

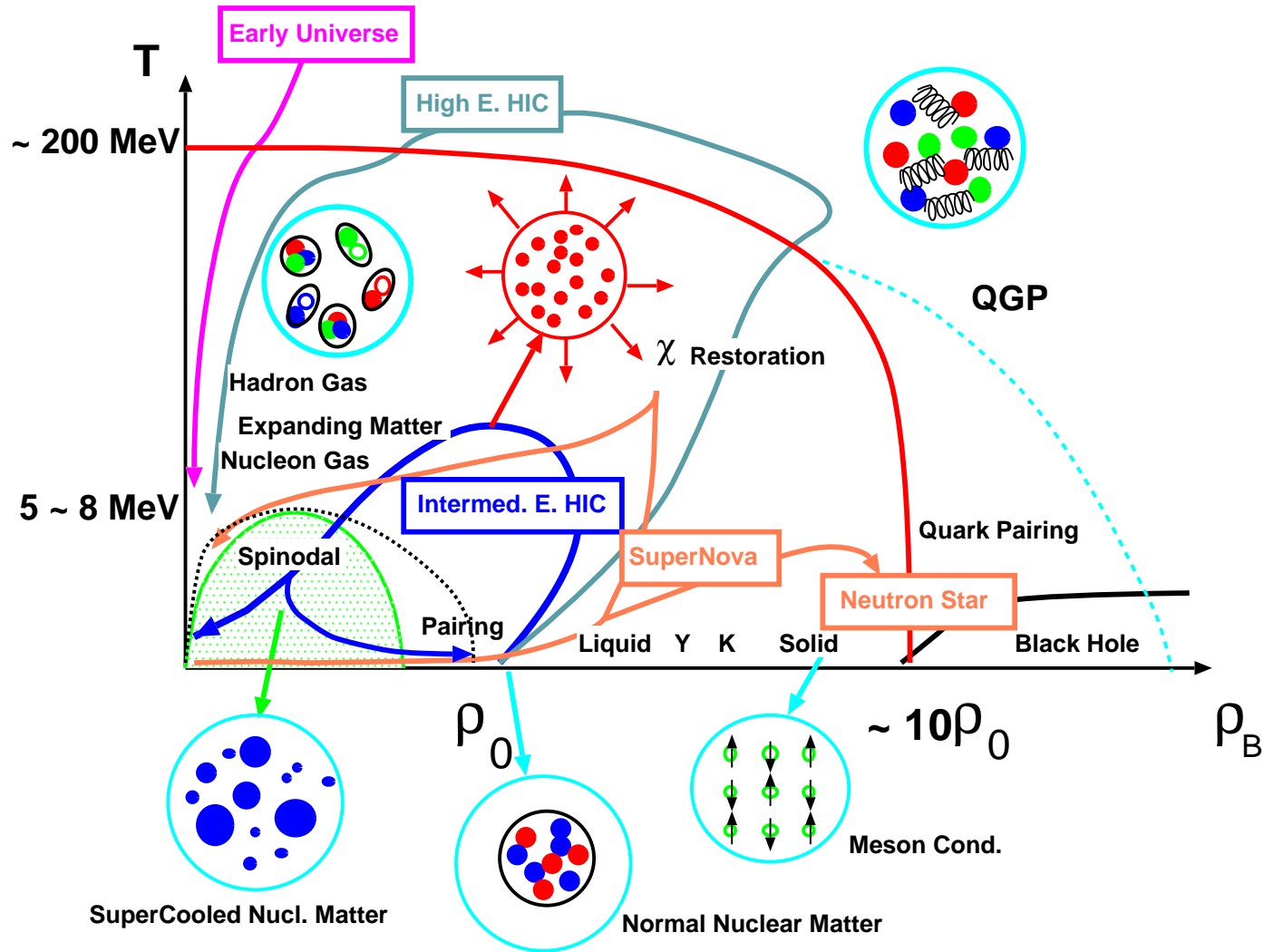
Aug. 19-22, Hokkaido Nucl. Theor. Seminar

Phenomenological Study of Hadronic Matter Dynamics

Akira Ohnishi Hokkaido U.

1. 基本的課題から個別課題へ
2. フラグメント生成の研究
3. ストレンジネス核物理
4. 高エネルギー重イオン反応
5. Summary

Hadronic Matter Phase Diagram



★ ハドロン物質動力学の現象論的研究

● 基本的課題 (Fundamental Problems)

様々な密度・温度での核物質（ハドロン物質）の性質を実験データに基づいて明らかにし、核反応に見られる現象や天体現象への影響・関連を解明すること。

● 課題意識 (Standpoint of Study)

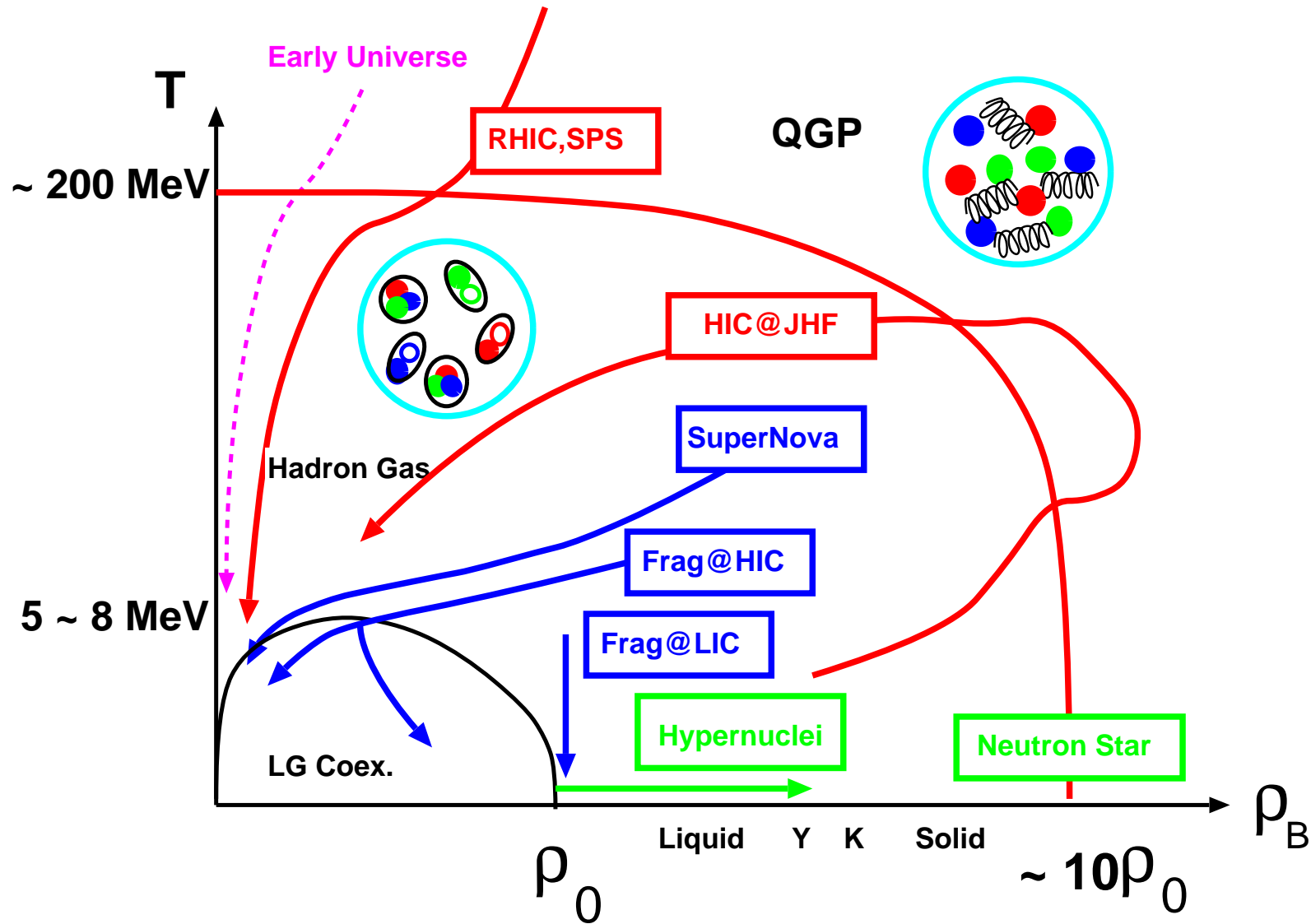
★ 研究対象の階層

- 「Quark, Gluon → ハドロン・核力」
- 「核子・ハドロン → 核力」
- 「現実的核力 → 少数系」
- 「有効核力+模型空間 → 多体系の構造・直接的反応」
- 「半古典近似（平均場+断面積+粒子自由度+ゆらぎ） → 複雑な核反応」
- 「相互作用と状態の理解 → 核物質・ハドロン物質」

★ 統計性を意識した核反応動力学

- 平均場近似の範囲内で系の時間発展は半古典論でよく記述できる
- 非平衡・多段階反応 → 核反応のシミュレーション
- 平衡化への寄与:
= 残留相互作用による hh 衝突+ 異なる状態への遷移による平均場の揺らぎ+ α
- 相転移近辺での振舞 = 「揺らぎ」 \gg 「平均的振舞」

● 個別課題 (Individual Problems): ハドロン相図の各部分の理解



★ フラグメント生成

- 重イオン反応での多重破砕 (Randrup)
- 軽イオン反応でのフラグメント (IMF, ハイパー核) 生成 (奈良、平田、原田、Randrup、原研グループ)
- 超新星爆発時のフラグメント生成 (石塚、住吉)

★ ハイパー核

- 静止 K^- , Ξ^- 反応でのハイパー核生成 (奈良、平田、原田、Randrup)
- (K^-, π) , (K^-, K^+) 反応での粒子スペクトル (奈良、原田、Koch、平田、赤石、新村)
- ストレンジネス物質の状態方程式 (一色、内藤、Sahu)
- 軽いハイパー核構造の AMD による研究 (一色、(明、板垣))

★ 高エネルギー重イオン反応

- ハドロン素過程断面積と重イオン反応でのハドロンスペクトル (大塚、奈良、仁井田、千葉)
- 粒子自由度のハドロンスペクトルへの影響 (大塚、奈良、Sahu、Cassing、Mosel)
- 平均場とフロー (一瀬、大塚、Sahu、Cassing、Mosel)

★ AMD+GCM の核構造への適用

- ^{12}C , ^{16}O の 3α , 4α 模型 (板垣、加藤)

