

学位論文題名

Hadronic Degrees of Freedom
in Relativistic Heavy-Ion Collisions

(相対論的重イオン衝突におけるハドロン自由度)

学位論文内容の要旨

初期宇宙や中性子星のような自然現象を理解する上では、通常の原子核から遠く離れた高温高密度の下のハドロン多体系の性質を理解することが重要である。この理解を目指す実験的な取り組みとして、相対論的重イオン衝突実験がここ十数年来精力的に行われて、豊富な実験データが蓄積されてきた。しかしながら、こうした重イオン衝突は極めて非平衡な現象であり、生成されるハドロン物質も非一様な状態でごく短時間の間生成されるのみである。よって、蓄積された豊富な重イオン衝突データから平衡一様ハドロン物質の性質を引き出すためには、ハドロン多体系の動力学を信頼できる形で解き、その動力学で仮定(あるいは導出)された平衡状態での物性と重イオン衝突の現象の関連を明らかにする必要がある。現在進行している実験の大きな目標はクォークやグルーオンが単体として存在するプラズマ状態(クォーク・グルーオン・プラズマ, QGP)の生成であるが、終状態に現われる膨大な数のハドロンの情報からプラズマの生成を実験的に確認する上でも、ハドロン多体系の動力学を解くことは大変重要である。

本論文の目的は、近年の相対論的重イオン衝突実験で得られたデータを微視的ハドロン輸送模型を用いて分析し、この分析を通じてハドロン粒子自由度がどの程度活性化されているのかを明らかにすることである。多くのハドロン粒子自由度が活性化されれば、これらの自由度と質量にエネルギーが分配されるため、運動エネルギーの減少(現象としては温度上昇の鈍化、あるいはスペクトルの軟化)が期待される。実際、米国国立ブルックヘブン研究所(BNL)での核子あたり10GeVの加速器(AGS)による実験ではこうした傾向がみられている。高エネルギー領域のハドロン多体系としては、この自由度の増加が軟化の最も大きな要因と期待され、重要な課題である。

高エネルギー重イオン反応の記述において、微視的ハドロン輸送模型は強力な方法である。ハドロン多体系の非平衡現象である重イオン反応を取り扱う上で、現時点では厳密に解き得る理論的方法は存在しない。しかし、ハドロンの質量と崩壊幅は実験データを利用し、ハドロン2体間の素過程相互作用を現象論的に取り入れられれば、高次の多体効果・多段階効果を解くことが残された問題となる。微視的ハドロン輸送模型では、模型に導入する自由度を与えた後、こうした1体、2体問題を現象論的に取り入れた上で、ハドロン間の多重衝突を独立な2体衝突の重ね合わせとして記述する。高エネルギーの反応では、ド・ブロイ波長が原子核における典型的な核子間距離よりも短くなるため、上のような取扱いが良い近似となることが期待される。

ところが、微視的ハドロン輸送模型においてハドロン粒子自由度をどの程度導入するべきかは自明ではない。ハドロンには陽子・中性子・パイ中間子以外にも様々な共鳴粒子と呼ばれるハドロンの励起自由度が存在し、重いものでは陽子の質量の2倍以上に至るまでの様々な共鳴状態が発見されているが、これらは全てクォーク・グルーオンからなる複合粒子であると同時に、高励起の共鳴状態は、パイ中間子と低励起共鳴にも崩壊するなど低励起ハドロンの複合系の側面も持つ。このため、ハドロンの輸送模型には大きく分けて、「一つは共鳴粒子自由度を可能な限り多く取り入れる模型」と、「 $\Delta(1232)$ のような代表的な共鳴粒子自由度のみを取り入れる模型」の2種類が現存しており、入射エネルギーが核子あたり10 GeV程度の重イオン反応ではハドロンのエネルギースペクトルに関して、上の両方の模型が良い再現性を示す。しかし、平衡状態ではエネ

ルギー密度が与えられた場合、自由度の違いは温度の違いに反映されるので、このスペクトルが一致するという事実は一見奇妙である。相対論的重イオン衝突においても、反応初期の構成粒子の非弾性散乱において、入射運動エネルギーの多くは共鳴粒子の質量エネルギーに転化され、その共鳴粒子の崩壊を通じて終状態に大量のパイ中間子が残るため、パイ中間子の生成量、およびスペクトルの傾きを決定するエネルギー転化量は共鳴粒子自由度に依存すると考えられる。

このような「ハドロン自由度の活性化にともなうスペクトルの軟化」と上述の奇妙な「ハドロン自由度に対するスペクトルの非依存性」の問題を解決するため、我々は2種類の輸送モデルを開発し、比較研究を行なった。多自由度モデルとして、JAM (Jet Aa Microscopic transport model)、少自由度モデルとして、HANDEL (HADronic Nucleus-nucleus cascade moDEL)を構築した。特に、少自由度モデルには公開コードが存在しないため、HANDELの開発は重要である。

我々はまず、核子-核子 (NN)、パイ中間子-核子 (πN) 衝突の素過程断面積を、少自由度の2体・1体ハドロンへの非弾性散乱・融合過程と直接多中間子生成を組み合わせることにより評価し、現象論的なフィットを行なった。そしてこの断面積をもとにして、逆反応に一般化された詳細釣合公式を適用するなど、出来る限り統計性(詳細釣合)を保持した上で現存する素過程の実験データをよく再現する反応断面積を提示した。

