

北大での研究の展望 --- その 2 ---

北大理 大西明

その 1 は明君のもともとのタイトルでした。

原子核物理学の基本課題

クォーク・ハドロン物質物理の展望

強結合格子 QCD

ハイパー核物理と状態方程式

高エネルギー重イオン反応

まとめ



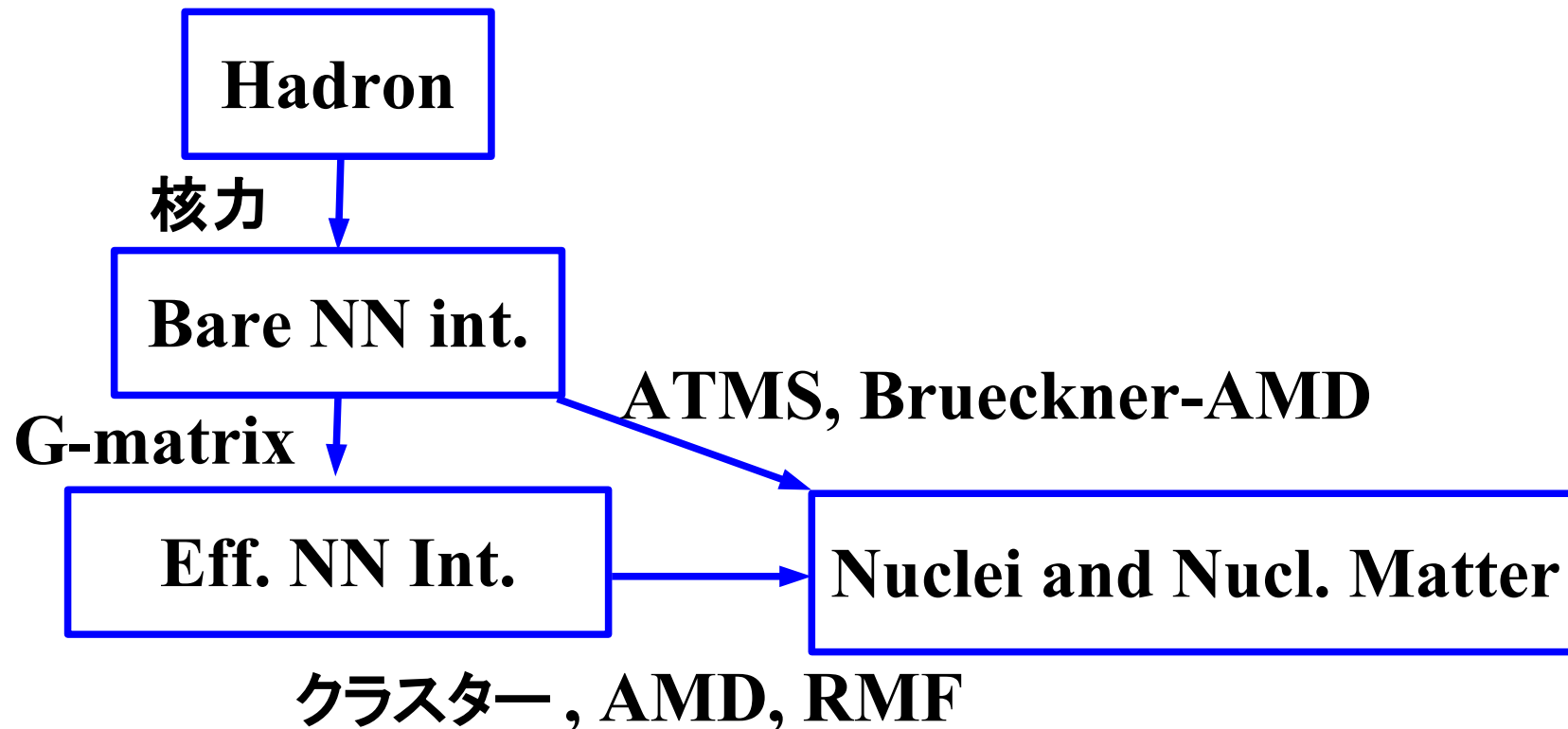
原子核物理学の基本課題

核力から核構造へ (そして核物質の飽和性へ)

現在も解決していない核物理の基本課題

「現実的核力 → 有効核力 → 原子核・核物質」
→ 単に解くだけでなく、それぞれの段階での機構の理解が必要

第一原理計算：現実的核力 → 原子核・核物質

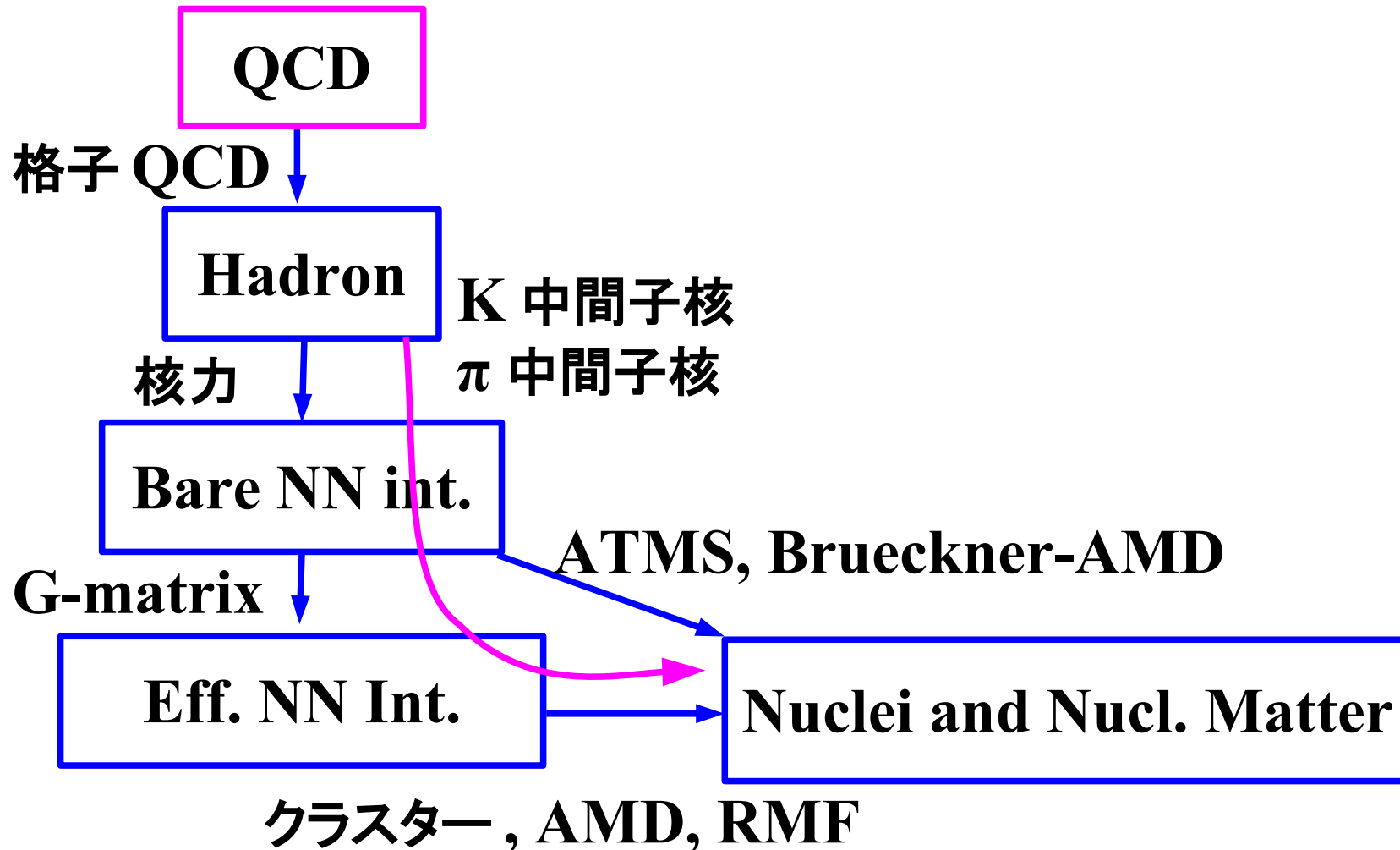


原子核物理学の基本課題

近年の核物理の発展

核子以外のバリオン、中間子の多体系の物理へ
(中間子は力を媒介するだけでなく、構成要素となった)

格子 QCD による核力の理解 (青木・石井・初田)

