
天体物理と状態方程式

初田さんからもらったお題

京大基研 大西 明

バリオン間相互作用に基づく核物質の構造
盛岡市つなぎ温泉ホテル紫苑
2009年6月25-27日

- Introduction
- 高密度核物質
- 低密度核物質
- Summary

コンパクト天体現象

■ 中性子星（初田さん、武藤さん）

- Cold -dense ($\sim 5 \rho_0$) matter (static, v-less)
- Many new forms of matter have been proposed !

■ 超新星

- Warm ($T \sim 20$ MeV), dense ($\sim 1.6 \rho_0$), dynamical, non-eq. v
- Important site of nucleosynthesis

■ ブラックホール形成過程

- Hot ($T \sim 70$ MeV), dense ($\sim 5 \rho_0$), dynamical, non-eq. v

■ BH-BH, NS-BH, NS-NS 融合 → 数値相対論

Nuclear matter at various densities and temperatures is realized in nature !

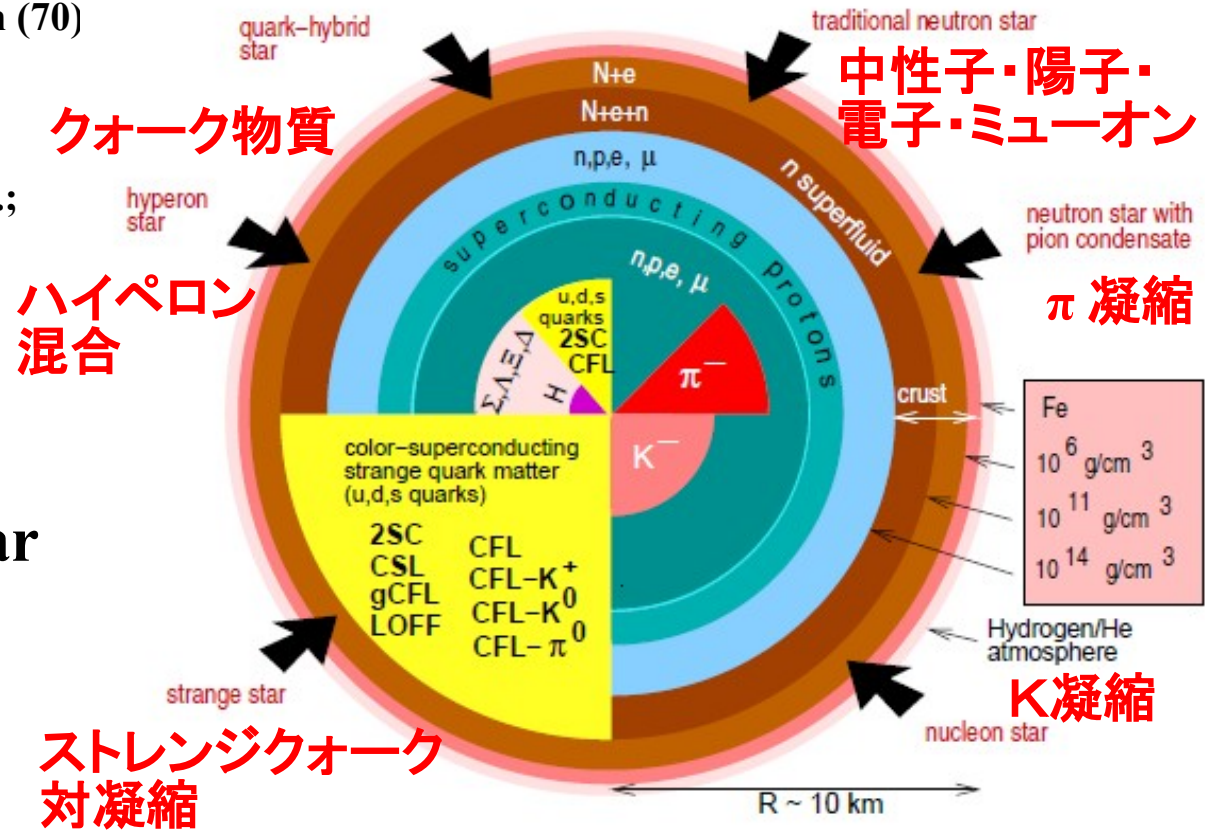
Neutron Stars

■ 高密度物質はどのような状態か？

- 核子の超流動状態 (${}^3S_1, {}^3P_2$)
- π 凝縮、K 凝縮、QGP、カラー超伝導、Quarkyonic 物質、....
- ハイペロン混合

Tsuruta, Cameron (66); Langer, Rosen (70)
 Pandharipande (71); Itoh(75);
 Glendenning; Weber, Weigel;
 Sugahara, Toki; Schaffner, Mishustin;
 Balberg, Gal; Baldo et al.; Vidana et al.;
 Nishizaki, Yamamoto, Takatsuka;
 Kohno, Fujiwara et al.; Sahu, AO;
 Ishizuka, AO, Tsubakihara,
 Sumiyoshi, Yamada; ...

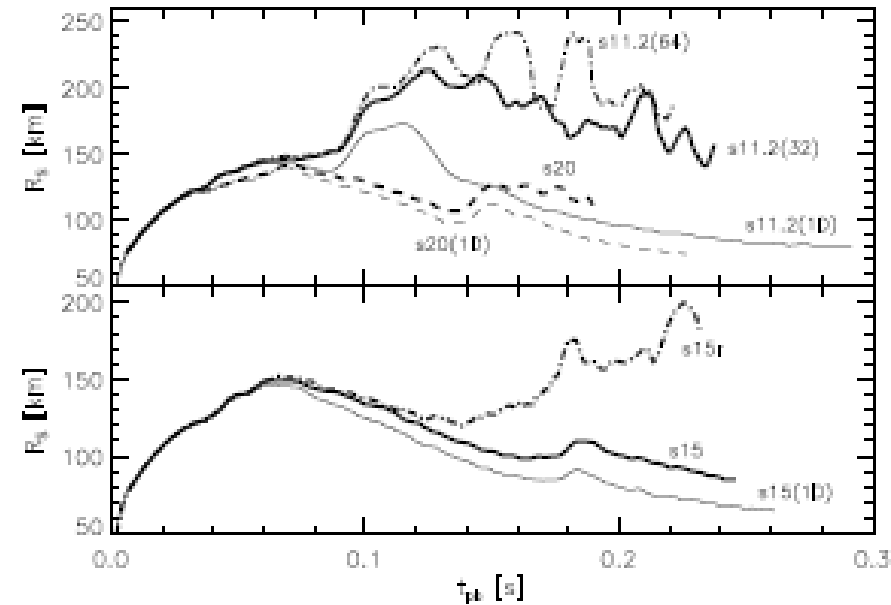
→ Nobody says
 “Hyperons do not appear
 in Neutron Stars !



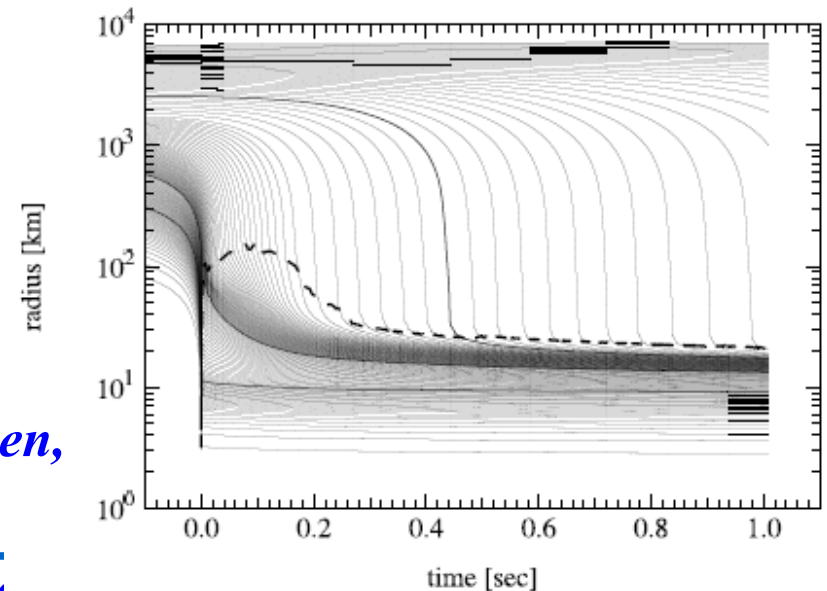
F. Weber, *Prog. Part. Nucl. Phys.* 54 (2005) 193

