

---

# *Microscopic Phenomenology of Hadronic Matter Dynamics*

*Akira Ohnishi*

*Hokkaido University, Sapporo 060, Japan*

- **Introduction**
- **Hypernuclear Physics**
- **Heavy-Ion Collisions**
- **Spectroscopic study by using AMD**
- **Nuclear Matter EOS for Astrophysics**
- **Strong Coupling Lattice QCD**
- **Summary**

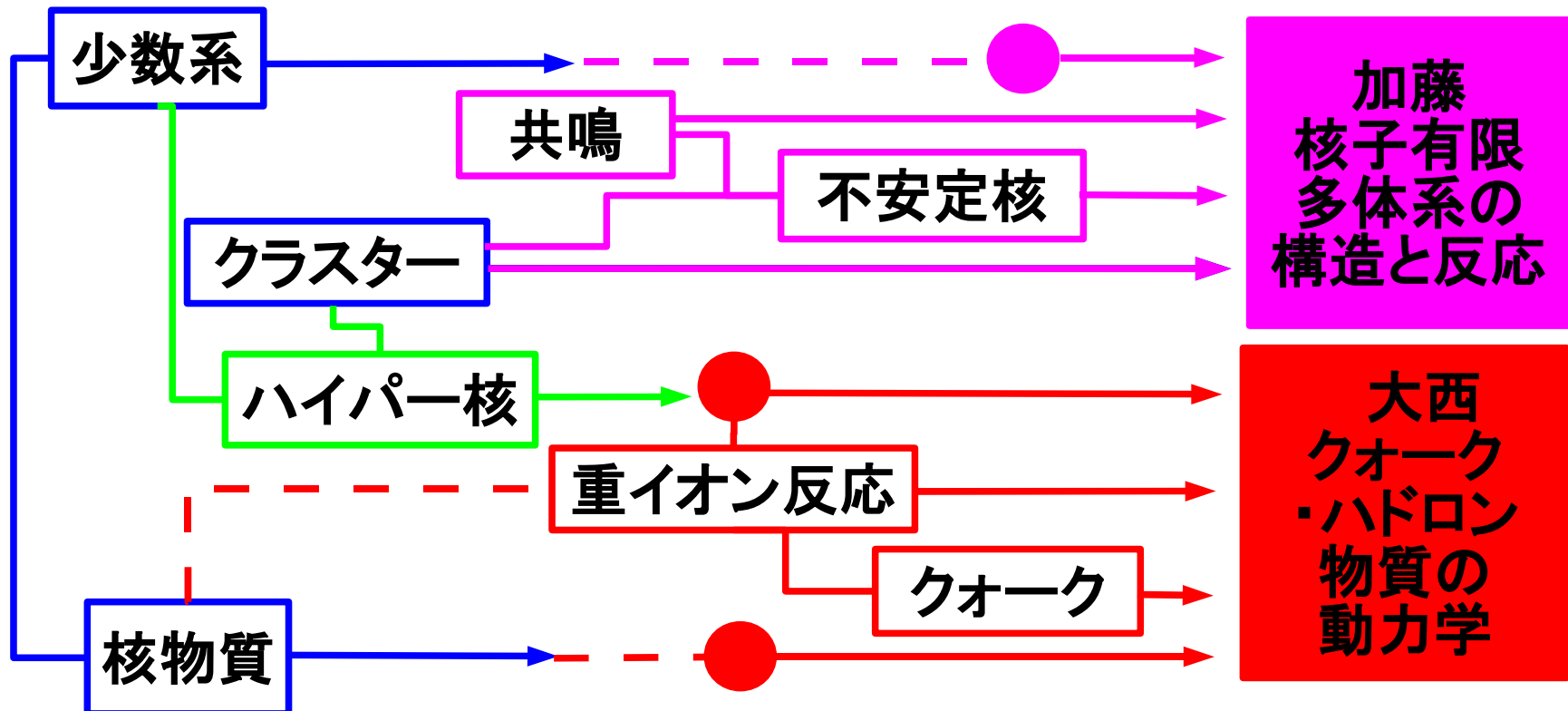
---

# *Introduction*

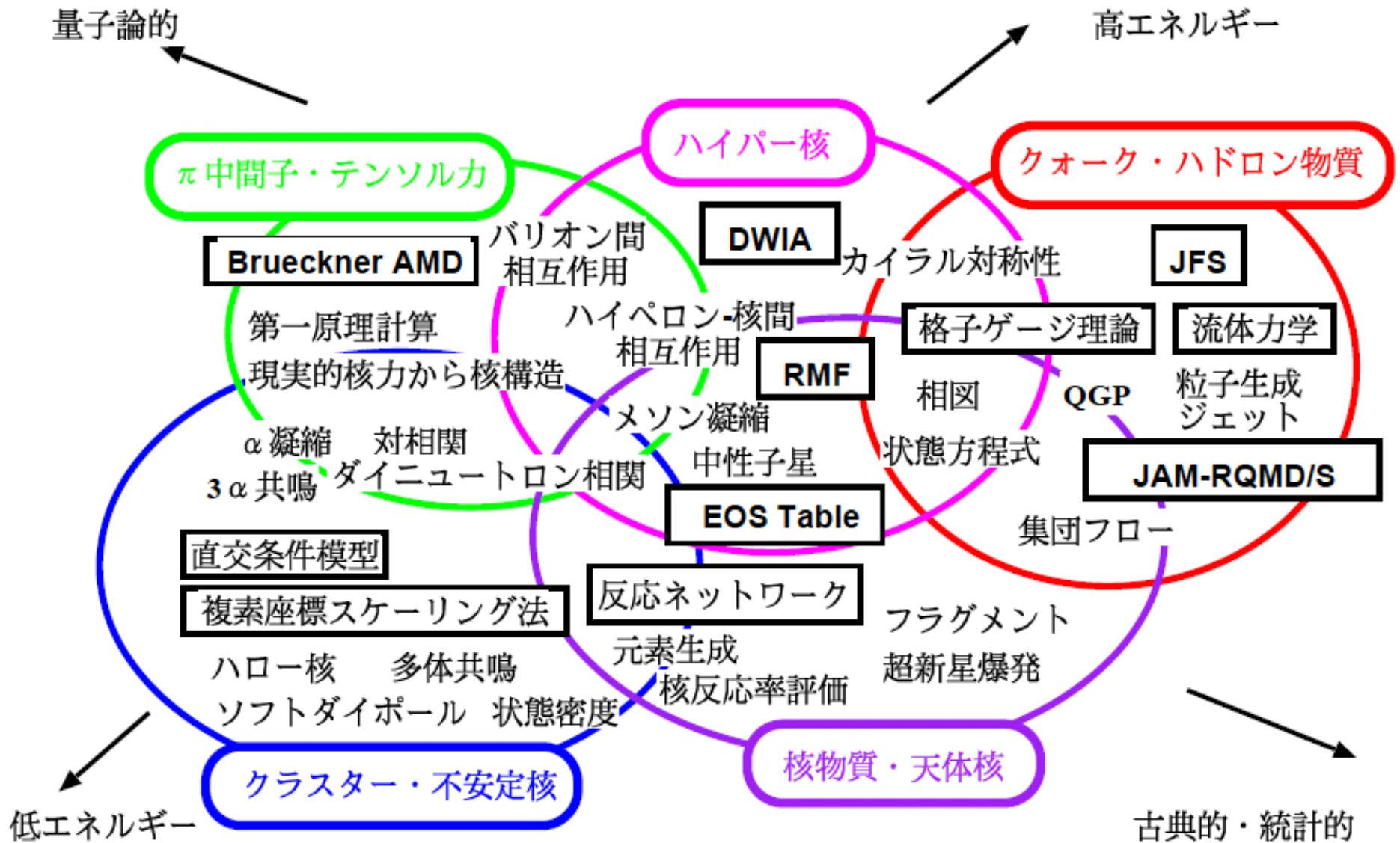
# 北大原子核理論研究室での研究の柱

## ■ 2本(以上)の柱

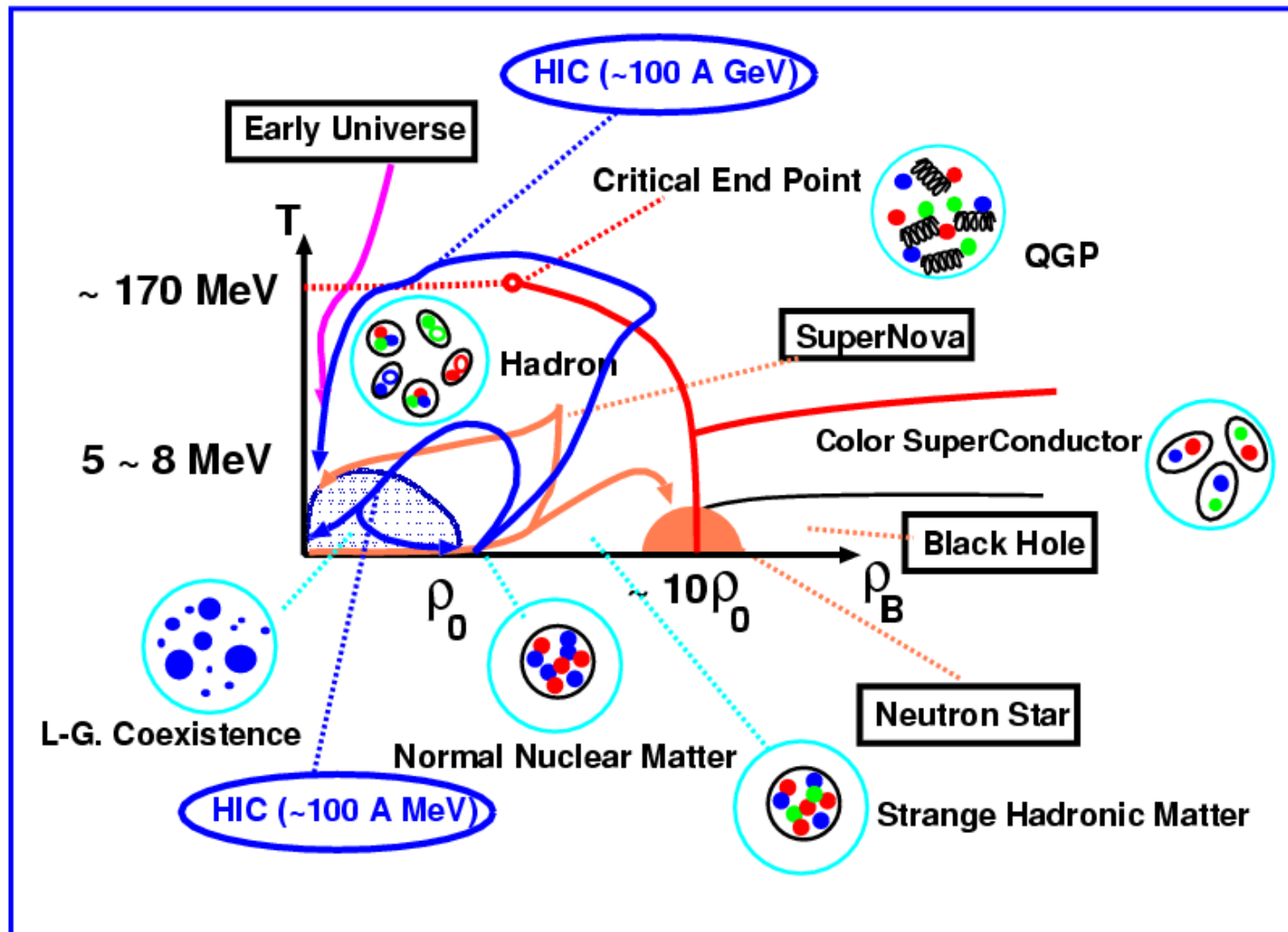
- 「少数系」と「クラスター」  
〜「積み重ねる理論」と「現象論」
- 「核子多体系」と「クォーク・ハドロン物質」  
〜「核力から原子核」と「密度汎関数から核力へ」
- 現象との比較はいずれにしても必要



