

強い相互作用の相図の探索 ——クォークグルーオンプラズマの発見

浅川 正之 (大阪大学大学院理学研究科 yuki@phys.sci.osaka-u.ac.jp)

はじめに

強い相互作用は自然界に存在する4つの相互作用の1つであり、その名の通り、4つのうちで最も強いものである。陽子や中性子、パイ中間子などのハドロンは強い相互作用をする。原子核を構成する相互作用も基本的には強い相互作用である。この強い相互作用の高温・高密度における相構造の(主に平成における)解明の飛跡が本論のテーマである。

ゼロバリオン化学ポテンシャルでの期待

我々が経験する限り、強い相互作用の基礎理論である量子色力学における基本粒子であるクォークやグルーオンは単独では観測されない。厳密な証明はないが、我々の住む世界である、ゼロ温度・ゼロ密度(バリオン化学ポテンシャルがゼロという意味、クォーク化学ポテンシャルがゼロと言っても同じ)近傍ではクォークやグルーオンはハドロン中に閉じ込められていると考えられている。量子色力学において相互作用定数は近距離では小さくなるという漸近自由性の理論的発見の直後、高温や高密度の世界ではクォークやグルーオンは閉じ込めから解放されて、クォークやグルーオンがほぼ自由に振る舞うスープのような状態が実現されるという考えが提案された。^{1,2)} この状態をクォークグルーオンプラズマと呼ぶ。簡単なモデル計算によると、ゼロクォーク化学ポテンシャルにおいて相転移温度はおおよそ200 MeV(自然単位系で1 MeVはおおよそ 1.16×10^{10} K)であるとされ、量子色力学の第一原理計算である格子量子色力学による数値計算もこの程度の相転移温度を与え、計算された熱力学量もこの描像を支持するよう思われた。この状態は、分子、原子、原子核、核子と続く物質相の階層において、核子の次に存在する第5の相(通常のプラズマはこの系列から分枝していると考えられる)であり、地球上で実現可能な状態のうち、最も宇宙初期に近い状態である。宇宙初期において、温度がこの程度になるのは宇宙開闢からおおよそ 10^{-5} 秒後である。

実験的探索

このような高温状態を実現するためには、地球上に存在する最も密度が高い物体である原子核を衝突させればよい。このように考えられて、まず世界の数か所で固定標的型の原子核衝突が開始された。実験的にクォークグルーオン

プラズマが生成されても、その状態は 10^{-23} から 10^{-22} 秒程度しか存在せず、実験的に検出されるものの多くはクォークグルーオンプラズマが冷えて逆に相転移してハドロンに戻ってしまった後の状態であるので、ハドロン相にいる物質の何を見たらクォークグルーオンプラズマが生成されたと判断できるかという問題がある。これを解決するために、様々な観測量が提案された。実験的に検出されるものの「多くは」と書いたのは、例えば直接クォークグルーオンプラズマ相から生成される電磁放射も存在するからである。

衝突型加速器 RHIC とパラダイムシフト

衝突型加速器は重心系におけるエネルギーを上げるために有利である。衝突型原子核加速器であるアメリカのブルックヘブン国立研究所のRHIC(Relativistic Heavy Ion Collider)が多くの期待を背負って2000年(平成12年)に稼働を始めた。³⁾ この加速器は金原子核(質量数197)の場合、核子あたり100 GeVまで加速してそれらを正面衝突させることができる。

RHICの成果は華々しいもので、稼働直後から高エネルギー密度状態の生成を窺わせる様々な観測量が得られた。しかし、高温相の物理的状态に対する大きなヒントとなる結果とその解釈は稼働開始から数年後にもたらされた。この過程では楕円型フローという概念が大きな役割を果たした。原子核衝突ではいつも正面衝突が起きる訳ではない。有限の衝突径数を持った衝突も起きる。この場合、衝突する原子核の重なりは衝突軸方向から見ると中心のずれた円の重なり(衝突原子核は球形核とする)である。衝突直後に例えば衝突点で衝突軸に垂直な面で生成された系を切断して見たとすると、短軸方向(衝突径数ベクトル方向)の圧力勾配は長軸方向(衝突径数ベクトルと衝突軸に垂直な方向)のそれよりも大きいので、短軸方向に生成される流れは長軸方向に生成されるそれよりも大きいと予想される。こうして、非等方な流れの存在が予想されるが、非等方な流れ自体は観測されない。衝突軸に垂直な面における方位角に関する生成粒子の非等方性に反映されていると考える。あるイベントにおける粒子の方位角 ϕ 分布を

$$\frac{dN}{d\phi} = N_0(1 + 2v_1 \cos(\phi - \phi_1) + 2v_2 \cos 2(\phi - \phi_2) + \dots)$$

