

中性子星の観測から星内原子核の性質をさぐる

飯田 圭（高知大学）

中性子星の質量・半径と中性子星内部物質

クラスター深部での核燃焼と低質量X線連星系

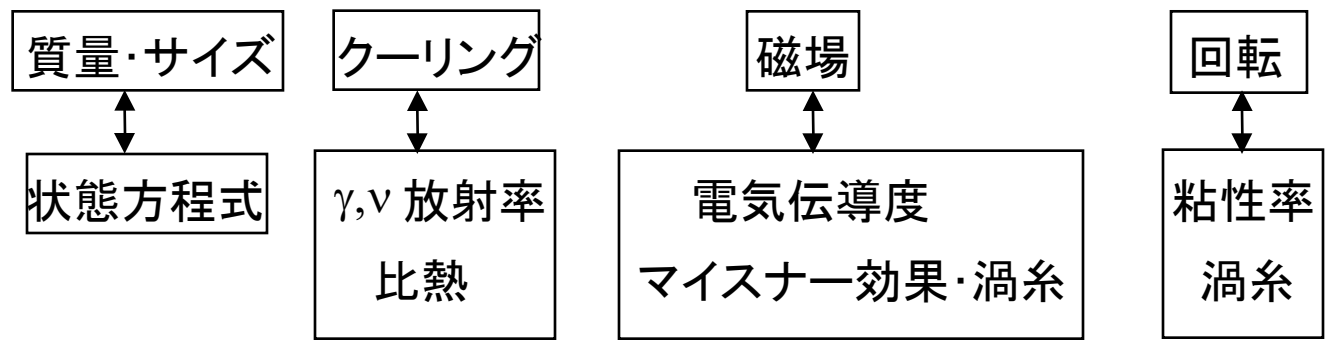
軟ガンマ線リピーターの巨大フレアとクラスター内部の原子核

高密度縮退星は高密度物質の実験室！？

・高密度縮退星内部物質： 強結合・ほぼ β 平衡・電気的中性・カラー中性

白色矮星	↔	高密度プラズマ (e, ions)	↔	電磁相互作用
中性子星	↔	高密度核物質 (n, p, e, μ, \dots)	↔	強い相互作用
クォーク星？	↔	高密度クォーク物質 (u, d, s, e, μ)？	↔	強い相互作用

・観測から推定可能な物性



物質状態(超流動・結晶等)に敏感

観測されている高密度縮退星

白色矮星

<孤立>

視差



輻射スペクトル・偏光 → R, M, B, P

<近接連星系>

矮新星

新星爆発

磁気激変星

輻射スペクトル・偏光 → B

X線輝線 → M, R

超軟X線源?

I型超新星爆発?

中性子星

<孤立>

回転駆動型パルサー → P, (B, age)

軟X線源 (超新星残骸中、再起性γ線バースター、異常なX線パルサー、孤立した古い中性子星、...)

<近接連星系>

X線バースター

輻射スペクトル → P, (M, R)

降着駆動型パルサー → P

サイクロトロン吸収線 → B

公転 → M

回転駆動型パルサー → P

公転 → M

γ線バースター?

コンパクト天体の性質

(赤字は20世紀以前の観測に基づく)

	主な観測手段	構造			
		半径(R)・質量(M)	縮退圧の担い手	一般相対論の効果	中心密度
白色矮星	可視光、UV、X線	$\sim 1-2 R_{\oplus}$, $\sim 0.4-1 M_{\odot}$	e	$2GM/Rc^2 \sim 0.0001$	$< \sim 10^8 \text{ g cm}^{-3}$
中性子星	電波、X線、 γ 線 可視光、UV ν (超新星爆発時)	$\sim 10 \text{ km}$, $\sim 1.4 M_{\odot}$	$n, (p, e, \mu, \Sigma^-, \Lambda, \dots)$	$2GM/Rc^2 \sim 0.4$	$\sim 10^{15} \text{ g cm}^{-3}$
クォーク星	X線?、可視光?	$< \sim 10 \text{ km}$, $< \sim 2 M_{\odot}$	$q, (e)$	$2GM/Rc^2 < \sim 0.6$	$\sim 10^{15} \text{ g cm}^{-3}$
太陽	電波 $\sim \gamma$ 線、 ν	$R_{\odot} \approx 70 \text{ 万 km}$, $M_{\odot} \approx 2 \times 10^{33} \text{ g}$	(ガス圧)	$2GM/Rc^2 \sim 0.000004$	$\sim 100 \text{ g cm}^{-3}$

	熱現象				表面磁場 (B)	自転周期 (P)	主系列時の質量
	主な熱源	比熱	エネルギー輸送	表面温度			
白色矮星	形成時	ions	外: radiative, convective 内: conductive, (ν)	$< \sim 10^4 \text{ K}$	$< \sim 10^8 \text{ G}$	$> 1 \text{ hour}$ (下限: $\sim 1 \text{ s}$)	$\sim 0.1-8 M_{\odot}$
中性子星	形成時	e, μ, n	外: radiative 内: ν , conductive	$< \sim 10^6 \text{ K}$	$\sim 10^8-10^{15} \text{ G}$	$\sim 10^{-3}-10^3 \text{ s}$ (下限: $\sim \text{subms}$)	$\sim 8-40 M_{\odot}$
クォーク星	形成時	e, q	(外: radiative) 内: ν , conductive	$< \sim 10^6 \text{ K}$?	?	?
太陽	pp chain	e, ions	外: convective 内: radiative, (ν)	$\sim 6000 \text{ K}$	$< \sim 2000 \text{ G}$	$\sim 30 \text{ days}$	—