# 研究室での研究課題(2006 年度年次報告より)



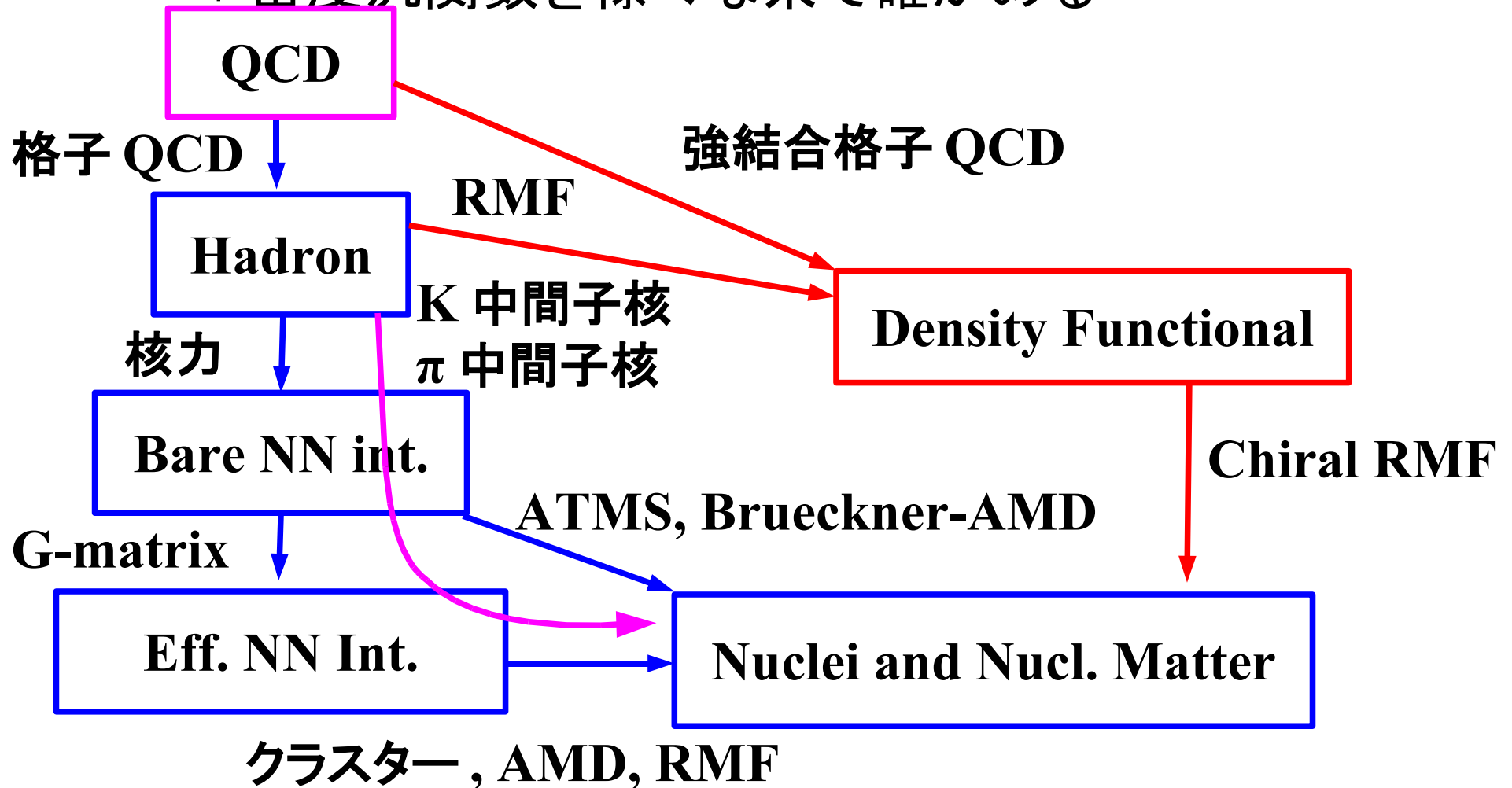
# Quark / Hadron / Nuclear Matter Phase Diagram



*How much can we understand from Lab. Experiments ?*

# 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



---

# *Hypernuclear Physics*

# Hypernuclear Physics (1): Hyperfragments

## ■ 事始め (1993)

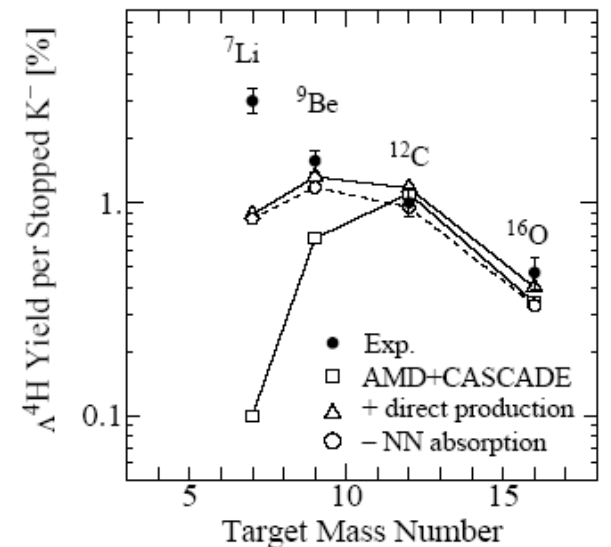
- 大西「AMD で押したい」
- 奈良「軽い核で特徴を出すには  
ハイパー核をやるしかないですよ」  
(裏で原田さんが糸をひいていた?)

## ■ Hyperfragment formation from stopped $K^-$

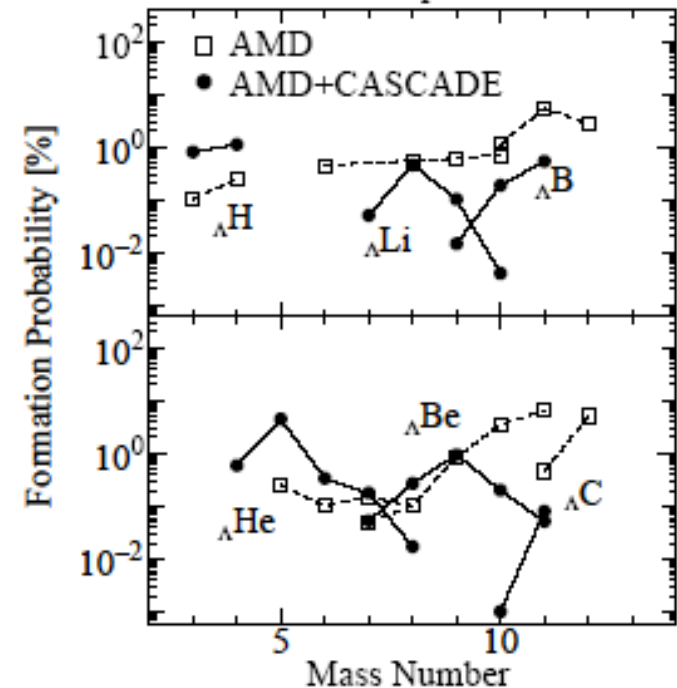
Nara, AO, Harada, 1995

- AMD をハイパー核に適用した初めての仕事
- 奈良君の修論、  
河内さん (東大→宇宙線研) の D 論
- 「AMD+ 統計崩壊」に「直接生成」を取り入れて、  
反応機構の標的核依存性を議論
- ${}^5_{\Lambda}\text{He}$  の生成率を書いておくと、後から田村さんが  
測定してくれた。
- 実は  $\pi$  のスペクトルは出ていなかった。  
→ ( $K^-, K^+$ ),  $\Lambda(1405)$  の仕事へ。

Target Dependence of  $\Lambda^4\text{H}$  Formation



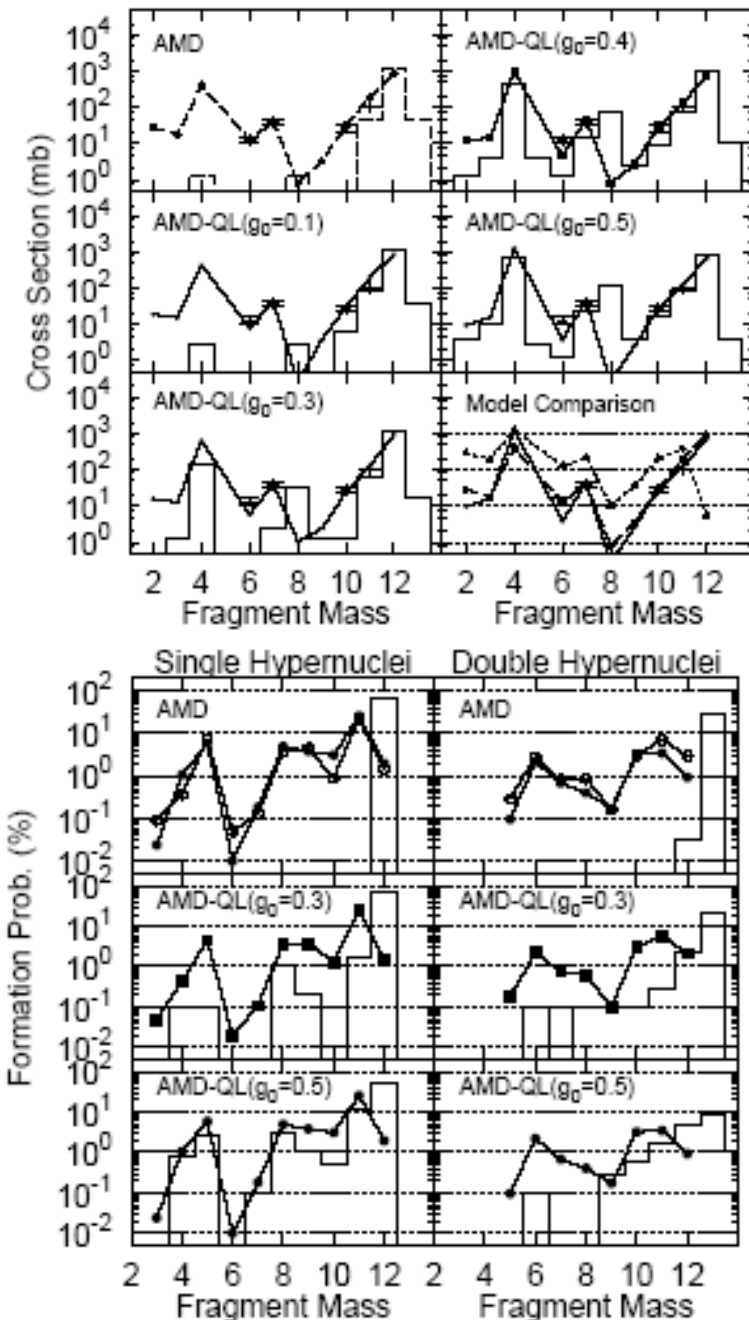
Hyperfragment Isotope Distribution from  $K^-$  Absorption on  ${}^{12}\text{C}$





# Hypernuclear Physics (2): Double Hypernuclei

- Double  $\Lambda$  nucl. form. from stopped  $\Xi^-$   
Hirata, Nara, AO, Harada, Randrup, 1999
  - Randrup との Quantum Langevin model を使ってダブルハイパー核生成へ
  - p-A 反応での動的なフラグメント生成断面積、静止  $\Xi^-$  吸収からのシングル、ダブル、ツインハイパー核生成確率をほぼ説明。
  - 堀内、小野との論争 (Ono, Randrup paper で手打ち?)
  - 山田、池田との論争 → Direct or Compound?
  - J-PARC 実験へ向けて鉄標的で再計算が必要? (谷田)
- 長く続いている戦争の最前線に若い院生を送り込むべからず!