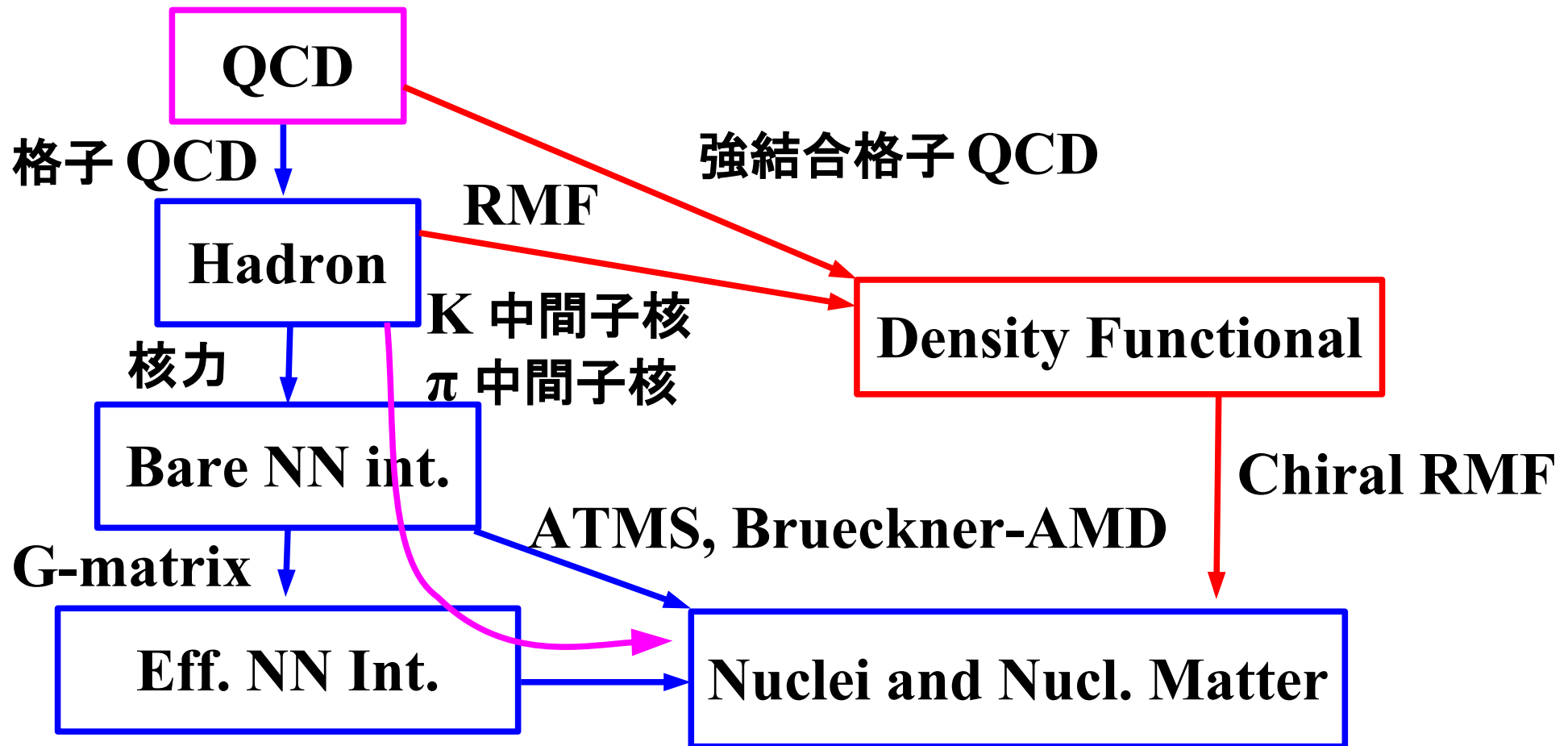


原子核物理学の基本課題

「QCD から核構造へ」の道の障害

= 格子 QCD では、有限バリオン密度系の取扱いが困難

第 2 の道 = QCD から原子核の密度汎関数を得る
+ 密度汎関数を様々な系で確かめる



クラスター, AMD, RMF



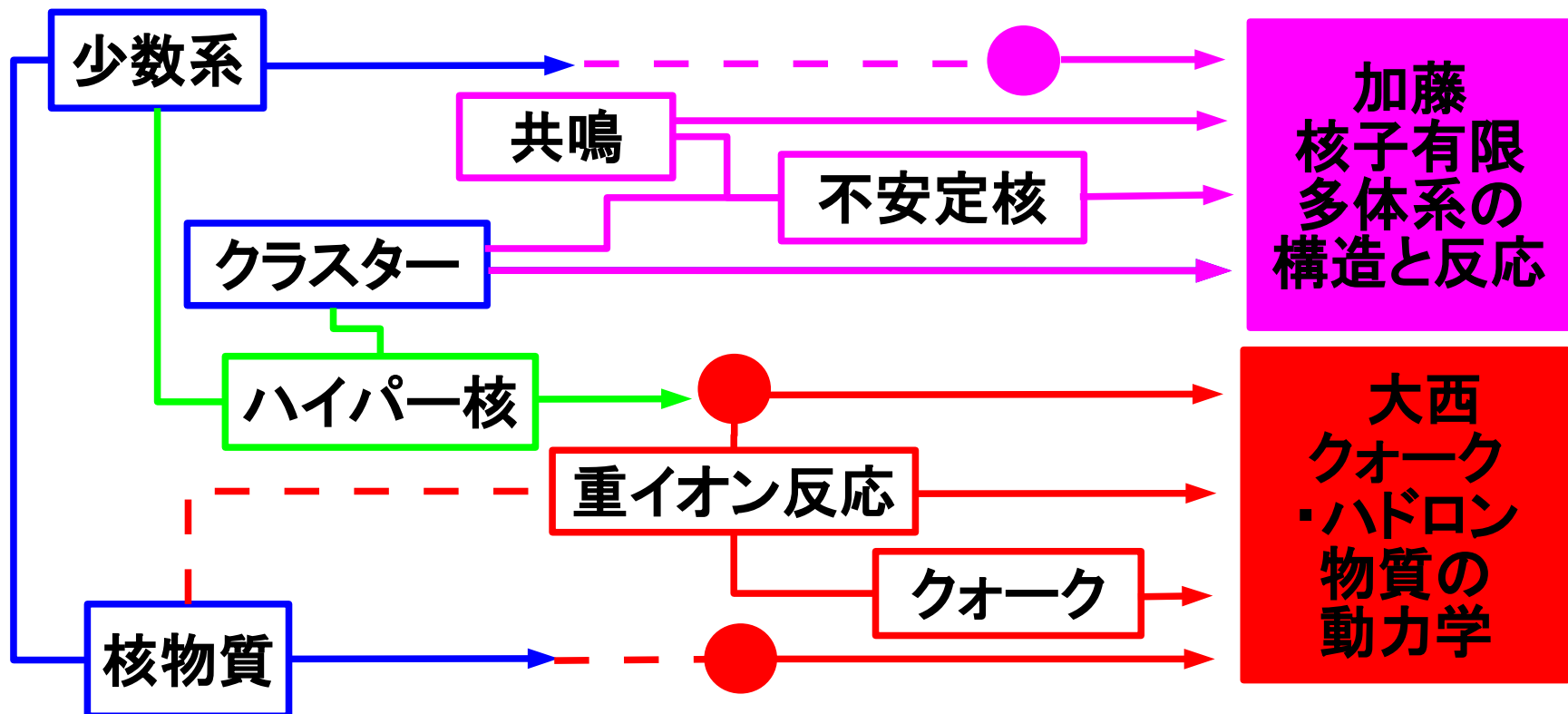
北大原子核理論研究室での研究の柱

2本(以上)の柱

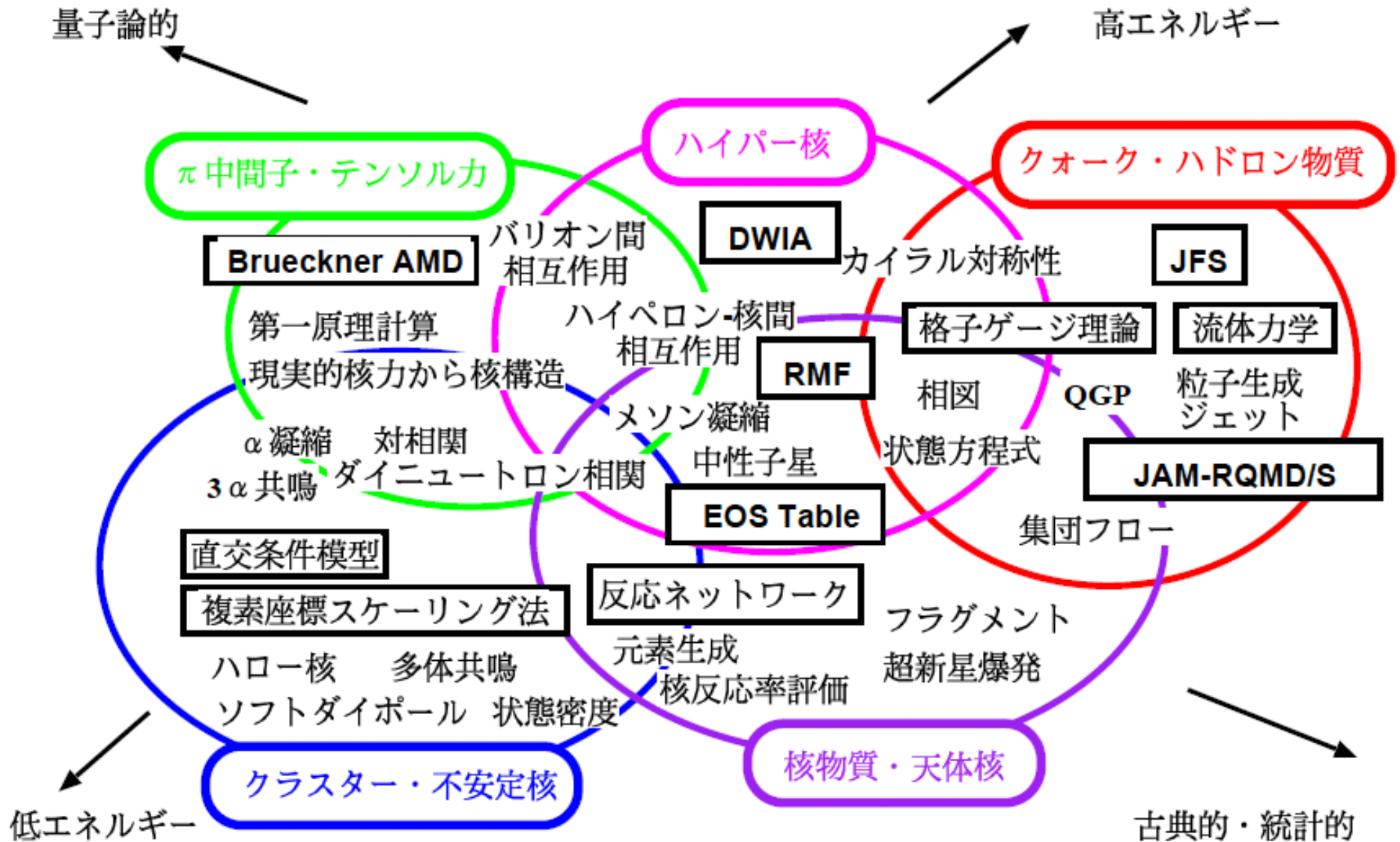
「少数系」と「クラスター」
～「積み重ねる理論」と「現象論」

「核子多体系」と「クォーク・ハドロン物質」
～「核力から原子核」と「密度汎関数から核力へ」

現象との比較はいずれにしても必要



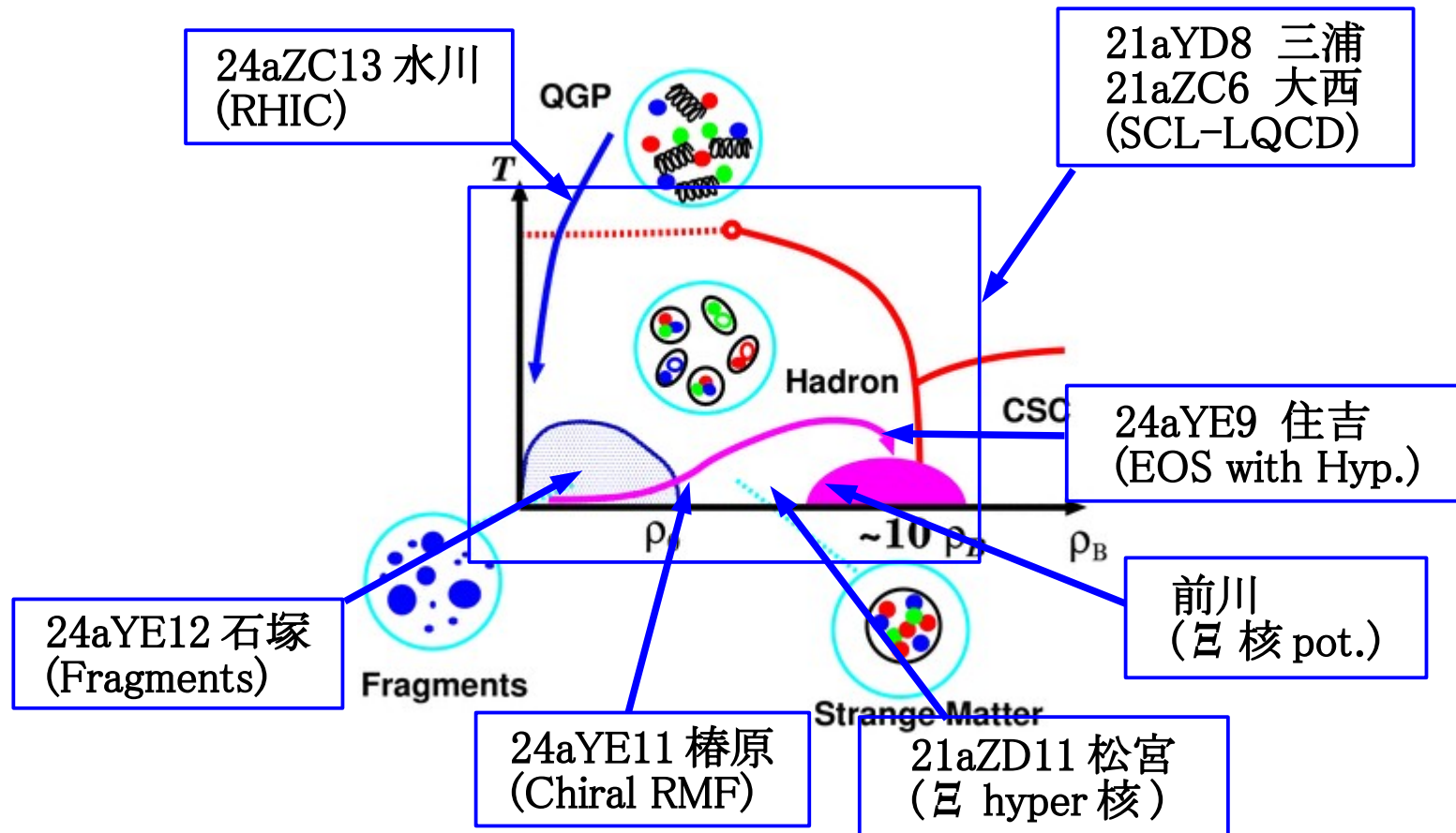
研究室での研究課題(2006 年度年次報告より)



Quark and Hadronic Matter Phase Diagram

原子核・ハドロン・クォークの3階層状態方程式とコンパクト天体現象
 (科研費基盤研究 (C), 大西、河本、住吉)

クォーク、ハドロン、原子核の3階層をつなぐ EOS を作りたい!



