

核破碎反応からの粒子・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

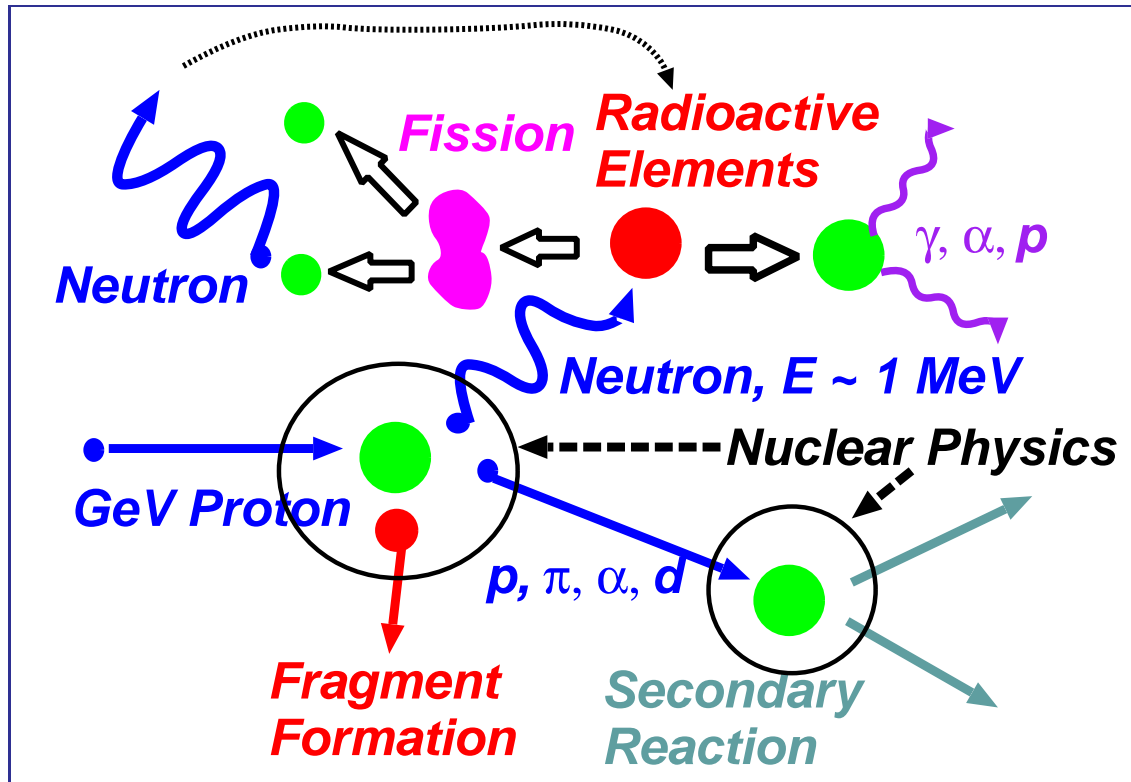
- ★ コアラッセンスモデルでの重陽子生成
- ★ $A \geq 3$... 平田君の Talk へ

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、(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 - 2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

- ADS の成否を決める (核物理の観点からの) Point
核反応で新たに生成される放射性元素の量
≪ 2次反応で消滅する (長寿命) 放射性元素の量

加速器駆動型未臨界炉: (核物理から) 何が必要か?

● 2重微分断面積

… 2次反応を起こし得る Yield の多い粒子 ($n, p, \pi, d(?), \alpha(?), \Lambda(?)$)

$$d^2\sigma(Z, N)/d\Omega dE$$

● 生成断面積

… Yield が無視できない長寿命放射性核種 (${}^3\text{H}(=t), {}^7\text{Be}, {}^{22}\text{Na}, {}^{99}\text{Tc}, {}^{129}\text{I}, \dots$)
+ (標的核が重い場合には) マイナーアクチノイド (MA; Np, Am, Cm, ...)

$$\sigma(Z, N)$$

× 編極量、粒子相関、Coincidence 量、....