中性子星

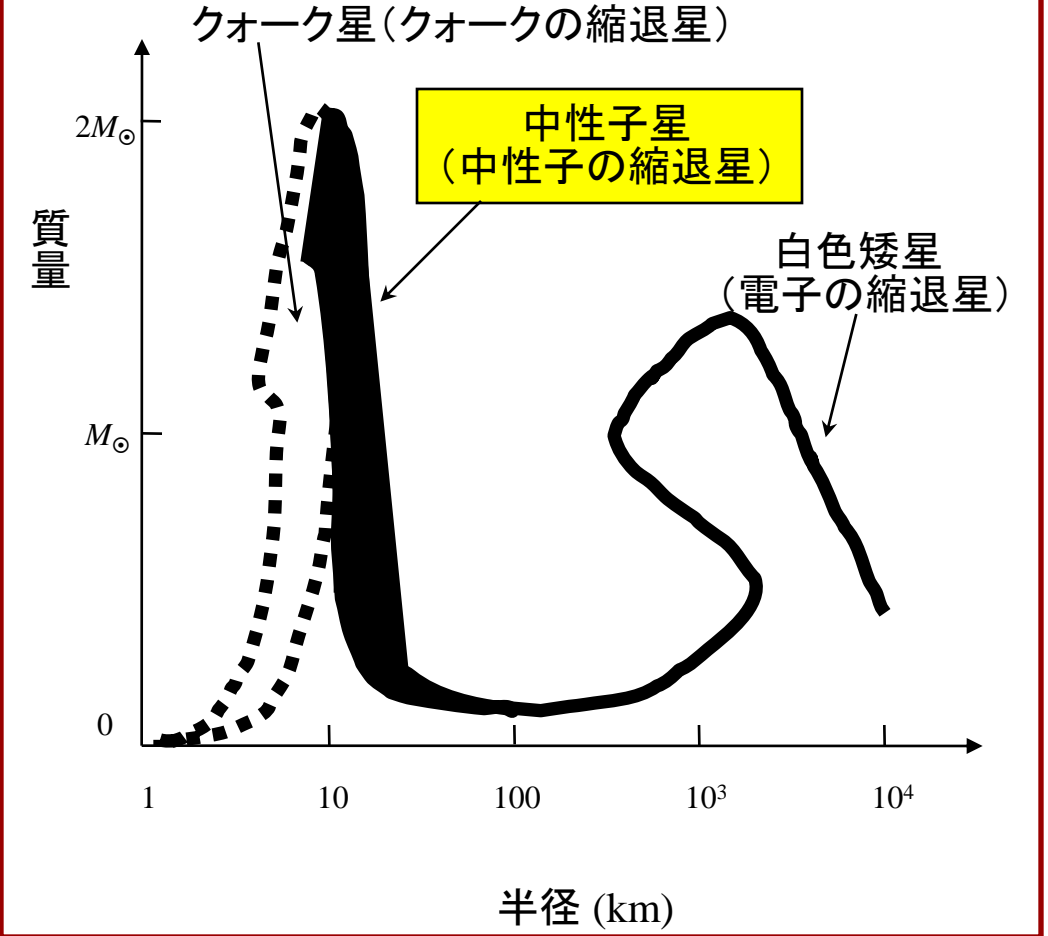
中性子星の質量・半径の関係

星内部のフェルミ物質では、
フェルミエネルギー ≫ 熱エネルギー

静水平衡式 + 状態方程式 (T=0) ⇒

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

$$m(r) = \int_0^r \rho(r) 4\pi r^2 dr$$



パルサーは自転する中性子星？

パルス周期 P_{rot} が最短で 2 ms 弱

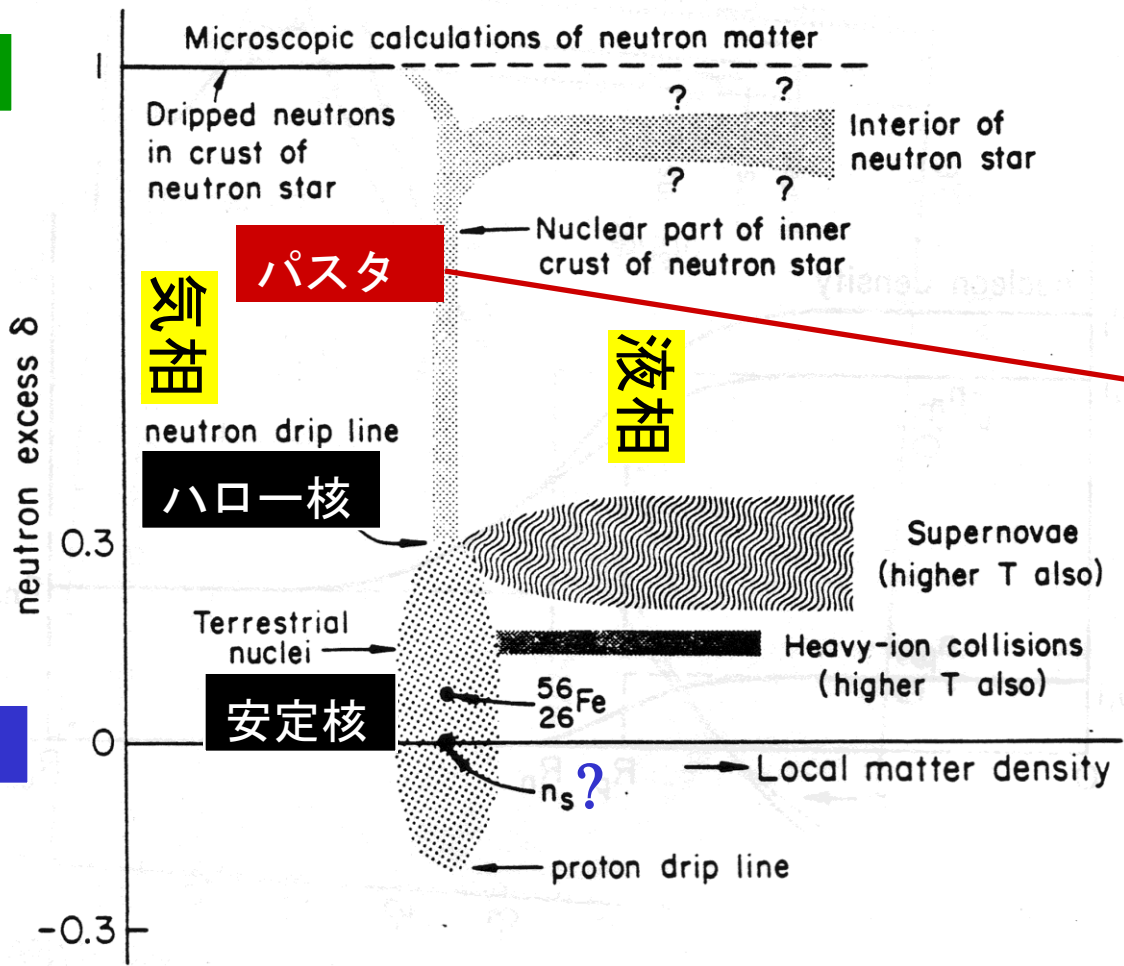
→ パルサーが自転する白色矮星だとすると、遠心力で表面から物質が離散するはず

$$\because R_{\oplus} P_{rot}^{-2} \gg GM_{\odot} R_{\oplus}^{-2}$$

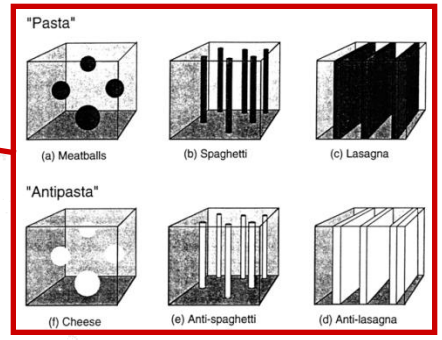
→ パルサーを、理論上存在が予想されていたにすぎなかった **中性子星** とみなすための重要な観測的証拠

