

重イオン衝突における π 中間子生成と 非対称核物質の性質

池野なつ美（鳥取大学）

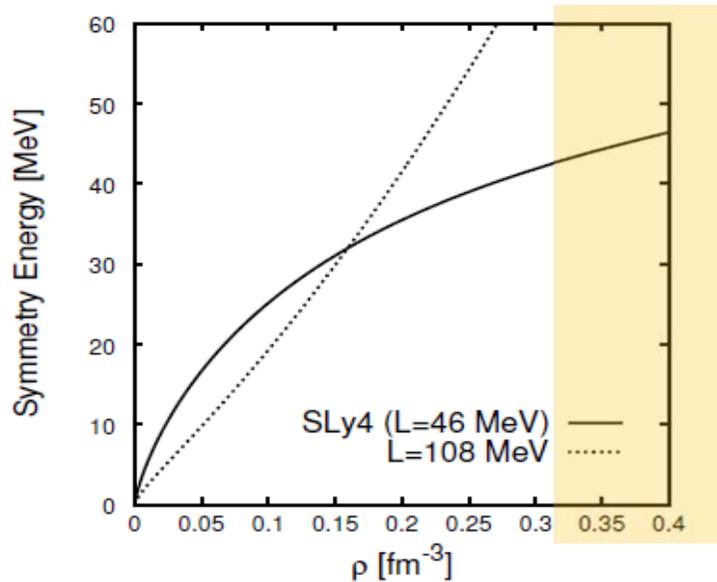
共同研究者：

小野章（東北大理）、奈良寧（国際教養大）、大西明（京大基研）

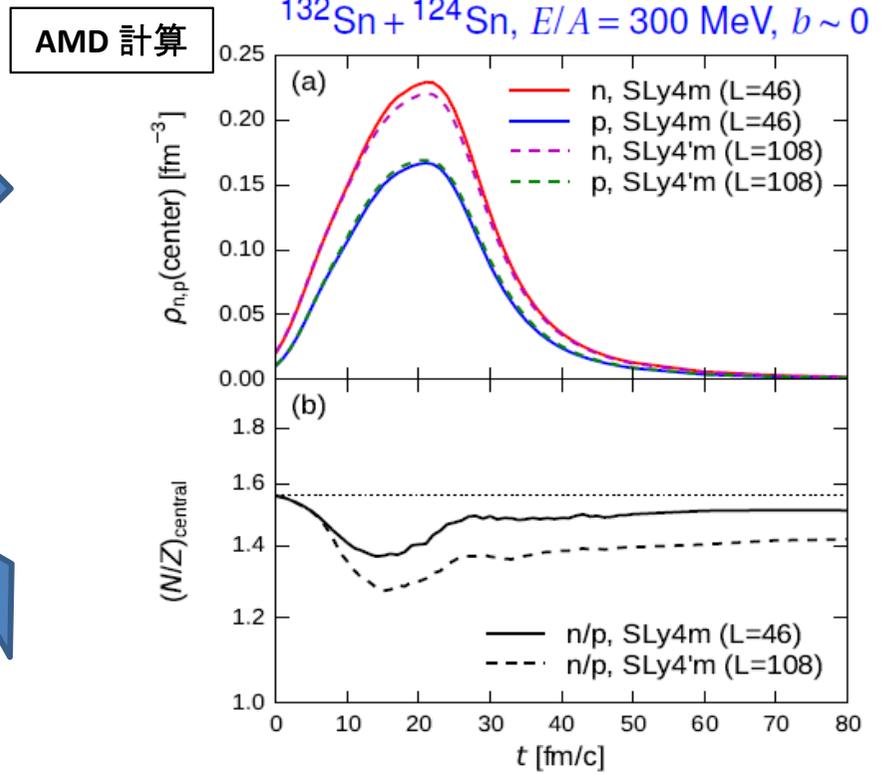


対称エネルギーと重イオン衝突

* 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（中性子過剰な系）：
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



* 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

$$NN \leftrightarrow N\Delta, \Delta \leftrightarrow N\pi$$

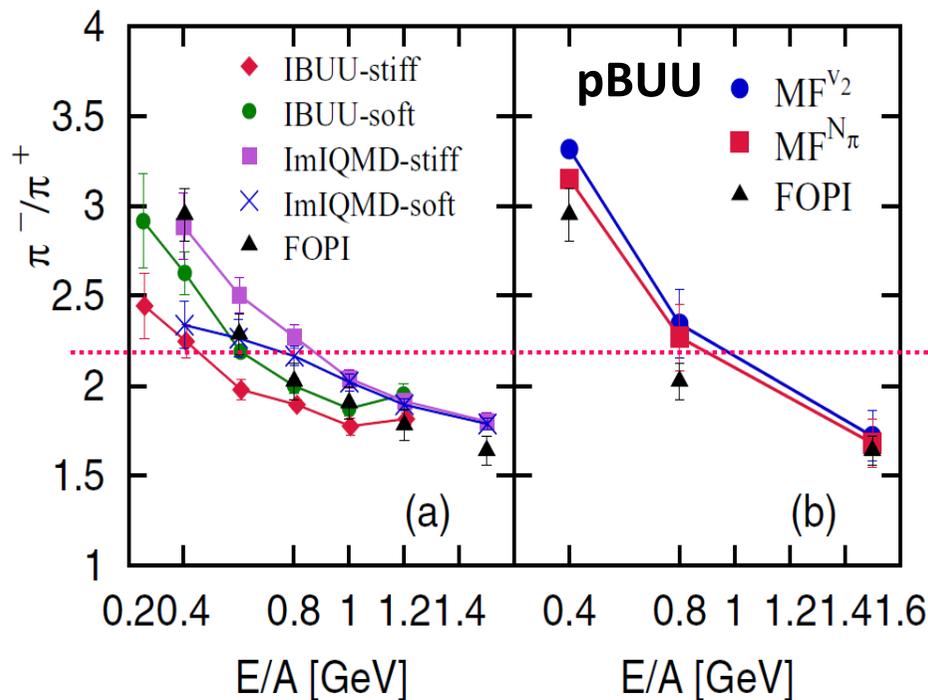
単純な期待：
$$\left(\frac{\pi^-}{\pi^+}\right) \simeq \frac{5N^2 + NZ}{5Z^2 + NZ} \simeq \left(\frac{N}{Z}\right)^2$$

π中間子と対称エネルギー

(先行研究：様々な理論モデルによるπ中間子の計算)

- B. A. Li, PRL 88 (2002) 192701 : **IBUU**
- Z. Xiao, B. A. Li, L. W. Chen, G.-C. Yong, and M. Zhang, PRL102 (2009) 062502 : **IBUU04**
- Z. Q. Feng and G. M. Jin, PLB 683 (2010) 140 : **ImIQMD**
- J. Hong and P. Danielewicz , PRC90 (2014) 024605 : **pBUU**
- Wen-Mei Guo, Gao-Chan Yong and Wei Zuo, PRC90 (2014) 044605 ... etc.

➤ Pion ratio in central Au+Au collisions



	asy-stiff	asy-soft
IBUU	$\pi^-/\pi^+ <$	π^-/π^+
ImIQMD	$\pi^-/\pi^+ >$	π^-/π^+
pBUU	$\pi^-/\pi^+ \sim$	π^-/π^+

⇒ 理論モデルによって計算結果が**矛盾**

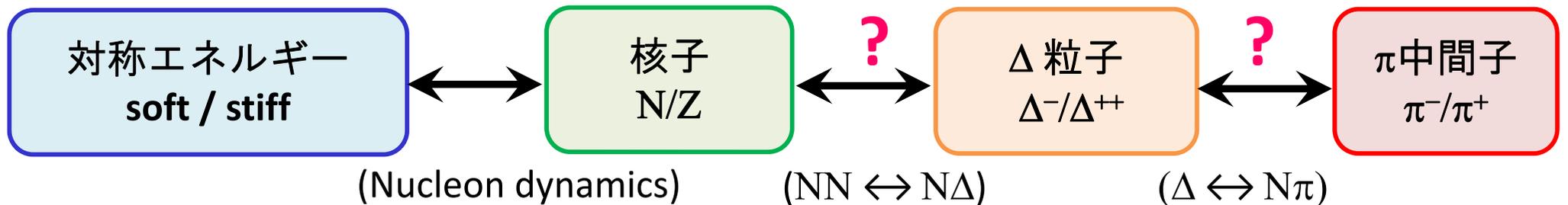
Au + Au系全体 $(N/Z)_{\text{sys}}^2 = 2.231$

