

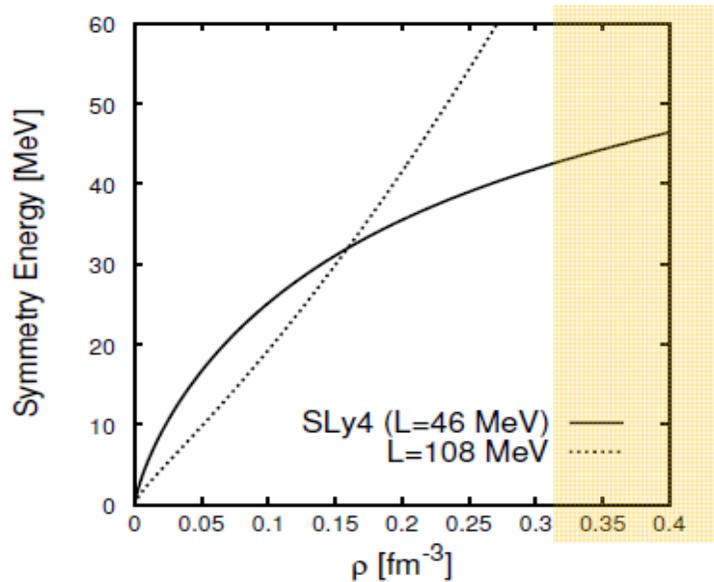
重イオン衝突における π 中間子生成の 輸送モデルによる解析

池野なつ美（東北大理/京大基研）

共同研究者：小野章（東北大理）、
奈良寧（国際教養大）、大西明（京大基研）

対称エネルギーと重イオン衝突

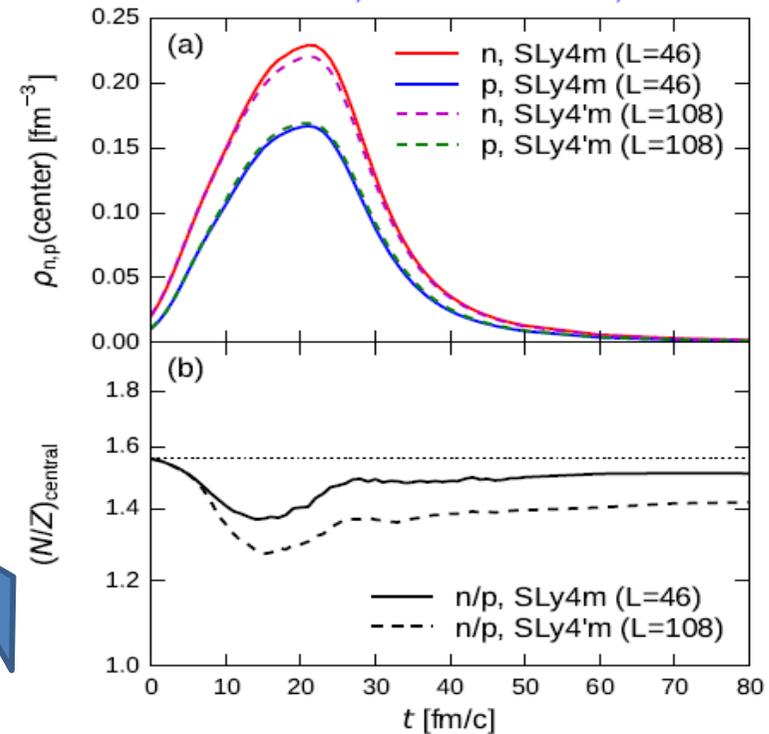
- * 対称エネルギー $S(\rho)$ の密度依存性：
特に $2\rho_0$ 付近での振る舞いを知りたい



- * 重イオン衝突：

高密度での対称エネルギーの値により、中心部分の陽子・中性子密度が異なる

$^{132}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$, $E/A = 300$ MeV, $b \sim 0$



* 高密度部分の陽子・中性子の影響を観測できる物理量は何か？

→ 重イオン衝突によって生成される π 中間子に着目

($NN \rightarrow N\Delta$, $\Delta \rightarrow N\pi$, $N\Delta \rightarrow NN$, $N\pi \rightarrow \Delta$)

$$\left(\frac{\pi^-}{\pi^+}\right) \simeq \frac{5N^2 + NZ}{5Z^2 + NZ} \simeq \left(\frac{N}{Z}\right)^2$$

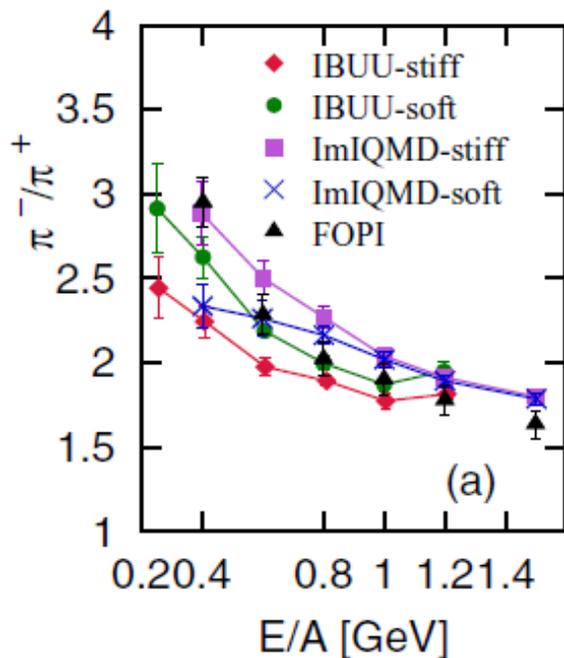
π 中間子と対称エネルギー

➤ 重イオン衝突で生成される荷電 π 中間子と対称エネルギーの関係性

(先行研究：理論)

- B. A. Li, PRL 88 (2002) 192701
- Z. Xiao, B.-A. Li, L.-W. Chen, G.-C. Yong, and M. Zhang, PRL102 (2009) 062502 : **IBUU**
- Z. Q. Feng and G. M. Jin, PLB 683 (2010) 140 : **ImIQMD**
- J. Hong and P. Danielewicz , PRC90 (2014) 024605
- Wen-Mei Guo, Gao-Chan Yong and Wei Zuo, PRC90 (2014) 044605 ... etc.

(例) Au+Au衝突での荷電 π 中間子比の入射エネルギー依存性



	stiff		soft
IBUU	π^-/π^+	<	π^-/π^+
ImQMD	π^-/π^+	>	π^-/π^+

モデルによって
計算結果が矛盾!!

重イオン衝突における π 中間子生成の機構を
十分に理解することが必要!!