Numerical Simulation of Supernova Explosion

- **ν radiation hydrodynamics**
 - **Baryons, Electrons, Photons (Hydro)**
+ **neutrinos (Boltzmann)**
 - **1-dim. (Spherical Sym.)**
→ **Exact ν transport leads to failed supernova explosion failure.**
(Sumiyoshi et al., 2005)
 - **2-dim. Hydrodynamics** → **marginal**
(Janka et al., 2002)



R. Buras, M. Rampp, H.-Th. Janka, K. Kifonidis, PRL90(03)241101



K. Sumiyoshi, S. Yamada, H. Suzuki, H. Shen, S. Chiba, H. Toki, ApJ629(05)922

Numerical Simulation of Supernova Explosion

Recent developments (approximate v transport)

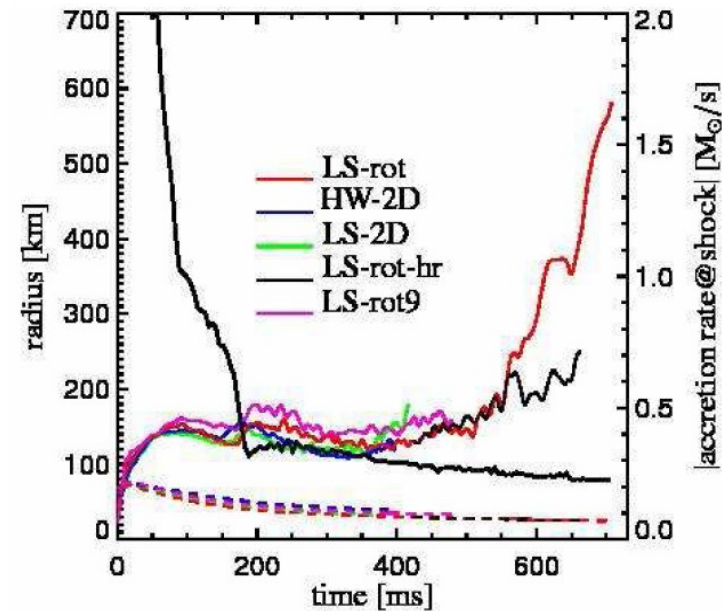
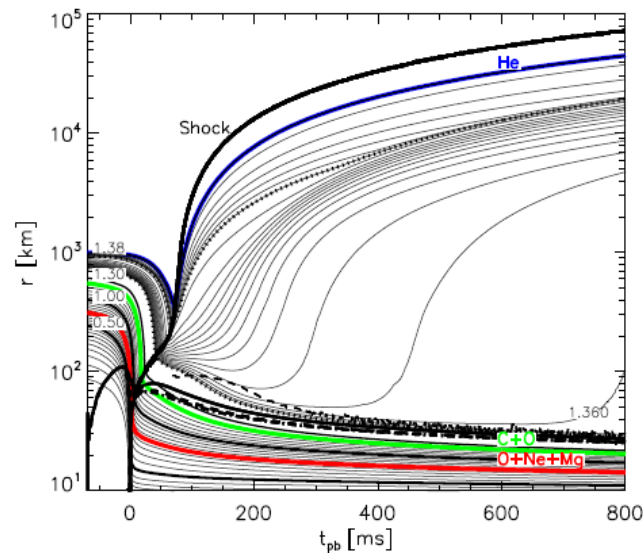
Light progenitor (8-10 Msun)

→ Successful explosion with simultaneous calc. of nucleosynthesis

Heavy progenitor (15 Msun)

→ Standing accretion shock instability (SASI) causes late expl.

There are some successful examples, but not conclusive yet.

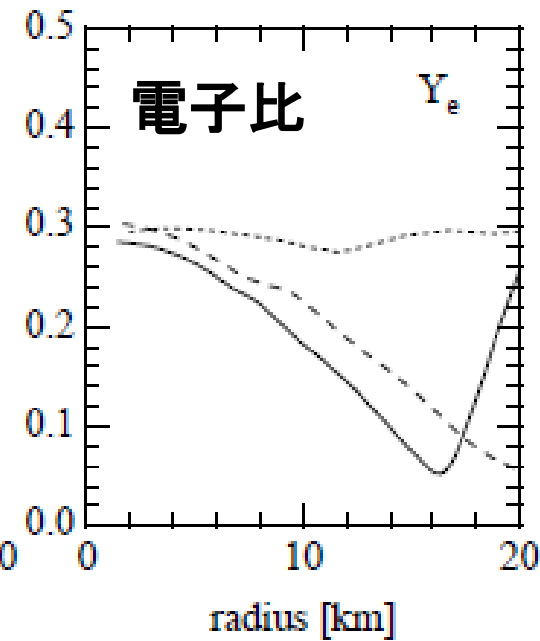
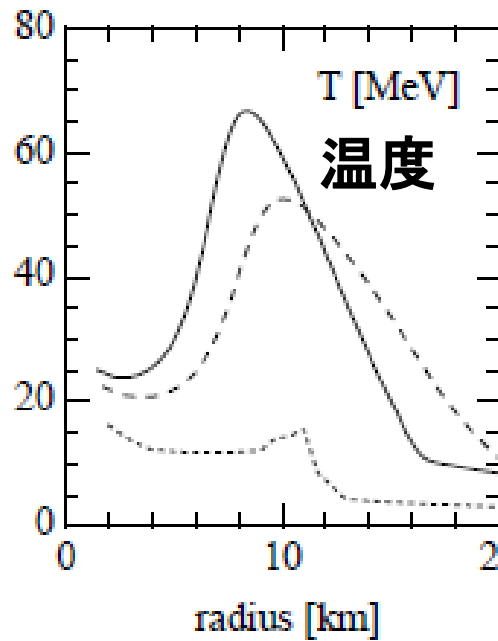
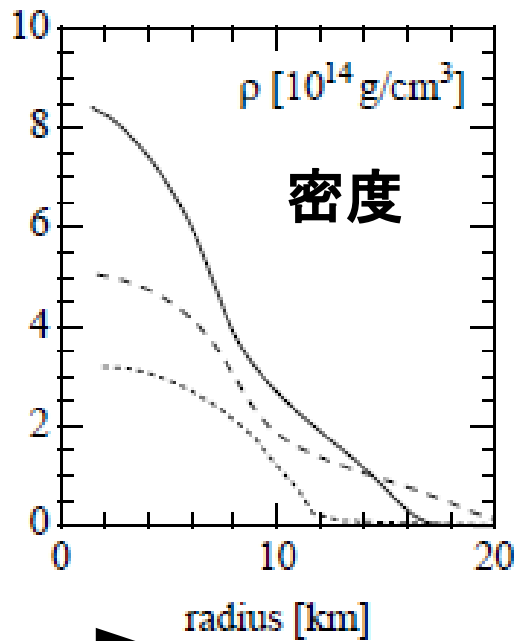
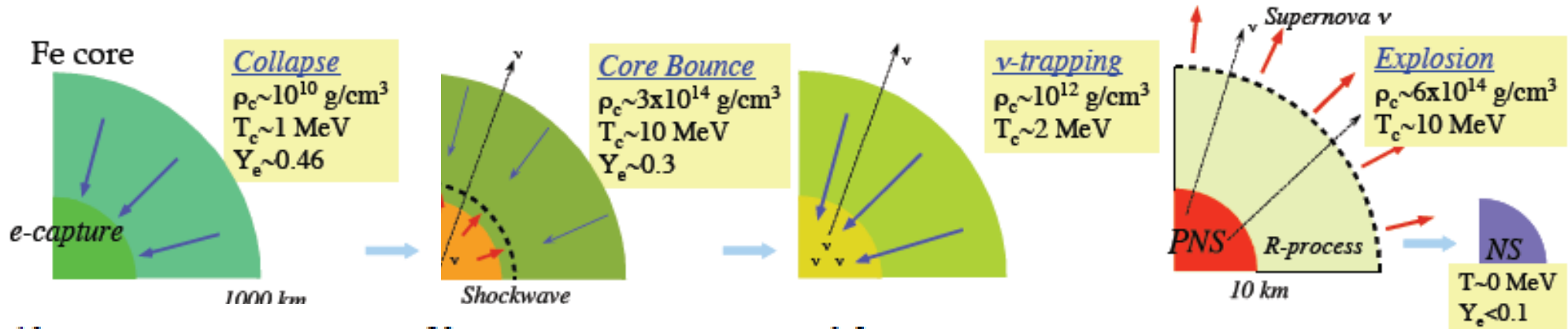


Kitaura, Janka, Hillebrandt, 2006

Marek, Janka, 2008

Black Hole Formation (Failed Supernova)

- “Hot” rather than “Dense” in BH formation process !
 $T \sim 70 \text{ MeV}$ ($\sim 1/3$ of QCD phase transition T .)

