

---

# 連続パスタを取り入れた カイラル対称な超新星物質状態方程式

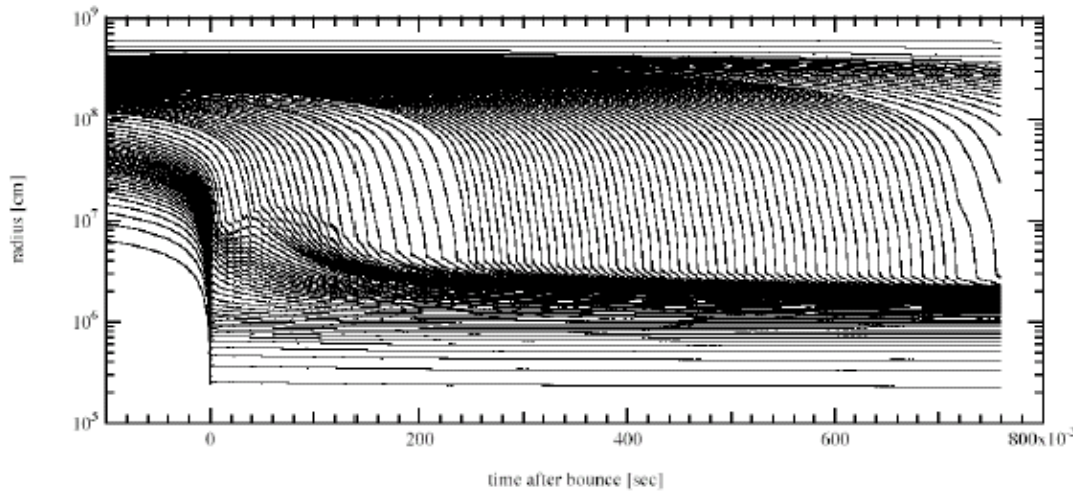
北大理  
沼津高専  
早稲田大理工  
東京理科大

大西 明、石塚知香子、椿原康介  
住吉光介  
山田章一  
鈴木英之

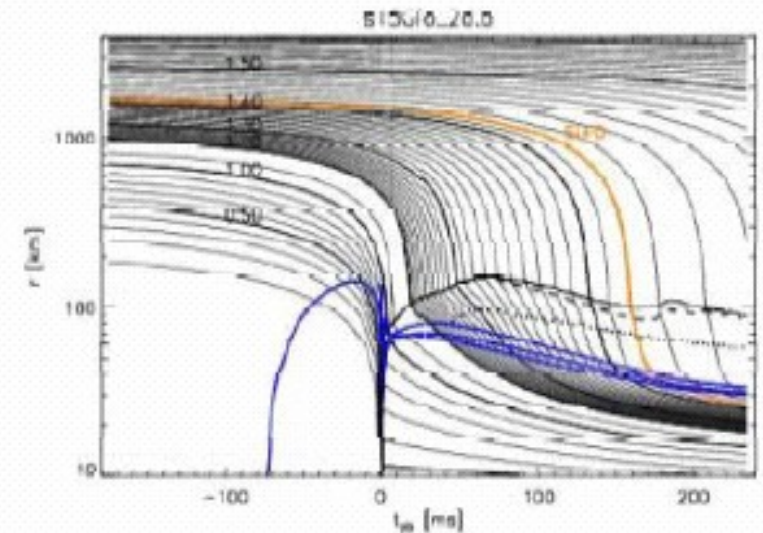
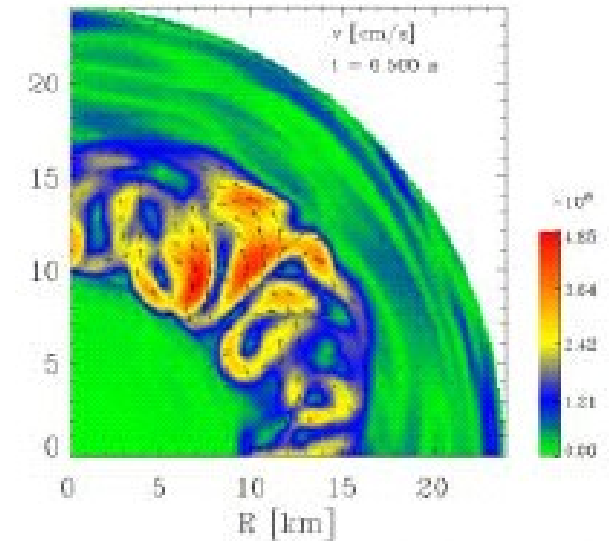
# 超新星爆発のシミュレーション

## ■ 超新星爆発のシミュレーション

- バリオン、電子、光子 (流体)  
+ ニュートリノ (ボルツマン)
- 1次元 (球対称) → ニュートリノ輸送を正確に取り入れると爆発しない (Sumiyoshi et al., 2005)
- 2次元流体 → もう少しで爆発に成功 (Janka et al., 2002)



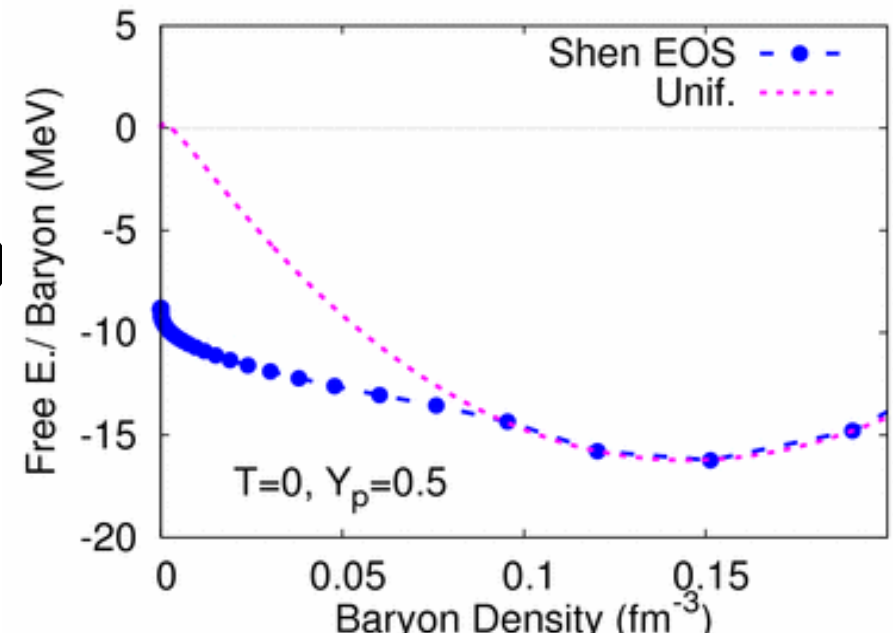
Sumiyoshi et al., 2005



(Janka et al., 2002)

