

見えないクォーク・グルーオンを見る

Keyword: クォーク・グルーオン・プラズマ

1. 観測できない“粒子”

もしも素励起ではなく複合状態や集団運動モードしか観測できない“粒子”があったら、それは最早、通常の意味での(準)粒子ではない。強い相互作用の基礎理論であるQCDの主役、クォークとグルーオンはそのような特殊な素粒子だが、高エネルギーQCDでのパートン(粒子的なクォーク・グルーオンの総称)描像の成立によって、直接観測できないにもかかわらず“粒子”と見做される。QCDの真空状態は、特殊な媒質の基底状態のようなものであり、温度の上昇とともにクォークの有効質量やグルーオン交換力の遮蔽長などが変化する。そして遂には、複合状態であるハドロンから、パートンへと物理的自由度が転移するだろう。この超高温パートン物質が、クォーク・グルーオン・プラズマ(以下、QGPと略記)である。

クォークとグルーオンは直接観測できないので、QGPを厳密に定義することは難しい。換言すると、ハドロンの熱平衡状態とQGPとは滑らかなクロスオーバーで繋がっていて、これらを曖昧さなく区別できる秩序変数は存在しない。従ってQGPの実験的シグナルにも決定的なものはなく、「熱平衡的」でしかも「パートンの」な性質を示唆する様々な物理量の合わせ技で、対象の物性に肉薄していくしかない。本稿の目的は、今日ほとんどのQCD研究者が、QGPが生成されたと信じている根拠について解説することである。

2. 相対論的重イオン衝突実験

QGPクロスオーバーには大体2兆度程度の温度が必要となる。超新星爆発でも届かない、ビッグバン直後の初期宇宙でやっと実現している途方も無い超高温を実現する手段が、相対論的重イオン衝突実験である。我々の身の回りで最も高いエネルギー密度を持っているのは原子核であり、QGP転移に要求されるエネルギー密度は、原子核のエネルギー密度の5倍程度であることが知られている。なるべく安定で重い原子核(つまり重イオン:金あるいは鉛が多く用いられる)を加速して高エネルギーで衝突させれば、QGP生成に必要なエネルギー密度を達成できるだろう。実際、このようなアイデアのもと、20余年に亘って様々な加速器施設(Bevalac, AGS, SPS, RHIC, LHC)が建設・アップグレードされてきた。例えばRHICの衝突エネルギーは重イオンの静止エネルギーの百倍、LHCでは千倍以上にも達する。

ここで「QGP生成」を理解するための重要なポイントを2つ挙げる。まず“温度”というからには熱平衡を仮定している。つまり単独の高エネルギーパートン散乱では不十

分で、エネルギーが多数のパートンに分配される必要がある。次に、熱化したときの物理的自由度がパートンのであることを確認せねばならない。以下で、これらのポイントを順番に見ていくことにしよう。

3. 熱平衡を巡って

熱平衡については専門家でも意見の分かれるところだが、ここは深入りせず、標準的な解釈を簡単に述べるにとどめる。

(1) 楕円型フロー:丸い原子核・原子核が中心軸からずれて衝突し熱平衡に達すると、衝突部分の配位は丸くなく、両手で挟んで押さえたように(アーモンド型に)歪んでいる。両手をパッと離して、押さえられていた方向に勢いよく膨張する様子を想像すれば分かるように、粒子数の運動量・角度分布に、初期配位を反映したパターンが観測される。このパターンを定量化した物理量を“楕円型フロー”と呼び、RHICやLHCでの計測値は流体方程式を用いた理論計算とよく合っている。流体計算の成功が熱平衡(あるいは各点で“温度”を定義できる局所熱平衡)の証拠だと言われてきたが、ここ数年で状況が大きく変わり「熱化(thermalization)」と「流体化(hydrionization)」という概念が、はっきり区別されるようになってきた。温度を定義するためには粒子の運動量分布というマイクロな情報が必要だが、圧力や内部エネルギー密度等の熱力学関数は、必ずしも熱分布を前提としない。流体方程式自体は、連続の方程式(保存則)であり、熱力学関数が十分に滑らかならばよく、一般には熱化より先に流体化する。もちろんこれは物性や宇宙論で言われる「初期熱化(prethermalization)」と同じ問題であり、近年、QGP物理の守備範囲はますます学際的に広がっている。

(2) 生成粒子数比:QGPは膨張して冷えていく。熱化学平衡を保ったままハドロン気体に転化したとしよう。ハドロン数分布が質量と温度・化学ポテンシャルで決まっているのが化学平衡の意味するところである。そしてある温度(化学凍結点)で突然、化学凍結流になったとする。化学反応系の流体における、いわゆる第1ダムケラー数(反応率と輸送率の比)が急速に小さくなる状況に相当する。このような考えに従って重イオン衝突実験で観測される生成粒子数を解析(もちろん崩壊による増減も考慮)すると、10種類以上の独立な粒子数比が、化学凍結点における温度と化学ポテンシャルという2つのパラメーターだけで見事にフィットできてしまう。ということは化学凍結点よりも高温で熱平衡に達していたはずである。さらに面白いこと