Systems composed of nuclear matter

中性子物質



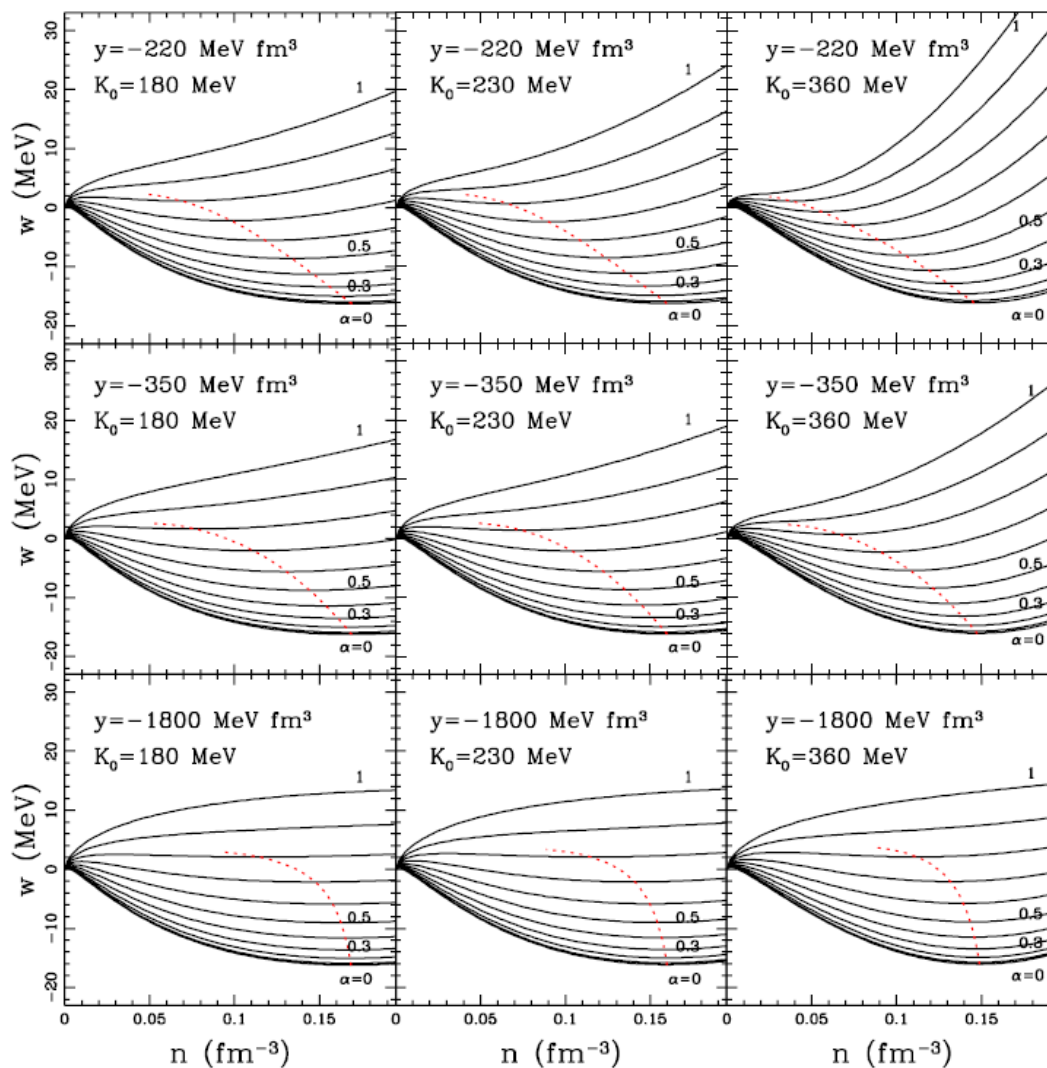
対称核物質



From Lamb (1991).

非圧縮率

対称エネルギーの密度勾配

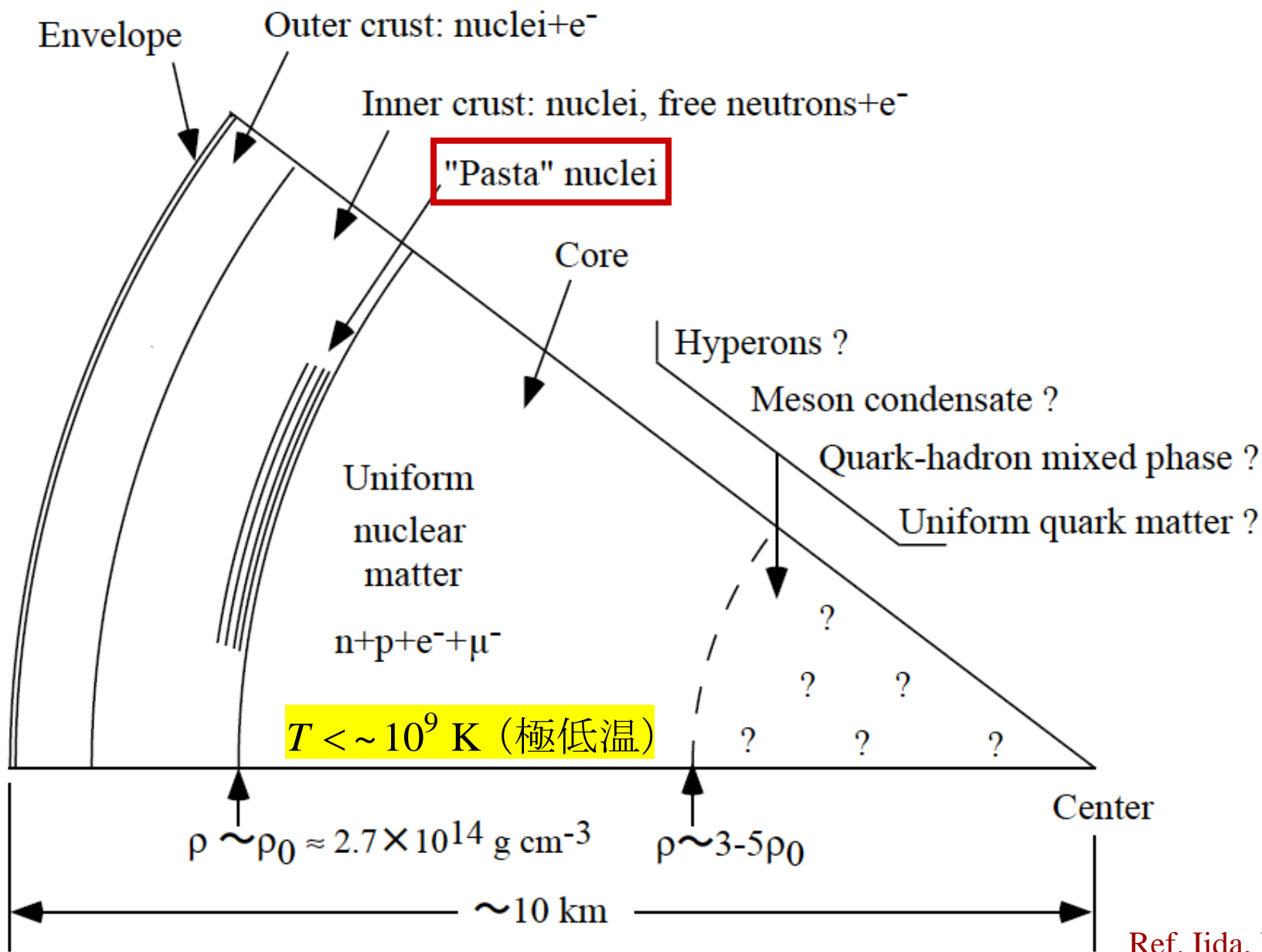


9つの極端な例

- ・安定核の半径・質量データは同様に再現
- ・将来の不安定核データで峻別可能？

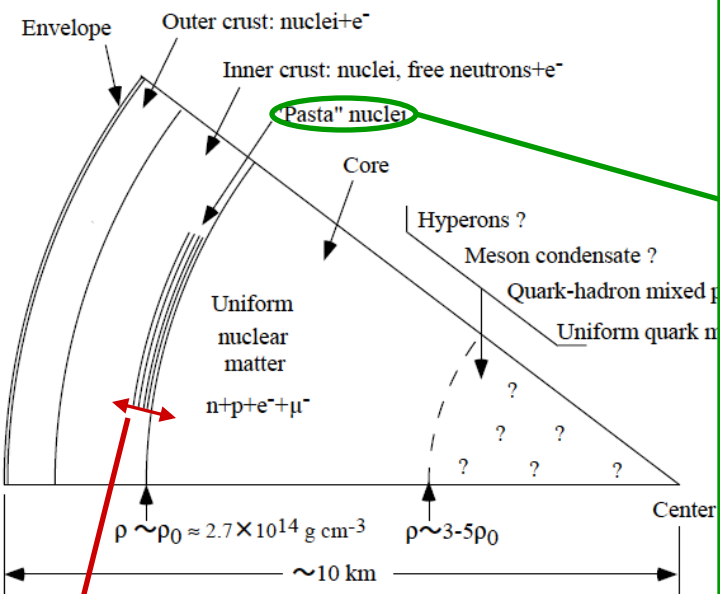
Ref. Oyamatsu & Iida, PTP **109** (2003) 631;
Kohama, Iida, & Oyamatsu, PRC **72** (2005) 024602.

