

重イオン衝突で探る状態方程式

小野 章

東北大・理

ミニワークショップ「中性子星の核物質」, 理研, 2011年9月13日

重イオン衝突ダイナミクス \Leftrightarrow 核物質の諸性質

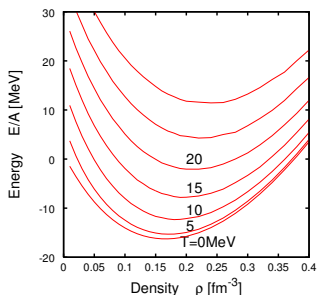
微視的観点からの理解

状態方程式

核物質の状態方程式（一般には有限温度）

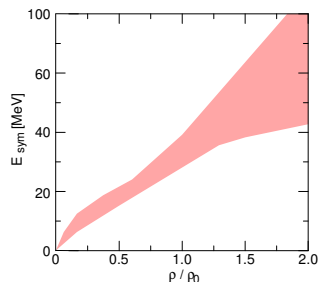
$$(E/A)(\rho_p, \rho_n, T) = (E/A)_0(\rho, T) + E_{\text{sym}}(\rho, T) \left(\frac{\rho_n - \rho_p}{\rho_n + \rho_p} \right)^2, \quad \rho = \rho_p + \rho_n$$

対称核物質の $(E/A)_0(\rho, T)$



(Gogny 力)

対称エネルギー $E_{\text{sym}}(\rho)$

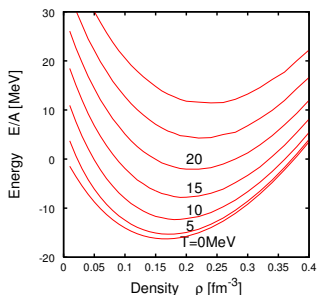


状態方程式

核物質の状態方程式（一般には有限温度）

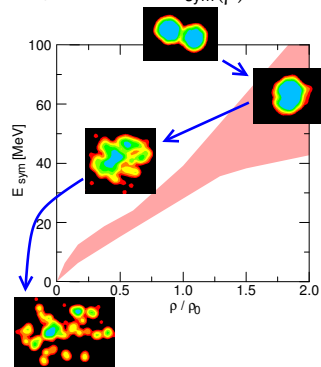
$$(E/A)(\rho_p, \rho_n, T) = (E/A)_0(\rho, T) + E_{\text{sym}}(\rho, T) \left(\frac{\rho_n - \rho_p}{\rho_n + \rho_p} \right)^2, \quad \rho = \rho_p + \rho_n$$

対称核物質の $(E/A)_0(\rho, T)$



(Gogny 力)

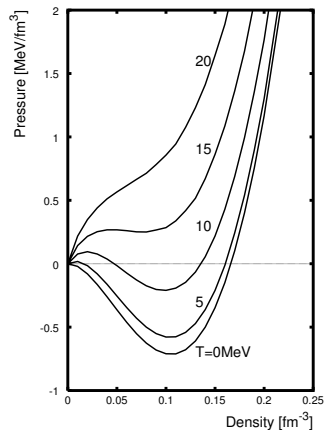
対称エネルギー $E_{\text{sym}}(\rho)$



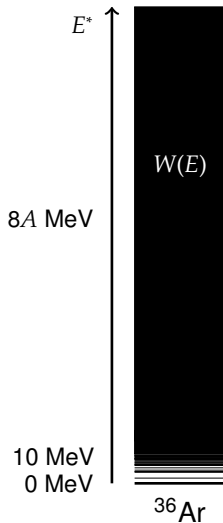
重イオン衝突との密接な関係．

液相気相相転移

状態方程式： $P(\rho, T)$



(一様密度を仮定した平均場計算)



核子・クラスター気体



液相気相相転移

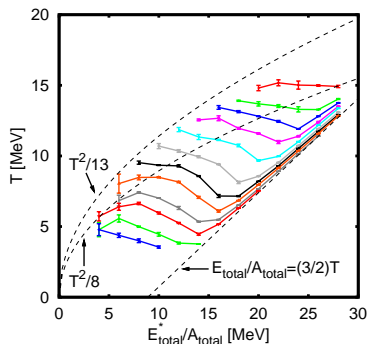


$$W(E) \approx e^{2\sqrt{a}E^*}$$



$$V = \frac{4}{3}\pi(9 \text{ fm})^3$$

Constant-pressure caloric curves



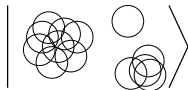
- Negative heat capacity was obtained. (First order phase transition)
- From liquid-gas coexistence to gas phase
- Consistent with the quantum relation $E_{\text{liq}}^* = aT^2$ with $a = A/(8-13 \text{ MeV})$.
- Critical point $(T_c, P_c) \approx (12 \text{ MeV}, 0.2 \text{ MeV}/\text{fm}^3)$

Furuta and Ono, PRC79 (2009) 014608;
PRC74 (2006) 014612.

