中性子星冷却とその状態方程式依存

土肥 明 橋本正章 松尾康秀 中里健一郎 A 野田常雄 B

九大理学研究院、九大基幹教育院 A 、久留米工大 B

February 20, 2019

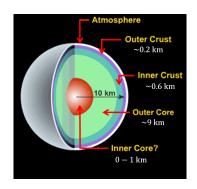
Intoduction of neutron star structure

- 超新星爆発によって誕生し、 その後ニュートリノと光子 の散逸により冷却
- ニュートリノの平均自由工程が一番大きく ($\simeq 10^5 \text{km}$)、 爆発後しばらくはニュートリノ放射がドミナント
- Core には様々なエキゾチックと粒子が存在

⇒核力の効果が大きくその性質を考慮すべきだが、核力の不定性により内部を記述する状態方程式(EoS)は多数存在

Typical values

 $M \sim 1.4 M_{\odot}$ 、 $R \sim 10 \text{ km}$ 中心密度 $\rho_{\rm C} \sim 10^{15} {\rm g/cm^3}$



(http://jiaps.org/assets/1-NeutronStar.gif)

EoS model

npeμ のみで構成された有限温度の通常核物質 EoS

- Shen EoS $\sigma\omega\rho$ の meson を取り入れた特殊相対論的な平均場 (RMF) モデル (1998)
- LS220 EoS 液滴模型+2体スキルム型相互作用(1991)

EoS model

npeμ のみで構成された有限温度の通常核物質 EoS

- Shen EoS $\sigma\omega\rho$ の meson を取り入れた特殊相対論的な平均場 (RMF) モデル(1998)
- LS220 EoS 液滴模型+2体スキルム型相互作用(1991)
 ⇒ しかし、これらは現実的な計算に基づいて構成されていない(s.t. 平均場、液滴模型、…)

EoS model

npeμ のみで構成された有限温度の通常核物質 EoS

- Shen EoS $\sigma\omega\rho$ の meson を取り入れた特殊相対論的な平均場 (RMF) モデル(1998)
- LS220 EoS 液滴模型+2体スキルム型相互作用(1991)
 ⇒ しかし、これらは現実的な計算に基づいて構成されていない(s.t. 平均場、液滴模型、…)
- Togashi EoS 近年、富樫・中里ら(九大)により、現実的な 2体(Argonne V 18)、3体(Ubrana IX)のポテンシャルを基 にして構築された新しい有限温度の EoS (2017)

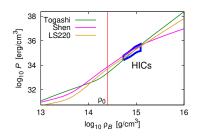
今回は上記の3つの有限温度の EoS を使用。新しい Togashi EoS は 観測的・実験的制限を満たすだろうか?

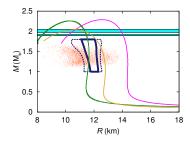
Interactions and nuclear matter properties of the SN EOSs

Nuclear	$n_{ m sat}$	BE/A	K	\overline{Q}	J	L	type of int.	used in
Interaction	(fm^{-3})	(MeV)	(MeV)	$\left(\frac{\text{MeV}}{\text{fm}^3}\right)$	(MeV)	(MeV)		
SKa	0.155	16.0	263	-300	32.9	74.6	Skyrme	H&W
LS180	0.155	16.0	180	-451	28.6	73.8	Skyrme	LS180
LS220	0.155	16.0	220	-411	28.6	73.8	Skyrme	LS220, LS220 Λ , LS220 π
LS375	0.155	16.0	375	176	28.6	73.8	Skyrme	LS375
TMA	0.147	16.0	318	-572	30.7	90.1	RMF	HS(TMA)
NL3	0.148	16.2	272	203	37.3	118.2	RMF	SHT, HS(NL3)
FSUgold	0.148	16.3	230	-524	32.6	60.5	RMF	SHO(FSU1.7), HS(FSUgold)
FSUgold2.1	0.148	16.3	230	-524	32.6	60.5	RMF	SHO(FSU2.1)
IUFSU	0.155	16.4	231	-290	31.3	47.2	RMF	HS(IUFSU)
DD2	0.149	16.0	243	169	31.7	55.0	\mathbf{RMF}	$HS(DD2)$, $BHB\Lambda$, $BHB\Lambda\phi$
$_{ m SFHo}$	0.158	16.2	245	-468	31.6	47.1	RMF	SFHo
SFHx	0.160	16.2	239	-457	28.7	23.2	RMF	SFHx
TM1	0.145	16.3	281	-285	36.9	110.8	RMF	STOS, FYSS, $HS(TM1)$, $STOS\Lambda$,
								STOSY, STOSY π , STOS π , STOS π Q,
								STOSQ, STOSB139, STOSB145,
								STOSB155, STOSB162, STOSB165

