

---

# 核破碎反応など

## —GeV領域のhA反応のメカニズム—

東京理科大・理工物理  
千葉順成

# アウトライン

---

- ハドロン原子核 (hA) 反応
  - Spallation … 現象を示すだけ
- 反応シミュレーション
  - いろいろな反応で使用したが… PHITSは？
- KEK-PSでのhA反応実験
  - 昔ばなしです
- Quasi-free (QF) process
  - Quasi-elastic, Quasi-free inelastic
- シミュレーションコードにQFデータを使うべき

# ハドロン原子核反応

---

- At Low Energies ( $<100\text{MeV}$ )
  - Coherent mechanism (compound reaction)
    - Because the projectile momentum is the same order of the Fermi motion
- **At Medium Energies ( $\sim 1\text{ GeV}$ )**
  - Nucleon-Nucleon collisions
  - **Delta (pion), Kaon, antiproton productions**
- At High Energies ( $\sim 10\text{GeV}$ )
  - Coherent-tube mechanism
    - Nucleon's mean distance  $<$  pion Compton length
- At Higher Energies ( $>10\text{GeV}$ )
  - Parton collisions
  - Heavy quark productions

# 核内カスケード計算

- 実験データの解析に、「標準」反応シミュレーション計算が欲しい・・・
  - いくつかのコードを試したがなかなかうまく合わない
  - 自分たちで開発するにはマンパワー不足
- 最近「PHITS」なるコードが広く使われていると聞いた・・・
  - ただし、核内カスケード計算でイベント生成するのが主目的ではないらしい
  - 少しお勉強してみよう
  - 「真空」と「核物質中」での振舞いの違いを調べたい

# モンテカルロ・イベント生成

---

- 「標準」が欲しい！
- 1980年初頭の電子・陽電子実験での例
  - Lund模型が主流ではあったが他にも多数(全て、quark fragmentation model by Field-Feynman)
  - 模型によって主要パラメタの結果が異なる
  - 模型を一堂に集めて、比較検討→標準化
- 高エネルギー pp/AAでは標準模型
- hA反応で、PHITSに匹敵する模型は存在するの？

# KEK-PS実験

---

- 1978~ (黎明期)
  - $\pi\mu$ ラインの建設 (低エネルギー $\pi$ 反応)
    - E65 ( $\pi$  absorption  $\rightarrow \gamma$ 、中性子) E91 ( $\pi A$ 反応)
- 1982~ (発展期)
  - 大立体角を覆った準包括測定 (FANCY)
    - E71, E90 (励起核物質)、E133, E173 (核内の共鳴)
    - E157 (DCX)、E132, E187 ( $\Lambda$ 生成)
- 1991~ (重イオン加速へ向けて)
  - 重陽子と $\alpha$ 粒子の加速
    - E257, E286 (反陽子生成)、E286 (多重核破碎)
- 1997~ (核物質とメソン)
  - 一次ビーム用大型検出器の建設
    - E325 (核内 $\phi$ 粒子)

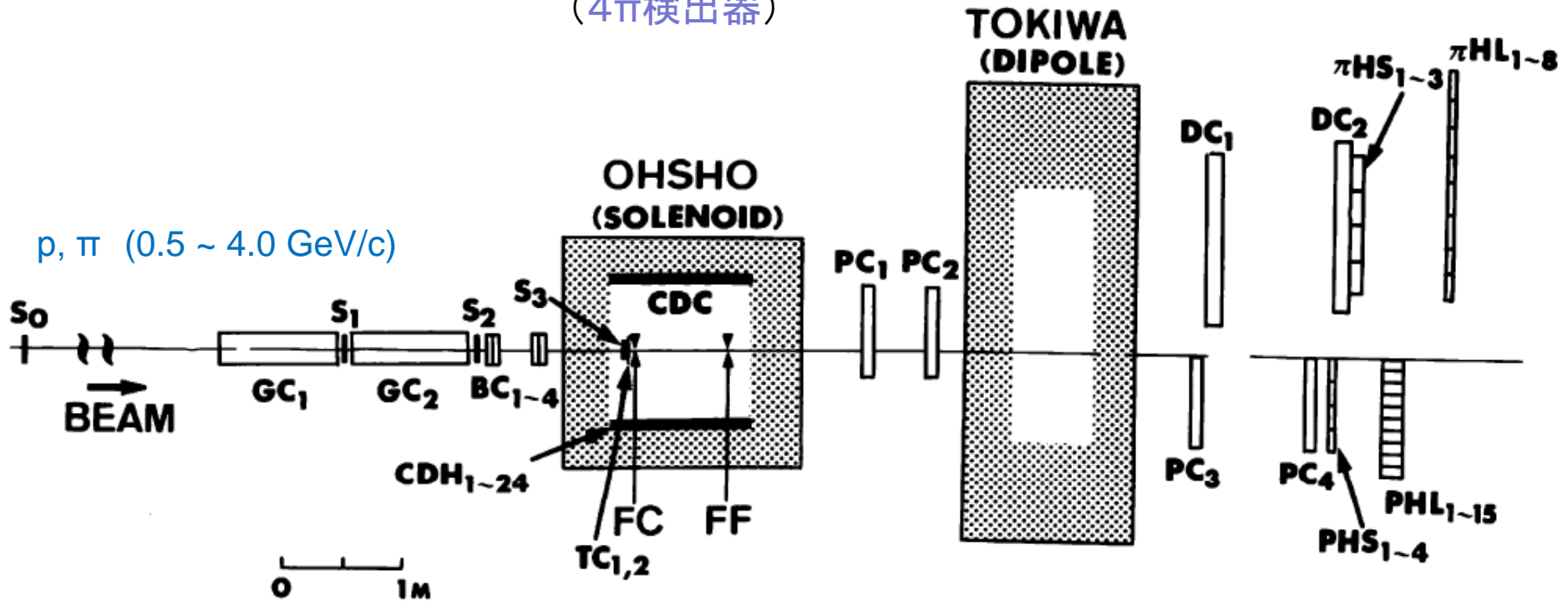
# FANCY検出器 (中井他 1980~)

