

1920-59

早稲田大学大学院理工学研究科

博士論文概要

論文題目

相対論的流体模型に基づく高エネルギー
重イオン非中心衝突反応の研究
(Hydrodynamical analysis of non-central
heavy-ion collisions at relativistic energies)

申請者

平野 哲文

Tetsufumi Hirano

物理学及应用物理学専攻 素粒子理論研究

2000年 12月

現在の素粒子物理学では、強い相互作用をするクォークやグルーオンの振る舞いは量子色力学 (Quantum ChromoDynamics 略して QCD) と呼ばれる SU(3) 非可換ゲージ理論によって記述される。電弱相互作用を記述するワインバーグ・サラム理論と併せて、QCD は今日の素粒子物理学の標準模型を形成している。この標準模型の一角を担う QCD は「カラーの閉じ込め」、「漸近的自由性」という二つの特徴的な性質を持っている。低エネルギーではカラーの自由度を持つクォークやグルーオンはカラー三重項の形でハドロンの中に閉じ込められている。一方で、くりこみ群に基づく解析によると、高エネルギー反応における運動量遷移や、温度、密度が大きい状況では、クォークやグルーオンの結合定数が減少する。この二つの「顔」を持った QCD の枠組みから、ハドロン多体系の温度または密度を上げると、漸近的自由性の性質により、カラーの閉じ込めが破れてこのハドロン多体系はクォークとグルーオンの多体系に相転移を起こすと予想されている。この全く新しい物質の相は「クォーク・グルーオン・プラズマ (Quark Gluon Plasma 略して QGP)」と呼ばれている。この物質相は、宇宙初期のビッグバン直後に存在していたと考えられており、また現在では中性子星の中心部分に存在する可能性も指摘されている。一方で、これまでにこのような物質の極限状態を地球上の加速器実験によって作り出そうという多くの試みがなされてきた。この実験は光速近くにまで加速された原子核 (重イオン) を標的原子核に正面衝突させることにより、ほんの一瞬ではあるが、宇宙初期や中性子星内部と同程度の高温度・高密度状態の実現を目指すものである。これまでに、アメリカの BNL (Brookhaven National Laboratory) の AGS (Alternating Gradient Synchrotron) 加速器や、スイスの CERN (European Laboratory for Particle Physics) の SPS (Super Proton Synchrotron) 加速器において、軽い原子核から重い原子核までを加速させ、固定された標的原子核に衝突させる実験が行われてきた。2000年2月には CERN において、QGP が発見されたという発表がなされたが、まだ状況証拠にすぎず、確証を得るためにはさらに衝突エネルギーの高い衝突型加速器である BNL の RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) に期待がかかっている。RHIC は 2000年6月に稼動し始めており、この加速器によって QGP が確実に見つかるであろうと思われる。

本論文では、この高エネルギー重イオン衝突反応において生成される高温・高密度核物質の時空発展の解析を通して、QGP を含む通常の原子核内部とは異なった極限状態における素粒子多体系の物理的性質について議論する。

本論文の構成は以下の通りである。

第1章は序論であり、高エネルギー重イオン非中心衝突反応の概観および本論文の背景について述べられている。

第2章では、高エネルギー重イオン衝突によって生成された高温・高密度核物質の時空発展を記述するための相対論的流体模型について説明する。相対論的流体模型は、連続の方程式を表す相対論的流体方程式と、流体を構成している物質の性質

を表す状態方程式から成る。本研究では状態方程式として、QGP 相とハドロン相の間に強い1次相転移を起こす簡単なモデルを用いた。通常、相転移を含む状態方程式はエネルギー密度と圧力の間の関係にいわゆる軟化現象を起こす。すなわち、相転移近傍ではエネルギー密度やバリオン密度の増大に対して圧力の増大が緩慢になる。このような振る舞いは、高エネルギー重イオン衝突反応において、QGP 相とハドロン相との間に相転移現象が生じている場合には、そのシグナルの有力な候補になると考えられている。高エネルギー重イオン衝突反応によって作られた高温・高密度核物質は膨張し冷却されていくが、この膨張速度 (流速) は圧力勾配によって引き起こされる。従って、相転移が起こると状態方程式の軟化現象を通して膨張が弱められ、流速に関わる物理量を調べることにより、QGP 相-ハドロン相間の相転移の有無、さらには相転移付近の状態方程式の性質を調べることができるだろうと考えられている。

