

■ 研究紹介

超相対論的重イオン衝突加速器を用いた クォーク・グルーオン・プラズマ探索研究

筑波大学物理学系

江角 晋一

esumi@sakura.cc.tsukuba.ac.jp

2003年10月14日

1. はじめに

数年前、スイスの CERN（欧州原子核共同研究機構）にある SPS 加速器を用いた高エネルギー衝突実験によって、クォーク・グルーオン・プラズマ（QGP）の生成が報告された。SPS（重心系核子対当たり 20GeV の鉛原子核同士の衝突）における様々な実験からの結果を統一的に説明するためには、この QGP が発生したと考える方が自然であるとの見方が強かった。逆から言えば、すべての実験結果を同時に矛盾なく QGP を用いずに説明できるような理論モデルがないということである。以下に SPS における QGP 生成の有力証拠を挙げる。

- 1) J/ψ 粒子の抑制
- 2) 低質量電子対の増量
- 3) 直接単光子の増量
- 4) s クォークを含む粒子の増量
- 5) 粒子生成量に見る化学平衡
- 6) 粒子分布に見る熱平衡と膨張

またあの時期に、SPS での実験グループが QGP 生成を公表することになったもう一つの理由は、その年から始まることになっていた、アメリカでのさらに高いエネルギーでの実験である。これは、アメリカの BNL（ブルックヘブン国立研究所）にある RHIC（超相対論的重イオン加速器、重心系核子対当たり 200GeV の金原子核同士の衝突）を用いた高エネルギー重イオン衝突である。ここでは、RHIC の実験でこれまでに何が分かったかを紹介する。

2. RHIC 実験でのハドロン抑制

RHIC 加速器を用いてこれまでに以下の衝突実験が行われた。以下のエネルギーは重心系核子対当たりの値である。

- A) 130GeV 金+金
- B) 200GeV 金+金
- C) 200GeV 重陽子+金
- D) 200GeV 陽子+陽子

RHIC の高エネルギー重イオン衝突において、ハドロン生成量や運動量分布などの比較的測定の容易な観測量（SPS での結果 5）と 6）など）においては、図 1 に示すように、SPS エネルギーでの測定の延長線上にあり、化学平衡および熱平衡の温度は飽和し、 u 、 d クォークの化学ポテンシャルはさらに 0 に近づき、反応領域の膨張はさらに顕著になる傾向が確認された。

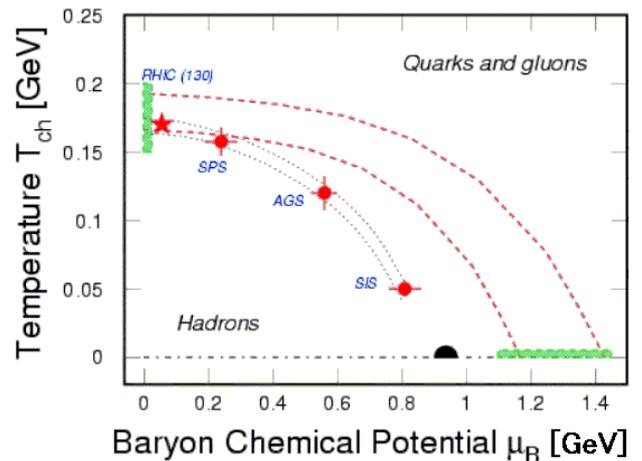


図 1：化学平衡温度と化学ポテンシャル

SPS のハドロン生成と大きく違う点は、高横運動量領域のハドロン収量にあった。図 2 に示したのは金+金衝突におけるハドロン収量（白抜き）を横運動量の関数で表示し、かつ同じエネルギーでの陽子+陽子衝突における収量に、金+金衝突中で予測される核子+核子衝突数をかけた量で規格化している。SPS のエネルギーでは、この陽子+陽子衝突で規格化したハドロン収量は、高横運動量で 1 を十分超えていた（2 に近い）のに対して、RHIC のエネルギーでは、1 を超えないだけでなく、1 の 1/4~1/5 程度に小さくなっていることが分かった。これは、初期の散乱で生成されたパートンが QGP を進む過程でエネルギーを失うことによって説明されている。つまりこれは、QGP 生成を示唆する一つの観測量に加えられた。

