

# 核反応・超新星爆発時のフラグメント生成

大西 明 (北大理)

## 1. Introduction: Fragment 生成の物理の面白さ

- ★ 核物質の相図: 液相・気相相転移
- ★ GeV 陽子入射反応の重要性

## 2. GeV 陽子入射反応での Fragment 生成

- ★ 物理としての問題: 破碎機構は分かっているか?  
— 奇妙な角分布
- ★ 模型: 輸送模型 + Percolation 模型
- ★ GeV 陽子入射反応でのフラグメント質量数分布
- ★ IMF の角分布

## 3. 超新星爆発時の Fragment 生成

- ★ 元素合成の機構は分かっているか ?
- ★ 核物質の液相・気相相転移を通じた元素生成の可能性
- ★ モデル計算 (1): 相対論的平均場理論
- ★ モデル計算 (2): 統計模型
- ★ 宇宙の Isotope 分布

共同研究者

GeV 陽子入射反応: 平田 雄一 (北大理 → 東大医科学研), 大塚直彦 (北大理), 高田 弘, 千葉 敏 (JAERI), 奈良 寧 (BNL), 仁井田 浩二 (RIST)

超新星爆発: 石塚 知香子 (北大理), 住吉 光介 (沼津高専)

## ★ 様々なハドロン物質の相

= 重イオン物理の最大の目標のひとつ

### ● いかにして相の性質を引き出すか？

- ★ QCD 相転移
- ★ Pairing 相転移
- ★ 共鳴ハドロン物質
- ★ ストレンジ物質
- ★ 液相・気相相転移

...