- 低エネルギーにおけるデータや計算結果は $\pi^-/\pi^+ > (N/Z)_{\text{sys}}^2$
 - 高密度領域では、less n-richで $(N/Z)^2 < (N/Z)_{\text{sys}}^2$
- ⇒ $\pi^-/\pi^+ \simeq (N/Z)^2$ の関係が**成り立っていない**

→ π中間子と対称エネルギーの関係は十分に理解されていない

我々の研究

- **目的**：重イオン衝突反応における陽子・中性子のダイナミクスが、 Δ 粒子や π 中間子生成にどのように影響するかを調べる



- **理論模型: Combining AMD and JAM**

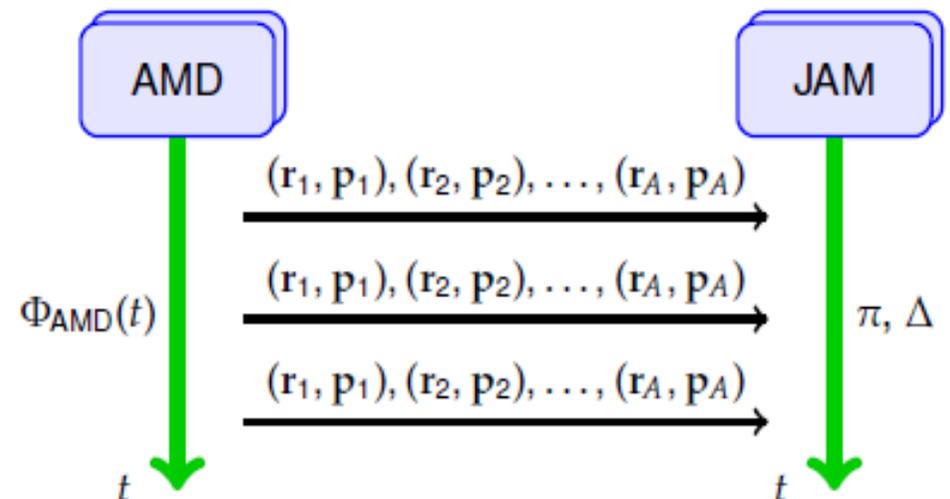
模型の利点：

* AMD

- ✓ 核子系の計算として最善
- ✓ クラスタ関連も計算に考慮可能

* JAM

- ✓ 反応過程において π , Δ 生成を取り扱える
- ✓ 高エネルギー重イオン衝突の実験データをほぼ再現



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

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

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

$I_N[f_N, f_{\Delta, \pi}]$: 衝突項

$$\left(\begin{array}{l} NN \rightarrow NN \\ NN \rightarrow N\Delta \\ N\Delta \rightarrow NN \\ \Delta \rightarrow N\pi \\ N\pi \rightarrow \Delta \quad \dots \text{etc.} \end{array} \right)$$

➤ 我々の輸送模型 : JAM coupled with AMD

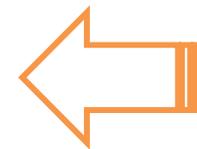
π 中間子と Δ 粒子生成を摂動として取り扱う

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

$$\left(\begin{array}{l} f_{\Delta, \pi} = O(\lambda) : \pi \text{中間子} \cdot \Delta \text{粒子生成は少ない} \\ f_N = f_N^{(0)} + \lambda f_N^{(1)} + \dots \end{array} \right)$$

- 核子 f_N について : 摂動の0次

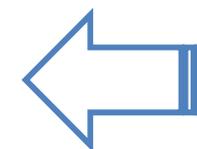
$$\frac{\partial f_N^{(0)}}{\partial t} + \frac{\partial h_N}{\partial \mathbf{p}} \cdot \frac{\partial f_N^{(0)}}{\partial \mathbf{r}} - \frac{\partial h_N[f_N^{(0)}, 0]}{\partial \mathbf{r}} \cdot \frac{\partial f_N^{(0)}}{\partial \mathbf{p}} = I_N^{\text{el}}[f_N^{(0)}, 0]$$



AMDで解く

- Δ 粒子 f_Δ と π 中間子 f_π について : 摂動の1次

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

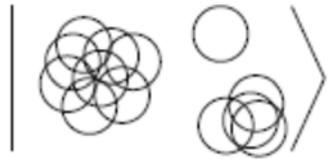


与えられた $f_N^{(0)}$ に対して JAM で解く

AMD (Antisymmetrized Molecular Dynamics)

A. Ono, H. Horiuchi, T. Maruyama, and A. Ohnishi, PTP87 (1992) 1185

➤ AMD wave function



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

$$\mathbf{Z}_i = \sqrt{v} \mathbf{D}_i + \frac{i}{2\hbar \sqrt{v}} \mathbf{K}_i$$

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

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

Solve the time evolution of the wave packet centroids Z ✓ Effective interaction

➤ Turn on/off Cluster correlation A. Ono, J. Phys.: Conf. Ser. 420 (13) 012103

• Without Cluster



$N1, N2$: Colliding nucleons

Transition rate:

$$W(NN \rightarrow NN) = \frac{2\pi}{\hbar} |\langle NN | V | NN \rangle|^2 \delta(E_f - E_i)$$

• With Cluster



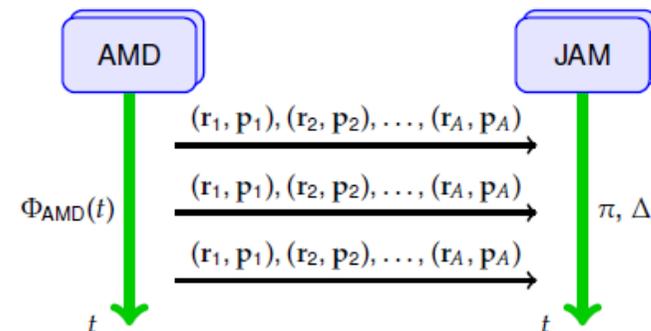
$N1, N2$: Colliding nucleons

$B1, B2$: Spectator nucleons/clusters

$C1, C2$: $N, (2N), (3N), (4N)$ (up to α cluster)

$$W(NBNB \rightarrow CC) = \frac{2\pi}{\hbar} |\langle CC | V | NBNB \rangle|^2 \delta(E_f - E_i)$$

➤ We send **nucleon test particles** $(\mathbf{r}_1, \mathbf{p}_1), (\mathbf{r}_2, \mathbf{p}_2), \dots, (\mathbf{r}_A, \mathbf{p}_A)$ from AMD to JAM at every 2 fm/c with corrections for the conservation of baryon number and charge.



JAM (Jet AA Microscopic transport model)

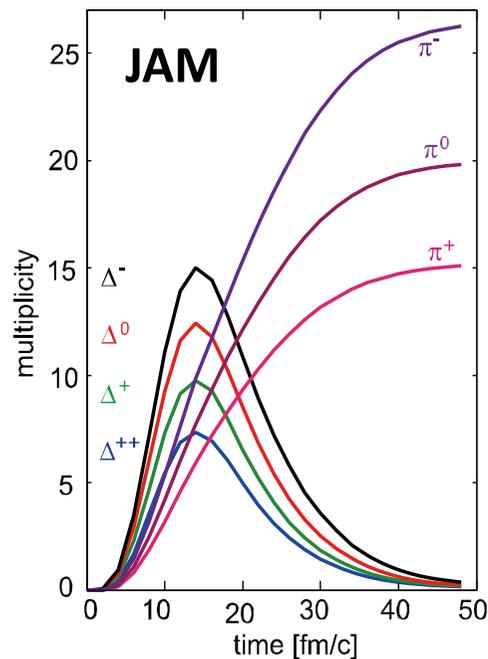
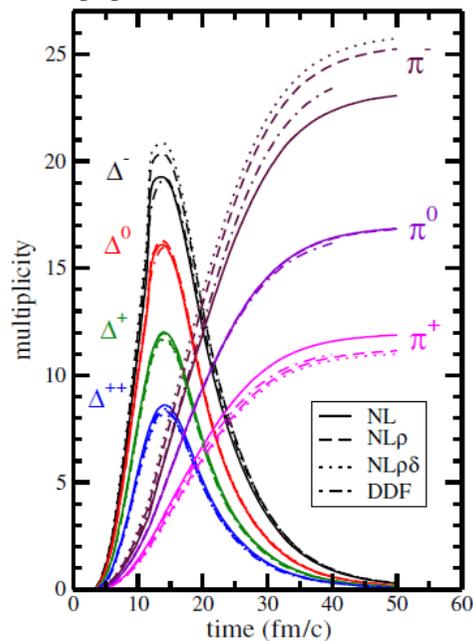
Y. Nara, N. Otuka, A. Ohnishi, K. Niita, S. Chiba, PRC61 (2000) 024901

- Applied to high-energy collisions (1 ~ 158 A GeV)
- Hadron-Hadron reactions are based on experimental data and the detailed balance.
- No mean field (default)
- s -wave pion production ($NN \rightarrow NN\pi$) is turned off. ... etc.