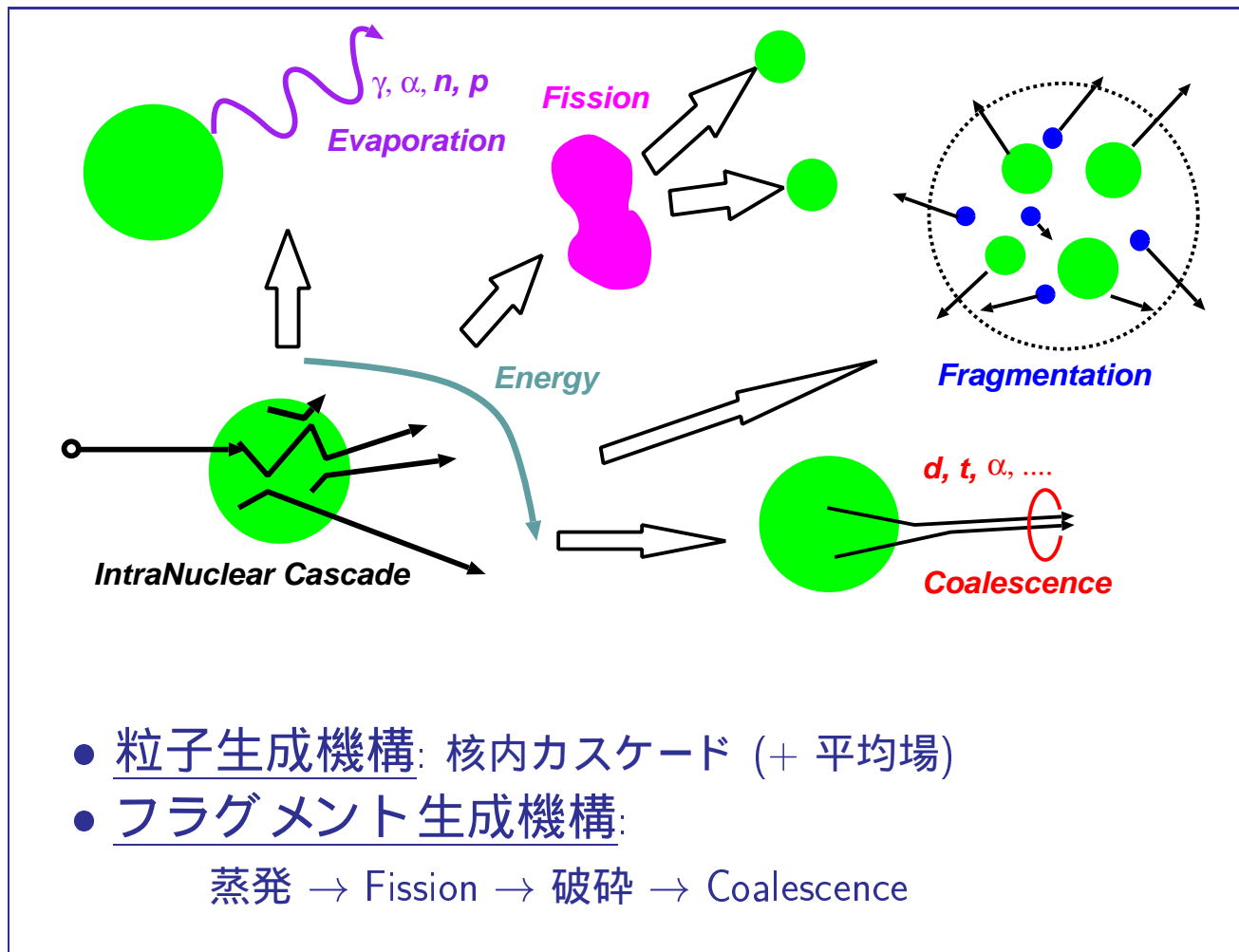
「核反応のシミュレーション+統計モデル」が有効

- ★ 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、仁井田ら)

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

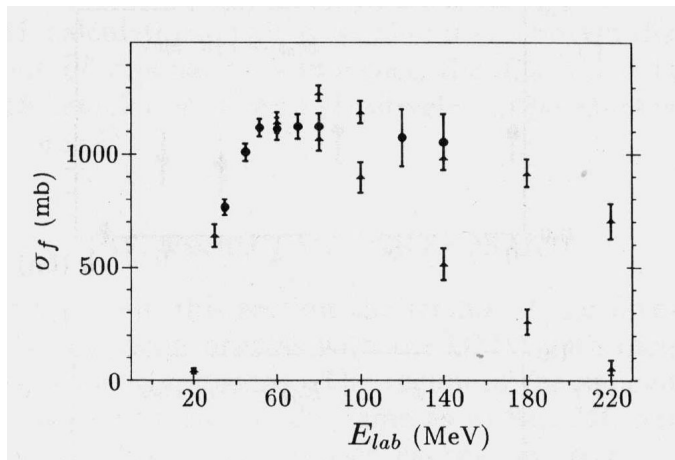
★ 反対称化分子動力学 (AMD) の開発: 反対称化 W.F. + 2体衝突

★ 素過程断面積: 数 10 MeV ~ 数 100 GeV まで

● 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)



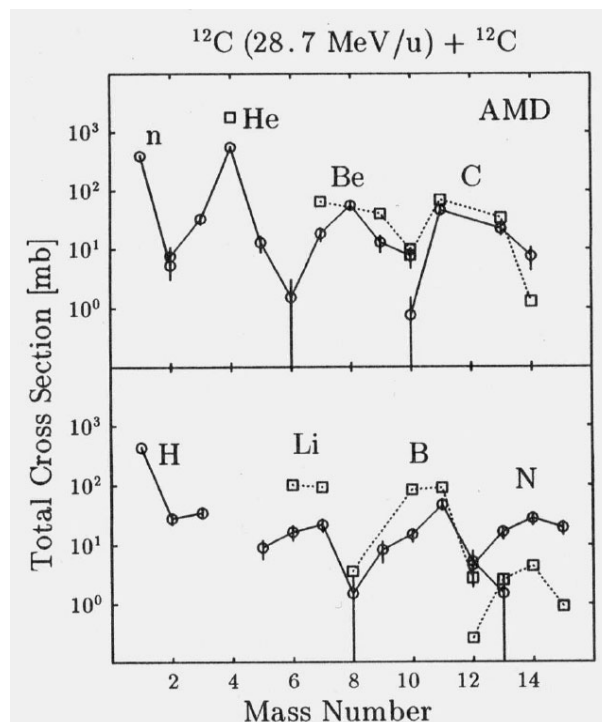
● 反対称化分子動力学 (Ono et al., PRL68('92)2898, PTP87('92)1185)

→ 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)

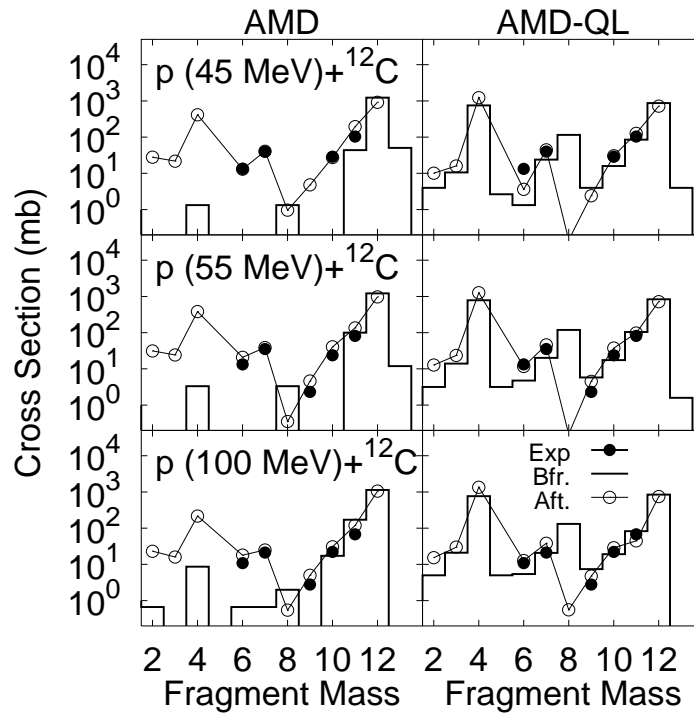


● 動力学的な揺らぎの導入

… 動的なフラグメント生成の増加

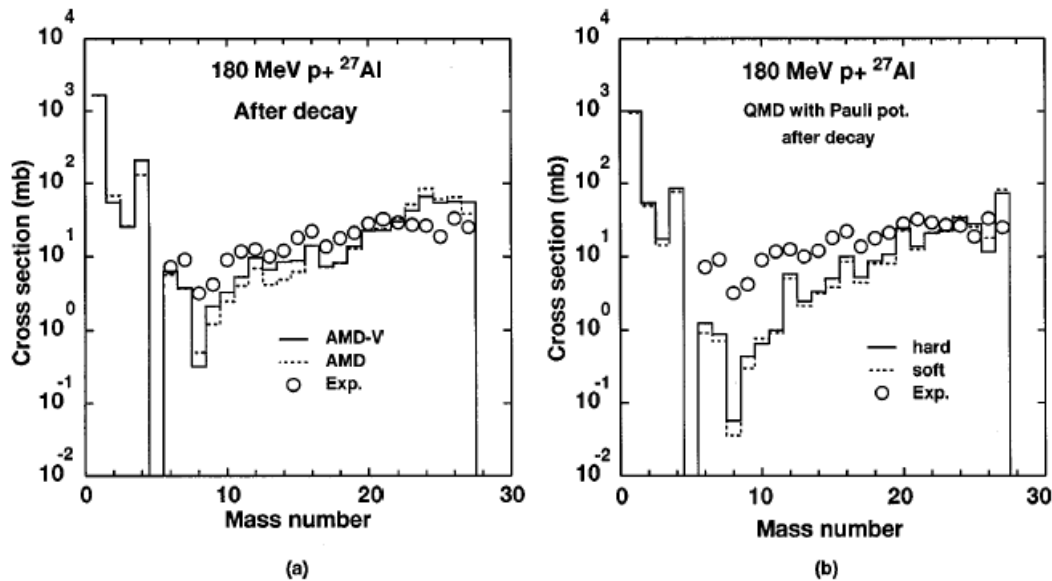
★ AMD-QL: $p + {}^{12}\text{C}$ 反応からのフラグメント生成