★ フラグメント生成の研究

● 量子ランジュバン法と重イオン反応での多重破碎

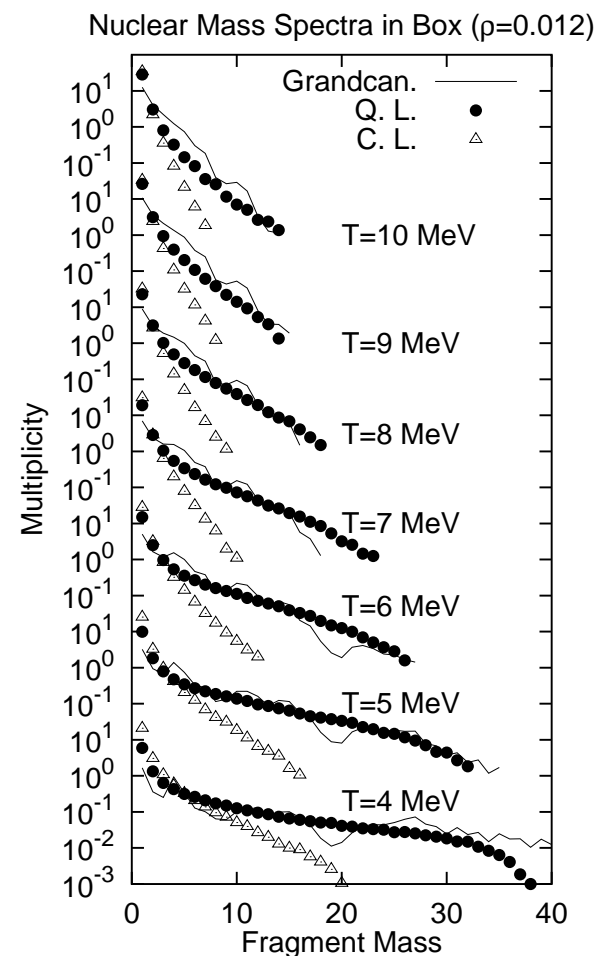
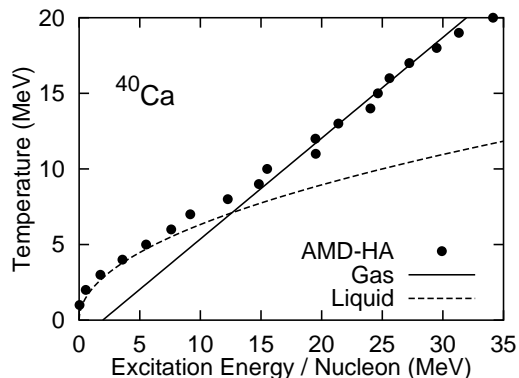
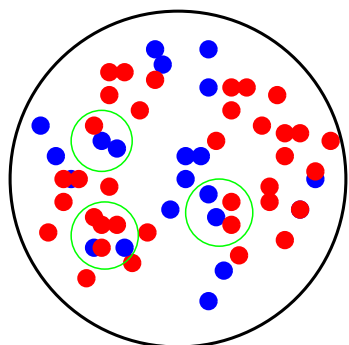
(Ohnishi, Randrup, NPA565(93)474; PRL75(95)596; Ann.Phys.253(97)279; PLB394(97)260; PRA55(97)3315R)

アイデア: 波束の量子統計力学から

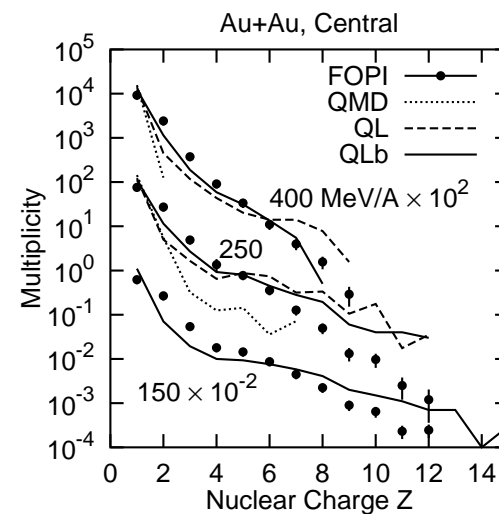
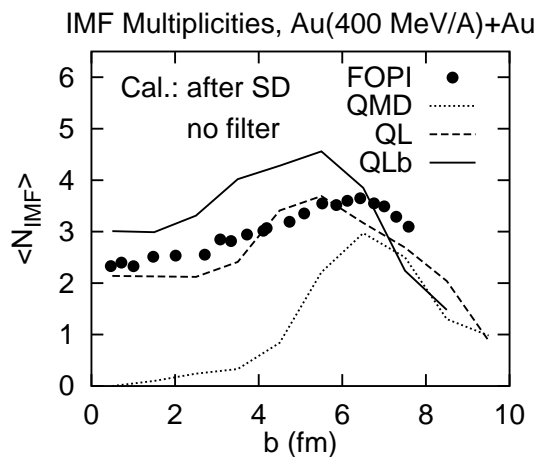
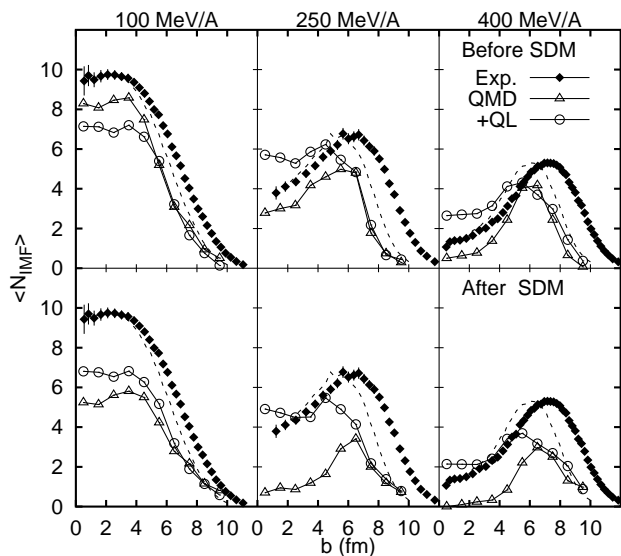
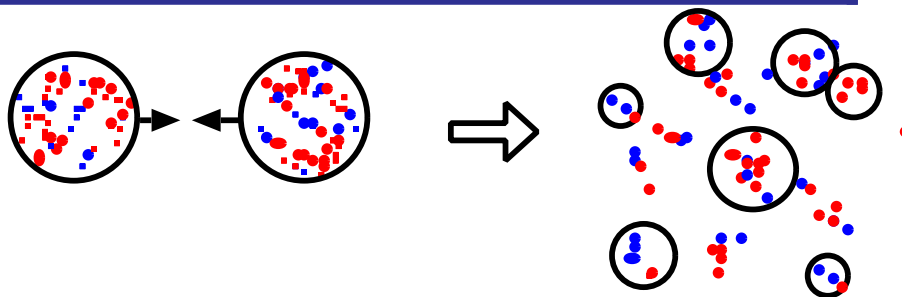
波束中心に対する揺らぎを含む運動方程式へ

	古典論	量子論
Canonical	$\exp(-\beta \langle \hat{H} \rangle)$	$\langle \exp(-\beta \hat{H}) \rangle$
MicroCan.	$\delta(E - \langle \hat{H} \rangle)$	$\langle \delta(E - \hat{H}) \rangle$
EOM	Newton 方程式	量子 Langevin 方程式

波束の統計力学

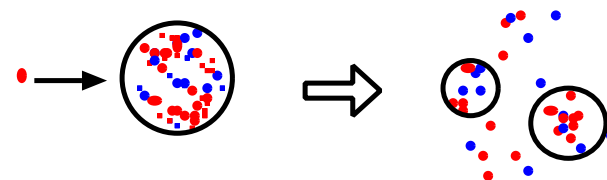


重イオン反応への適用 (Au+Au, 100-400 MeV/A, QMD-QL)



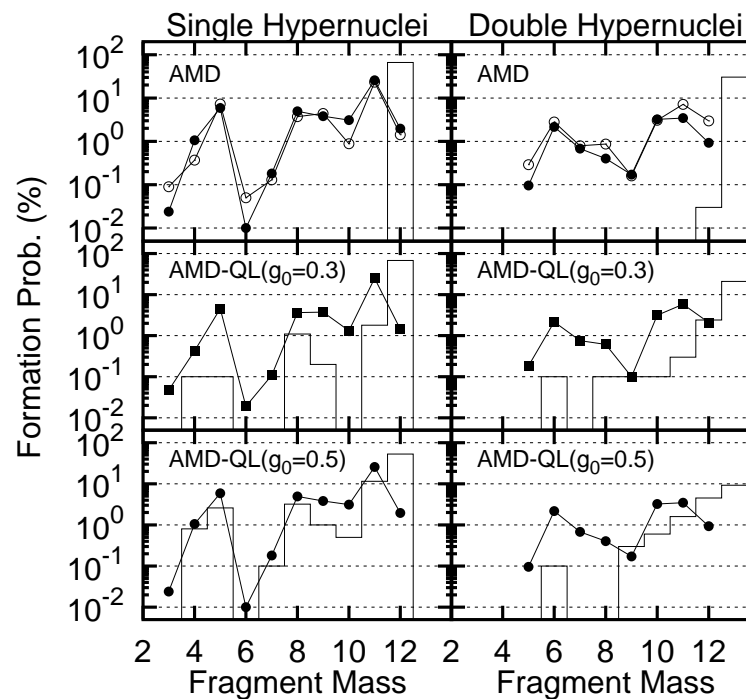
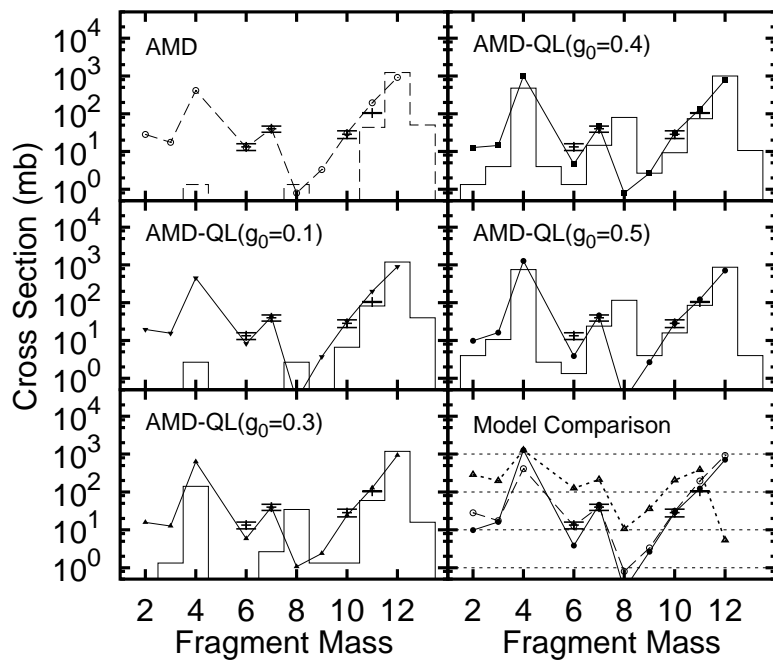
Quantum Fluctuation Enhances Stable Fragment Formation in Early Stages