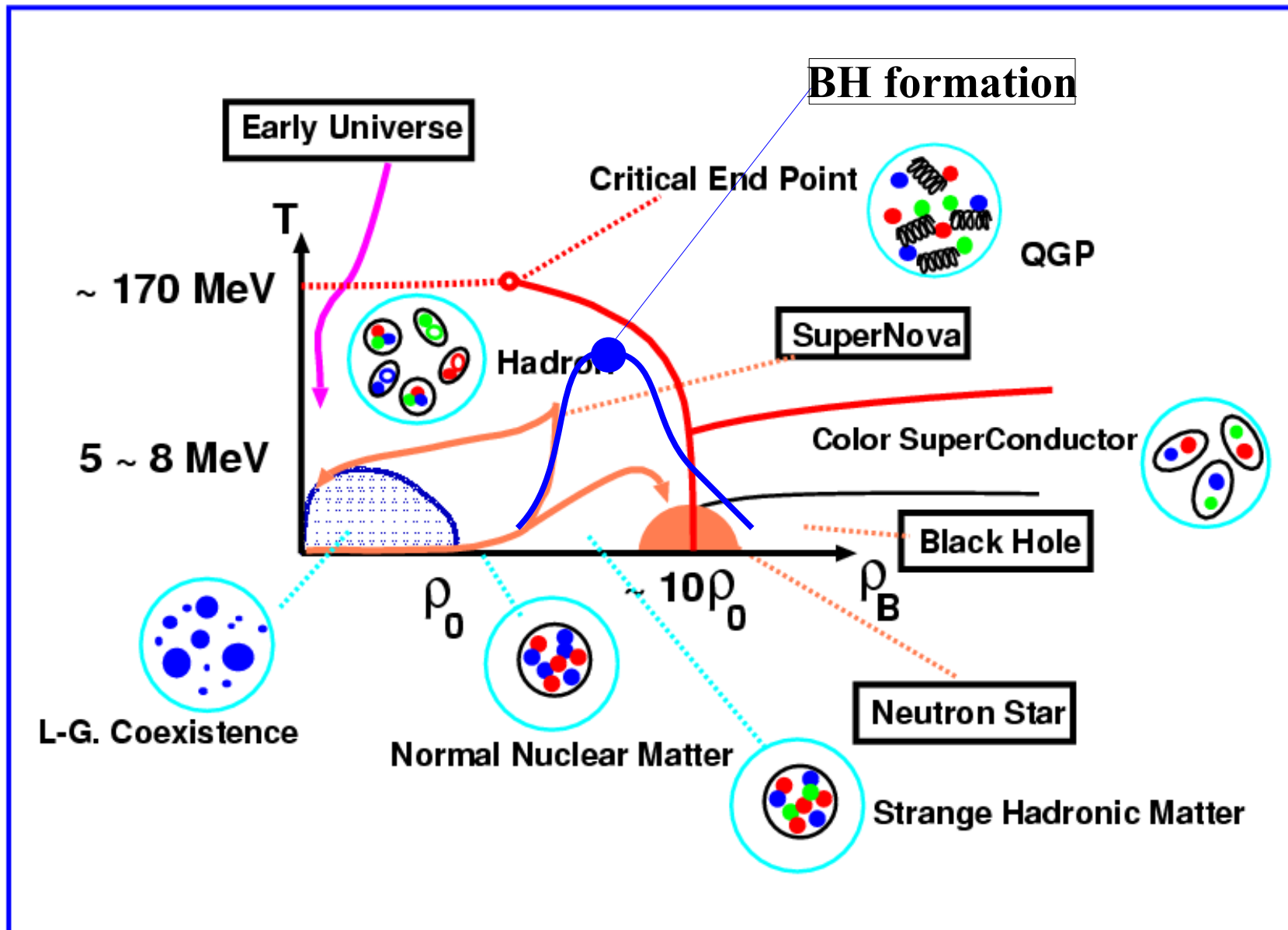


バウンス直後
 500 ms
 680 ms
 (BH 生成直前)

Sumiyoshi, Ishizuka, AO, Yamada, Suzuki, 2009

半径

Nuclear Matter Phase Diagram



コンパクト天体現象に用いる核物質状態方程式

- 超新星爆発計算 = v 輸送を取り入れた流体模型
 - 時間スケール ~ 数100 msec = v 以外は熱・化学平衡
 - 状態方程式: 核子、電子、光子、**原子核**、**ハイペロン**、 π , K, クォーク、...
 - 輸送方程式 (Boltzmann): v -A 断面積、e- 捕獲率
- 状態方程式 \rightarrow 有限温度効果、広い密度・ Y_p 範囲、公開
 - 第一原理計算 (LQCD, GFMC, Variational, DBHF, G-matrix)
 \rightarrow 飽和性の説明には現象論的3体力などが必要 (鷹野さん)
 - Lattimer-Swesty (LS) EOS (*J. M. Lattimer, F.D. Swesty, NPA535('91)331*)
 - ◆ 一様物質 \rightarrow スキルム力 (密度依存ゼロレンジ力) での平均場
 - ◆ 非一様効果 \rightarrow 圧縮性液滴
 - Relativistic EOS (Shen EOS)
(*H. Shen, H. Toki, K. Oyamatsu, K. Sumiyoshi, NPA637(1008)435*)
 - ◆ 一様物質 \rightarrow Relativistic Mean Field (RMF, TM1)
 - ◆ 非一様効果 \rightarrow Thomas-Fermi 近似 + 排除体積効果を取り入れた α

コンパクト天体現象に用いる核物質状態方程式

- 超新星爆発計算 = v 輸送を取り入れた流体模型
 - 時間スケール \sim 数100 msec = v 以外は熱・化学平衡
 - 状態方程式: 核子、電子、光子、**原子核**、**ハイペロン**、 π , K, クォーク、...
 - 輸送方程式 (Boltzmann): v -A 断面積、e- 捕獲率
- 状態方程式 \rightarrow 有限温度効果、広い密度・ Y_p 範囲、公開
 - 第一原理計算 (LQCD, GFMC, Variational, DBHF, G-matrix)
 \rightarrow 飽和性の説明には現象論的3体力などが必要 (鷹野さん)

($L \cdot \sigma_i \cdot \sigma_j$), and a two-pion part with operators $(L \cdot S)_{ij}^2$, L_{ij}^2 , $\sigma_i \cdot \sigma_j L_{ij}^2$ and $(L \cdot S)_{ij}^2$. The UIX model of V_{ijk} contains two static terms; the two-pion exchange Fujita-Miyazawa interaction, $V_{ijk}^{2\pi}$, and a phenomenological, intermediate range repulsion V_{ijk}^R . The strength of the $V_{ijk}^{2\pi}$ interaction was determined by reproducing the binding energy of the triton via Green's-function Monte Carlo (GFMC) calculations [20], while that of V_{ijk}^R was adjusted to reproduce the saturation density of SNM.

核物理からみた状態方程式の面白さ・問題点

■ なぜ面白い？

- 高温・高密度物質が「平衡状態」で作られている → 相転移現象がみえる？
- 物質の構成要素は？ → 原子核・ハドロン・クォークの3階層の関連

■ 問題点

● 高密度側

- ◆ 非圧縮率、対称エネルギーの密度依存性 → Unknown
- ◆ 核物質中のハドロン・ポテンシャル
- ◆ クォーク物質への相転移の性質は？

● 低密度側

- ◆ 物質の構成粒子は？ Fermi gas ? Nuclei ? Pasta ?
- ◆ 「原子核熱的分布」と「一様物質」をスムーズにつないだ EOS はない。

→ 高密度側・低密度側の取り組みについて、個人的視点から概観します。

高密度核物質の状態方程式

高密度核物質の状態方程式

■ 構成粒子

- 超流動核子、 π 、K、ハイペロン、クォーク、クォーク対、...