中性子星断面の予想図

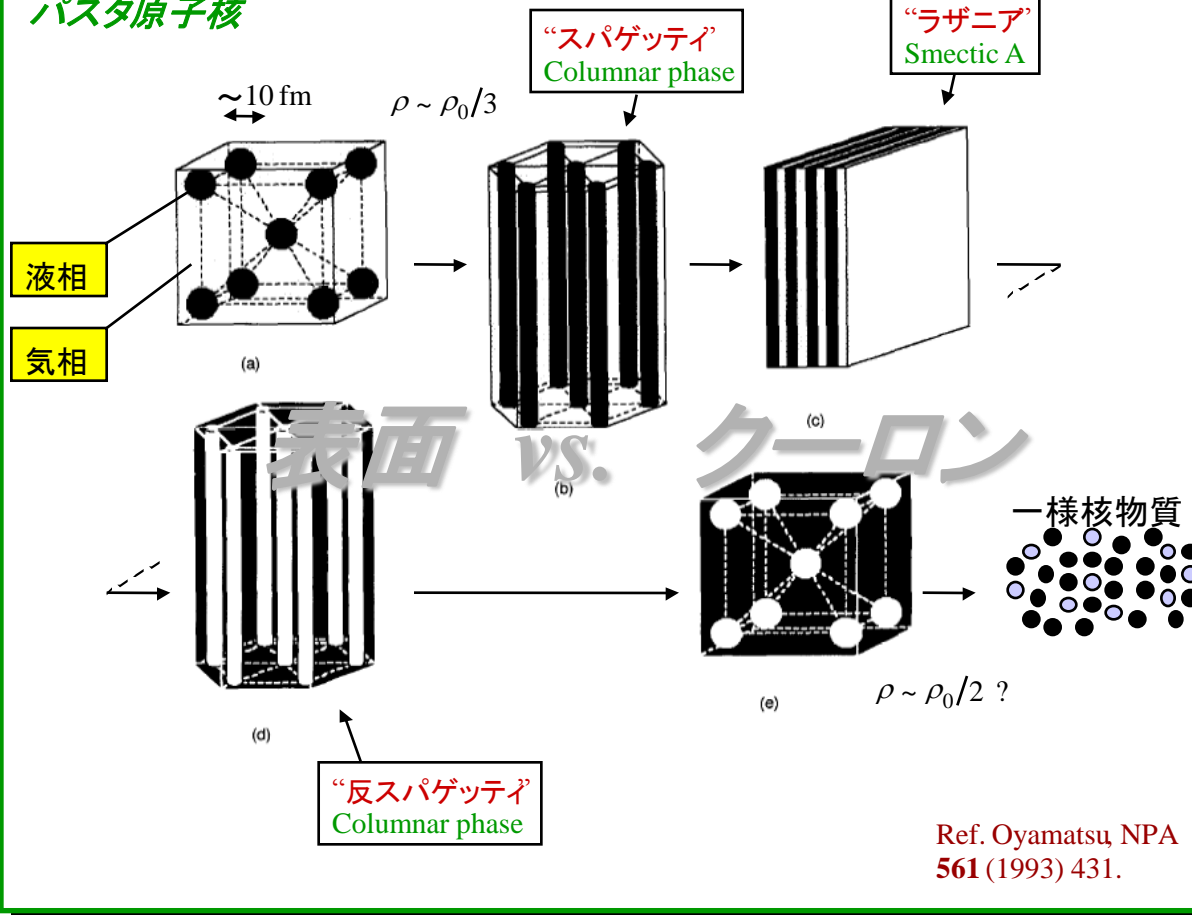


Ref. Iida, D論 (1998)

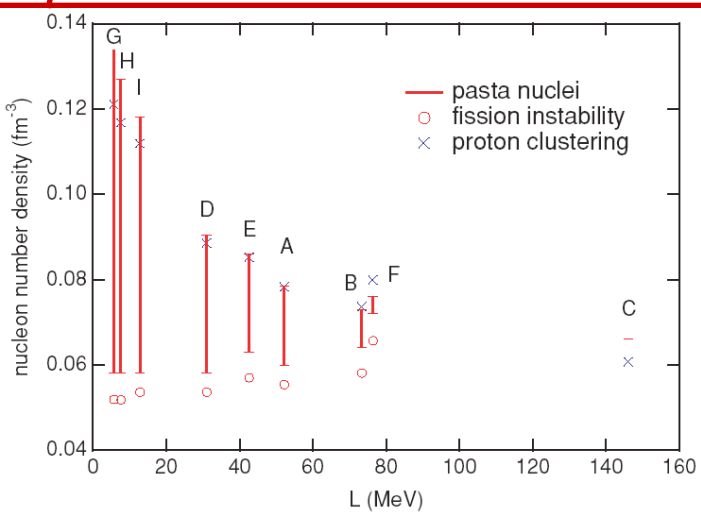
Nuclear pasta



パスタ原子核



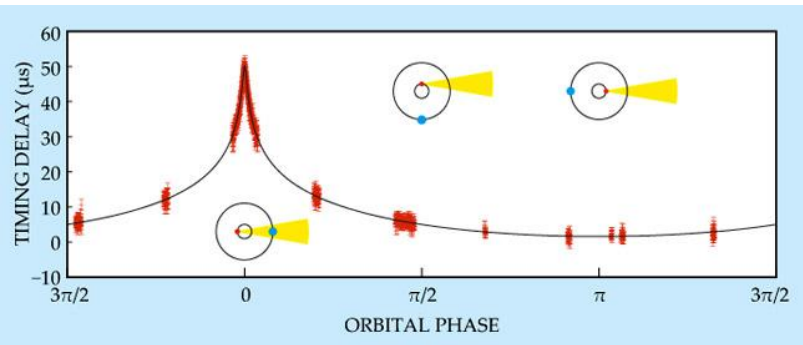
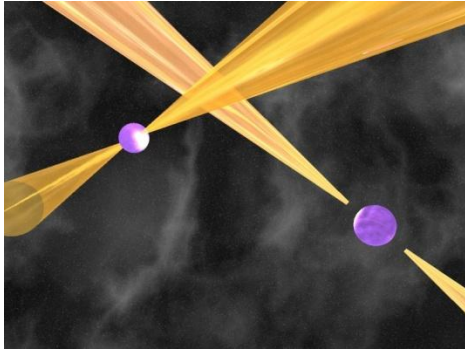
Ref. Oyamatsu, NPA
561 (1993) 431.



