

(続紙 1)

京都大学	博士 (情報学)	氏名	守田 利昌
論文題目	Studies on the Proton Acceleration by a Laser Pulse (邦訳：レーザーパルスを用いた陽子加速の研究)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、パルス状の高強度レーザー光 (パルスレーザー) の物質 (ターゲット) への照射によって引き起こされる、プラズマ化された物質中の陽子の加速に関する研究である。パルスレーザーを用いた陽子加速の応用においては、この加速によって生成される高速の陽子の塊が高エネルギーかつ高品質 (エネルギー分布の幅が狭い) である必要がある。したがって、そのような陽子塊を生成するための条件を求めることは重要であるが、レーザーによる陽子加速はごく小さい領域においてごく短い時間スケールで起こるので、実験によってその過程の詳細を理解することは困難である。そこで本論文では、生成される陽子塊がもつ平均エネルギーやエネルギー分布の幅のレーザー照射条件およびターゲット形状に対する依存性を、シミュレーションと理論的考察によって明らかにし、また陽子の加速機構について考察している。</p> <p>第1章では、レーザー技術のこれまでの発展に関して、とくにレーザー強度の進歩に重点を置いて概観したあと、パルスレーザーを用いた荷電粒子の加速に関する過去の研究について述べている。また、本論文で用いているシミュレーション手法であるPIC法 (particle in cell法) の考え方と具体的計算方法を紹介している。</p> <p>第2章では、レーザーを用いた陽子加速について過去に行なわれた理論的考察を概説し、とくに生成陽子塊の平均エネルギーおよびエネルギー分布とレーザー出力との理論的関係式を紹介している。また、高品質の陽子塊を生成するために有効であると考えられているダブルレイヤーターゲット (重い原子からなる層の表面に軽い原子からなる薄い層を貼り付けたターゲット) について説明している。</p> <p>第3章では、金原子からなる円板状の第1層の表面に、水素を多く含む物質からなる小さく薄い円板状の第2層を中心が一致するように貼り付けた軸対称ダブルレイヤーターゲットを考え、その中心にガウス型の強度分布をもつ高強度パルスレーザーを斜めに照射した場合に起こるターゲットからの電子の放出とそれに続くターゲット第2層からの高速の陽子塊の生成などについて、PIC法に基づくシミュレーションと理論的考察によって調べている。具体的には、レーザーの入射方向がターゲットの法線方向となす角度 θ を変化させたときの生成陽子塊の進行方向、平均エネルギー、エネルギー分布の幅などの変化を調べ、次の結果を得ている。θ を変えることによって生成陽子塊の平均エネルギーは大きく変化し、θ が約30度の場合に得られる最大の平均エネルギーは、レーザーをターゲットに垂直に入射した $\theta = 0$ の場合の約2倍となる。このようにある θ で最大の平均エネルギーを示すことは、理論的な考察から説明することができる。ただし、θ が約30度の場合の生成陽子塊のエネルギー分布の幅は垂直入射の場合に比べてかなり大きくなる。また、$\theta = 0$ の場合は生成陽子塊はターゲットの法線方向に進むが、レーザーを斜め入射した場合には、陽子塊の進行方向はターゲットの法線方向から小さな角度 ϕ だけずれる。そして、この角度 ϕ を θ と陽子塊のもつ運動量から決める式を理論的考察によって導くことができ、この式から得られる ϕ の値はシミュレーションで得られる値とよく一致する。</p> <p>次に、軸対称の円板形ダブルレイヤーターゲットの中心にパルスレーザーを斜め</p>			