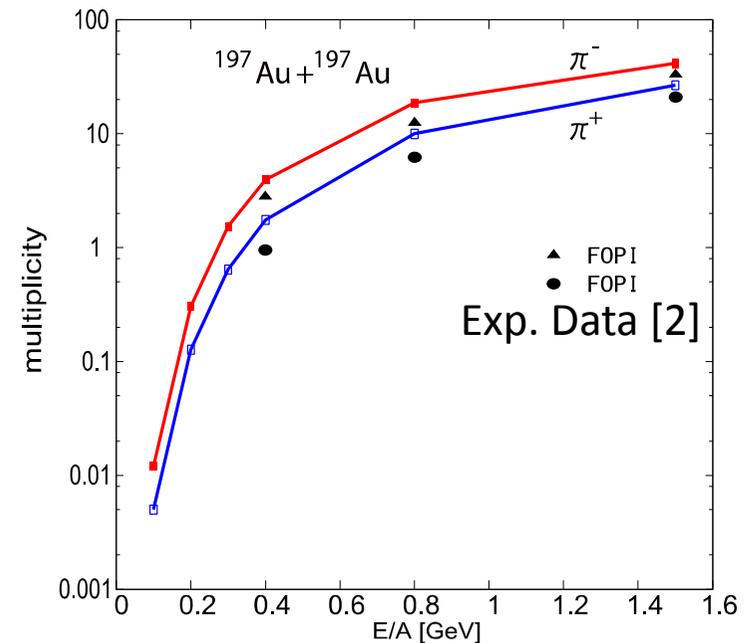
➤ $^{197}\text{Au} + ^{197}\text{Au}$ 中心衝突のJAM計算：他の理論結果・実験データと比較

* 時間発展

[1] other calculation



* 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.

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

- 理研RIBFで実験が計画されている T. Isobe, T. Murakami *et al.*
- 中性子過剰な原子核の衝突 (N/Z) = 1.56 $\rightarrow \pi^- > \pi^+$

Calculation set: Impact parameter $b < 1$ fm

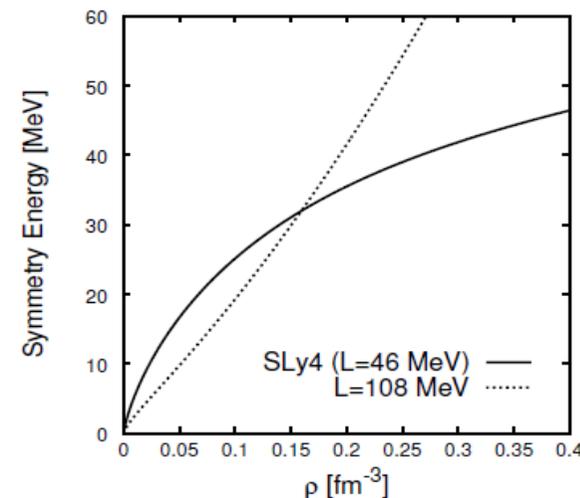
1. AMD + JAM **with cluster (asy-soft)** L=46 (SLy4)
2. AMD + JAM **with cluster (asy-stiff)** L=108
3. AMD + JAM **without cluster (asy-soft)** L=46 (SLy4)
4. AMD + JAM **without cluster (asy-stiff)** L=108
5. JAM (no mean field)

- ✓ 対称エネルギーの密度依存性
- ✓ クラスタ関連の有無
- ✓ 平均場ポテンシャルの有無

Effective interaction: Skyrme force

S(ρ) : different ρ dependence

Momentum dependence has been corrected for high energy collisions, in a similar way to Gale, Bertsch, Das Gupta, PRC 35 (1987) 1666.