- BEAM -

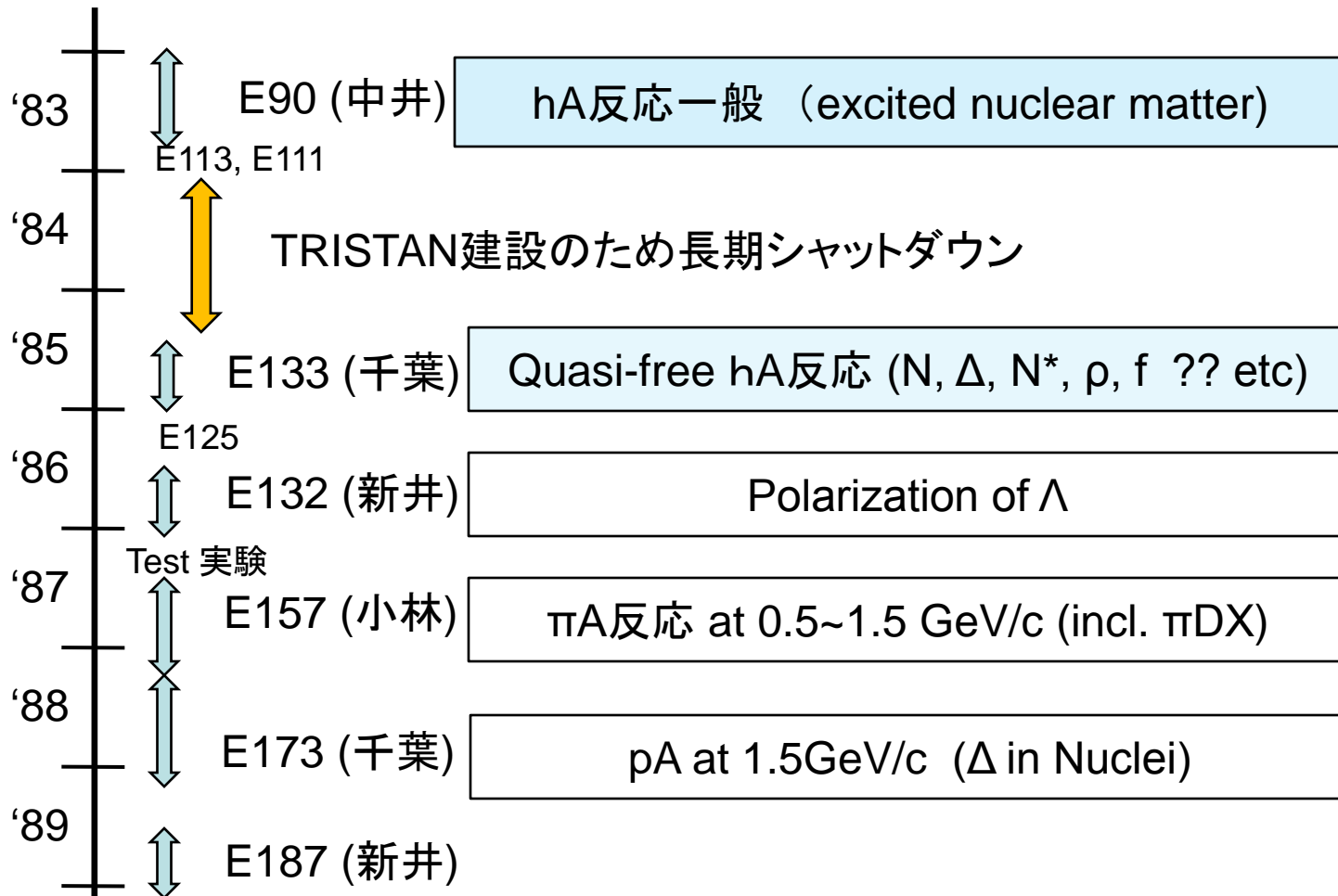
- CENTRAL -

- FORWARD -

(4 $\pi$ 検出器)