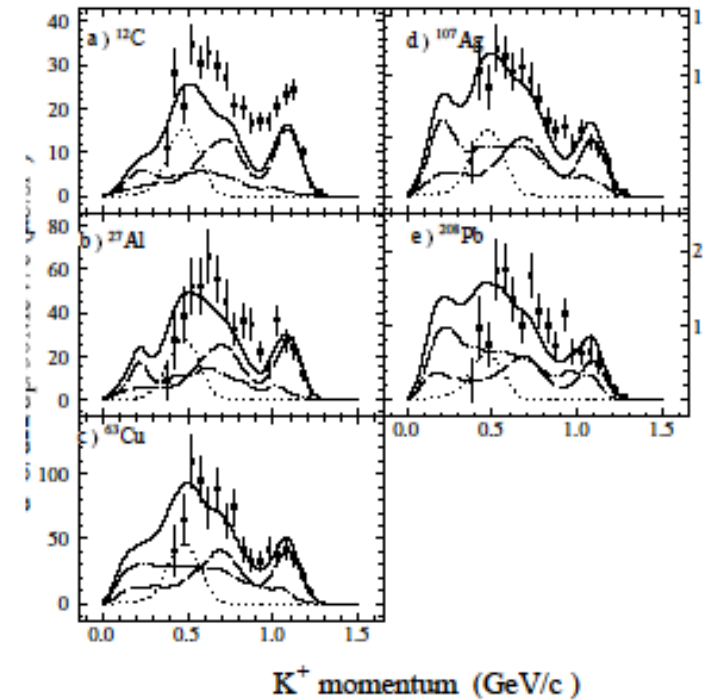


# Hypernuclear Physics (3): Meson Spectra

## ■ (K<sup>-</sup>,K<sup>+</sup>) reactions

Nara, AO, Harada, Engel, 1997

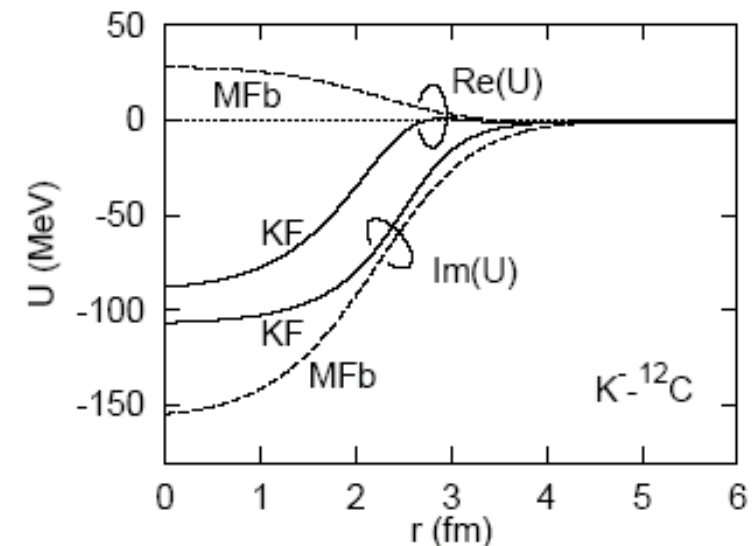
- Hyper 核生成中間子スペクトルに輸送模型 (カスケード) を適用した最初の例。
- 後から (K<sup>-</sup>,K<sup>+</sup>YY) として、2 step 断面積を Ahn さんが測った。
- Ahn(京大→韓国), 玉川(東大→宇宙線研) の D 論へ。



## ■ $\Lambda(1405)$ and (K<sup>-</sup><sub>stopped</sub>, $\pi$ ) spectrum

AO, Nara, Koch, 1997

- 核内で  $\Lambda(1405)$  が Res. となり、K<sup>-</sup> 核の 80 MeV 程度の強い引力を生み出す → 深い束縛状態だが幅は広い
- なぜ「束縛状態」との発想が出てこなかったのか？



# Hypernuclear Physics (4): QF Hyperon Prod.

## Green's function 法を用いた Hyperon 生成スペクトルの研究

Maekawa, Tsubakihara, AO, 2007

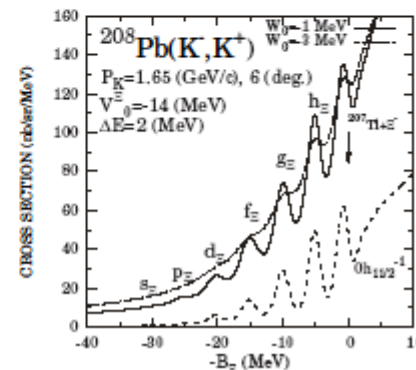
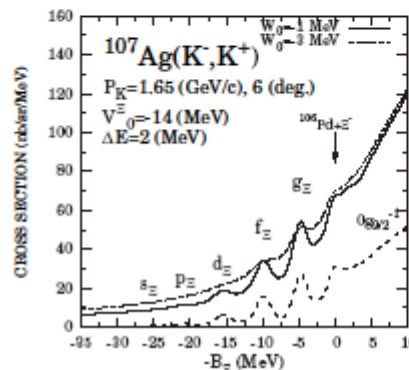
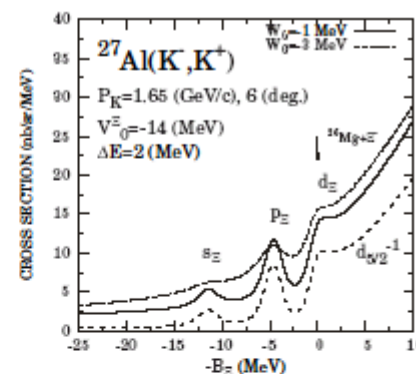
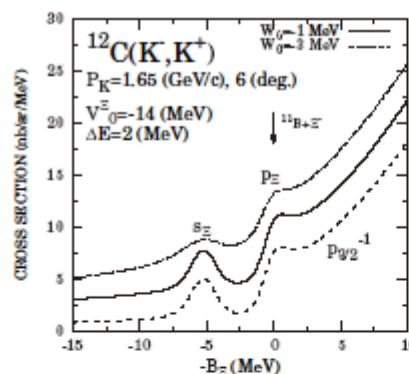
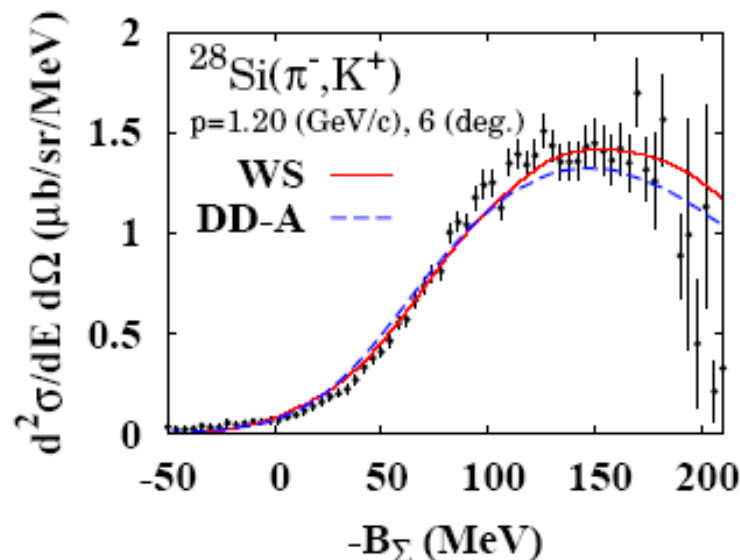
Maekawa, Tsubakihara, Matsumiya, AO, 2007

- $\Sigma^-$  核の強い斥力ポテンシャルの指摘 (野海)  
→ 本当か？

- 「量子論」での反応における私の最初の仕事 (前川君、苦勞かけました。)  
ただし、アイデアは古典論から。

- 原田 - 平林、河野 et al., 橋本 et al. との競争！

## 競争は、まずは「早いもの勝ち」



# Hypernuclear Physics (5): Chiral RMF

## ■ Chiral RMF study of hypernuclei

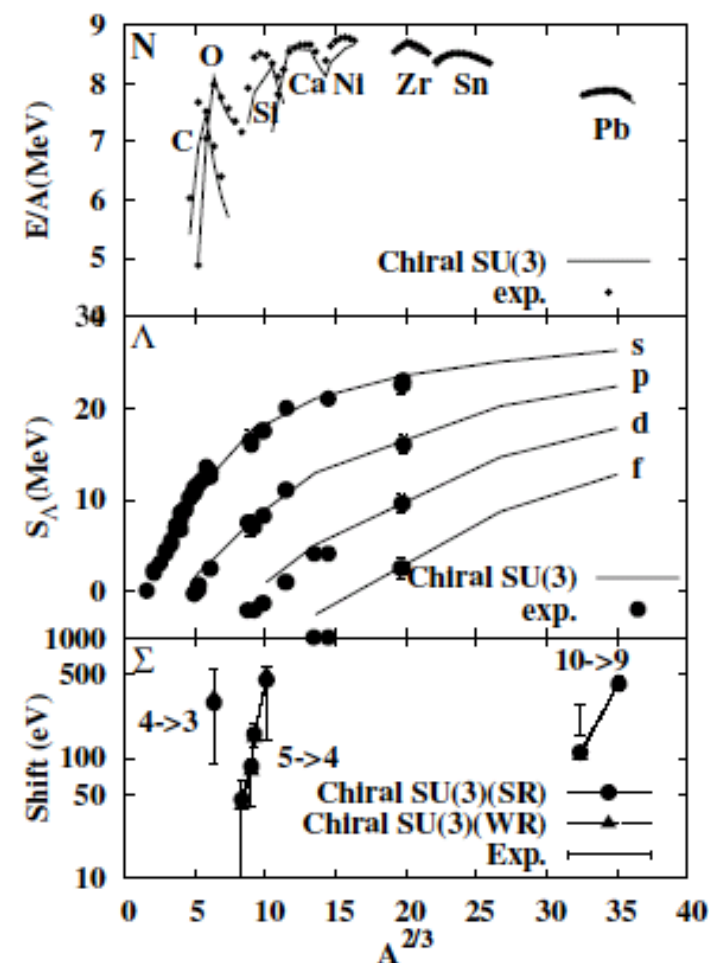
Tsubakihara, AO, 2007

Tsubakihara, et al., 2008

- 強結合極限格子 QCD から得た Effective potential (自由エネルギー密度) を取り入れた RMF
- QCD から出発して、これまでの Chiral RMF の欠点を全て取り去る
- 中性子星に適用すると ....