Antisymmetrized Molecular Dynamics

AMD wave function

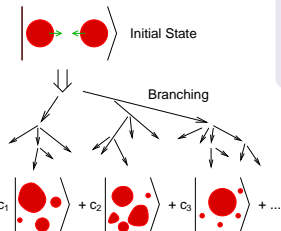
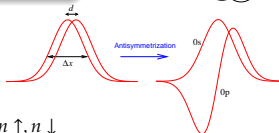
$$|\Phi(Z)\rangle = \det_{ij} \left[\exp \left\{ -v \left(\mathbf{r}_j - \frac{\mathbf{Z}_i}{\sqrt{v}} \right)^2 \right\} \chi_{\alpha_i}(j) \right]$$



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

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

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



Stochastic equation of motion for the wave packet centroids Z :

$$\frac{d}{dt} \mathbf{Z}_i = \{ \mathbf{Z}_i, \mathcal{H} \}_{\text{PB}} + \Delta \mathbf{Z}_i(t) + (\text{NN collisions})$$

- Mean field (Time evolution of single-particle wave functions)
- Nucleon-nucleon collisions (as the residual interaction)

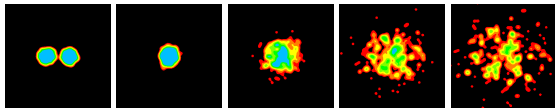
Energy is conserved. No temperature in the equation.

Quantum effects are included.

- 比較的高エネルギー (≥ 100 MeV/u) の重イオン衝突
 - 高密度核物質を反映する現象
 - クラスターの生成

- 比較的低エネルギー (~ 50 MeV/u) の重イオン衝突
 - 低密度核物質を反映する現象
 - アイソスピン蒸留, アイソスピン拡散

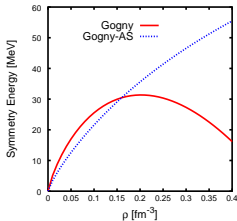
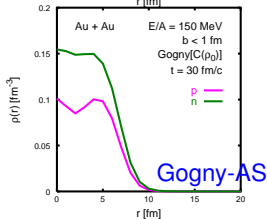
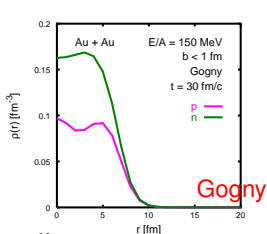
Isospin Effects in High Density Region



$^{197}\text{Au} + ^{197}\text{Au}$, 150 MeV/u, $b < 1$ fm

Ono, PTP Suppl 146 (2002) 378.

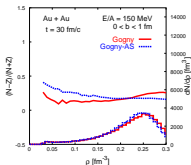
$\rho_p(r)$ and $\rho_n(r)$ at $t = 30$ fm/c



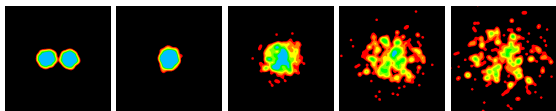
中性子と陽子の運動の差は，対称エネルギーを反映している．

観測量

- 陽子・中性子のフロー (t と ^3He のフロー)
- π^-/π^+ の比

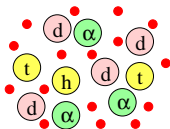
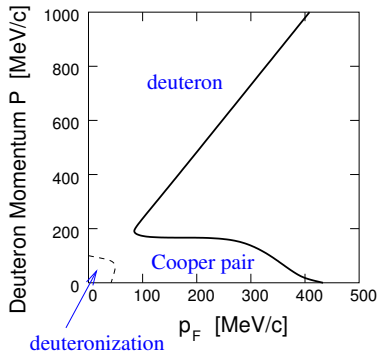


Cluster correlations



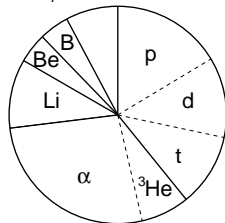
$^{197}\text{Au} + ^{197}\text{Au}$ at 150 MeV/u

