学位論文要旨

Energy Loss of Charm and Bottom Quarks in Quark-Gluon Plasma
Created in Au+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}}$ = 200 GeV

($\sqrt{s_{NN}}$ = 200 GeV Au+Au 衝突で生成されるクォーク・グルーオン・プラズマ中
におけるチャーム/ボトムクォークのエネルギー損失)

永嶋　和也

【研究背景】

真空の構造は、ビックバン以降の膨張に伴う温度低下とともに幾度の相転移を繰り返して現在の姿となった。この宇宙の歴史の中で、物質の構造や力が変化して、素粒子であるクォークやグルーオンがハドロンの内部に閉じ込められた。人類は遥か昔から物質の構造や力の根源を探求してきたが、これは宇宙の歴史を遡ることと同義である。超伝導加速器を用いた高エネルギー重イオン衝突実験によって、ビックバンから 10^{-5} 秒以内に存在した超高温物質状態を再現することが可能である。この超高温の初期宇宙状態は、クォーク・グルーオン・プラズマと呼ばれており、クォークやグルーオンがハドロン内の閉じ込めから解放されたプラズマ状態である。クォーク・グルーオン・プラズマは、現在の物質世界とはその構造が異なっている。つまりクォーク・グルーオン・プラズマを研究することは、物質の構造の根源を研究することと同義である。

量子色力学が完成し、強い相互作用の漸近的自由性が発見された後にクォーク・グルーオン・プラズマの存在が予言され始めた。当時は、強い相互作用の持つ漸近的自由性によって、超高温におけるクォーク間の結合が弱くなることで、クォークがハドロン内の閉じ込めから開放されて、自由ガスのように振る舞うプラズマ状態になると考えられていた。しかし 2000 年から始まった米国ブルックヘブン国立研究所の Relativistic Heavy Ion Collider(RHIC)による高エネルギー重イオン衝突実験による研究により、クォーク・グルーオン・プラズマは比粘性(剪断粘性とエントロピー密度の比)が非常に小さい強結合物質、つまりほぼ完全流体であることが発見された。これは漸近的自由性を考慮した二体散乱の拡張では予想できなかった量子色力学の創発現象が発見されたことを意味する。クォーク・グルーオン・プラズマの研究は、クォーク閉じ込め機構のみならずクォーク/グルーオン物質の強結合性という量子色力学の基礎的な疑問に答える。

【研究目的】

本研究では、RHIC を用いた高エネルギー重イオン(Au+Au)衝突実験 PHENIX によりクォーク・グルーオン・プラズマを実験室内に再現して、重クォーク(チャーム/ボトムクォーク)をプローブとしてその性質を研究する。重クォークは、大質量故に重イオン衝突の初期散乱で生成され、クォーク・グルーオン・プラズマの全時間発展をプローブすることができる。重クォークがクォーク・グルーオン・プラズマを伝搬する際に強い

相互作用によりエネルギーを損失して、運動量分布が変化する。重クォークの初期生成時と終状態の運動量分布の違いがクォーク・グルーオン・プラズマのダイナミクスを強く反映する。また重クォークは、生成過程が初期散乱に限定されるので、クォーク・グルーオン・プラズマの生成されない p+p 衝突により初期生成時の運動量分布を推定することが可能である。つまり Au+Au 衝突実験と p + p 衝突実験における重クォークの運動量分布の違いからクォーク・グルーオン・プラズマ中での重クォークのエネルギー損失量を測定することが可能となる。エネルギー損失量は、媒質の結合の強さと比例関係にあるために、間接的にクォーク・グルーオン・プラズマの結合の強さを測定することができる。

エネルギー損失量からクォーク・グルーオン・プラズマの結合の強さを測定するためには、実験値と理論モデルの比較が必要となる。しかしクォーク・グルーオン・プラズマ中でのクォークエネルギー損失機構は、未だに十分解明されていない。特にエネルギー損失機構のクォーク質量依存性が未解明である。そこで本研究では、検証が不十分なチャーム/ボトムクォークのエネルギー損失量を測定して、その質量依存性を検証する。

【実験結果】

Au+Au 衝突実験と p+p 衝突実験におけるチャーム/ボトムハドロンの運動量分布を比較することで、クォーク・グルーオン・プラズマ中での運動量損失量を導出した(図.1)。十分に高横運動量の領域では、チャーム/ボトムハドロンの運動量損失率はチャーム/ボトムクォークのエネルギー損失率と同義である。本研究の結果、チャーム(ボトム)クォークは、25% (20%)もの運動量を損失していることが分かった。これはクォーク・グルーオン・プラズマが高密度で強結合な媒質であることを示している。また系統的測定によりボトムクォークの方がチャームクォークよりエネルギー損失率が小さいことが分かった。つまりクォーク・グルーオン・プラズマ中のエネルギー損失にクォーク質量依存性があることを明らかにした。

【結論】

クォーク・グルーオン・プラズマ中におけるチャーム/ボトムクォークのエネルギー損失量を測定して、エネルギー損失機構のクォーク質量依存性を明らかにした。本研究によりエネルギー損失機構に大きな知見を与えた。今後の展開として、本研究結果をもとに発展した理論モデルによる理論計算値と実験値の比較によってクォーク・グルーオン・プラズマの比粘性(∝ 結合の強さ$^{-1}$)を高精度で決定する。

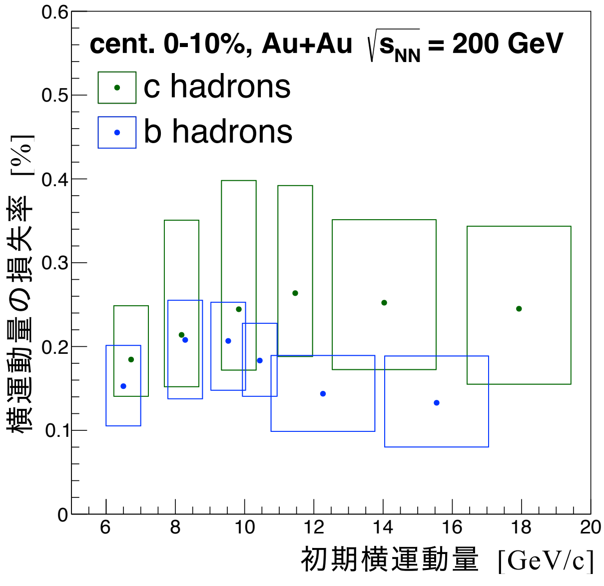

図.1 チャーム/ボトムハドロンの運動量損失率