

超高強度レーザーによるイオン化の物理とその制御

畑 昌育

量子科学技術研究開発機構 関西光量子科学研究所

1. はじめに

超高強度レーザーにより加速される荷電粒子には、がん治療やレーザー核融合、イオン加速器の入射器といった多くの応用の可能性がある[参考文献 1,2]。さらに、レーザーによって生成・加速される高価数電離重イオンの場合には、重イオン衝突実験に代表される核物理への応用において大きな魅力がある[参考文献 2]。重イオン加速器は多くの加速器の複合体として構成されるが、この加速器の上流において重イオンを高価数電離状態にしておくことは、下流の加速器における加速効率を飛躍的に高めるため、非常に有用である。従来の重イオン加速器では、この前段における電離度が数価程度であり、仮に電離度を数十価にできたとするならば、その加速効率は単純に10倍となり、装置のコンパクト化、低コスト化が見込め、冒頭に述べた応用研究の大きな進展に繋がる。そのため、重イオン加速器に使われている従来のイオン源に代わる新しいイオン源としてレーザー加速重イオンは非常に有望視されており、Rare Isotope Beam Facilitiesにおいてレーザー加速重イオンの技術を使う提案もなされている[参考文献 2]。

実際にレーザー加速イオンを次世代の加速器に利用する場合、レーザー加速イオンを精確に制御できなければならない。しかしながら、レーザー駆動イオン加速の如何なる手法もイオン加速器からの要求を完全には満たせていない。イオン加速器に利用する上では、レーザー加速イオンが準単一高価数電離状態、準単色エネルギー分布であることが望ましい。ここで、準単一高価数電離状態とは、電離度分布において特定の高価数にイオンが局在している状態を指す。仮に、イオンの

電離過程を制御して準単一高価数電離状態を作ることができたとすると、同一の加速場があれば加速イオンのエネルギー分布は準単色になる。したがって、準単一高価数電離状態を作ることが肝要である。そこで、本研究では、超高強度レーザーと固体ターゲットとの相互作用において、イオン化過程の物理を解明し、任意のイオンを準単一高価数電離状態で引き出す(加速する)手法の確立を目指す。本報告書では、その第一歩として実施した、金のような重イオンの電離過程・加速過程について大規模計算機シミュレーションを駆使して調べた結果について報告する。

2. 超高強度レーザープラズマ相互作用におけるイオン化過程

本研究では、超高強度レーザーによるイオン加速機構として TNSA (Target Normal Sheath Acceleration) を想定する。TNSA によるイオン加速では、薄膜ターゲットにレーザーを照射してターゲット前面で高エネルギー電子を発生させる。この高速電子が薄膜裏面を飛び出す際に励起される準静的電場(シース場)によって薄膜裏面のイオンを加速する。そのため、TNSA の加速効率を高めるにはシース場に高い価数まで電離したイオンを送り込む必要がある。高強度レーザー照射下のプラズマ中では、強い電場による電場電離と高温・高エネルギーの自由電子が束縛電子と衝突することにより電離する衝突電離の2つの過程が重要である。どちらの過程がどこで支配的になるかは、レーザー照射条件およびターゲットの材質や厚さなどのターゲット条件によることがわかってきた[参考文献 3]。

図1に超高強度レーザープラズマ相互作用に

おけるイオン化過程をまとめた。図中の過程①および③は、電場電離によるものであるが、TNSA の場合、過程①によって電離したイオンはターゲット前面の吹き出しプラズマであるプリプラズマ中で生成されるため、裏面のシース電場によって加速されることはない。そのため、電場電離でイオンを高価数状態にするには、過程③を利用する。また、過程②および④は電子衝突電離によるものである。高強度レーザーによって作られる高エネルギー電子は、MeV を超えるエネルギーまで加速されており、固体密度のターゲットでもサブミクロン薄膜ではあまり衝突を起こさず電離頻度は小さい。そのため過程②によって高価数のイオンを大量に作ることは難しい。一方、過程④は、超高強度レーザーによって keV 程度まで温まったバルク電子による衝突電離であるが、こちらは電離確率が高く、大量の高価数のイオンを作ることができる。しかしながら、バルク電子の加熱はレーザー照射面側から起きるため、TNSA による取り出しを試みるには薄膜の厚さを十分に薄くする必要がある。過程⑤は、プラズマからの輻射による光電離であるが、この過程は、薄膜ターゲットにおいては、他のイオン化過程に比べて支配的ではないため、考慮しない。以上の議論から、過程③と④のどちらかが高価数電離イオンを取り出す上で有効であることがわかる。