# 「あと少し」に足りないものは？

- 流体模型の改善 → 多次元効果 (対流、回転)、磁場、.....
- ニュートリノ輸送係数 (断面積と原子核の分布)
  - 電子捕獲率 → 電子とニュートリノの比
  - ニュートリノ反応率 →  $\nu$  から流体へのエネルギー移行
- 状態方程式
  - 柔らかさ (High  $\rho$ ) → 重力エネルギーの解放量を決定
  - 不均一性 (Low  $\rho$ ) → 原子核生成による *Energy Gain*
- これまでの我々の取り組み
  - 高密度領域でのハイペロン、パイオン、カイラル対称性の導入 (2004 学会、前回の学会 (椿原))
  - 低密度領域での原子核分布 (NSE; Nuclear Stat. Equil.) の重要性 (Ishizuka et al. 2003, Thesis)



# 代表的な超新星物質状態方程式

## ■ 代表的な超新星物質状態方程式

- Liquid-Drop 模型 (Lattimer-Swesty)

  - Skyrme 型の密度依存力 ( $K=180-350$  MeV)+Liquid Drop

- Relativistic EOS (Shen-Toki-Sumiyoshi-Oyamatsu)

  - RMF-TM1( $K\sim 280$  MeV)+Thomas-Fermi 近似 + $\alpha$

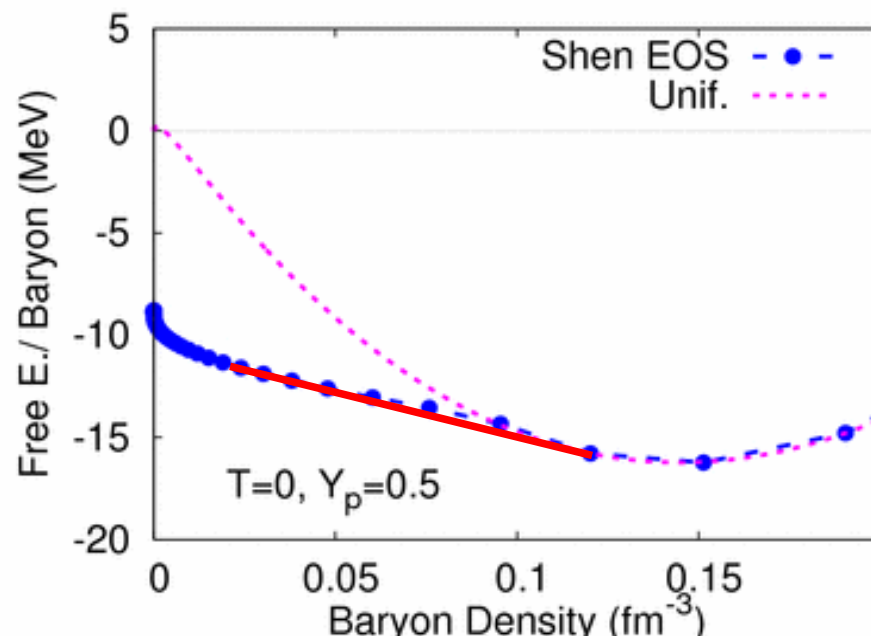
## ■ 低密度での問題点

「球形原子核 + 核子ガス」から「一様核物質」への転移が  
圧力の不連続性を生み出す

- Shen EOS では不連続のまま

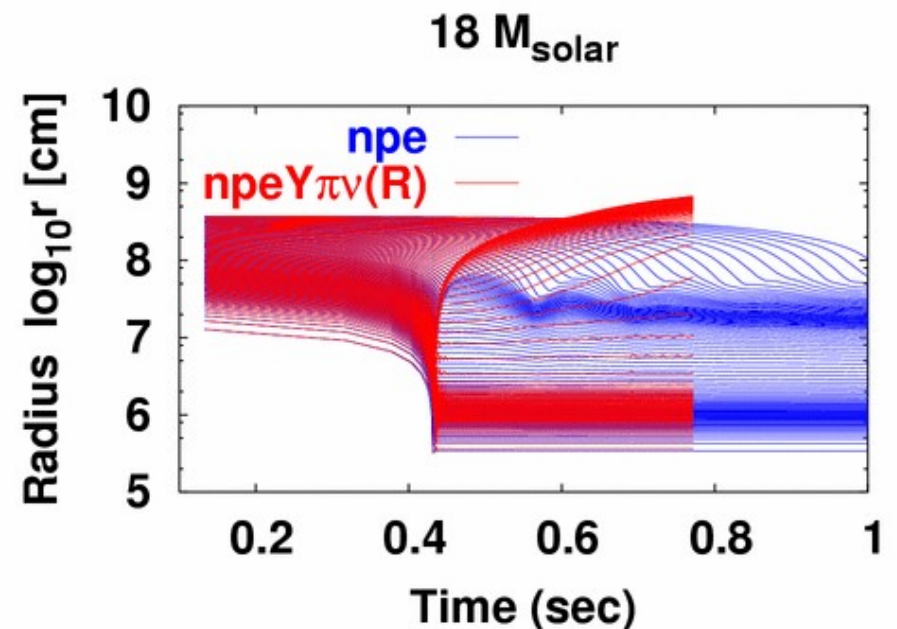
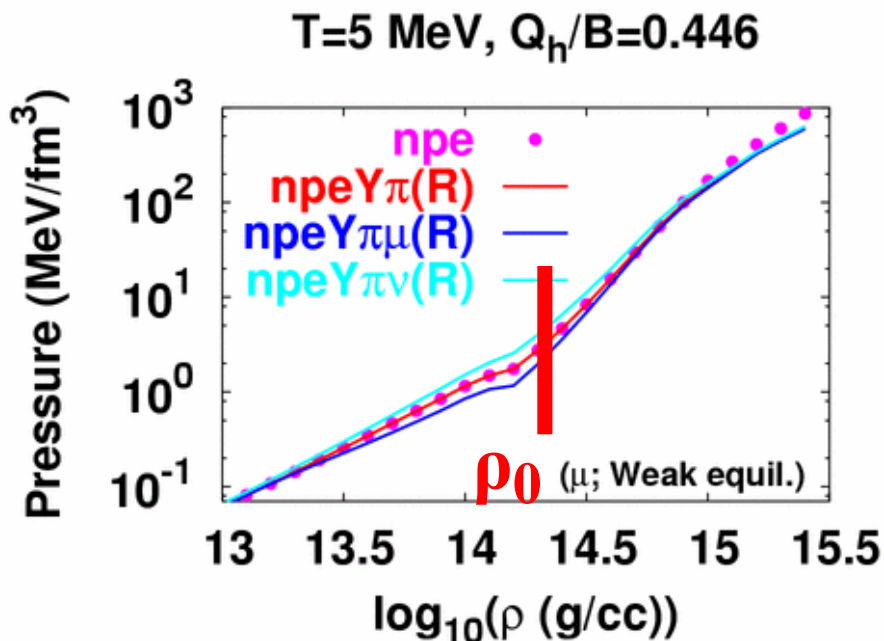
- Lattimer-Swesty EOS

