

# 重イオン反応及びハイパー核反応に基づく 超新星物質の状態方程式と 核種分布テーブルの構築

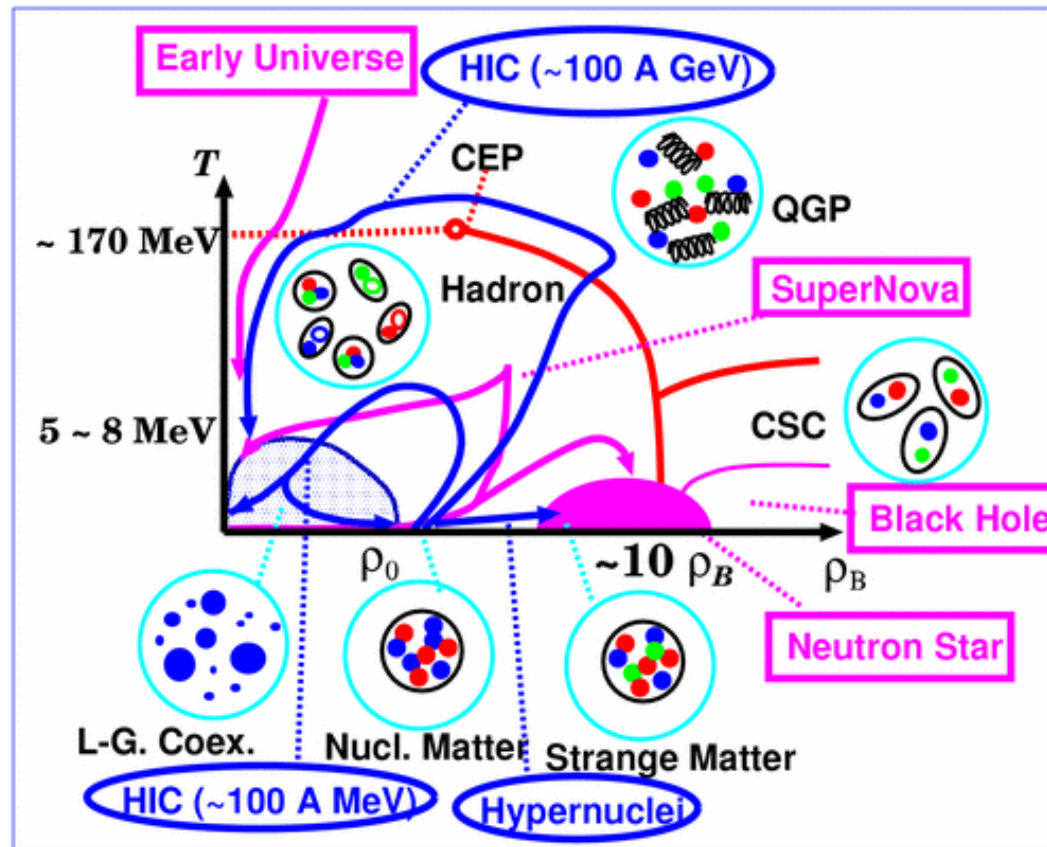
北大理 大西明

- AGS-SPS-RHIC エネルギーの重イオン反応
- ハイパー核反応データによるハイペロン・ポテンシャルの決定
- 低密度超新星物質における原子核種分布
- 超新星物質の EOS と核種分布テーブルの構築と  
超新星爆発メカニズム

<http://nucl.sci.hokudai.ac.jp/~chikako/EOS/index.html>



# Hadronic Matter Phase Diagram



*Various States of Matter characterize Compact Astrophysical Objects and Phen. and can be probed by HIC and Hypernuclear reactions*

# 科研費基盤(C): 大西、住吉 (2003-2006)

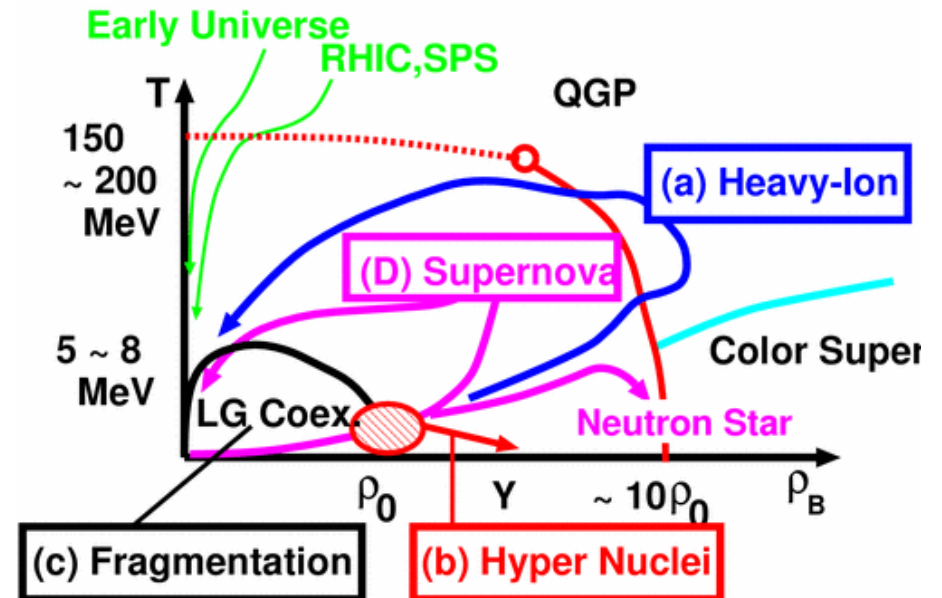
## ■ 「重イオン及びハイパー核反応に基づく超新星物質の状態方程式と核種分布テーブルの構築」

A) AGS-SPS-RHIC エネルギーの重イオン反応

B) ハイパー核反応データによるハイペロン・ポテンシャルの決定

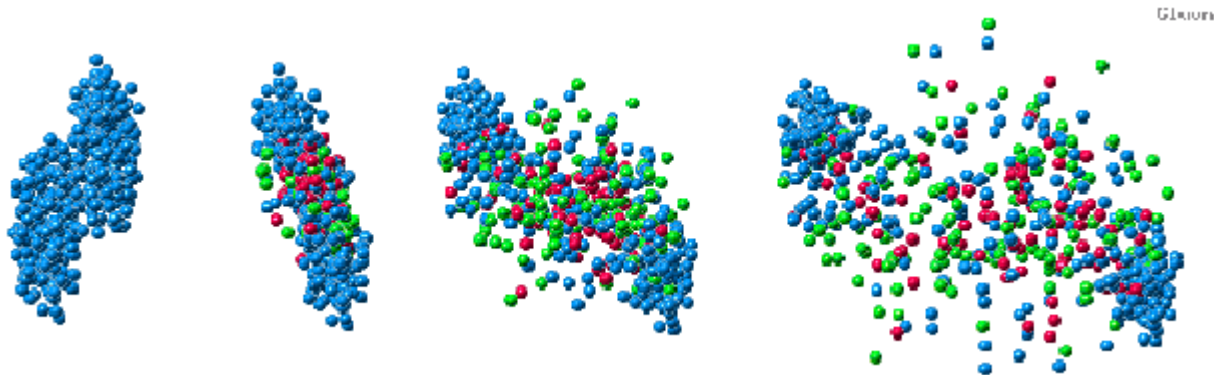
C) 低密度超新星物質における原子核種分布

D) 超新星物質の EOS と核種分布テーブルの構築と超新星爆発メカニズム

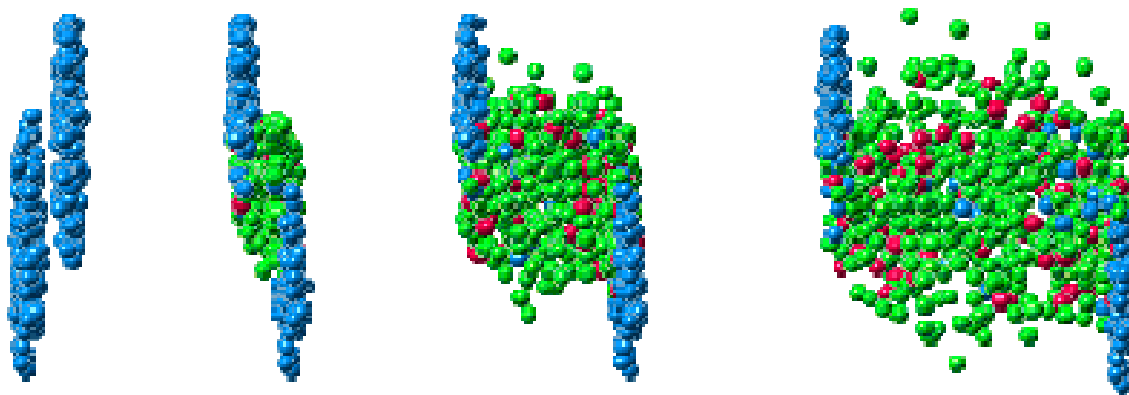


# High-Energy Heavy-Ion Collisions

AGS



SPS



JAMming on the Web, linked from <http://www.jcprg.org/>



# GSI-AGS-SPS エネルギーの重イオン反応

Isse, AO, Otuka, Sahu, Nara, PRC 72 (2005), 064908.

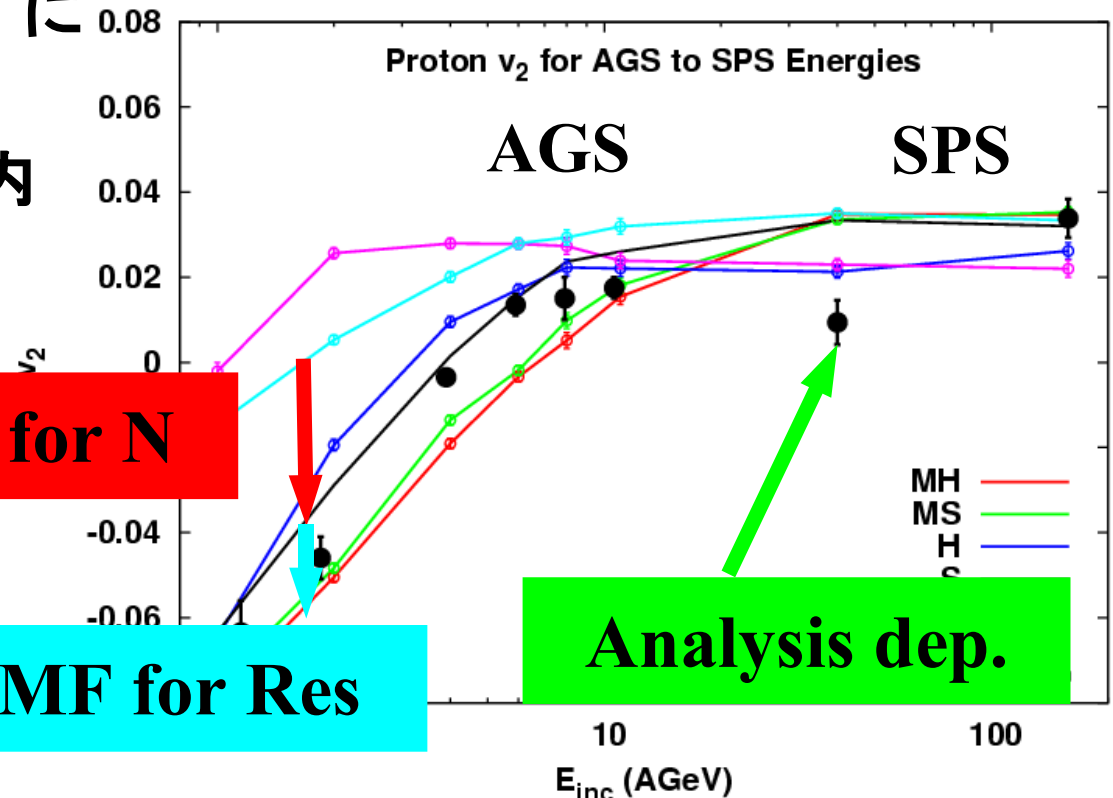
- 集団運動流：平均場に敏感だが、AGS (~10 A GeV) まででは EOS は決まっていない
- 運動量依存平均場を取り入れたカスケード模型 (JAM with p dep. MF) により 1-158 A GeV (GSI-AGS-SPS energies) での  $v_2$  を記述可能
- ここで用いた平均場の取り入れ方 (RQMD/S) では、 $v_2$  は EOS に敏感でない。
- 共鳴バリオンの不定性の範囲内にデータがある。

フローでの EOS 決定  
→ より詳細な比較が必要

MF for N

MF for Res

Analysis dep.



