

Sept. 24, 2000 @ JPS ADS-Symp.

# GeV 陽子によるフラグメント生成

北大理 大西 明

## 1. 加速器駆動型未臨界炉での原子核物理学の役割

- ★ 核物理から何が必要なのか？
- ★ 「粒子」(ハドロン)と「フラグメント」(原子核)の生成機構— MeV から GeV まで
- ★ 原子核反応のシミュレーション — '90 における発展

## 2. 軽イオン (and/or 重イオン) 反応での「粒子」スペクトル

- ★ ハドロン反応の素過程断面積
- ★ 100 MeV 領域での核子スペクトル
- ★ 1 GeV 領域での核子・粒子スペクトル
- ★ 10 GeV 領域での粒子スペクトル

## 3. 「フラグメント」(原子核) 生成

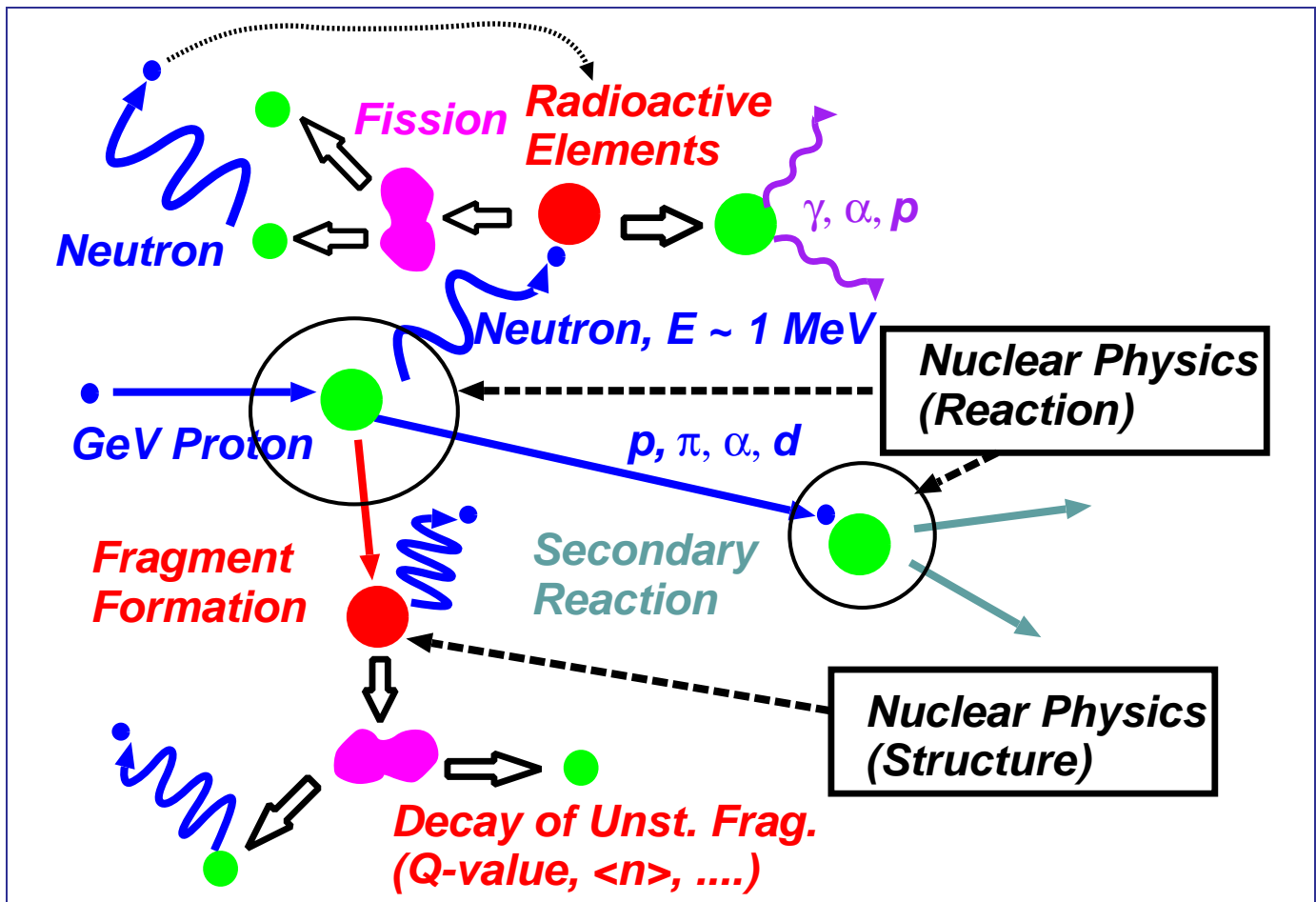
- ★ コアラッセンスモデルでの重陽子生成
- ★ 励起残留核の崩壊
- ★ 破碎過程: V 字型質量分布の理解へ

## 4. まとめ

共同研究者:

平田雄一, 大塚直彦, P.K.Sahu (北大), 奈良寧 (BNL),  
仁井田浩二 (RIST), 千葉敏, 高田弘 (原研),  
Randrup (LBNL), Cassing, Mosel (Giessen)

## ★ 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 (反応)、(荷電粒子) 核反応データ
  - …  $p, n, \alpha, \gamma, \pi, d$ , IMF, 中重核, 短寿命核 … 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 2 次粒子による反応:
  - 原子核物理学 (反応)、(荷電粒子 + 中性子) 核反応データ
- ★ 生成された短寿命核の崩壊: → 原子核物理学 (構造)

## ★ ADS: (核物理から) 何が必要か？

### ● Key Questions

??? 核反応で新たに生成される放射性元素  
 ≪ 2次反応で消滅する(長寿命)放射性元素

??? 取り出せる熱エネルギー  
 > 陽子加速に必要なエネルギー



必要な物理量は...

- 2重微分断面積: .....  $d^2\sigma(Z, N)/d\Omega dE$ 
  - ★ GeV 陽子入射 → 2次反応を起こす Yield の多い粒子  
 $(n, p, \pi, d(?), \alpha(?), \Lambda(?))$
  - ★ 2次粒子入射 → 3次反応を起こす Yield の多い粒子 ( $n$  ?)
- 生成断面積: .....  $\sigma(Z, N)$ 
  - ★ Yield が無視できない長寿命放射性核種  
 $({}^3\text{H}(=t), {}^7\text{Be}, {}^{22}\text{Na}, {}^{99}\text{Tc}, {}^{129}\text{I}, \dots)$
  - ★ マイナーアクチニド (標的核が重い場合)  
 $(\text{MA}; \text{Np}, \text{Am}, \text{Cm}, \dots)$
- 束縛エネルギー・放出中性子数:  $B(Z, N), \langle M_n \rangle$ 
  - ★ Yield が無視できない短寿命放射性核種の崩壊熱
  - ★ (Fission する場合には) 放出中性子数
  - ★ (生成断面積評価に必要な) 準位密度
- × 編極量、粒子相関、Coincidence 量、....

## ★ 評価に必要な「道具」と条件

理想は...

- ★ 系統的実験データ
  - ... 全てが補間できればベスト
- ★ 信頼できる理論
  - ... パラメータ・フリーで全てが予言できればベスト  
(中性子、陽子、 とフラグメントをともに記述する模型)

現時点でのベスト

「現存するデータを再現する現象論による補間」



「核反応のシミュレーション」+「統計模型」が有効

- ... 「平均場内での古典運動方程式 + 確率的衝突」  
+ 「蒸発、分裂...」
- ★ 半古典的 (多段階過程が容易)
- ★ 微視的 (核子、ハドロンのレベルから記述、全ての核種)
- ★ 位相空間輸送理論 (非平衡過程)
- ★ 統計的な崩壊・フラグメント生成  
(精度の高いフラグメント量の記述)

