

学位審査報告書

（ふりがな） 氏名	いわやま ひろし 岩山 洋士
学位（専攻分野）	博士（理学）
学位記番号	理博第 号
学位授与の日付	平成 年 月 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） Interaction of rare gas clusters with intense extreme-ultraviolet laser pulses: Multiple ionization and charge redistribution 希ガス・クラスターと極端紫外レーザーパルス光との相互作用： 多価イオン化及び電荷再分配	
論文調査委員	（主査） 八尾 誠 教授 松田 祐司 教授 太田 隆夫 教授

理学研究科

京都大学	博士 (理学)	氏名	岩山 洋士
論文題目	Interaction of rare gas clusters with intense extreme-ultraviolet laser pulses: Multiple ionization and charge redistribution		
(論文内容の要旨)			
<p>クラスターは、原子・分子と凝縮相 (固体・液体) の中間相として近年注目されているが、同時に、光と物質の相互作用を調べるための理想的な系であると考えられている。その理由として、単に構成原子個数を大幅に変えられることだけでなく、孤立系であるために吸収されたエネルギーの散逸が抑制されることが挙げられている。このため、特に典型的な絶縁性物質である希ガス・クラスターを研究対象として、強力な超短パルスが得られる近赤外レーザーとの相互作用について多くの研究が為されており、超高光電場下でのトンネルイオン化やプラズマ加熱などの興味深い現象が観測され、理論的な理解も進んでいる。しかし、この近赤外域での考え方は、短波長の極端紫外域には適用することはできない。よって、極端紫外域での光と物質の相互作用については、少数の先行研究はあるものの、まだまだ未開拓な分野である。</p> <p>申請論文では、大型放射光施設 Spring-8 内に完成したばかりの極端紫外自由電子レーザー (EUV-FEL) を利用して、EUV-FEL パルス光と希ガス・クラスターとの相互作用について実験的研究を行っている。研究内容は二つに大別され、前半は波長 $\lambda \cong 61\text{nm}$ の比較的弱い EUV-FEL パルス (強度 $I \cong 1.3 \times 10^{11}\text{W/cm}^2$) を、平均原子個数 $\langle N \rangle = 10 \sim 600$ のアルゴン・クラスターに照射した場合のイオン化や脱励起に関する実験研究であり、後半は波長 $\lambda \cong 51\text{nm}$ の強い EUV-FEL パルス ($I \leq 2 \times 10^{13}\text{W/cm}^2$) を、平均原子個数 $\langle N \rangle = 2000, 10000, 50000$ のキセノン・クラスターに照射した場合の研究である。いずれの場合でも、EUV-FEL パルス光を吸収したクラスターは多重電離し、それによって生じる静電反発力により解離 (クーロン爆発) して、原子レベルの多数の子イオンになる。実験には、申請者が共同研究者と共に新たに開発した、クラスター作製装置、飛行時間型質量分析器、多重イオン三次元運動量計測装置などが用いられている。</p> <p>まず、前半において、小さなアルゴン・クラスター (平均構成原子個数 $\langle N \rangle \leq 200$) では、ほぼ $\langle N \rangle$ に比例して、放出される子イオン (1 価イオンのみ) の平均運動エネルギーが増大することを観測している。これは、クラスターが吸収する光子数が $\langle N \rangle$ と共に増加するためである。しかし、$\langle N \rangle$ が 200 を超えると、平均運動エネルギーの直線的な増加が次第に抑制され飽和する傾向を観測している。これを説明するため、申請者はまず、クーロン相互作用とファンデルワールス相互作用を取り入れた分子動力学シミュレーションを行い、クラスター全体が多価になれば次第に光電子放出が抑制されることを示している。その際、イオン化のメカニズムについても詳細な考察を加え、近赤外域でのトンネルイオン化等ではなく、1 光子吸収によると提唱している。さらに、クーロン爆発前後のエネルギーバランスを考えることにより、この抑制現象を理論的に説明している。具体的には、爆発前に蓄えられたイオン化エネルギーとクーロンエネルギーが、爆発後に運動エネルギーに転換されると考え、それを実験から得られる運動エネルギー分布と結びつけることにより、定量的な解析を行っている。</p> <p>後半では、まず強い光子場を反映して、単一キセノン原子が多数の光子を同時吸収して 4 価までの多価イオン (すなわち、$z \leq 4$ の Xe^{z+}) になることを観測している。但し、他のイオンからの力を受けないため、運動エネルギーは殆どゼロであった。一方、$\langle N \rangle = 2000$ クラスターでは、クラスター全体が吸収する光子数が、単一原子に比べて飛躍的に増加するにも関わらず、$z \geq 2$ の Xe^{z+} は現れず、1 価イオン Xe^+ がゼロから数十電子ボルトまでの非常に広い運動エネルギー分布で放出されることを観測している。これは、クラスター内に発生した多数の電荷が、光吸収原子に留まることなく、クラスター内に再分配されることを意味している。さらに、クラスターが $\langle N \rangle = 10000$ 以上に大きくなると、1 価イオンの運動エネルギー分布がますます広がると同時に、再び $z \geq 2$ の Xe^{z+} が出現することを見出している。しかし、この多価イオンは孤立原子から発生するものとは異なり、数十電子ボルト以上の大きな運動エネルギーをもつものが大半であった。</p>			