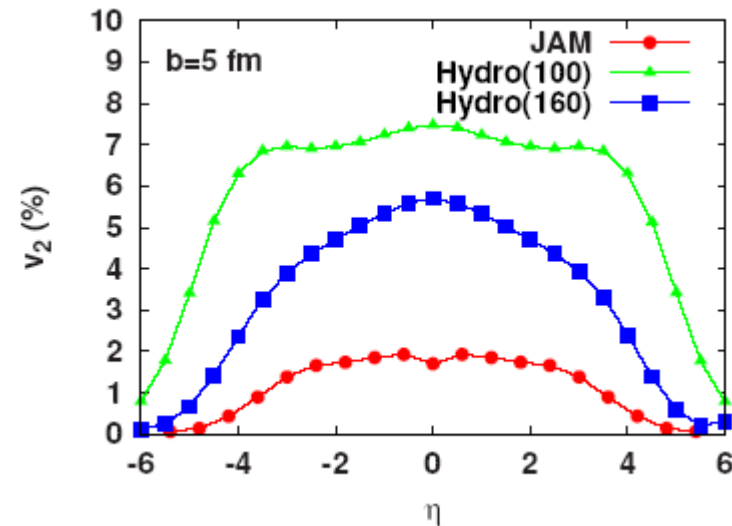
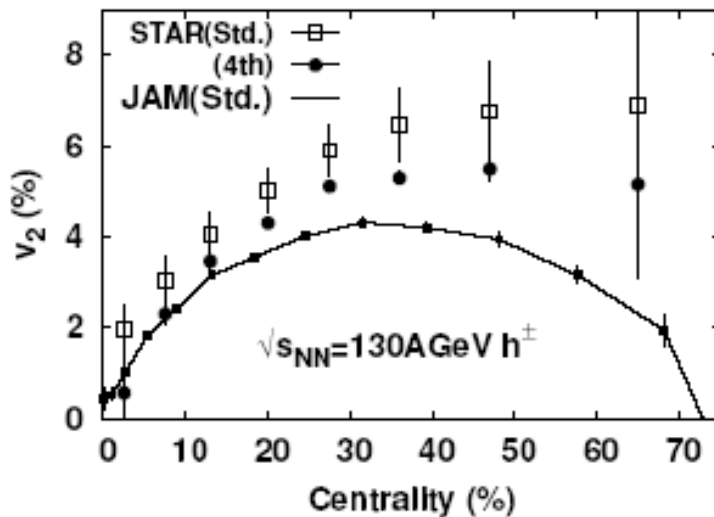
# RHIC エネルギーの重イオン反応 (1)

Sahu, AO, Isse, Otuka, Phatak, Pramana 67 ('06), 257.

Hirano, Isse, Nara, AO, Yoshino, PRC72('05), 041901(R)

## ■ RHIC エネルギーでのカスケード模型

- Au+Au 衝突で集団フロー ( $v_2$ ) を過小評価
- Cu+Cu 衝突での prediction → やはり  $v_2$  を過小評価



**RHIC エネルギーでの重イオン衝突 ( $Au+Au$ ,  $Cu+Cu$ ) では、 $QGP$  が生成されていると考えることが妥当 (流体模型で説明)**



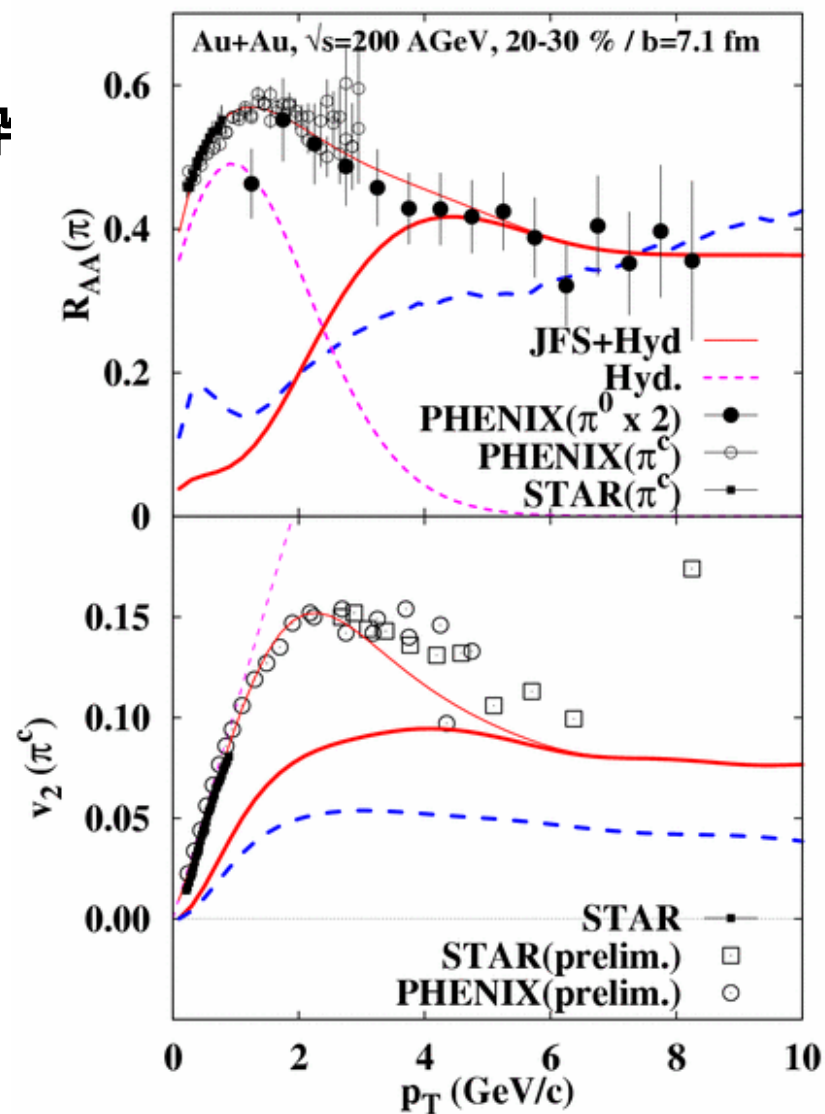
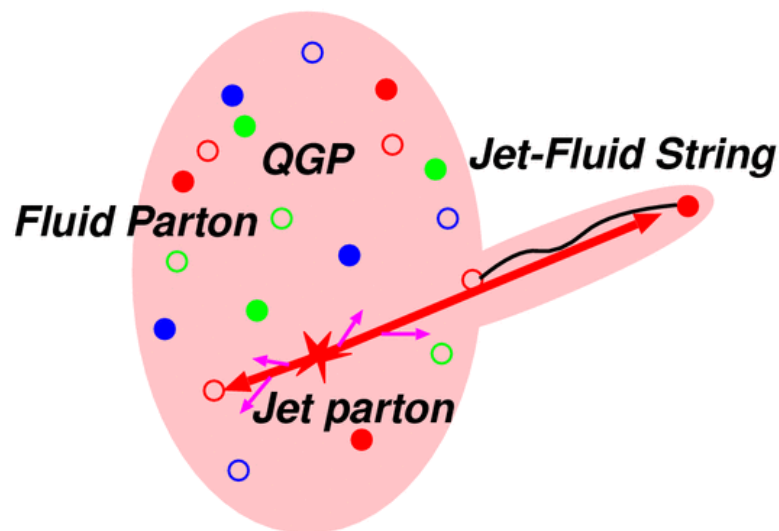


# RHIC エネルギーの重イオン反応 (2)

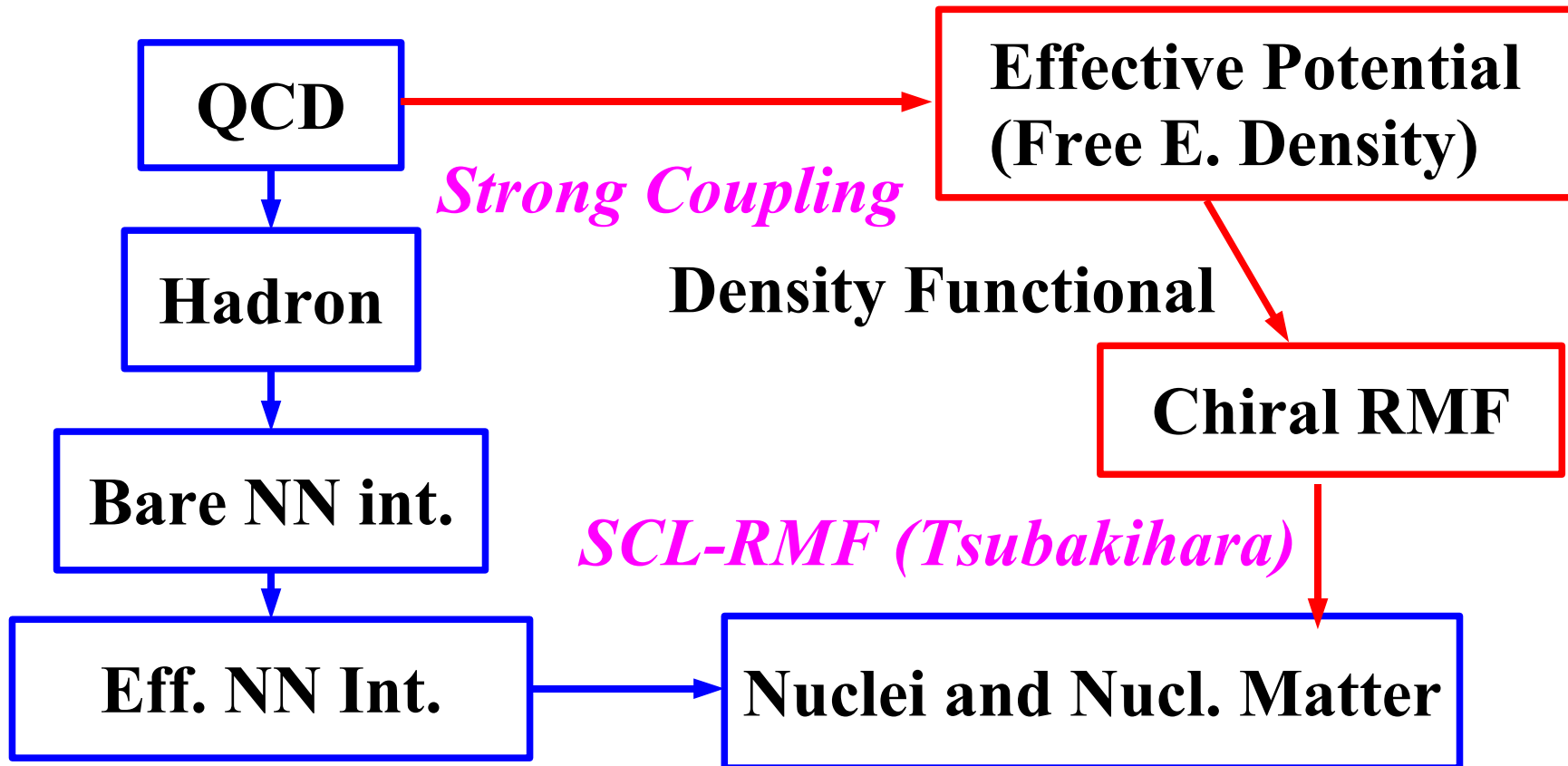
Isse, Hirano, Mizukawa, AO, Yoshino, Nara, nucl-th/0702068 (QM06 Proc.).

## ■ 高い $p_T$ での新しいハドロン化機構の提案

- Jet parton と Fluid parton が作る  
ストリングが崩壊してハドロンを生成  
(通常理解は jet parton が独立に破砕)
- high  $p_T$  でのハドロン生成率と  
集団フロー  $v_2$  を同時に(ほぼ)再現可能



# ハイパー核反応データによるハイペロン・ポテンシャルの決定





# Strong Coupling Limit/Region of Lattice QCD

Kawamoto, Miura, AO, Ohnuma, PRD75 ('07), 014502  
AO, Kawamoto, Miura, hep-lat/0701024

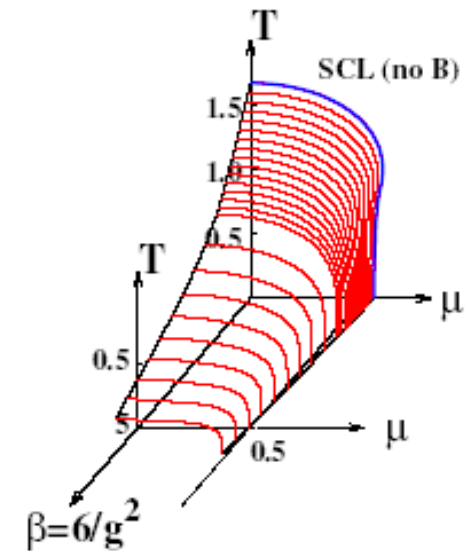
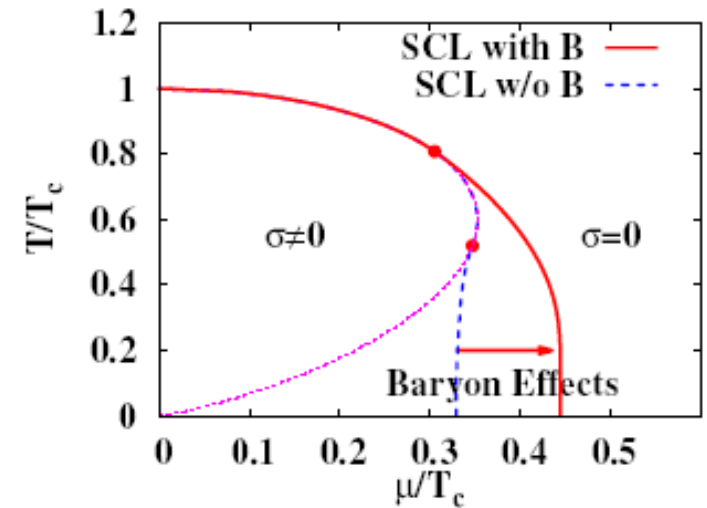
## ■ 格子 QCD のモンテカルロ・シミュレーション