## ■ よい仕事の起源 (?)

- 基本的な部分から出発する突き詰めた仕事
- 独自の「持ち物」を使い込む仕事
- 「輸入品」の適用と改善
- 「輸入品」と「持ち物」の融合

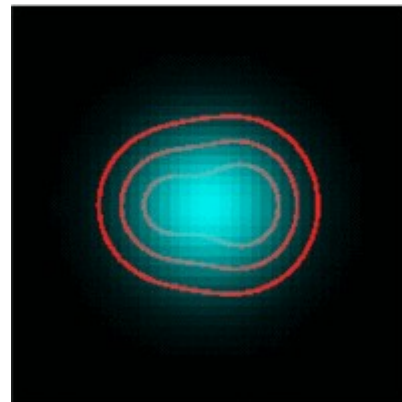


# Hypernuclear Physics (6): Coupled Chanel AMD

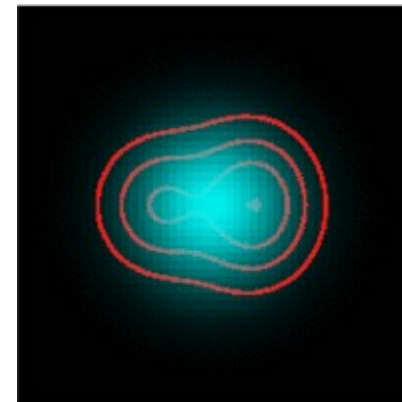
## ■ Coupled Channel AMD study of $\Xi$ hypernuclei

Matsumiya et al., in preparation

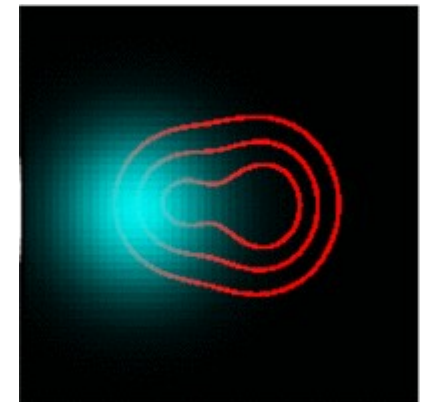
- AMD with  $\pi$  の仕事を進める上で準備していた枠組みの適用
- $\Xi$  を核内に入れると形が大きく変わる？  
→  $\Lambda$  で形が変わらないとして記述できていたのは  $\pi$  交換が無いための偶然か？
- 今後、突き詰めていく仕事が必要。



Intrinsic



$\pi = -1$



$\pi = +1$

---

# *Heavy-Ion Collisions*

# *Heavy-Ion Collisions (1): Fragmentation*

---

## ■ 事始め (1988)

- 大西 「将来 QGP の研究をしたいのですが、輸送模型を知っておく必要がありますよね。」
- 堀内 「ははは、そうですね。やりましょう。」

## ■ 事始めの続き (1993)

- Randrup 「AMD の運動方程式は古典的だから、統計も古典統計になるはずだ。」
- 大西 「そのまま計算したらそうなるんだけど、それだけだと日本に帰れない。なんとか量子統計にする方法を見つけるぞ！」

# Heavy-Ion Collisions (2): Fragmentation

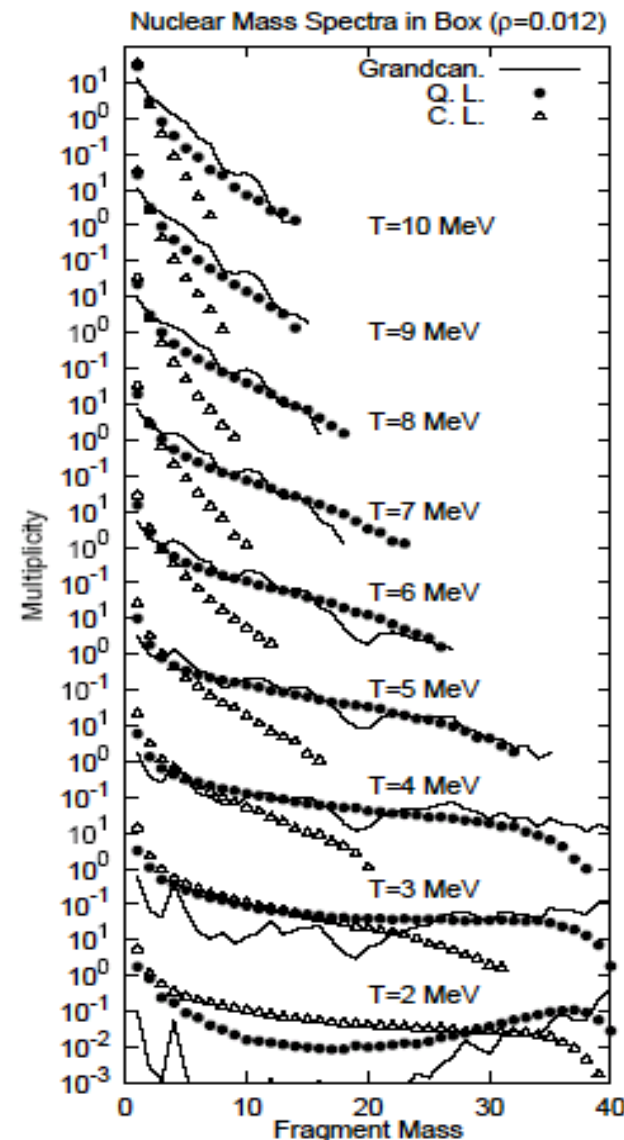
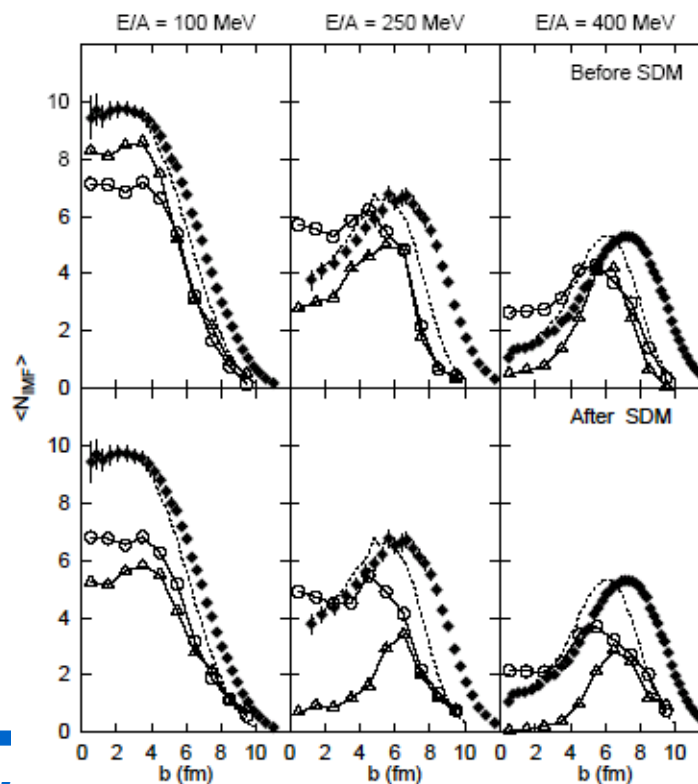
## Wave packet statistics and dynamics

AO, Randrup, 1993, 1995, 1997abc

- 波束がエネルギーの揺らぎをもつことを利用した「波束の統計力学」→ 波束中心の遥動・散逸模型
- 波束の量子論的な統計平衡へ向かう動力学 → 量子ランジュバン法

## フラグメント生成が「統計的」か、「動力的」かを一つの枠組で議論可能に！

- Ono-Horiuchi, Schnack-Feldmeier との論争





# Heavy-Ion Collisions (3): JAM

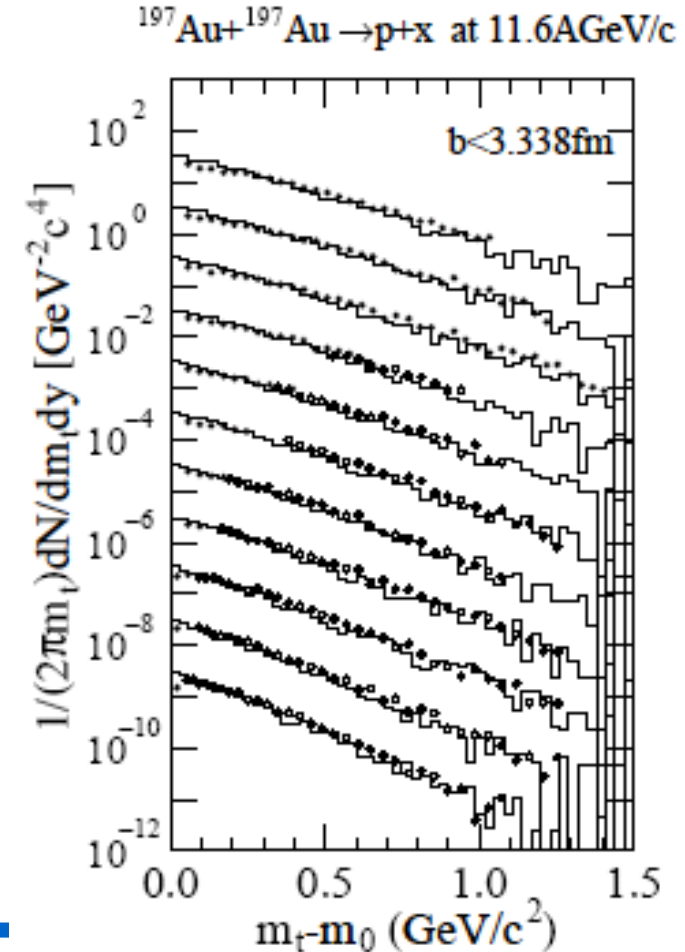
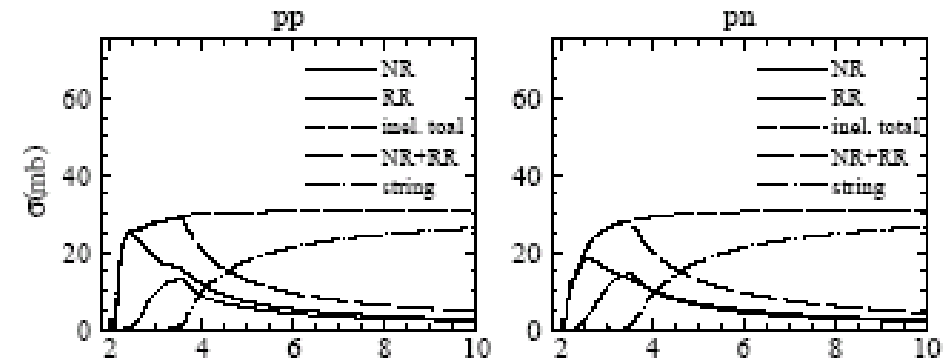
## ■ Jet AA Multiple scattering model

Nara, Otuka, AO, Niita, Chiba, 2000

- Resonance, String, Parton(Jet) 生成を取り入れた輸送模型
- hh, pA, AA 衝突を一つの枠組みで記述可能
- Referee から「他の輸送模型も、これだけ完全にチェックして欲しいものだ」とお褒めの言葉。
- 比較的多くの citation !