重イオン衝突反応は衝突係数がほとんどゼロの「中心衝突」と有限の衝突係数を持った「非中心衝突」に分けることができる。従来の実験や理論は主に中心衝突反応を解析するものであった。これに対して、Ollitrault(1992) は非中心衝突反応にこそ高温・高密度核物質の状態方程式の情報が含まれていると指摘した。しかしながら、核物質の時空発展を相対論的流体模型に基づいて解析する立場からみると、非中心衝突反応の数値シミュレーションは困難を極める。中心衝突の場合は衝突軸に関する円筒対称性により空間2次元上でシミュレーションを行えばよい。ところが、非中心衝突反応を記述するためには、必然的に空間3次元で時空発展のシミュレーションを行わなければならない。これが数値的解析を困難にしている。本研究ではまずは空間的な対称性や解を単純化するための仮定を一切用いず、完全に空間3次元で高エネルギー重イオン衝突反応を記述できる数値計算プログラムの開発を行った。

第3章では相対論的流体模型に基づき、まずはハドロンの1粒子分布の解析結果を示した。作成したプログラムを用いて、CERN の SPS 加速器で行われる実験、すなわち、鉛の原子核を核子当り 158 GeV に加速し、鉛の原子核標的に衝突させる反応によって生成される高温・高密度核物質の時空発展のシミュレーションを行った。流体模型の初期パラメータのチューニングを行うことにより、様々な衝突係数を持つ事象に対して生成された負電荷を持った π 中間子のラピディティ分布を再現することができた。これは相対論的流体模型を用いて非中心衝突反応のラピディティ分布を再現した最初の解析である。

第4章では第3章の結果を用いて、非中心衝突反応における生成粒子の方位角方向の相関を調べた。規格化された生成粒子の方位角分布をフーリエ級数に展開したときの2番目の係数 v_2 を楕円型フロー (elliptic flow) と呼ぶ。楕円型フローは衝突軸に垂直な平面内における核物質の集団的な流れ (collective flow) の指標となる物理量であり、状態方程式の情報を持っていると考えられている。特に v_2 が正の

場合,核物質の集団的な流れは衝突軸と衝突係数ベクトルを含む散乱平面に平行 (in-plane elliptic flow),逆に v_2 が負であると垂直 (out-of-plane elliptic flow) 方向が優勢と推測される.したがって, v_2 の定量的な評価から,核物質の流体力学的な流れの情報や,更には状態方程式の情報を導出できると期待される. これまでは流体から直接放出された π 中間子についてのみ v_2 の導出計算が行われてきた.しかしながら現実的には, π 中間子のスペクトルには流体から直接放出された共鳴粒子の崩壊からの寄与もある.本論文ではこの寄与に注目し,崩壊現象の相対論的運動学に基づいてその評価を行い,楕円型フロー v_2 に与える影響を調べた.共鳴粒子のスピンの偏極していない場合,共鳴粒子の静止系では崩壊粒子は等方的に放出されるが,その分布は共鳴粒子の速度によって運動学的に変更を受ける.したがって,直観的には崩壊現象は共鳴粒子がもっている集団的な流れの情報を打ち消す効果を生むと予想される.そこで,この効果を典型的な崩壊過程 $\rho \rightarrow \pi\pi$ で,流体素片が2個だけのモデルの場合について確かめた.二つの流体素片を散乱平面内で互いに逆向きの流速を持たせる.これは最も簡単な in-plane elliptic flow のモデルを表す.これまでの常識ではこのような場合の楕円型フロー v_2 は正になるはずであった.しかしながら,共鳴粒子である ρ 中間子自身の v_2 は予想通り正の値で得られたが,その崩壊粒子の π 中間子の v_2 は負の値になった.このことは,崩壊現象が見かけの負の楕円型フローを生むことを意味している.すなわち,これまで実験的に得られた v_2 が正の場合は in-plane elliptic flow が起こっていると推測されてきたが,共鳴粒子の崩壊によって,その推測がもはや必ずしも成り立たないということが分かった.

さらに,すでに π 中間子のラピディティ分布を再現できている, QGP 相とハドロン相の間に相転移を起こす現実的な流体シミュレーションの結果を用いて,この効果の定量的な評価を行った. v_2 のラピディティ依存性を求めてみると,直接放出された π 中間子のみの場合には実験データを過大評価してしまう結果が得られた.そこで共鳴粒子からの崩壊の寄与を正確に取り入れると,上で述べた崩壊の運動学の効果により v_2 が 25%程度減少し,実験データを再現することができた.このことから,共鳴粒子の崩壊現象は,観測されている π 中間子の楕円型フローを理解する上で重要な補正であることが判明した.

第5章では本論文のまとめを示した.本論文では高エネルギー重イオン衝突反応の物理において,

- I. 完全に空間3次元における相対論的流体シミュレーションプログラムの作成,
- II. 非中心衝突の事象における π 中間子のラピディティ分布の再現,
- III. 生成粒子の楕円型フロー抑制現象のメカニズムの解明,
- IV. QGP 相とハドロン相の間に相転移を起こすモデルによる実験データの再現, という大きな成果を得ることができた.