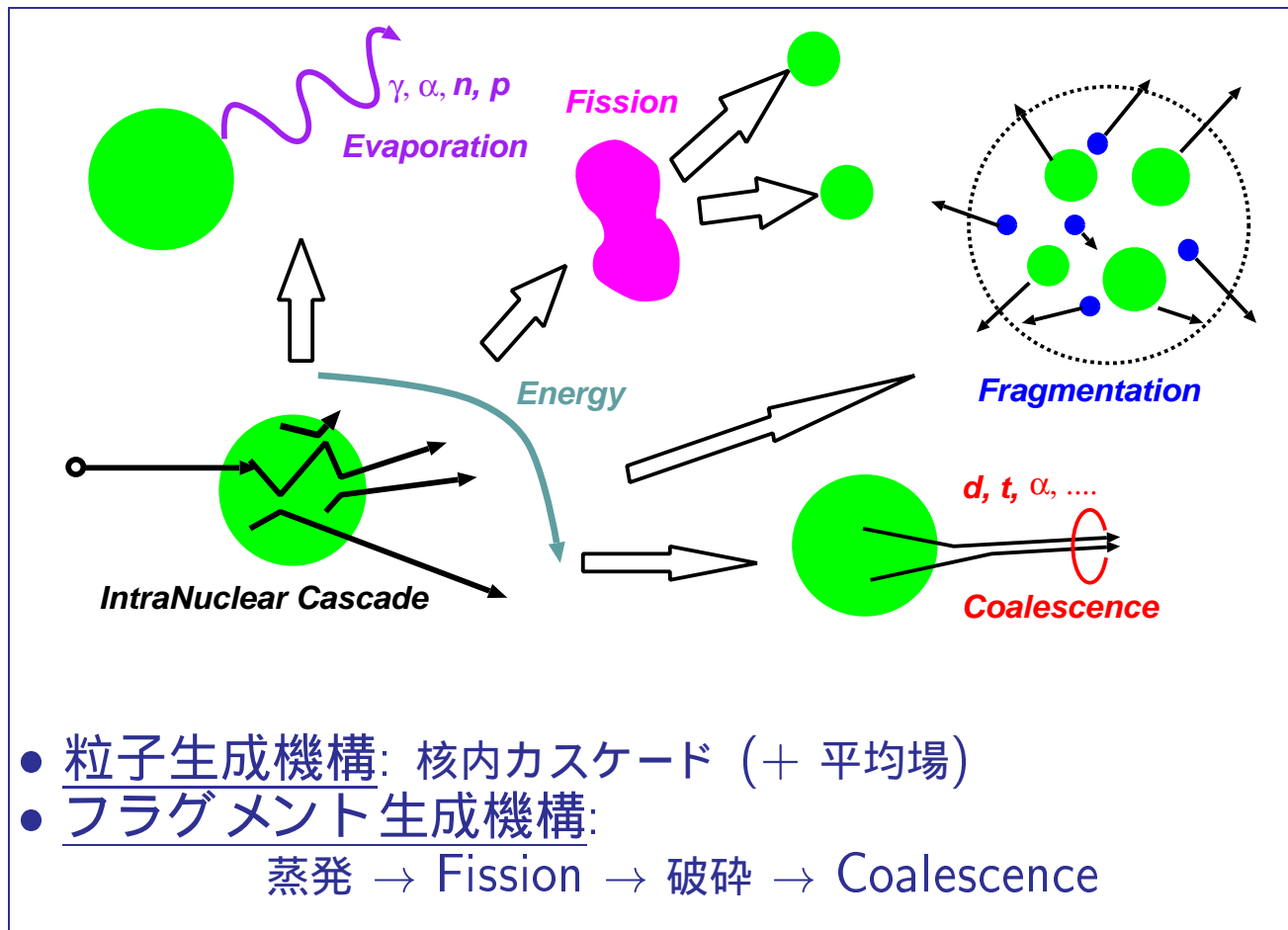
... ハドロン輸送グループ @ 原研先端基礎研究センター  
(1993-1997, 岩本、丸山、千葉、仁井田ら)

in partial support by

京大(堀内ら)、九大(渡辺ら)、広島大、北大、....

# ★ 核反応のシミュレーション: '90 における発展

## ● 原子核反応機構のエネルギー依存性



'70: カスケード模型 (2体衝突)、TDHF (平均場)

'80: BUU 方程式 (2体衝突+平均場), QMD (+フラグメント)

## ● '90 における発展 (工学への応用の観点から)

★ **低エネルギーへの適用**: 初期核の安定化 + 統計崩壊

★ **反対称化分子動力学 (AMD) の開発**:

反対称化 W.F. + 2体衝突

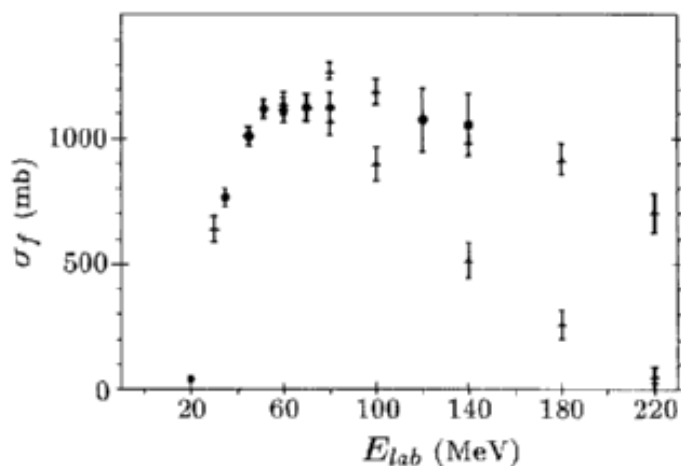
★ **素過程断面積**: 数 10 MeV ~ 数 100 GeV まで

★ **量子論-半古典論対応**: SCDW, QMD, AMD 等の比較

● 低エネルギーの反応へ (Maruyama et al., PRC42('90)386, C45('92)2355)

→ JQMD: Niita et al., PRC52('95)2620; Chiba et al., PRC53('96)1824

★  $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$  の融合断面積 (QMD)



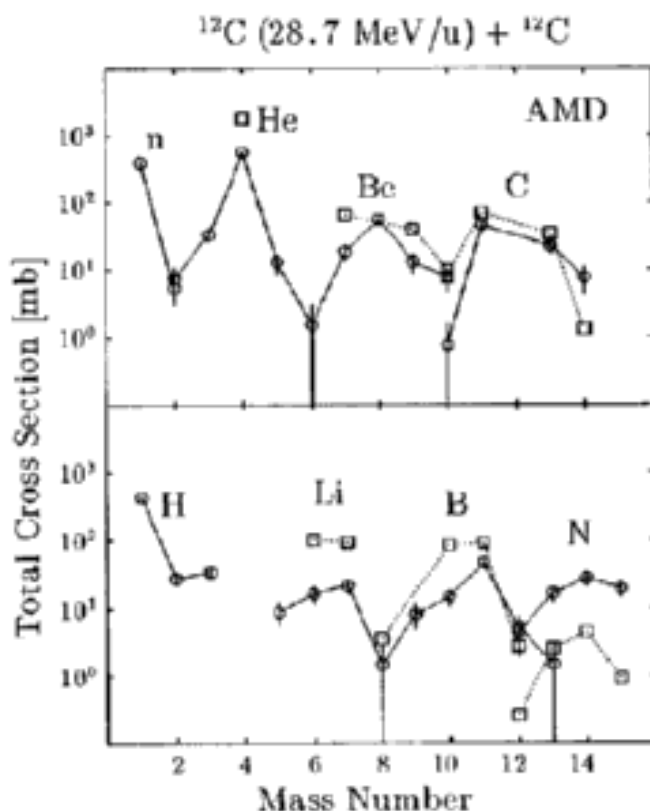
● 反対称化分子動力学 (Ono et al., PRL68('92)2898, PTP87('92)1185)

→ AMD-QL: Hirata et al., PTP102('99)89; Ohnishi et al., PRL75('95)596

→ AMD-V: Ono (et al.), PRC53('96)2958; C59('99)853

→ Tosaka et al., PRC60('99)064613

★  $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$  からのフラグメント生成 (AMD)

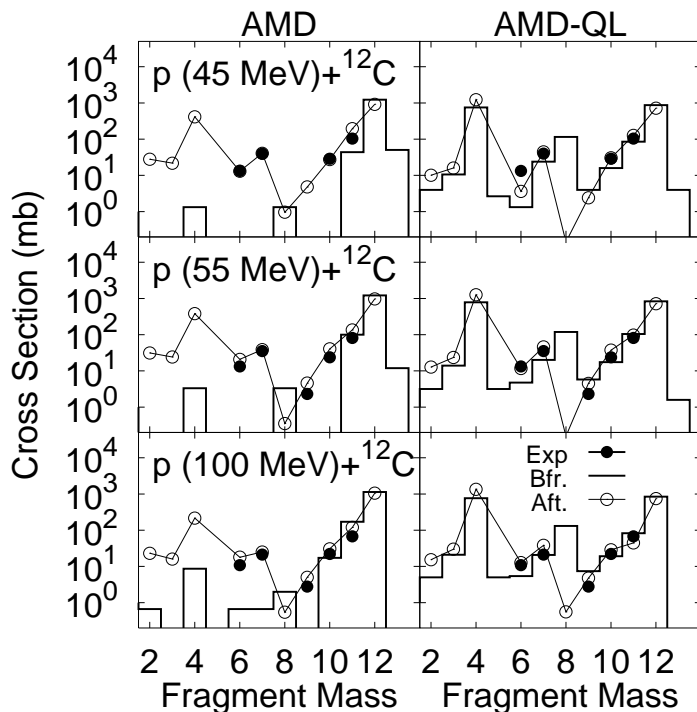


## ● 動力学的な揺らぎの導入

… 動的なフラグメント生成の増加

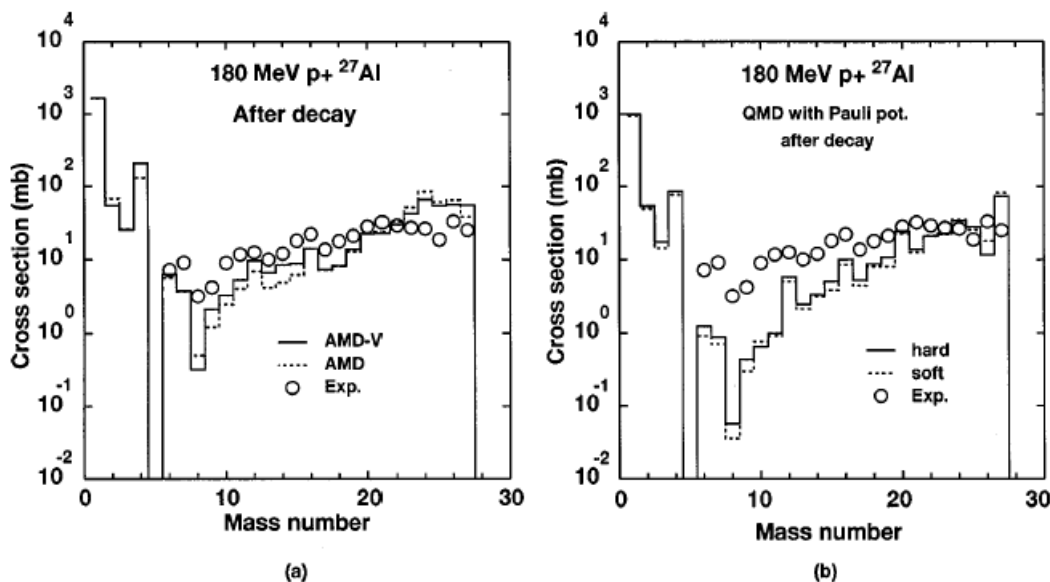
★ AMD-QL:  $p + {}^{12}\text{C}$  反応からのフラグメント生成

