

H19.09.22 日本物理学会 第62回年次大会  
北海道大学札幌キャンパス

# 入射核破断片の運動量分布 の系統性

高知工科大学：百田佐多生，野尻洋一

放医研：金澤光隆，北川敦志，佐藤真二



# 研究の目的

## 破碎片の運動量分布（生成断面積）

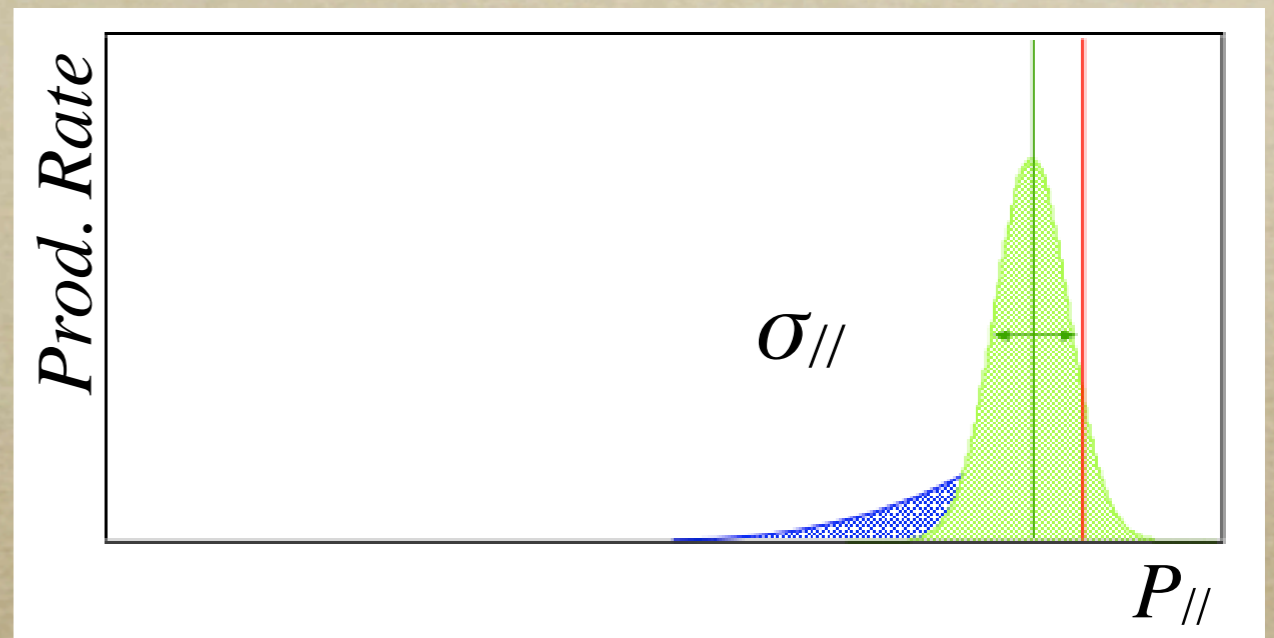
- 破碎片生成過程のメカニズム
  - 運動量分布 → 反応に関与する相互作用
  - 生成断面積 → 核構造効果
- 核データ
  - 二次ビーム強度の予測
  - 照射効果の評価（*Ex.* がん治療）



# 破碎片の運動量分布: $P_{//}$

## 📌 *Goldhaber* 模型

フェルミ運動量( $P_F$ )による広がり



$$\sigma_{//} = \sigma_{GH}$$

$$\sigma_{GH} = \sigma_0 \sqrt{\frac{A_F (A_P - A_F)}{A_P - 1}}$$

●  $E_i \geq 1 \text{ GeV}/u$

$$\sigma_0 \sim \frac{P_F}{\sqrt{5}} \sim 112 \text{ (MeV / c)}$$

●  $E_i \sim 100 \text{ MeV}/u$

$$\sigma_0 \sim 95 \text{ (MeV / c)}$$



# 破碎片の運動量分布: $P_{\perp}$

$$E \geq 1 \text{ GeV}/c : \sigma_{\perp} \sim \sigma_{\parallel}$$

中間エネルギー ( $\sim 100 \text{ MeV}/u$ ) では？



# 破碎片の運動量分布: $P_{\perp}$

$$\sigma_{\perp}^2 = \sigma_{GH}^2 + \sigma_D^2 + \sigma_C^2 + \sigma_{D \times C}$$

- 標的核による軌道偏向の寄与

$$\sigma_D = \sigma_{D0} \sqrt{\frac{A_F (A_F - 1)}{A_P (A_P - 1)}}$$

●  $E_i \sim 100 \text{ MeV/u}$ ,  $^{16}\text{O} + \text{Trg.}$

*Phys. Rev. Lett.* 43 (1979) pp.840

$$\sigma_{D0} \sim 200 \text{ (MeV / c)}$$

- *Coulomb final state interaction*の寄与

$$\sigma_C = C_0 \sqrt{(Z_P - Z_F) \left( \frac{1}{3} + \frac{Z_P - Z_F - 1}{8} \right)}$$

●  $E_i \sim 100 \text{ MeV/u}$

$^{16}\text{O}$  or  $^{40}\text{Ar} + \text{Trg.}$

*Phys. Rev. Lett.* 43 (1979) pp.840

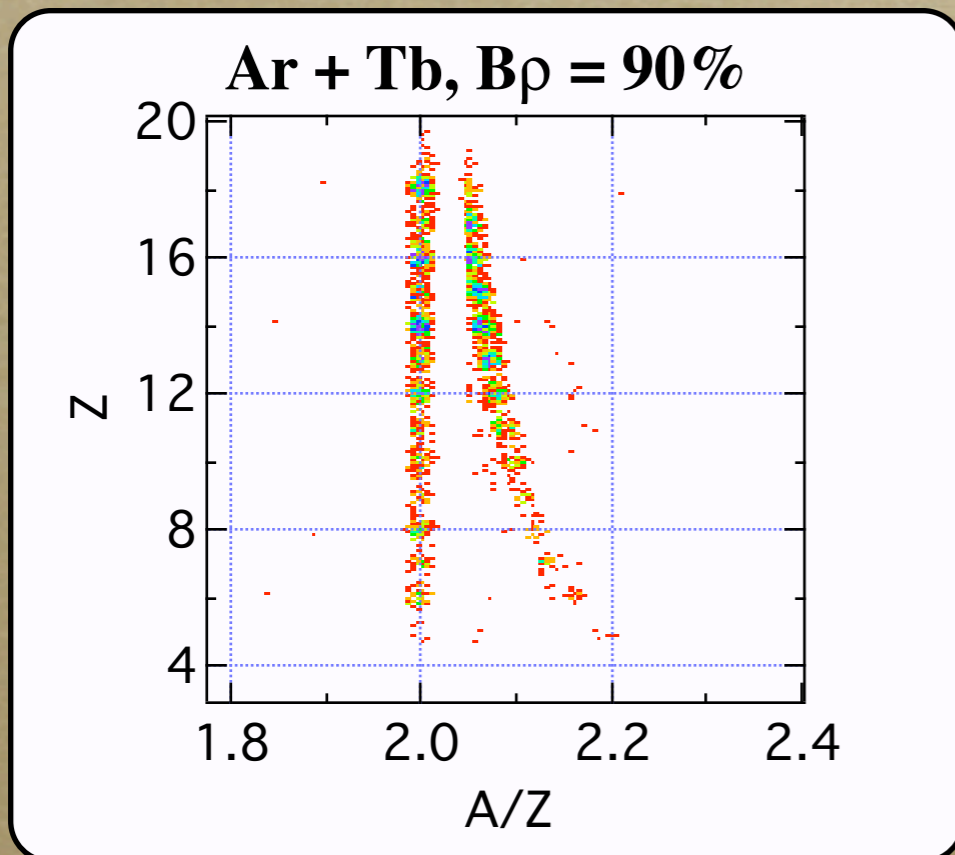
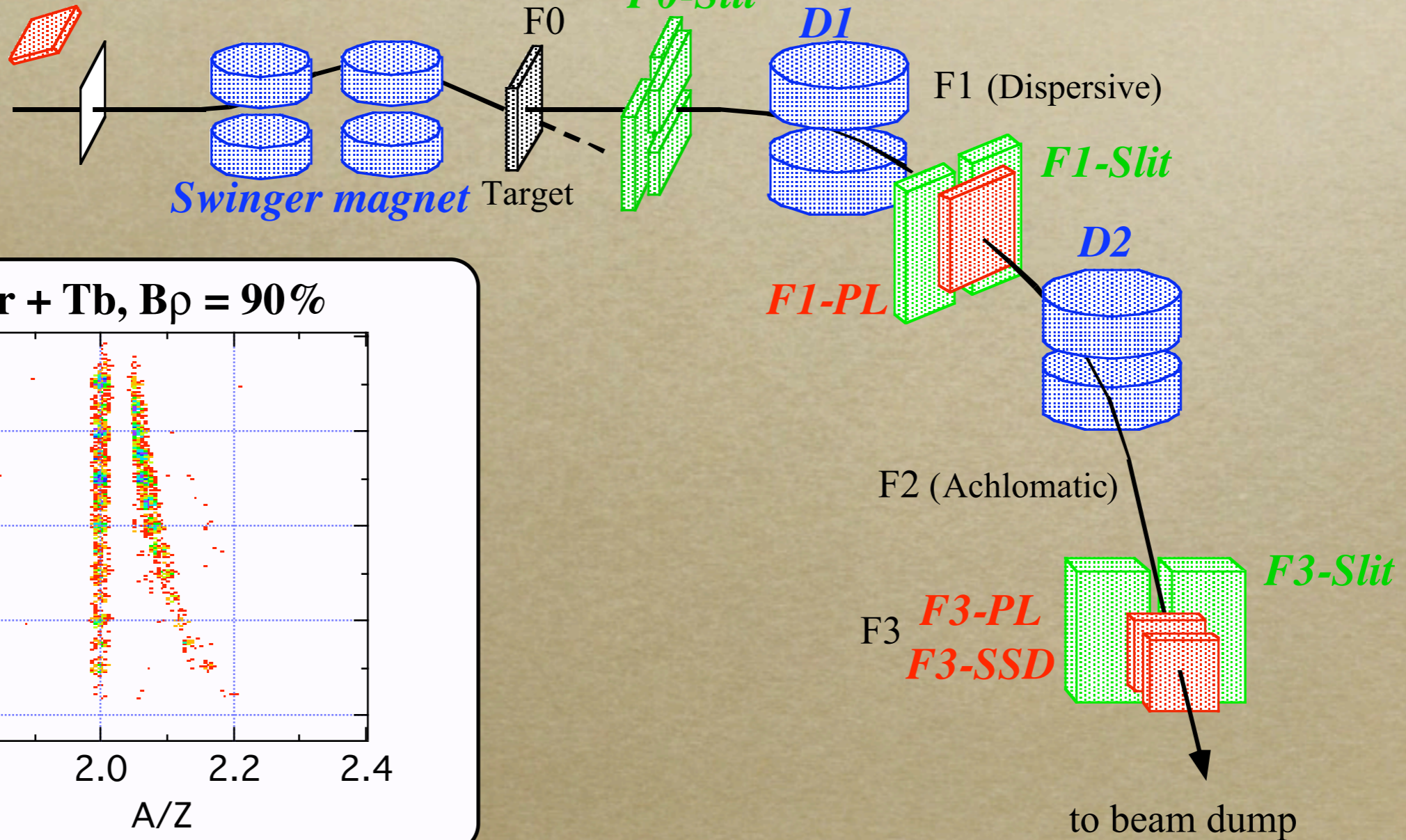
$$C_0^2 = 2702 \times Z_F \cdot \frac{A_F}{A_F + 1} \cdot A_P^{1/3}$$