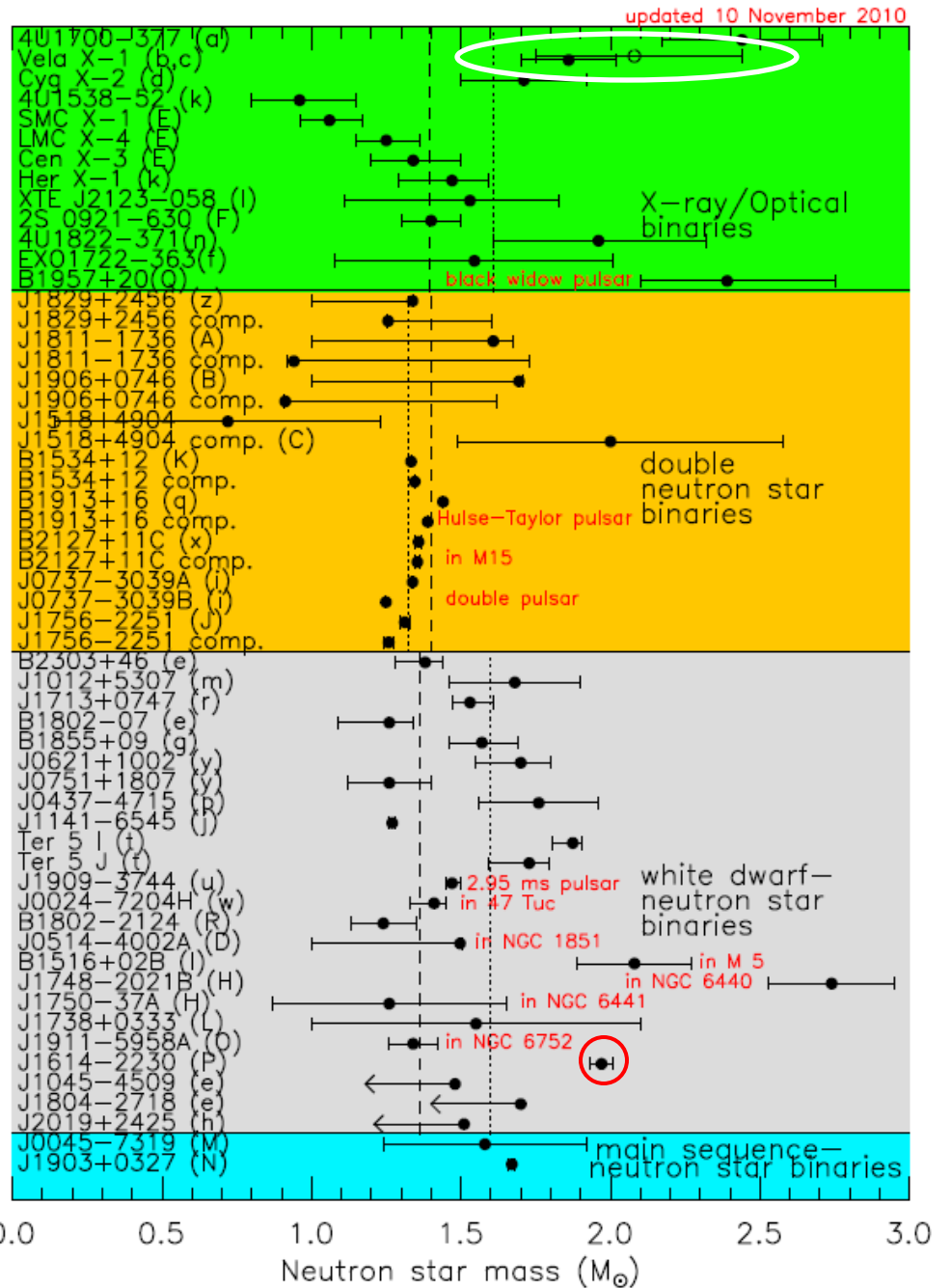
The larger *L*, the narrower pasta region.

Ref. Oyamatsu & Iida, PRC 75 (2007) 015801.

Recently, measured masses and radii have been accumulated.



Demorest et al. (2010)



The Best Measured Neutron Star Radii

Name	R_∞ (km/D)	D (kpc)	$kT_{\text{eff},\infty}$ (eV)	N_{H} (10^{20} cm^{-2})	Ref.
omega Cen (Chandra)	13.5 ± 2.1	$5.36 \pm 6\%$	66^{+4}_{-5}	(9)	Rutledge et al (2002)
omega Cen** (XMM)	13.6 ± 0.3	$5.36 \pm 6\%$	67 ± 2	9 ± 2.5	Gendre et al (2002)
M13** (XMM)	12.6 ± 0.4	$7.80 \pm 2\%$	76 ± 3	(1.1)	Gendre et al (2002)
47 Tuc X7 (Chandra)	34_{-13}^{+22}	$5.13 \pm 4\%$	84^{+13}_{-12}	$0.13^{+0.06}_{-0.04}$	Heinke et al (2006)
M28** (Chandra)	$14.5_{-3.8}^{+6.9}$	$5.5 \pm 10\%$	90_{-10}^{+30}	26 ± 4	Becker et al (2003)
M30 (Chandra)	$16.9_{-4.3}^{+5.4}$	--	94_{-12}^{+17}	$2.9^{+1.7}_{-1.2}$	Lugger et al (2006)
NGC 2808 (XMM)	??	9.6 (?)	103_{-33}^{+18}	18^{+11}_{-7}	Webb et al (2007)

$$R_\infty < 5\%$$

Caveats:

- All IDd by X-ray spectrum (47 Tuc, Omega Cen now have optical counterparts)
- calibration uncertainties

Distances:

Carretta et al (2000),
Thompson et al (2001)

Quiescent LMXBs
in globular clusters



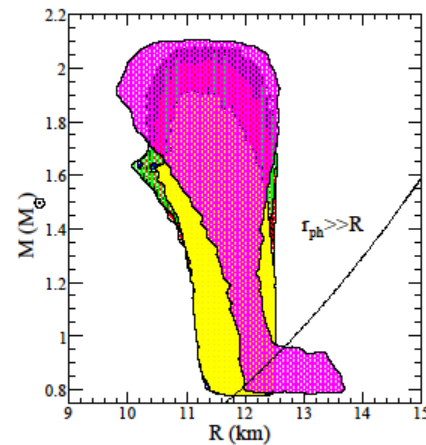
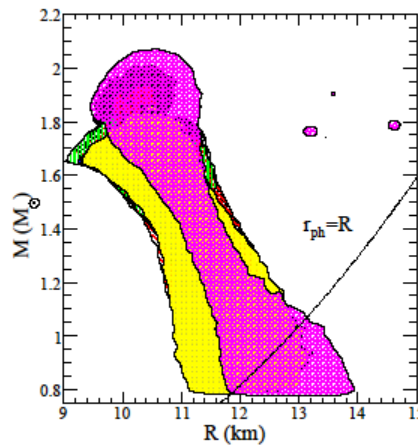
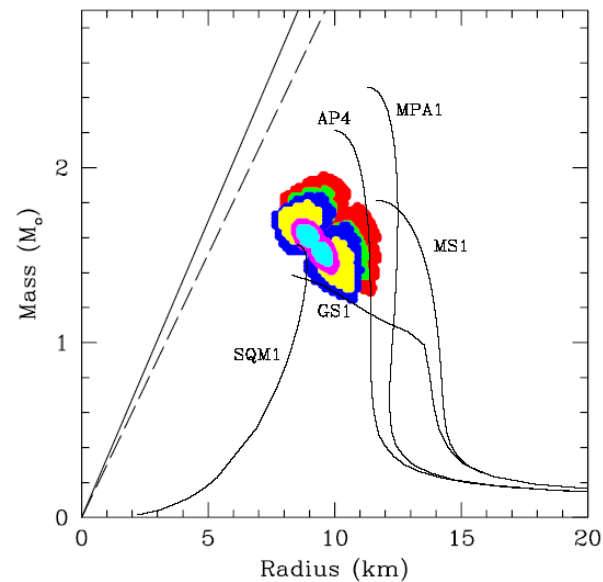
遠方からみた半径