(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)



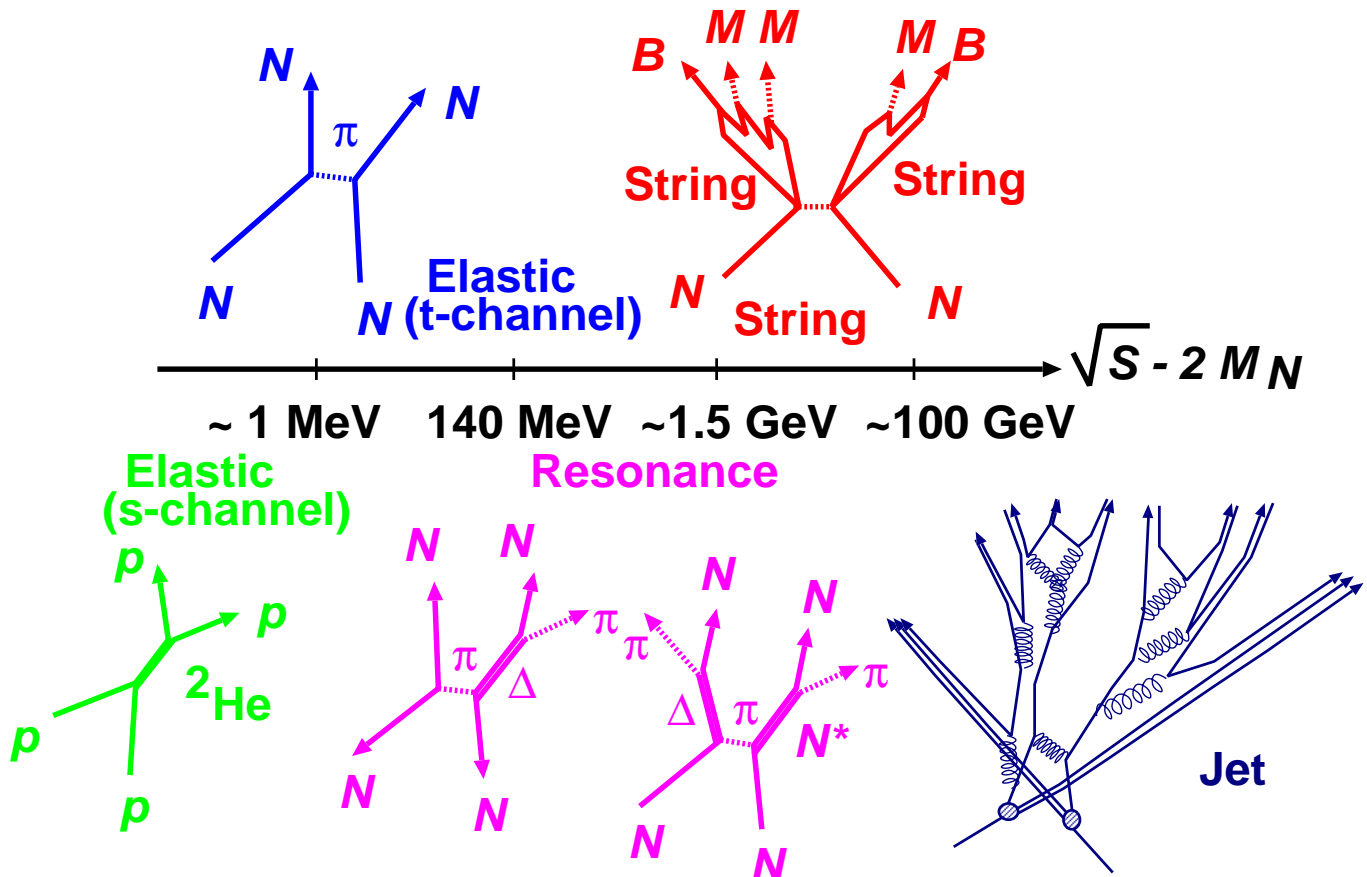
「粒子」生成核反応のエネルギー依存性

s -channel 反応 (系全体の融合)