軽イオン反応・ハイパー核生成への適用 (AMD-QL)



● p(45 MeV) + ¹²C

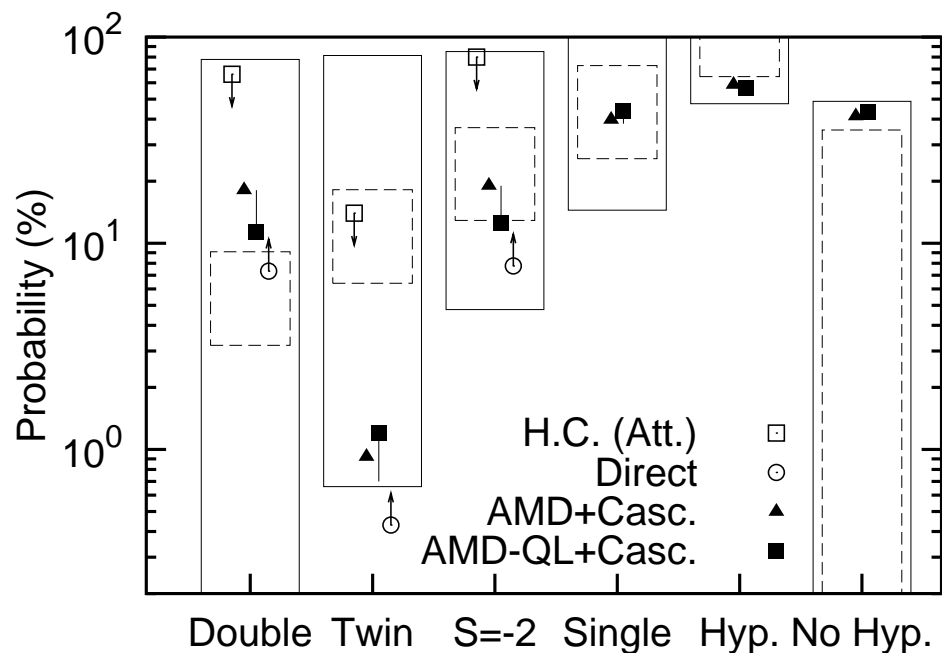
● 静止 Ξ^- 反応



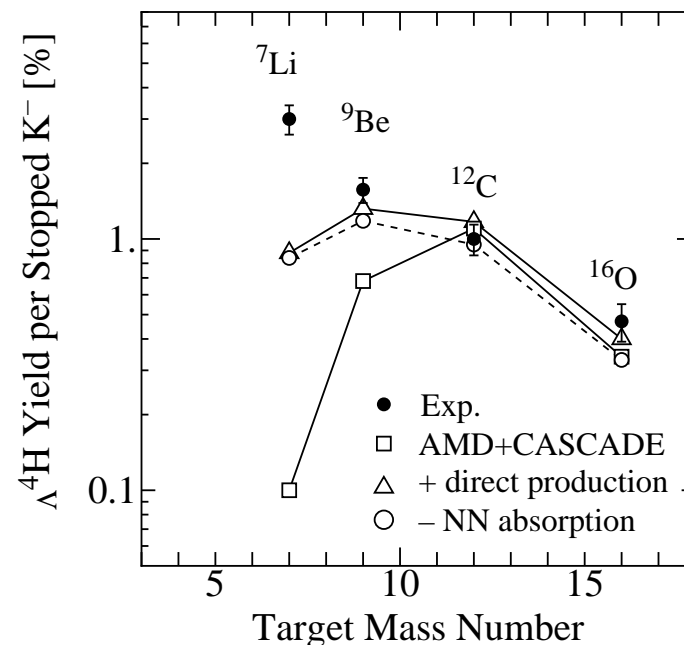
(Hirata, Nara, Ohnishi, Harada, Randrup, PTP102(99), 89)

• Double and Twin Hypernuclei

cf. 静止 K^- 反応からの ${}^4_{\Lambda}H$ 生成
(Nara, Ohnishi, Harada, PLB346(95), 217)



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



 Faster (Direct-like) Fragment Formation Seems to be Necessary

● その後の展開

- ★ 「早いフラグメント生成」という予想をもとにした模型化した研究
 - … 非平衡状態(非球形)からのパーコレーションによる GeV 陽子入射反応からの IMF side-ward, backward peak の機構解明(平田 (Hirata et al., NPA, in press)、山口)
- ★ 「様々なフラグメント配位の統計的分布の重要性」に着目した研究
 - … 超新星爆破時の液相・気相相転移を通じた元素生成(石塚, submitted)

★ ストレンジネス核物理

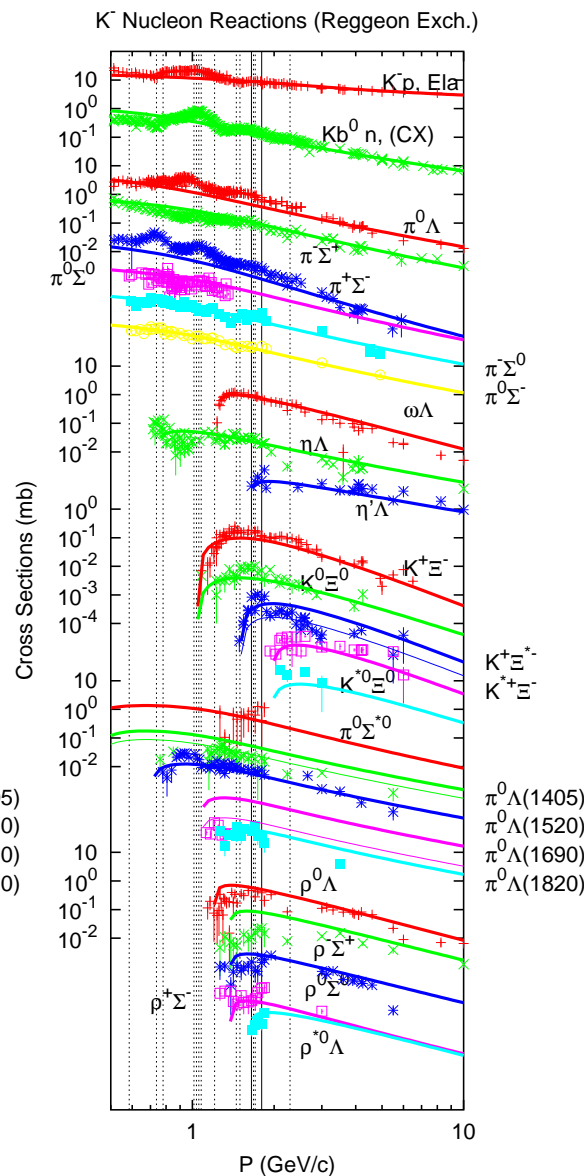
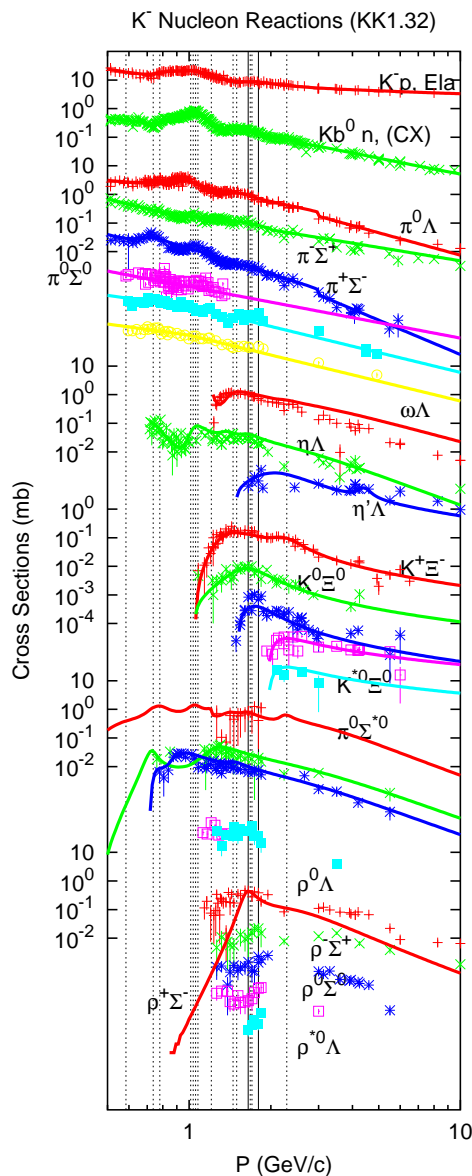
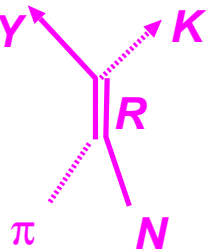
- ハイパー核破片生成
- (K^-, K^+) スペクトル
(Nara, AO, Harada, Engel, NPA614(97)433)

アイデア:

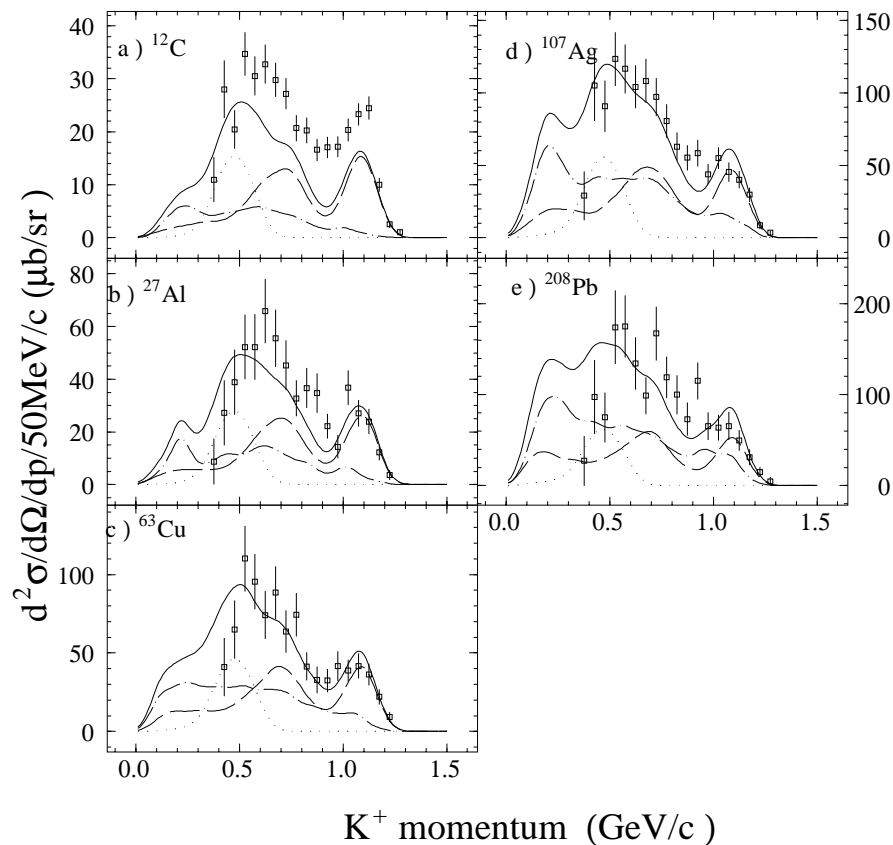
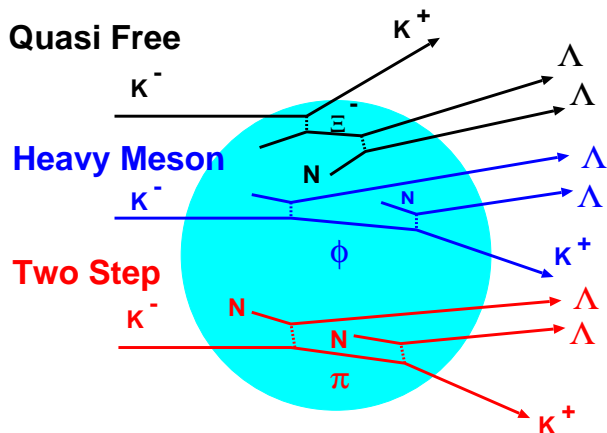
多段階過程を (古典論の範囲内で) 正確に評価する

- 様々な素過程断面積の評価と Simulation による実装
- Generalized Breit-Wigner for Unknown Cross Sections

s-channel
R (or S) Form.