## ■ 良かった点と反省点

- 蓄積 (Hyper 核研究での MB 断面積、低いエネルギーでの BB 断面積の評価) + 技術(仁井田、奈良) + 激励 (Stoecker)
- フローなどもすぐに調べるべきだったなあ。



# Heavy-Ion Collisions (4): RBUU

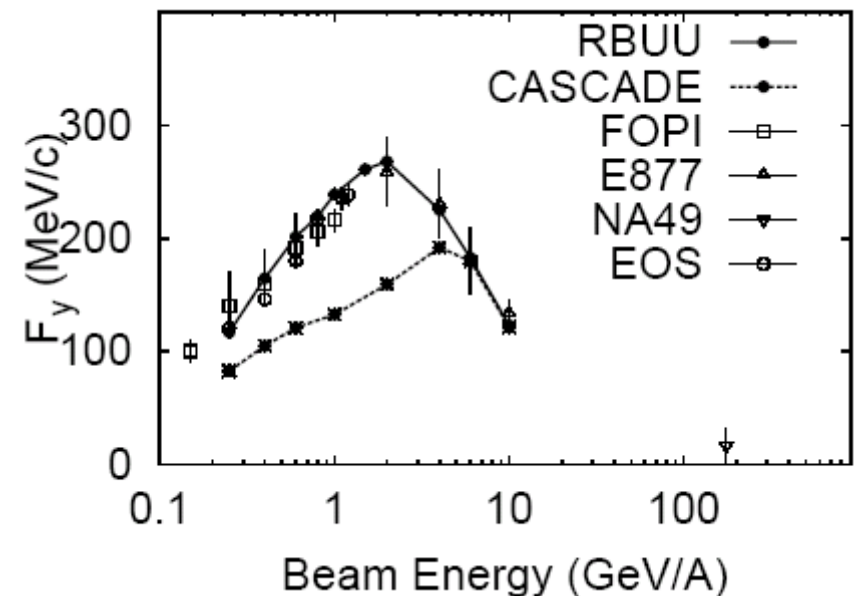
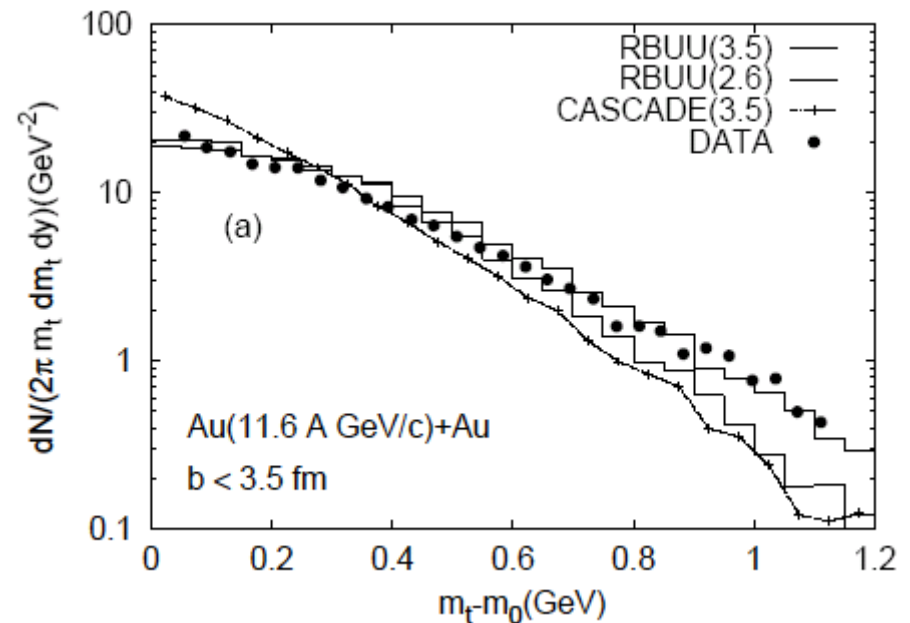
## ■ Relativistic BUU

Sahu, Cassing, Mosel, AO, 2000

- Sahu (学振), Giessen グループとの共同研究
- Mean Field + Hadron 自由度の調整  
→  $M_T$  spectrum と Flow の再現

## ■ 良かった点、残念だった点

- 高エネルギーでの(非等方)フロー研究の(私の)出発点
- 北大でのアイデア(Hadron 自由度)と Giessen program (RBUU) により、初めて AGS でのフローを理解
- Sahu 「Collision term (HSD 部分) は 門外不出で、高エネルギーへの拡張部分で間違っているので、SPS へは進めない。」  
→ JAM + MF へ

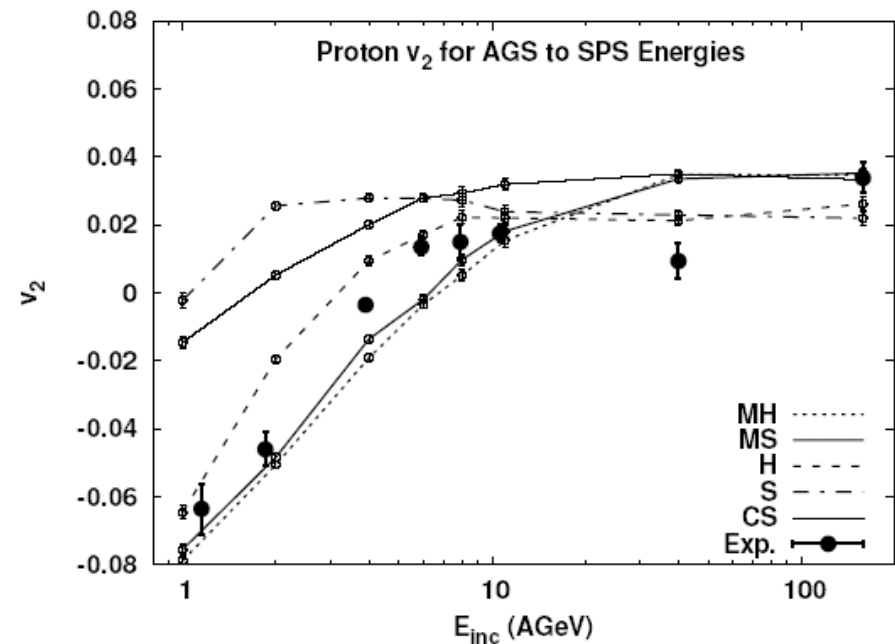


# Heavy-Ion Collisions (5): JAM+MF

- RBUU での仕事 (Sahu et al., 2000)  
→ Medium EOS を用いた RBUU でフローが説明できる  
≠ EOS は Medium ( $K \sim 300$  MeV) である
- Collective Flows at 1-158 A GeV Energies  
in JAM + MF(RQMD/S)

Isse, AO, Otuka, Sahu, Nara, 2000

- 一瀬君の M1 からの仕事  
(長かった！と一瀬君は文句たらたら)
- 高エネルギー重イオンでのフロー  
(SPS まで)  
= Collision term + Nucleon MF  
+ Resonance (String) MF
- プログラミングでの大間違い！  
(大西が書いた3体崩壊部分)  
→ 再投稿時に全て再計算

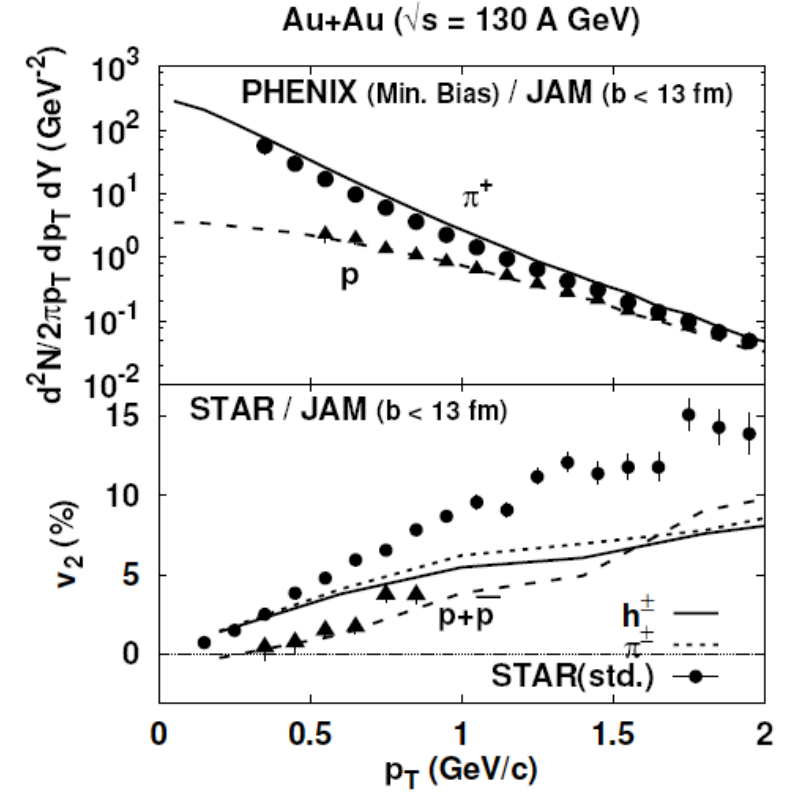
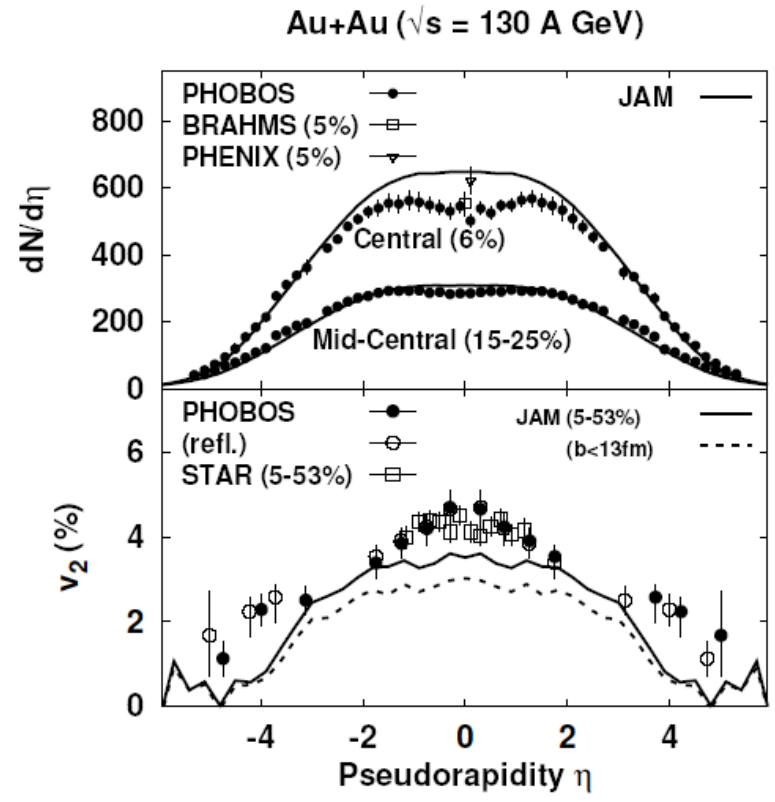