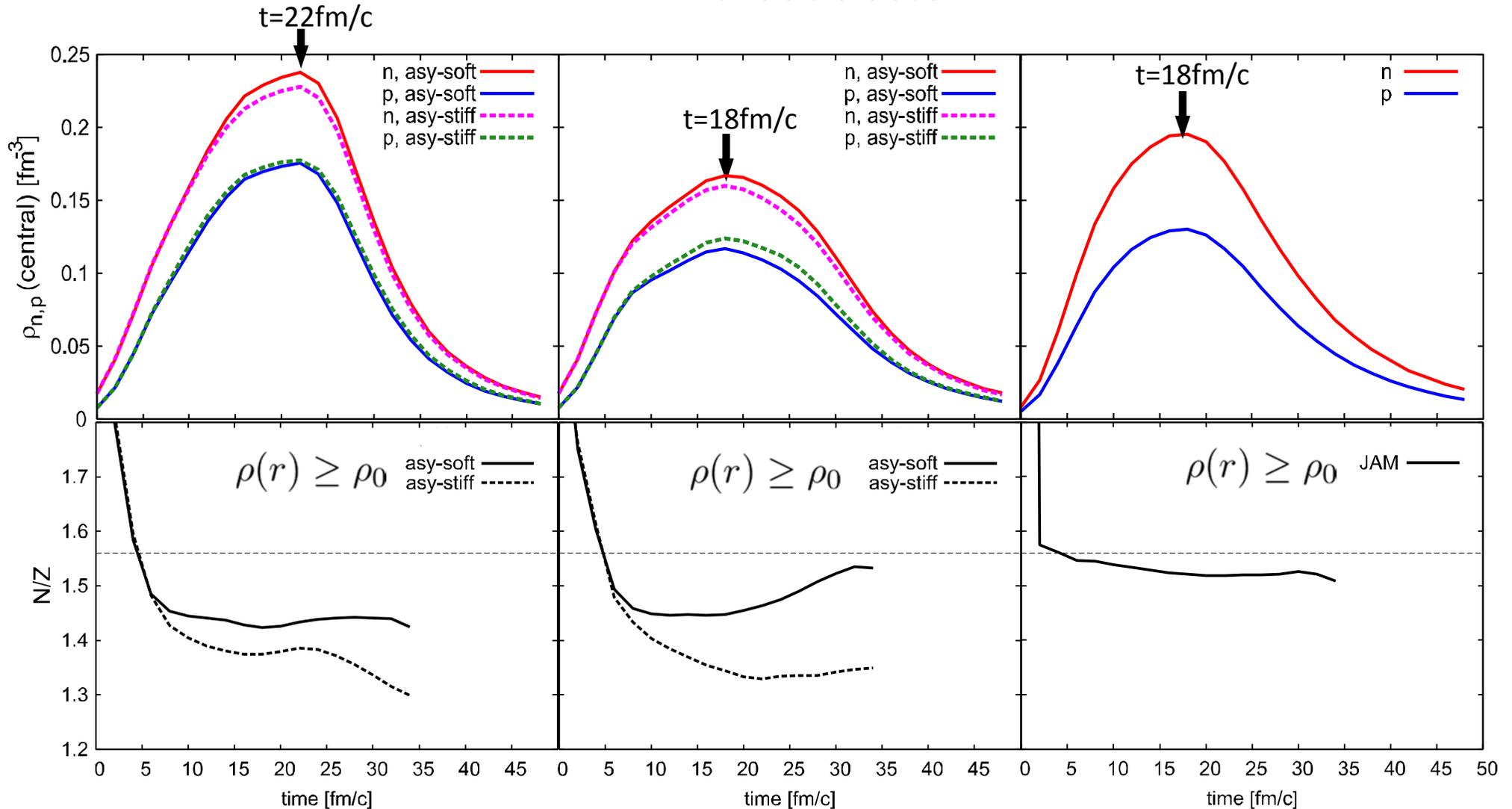


核子のダイナミクス

• with cluster

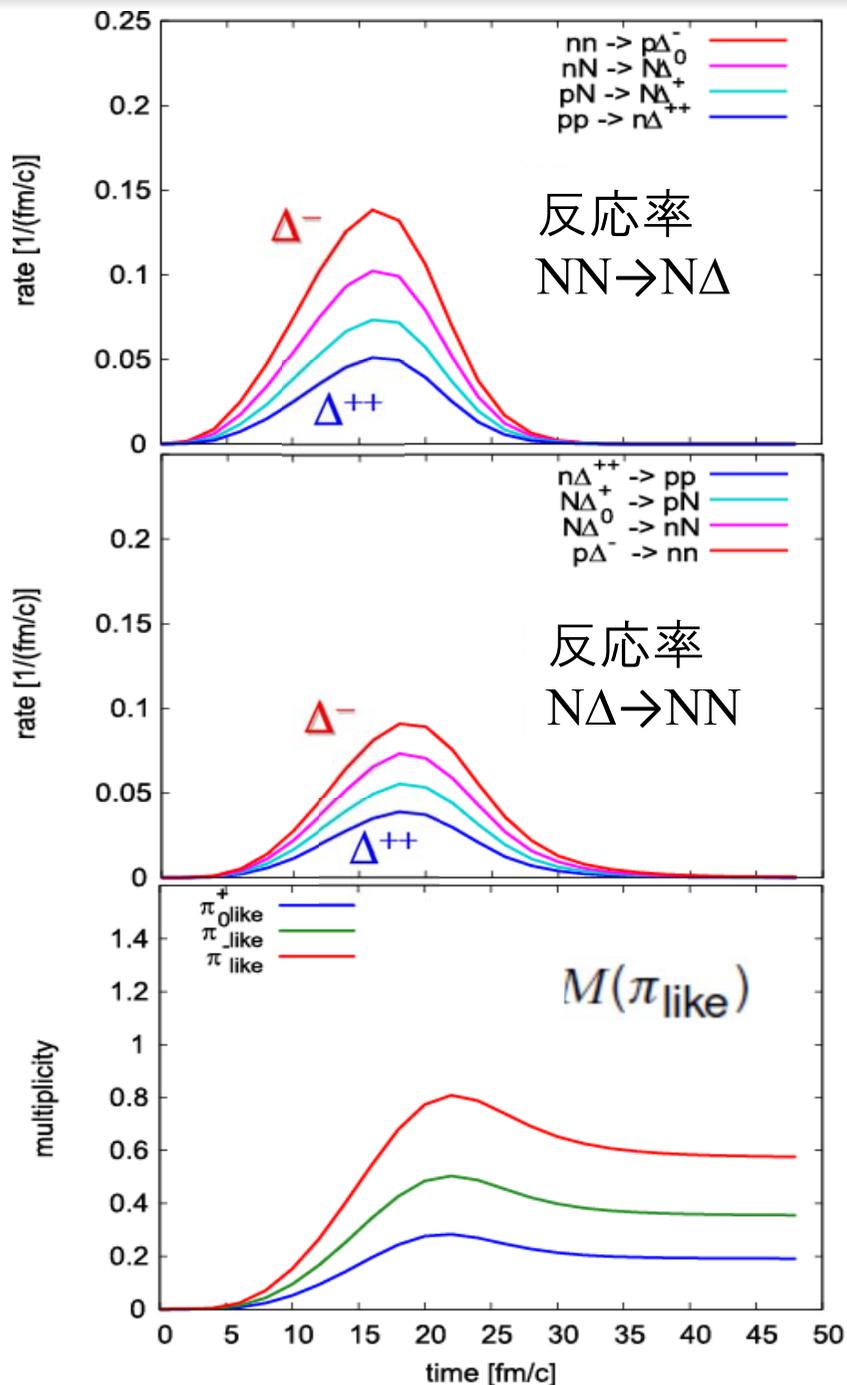
• without cluster

• JAM

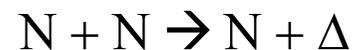


- ✓ クラスタ関連の有無によって、最大密度の値やその時刻が異なる
- ✓ 相互作用(対称エネルギーの密度依存性)により N/Z 比が異なる
- ✓ クラスタ関連のない方が、対称エネルギーの効果が N/Z 比に顕著に現れる

Δ 粒子とπ中間子生成



- Production/absorption of Δ and π



$$\pi_{\text{like}}^- = \pi^- + \Delta^- + \frac{1}{3}\Delta^0,$$

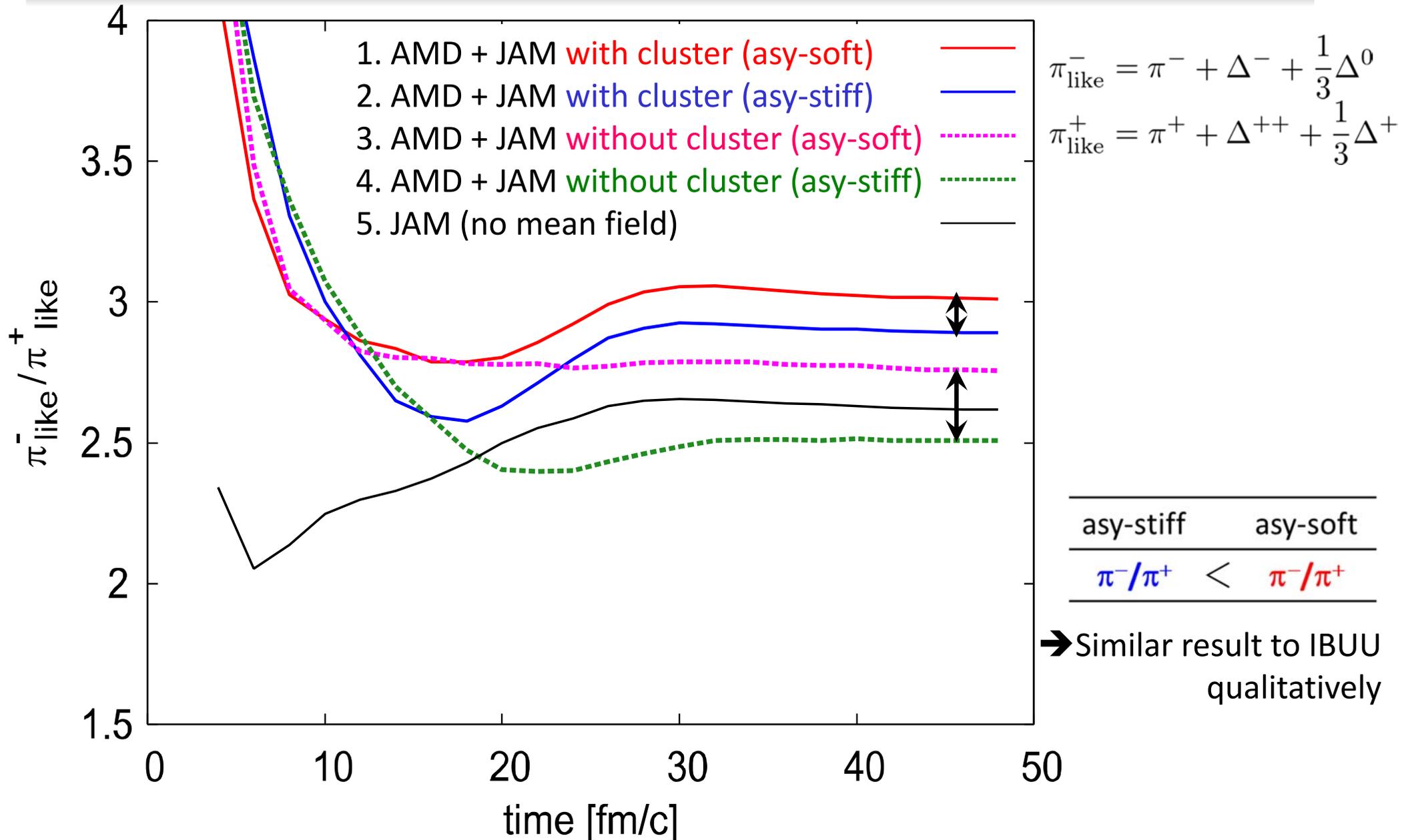
$$\pi_{\text{like}}^0 = \pi^0 + \frac{2}{3}\Delta^0 + \frac{2}{3}\Delta^+,$$