(K⁻, K⁺) スペクトル



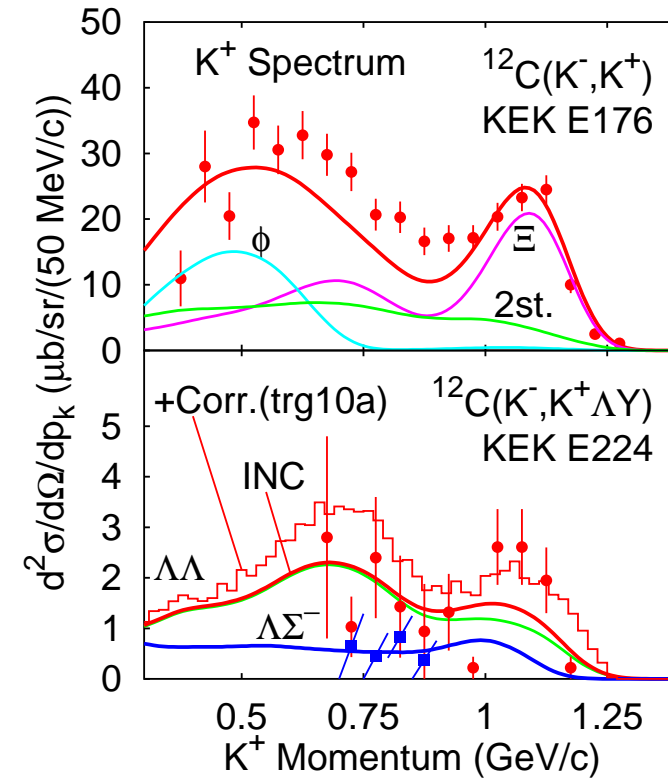
K⁺ Production Mech.

Quasi Free	$K^- N \rightarrow K^+ \Xi^{(*)}$
Heavy-Meson	$K^- N \rightarrow MY, M \rightarrow K^- K^+ \quad (M = \phi, f_0, a_0) \text{ (Gobbi-Dover-Gal)}$
Two-Step	$K^- N \rightarrow MY^{(*)}, MN \rightarrow K^+ Y^{(*)} \quad (M = \pi, \eta, \rho, \omega, \eta')$

論文発表後の実験解析: (K^- , $K^+\Lambda Y$) スペクトル

Two-step 過程は少なくない!

- ★ Low $P(K^+)$ 領域で ΛY 放出が大きい。
- ★ QF Ξ 生成領域でも ΛY 放出が 10 % 程度ある。



連続状態のスペクトルは、多段階過程を通じて実験で断面積を直接観測できない様々な素過程の情報を含んでいる。

● ハイパー核物理における他の展開

★ (K^-, π) 粒子スペクトルと $\Lambda(1405)$ の性質 (AO, Nara, Koch, PRC56(97), 2767)

★ $\Lambda\Lambda$ 相関と $\Lambda\Lambda$ 相互作用 (AO, Hirata, Nara, Shinmura, Akaishi)

★ ストレンジネス物質の状態方程式

- $\Lambda\Sigma$ Mixing を通じた π 凝縮の可能性 (一色, Proc. of YKIS01)
- Σ potential と中性子星物質組成 (Sahu, AO, PTP104(00)1163; NPA691(01)439)
- Chiral SU(3) Linear sigma Model の開発 (内藤)

★ ハイパー核構造の AMD+GCM による研究 (一色, Proc of PostYK01)



高密度核物質での大きな問題:

Σ の核物質中でのポテンシャル
媒質効果 ($\bar{K}N$ - Λ^* , $\Lambda\Sigma\pi$)

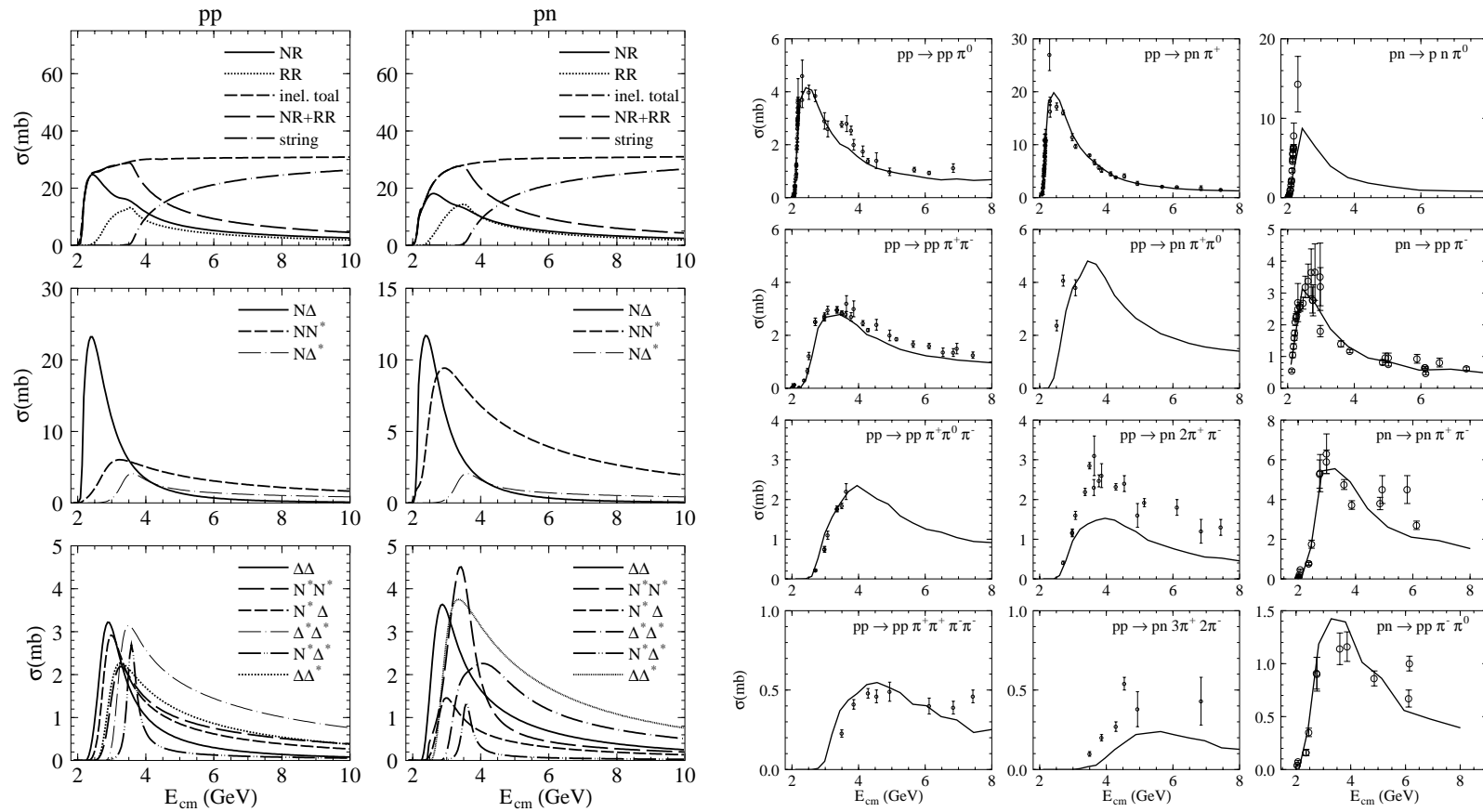
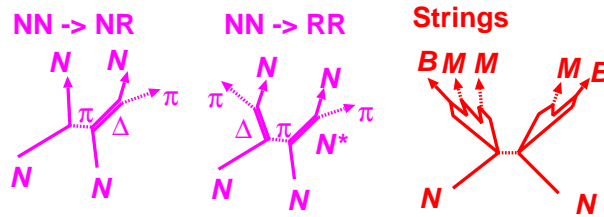
★ 高エネルギー重イオン反応

アイデア: ハドロンスペクトルの硬さには、「粒子自由度・平均場・平衡化の度合」が全て効く
→ 様々な素過程断面積模型・粒子自由度模型の比較研究

- ★ JAM (Nara, AO, Otuka, Niita, Chiba, PRC61(00)024901)
... Various Hadron Resonances / Strings / Jet
- ★ RBUU (Sahu, AO, Cassing Mosel, NPA672(00)376)
... Various Hadron Resonances → Strings (switch at $\sqrt{s_{sw}}$)
... Relativistic Mean Field
- ★ HANDEL (Otuka, Thesis, in preparation)
... Several Hadron Resonances + Multiparticle Prod.