(Ref: Hirata et al.,PTP102('99)89)



★ AMD-V:  $p + {}^{27}\text{Al}$  反応からのフラグメント生成

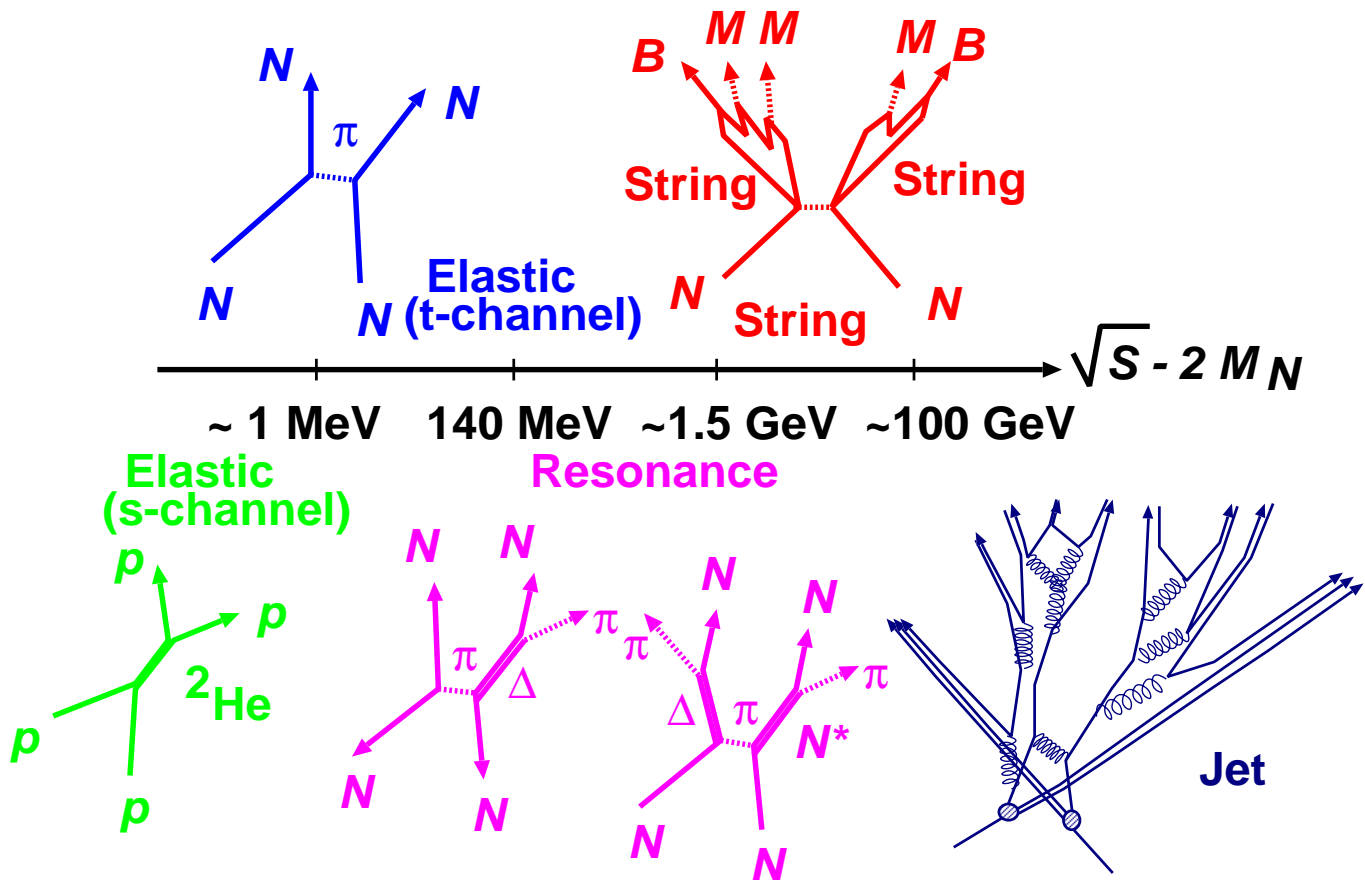
(Tosaka et al., PRC60('99)064613)



# ★ 「粒子」生成核反応のエネルギー依存性

$s$ -channel 反応 (系全体の融合)  
 →  $t$ -channel 反応 (エネルギー・運動量・量子数の交換)  
 → 各構成粒子の反応 + 幾何学

## Energy Dependence of NN Reaction Mechanism

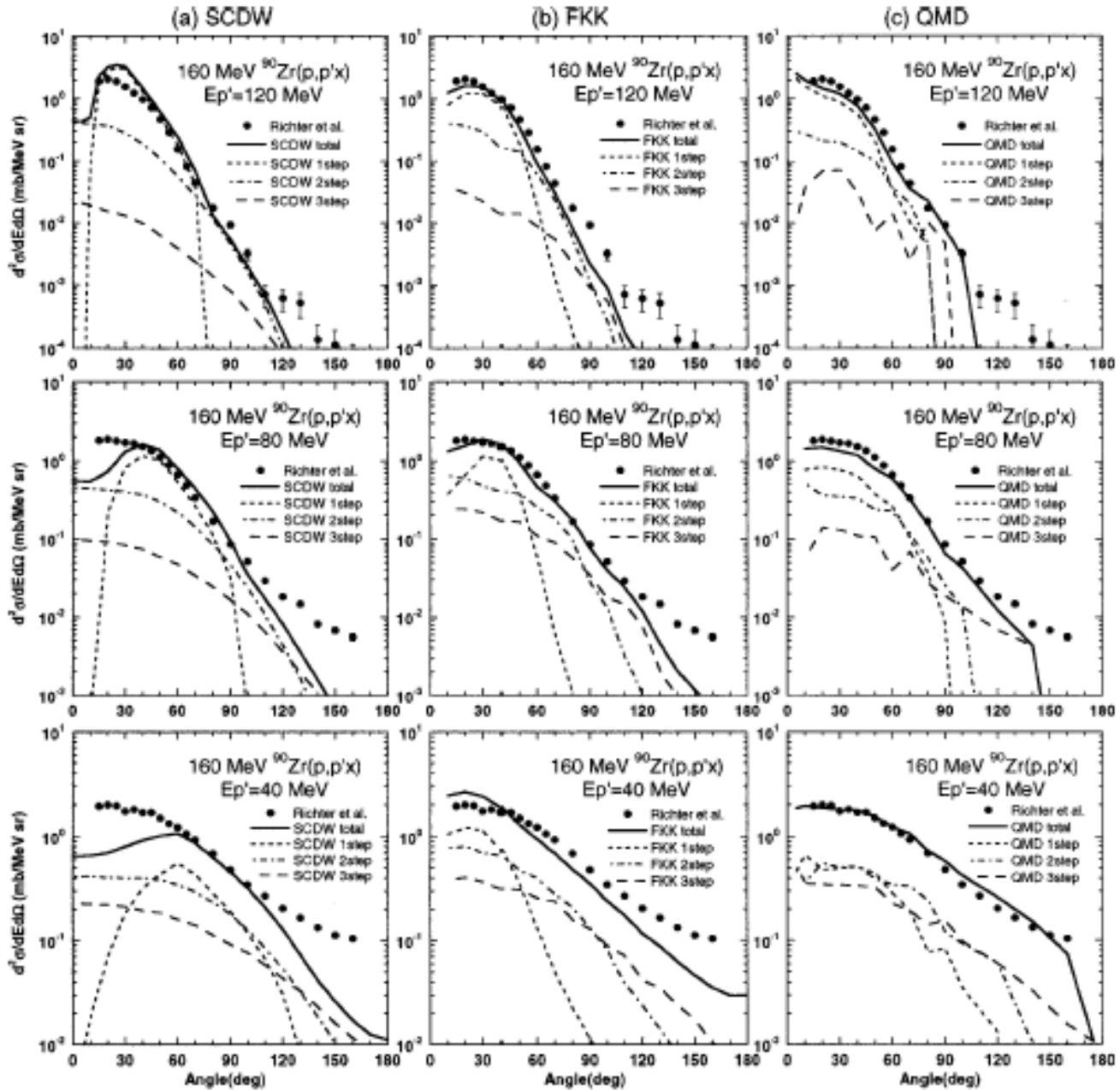




# ★ 核子-核反応: 100 MeV 領域

… 平均場による軌道の変化 ( $\leftrightarrow$  Distorted Wave)  
 + 多段階 2 体衝突 ( $\leftrightarrow$  Impulse)

