

Title	動運動論的レーザー吸収で発生する高速電子特性の解析
Author(s)	高木, 悠司
Citation	サイバーメディアHPCジャーナル. 2024, 14, p. 124-127
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.18910/96540">https://doi.org/10.18910/96540</a>
rights	
Note	

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

# 動運動論的レーザー吸収で発生する高速電子特性の解析

高木 悠司

大阪大学 大学院理学研究科

大阪大学 レーザー科学研究所

## 1. はじめに

### 1.1 高強度レーザー生成プラズマ

出力がPW（ペタワット）級の高強度レーザーを用いて物質を加熱・圧縮することで、温度が数千万度、圧力が数百億気圧に達する高温高密度状態を実現できる（図1）。これは星内部や活動銀河核周辺の状態に相当し、高圧物性研究・核融合研究等のプラットフォームになると共に、高エネルギー粒子源等への応用も期待されている。現在このような高エネルギー密度プラズマを実験室内で作り出せるのは高強度レーザーだけである。

高強度レーザーとプラズマとのレーザープラズマ相互作用(Laser plasma interaction: LPI)は、レーザー強度・パルス長・プリパルス形状等のレーザー照射条件にターゲットの形状・材質等の条件も組み合わさった、多数のパラメーターが関与する複雑な物理過程であり、解明しきれていない部分が存在する。特に、レーザー強度が  $10^{17} \text{ W/cm}^2$  以上の運動論的・相対論的強度領域と  $10^{13} \text{ W/cm}^2$  以下の流体的強度領域との中間に位置する  $10^{14} \sim 10^{16} \text{ W/cm}^2$  程度の強度領域での LPI は、熱的平衡にある流体的プラズマと粒子（運動論）的非線形過程で発生する非熱的高速粒子とが混在する非平衡状態にあるため、流体モデルや粒子（運動論）モデルでの解析が難しく理解が進んでいない。

### 1.2 中間的強度でのレーザープラズマ相互作用

強度が  $10^{14} \sim 10^{16} \text{ W/cm}^2$  程度の中間的強度領域での LPI では、誘導ラマン散乱(Stimulated Raman scattering: SRS)・誘導ブリルアン散乱(Stimulated Brillouin scattering: SBS)・二電子波崩壊不安定性(Two plasmon decay: TPD)等の粒子的過程によるレーザー光の吸収・散乱が起こる（図2）。これら

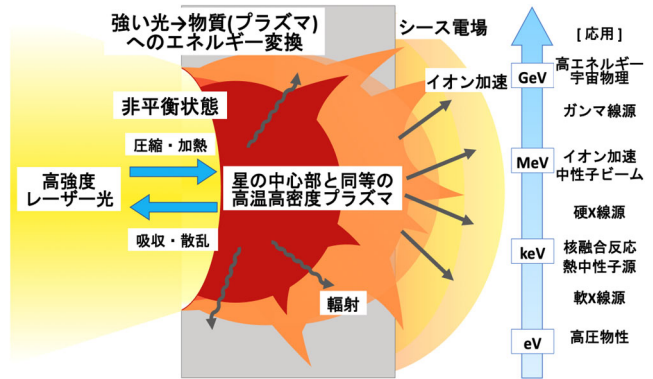


図1：レーザー光と物質との相互作用の模式図。

の過程はピコ秒スケールで成長し、発生する周囲のプラズマより一桁以上エネルギーの高い非熱的高速電子は高密度プラズマ内にエネルギーを輸送し、衝撃波等のナノ秒スケールのプラズマ流体現象に影響を与える。

Particle in cell (PIC)法等を用いた運動論的コードは微小時間スケールでの LPI のシミュレーションを得意とし、中間的領域での粒子的過程による非線形な高速電子発生をシミュレートできるが、プラズマの流体運動のような大きな時空間スケールの計算は数値誤差の点から困難である。流