輸送模型

➤ 分布関数 $f_\alpha(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t)$ ($\alpha = N, \Delta, \pi$) に対する一般的な方程式

$$\frac{\partial f_N}{\partial t} + \frac{\partial h_N}{\partial \mathbf{p}} \cdot \frac{\partial f_N}{\partial \mathbf{r}} - \frac{\partial h_N[f_N, f_\Delta, f_\pi]}{\partial \mathbf{r}} \cdot \frac{\partial f_N}{\partial \mathbf{p}} = I_N[f_N, f_\Delta, f_\pi]$$

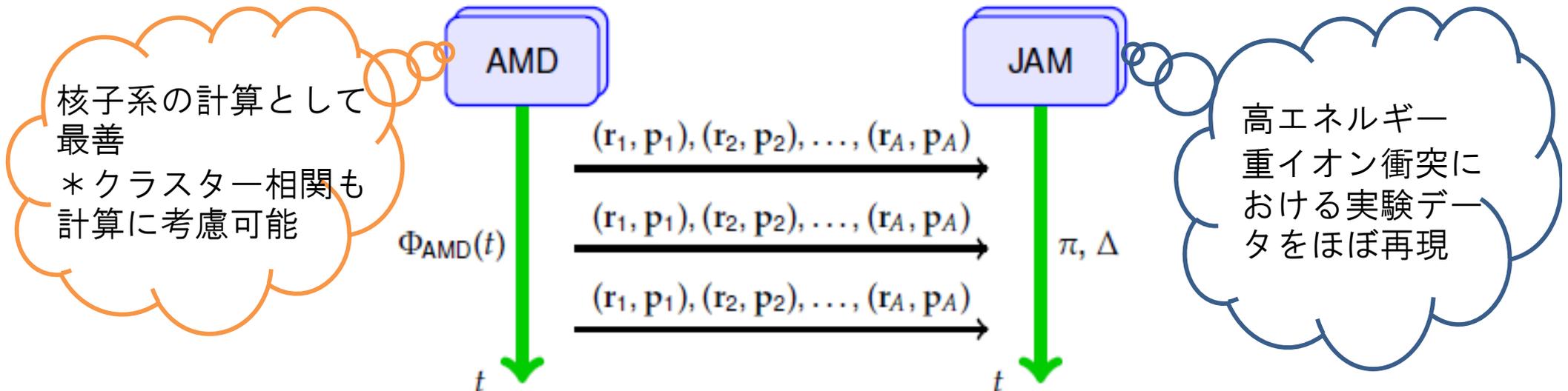
$$\frac{\partial f_\Delta}{\partial t} + \frac{\partial h_\Delta}{\partial \mathbf{p}} \cdot \frac{\partial f_\Delta}{\partial \mathbf{r}} - \frac{\partial h_\Delta[f_N, f_\Delta, f_\pi]}{\partial \mathbf{r}} \cdot \frac{\partial f_\Delta}{\partial \mathbf{p}} = I_\Delta[f_N, f_\Delta, f_\pi]$$

$$\frac{\partial f_\pi}{\partial t} + \frac{\partial h_\pi}{\partial \mathbf{p}} \cdot \frac{\partial f_\pi}{\partial \mathbf{r}} - \frac{\partial h_\pi[f_N, f_\Delta, f_\pi]}{\partial \mathbf{r}} \cdot \frac{\partial f_\pi}{\partial \mathbf{p}} = I_\pi[f_N, f_\Delta, f_\pi]$$

$I_N[f_N, f_\Delta, f_\pi]$: 衝突項

(
 $NN \rightarrow NN$ 、
 $N\Delta \rightarrow NN$ 、
 $\Delta \rightarrow N\pi$ 、
 $N\pi \rightarrow \Delta$... など

我々の輸送模型：JAM coupled with AMD



JAM coupled with AMD

- π 中間子と Δ 粒子生成を摂動として取り扱う

$$I_N = I_N^{\text{el}}[f_N, 0, 0] + \lambda I'_N[f_N, f_\Delta, f_\pi]$$

NN \rightarrow NN

NN \rightarrow N Δ 、N Δ \rightarrow NN
 Δ \rightarrow N π 、N π \rightarrow Δ など

$$\begin{cases} f_\Delta = O(\lambda), & f_\pi = O(\lambda) \\ f_N = f_N^{(0)} + \lambda f_N^{(1)} + \dots \end{cases} \quad \text{: 生成される}\pi\text{中間子と}\Delta\text{粒子は少ない}$$

- 核子 f_N について：摂動の0次

$$\frac{\partial f_N^{(0)}}{\partial t} + \frac{\partial h_N}{\partial \mathbf{p}} \cdot \frac{\partial f_N^{(0)}}{\partial \mathbf{r}} - \frac{\partial h_N[f_N^{(0)}, 0, 0]}{\partial \mathbf{r}} \cdot \frac{\partial f_N^{(0)}}{\partial \mathbf{p}} = I_N^{\text{el}}[f_N^{(0)}, 0, 0]$$



AMD

- Δ 粒子 f_Δ と π 中間子 f_π について：摂動の1次

$$\frac{\partial f_\Delta}{\partial t} + \frac{\partial h_\Delta}{\partial \mathbf{p}} \cdot \frac{\partial f_\Delta}{\partial \mathbf{r}} - \frac{\partial h_\Delta[f_N^{(0)}, f_\Delta, f_\pi]}{\partial \mathbf{r}} \cdot \frac{\partial f_\Delta}{\partial \mathbf{p}} = I_\Delta[f_N^{(0)}, f_\Delta, f_\pi]$$

$$\frac{\partial f_\pi}{\partial t} + \frac{\partial h_\pi}{\partial \mathbf{p}} \cdot \frac{\partial f_\pi}{\partial \mathbf{r}} - \frac{\partial h_\pi[f_N^{(0)}, f_\Delta, f_\pi]}{\partial \mathbf{r}} \cdot \frac{\partial f_\pi}{\partial \mathbf{p}} = I_\pi[f_N^{(0)}, f_\Delta, f_\pi]$$



JAM

AMD(Antisymmetrized Molecular Dynamics)

AMD :



AMD wave function

$$|\Phi(Z)\rangle = \det_{ij} \left[\exp\left\{-v\left(r_j - \frac{Z_i}{\sqrt{v}}\right)^2\right\} \chi_{\alpha_i}(j) \right]$$

$$Z_i = \sqrt{v}D_i + \frac{i}{2\hbar\sqrt{v}}K_i$$

v : Width parameter = $(2.5 \text{ fm})^{-2}$

χ_{α_i} : Spin-isospin states = $p \uparrow, p \downarrow, n \uparrow, n \downarrow$

AMD波動関数に対応する分布関数 $f(\mathbf{r}, \mathbf{p})$:

$$f(\mathbf{r}, \mathbf{p}) = \sum_{ij} 2^3 e^{-2(\mathbf{u}-Z_i)^* \cdot (\mathbf{u}-Z_j)} B_{ij} B_{ji}^{-1}$$