$$\pi_{\text{like}}^+ = \pi^+ + \Delta^{++} + \frac{1}{3}\Delta^+.$$



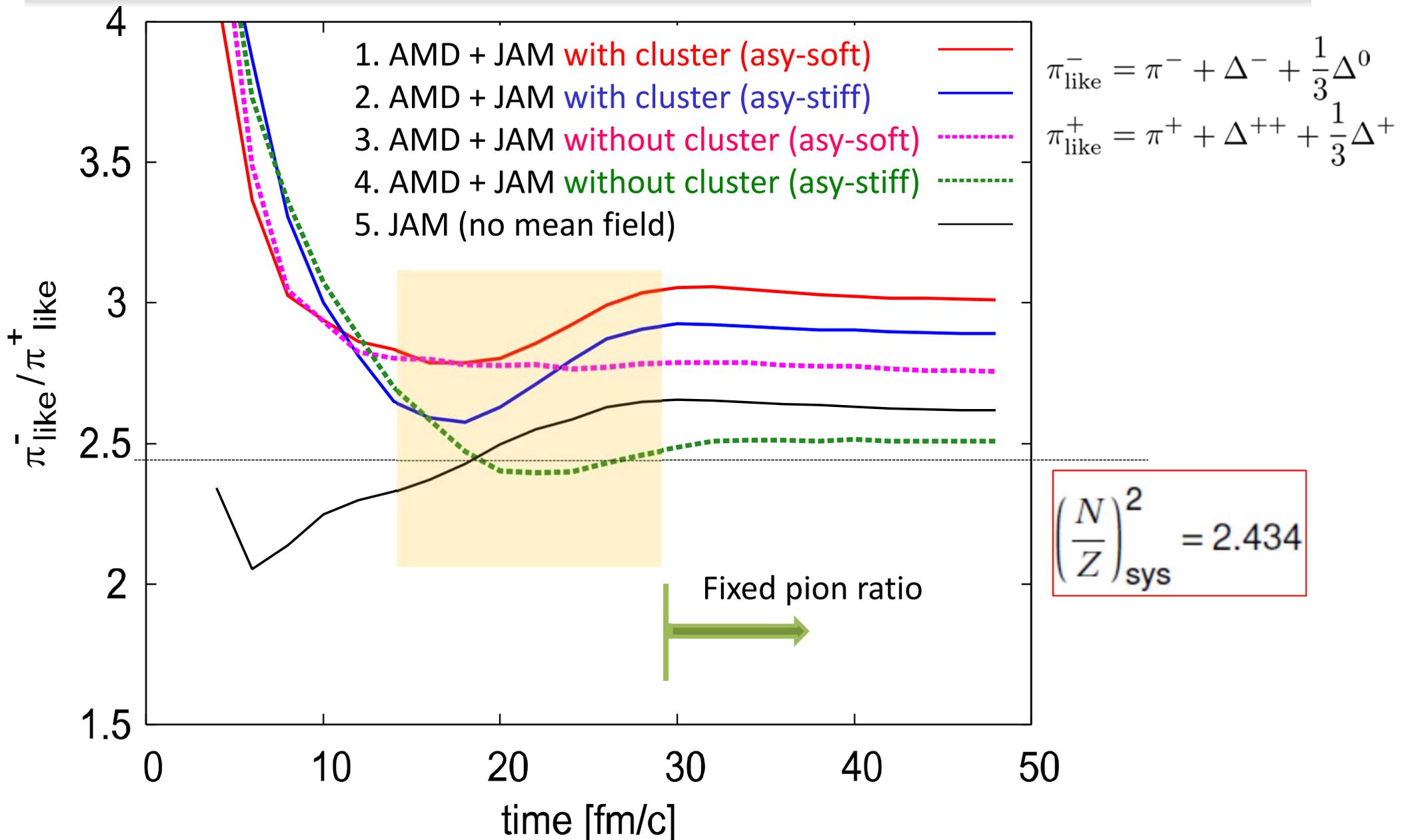
We confirm that final pions are produced through many productions/absorptions of Δ and π.

π中間子生成



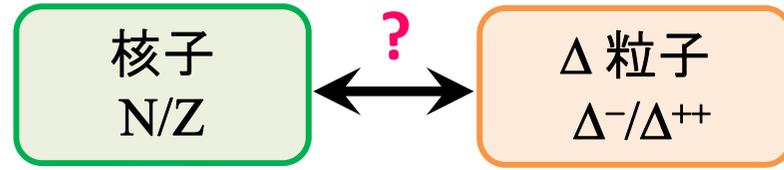
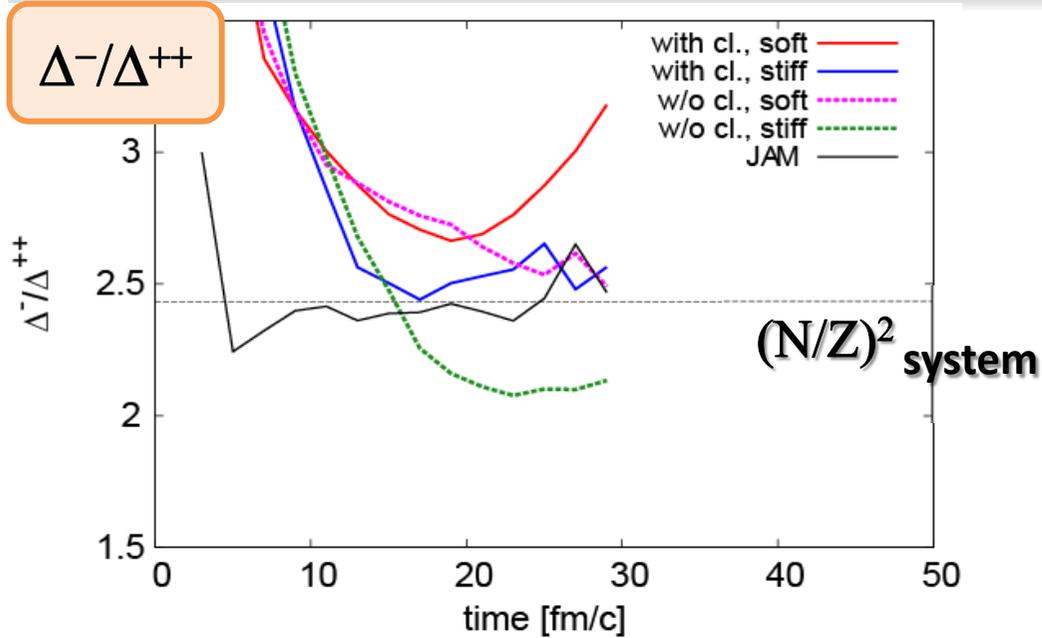
* クラスタ相関のない計算：対称エネルギーの効果が大きく見える

π中間子生成



* π^-/π^+ は、系全体の比 $(N/Z)_{\text{sys}}^2$ より大きい $\Rightarrow \Delta$ や π が見ている核子の情報は？