Strong Coupling Limit/Region of Lattice QCD

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

格子 QCD のモンテカルロ計算

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

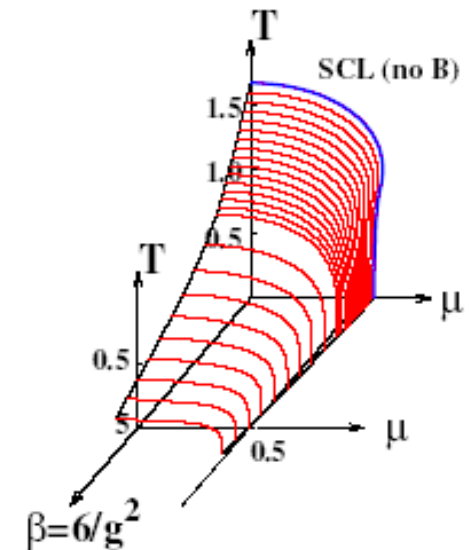
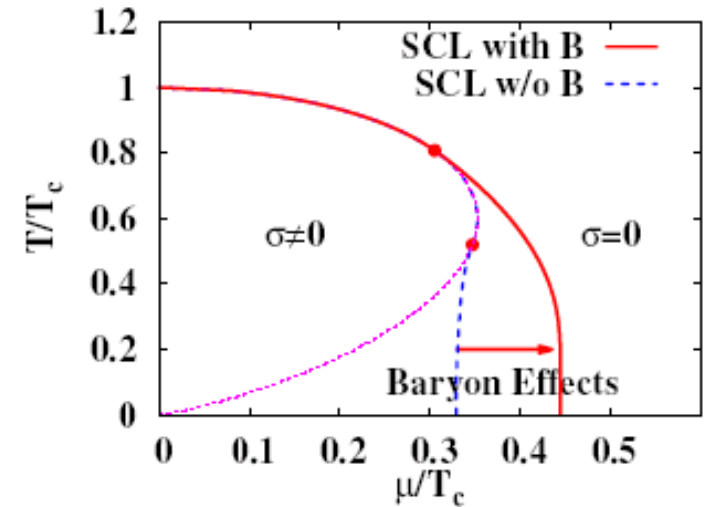
強結合極限でのバリオン効果

- 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



有限温度強結合格子 QCD でのハドロン質量

今回の学会発表 (大西, 河本, 三浦)

有限温度強結合格子 QCD でのハドロン質量

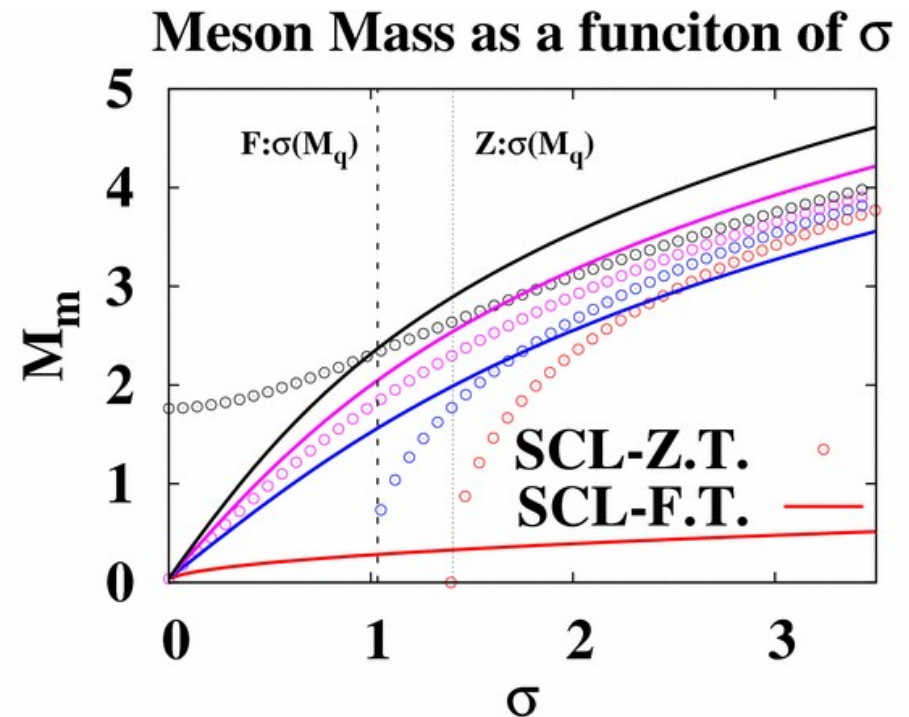
$$M = 2 \operatorname{arcsinh} \sqrt{(\bar{\sigma} + m_q) \left| \frac{d + \kappa}{d} \bar{\sigma} + m_q \right|}$$

$$\kappa = -d, -d+2, \dots, d \quad (d=3)$$

これまでにゼロ温度での研究は行われていたが、
カイラル凝縮 σ の関数としての振舞が不自然。

有限温度の取扱い (時間方向の
グルーオンを厳密に積分)

→ 中間子質量に対して
近似的に Brown-Rho
スケーリングが成り立つ



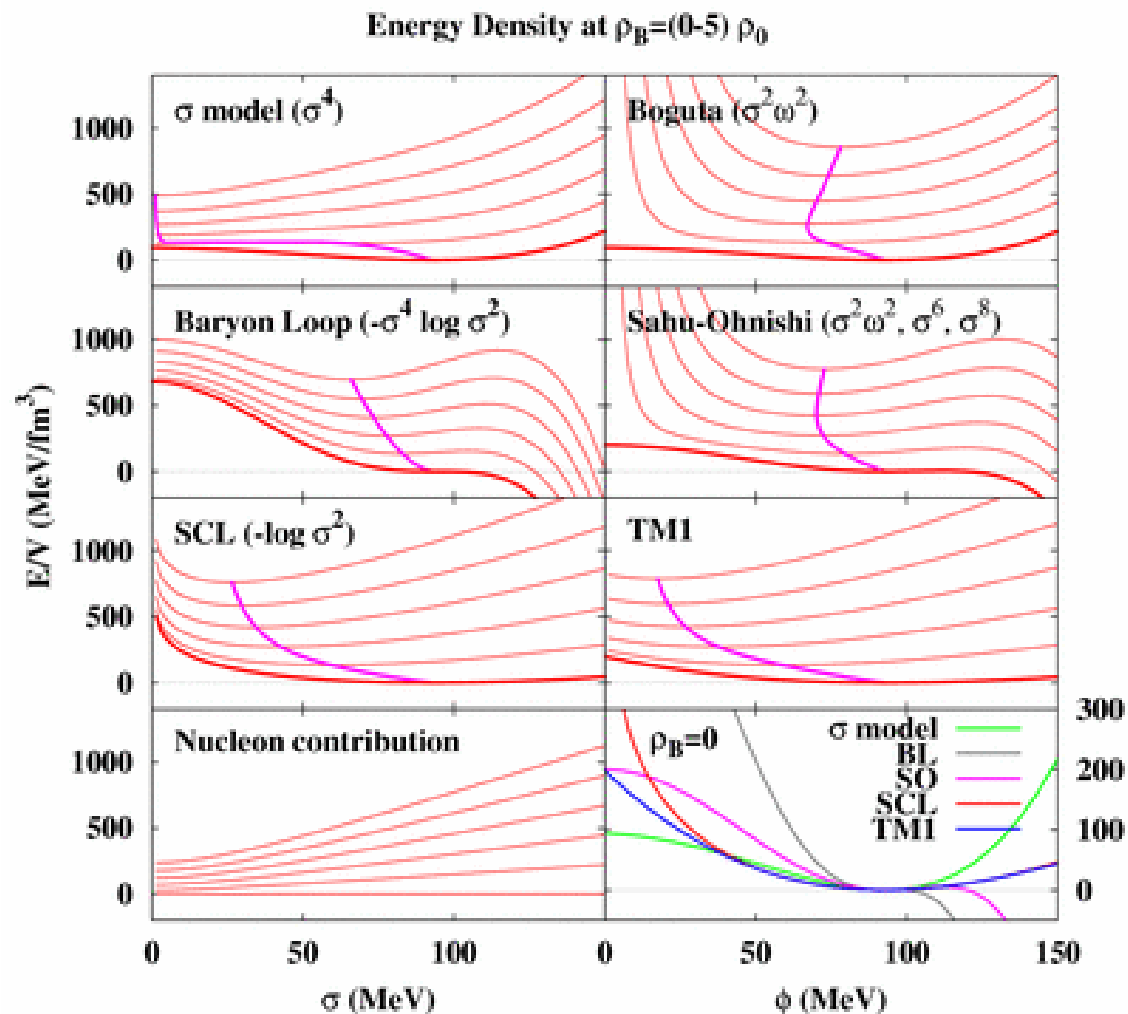
カイラル対称な相対論的平均場

カイラル対称性

QCD の対称性であり、自発的な破れがハドロンの質量を生み出す
→ ハドロンからなる系の基本的対称性の一つ

有限密度での問題点
カイラル対称性が
 ρ_0 以下で回復してしまう
(Lee-Wick 1974)

多くの処方箋が提案
されているが問題が残る



カイラル対称な相対論的平均場

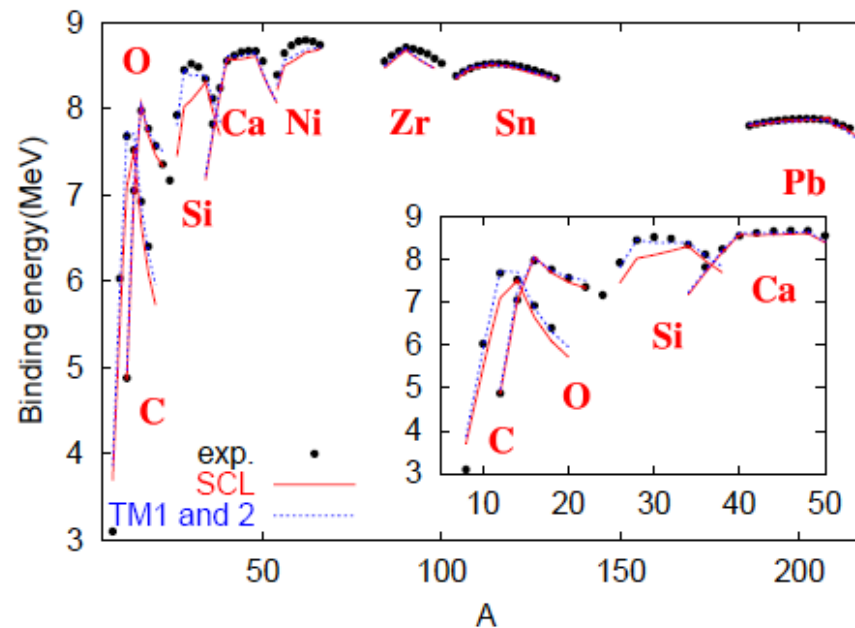
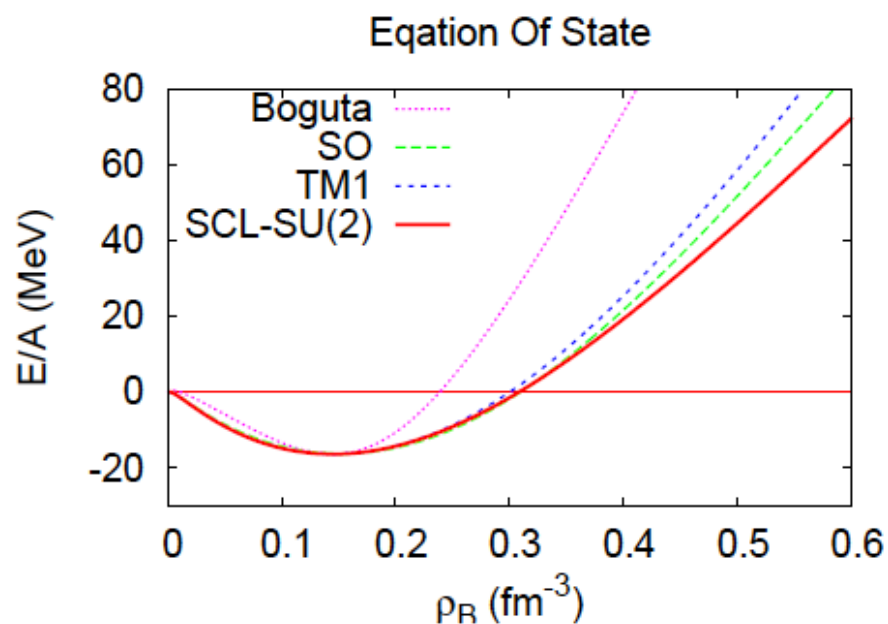
強結合格子 QCD に基づく Chiral RMF 模型