位相空間座標 : $\mathbf{u} = \sqrt{v}\mathbf{r} + \frac{i}{2\hbar\sqrt{v}}\mathbf{P}$

この分布関数に従って、あるアルゴリズムを用いて、
テスト粒子 $(\mathbf{r}_1, \mathbf{p}_1), (\mathbf{r}_2, \mathbf{p}_2), \dots, (\mathbf{r}_A, \mathbf{p}_A)$ (核子あたり1個) を生成する

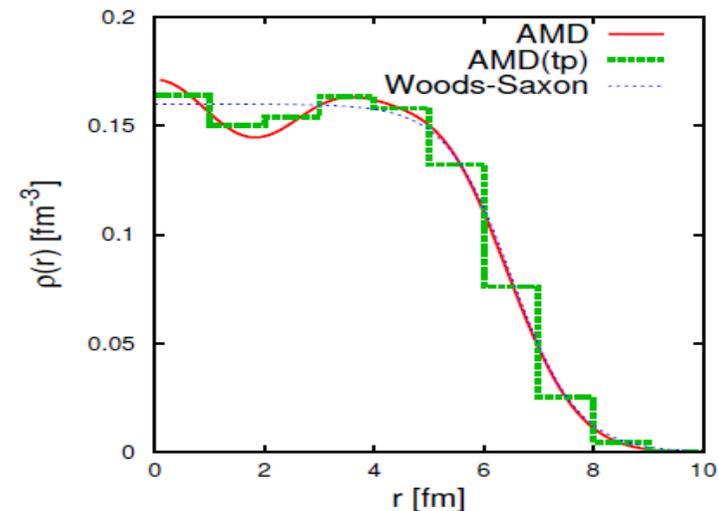
⇒ 各時刻での核子の位置と運動量の情報をJAMへ渡す
 (バリオン数と電荷の保存のために補正した)

* テスト粒子を用いた ^{197}Au 密度分布

Transport2014 (<http://www.physics.sjtu.edu.cn/hic2014/>)での
 小野さんの計算結果

AMD: AMDの波動関数から解析的に計算したもの

AMD(tp): テスト粒子生成 (核子あたり1個) を
 1000回繰り返した際のヒストグラム



JAM (Jet AA Microscopic transport model)

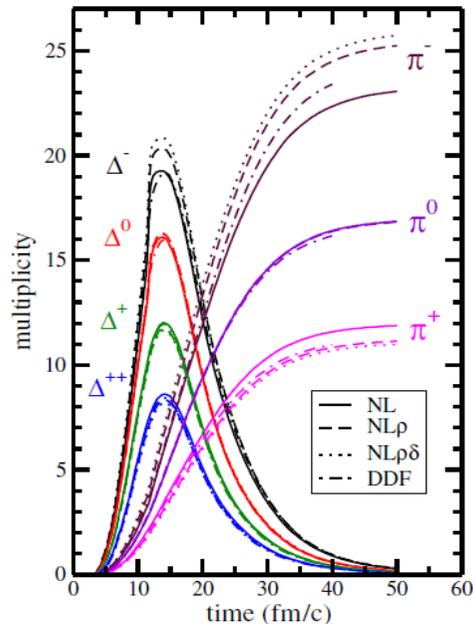
Y. Nara, N. Otuka, A. Ohnishi, K. Niita, S. Chiba, PRC**61**(2000)024901

- 1 ~ 158 A GeV 程度まで高エネルギー領域まで扱える相対論的な原子核衝突のシミュレーションプログラム
- 各衝突はハドロン-ハドロン散乱の実験データに基づいて記述 . . . etc.

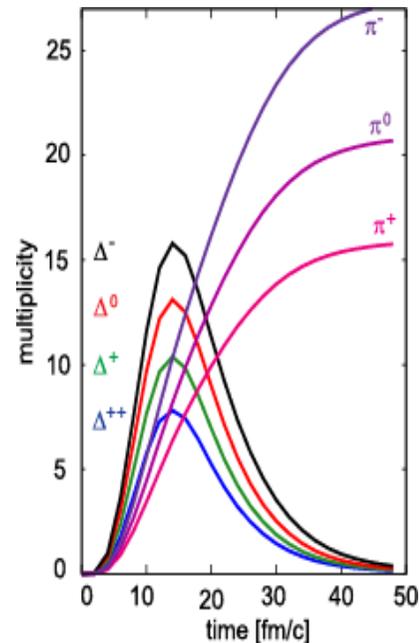
* $^{197}\text{Au}+^{197}\text{Au}$ 中心衝突のJAM計算: 他の理論結果・実験データと比較

① 時間発展

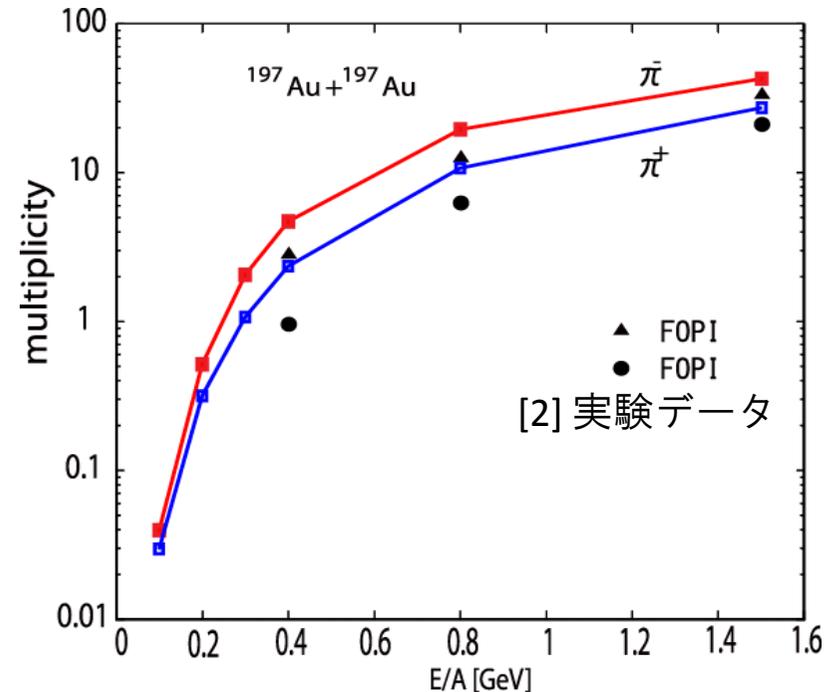
[1] 他の計算結果



JAM



② エネルギー依存性



[1] G. Ferini, T. Gaitanos, M. Colonna, M. Di Toro, H. H. Wolter, PRL97 (06) 202301

[2] W. Reisdorf *et al.* (FOPI Collaboration), NPA **848**, (2010)366.