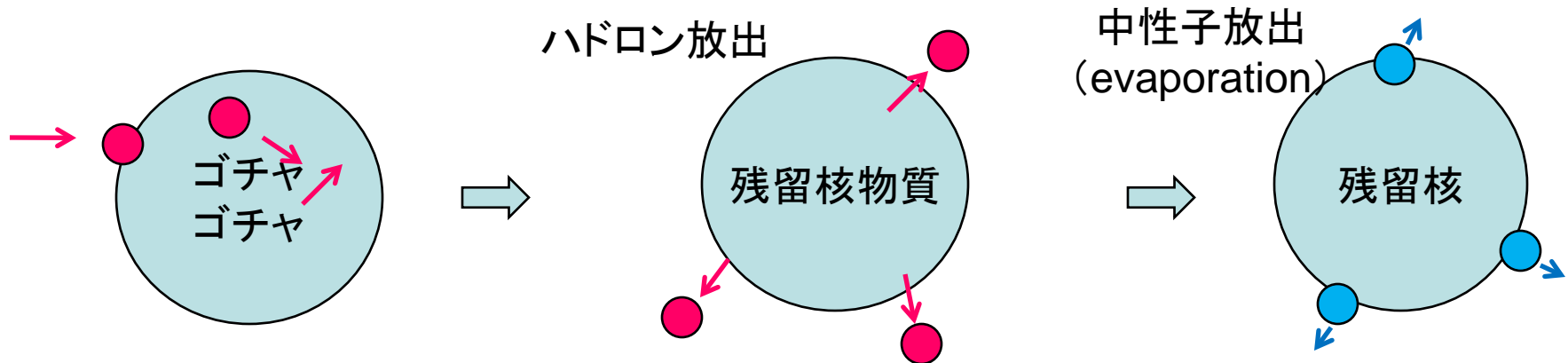


# FANCY実験 (PS- $\pi$ 2)





# GeV領域hA反応の描像

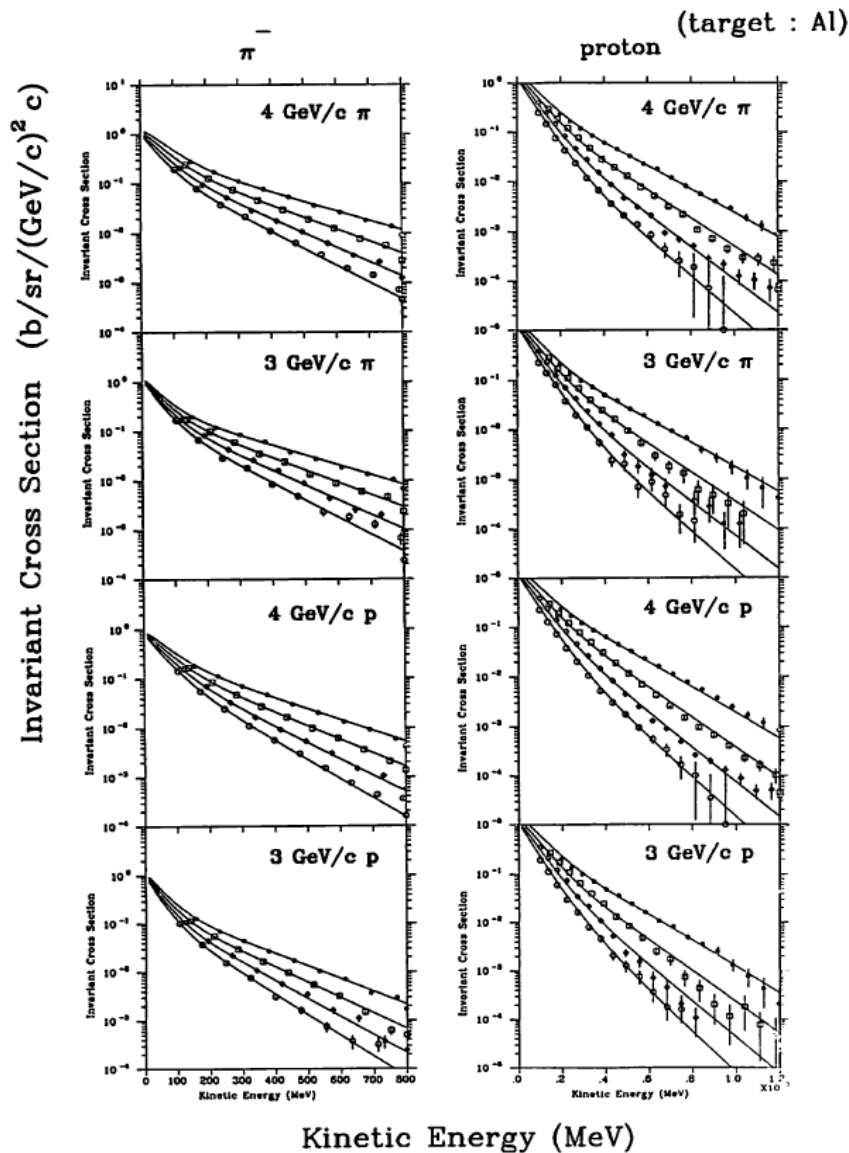


「ゴチャゴチャ」部分をどう扱う？

- 平衡状態を仮定して実験的にパラメタを求める
  - Two Moving-Source模型
  - HBT, d/p比からSourceサイズ
- 核内カスケード
- 第一原理からmicroscopicに??

この部分は予言能力を持っている(実験を再現する計算模型が存在)。

# Two Moving-Source Model



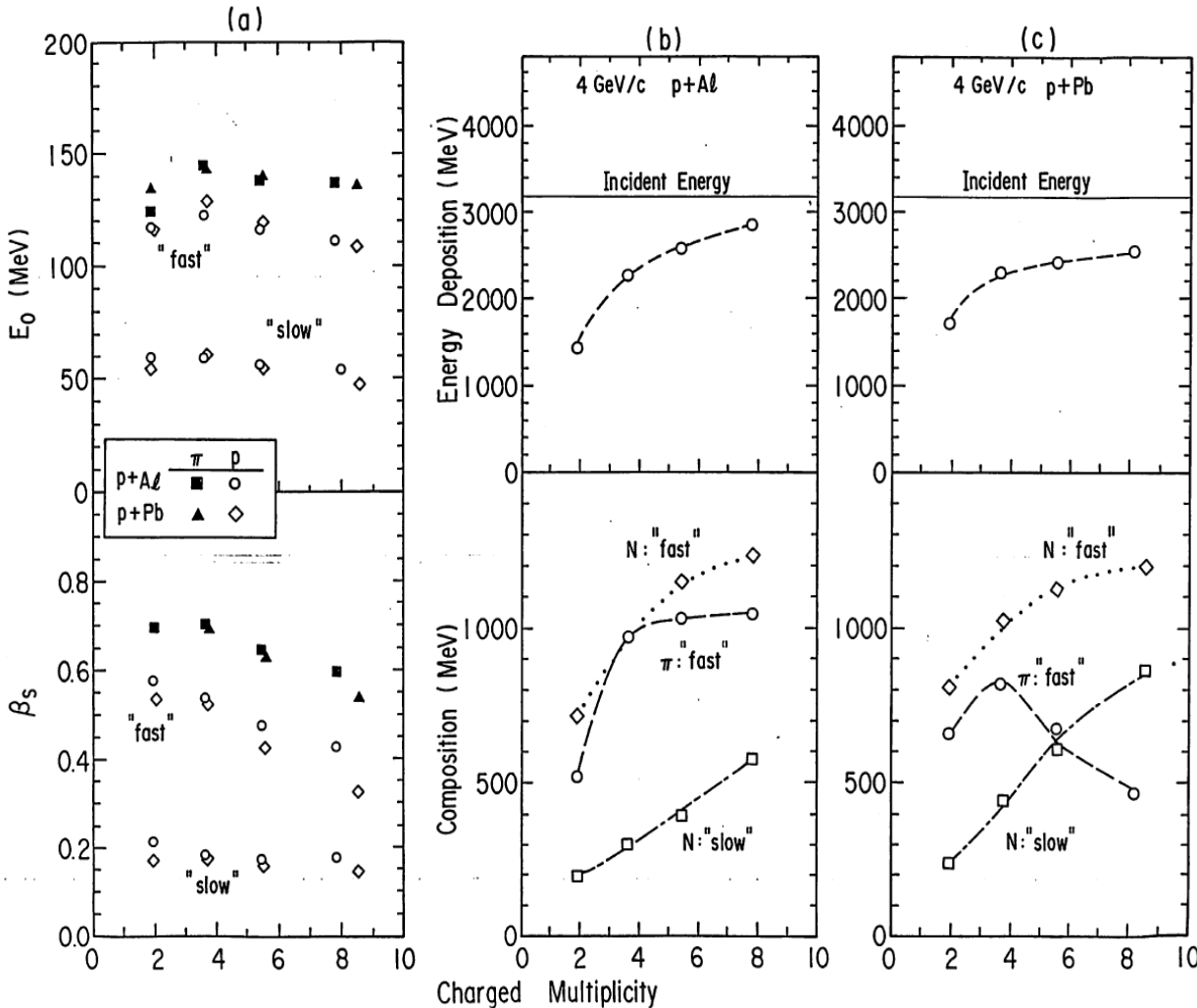
$$E(d^3\sigma/dp^3) \propto \exp(-E/E_0)$$