- 第一原理計算だが、有限密度は sign 問題のために困難

## ■ 格子 QCD の強結合極限 / 強結合展開

- 近似模型だが、有限密度でも解析的な計算が可能
- 強結合極限でのバリオン効果  
→ 相転移化学ポテンシャルの増加 (ハドロン相でのエネルギー・ゲイン)  
→ それでも相転移化学ポテンシャルは相転移温度に比べて小さすぎる
- 強結合展開 (NLO,  $1/g^2$ )  
→ 相転移温度の大きな減少

格子 QCD の強結合展開 + バリオン効果により、QCD の「密度汎関数」を与えられる可能性



# ハイパー核生成反応と $\Sigma$ 、 $\Xi$ ポテンシャル

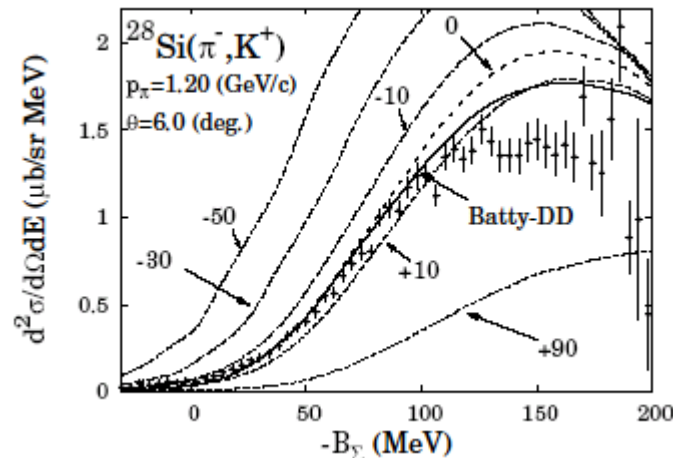
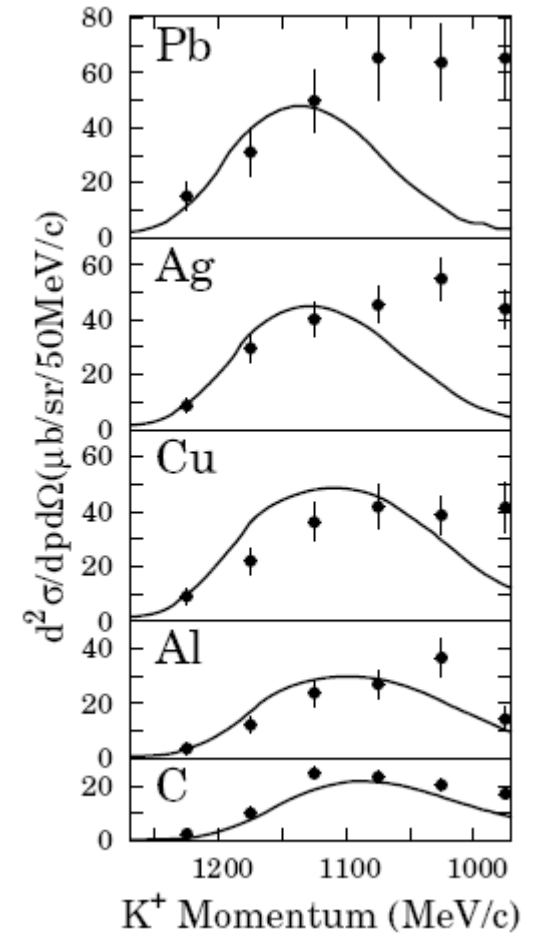
Maekawa, Tsubakihara, AO, nucl-th/0701066 (HYP06 Proc.)

- 核物質中でのハイペロン・ポテンシャルの深さ  
→ 中性子星物質、高密度超新星物質の性質を大きく左右

- $\Lambda$ ポテンシャル: 束縛状態から  $\sim -30$  MeV
- $\Sigma$ 、 $\Xi$ : ハイパー核反応から分析

- ポテンシャル効果を取り入れた局所最適 Fermi 平均 t-matrix (LOFAt)

- $\Sigma \rightarrow$  弱い斥力 ( $0 \sim +30$  MeV)
- $\Xi \rightarrow$  弱い引力 ( $\sim -15$  MeV)
- ポテンシャルの「形」にも依存



---

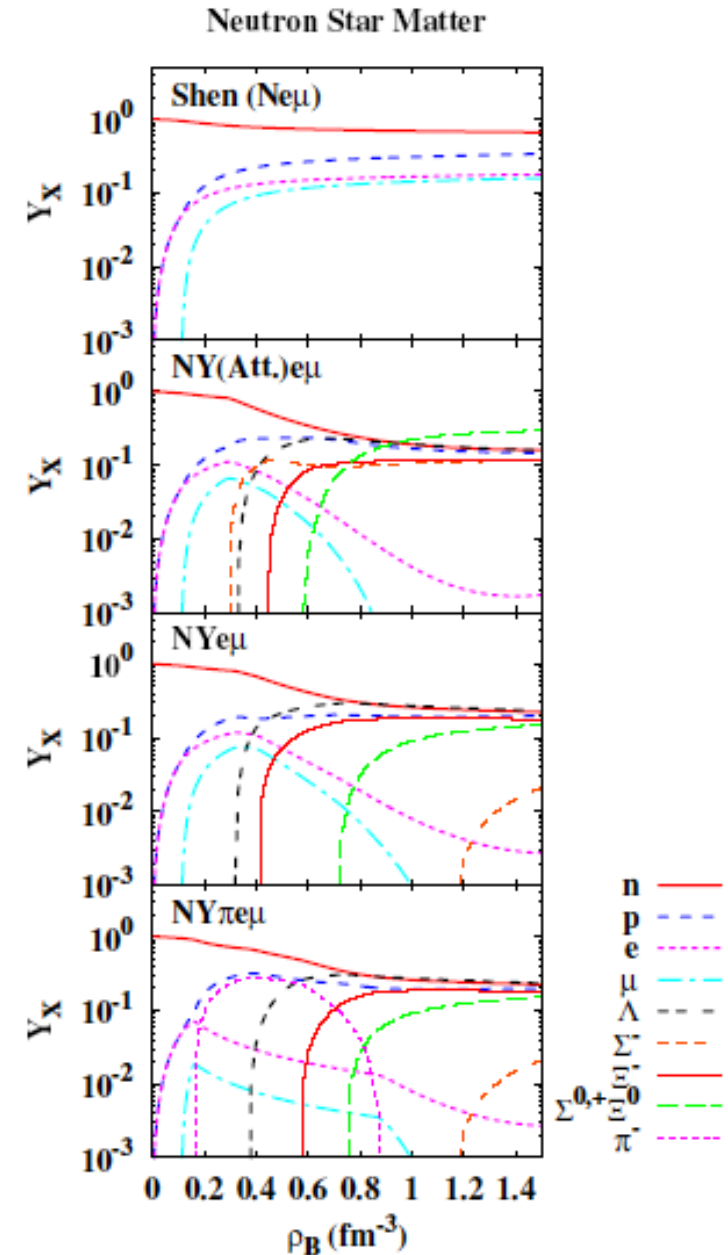
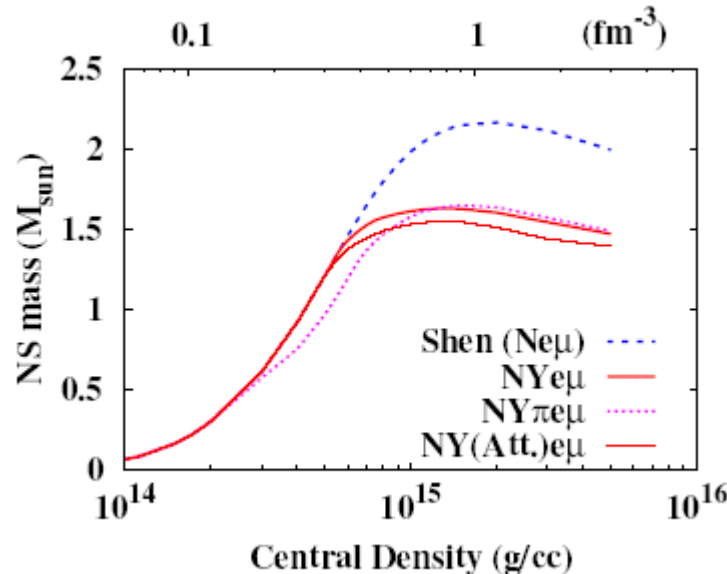
## 超新星物質 $EOS$ ・核種分布 テーブル



# ハイペロンを取り入れた超新星物質 EOS テーブル (1)

Ishizuka, AO, Sumiyoshi, Yamada, in preparation

- ハイパー核反応から示唆される  
ハイペロン・ポテンシャルを考慮して  
ハイペロンを取り入れた EOS テーブル
- 中性子星への適用
  - 高密度で  $\Sigma^-$  はなかなか現れない
  - 古い示唆より斥力的  $\rightarrow$  最大質量 ( $1.6 M_{\text{sun}}$ )  
は、ほぼ  $\Lambda$  のポテンシャルで決まる

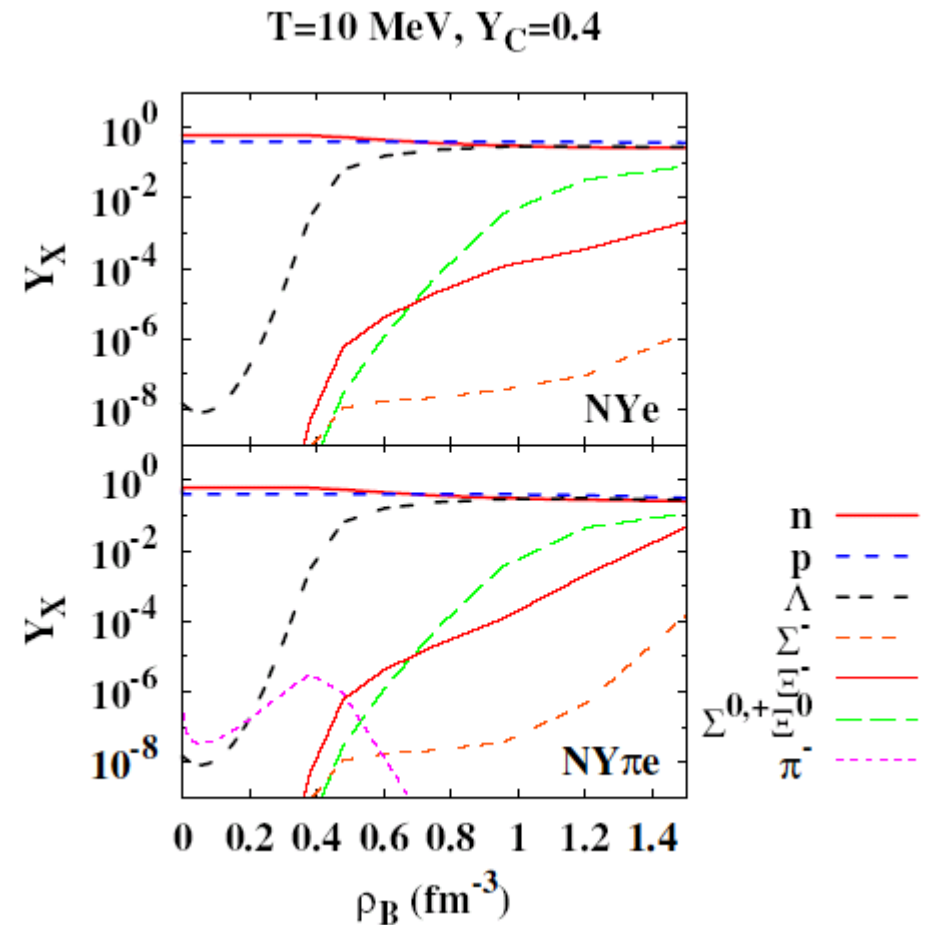
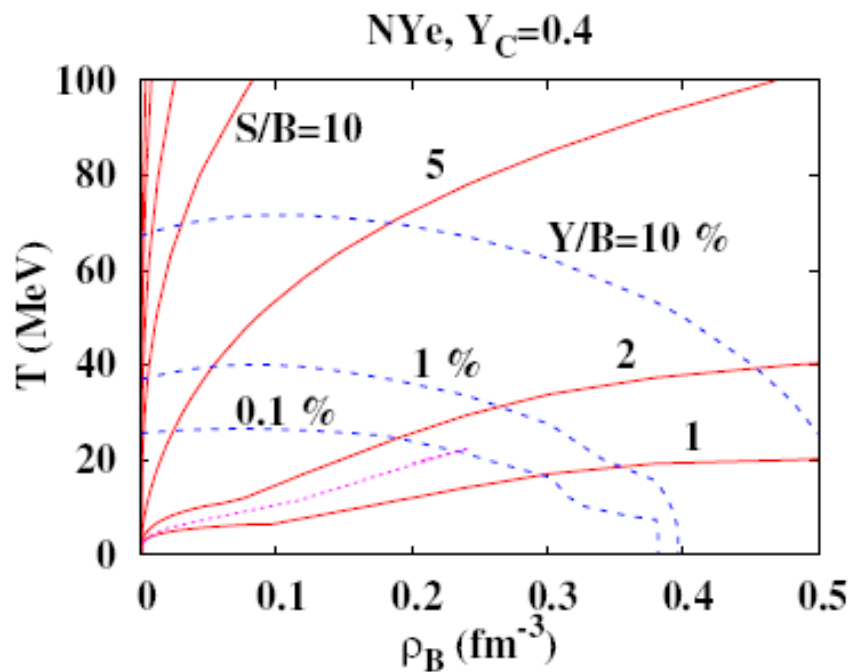