次に周期境界条件のもとで長時間時間発展させることにより、HANDELによって作られる平衡ハドロン物質の性質を調べ、温度が定義できる平衡状態が記述できることを確認した。また直接多粒子生成を導入した場合には詳細釣合が破れるが、この頻度を評価した上で、直接多粒子生成がこの評価を越えて物質の軟化に寄与することを示した。この軟化は粒子生成時間 (formation time) を有限にした場合により顕著である。粒子生成時間は、多重発生モデルにおけるハドロン化に要する時間に対応したものとして導入されたもので、この時間の間、直接生成された粒子は他粒子と反応することができない。この生成時間内にある発生粒子群は実効共鳴粒子としての役割を果たしていると解釈すれば、上記の軟化を自然に理解できる。

そして、HANDELと多自由度モデルであるJAMを用いてBNL-AGSエネルギーでの金-金衝突を計算し、両者がエネルギースペクトルを同程度に再現すること、また、バリオン密度-温度の時間発展に関しても同様の履歴を示すことが示された。こうした再現性・一致は粒子多重発生を取り入れ、かつ粒子生成時間を標準的な値 ($0.8\text{fm}/c$) の近傍とした場合に限られる。これを大きくした場合にはスペクトルが軟化しすぎ、小さくした場合には核子の Stopping Power が大きすぎることを示された。これらの結果は、前節の解釈 — 粒子生成時間内にある発生粒子群は実効共鳴粒子自由度としての役割を果たしている — と無矛盾であり、また導入される実効共鳴粒子自由度の大きさに制限をつけていることとなる。

以上をまとめると、BNL-AGS エネルギーでの相対論的重イオン反応で生成される核(ハドロン)物質は、ハドロンの基底状態のみでない多くの自由度が発現した結果として、温度上昇や圧力増加の抑制が起こっている系であると結論する。この自由度増加は、多くの共鳴ハドロンをあらわに導入することによっても記述可能であるが、あらわに導入する自由度は少数(ハドロンの基底状態と少数の共鳴ハドロン)であっても粒子の多重発生において粒子生成時間を適度にとることで記述できる。本申請論文では、少自由度ハドロン輸送モデル (HANDEL) を新たに構築し、これを統計平衡状態と重イオン反応に適用し、多自由度モデルと比較することにより、これらの結論を得た。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 加 藤 幾 芳

副 査 教 授 河 本 昇

副 査 教 授 岡 部 成 玄

(北海道大学情報メディア教育研究総合センター)

副 査 助 教 授 大 西 明

学 位 論 文 題 名

Hadronic Degrees of Freedom in Relativistic Heavy-Ion Collisions

(相対論的重イオン衝突におけるハドロン自由度)

高エネルギー重イオン反応研究の目的は、通常の原子核から遠く離れた高温・高密度の下のハドロン多体系の性質を理解することである。特に、高温ハドロン多体系としては、核子以外に様々なハドロンが現われる「ハドロン自由度の増加」が、核子当たり 10 GeV 程度の入射エネルギー (BNL-AGS エネルギー) における重イオン反応で観測されている温度上昇の抑制と物質の軟化を説明するうえで重要な要因である。ところが、現在までの理論的分析では、模型にあらわに導入する自由度の大小によらず実験データが説明されており、上述のハドロン物質の性質と重イオン反応データの関連づけにおける大きな疑問となっていた。

本論文は、近年の相対論的重イオン衝突実験で得られたデータを微視的ハドロン輸送模型を用いて分析し、この分析を通じてハドロン粒子自由度がどの程度活性化されているのかを明らかにしたものである。

具体的には、多自由度模型は著者らが既に関発し、公開されている模型が存在するため、本論文ではまず素過程実験データを忠実に再現する断面積を導入した少自由度ハドロン輸送模型 (HANDEL) を新たに構築した。次に周期境界条件のもとで長時間時間発展させることにより、この模型によって作られる平衡ハドロン物質の性質を調べ、粒子生成時間内にある発生粒子群が実効共鳴粒子としての役割を果たしていることを示した。そして実際の相対論的重イオン反応についての計算結果を多自由度模型、および実験データと比較することにより、実効ハドロン自由度の増加が、多くの共鳴ハドロンをあらわに導入することによっても記述可能であるが、あらわに導入する自由度が少数 (ハドロンの基底状態と少数の共鳴ハドロン) であっても粒子の多重発生において粒子生成時間を適度にとることも記述できることを示した。そしてこの分析から、「BNL-AGS エネルギーの相対論的重イオン反応で生成される核 (ハドロン) 物質は、ハドロンの基底状

態のみでない多くの自由度が発現した結果として、温度上昇や圧力増加の抑制が起こっている系である」との結論を得ている。

これを要するに、著者は、重イオン反応研究の分野における現象の認識を深めたとともに、重イオン反応の現象を平衡ハドロン物質の性質を結びつけるための基本的な理解方法を提案したものであり、分野の研究に対して貢献するところ大なるものがある。

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。