- 核子スペクトル (SCDW: Watanabe et al., PRC59('99)2136)



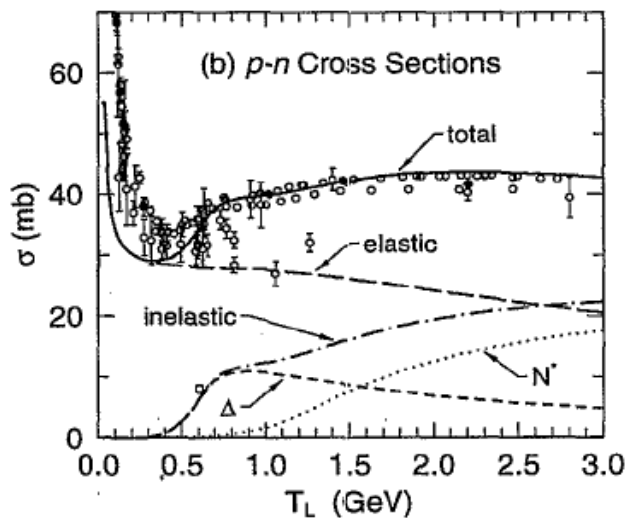
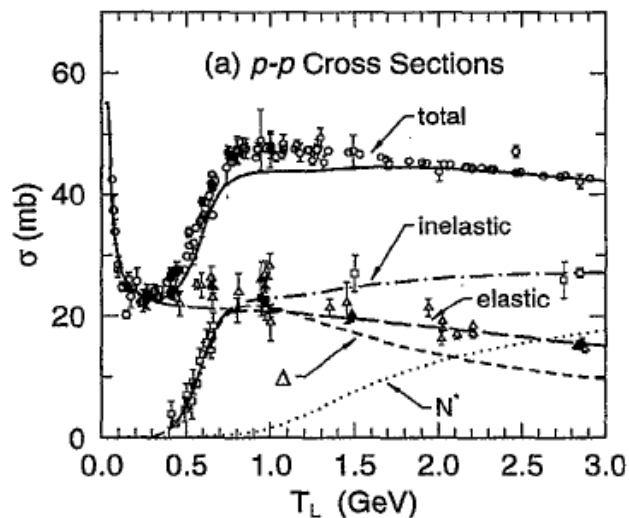
励起エネルギーが比較的大きい場合

→ 「多段階直接反応 ~ 平均場内でのカスケード」

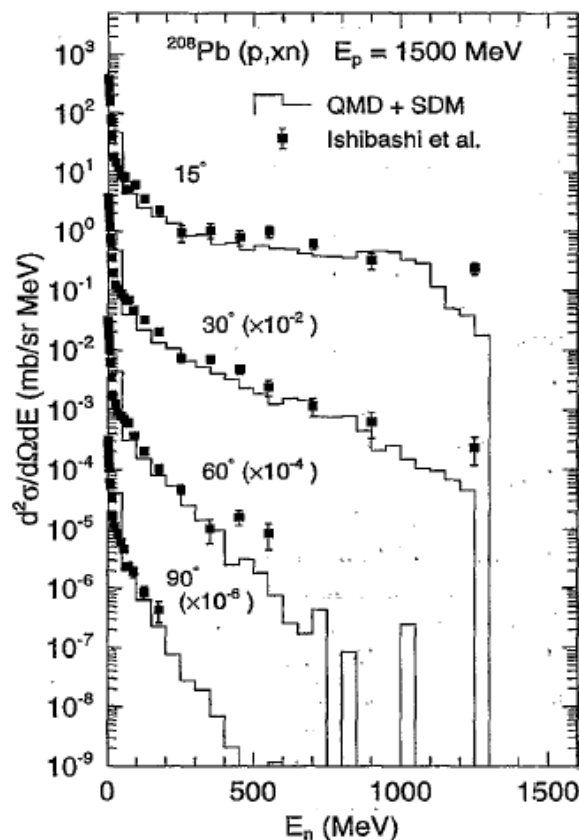
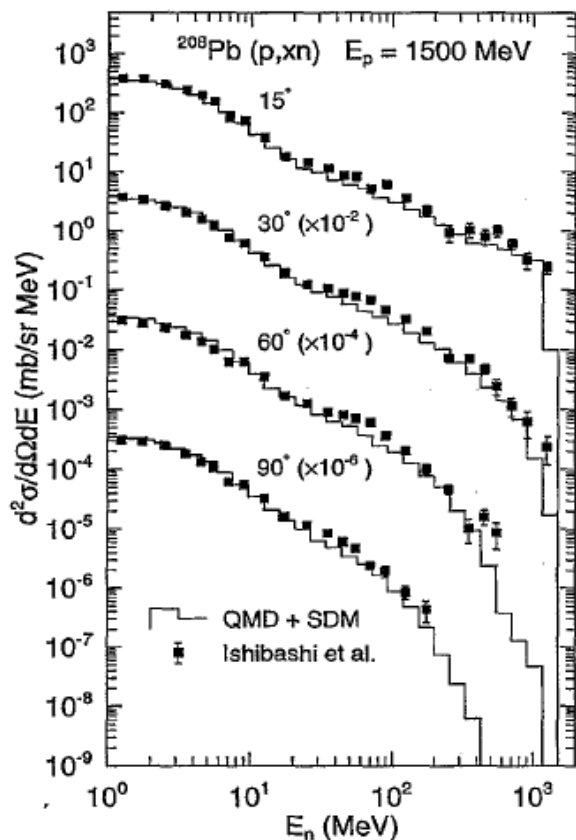
★ **核子-核反応: 1 GeV 領域** JQMD: Niita et al., PRC52('95)2620

… バリオン共鳴状態への励起を通じた粒子生成 (+ 平均場)

● **素過程断面積**



● **核子スペクトル**



# ★ 素過程: 10 GeV 領域

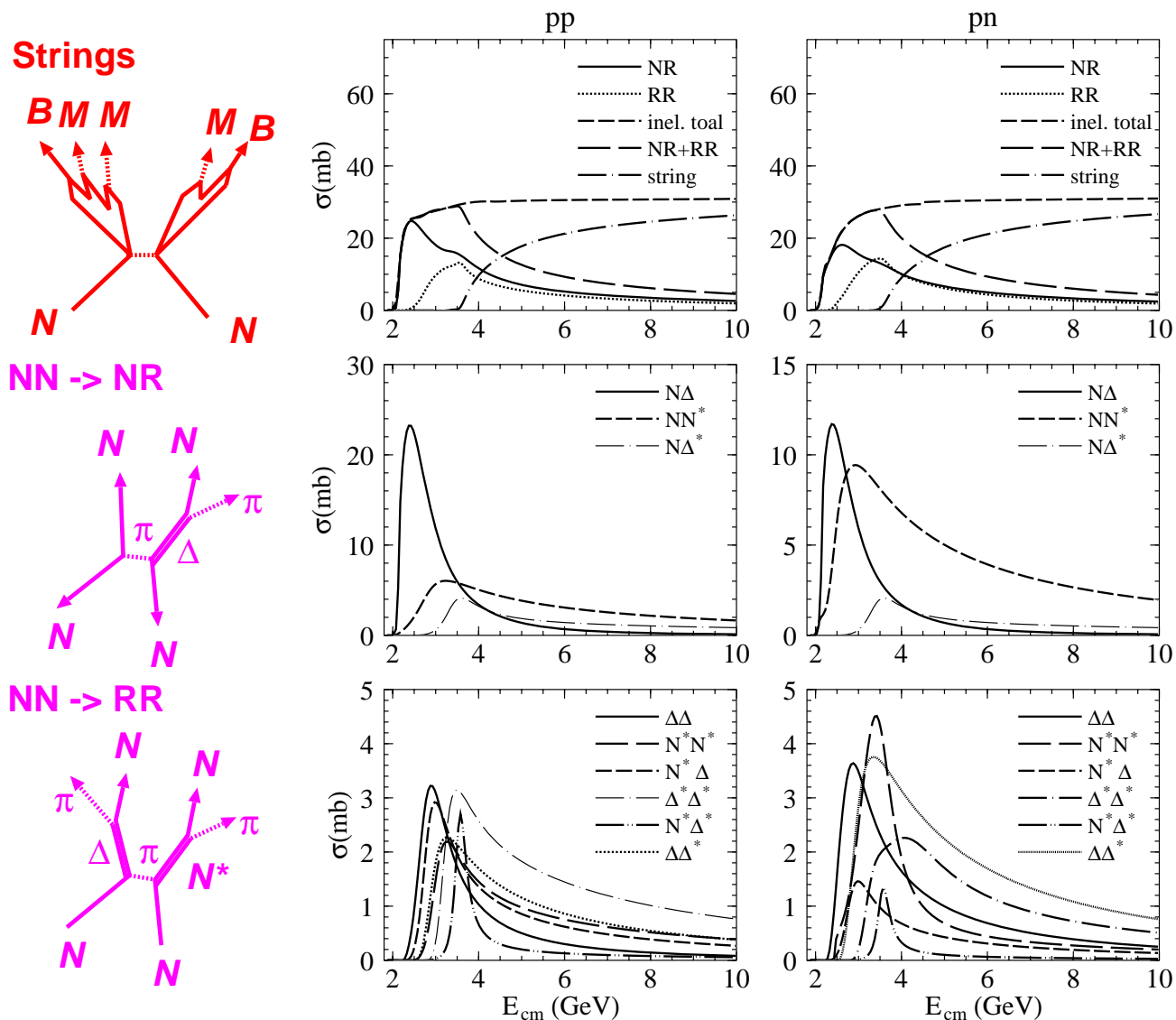
RQMD: Sorge, PRC52('95)3291

→ UrQMD: Bass et al., Prog.Part.Nucl.Phys 42('99),313

→ JAM: Nara et al., PRC61('00)024901, RBUU: Sahu et al., NPAA672('00)376,  
(HANDEL: Otuka et al., in prep.)