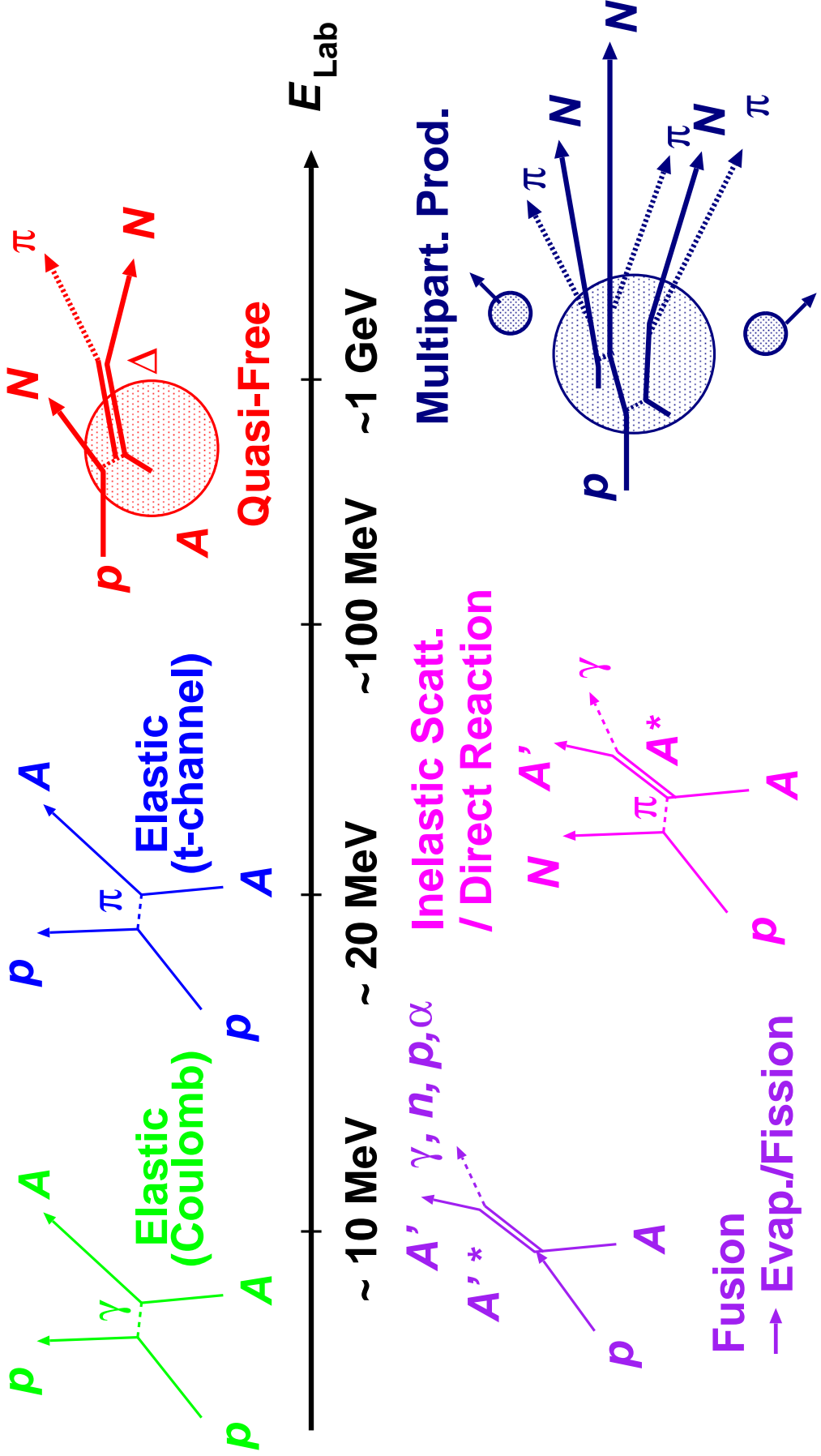
→ t -channel 反応 (エネルギー・運動量・量子数の交換)

→ 各構成粒子の反応 + 幾何学

Energy Dependence of NN Reaction Mechanism



Energy Dependence of pA Reaction Mechanism

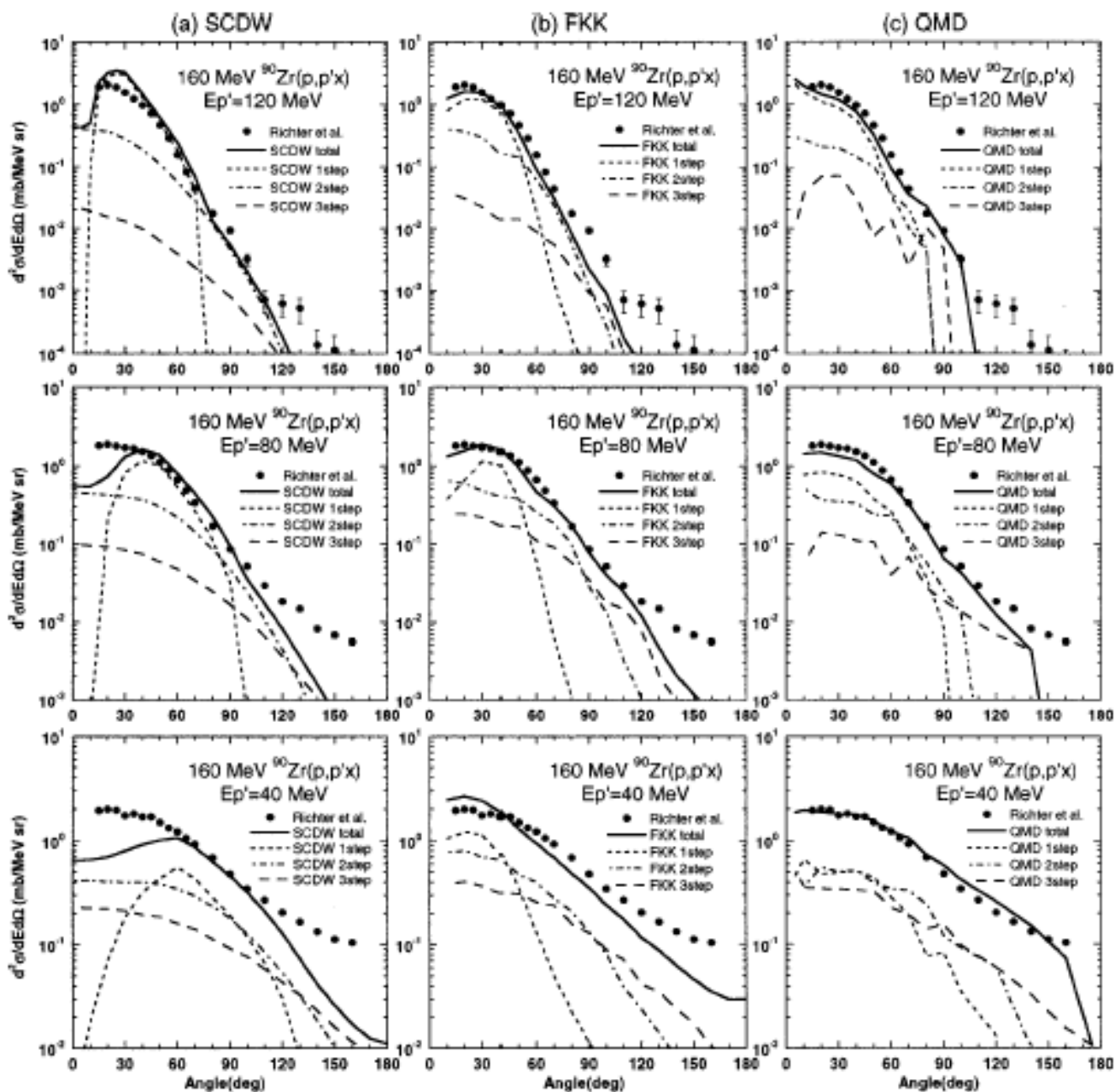


核子-核反応: 100 MeV 領域

… 平均場による軌道の変化 (\leftrightarrow Distorted Wave)

