

重イオン衝突実験における非ガウスゆらぎ

北沢正清¹

大阪大学大学院理学研究科

近年重イオン衝突実験での観測が精力的に進む保存電荷のバルクなゆらぎ、特に高次キュムラントについて、ハドロン相中における散逸が観測値に及ぼす効果を拡散マスター方程式を用いて考察する。また、実験で測定される高次キュムラントのラピデティ幅依存性を利用して、重イオン衝突終状態のゆらぎが持つ物理的意味を探る手段を提案する。

1 はじめに

有限温度 QCD が持つ、非閉じ込め・カイラル相転移や、臨界温度付近の物質が持つ強結合性等の物性現象は、ハドロン物理のみならず、様々な分野から注目を集める興味深い研究課題である。これらの物理現象に実験的に迫る手段として、重イオン衝突実験が世界各地で活発に行われている [1, 2]。また、格子 QCD 数値解析による高温物質の研究も、臨界温度付近の強結合物質の非摂動論的側面を第一原理的に調べる手段として精力的に推し進められている。近年、これらの分野において、保存電荷ゆらぎ、特にゆらぎの非ガウス性を特徴づける高次キュムラントが持つ観測量としての有用性が注目を集め [3, 4]、観測・研究が活発に行われている [1, 2]。重イオン衝突実験では、イベント毎解析により衝突終状態のある位相空間内の保存電荷数ゆらぎを観測することができる。一方、保存電荷ゆらぎは格子 QCD 数値解析でも測定可能であり、重イオン衝突実験での測定値は格子 QCD の数値解析結果と直接比較することができる。これらそれぞれの系で測定される保存電荷ゆらぎを相互に比較し、またこれらを理論的に考察することにより、QCD 相図上における QCD 臨界点の存在の実験的確認など、様々な物理が明らかになることが期待されている。

ただし、このような比較をするうえで注意しないといけないのが、格子 QCD を含む多くの理論研究において考察されるゆらぎは大正準集団の平衡状態におけるそれに相当するのに対し、重イオン衝突の終状態におけるゆらぎは完全には熱平衡化していないということである。実際、重イオン衝突終状態でのゆらぎの非平衡性は最近のいくつかの研究により強く示唆されている。まず、LHC の ALICE 実験で観測された電磁電荷の 2 次ゆらぎが、ゆらぎを観測するラピデティ幅に強く依存するという結果が得られた [1] が、このような振る舞いはゆらぎが熱平衡に至っていると説明できない。また、最近行われた、格子 QCD 計算と RHIC の STAR 実験での実験結果 [2] との比較においても、粒子収量から決められた温度と、ゆらぎの観測値から推定された温度とに有意な差があるという結果が得られており [5]、重イオン衝突終状態のゆらぎが熱平衡化してないことを示唆している。

これらの結果が意味するのは、重イオン衝突実験で観測されるゆらぎの性質を正しく理解し、また格子 QCD を含む理論計算との比較を適切に進めるためには、衝突で生成された高温物質中でのゆらぎの非平衡性を考慮し、時間発展の様相を正しく記述することが不可避だということである。反面、終状態のゆらぎが熱平衡に至っていないということはまた、観測されるゆらぎが高温物質の時間発展の歴史を記憶しており、それゆえに非平衡性を正しく記述することにより、この観測量を重イオン衝突全体のダイナミクスを理解する新たな情報源として利用できることを示唆している。高温物質中でのゆらぎの時間発展に関しては、ガウスゆらぎ、すなわち 2 次のゆらぎに関しては先行研究が存在する [6] もの、最近注目を集めるようになった高次ゆらぎに関する研究はこれまで行われてこなかった。本研究では、この問題に取り組むため、拡散マスター方程式を用いて高次ゆらぎの時間発展を記述することを試みる [7]。また、この解析で得られる結果を実験で観測されるゆらぎのラピデティ幅依