# ハイペロンを取り入れた超新星物質 EOS テーブル (2)

Ishizuka, AO, Sumiyoshi, Yamada, in preparation

## ■ 有限温度 (超新星物質) への適用

- $\rho < 2\rho_0$ 、 $T < 20$  MeV 程度では、ハイペロンはほとんど現れない。
- 高温・高密度領域では大きな役割



**Black Hole 形成時での  
ハイペロンの役割は？**



# 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 + $\alpha$

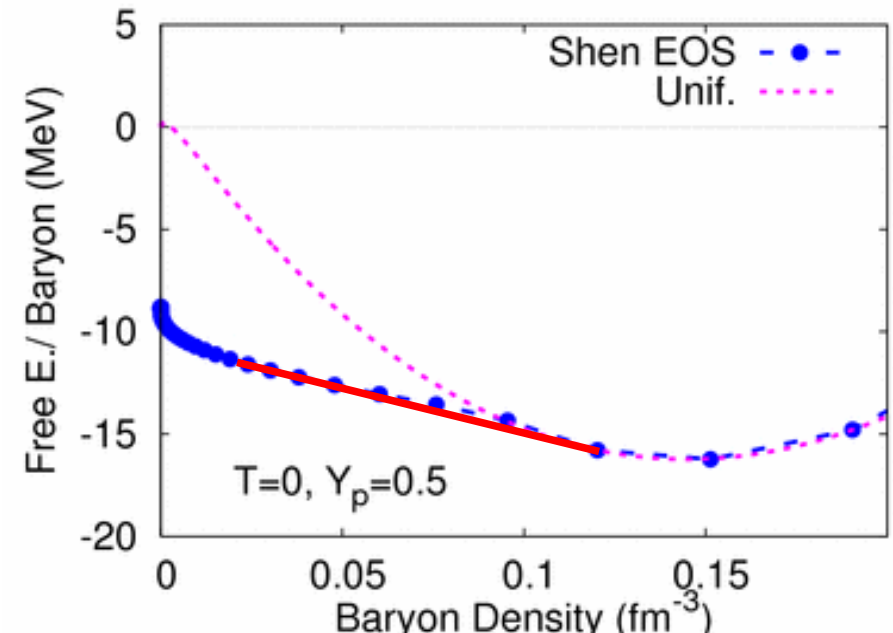
## ■ 低密度での問題点

「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



# 核種分布、パスタの混在

- 目指している状態方程式・核種分布テーブル  
→ Chiral SU(3) RMF + NSE(incl.  $\alpha$ ) + Pasta
- 「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 ( 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。



# まとめ

## ■ 科研費研究で目指した課題の進行状況

- AGS-SPS-RHIC エネルギーの重イオン反応
  - SPS 以上のエネルギーは EOS への制限を強く与えていない
- ハイパー核反応データによるハイペロン・ポテンシャルの決定
  - $\Xi$  は -15 MeV 程度で無矛盾、  
 $\Sigma$  はまだ不定性が残るが、+30 MeV 程度であろう。
  - $\Sigma$ 、 $\Xi$  が古い示唆より斥力的であれば、 $(2-3)\rho_0$  では  $\Lambda$  が主要
- 低密度超新星物質における原子核種分布
  - 滑らかな EOS を与える原子核、パスタの混在は non-trivial  
(Shen EOS は実用的滑らかさをもっていて偉い！)
- 超新星物質の EOS と核種分布テーブルの構築と超新星爆発メカニズム
  - ハイペロンを含む EOS テーブルはこっそり公開中  
<http://nucl.sci.hokudai.ac.jp/~chikako/EOS/index.html>
  - Black Hole 形成時にはハイペロン・パイオンが大きな役割を果たす可能性がある。

## ■ Pasta, NSE との「接続」はきわめて non-trivial 。お助けを！



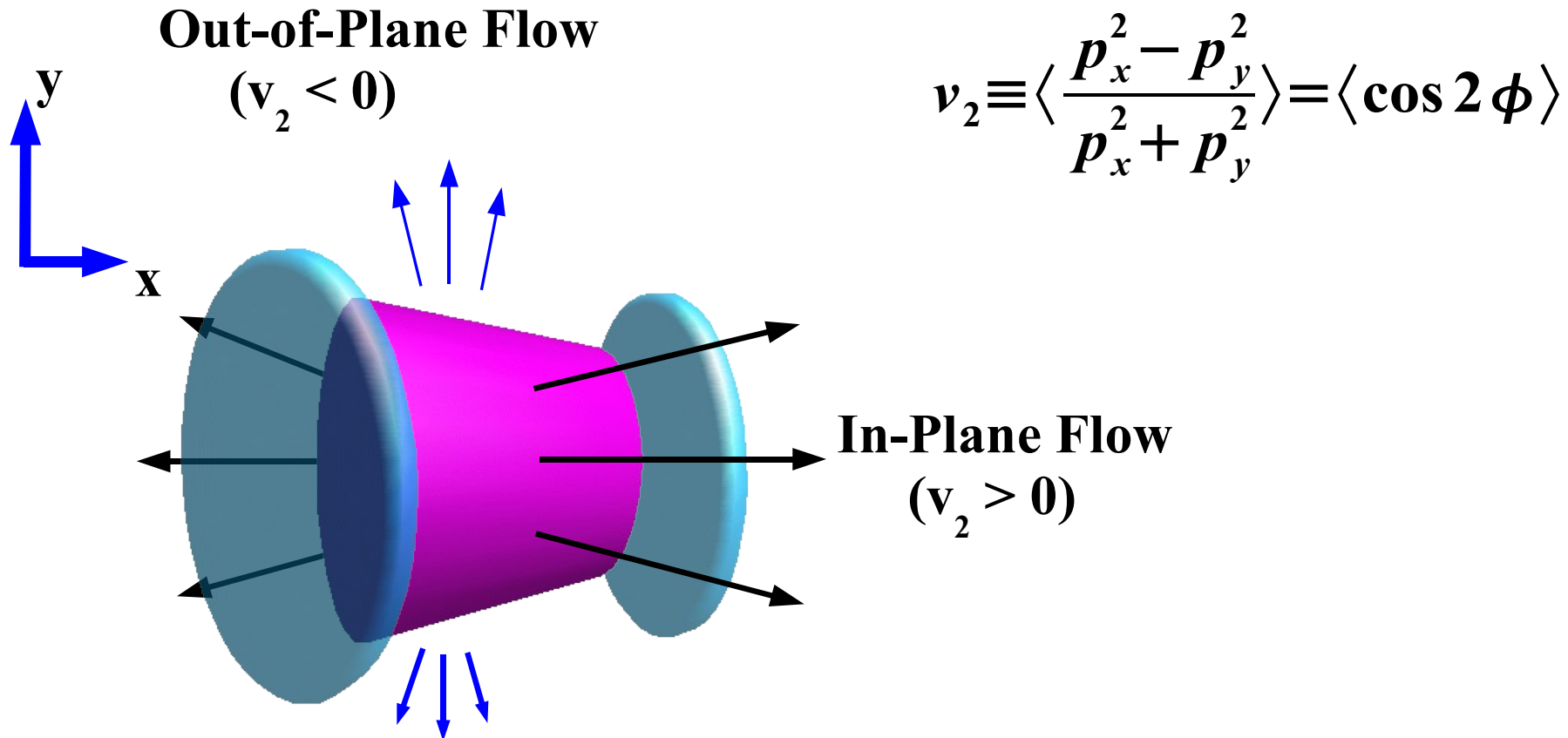
---

*backups*



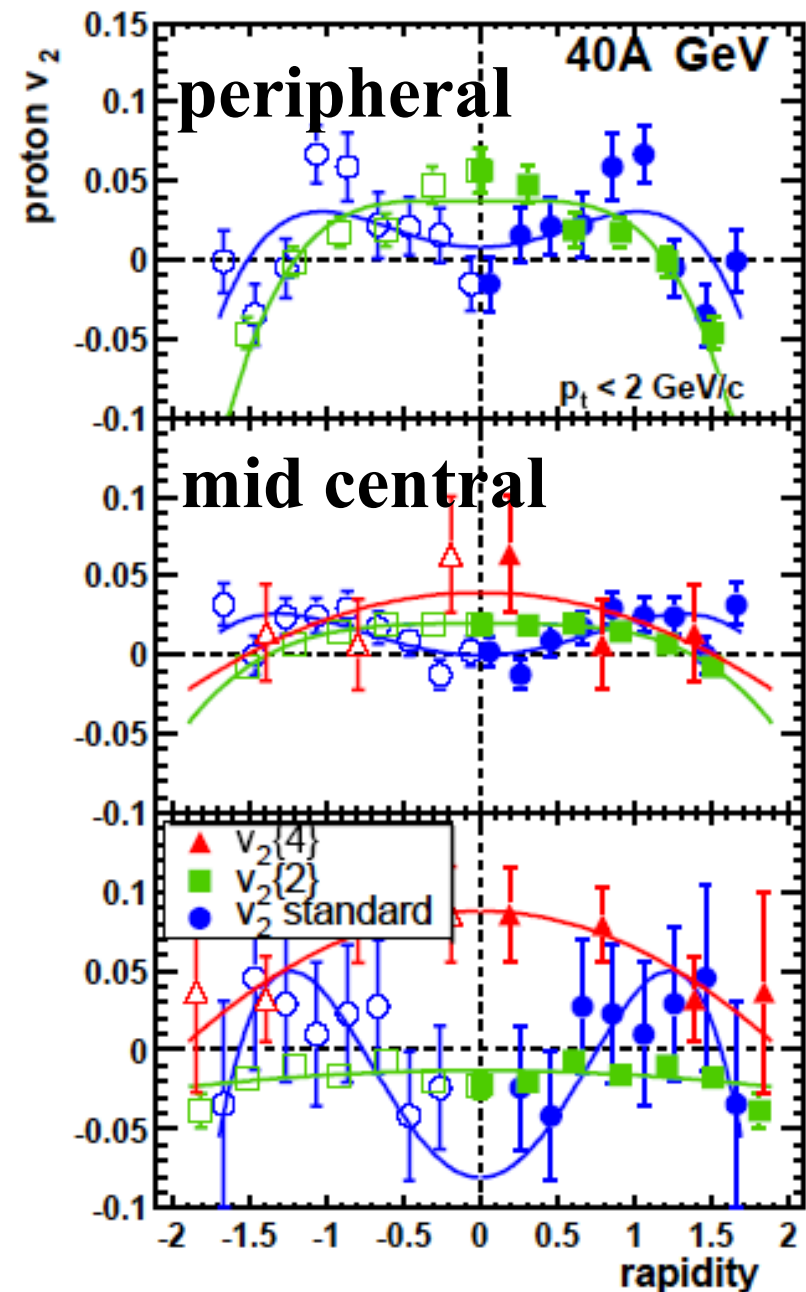
# *Elliptic Flow*

- What is Elliptic Flow ? → Anisotropy in P space
- Hydrodynamical Picture
  - Sensitive to the Pressure Anisotropy in the Early Stage
  - Early Thermalization is Required for Large  $v_2$



# Dip of $V_2$ at 40 A GeV: Phase Transition ?

- Dip of  $V_2$  at 40 A GeV may be a signal of QCD phase transition at high baryon density.  
(Cassing et al.)
- However, the data is too sensitive to the way of the analysis (reaction plane/two particle correlation).
  - We have to wait for better data.



# Flow and EOS; to be continued

- In addition to the ambiguities in in-medium cross sections, Res.-Res. cross sections, we have model dependence.

- RBUU (e.g. Sahu, Cassing, Mosel, AO, Nucl. Phys. A672 (2000), 376.)

- ◆ In RMF, Strong cut-off for meson-N coupling in RMF  
→ Smaller EOS dep.

- Scalar potential interpretation in BUU

*Larionov, Cassing, Greiner, Mosel, PRC62,064611('00), Danielewicz, NPA673,375('00)*

$$\varepsilon(\mathbf{p}, \rho) = \sqrt{[m + U_s(\mathbf{p}, \rho)]^2 + \mathbf{p}^2} = \sqrt{m^2 + \mathbf{p}^2} + U(\mathbf{p}, \rho)$$

- ◆ Due to the Scalar potential nature, EOS dependence is smaller.

