

## 論文の内容の要旨

### 論文題目

#### Generation of Relativistic Ultrashort Electron Single Bunch via Interacting 12TW-50fs Laser Pulse with Gas-Jet Plasma

(12TW-50fs レーザーとガスジェットプラズマとの相互作用による  
相対論的超短電子シングルバンチ生成)

氏名 モハメド・ハフス ナシル アブ・デルハマン

近年の T<sup>3</sup> (Table-Top Terawatt) レーザーの急速な進歩によって、レーザー励起プラズマによる電子加速の分野において多数の様々な研究が誘起されてきている[1]。

本論文の第1章では、レーザープラズマに基づく先進的な加速器を構成する主要な概念の背景にある基礎的な物理について概観している。特に注目しているのはレーザー航跡場加速における標準的な枠組みである。そこでは、臨界密度未満の低密プラズマ中に入射された超短パルス大強度レーザーによって  $F_p \propto \nabla |E^2|$  と表されるようなレーザーパルスの包絡線と結びついた動重力が発生し、大振幅のプラズマ波（航跡場）が誘起される。ここではプラズマ波の波長は（密度  $10^{18} \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  に対して） $10 \sim 100 \mu\text{m}$  程度であり、加速された電子の軸方向バンチ長もこの範囲内になることが期待される。そこで我々は、図1に示すように、より簡単な単一の超高強度レーザーパルスを用いて超短パルス電子バンチを生成する手法を提案している[2]。従って、本研究の目的は  $100 \text{ fs}$  以下のパルス幅を持つ相対論的

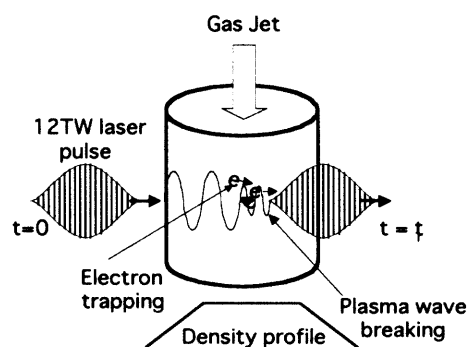


図1: レーザープラズマ相互作用と波の破

(数十 MeV) 電子シングルバンチをレーザープラズマ相互作用によって生成することである。我々の体系はそれ自体加速器としても、あるいはさらなるレーザープラズマ加速や高周波加速のための入射系としても用いることができる。ここで土台となる概念はプラズマ波の砕波によってプラズマ電子の一部を非線形プラズマ波中に捕獲して加速することである。波の破碎点では多数の電子が加速され、高エネルギー化してプラズマから放出される。

第2章では数値計算結果について述べている。図2は、12TW-50fs レーザーを 10  $\mu\text{m}$  まで集光し、 $\gamma = \omega_{\text{Laser}}/\omega_{\text{plasma}}=18.6$  に対応する密度を持つ低密プラズマに入射した際の、2次元 PIC 計算の結果である。このパラメータは前述したレーザー航跡場加速の枠組みに対応している。この数値計算においてプラズマ密度分布は図1に示すような台形型を持つ。プラズマ密度は真空領域から長さ 500  $\mu\text{m}$  の立ち上がりを持ち、500  $\mu\text{m}$  の平坦部を経過した後、500  $\mu\text{m}$  の立下りを示す。平坦部のプラズマ密度は  $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  である。図2(a)に軸方向位置に対する電子の軸方向運動量分布を示す ( $p_1$ - $x_1$  位相空間)。数値計算領域の最も端 (図中  $x = 1.31 \times 10^4 (c/\omega_0)$ ) にある粒子が最初にプラズマから真空領域へ抜け出す粒子である。それらの電子の平均エネルギーは 6.5 MeV であった。プラズマ中への電子捕獲の過程は図2(b)および図2(c)に示す通りである。それらの図はプラズマ最終端付近でのプラズマ電子密度の等高線を示している。図2(b)は 1.38 mm 進行後であり、図2(c)は 1.40 mm 進行後である。赤い半円は電子プラズマ波に対応する。時間  $t = 11592/\omega_0$  では、図2(b)に示すように、波1中のいくつかの電子はプラズマ波の側面から横方向に入射され始めている。同様に、波2の中央からも電子は入射されている。時間  $t = 11760/\omega_0$  においては、図2(c)に示すように、両方の波から電子の入射が明確に起こっている。入射点において、プラズマ波の波長はプラズマ密度の減少のために増加している。そのような波長の伸長によって波の規則的な構造が乱され、波の中から一部の電子がこの過程によって失われる。こ