### ● 液相・気相相転移

Caloric Curve (GSI) の実験結果と Negative Heat Capacity (MSU-GANIL) の実験結果が見事に一致。

問題点：「核物質」の相の情報がどこまで取り出せるか？

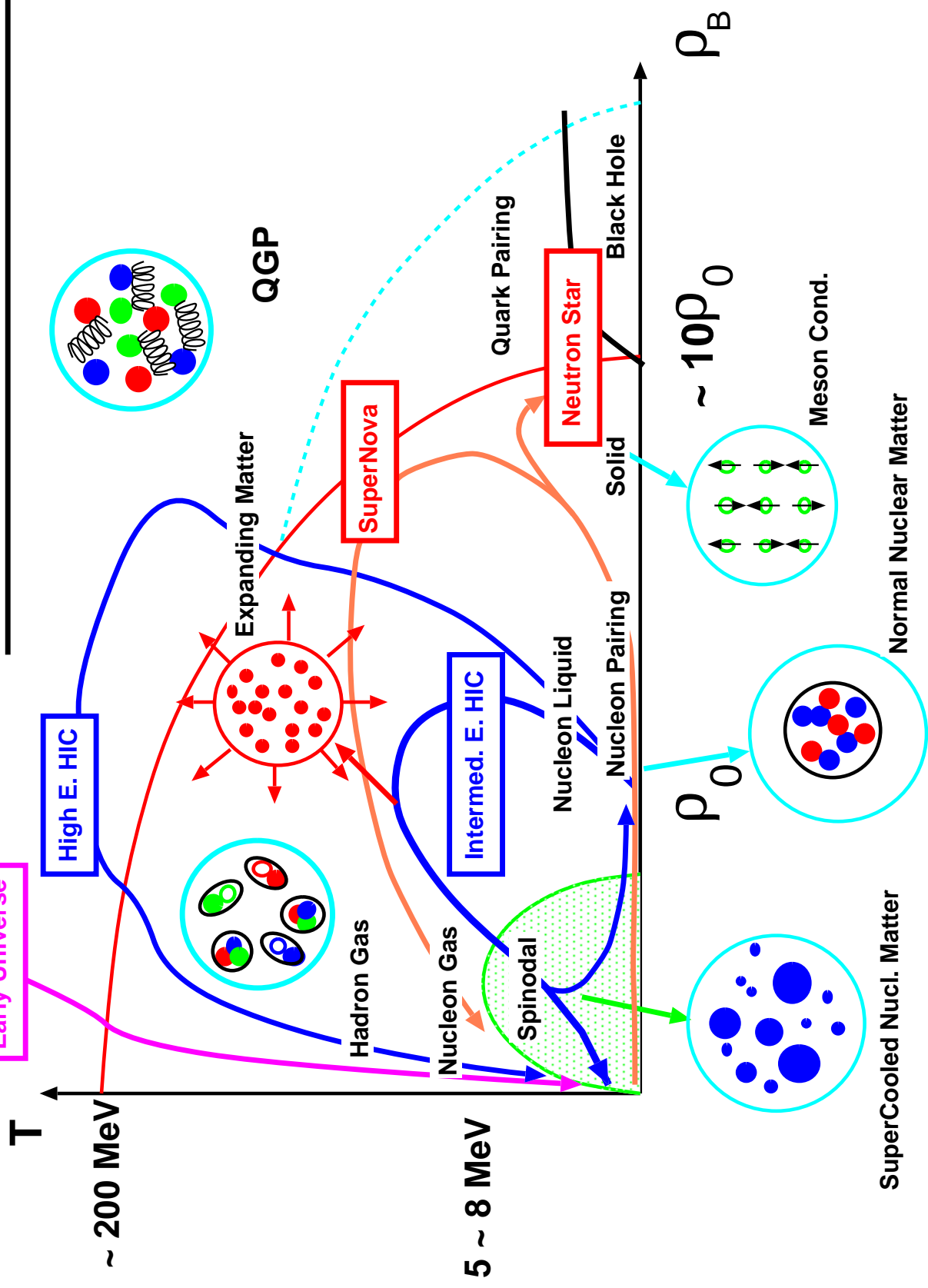
- ★ 重イオン反応：有限サイズ、有限時間、集団運動流（フロー）の効果



より「きれいな」現象は無いか？

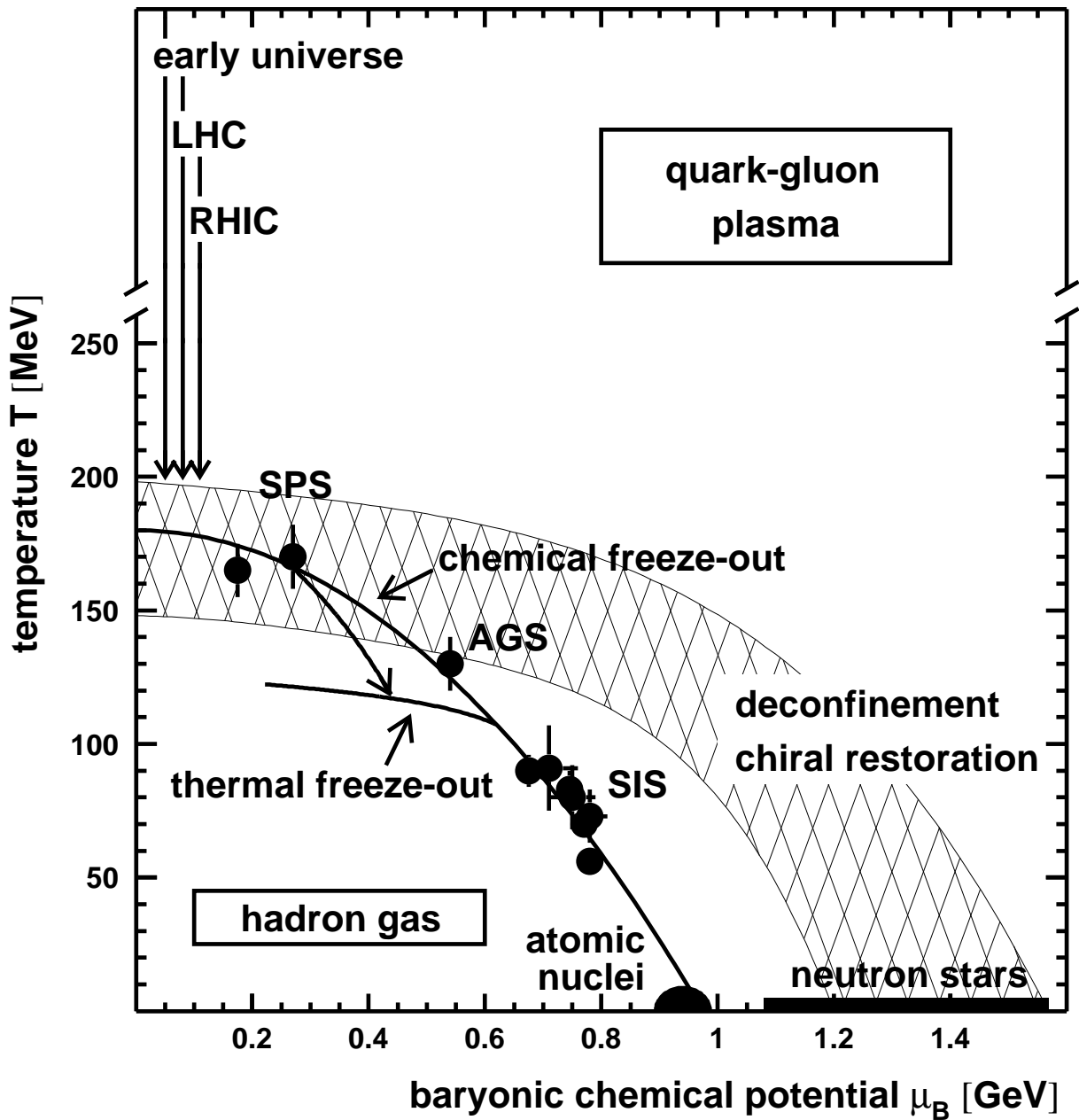
- ★ 高エネルギー軽イオン反応：励起エネルギー大、フローは小さい
- ★ 超新星爆発：実質的に無限系、無限の時間、フロー小