陽子...2つの源  
 $\pi$  ...1つの源

slow source  
 $\beta_s(p)$

fast source  
 $\beta_f(p) \sim \beta_f(\pi)$

# Two-moving model

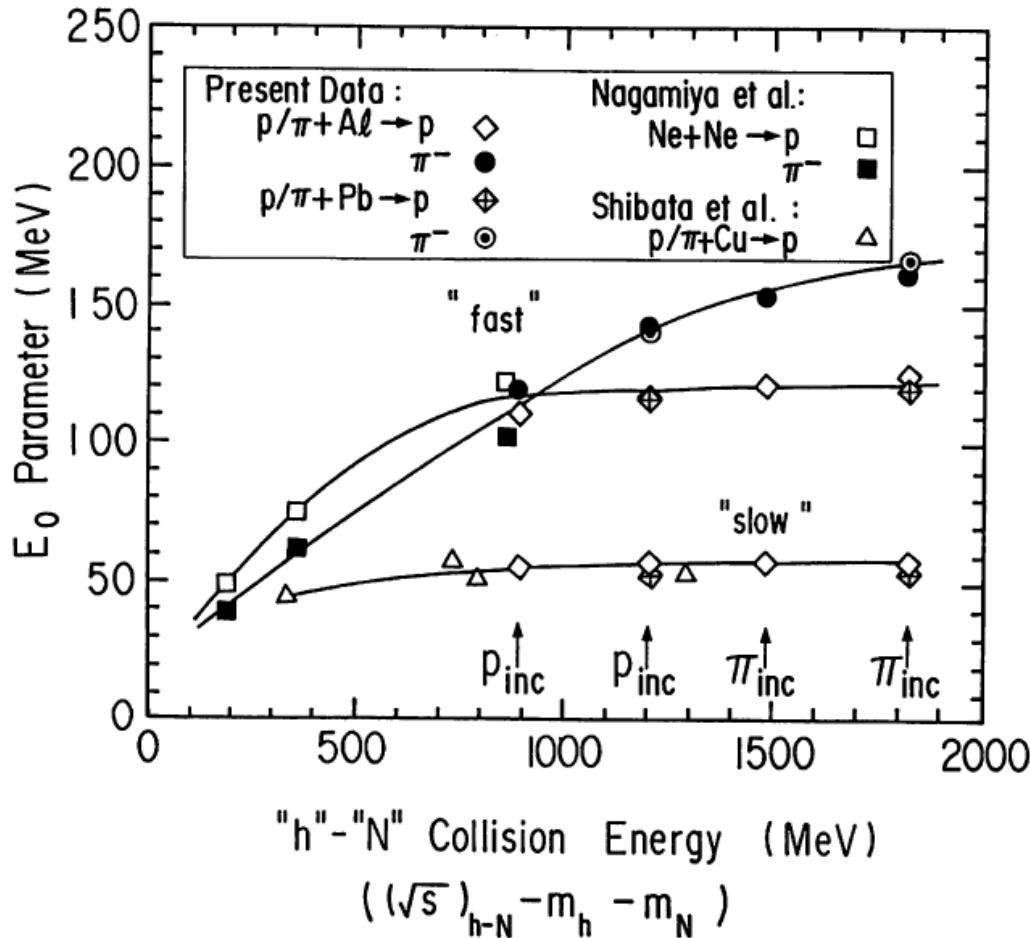


- $E_0$ : (s)  $\sim 50$  MeV  
(f) 100~150
- $\beta_s$ : (s)  $\sim 0.2$   
(f) 0.4~0.7