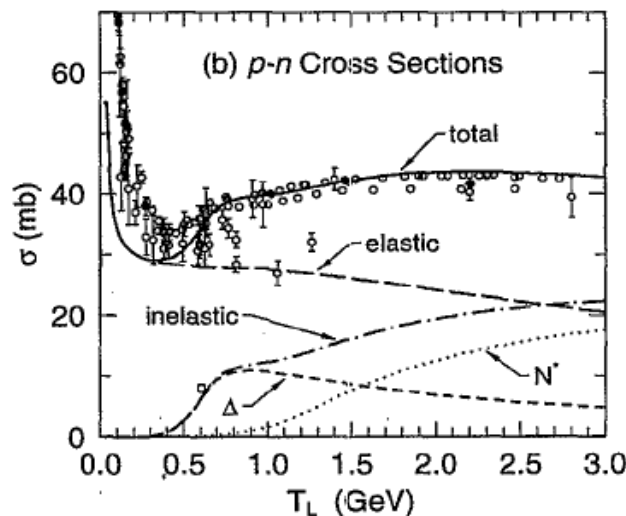
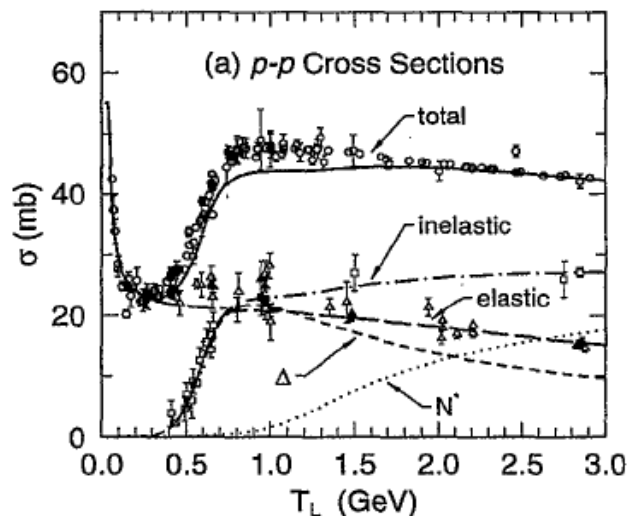
+ 多段階 2 体衝突 (\leftrightarrow Impulse)

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

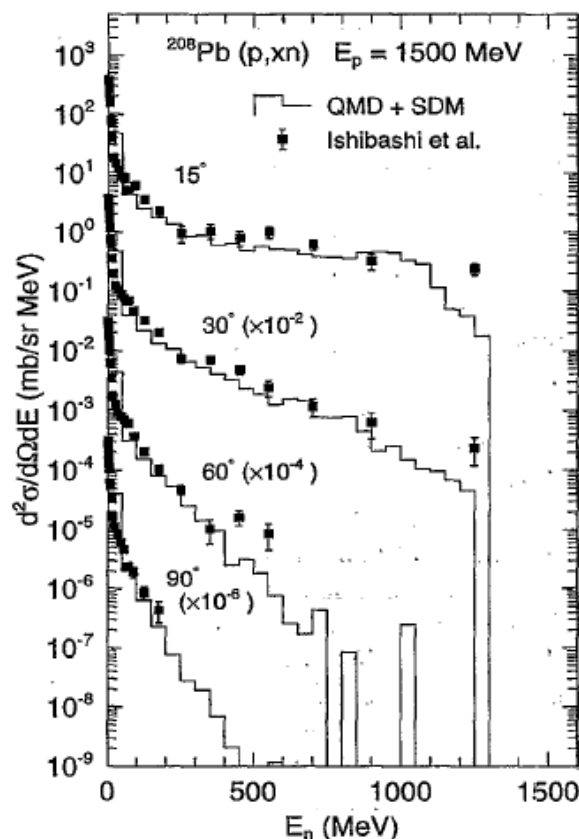
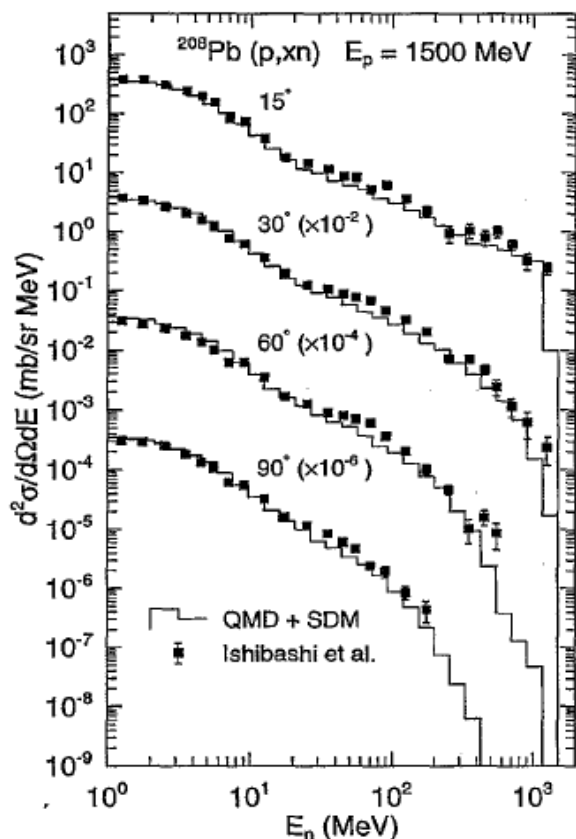


… バリオン共鳴状態への励起を通じた粒子生成 (+ 平均場)

● 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

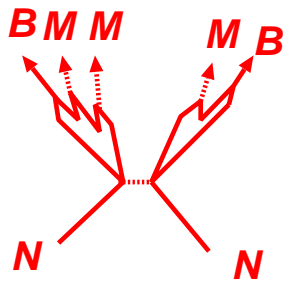
→ JAM: Nara et al., PRC61('00)024901, RBUU: Sahu et al., NPA, in press

(HANDEL: Otuka et al., in prep.)

