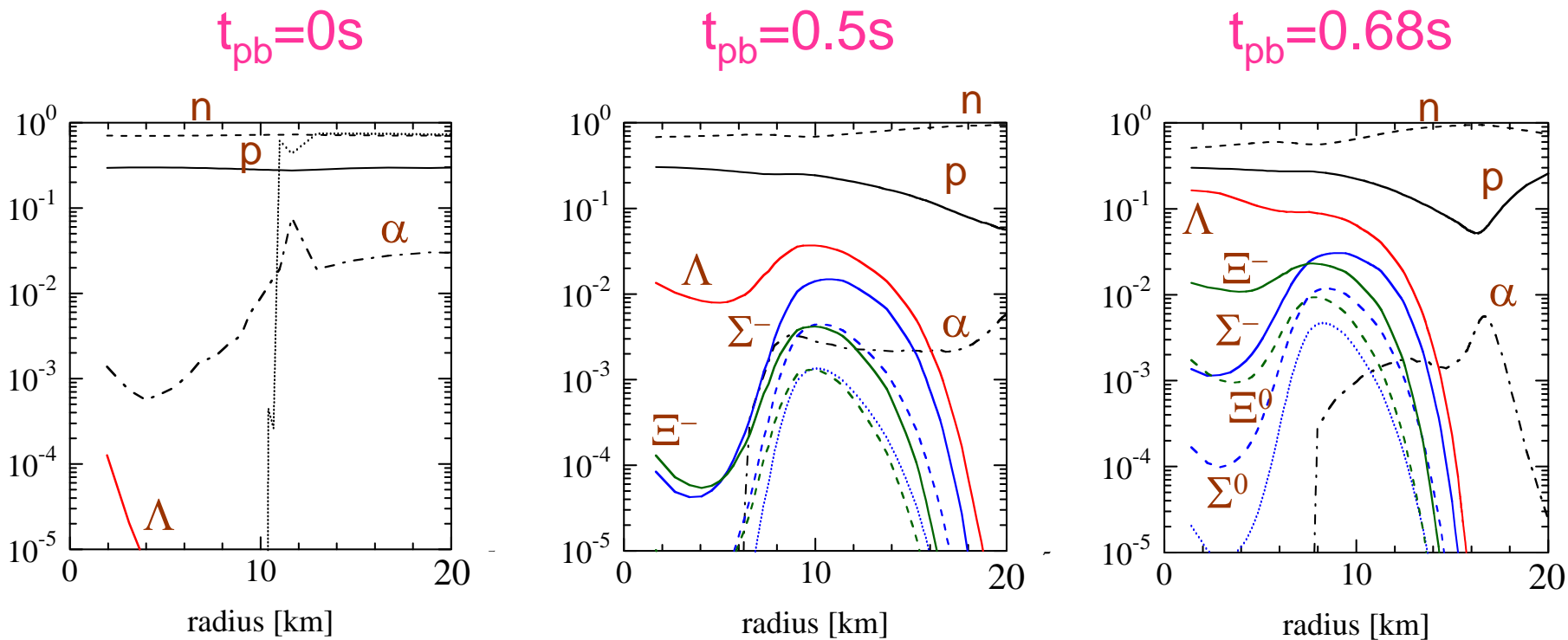


重力崩壊中の物理量変化 (repulsive)