# 運動量分布の測定

放射線医学総合研究所：HIMAC加速器+二次ビームコース

*Beam current monitor*

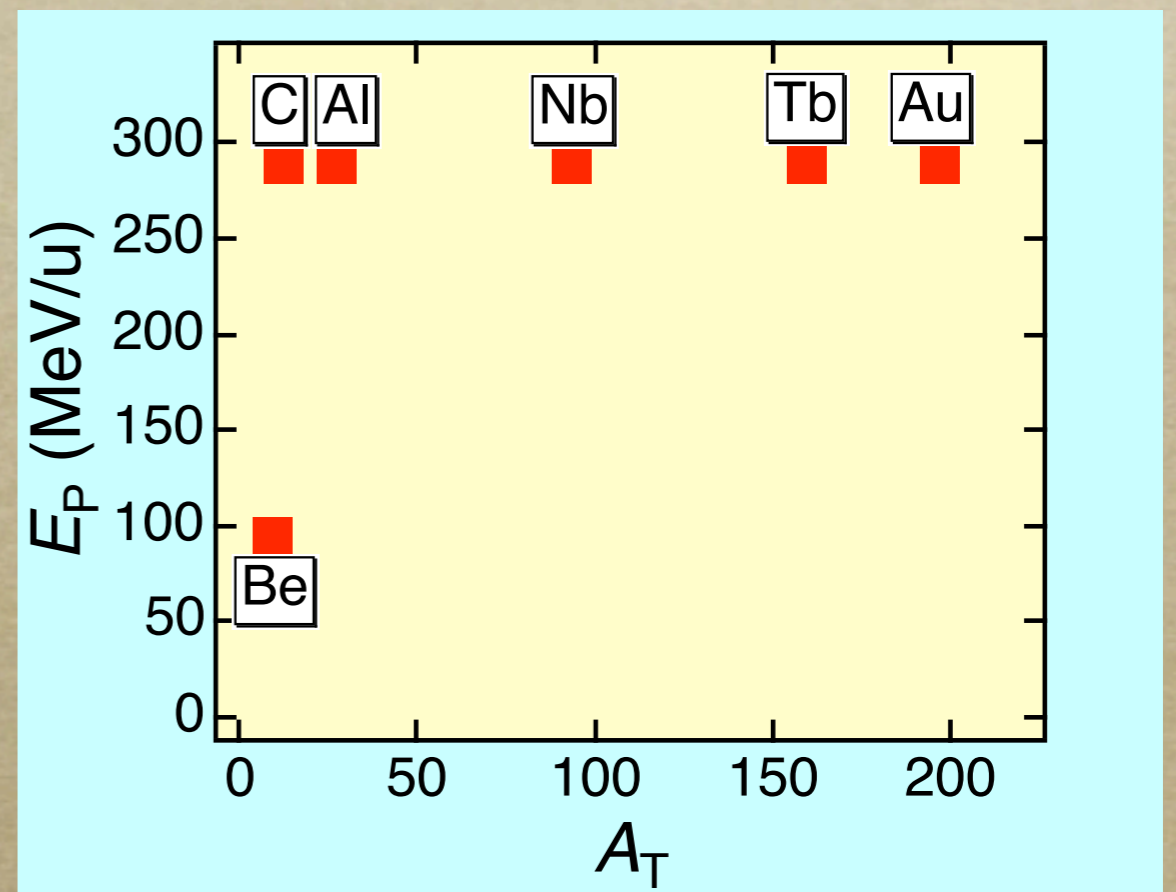




# 反応及び測定条件

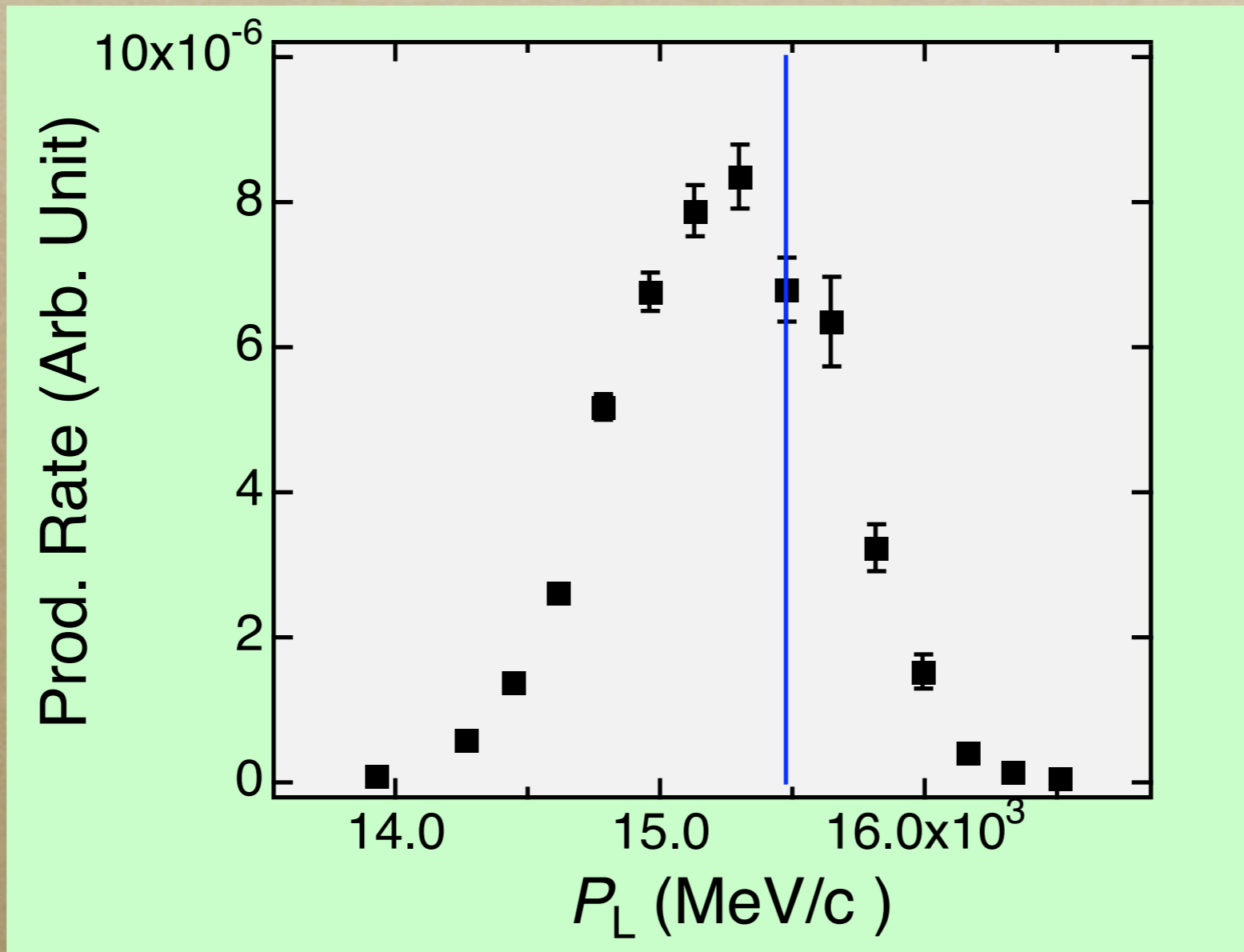
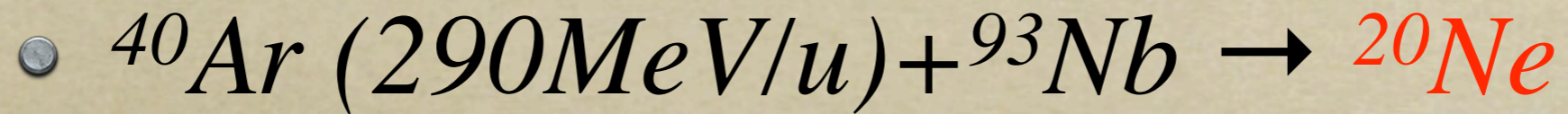
<i>Reaction</i>	$E_i$ (MeV/u)	$\sigma_E/E_0$ (%)	$\sigma_\theta/\Delta\theta$ (%)
$^{40}\text{Ar}+^9\text{Be}$	95	0.04	6.2
$^{12}\text{C}$	290	0.03	8.0
$^{27}\text{Al}$	290	0.02	10
$^{93}\text{Nb}$	290	0.03	23
$^{159}\text{Tb}$	290	0.03	26
$^{197}\text{Au}$	290	0.04	35