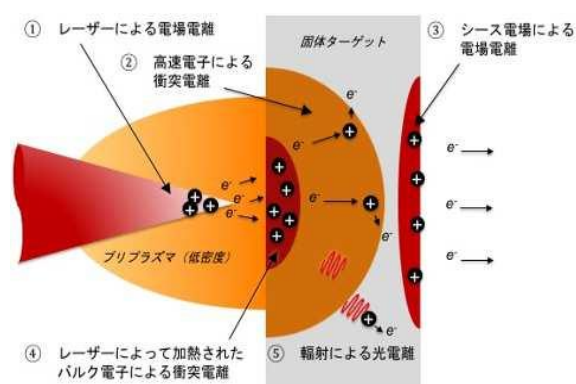


図1：超高強度レーザープラズマ相互作用におけるイオン化過程

3. 二次元大規模並列計算による金イオン加速シミュレーション

本研究では、金薄膜ターゲットを用いた金イオン加速シミュレーションを通して、電離過程③と④について詳細に調べることを目的とする。シミュレーションには、クーロン衝突、衝突電離・電場電離の物理モデルを組み込んだ多次元電磁粒子コード PICLS [参考文献 4] を用いる。

3.1 シミュレーションセットアップ

レーザーの時間・空間プロファイルはガウシアンとして、強度、スポット径 (FWHM)、パルス幅 (FWHM) を $3.2 \times 10^{22} \text{ W/cm}^2$ 、 $1.5 \text{ }\mu\text{m}$ 、 30 fs とした。ターゲットとして厚み 200 nm の金を採用した。ターゲット前面にプリパルス生成プレプラズマとして、スケール長 28.3 nm の指数関数型密度プロファイルをもたせて金イオンの密度を $0.003n_{\text{cr}}$ から $30n_{\text{cr}}$ まで上昇させて固体密度 $38.4 n_{\text{cr}}$ の金に接続させた。ここで、 n_{cr} は非相対論的強度のレーザーが伝播できなくなる密度、すなわち臨界密度を表す。このような条件で、レーザーを標的に対して入射角 45° で照射し、金イオンの電離・加速過程を調べた。

3.2 加速金イオンの特性

図2にシミュレーションによって得られた加速金イオンのエネルギースペクトルとエネルギーごとの最終イオン化過程の割合、そして、最終的なイオン化過程が衝突である場合と電場である場合の平均電離度のエネルギー依存性を示す。この結果から、 $\sim 13 \text{ MeV/u}$ 以上の金イオンの最終イオン化過程は衝突電離が支配的で、電場電離では $51+$ 程度までしか電離できないことが明らかになった。また、低い電離度が原因で電場電離によってイオン化したイオンは最大でも 15 MeV/u 程度までしか加速されなかった。他方、衝突電によって高価数に電離されものは最大で 26 MeV 程度まで加速されていた。

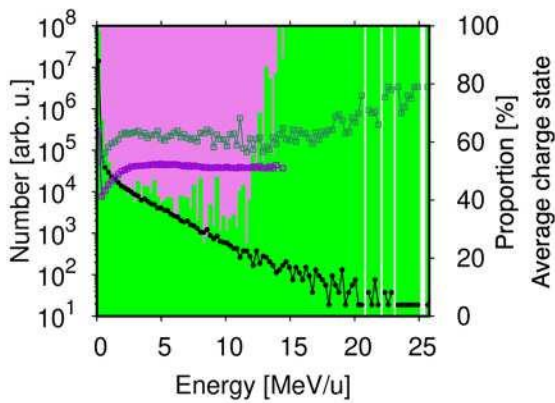


図2：加速された金イオンのエネルギースペクトル（黒線）、最終イオン化過程が衝突電離（黄緑）または電場電離（桃色）の割合、および、それぞれのイオン化過程ごとの平均電離度（緑線：衝突電離、紫線：電場電離）