¹e-mail address: kitazawa@phys.sci.osaka-u.ac.jp

存性と比較することにより、重イオン衝突終状態におけるゆらぎの物理的性質を正しく理解するための具体的手段を提案する。

2 拡散マスター方程式

流体の時間発展を記述する基本方程式である流体方程式は決定論的であり、初期条件を定めればその後の時間発展は一意に決定される。一方、現実の流体においては、マクロにはまったく同じ初期条件から時間発展を開始しても、熱運動などのランダムな運動によって、一定の時刻が経過したあとの物質の状態は流体方程式の解の周りにゆらぎを持って分布することができる。このようなゆらぎを記述する理論的形式として、流体ゆらぎの理論を挙げることができる [8]。この理論では、流体方程式は確率論的な揺動項が付加された、Langevin 型の方程式となる。流体ゆらぎの理論はガウスゆらぎの範囲では様々な問題に適用され、広く成功を収めている。しかし、この形式を非ガウスゆらぎに適用することは、そう自明な問題ではない。ガウスゆらぎに関しては、揺動項が揺動散逸関係で決定するのに対し、高次ゆらぎに関しては同種の自明な関係が存在しないためである。また、重イオン衝突実験が観測するゆらぎは Poisson 分布に近いのだが [1, 2]、流体方程式のように粒子の離散性が粗視化によって消失した形式では、離散系で自然に現れる分布である Poisson 分布に従う高次キュムラントを論じるのが難しいという困難も挙げられる。Poisson 分布に従う高次キュムラントを記述するためには、粒子の離散性を保った枠組みを用いる必要がある [7]。

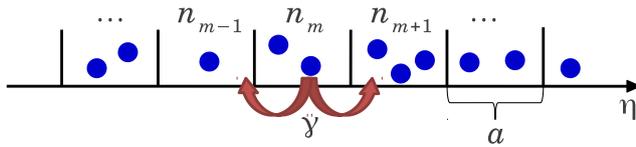


図 1: 拡散マスター方程式 (1) によって記述される系の概念図。

本研究では、このような要請を満たすモデルとして、以下のようなもの採用する [7]。まず、図 1 に示すように空間を長さ a の離散的なセルに分割し、各セルに存在する粒子が単位時間あたり一定の確率 γ で隣接するセルに移動すると仮定する。このとき、 m 番目のセルに含まれる粒子数がそれぞれ n_m である確率 $P(\mathbf{n})$ は、拡散マスター方程式

$$\partial_\tau P(\mathbf{n}, \tau) = \gamma \sum_m [(n_m + 1) \{P(\mathbf{n} + \mathbf{e}_m - \mathbf{e}_{m+1}, \tau) + P(\mathbf{n} + \mathbf{e}_m - \mathbf{e}_{m-1}, \tau)\} - 2n_m P(\mathbf{n}, \tau)], \quad (1)$$

に従う。このモデルで各セルの長さ a を小さくする連続極限を取れば、各粒子は相互に無相関なブラウン粒子として振る舞う。また、この極限で $D = \gamma a^2$ が拡散係数に相当するので、極限は D を固定したうえで取る必要があり、このとき粒子数の期待値及びガウスゆらぎの時間発展は通常の高次キュムラントを解析すれば、重イオン衝突実験の終状態におけるゆらぎと比較することができる。特に、実験では保存電荷のキュムラントをラピデティ幅 $\Delta\eta$ の関数として測定することができるので [1]、 $\Delta\eta$ 依存性を (1) 式から得られる結果と比較することで様々な物理を論じることが可能となる。

3 高次キュムラントの $\Delta\eta$ 依存性

図 2 に、拡散マスター方程式 (1) で計算された $Q(\tau)$ の 2 次および 4 次キュムラントの振る舞いを示す。ただし横軸は $1/X = \Delta\eta/\sqrt{D\tau}$ である。図のそれぞれの線は異なる初期状態に対応しており、左の図が初期状態でゆらぎが全く存在しなかった場合、右図は比較的小さいが有限のゆらぎが存在する