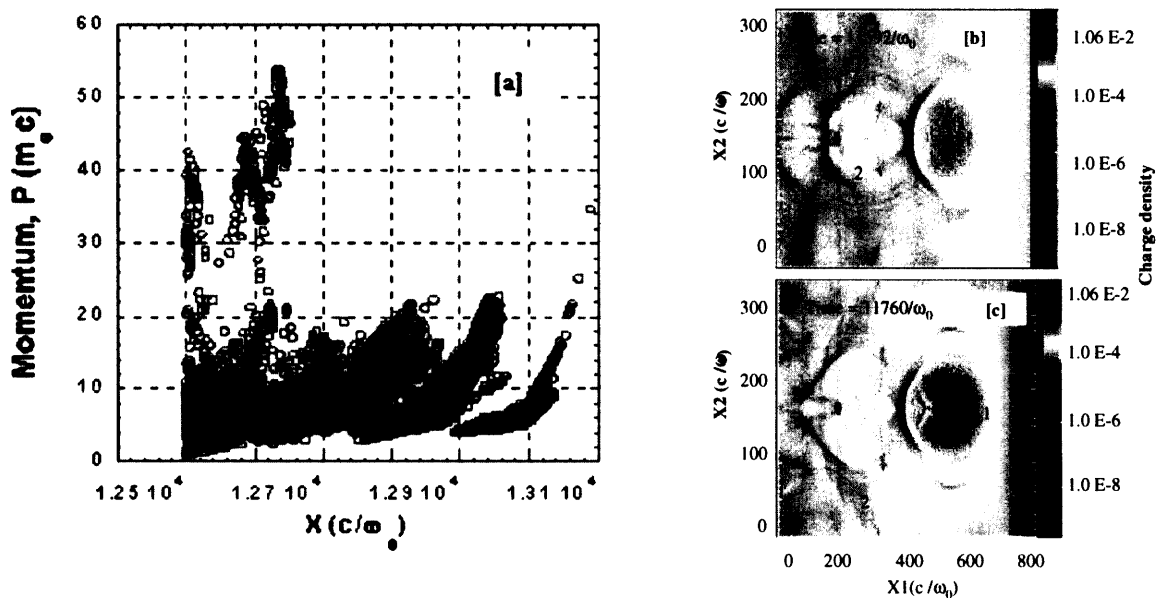


図 2: PIC 計算結果 (12TW レーザーと密度  $5 \times 10^{18} / \text{cm}^3$  のプラズマとの相互作用)

こでの電子発生機構は「横方向の碎波」と呼ばれる。本計算ではこの現象はプラズマの終端でのみ起こっている。そのため、生成された電子のエネルギーはあまり増加せず、この過程は有効とは言えない。図3は、平坦部のプラズマ密度が  $5 \times 10^{19}/\text{cm}^3$  であり、その他の条件は前の計算と同じである場合の数値計算結果である。図3(a)および図3(b)はプラズマ波に捕獲され、最大 110 MeV まで加速されたプラズマ電子の軸方向位相空間を示している。それら非常に高エネルギーの電子はレーザープラズマ相互作用の初期に加速が始まったものである。図3(a)において、レーザーの通過距離が 0.49 mm となる時点で、既に多くの高エネルギー電子が加速位相の範囲に含まれていることが見て取れる。文献[3]では、この場合の電子発生に対応するプラズマ碎波メカニズムについて提案が成されている。しかしながら、相対論的強度を持つレーザーパルス ( $a = eE/m_0c\omega > 1$ ) においてはもうひとつ別の電子発生メカニズムが存在する。動重力の表式は分母に相対論因子 $\gamma$ を持つため、その電子加速に対する効果は相対論的レーザー強度と伴に減少することになる[4]。

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = -\frac{mc^2}{2\bar{\gamma}} \nabla \bar{a}^2, \quad (1)$$

ここで、 $\bar{\gamma}$  および  $\bar{a}$  は時間平均されていることを意味する。 $a > 1$  の場合、この力はレーザー強度の増加に従って  $a$  と同じように増加する。動重力とは対照的に、相対論的な力は  $a^2$  に従って増加し[5]、レーザーの進行方向に沿って作用する。この相対論的な力によって、レーザー波長と同程度の波長を持ち、レーザーと共に進行する波が形成される。この波における最大の電子エネルギーは電子運動量の軸方向線分によって決定される。

$$\gamma \sim p_x = a^2 \sin^2(\omega t + kx)/2 \quad (2)$$

これらの波の波長はプラズマ波の波長  $\lambda_p = 2\pi c/\omega_p$  よりも非常に短いため、レーザーパルスの背後ではこの波は航跡場中へ破碎され、高エネルギー電子を生成する。それらの電子はその後に続く相対論的波への電子源として働き、図3に示すように電子はレーザーパルス直後のバンチにおいて最大のエネルギーを獲得する。短い波長の波はレーザーパルスの背