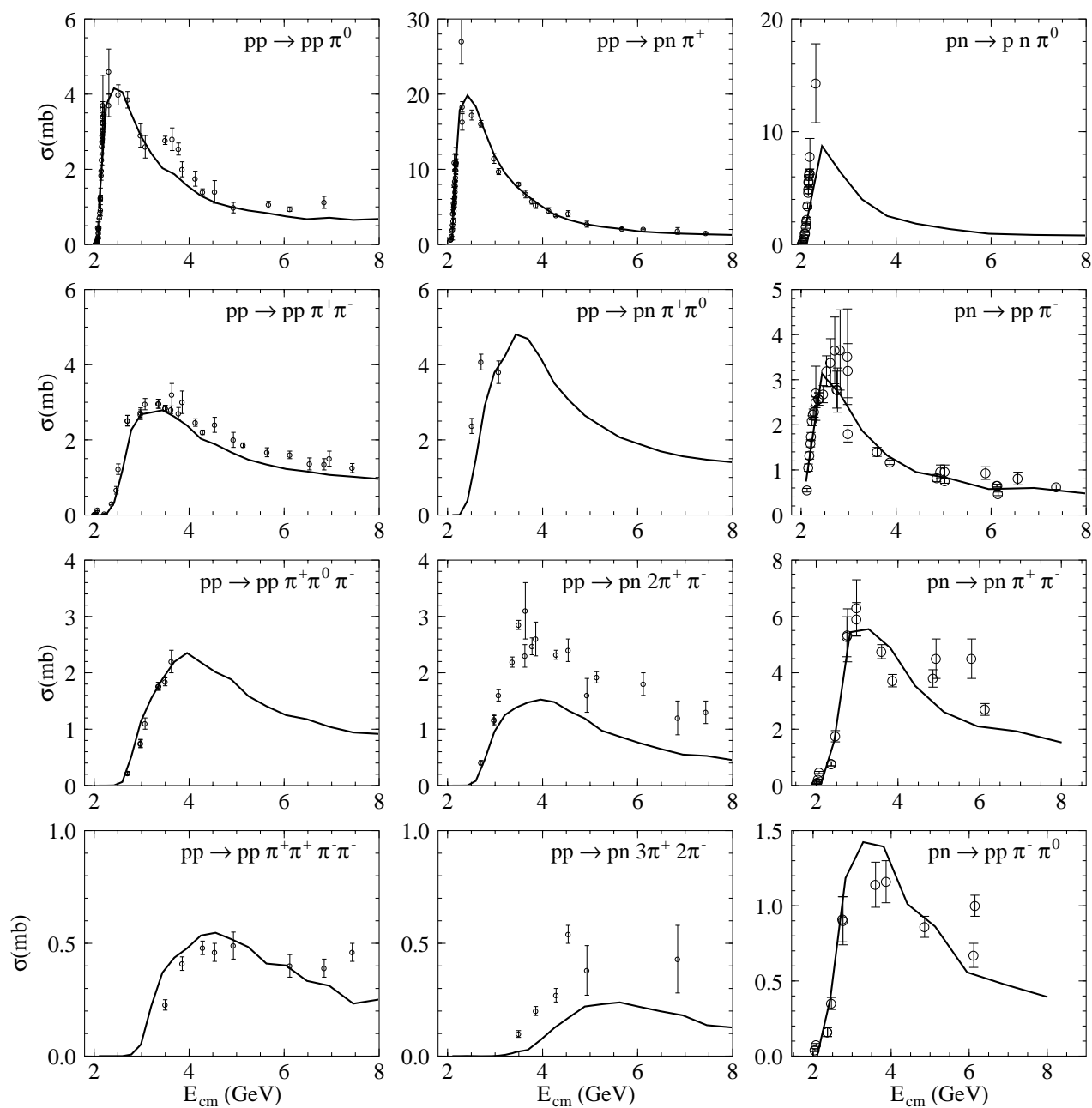
## ● 2 バリオンの同時励起、ストリングの生成

( $NN \rightarrow NR, RR$ , String 断面積 in JAM)