- 大雑把に言うと、中心部は高密度低温、やや外側の 10 km 付近では低密度高温。
→ shock heating の結果。

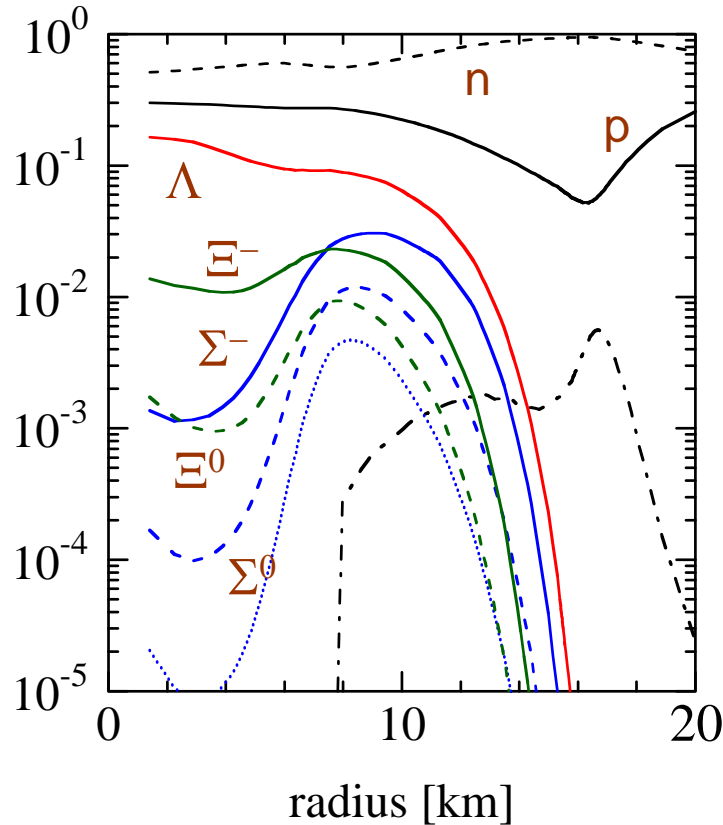
重力崩壊中の組成変化 (repulsive)



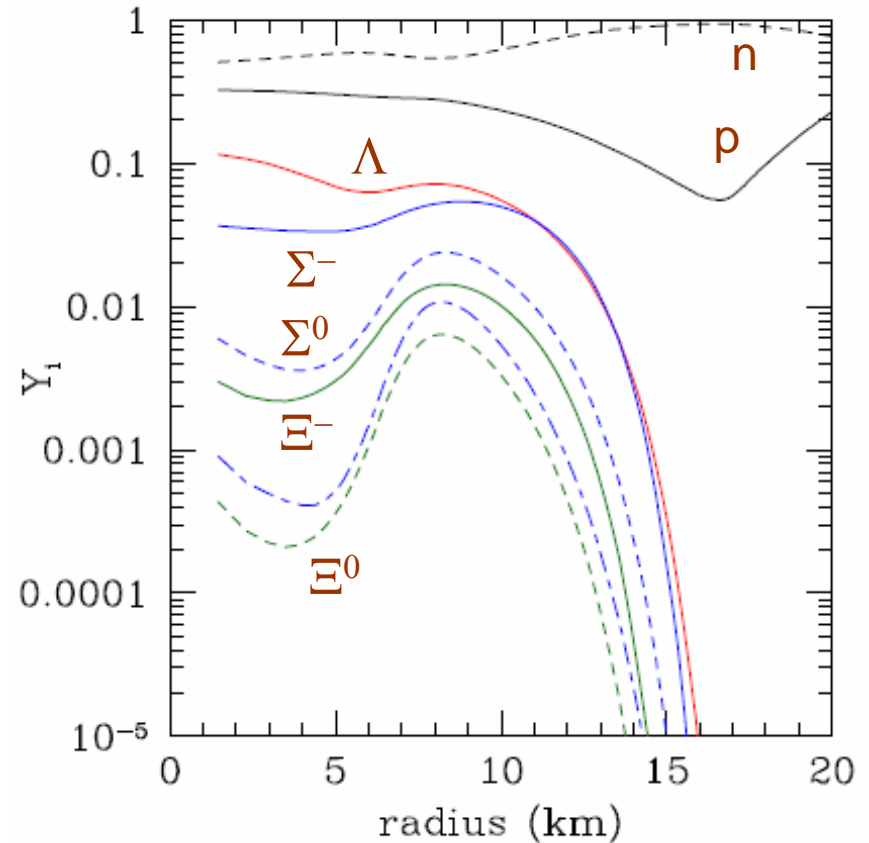
- バウンス時はハイペロンはほとんどいない。
- 時間がたつにつれ、内部が高温・高密度となり割合が増えてくる。