*Energy and angular straggling are calculated by LISE.*



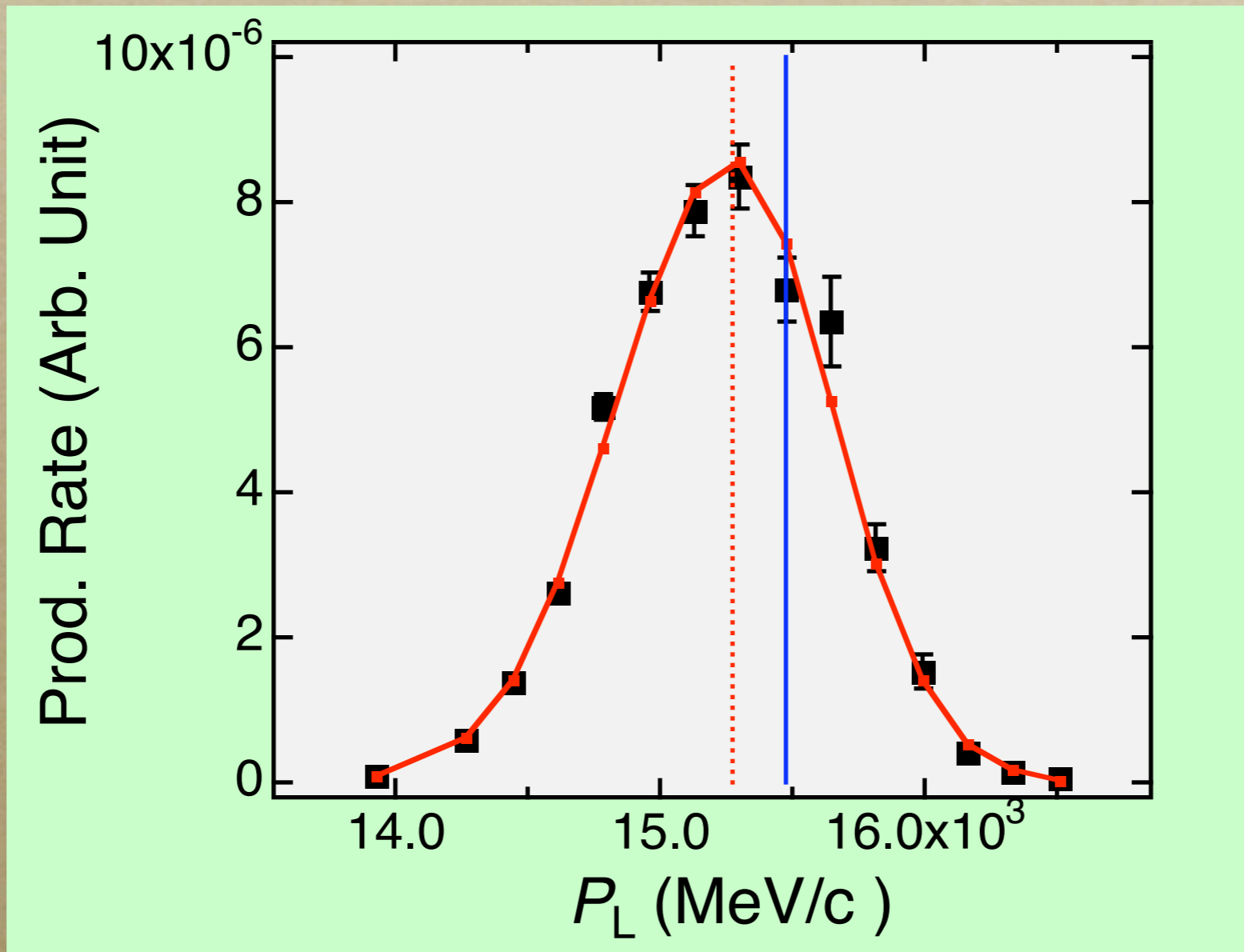
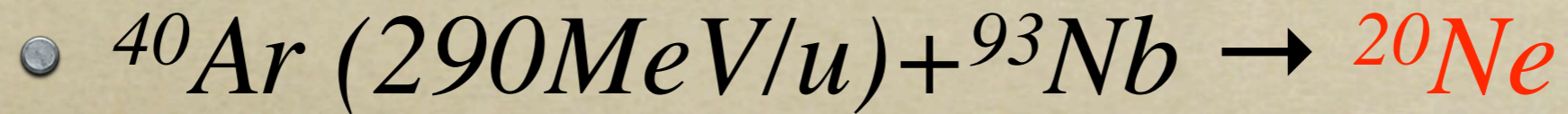


# $P_{//}$ 分布の解析



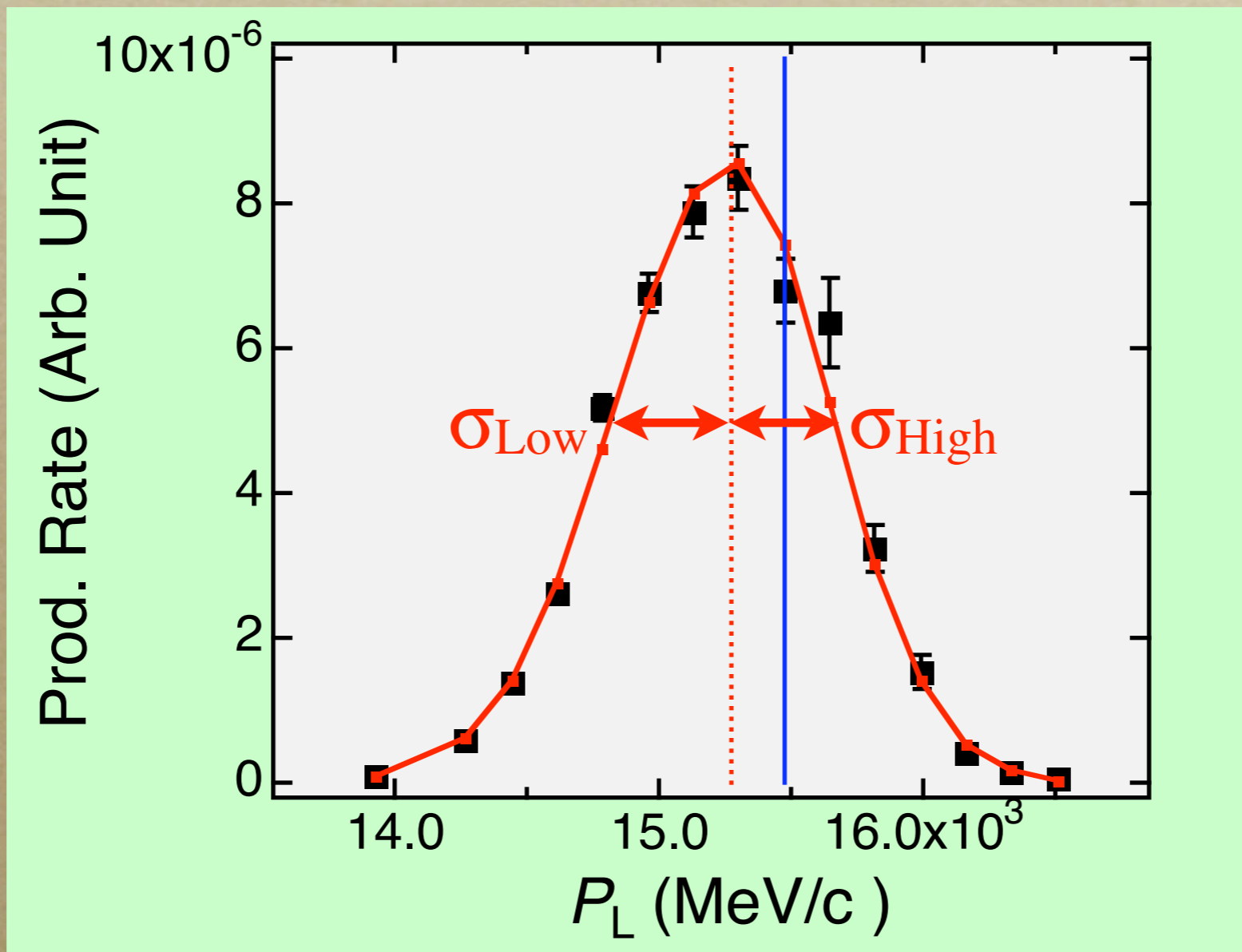
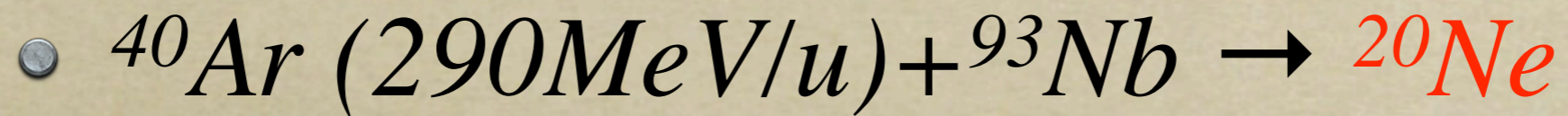


# $P_{//}$ 分布の解析





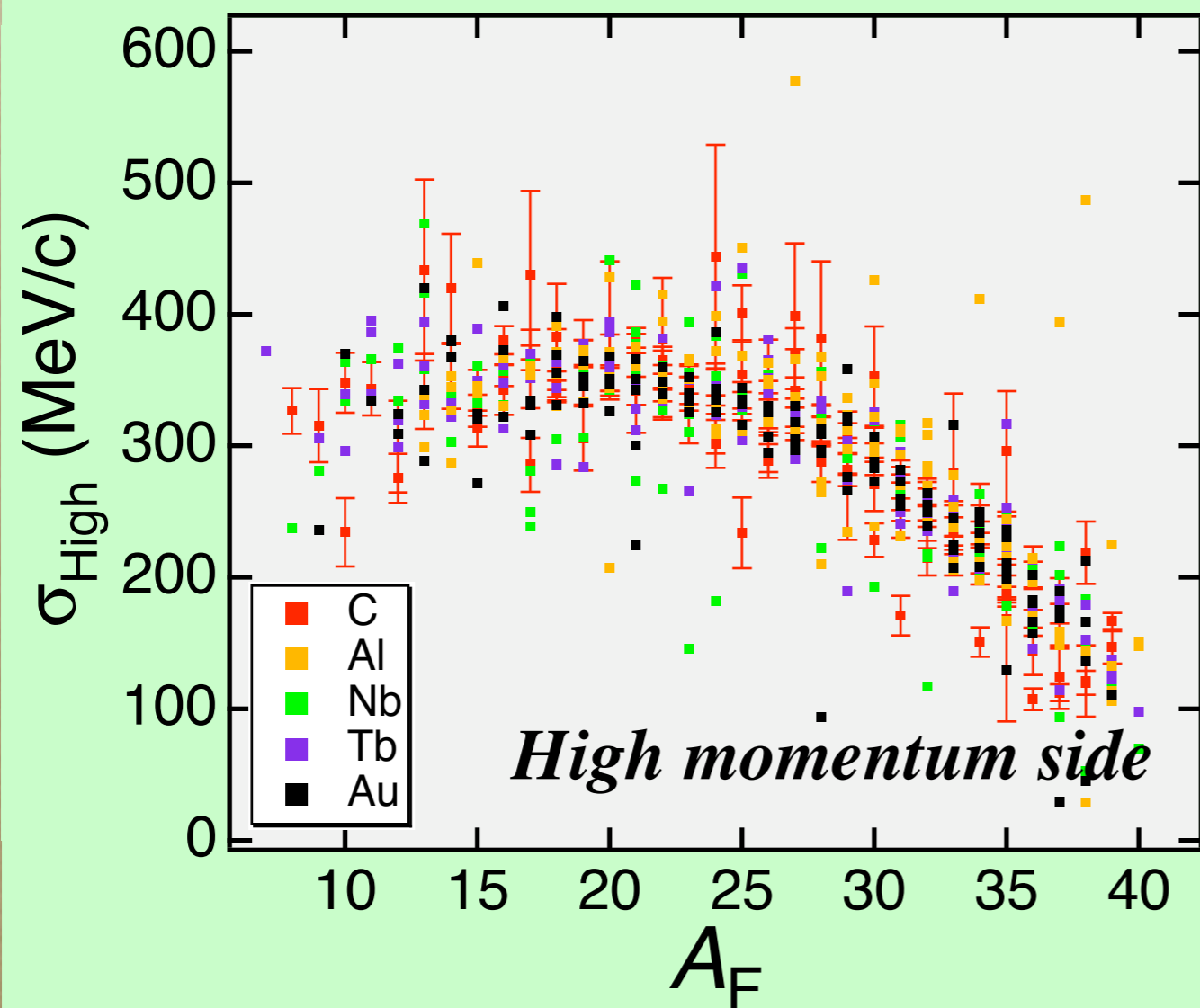
# $P_{//}$ 分布の解析





# $P_{//}$ 分布： $\sigma_{\text{High}} \rightarrow \sigma_0$

●  $^{40}\text{Ar} (290\text{MeV}/u) + \text{C}, \text{Al}, \text{Nb}, \text{Tb}, \text{Au}$