# ● $NN$ , Exclusive 反応断面積

… 4 ~ 5  $\pi$  生成までを Fit 可能

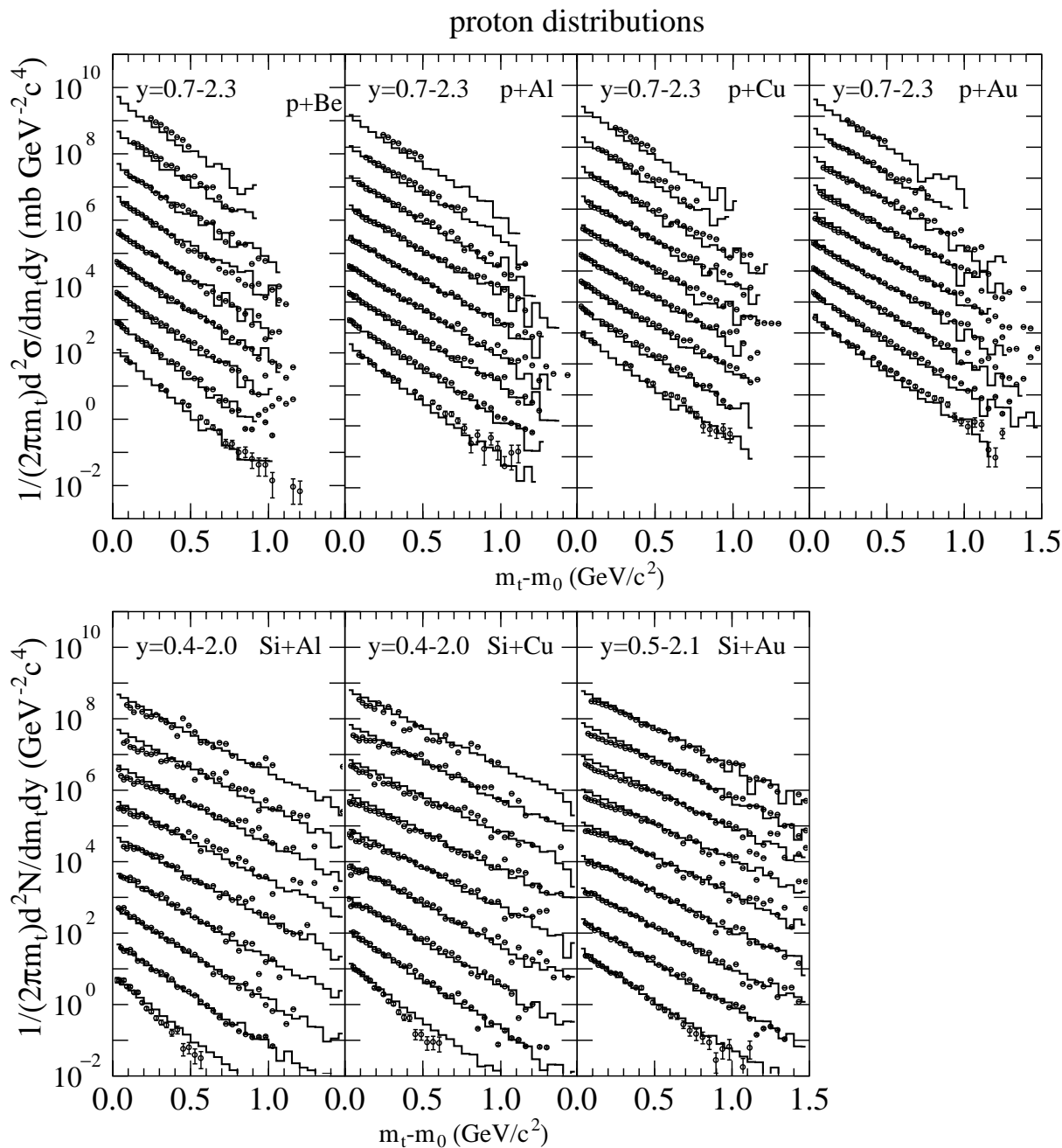


# ★ 核子-核反応: 10 GeV 領域

## ● 核子-核反応: 核子スペクトル

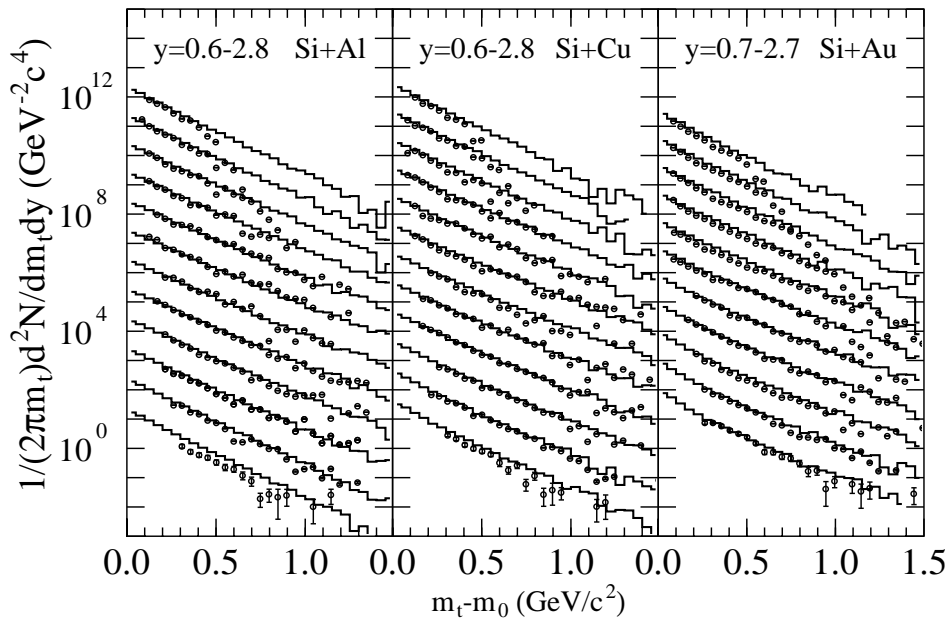
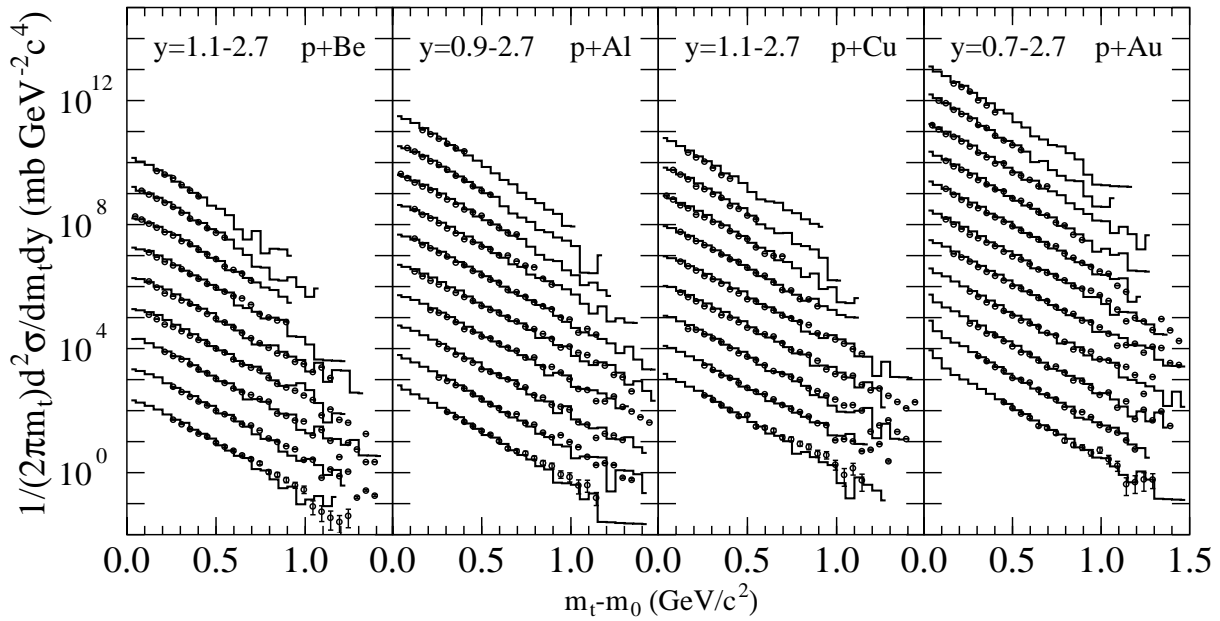
…  $NN, MN$  素過程 + 多段階 2 体衝突

