

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05236

研究課題名(和文)重イオンの低主量子数束縛電子に対する極相対論的光電離の研究

研究課題名(英文)The study on the optical field ionization from a low quantum principal number bound state of heavy ions in extremely relativistic high field

研究代表者

近藤 公伯 (KONDO, Kiminori)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・関西光科学研究所 光量子科学研究部・部長(非常)

研究者番号：80225614

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、まず、研究代表者が所属する量研関西研のパワーレーザーJ-KARENの高度化を完了し、 $1e22$ W/cm²の集光強度を達成することができた。この強度下での原子のイオン化は従来のトンネル電離とは異なることが予測されており、引き続いてイオン化の実験を行う予定であったが、実際にはレーザー高度化に時間を要することになり、実験は薄膜ターゲット照射を実行するところまでに留まった。ターゲット照射による多価イオン発生の研究に関しては、残念ながらデータ解析を行っている状況にあり、まだ十分な結論に至ることはできていない。

研究成果の概要(英文)：The power laser in KPSI, QST, called J-KAREN, has been upgraded to generate $1e22$ W/cm² in the target chamber. In this extremely high optical field, the field ionization mechanism will be different from the conventional AC tunneling ionization theory. Then, it has been planned to perform field ionization experiment. However, it has been taken too long term to do it. Although the thin foil target has been shoot at such extremely high field, the analysis on the highly charged ionization is still undergoing.

研究分野：高強度レーザー科学、プラズマ科学

キーワード：極相対論的光イオン化 トンネル電離 パワーレーザー

1. 研究開始当初の背景

シングルショットの卓上型高出力レーザーがペタワット (PW:10¹⁵ W) のピーク出力を記録して十年以上が経過し、PW 級のレーザー装置は 1 Hz の繰り返し運転も可能になっている。このような PW 級のレーザーパルスを、理論的境界である数ミクロン程度の大きさまで絞り込めば、ピーク照射強度は 10²² W/cm² 級が実現でき、そのような強い光で発生する相対論的プラズマについては、レーザー駆動イオン加速や高速点火慣性核融合の研究において極めて重要な役割を果たすので、精力的に研究が行われている。一方で、照射強度 I の直線偏光の光電磁界の瞬時電界 E は $I = c \epsilon_0 |E|^2$ という関係より、 $E[\text{V/m}] = 1.9 \times 10^3 \cdot (I[\text{W/cm}^2])^{0.5}$ と表せ、例えば集光強度が 10²² W/cm² の場合、対応する瞬時電界の強さは 200 TV/m 程度と評価できる。水素原子の基底状態にある電子が感じるクーロン場は、ボーア半径 a_B により $(1/4\pi\epsilon_0)(e/a_B^2) = 0.51 \text{ TV/m}$ と評価できる。従って、PW レーザーで発生可能な電界はその 400 倍の強さを持つことになる。このような光の電磁場下では、ある程度高い原子番号の重イオンについても、低主量子数軌道の束縛電子を光電離することが可能と考えられ、90年代に入って、光によるトンネル電離は ADK 理論、あるいはより現象論的な BSI 理論で説明できるという理解になっている。BSI 理論は、光の瞬時電界により原子核からのクーロンポテンシャルが押し下げられ、それが束縛電子のイオン化ポテンシャル I_p とバランスするときの光強度をイオン化閾値強度 I_{th} とするものであって、 $I_{th}[\text{W/cm}^2] = 4.0 \times 10^9 \cdot (I_p[\text{eV}]^4/Z^2)$ と書ける。図に、He から Xe までの各希ガス原子の I_{th} をイオン化ポテンシャル I_p に対してプロットした。例えば、10²² W/cm² の光強度下では、He、Ne、そして Ar は完全電離まで到達し、Kr は主量子数 2 の L 殻の電子までがトンネル電離するものの、K 殻の電子は束縛状態に留まることが分かる。また、Xe は L 殻電子が残るかどうかという程度までイオン化が進むことが見て取れる。