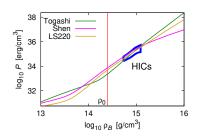
(©Hempel's slide at Numazu Workshop 2015)

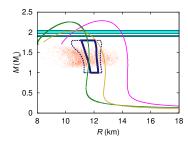
- 重イオン衝突(HICs)の実 験による制限 (Danielewicz et al. 2002)
- ② 観測された中性子星の最大 質量が $2.01\pm0.04M_{\odot}$ (Antoniadis et al. 2013)
- 低質量 X 線連星の Flux の観測・解析による制限 (Steiner et al. 2010)
- GW170817の観測・解析に よる制限 (Abbott et al. 2018)





- 重イオン衝突(HICs)の実 験による制限 (Danielewicz et al. 2002)
- ② 観測された中性子星の最大 質量が $2.01\pm0.04M_{\odot}$ (Antoniadis et al. 2013)
- 低質量 X 線連星の Flux の観測・解析による制限 (Steiner et al. 2010)
- GW170817の観測・解析に よる制限 (Abbott et al. 2018)
 - 2M_☉ に到達する soft な EoS が望ましい!

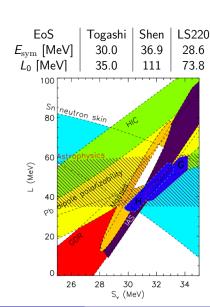




- $E_{\mathrm{sym}} L_0$ constraints (Lattimer & Steiner 2013)
 - 白が6つの実験的制限をすべて満たすエリア
 - しかしどれも原子核実験の model dependence もあり
 - Steiner らが 2018 年 12 月に 出した論文では

$$E_{\mathrm{sym}} \lesssim$$
 36MeV, $L_0 \lesssim$ 80MeV.

• Togashi EoS も OK

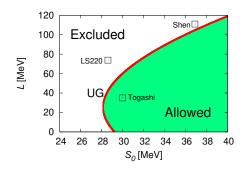


- UG bound (Tews et al. 2017)
 - 中性子星内部では、粒子が 凝縮し相互作用が大きい。⇒Unitary Gas (UG) 近似
 - 中性子核のエネルギー $E(u, Y_p = 0)$ は UG のエネルギー E_{UG} より大きい。

$$E(u,0)\geqslant E_{\mathrm{UG}}=0.6\xi_0E_{\mathrm{F}}(u)$$

ここで、 $\xi_0 \simeq 0.37$ は Bertsch パラメータで、実験 により決定される。

EoS	Togashi	Shen	LS220
S_0 [MeV]	30.0	36.9	28.6
L [MeV]	35.0	111	73.8

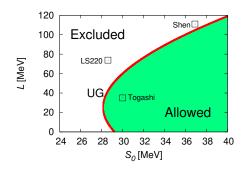


- UG bound (Tews et al. 2017)
 - 中性子星内部では、粒子が 凝縮し相互作用が大きい。⇒Unitary Gas(UG)近似
 - 中性子核のエネルギー $E(u, Y_p = 0)$ は UG のエネルギー E_{UG} より大きい。

$$E(u,0)\geqslant E_{\mathrm{UG}}=0.6\xi_0E_{\mathrm{F}}(u)$$

ここで、 $\xi_0 \simeq 0.37$ は Bertsch パラメータで、実験 により決定される。

EoS	Togashi	Shen	LS220
S_0 [MeV]	30.0	36.9	28.6
L [MeV]	35.0	111	73.8



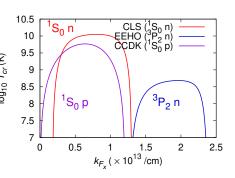
LS220 EoS は棄却

Motivation of our research

- 現実的な核力ポテンシャルを基にして作られた有限温度の状態方程式 Togashi EoS は多くの実験的・観測的制限を満たす。
- 柔らかい Togashi EoS において中性子星の冷却シミュレーションを行い表面温度の観測値と比較する。他の EoS の比較対象として従来使われてきた Shen EoS と LS220 EoS を使用。
- それぞれの EoS での冷却計算の結果を比較し、特に Togashi EoS においてその原因を探る。

