

氏 名	村 田 次 郎
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 2110 号
学位授与の日付	平 成 11 年 7 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	Nuclear Calorimetry on GeV Proton Induced Target Multifragmentation Reactions (GeV 陽子入射標的核多重破碎反応による原子核の熱量測定)

論文調査委員	(主 査) 教 授 今 井 憲 一	教 授 堀 内 昶	教 授 笹 尾 登
--------	----------------------	-----------	-----------

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所の陽子シンクロトロン (KEK-PS) において行われた、ビームエネルギーが 8 GeV および 12 GeV の陽子ビームによる標的核多重破碎反応 (Target Multifragmentation Reaction; TMF Reaction) から放出される荷電数が 3 以上 25 以下の中間質量破碎片 (Intermediate Mass Fragment; IMF) を複数の大立体角ガス検出器で測定した実験の結果と、それから導かれた IMF 発生源としての高温核物質の熱力学的性質について理論的に考察した結果をまとめたものである。

原子核物理学にとって物質としての原子核、即ち核物質の持つ相図や状態方程式を決めることは非常に重要な課題である。しかし、これまでの実験的研究で比較的良好に分かっているのは励起エネルギーが 50 MeV 以下、密度がほぼ通常の原子核密度である、ごく限られた領域内での性質だけである。この領域では核物質は通常物質でいうと液体的な性質を示している。一方理論的には、核子間相互作用が分子間相互作用である Van der Waals 力によく似ていることから、核物質においてもその密度、温度を変化させることによって通常物質に見られるような液相-気相の相転移が起こることが予想されている。高エネルギーハドロンを重い原子核にぶつけた時に起こる、標的核が短い時間スケールの内にバラバラになる TMF 反応は、核物質の液相-気相相転移の情報をもたらしてくれる可能性があることから、非常に注目されている。これまで、TMF 反応の研究は、主に中間エネルギー-或は相対論的エネルギー重イオン反応を使って行われてきた。しかし、重イオン反応を使った場合、TMF 反応から放出された IMF をそれ以外の過程から放出されたものと識別することは非常に困難である。これに対して陽子のような軽粒子によって引き起こされる反応の場合、IMF の発生源は標的核だけであり、運動学的に明解な TMF 反応実験が可能である。本研究は、軽粒子反応のこの特性を生かし、放出される IMF の角度分布が前方ピークから側方ピークに変化することがこれまでの放射化学実験から分かっている、陽子エネルギーが 10 GeV 前後の領域で、TMF 反応を詳細に調べ、側方ピークの原因を探るとともに、IMF 発生源の温度を決めることを目指して行われた。

本研究の最大の特徴は IMF の測定方法にある。IMF は新たに開発された特殊な形状のガス電離箱であるブラッグカーブ検出器 (Bragg Curve Counter; BCC) を用いて測定された。BCC は基本的にはフレッシュグリッド付の電離箱であるが、一様な電場を検出器に入射する荷電粒子と平行方向に印加することにより、荷電粒子の軌道に沿って生成される電子をその空間密度情報を保持したまま陽極に集めることが出来る。従って、陽極からの信号を時間の関数として測定すると、荷電粒子の軌道に沿ってのエネルギー損失の分布、つまりはブラッグカーブを得ることが出来る。ブラッグカーブの最大値 (ブラッグピーク) は入射荷電粒子の持つ荷電数に比例するため、BCC を使うと比較的に簡単に入射粒子の運動エネルギーだけでなく荷電数の情報も得ることが出来る。陽極からの電気信号の持つ時間幅を測定することにより、入射粒子の検出器ガス中の飛程を決めることもできる。この飛程と運動エネルギーの相関を調べれば、Li と Be については同位体の分離も可能である。BCC はガス電離箱であるため最小電離粒子に基本的には不感であり、高エネルギー一次ビームのようにビームハロー

が多いビームを使った実験に最適な検出器である。本研究では大立体角の BCC とビーム強度の強い一次ビームを使うことにより、統計精度の高いデータを得ることが出来た。

実験は、8 GeV、12 GeV の陽子ビームを金、ツリウム、サマリウム、銀標的核に照射し、TMF 反応から放出される荷電数が 3 以上 25 以下の IMF を全立体角の約 20% を覆う 37 チャンネルの BCC で測定することにより行われ、IMF の二階微分断面積の放出角度依存性、標的核の質量数依存性、それに IMF 多重度依存性が調べられた。測定された全ての反応で IMF は実験室系 70° 付近にピークを持つ角度分布を示し、この側方ピークの度合は IMF 多重度にはほぼ依存しないことが分かった。IMF の二階微分断面積を説明するために、側方の収量を現象論的に enhance するような因子が moving source model の規格化定数に付け加えられ、それを使った fitting が行われた。そして測定された全てのエネルギースペクトルがこの model を使えばうまく説明出来ることが明らかになった。これらのことは、IMF が生成される段階では、幾何学的に変形した或は不均質な核物質が作られている可能性が高く、以前から理論的にその存在が予言されてきた衝撃波現象が側方ピークの原因である可能性は低いことを示唆している。