3.3 シースによる電場電離とバルク電子の加熱による衝突電離

レーザーピーク照射時の裏面シース場を計測したところ 90 TV/m 程度の準静的電場が生じており、パルス幅程度の時間の間、持続していることがわかった。BSI（Barrier Suppression Ionization）モデル [参考文献 5] を使ってこの電場で到達可能な電離度を求めると 55+ となった。しかし、前節の結果から、最終的に電場電離によって電離される金の電離度は 51+ に留まっており 55+ には届いていなかった。

次に、レーザーピーク照射時の金薄膜ターゲットの裏面側バルク電子温度を 100 keV 未満の電子の平均エネルギーから見積もった。図3に、レーザーピーク照射時のバルク電子温度（単位は eV）の空間プロファイルを示す。図から、レーザー照射部（ $X = 30 \mu\text{m}$, $Y = 30 \mu\text{m}$ ）においてバルク電子が 40 keV 程度まで加熱されていることがわかる。これらの熱的な電子は金イオンに衝突することができればエネルギー的には 77+ まで電離することが可能である。前節でみたように、最終的に衝突電離でイオン化した金イオンの平均電離度は 60+ 程度から 79+ まで分布しており、衝突電離によって電場電離より

も高価数に金が電離されるために、最終的に電場電離で電離している金イオンの電離度が BSI モデルを使った見積もりと合わなくなっていると考えられる。

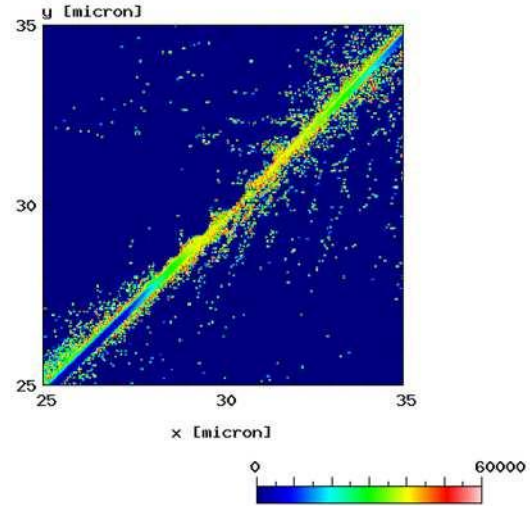


図3：レーザーピーク照射時のバルク電子温度の空間プロファイル（単位は eV、レーザーは左側境界から X 軸に沿って平行に照射、焦点位置は $X = Y = 30 \mu\text{m}$ ）

4. おわりに

本研究では、加速手法としてよく知られている TNSA を採用し、現在の技術で到達可能な超高強度レーザーのパラメータを使って、原子番号の大きい金のレーザー駆動イオン加速シミュレーションを実施し、その電離過程・加速過程について調べた。その結果、厚み 200 nm の金ターゲットを超高強度フェムト秒レーザーで効率的に加熱し、衝突電離が支配的な状態を作ること、高価数の金イオンを取り出し加速可能であることを明らかにした。

本研究では、加速手法としてよく知られている TNSA を採用したため、薄膜ターゲットと超高強度レーザー装置さえあれば、容易に実験が可能である。このことは、本研究の与えるインパクトに直結している。今後、本研究の結果が実験的に可能であるかが検証されることが待たれる。また、高価数・高エネルギーの重イオン

を作ることが可能であるため、重イオン加速器の入射器としてレーザー駆動イオン加速器が使われるといったことも期待したい。

参考文献

- (1) H. Daido, et al., Rep. Prog. Phys. **75**, 056401 (2012).
- (2) M. Nishiuchi, et al., Phys. Plasmas **22**, 033107 (2015).
- (3) M. Nishiuchi, et al., Phys. Rev. Research **2**, 033081 (2020).
- (4) R. Mishra, et al., Phys. Plasmas **20**, 072704 (2013).
- (5) S. Augst, et al., J. Opt. Soc. Am. B **8**, 858 (1991).