Deuteron pole in nuclear matter ($T = 0$)

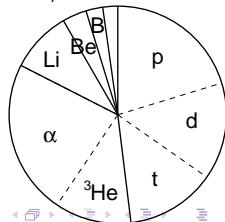


- 低密度核物質
- 低密度原子核
- 反応

$E/A = 150$ MeV



$E/A = 250$ MeV

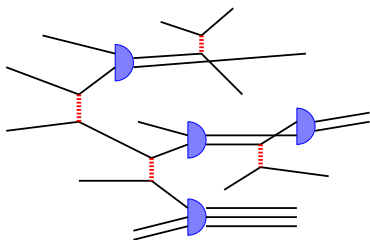


Danielewicz and Bertsch, NPA 533 (1991)
712.

Cluster formation

During the time evolution of AMD,

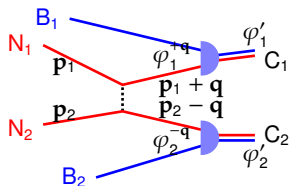
- Cluster formation
- Propagation
- Breakup



$$N_1 + B_1 + N_2 + B_2 \rightarrow C_1 + C_2$$

- N_1, N_2 : Colliding nucleons
- B_1, B_2 : Spectator nucleons/clusters
- C_1, C_2 : $N, (2N), (3N), (4N)$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = F_{\text{kin}} |\langle \varphi'_1 | \varphi_1^{+q} \rangle|^2 |\langle \varphi'_2 | \varphi_2^{-q} \rangle|^2 \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{\text{NN}}$$

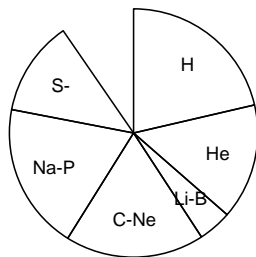


c.f. Danielewicz et al., NPA533 (1991) 712.

Effects of cluster correlations

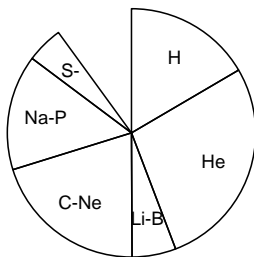
$^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$, $E/A = 35$ MeV, filtered violent collisions

w/o cluster correlations



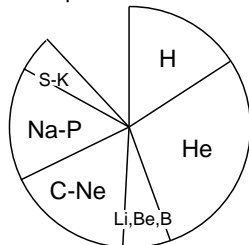
p	6.7
d	1.5
t	0.3
^3He	0.3
α	2.7

with cluster correlations



p	4.4
d	1.8
t	0.5
^3He	0.6
α	5.0

experiment



Effects of clusters

- $M_p \downarrow$
- $M_\alpha \uparrow$
- $\sum_{\text{IMF}} Z \downarrow$

Coherence time: $\tau_{\text{NN-coll}}$

- 比較的高エネルギー (≥ 100 MeV/u) の重イオン衝突
 - 高密度核物質を反映する現象
 - クラスターの生成

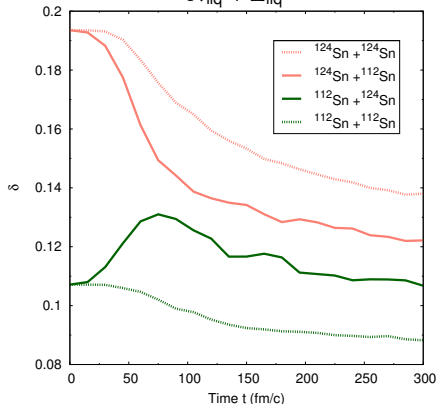
- 比較的低エネルギー (~ 50 MeV/u) の重イオン衝突
 - 低密度核物質を反映する現象
 - アイソスピン蒸留, アイソスピン拡散

Collision Dynamics and Isospin Fractionation

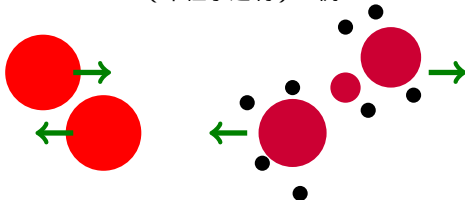
Sn + Sn at $E/A = 50$ MeV, $6 \leq b \leq 8$ fm

