

# 論文審査の結果の要旨

氏名：橋保貴

本論文は英文で書かれ、本文6章 (section) と補章2 (appendix) から構成されている。第1章は序論で、この研究の動機となる実験的背景と理論的問題の設定、それに対するこの論文で展開する新しいアプローチの概観、そして論文の構成と残りの各章の簡単な要約が述べられている。第2章では本研究の背景として、高エネルギー原子核衝突とその時空発展のダイナミクスの流体模型による記述、その初期条件を設定する幾何学的模型、この研究で注目するジェット・クエンチングのメカニズムについて、これまでの研究成果がまとめられ、本研究の目標設定が最後に述べられている。第3章は、本研究でおこなう流体模型にジェット現象を融合する拡張を行っている。ジェット先端粒子 (高エネルギー・パートン) は流体中を通過する際、流体にエネルギー・運動量を明け渡して自己のエネルギーを減衰するが、流体へのエネルギー・運動量ソース項を高温プラズマ中のエネルギー損失の公式を使って現象論的に構成している。また流体計算に必要な、初期条件の設定の仕方と、流体が自由粒子の集団に崩壊する際の凍結条件の設定について述べられている。第4章と第5章は本研究のオリジナルな研究成果で、ジェットが膨張するプラズマ流体の中を通過する際に現れる、変形したマッハコーンのパターンが詳細に数値シミュレーションで示され、ジェットのもともと持っていたエネルギーがプラズマ流体へ放出され、それが低運動量の粒子生成に変わることが示されている。第5章はこの計算結果を、実際の実験結果と比較するため、さまざまな不可避なバイアスによる統計平均を行っている。最終章は、この研究のまとめと、残された研究課題について述べられ、最後の2つの補章で、計算に用いられた非デカルト座標系と、数値計算のアルゴリズムについて補足説明している。

序論で述べられているように、最近の CERN (欧州原子核研究機構) での LHC (Large Hadron Collider) を用いた超高エネルギーの原子核 (鉛・鉛) 衝突実験で、ジェット・クエンチングとよばれる現象が観測され、注目を集めている。ジェットというのは、陽子・陽子衝突のような高エネルギーの反応でよく現れる現象で、高エネルギー陽子を構成するパートン (クォークやグルーオン) が大角度に散乱されて、そのハドロン化によって反対方向にハドロンの集団 (ジェット) が現れる現象である。通常は、2つの反対方向に現れるハドロン・ジェットは横運動量がバランスしているが、重イオン衝突でパートン散乱が周辺で起こったときは、一方のパートン粒子は反応によって生成されたクォーク・グルーオンプラズマの中を相棒のパートンに比べ長く走るため、プラズマ中でよりエネルギーを奪われ、2つのジェットのエネルギー・運動量のバランスが崩れることが予想される。これが、「ジェット・クエンチング」と呼ばれる現象で、米ブルックヘブン国立研究所の RHIC の実験で初めて観測され、LHC の実験でも更にはっきりと確認されている。

このジェット運動量のアンバランスからクォーク・グルーオンプラズマの阻止能にたいする情報が得られる。また、最近の CMS 共同実験の発表した実験データでは、ジェットの失ったエネルギーが、たくさんの終状態低エネルギー粒子に配分されていることが示されており、阻止能だけでなく、プラズマ中のエネルギー輸送のメカニズムにも注目が集まりつつある。本来、この2つの問題は密接に関係しているものと思われるが、本研究では、流体模型という枠組みの中で、前者の問題については現象論的な取り扱いを行い、後者の問題について「強結合」の流体描像でどこまで説明が可能か調べた。

流体模型は、原子核衝突によるハドロンの異方的集団流の生成の説明に成功し、その有効性が広く認められるようになった。この研究ではその成果の上に立って、更にジェットが膨張する流体の中でどのような集団流パターンを生み出すか、数値シミュレーションによって詳細な分析を行っている。流体が膨張していない場合は、流体中を通過する物体はその速さが音速を超えるとマッハコーンと呼ばれる衝撃波が形成されることが知られている。この衝撃波は、物体の持っていたエネルギーを大角度の流体流のエネルギーに変換することが期待される。

本研究によると、原子核衝突で生成されたプラズマ流体の横方向の膨張によって、プラズマ中を伝わるマッハコーンは歪められ、マッハコーン上の流速分布は滑らかになる。また先端粒子の後からも、先端粒子を追いかける流れが現れることを著者は数値計算によって示した。これらの効果に加えて、流体が自由粒子群に崩壊する際、粒子の速度分布の熱的揺らぎによって粒子速度分布は広がり、結果的にプラズマに放出されたエネルギーは粒子エネルギーとして大角度に一樣に分散することを著者は示した。その結果、適当に模型のパラメータを選ぶと、CMS の実験結果をほぼ再現できることを示した。

この流体計算に用いられた状態方程式はクォーク・グルーオンプラズマの理想気体の状態方程式を用いており、それを凍結面を通して粒子の運動量分布に変換しているが、まだハドロ化の効果（自由度の1桁の減少）が入っていないため、流体の膨張の効果は十分取り込まれているとはいえない。状態方程式にハドロ化の効果や、流体の粘性等の非平衡過程の効果を入れることは、今後の重要な課題として残されている。著者はこのことを十分認識しており、今後のこの方向での研究の発展が大いに期待される。

このように、著者は、高エネルギー原子核衝突の流体模型によって、ジェット・クエンチングに伴うジェットのエネルギーの流体中の輸送を数値シミュレーションで詳細に記述し、最近の実験結果を半定量的に再現することに成功している。

この論文は現在上智大学の平野哲文教授との共同研究に基づいているが、本人の寄与が十分あり、博士号を授与するのに十分な内容であると審査員一同で判定した。