Mにより変化

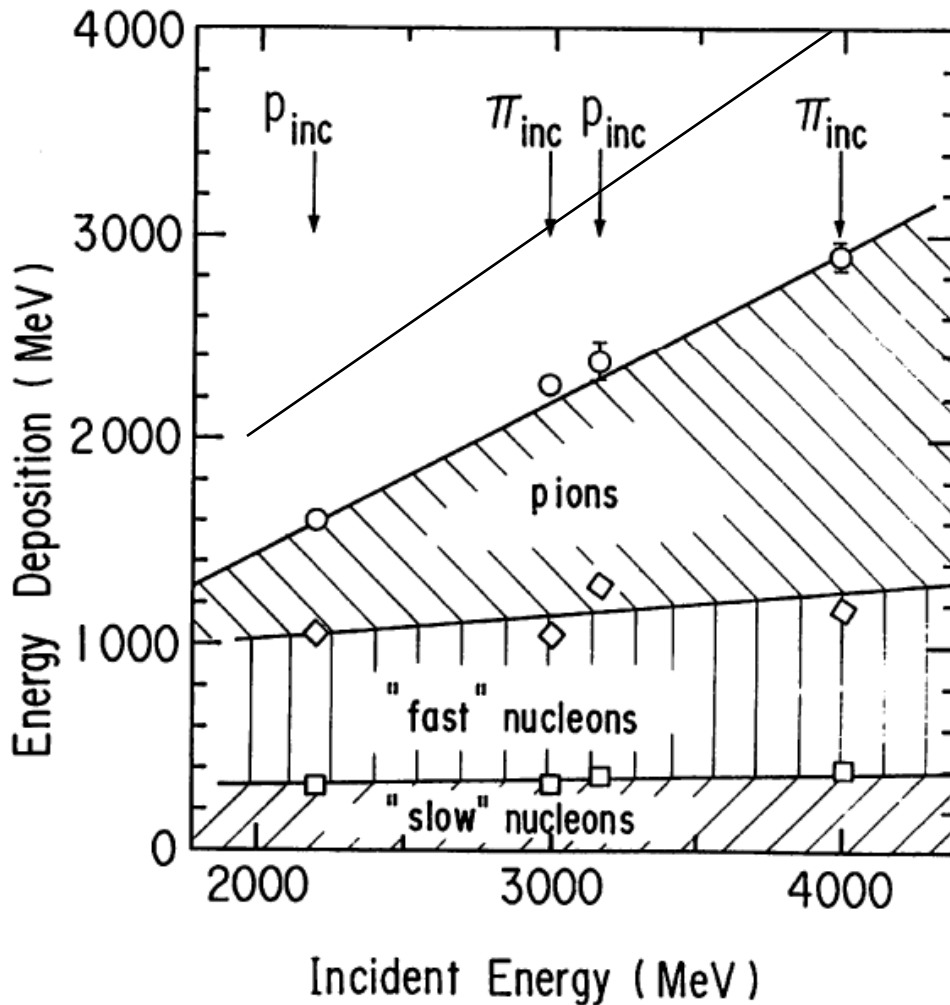
- 放出エネルギー
- $\pi/p$ 比 (M依存)

# Two-moving source



- $E_0$ (proton) 飽和
  - Limiting fragmentation
  - エネルギーは $\pi$ 生成に

# Two-Moving source



イベントを平均すると

- 入射エネルギーの7割程度がsourceからの放出
- 核子が持ち出すエネルギーは飽和
- Pionが持ち出すエネルギーは増大

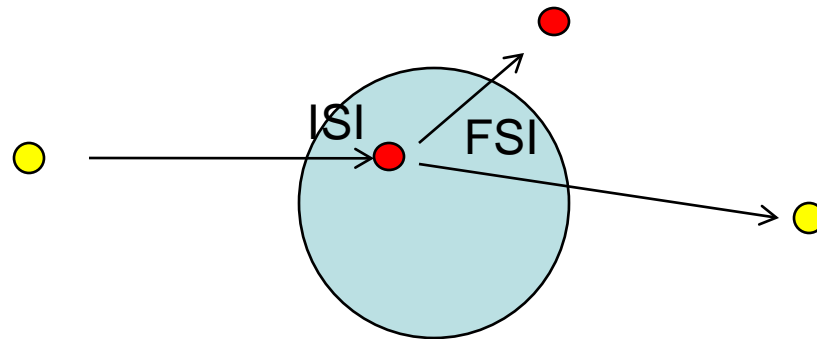
# Quasi-free process

## 「核内カスケード模型」的に考えると

- 一般的には $h \sim N$ 反応の回数は断面積と核密度を用いて衝突係数 $b$ で決まる。平均自由行程は $h=N$ で1fm程度、 $h=\text{pion}$ では1.5fm程度
- $h \sim N$ が一度だけ起こった反応
- 従って、「稀な」事象ではない
- しかしながら、一般にカスケード計算では実験に合わない(ある意味では当たり前?なぜなら、この事象にtuneしてないから。)PHITSでは?

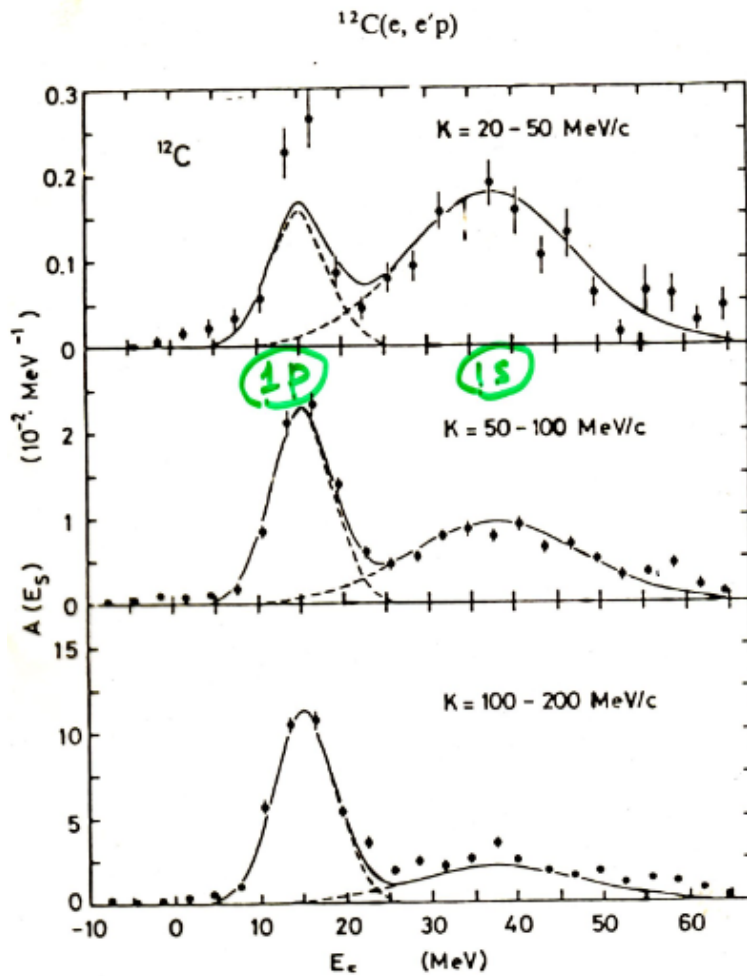
# Quasi-elastic

---



- 歴史は古い (1952)
  - セグレ・チェンバレン ( $p+Li$  at 350MeV, PR87 p81)
- ~1970年に数多くの論文 (eA, pA)
- 測定
  - 前方粒子のみ (高エネルギー)
  - 前方粒子と散乱粒子の同時計測 (核子軌道の直接測定)
- ISI + 素過程 + FSI