→ Maxwell construction で  
不連続性を消去



# 圧力の不連続性が爆発に与える影響

- 不連続性の原因：  
表面 + クーロンエネルギーが、一様物質に転移する時点で有限の「傾き」をもつ。
- 超新星の爆発エネルギーは、転移領域の圧力に sensitive
  - Ishizuka et al. (Thesis),  $0.7 \rho_0$  近辺で圧力を滑らかにすると爆発エネルギーに顕著な増加が見られる

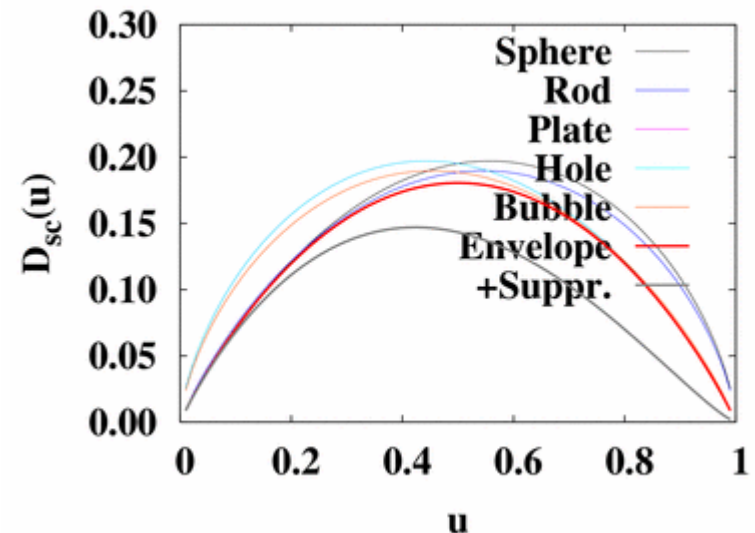
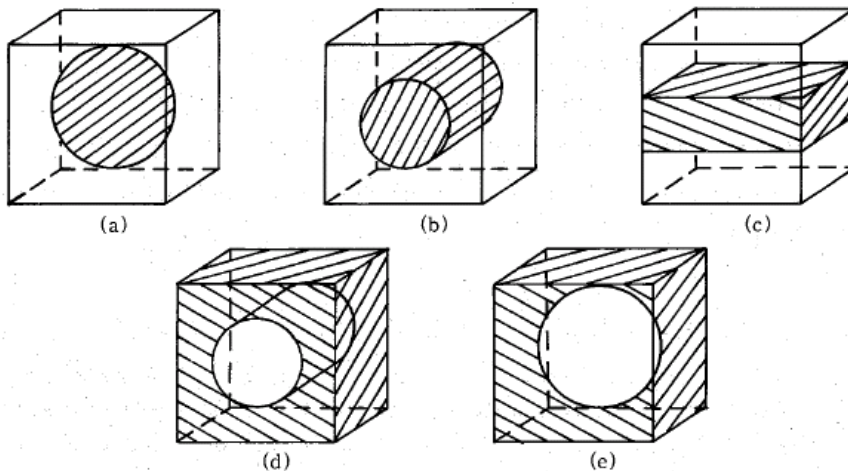


一様物質への転移を滑らかにする方法の候補 = 連続パスタ

# 連続パスタの導入

- パスタ原子核：不連続性を滑らかにする
  - 通常のパスタ原子核の包絡線 = 連続パスタ (in Glendenning text)  
Sphere → Rod → Plate → Hole → Bubble
  - 残る不連続性：一様物質への移行時 ( $u \rightarrow 1$ ) で有限の傾き  
→  $(1-u)^\alpha$  を乗じて  $u \rightarrow 1$  での傾きを 0 にする  
(液体が主要になると表面の極率が負、また多くの phonon も寄与)