ところで Reiss は $(I_p/2U_p)^{0.5}$ なる Keldysh パラメータの条件が極限になった場合、すなわち 0 の極限では、トンネル電離が有効な $\ll 1$ であるにも関わらず、ADK 理論や BSI 理論の中の描像が必ずしも成り立たなくなる可能性があり、その電離は ADK 理論では評価できなくなることを指摘した。ここで 2U_p は、光による自由電子のジグザグ運動の平均値であり、相対論因子 γ を用いて $2U_p = (\gamma - 1)mc^2$ と書ける。さらに $\gamma = (1+a_0^2)^{0.5}$ であり、a₀ は光電磁場の規格化ベクトルポテンシャルの大きさで、 $a_0 = eE/mc\omega$ であり、 ω は光の角周波数である。光が十分に強いとき、 $\gamma \sim (I_p m/e^2)^{0.5} \cdot (\omega/E)$ となり、結局 0 の極限は、0 もしくは E の極限において顕在化すると言える。前者は

光が DC 電磁界とみなせること、すなわち光の磁界の影響を無視して扱うことを意味しており、後者は電界が十分に大きい場合に相当する。後者については、 $\gamma \gg 1$ であり、 $(p/mc) \gg 1$ となるので、自由電子の運動に対してローレンツ力が影響、すなわち光の磁界の影響が無視できなくなることを意味している。これに対し、ADK 理論や BSI 理論では、光磁界の影響を無視してトンネル電離の評価をするものであり、光磁界の影響が現れる可能性がある 0 の領域で、この有効性を実験及び理論により検討することは有意義であるといえる。ところが、このような極めて強い光電磁場におけるイオン化現象の観測は、a₀ ~ 1 であるような相対論的光強度下までは行われてきたが、実質的に、a₀ >> 1 の状態を実験室に発生して光電離の様子を観測した例はない。

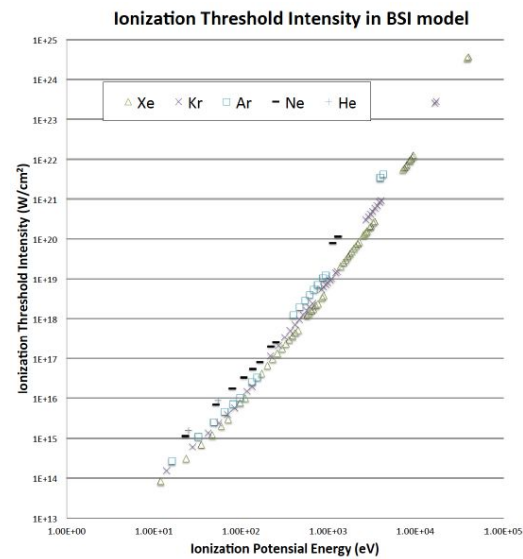


図1 BSIモデルによるイオン化閾値

2. 研究の目的

以上のような背景の中、研究代表者が所属する量子科学技術研究開発機構(量研)関西光科学研究所(関西研)では、研究提案当初、研究所が有する大型レーザー装置 J-KAREN であるレーザーの高度化が進められており、かつて出力が 200 TW であったのが、高度化に伴って 1 PW まで引き上げられ、またその集光性能の高度化も合わせて行うので、集光強度 10²² W/cm² でのターゲット照射実験が可能になることが予定されていた。このような状況を踏まえ、本研究では、J-KAREN レーザーをまずは高度化して、その結果 $\gamma > 10$ となる、すなわち $\sim 10^{21} \text{ W/cm}^2$ を上回る光強度を実験的に実現し、様々な原子、特に重原子核イオンの光電離の様子を、これまで誰も実行してこなかった極相対論的な光を使って観測することを目指した。これにより、a₀ >> 1 の領域において発生イオンとレーザー照射強度の関係を調べ、ADK 理論や BSI 理