# QE example1 [(e, e'p) at INS]



C(e, e'p) at 700 MeV/c

入射粒子:  $(\epsilon, \vec{p})$

散乱粒子:  $(\epsilon', \vec{p}')$

反跳陽子:  $(m + T_p, \vec{p}_p)$

Fermi Motion

$$\vec{k} = \vec{p} - \vec{p}' - \vec{p}_p$$

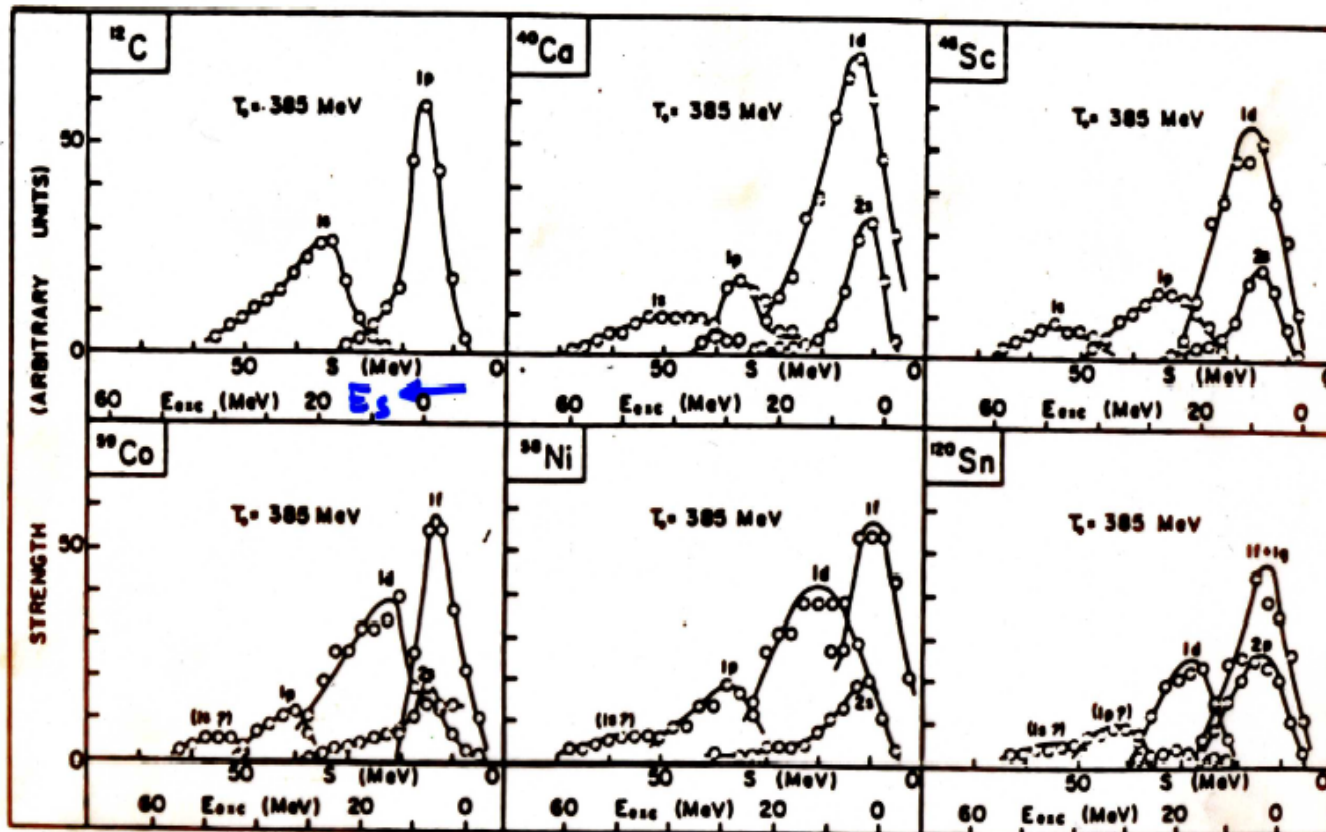
Separation Energy

$$E_S = \epsilon - \epsilon' - T_p - \vec{k}^2 / 2m$$



# QE example2 [(p,2p) @1971]

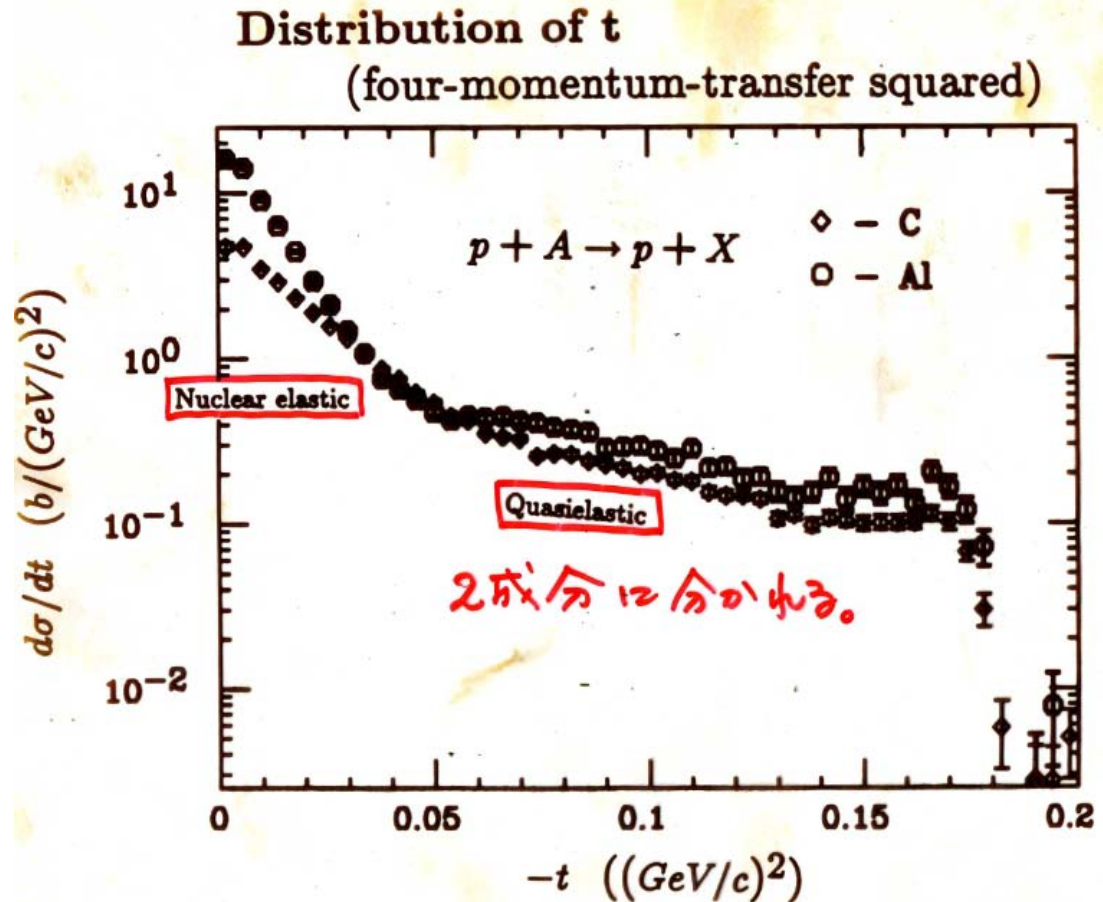
(p,2p) at 385 MeV



# QE at high energies

- Quasi-elasticとNuclear elasticの分離

前方粒子  
だけの測定



# NEとQE (モデル計算)

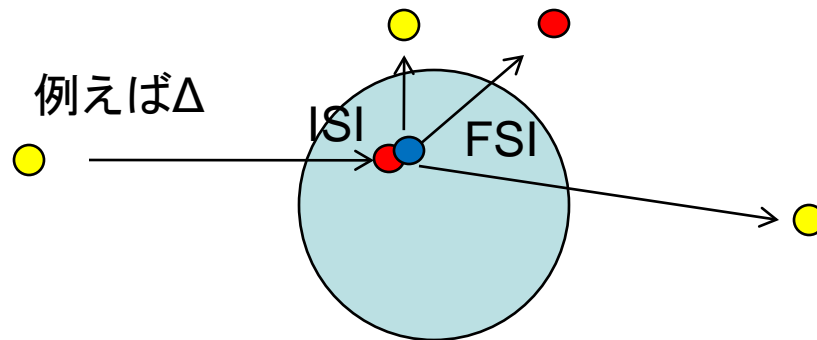
$$\frac{d\sigma}{d|t|} = \frac{\sigma_{hA}^2}{16\pi\hbar^2} \exp(-b_A|t|) + \frac{N_{eff}\sigma_{hp}^2}{16\pi\hbar^2} \exp(-b_p|t|).$$

- $b_A$  slope parameter ( $hA$ )  