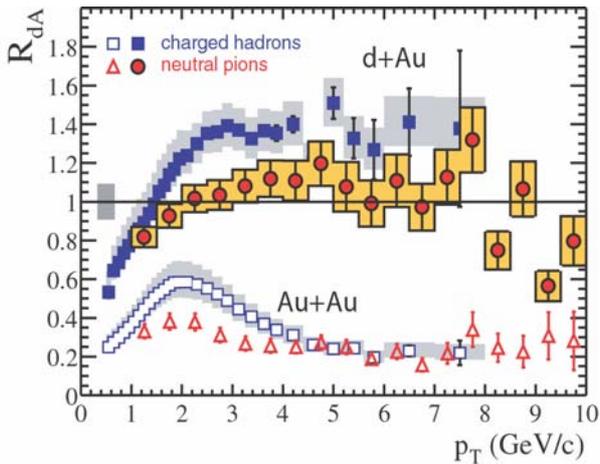


図 2: R_{AA} と R_{dA} の比較

この結果が、初期の多重散乱などによって (QGP とは無関係に) 起こっているのではないことを確認するために、RHIC が次に選んだ衝突系が、同じエネルギーでの重陽子+金衝突である。この衝突では高横運動量のハドロン収量の抑制は起こらず、多少増加する傾向 (クローニン効果として知られている) が確認された (図 2 の上部のデータ)。これによって、金+金衝突で起こっているハドロン抑制は衝突初期に起こっているのではなく、(QGP との相互作用などによって) 衝突後期に起きていると考えられるようになった。

3. 楕円放射とクォーク描像

原子核衝突における特徴的な観測量として反応平面に対する粒子生成の方位角異方性がある。非中心衝突の時のみ定義できる反応平面とは、ビーム粒子の方向と、原子核同士が衝突時最も近づいたときの原子核中心間を結ぶ線によって張られる平面のことを指す。この平面に対して、すれ違った原子核が重なり合う反応領域 (衝突関与部) は縦長のアーモンド型になる。この高エネルギー領域では、多くの粒子はこの反応領域をビーム軸方向から見たとき、そのアーモンド型の短軸方向に多く放出される。アーモンド領域に押し込められた物質が、短軸方向の圧力勾配が大きく、その方向に膨張しやすく、粒子放出もこれに従うという、流体力学的な振る舞いとして理解できる。

図 3 に示したのは、楕円の方位角異方性パラメータ v_2 を運動量の関数にしたもので、三種類の識別されたハドロンに対して表されている。左下図の、低い運動量領域 ($2\text{GeV}/c$ 以下、これが全体の 9 割を超える) では、上で述べた流体的な描像で実験結果がうまく説明できたのとは対照的に、高い運動量領域では、うまく説明できていない。この領域は、初期の散乱などによって作られるジェット生成が主要な領域であり、かつ前章で述べたハドロン抑制が始まる

領域でもある。初期散乱によって作られるパートンは、反応平面とは無関係に作られるが、アーモンド型をした反応領域との相互作用によってエネルギーを失うので、作られるジェットの量が結果的に反応平面と相関を持つことが高い運動領域の v_2 が 0 にならない理由でもある。

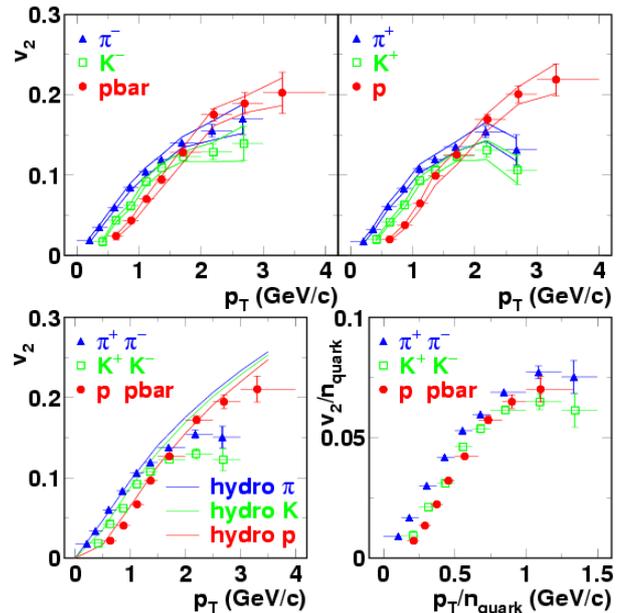


図 3: v_2 の粒子種依存性

図 3 の右下図に示したのは、粒子毎に異なる v_2 はクォークの数によって決まっていると仮定して、つまりクォークのコアレスセンス描像が成り立っているとして、縦横軸をクォーク数で規格化したものである。完全に一致しているわけではないが、クォークの v_2 が決まっていれば、それらの組み合わせで、ハドロン v_2 が決まっているということは、ハドロン化する前がクォーク相であったことを示唆する実験事実である。

4. おわりに

RHIC における高エネルギー重イオン衝突実験によって、上に述べたことを中心に SPS エネルギーでは見つからなかった新たな発見があった。それらは、共に RHIC のエネルギーでの金+金衝突において QGP が生成されていることを支持する結果である。しかしながら一方で、SPS での結果 1)、2)、3) などの RHIC エネルギーでの確認は、統計量および精度の面でまだ完全な比較が行われていない。この冬に予定されている高統計の 200GeV 金+金衝突実験および、それ以降の実験により詳しく確認されることが期待される。