

	くろ さわ ただ ひろ
氏 名	黒 澤 忠 弘
授 与 学 位	博士 (工学)
学位授与年月日	平成12年3月23日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科、専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 量子エネルギー工学専攻
学位論文題目	高エネルギー重イオンによる2次粒子の生成に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 中村 尚司
論文審査委員	主査 東北大学教授 中村 尚司 東北大学教授 馬場 護 東北大学教授 織原 彦之丞 (理学研究科)

論文内容要旨

- 1. 序論** 近年、加速器技術の発展に伴い、重イオンを高エネルギーまで加速することが可能となり、重イオン加速器施設は原子核物理・素粒子研究のみならず、物性物理・化学・生物・医学・工学にわたる多くの分野で研究に利用されるようになった。このような施設では、一次粒子によって生成される二次放射線に対する安全設計が重要な問題となる。また現在重イオンを用いた癌治療が行われており、重イオンによって生成される二次粒子による被曝線量の評価も必要になっている。さらに近年の宇宙環境利用の増加に伴い、銀河宇宙線に含まれる重イオンによる被曝線量の評価も重要になってきている。このような二次放射線に対する被曝線量評価を行う際、重イオンが厚いターゲットに入射した時に生成される二次粒子、特にその透過力の強い中性子に関するデータが必要となるが、これらのデータが非常に乏しいというのが現状である。そこで、システムティックな収集のために4種類のターゲットと12種類の入射粒子を用いた実験を行い、生成二次中性子のエネルギー・角度分布の測定を行った。
- 2. 実験** 実験は、放射線医学総合研究所の HIMAC (Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba) で 100~800MeV/nucleon の He~Xe イオンを入射粒子が完全に止まる厚い C, Al, Cu, Pb ターゲットに入射させ、生成される二次粒子、特に二次中性子に注目して測定を行った。測定角度は 0~90 度の 6 点、測定された中性子の下限エネルギーは測定回路の改良により 3MeV 程度となった。用いた検出器は、E カウンターとして NE213 有機液体シンチレータ (直径 12.7cm、長さ 12.7cm)、 ΔE カウンターとして NE102A プラスティックシンチレータ (15cm×15cm、0.5cm 厚) である。また本研究では TOF 法を用いて測定を行っており、そのスタート信号を得るため小型の NE102A プラスティックシンチレータ (直径 3cm、厚さ 0.5mm) をビーム出口に設置している。この信号は、スタート信号の他にターゲットに入射した粒子数の測定にも用いている。効率のよい角度分布の測定のため、 ΔE -E カウンターのセットを 3 台用いて測定しており、飛行距離は 5~2m としている。室内散乱線の評価のために、長さ 60cm のシャドーバーを用いた測定も合わせて行った。
- 3. 解析** データの解析は、二次中性子に関しては、 ΔE カウンターの発光の有無から中性子・ γ 線のイベントを取り出し、その後 Total-Slow 発光量二次元分布図を用いて γ 線を除去し、中性子のみの TOF スペクトルを得た。この TOF スペクトルから最終的に中性子エネルギースペクトルへ変換を行うが、この際必要となる検出効率は実験値が 200MeV 程度までしかなく、そのため Cecil コードを用いた計算値を使用している。二次荷電粒子の解析には、 ΔE -E の発光量二次元分布図、TOF-E カウンター発光量二次元分布図、Total-Slow 発光量二次元分布図の三種類を用いることによって、電荷だけでなく質量数の異なる粒子も明確に弁別することができた。ただし本研究では二次中性子の測定に重点をおいて回路を設定しており、解析可能となったデータは 100MeV/nucleon の He イオン入射の場合のみとなった。
- 4. シミュレーション計算** 実験値との比較を行うため、二つの計算コードを用いたシミュレーションを行った。一つは重イオン核反応による二次粒子生成断面積計算コードである HIC を用いた計算である。本研究の実験は厚いターゲットを用いており、これを模擬するために HIC を用いて生成二重微分断面積 DDX(Double Differential Cross Section)を計算し、それを重ね合わせて二次粒子生成量 DDY(Double Differential Yield)を求めている。そのためこの計算には、二次粒子がさらにターゲット核と反応して生成する三次的に生成された中性子成分は含まれていない。もう一つ使用した計算コードは LCS (LAHET Code System)である。このコードは輸送計算を行うことから、この結果は直接実験値と比較を行っている。ただし LCS では入射粒子の上限が He イオンとなっており、比較は He 入射の実験のみを行った。
- 5. 現象論的解析** 本研究で得た中性子スペクトルの結果を系統的に理解するために、Moving Source Model