 $b_p$  slope parameter — fixed (use  $hp$  values)  
           7.7 ( $GeV/c$ )<sup>-2</sup> for pp, 6.6 for  $\pi^+p$  at 4 GeV/c  
 $\sigma_{hA}$   $hA$  total cross section (based on optical theorem)  
 $\sigma_{hp}$   $hp$  total cross section — fixed  
           42.2 (mb) for pp, 27.8 for  $\pi^+p$  at 4 GeV/c  
 $N_{eff}$  effective number of nucleons

$P_{inc}$ GeV/c	p + C			p + Al			p + p	
	$\sigma_{pA}$ mb	$b_A$ (GeV/c) <sup>-2</sup>	$N_{eff}$	$\sigma_{pA}$ mb	$b_A$ (GeV/c) <sup>-2</sup>	$N_{eff}$	$\sigma_{pp}$	$b_p$
175	329.3	74.0	3.5	648.5	120.3	3.7	37.5	11.5
125	-	-	-	653.3	119.1	3.6	37.5	11.5
70	325.3	70.5	3.9	652.3	118.8	4.2	37.5	11.5
19.3	335	67	3.6	687	111	4.9	38.9	10.4
3.9	342.5 ± 3.2	62.0 ± 0.7	4.6 ± 0.2	713.1 ± 11.9	109.2 ± 1.3	7.4 ± 0.5	42.2	7.7