■ 非圧縮率 (K) : 決まっていない

- GMR (原子核の圧縮振動) $\rightarrow K = 210 \pm 30$ MeV (非相対論的平均場)

- 重イオン反応

\rightarrow 平均場の運動量依存性によりフローの K 依存性が抑制される

(*Sahu, Cassing, Mosel, AO, 2000; Danielewicz et al., 2002; Isse, AO, Otuka, Sahu, Nara, 2005*)

■ 対称エネルギーの密度依存性: 分かっていない

- 不安定核半径の精密測定で推定可能 (Oyamatsu, Iida, 2007)

■ 核物質中のハドロン・ポテンシャル: 進んでいる

- ハイペロン $U_{\Lambda}(\rho_0) = -30$ MeV, $U_{\Sigma}(\rho_0) = +(15-90)$ MeV, $U_{\Xi}(\rho_0) \sim -15$ MeV

- pionic atom $\rightarrow U_{\pi}(2\rho_0, Y_p \sim 0.2) > +50$ MeV

(*AO, Jido, Sekihara, Tshubakihara*)

■ クォーク物質への相転移の性質は? 非一様な分布? (丸山さん)

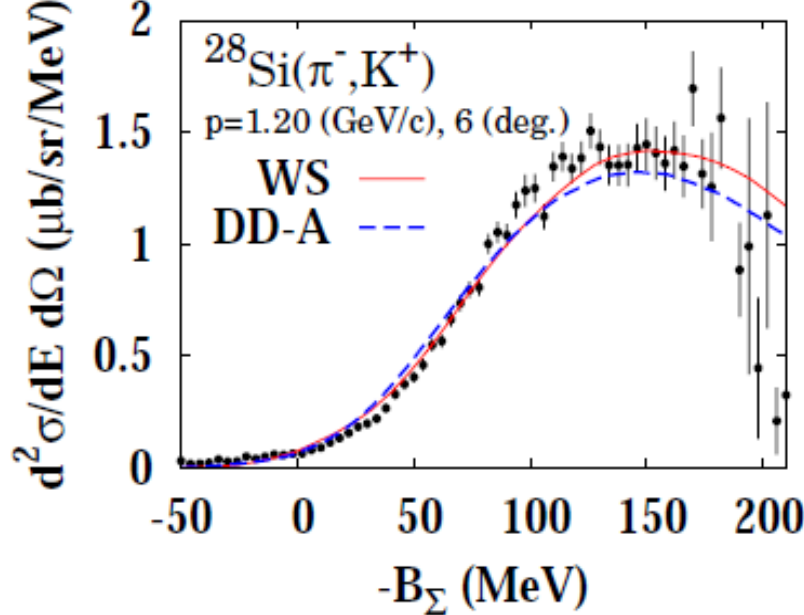
Σ Potential in Nuclear Matter

Maekawa, Tsubakihara, AO, EPJA 33(2007),269.

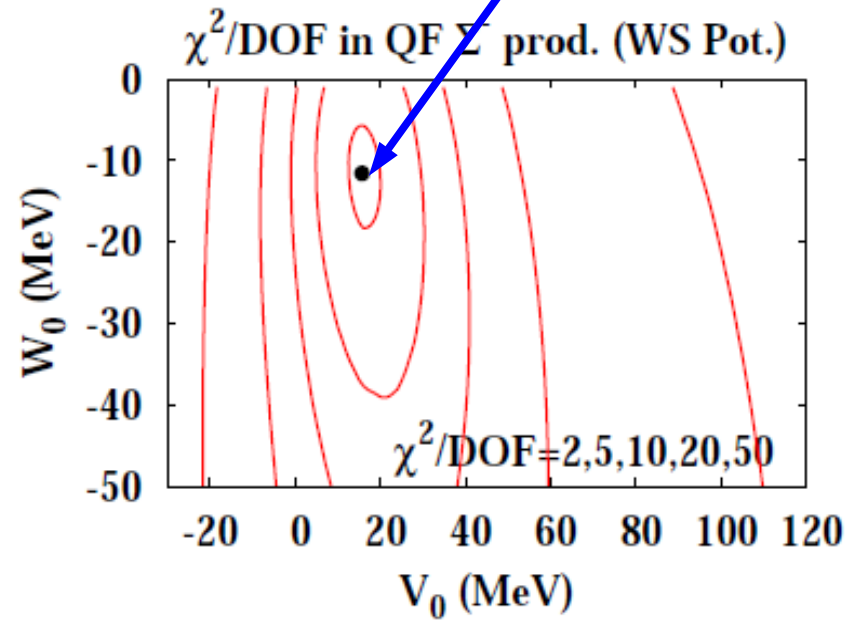
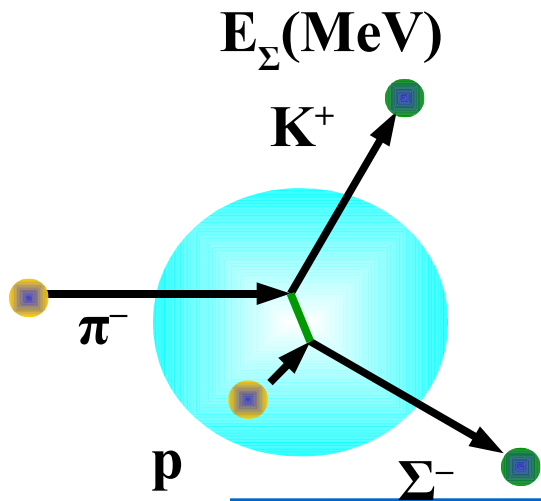
Harada, Hirabayashi, NPA744('04),323.

Kohno, Fujiwara, Kawai, et al. PTP112('04)895

$$\frac{d^2 \sigma}{d E_K d \Omega_K}$$



$U_{\Sigma}(\rho_0) \sim +15 \text{ MeV} - i 10 \text{ MeV}$
 with Woods-Saxon potential,
 no Atomic shift fit



Σ feels repulsive potential in nuclei

Relativistic EOS of Supernova Matter with Hyperons

- **Extention of the Relativistic (Shen) EOS to $SU_f(3)$ with updated Hyperon Potentials in Nuclear Matter**
(Ishizuka, AO, Tsubakihara, Sumiyoshi, Yamada, *J. Phys. G35(08),085201*)
 - Relativistic (Shen) EOS (Shen, Toki, Oyamatsu, Sumiyoshi, *PTP 100('98), 1013*)
Rel. Mean Field (RMF) + Local Density Approx. (Nuclear Formation)
 - $SU_f(3)$ Extention of RMF (Schaffner, Mishustin, *PRC53 (1996), 1416*)

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{Free}(B, \sigma, \omega_\mu, \vec{R}_\mu, \zeta, \phi_\mu) - U_\sigma(\sigma) + \frac{1}{4} c_\omega (\omega^\mu \omega_\mu)^2 - \sum_B \bar{\Psi}_B \left(g_{\sigma B} \sigma + g_{\omega B} \omega + g_{\rho B} \vec{R} \cdot \vec{\tau}_B + g_{\zeta B} \zeta - g_{\phi B} \gamma^\mu \phi_\mu \right) \Psi_B$$