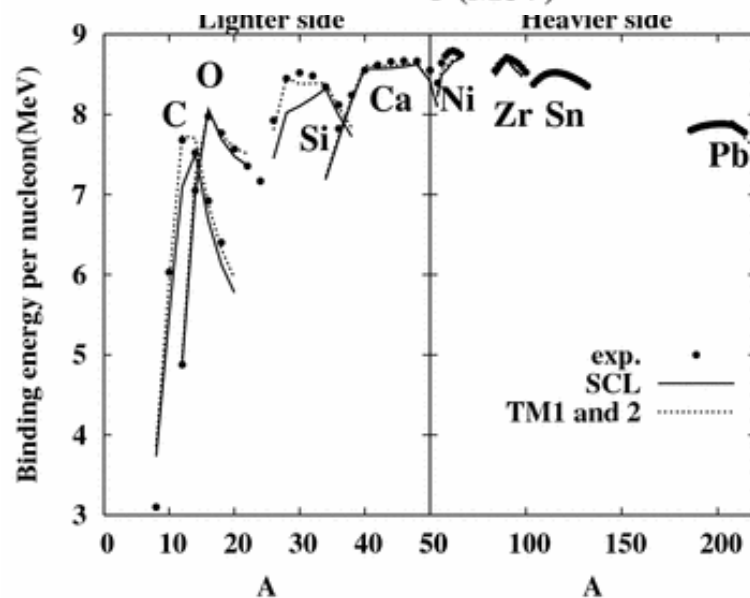
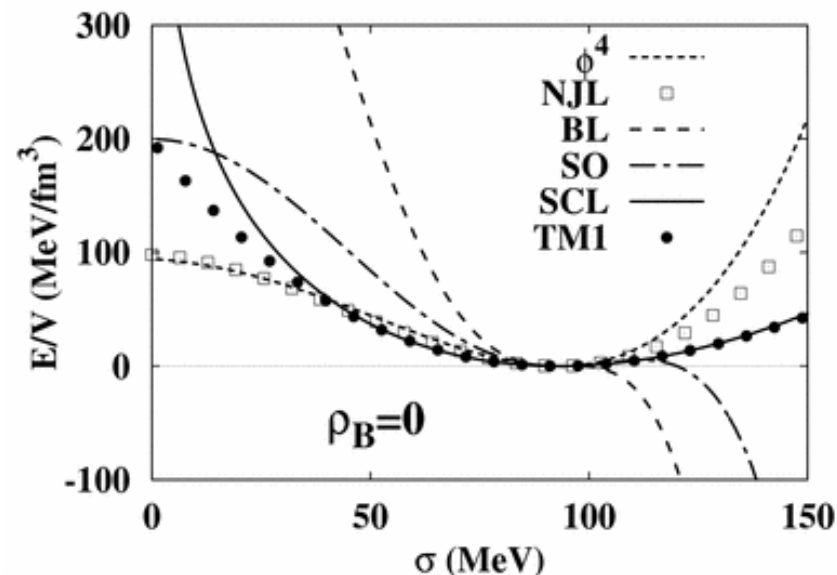
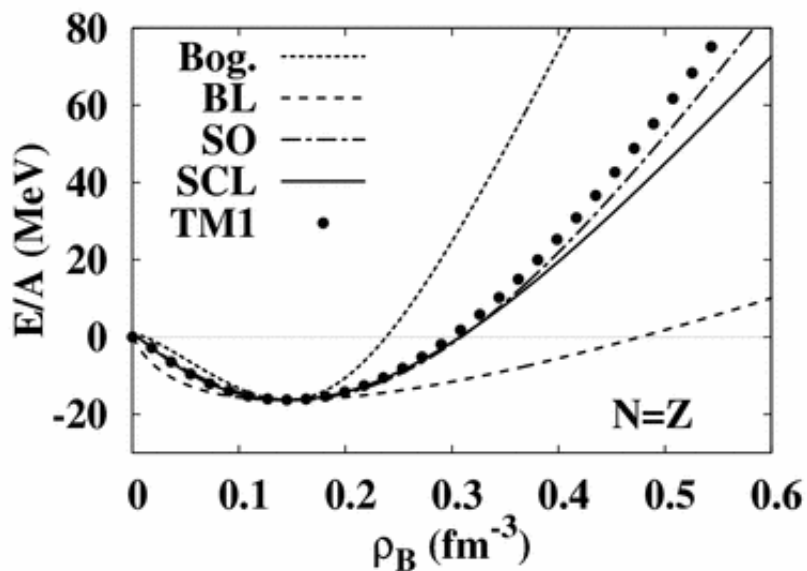
$$V_{sc} = \frac{a_{surf}}{R} + \beta_{Coulomb} R^2 = C (\Delta \rho_c)^{2/3} D_{sc}(u) / \rho_B$$



Oyamatsu et al., 1984

# Chiral RMF

- 強結合格子 QCD の成果に基づく  
対数型の Chiral potential を導入  
→ 真空の安定性
- 十分に柔らかい状態方程式
- 広い質量数領域において、  
原子核の束縛エネルギーと  
荷電半径を再現



(Tsubakihara, AO, 2006)

# Chiral RMF+ 連続パスタ: 状態方程式の変化 (1)

- $T=0$ : 真空 + パスタ → 体積占有率が増加し、一様物質へ転移
- $T>0$ : 一様核子ガス → 核子ガス + パスタ → 一様核物質

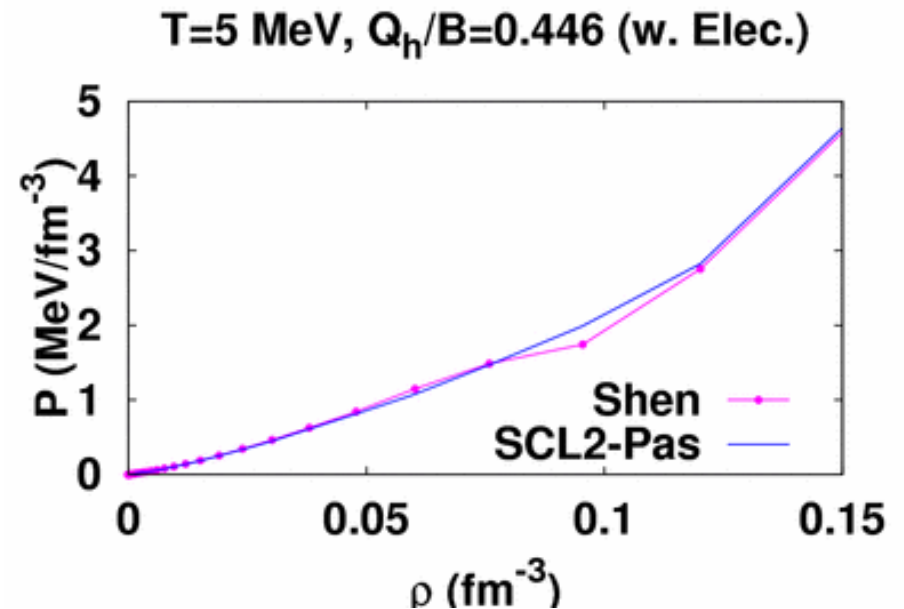
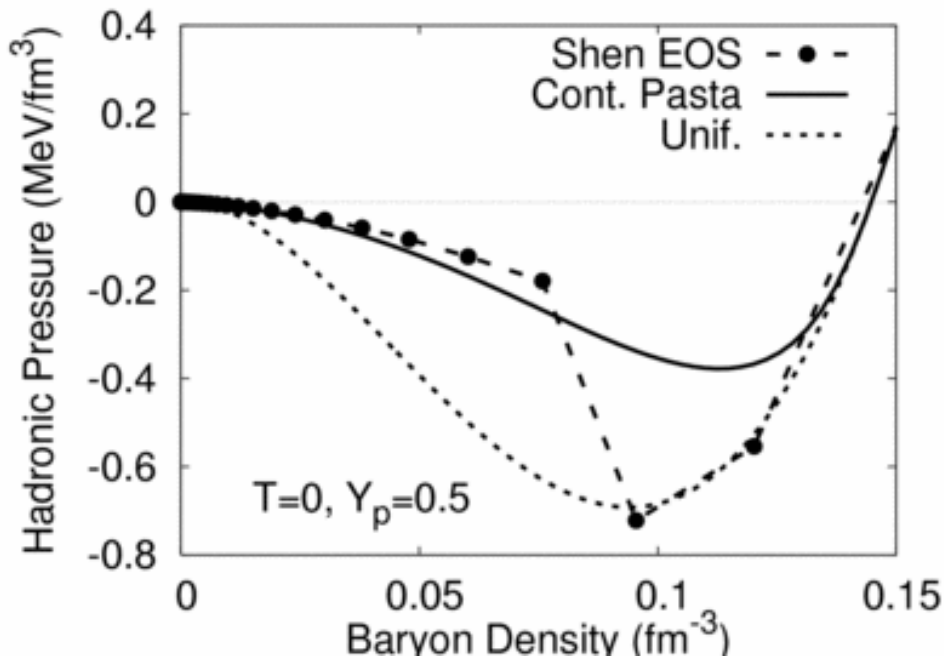
$$F = (1-X)F(\rho_{BL}, Y_{pL}) + XF(\rho_{BG}, Y_{pG}) + V_{SC}(\Delta\rho_c, u)$$