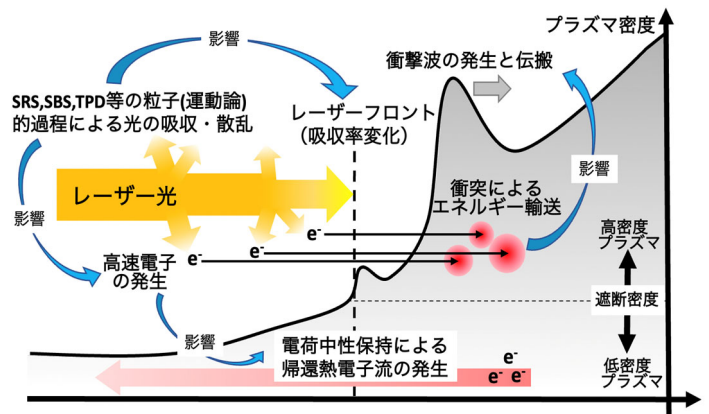


図2：レーザー強度が  $10^{15} \sim 10^{16} \text{ W/cm}^2$  程度の領域で起こるレーザープラズマ相互作用の模式図。

体コードは大きな時空間スケールの LPI をシミュレートできるが、粒子的な高速電子発生過程を考慮できない。よって中間的領域のシミュレーションは難しく、これまで実験においても避けられてきた強度領域であることから総合的な理解が進んでいない。

しかし近年では、衝撃点火と呼ばれる中間的領域での LPI で発生する高速電子を積極的に利用する新たなレーザー核融合手法の提案がなされたり[1]、ピーク強度が  $10^{18} \text{ W/cm}^2$  以上の超高強度レーザーにおいてメインパルスに先駆する中間的レーザー強度のプリパルス・ペDESTALによる LPI がその後のメインパルスによる LPI に影響を及ぼすことが分かってきた。このように中間的領域での LPI の理解深化が重要となってきた。

## 2. 高速電子発生過程のシミュレーション

中間的領域での LPI の難しさは粒子的・流体的 2 つの時空間スケールが含まれる点にある。よって本研究では両者を切り分け、高速電子発生のみ焦点を当て PIC 法による運動論的シミュレーションからその発生過程を調べた。

### 2.1 シミュレーションの設定

PIC 法では格子状に分割したシミュレーション空間内にプラズマを模した荷電粒子を配置する。空間内での荷電粒子の運動に伴い発生する電磁場及び外部電磁場(レーザー場)を各空間格子上でマクスウェル方程式に従って求める。荷電粒子の運動は自分の位置する格子上の電磁場から運動方程式に従って計算される。

まず 1 次元シミュレーションを行った。PIC コードは PICLS コード[2]を使用した。図 3 にシミュレーションのセットアップを示す。1 次元シミュレーション空間  $x$  軸上に陽子と電子からなる水素プラズマを配置し、左 ( $x$  軸負方向) からレーザーを照射した。レーザーは p 偏光 (電場は  $y$  方向、磁場は  $z$  方向に振動する) を用い、レーザー波長  $\lambda$  は  $1 \mu\text{m}$ 、レーザー強度は  $10^{14}$  から  $10^{16} \text{ W/cm}^2$  の間で変化させた。シミュレーション中レ