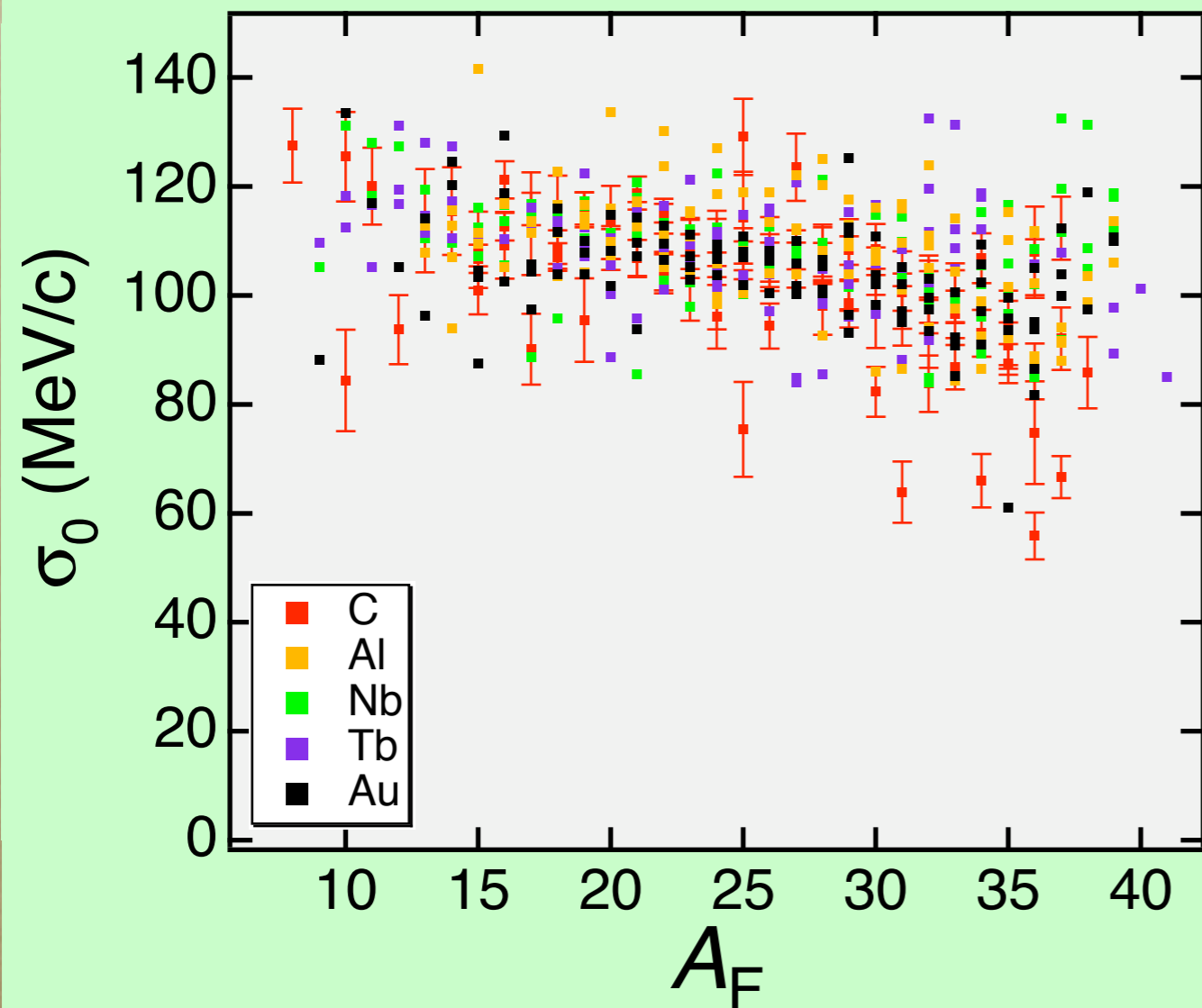


$$\sigma_{\text{GH}} = \sigma_0 \sqrt{\frac{A_F (A_P - A_F)}{A_P - 1}}$$



# $P_{//}$ 分布： $\sigma_{\text{High}} \rightarrow \sigma_0$

●  $^{40}\text{Ar} (290\text{MeV}/u) + \text{C}, \text{Al}, \text{Nb}, \text{Tb}, \text{Au}$

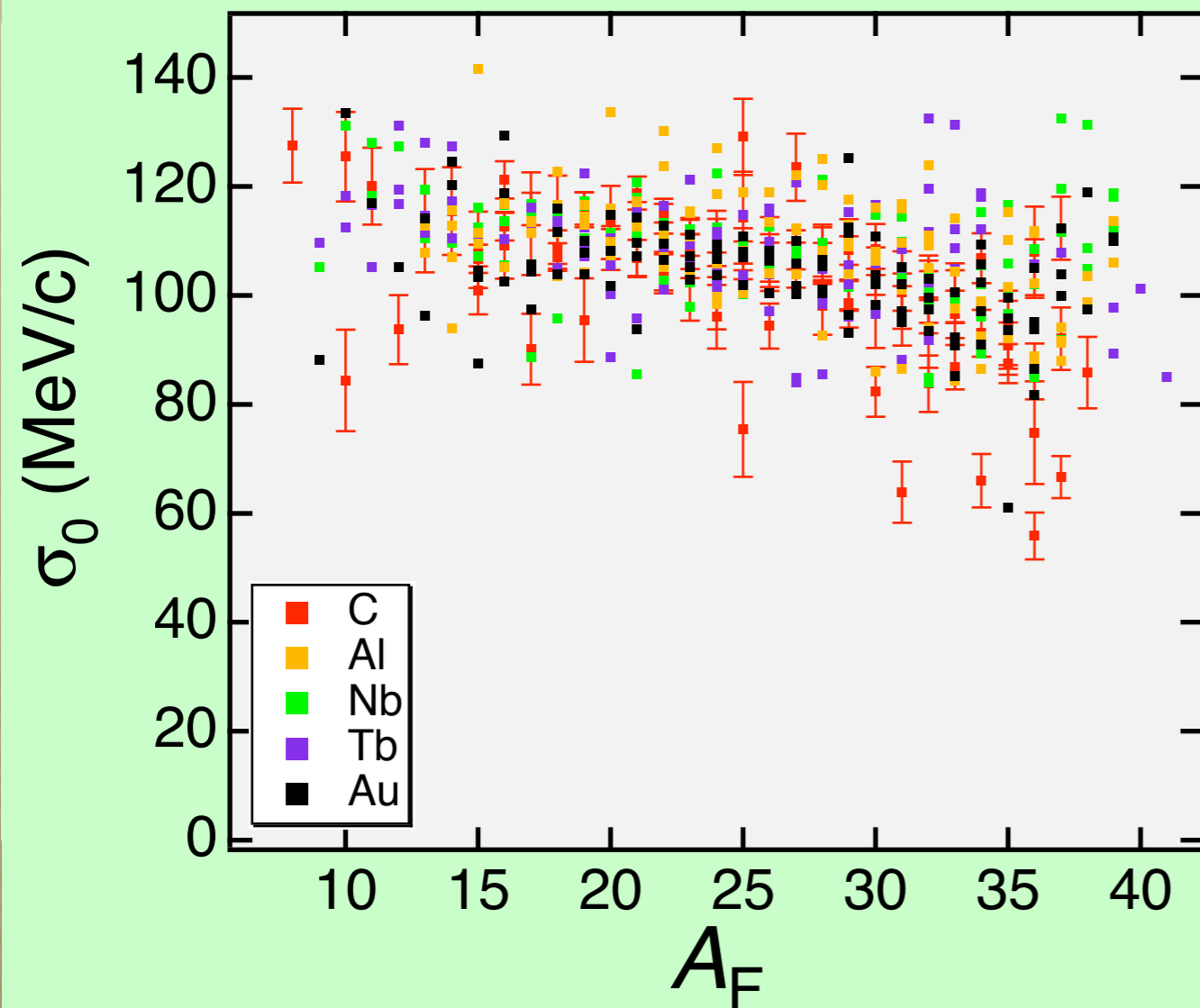


$$\sigma_{\text{GH}} = \sigma_0 \sqrt{\frac{A_F (A_P - A_F)}{A_P - 1}}$$

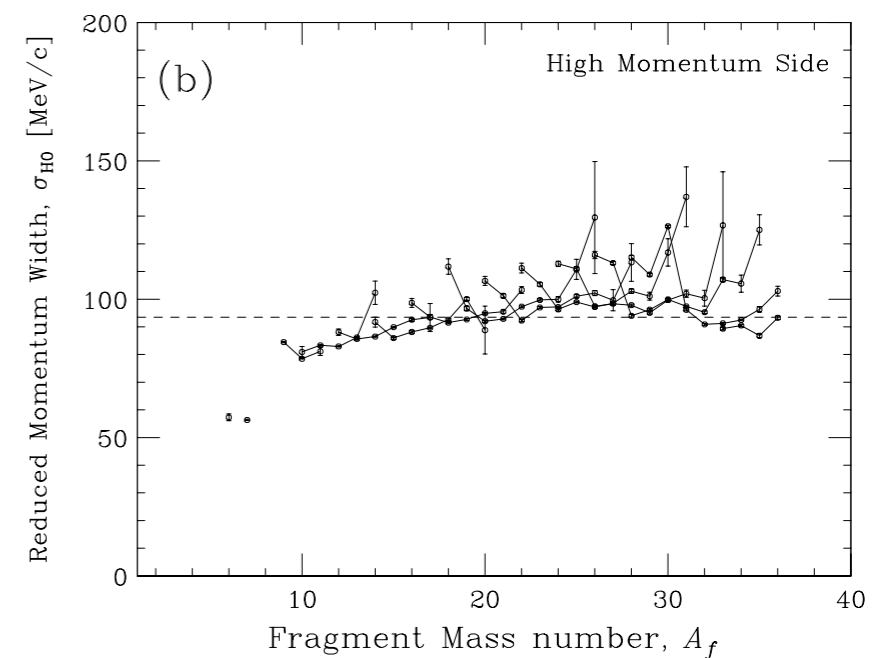


# $P_{//}$ 分布 : $\sigma_{\text{High}} \rightarrow \sigma_0$

$^{40}\text{Ar} (290\text{MeV}/u) + \text{C}, \text{Al}, \text{Nb}, \text{Tb}, \text{Au}$