Tsubakihara, Ohnishi, PTP 117 (2007) 903 [nucl-th/0607046]

$$U_{\text{Linear } \sigma \text{ model}}(\sigma) = -\frac{\mu^2}{2} \sigma^2 + \frac{\lambda}{4} \sigma^4 \rightarrow U_{\text{SCL}}(\sigma) = \frac{1}{2} b_\sigma \sigma^2 - a_\sigma \log \sigma$$

QCD に基づき、カイラル対称性をもち、不安定性はない。

少ない数のパラメータで、核物質・原子核のバルクな性質をよく説明



QCD から原子核の「密度汎関数」の形を与えられるか？



ハイパー核物理への取り組み

ハイパー核物理の3つの目標

核子系で確認されたバリオン間相互作用 (or 密度汎関数) の検証・選択

高密度物質で現れ、状態方程式を軟化させる

異なる種類の粒子が結合する、コア核の異なるパリティ状態を結合する、コア核を変化させる、重い核の内側に入り込む、...
→ 構造としての面白さ

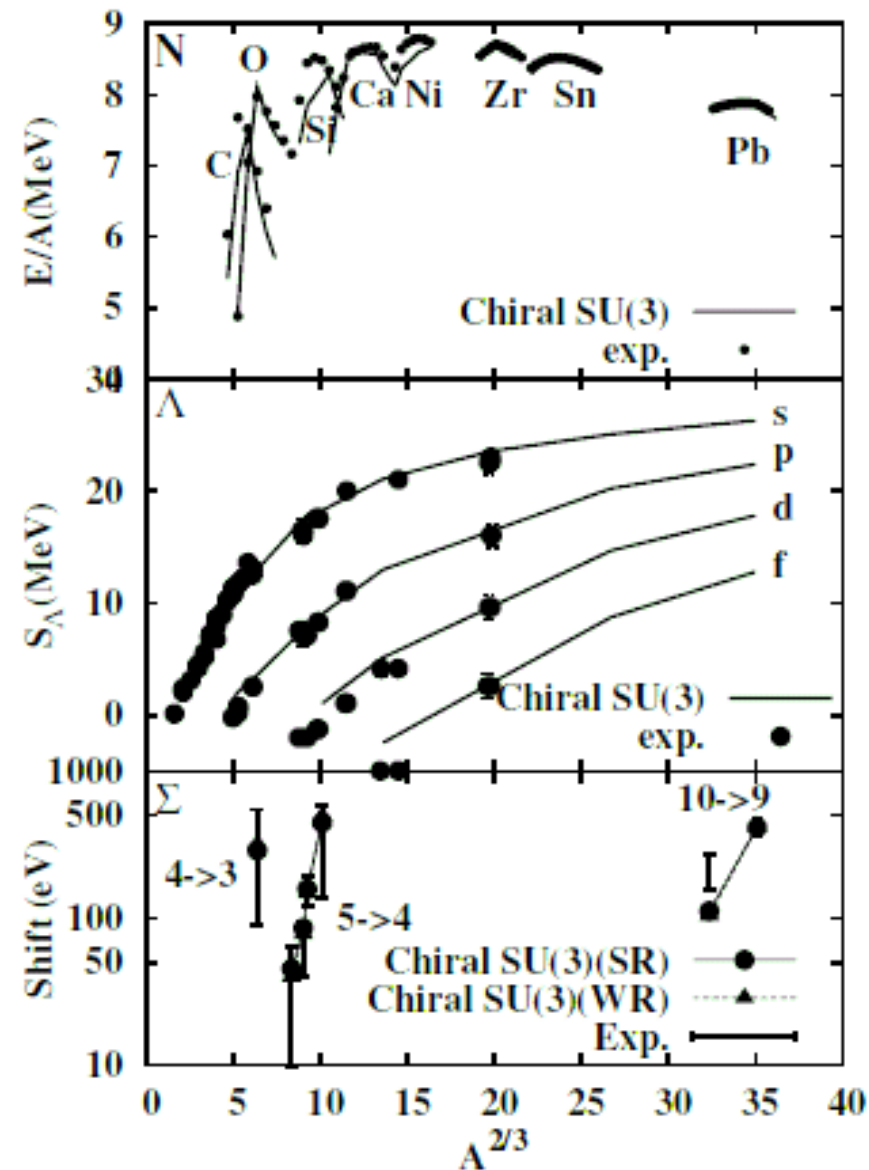
Chiral RMF の与える相互作用はハイパー核を説明できるか？

カイラル対称性 + $SU_f(3)$ 対称性

スカラー中間子との結合は free param.

→ Λ 核、 $\Lambda\Lambda$ 核、 Σ 原子を説明可能

→ $1.9 M_{\text{solar}}$ の中性子星は支えられない



ハイパー核生成反応と Σ , Ξ ポテンシャル

Maekawa, Tsubakihara, AO, nucl-th/0701066

Maekawa, Tsubakihara, Matsumiya, AO, arXiv:0704.3929

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

Λ ポテンシャル: 束縛状態から ~ -30 MeV

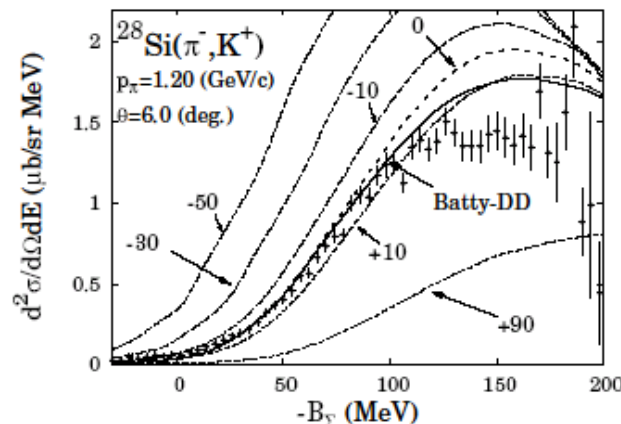
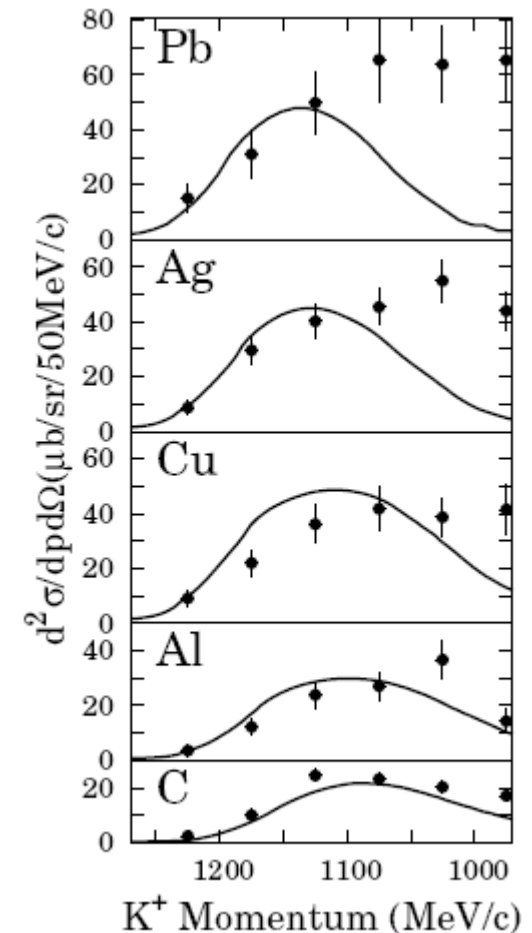
Σ , Ξ : ハイパー核反応から分析

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)
(Harada, Hirabayashi)

$\Xi \rightarrow$ 弱い引力 (~ -15 MeV)

ポテンシャルの
「形」にも依存



AMD による Ξ 核の研究

これまでの (K^-, K^+) 反応スペクトルの評価では丸い原子核を仮定
 → 核の変形、クラスター構造がある場合には？

結合チャネル AMD による Ξ 核の研究

(*Matsumiya, Tsubakihara, Maekawa, AO, Dote*)

V_{NN} : Brink-Boeker-Okabe (BBO1)

V_{YN} : G-matrix of Nijmegen ESC04d (*Rijken, Yamamoto, 2006*)

Consistency $V_{YN}(\rho) \leftrightarrow \rho = \langle \rho \rangle$ (*Dote, Akaishi, Yamazaki*)

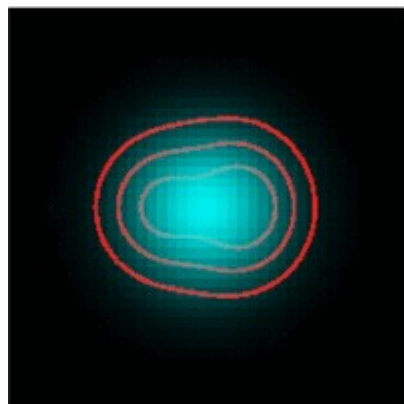
$$|\Psi\rangle = \sum_a x_a |\Phi^a\rangle \quad (a : \text{channel}) \quad |\Phi^a\rangle = \frac{1}{\sqrt{A!}} \det [|\varphi_j^a(i)\rangle]$$

$(A-1)Z \otimes \Xi^0$ $(A-1)(Z+1) \otimes \Xi^-$

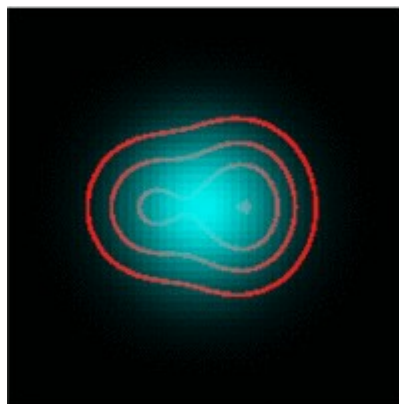
$$\hat{H} = \hat{T} - \hat{T}_{\text{cm}} + \hat{V} + \Delta mc^2$$

