

学位論文題名

Search for Nuclear Equation of State and Quark-Gluon Plasma with a Hadronic Transport Model in High Energy Heavy-Ion Collisions

(ハドロン輸送模型による高エネルギー重イオン衝突での核物質状態方程式とクォーク・グルーオン・プラズマの探求)

学位論文内容の要旨

原子核は極限的な高温・高密度状態で、種々の様相を呈することがわかっている。高い温度(T)・低い化学ポテンシャル(μ)の相は、閉じ込めが解放された状態で、クォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)相と呼ばれる。QGPを生成すること、また、核物質の状態方程式を探ることを目的として、加速器を用いた重イオン衝突実験が行われてきた。核物質の状態方程式は、巨大単極子共鳴などの原子核物理から、超新星爆発や中性子星内部構造の理解までの幅広い背景をもつテーマとして、長く議論されてきたが、未だ定まるには至っていない。

早い段階で行われた SIS(Au+Au 等, $E_{\text{lab}} \sim (0.1 - 1)A \text{ GeV}$, $\sqrt{s_{NN}} \sim 2 \text{ GeV}$) および AGS(Au+Au, $E_{\text{lab}} \sim (2 - 11)A \text{ GeV}$, $\sqrt{s_{NN}} \sim 3 - 5 \text{ GeV}$) での重イオン衝突実験では、ビームエネルギーが低いため、QGP への相転移はなかったものと考えられている。しかし、衝突から生成された Collective Flow(集団粒子流)が、核物質の状態方程式に敏感に反映するため、この入射エネルギーでのハドロン輸送模型を用いた状態方程式の研究は進んでいる。

SPS (Pb+Pb, $E_{\text{lab}} = (40 - 158)A \text{ GeV}$, $\sqrt{s_{NN}} = 9 - 17 \text{ GeV}$) 実験では、158GeV で QGP への相転移が生成されたと発表されたが、ハドロン間相互作用のみを取り入れたハドロン輸送模型でも、粒子の収量分布など大まかな物理量は説明できるため、QGP が実際に生成されたかどうかも含め、議論が続いている。また、この実験で得られた Collective Flow のデータも、SIS・AGS でのデータ同様、核物質の状態方程式を決定する上で、重要な手掛かりとなるものであるが、この入射エネルギーでの研究は進んでいるとはいえない。

一方、2000年に始まった RHIC (Au+Au, Cu+Cu, $\sqrt{s_{NN}} = 62, 130, 200 \text{ GeV}$) では、特に Au+Au の 130, 200GeV で QGP への相転移を強く示唆する、ジェット収量抑制、強い楕円フロー(v_2 ; Collective Flow の一種)などのシグナルが観測されたため、強く結合した QGP(sQGP) が生成されたと結論する方向で議論が続いている。

このような状況の下、AGS~SPS のエネルギーでの核物質状態方程式と、RHIC のエネルギーでの QGP への相転移を議論するため、以下の研究を行った。

1. 平均場を導入したハドロン輸送模型 [JAM+RQMD/S] の開発と適用@AGS,SPS

SIS, AGS, SPS の入射エネルギーでの重イオン衝突実験は、ハドロン衝突を重ね合わせた微視的ハドロン輸送模型(ハドロンカスケード)で、粒子分布(y 分布, p_T 分布)などは記述できるが、Collective Flow($\langle p_x \rangle$, v_1 , v_2 など)はできないことがわかっている。SIS と AGS のエネルギーでは、核子間に働くポテンシャルを平均場として導入してはじめて、Collective Flow を再現できる。この際、平均場の運動量依存性が重要な役割を果たしていることも、よくわかっている。しかし、SPS では相対論的な効果を十分に考慮し、かつ運動量依存な平均場を導入した模型は存在せず、実験

で得られた Collective Flow を説明できていなかった。

このため、原子核状態方程式を再現するパラメーターを4種【運動量依存なもの二種 (MH,MS) と、運動量非依存なもの二種 (H,S)】を用意し、相対論的に共変な枠組である RQMD/S を用いて、ハドロンカスケード模型 JAM に組み入れた (JAM+RQMD/S)。そして、それを用いて AGS から SPS までの重イオン衝突の解析を行った。結果として、状態方程式による違いはみられなかったものの、AGS と SPS での陽子の Collective Flow を運動量依存平均場でよく説明できることがわかった。