# Hadronic Matter Phase Diagram



# ★ 高エネルギー重イオンでの Freeze Out

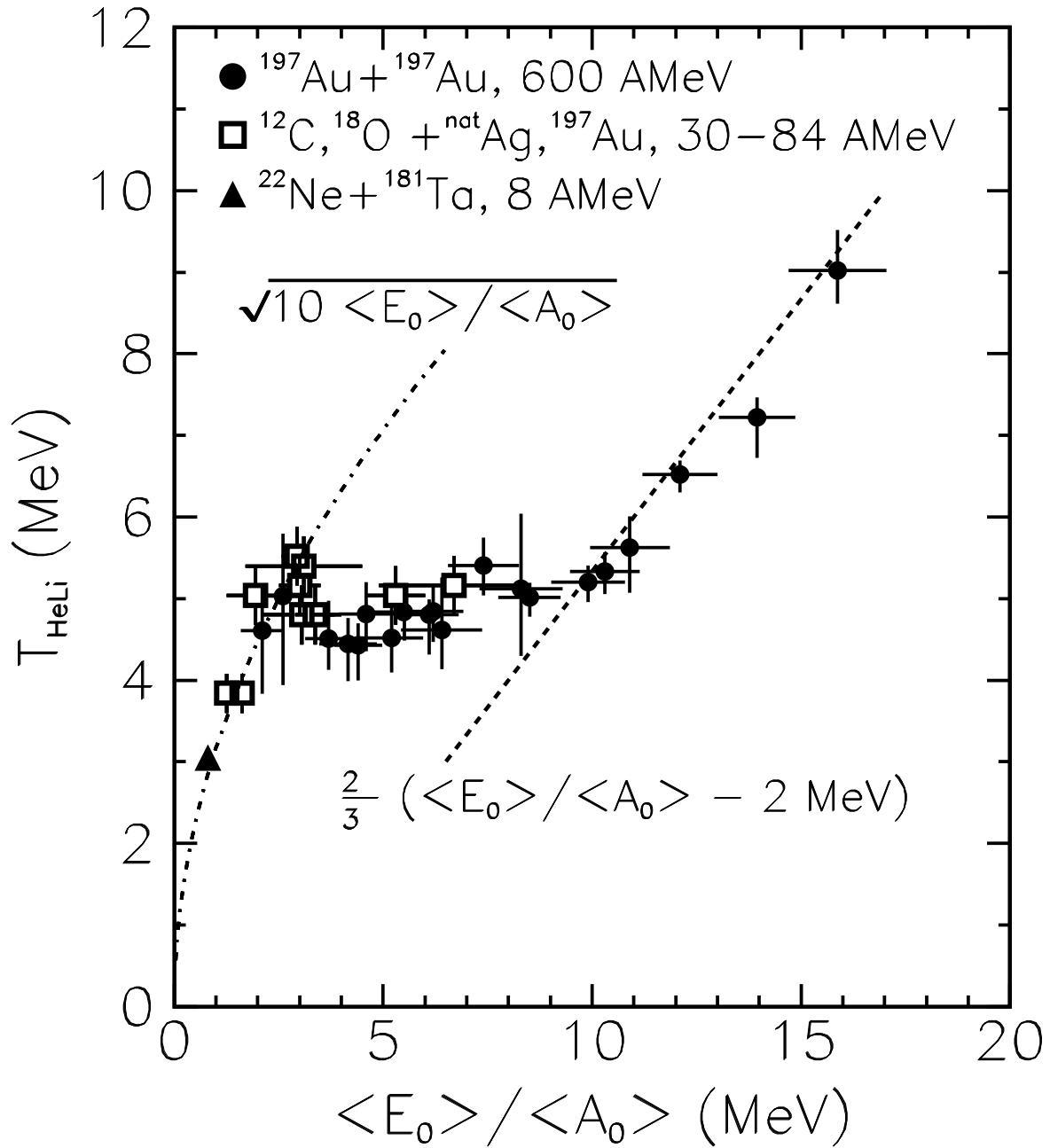
J. Stachel, Proc. of INPC98



$$T_{\text{Thermal}} < T_{\text{Chemical}}$$

# ★ 原子核のカロリ-曲線と液相・気相相転移

J.Pochadzalla et al.(ALADIN Collab.@GSI), PRL75('95),1040.



Low- $T$	$\leftrightarrow$	High- $T$
液体	$\leftrightarrow$	気体
$E^*/A = aT^2$	$\leftrightarrow$	$E^*/A = 1.5T + c$
量子統計的相	$\leftrightarrow$	古典統計的相

## ★ 負の比熱：一次相転移の証拠

M.D'Agostino et al. (MSU-GANIL) PLB473(2000)219

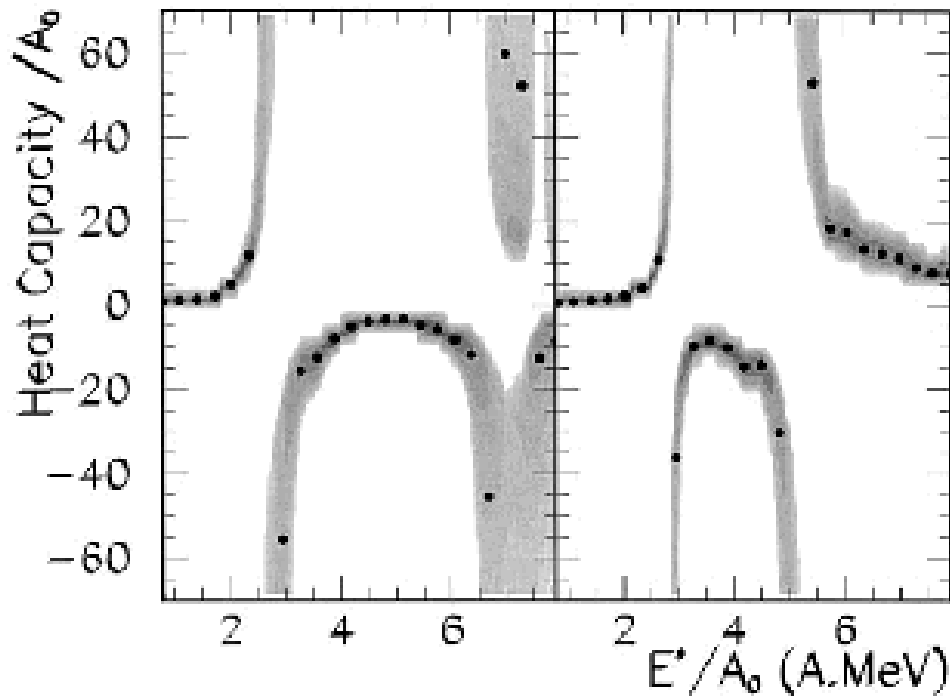


Fig. 4. Heat capacity (solid symbols) per nucleon from Eq. (2). The panel on the left (right) refers to the freeze-out hypothesis I (II). The grey contour indicates the confidence region for  $C_V$  (see text).