模型の妥当性

➤ $^{20}\text{Ne} + ^{20}\text{Ne}$ 衝突@ $E/A=400$ MeV (NaF)

- 実験データ:
Nagamiya et al., PRC24 (1981) 971



CM系でのエネルギー分布

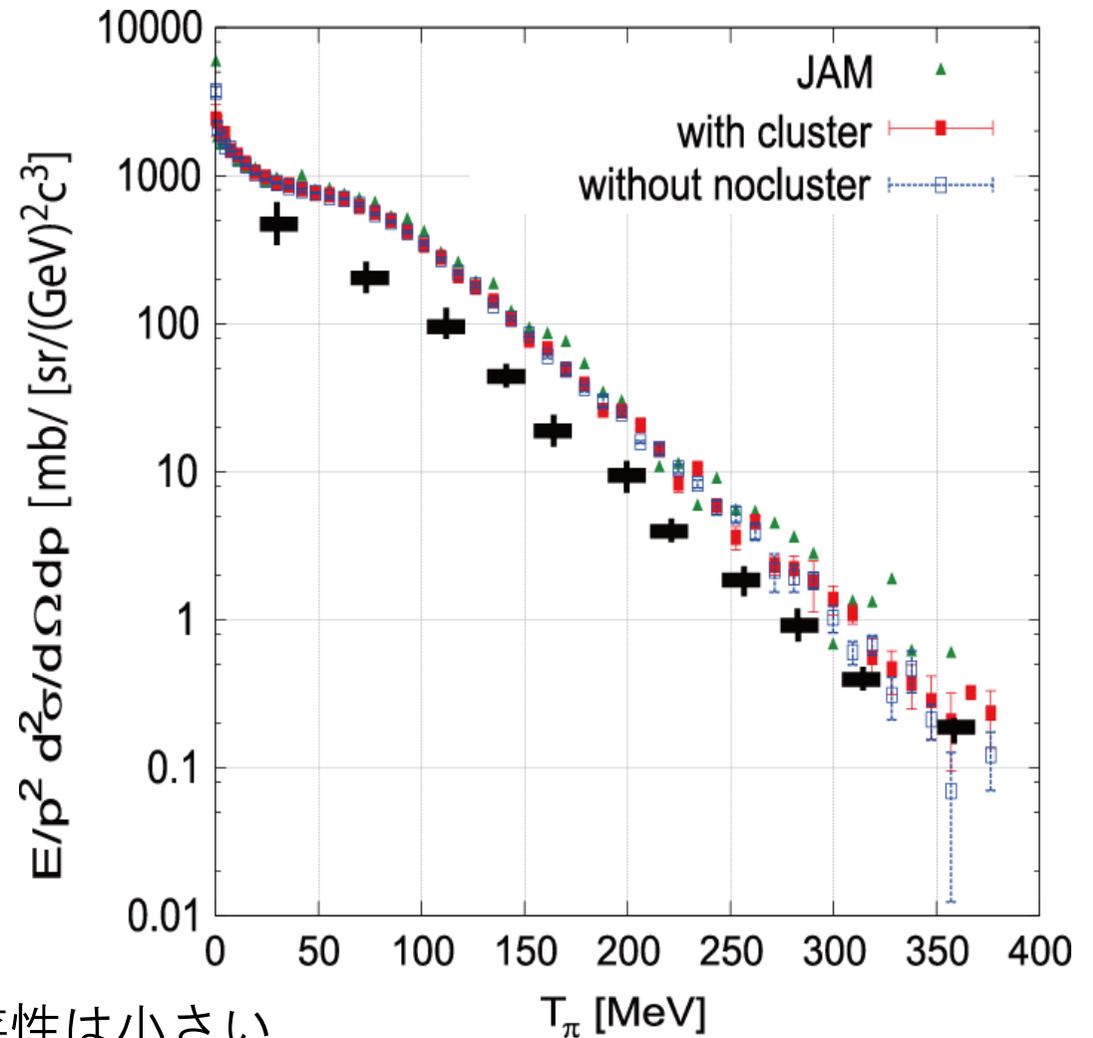
($\theta_{\text{cm}} = 90$ deg.)

- 我々の計算

① AMD with cluster/JAM

② AMD without cluster/JAM

③ JAM



* この軽い系では、理論模型による依存性は小さい

* 断面積の絶対値：2倍ほど異なる

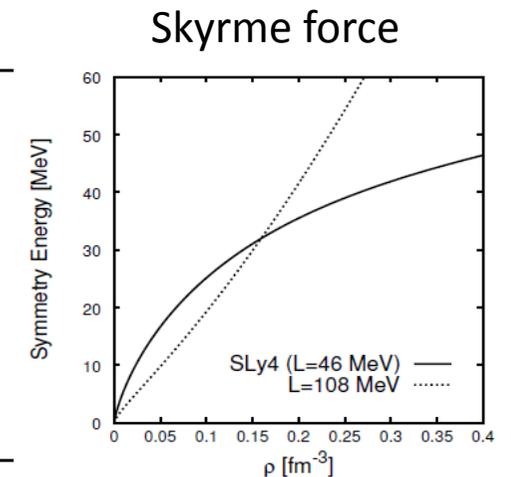
* 傾きはほぼ一致

$^{132}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 衝突 @E/A=300MeV

- 理研RIBFで実験が計画されている
- 中性子過剰な原子核の衝突 (N/Z) = 1.56 → π^- が π^+ より多く生成される

➤ 5つの場合について計算

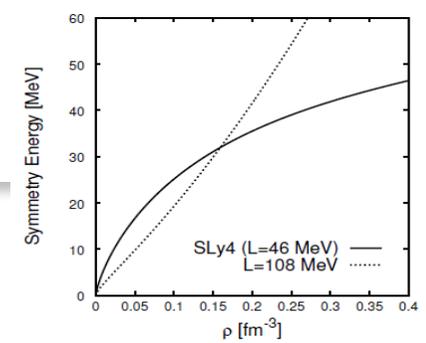
	輸送模型	クラスター相関	相互作用
① with cluster (SLy4)	AMD/JAM	○	SLy4
② (SLy4-L108)	AMD/JAM	○	SLy4-L108
③ without cluster (SLy4)	AMD/JAM	×	SLy4
④ (SLy4-L108)	AMD/JAM	×	SLy4-L108
⑤ JAM	JAM	×	平均場なし



- (注) ・ π 中間子のクーロン相互作用は入っていない
 ・ 衝突係数 $b < 1$ fmで計算

- ✓ 対称エネルギーの密度依存性 \Leftrightarrow 核子のダイナミクス \Leftrightarrow Δ 粒子 \Leftrightarrow π 中間子の関係性について