# Heavy-Ion Collisions (6): Hadron Cascade @ RHIC

## Application of JAM to RHIC Energy HIC

Sahu, AO, Isse, Otuka, Phatak, 2006; Isse, Thesis, 2006

- JAM を RHIC に使った論文は 2000 年から投稿したが、「Hadron Cascade である程度うまくいく」と書くと絶対通らない。
- あきらめて「低い  $p_T$  領域しか説明できない」と筋を変えて論文を通す。(敗北、方針転換へ。)

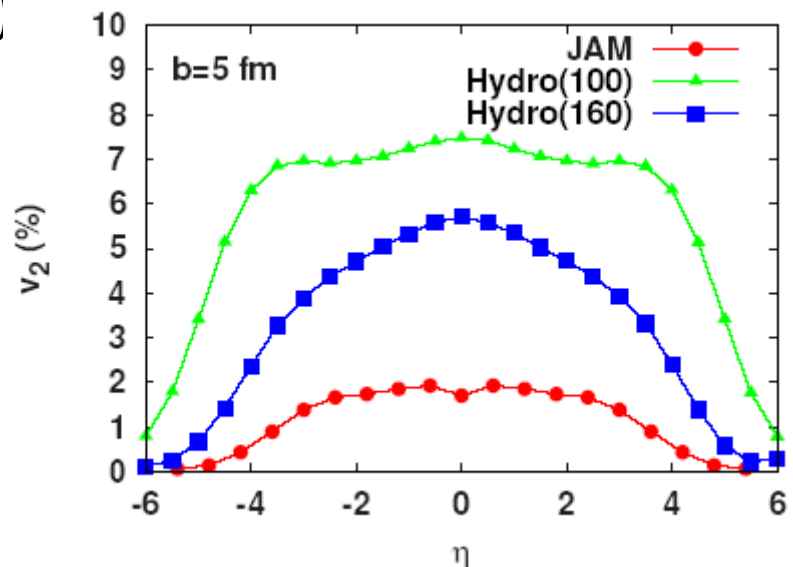
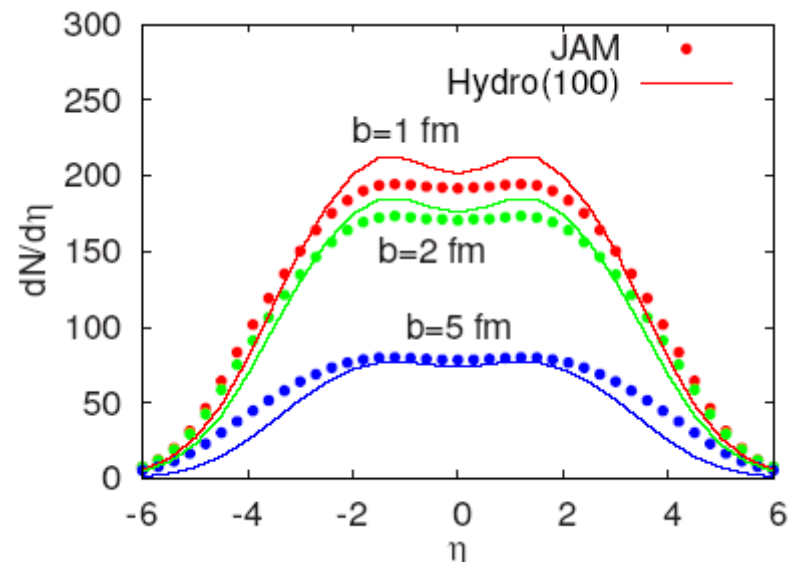


# Heavy-Ion Collisions (7): Hydro vs. Cascade

- RHIC の Au+Au だと Hadron Cascade はだめ。  
→ Cu+Cu では？
- Comparison of Hydro and JAM for Cu+Cu collisions at RHIC energy

Hirano, Isse, Nara, AO, Yoshino, 2005

- データが出る前に投稿！（実質1ヶ月の仕事）
- $dN/d\eta$  は2つのモデルでほぼ同じだが、 $v_2$  は大きく異なる。
- PHOBOS データは Hydro を支持  
→ Cu+Cu でも Hydro の勝ち
- 仕事の途中で平野さんが freeze-out  $T$  を変更していなければ、Hydro と JAM の間だった。



# Heavy-Ion Collisions (8): Jet-Fluid String

## ■ sQGP formation at RHIC

- RHIC で初期条件からの粒子輸送模型を  
とりあえずあきらめる  
→ 特徴をだせるアイデアは？

## ■ Jet-Fluid String formation and decay

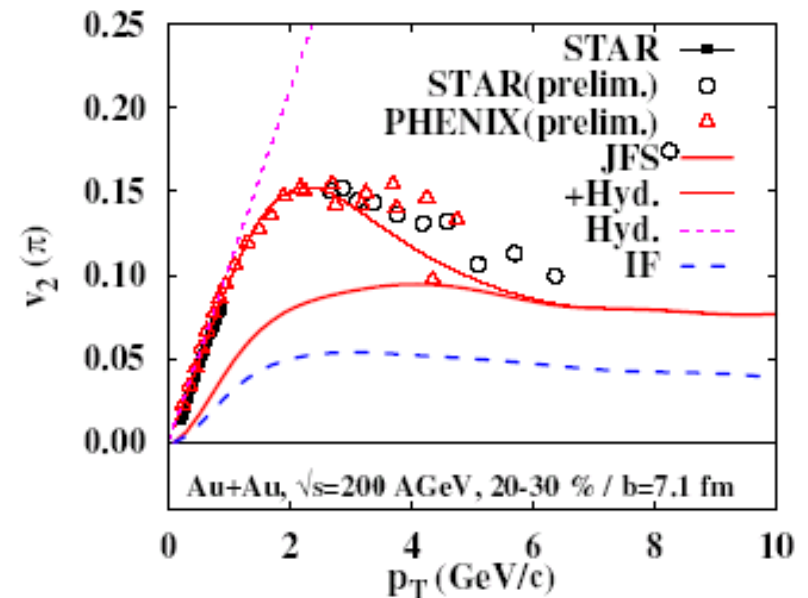
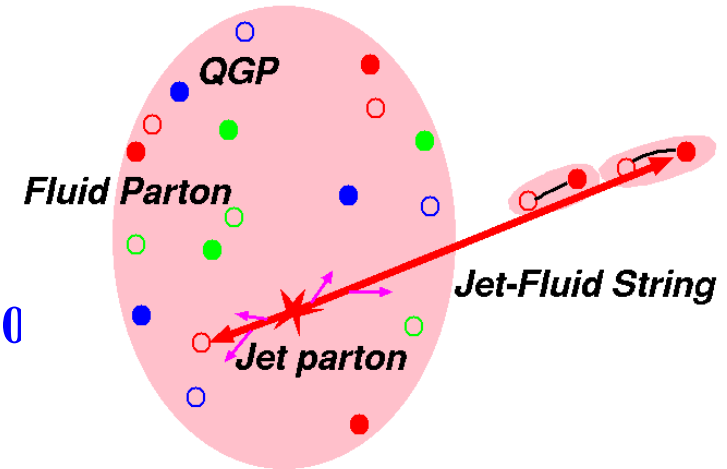
Isse, Hirano, Mizukawa, AO, Yoshino, Nara, 20

- high  $p_T$  での大きな  $v_2$  を説明するには  
jet parton の  $v_2$  だけでは足りない！

→ fluid parton の活用

(recombination からのアイデア)

- ほとんど粒子は「崩壊」でできる！  
(大きなエネルギーを持つ状態の方が  
準位密度が大きいから)
- high  $p_T$  での QGP シグナル  
(RAA,  $v_2$ , backward corr. の消失)を  
同時に説明  
→ 早く論文を投稿しなければ .....



---

*Spectroscopic Study by using AMD*

# Spectroscopy by using AMD (1): AMD-GCM

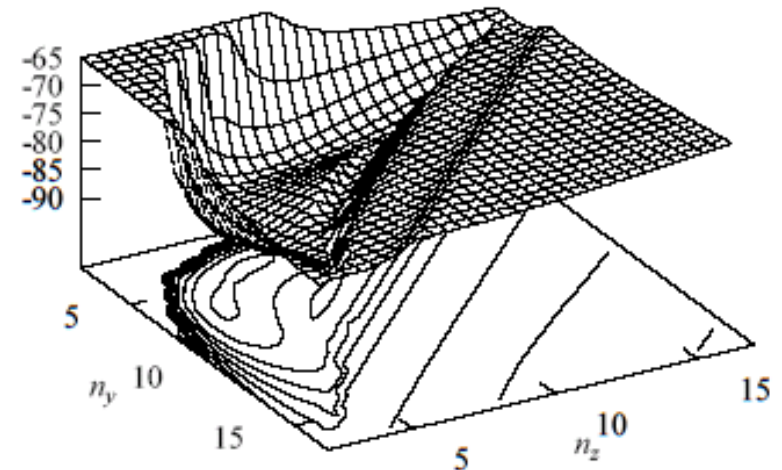
## ■ 事始め (1993)