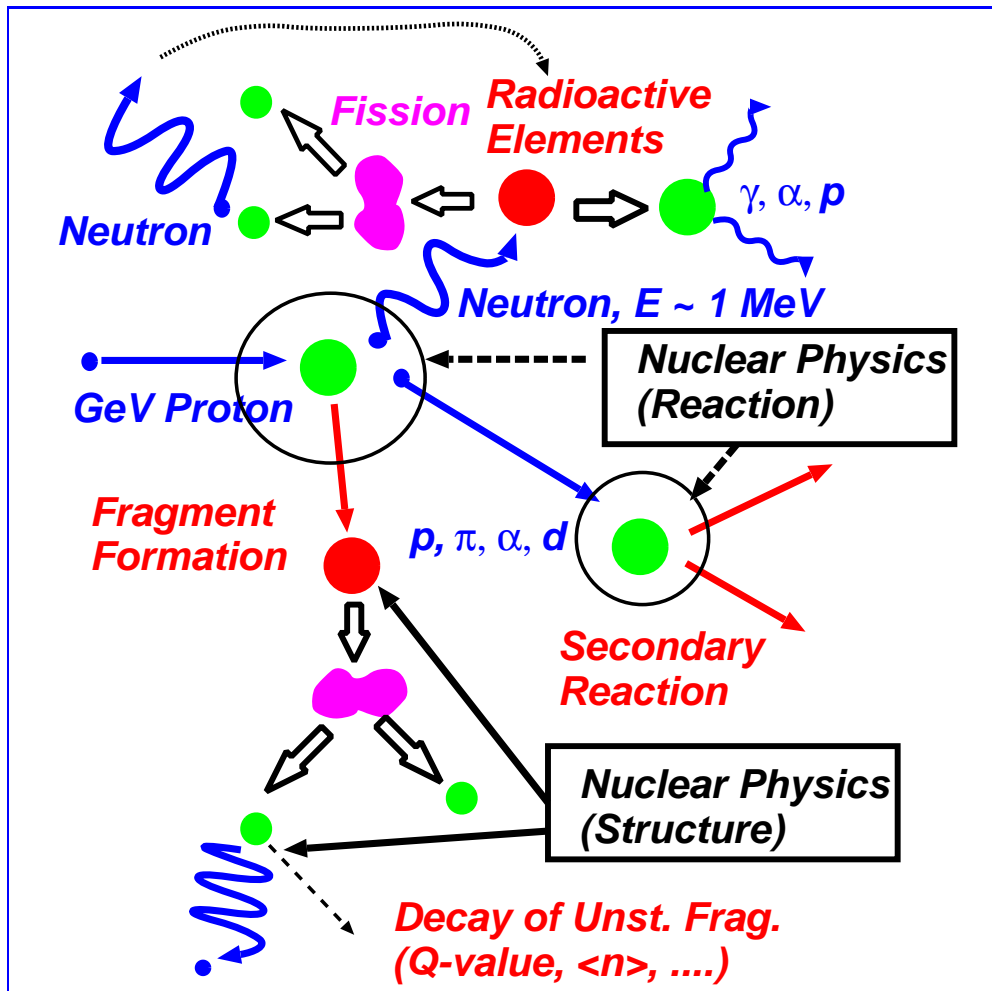
異なるフラグメント配位の共存

- ● 大きなフラグメント + 核子 (B 大、T 大)
- 様々な小さなフラグメント (B 小、T 小)

→ 大きな運動エネルギーの揺らぎ

→ 負の比熱

# ★ 加速器駆動型未臨界炉：原子核物理学の役割



★ 初期核反応 = GeV 陽子による核反応:

→ 原子核物理学、(荷電粒子)核データ

...  $p, n, \alpha, \gamma, \pi, d$ , IMF, 中重核 ... の生成

★ 中性子と熱の輸送: 物性物理学、原子力工学、中性子核データ

★ 高エネルギー二次粒子による反応:

→ 原子核物理学、(荷電粒子 + 中性子)核データ



「核反応のシミュレーション+統計模型」

... 2重微分断面積、フラグメントの生成断面積

## ★ GeV 陽子入射での核破砕: 物理として残っている問題

### ● 核物質の相と Fragment 生成の関連

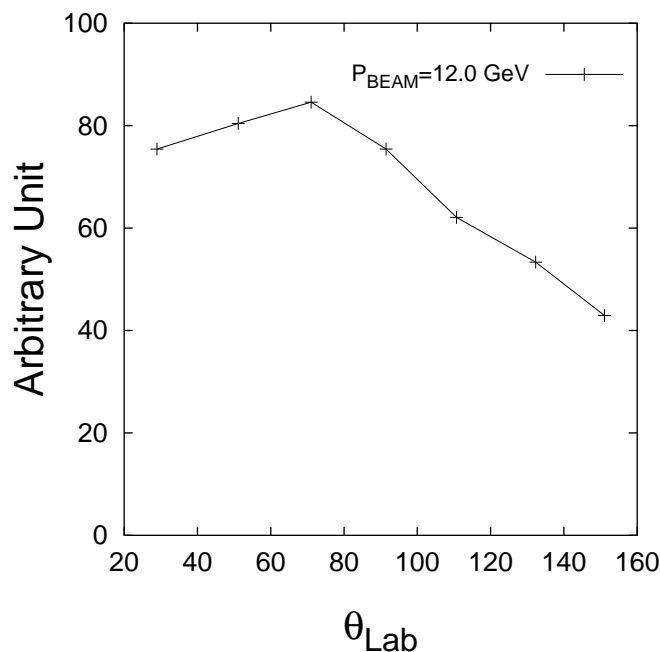
★ 核反応中で何が起こり、どのような経路で Fragment が作られているのか？

### ● IMF 質量数分布

★ V-shape: 励起残留核の従来の統計的崩壊では理解できない。

### ● IMF 角分布: 側方 70° ピーク

p(12GeV)+Au: K.H.Tanaka et al., NPA503(95)581c



★ 励起残留核の従来の統計的崩壊では理解できない。

★ 微視的な説明例なし。

 Why ?