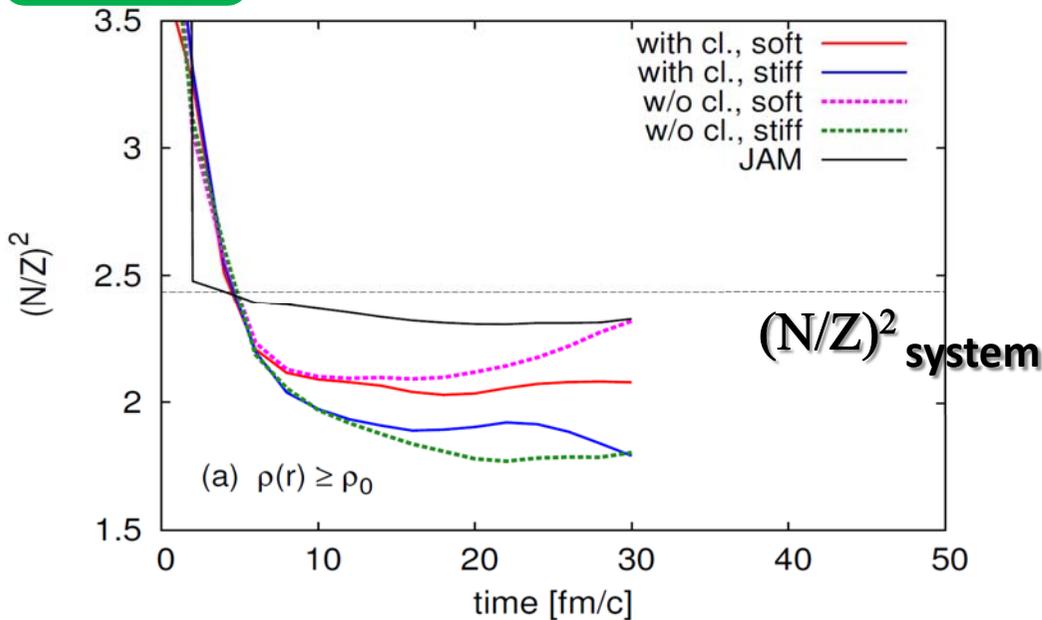
N/Zと Δ^-/Δ^{++} の関係性



単純な期待： $\Delta^-/\Delta^{++} \sim (N/Z)^2$

$$\frac{\Delta^-}{\Delta^{++}} = \frac{\text{Rate}(nn \rightarrow n\Delta^-)}{\text{Rate}(pp \rightarrow p\Delta^{++})}$$

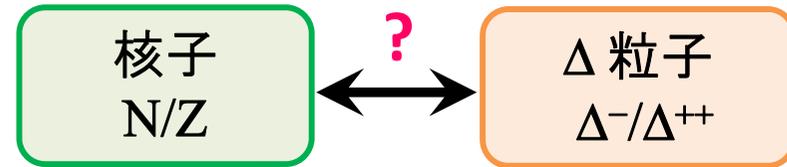
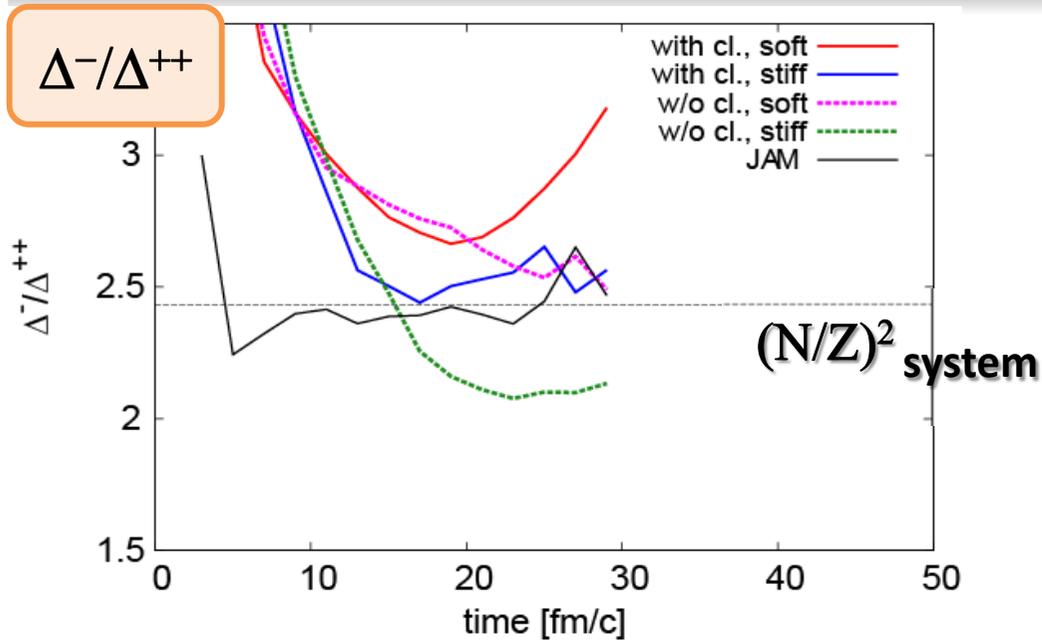
$(N/Z)^2_{\rho}$ $\rho_0 \leq \rho$ に存在する核子



$\rightarrow \Delta^-/\Delta^{++} \neq (N/Z)^2$

We are not looking at the correct region of nucleons for Δ production.

N/Zと Δ^-/Δ^{++} の関係性

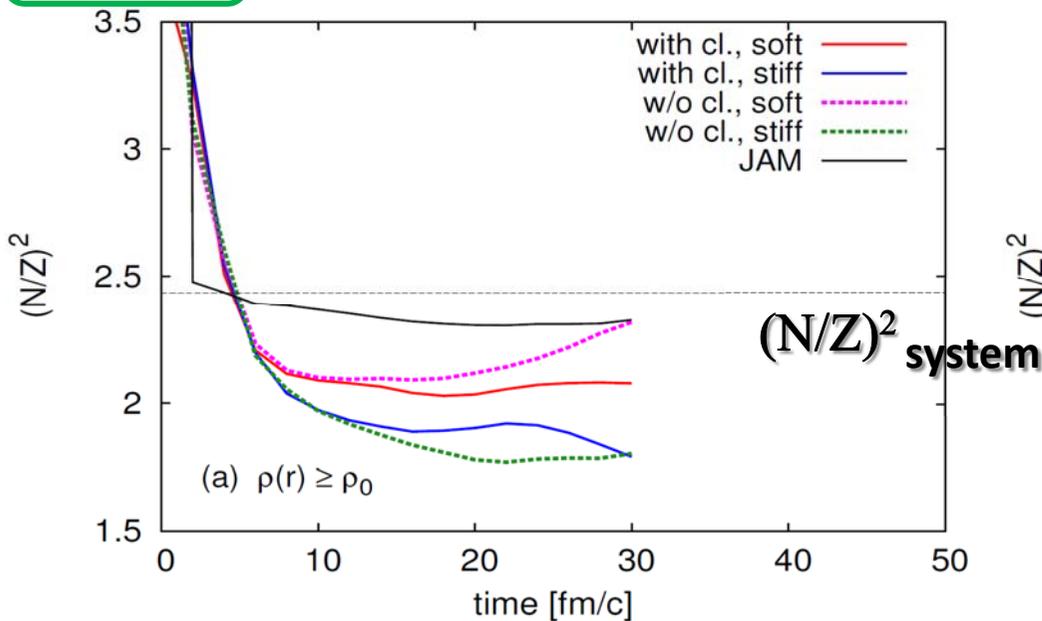


単純な期待： $\Delta^-/\Delta^{++} \sim (N/Z)^2$

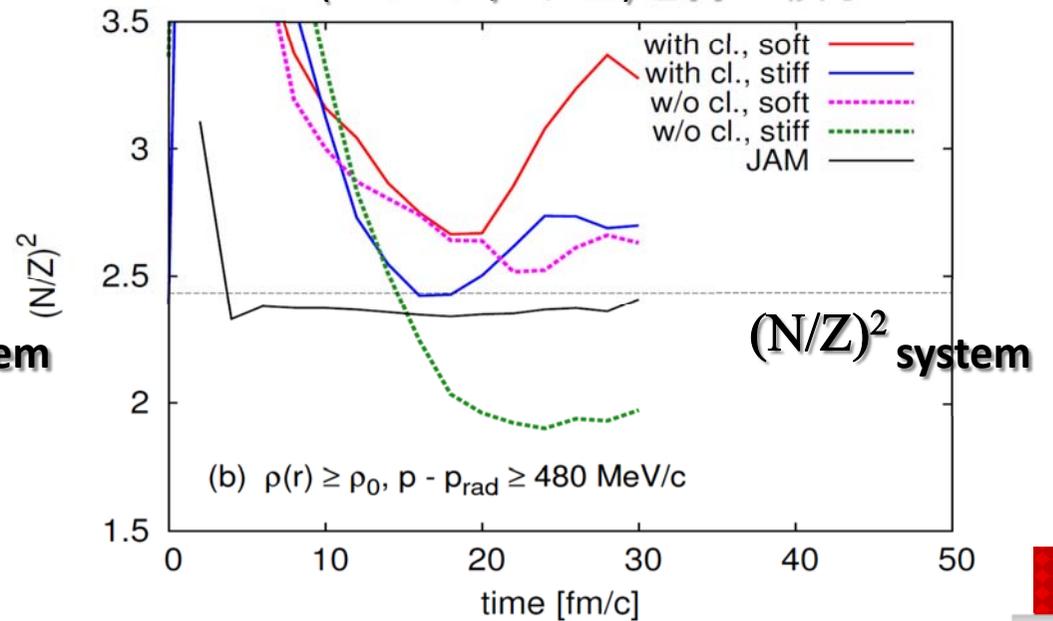
$$\frac{\Delta^-}{\Delta^{++}} = \frac{\text{Rate}(nn \rightarrow n\Delta^-)}{\text{Rate}(pp \rightarrow p\Delta^{++})}$$