- 大西 「AMD 波動関数は重ね合わせないと空間は広くないですね。」
- 加藤 「板垣君にやってもらいましょう。」

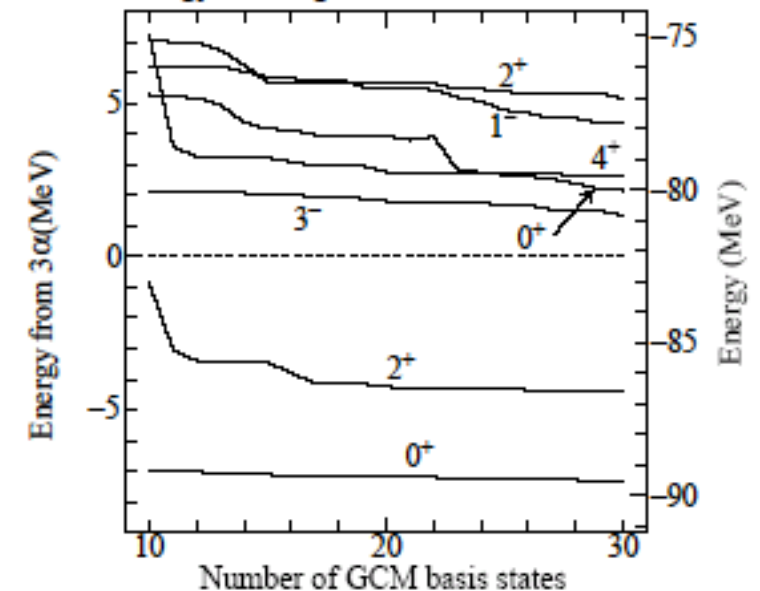
## ■ $\alpha$ cluster model of $^{12}\text{C}$ and $^{16}\text{O}$ based on AMD-GCM

- 実は AMD でなく Brink 模型だが、Constraint cooling+GCM のアイデアを提唱(したつもり)
- Local Gauss での多次元 GCM は収束が遅い。  
→ 物理的な描像に基づく重ね合わせがやはり必要だろう。
- $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$  の問題は解決せず

Energy Surface of  $^{12}\text{C}$  (projected to  $0^+$ )



$^{12}\text{C}$  Energy Convergence set I (Volkov,  $M=0.59$ )





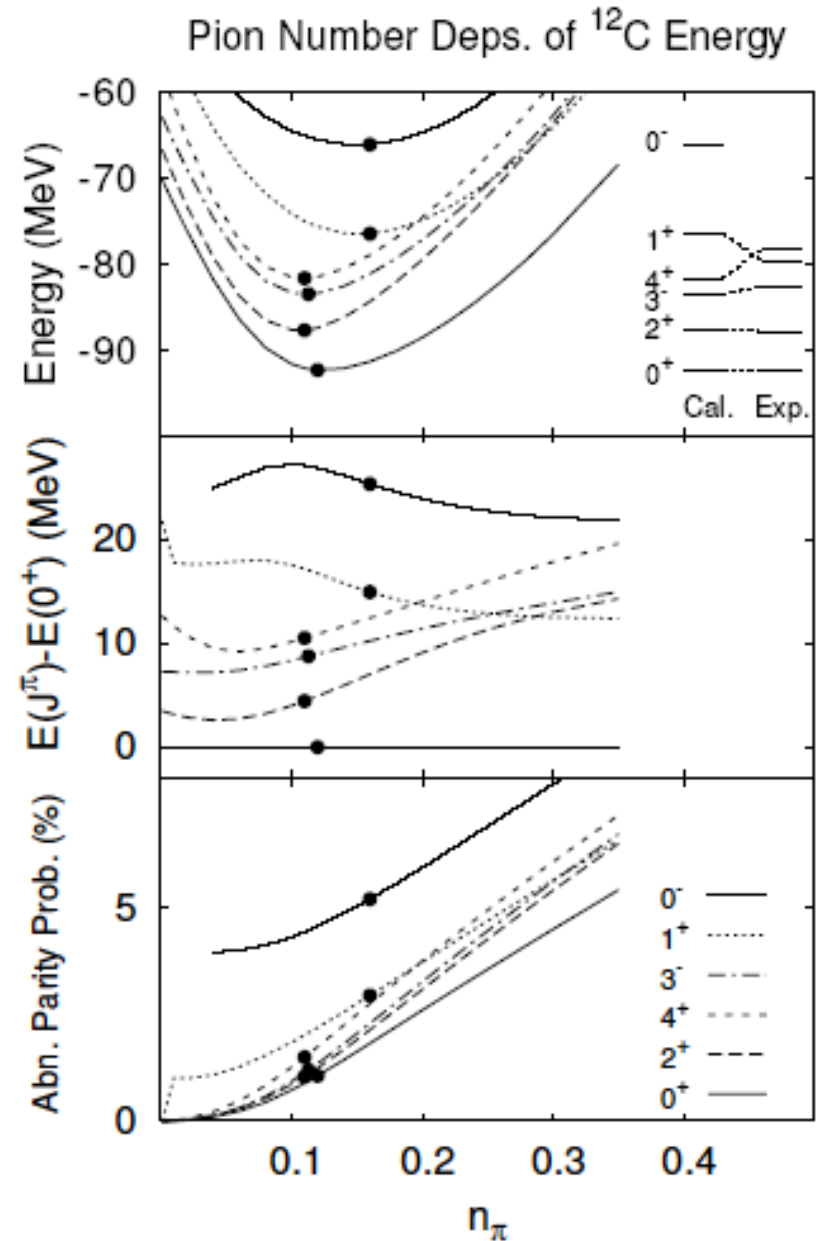
# Spectroscopy by using AMD (2): AMD $\pi$

## ■ 事始め

- 大西「今のテーマだとあまり意欲がわかないようですね？ AMD に $\pi$ を入れてみませんか？」
- 一色「それはすごいですね。」

## ■ AMD+Coherent state $\pi$

- $\pi$  粒子の混ざり方は  $J^\pi$  ごとにことなる  
→  $2^+$  が上がり、 $1^+$  は下がる
- 有限の異常パリティ確率  
(核子 wf のパリティと全体のパリティが  
違う確率)  
→ 構成要素としての  $\pi$  へ
- $\Lambda\Sigma$  mixing へ進むための第一歩のはず  
だったが、.....



---

*Nuclear Matter EOS  
for Astrophysics*

# EOS for Astrophysics (1): NSE vs. RMF

## ■ 事始め

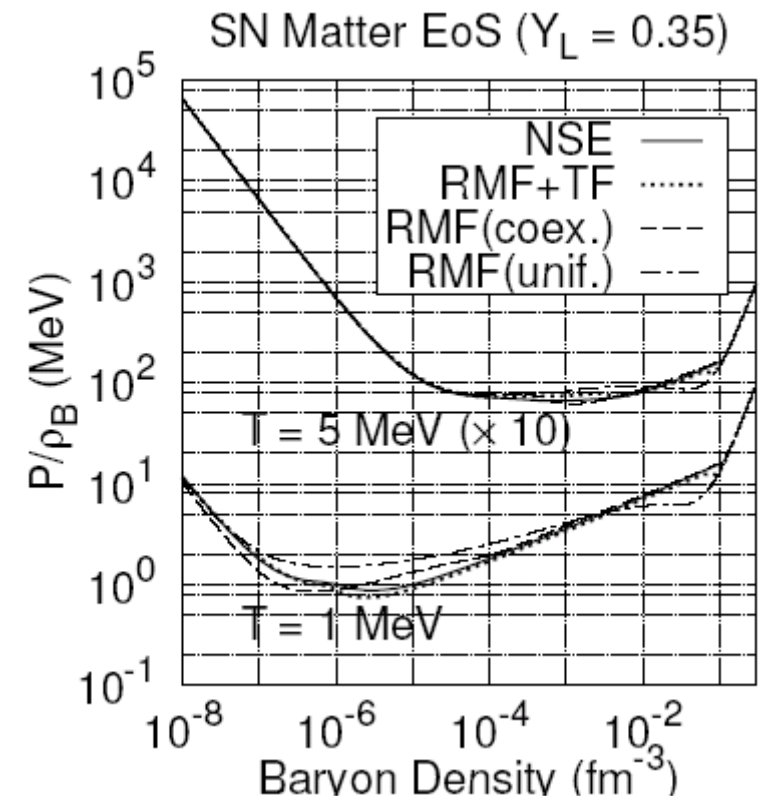
- 石塚「どうしても超新星爆発がやりたいんです。」
- 大西「私にできるのは低密度での原子核分布を取り入れた EOS 作りぐらいですけどいいですか？」

## ■ NSE vs RMF in supernova matter

Ishizuka, AO, Sumiyoshi, 2003;

Ishizuka, Thesis

- NSE と RMF+TF (Shen) では EOS がそれなりに違う。  
(特に沸点付近)
- $\rho_0$  近辺で EOS を変えると爆発の様相は大きく変わる
- どうやって「低密度での NSE」と「高密度での RMF」をつなぐか？  
(未解決)  
→ Pasta Glass ?



# EOS for Astrophysics (2): EOS with Hyperons

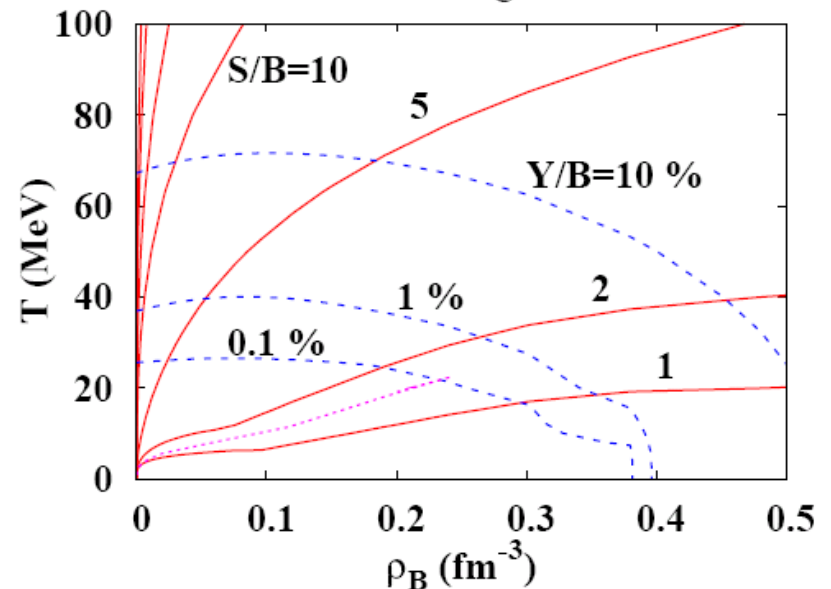
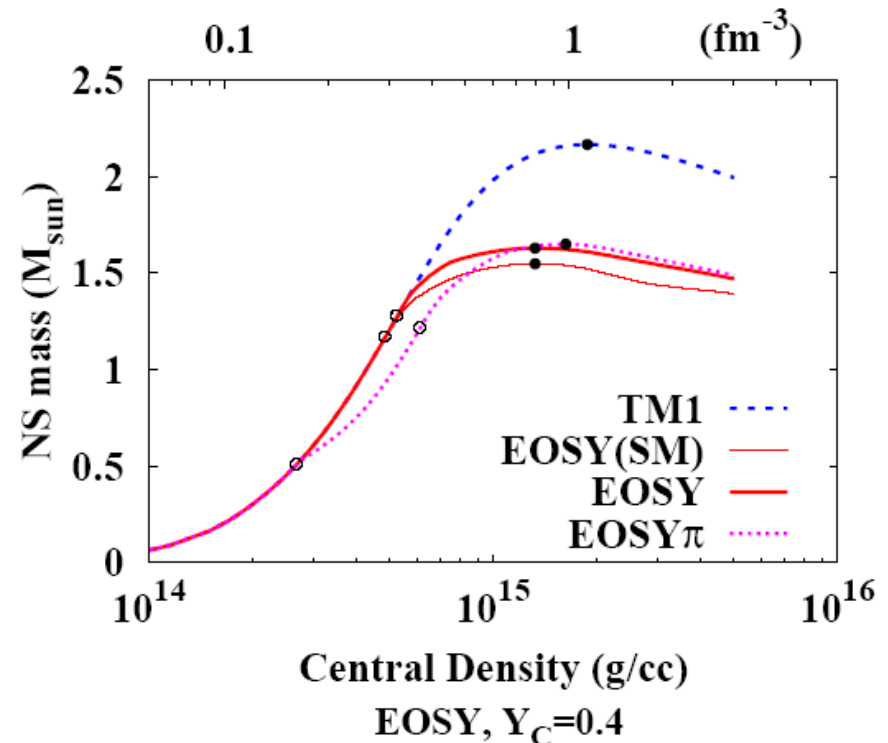
## ■ 事始め (2003)