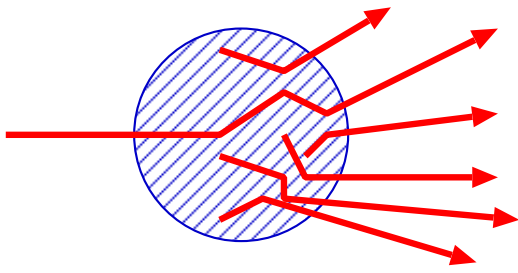
★ GeV領域の高精度な衝突断面積必要

★ フラグメンテーションの記述必要

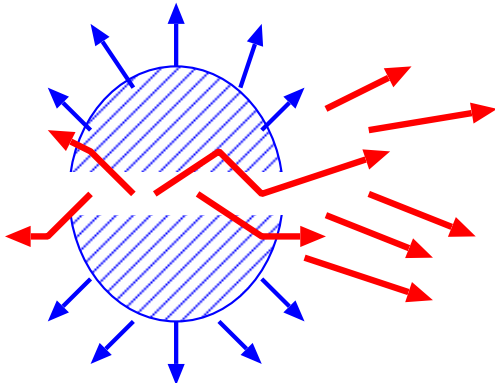


★ GeV 陽子によるフラグメント (原子核) 生成

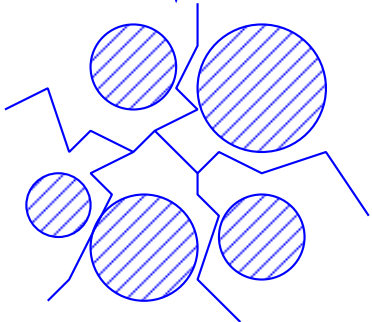
---



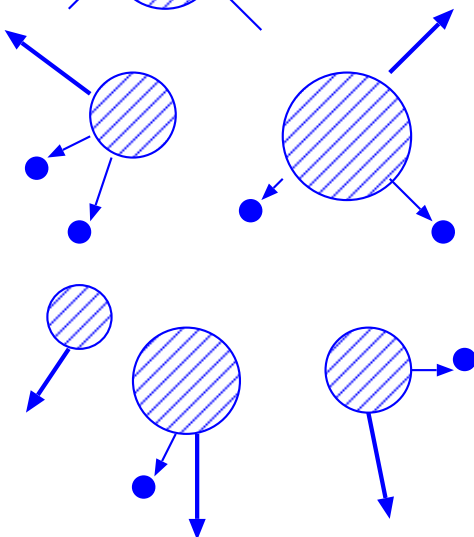
Initial Cascade  
(JAM)



Multiple Scatt.  
+ Mean Field Evol.  
(QMD, Coal.)



Fragmentation  
(Percolation)



Coulomb Expansion  
+ Evaporation  
(Stat. Dec.)

## ● フラグメント生成機構

低励起状態:  $n, \gamma, p, \alpha$  の蒸発 + 核分裂 (統計崩壊模型)

→ 高励起状態: 核破碎反応

→ 高エネルギー軽イオン: Coalescence

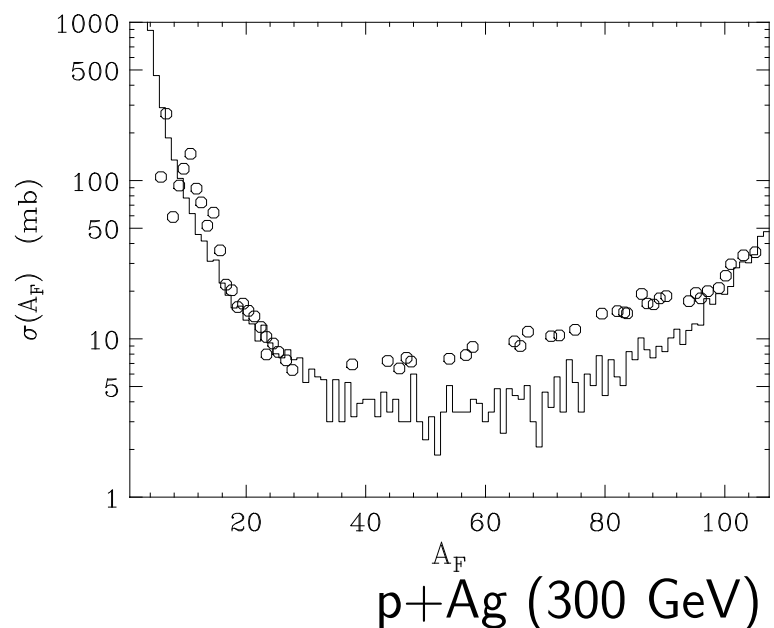
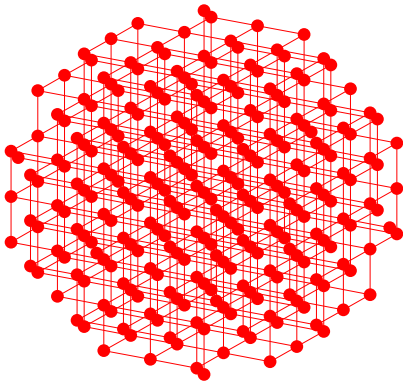
... 位相空間で近い核子 (・フラグメント) の量子力学的融合



GeV 陽子によるフラグメント生成描像の問題は ?

→ 核破碎の部分

## ● Percolation 模型 (Bauer et al., PLB150(85)53.; Bauer PRC38('88)1297)



★ Put Nucleons on Site

★ Give Bond Cut Prob.

★ Connected → Frag.