$$R_\infty = \frac{R}{\sqrt{1 - 2GM/Rc^2}}$$

球状星団までの距離

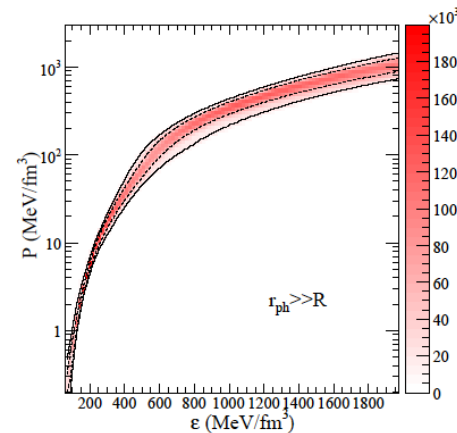
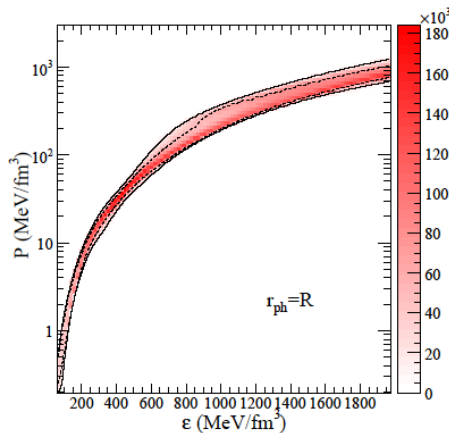
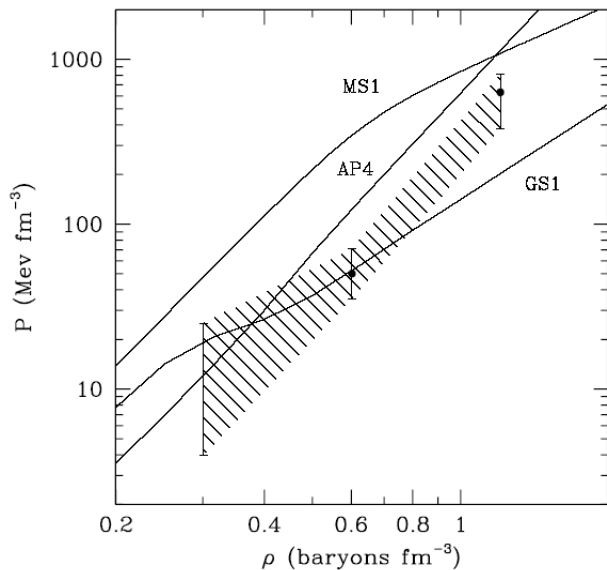
Now, constraints on EOS can be obtained from observations of X-ray bursters !?

Eddington fluxの不定性に
 に伴い、 M , R
 の推定値に
 不定性が残る
 のが現状

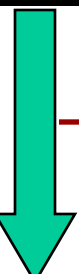
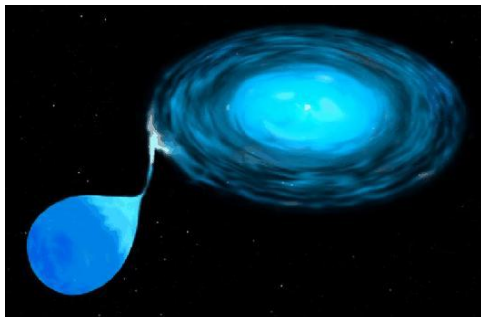


↓ Özel et al.,
 arXiv:1002.3153.

↓ Steiner et al.,
 arXiv:1005.0811.



Quiescent LMXB systems



降着が止むと

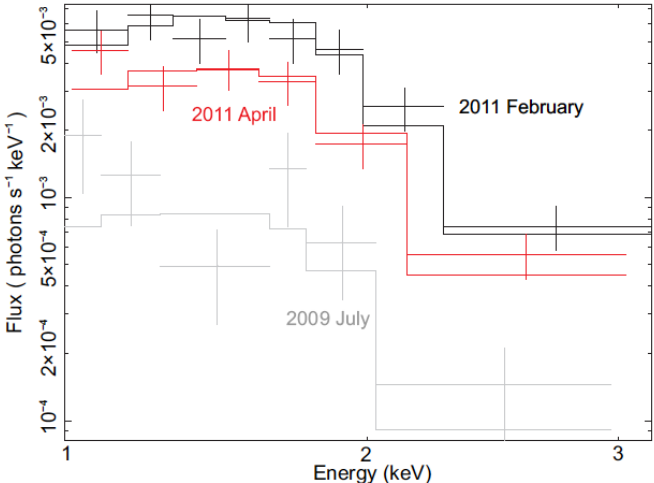


Figure 2. *Chandra*/ACIS spectra of IGR J17480-2446 at three different epochs. The 2011 data was obtained within a few months after the end of the 2010 October-December outburst and the 2009 data ~ 1 year prior to the accretion activity. The solid lines indicate best-fits to the neutron star atmosphere model NSATMOS.

Degenaar et al., arXiv:1107.5317.