一般に、クーロン爆発後の運動エネルギーは、そのイオンが爆発直前に周囲のイオンから受けるクーロン力のベクトル和に支配される。よって、クラスター中心付近のイオンは、クーロン力の相殺効果のため小さな運動エネルギーで放出されるが、クラスター周縁のイオンは大きな運動エネルギーで放出される傾向にある。申請者はこれを根拠にして、巨大キセノン・クラスターで観測された1価イオンおよび多価イオン運動量分布から、爆発直前には電荷再分配によってクラスター周縁に電荷が集まり易いとするモデルを提唱している。さらにそれを理論的に検証するため、アルゴン・クラスターで用いた爆発前後でのエネルギーバランスの考え方を、2価イオンの存在も許してキセノン・クラスターに適用し、その結果、非常に簡単なモデルにも関わらず、クラスターサイズがある大きさ以上になると2価イオンがクラスター周縁に出現することを示している。最後に、このモデルの汎用性を確かめるために、アルゴン・クラスター ($\langle N \rangle = 1000$) とネオン・クラスター ($\langle N \rangle = 4000$) から放出される2価イオンの運動エネルギー分布の測定も行い、その分布形状が、申請者のモデルで特徴付けられることを実証している。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

今、日本、アメリカ、ヨーロッパでX線自由電子レーザー (XFEL) の開発競争が繰り広げられている。その主要目的は、生体関連物質など容易に結晶化しない物質の構造解析であるが、その手法のベースとなるX線と物質の相互作用についても未開拓な問題である。我国では XFEL 建設に先立ち、プロトタイプである極端紫外自由電子レーザー施設 (EUV-FEL) を建設し、2008 年から実験研究に利用されている。

申請者は数名の共同研究者と共に、この EUV-FEL の黎明期から利用実験に従事し、実験技術開発における多くの困難を、グループの最前線に立って克服してきている。その中には、クラスター作製装置の設計・製作、EUV-FEL パルスとクラスタービームとの空間的・時間的交差のための手順確立、クーロン爆発で生成される膨大な数のイオンの高効率検出法の確立など、クラスター実験の成否の鍵となる、非常に重要な要素技術の開発が含まれている。特に、キセノン巨大クラスター作製のために、クラスターをパルスの発生させ、EUV-FEL パルスと同期をとることに成功している。また、従来からの粒子検出法では、一つの粒子を検出した後に、不感時間と呼ばれる次の粒子を検出できない時間帯が発生することが知られているが、クラスターからのクーロン爆発の際には、同一の質量・電荷を有する多数のイオンが検出器に到達するため、不感時間の問題を克服できない限り信頼性の高い実験成果は得られない。そこで申請者は共同研究者と共に、“不感時間ゼロ”の新しい計測方法を、世界に先駆けて開発している。具体的には、高速デジタイザを用いて検出器からの信号をそのままコンピュータに格納し、その時間パターンから検出粒子の質量および三次元運動量に関する情報を抽出する方法を確立している。

申請者は、上述の実験技術や解析法の積み重ねの結果、アルゴン・クラスターでは比較的弱い光子場にも関わらず、クラスターサイズ増大に伴う光電子放出抑制効果を見出し、さらにキセノン・クラスターでは原子、小クラスター、巨大クラスターで、生成されるイオン種やその運動エネルギー分布が特徴的な変化を遂げることを発見している。さらに申請者は、実験結果を説明するため、分子動力学シミュレーションと理論モデルの提案を行っている。特に、理論モデルは、従来からの原子・分子物理学に基礎を置く微視的観点からのものとは異なり、エネルギーバランスという大局的観点からクラスター内の不均一分布等を捉えたもので、複雑な微視的過程の知識なしに、実験結果を特徴付けられるという点で、極めて優れたものである。

本申請研究で培われた実験技術、解析方法、現象論は、より短波長である XFEL 光と物質の相互作用を考える上でも、道標となりうるものである。

よって、本論文は博士 (理学) の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 22 年 1 月 14 日に論文内容とそれに関連した口頭試問を行った。その結果、合格と認めた。

要旨公開可能日： 年 月 日以降