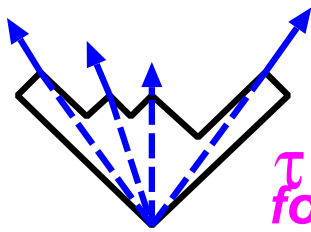


Good Crit. Behavior, IMF Formation

# JAM (Jet Aa Microscopic transport model)

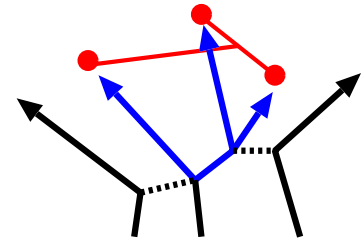
Y. Nara et al., PRC61('00), 024901.

- ★ DOF:  $h(B, B^*, M, M^* (m \leq 2 \text{ GeV})) + s(\text{Strings})$   
+ Partons (at higher energies)
- ★  $\sigma$ : **Hadronic** ( $hh \leftrightarrow hh, hh \leftrightarrow h$ )  
+ **Soft** ( $hh \leftrightarrow s, hh \rightarrow hs, hh \rightarrow ss, s \rightarrow hhh \dots$  [1]  
 $ch \leftrightarrow ch, ch \rightarrow cs$  ( $c = (qq), q, \bar{q}$ ) [2] )

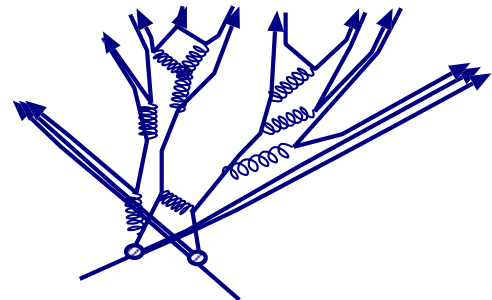


$\tau \sim 1 \text{ fm}/c$   
for  $K \sim 1 \text{ GeV}/\text{fm}$

**Diquark  
Breaking**



**Resonance  
+ String  
+ Jet**



+ Hard (Jet Production, at higher energies) [3]

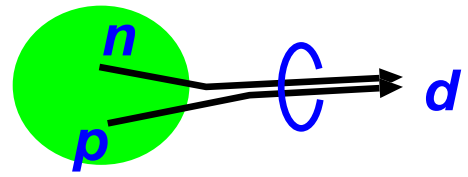
- ★ No Mean Field (in progress), No Medium Modification

- [1] "DPM + Lund" ( $\sim$  HIJING) + Phase Space
- [2] Constituent Rescattering ( $\sim$  RQMD),  $c = (qq), q, \bar{q}$
- [3] Jetset (Pythia)

Version: JAM1.009.27 (April 2000 Version)

● Coalescence 模型

$$\frac{d^3 N}{dp_d^3} = \int d\Gamma_p d\Gamma_n \rho_{pn}^{Wig} P_d$$



$$\rho_{pn}^{Wig} = \sum_{i=pn \text{ pair}} \prod_{\alpha=p,n} (2\pi\hbar)^3 \delta(\vec{x}^\alpha - \vec{x}_i^\alpha) \delta(\vec{p}^\alpha - \vec{p}_i^\alpha)$$

$$P_d = \frac{3}{4} (\text{スピン}) \times \frac{1}{2} (\text{アイソスピン})$$

$$\times |\sqrt{2} \cos \vec{q} \cdot \vec{r}|^2 (\text{パリティ})$$

$$\times \delta(\vec{p}_p + \vec{p}_n - \vec{p}_d) \rho_d^{Wig}(\vec{r}, \vec{q})$$

$$\rho_d^{Wig}(\vec{r}, \vec{q}) = \text{Wigner Transf. of deuteron W.F.}$$

$$\simeq 8 \exp(-r^2/d^2 - d^2 q^2)$$

$\rho_{pn}^{Wig}$ : 陽子と中性子の 2 体密度

(← シミュレーション計算)