に熱的フィットから決められた化学凍結温度はQGPクロスオーバー温度に近く、様々な衝突エネルギーの化学凍結点を結んでQCD相図を探索しようという実験的試みもなされている。しかし問題点がないわけではない。QGP生成とは無関係なはずの e^+e^- 散乱でも、同様の熱的フィットがある程度うまくいくのである。¹⁾ 熱的フィットの正しい物理解釈については、より基礎的な理論研究が必要となる。

4. パートンはどこに

パートンの問題は熱平衡よりも誤解を生みやすいが、よく採り上げられる論拠に絞って、ここに手短かに紹介しよう。

(1) ジェット抑制：高エネルギーのクォークと反クォークの対生成が起きると、お互いに反対向きにジェットの対が観測される。ジェットがQGP中を通過すると輻射・散乱によりエネルギーを失い抑制される。2つのジェットの角度相関測定によって、対の相手となるジェット抑制が実験的に確認され、QGP生成の強い証拠の1つに数えられている。本当は、ハドロン物質とQGPのそれぞれに対して信頼できる計算があって、QGP中でのエネルギー損失率が実験とピッタリ合うことを確かめねばならないが、パートンのQCD計算にも仮定の違いで様々なバージョンが混在しており、強い結論を下せるほどには理論が固まっていないのが現状である。

(2) 粘性係数：流体計算の成功については既に述べた。放物型微分方程式と相対論的因果律との不整合など、様々な問題があって、当初は流体計算に粘性項が入っていなかった。にもかかわらず実験データを再現できたということは、QGPの粘性（正しくはエントロピー密度で割った無次元の粘性比）が無視できるほど小さいことを示唆する。ハドロン相で小さな粘性を説明することは難しいが、実はパートンの描像とも相性が悪い。（ずれ）粘性は、流速の違う離れた2点がどれだけお互いに影響を与えられるかを定量化した輸送係数で測られる。弱結合のパートンは平均自由行程が大きく、遠くまで影響を及ぼすことができる。つまり弱（強）結合の気体は大きな（小さな）粘性を持っていることになる。実際、AdS/CFT対応によってQCDに似たある種のゲージ理論の強結合極限を調べると、粘性係数が不確定性原理から許される最低値をとることが知られている。²⁾ 小さな粘性はハドロン相でも弱結合パートンでも説明がつかず、非摂動的なパートン物質だろうという意味で「強相関QGP」という不思議な言葉が生み出されるに至った。

(3) クォーク数スケーリング：楕円型フローは、横運動量 p_T （あるいは横運動エネルギー）の関数として粒子数の角度分布を定量化して定義する。構成子クォーク2つ（い

ま反クォークも1つと数える）から成るメソンのフローと、構成子クォーク3つから成るバリオンのフローの振る舞いの違いは、フローしている実体がパートンだと考えると、うまく説明できる。一般に n_q 個の構成子クォークからなるハドロンを1つ組むとき、クォーク1つあたりの平均運動量は p_T/n_q となる。またハドロンの楕円型フローは、クォークのそれぞれの n_q 倍となる。というのも、たくさんクォークのいる角度方向ではハドロンを組みやすくなるから、ハドロンで見たときの角度分布の偏りの方が大きいのである。従って、楕円型フローを n_q で割ったものを p_T/n_q の関数として見ると、メソンもバリオンも全く同じ振る舞いを示すはずである。そして実際、そのような n_q スケーリングが実験的に確認された。これは確実な証拠のようだが、RHICで綺麗に見えていたスケーリングがLHCでは少し破れている等、なかなか一筋縄ではいかない。クォークからハドロンへと転化するプロセス（ハドロン化）をQCDから理解することは非常に難しく、 n_q スケーリングは“パートン描像に根差したハドロン化モデル”の正当性は示唆しているが、パートン物質生成の証拠としては慎重な考察が必要である。

5. 精密科学へ

以上、見てきたように、これが決定打と言えるようなQGPの証拠は1つもないし、それぞれを細かく見ていくと疑問点も残る。しかし全てを同時に解釈しようとする、ハドロン物質だと考えるよりも、QGPだと考える方が遙かに自然である。この「自然な」という物理学の指導原理を認めれば、見えないクォーク・グルーオンを見た、という結論にも説得力があると言えるのではないだろうか。

本稿では「グルーオン飽和」や「磁場とトポロジー」等、重要な話題を割愛した。QGP生成の“発見の時代”から今や“精密科学の時代”へと移り変わり、QGP物性物理は円熟の極みを迎えている。詳しくはレビュー³⁾を参照されたい。

参考文献

- 1) A. Andronic, *et al.*: Phys. Lett. B **675** (2009) 312.
- 2) G. Policastro, D. T. Son and A. O. Starinets: Phys. Rev. Lett. **87** (2001) 081601.
- 3) 相対論的重イオン衝突全般についてはC. Nonaka and M. Asakawa: Prog. Theor. Exp. Phys. **2012** (2012) 01A208; 流体計算についてはT. Hirano, P. Huovinen, K. Murase and Y. Nara: Prog. Part. Nucl. Phys. **70** (2013) 108; QCD相転移についてはK. Fukushima and C. Sasaki: Prog. Part. Nucl. Phys. **72** (2013) 99; グルーオン飽和と熱化についてはF. Gelis: Int. J. Mod. Phys. A **28** (2013) 1330001; 磁場とトポロジーについてはK. Fukushima: Lect. Notes Phys. **871** (2013) 241.

福嶋健二（東京大学大学院理学系研究科）

（2014年7月8日原稿受付）