ザーは常に照射し続ける。空間格子サイズは  $1/20 \mu\text{m}$  (レーザー波長  $\lambda$  を 20 分割) に設定した。PICLS のアルゴリズムの都合上、空間格子のサイズを設定するとシミュレーションのタイムステップは  $\approx 0.17 \text{ fs}$  (レーザー周期を 20 分割) に自動的に決定される。水素プラズマの密度  $n$  の初期設定は、最大密度をレーザー遮断密度  $n_c$  ( $\sim 10^{21} / \text{cm}^3$ ) の 1.2 倍、最小密度を  $1.2/e^4 \approx 0.02$  倍に固定し、指数関数的な密度勾配を仮定した。密度勾配のスケール長  $L$  は  $50 \sim 800 \mu\text{m}$  の間で変化させた ( $n \propto e^{-x/L}$ )。よってプラズマの量及びシミュレーション空間の大きさはスケール長によって変化する。陽子と電子はそれぞれ一空間格子につき 70 個ずつ配置し、初期温度がそれぞれ  $1 \text{ keV}$  と  $5 \text{ keV}$  となる様に初期運動量分布を持たせた。シミュレーション空間は 1 次元だがプラズマの運動量空間は 3 次元でシミュレーションを行なっている。プラズマの左 (レーザー照射) 側に  $1000 \mu\text{m}$ 、右側に  $500 \mu\text{m}$  の真空領域を設け、左右の境界から  $600 \mu\text{m}$  にダンピング (減速) 領域を設定した。それぞれのダンピング領域内を境界に向かって進むプラズマ粒子は初期温度程度まで減速を受ける。これは発生した高速電子がいつまでもシミュレーション空間内に残り続ける事を防ぐためであり、実際のレーザープラズマ相互作用において高速電子が高密度プラズマ中に抜け電荷中性保持のため帰還熱電子流が発生することを模擬している。大きな真空領域は両境界付近に減速されたプラズマ粒子が溜まりレーザー入射等

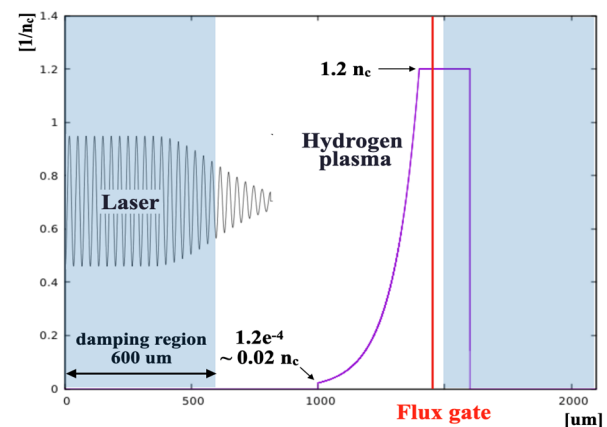


図 3 : 1 次元 PIC シミュレーションのセットアップ。

を阻害するのを防ぐ目的である。

## 2.2 ゲートを用いた高速電子の測定

シミュレーション空間内にフラックスゲートを設置し、ゲートを左から右へ通過する電子のエネルギースペクトルを測定した(図4)。エネルギースペクトルの測定は1 ps 間ごとの間隔で100 ps まで行った。レーザー強度が  $10^{15}$  W/cm<sup>2</sup> 以上の時、測定されたスペクトルは平均エネルギーが数10 keV と数100 keV の二成分からなることが分かった。Maxwell 分布を用いたフィッティングから両者を分け、数100 keV の平均エネルギーを持つ成分に関して平均エネルギーとエネルギーフラックスの時間発展を調べた。どちらもおよそ30 ps 以降定常な値を記録し、その大きさは入射レーザーの強度に大きく依存することが分かった。

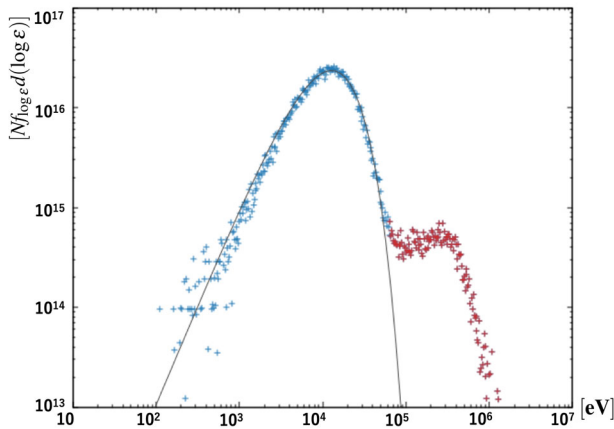


図4：フラックスゲートで観測された高速電子のエネルギースペクトル。平均エネルギーが数10 keV (青色十字) と数100 keV (赤色十字) の二成分からなる。Maxwell 分布を用いたフィッティングを行っている (灰色実線)。