Neutrino emission on $npe\mu$ matter

- Standard Cooling Modified URCA プロセス+制動放射 ⇒ 放射率はいずれも 10¹⁹⁻²¹ erg/s 程度
- Exotic Cooling Direct URCA プロセス (DU) \Rightarrow 逆 β decay。放射率は 10^{27} erg/s 程度で非常に強く支配的! しかし、 $Y_p \gtrsim 0.1477$ でのみ発生
- Nucleon Superfluid (SF) Effect
 ⇒ SF 転移温度以下で核子同士が Pair を組むことにより ν 放射を抑制
 - $p: {}^{1}S_{0} \quad n: {}^{1}S_{0}, {}^{3}P_{2}$
 - ▶ ³P₂ 状態のほうが ν 放射を 大きく抑制 (Takatsuka. 1972)



(SF model at present)

Setup

- 表面組成を H73%、He25%、Ni2% (Potekhin et al. 2015)
- 1D 球対称の基礎方程式 (Thorne et al. 1977)
 - 連続の式

$$\frac{\partial M_{\rm tr}}{\partial r} = 4\pi r^2 \rho \ ,$$

② 静水圧平衡の式(TOV 方程式)

$$\frac{\partial P}{\partial r} = -\frac{G\rho}{r^2} \left(1 + \frac{P}{\rho c^2} \right) \left(M_{\rm tr} + \frac{4\pi r^3 P}{c^2} \right) \left(1 - \frac{2GM_{\rm tr}}{c^2 r} \right)^{-1} ,$$

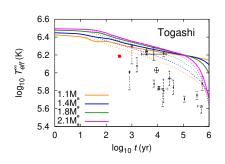
3 エネルギー輸送方程式

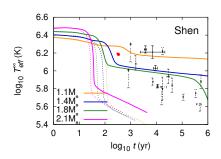
$$\frac{\partial \ln T}{\partial \ln P} = \nabla_{\rm rad} \ ,$$

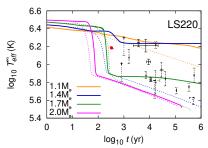
● エネルギー保存則

$$rac{\partial (L_r \mathrm{e}^{2\phi/c^2})}{\partial M_r} = -\mathrm{e}^{2\phi/c^2} \left(arepsilon_
u + \mathrm{e}^{-\phi/c^2} C_V rac{\partial T}{\partial t}
ight) \; .$$

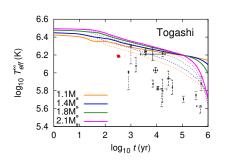
Result 1

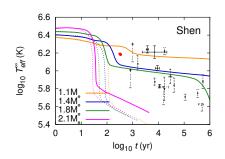


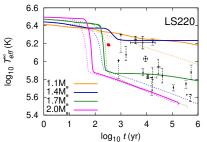




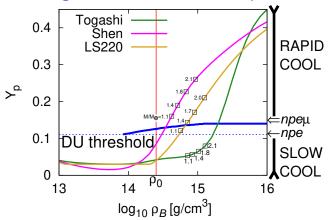
Result 1

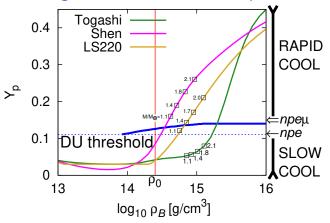




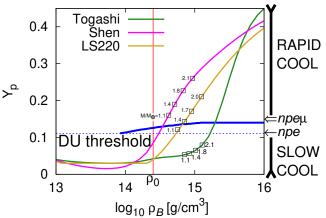


⇒ Shen EoS や LS220 EoS では SF model で観測値をよりよく再 現できるかもしれないが、 Togashi EoS では DU が起こらず 観測値の再現は不可能…





• Togashi EoS は高密度での Y_p が他と比べ非常に小さいので DU が起こらず表面温度の低い観測値と合わない。



- Togashi EoS は高密度での Y_p が他と比べ非常に小さいので DU が起こらず表面温度の低い観測値と合わない。
 - ⇒ Symmetry energy が小さいことに由来。

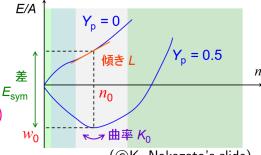
The property of symmetry energy

 $u = \rho_B/\rho_0$ とすると、1 核子あたりの核物質エネルギー $w(u, Y_p)$ は

$$w(u, Y_p) = w_0 + \frac{K_0}{18} (u - 1)^2 + \left[\frac{E_{\text{sym}}}{3} + \frac{L}{3} (u - 1) + \cdots \right] (1 - 2Y_p)^2$$