Deep crustal heating during accretion

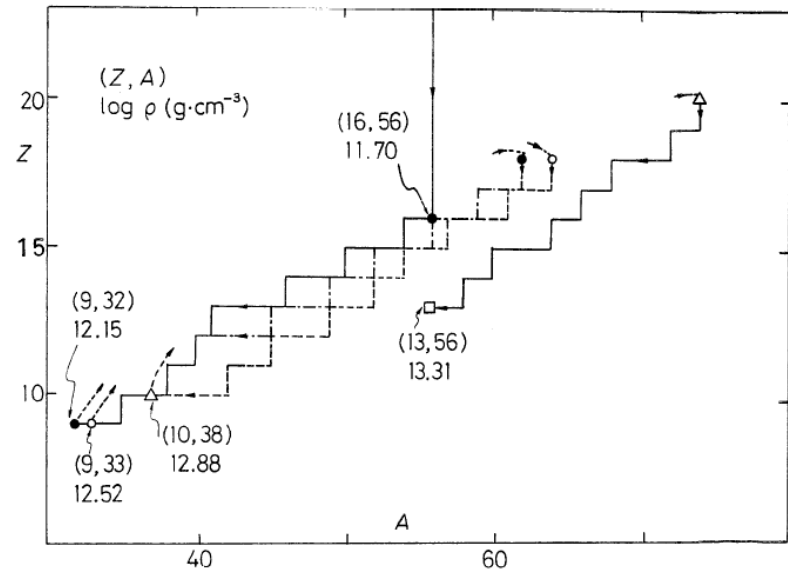


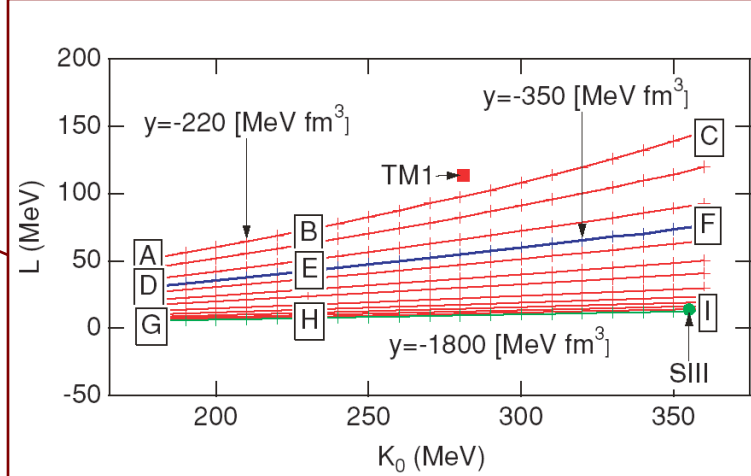
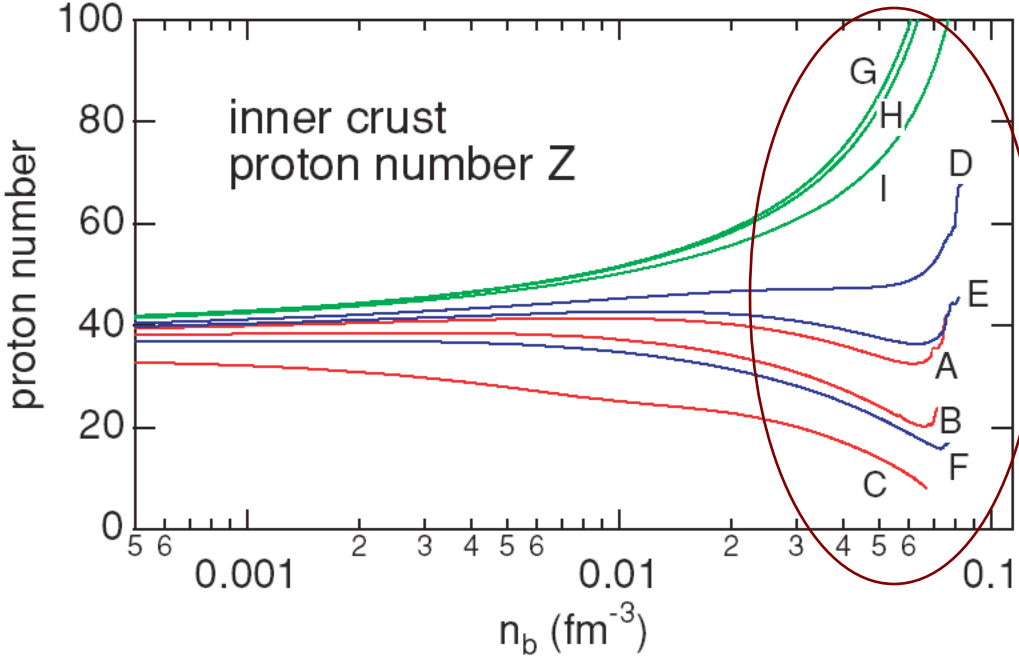
Fig. 1. Evolution of nuclear species with the increase of the density. The mark ● indicates the point of the first pycnonuclear reaction, ○ the second, △ the third and □ the fourth. The initial species is ⁵⁶Fe. (Model I)

K. Sato (1979)

Lとともに反応経路は
いかに変化する？

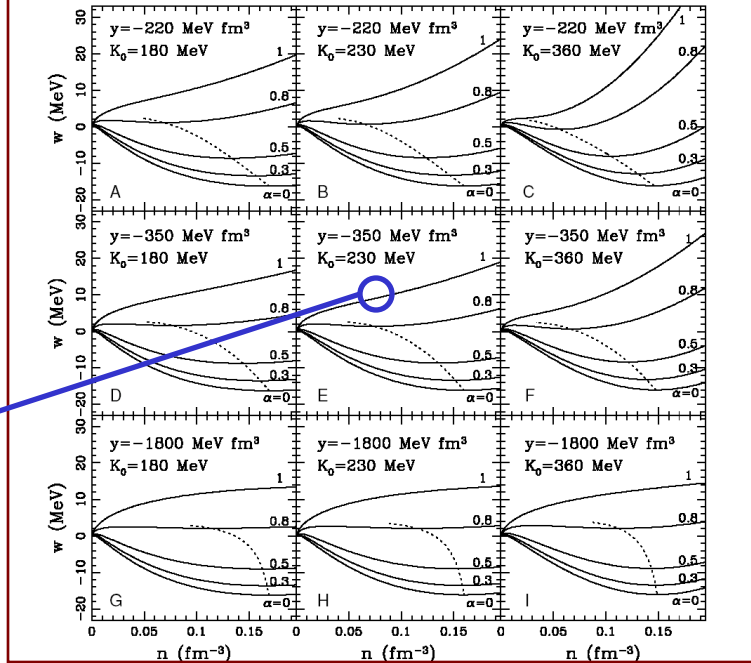
Equilibrium nuclear size in the inner crust of a neutron star

Ref. Oyamatsu & Iida, PRC 75 (2007) 015801.



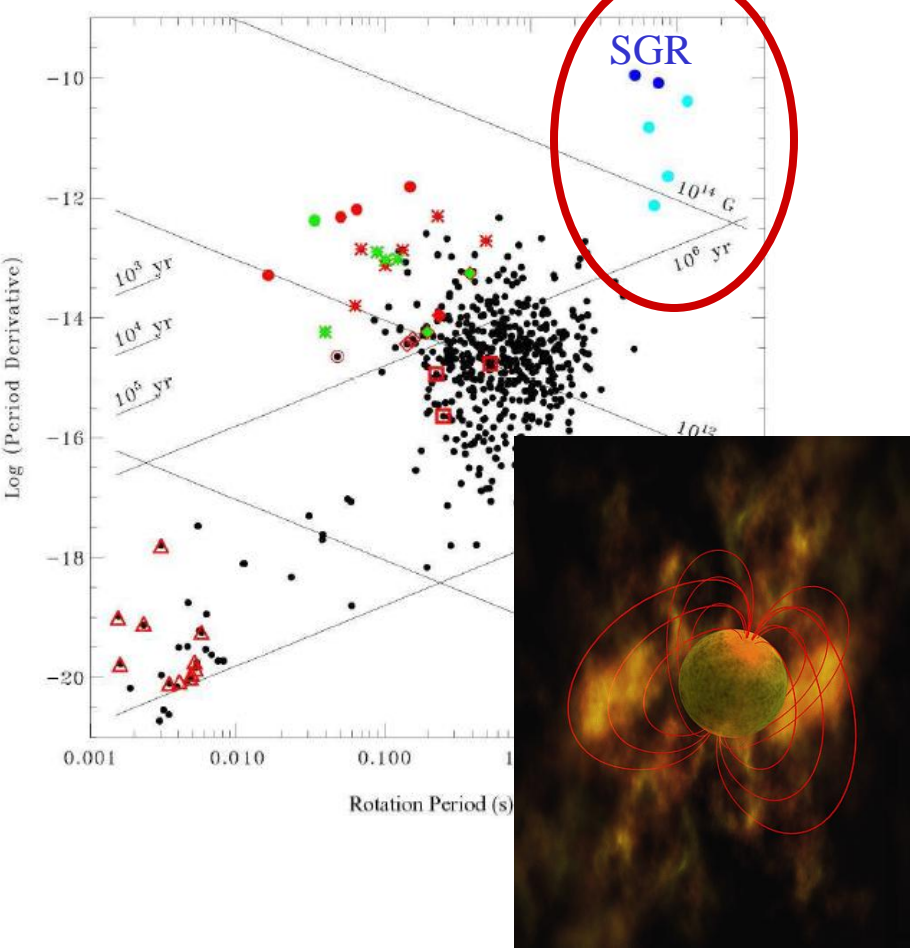
The larger L , the smaller size.