を用いて解析を行った。このモデルは本来核反応断面積を記述するモデルの一つとして考えられたもので、この手法を用いた解析が過去にいくつか行われている。このモデルは平衡過程、前平衡過程を表す二つの項からなり、比較的入射エネルギーの低い場合再現することができる。しかし、本研究のように入射粒子のエネルギーが高くなると、直接過程によって生成される成分が多くなり既存の式では再現することが困難となった。そこでこの直接過程によって生成される成分を表す項を新たに加え、三つの項からなる Moving Source Model を考案し、フィッティングを行った。

6. 結果 この測定によって得られた二次中性子スペクトルは、前方方向では核子当たりの入射エネルギーの 60~70%付近に緩やかなピークを持ち、高エネルギー成分は核子当たり入射エネルギーの 2 倍程度まで広がっていることが分かった。各角度での中性子スペクトルを見ると、低エネルギー成分は実験室系において等方に近い角度分布を示し、中間エネルギー成分はそれが崩れ前方性を持つことからそれぞれ異なる反応過程から生成されたものであると分かる。また前方では直接反応成分が多くスペクトルが硬く、後方では平衡過程が主になりスペクトルが軟らかくなる。この直接反応は軽核では核子密度が小さく核外に放出される確率が高く、逆に核子密度が大きい重核では放出確率が小さくなることから、生成量は軽核の方が多くになっている。平衡過程による中性子生成量であるが、軽核では前述したように入射エネルギーが直接反応に寄与する割合が大きく残留核の励起エネルギーが低い。逆に重核では残留核の励起エネルギーが大きくなり、平衡過程から生成される粒子数が多くなっている。二次荷電粒子に関しては、本研究の測定方法における陽子、重陽子、三重陽子の弁別手法を示している。本研究では二次粒子のうち中性子に重点をおいて測定したため、得られた荷電粒子スペクトルは一部の測定データに対してのみ解析を行ったが、測定回路の設定を変更することによって本研究で使用した測定方法及び解析手法を用いて二次荷電粒子を質量数まで弁別して測定することが可能である。得られた二次中性子スペクトルから 5MeV 以上の中性子生成量の角度分布を求め、その結果前方では軽核からの生成量が、また大角度では重核からの生成量が大きくなった。これは前方方向に放出される中性子が主にカスケード過程によって生成され、後方では平衡・前平衡過程によるものが支配的になっていることを示している。また角度積分によって生成二次中性子のエネルギー分布を考察し、その入射粒子の質量数、エネルギー依存性を示すことができた。この角度分布のデータを角度で積分し、 2π 方向に放出される全中性子生成量を求め、その傾向から簡易式によって全中性子生成量を示すことができた。

測定によって得られた二次中性子の比較のため、重イオンによる二次粒子生成断面積計算コードである HIC を用い、厚いターゲットから放出される状態を模擬する計算を行った。この手法によって、入射粒子エネルギーが 180~400MeV/nucleon、質量数が 12~56 程度の入射粒子に対して二次中性子スペクトルをおおよそ再現できることが分かった。また二次荷電粒子に関しては、LCS を用いた輸送計算コードを用いた計算値と比較を行い、実験値をよく再現できることが確認でき、このコードの信頼性を評価することができた。

得られた二次中性子スペクトルから、Moving Source Model を用いた解析を行った。以前用いられてきた評価式は平衡・前平衡成分を表す項のみで、そのままでは高エネルギー重イオンによる二次中性子スペクトルを再現できないため、本研究ではカスケード反応によって生成される成分を表す項を新たに考案し加えている。これによって実験で得られた二次中性子スペクトルを再現できるようになり、得られたパラメータを考察し、最終的に入射粒子、ターゲット、入射エネルギーの情報のみで厚いターゲットから生成される二次中性子スペクトルを求めることができた。この Moving Source Model によって得られた二次中性子スペクトルは、ファクター 2 以内でおおよそ一致することが分かった。