Coupling ~ Quark Number Counting

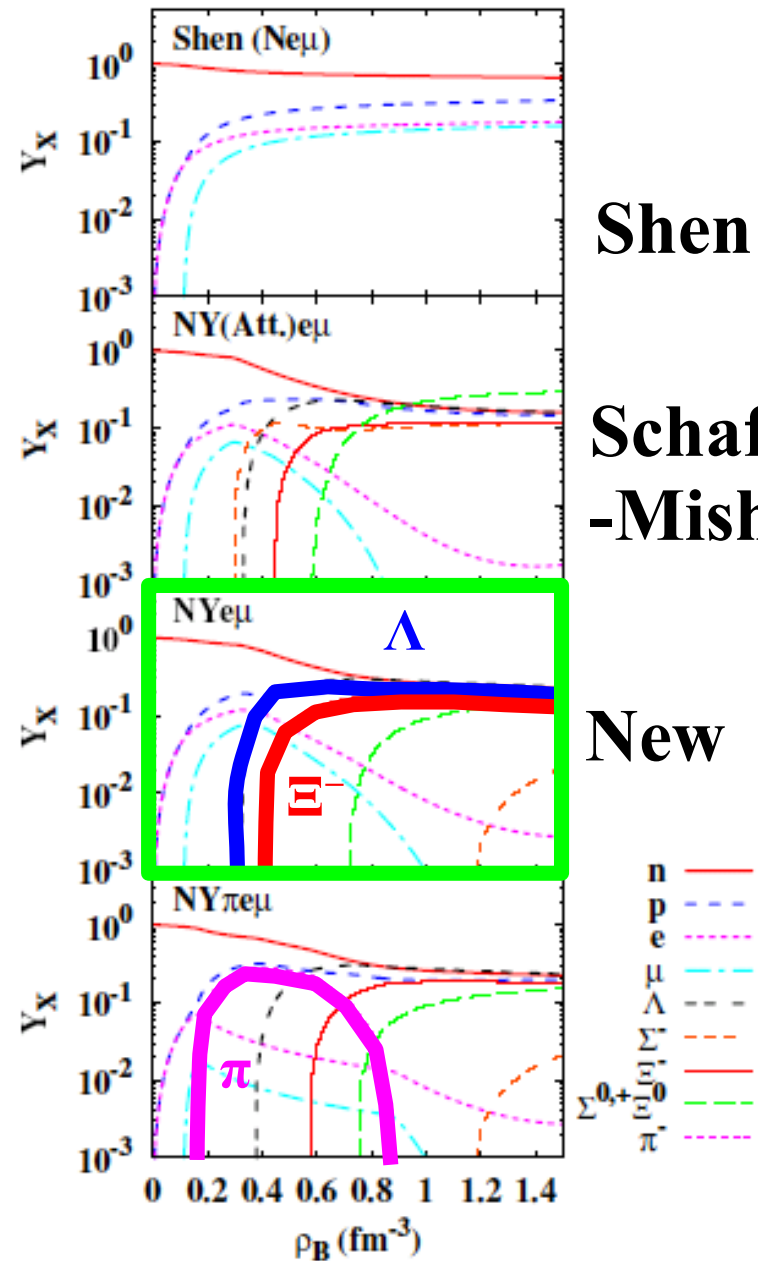
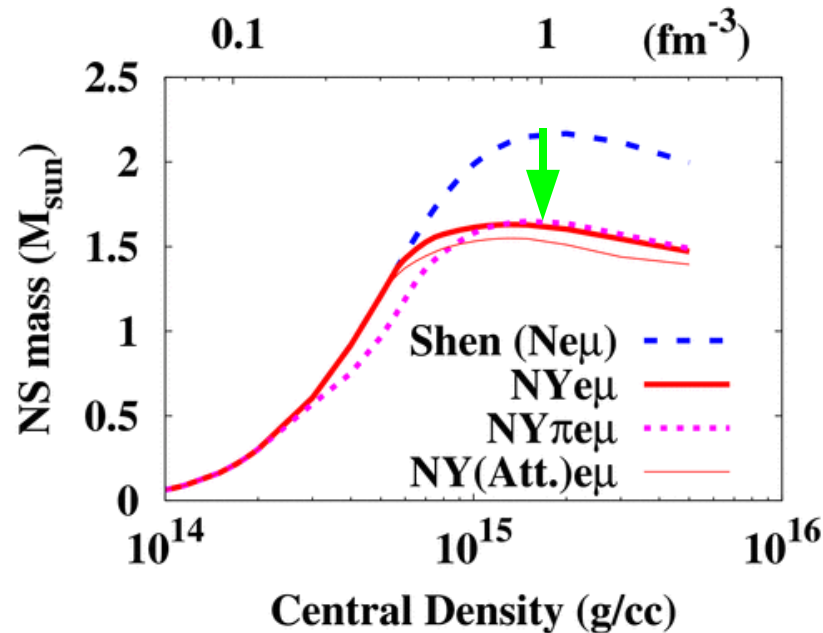
- $g_{\sigma Y}$ is tuned to fit Hyperon Potential in Nuclear Matter
 $U_\Lambda = -30 \text{ MeV}, U_\Sigma = +30 \text{ MeV}, U_E = -15 \text{ MeV}$
- Nuclear Formation is included using Shen EOS table

Neutron Star

Ishizuka, AO, Tsubakihara, Sumiyoshi, Yamada, *J. Phys. G* 35(08),085201

Hyperon Effect is DRASTIC

- $M_{\text{max}} = 2.1 M_{\text{sun}} \rightarrow 1.56 M_{\text{sun}}$
 - Composition $Y_{\Lambda} \sim Y_n$
 - Large fraction of Ξ
- Thermal (free) pions can admix at $\rho > 1.5 \rho_0$



Shen

Schaffner
-Mishustin

New

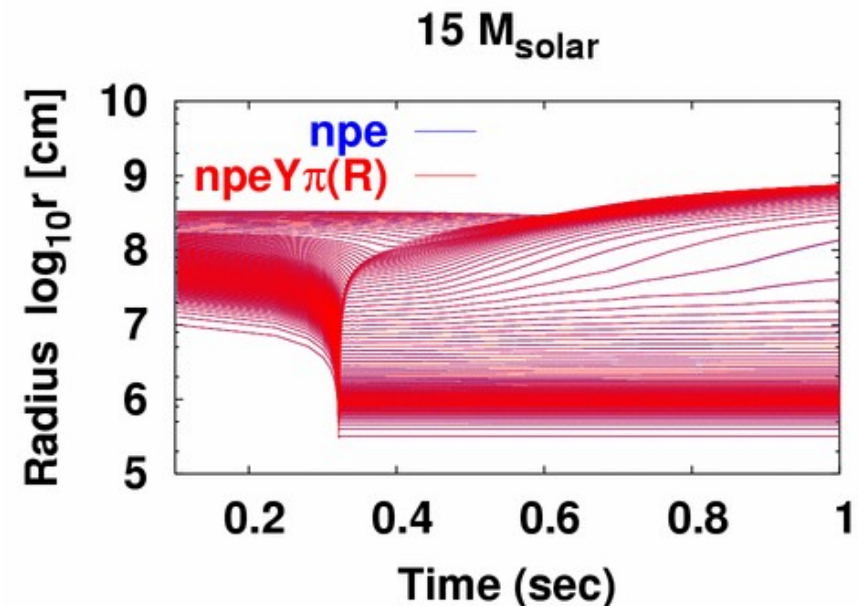
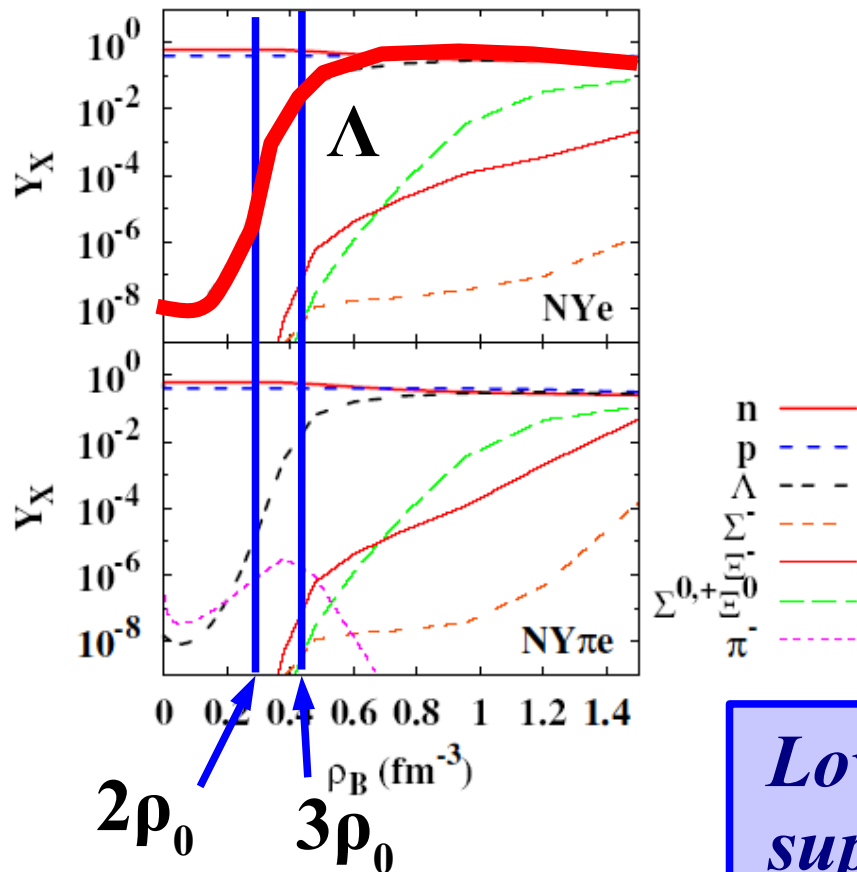
Finite Temperature and Supernova

Ishizuka, AO, Tsubakihara, Sumiyoshi, Yamada, *J. Phys. G35(08),085201*

- **Example: $T=10$ MeV, $Y_e = 0.4$**
 - Λ starts to increase at $\rho \sim 2\rho_0$, becomes significant at $\rho \sim 3\rho_0$.