Density Distribution

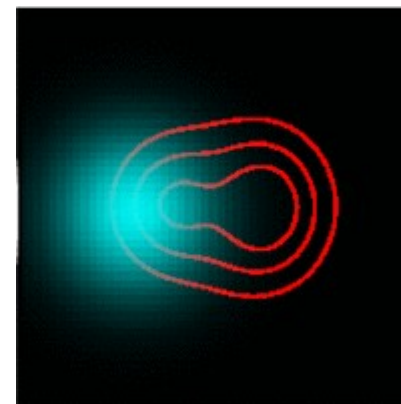
$^{12}_{\text{E}}\text{Be}$



Intrinsic

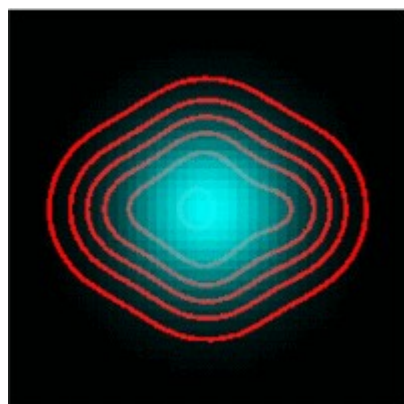


$\pi = -1$

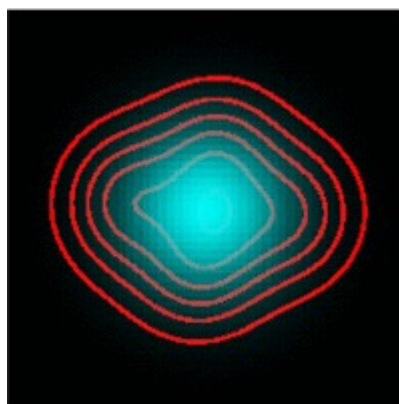


$\pi = +1$

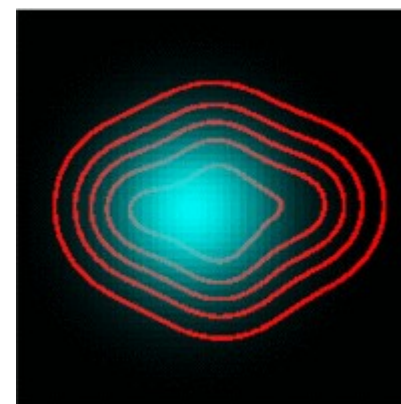
$^{28}_{\text{E}}\text{Mg}$



Intrinsic



$\pi = +1$



$\pi = -1$

標的とコアの変形・クラスター構造が異なる場合
→ 小さな有効核子数

コア核のクラスター構造が生成スペクトルに大きな影響を与える可能性あり！

ハイペロンを取り入れた超新星物質 EOS テーブル (1)

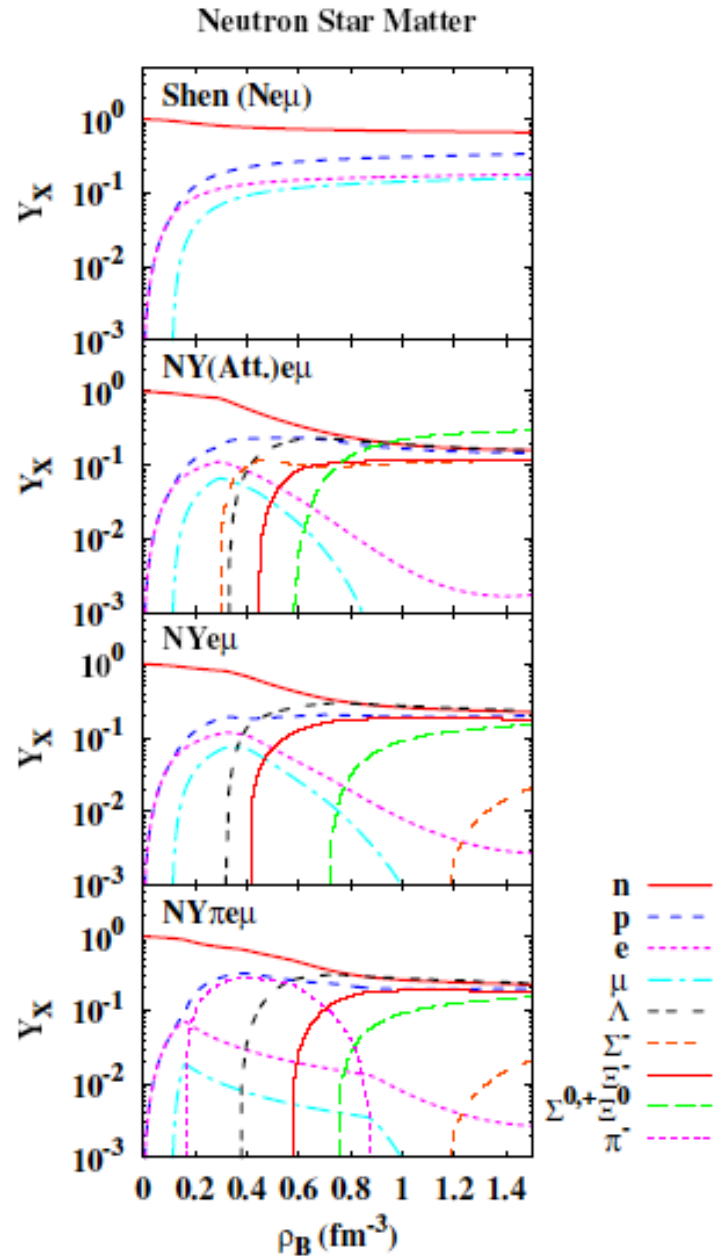
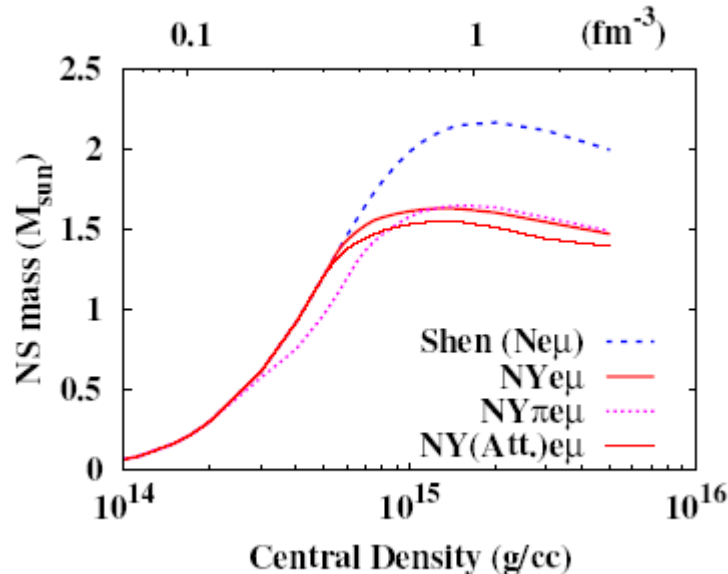
Ishizuka, AO, Sumiyoshi, Yamada, in preparation

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 Σ^- 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 Λ のポテンシャルで決まる



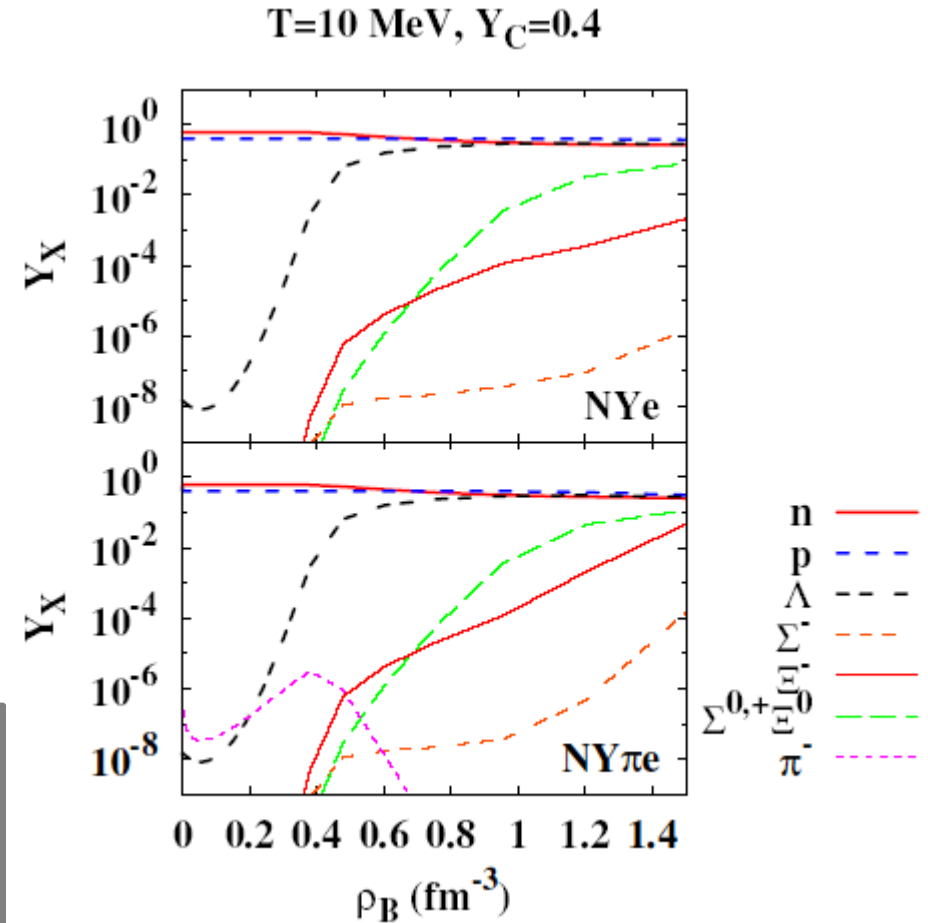
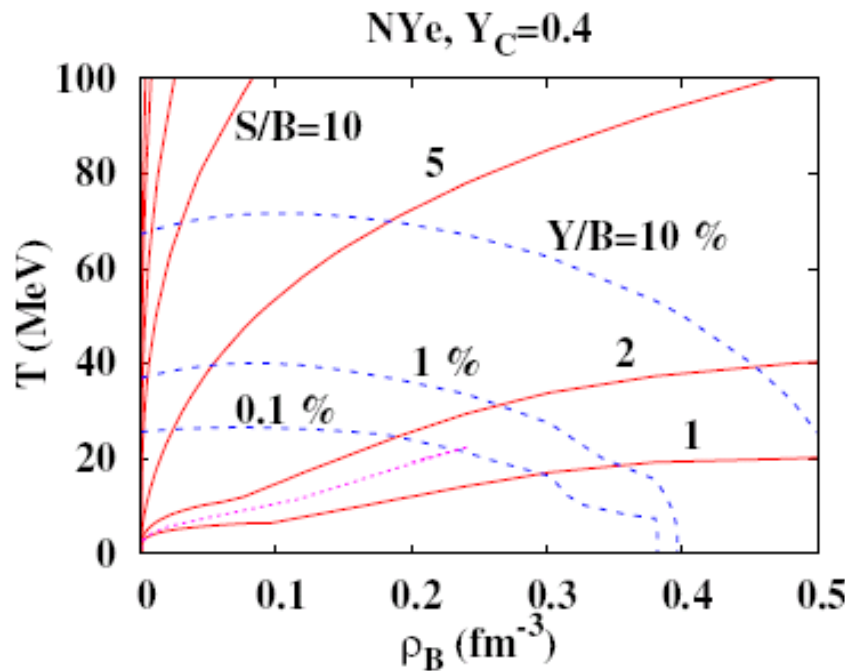
ハイペロンを取り入れた超新星物質 EOS テーブル (2)