$^{40}\text{Ar} (90\text{MeV}/u) + \text{Be}$   
*M. Notani et al.\**



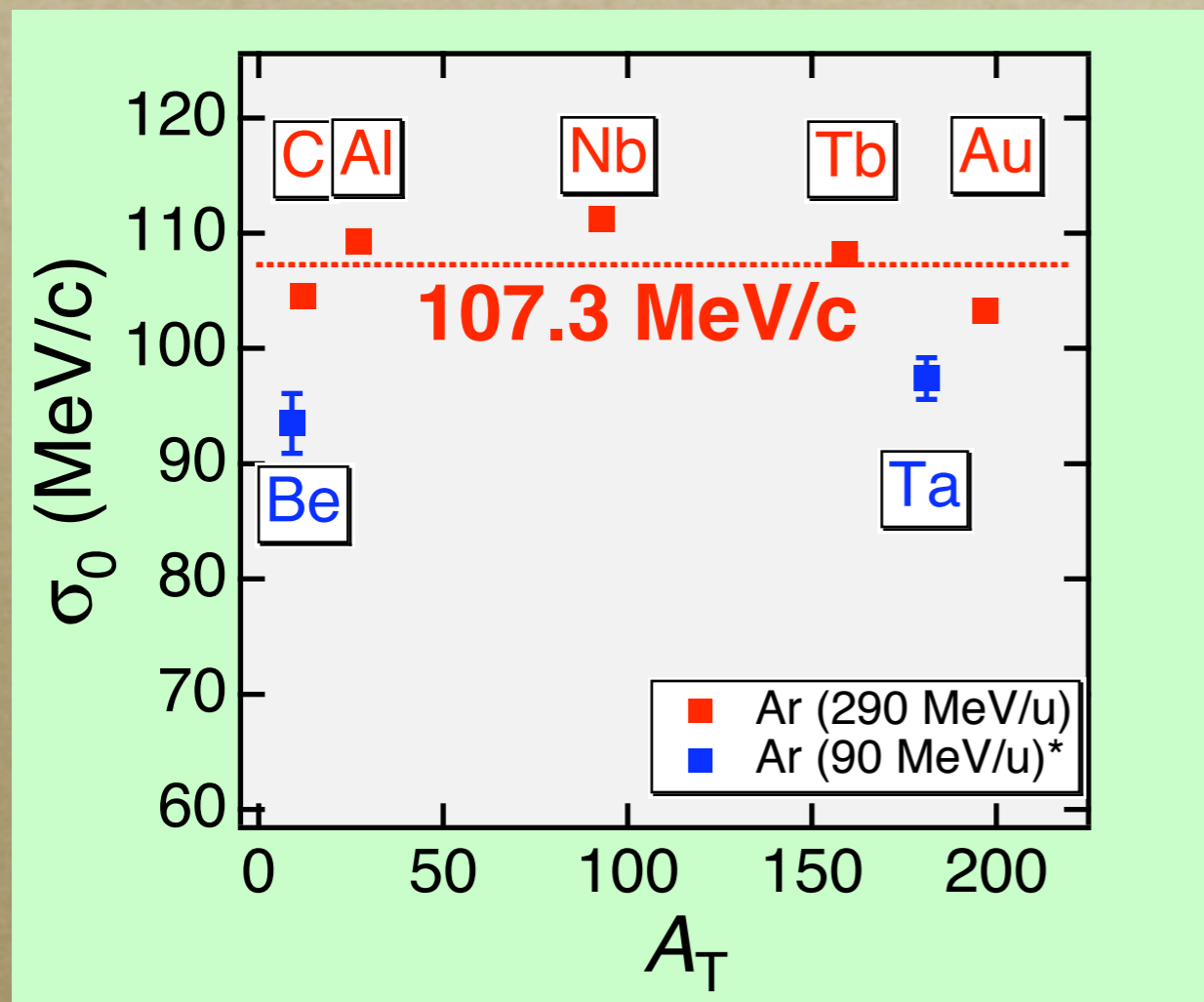
$$\sigma_{\text{GH}} = \sigma_0 \sqrt{\frac{A_F (A_P - A_F)}{A_P - 1}}$$