2、カスケード模型 [JAM] と流体模型の適用 @ RHIC

RHIC の 130, 200 GeV での Au+Au 衝突では、荷電粒子の楕円フロー (v_2 ; Collective Flow の一種) が、大きな値を示しており、QGP への相転移の効果を取り入れた相対論的流体力学模型で再現できることなどから、強く結合した QGP (sQGP の) 一つの証拠とされている。しかし QGP の生成を議論するには、微視的なハドロン間衝突の重ね合わせで記述しようとする立場 (ハドロンカスケード) が、どこまで有効かを詰めて調べることが必要である。このため、ハドロンカスケード模型 JAM で、各種観測の解析を行った。結果として、JAM でも粒子分布 (η 分布, p_T 分布) は再現できるものの、 v_2 は全体として実験値よりも小さい値しか出せないことがわかった。また、この値は SPS の入射エネルギーで JAM で得たものとほぼ同じという結果も得た。すなわち、ハドロンカスケードの描像では、 v_2 は SPS~RHIC では入射エネルギーに依存しないといえる。これは、RHIC の実験で得られた大きな v_2 は、QGP への相転移の結果起こった圧力勾配の増加によって実現されたという、流体模型で採用されているシナリオを補強するものである。

また最近、RHIC ($\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV) の Cu+Cu 衝突実験が行われ、この結果が公表されるのに先立ってカスケード模型と流体模型での計算結果を比較した結果を発表した。両模型で粒子分布を比較すると、ほとんど同じ値を示したが、 v_2 は両模型では全く違ったふるまいを示した。最近、RHIC の PHOBOS グループが発表した Preliminary の結果と、今回の計算結果を比較すると、 v_2 の実験値は、熱的凍結温度 $T^{\text{th}} = 100$ MeV としたときの流体模型と、カスケード模型の中間あたりに位置し、 $T^{\text{th}} = 160$ MeV としたときの流体模型が最も近い値を示していることがわかった。このことから、Au+Au 衝突で広い範囲にわたっていた QGP が、Cu+Cu では小さい範囲に狭まり、またより短い時間に実現したというシナリオが示唆される。

まとめると、AGS, SPS, RHIC に渡る広い入射エネルギー ($\sqrt{s_{NN}} = 3 - 200$ GeV) での重イオン衝突で得られた Collective Flow を、ハドロン輸送模型を用いて分析したことにより、次のことを新しく示すに至った。

AGS~SPS では、核物質の状態方程式に関しては新しい知見は得られなかったが、運動量依存平均場の重要性を示すことはできた。SPS では平均場の効果そのものが重要視されてこなかったことを考えると、これは大きな進歩といえる。また、SPS ではハドロンの自由度の範囲内で Collective Flow をよく説明できることがわかった。これは、SPS で実現されていると議論されている QGP が、小規模であることを示唆している。

RHIC では、QGP 生成を考慮しないハドロン輸送模型で記述できる観測はあるものの、楕円フロー v_2 を説明するには、QGP 生成による圧力勾配の増加を考慮することが必要であることがわかった。これらは、流体模型の描像を補強するものであり、RHIC では SPS よりも大規模に QGP が生成されているとするのが、自然な結論であると考えられる。

学位論文審査の要旨

主査	助教授	大西	明
副査	教授	加藤	幾芳
副査	教授	石川	健三
副査	教授	岡部	成玄 (情報基盤センター)
副査	助教授	羽部	朝男

学位論文題名

Search for Nuclear Equation of State and Quark-Gluon Plasma with a Hadronic Transport Model in High Energy Heavy-Ion Collisions

(ハドロン輸送モデルによる高エネルギー重イオン衝突での核物質状態方程式とクォーク・グルーオン・プラズマの探求)

核物質の状態方程式 (EOS) と相転移の様式は原子核物理に閉じない研究課題であり、宇宙物理・素粒子物理・物性物理等の広い分野と関連する。例えば、高密度での EOS は中性子星や超新星爆発などの天体現象を支配し、高温物質での QCD 相転移は真空中で自発的に破れた対称性の回復現象である。

本論文において申請者は、主にハドロン輸送モデルを用いて広いエネルギー領域における重イオン反応を分析し、衝突中に生成される高温・高密度物質の性質についての理解を進めた。まず、固定標的型加速器のエネルギー領域 ($E_{\text{inc}} = 2 \sim 158A$ GeV) での分析を行い、平均場に運動量依存性を取り入れることにより上記の全エネルギー領域において一貫して集団運動流を記述できることを示し、このエネルギー領域でハドロン自由度が支配的であるとの理解を得た。次に、衝突型加速器 (RHIC) エネルギー領域 ($\sqrt{s} = 62 \sim 200A$ GeV) での分析を進め、ハドロン輸送モデルは粒子生成量は正しく記述するが、集団運動流の一種である楕円型フローを過小評価することを示した。一方で、QGP 生成を仮定した流体モデルでは早い熱的凍結を仮定すれば楕円型フローを記述できることも分かり、RHIC エネルギー領域では閉じ込めから開放されたクォークとグルーオンの運動が重要であるとの理解を得た。

これを要するに、著者は輸送モデルにより広いエネルギー領域での重イオン衝突を分析することにより、高温・高密度核物質における平均場と相転移の様式についての理解を深めたものであり、分野の研究に対して貢献するところ大なるものである。

よって著者は、北海道大学博士 (理学) の学位を授与される資格があるものと認める。