

極高強度極限における光と相対論的プラズマの相互作用の実験的解明

Experimental exploration of light–relativistic plasma interactions at extreme intensities

(加速器学会学会推薦)

代表研究者	関西光量子科学研究所 西内 満美子	QST Mamiko NISHIUCHI
協同研究者	インペリアルカレッジロンドン ICL	ドーバー ニコラス Nicholas Peter DOVER
	インペリアルカレッジロンドン ICL	カサティ ジネブラ Genevra CASATI

By tightly focusing petawatt-class, ultra-intense, ultrashort laser pulses in space and time, matter is instantaneously ionized, forming plasmas in which electrons oscillate at near-light velocities. These conditions generate relativistic plasmas, where charged particle dynamics are strongly coupled to extreme electromagnetic fields and light–matter interactions evolve in highly nonlinear ways.

Within such plasmas, a number of exotic phenomena have been theoretically predicted but not yet experimentally demonstrated. One key example is relativistic birefringence arising from anisotropic electron temperature distributions. This project aims to provide the first experimental verification of this effect. Clarifying how electron density and temperature anisotropy determine relativistic plasma birefringence will enable active control of plasma refractive indices. Such control would allow simultaneous manipulation of the temporal waveform and polarization state of ultra-intense laser pulses. In particular, generating a circularly polarized pulse with an extremely sharp, delta-function-like rising edge would open a new regime for particle acceleration. This capability could enable efficient acceleration and extraction of superheavy elements and short-lived nuclei to high energies and charge states, which are difficult to achieve using conventional technologies. Ultimately, this research seeks to establish a novel, compact heavy-ion accelerator, with transformative impacts on astrophysics, nuclear physics, and related scientific fields.

研究目的

PW級の超高強度極短パルスレーザーを時間・空間的に絞り込むことで発生する極高強度電磁場中に物質を曝せば、物質は一瞬にしてプラズマ化し、プラズマ中における電子が光速に近い速度で揺動する相対論的プラズマが生成される。この特異なプラズマ中では、光との相互作用によって荷電粒子の状態がダイナミカルに変化し、それに連動し光との相互作用も非線形に変化を遂げる。

このような相対論的プラズマ中において、理論的に予見されているものの未だ実証されていない現象の一つである「相対論的プラズマ中の非等方温度分布に起因する複屈折現象の発現」に着目し、実証に

挑戦する。その理解をプラズマ中での電子密度や複屈折率の制御につなげれば、超高強度レーザーの「時間波形」と「偏光状態」の同時制御が可能となる。この技術を利用し、「円偏光」かつ「デルタ関数的な急峻な立ち上がりを持つ時間波形」を持つレーザー光が生成できれば、既存加速技術では困難な、超重元素や短寿命核を多価状態・高エネルギーで加速して取り出すことが可能となり、宇宙物理・核物理分野等に大きな波及効果をもたらせる新規小型重イオン加速器が実現すると期待される[1]。

図 2. 実験のセットアップ (左) と実験に使用した JKAREN レーザーの時間波形 (右)

実験においては、超高強度レーザーの時間波形の精密制御が必要不可欠である。レーザーのスペクトル位相の制御を行い、3 次の分散成分を最適化することで、レーザーのメインパルスの立ち上がりを急峻にした。さらにレーザーシステム中のプラズマミラーシステムを用いてさらなる急峻化を達成した(図2)。

実験においては、ターゲットの厚みを変えていくことで、プラズマとの相互作用後のレーザーの透過光の量を計測し、どのターゲットの厚みで、プラズマが相対論的透過な状況になったかを確認した。プラズマからの透過光を、ターゲット後方に設置したスクリーンで散乱させ、その散乱光の光量をキャリブレーション済みの CCD カメラでとらえることで、透過光の絶対量を計測した(図3)。また、透過光の一部をピックアップミラーにて蹴りだし偏光計測系へと導き(図2)、偏光度のターゲットの厚み依存性を調査した。偏光計測系で計測されるデータは、光の偏

光度合いを示すストークスパラメータ (S_0, S_1, S_2, S_3) のうち、 S_1, S_2, S_3 である。 S_0 との関係は、 $S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2$ で結ばれている。計測結果を図4に示す。

考察

図3に示す透過光の量が、入射レーザーの1～10%の値を取った場合に、プラズマが相対論的透過な状況になることがわかっており[3]、これより、ターゲットの厚みが50nm以下の領域で、相対論的透過になっていることが示唆される。図4(a)～(c)より、プラズマが相対論的に透過な状況となるターゲットの厚み近辺より薄い領域で、 S_1, S_2, S_3 パラメータが減少していることが見て取れ、図4(b), (c)より、 S_2, S_3 の値は、透過光が10%を超える領域でも減少している傾向が見て取れる。

