

氏 名	進 博 正
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 2022 号
学位授与の日付	平成 11 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	理 学 研 究 科 物 理 学 ・ 宇 宙 物 理 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	高エネルギー重イオン反応での電子対生成

(主査)
論文調査委員 助教授 初田 哲男 教授 堀内 昶 助教授 延與 秀人

論 文 内 容 の 要 旨

高エネルギー重イオン反応の主要な目的は、高温・高密度物質の生成と、その性質の解明である。特に、高温・高密度物質中では、カイラル対称性の部分的回復によるハドロンの性質変化や、クォーク・グルオン・プラズマへの相転移などが理論的に予言されており、その実験的検証が期待されている。

高エネルギー重イオン反応において、反応の初期情報を担う有力なプローブの一つは電子対に代表される電磁プローブである。これらは、平均自由行程が十分に長いので、一度作られると、ハドロ物質中ではほとんど散乱されることなく測定器まで到達する。特に、電子対は終状態のハドロ崩壊から生ずる物理的なバックグラウンドが少ないことや、初期に電子対をつくる熱的過程（例えば、 $\pi^+\pi^-$, $q\bar{q}\rightarrow l^+l^-$ 等）が系の温度に対して急速な増加関数であるために、初期の高温・高密度物質を調べるための格好のプローブと考えられている。

最近、CERN-SPSでのCERES共同実験及びHELIOS-3共同実験によって、不変質量が1 GeV以下の電子対に異常が観測された。いずれの実験も、固定原子核標的に対する陽子入射 (p-A) 反応と原子核入射 (A-A) 反応を観測している。p-A 反応での低不変質量電子対 ($M_{ee}=0.2\sim 1.5\text{GeV}/c^2$) については、最初の衝突で生成したハドロンの電磁崩壊 (カクテル模型) で実験データが説明出来るが、A-A反応においては、これでは説明できない多量の低不変質量電子対が観測されている。これを説明するために、様々な理論的な試みがこれまで行なわれた結果、A-A反応では相互作用する π 中間子ガスが生成され、 $\pi^+\pi^-\rightarrow e^+e^-$ 過程を通じて多量の電子対が放射される事が明らかになってきた。また、 $\pi^+\pi^-\rightarrow e^+e^-$ の中間状態として、 ρ^0 中間子が重要な役割を果たす事も分かってきた。

主論文では、まず、 π 中間子ガス中での ρ^0 中間子の振る舞いを記述する新しい理論的方法を提案している。この方法では、 ρ^0 中間子に対して熱平衡を仮定せず、 ρ^0 - π の相互作用系を“注目する部分系 ρ^0 ”と“熱浴となる部分系 π ”の二つに分解した後、“注目する部分系”の発展方程式をHeisenbergの運動方程式から導出する。これにより、 π 中間子ガス中で、 ρ^0 中間子が熱平衡へ緩和する過程が量子論的に記述可能となる。

緩和過程の例として、 π 中間子ガス中での ρ^0 中間子の占有率の時間発展がまず議論されている。運動方程式を用いる方法は、系が熱平衡に十分近く、粒子の崩壊巾が十分に小さい場合には、ボルツマンの輸送方程式の結果を再現する。しかしながら、現実の高エネルギー重イオン衝突における ρ^0 中間子に対しては、これらの条件は満たされず、ボルツマン方程式と異なる振る舞いが得られる。特に、 ρ^0 中間子の熱平衡への緩和時間が、 ρ^0 中間子の崩壊巾の逆数と一致しないという結果が得られた。これは、有限温度において、スペクトル関数の低振動数部分が強調されるため、“代表的な崩壊巾”が必ずしも“質量殻上の崩壊巾”に等しくない事が理由である。また、同じ理由から高温側では緩和時間があまり変化しないという事が示された。

つぎに、電子対生成に直接関係する、 ρ^0 中間子のスペクトル関数の時間発展が考察されている。 ρ^0 中間子の緩和過程を考慮すると、 π 中間子ガスの温度が急速に冷えた場合には、初期に存在する前平衡系からの寄与が強調される。その結果、

電子対の不変質量分布が平衡系のそれと比較して、 ρ^0 中間子ピーク付近で抑制される事が示された。更に、以上で得られた結果を用いて、核子あたり200GeVのS-Au衝突におけるCERES共同実験のデータに対する解析をおこなった。まず、簡略化された初期ハドロン分布と検出器の立体角のみで決まる定数のアクセプタンスを用いたカクテル模型での解析を行い、次に、緩和過程を考慮した ρ^0 中間子からの電子対生成を加えて、実験データと比較した。その結果を緩和過程を考慮しない場合と比較すると、電子対スペクトルの形が著しく異なり、 ρ^0 中間子ピークより低い不変質量を持つ電子対が、 ρ^0 中間子ピーク付近の電子対に比べて相対的に大きくなる事が示された。