論との比較を通じて、Reiss の指摘の妥当性を明らかにしたいと考えた。具体的には、原子の扱いやすさから、希ガス原子として Ar、Kr、Xe のイオン化の様子を観測する。また、レーザープラズマ状態を利用することで、より高い原子番号の金や鉛などについても、同様の観測をすることを目指すことを目標とした。

3. 研究の方法

まずは関西研の J-KAREN レーザーの高度化を完了し、ターゲット照射の 10^{22} W/cm² を可能にする。その後、集光強度のキャンペーン実験に提案し、 $\sim 10^{22}$ W/cm² の光強度における Ar、Kr、Xe のイオン化の様子を、Time of Flight(TOF)分析法やトムソンパラボラ分析器等により観測し、ADK 理論や BSI 理論と比較する予定であった。

4. 研究成果

今回の研究では、J-KAREN の高度化を完了しターゲット照射実験を実行するところまでに留まった。ターゲット照射による多価イオン発生に関しては、残念ながらデータ解析を行っている状況にあり、まだ十分な結論に至ることはできていない。一方で、J-KAREN の高度化に関しては、最も重要とされる 10^{22} W/cm² の集光強度を達成することができた。以下に、その詳細を示す。

上述のように J-KAREN レーザーは、かつてピーク出力 850 TW、すなわち 0.85 PW を出力できる卓上型レーザーとして、2003 年に世界に先駆けて開発された装置であるが、実際にその装置を運用するにあたっては、パルス圧縮に用いる回折格子の損傷のことや、直径 10 cm 程度の比較的大口径のビームをターゲットまで伝送する際の時間空間的コヒーレンス、すなわち空間波面やスペクトル波面の不揃いが生じることから、空間的に一部分を着目したときのフーリエ限界パルスに近いパルス幅は実現したものの、空間全体に渡っての時間空間位相の扱いは極めて問題があった。

実際にこの問題はパワーレーザーの応用をしていく上で大いに問題であり、出力されたビームの一部を切り出してフーリエ限界パルスを計測し、また、パワーメーターで 1 ショットあたりのパルスエネルギーを測って、単純にピーク出力を算出し、得られたピークパワーを誇るような開発研究が横行した。しかしながら実際にレーザーを使って電子加速やイオン加速のような実験を行うには、ビーム全体での位相のコヒーレンスが完璧に揃っている必要があるため、これはパワーレーザー科学の分野の大きな問題点であった。

本研究では、このようなパワーレーザーを究極の性能で使って初めて発生できる 10^{22} W/cm² の集光強度下でのイオン化特性を実験的に明らかにすることが目的であった

め、ここでの高度化は、ピーク出力が大口径のレーザービーム全体について成り立ち、尚且つ大口径ビームの空間波面が揃っている状態を、かつての最大パワーレベルで実現することを目指した。