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？
→ 住吉さんの学会発表



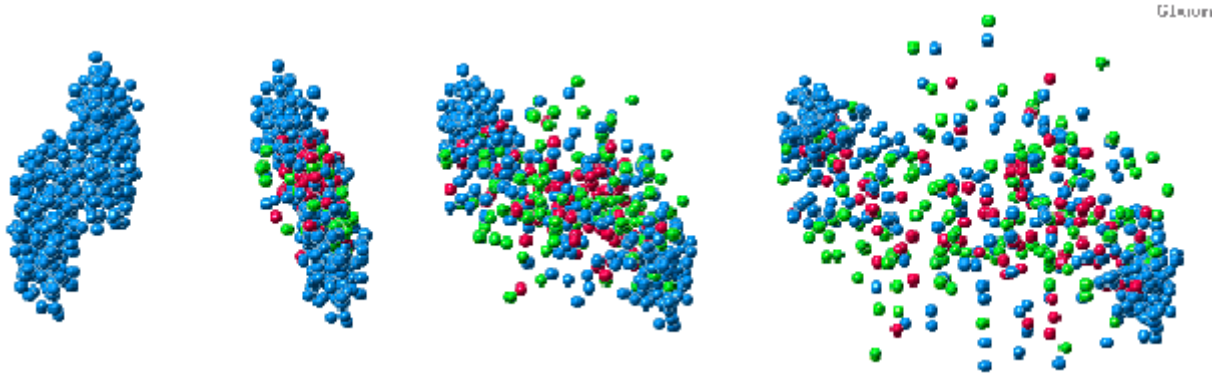
高エネルギー重イオン反応

様々な温度・密度のハドロン物質を実験室で調べる手段

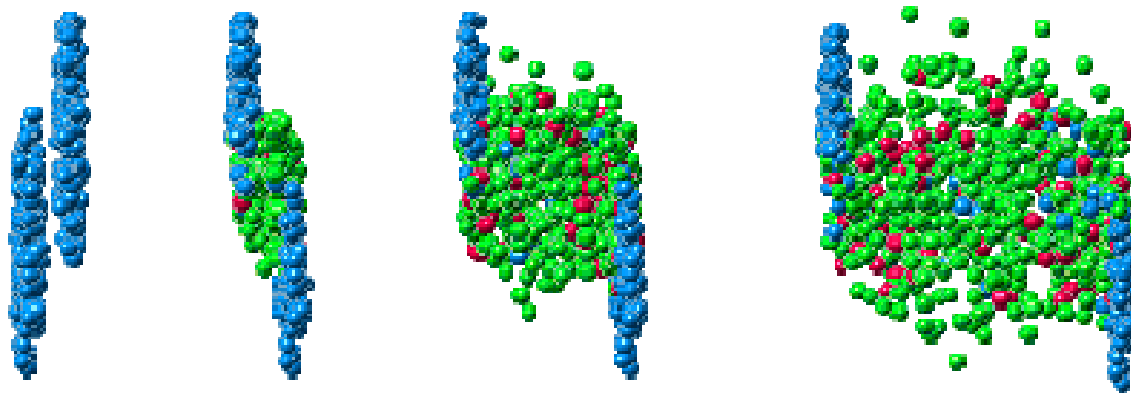
RHIC エネルギーでの重イオン反応

→ クォーク物質 (QGP) の性質を実験室で調べる

AGS



SPS



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



RHIC エネルギーでの High p_T ハドロン生成

RHIC での標準描像 = pQCD+E-loss+ 独立破砕

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

Jet Quenching 現象を通じて
「QGP 中でパートンがエネルギーを失う」
ことを解明

しかし
「低 p_T でのフロー」、「高 p_T でのフロー」、「高 p_T でのハドロン生成量」は同
時に理解できていない。

ハドロン化の機構 (独立破砕描像) が問題ではないか？



Jet-Fluid String Model

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

QGP 中でエネルギーを失ったパートンが
流体パートンとストリングを作り崩壊

低 p_T でのフローからの要請

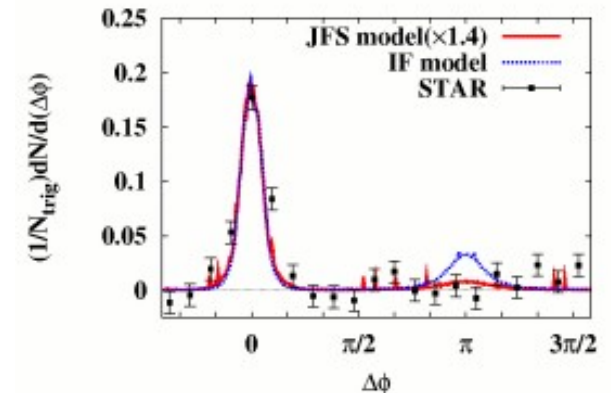
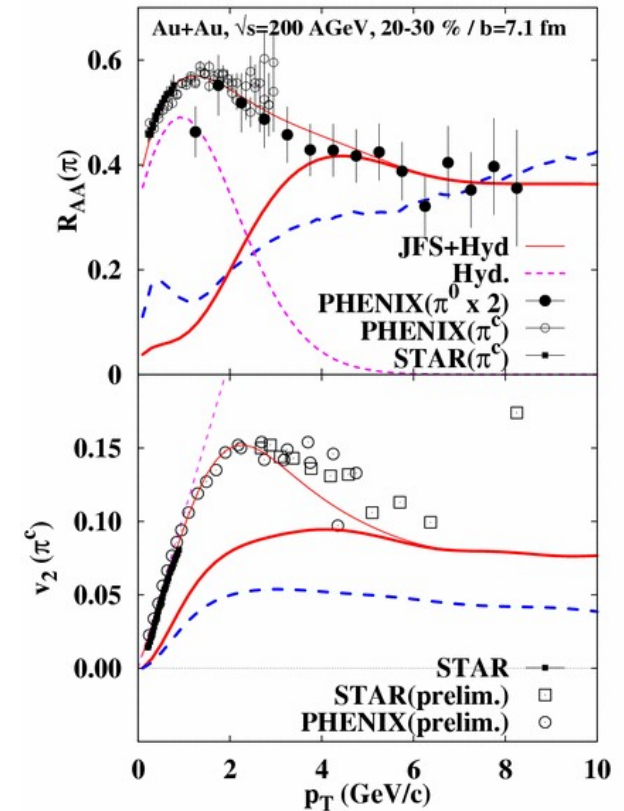
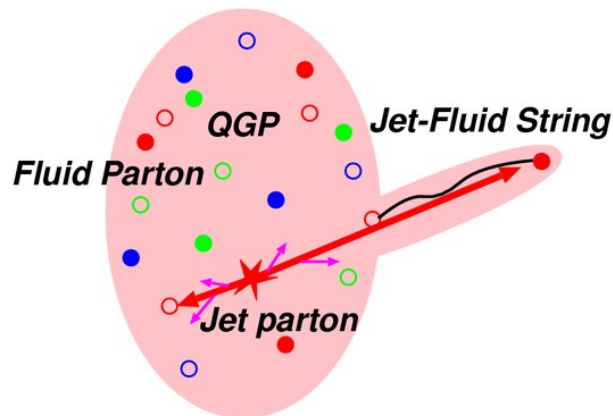
→ 3次元流体模型の結果を利用

(Hirano-Nara)

高 p_T でのハドロン生成量からの要請

→ 核-核衝突での生成量をエネルギー
損失率により fit

高 p_T でのフロー・ハドロン相関を説明



まとめ

クォーク・ハドロン物質の物理の展開

3階層(3累層)状態方程式 (Tri Hierarchical EOS, THE) 構築へ向け、
多方面からの研究を展開中

核物質、ハイパー核、クォーク、クラスター、重イオン

→ 玉垣、赤石、堀内、田中、加藤の「血」と「知」と「経験」に感謝！

原子核物理の基本的課題 (の一つ) 「QCD, 核力から原子核へ」

核力から出発する立場 (加藤) → 現象と比較して理論を磨く

現象論的な汎関数から出発する立場 (大西)

→ 現象と比較してパラメータ (結合定数、ポテンシャル) を決め、
その妥当性を問う and/or 他の現象に適用する

??? (Tenua Track の助教、1/2 の確率で12月ぐらいから着任)

→ 今後しばらくの研究室の「柱」を左右

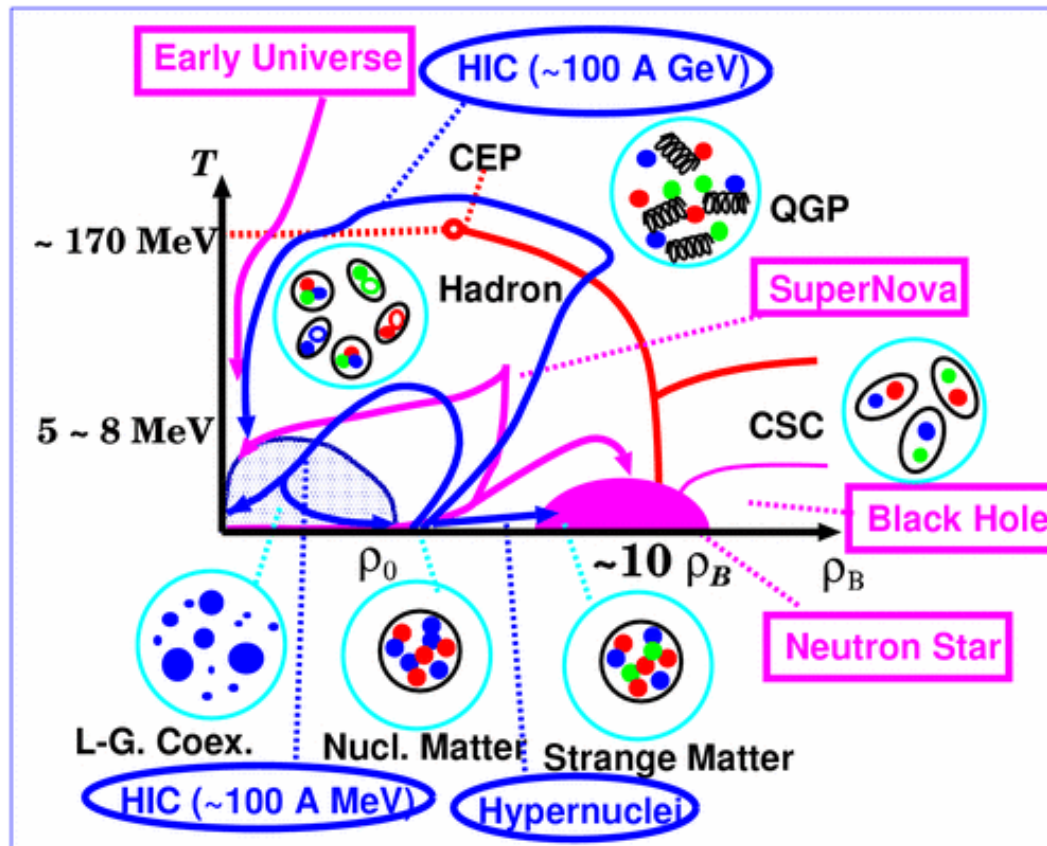
これからも、研究室への応援、よろしくお願いします。



backups



クォーク・ハドロン物質の物理



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

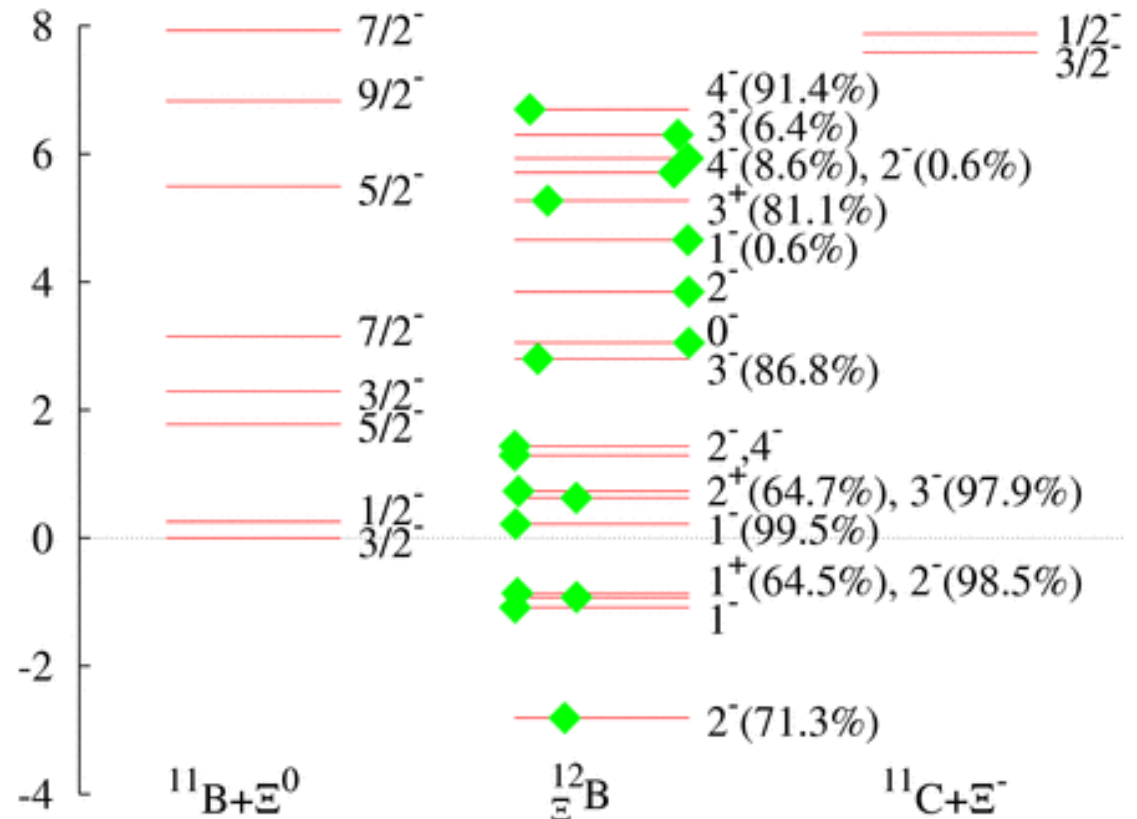
Level Structure: $^{12}_{\Xi}B$ (Coherent mixing ?)

$$^{12}C(K^-, K^0)^{12}_{\Xi}B, \quad ^{12}_{\Xi}B = (^{11}B + \Xi^0) + (^{11}C + \Xi^-)$$

(Mirror Core) $\otimes \Xi$, $T=0, 1 \rightarrow \Xi^0 : \Xi^- = 1:1$ without isospin breaking

Mass diff. ($M(\Xi^-) \sim M(\Xi^0) + 7 \text{ MeV}$) & Coulomb break isospin sym.