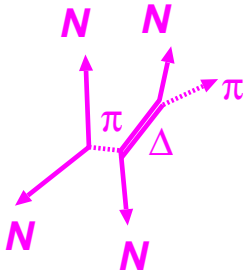
● 2 バリオンの同時励起、ストリングの生成

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

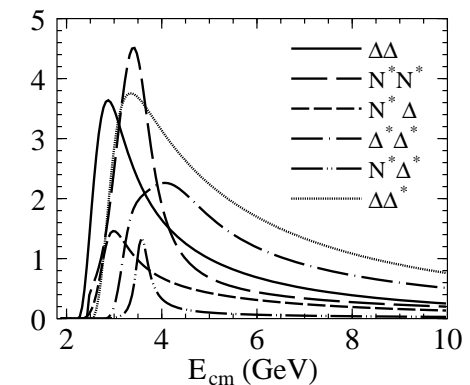
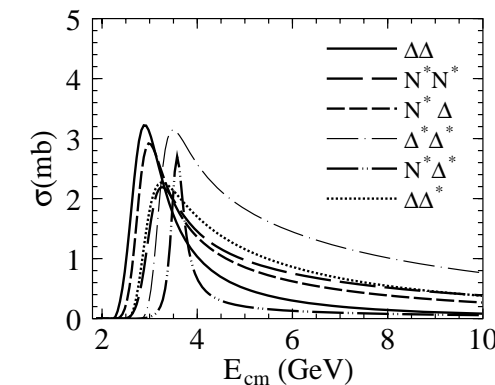
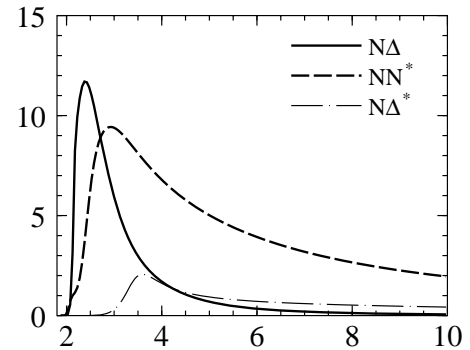
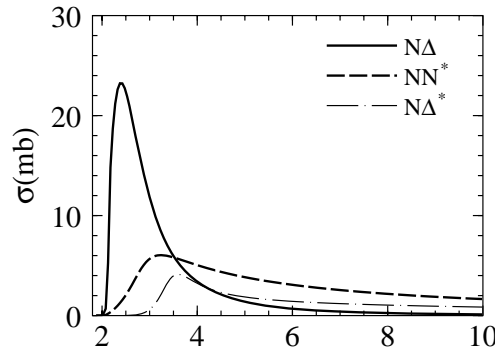
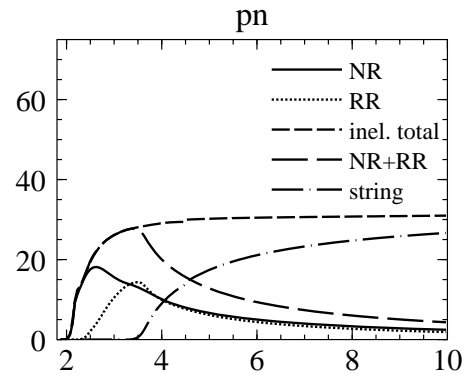
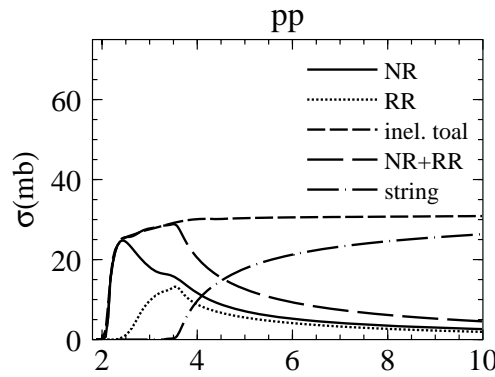
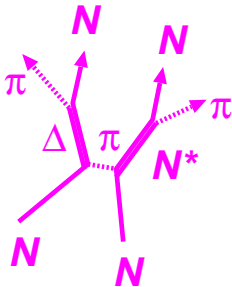
Strings