- Scalar/Vector Combination *Danielewicz, Lacey, Lynch, Science 298('02), 1592*

$$\varepsilon(p, \rho) = m + \int_0^p dp' v^*(p', \rho) + \tilde{U}(\rho), \quad v^*(p, \rho) = \frac{p}{\sqrt{p^2 + [m^*(p, \rho)]^2}}$$

- ◆ Relatively Strong EOS dependence even at high energy

- JAM-RQMD/S *Isse, AO, Otuka, Sahu, Nara, PRC 72 (2005), 064908*

- ◆ Similar to the Scalar model BUU



# Hadron Production at High $p_T$

- GSI, AGS and SPS → *Resonance and String formation*

*Nara et al., PRC61('00),024901; Isse et al., PRC72('05),064908.*

- Standard picture at RHIC = pQCD+E-loss+Indep. Frag.

$$\begin{aligned} \frac{d N^{AA}(b)}{dy d^2 p_T} &= \int d\mathbf{r}_T t_A(\mathbf{r}_T - \mathbf{b}/2) t_B(\mathbf{r}_T + \mathbf{b}/2) && \text{Geometry} \\ &\times K \sum_{abcd} \int dx_a dx_b d^2 k_a d^2 k_b f_{a/A} f_{b/B} \frac{d\sigma^{ab \rightarrow cd}}{d\hat{t}} && \text{pQCD} \times \text{K-fac.} \\ &\times D(E_c - \Delta E_c(\mathbf{r}_T); c \rightarrow h) && \text{E-loss + Indep. Frag.} \end{aligned}$$

- Hadron-String dynamics may be important in the later stage.

*Hirano et al., PLB636('06)299 (afterburner improves  $v_2$  in Hydro+Jet)*

*Sahu et al. Pramana 67 ('07)257 (cascade → low  $p_T$  observables except for  $v_2$ ).*

*How about String Fragmentation ?*



# Jet-Fluid String formation and decay: Model

Isse, Hirano, Mizukawa, AO, Yoshino, Nara, nucl-th/0702068

## Mini-Jet production in pQCD

Sjostrand et al., CPC 136('01), 238 (PYTHIA 6.4)

## Jet propagation in QGP Fluid

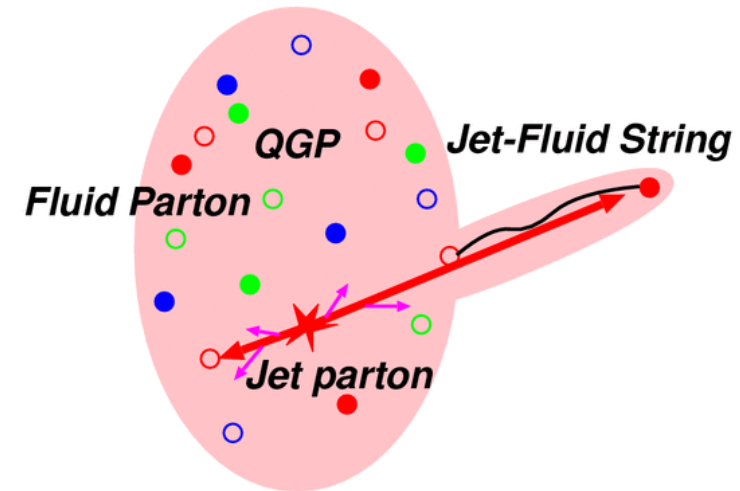
### Full 3D Hydro. Results

Hirano-Nara, PRL91('03), 082301; PRC69('04),034908

Hirano, Tsuda, PRC66('02),054905

+Simplified GLV E-loss  $\times$  factor (C)

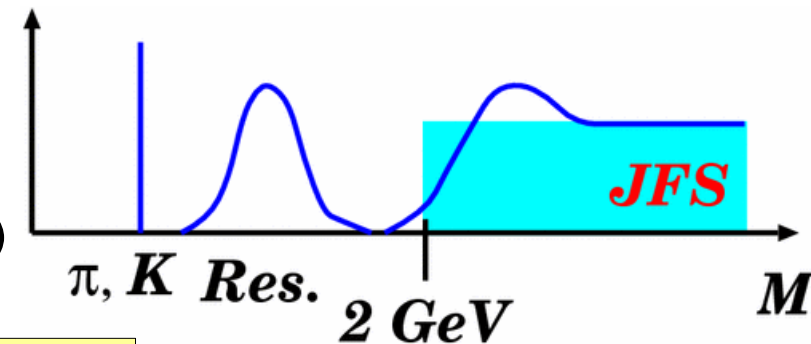
Gyulassy-Levai-Vitev, PRL85('00), 5535.



## String Formation and Frag.

$$\Delta E = C \times 3 \pi \alpha^3 F_{\text{color}} \int d\tau \rho(\tau, \mathbf{x}(\tau)) \cdot (\tau - \tau_0) \log \left( \frac{2 E_0}{\mu^2 L} \right)$$

### Flat "Spectral" Function $\Theta$ ( $\sqrt{s} - 2 \text{ GeV}$ )



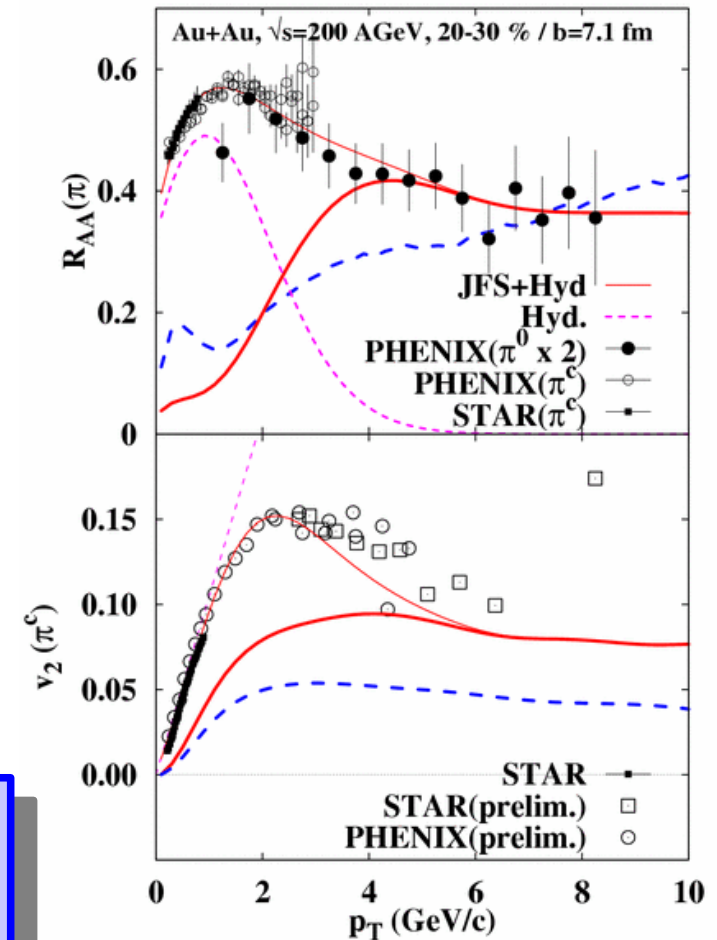
$$D(j \rightarrow h) = \int d^3 k_f f_f(k_f, T, u_\mu, \mathbf{x}(\tau_f)) \times S(s = (k_j + k_f)^2) D(\text{String}(\sqrt{s}, k_j, k_f) \rightarrow h)$$



# Jet-Fluid String formation and decay: Results

Isse, Hirano, Mizukawa, AO, Yoshino, Nara, nucl-th/0702068

- Efficient high  $p_T$  hadron production  
→ Large Energy loss is required
  - $R_{AA}$  fit → Energy loss factor  $C = (6-8)$   
*c.f.  $C = (2-3)$  in Hydro+Jet (Hirano-Nara)*
- Large E-loss + Fluid parton  $v_2$  enhances hadron  $v_2$  at high  $p_T$ 
  - $v_2 \sim 8\%$  @  $p_T > 6$  GeV/c  
*c.f.  $v_2 \sim (4-5)\%$  in Indep. Frag.*



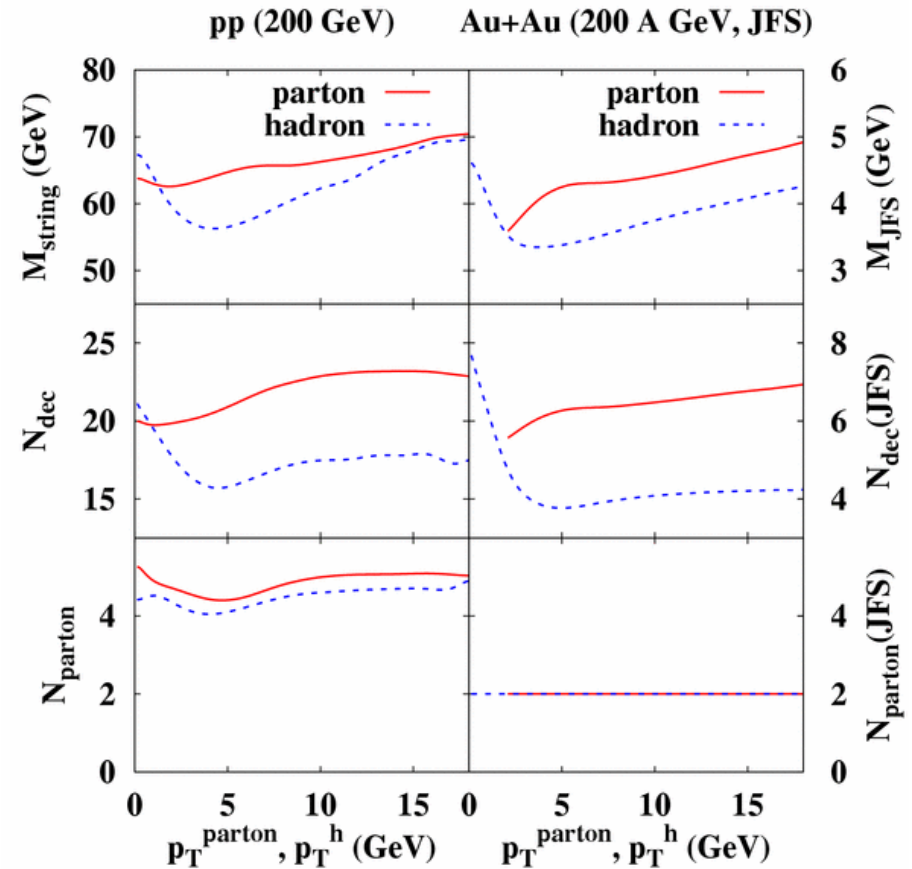
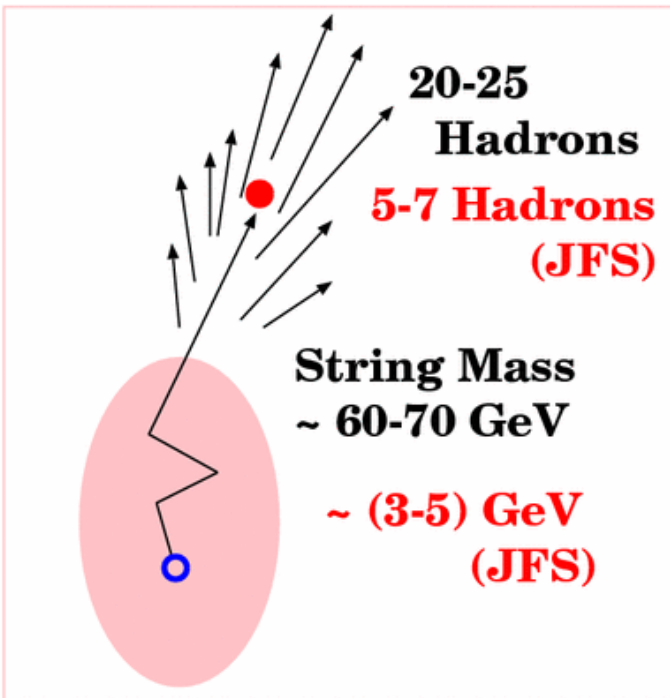
When we fit  $R_{AA}$  at high  $p_T$ ,  
larger  $v_2$  than IF is obtained,  
and roughly explains data !  
→ How about Hadron Correlation ?