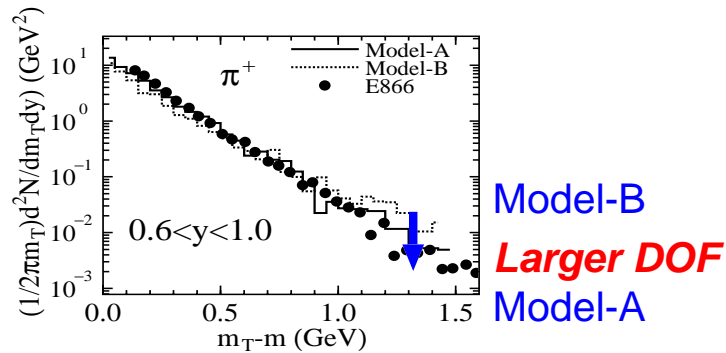
● Elementary σ @ SIS-AGS-JHF Energies (JAM)

BB: Single- and Double-Resonance Formation \rightarrow Strings



Particle DOF Effects

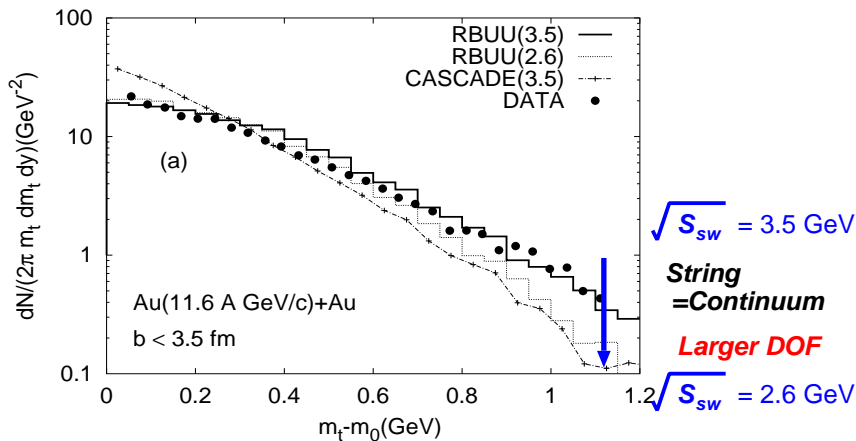
- **Model A/B**
(Nara et al., PTP Suppl.129(97)33)



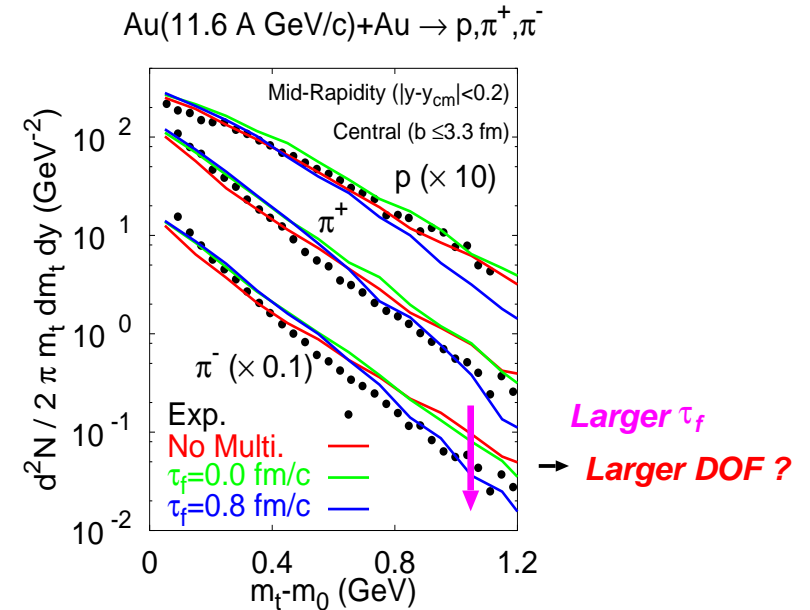
Model-A: Old JAM

Model-B: Old HANDEL (No Multi., No Reggeon Exch.)

- **RBUU (Sahu et al.)**



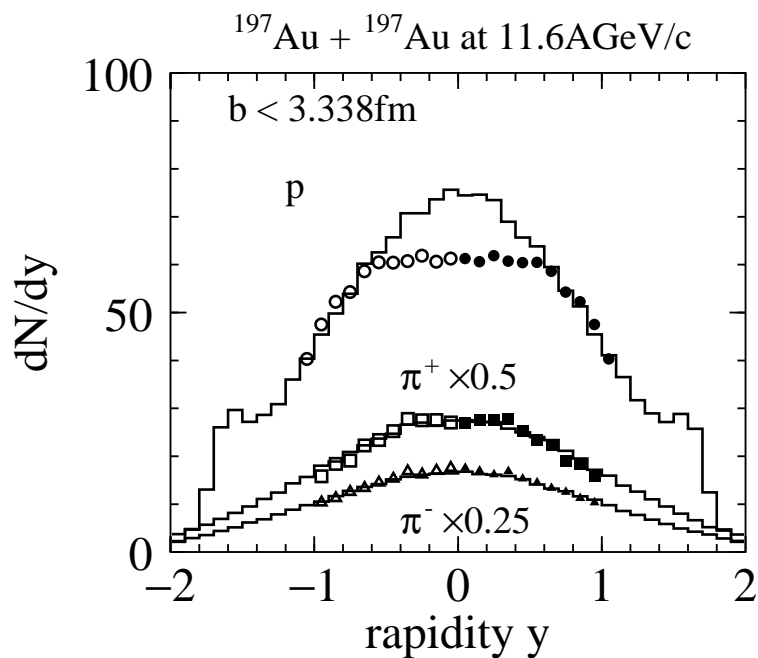
- **HANDEL (Otuka et al.)**



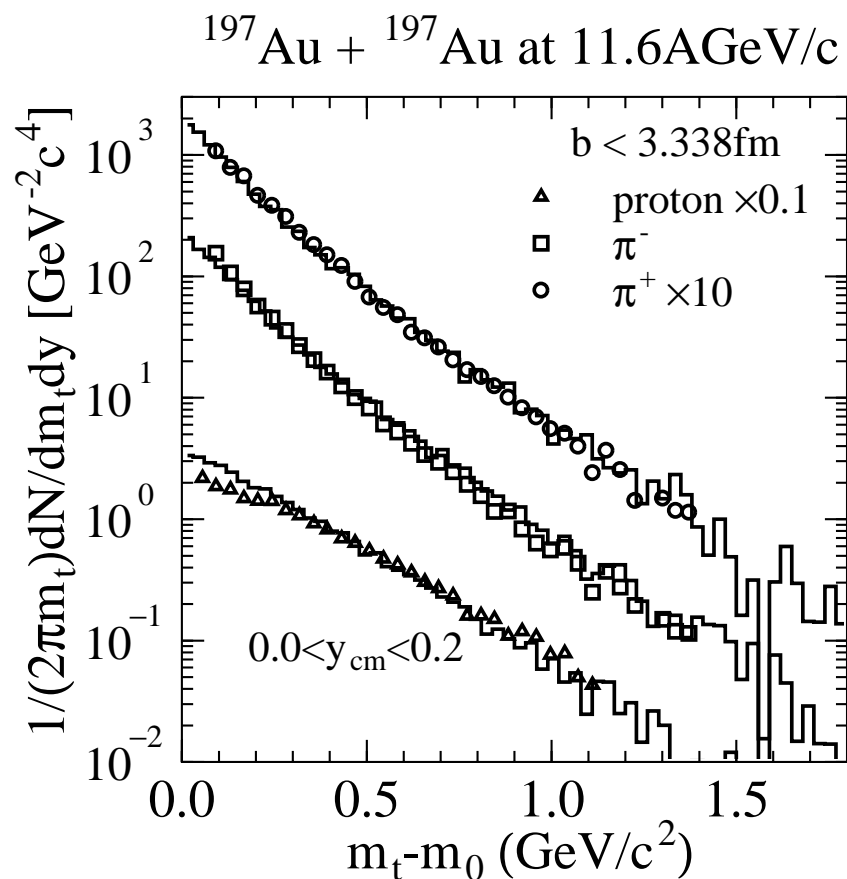
M_T Spec. Softening
 Comes from Larger DOF/ τ
 ... Approximate Hagedorn Gas
 seems to be Realized.

JAM Results at AGS energies

• Rapidity Dist.

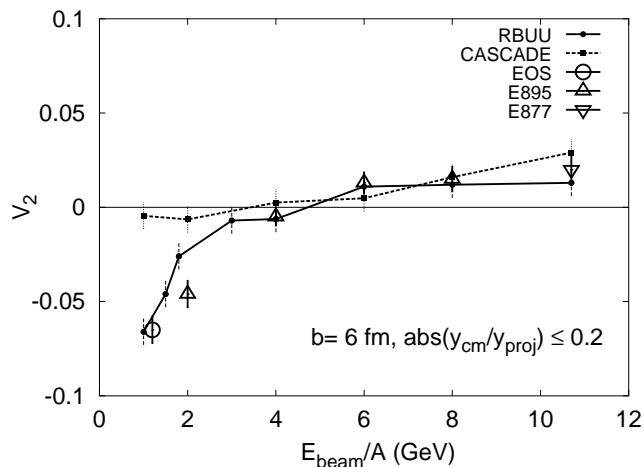
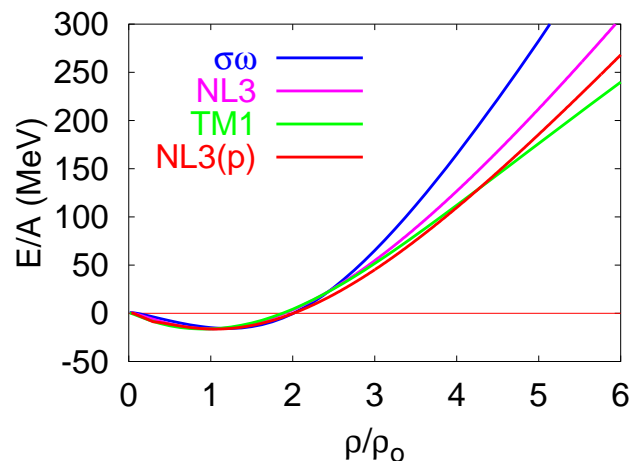
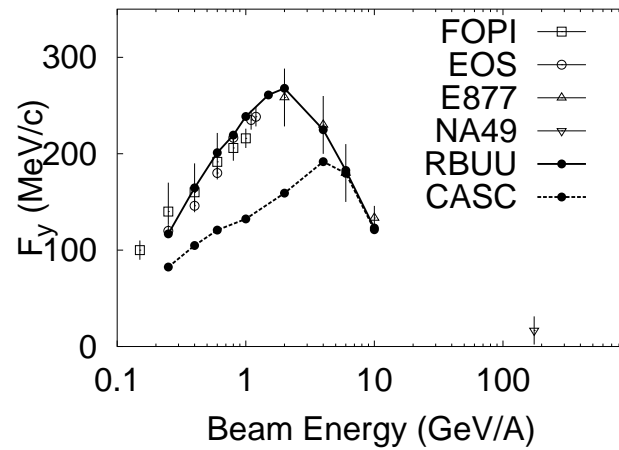
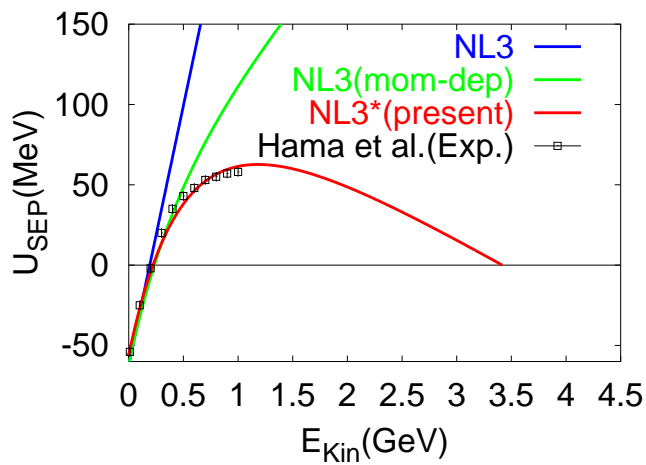