Liquid = ある程度密度の高い部分

$$\delta = \frac{N_{\text{liq}} - Z_{\text{liq}}}{N_{\text{liq}} + Z_{\text{liq}}}$$



$^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ (中性子過剰) の例



● Fractionation/Distillation (蒸留)

$$\delta(\text{液体}) < \delta(\text{気体})$$

● フラグメントの生成量 $Y(N, Z)$ の分析 (Isoscaling など)

⇒ 低密度での対称エネルギー

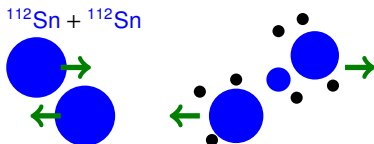
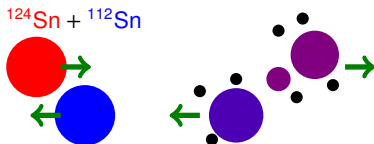
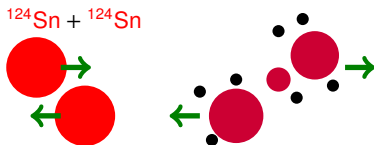
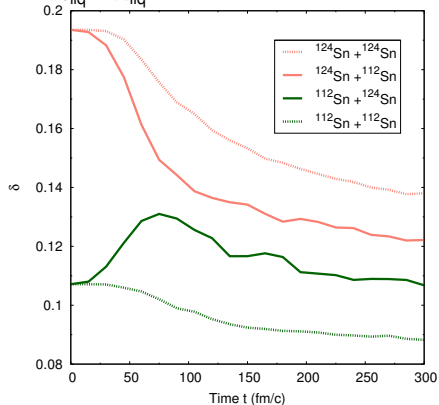
AMD 計算の結果 (赤石), Skyrme SLy4

Ispिन Diffusion

Sn + Sn at $E/A = 50$ MeV, $6 \leq b \leq 8$ fm

Liquid = ある程度密度の高い部分

$$\delta = \frac{N_{\text{liq}} - Z_{\text{liq}}}{N_{\text{liq}} + Z_{\text{liq}}} \quad \text{Projectile-like } (p_z > 0)$$

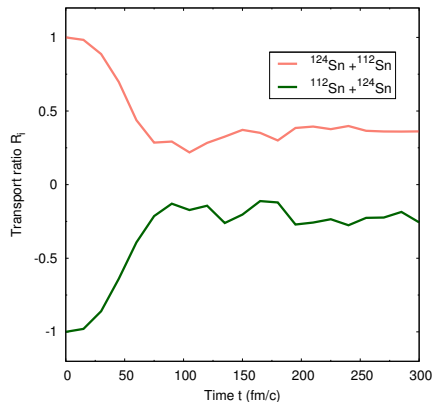


AMD 計算の結果 (赤石), Skyrme SLy4

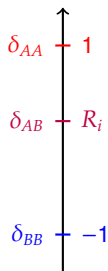
Ispin Diffusion — Transport Ratio

δ から計算した Transport Ratio

$6 \leq b \leq 8 \text{ fm}$



AMD 計算の結果 (赤石), Skyrme SLy4



● $AA = ^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$

● $AB = ^{124}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$

● $BB = ^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$

$$R_i(\delta) = \frac{2\delta_{AB} - \delta_{AA} - \delta_{BB}}{\delta_{AA} - \delta_{BB}}$$

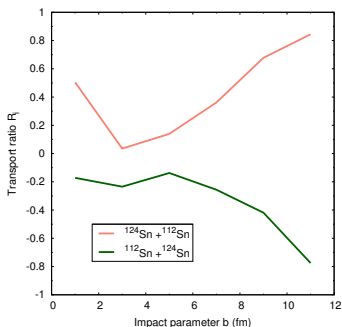
実験と理論を比較する上で都合がよい.

- 時刻 t にほとんど依存していない.
- δ に線形に關係している観測量 X であれば

$$R_i(\delta) = R_i(X)$$

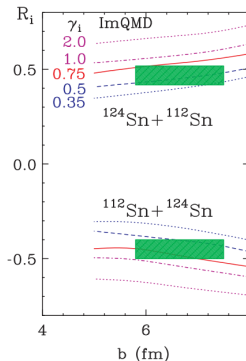
Dependence on Impact Parameter, EOS and Model

$t = 300 \text{ fm}/c$ での Transport Ratio



ImQMD の結果

M.B. Tsang et al., PRL102 (2009) 122701.