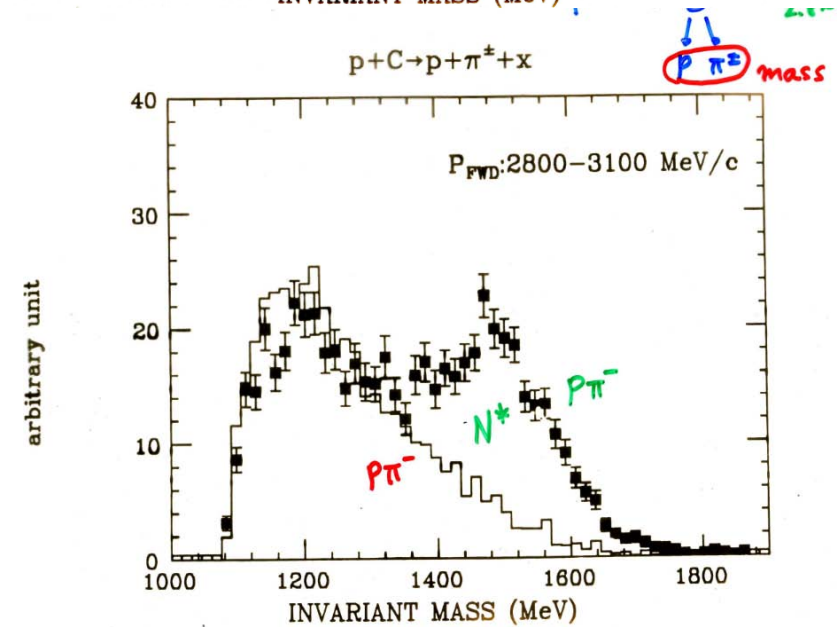
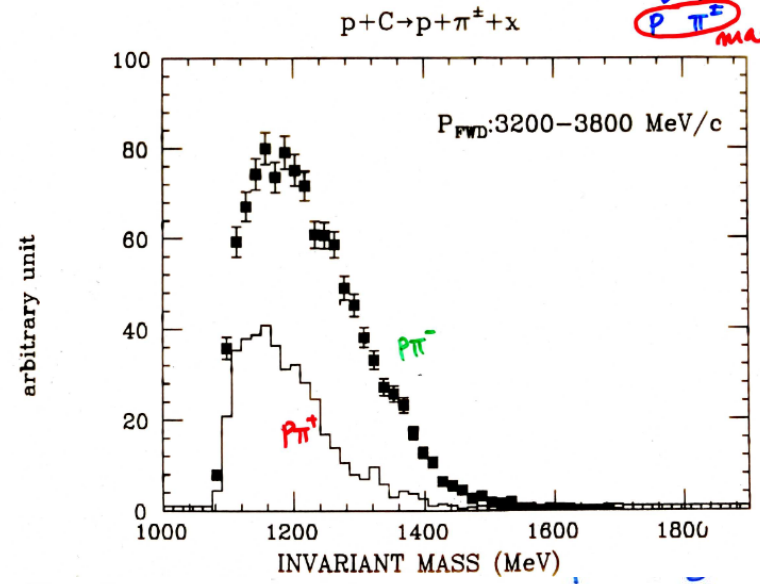
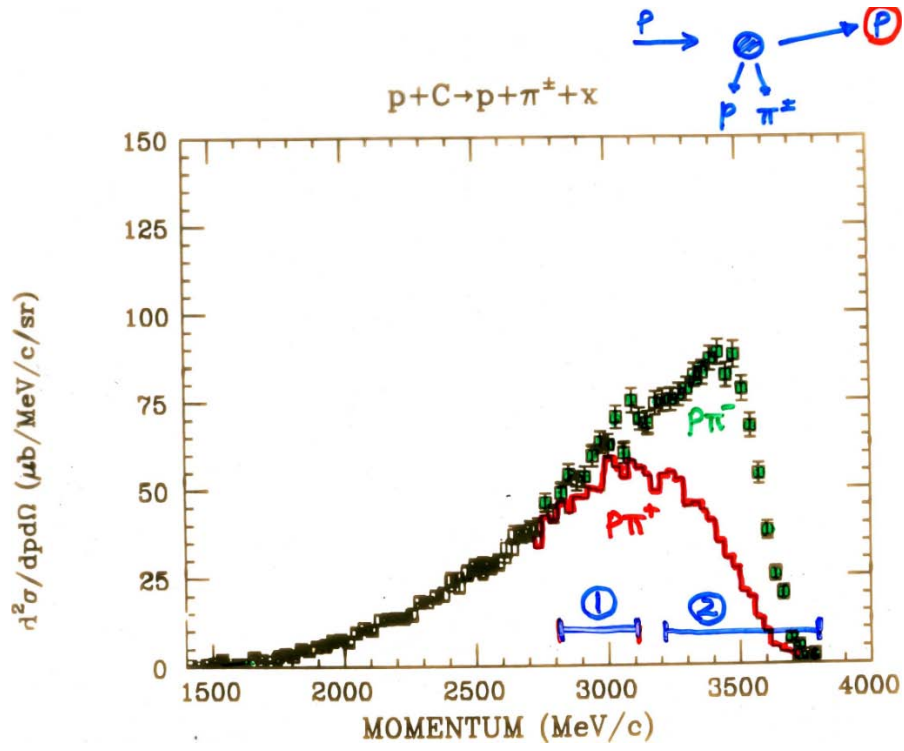
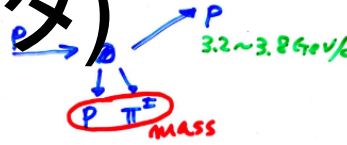
# Quasi-free inelastic

---



- Experimentalist's Toy Model
  - ISI (単なる吸収) +
  - $h^2N$  ( $hN$ と完全に同じ; Fermi運動) +
  - FSI (吸収)
- 測定
  - 前方粒子と散乱粒子の同時計測

# QF $\Delta$ at 3,4 GeV/c (実験データ)



# まとめ

---

実は、私はこの分野の最近の進展をフォローしていないので、間違っているかもしれないが...

- 数100MeV～数GeVのhA反応による生成物を「予言」する手段は核内カスケード(INC)が現時点では最善と思われる。
- しかし、「通常の」パラメタを使う限りINCでQF processは再現できない。
- 実験データを再現するように ad hoc にパラメタを独立にtuneしているのが現状？
- 「パラメタ」を統一して、多くのデータ、特にQFのデータを解析することにより、重要な物理量を手にいれることができるのではないか。

昨夜、スライドの準備をほぼ終えた後で、以下の論文をネットで見つけた。  
考え方の方向性は非常に近いと感じています。

魚住裕介 「200~400MeV領域での陽子入射原子核反応の研究」;  
核データニュース No98(2011) p24

# 追加

---

- (今日の話の中で)数10MeVのpA反応の残留核断面積が再現できないというのは信じられない。蒸発過程のモデルはかなり前に確立しているはずはなかったのか？(自分でキチンと確認したことはないのだが、複合核反応モデルの計算の中で、再現できるようなパラメタが相当正確に決められていると思っていた。)そうでないならば、応用分野の人々に対して原子核物理屋が責務を放棄しているとしか私には思えない。「原子核物理の物理としての興味」からは外れているかもしれないが、このような事をキチンと調べて情報を供給することも原子核物理屋の責任だと思う。