(動径方向の膨張速度は引いた)

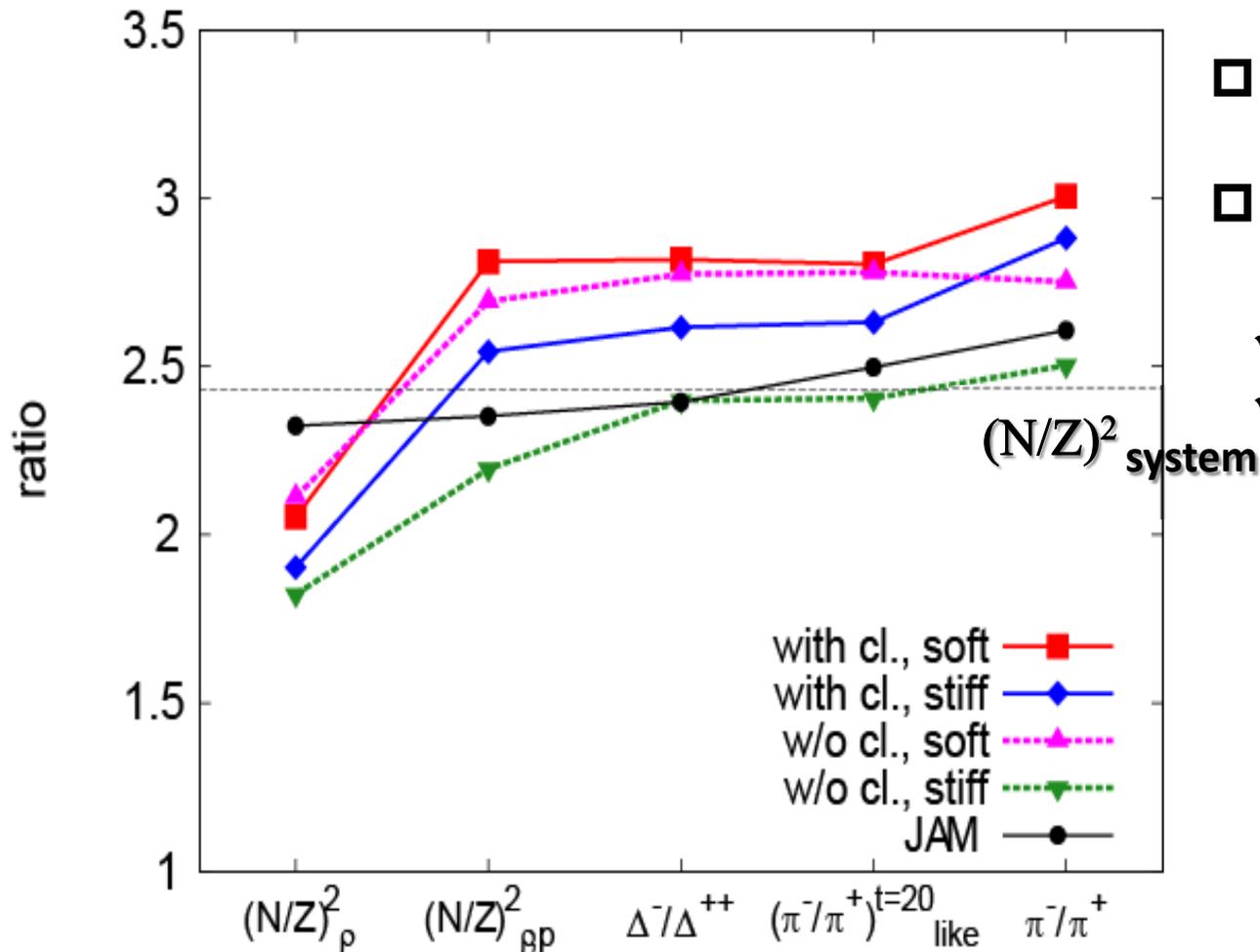
$(N/Z)^2_{\rho}$ $\rho_0 \leq \rho$ に存在する核子



$(N/Z)^2_{\rho, p}$ $\rho_0 \leq \rho$ に存在し、高運動量 (480MeV/c以上)を持つ核子



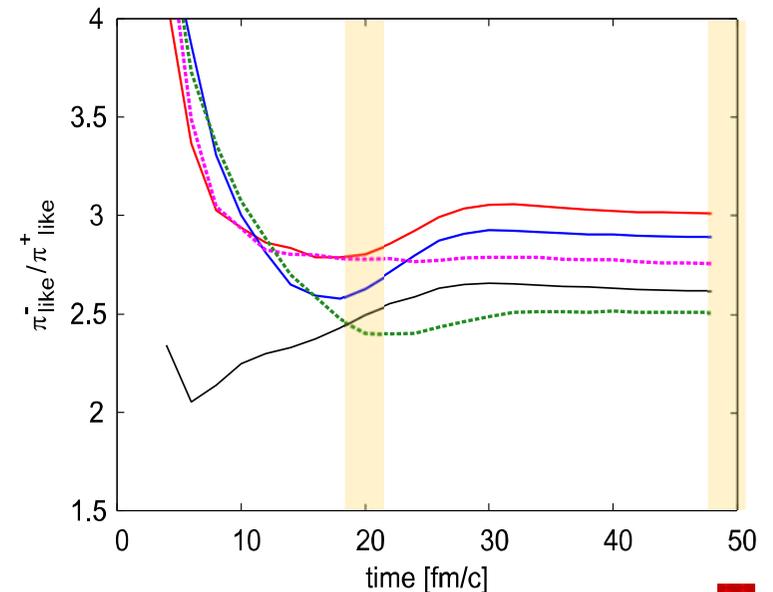
終状態の π^-/π^+ 比



□ $(N/Z)_{\rho, p}^2 \sim \Delta^-/\Delta^{++} \sim (\pi^-/\pi^+)_{\text{like}}^{t=20}$

□ 終状態：
 π^-/π^+ 比は $(\pi^-/\pi^+)_{\text{like}}^{t=20}$ 比と異なる

- ✓ Cluster correlation $\rightarrow \pi^-/\pi^+$ up
- ✓ Stiff $S(\rho) \rightarrow \pi^-/\pi^+$ up



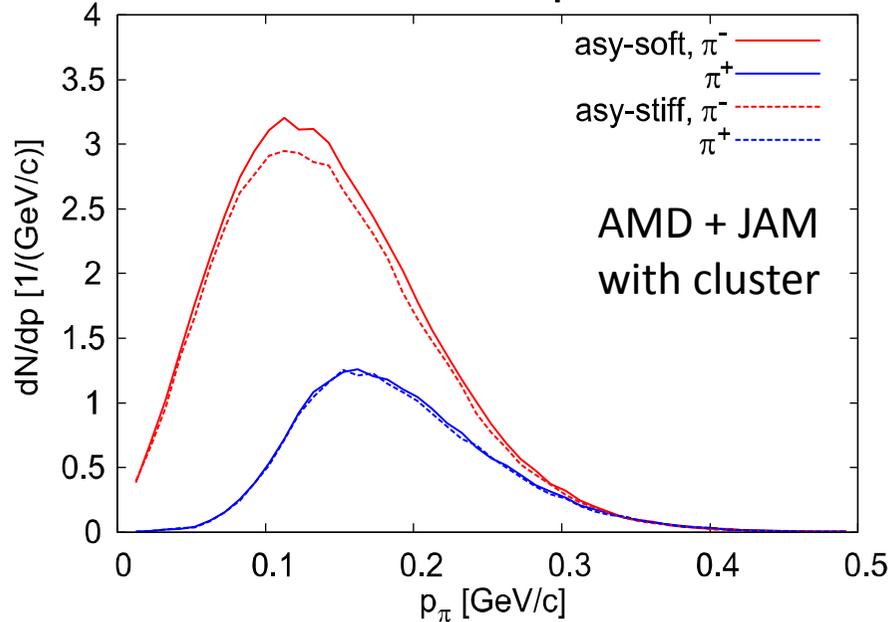
$$\left(\frac{N}{Z}\right)^2 = \frac{\int_0^\infty N(t)^2 dt}{\int_0^\infty Z(t)^2 dt}$$

$$\frac{\Delta^-}{\Delta^{++}} = \frac{\int_0^\infty (nn \rightarrow p\Delta^-) dt}{\int_0^\infty (pp \rightarrow n\Delta^{++}) dt}$$