close to the GFMC result with the Argonne v_8' potential

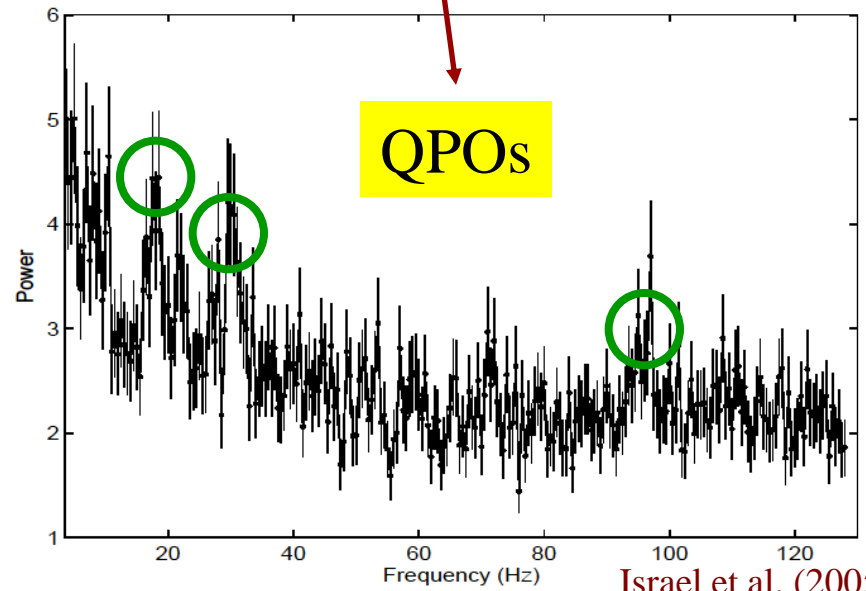
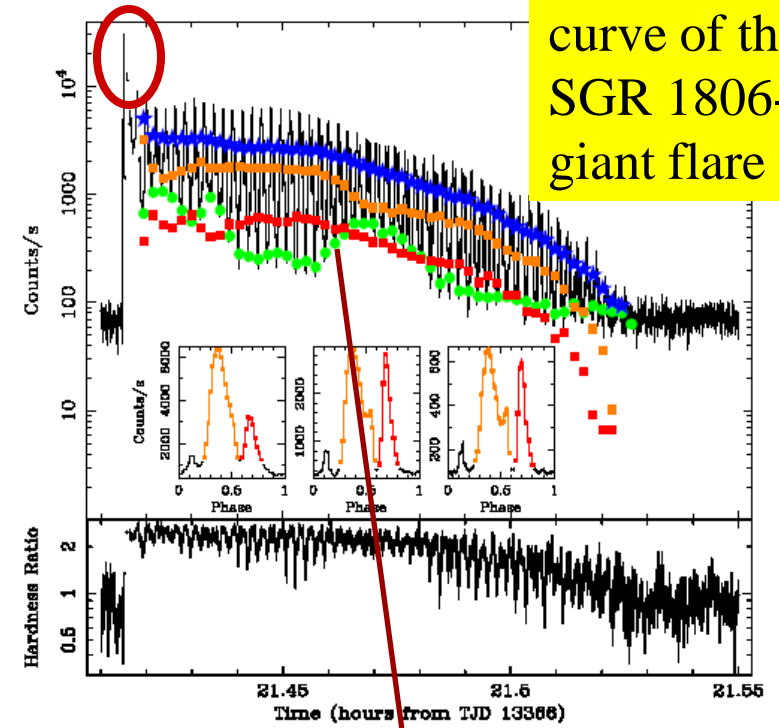


QPOs in giant flares from SGRs

マグネター



X-ray light curve of the SGR 1806-20 giant flare



arXiv:astro-ph/0208356

想像図
by NASA

Israel et al. (2005)

QPOs in giant flares from SGRs (contd.)

QPOをクラストのずりモードととらえた場合の振動数計算例

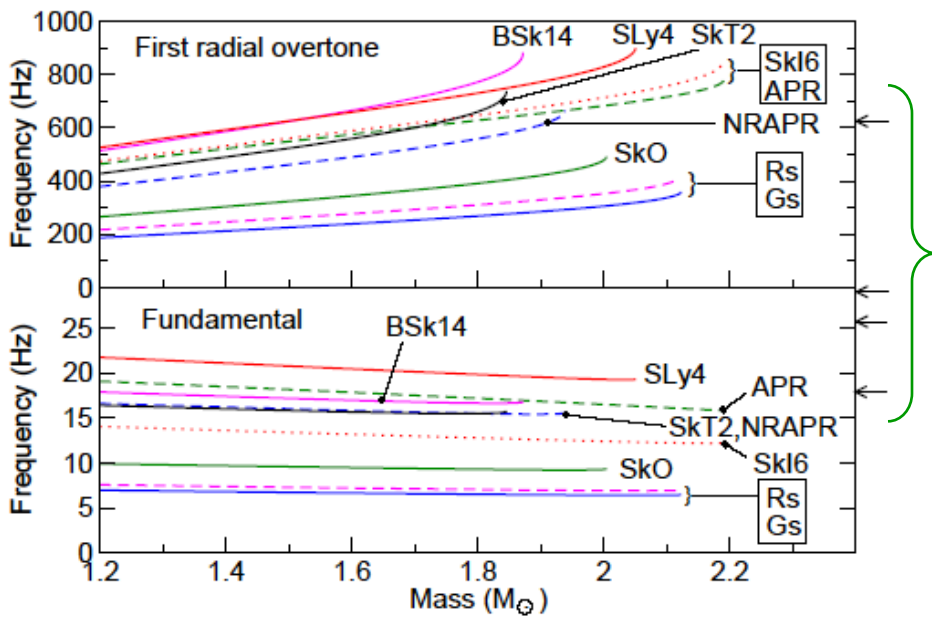
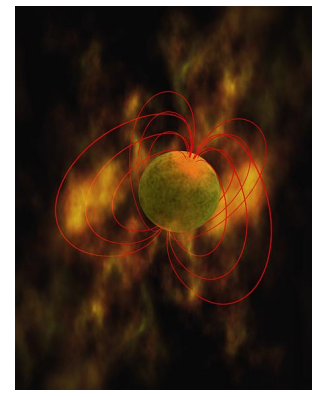


FIG. 3: The crust oscillation frequencies as a function of neutron star mass, for both the fundamental ($n = 0, l = 2$) torsional shear mode and the first radial ($n = 1$) overtone. The curves end at the maximum mass. The arrows on the right indicate QPO frequencies measured during the 2004 hyperflare from SGR 1806-20 [2, 4, 5].

Steiner & Watts (2009)

同定できないものはコアのアルベンモード？



Observed QPO frequencies

・ずり弾性率 ($\propto Z^2$) と L の関係から L に制限！？

・パスタのずり弾性率への影響の重要性

Sotani (2011)
Nakazato et al. (in prep.)

Conclusion

QPOs in giant flares
from SGRs

X-ray data from
quiescent LMXBs

Nuclear size and pasta region
in neutron star crusts

L

```
graph TD; A[QPOs in giant flares from SGRs] <--> B[Nuclear size and pasta region in neutron star crusts]; C[X-ray data from quiescent LMXBs] <--> B; B <--> D[L];
```