• M_T Spectra



Reasonably reproduced,
 except for larger stopping power and overestimate at very small M_t

RBUU Results at AGS



Simultaneous Explanation of $U(\rho, E)$, M_T Spectrum, Flow and V_2 by tuning the form factor of MB coupling and particle DOF

- その後の展開

- ★ RHIC エネルギーへ (Otuka, Sahu, Isse, Nara, AO)
- ★ JAM への平均場の導入 (Isse, Otuka, Sahu, Nara, AO)

- 断面積・粒子自由度・平均場:

- 一つの「組」として与える必要あり。
 - 継続的に改善していくことが望ましい。

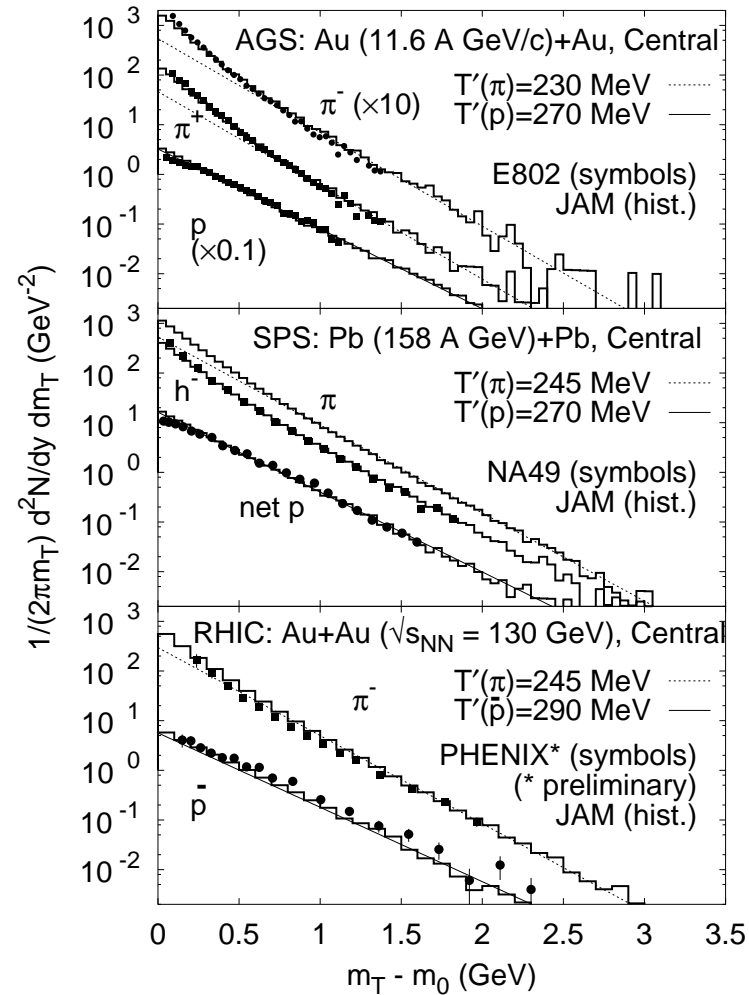
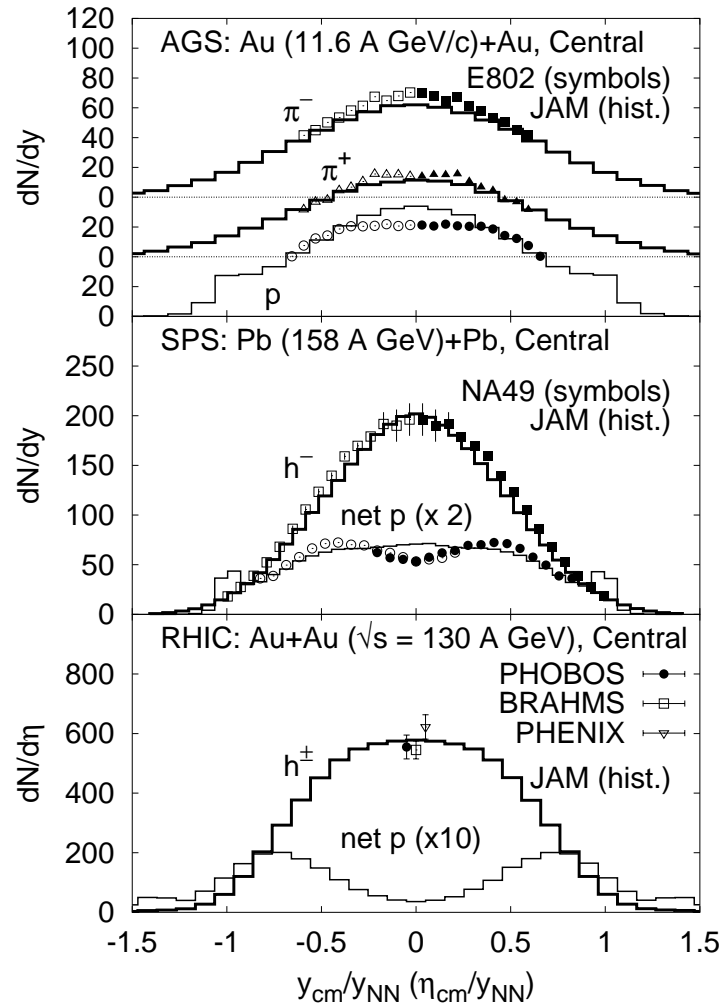
- 問題点

- Resonance からストリング、ストリングからジェットへ。
 - (新しい自由度が活性化される場合のつなぎ)

- 多重衝突の取り扱い

- Quark, Gluon の陽な取り扱い

• Hadron Spectra from AGS to RHIC



• Flow Measurements at JKJ-50 GeV

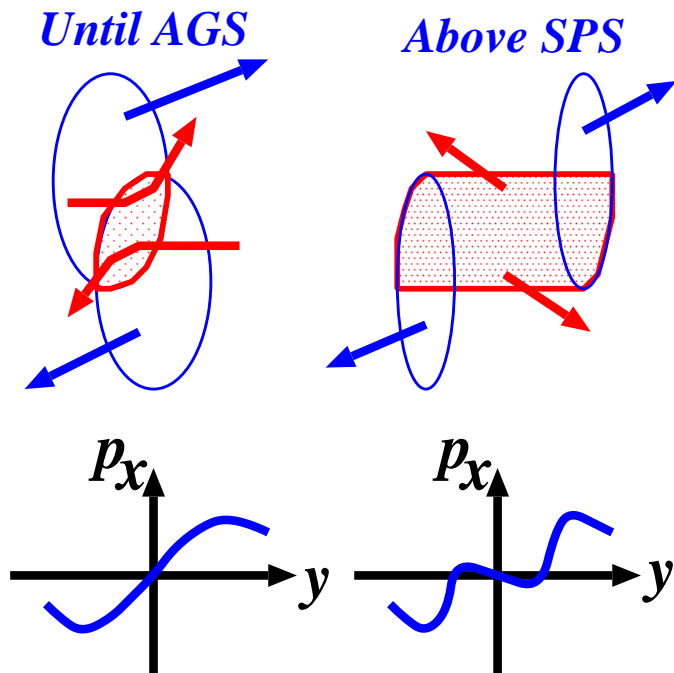
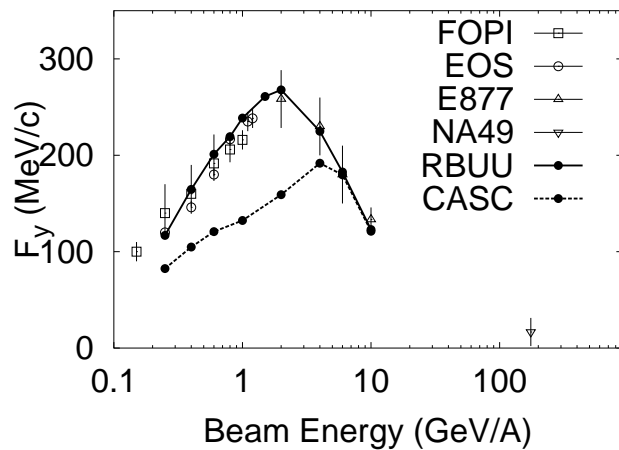
Systematics Suggests Followings.

- ★ Directed Flow (or V_1): Almost Zero or Negative Flow
- ★ Elliptic Flow (V_2): $V_2(\text{AGS}) < V_2(\text{JKJ}) < V_2(\text{SPS})$
- ★ Radial Flow: around Local Maximum at JKJ

(Directed) Flow

: Stiffness (Low E) + Time Scale (High E)

Calculation & Exp.:
 Sahu et al. NPA(2000))

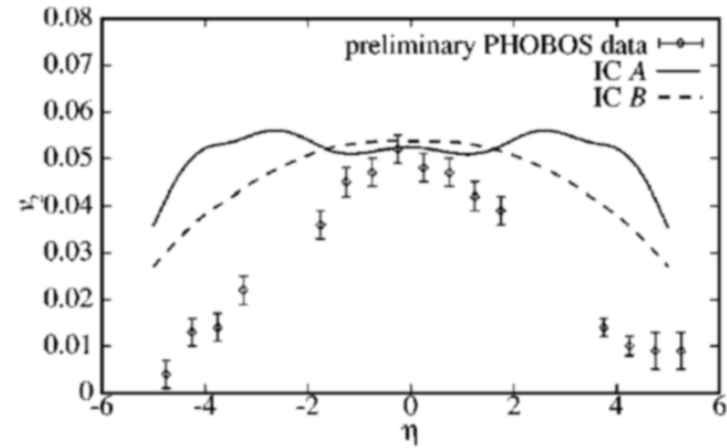
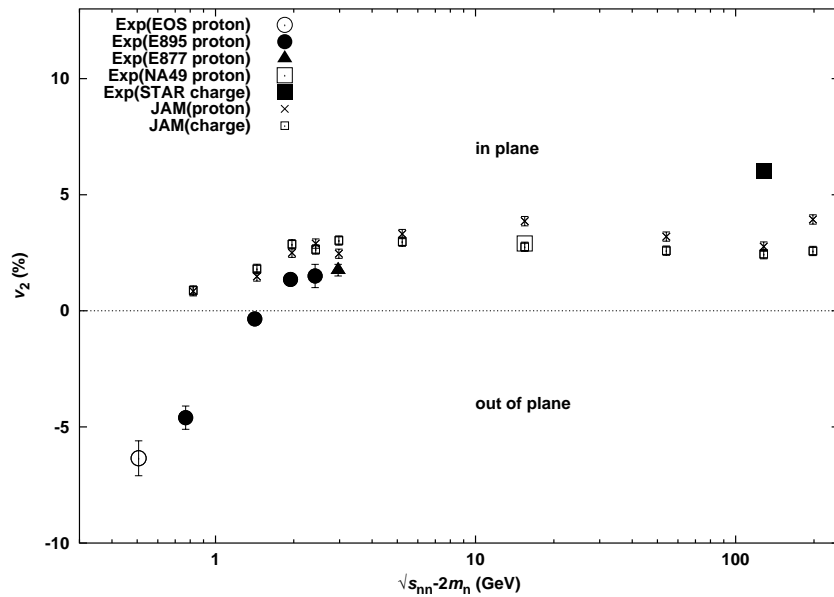