→ 10 ~ 30 % の精度で  $M_T$  スペクトルを再現



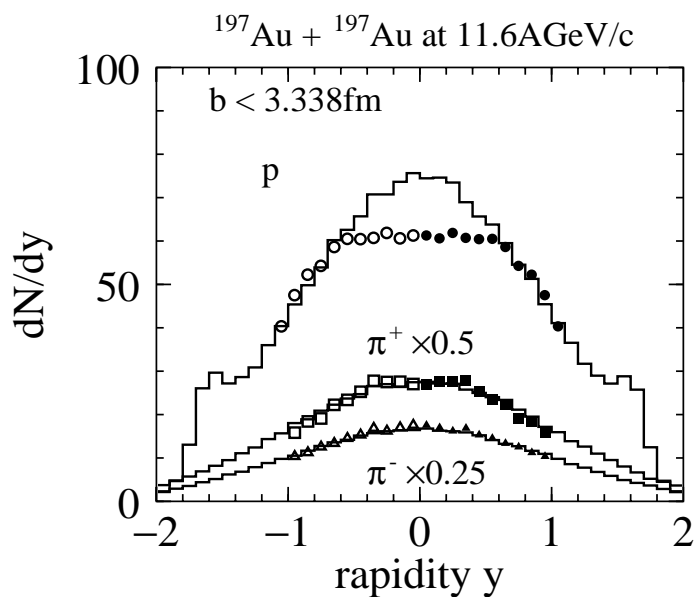
● 核子-核反応:  $\pi$  スペクトル

Negative pion distributions

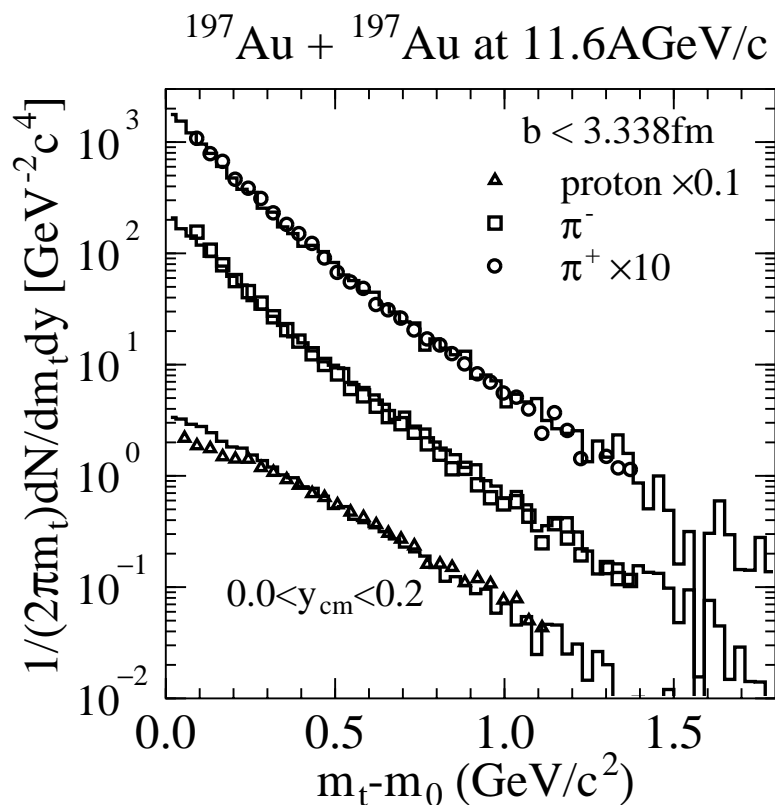


# ★ 相对論的重イオン反応

## ● Au+Au 反応 (AGS): Rapidity 分布



## ● Au+Au 反応 (AGS): $M_T$ 分布



# ★ GeV 陽子によるフラグメント (原子核) 生成

## ● 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)

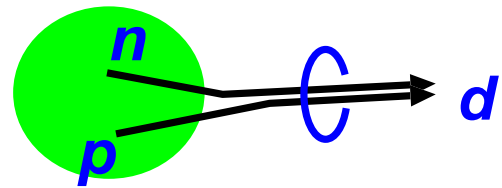
→ 高励起状態: 核破碎反応

→ 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) が量子力学的に融合

## ● 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

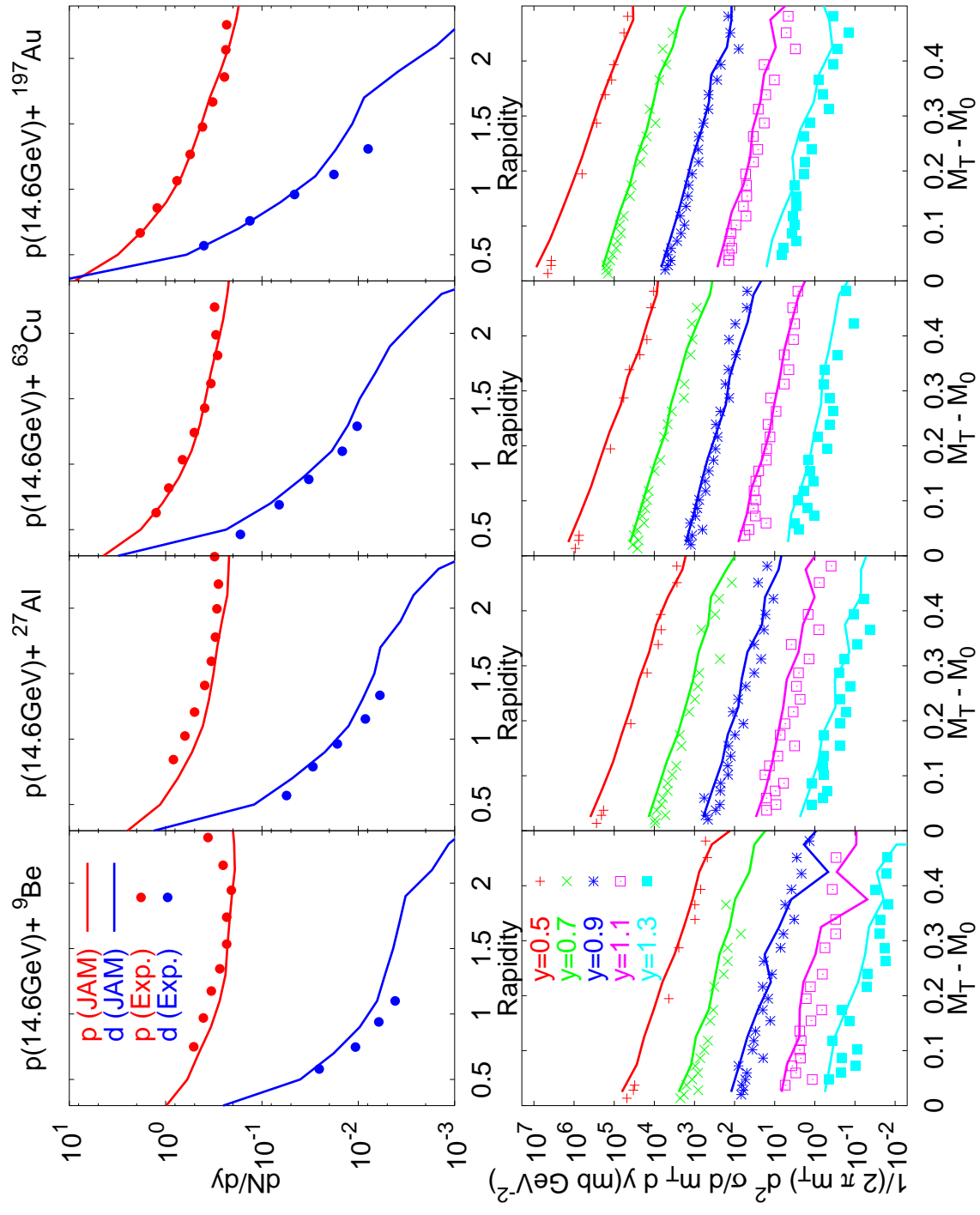


重陽子のサイズを決めれば  $d$  が与えられる  
→ No Free Param.



# Coalescence 模型での重陽子生成

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



## GeV 陽子での重陽子より大きなフラグメント生成

★ 「最良の理論」

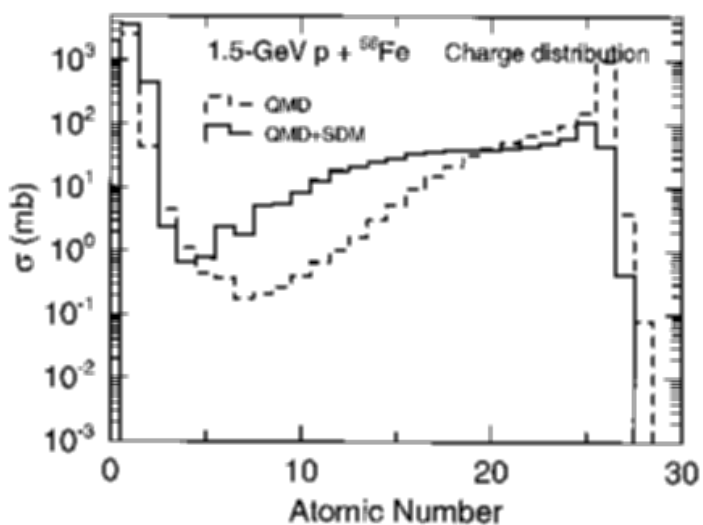
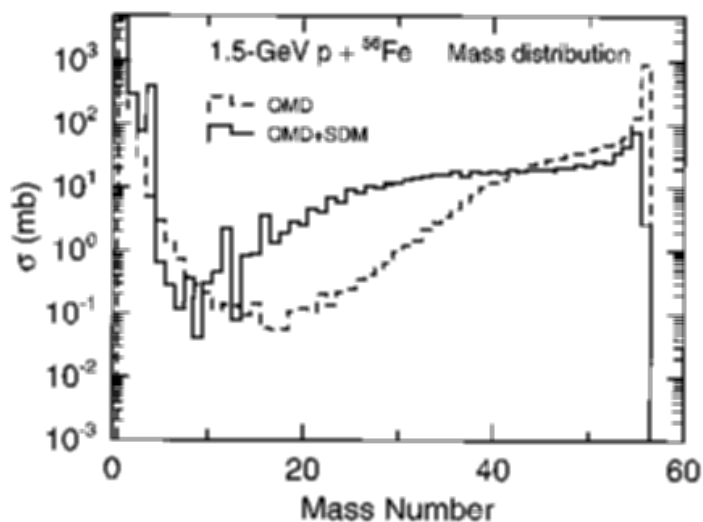
= 様々な素過程 ( $\pi, \Delta, N^* \dots$ ) + 相対論的 AMD

+ 動的揺らぎ (AMD-V or AMD-QL)

... Not Yet Done

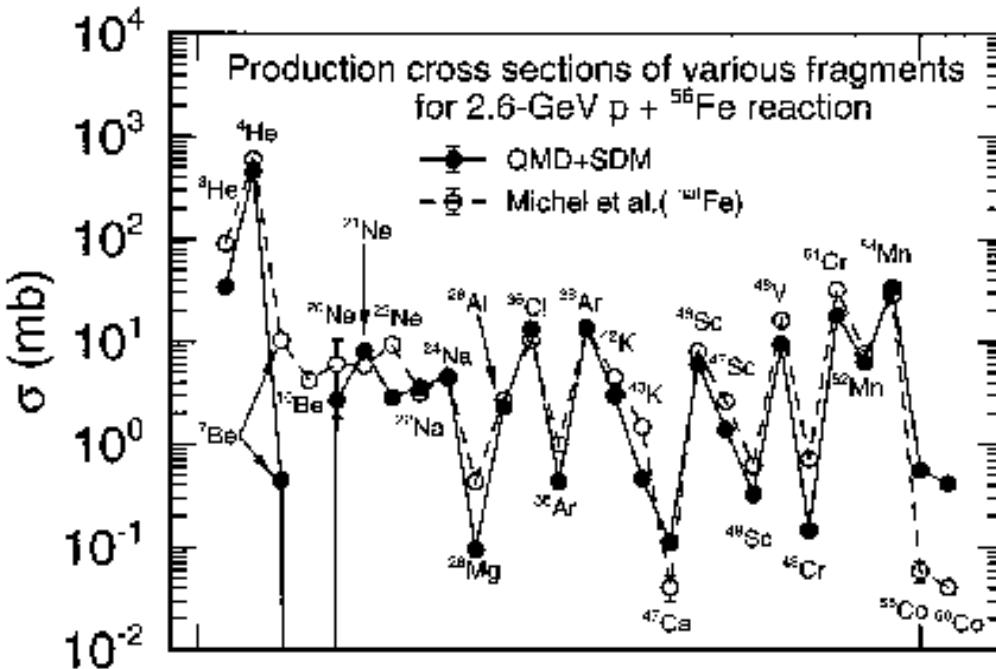
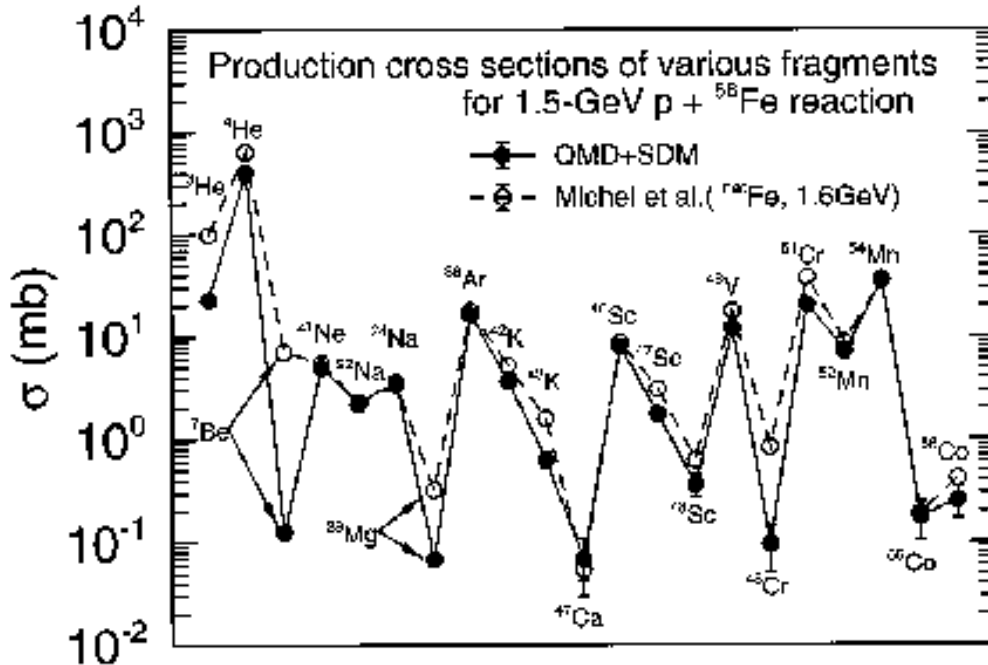
● 「QMD + 統計崩壊 (Binary)」模型 (Chiba et al., PRC54('96)285.)