$P_d$ : 陽子と中性子が重陽子を作る確率

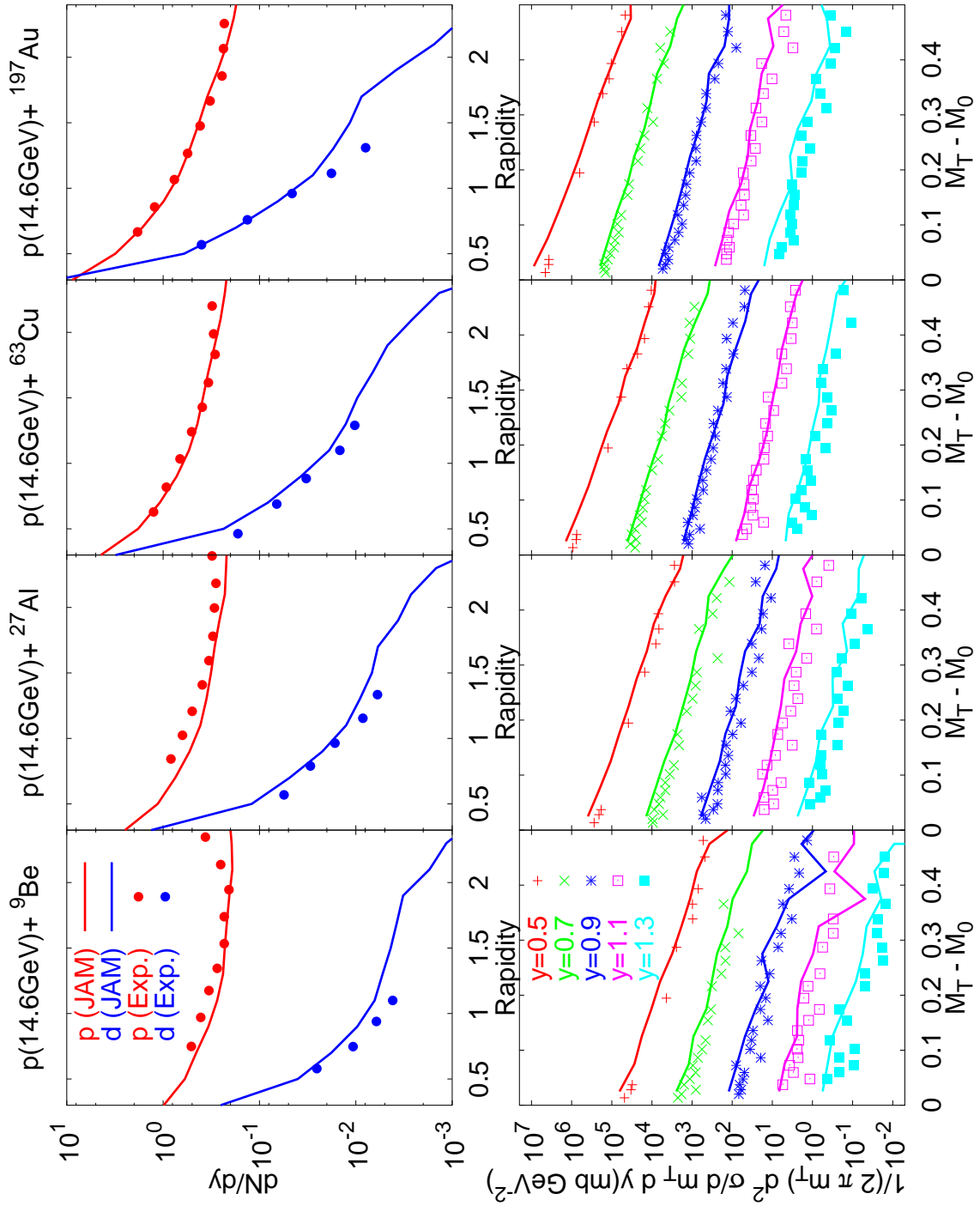


重陽子のサイズを決めれば  $d$  が与えられる

→ No Free Param.

# Coalescence 模型での重陽子生成

(Nagle et al., PRC53('96)367; Hirata, Thesis, in preparation.)

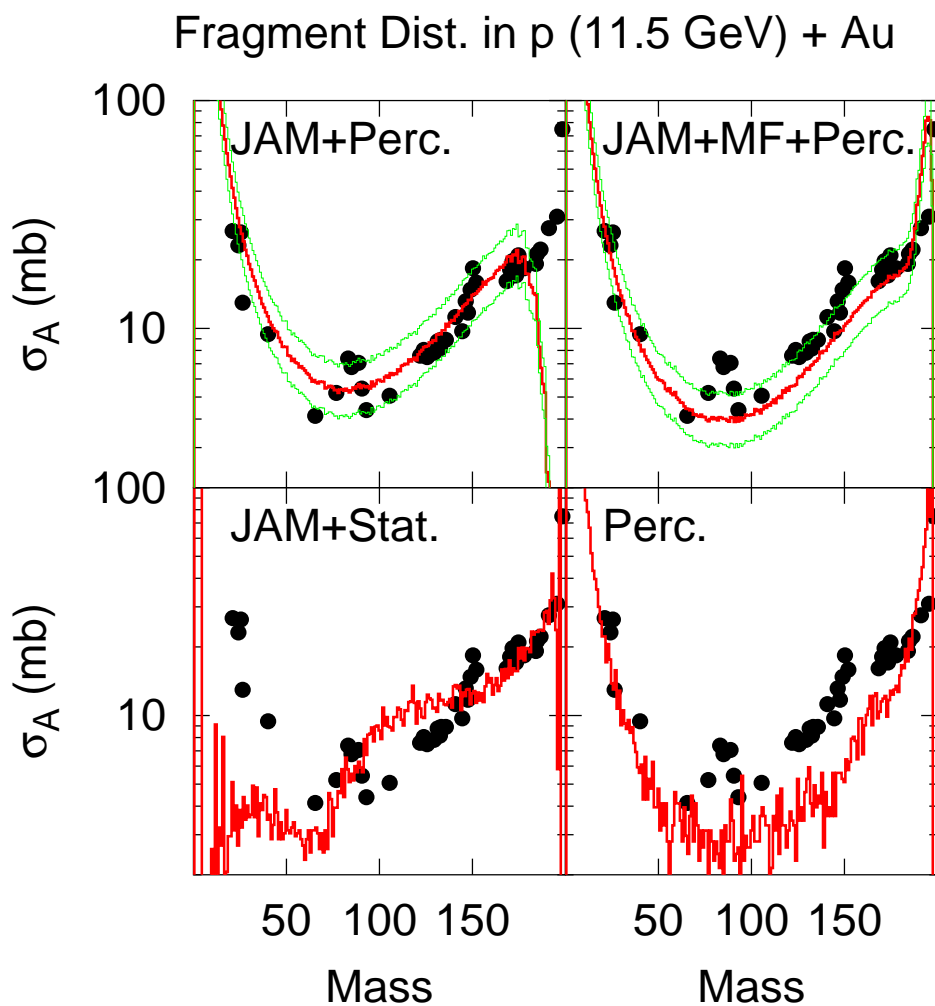


# ★ JAM-QMD + Percolation: — 動力学を反映した多重破碎模型

1. JAM + QMD: Cascade 過程と平均場による発展
2. ある時刻で運動量・位置に依存した確率で Percolation
3. Coulomb Expansion

p (11.5 GeV) + <sup>197</sup>Au でのフラグメント質量分布

(Hirata, Thesis, in preparation.)