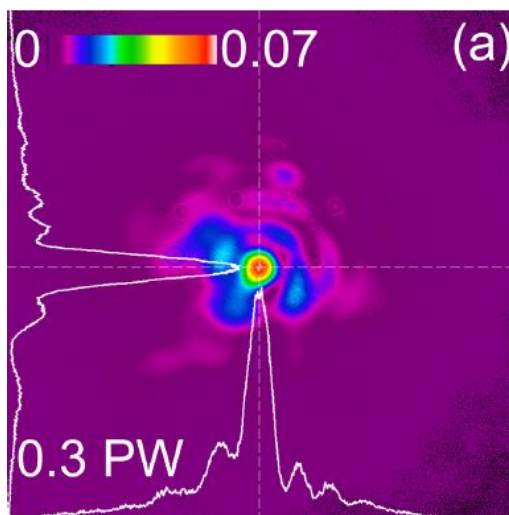


図2 高度化以前の集光パターン

まず、図2に J-KAREN の高度化以前の集光パターンを示した。一見エネルギーは一点に集まっているように見えるが集光点の周囲には明らかに明るい部分が見られ、光エネルギーが理想的に一点に集まっていないように見える。この結果は高度化に伴って導入したレーザービームの波面センサーと大口径の変形鏡を用いて、CW のアライメント用単色レーザーを用いるある程度理想的に一点に集光できるアライメントを行った上で取得した集光パターンである。この場合、レーザービームの空間強度パターンからフーリエ変換で求まる理想的に集光状態が作られたときの集光点のピーク強度と実際に光を集光して、それを高性能の対物レンズで拡大し、CCD カメラで取得したときのピーク強度の比をストレール比というが、その比が 0.1 程度にしかならないと言う結果が得られた。

このことは単色レーザービームと帯域の広い極短パルスレーザーの違いを反映した結果であり、すなわち PW レーザーは多くの周波数成分を含んでいるため、そのような周波数成分が時間空間的に全て揃わないと理想的な集光は不可能であるからである。このことは J-KAREN レーザーシステムの増幅段の段間に設けたビーム拡大系に透過型のレンズを用いたことに起因することがわかった。すなわちレンズは周波数が異なる、すなわち色が異なればそれに対する屈折率が異なるため、レンズ系を通った後で、レーザーパルスの色による拡がり角に有意な差が生じるためである。この対策として、拡大系を反射光学系で尚且つ無収差となる配置にすることで、この問題点を解決した。この結果、

最終的に得られた集光パターンを図3に示した。図2に比べエネルギーの集中度は明らかに増しており、このときのPWパルスのストレール比は0.54であった。理想的には0.8程度が欲しいところであるが、パルス圧縮器の現在の調整精度では、ほぼ限界の値となった。

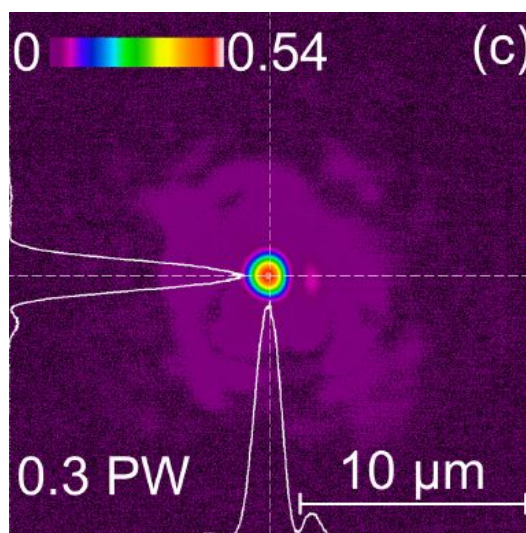


図3 高度化後の集光パターン

以上の結果から、このような現時点での最高性能の集光をターゲット上で実現できれば、J-KARENを用いれば 10^{22} W/cm²の照射強度でターゲットとの相互作用の研究が行えるということになった。

このような状況下で薄膜ターゲットを照射し、現在のところ陽子線で最大エネルギー54 MeV、炭素線で12 MeV/核子が得られている。当該報告書執筆時点で、イオン加速実験を進めており、いずれ目的としていた極相対論強度下での低主量子数束縛電子の光イオン化特性を実験的に取得できるように考えている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計17件)

A. Pirozhkov, K. Kondo, et al., “Burst intensification by singularity emitting radiation in multi-stream flows”, *Sci. Rep.*, 7, 2018, 17968. (査読有り)

M. Nishiuchi, K. Kondo, et al., “Ion acceleration experiment with the high intensity, high contrast J-KAREN-P laser system”, *Rev. Laser Engineering*, 46, 2018, 145-147. (査読有り)

N. Dover, K. Kondo, et al., “Scintillator-based transvers proton beam profiler for

laser-plasma ion sources”, *Rev. Sci. Inst.*, 88, 2018, 73304. (査読有り)

E. Dalimier, K. Kondo, et al., “X-ray spectroscopy of super-intense laser-produced plasmas for the study of nonlinear processes comparison with PIC simulation”, *J. Phys.*, 810, 2017, 12004. (査読有り)