p (1.5, 2.6 GeV) +  $^{56}\text{Fe}$  → Fragments



主なフラグメント生成機構 = 励起した残留核の崩壊

# Isotope Distribution



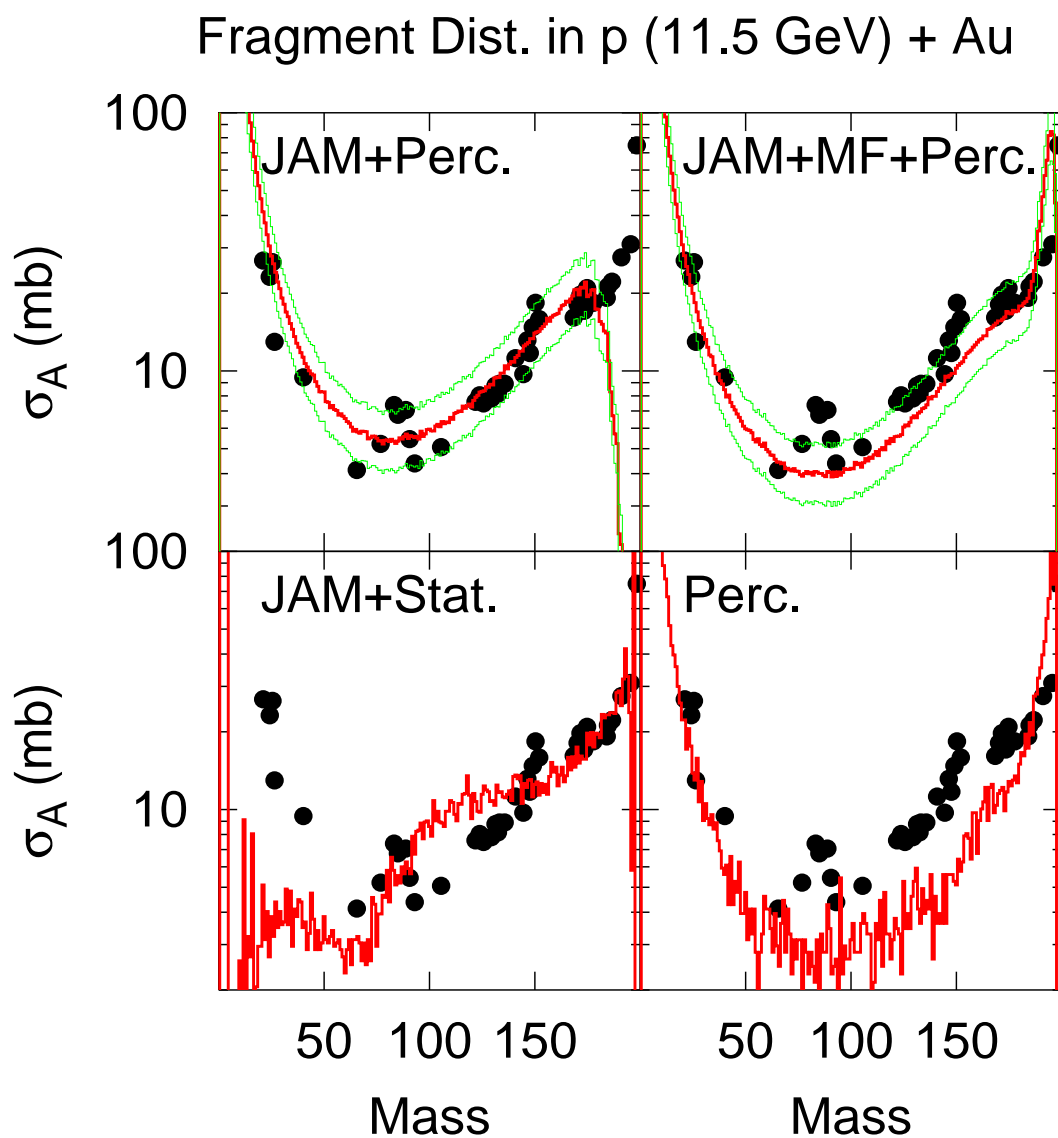
Generally Good, **except**

- Direct-Like Reactions (<sup>56</sup>Fe(p,n)<sup>56</sup>Co)
- Unstable Nuclei (<sup>7</sup>Be, <sup>10</sup>Be, <sup>28</sup>Mg, <sup>48</sup>Cr)
- Very Light Nuclei (<sup>3</sup>He)

● GeV 陽子での重い原子核標的の破砕

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

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

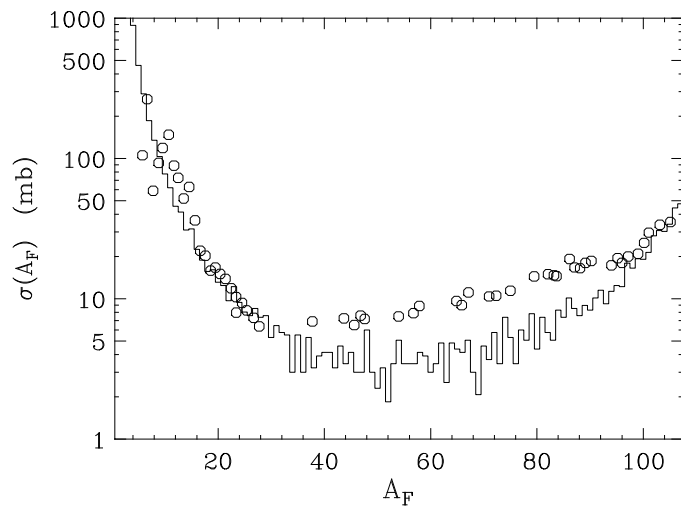
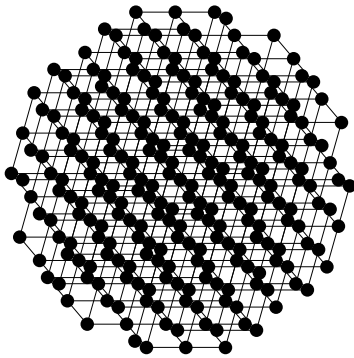
→ Percolation、動的揺らぎ、統計的多重破砕などの

「破砕促進過程」が必要

- Percolation 模型(Bauer, PRC38 ('88)1297)

### Original Treatment

1. 核子を close packing で site におき、最近接の bond をつなぐ
2. 励起エネルギーに依存した確率で bond を切る



(p (300 GeV) + Ag)

★ 今回は Simulation の結果の位相空間から出発  
(初期の密度揺らぎがある)

## ★ Summary

### ADS(加速器駆動型未臨界炉)での粒子・フラグメント・熱生成

- ★ 不安定核・放射性核を含む核反応 NetWork
- ★ Micro (物理) + Macro (工学)
- ★ 反応 (粒子・フラグメント) + 構造 (熱・フラグメント生成量)

### 核反応のシミュレーション + 統計的崩壊

- ★ 素過程断面積 + 平均場 + 量子効果 (反対称化、揺らぎ、相関)
- + 束縛エネルギー + 励起状態密度

### pA 反応 (数 10 MeV ~ 10 GeV, 励起エネルギー $\gg \Delta E$ )

- ★ 2重微分断面積 ( $d^2\sigma/d\Omega dE$ ):  
p, n,  $\pi$ , d ... Well Understood ( $\leq$  Factor 2)
- ★ フラグメント生成断面積 ( $\sigma(N, Z)$ ):
  - 軽い標的; OK (少なくとも低 E では。)
  - 重い標的; 破砕過程の微視的理解は不完全

### 核データの必要性

- ★ 実験データベース  
(含:不安定核の束縛エネルギーと崩壊モード、荷電粒子反応、高エネルギー反応)
- ★ 理論計算データベース (計算結果、プログラム)