に適切な角度で入射した場合には、上で述べたように生成陽子塊のエネルギー分布の幅が垂直入射の場合に比べてかなり大きくなり、応用上好ましくない。そこで第4章では、 θ を30度に固定して、ダブルレイヤーターゲットの形状が軸対称でない場合、およびレーザーの照射位置が軸対称ターゲットの中心からずれている場合についてもシミュレーションを行い、生成陽子塊のエネルギー分布の幅のターゲット形状やレーザー照射位置に対する依存性を調べて次の結果を得ている。まず、レーザーを軸対称ターゲットの中心に斜め入射した場合に生成される陽子塊中の高エネルギーの陽子は、この陽子塊の中心からずれた位置で観測される。そして、レーザーを斜めに入射したときにエネルギー分布の幅が広がる現象は、この高エネルギーの陽子がターゲット第2層の中心からずれた位置から放出されることと関係づけられる。このことを念頭において、レーザー照射位置あるいはターゲット第2層の位置を適切にずらしたシミュレーションを行うと、生成陽子塊のエネルギー分布の幅を減らすことができる。具体的には、ターゲット第2層の中心を第1層の中心から適当な量だけずらした場合には、第2層の中心が第1層の中心と一致する軸対称の場合に比べて、生成陽子塊のエネルギー分布の幅は約半分となる。また、軸対称ターゲットに対するレーザー照射位置をターゲット中心から適当な値だけずらすことによっても、生成陽子塊のエネルギー分布の幅を約半分に減らすことができる。さらに第4章では、ターゲット内の陽子の加速機構と生成陽子塊のエネルギー分布に幅が生じる理由についても考察し、陽子を加速する電場の時間変化を詳細に調べることによって、レーザーの作る非一様電場のポンデロモティブ力による斜め方向への電子の放出とこの電子によるクーロン力が、陽子を非一様に加速し生成陽子塊のエネルギー分布の幅をもたらす大きな要因となっていることを示した。

第5章では、本論文で得られた結果についてまとめて述べている。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、パルスレーザーの物質（ターゲット）への照射によって引き起こされる、物質中の陽子の加速に関するシミュレーションと理論的考察に基づく研究である。パルスレーザーを用いた陽子の加速は重粒子線治療やレーザー駆動小型陽子加速器などの重要な応用分野をもつが、これらの応用のためには、この加速によって生成される高速の陽子塊が高エネルギーかつ高品質（エネルギー分布の幅が狭い）である必要がある。したがって、本論文で調べている、生成陽子塊の平均エネルギーやエネルギー分布の幅のレーザー照射条件およびターゲット形状に対する依存性、およびレーザー照射による陽子の加速機構は、重要な研究テーマであると考えられる。

パルスレーザーを用いた高速の陽子塊の生成に関するこれまでの研究では、高エネルギーかつ高品質の陽子塊を生成するための方法として円板状ダブルレイヤーターゲットを用いることが有効であると考えられていた。そして、この種のターゲットの法線方向からレーザーを入射した場合については過去に研究例があるが、ターゲットの斜め方向からレーザーが入射した場合の高速の陽子塊の生成に関する系統的な研究は過去に行われておらず、本論文においてそのような研究を詳細に行ったことはオリジナルな点として評価される。

次に本論文では、軸対称ダブルレイヤーターゲットの中心に高強度パルスレーザーを斜めに照射する場合に、レーザーの入射方向がターゲットの法線方向となす角度 θ を変化させると生成陽子塊の平均エネルギーは大きく変化し、 θ が約30度の場合に得られる最大の平均エネルギーは、レーザーをターゲットに垂直に入射した場合の約2倍となるという結果を得ている。また、 θ を30度に固定して、ターゲット第2層の中心を第1層の中心から適当な量だけずらした場合や、軸対称ターゲットに対するレーザー照射位置をターゲット中心から適当な値だけずらした場合には、軸対称ターゲットの中心にレーザーを照射する場合に比べて、生成陽子塊のエネルギー分布の幅は約半分減少し、高品質の陽子塊が生成されるという結果を得ている。これらの結果は、高エネルギー、高品質の陽子塊を生成するための具体的方策を与え、かつどの程度改善されるかも具体的に示している点で高く評価される。

また、ターゲット内の陽子の加速機構と生成陽子塊のエネルギー分布に幅が生じる理由について、陽子を加速する電場の時間変化を詳細に調べることによって詳しく考察している点や、陽子塊の進行方向がターゲットの法線方向から小さな角度だけずれることを理論的に考察している点も評価できる。

以上のように、本論文は、パルスレーザーのターゲットへの斜め照射によって生成される高速の陽子塊の特性を、いくつかのレーザー照射条件およびターゲット形状に関して調べたものであり、本論文の研究によって、パルスレーザーによる陽子の加速機構と高速の陽子塊の生成過程に関する理解が大きく進展したと判断される。

よって、本論文は博士（情報学）の学位論文として価値あるものと認める。

また、平成 22 年 4 月 16 日論文内容とそれに関連した口頭試問を行った結果合格と認めた。