



Title	高エネルギー原子核衝突反応の大統計シミュレーションを用いた原子核形状の研究
Author(s)	坂井, あづみ; 村瀬, 功一
Citation	サイバーメディアHPCジャーナル. 2026, 16, p. 126-129
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/106253
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

高エネルギー原子核衝突反応の 大統計シミュレーションを用いた原子核形状の研究

坂井 あづみ¹、村瀬 功一²

¹長崎総合科学大学 総合情報学部、²大阪大学 大学院理学研究科

1. はじめに

原子核を構成する陽子や中性子といったハドロンは、素粒子であるクォークとグルーオンから構成される。真空ではクォークは単体では存在できず、強い相互作用を媒介するグルーオンによってハドロン内部に閉じ込められている。極限的に高温または高密度の環境では、クォークが閉じ込めから解放されたクォーク・グルーオンプラズマ (QGP) 相が現れる。粒子加速器を用いた高エネルギー原子核衝突実験では、光速近くまで加速した原子核を衝突させることで QGP を人工的に生成し、その性質を研究している。この加速器で生成される QGP は、現在、人工的に生成できる最も高温および最も高密度な極限物質であり、QGP の物性の探求は現代物理学の重要な研究テーマの 1 つである。

近年、葉巻型に変形しているとされるキセノン原子核同士 (Xe+Xe) の中心衝突で、鉛原子核同士 (Pb+Pb) の場合より大きな楕円フロー v_2 (ハドロン方位角分布の 2 次のフーリエ係数) が観測された[1]。これは、原子核の変形に起因すると考えられ、原子核形状制限の新技术として高エネルギー原子核衝突反応に期待が高まり、研究が活発になっている。低エネルギーの原子核衝突では変形核の回転や量子揺らぎの影響の考慮が必要なのに対し、高エネルギー衝突では瞬間的に原子核が衝突するため、原子核の形状が直接寄与する。原子核形状に定量的な制限をかけるため、統合的動的模型を用いたシミュレーションによる理論解析を通して、原子核形状と実験測定量の関係を定量的に評価する必要がある。

先行研究[2]では、ウラン原子核の衝突 (U+U) における v_2 , δp_T , $\langle v_2 \delta p_T \rangle$ の 3 つの測定量(ただし p_T はハドロン横運動量)から原子核形状の評価を

行った。本研究では、ベイズ推定を行うことで、原子核変形パラメータを確率的に制限していく。

本研究では、高エネルギー原子核衝突を用いた原子核形状の制限を究極目標として Pb+Pb (球形) と Xe+Xe (変形核) 衝突の大規模計算を行う。原子核形状の制限の方法として、2 つのアプローチを行う。まず、従来にない高統計のシミュレーションデータを用いて、原子核の変形が個々の測定量に与える影響を定量的に評価し、原子核変形の制限に使える測定量を新しく解析・特定する。さらに、大規模計算を用いることで、測定量から原子核変形パラメータをベイズ推定する枠組みを作る。

2. 統合的動的模型

本研究では、統合的動的模型[3,4]を用いて高エネルギー原子核衝突の数値シミュレーションを行う。衝突反応では、衝突初期の形状、QGP の時空発展、ハドロンの時空発展といった動的な過程が起こり、ハドロンの最後の運動量・角度分布が実験的に測定される。統合的動的模型では、それぞれの過程の模型を組み合わせることで、数値シミュレーションの結果と実験データを比較し、物性パラメータを制限する。現在までに、QGP は粘性の小さい流体的性質を持つことが明らかになり、その時空発展を記述する模型として相対論的流体模型が広く用いられている。測定量の中でも、因子化比 r_n [5] の理解には流体の熱揺らぎ (流体ゆらぎ) を取り入れた揺動流体模型が不可欠であり[3,4]、本研究では、従来の粘性流体模型と揺動流体模型を用いて原子核形状の情報を探る解析を行う。

3. 結果

統合的動的模型の中でも、ハドロンの時空発展に用いるハドロン運動学 JAM コードの更新を行った。

3.1 シミュレーションコードの更新

JAM コードには、ハドロンの散乱・共鳴の模型が含まれる。最新のハドロン共鳴のリストへの切り替えを行った。また、流体とハドロン運動学接続の熱力学的一貫性を確保するために、流体の状態方程式の更新を行った。図 1 はこれらの更新前 (JAM1) と更新後 (JAM2) の粒子数とフローの比較である。