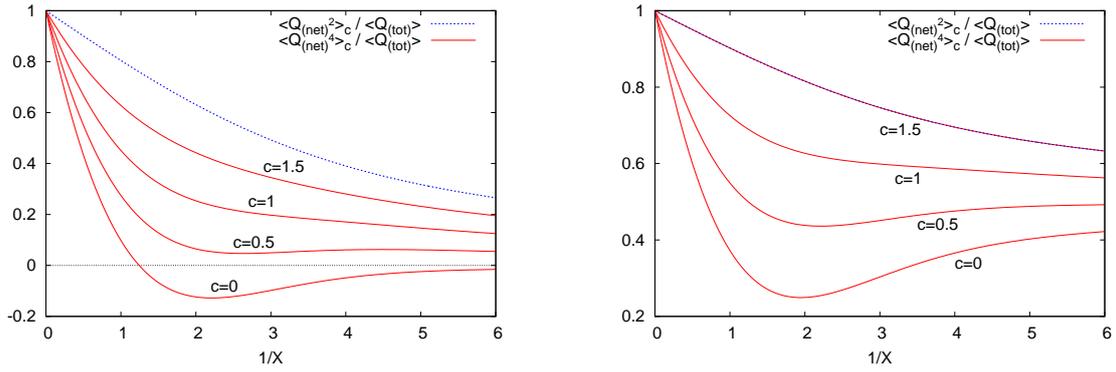


図 2: 時刻 τ に、ラピディティ幅 $\Delta\eta$ の領域に存在する保存電荷のネット粒子数 $Q_{\text{(net)}}$ の 2 次および 4 次キュムラント [7]。横軸は $1/X = \Delta\eta/\sqrt{D\tau}$ 。

場合である。また c は初期状態に依存したパラメータ。詳細は文献 [7] に示してある。実験で観測されるゆらぎが固定されたフリーズアウト時刻 τ のものであると思えば横軸は $\Delta\eta$ に比例するので、これらの結果は実験における各キュムラントの $\Delta\eta$ 依存性と直接比較することができる。

図を見ると、2 次のゆらぎは $\Delta\eta$ の増大とともに減少していくが、この結果は最近 ALICE で観測された電磁電荷ゆらぎの振る舞い [1] と整合する。一方、4 次キュムラントは広いパラメータ領域に渡って 2 次のゆらぎよりも小さい値を持っている。4 次ゆらぎの $\Delta\eta$ 依存性は現状では観測されていないが、ここで得られた 4 次ゆらぎが 2 次より抑制されるという結果は、高次ゆらぎの測定値に対する最初の理論的予言であり、今後実験的に検証されることが望まれる。

また、図 2 からは、 $\Delta\eta$ の関数としての各次数のキュムラントが初期条件に強く依存して特徴的に振る舞うことが見て取れる。特に 4 次キュムラントは、初期条件によっては単調減少でない振る舞いをするし、負にすらなり得る。このように、高次キュムラントの $\Delta\eta$ 依存性が初期条件に強く依存することは、終状態のキュムラントの $\Delta\eta$ 依存性を観測することで初期状態の性質を実験的に明かにできることを示唆している。このように、各種キュムラントの $\Delta\eta$ 依存性は非常に興味深く重要な観測量であり、今後これらの量の実験的測定が行われることにより、重イオン衝突全体のダイナミクスの理解が深まることが期待される。

参考文献

- [1] B. Abelev *et al.* [ALICE Collaboration], Phys. Rev. Lett. **110**, 152301 (2013).
- [2] L. Adamczyk, et al. [STAR Collaboration], arXiv:1309.5681 [nucl-ex].
- [3] V. Koch, arXiv:0810.2520 [nucl-th].
- [4] M. Asakawa, S. Ejiri, and M. Kitazawa, Phys. Rev. Lett. **103**, 262301 (2009).
- [5] S. Mukherjee and M. Wagner, arXiv:1307.6255 [nucl-th].
- [6] E. V. Shuryak and M. A. Stephanov, Phys. Rev. C **63**, 064903 (2001).
- [7] M. Kitazawa, M. Asakawa, H. Ono, arXiv:1307.2978 [nucl-th].
- [8] L.D. Landau and E.M. Lifshitz, *Statistical Physics: Part 2*, (Pergamon, Oxford, 1980).