# Comparison with Indep. Frag.

## Independent Fragmentation (IF)

- IF in pp ~ String Frag. in pp  
→ Heavy string (60-70 GeV)  
decays into many (20-25) hadrons)
- IF @  $p_T$  (After E-loss) in AA  
~ String Frag. @  $p_T$  in pp

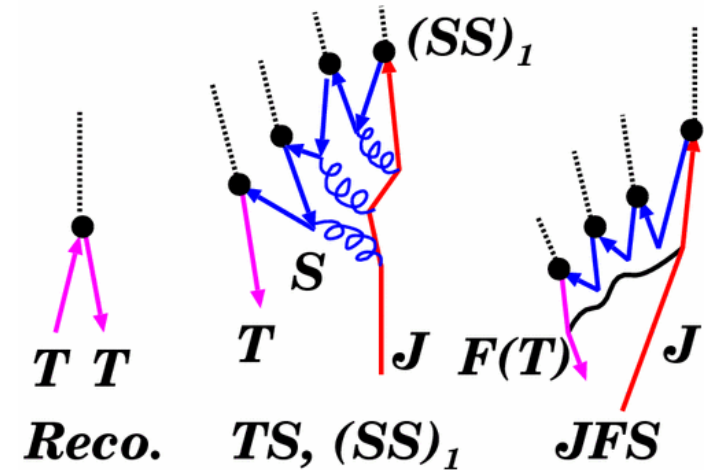


*IF ~ Heavy Mass String Frag.  
→ Are these heavy strings really  
formed in Au+Au collisions ?*

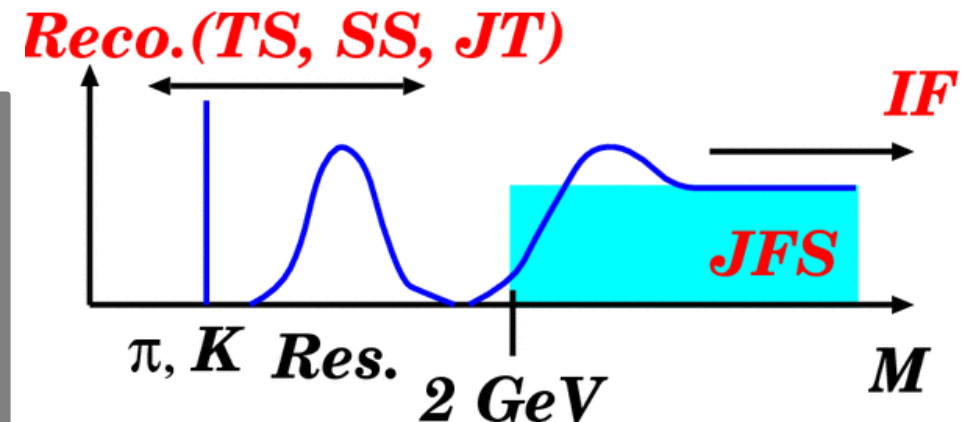
# Comparison with Reco. Models at High $p_T$

- $TT(T) \rightarrow$  med.  $p_T$   
*Nonaka et al., PRC69('04),031902*
- $JT \rightarrow$  med.  $p_T$  (soft-hard)  
*Greco-Ko-Levai, PRC68('03),034904*
- $TS \rightarrow$  med.  $p_T$ ,  $(SS)_1 \rightarrow$  high  $p_T$   
*Hwa-Yang, PRC70('04)024905*
- $TT(T) \rightarrow$  Res.  $\rightarrow$  med./low  $p_T$   
*Greco-Ko, PRC70('04)024901*

T: Thermal (Fluid) parton  
J: Jet parton  
S: Shower parton

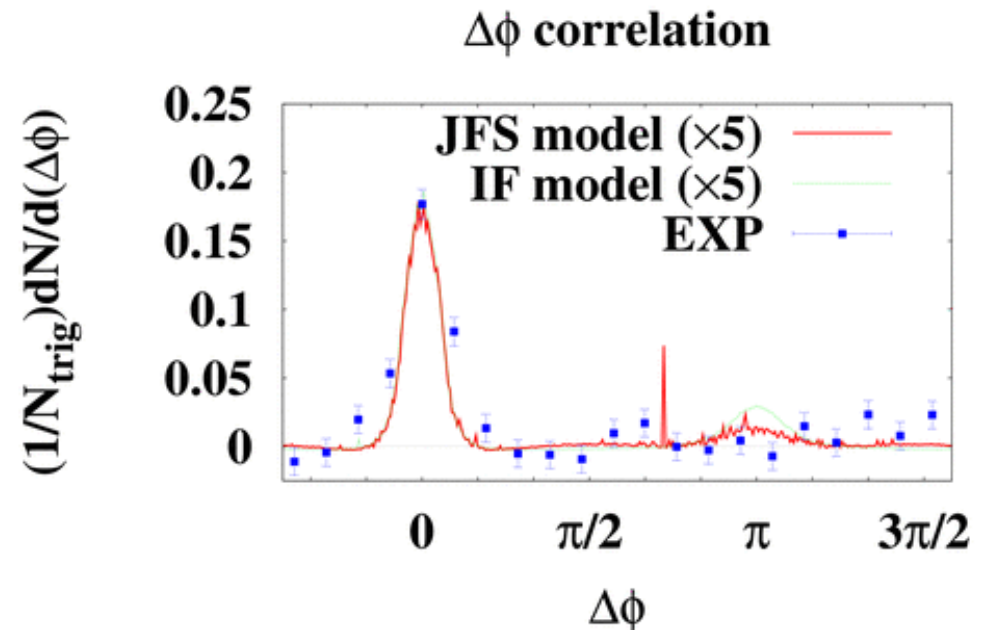


- Th. + "part of Jet" produce  $h$
  - Higher mass Res. is favored than Direc. prod.
- $\rightarrow$  not inconsistent with JFS



# Dihadron azimuthal angle correlation

- Disappearance of backward azimuthal angle correlation in Au+Au collisions = one of the most strong QGP signals.
  - Hydro + Jet model *Hirano & Nara, PRL (2003)*
    - ◆ E-loss which fit  $R_{AA}$  is not enough to suppress back. corr.
  - Jet “absorption” model *Drees, Feng, Jia, PRC71('05),034909*
    - ◆ Jet parton is absorbed with  $\exp(-\alpha L)$
    - ◆ What is the relation to the energy loss ?
  - JFS
    - Large E-loss (which fit  $R_{AA}$ ) explains suppression !



# Jet-Ridge Structure

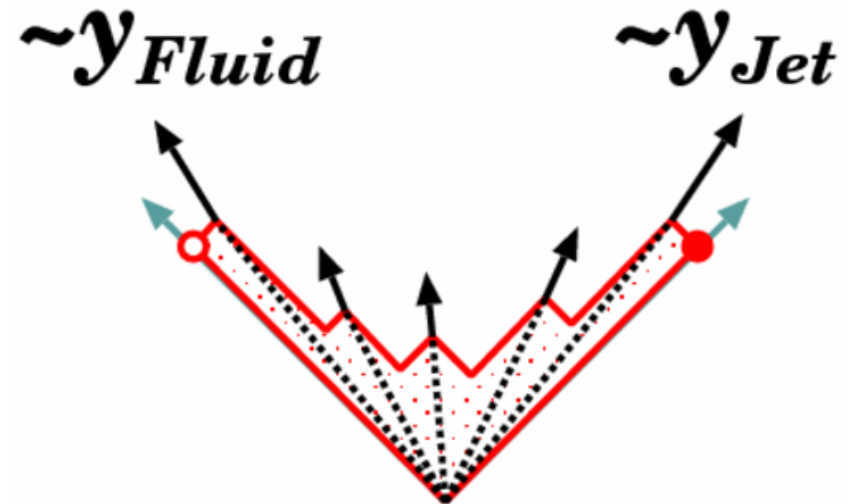
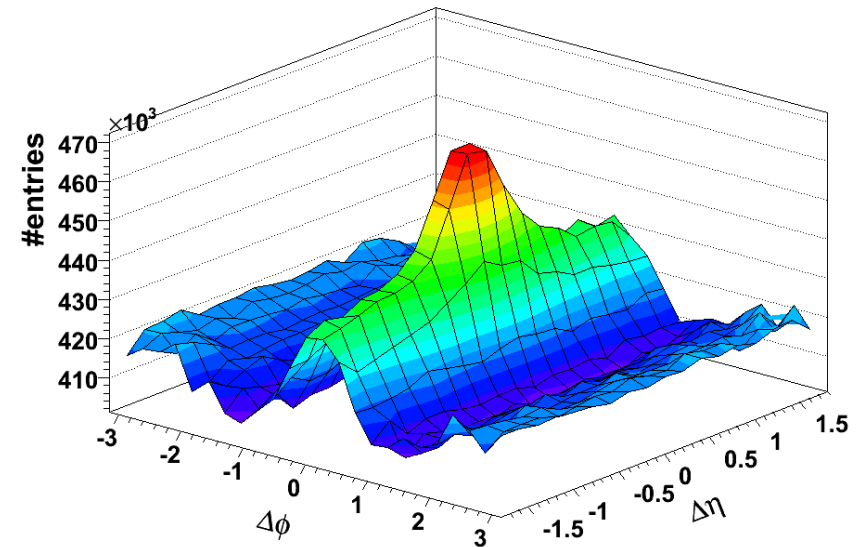
- Jet-Ridge structure  
(narrow  $\Delta\phi$  corr.,  
+wide  $\eta$  corr.)

- Hwa et al.  
Emitted gluon  $\eta$  is widened  
by the fluid velocity

- JFS  
Hadrons are distributed  
between

$$y_{\text{Fluid}} < y < y_{\text{Jet}}$$

and pT boost narrows  $\Delta\phi$  corr.



*One-Shot Calc. does not show  
Ridge structure. Why ...*

# Summary

---

- JFS model roughly explains
  - v2 at high  $p_T$  and Disappearance of back.  $\Delta\phi$  corr.
  - with a large Energy-loss factor fitting  $R_{AA}$  ( $C \sim 6$ )
  - with dynamically evaluated jet and fluid mom. dist.
- Large E-loss is allowed in JFS (compared to IF), since string mass is smaller and string decays into fewer  $h$ , which share the jet parton mom.
- JFS results may be not inconsistent with Jet(Shower)-Therm.(Fluid) recombination. (AO's personal opinion)
- To do; Baryon enh., Jet-Fluid Res., Ridge structure, Relation to the spectral func., .....

---

# 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

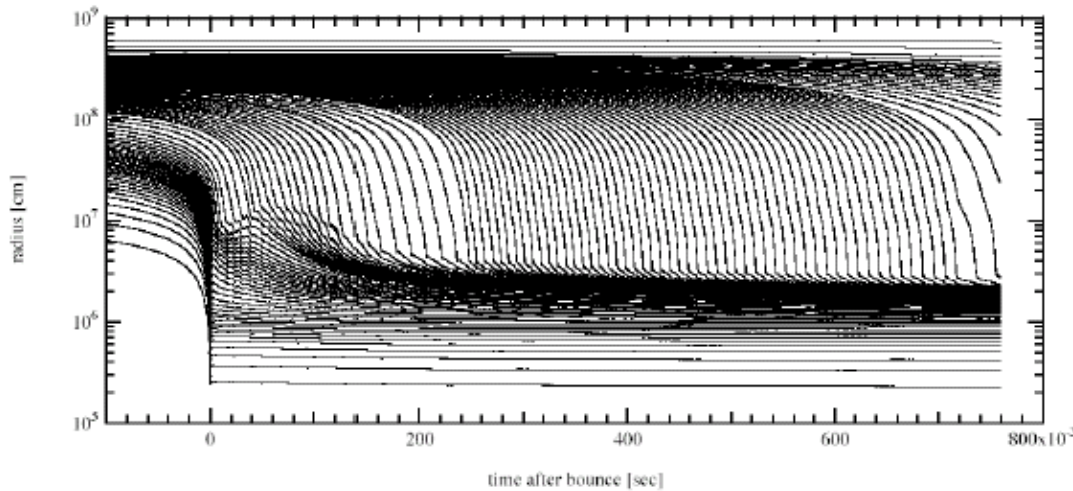
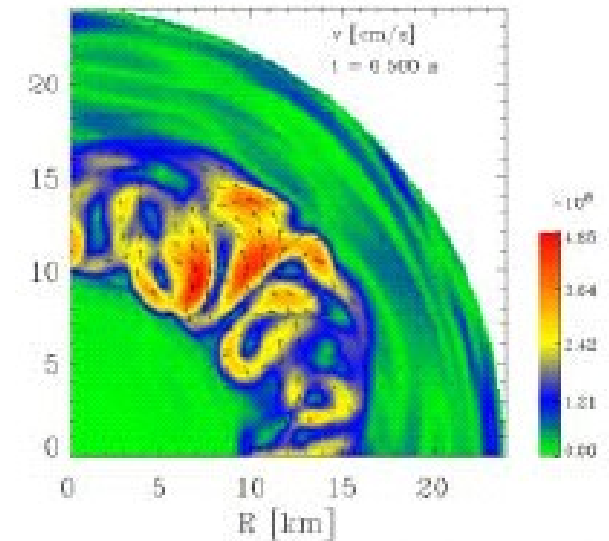
大西 明、石塚知香子、椿原康介  
住吉光介  
山田章一  
鈴木英之