*\*to be published in Phys. Rev. C*



# $P_{//}$ 分布： $\sigma_0$

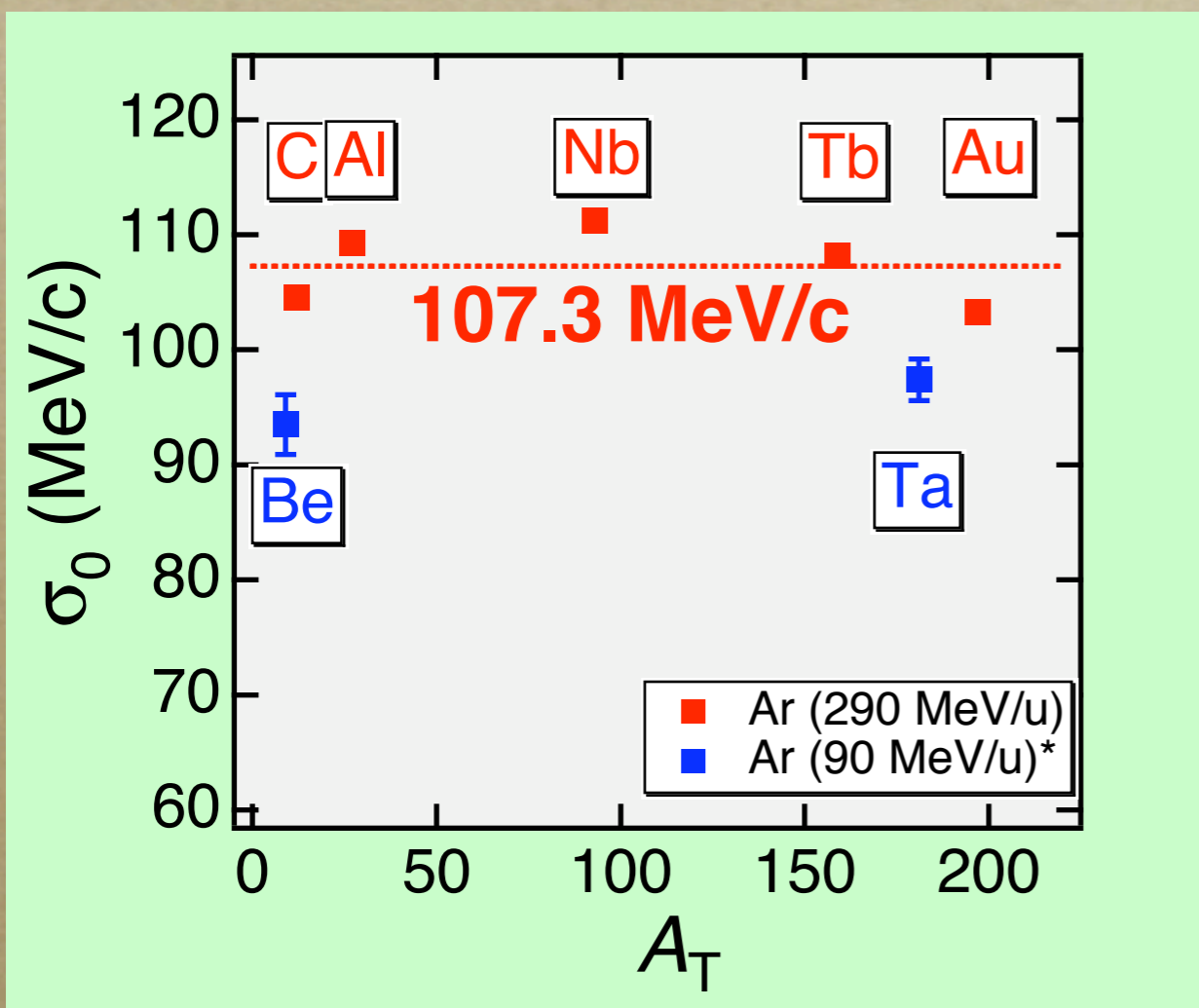
●  $\sigma_0$ の標的依存性



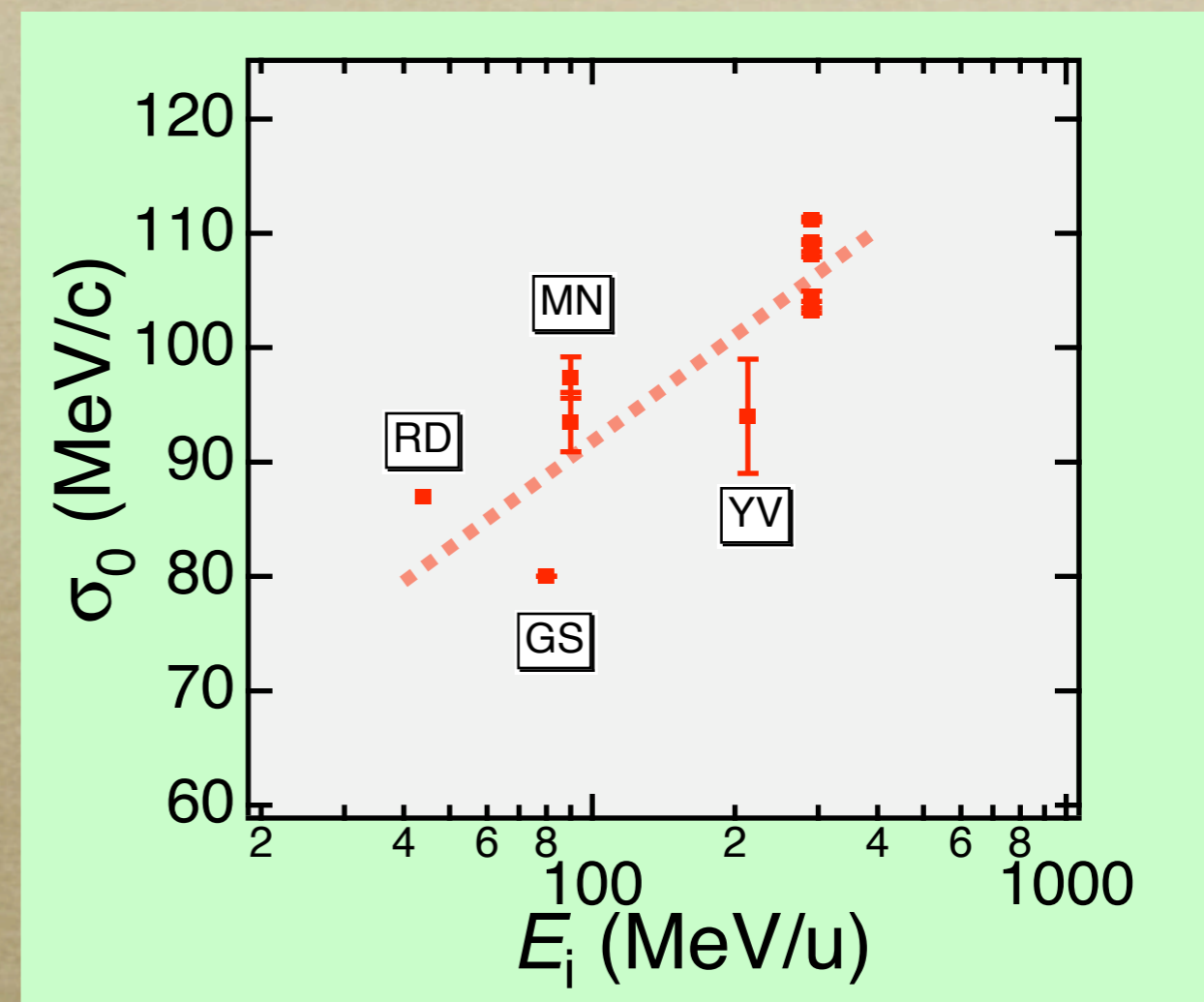


# $P_{//}$ 分布： $\sigma_0$

●  $\sigma_0$ の標的依存性



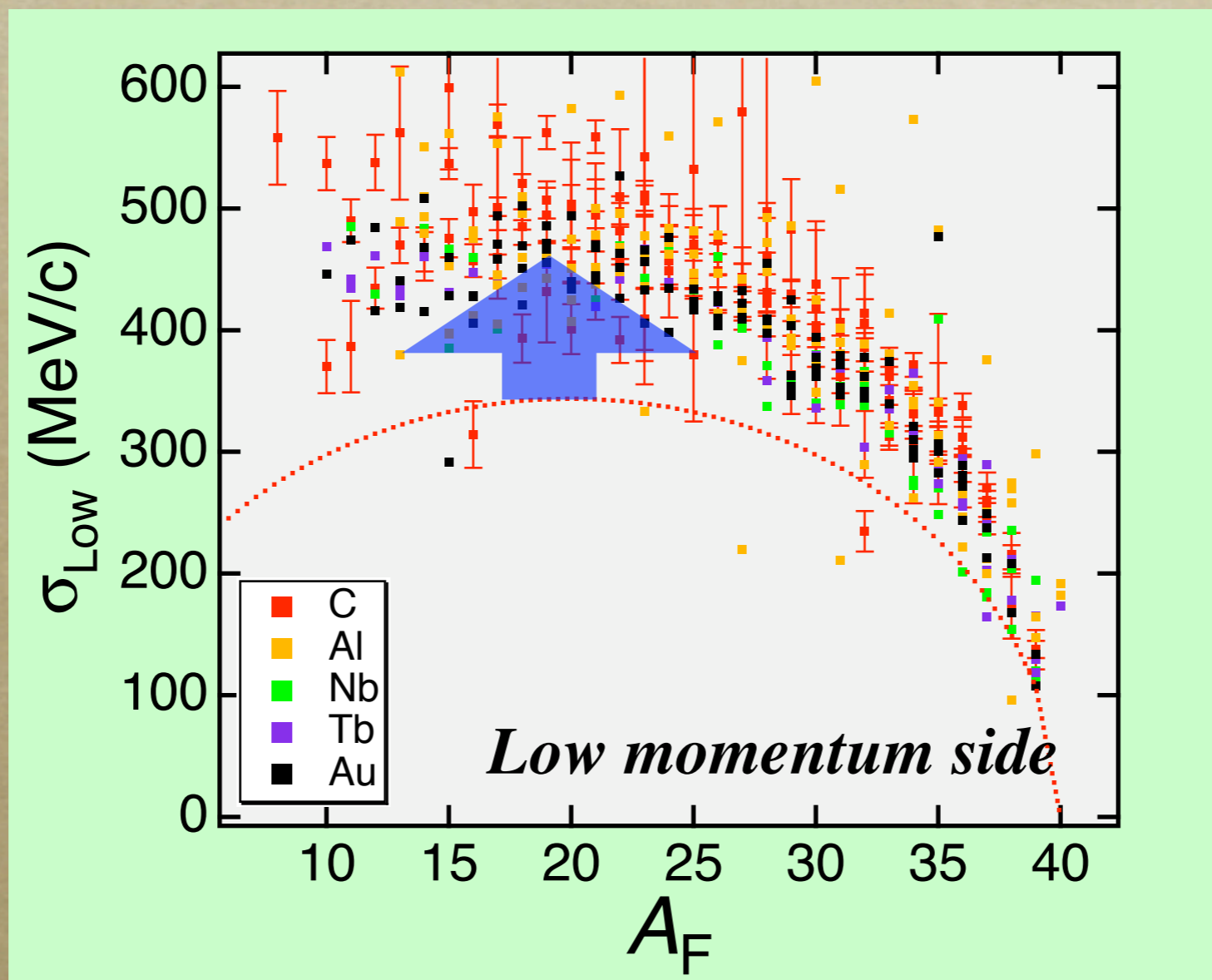
●  $\sigma_0$ の $E_i$ 依存性





# $P_{//}$ 分布： $\sigma_{\text{Low}}$

- $^{40}\text{Ar}$  (290 MeV/u) + C, Al, Nb, Tb, Au

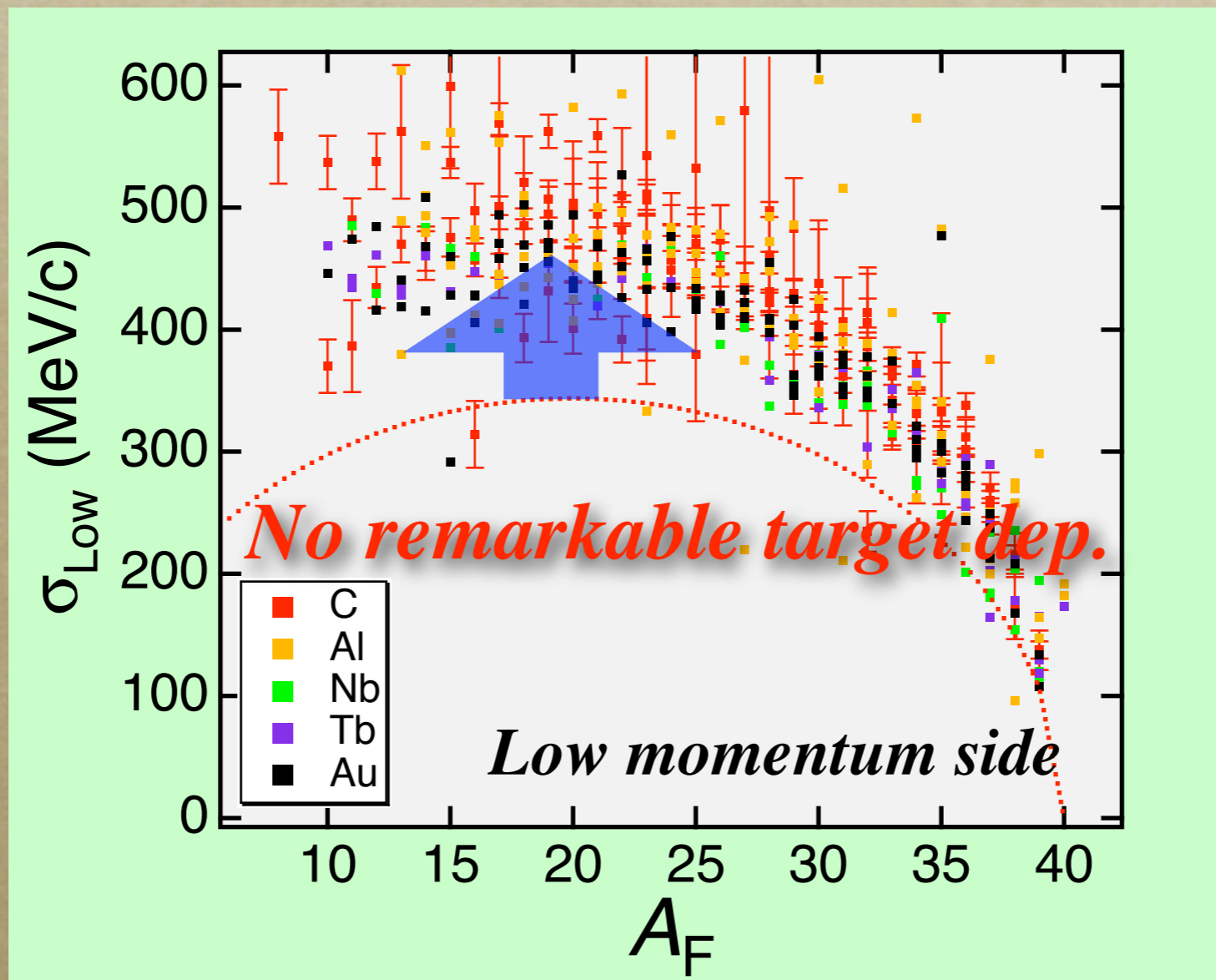


$$\sigma_0 = 107.3 \text{ MeV/c}$$



# $P_{//}$ 分布： $\sigma_{\text{Low}}$

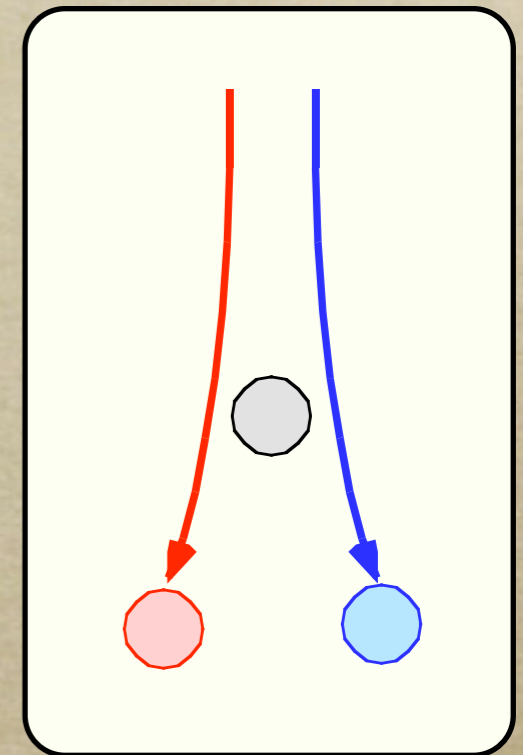
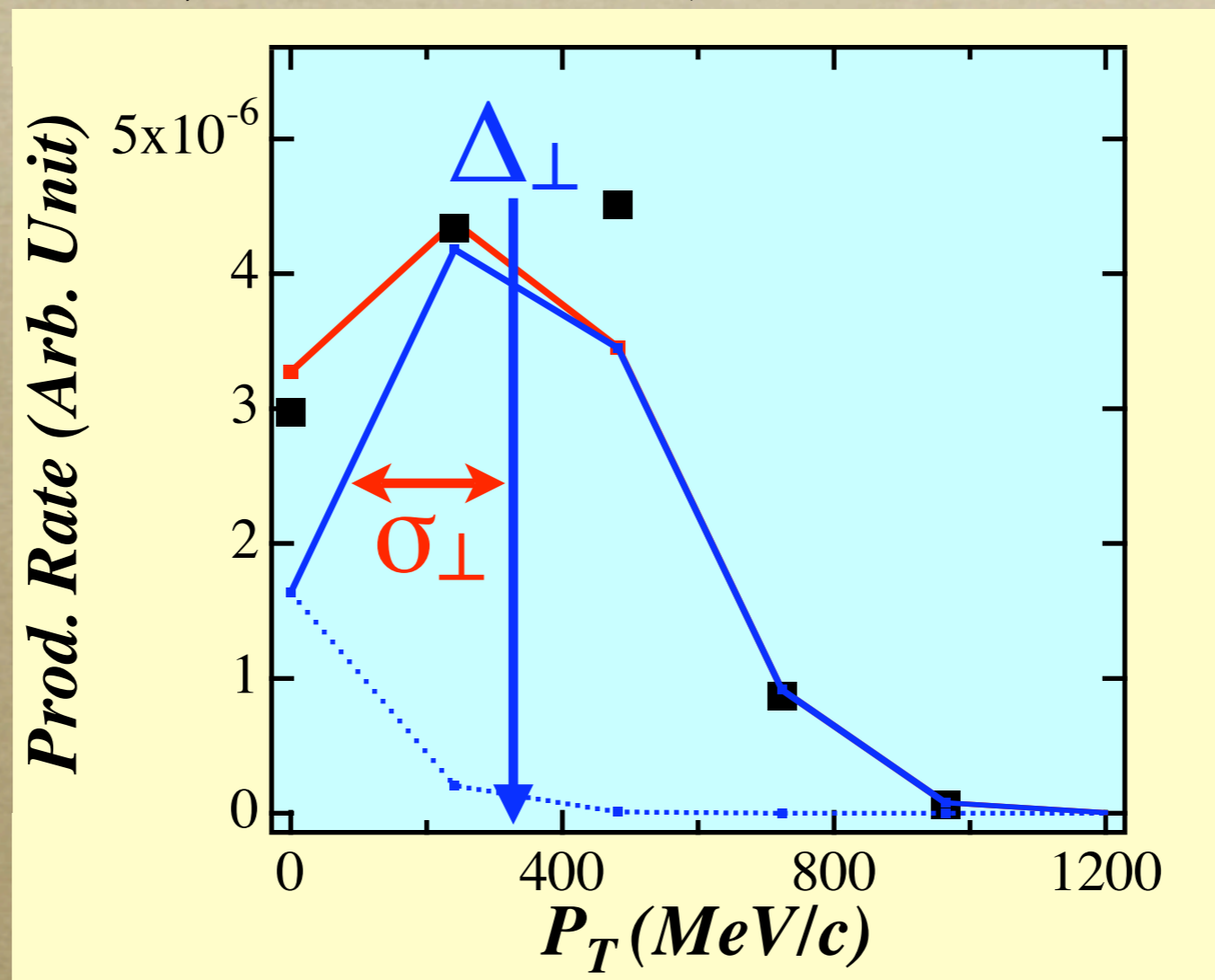
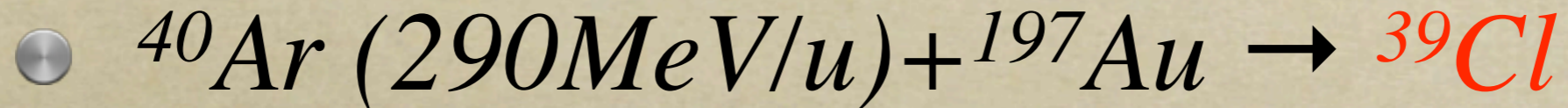
- $^{40}\text{Ar}$  (290 MeV/u) + C, Al, Nb, Tb, Au