A. Boldarev, K. Kondo, et al., “Numerical modeling of cluster targets for their optimization in femtosecond-laser-cluster-driven experiments”, *Laser and Particle Beams*, 35, 2017, 397-408. (査読有り)

S. Jinno, K. Kondo, et al., “Characterization of micron-size hydrogen clusters using Mie scattering”, *Opt. Express*, 25, 2017, 18774-18783. (査読有り)

K. Kondo, W. Utsumi, M. Kando, M. Nishikino, R. Itakura, H. Kiriyama, “High Power Laser Facilities in Kansai Photon Science Institute”, *Quantum Beam Science*, 1, 2017, 1-12. (査読有り)

A. Pirozhkov, K. Kondo, et al., “Approaching the diffraction-limited, bandwidth-limited Petawatt”, *Opt. Express*, 25, 2017, 20486-20501. (査読有り)

Y. Miyasaka, H. Kiriyama, M. Kishimoto, M. Mori, M. Kando, K. Kondo, “Development of stable seed pulses for optically synchronized optical parametric chirped-pulse amplifier pumping”, *レーザー研究*, 45, 2017, 108-111. (査読有り)

A. Yogo, K. Kondo, et al., “Boosting laser-ion acceleration with multi-picosecond pulses”, *Sci. Rep.*, 7, 2017, 42451. (査読有り)

M. Mori, A. Kosuge, H. Kiriyama, R. Hajima, K. Kondo, “Simple synchronization technique of a mode-locked laser for Laser-Compton scattering Gamma-ray source”, *Rev. Sci. Inst.*, 87, 2016, 63307. (査読有り)

Y. Arikawa, K. Kondo, et al., “Ultra-high contrast kilojoule-class petawatt LFEX laser using a plasma mirror”, *Appl. Opt.*, 55, 2016, 6850-6857. (査読有り)

A. Faenov, K. Kondo, et al., “X-ray spectral diagnostics of laser harmonic

generation in the interaction of relativistic femtosecond laser pulses with clusters”, Quantum Electronics, 46, 2016, 338-341. (査読有り)

A. Kon, M. Nishiuchi, H. Kiriya, K. Ogura, M. Mori, H. Sakaki, M. Kando, K. Kondo, “High-dynamic-range cross-correlator for shot-to-shot measurement of temporal contrast”, J. J. Appl. Phys., 717, 2016, 12013. (査読有り)

M. Nishiuchi, H. Sakaki, K. Kondo, et al., “Towards a novel laser-driven method of exotic nuclei extraction-acceleration for fundamental physics and technology”, Plasma Phys. Rep., 42, 2016, 327-337. (査読有り)

S. Bulanov, A. Yogo, J. Koga, S. Bulanov, K. Kondo, and M. Kando, “Stochastic regimes in the driven oscillator with a step-like nonlinearity”, Phys. Plasmas, 22, 2016, 63108. (査読有り)

S. Bulanov, T. Esirkepov, M. Kando, H. Kiriya, K. Kondo, “Relativistic Strong Electromagnetic Radiation in a Plasma”, JETP, 122, 2016, 427-434. (査読有り)

[学会発表](計 16 件)

K. Kondo, “Development of the laser driven ion injector for the new generation heavy ion cancer therapy”, AFAD 2018, テジョン 韓国 (invited)

近藤公伯, “ハイパワーレーザーによる高エネルギー密度科学 I”, レーザー学会学術講演会第 38 回年次大会 2018、みやこめっせ (京都)(招待講演)

K. Kondo, et al., “Laser driven injector for a new generation heavy ion cancer therapy machine in Japan”, Topical Problem of Biophotonics 2017, サンクトペテルブルグ-ニジニ・ノボゴロド (plenary)

近藤公伯, 神門正城, 西内満美子, 桐山博光, 白井敏之, 野田耕司, 内海渉, “Laser acceleration studies in KPSI”, Nuclear Photonics 2016, モントレー USA (invited)