$F$ : 核子あたりの自由エネルギー

$X$ : ガス核子のバリオン占有率

$u$ : 液滴の体積占有率

$V_{SC}$ : 核子あたりの表面+クーロンエネルギー





# Chiral RMF+ 連続パスタ: 状態方程式の変化 (2)

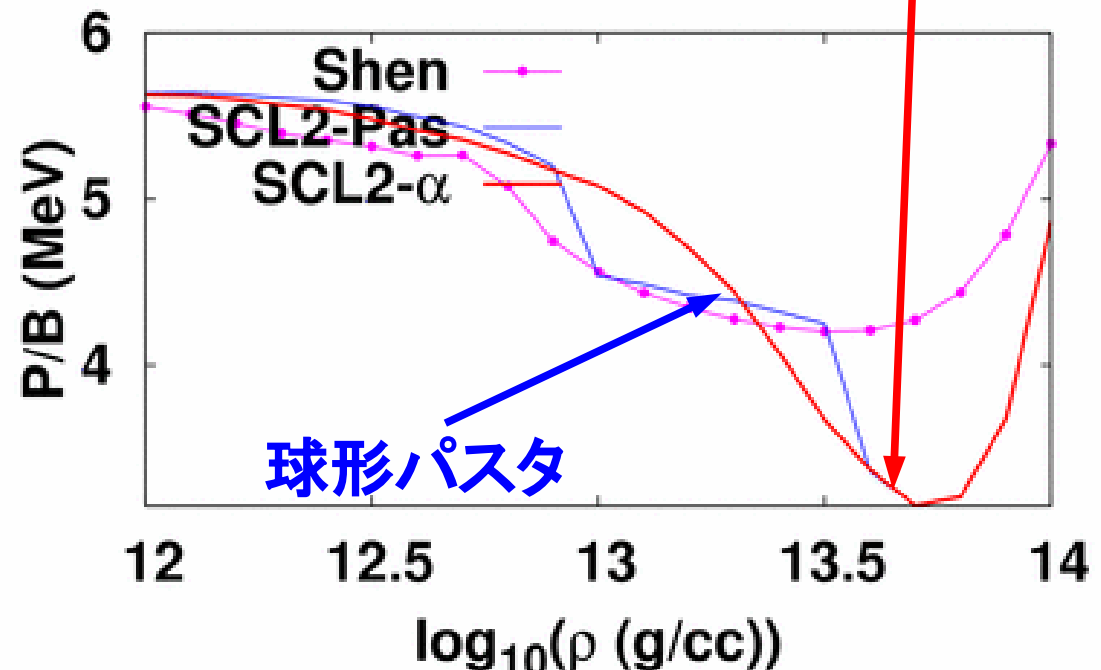
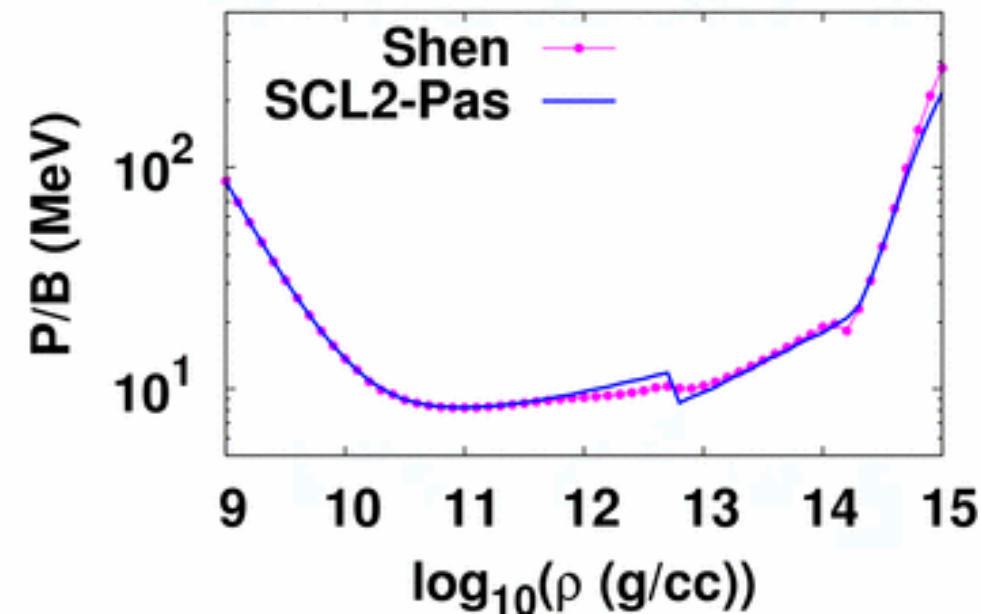
## ■ 問題点