- **Prompt explosion (without ν transport)**
 → Almost no change
 (Expl. E. increase $\sim (0.1-0.5 \%)$)

$T=10$ MeV, $Y_C=0.4$



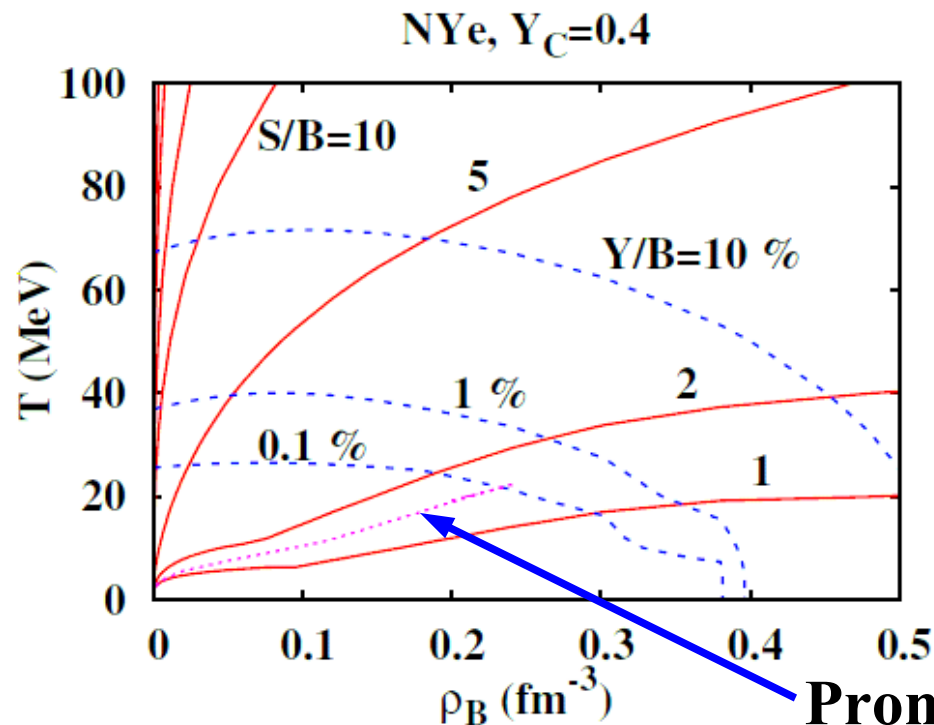
WW95 + 1 Dim. Hydro. (Sumiyoshi, Yamada)

Low density and High Y_e suppresses Hyperons in the Early Stage

Where do we see Hyperons ?

- Hyperon Fraction is sensitive to Y_e , T , and ρ_B .
 - $Y_v \sim 0$ (Neutron Star) $\rightarrow \rho_B > 2 \rho_0$
 - $Y_e \sim 0.4$ (Supernova, early stage) $\rightarrow T > 40$ MeV or $\rho_B > 3 \rho_0$

Hyperons would be important in Late Stage(Nstar cooling), BH formation, and Heavy-Ion Collisions



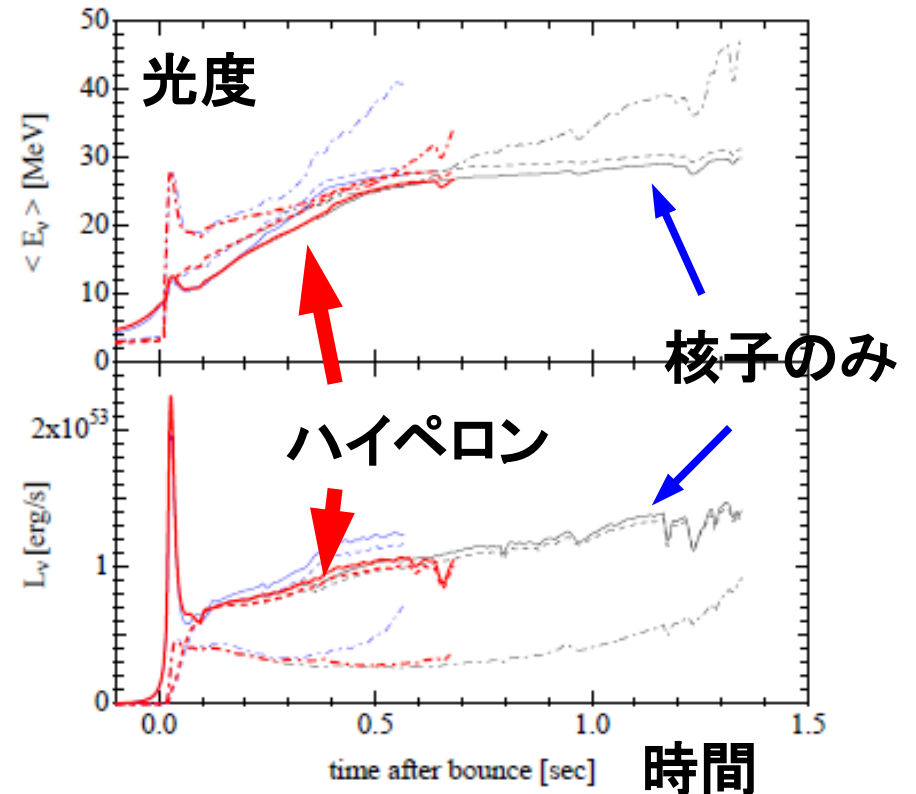
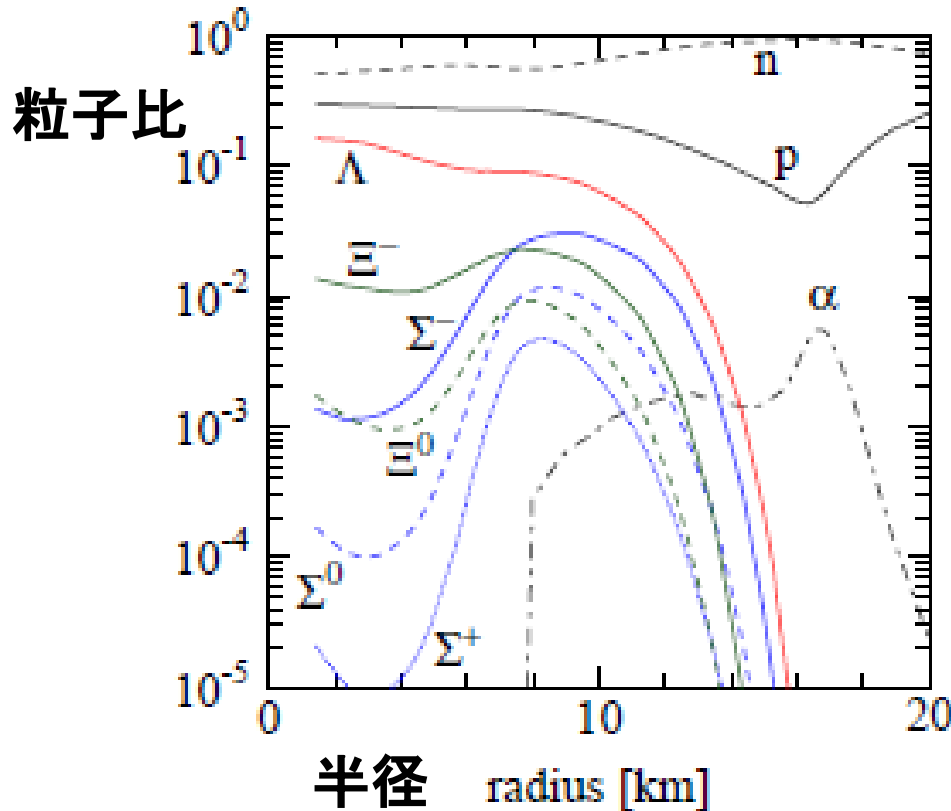
Prompt Expl. (15 Msun)

Black Hole Formation (Failed Supernova)