励起残留核の Binary 統計崩壊では不十分

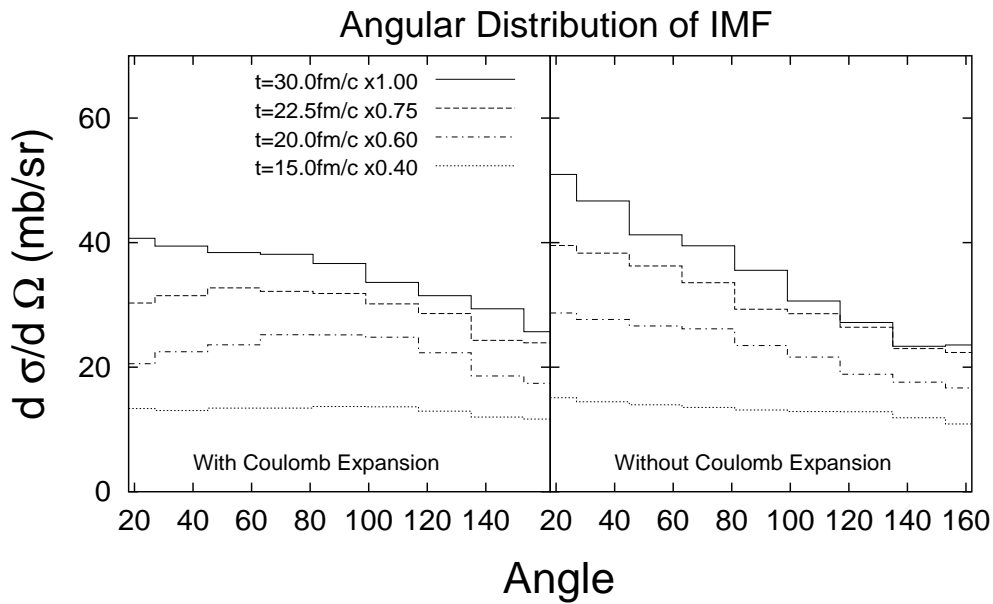
...  $A(\text{IMF}) \ll A(\text{Target})/2$

→ Percolation、動的揺らぎ、統計的多重破碎などの

「破碎促進過程」が必要

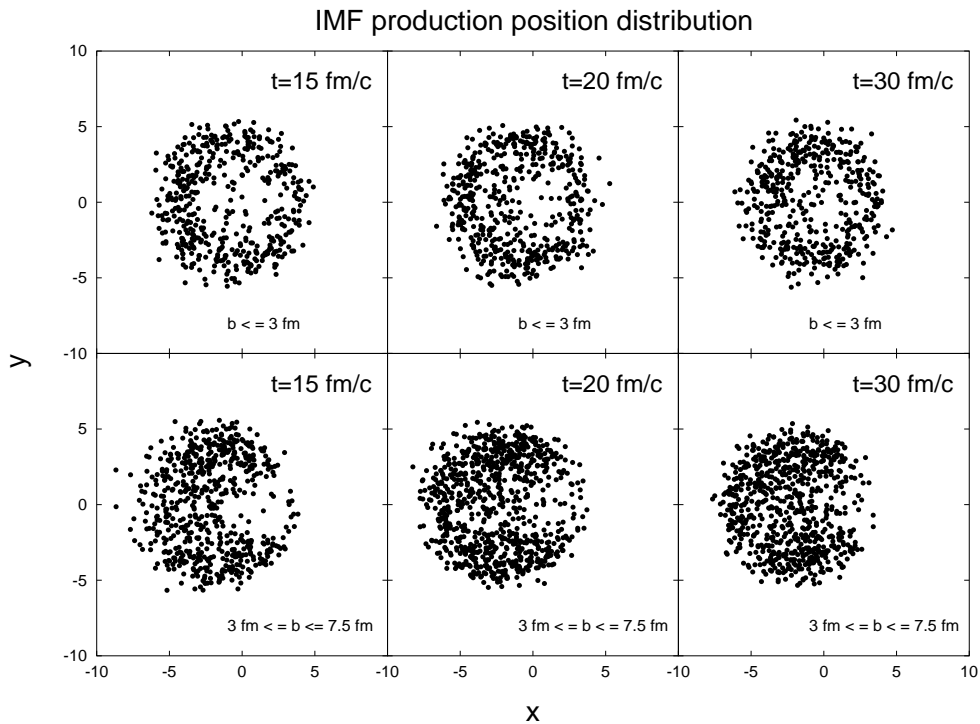
## ★ IMF の角分布

- p (11.5 GeV) +  $^{197}\text{Au}$  でのフラグメント角分布



早い時刻では側方ピーク。Why ?

- IMF 生成点分布の時刻依存性



冷えた部分のドーナツ形状からのクーロン膨張 → 側方ピーク

## ★ まとめ

- ★ GeV 陽子からの核破砕  
... 工学的に必要、物理としてもまだ問題あり。
- ★ カスケード過程  
... JAM は RHIC エネルギーまで大体 OK  
(Fixed target に換算して 20 A TeV 程度まで → 宇宙線も大体 OK)
- ★ フラグメント生成の標準模型: QMD + 統計崩壊 (蒸発 + Fission)  
... 数 GeV を越える陽子入射反応では IMF 生成に問題あり
- ★ JAM-QMD + Percolation  
(動力学を反映した多重破砕模型)  
... 質量数分布、角分布をほぼ ( $\sim$  factor 程度で) 再現
- ★ To Do:  
JAM-QMD + Coalescence + Percolation + Evaporation  
... 全ての時間スケールをカバーできると期待される。
- ★ GeV 陽子入射反応での側方ピークは何だったのか?  
→ ドーナツ型の冷たい領域からの統計的破砕  
(全体としては平衡に達していない。体積よりも形状不安定性。)