ストークスパラメータと光の持つ方位角 ϕ 及び楕円角 χ は次の式で表され(図1)、

$$2\psi = \arctan\left(\frac{S_2}{S_1}\right),$$

$$2\chi = \arcsin\left(\frac{S_3}{S_0}\right)$$

これらのパラメータは、それぞれ、 ϕ が楕円偏光成分の長軸の向き、及び、 χ が楕円偏光の偏光度を示す。計測されたストークスパラメータより ϕ, χ を求めたものを図5に示す。これより、透過光が多い(元のレーザーの光の10%以上)もしくは、少ない(元のレーザー光の1%以下)の時に、透過光の偏光状態が元の光から変化を受けていることがわかる。透過光の量が少なくなると顕著に、楕円偏光成分が表れて計測されていることがわかった。

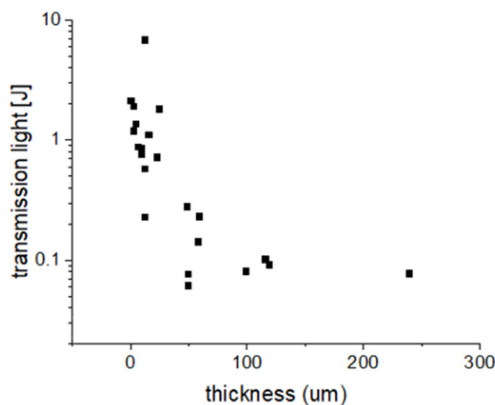


図3. ターゲットの厚みに対する透過光の量

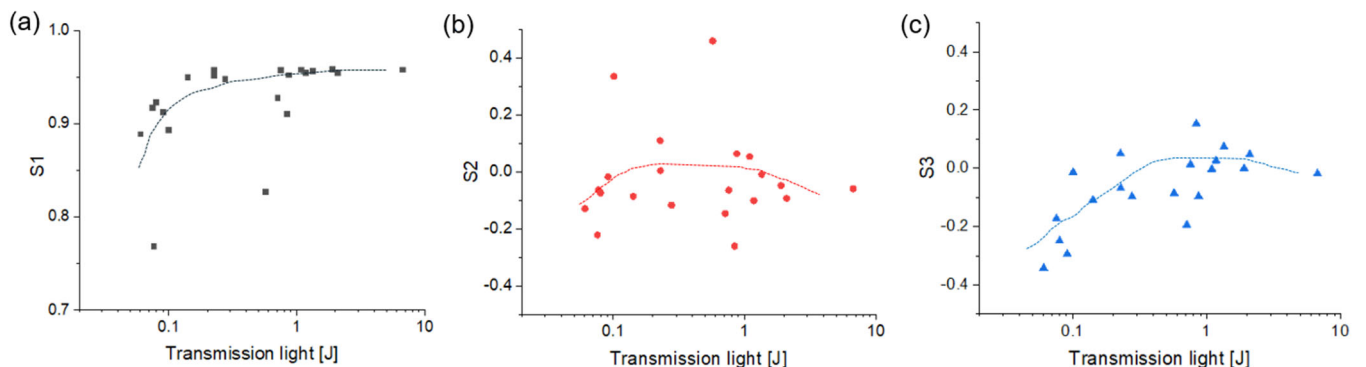


図4. 計測された S_1, S_2, S_3 の値と、透過光の量との関係。各々の図における点線は傾向を示すものである。

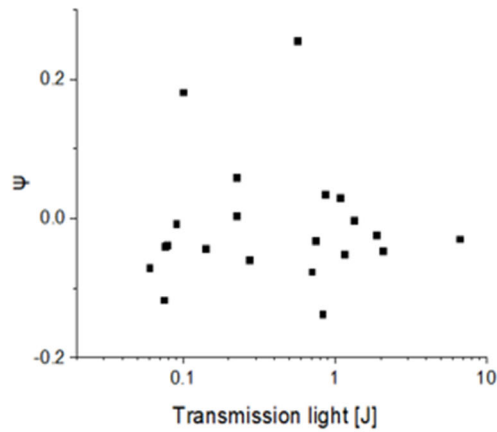
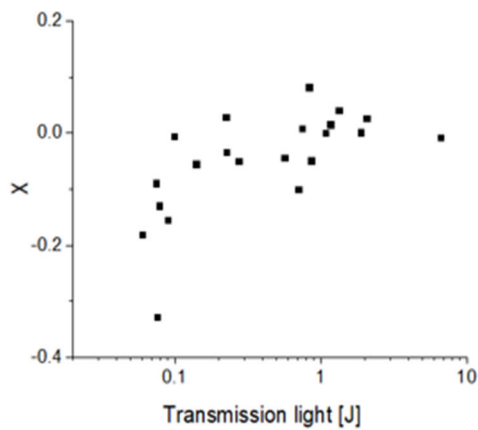


図 5. 透過光の持つ偏光の方位角及び楕

現在は Particle In Cell シミュレーションを行うことで、これらの結果の再現を試みている。実験結果を再現する PIC シミュレーションを得ることができれば、プラズマ内部のミクロスコピックな描像を調査することにより、なぜ透過光の偏光量が変化したのかを調査する予定である。

研究の発表

まだ解析中故、成果発表等はしかるべき時期に、これから行う予定である。