- High T during BH formation

→ Abundant hyperons → Soft EOS → Earlier Collapse to BH

Short ν emission may be the signal of Hyperon Admixture at high density and/or temperature



Sumiyoshi, Ishizuka, AO, Yamada, Suzuki, 2009

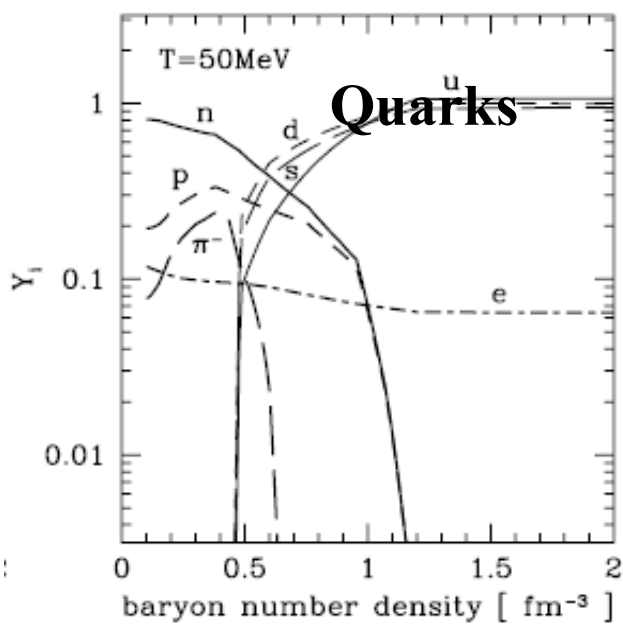


Can we detect Quark Matter ?

■ Supernova EOS with Quark-Hadron Coexistence

- Quark matter=Bag model, Hadronic matter= RMF with free pions
→ Earlier Collapse to Black Hole (*Nakazato, Sumiyoshi, Yamada, 2008*)
- Transition to Strange Quark Star → Second Shock (*Hatsuda, 1987; Sagert et al., 2009*)
- 他の QCD 相転移効果 → 安武さん

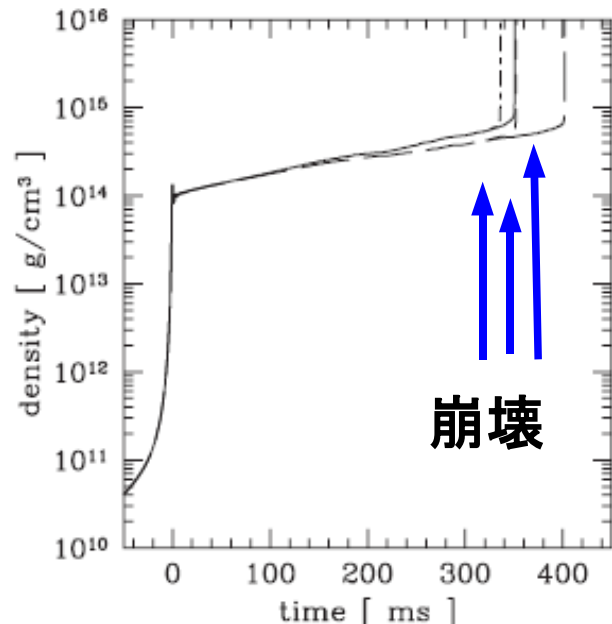
粒子比



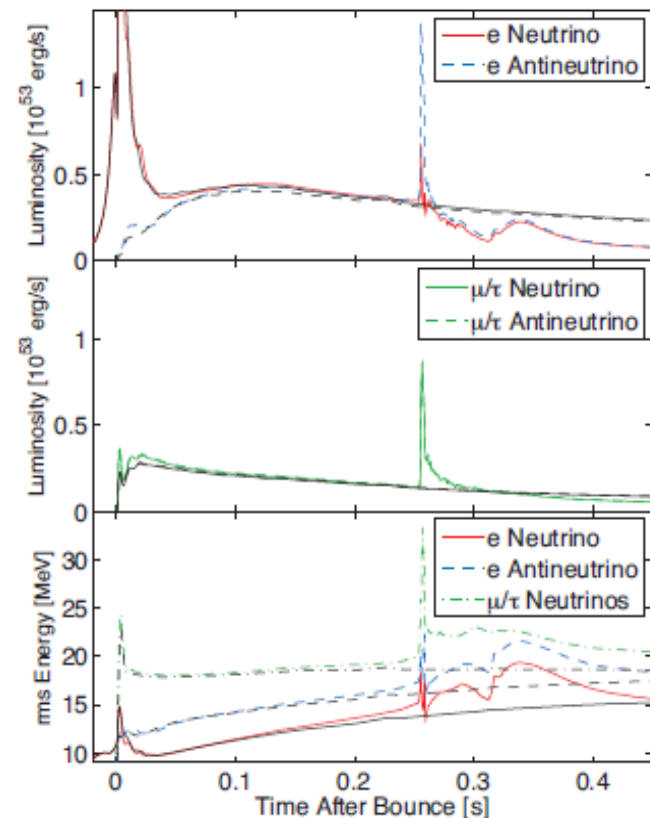
密度

Nakazato, Sumiyoshi, Yamada

密度



時間



Sagert et al., 2009

低密度核物質の状態方程式

低密度核物質の状態方程式

■ 液相・気相相転移 (Liquid-Gas) = 1次相転移

E.g. J. Pochodzalla et al. (ALADIN Collab.), PRL 75 ('95)1040

→ ρ_0 以下の低温核物質は一様でない

“p, n, α ” → “p, n, α , A(原子核)” → 一様核物質

■ LS EOS, Shen EOS : 代表的1種の原子核

● 圧縮性液滴 (LS EOS)、Thomas-Fermi (Shen EOS, IOTSY E)

→ 原子核の熱的分布が取り入れられていない!

(電子捕獲、 νA 反応率、元素合成)

■ 原子核統計平衡

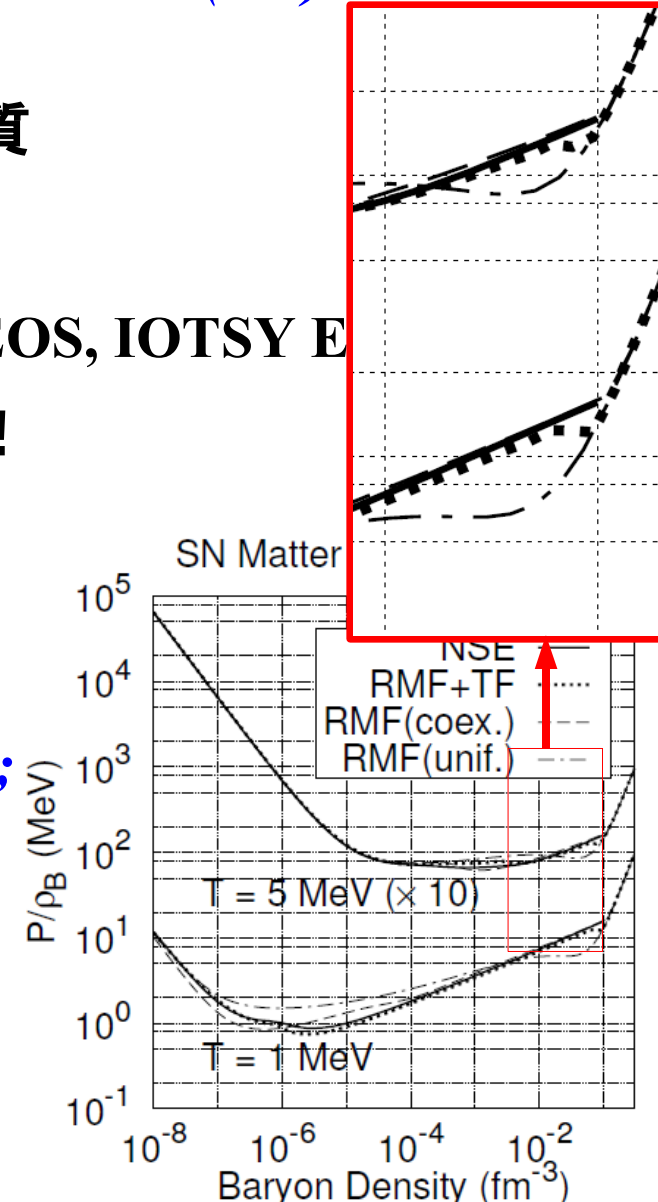
(NSE; Nuclear Statistical Equilibrium)

Ishizuka, AO, Sumiyoshi, 2003, Blinnikov et al., 2009; Botvina et al. 2009, ...