$$\sigma_0 = 107.3 \text{ MeV/c}$$



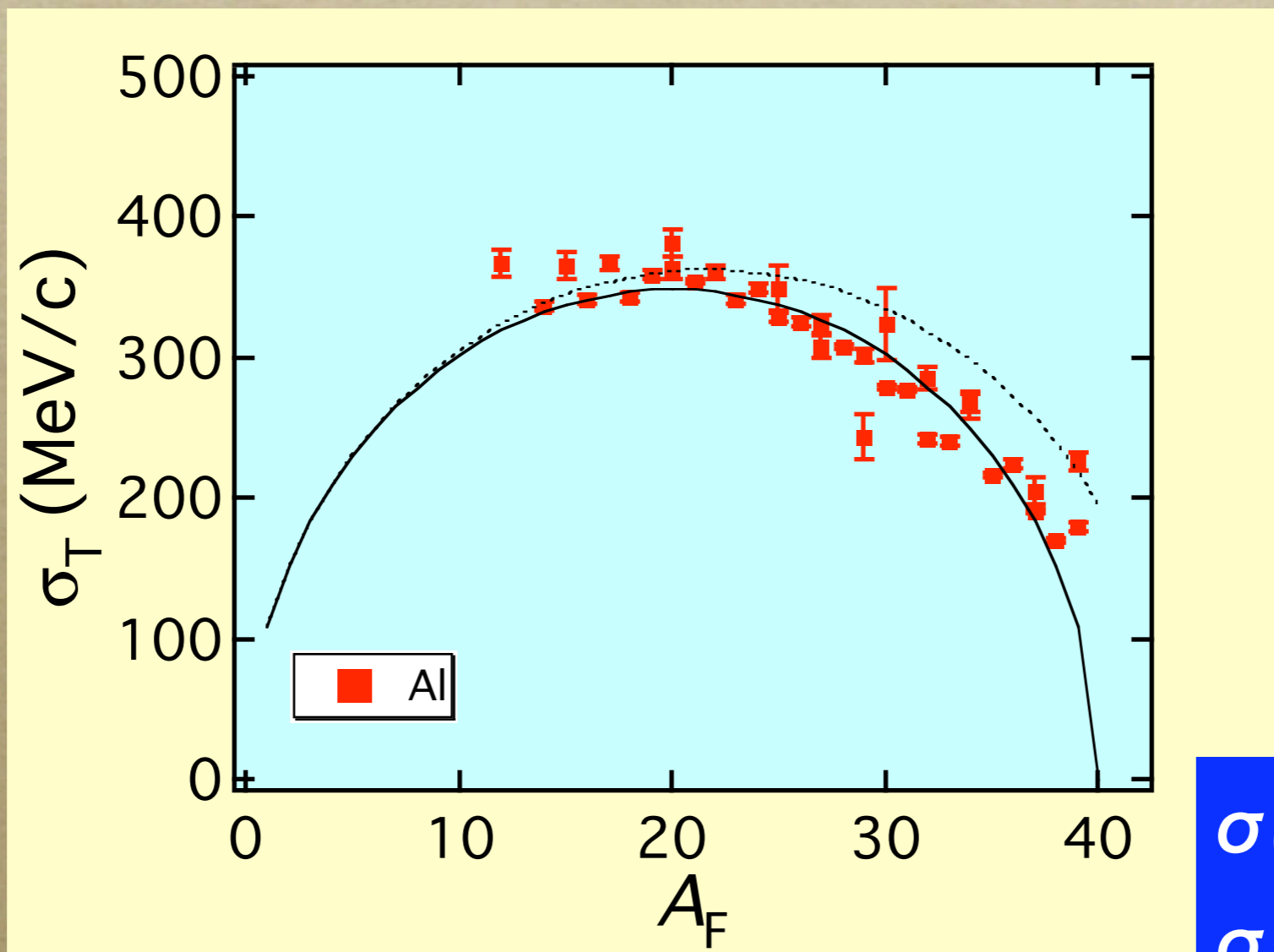
# $P_{\perp}$ 分布の解析



$$Y = \int_{P_{\perp}^{-}}^{P_{\perp}^{+}} k \left\{ \exp\left(-\frac{(P_{\perp} - \Delta_{\perp})^2}{2\sigma_{\perp}^2}\right) + \exp\left(-\frac{(P_{\perp} + \Delta_{\perp})^2}{2\sigma_{\perp}^2}\right) \right\} dP_{\perp}$$



# $P_{\perp}$ 分布： $\sigma_{\perp}$ , 290MeV/u

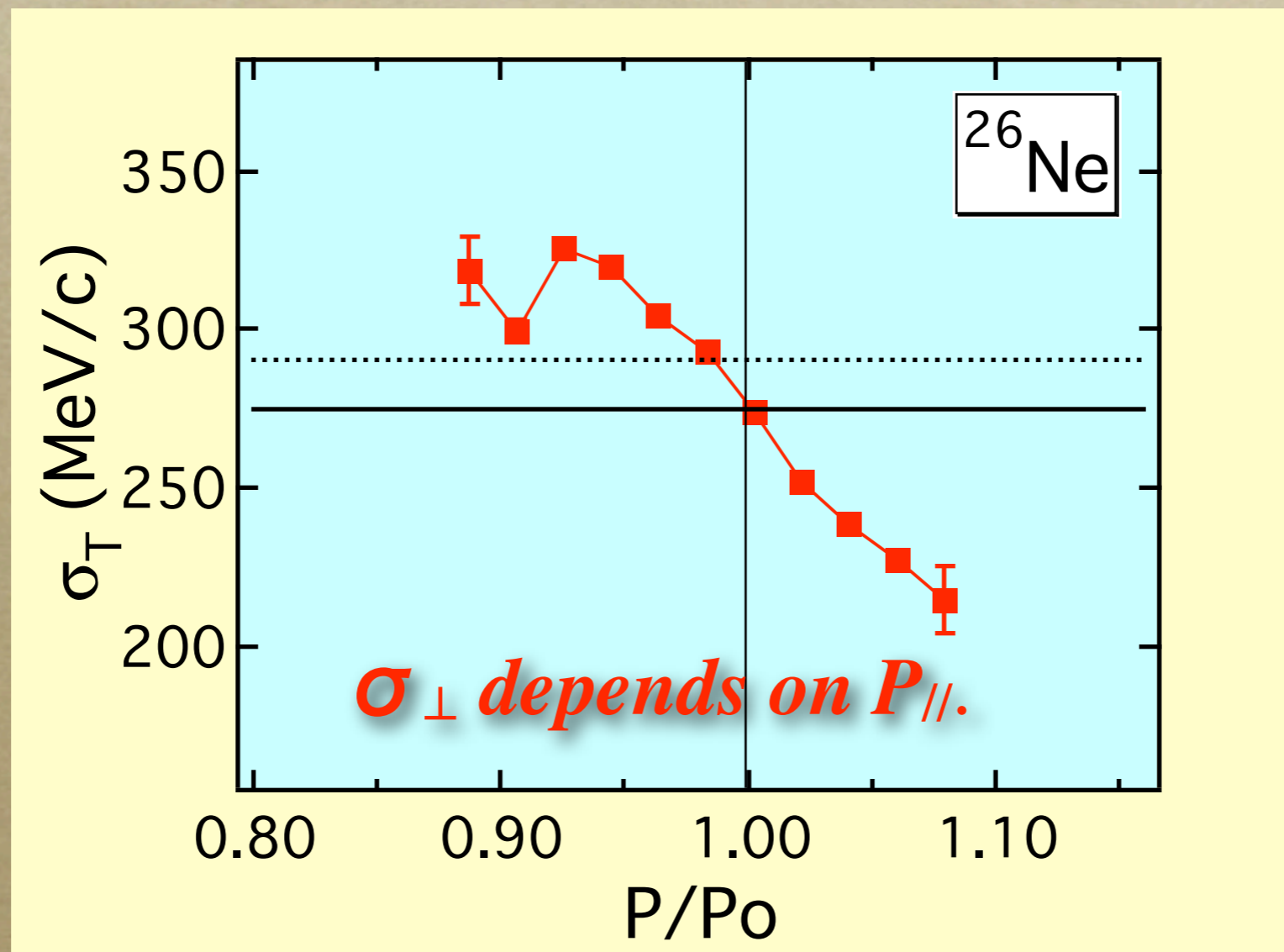
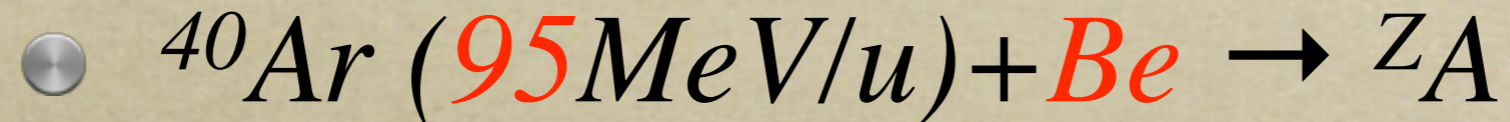