Elliptic Flow (V_2)

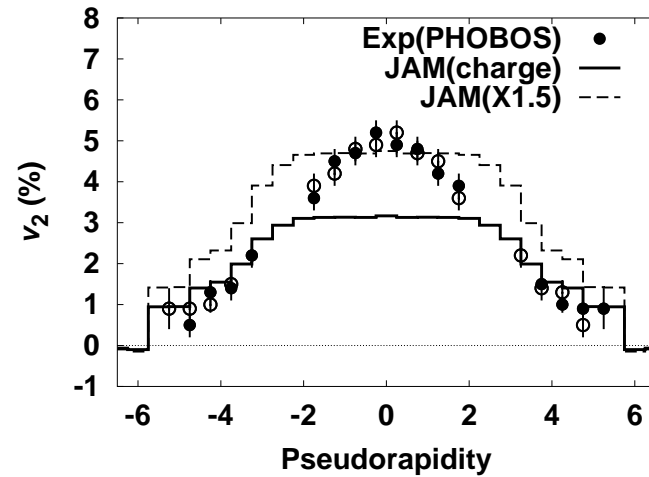
: Thermalization & Pressure Gradient Above AGS

Hydro: Hirano (2001)

Incident Energy Deps.



Cascade: P.K.Sahu et al. (2002)



Radial Flow

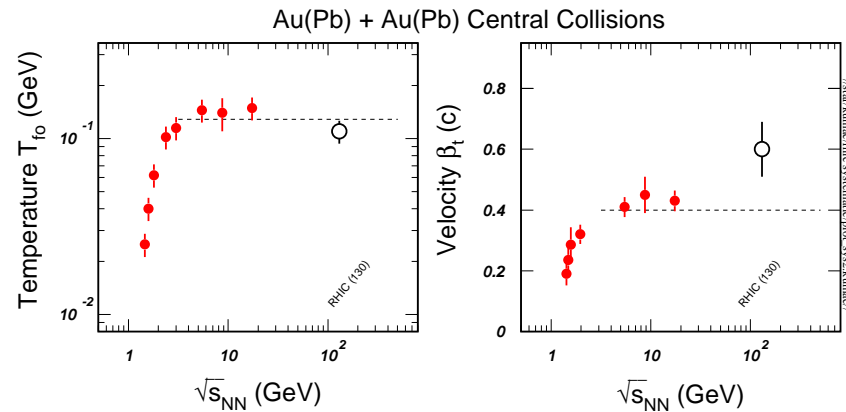
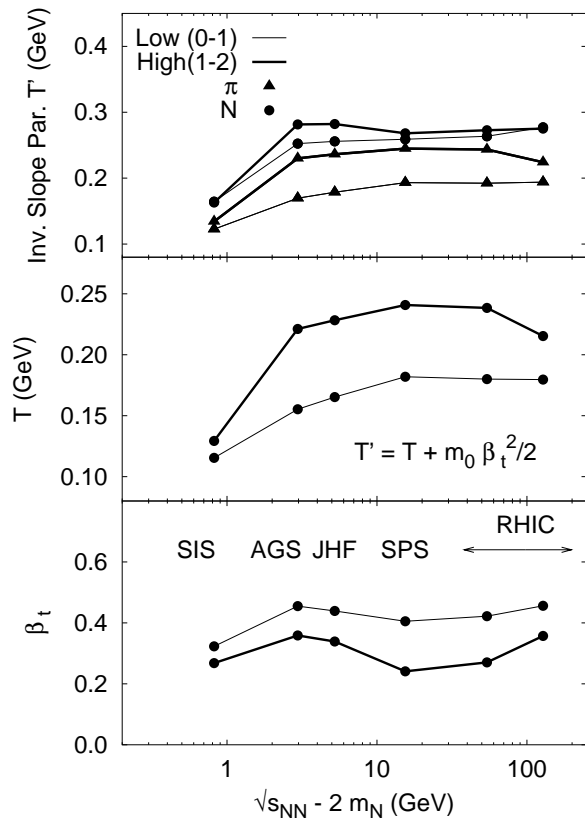
$$= \sqrt{P/E} \quad (?)$$

... Up (LBL~JKJ) → Down (JKJ~SPS) → Up (SPS~RHIC) → Stay (RHIC~)

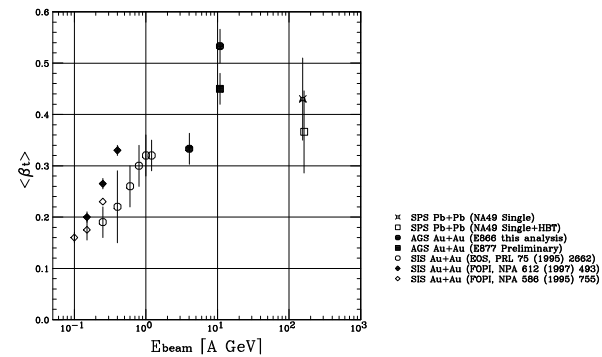
Exp: **Nu Xu and M. Kaneta (STAR)**

Calculation:

Otuka et al.(Eprint, 2001)



Exp: **Chujo, PhD Thesis**



Local Max. may appear around JKJ energies

★ Simple Model

★ Hadron Gas = Massless Pion Gas

$$P = \frac{\pi^2}{90} g_\pi T^4, \epsilon = \frac{\pi^2}{30} g_\pi T^4 \quad (g_\pi = 3) \rightarrow P = \epsilon/3.$$

★ QGP = Bag model

$$P = \frac{\pi^2}{90} g_{qgp} T^4 - B, \epsilon = \frac{\pi^2}{30} g_{qgp} T^4 + B$$

$$\rightarrow P = (\epsilon - 4B)/3,$$

$$g_{qgp} = 2 \times 8(\text{gluon}) + \frac{7}{8}(2 \times 2 \times 3 \times 3)$$

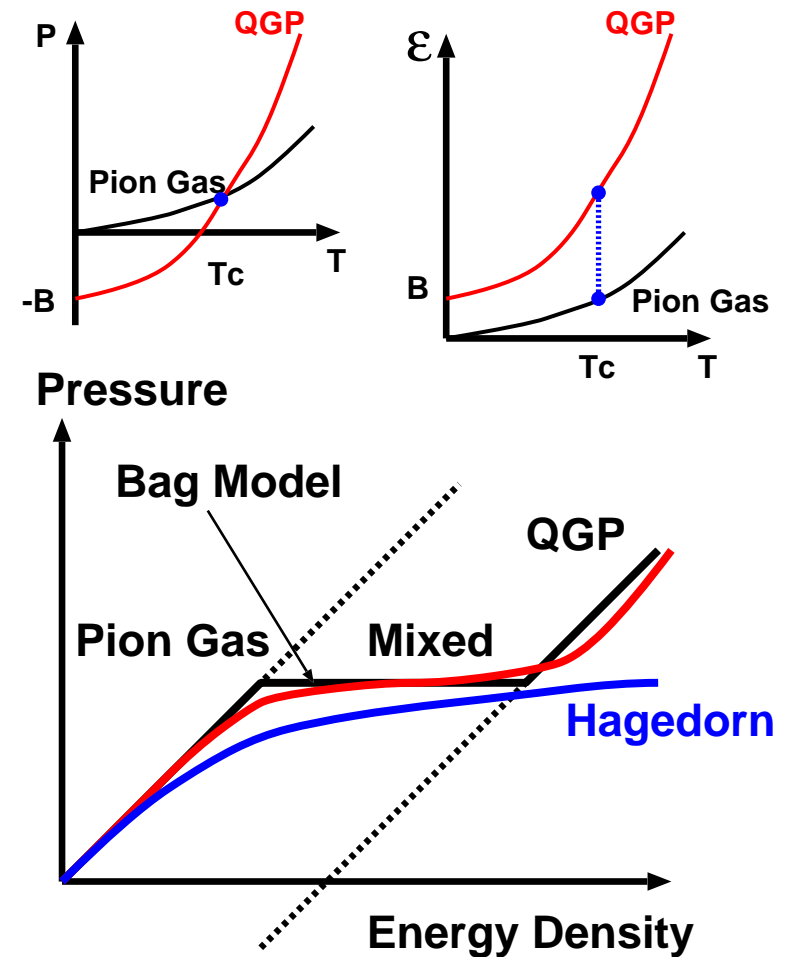
(quark, spin, q, \bar{q} , color, flavor)