更新前と更新後ともに、実験の粒子数を概ね再現することが出来た。今回の更新により、Fortran から C++ に移行し、コードが扱いやすくなった。

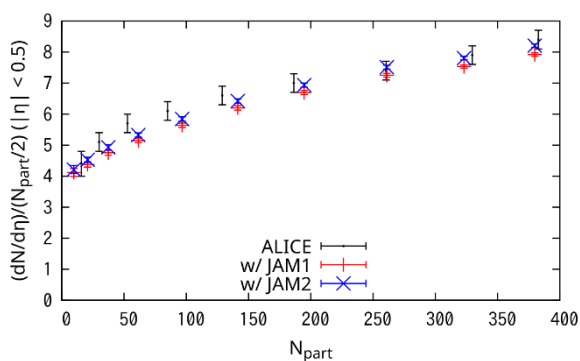


図 1 : JAM の更新

3.2 シミュレーションコードの高速化

ハドロン運動学 JAM コードでは、2 粒子間の衝突判定を行う計算コストが大きく、ボトルネックになっていた。従来のコードでは、粒子数 N の 2 乗のオーダーの衝突判定を行っていたが、空間分割により近くの粒子間だけで衝突判定をするよ

うに更新した。空間を $15 \times 10 \times 10$ に分割したことで、計算時間を 37% に短縮することができた。

図 2 は空間分割なし (w/o Div) と空間分割あり (w/ Div) の粒子数とフローの比較である。

空間分割により計算結果が影響を受けないことが検証された。

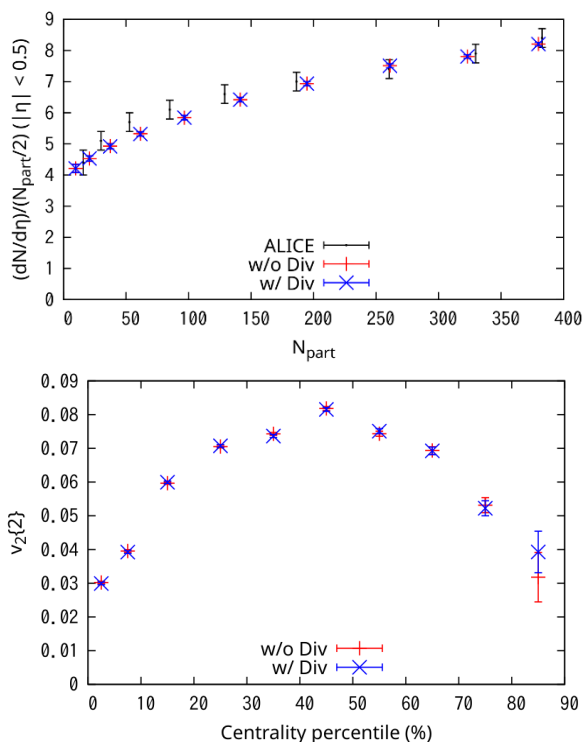


図 2 : 高速化の検証

3.3 モデルパラメータの再調整

統合的動的模型には、モデルパラメータがあり、測定量を再現するようにパラメータを選定する必要がある。本研究で対象とする鉛 (球形) 同士の衝突、キセノン (球形ないし変形) 同士の衝突について、パラメータの探索を行った。

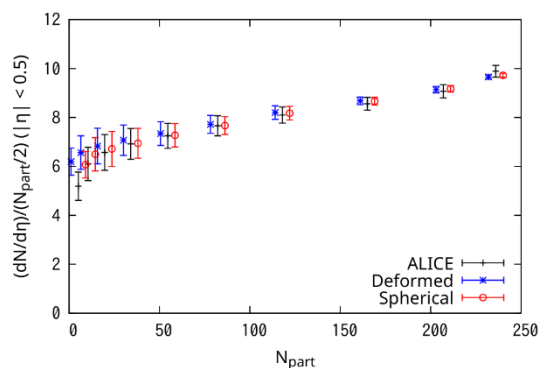


図 3 : 生成粒子数

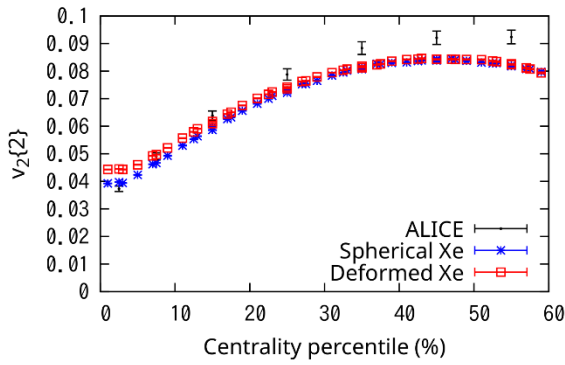


図 4：楕円フロー

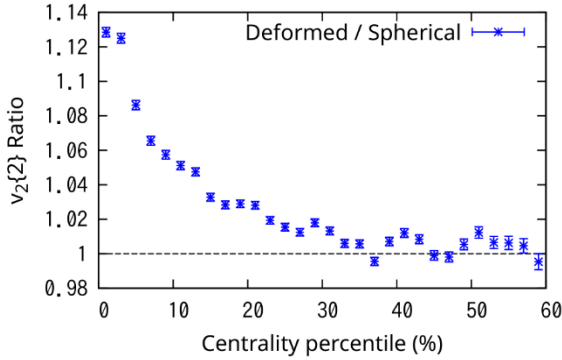


図 5：楕円フローの比（変形核/球形核）

キセノン原子核同士の衝突では 16 のパラメータセット、鉛原子核同士の衝突では 22 のパラメータセットで計算を行うことで、最適なパラメータの選定を完了した。調整したパラメータで、粘性流体模型、流体揺らぎを含むよう同流体模型でのシミュレーションをそれぞれ 2×10^6 衝突事象おこなった。