$$\sigma_0 = 107.3 \text{ MeV/c}$$

$$\sigma_{D0} = 195 \text{ MeV/c}$$

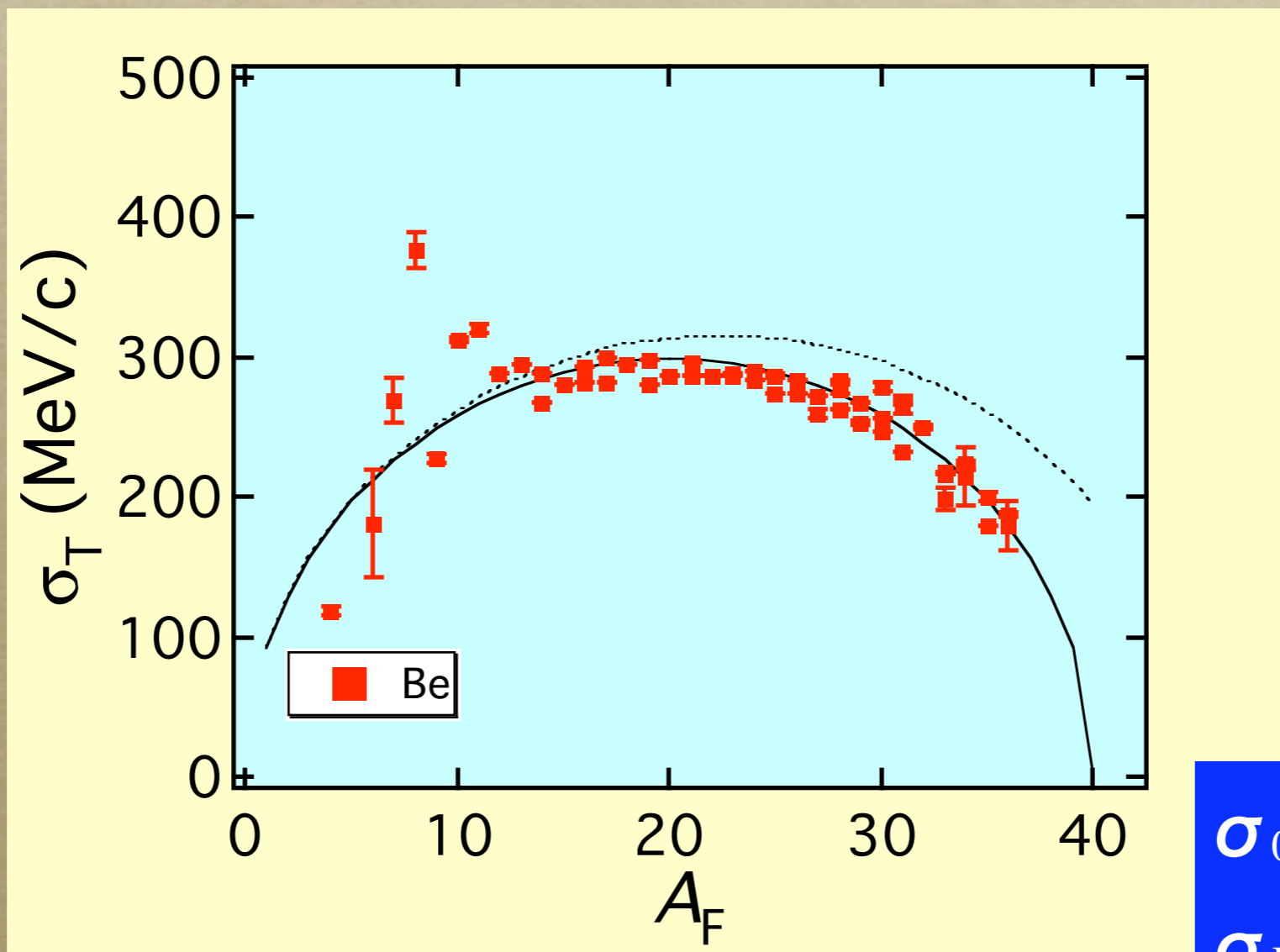
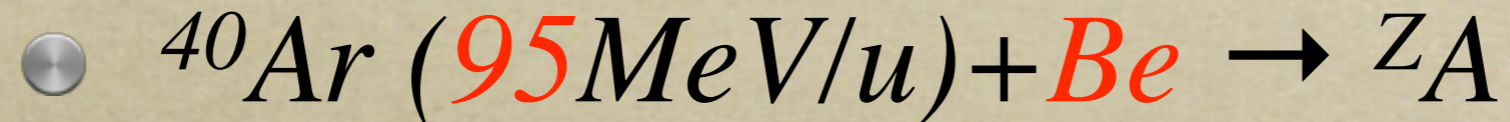


# $P_{\perp}$ 分布： $\sigma_{\perp}$ , 95MeV/u





# $P_{\perp}$ 分布： $\sigma_{\perp}$ , 95MeV/u



$$\sigma_0 = 93.5 \text{ MeV/c}$$

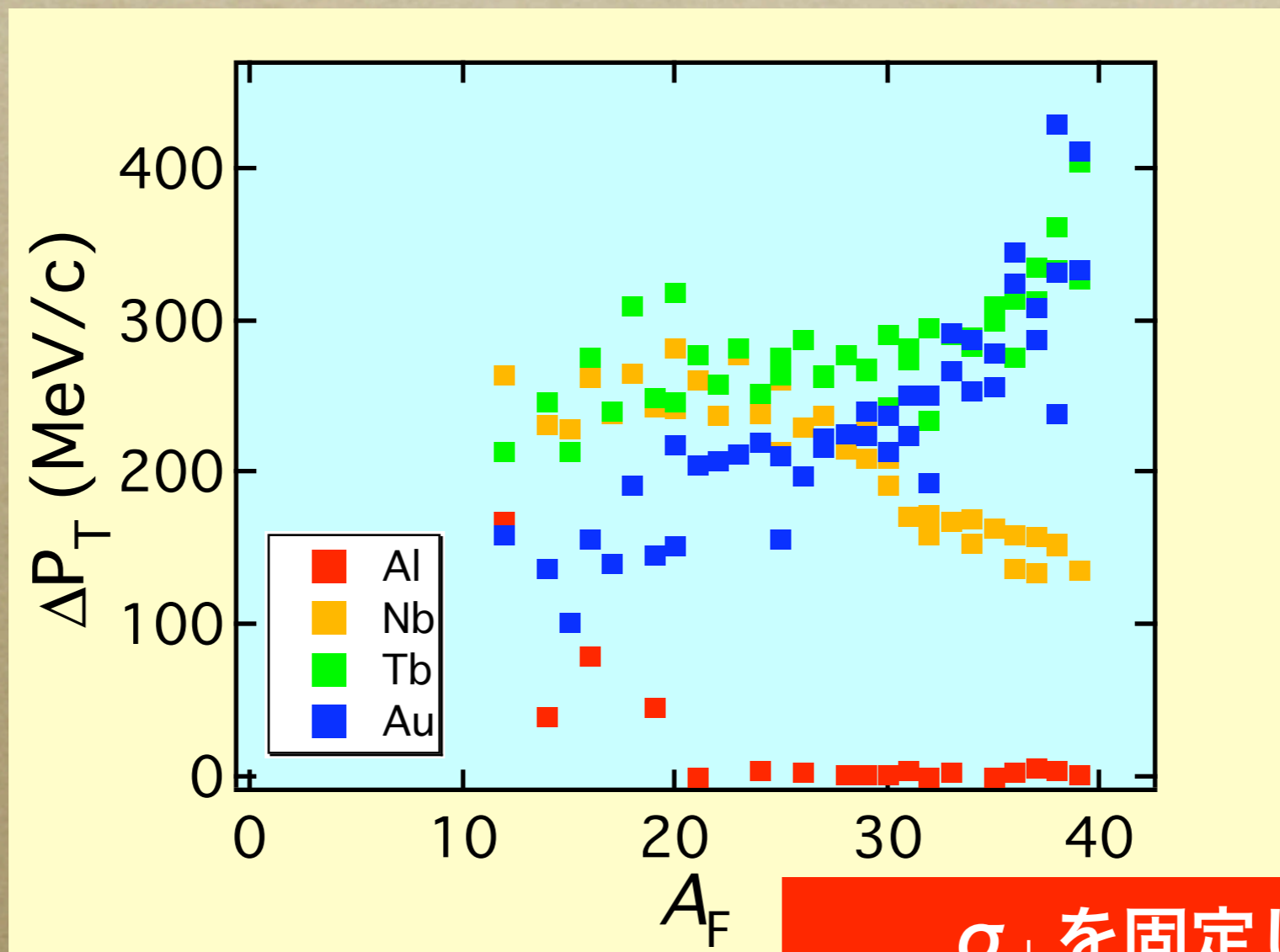
$$\sigma_{D0} = 195 \text{ MeV/c}$$

$P/P_0 \sim 1$ で測定された  $\sigma_{\perp}$



# $P_{\perp}$ 分布： $\Delta_{\perp}$

●  $^{40}\text{Ar}$  (290 MeV/u) + *Al, Nb, Tb, Au*  $\rightarrow$   $^Z\text{A}$



$\sigma_{\perp}$  を固定してfitting  
( $\sigma_0 = 90$  MeV/c,  $\sigma_{D0} = 195$  MeV/c)



# 結論

- $P_{//} \rightarrow \sigma_{\text{Low}}, \sigma_{\text{High}}$ 
  - $\sigma_{\text{Low}} / \sigma_{\text{High}} \sim 1.3$  at 290 MeV/u
  - $\sigma_{\text{Low}}, \sigma_{\text{High}}$  いずれも標的依存性なし
  - $\sigma_0 = 107.3 \text{ MeV}/c$  :  $E_i$  とともに増加



# 結論

- $P_{//} \rightarrow \sigma_{\text{Low}}, \sigma_{\text{High}}$ 
  - $\sigma_{\text{Low}} / \sigma_{\text{High}} \sim 1.3$  at 290 MeV/u
  - $\sigma_{\text{Low}}, \sigma_{\text{High}}$  いずれも標的依存性なし
  - $\sigma_0 = 107.3 \text{ MeV}/c$  :  $E_i$  とともに増加
- $P_{\perp} \rightarrow \sigma_{\perp}$ 
  - $Be(95 \text{ MeV}/u), Al(290 \text{ MeV}/u)$  標的では  $\sigma_{\perp} \sim \sigma_{//}$   
 $\sigma_D, \sigma_C$  の寄与が小さい
  - クーロン力による偏向  $\rightarrow$  標的に依存
  - $Nb, Tb, Au$  標的での  $\sigma_D, \sigma_C$  の寄与は？