- 住吉「仕事仇から、お前達の EOS はハイペロンが入っていないからだめだ、といわれる。なんとかならないか？」
- 大西「彼らの入れ方は  $\Sigma$  が引力だからうそですよ。なんとかしましょう。」

## ■ EOS with Hyperons (EOSY) for supernova matter

Ishizuka, AO, Tsubakihara,  
Sumiyoshi, Yamada, 2008

- $U_{\Sigma} \sim +30$  MeV,  $U_{\Xi} \sim -15$  MeV を取り入れた EOS テーブル
- Hyperon は Neutron star や BH 形成時には効くが、Supernova ではあまり出てこない。



---

*Strong Coupling Lattice QCD*

# SCL-LQCD(1): Baryonic Effects

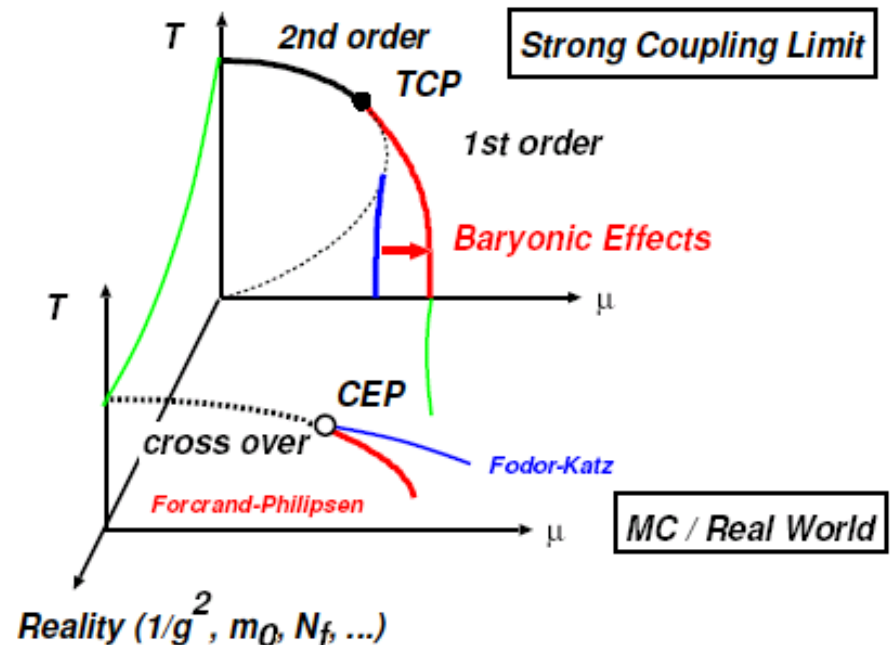
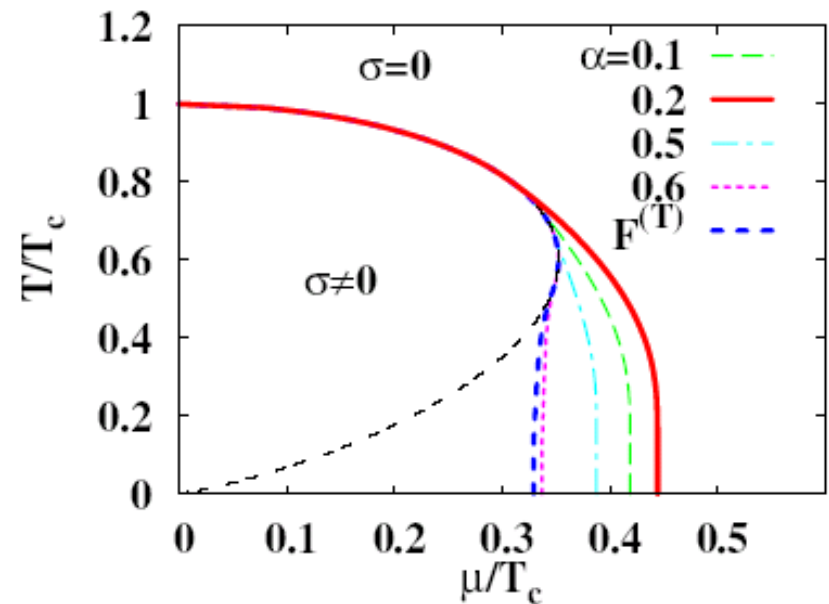
## ■ 事始め

- 大沼 「素粒子分野の仕事でなければやりたくないです。」
- 大西 「河本さんと組んでSCL-LQCD ならいいですか？」

## ■ SCL-LQCD at finite T and $\mu$ with baryon effects

Kawamoto, Miura, AO, Ohnuma, 2007

- Finite T, Baryon effects を同時に取り入れた初めての仕事
- 大きな  $\mu$  にハドロン相がなかなか伸びず、 $\rho_0$  でも chiral restoration ! (他の仕事や NJL も同様)  
→ 核物質屋として許せない!

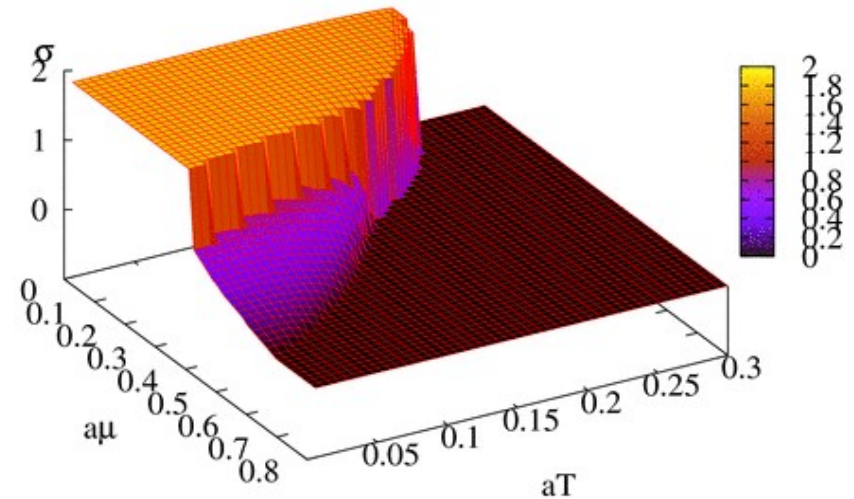
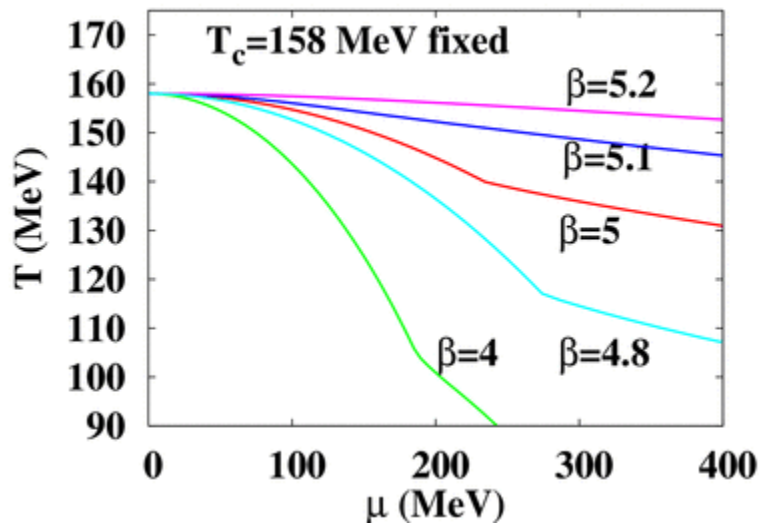
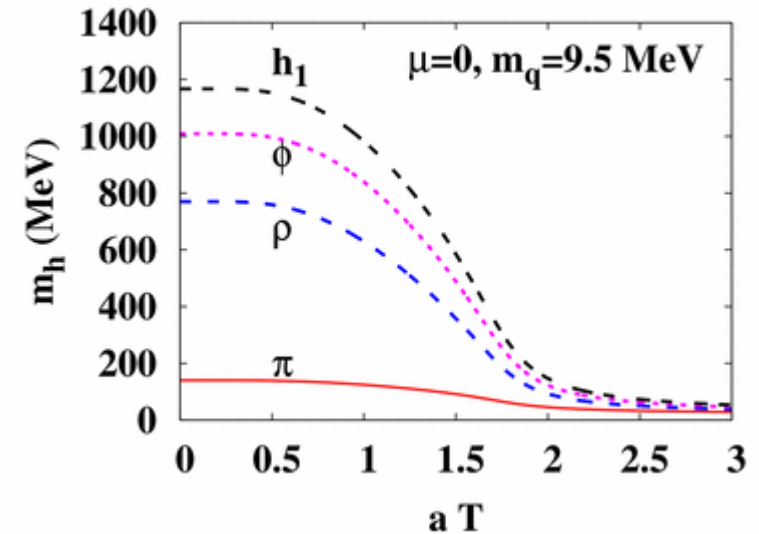


# SCL-LQCD(2): BR scaling, $1/g^2$ , Quarkyonic phase

## ■ Several extensions

- Meson masses at finite T
- Finite coupling corrections
- New Phase (Quarkyonic phase)

→ 競争の激しい課題は速い論文作成を！



*Kawamoto, Miura, AO, in prep.*

# Summary

- 15年間を振り返って
  - 大学院生に引っ張られて研究分野を広げられた15年。  
→ 新しい対象 / 手法だと比較的短期間で「新しい」仕事ができる  
(楽しかった！)  
↔ 「深み」は足りなかったか？
  - 北大の15年で原著論文28編(少ない！)。  
→ 前にすすむこととまとめることのバランスを大切に。
- 研究の方針：北大から基研へ
  - 微視的な現象論：micro といえる自由度から現象を見たい
  - 相図と状態方程式：原子核物理に閉じない課題
  - 「追い越して追いつく」独自の課題・手法で最先端へ
  - 「書いてから発表する」やらなければ.....
- ありがとうございます。