桐山博光, 近藤公伯, 他, “Recent progress on the J-KAREN laser upgrade”, APLS 2016, 済州島 韓国 (invited)

ピロジコフ・アレキサンダー, 近藤公伯, 他, “high-order harmonic generation by relativistic plasma singularities”, The 15th

International Conference on X-ray Lasers, 2016, 奈良春日野国際フォーラム (invited)

ピロジコフ・アレキサンダー, 近藤公伯, 他, “Required laser properties for efficient high-order harmonic generation from relativistic electron spikes”, HEDS-2016, パシフィコ横浜 (invited)

神門正城, 近藤公伯, 他, “Research on laser acceleration and coherent x-ray generation using J-KARTEN-P laser”, The 15th International Conference on X-ray Lasers, 2016, 奈良春日野国際フォーラム (invited)

桐山博光, 近藤公伯, 他, “J-KAREN-P による未踏の超高強度場への挑戦”, 光・量子ビーム科学合同シンポジウム 2016, 千里ライフサイエンスセンター (招待講演)

近藤公伯, “J-KAREN レーザー実験の高度化”, 第 58 回けいはんな光・医療バレー研究会, 2016, 関西光科学研究所 (招待講演)

近藤公伯, “超高強度レーザーとその応用”, 日本機械学会関西支部第 91 回定時総会講演会, 2016, 大阪電気通信大学 (招待講演)

K. Kondo, “Laser driven heavy ion acceleration and its application”, ASULA Grand Seminar/Symposium 2016, Osaka University, Suita, Osaka (invited).

近藤公伯, “J-KAREN レーザーのアップグレードとプラズマ科学研究”, 日本物理学会 2015 年秋季大会シンポジウム”高強度ペタワットレーザーと X 線自由電子レーザーを活用したプラズマ科学の展望”, 関西大学 (招待講演)

近藤公伯, “関西光科学研究所における高強度レーザー開発と学術および医療・産業応用” JPC 関西研見学会 & 講演会, 2015, 関西光科学研究所 (招待講演)

近藤公伯, “極相対論的光電磁場の利用”, レーザー学会第 428 回「短波長量子ビームと応用」2015, 広島大学 東広島キャンパス (招待講演)

K. Kondo, “High Field Science with PW Class High Peak Power Laser”, LPHYS'15, 2015, (invited).

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況（計 0件）

取得状況（計 0件）

〔その他〕

<http://www.kansai.qst.go.jp/research-1.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

近藤 公伯 (KONDO, Kiminori)
国立研究開発法人量子科学技術研究開発
機構・関西光科学研究所 光量子科学研究
部・部長
研究者番号：80225614

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

西内 満美子 (NISHIUCHI, Mamiko)
国立研究開発法人量子科学技術研究開発
機構・関西光科学研究所 光量子科学研究
部・上席研究員
研究者番号：70391315

福田 祐仁 (FUKUDA, Yuji)
国立研究開発法人量子科学技術研究開発
機構・関西光科学研究所 光量子科学研究
部・上席研究員
研究者番号：30311327

榊 泰直 (SAKAKI, Hironao)
国立研究開発法人量子科学技術研究開発
機構・関西光科学研究所 光量子科学研究
部・上席研究員
研究者番号：00354746

小倉 浩一 (OGURA, Kochi)
国立研究開発法人量子科学技術研究開発
機構・関西光科学研究所 光量子科学研究
部・主幹研究員
研究者番号：30354971

匂坂 明人 (SAGISAKA, Akito)
国立研究開発法人量子科学技術研究開発
機構・関西光科学研究所 光量子科学研究
部・主幹研究員
研究者番号：20354970

森 道昭 (MORI, Michiaki)
国立研究開発法人量子科学技術研究開発
機構・関西光科学研究所 光量子科学研究
部・上席研究員
研究者番号：10323271

(4)研究協力者
なし