と、 $Y_p = 0.5$ 近傍で展開可。この第 3 項の [] の中身を対称エネルギー S(u) と定義する。従って、高密度ほど S(u) が大きい。

- 核密度 u=1付近では主に5つのパラメータ $ho_0(n_0), w_0, K_0, E_{\mathrm{sym}}, L_0$ で核物質 EoS が決まる。
- 高密度 $u \gg 1$ では S(u) = w(u, 0) w(u, 0.5) が用いられる。

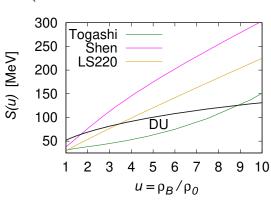


(©K. Nakazato's slide)

- ・ 黒の曲線は DU threshold での $S(u) \equiv S^{\mathrm{DU}}(u)$
- u ≫ 1でも EoS ごと の S(u) の違いは L で 表せている。
- Togashi EoS のような S(u) が小さい EoS は、半径の制限に対 してよくても表面温 度の観測値に対して はよくない。

$$S^{\mathrm{DU}}(u) \simeq 82.8 \mathrm{MeV} \cdot rac{(u Y_{p\mathrm{th}})^{1/3}}{1 - 2 Y_{p\mathrm{th}}}$$

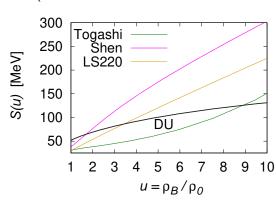
(Tews et al. 2017)



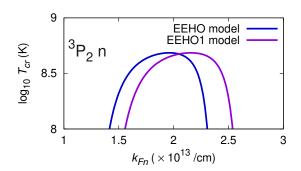
- ・ 黒の曲線は DU threshold での $S(u) \equiv S^{\mathrm{DU}}(u)$
- u ≫ 1でも EoS ごと の S(u) の違いは L で 表せている。
- ◆ Togashi EoS のような S(u) が小さい EoS は、半径の制限に対 してよくても表面温 度の観測値に対して はよくない。
- 他の Exotic 粒子による冷却機構を導入すべき!

$$S^{\mathrm{DU}}(u) \simeq 82.8 \mathrm{MeV} \cdot rac{(u Y_{p\mathrm{th}})^{1/3}}{1-2 Y_{p\mathrm{th}}}$$

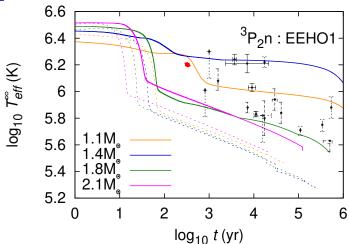
(Tews et al. 2017)



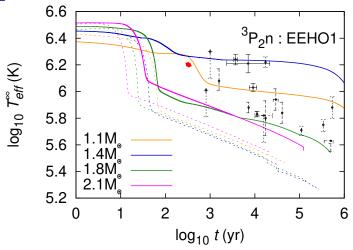
- Togashi EoS も Exotic 粒子による冷却を考慮すれば Cooling の 観測値を説明できるかもしれない。
- 今回は、 π 凝縮による ν 放射(Muto et al. 1993)を Togashi EoS に考慮した。
 - ⇒ 放射率は DU と同程度で非常に強く、かつほぼ常に発生
- ³P₂ 中性子の SF モデルを EEHO から EEHO1 に変更した。



Result 2



Result 2



⇒ Symmetry energy が小さい Togashi EoS でも SF model をうまく 選べば表面温度の観測値を再現可能

Summary & Future Work

- LS220、Shen EoS は Rapid Cooling を起こすが、Togashi EoS は Y_p が小さいため全く起こさない。
- 他と比べて Symmetry energy が小さいことが原因
- Symmetry energy が小さい EoS は多くの制限を満たす一方、 Cooling の観測値を満たさないので、他の Exotic 粒子による冷 却が必要!! Exotic 粒子の存在が期待される。

今後は …

- 他の Exotic 粒子を取り入れた Togashi EoS での冷却計算(Λ)
- 超流動モデル(特に³P₂ 中性子)の改良
- 他のLの値をもつ EoS とも比較
- Cassiopeia A の傾きも観測値として考慮 (Wijingaarden et al. 2019で表面温度のデータが更新)