組成比の比較 ($t_{pb} = t_{BH} - 2 \text{ ms}$)

repulsive



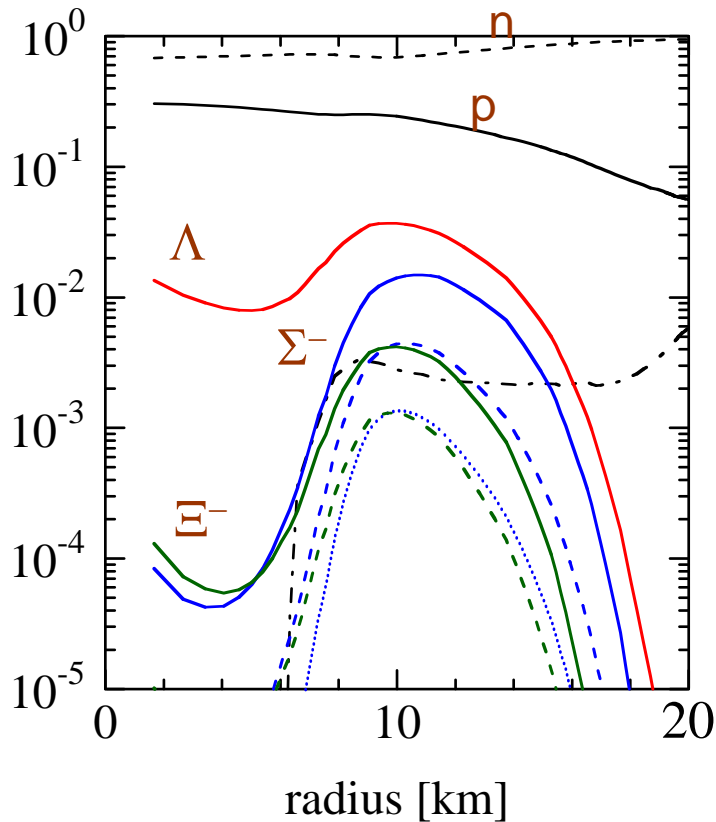
attractive



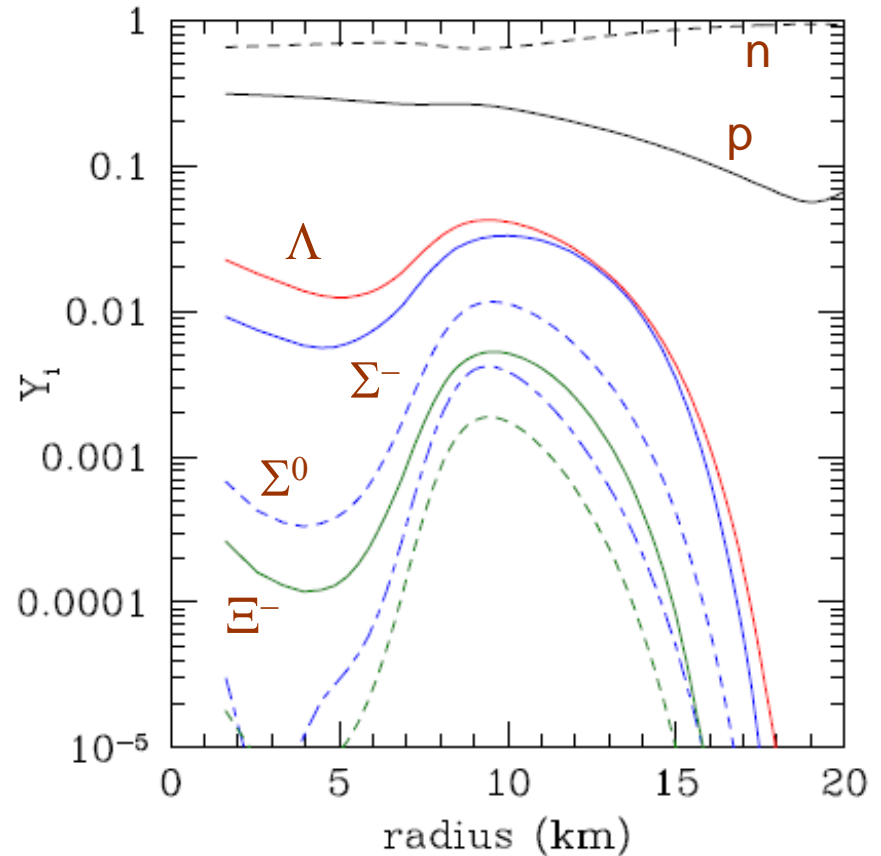
- 負電荷のハイペロンとして Σ^- が先に卓越する。
→ 崩壊までにかかる時間を早める。