NN → NR

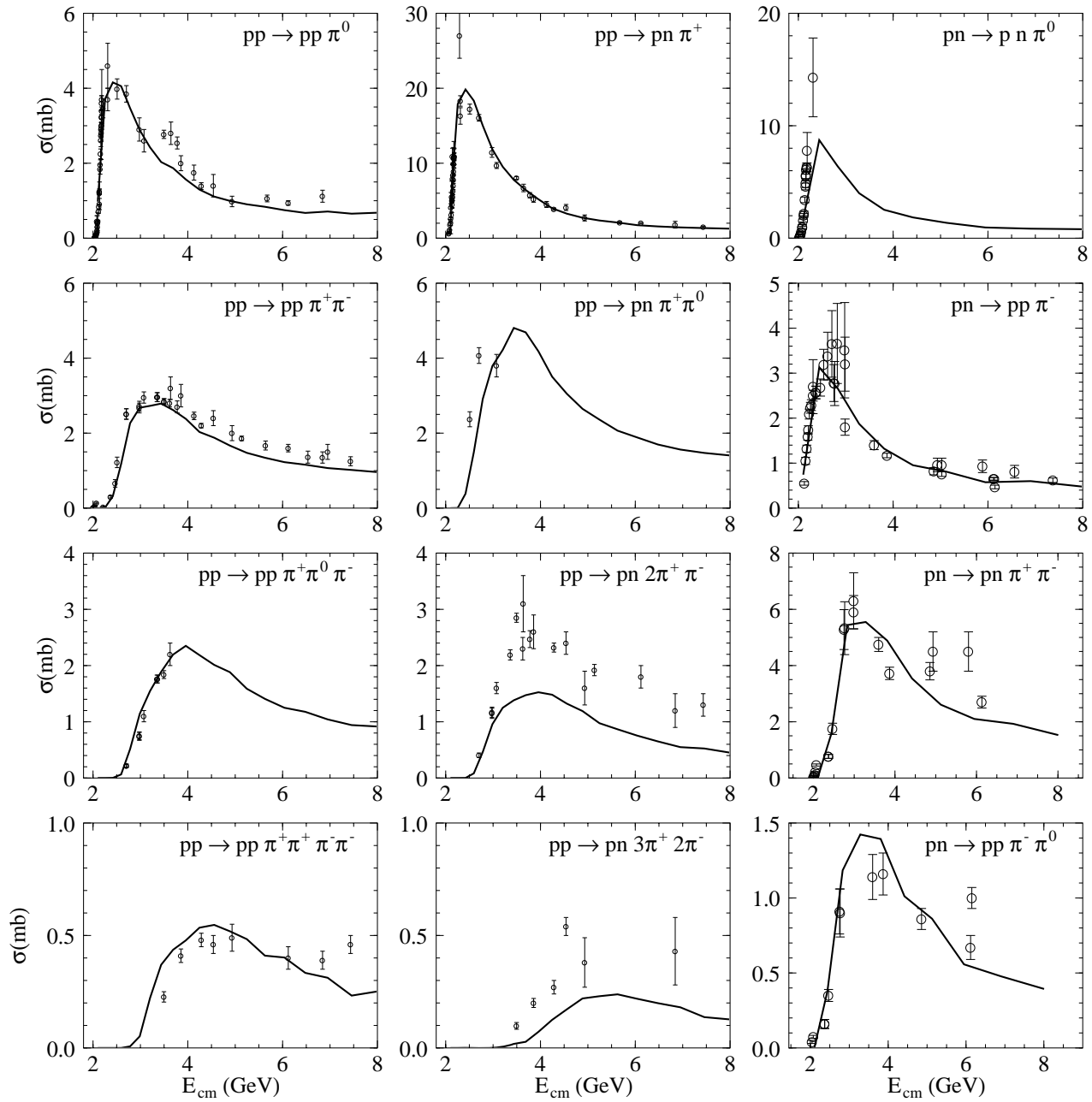


NN → RR



● NN , Exclusive 反応断面積

… 4 ~ 5 π 生成までを Fit 可能

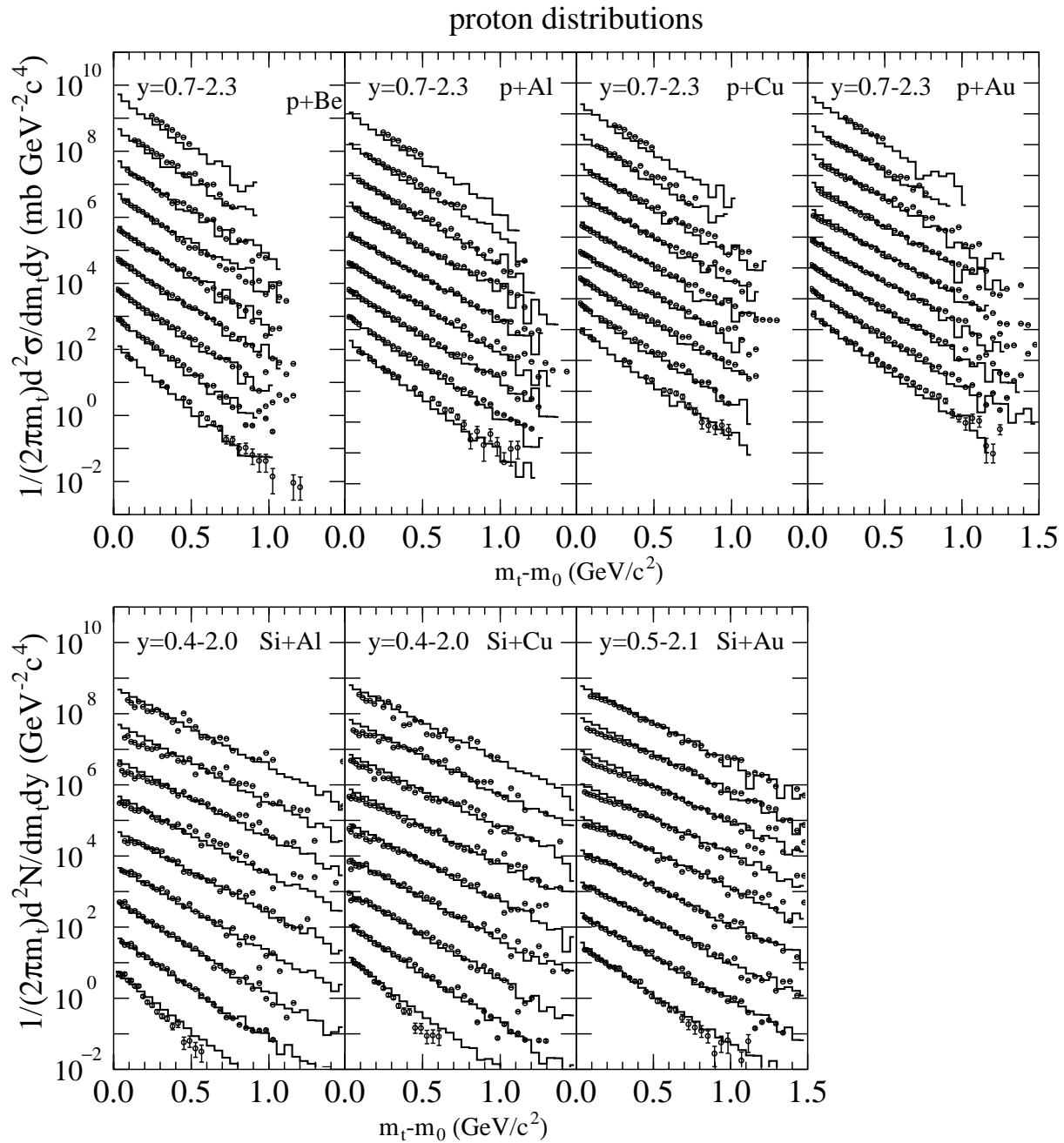


核子-核反応: 10 GeV 領域

● 核子-核反応: 核子スペクトル

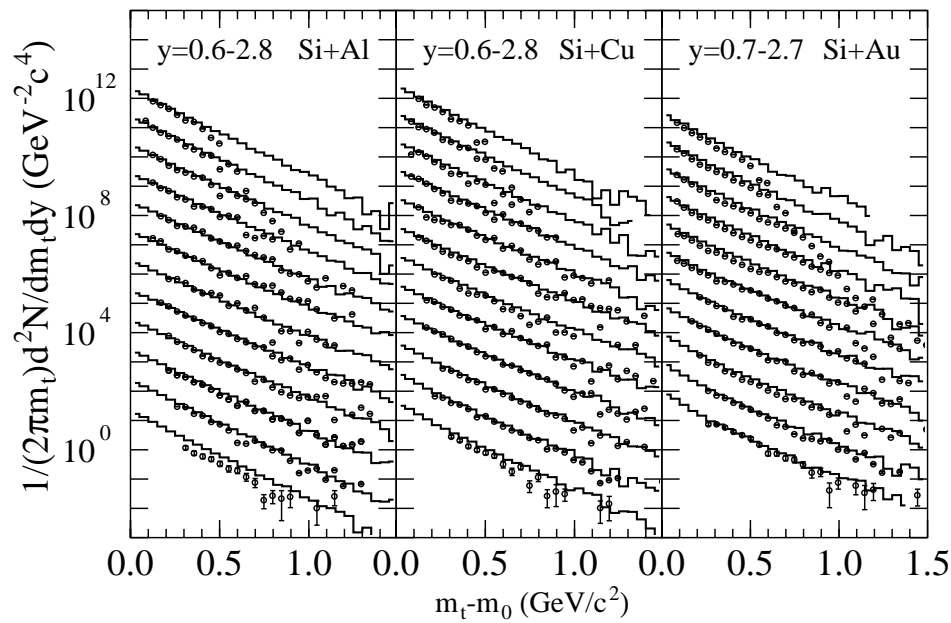
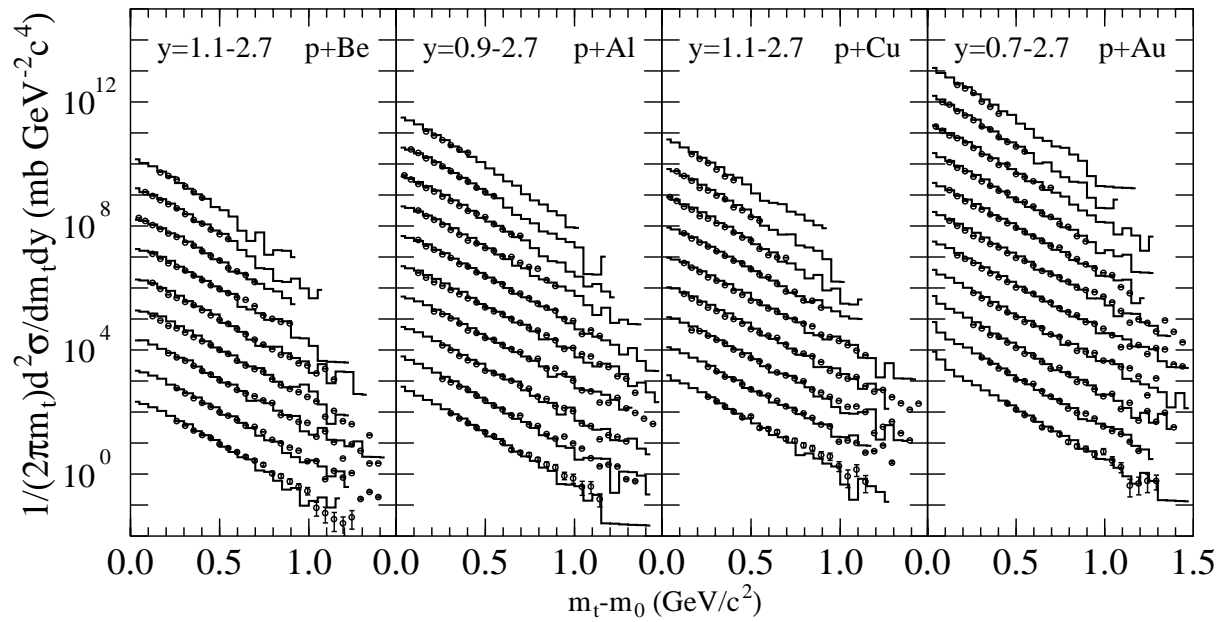
… NN, MN 素過程 + 多段階 2 体衝突