\rightarrow We need Charge base !



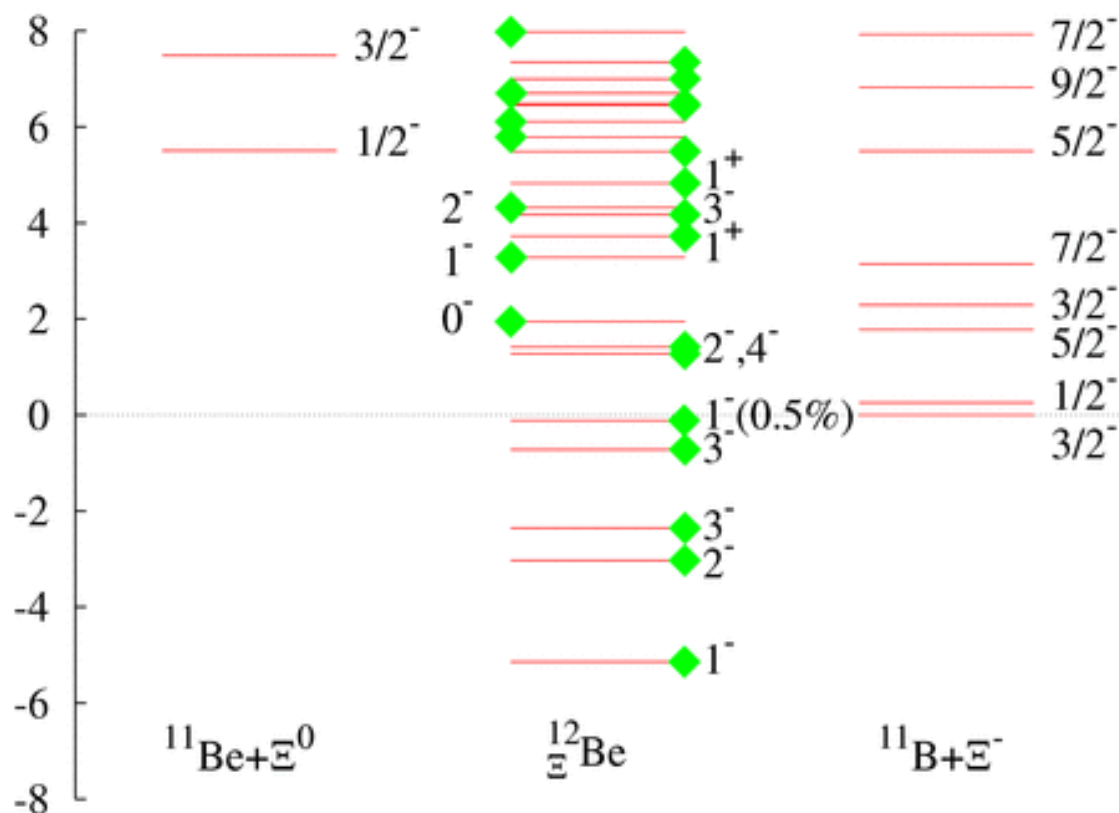
Level Structure: $^{12}_{\Xi}\text{Be}$ (Day-One Experiment Nucleus)

$$^{12}\text{C}(\text{K}^-, \text{K}^+) ^{12}_{\Xi}\text{Be}, \quad ^{12}_{\Xi}\text{Be} = ({}^{11}\text{Be}(\text{T}=3/2) + \Xi^0) + ({}^{11}\text{B}(\text{T}=1/2) + \Xi^-)$$

“Mass diff. of Core > Mass diff. of Ξ ” + “Core T diff.”

→ Almost No Coupling Effects

→ Single Channel (potential) description would be good enough !



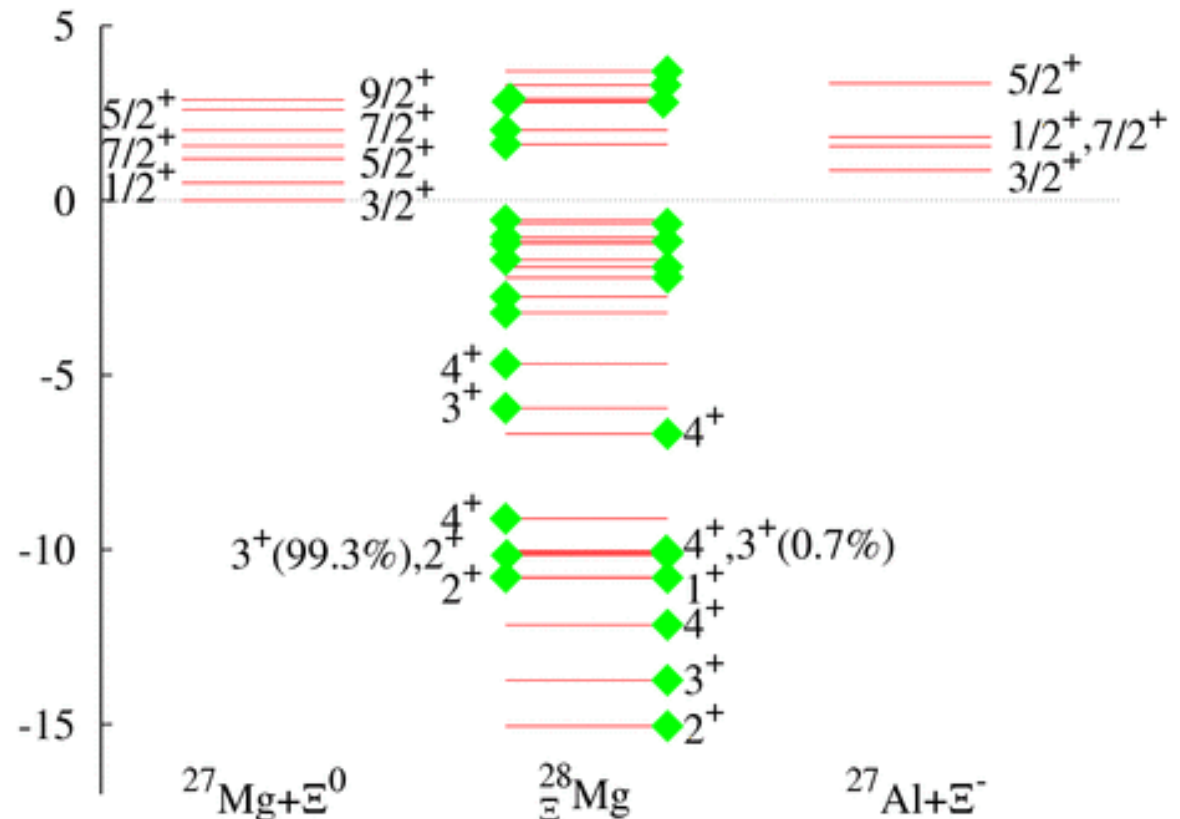
Level Structure: $^{28}_{\Xi}\text{Mg}$ (Day-Two Experiment ?)

$$^{28}\text{Si}(K^-,K^+)^{28}_{\Xi}\text{Mg}, \quad ^{28}_{\Xi}\text{Mg} = (^{27}\text{Mg}(T=3/2)+\Xi^0) + (^{27}\text{Al}(T=1/2)+\Xi^-)$$

“Masses of Core+ Ξ ” are Comparable, but Core T are different.