7. 結論 本研究によって、核子当たりエネルギー 100~800MeV/nucleon の He~Xe イオンを厚い C, Al, Cu, Pb ターゲットに入射させ生成される二次粒子のエネルギー、角度分布の測定を系統的に行い、合わせてモンテカルロコードを用いた計算との比較、また現象論的解析を行った。Cecil や Heilbronn らによる重イオンによる二次中性子スペクトルは、下限エネルギーが 10~20MeV と比較的高いエネルギー成分のみの測定であったが、本研究では測定手法の改良等により二次中性子スペクトルを 5MeV~GeV まで広いエネルギー範囲で得ることができた。100MeV/nucleon 以上の高エネルギー重イオン入射による二次中性子の角度・エネルギー分布の測定で、エネルギー・入射粒子・ターゲットの幅広い組み合わせで系統的に収集したデータは本研究が世界で初めてである。

本研究によって得られた実験データ、また Moving Source Model を用いた現象論的解析結果は、今後予定されている重イオン加速器施設の遮蔽設計における線源データとして非常に有用である。また宇宙環境中の重イオンによる宇宙飛行士の被曝線量評価や、重イオン癌治療における二次中性子による体内の正常組織の被曝線量の評価等に有用なデータであり、幅広い分野において本研究の結果が用いられると期待できる。

審査結果の要旨

近年、加速器技術の発展に伴い、重イオンを高エネルギーまで加速することが可能となり、重イオン加速器施設は原子核物理・素粒子研究のみならず、物性物理学・化学・生物学・医学・工学にわたる多くの分野で利用されるようになった。このような施設では、一次粒子によって生成される二次放射線に対する安全設計が重要な問題となる。さらに近年の宇宙環境利用の増加に伴い、銀河宇宙線に含まれる重イオンによる被曝線量の評価も重要になってきている。このような二次放射線に対する線量評価を行う際、重イオンが厚いターゲットに入射した時に生成される二次粒子、特にその透過力の強い中性子に関するデータが必要となるが、これらのデータは非常に乏しい。

本論文は、100~800MeV/nucleon の He から Xe までのイオンを入射粒子が完全に止まる厚い C, Al, Cu, Pb ターゲットに入射させ、生成される二次粒子、特に二次中性子に注目して測定を行っている。また得られた実験値は、HIC コードという重イオン入射による2次粒子生成断面積計算コードと、輸送計算コードである LCS を用いた計算と比較している。さらに、Moving Source Model を改良した式を用いた現象論的解析を行ったものであり、全文7章からなる。

第1章は序論である。

第2章では、放射線医学総合研究所の医療用重イオン加速器施設 HIMAC で行った実験に関する加速器施設の概要、測定体系、検出器、測定回路等の詳細について述べている。

第3章では、二次中性子および二次荷電粒子を弁別してエネルギー・角度分布を得るまでの解析過程について述べている。

第4章では、本研究で行った厚いターゲットからの生成粒子のシミュレーションのために、ターゲットをメッシュに区切り、HIC によりそれぞれの区間での生成量を求め、それを合算している。また He 入射の実験との比較のため LCS コードを用いたシミュレーションも行っている。

第5章では、現象論的解析として、Moving Source Model を用いたフィッティングを行っている。この式は本研究のような高いエネルギー領域では実験値を再現することができないため、この式を改良し、knock-on 反応を考慮した新しいフィッティング式を示している。

第6章では、解析の結果得られた厚いターゲットから放出された二次中性子、また一部の実験で得られた陽子、重陽子、三重陽子のエネルギー・角度分布を示している。シミュレーション計算との比較では、計算値が全体に過小評価を与え、計算モデルに問題があることを指摘している。またフィッティング式によって得られた各パラメータの系統性や、全中性子生成量の入射粒子・ターゲット核依存性についても議論している。

第7章は結論である。

以上本論文は、高エネルギー重イオンによって厚いターゲットから生成される二次粒子の情報を系統的に収集し、二次中性子スペクトルを簡便に求められる新しいモデル式を提案している。本研究は、重イオン加速器施設の遮蔽設計における線源データや宇宙環境中の重イオンによる宇宙飛行士の被曝線量評価などに非常に有用なデータを提供したものであり、加速器保健物理学、核データ工学の発展に寄与するところは極めて大きい。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格を認める。