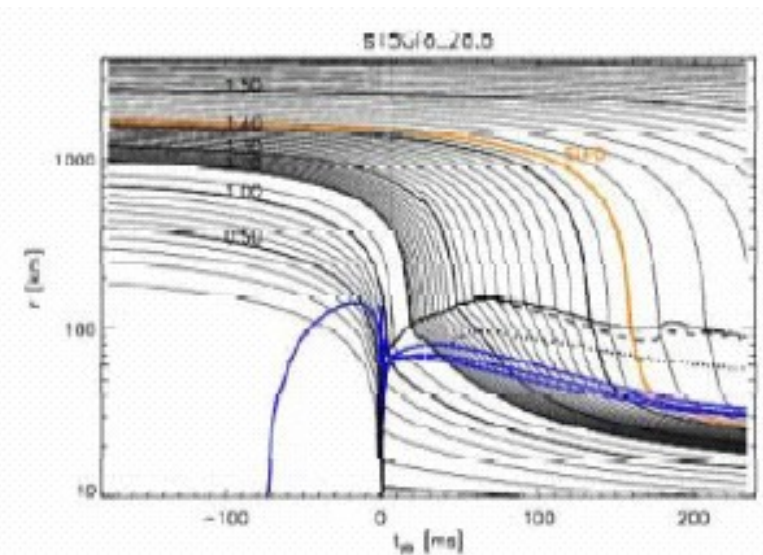
# 超新星爆発のシミュレーション

## ■ 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)



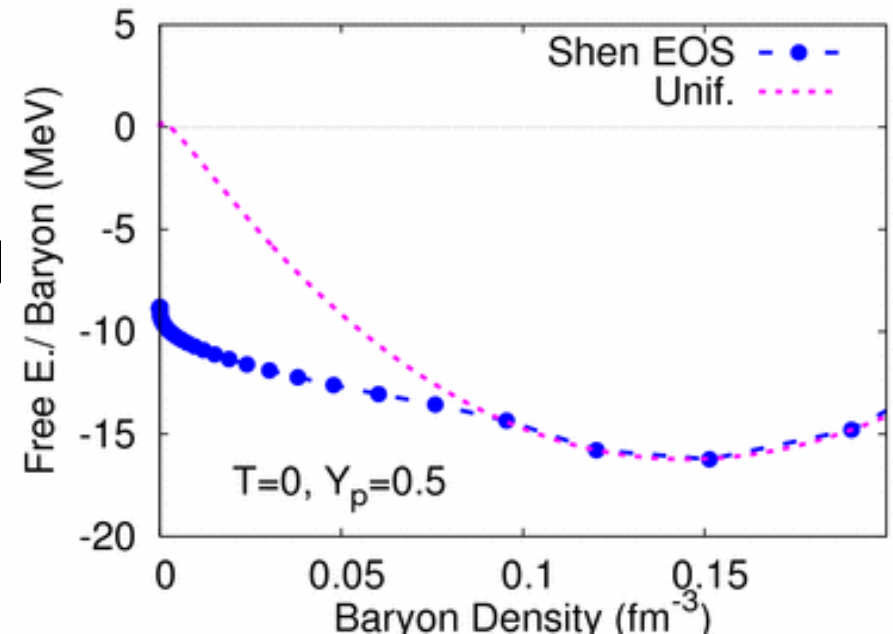
Sumiyoshi et al., 2005



(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 + $\alpha$

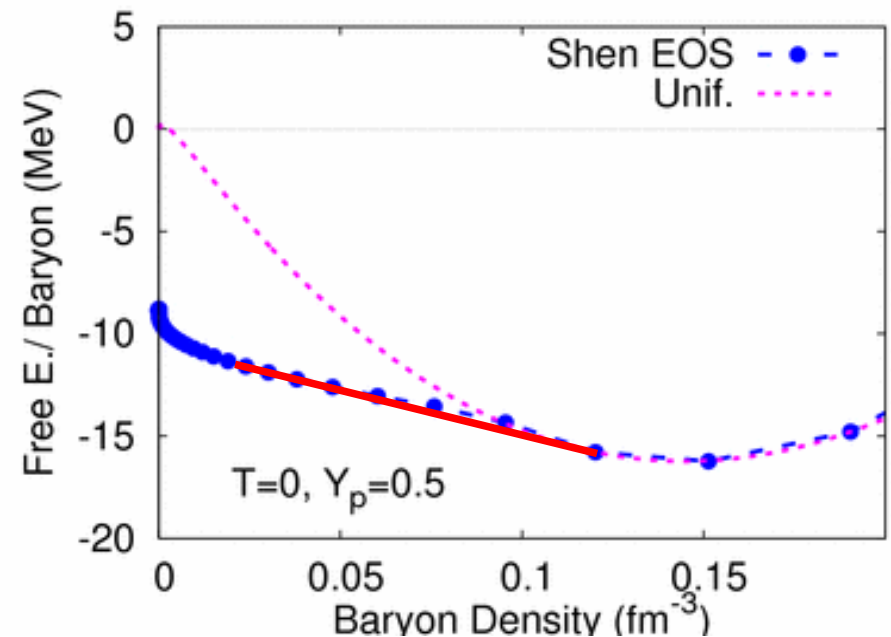
## ■ 低密度での問題点

「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

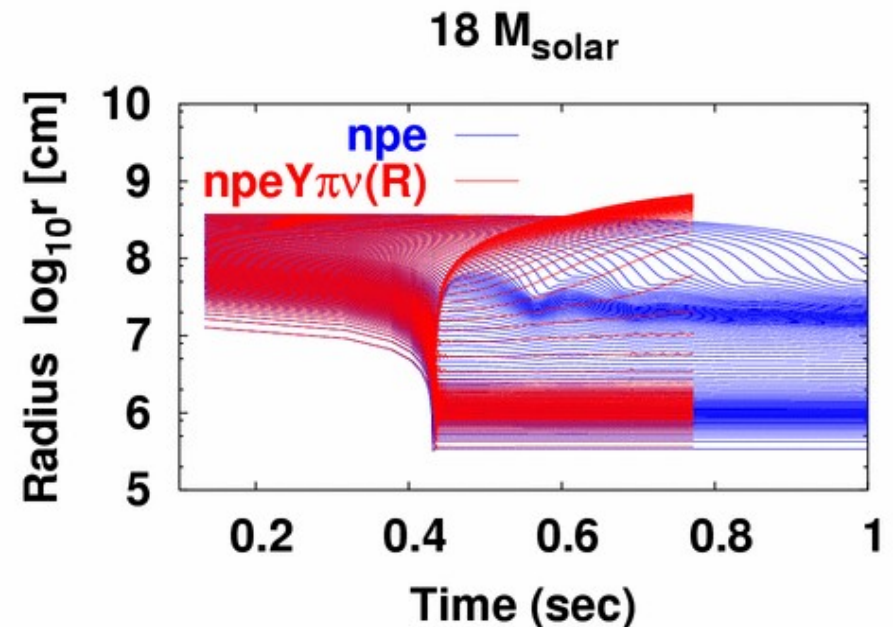
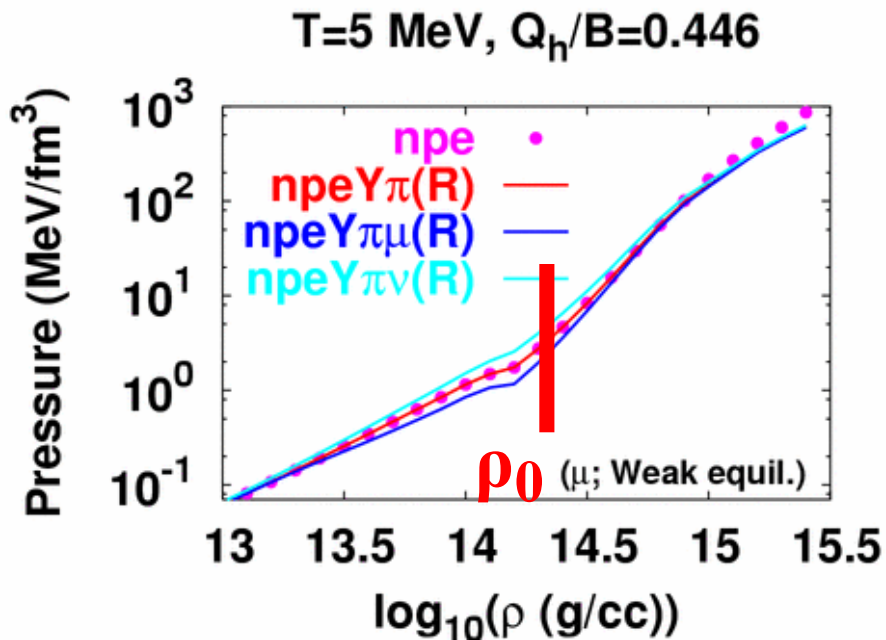
- Lattimer-Swesty EOS

→ 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

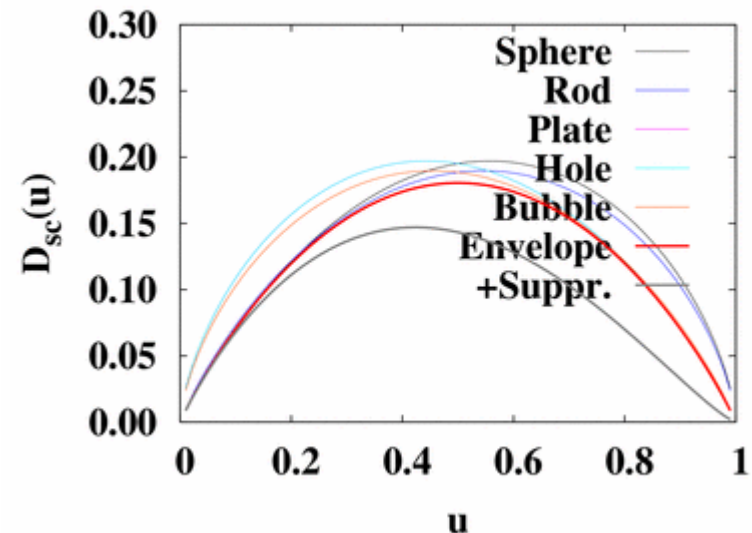
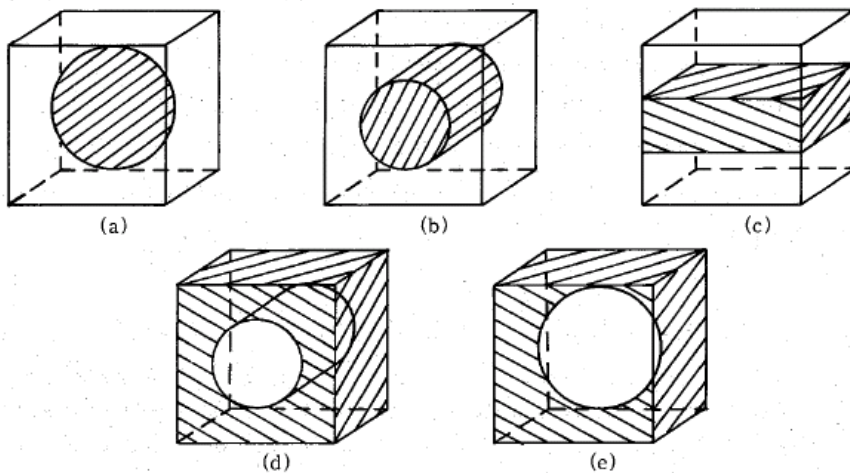


一様物質への転移を滑らかにする方法の候補 = 連続パスタ

# 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)

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

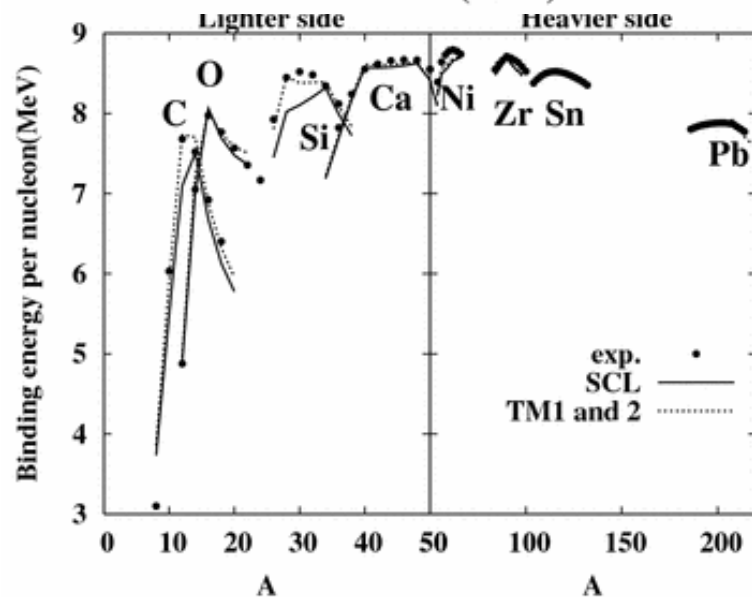
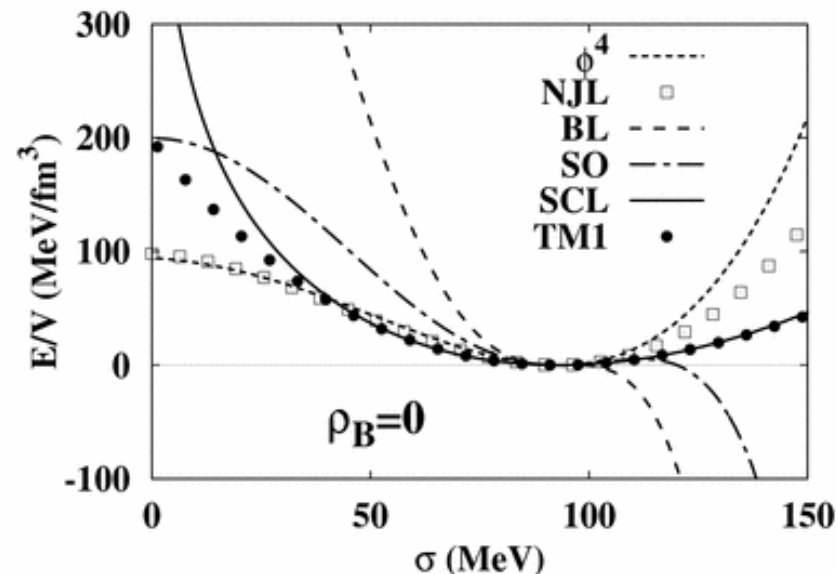
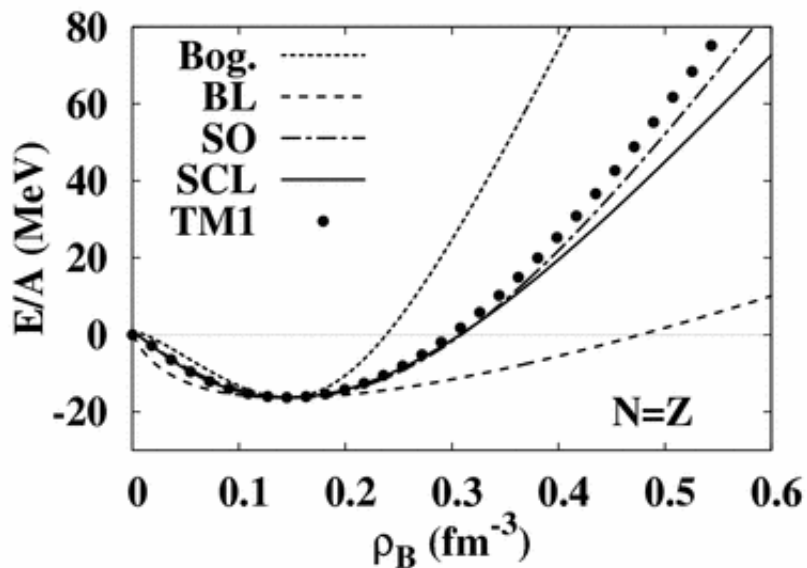