● ρ_0 以下での EOS は Shen EOS とほぼ同じ

● 球形原子核から一様物質には
圧力 (or F) が滑らかにつながらない。

パスタ原子核



パスタ原子核

- 飽和密度の少し下では、「奇妙な形」の原子核が現れうる
Sphere → Rod → Plate → Hole → Bubble

$$F = (1 - X) F(\rho_{BL}, Y_{pL}) + X F(\rho_{BG}, Y_{pG}) + V_{sc}(\Delta\rho_c, u)$$

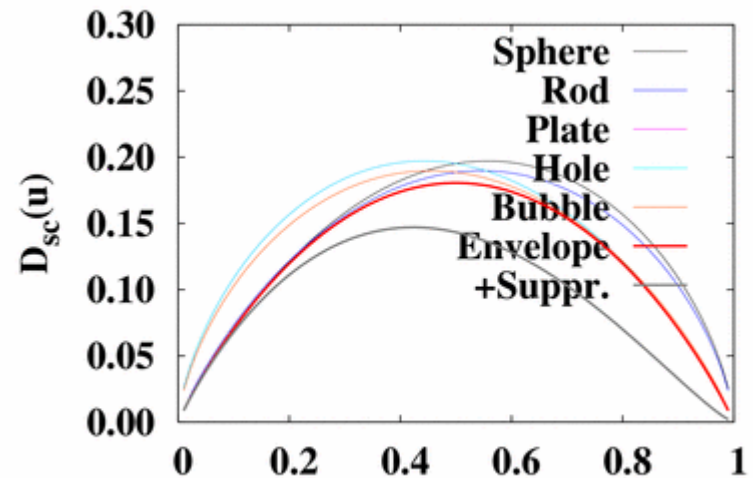
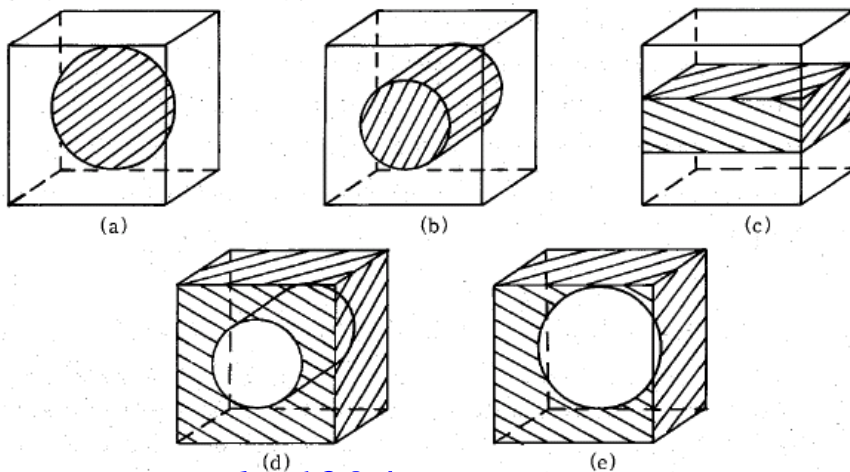
$$V_{sc} = \frac{a_{surf}}{R} + \beta_{Coulomb} R^2 = C(\Delta\rho_c)^{2/3} D_{sc}(u) / \rho_B$$

F : Free E. / A

X : Gas nucleon fraction

V_{sc} : Surface + Coulomb E / A

u : Liquid Volume fraction



Oyamatsu et al., 1984

Tatsumi, Maruyama, Muto, Yasutake u Kaonic / Quark pasta

望ましい低密度 EOS = NSE+Pasta+RMF ?

■ パスタ＋一様物質

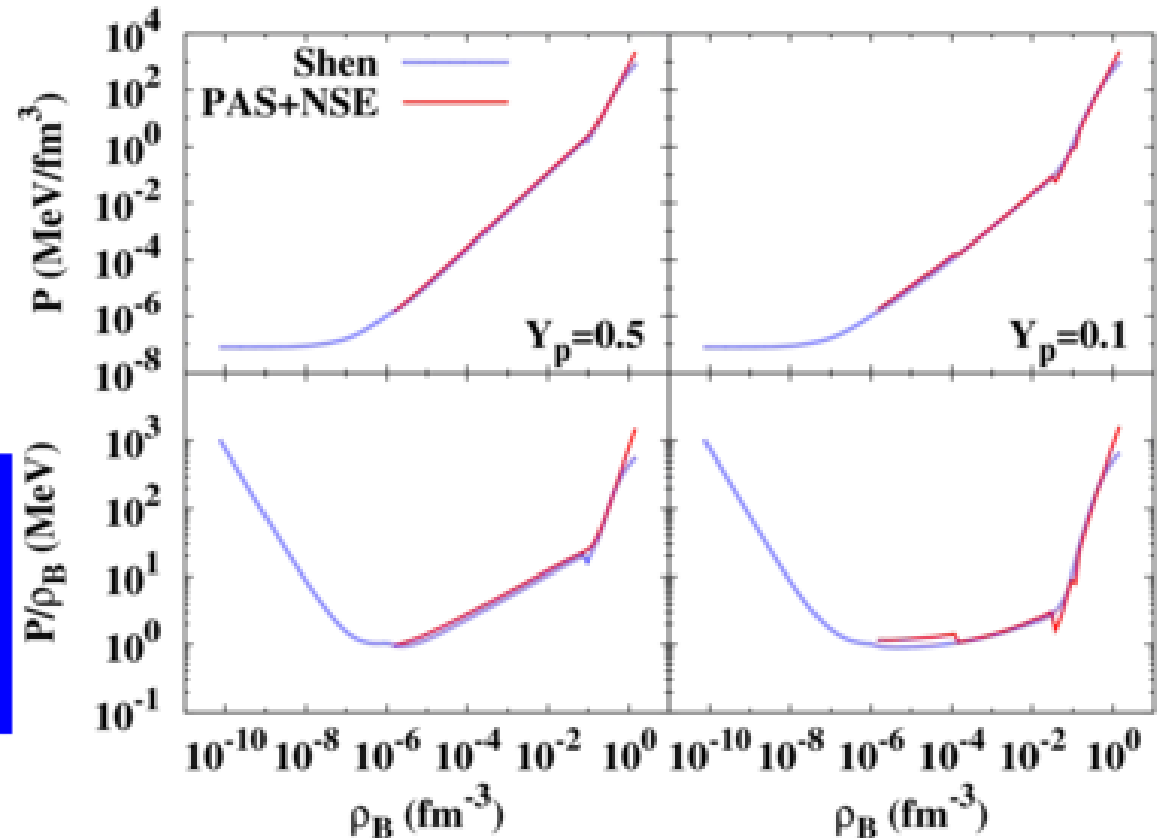
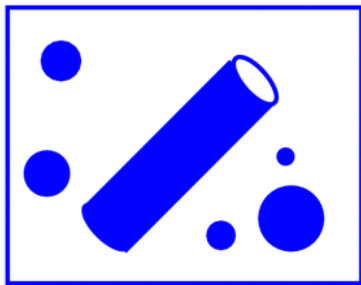
- 低密度での原子核の熱的分布が入らない
- 形状の変化にともない多少の圧力ギャップあり

■ NSE + パスタ＋一様物質

Very Preliminary !

- 対称核物質では滑らか
- 非対称物質では
まだつなげられていない
(Physics or Technical ?)

Very preliminary....



まとめにかえて

- コンパクト天体現象では、様々な温度・密度の核物質がほぼ平衡状態で作られている。核物理にとっても大きなチャレンジである。
- “The EOS” の構築のための宿題
 - 一様物質の EOS → 「核力」からの構築 How ?
 - 高温・高密度物質
 - ◆ ブラックホール形成過程などでは高温
 - ◆ 中性子星では高密度
 - ◆ 非一様な K 凝縮相、クォーク液滴もありうる！（武藤、丸山）
- ハイペロン、中間子、クォーク相の「信頼できる」導入 How ?
- 低密度物質
 - ◆ 原子核統計分布 (NSE) から一様物質に滑らかにつながる道筋は？
NSE + パスタ + RMF ? , 異なる形状のパスタの共存 (パスタ・ガラス) ?
- 素核宇宙の真の連携が要請されている。

Thank You for Your Attention !