★ Hydrodynamics

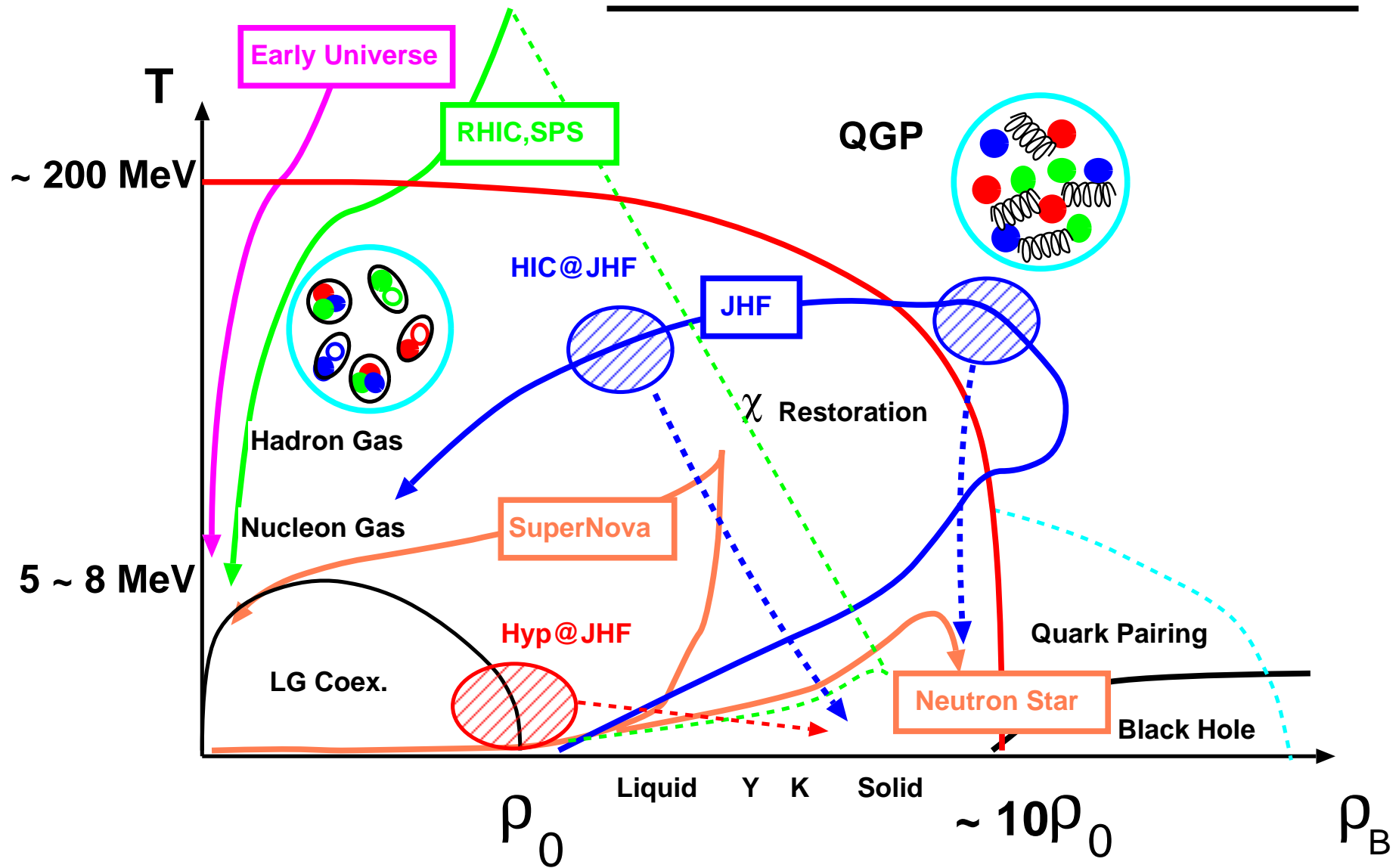
$$\epsilon \frac{DV}{Dt} = -\nabla P \rightarrow V = \int_{path} \nabla P \cdot d\mathbf{r} / \epsilon$$



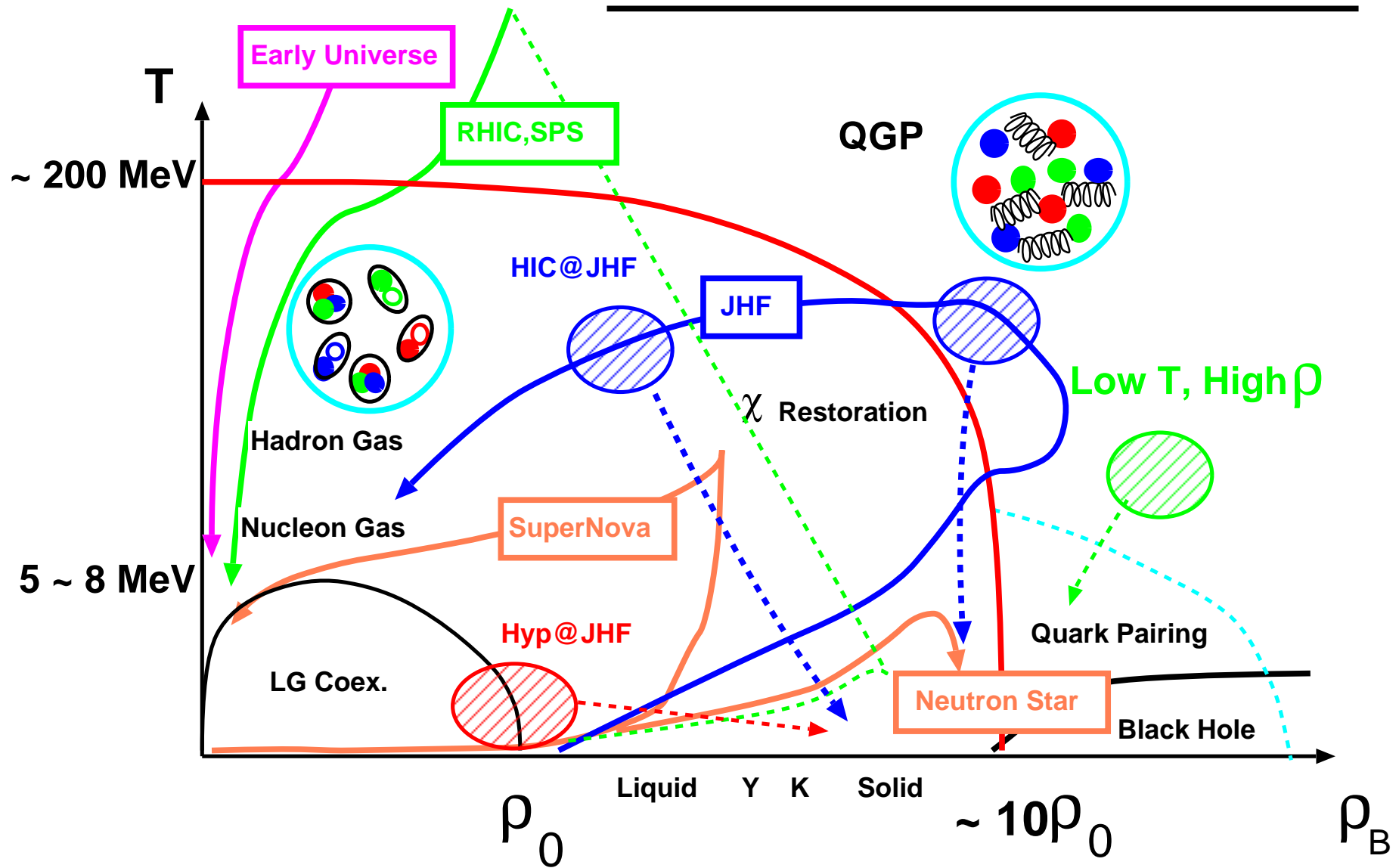
First Local Max. β = Starting Point of QGP Form.



Hadronic Matter Phase Diagram

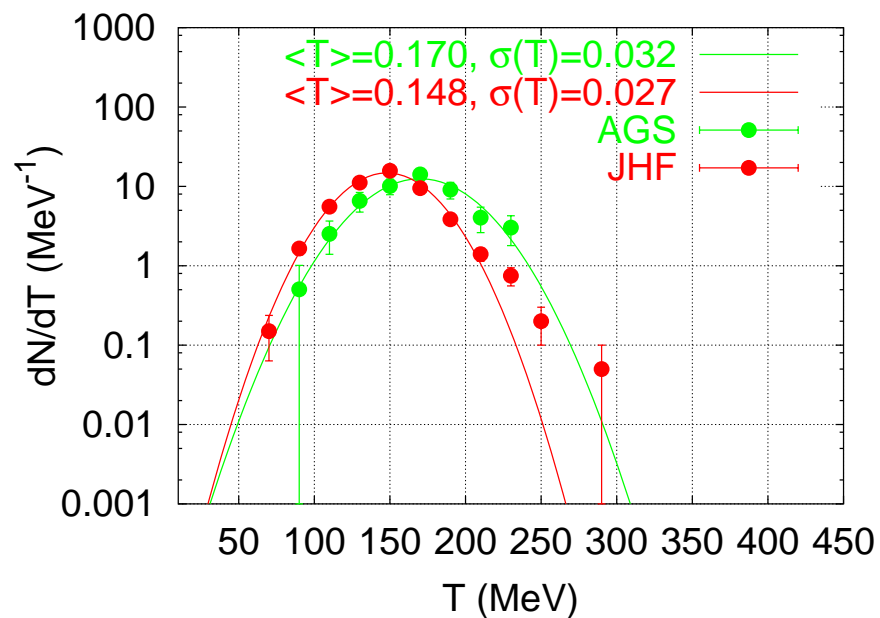
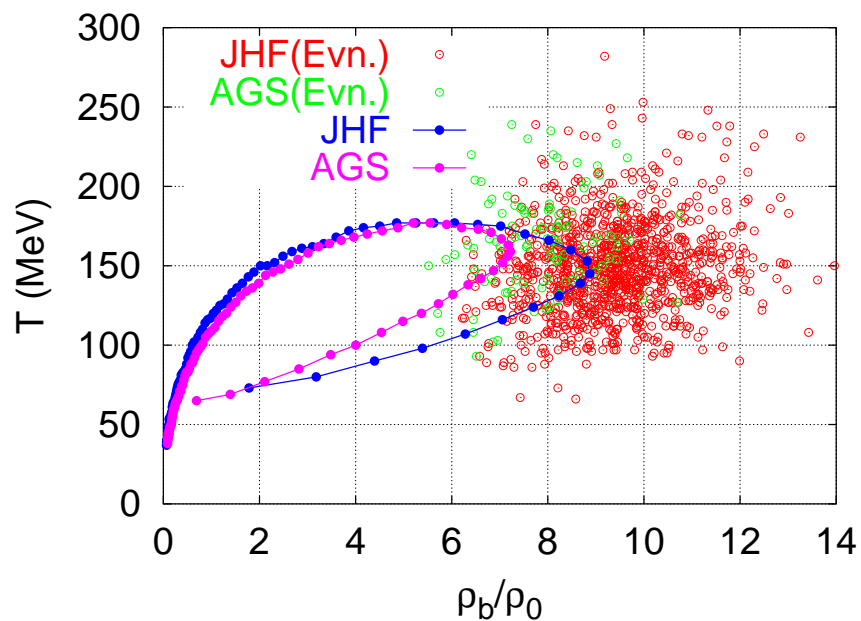


Hadronic Matter Phase Diagram



★ Towards LTHD (Low T & High ρ) Matter

● How Cold Matter we can make in JKJ-50 GeV ?



Finite System Has Fluctuation !

Average: $(\rho_B, T) \sim (9\rho_0, 150\text{MeV}) \rightarrow$ Event Fluctuation: $\sigma(T) \sim 27\text{MeV}$ (JAM)

Events with $T < 50$ MeV at $\rho_B > 5\rho_0 \rightarrow 1/1000 \sim 1/10000$

★ Summary

★ ハドロン物質動力学の現象論的研究

- フラグメント生成
- ハイパー核物理
- 高エネルギー重イオン反応

「状態方程式」、「天体現象」という観点から見ればつながっている。

★ 今後の研究方向

- 現象: Many Subjects to be Attacked...
- 理論: 積み重ねと、より「量子論的」な方向への進展