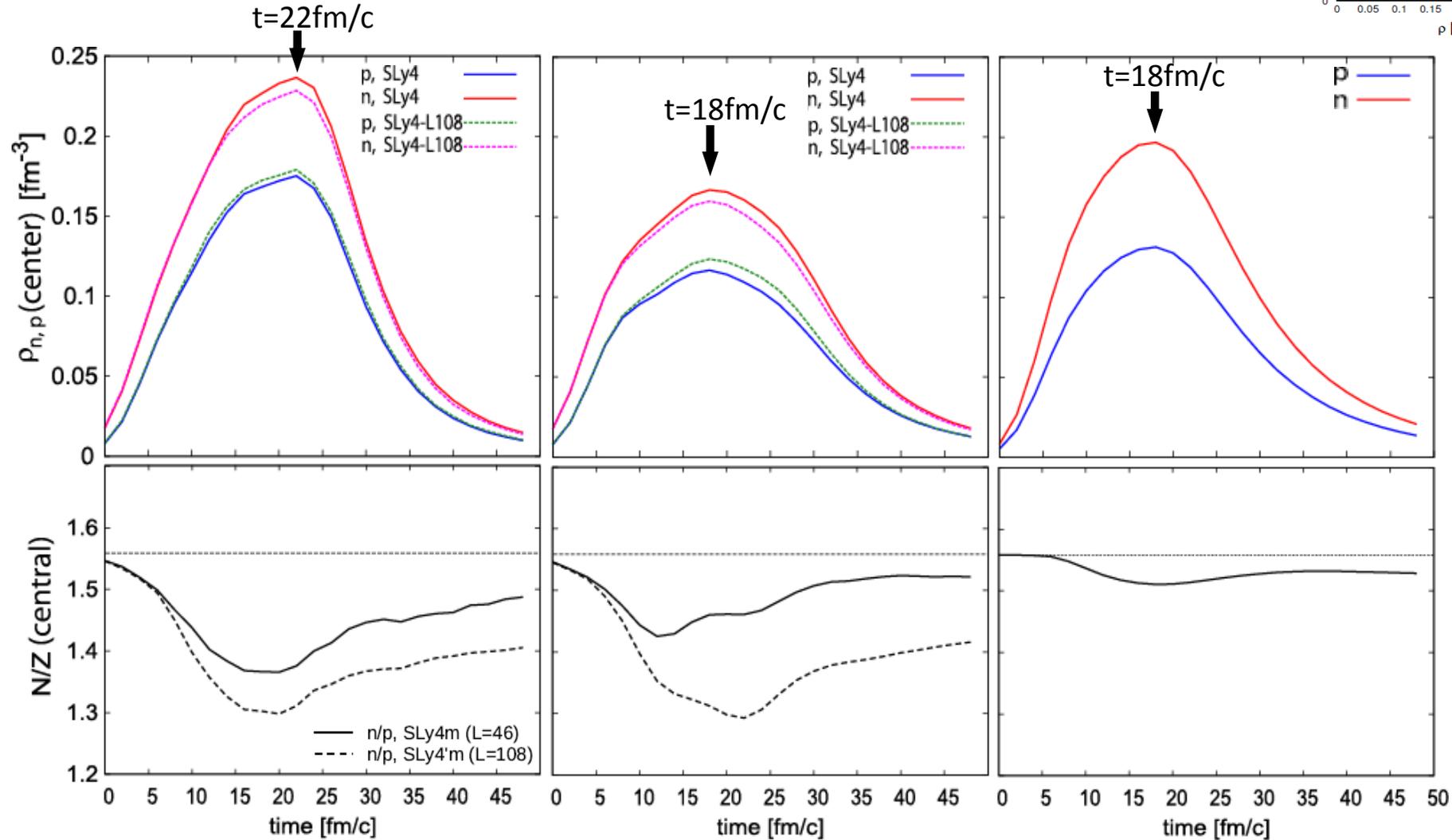
中心付近の核子密度とN/Z比



• with cluster

• without cluster

• JAM

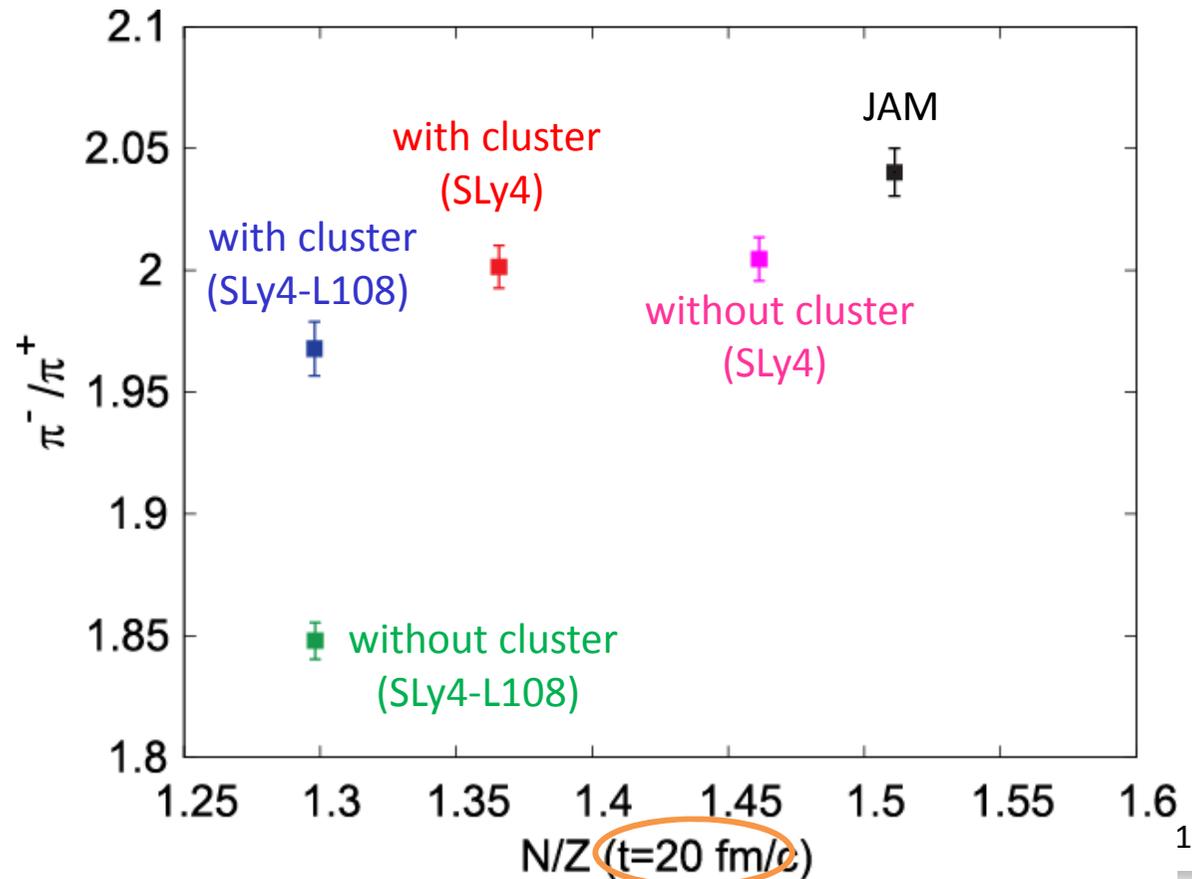
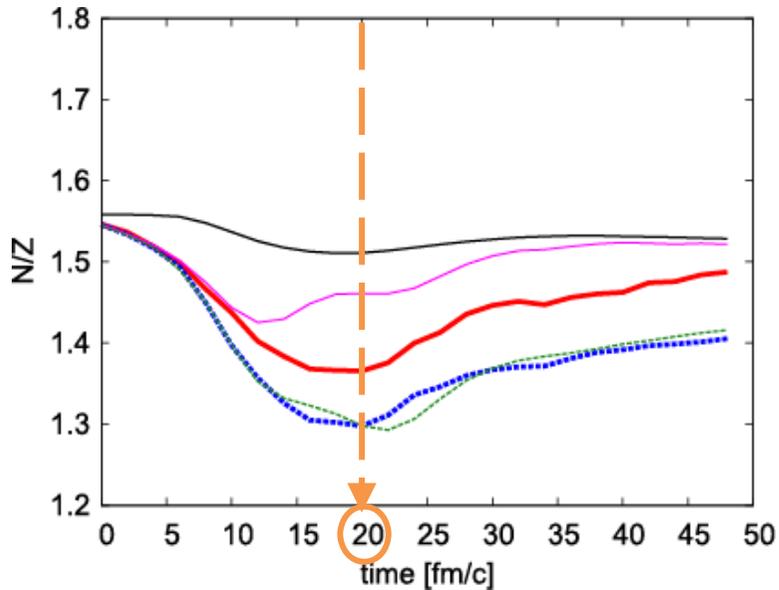