- 低密度: gas から Pasta への変化が連続的でない  
→  $\alpha$  の影響
- 非対称物質: 球形パスタ ( $u \ll 1$ ) と非球形パスタ ( $u \sim 1$ ) が競合  
→  $u \ll 1$  から  $u \sim 1$  へ非連続に移行

非球形パスタ ( $u \sim 1$ )

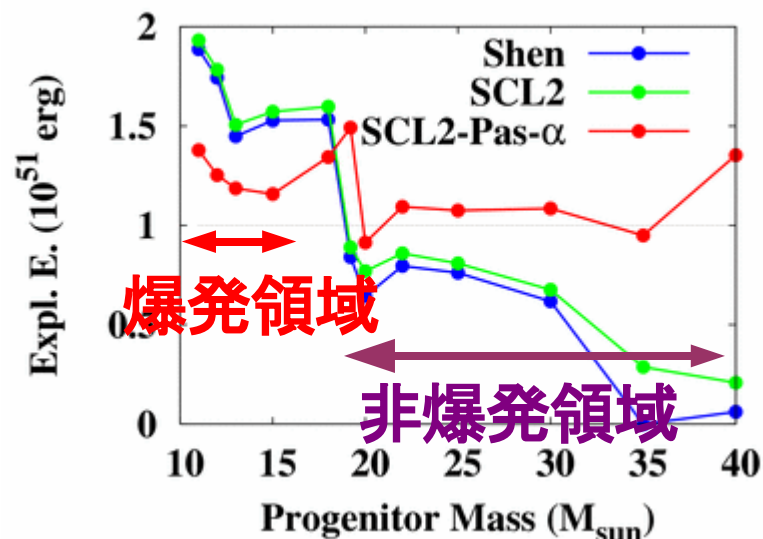
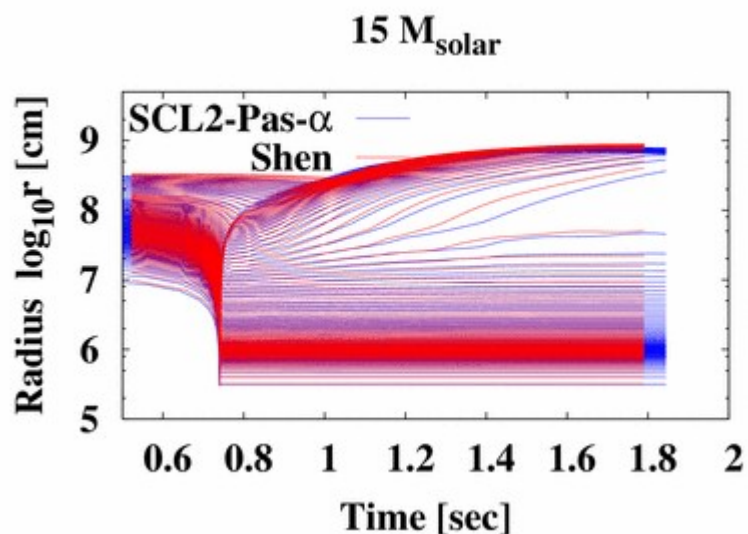
$T=5 \text{ MeV}, Q_h/B=0.446$

$T=5 \text{ MeV}, Q_h/B=0.1$



# 超新星爆発エネルギー

- 超新星爆発模型：1次元流体模型 (Sumiyoshi et al., 2002)
  - ニュートリノ輸送は考慮せず、 $Y_e$  は一定  $\rightarrow$  prompt Expl.
- 「Chiral RMF+ 連続パスタ」 $\rightarrow$  爆発は起こらず
- 「Chiral RMF+ 連続パスタ +  $\alpha$ 」 (preliminary) を非常に低密度の領域で Shen EOS と連続に結合
  - 爆発の成否は Shen EOS と同じ
  - 爆発エネルギーは 10-20 % の減少

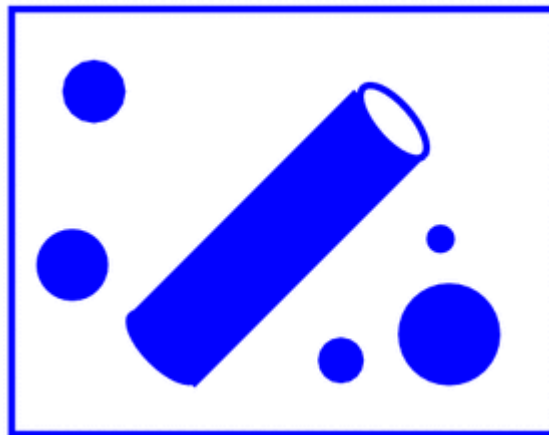


# まとめ

- 「Chiral RMF+ 連続パスタ」による超新星物質 EOS 構築の模索
  - Chiral RMF: 強結合格子 QCD に基づき、比較的柔らかい EOS  
→ Shen EOS より程度爆発エネルギーが 1-5% 増加 (前回、椿原)
  - 連続パスタ: 対称核物質で体積占有率の高いパスタから一様物質への転移を滑らかにする。
- 「核子ガス + パスタ」のみでは、低密度領域、あるいは非対称物質において圧力は連続に変化しない。
  - 低密度側:  $\alpha$  などの「有限原子核」の影響
  - 高密度側 ( $\sim \rho_0$ ): 球形パスタ ( $\sim$  原子核) と非球形パスタの競合
- 低密度側の EOS は超新星爆発エネルギーに大きな影響を与える
  - $\rho_0$  より少し低い密度での十分な圧力が重要と考えられる。