Oyamatsu et al., 1984



# 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

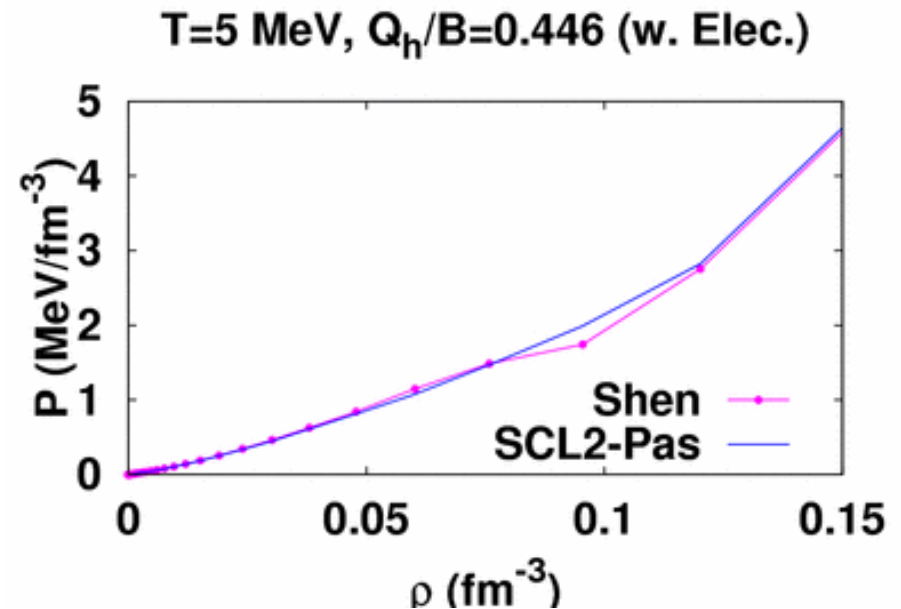
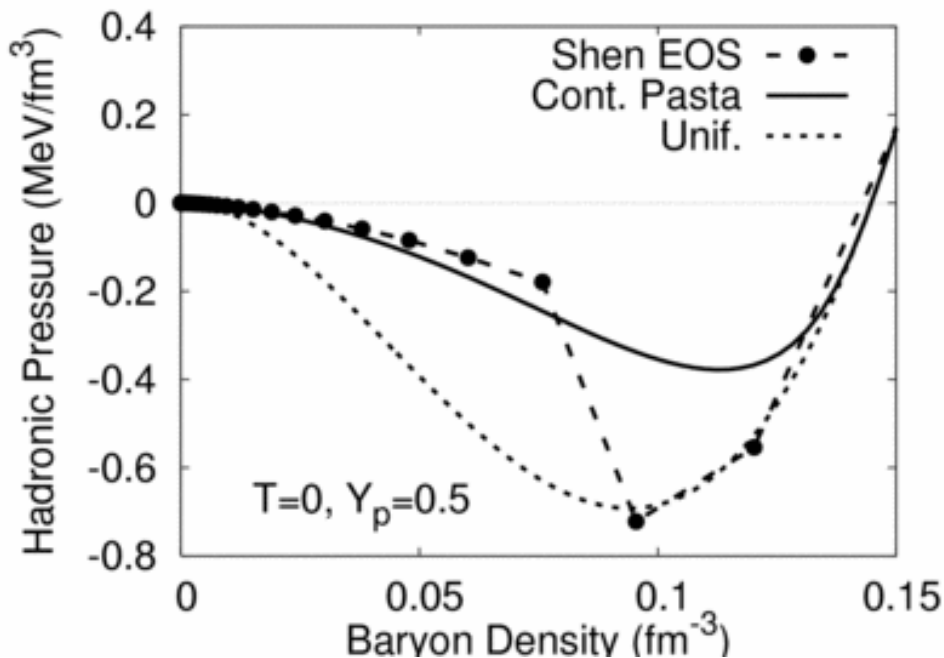
$$F = (1-X)F(\rho_{BL}, Y_{pL}) + XF(\rho_{BG}, Y_{pG}) + V_{SC}(\Delta\rho_c, u)$$

$F$ : 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

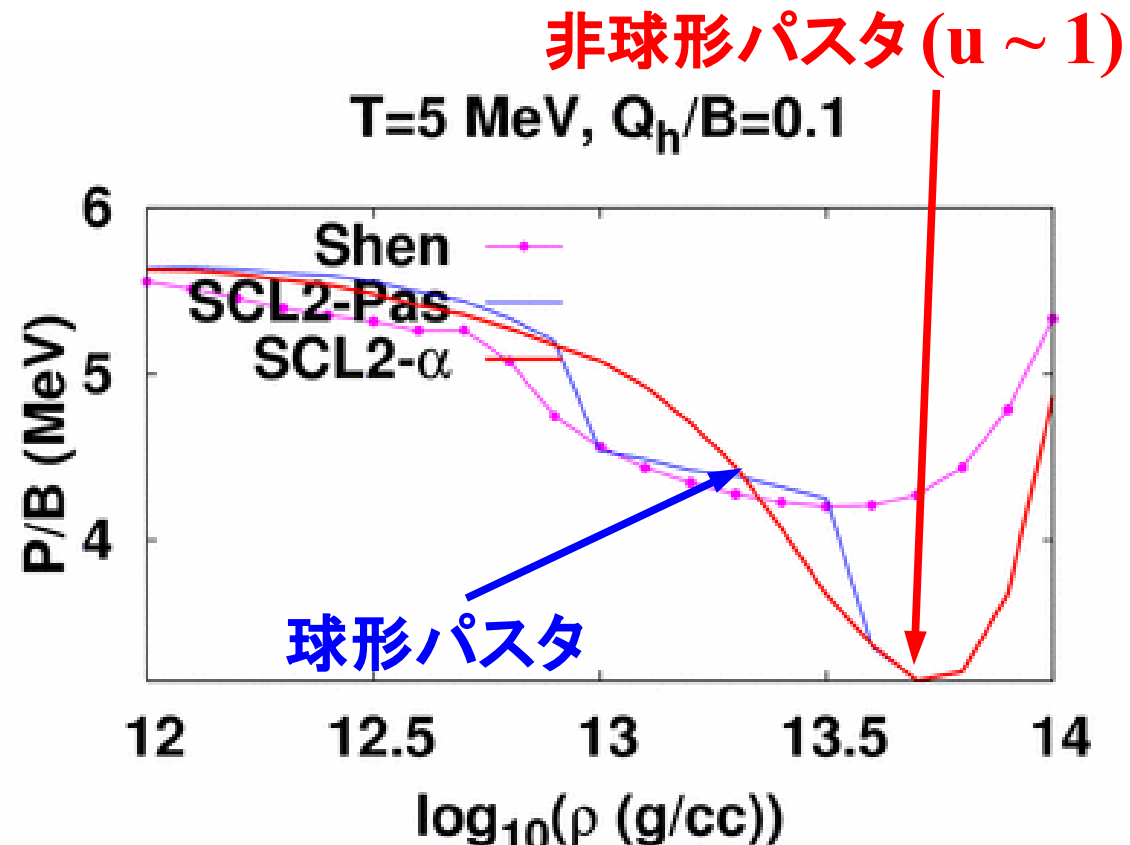
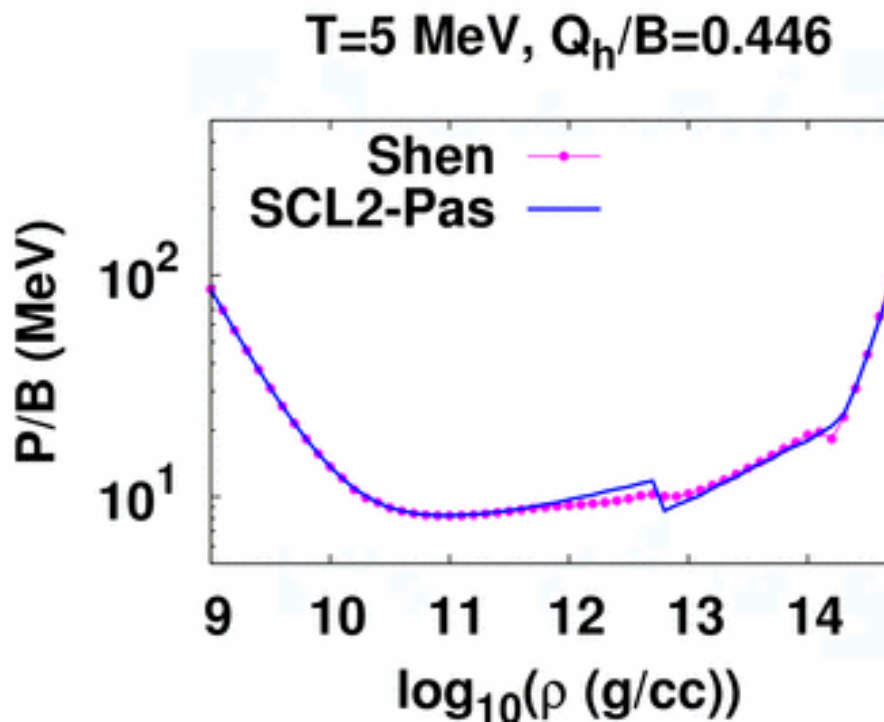




# Chiral RMF+ 連続パスタ: 状態方程式の変化 (2)

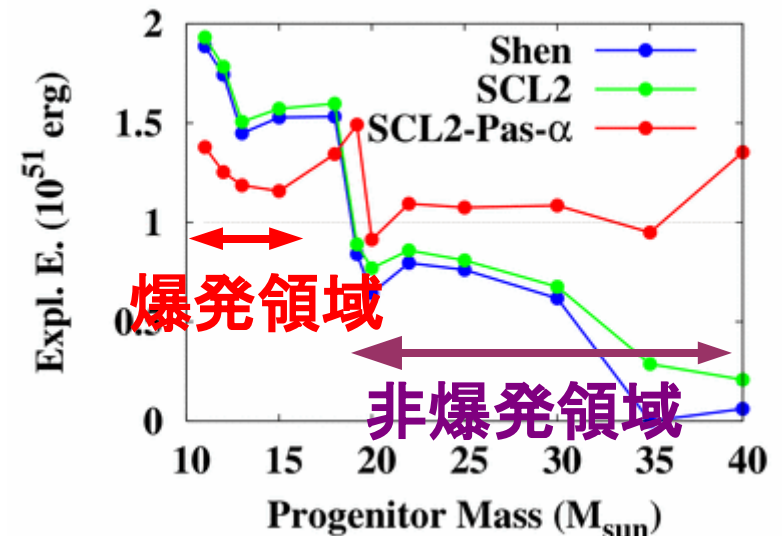
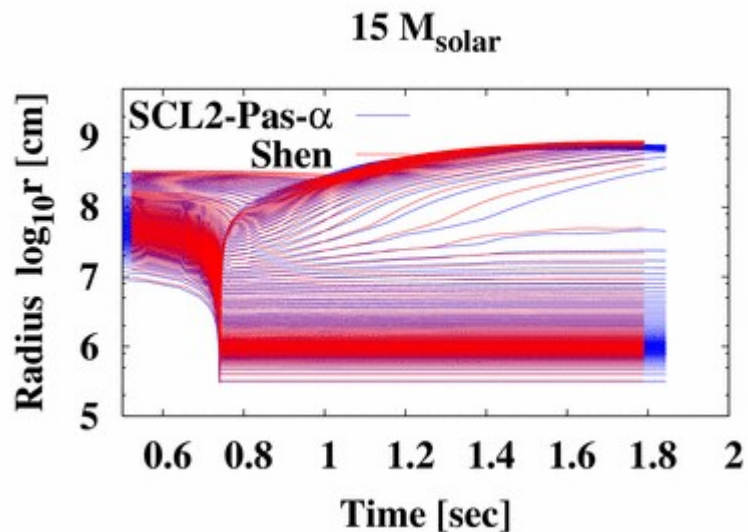
## ■ 問題点

- 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



# 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