## 3. 高速電子の加速機構の解明

### 3.1 電子軌道の解析

平均エネルギーが数100 keV の成分の加速機構を明らかにするために、特定の電子の位置・運動量・受けた電磁場の大きさを毎タイムステップごとに出力する機能を PICLS コードに追加し、電子の軌道を調べた。図5は時刻22 ps にフラックスゲートに平均エネルギー程度のエネルギーを持って到達した電子の6個の軌道を例示している。この加速の履歴から電子は、SRS, SBS 等

のLPI が作り出す密度揺動により発生する  $x$  方向の揺動的な電場  $E_x$  によって統計的な加速過程を経て数100 keV までエネルギーを増加させることが分かった。密度揺動は数10 ps かけて成長し準定常的な状態に落ち着く。これに呼応して定在波様の揺動電場  $E_x$  が発生する。 $E_x$  の平均的な大きさとサイズから見積もられる一回の  $E_x$  との相互作用による電子のエネルギー変化は1 keV 程度である。この縦電場中を通り抜ける間に電子は確率的にエネルギー増加(加速)も減少(減速)も受けるが、運の良い電子は多くの加速機会を得て数100 keV まで加速される。全体の平均エネルギーは、相互作用回数を  $N$  として  $N^{1/2}$  に比例する拡散的な加速過程であることが分かった。

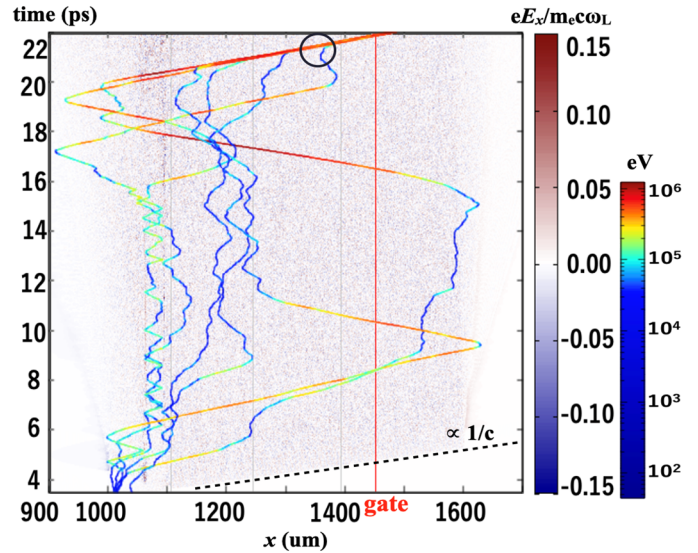


図5：高速電子の軌道。

### 3.2 キャビティー間での電子の捕捉

SRS は低密度プラズマ中に密度揺動を作り出すが、特にキャビティーと呼ばれるスパイク状の低密度構造を発生させる。このキャビティー内には電磁場が捕捉され、レーザー場より数倍大きいソリトン様の振動電磁場を形成する。この振動電磁場が常にプラズマをキャビティーから追い出す方向にローレンツ力を発生させることによりキャビティーは長い時間その構造を保ち続ける。よってキャビティーは常に電子を跳ね返すため、キャビティーとキャビティーに挟まれた電子がキャビティー間を往復し続ける電子のトラップ

運動が起こることを発見した。粒子間衝突による散乱がない場合、キャビティはおよそ  $x$  方向の運動量  $p_x$  が  $1.5 m_e c$  程度までの電子を捕捉する。ここで  $m_e$  は電子質量、 $c$  は光速である。このトラップ運動は電子の  $p_x$  を変更するが、加速すなわち  $p_x$  の増加にはあまり寄与しないことも判明した。