Li と Be 同位体の収量比を使って、IMF 放出源の温度、それにその中での自由核子密度が求められた。その結果、IMF 放出源の温度には放出角度依存性があり、前方、後方放出角度で高い値を示すことが初めてわかった。つまり IMF の放出は、系全体が熱平衡に達する前に起こっていることになる。自由核子密度についても放出角度依存性があり、しかも温度の示す放出角度依存性と強い正の相関が見られた。IMF 放出源の温度は、標的核の質量数が小さい程高くなる傾向にあり、この傾向は 12 GeV 陽子ビームの場合の方が 8 GeV の場合よりも強くなっている。温度の IMF 多重度依存性については、12 GeV 陽子ビームを軽い標的核に照射した場合以外はあまりはっきりしないが、IMF 多重度が高くなるほど温度が高くなっている。測定された温度の示すこれらの依存性は、核物質の caloric curve と陽子ビームが標的核に衝突するときの幾何学的条件とを考慮すると大雑把に理解することができ、8 GeV 陽子によって作られる高温原子核は液相・気相の混合相にあり、12 GeV 陽子の場合 IMF 多重度が高い中心衝突に近い時には気相にあると考えられる。この解釈に従うと、IMF 放出源は不均一な励起エネルギー分布それに自由核子密度分布を持っていることになり、この不均一さが、IMF の角度分布が側方ピークになる原因であると推察される。

論文審査の結果の要旨

本申請論文では、8 GeV および 12 GeV の陽子ビームによる標的核多重破砕反応 (Target Multifragmentation Reaction; TMF Reaction) から放出される荷電数が 3 以上 25 以下の中間質量破砕片 (Intermediate Mass Fragment; IMF) を複数の大立体角ガス検出器で測定した実験の結果と、それから導かれた IMF 発生源としての高温核物質の熱力学的性質について理論的に考察した結果をまとめている。Bragg Curve Counter (BCC) とよばれる特殊なガス電離箱を開発使用したことにより IMF の荷電数のみならずそのエネルギーさらに Li や Be の同位体の分離にも成功している。このためこれまでの核化学的手法による IMF の測定にくらべはるかに情報量が多く、軽粒子による標的核多重破砕反応としてはこれまでにない質のたかいデータを提供したことが、本申請論文のまず高く評価されることである。

申請論文では IMF の放出角度分布が 8 GeV および 12 GeV の陽子ビームと金、ツリウム、サマリウム、銀標的核について詳しく調べられており、いずれの場合でも実験室系で 70° 付近にピークを持つ分布を示すこと、またこの側方ピークの度合は IMF 多重度にはほぼ依存しないことを明らかにした。このデータにより以前の核化学的手法を用いた実験で示唆されていた側方ピークがはっきりと確認されたといえる。さらに申請者は IMF の二階微分断面積 (エネルギー分布と角分布) を説明するために、moving source model を基礎としてさまざまな model で fitting を行なっている。その結果 deformed moving source model と称する変形した高温核からの IMF 発生の model で現象論的にすべてのデータを良く再現することを示したことは高く評価できる。このことは、IMF が生成される段階では、幾何学的に変形した或は不均質な核物質が作られている可能性が高く、以前から理論的に予言されてきた衝撃波現象が側方ピークの原因である可能性が低いことを示唆している。

さらに申請者は IMF のうち Li と Be について、ていねいな解析を行ないその同位体比を求めることに成功した。この同位体比をつかってもとの放出核物質の温度を求めたことは、軽粒子による標的核多重破砕反応としては初めてのことで高く評価される仕事である。さらにこの同位体比つまり温度の角分布をしらべた結果、前方および後方の放出角度が側方にくら

べて温度が高いことを見出した。これは IMF の放出が系全体が熱平衡に達する前に起こっていることをしめすこと、またこの放出源の温度の不均一さが IMF の放出角分布の側方ピークの自然な説明を与えることで、重要な発見であるといえる。入射陽子のエネルギーと標的核さらに IMF 多重度に対する依存性を詳しく調べており、いずれも標的核多重破碎反応の新しいデータを提供している。これらから、陽子のエネルギーと標的核との衝突の幾何的条件などを考慮すると、この実験条件では 8 GeV では高温原子核が液相、気相の混合相にあり、12 GeV では中心衝突では気相にあると推定されている。申請者は核物質のエネルギー阻止能の推定および IMF の質量分布などを使って、核物質の caloric curve を求めている。この研究は核物質の液相、気相の相転移の研究に大きな寄与を与えるものであると評価できる。

なおこの申請論文の主な内容は理学部紀要に掲載されることが決まっている。

よって、本申請論文は博士（理学）の学位論文に値するものと認める。

また主論文および参考論文に報告されている研究業績を中心として、これに関連した研究分野について口頭試問した結果、合格と認めた。