論文審査の結果の要旨

高エネルギー重イオン反応における電子対生成の観測は、反応初期の高温・高密度物質を調べるための有力なプローブと考えられている。最近、CERN-SPSでのCERES共同実験及びHELIOS-3共同実験によって、不変質量が1 GeV以下の電子対に異常が観測され、その理解にむけて現在活発な研究が行われている。これらの実験では、固定原子核標的に対する陽子入射(p-A)反応と原子核入射(A-A)反応が観測されている。p-A反応での低不変質量電子対($M_{ee} = 0.2 \sim 1.5 \text{ GeV}/c^2$)については、最初の衝突で生成したハドロンの電磁崩壊(カクテル模型)で実験データが説明出来る事が確認されたが、A-A反応においては、これでは説明できない多量の低不変質量電子対が観測されている。これは、A-A反応において相互作用する π 中間子ガスが生成され、 $\pi^+ \pi^- \rightarrow e^+ e^-$ 過程を通じて多量の電子対が放射される事によると考えられるが、いまだ実験データの定性的理解も得られていない。申請者は、この電子対の問題に対して、非平衡系の緩和現象というこれまでと違った観点から研究を行っている。

まず申請者は、 π 中間子ガス中で、電子対が生成される種であるところの ρ^0 中間子の振る舞いを記述するために、切断近似を用いたHeisenberg運動方程式を用いた新しい方法を提案している。この方法では、熱浴となる π 中間子ガス内における ρ^0 中間子演算子の時間発展を、解析的に研究する事ができる。これにより、 ρ^0 中間子が熱平衡へ緩和する過程が量子論的に記述可能となった。更に、得られた量子論的發展方程式から、 ρ^0 中間子の占有率の時間発展を導き、数値的にこれを解くことにより、 ρ^0 中間子の熱平衡への緩和時間が、 ρ^0 中間子の崩壊巾の逆数と一致しないという興味深い結果が得られた。幅の広い共鳴粒子に対する非平衡過程を量子論的に扱う試みは、その重要性にもかかわらずこれまで行われておらず、申請者の方法とそれから得られた結論は、この問題に対する新たな方向を与えている。

つぎに、申請者は、高エネルギー重イオン反応における電子対生成に対する非平衡効果を調べる目的で、時間的に冷却していく π 中間子ガスからの電子対生成の不変質量分布を考察し、 ρ^0 中間子の緩和過程を考慮すると、電子対の不変質量分布が平衡系のそれと比較して、 ρ^0 中間子ピーク付近で抑制される事を示した。この抑制は、熱浴となる π 中間子ガスの温度が急速に下がった場合には、特に顕著に現れる。更に、得られた不変質量分布の形状は、A-A反応において観測されている異常な電子対の不変質量分布と似た傾向を持つ事が示された。

核子あたり200GeVのS-Au衝突におけるCERES共同実験の電子対データは、反応初期に生成されたハドロンからの直接電子対生成と、高温 π 中間子ガス中からの ρ^0 中間子を通じた間接電子対生成の和になっていると考えられる。申請者は、前者については簡略化された初期ハドロン分布と検出器の立体角のみで決まる定数のアクセプタンスを用いたカクテル模型を用い、後者については、申請者の方法による緩和過程を取り入れた ρ^0 中間子からの電子対生成を考慮して、実験データと理論との比較を行った。その結果を緩和過程を考慮しない場合と比較すると、電子対スペクトルの形状が著しく異なり、 ρ^0 中間子ピークより低い不変質量を持つ電子対が、 ρ^0 中間子ピーク付近の電子対に比べて相対的に大きくなる事が示された。これにより、電子対スペクトルの形状変化に対するこれまでの提案(媒質中でのハドロンの質量変化や、共鳴状態間の相互作用など)とは異なる新しい可能性が開かれた事になる。

以上、本申請論文で提案されている熱浴中での共鳴粒子の緩和過程に対する理論的手法は、高エネルギー重イオン反応における粒子生成の非平衡過程を量子論的に取り扱う可能性を開く新しい試みとなっている。また、電子対生成量及びそのスペクトル分布に異常を示しているCERES共同実験のデータに関して、この論文で初めて、 ρ^0 中間子のスペクトル分布が非平衡系においては変化するという新しい観点が導入された。これらの結果は、高エネルギー重イオン反応において生成が期待される高温・高密度物質の理解に向けての今後の理論・実験研究を促す基礎を与えており、本論文は博士(理学)の学位

論文として十分価値あるものと認める。

なお、本申請論文の内容を中心に、これに関連した研究分野についての口頭試問を行った結果、合格と認めた。