#### 4. 大規模 2 次元 PIC シミュレーション

多次元の場合でも、1 次元シミュレーションから判明した電子の加速及びキャビティ間でのトラップ運動が同様に発生するかを調べるために、2 次元 PIC シミュレーションを行った。1 次元シミュレーションを  $y$  方向に  $5 \mu\text{m}$  拡張させ、典型例としてレーザー強度が  $10^{16} \text{W}/\text{cm}^2$ 、プラズマスケール長が  $100 \mu\text{m}$  の場合でシミュレーションを行った。 $y$  方向の境界条件は周期境界に設定した。多次元シミュレーションの場合 1 次元よりも高い空間解像度が求められるため、空間格子サイズは 1 次元の場合の半分の  $1/40 \mu\text{m}$  に設定した。その分計算資源削減のためにプラズマの左側の真空領域を  $500 \mu\text{m}$ 、右側の真空領域を  $200 \mu\text{m}$  にそれぞれ減らし、一格子内のプラズマ粒子数も 30 個に削減した。図 6 に 2 次元シミュレーションの様子を示す。

##### 4.1 キャビティの構造変化と電子加速

2 次元シミュレーションの場合、キャビティは  $y$  方向の密度揺動による共鳴吸収により 1 次元の場合よりも構造を保ち続けることが難しい。従ってキャビティは十分成長できず発生するローレンツ力も小さくなる。これにより 2 次元シ

ミュレーションの場合、トラップできる電子の  $p_x$  は  $0.3 m_e c$  まで減少した。一方で  $E_x$  の大きさは 1 次元シミュレーションの場合とさほど変わらず、ゲートで観測された高速電子の平均エネルギーも 1 次元シミュレーションの場合と同程度であった。この結果はキャビティによる電子のトラップ運動は電子の加速にはあまり寄与しないという 1 次元シミュレーションの解析結果と整合する。

#### 5. おわりに

強度が  $10^{15-16} \text{W}/\text{cm}^2$  のレーザーとプラズマとの相互作用における高速電子発生過程について大規模 1 次元及び 2 次元 PIC シミュレーションを用いてその詳細を明らかにした。高速電子の内数  $100 \text{keV}$  の平均エネルギーを持つ成分について、改良した PIC コードを用いて 1 次元シミュレーションから電子の軌道を調べた。電子は密度揺動に起因して発生するレーザー伝搬方向の電場中での統計的な加速により数  $100 \text{keV}$  まで加速されることが分かった。また、この強度領域での LPI に起因した密度構造による特異な電子のトラップ運動も発見した。2 次元シミュレーションから多次元性がトラップ運動を弱める方向に働く一方で、電子の平均加速エネルギーには影響を与えないことが明らかになった。

#### 参考文献

- (1) D. Batani et al., Nucl. Fusion **54** 054009 (2014).
- (2) Y. Sentoku and A. J. Kemp, J. Comput. Phys. **227**, 6846-6861 (2008).

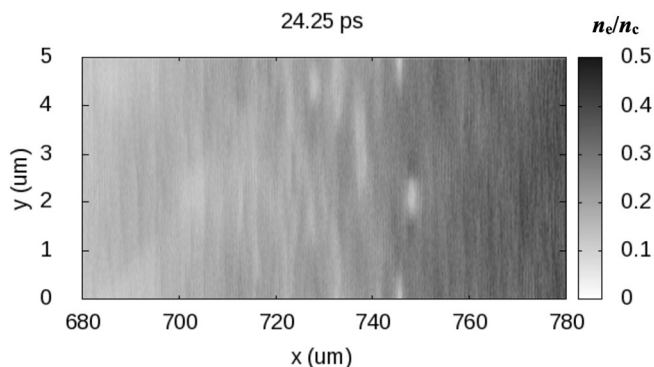


図 6： 2 次元シミュレーションでの電子密度揺動の様子。