- * クラスタ関連の有無によって、最大密度の値やその時刻が異なる
- * 相互作用(対称エネルギーの密度依存性)により、中心部分の陽子・中性子の比が異なる
- * クラスタ関連のない方が、対称エネルギーの効果がN/Z比に顕著に現れる

荷電 π 中間子の生成比 π^-/π^+

	π^-	π^+	π^-/π^+
① with cluster (SLy4)	0.884	0.442	2.001 ± 0.009
② (SLy4-L108)	0.852	0.433	1.968 ± 0.011
③ without cluster (SLy4)	1.050	0.524	2.005 ± 0.009
④ (SLy4-L108)	0.983	0.532	1.848 ± 0.008
⑤ JAM	1.320	0.647	2.040 ± 0.010

中心部分(25%)に存在する核子



$$\left(\frac{\pi^-}{\pi^+}\right) \simeq \frac{5N^2 + NZ}{5Z^2 + NZ} \simeq \left(\frac{N}{Z}\right)^2 \text{の關係性??}$$

πとΔの相関関係

π中間子比 π^-/π^+

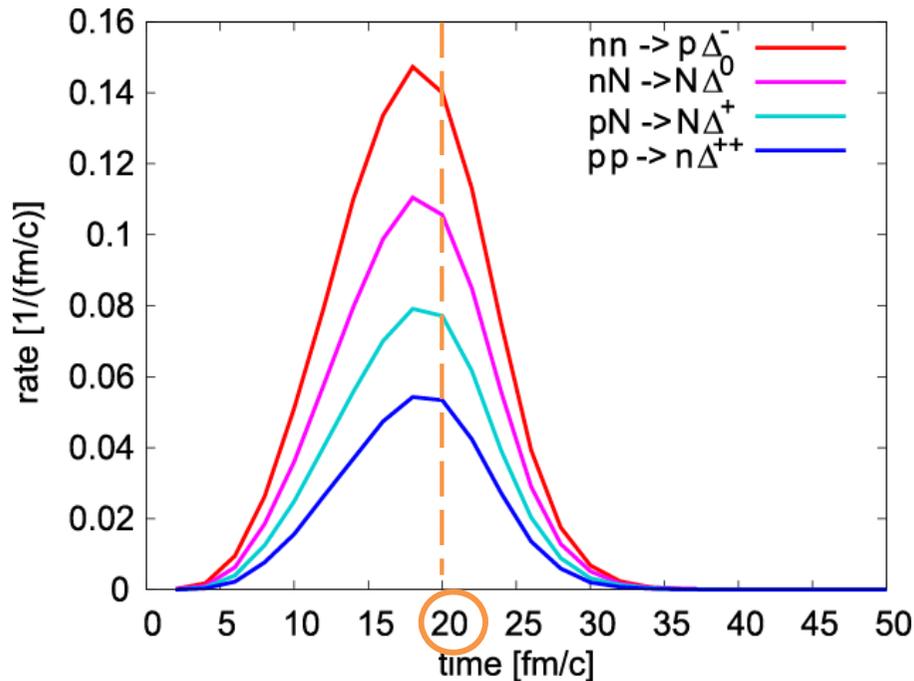


Δ粒子を生成する $NN \rightarrow N\Delta$ 反応率
の比 Δ^-/Δ^{++}

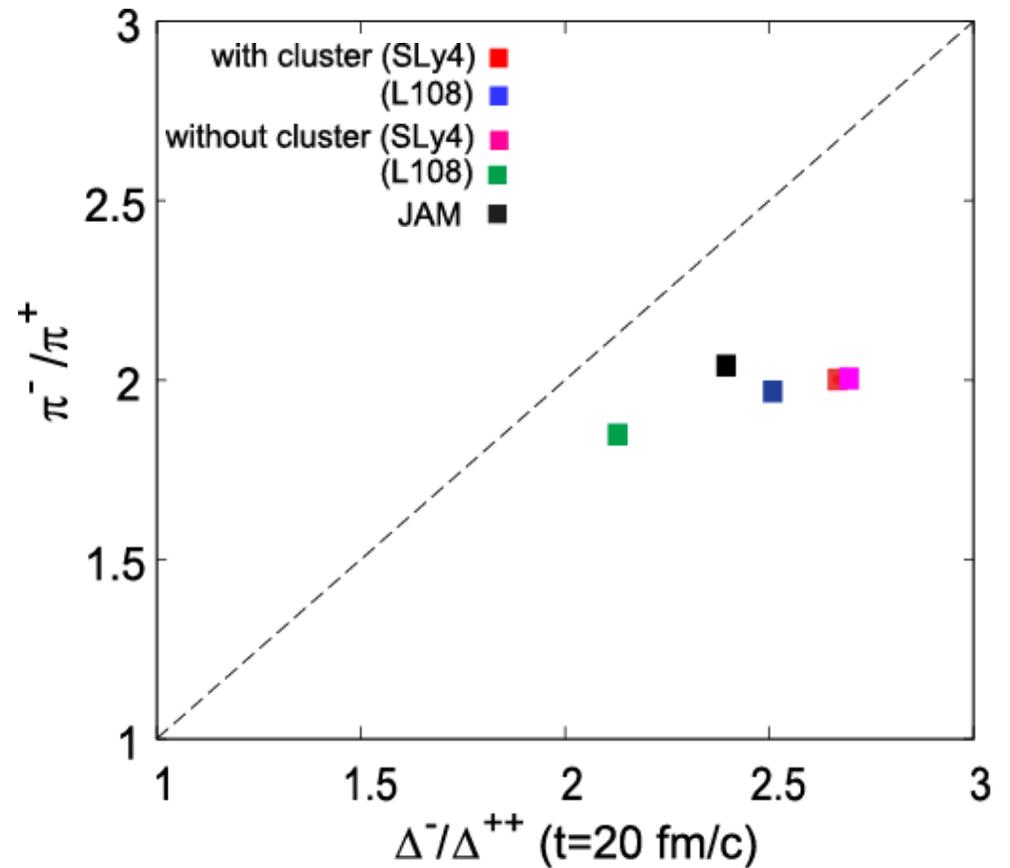
$$\Delta^-/\Delta^{++} = (N/Z)^2 \text{ と期待}$$