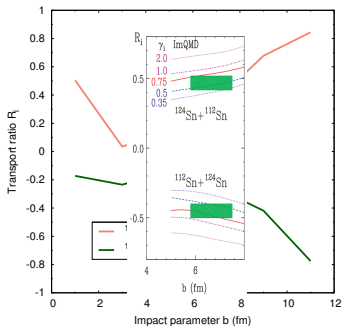
AMD 計算の結果 (赤石), Skyrme SLy4

より慎重に詳細を分析する必要あり.

- EOS 依存性 . 入射エネルギー依存性 . Isospin Transport の機構 .
- 衝突径数依存性 , モデル依存性 , 観測物理量依存性 , 二核子衝突依存性など .

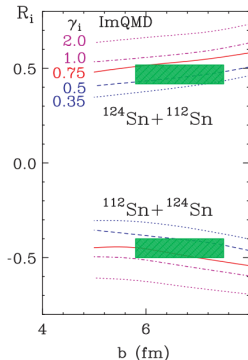
Dependence on Impact Parameter, EOS and Model

$t = 300 \text{ fm}/c$ での Transport Ratio



ImQMD の結果

M.B. Tsang et al., PRL102 (2009) 122701.

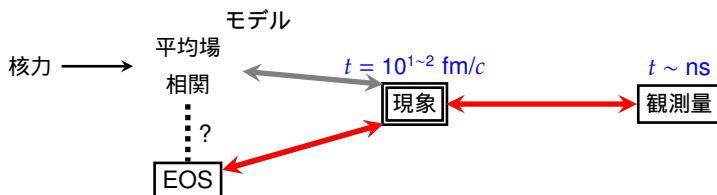


AMD 計算の結果 (赤石), Skyrme SLy4

より慎重に詳細を分析する必要あり.

- EOS 依存性 . 入射エネルギー依存性 . Isospin Transport の機構 .
- 衝突径数依存性 , モデル依存性 , 観測物理量依存性 , 二核子衝突依存性など .

状態方程式と核衝突の関連



- 現象（中間段階の物理量）と観測量との関連

例：集団のフローとクラスターのフローの関連； π^-/π^+ を測れば ρ_n/ρ_p を測ったことになるか

- 反応の中間段階における特徴的現象と平均場・相関との関連

例： ρ_n/ρ_p の振る舞いが有効相互作用パラメータを反映するか

- EOS（≡ 熱化学平衡の物質の性質）と現象の関連

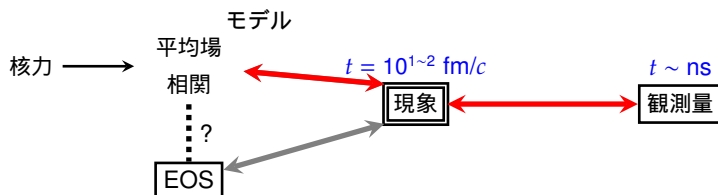
熱化学平衡が実現しているか、動的効果が重要か

- 理論のモデルに対する依存性

同じ EOS（平均場・相関）でもモデルによって結果が違う？

本当は核衝突のダイナミクス（何が起きているのか）を理解することが大事．

状態方程式と核衝突の関連



- 現象（中間段階の物理量）と観測量との関連

例：集団のフローとクラスターのフローの関連； π^-/π^+ を測れば ρ_n/ρ_p を測ったことになるか

- 反応の中間段階における特徴的現象と平均場・相関との関連

例： ρ_n/ρ_p の振る舞いが有効相互作用パラメータを反映するか

- EOS（≡ 熱化学平衡の物質の性質）と現象の関連

熱化学平衡が実現しているか、動的効果が重要か

- 理論のモデルに対する依存性

同じ EOS（平均場・相関）でもモデルによって結果が違う？

本当は核衝突のダイナミクス（何が起きているのか）を理解することが大事．

- 「これを測れば EOS がわかります」ということがあればよいが ...
- 「反応の全体像とともに EOS を解明しよう」というほうが健全であろう .

非対称核物質の EOS を反映する現象

- Isospin Diffusion
- Fragmentation
- 高密度での陽子・中性子の運動
- クラスターのガス

その他, 話さなかったこと

- 熱平衡を直接反映する物理量はあるか? (Fragmentation の例)
- 熱平衡系や核物質と核衝突の統一的記述 .
- モデルの比較 .