$N(t), Z(t)$: 条件を満たす核子数

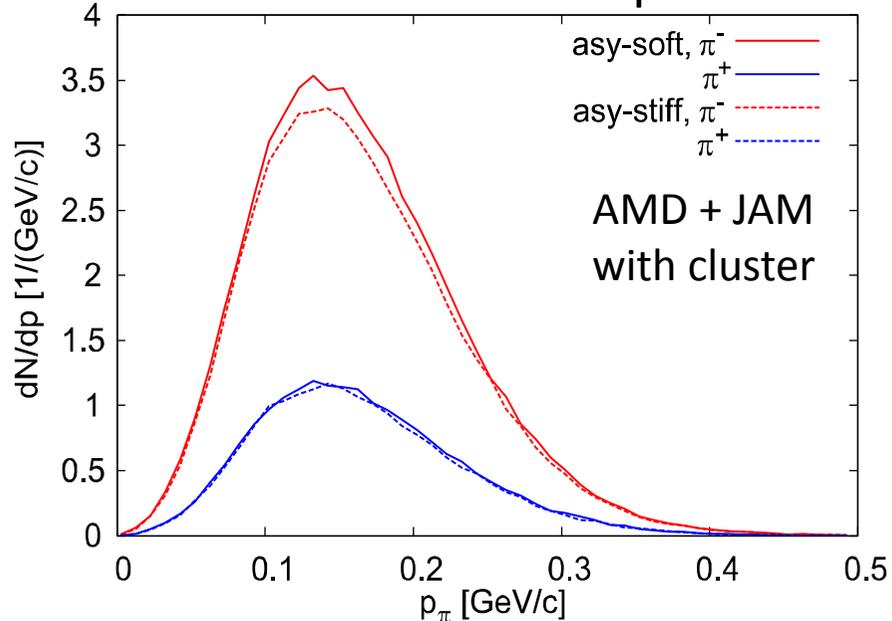
π 中間子の生成スペクトルとクーロンの影響

➤ With Coulomb for pions



- Coulomb effect:
Acceleration of π^+
Deceleration of π^-
 → Changes of pion spectra

➤ Without Coulomb for pions



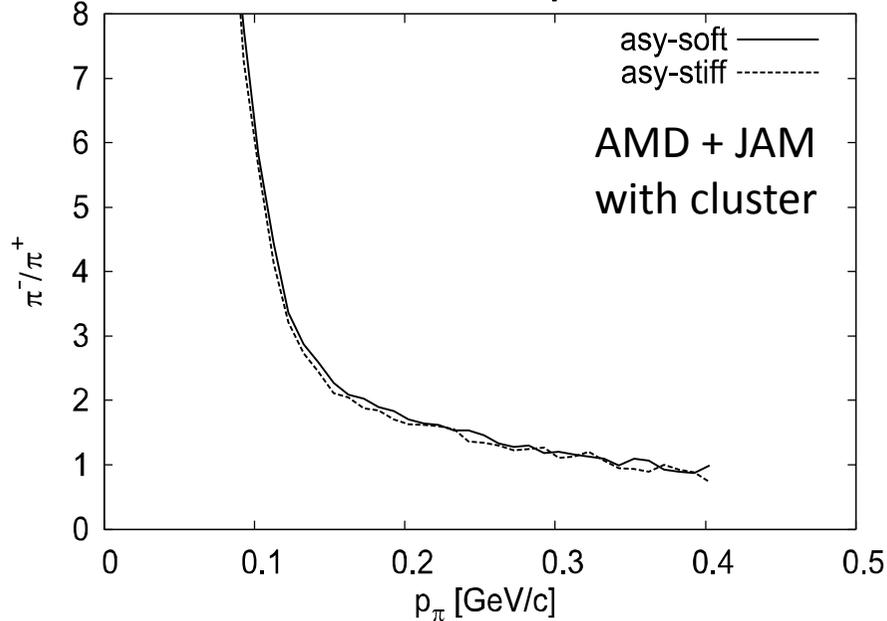
- **AMD + JAM with cluster (asy-soft)**

	π^-	π^+	π^-/π^+
With Coulomb	0.577	0.192	3.01(1)
Without Coulomb	0.582	0.193	3.02(1)

- Coulomb effect has almost no effect on the pion multiplicities and the pion ratio.

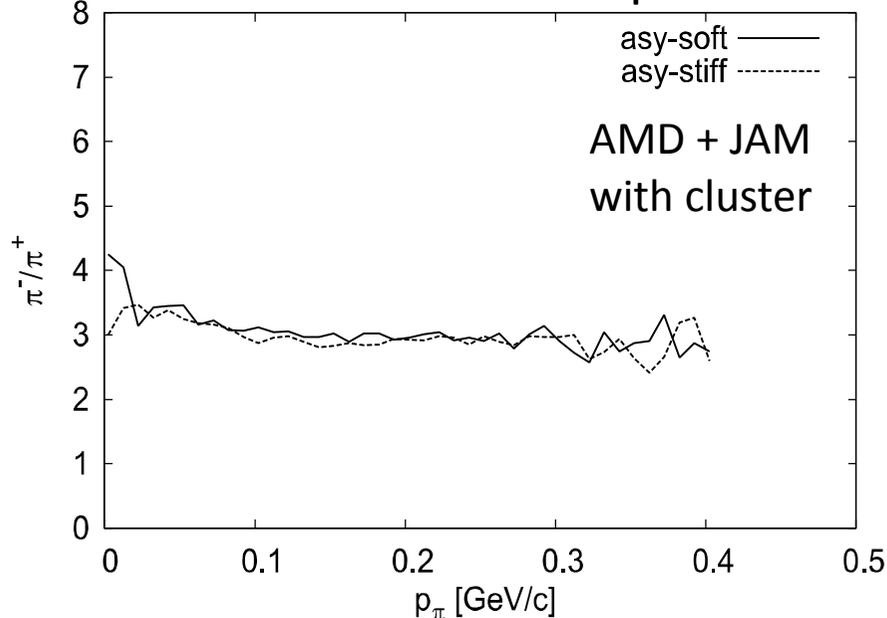
π 中間子の生成スペクトルとクーロンの影響

➤ With Coulomb for pions



- Coulomb effect:
 - Acceleration of π^+
 - Deceleration of π^-
- ➔ Changes of pion spectra

➤ Without Coulomb for pions



- **AMD + JAM with cluster (asy-soft)**

	π^-	π^+	π^-/π^+
With Coulomb	0.577	0.192	3.01(1)
Without Coulomb	0.582	0.193	3.02(1)

- ➔ Coulomb effect has almost no effect on the pion multiplicities and the pion ratio.

まとめ

- 中性子過剰核 $^{132}\text{Sn}+^{124}\text{Sn}$ の重イオン衝突における陽子・中性子のダイナミクスと、そこから生じる π 中間子や Δ 粒子との関係性について調べた
 - 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
- ✓ 核子のダイナミクスと Δ 粒子・ π 中間子が密接に関係しているように思われる
- ✓ π^-/π^+ と Δ^-/Δ^{++} 比は、高密度・高運動量部分の核子の $(N/Z)^2$ と関係している
- ✓ Soft E_{sym} の方が π^-/π^+ 比が大きい
- ✓ E_{sym} 効果はクラスタ相関を考慮しない場合の方が強い
- ✓ 終状態の π^-/π^+ 比は $(\pi^-/\pi^+)_{\text{like}}^{t=20}$ から変化する
 - Cluster correlation : π^-/π^+ up - Stiff E_{sym} : π^-/π^+ up