# 今後の課題

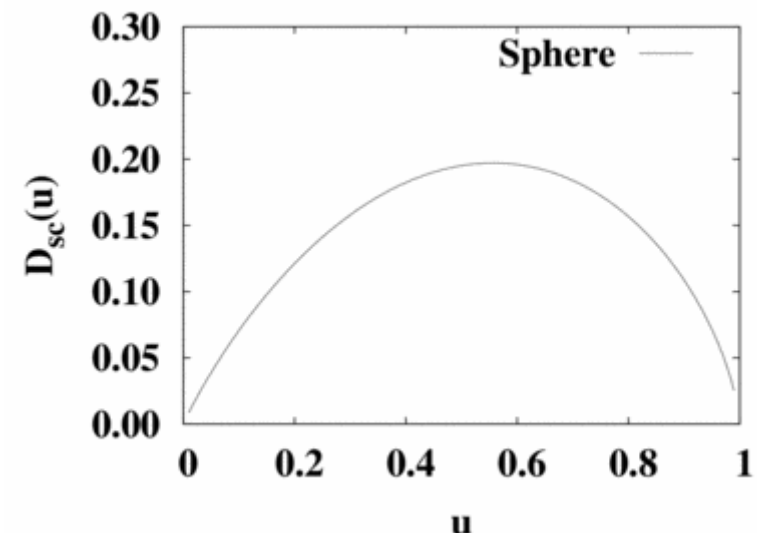
- 一様物質の EOS
  - SU(2) Chiral RMF  $\rightarrow$  SU(3) Chiral RMF ( 椿原 )
    - Single, Double  $\Lambda$  核、 $\Sigma$  原子の束縛エネルギーを再現可
    - Hidden Strange meson ( $\zeta$ 、あるいは  $f_0$ ) と  $\sigma$  の結合により、  
K  $\sim$  220 MeV 程度へ軟化
- 異なるパスタ配位が同様の自由エネルギーを与える
  - 様々な球形パスタ ( $\sim$  原子核) と非球形パスタの共存  
 $\rightarrow$  パスタと NSE (Nucl. Stat. Equil.) の組み合わせ



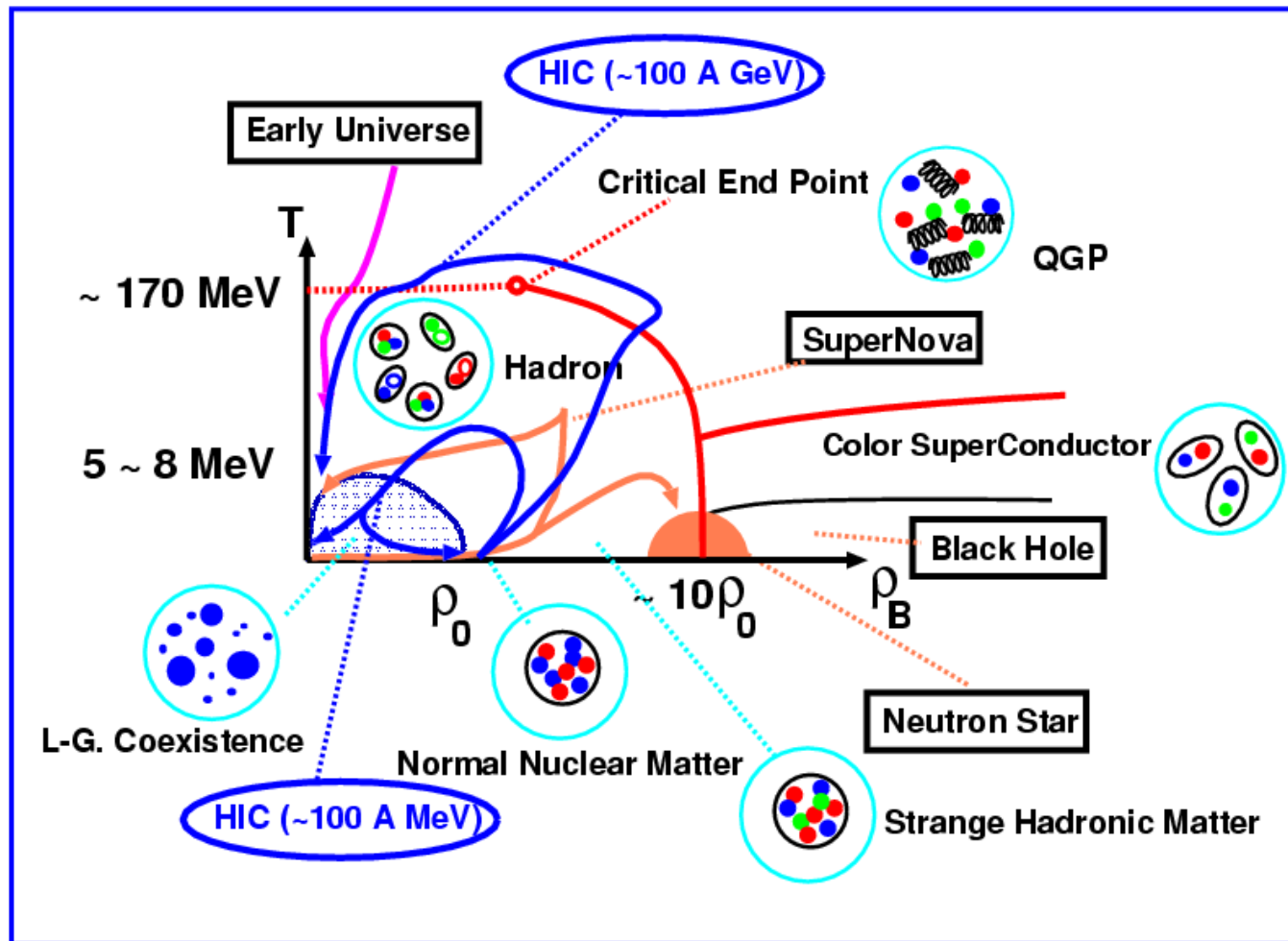
# 非一様物質から一様物質への転移

- 「球形原子核 + 核子ガス」から「一様核物質」への転移  
→ 圧力の不連続性を生み出す
  - Shen EOS では不連続のまま
  - Lattimer-Swesty EOS では、さらなる Maxwell construction で不連続性を消去
- 不連続性の原因：  
表面 + クーロンエネルギーが、一様物質に転移する時点で有限の「傾き」をもつ。