組成比の比較 ($t_{pb} = 0.5$ s)

repulsive



attractive

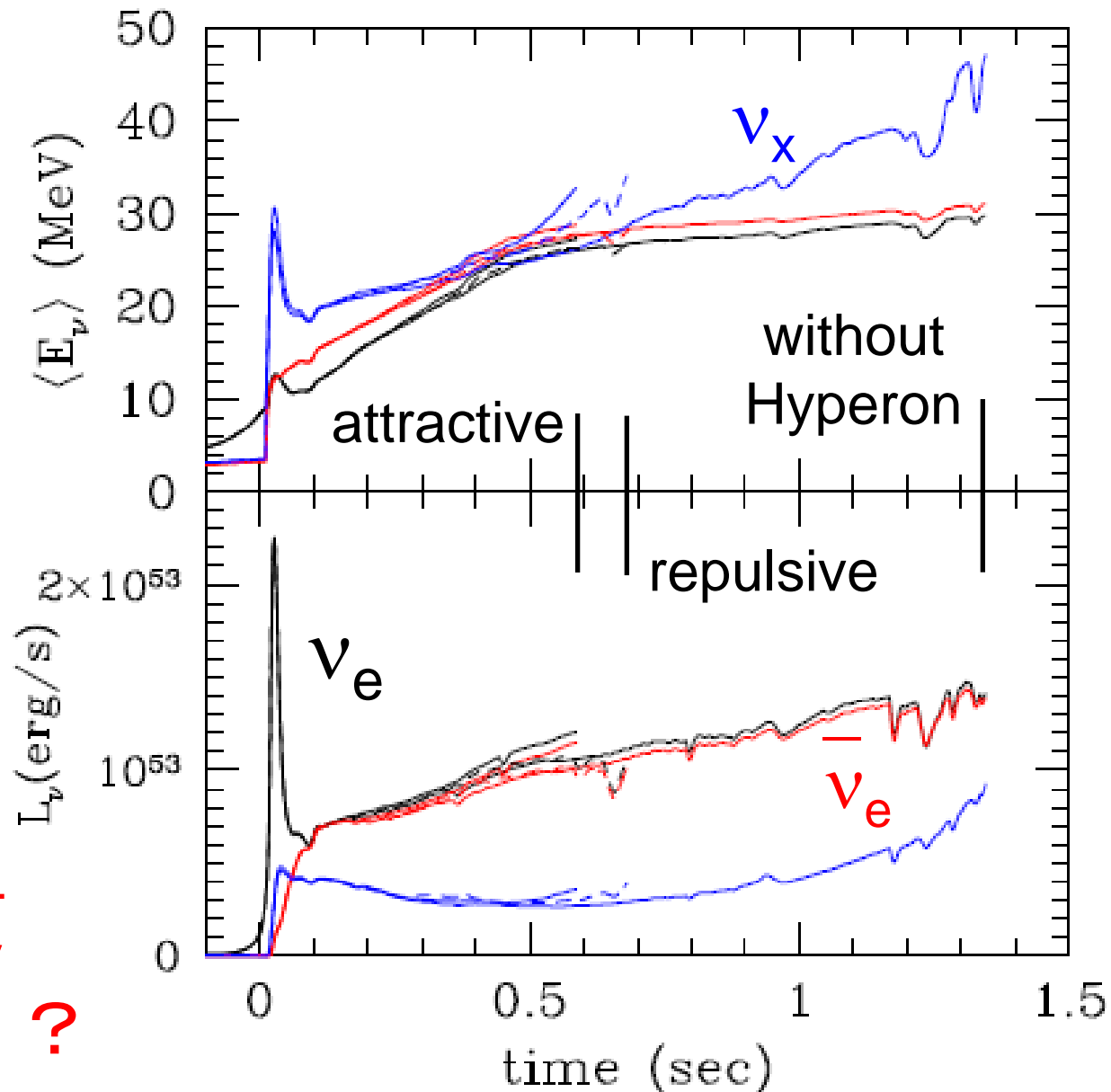


- Σ^- による違いは早い段階から現れ始めている。
→ ニュートリノ光度に影響を与える。

ニュートリノシグナル

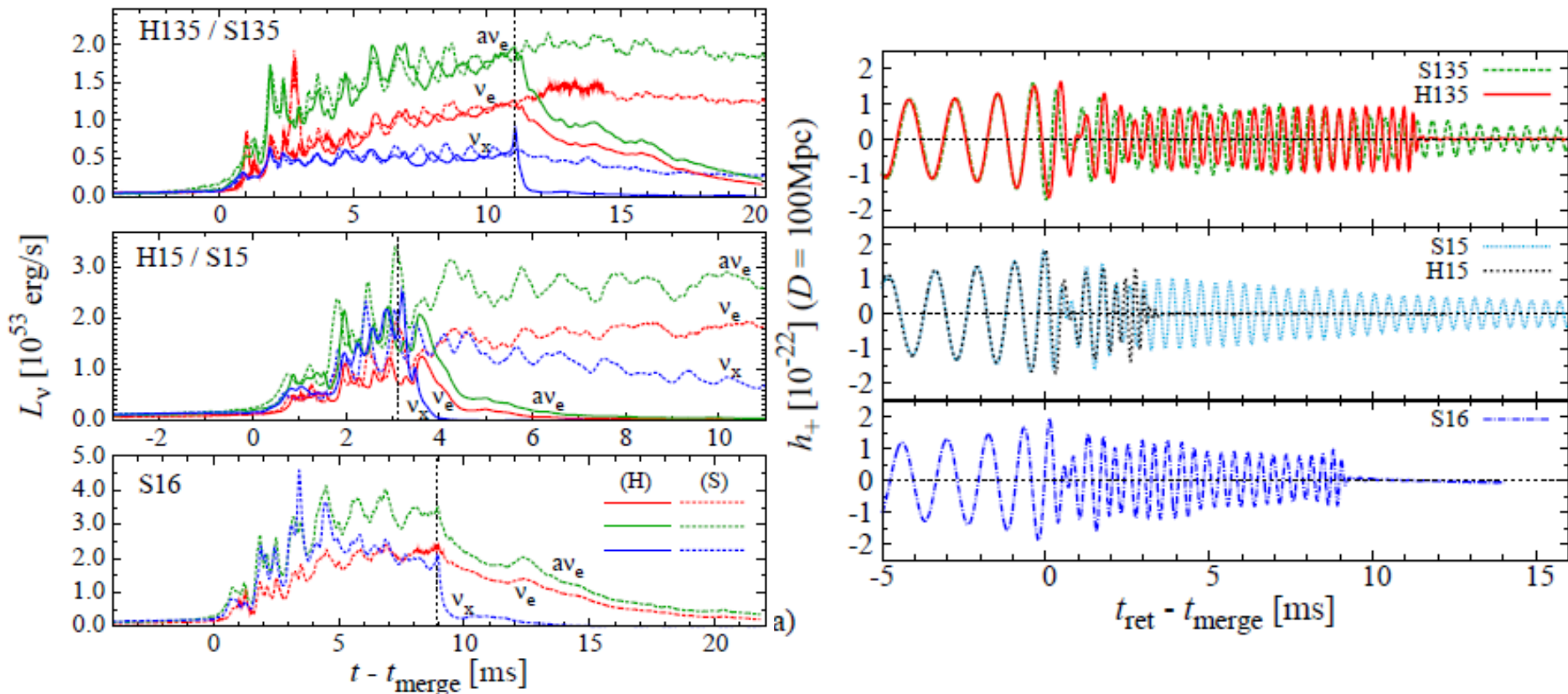
- ニュートリノはブラックホール形成までの間、放出される。
- ハイペロン出現による変化は attractive な場合のほうが顕著に表れる。

→ 高密度核物質の性質に迫る！？



関連するその他の話題

- 連星中性子星の合体とハイペロン
 - Sekiguchi et al., PRL 107 (2011) 211101
 - ニュートリノと重力波の同時観測？



まとめ

まとめ

- 天体現象から原子核物理を探る研究が多く行われている。
 - 太陽質量の2倍の中性子星の発見と、それに動機付けられた多くの理論研究はその好例。
- 中性子星の準周期振動からクラスト物質を探る。
(星震学)
 - 飽和密度付近で原子核状態方程式に制限を与えた。
 - パスタ相や超流動の寄与も重要？
- ブラックホール形成から高密度核物質に迫る。
 - ニュートリノ、重力波といった新しい天文学が鍵？