図 3 はキセノン衝突の変形・球形での粒子数と、実験の粒子数の比較である。事前のパラメータチューニングのもと、数値計算で実験結果の振る舞いを概ね再現できることが確認できた。

図 4 は 2 粒子相関法による楕円フローの、球形のキセノンと変形したキセノンの場合の比較である。今回の大統計を活かして中心度依存性が綺麗に求められていることが分かる。実験の傾向をほぼ再現している。非中心衝突（30%以降）でのずれは原子核形状のパラメータのみを変更した計算のためであり、今後のベイズ推定の解析で合わせる。中心（0-10%）で、変形キセノンにて楕円フローが増大する傾向が見られる。

図 5 では図 4 で見せた楕円フローについて、変形核の場合と球形核の場合の比をとったものである。これは実験での Xe+Xe（変形）と Pb+Pb（球形）の比と定性的に同じ振る舞いをする。今後は Pb+Pb（球形）による解析も進める。

既にこれらの結果は、京都大学基礎物理学研究所で行われた研究会 “Intersection of nuclear structure and high-energy nuclear collisions 2026”（2026 年 4 月 13～24 日）に発表 “Longitudinal flow decorrelations in Xe+Xe collisions and observables”（4 月 23 日）の中で部分的に紹介した。

今後は、より中心衝突（0-1%，0-5%）における原子核変形のフローに対する影響、フロー因子化比 r_n という測定量に与える原子核変形の影響、それらに対する流体力学的ゆらぎの効果の検証、イベント形状工学と呼ばれるフロー強度に基づくイベント分類、衝突時の原子核の姿勢と測定量の関係など、さまざまな対象に対して解析を展開する。

4. ベイズ推定

ベイズ推定を行うための数値シミュレーションを行う。計算コストを下げるため、まずはガウス過程エミュレータを学習する。本研究では、Sobol sequence という数列を用いて、原子核変形のパラメータ β_2, β_4, γ などのパラメータ空間の中で 1000 点をサンプルし、各点について 4×10^5 事象の計算を行った。

縦初期揺らぎ有[4]と無[3]、粘性流体と揺動流体の比較を行うため、4 種類の設定でシミュレーションを行った。粘性流体については 7 次元パラメータ空間、揺動流体については流体揺らぎの cutoff を含めた 8 次元パラメータ空間でサンプリングを行った。用いたパラメータとその範囲は表 1 の通りである。

今後はこれらの結果を用いて学習を行い、エミュレータを用いて、実験データを入力として原子核変形パラメータのベイズ推定を行っていく。

表 1：ベイズ推定に用いるパラメータと範囲

パラメータ	範囲
初期の規格化定数	[50.0, 85.0] (glbgk[3]) [5.0, 12.0] (glpythia[4])
四重極変形 β_2	[-0.1, 0.3]
十六重極変形 β_4	[-0.05, 0.05]
ガンマ変形角 γ	[0, 60°]
ずれ粘性 η/s	[1/4 π , 3/4 π]
ずれ粘性の傾き	[0, 4/4 π]
緩和時間 $\tau_\pi/[\eta/(e+p)]$	[2.5, 5.5]
流体揺らぎの cutoff	[1.5, 2.5] (揺動流体のみ)

5. おわりに

本研究では、高エネルギー原子核衝突による原子核形状の制限を目的に、鉛（球形）原子核同士の衝突、キセノン（変形）原子核同士の衝突とその比較用のキセノン（球形）の数値シミュレーションを行った。本研究では、JAM の更新、流体方程式の状態方程式の再構築、空間分割による計算時間の短縮を達成した。また、シミュレーションに用いるパラメータの調整を完了し、統計を貯めることができた。

今後は数値シミュレーションの計算結果を用いて、測定量の解析や議論を行っていくことで、原子核形状の制限をしていく。

参考文献

- (1) S. Acharya, et al. (ALICE), Physics Letter B, **784**, 82, (2018).
- (2) M. I. Abdulhamid, et al. (STAR), Nature **635**, 8037, 67–72, (2024).
- (3) A. Sakai et al., Physical Review C, **102**, 064903 (2020)
- (4) A. Sakai et al., Physics Letters B, **829**, 137053 (2022).
- (5) V. Khachatryan et al. (CMS), Physical Review C, **92**, 034911, (2015).