→ 10 ~ 30 % の精度で M_T スペクトルを再現



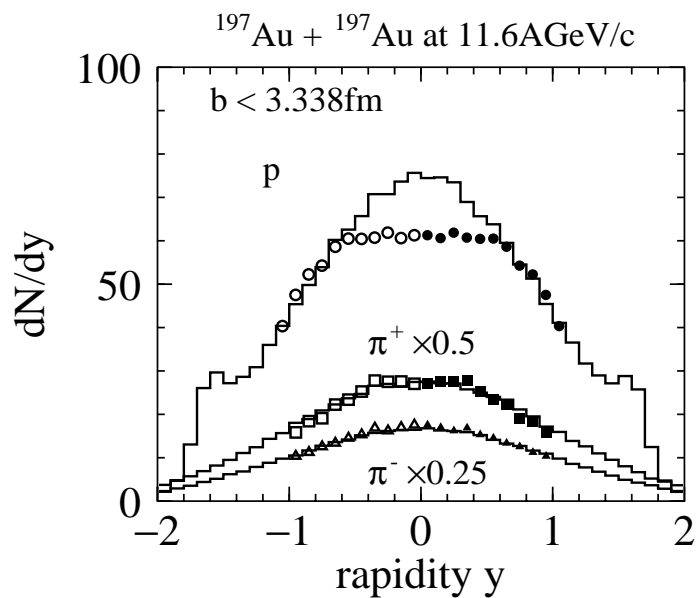
● 核子-核反応: π スペクトル

Negative pion distributions

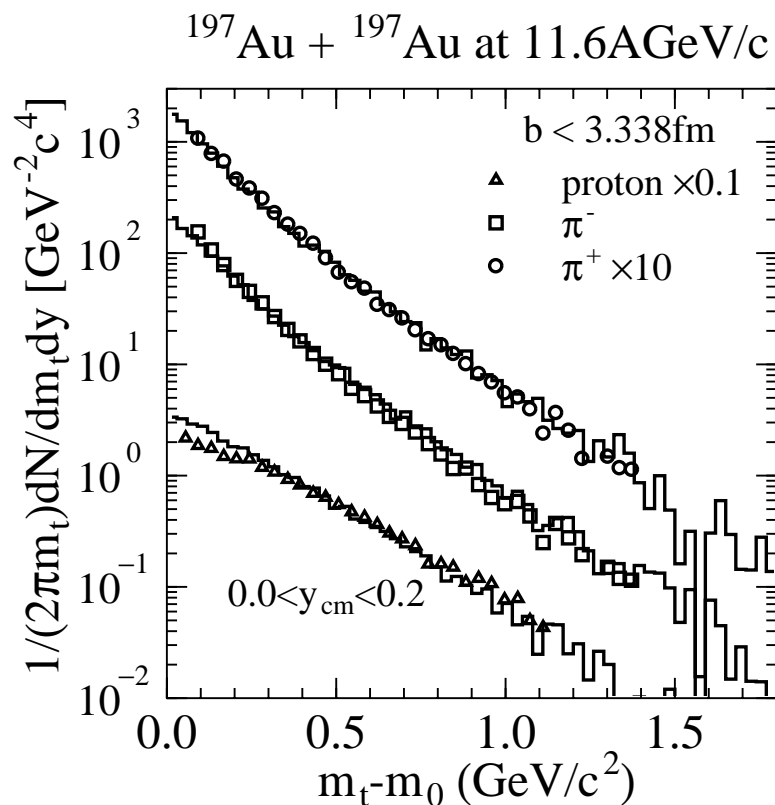


相対論的重イオン反応

● Au+Au 反応 (AGS): Rapidity 分布



● Au+Au 反応 (AGS): M_T 分布



GeV 領域での「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, γ, p, α の蒸発 + 核分裂 (統計崩壊模型)

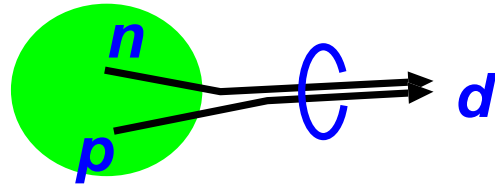
→ 高励起状態: 核破碎反応 ... 次の講演 (平田)

→ 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

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



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

$$P_d = \frac{3}{4} (\text{スピン}) \times \frac{1}{2} (\text{アイソスピン}) |\sqrt{2} \cos \vec{q} \cdot \vec{r}|^2 \\ \times \delta(\vec{p}_p + \vec{p}_n - \vec{p}_d) \rho_d^{Wigner}(\vec{r}, \vec{q})$$

$$\rho_d^{Wigner}(\vec{r}, \vec{q}) = \text{Wigner Transf. of deuteron W.F.} \\ \simeq 8 \exp(-r^2/d^2 - d^2 q^2)$$

ρ_{pn}^{Wigner} : 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.