➤ $NN \rightarrow N\Delta$ 反応率

- with cluster (SLy4) の場合



➤ π中間子比 π^-/π^+ と反応率の比 Δ^-/Δ^{++}

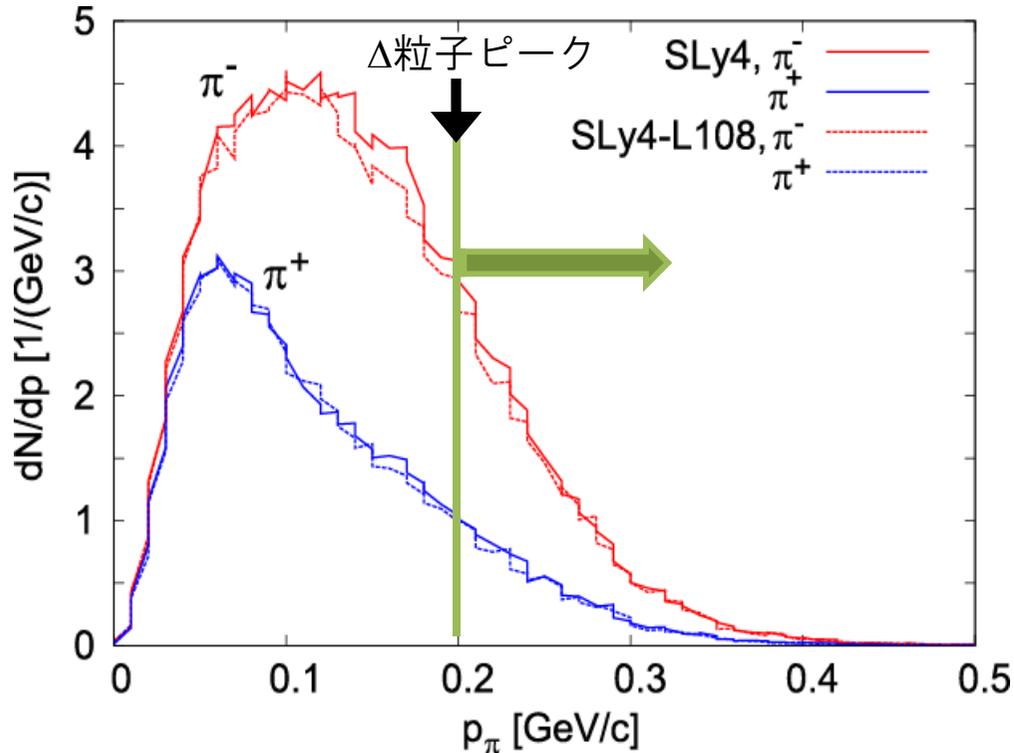


やや π^-/π^+ が少ない
→ さらに π を詳しく見てみる

πとΔの相関関係

➤ π中間子の生成スペクトル

- with cluster (SLy4、SLy4-L108) の場合



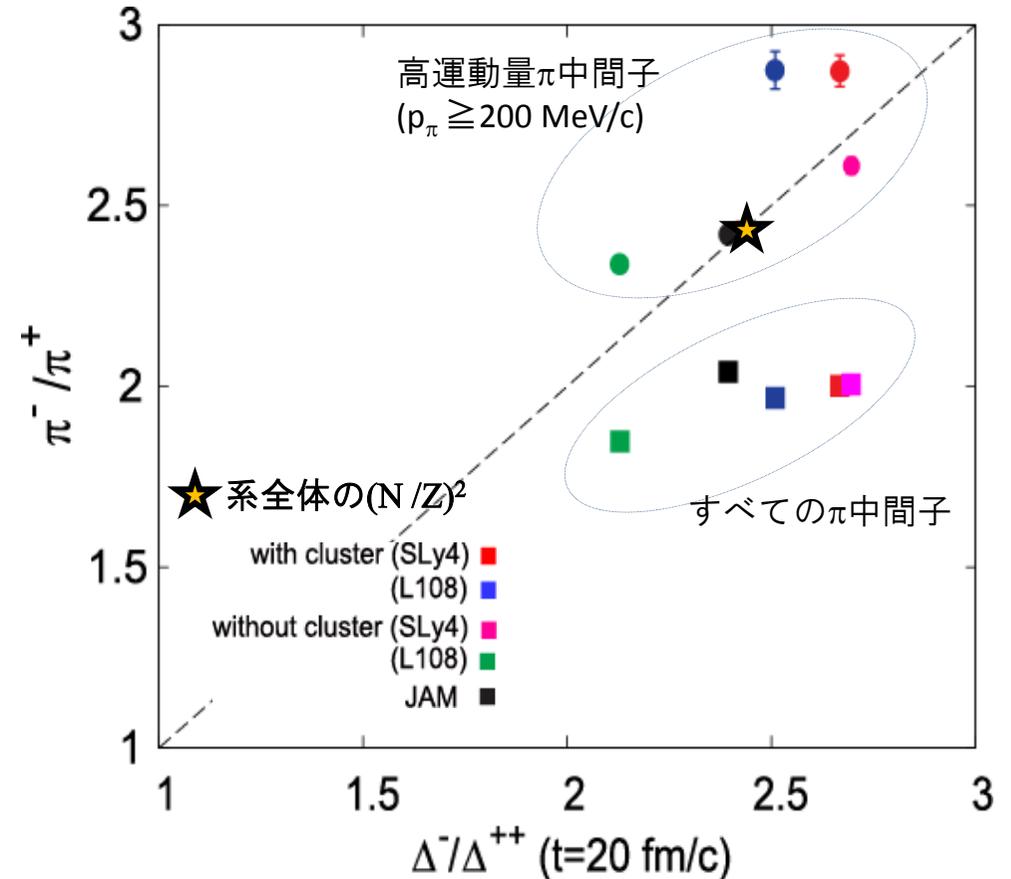
* 高運動量部分の π^-/π^+ の方が大きい

低運動量領域の問題点：

- ・ π中間子のクーロン相互作用を入れる
- ・ s-wave pion生成($pn \rightarrow NN\pi$)の取り扱い

→ 高運動量π中間子 ($p_\pi \geq 200$ MeV/c)に制限

➤ π中間子比 π^-/π^+ と反応率の比 Δ^-/Δ^{++}



Δが見ている $(N/Z)^2$ は、系全体の $(N/Z)^2 = (1.56)^2$ より大きい場合がある

⇒ 単純に中心部分の $(N/Z)^2$ というわけではない