と書いたとき、 v_2 を楕円型フローと呼ぶ。 N_0 や v_1 、 v_2 などは粒子種に依存する。また、重心系で見て前方、後方、真

横方向などの依存性もあるが、本稿では真横方向 (central rapidity と言う) を見ているとして、特に明示しない。この場合、 v_1 は通常非常に小さいので以後の議論では無視する。

v_2 を含め、一般に高エネルギー原子核衝突において、流れは主に圧力勾配が大きい反応初期に生成され、以後の時間発展においてもその情報は保持される。反応初期の時間発展のモデルとして、格子色力学で得られるような状態方程式 (温度と圧力、エネルギー密度の関係) を用いた流体計算を行ったところ、 v_2 の粒子種依存性、横方向 (衝突軸に垂直な方向) 運動量依存性が非常によく再現されることが判明した。⁴⁾ ここで言う流体計算とは古典流体力学による計算であり、初期には、ずれ粘性 η および体積粘性 ζ はゼロという完全流体計算が行われた。もちろん、当初の流体計算の位置付けは定量的な理解を得る手段であったので、この完全流体計算とのよい一致は驚きをもって迎えられた。さらに重要なことは、ずれ粘性が小さいということは平均自由行程が小さいということ、つまりクォークとグルーオンが弱く相互作用している系という期待とは真逆の物質が実現していたということである。粘性を取り入れた計算が行われて、RHIC で生成された系の η/s (ここで s はエントロピー密度) は $O(1/4\pi)$ であり、AdS/CFT 対応から予想される最小値 (量子色力学は共形対称性を持たないにもかかわらず) に非常に近い値であることが判明した。しかし、これだけではこの生成された物質がクォークグルーオンプラズマであるという証拠にはならない。

v_2 の横方向運動量依存性をさらに詳細に見ていくと、興味深い傾向が見て取れた。クォーク模型でクォークと反クォークからなるメソンと (反) クォーク 3 個からなるバリオンとで横方向運動量依存性が違うのである。この違いは、(反) クォークが一旦閉じ込めから解放された後、再び結合してメソンやバリオンを生成したことによると解釈することができる。実際、この再結合時におけるクォークの横方向運動量と v_2 の関係を 1 つ仮定するだけで、メソンとバリオンの横方向運動量と v_2 の関係がともによく再現されることが判明した。⁵⁾ 核子と ϕ 粒子はともに同程度の質量を持つが、核子はバリオンであり ϕ 粒子はメソンである。そして、核子はバリオンのラインに載り、 ϕ 粒子はメソンのラインに載ることが確かめられた。細部ではさらに精密な議論が必要であるが、ここにクォークが閉じ込めから解放されてバラバラになった状態が実現したことが確かなものとなった。期待された自由ガスに近い状態とは全く異なっていたが、クォークとグルーオンが超高温で解放された状態、クォークグルーオンプラズマは生成されたのである。

強い相互作用をする系の相図の理解に向けて

RHIC が稼働を開始するすぐ前の頃、量子色力学の相図に臨界点が存在し、その存在が実験的に確認できる可能性があることが指摘され、大きな反響を呼んだ。格子量子色力学

によると、有限温度ゼロクォーク化学ポテンシャルにおいては、ハドロン相からクォークグルーオンプラズマ相への相転移は特異性を持たないクロスオーバーであるとされている。その (擬) 転移温度の最新の値はほぼ 155 MeV である。ゼロから有限化学ポテンシャル (有限密度) に移行するに従って、相転移の次数がクロスオーバーから臨界点 (2 次) を経て、1 次に変化するということである。実は、この描像は有効模型を用いてそのおよそ 10 年前に提案されていた。⁶⁾ この論文の投稿は昭和 63 年、出版は平成元年であり、相構造の探索という平成の飛跡を象徴するものといえるだろう。臨界点が実際に存在するのか、存在するとすればその位置は、という問題に第一原理的に答えることは、有限化学ポテンシャルにおける量子格子色力学には符号問題という原理的困難があるために、現在のところできていない。一方実験的には、臨界点は相図上のランドマークとも呼ばれて、多くの探索の試みが行われている。原子核の衝突エネルギーを変えることによって、系が相図上で辿る軌跡を変え、その軌跡が臨界点近傍を通過したらそのシグナルが見えるであろうという訳である。一般に、衝突エネルギーを低くすると、生成される系の温度は低くなり化学ポテンシャルは大きくなる。しかし私見では、このシグナルに対する理論的実験的アプローチにはまだまだ多くの錯誤が存在し、科学的な結論を下すには時期尚早と考えられる。

極めて密度が大きく温度が低い状態については、FAIR (ドイツ)、NICA (ロシア)、J-PARC (日本) などで計画されている比較的低エネルギーにおける原子核衝突に加えて、最近になって中性子星の合体が重力波によって観測されるようになり、この領域の相図・物理量の理解にも手が届くようになりつつある。低温・高密度の極限領域にはカラー超伝導相という通常の超伝導の量子色力学 (非可換ゲージ理論) 版の存在が確実視されている。

おわりに

平成が終わり、強く相互作用している系の研究も、相の探索の段階から相の微視的物理の研究の段階へと移行することであろう。最後に、この解説では紙面の制約から、実験と理論が交錯する現場の風景を非常に単純化した描像にまとめたことをお断りしたい。

参考文献

- 1) J. C. Collins and M. J. Perry, Phys. Rev. Lett. **34**, 1353 (1975).
- 2) N. Cabibbo and G. Parisi, Phys. Lett. B **59**, 67 (1975).
- 3) RHIC における金原子核の衝突のイベントの実例は例えば <https://www.star.bnl.gov/public/imagelib/collisions2001/>
- 4) S. S. Adler et al. [PHENIX Collaboration], Phys. Rev. Lett. **91**, 182301 (2003).
- 5) J. Adams et al. [STAR Collaboration], Phys. Rev. Lett. **92**, 052302 (2004).
- 6) M. Asakawa and K. Yazaki, Nucl. Phys. A **504**, 668 (1989).

(2018 年 9 月 14 日原稿受付)