Almost no mixture of Ξ^- and Ξ^0 channels

→ Ξ^- states will be selectively populated in (K^-,K^+) reaction



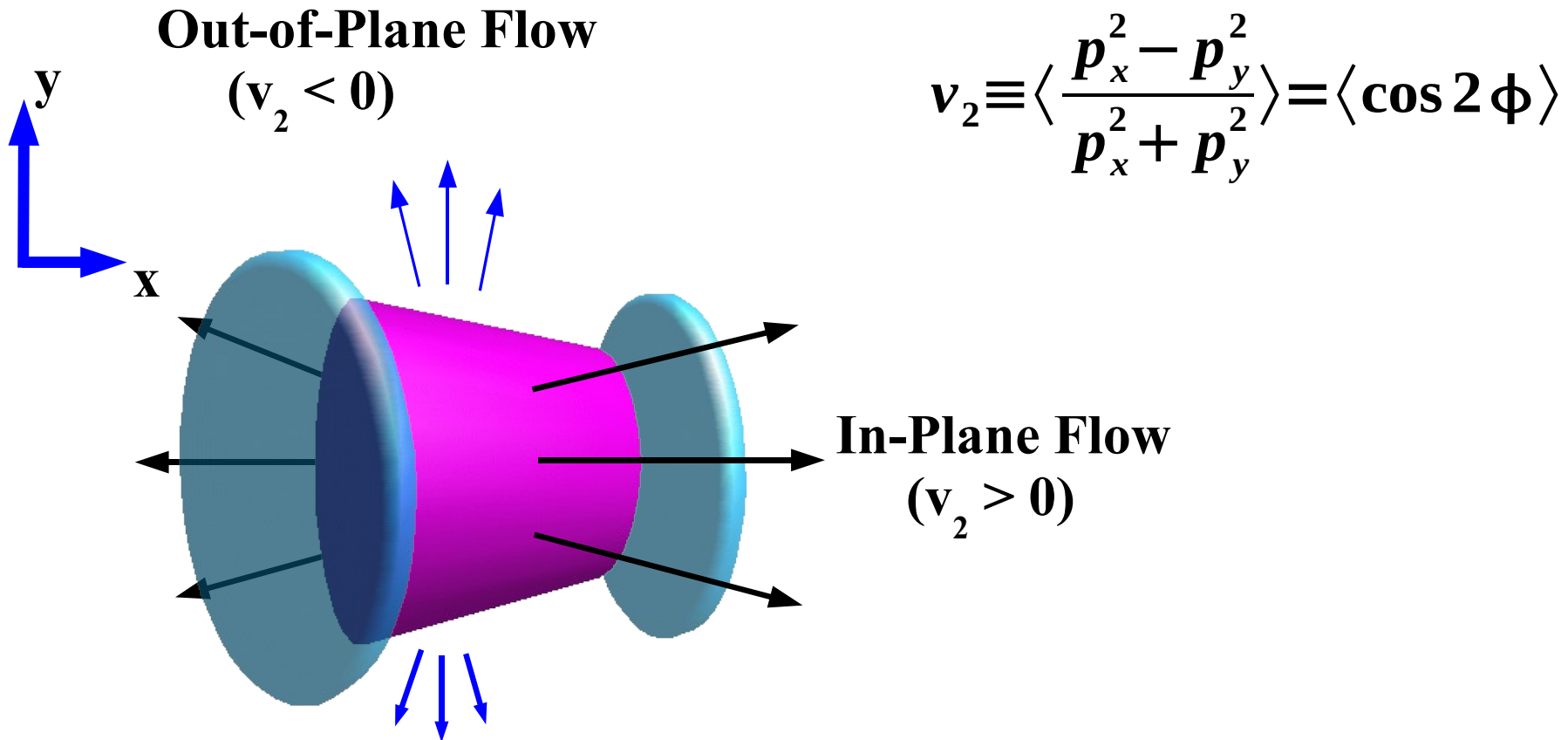
Elliptic Flow

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



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

ここでの平均場の取り入れ方 (RQMD/S) では、 v_2 は EOS に敏感でない。

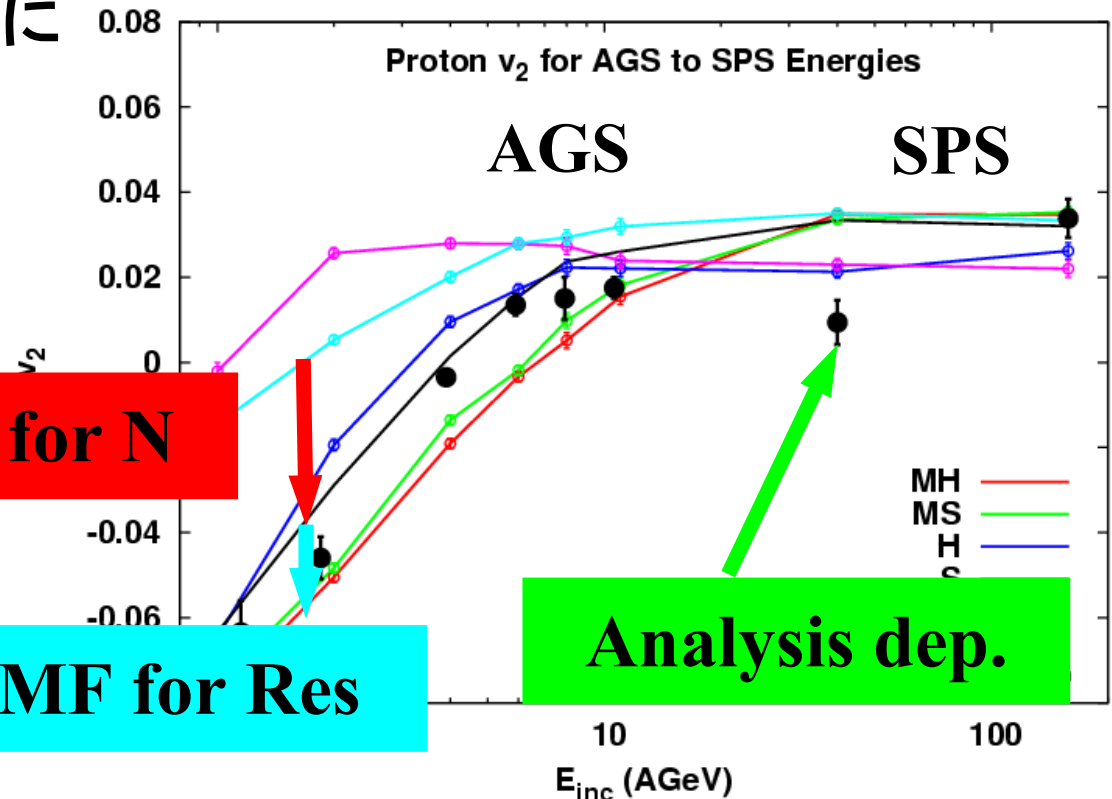
共鳴バリオンの不定性の範囲内にデータがある。

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.

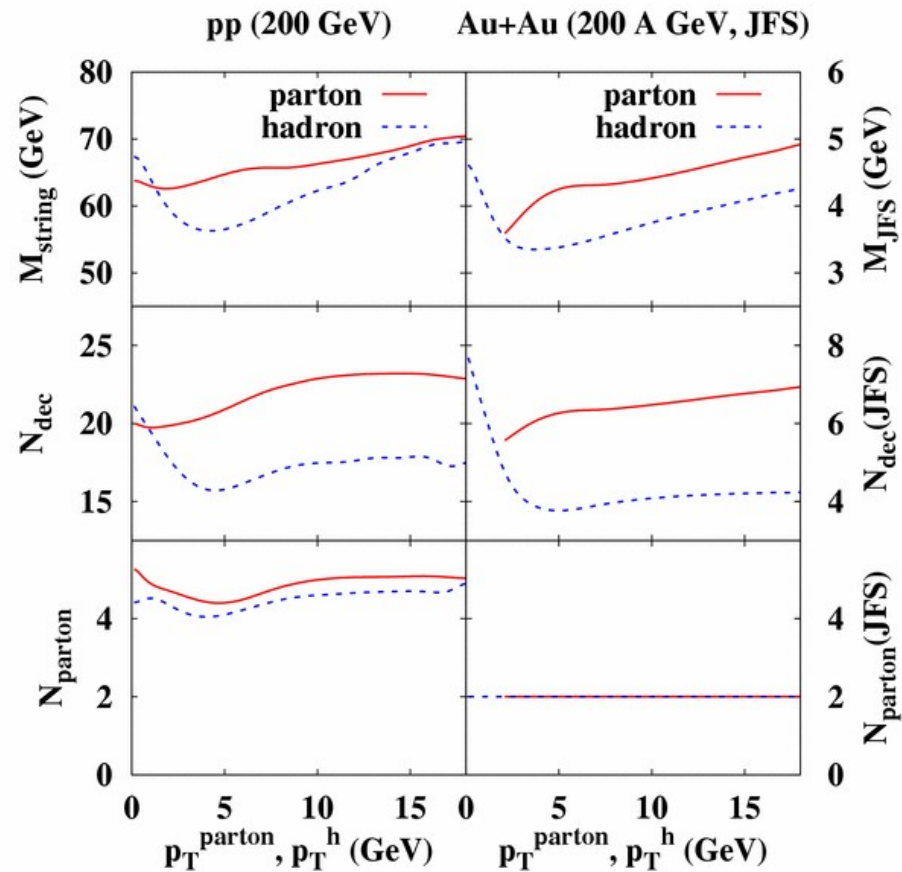
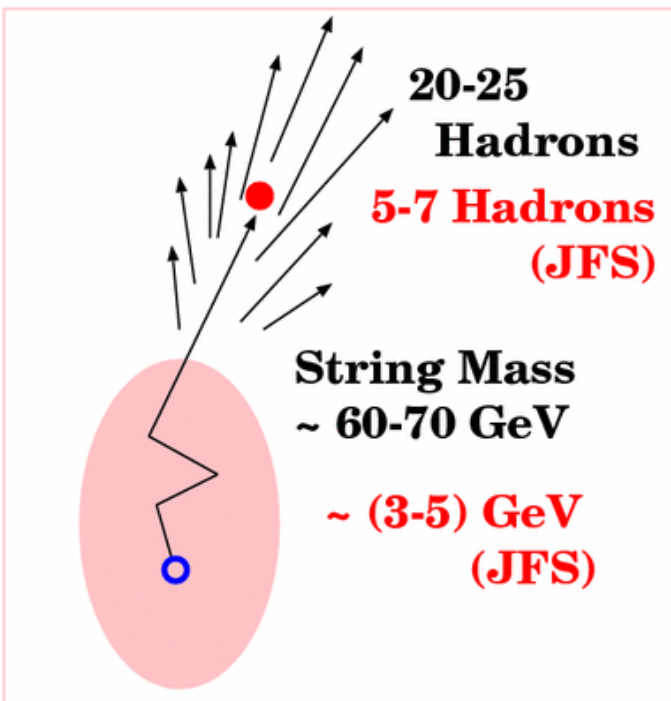


Comparison with Indep. Frag.

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 ?

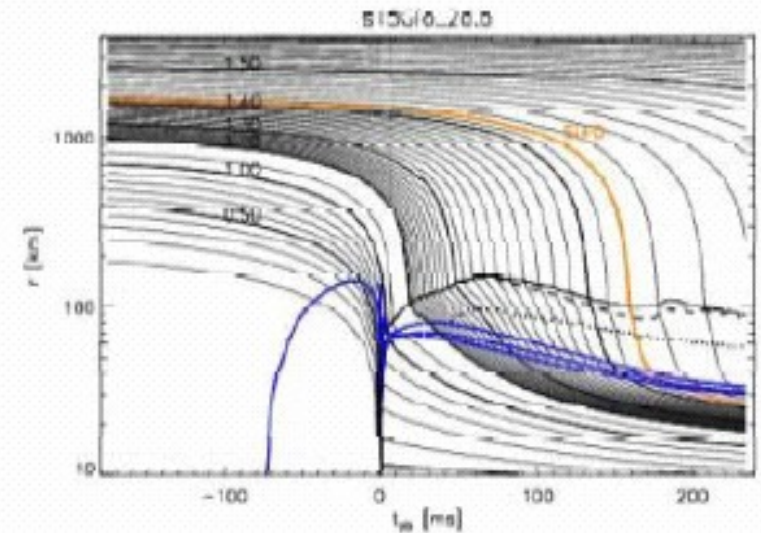
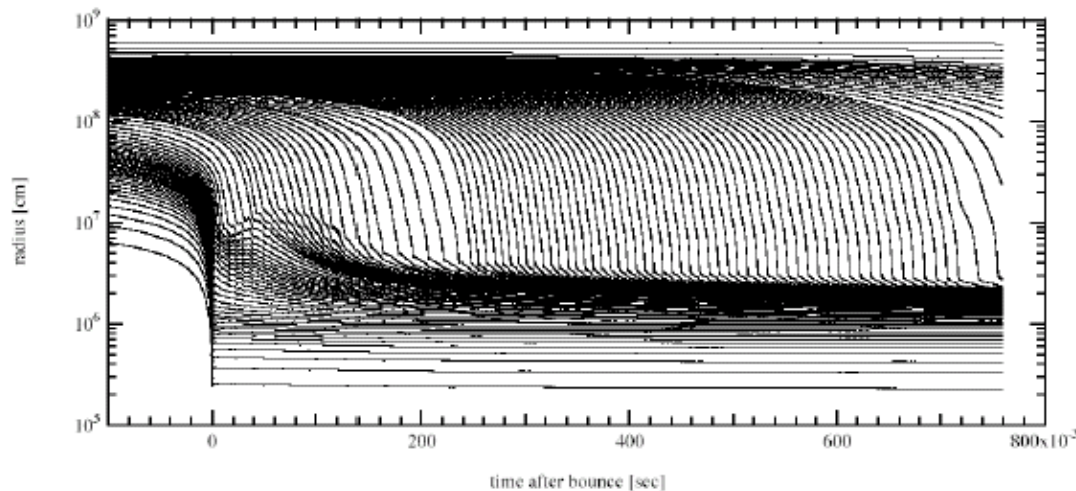
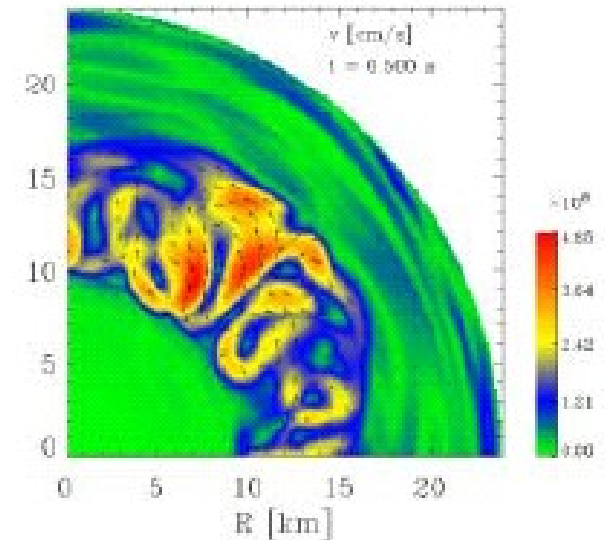
超新星爆発のシミュレーション

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)



(Janka et al., 2002)

Sumiyoshi et al., 2005

「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 → ν から流体へのエネルギー移行

状態方程式

柔らかさ (High ρ) → 重力エネルギーの解放量を決定

不均一性 (Low ρ) → 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)