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



# 宇宙と地上でのクォーク物質相転移

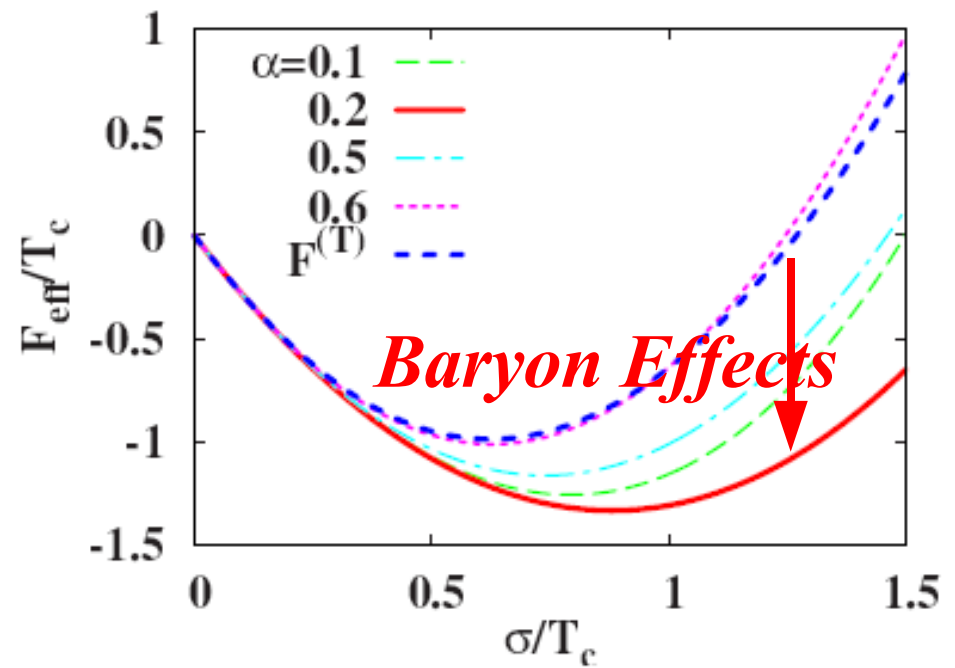
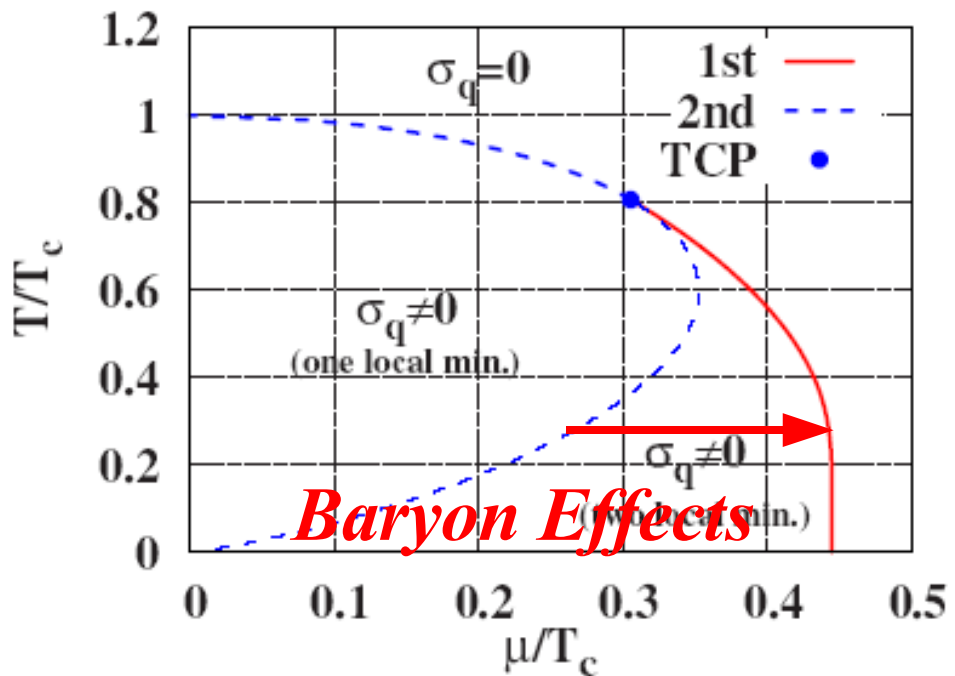


- QGP からハドロン相への相転移 (QCD 相転移)  
= この宇宙最後の「真空相転移」である！

# Effective Free Energy with Baryonic Effects

## Effective Free Energy

$$\mathcal{F}_{\text{eff}}(\sigma_q) = \frac{\sigma_q^2}{2\alpha^2} + F_{\text{eff}}^{(b)}(g_\sigma \sigma_q) + F_{\text{eff}}^{(q)}(\sigma_q; T, \mu)$$



*Baryons Gain Free Energy*  
 → *Extention of Hadron Phase to Larger  $\mu$  !*

# *RMF with $\sigma$ Self Energy from SCL-LQCD*

## ■ $\sigma$ Self Energy from simple Strong Coupling Limit LQCD

$$S \rightarrow -\frac{1}{2}(M, V_M M) \quad (1/d \text{ expansion})$$

$$\rightarrow b\sigma^2 + (\bar{\chi} \sigma \chi) \quad (\text{auxiliary field})$$

$$\rightarrow b\sigma^2 - a \log \sigma^2 \quad (\text{Fermion Integral})$$

## ■ RMF Lagrangian

- $\sigma$  is shifted by  $f_\pi$ , and small explicit  $\chi$  breaking term is added.

$$\mathcal{L} = \bar{\psi} (i\gamma^\mu \partial_\mu - \gamma^\mu V_\mu - M + g_\sigma \sigma) \psi + \mathcal{L}_\sigma^{(0)} + \mathcal{L}_\omega^{(0)} + \mathcal{L}_\rho^{(0)} \\ - U_\sigma + \frac{\lambda}{4} (\omega_\mu \omega^\mu)^2$$

$$U_\sigma(\sigma) = 2a f(\sigma/f_\pi), \quad f(x) = \frac{1}{2} \left[ -\log(1+x) + x - \frac{x^2}{2} \right], \quad a = \frac{f_\pi^2}{2} (m_\sigma^2 - m_\pi^2)$$



# Nuclear Matter and Finite Nuclei

- Nuclear Matter: By tuning  $\lambda$ ,  $g_{\omega N}$ ,  $m_{\sigma}$ , *EOS can be Soft!*
- Finite Nuclei: By tuning  $g_{\rho N}$ , Global behavior of B.E. is reproduced, *except for j-j closed nuclei (C, Si, Ni).*