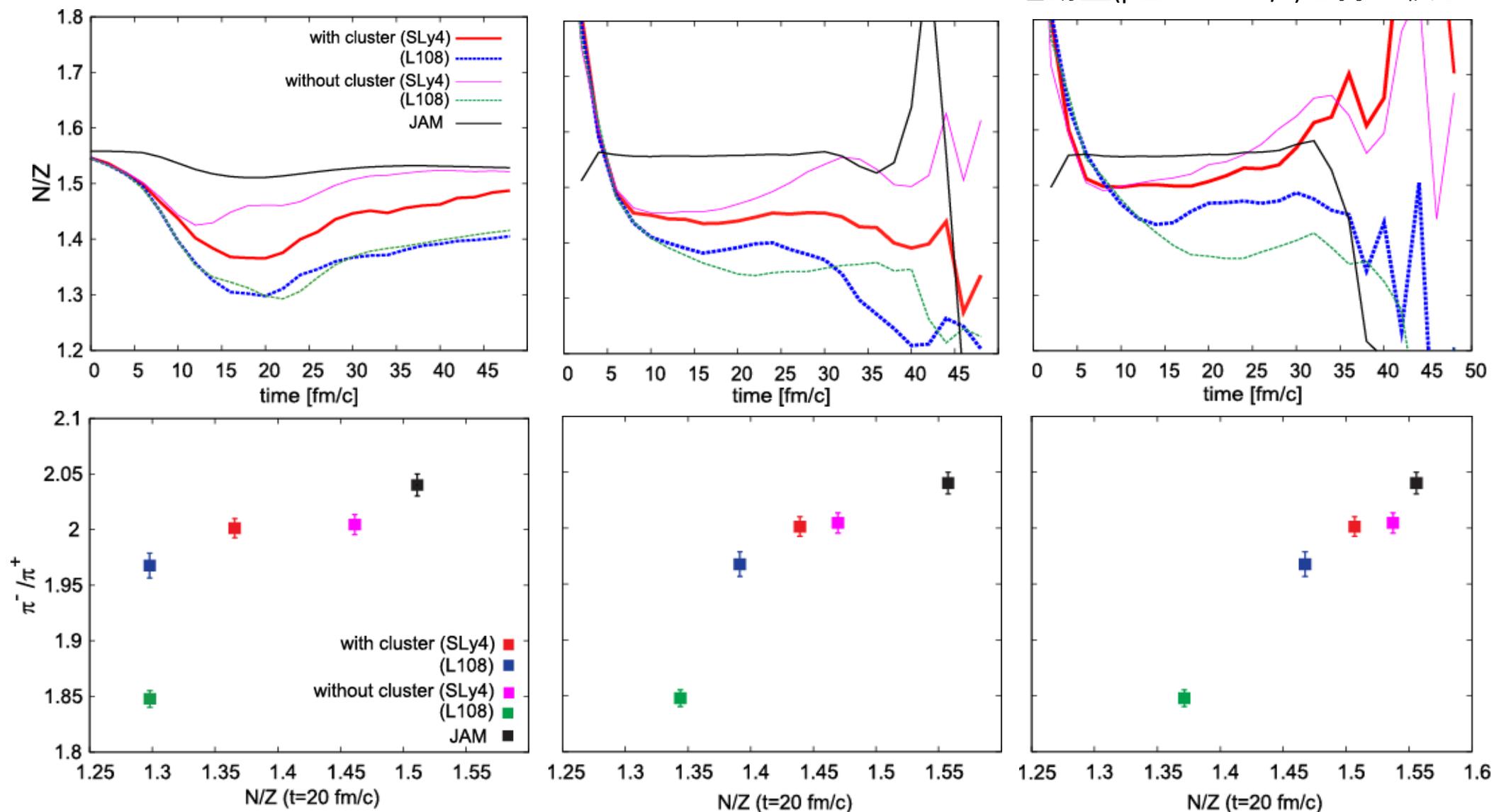
⇒ Δやπが見ている核子の情報は？

どの核子が生成比 π^-/π^+ に影響するか？

① 中心部分(25%)に存在する核子

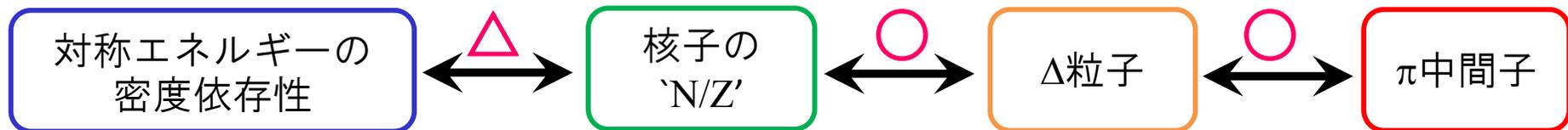
② $\rho_0 \leq \rho$ に存在する核子

③ $\rho_0 \leq \rho$ に存在する核子で、さらに π 中間子が生成しやすい運動量($p \geq 360$ MeV/c)を持つ核子



まとめ

- 高密度での対称エネルギーの密度依存性を調べるために、 $E/A=300$ MeVでの重イオン衝突で生成される π 中間子に着目して解析を行った。
 - AMDとJAMを連動させた輸送模型
 - 異なる対称エネルギーの密度依存性をもつ相互作用
 - クラスタ相関あり/なし



- ✓ 核子のダイナミックスと π 中間子・ Δ 粒子が密接に関係しているように思われる。
- ✓ 対称エネルギーとの関係は、核子系のモデルに依存する
→ 核子系のモデルの検証も重要

今後

- 他の原子核衝突について（系のN/Z、入射エネルギー）
- Δ や π が見ている核子の情報は？ 他のN/Zの選び方について
- π 中間子のクーロン相互作用を入れた計算 など