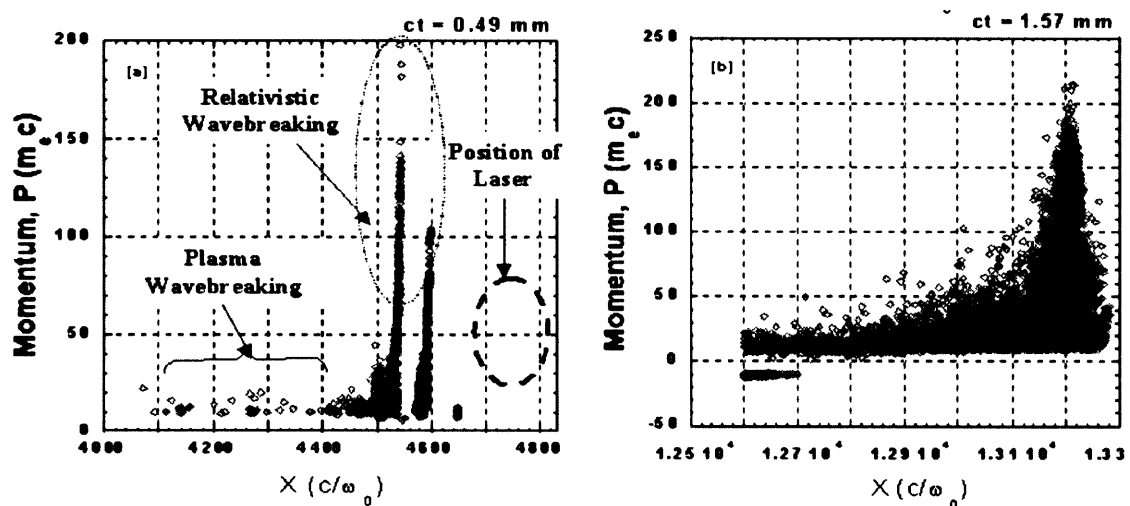


図3: PIC 計算結果 (12TW レーザーと密度  $5 \times 10^{19}/\text{cm}^3$  のプラズマとの相互作用)

後に現れ、長い波長を持った航跡場の中へ破碎されていく。この碎波は航跡場加速のひとつの電子源となる。これらの電子発生および加速の過程はレーザーパルスが相対論的かつ高エネルギーである限り有効である。しかし、レーザーはプラズマ中を進むに連れて分裂、劣化し、回折および散乱によってプラズマからはじかれてしまう。従って、図 3 (b)に示すように、相対論的波とそこでの電子の秩序だった構造とエネルギー分布もまた大きく乱されることになる。そこで、レーザーパルス劣化後の波と最大エネルギー電子の無秩序化はこのメカニズムのひとつの証拠を与えることになる。図 3 (b)に示されるように、捕獲された電子のバンチ形状の劣化にもかかわらず、それらの電子は最大エネルギー 110 MeV を持つシングルバンチとしてプラズマから放出される。全電子の平均エネルギーは 22.5 MeV であった。ただし、ここでのエネルギー分散は 100 % となっている。それでも、より多くの電子を含む、より大きな平均および最大エネルギーをもつシングルバンチが生成可能であることから、本計算でのビーム特性は有望であると言える。シケイン型磁場配列を用いることで、より小さなエネルギー分散を持つ電子ビームを選択的に取り出すことが可能であると考えられる。

第 3 章は実験装置に関する記述に当てられる。実験体系を図 4 に示す。レーザー光は軸外し放物面鏡によってパルス駆動超音速ガスジェット上 1 mm から 2 mm の位置に集光された。見積もられた真空中でのレーザースポットサイズとレーザー強度は  $12.6 \mu\text{m}$  および  $4 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$  である。最大の背景ガス圧は $\sim 80$  気圧 であり、ヘリウムおよび窒素ガスが使用された。高い圧力によって高いプラズマ密度を達成することが可能である。ノズルの形状は直径 2 mm の円形の底面を持つコーン型である。ガスジェットの密度分布は Mach-Zender 型干渉計によって測定された。図 5 は 80 気圧の圧力で放出されたヘリウムガスの分布である。ノズル上 3 mm の位置でのガス密度は $\sim 1.38 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  である。図に示されているように密度分布はガウス分布であるが、Laval ノズルを使用することで一定の密度分布を作ることが可能である[7]。レーザー一部はチャープパルス増幅法に基づく、波長  $0.8 \mu\text{m}$  の全固体チタンサファイアシステムである。そのシステムはパルス幅 50 fs を持つピークパワー 12 TW のレーザーパルスを生成可能である。レーザーシステムは発振器 (FEMTOSOURCE-20) およびパルス伸

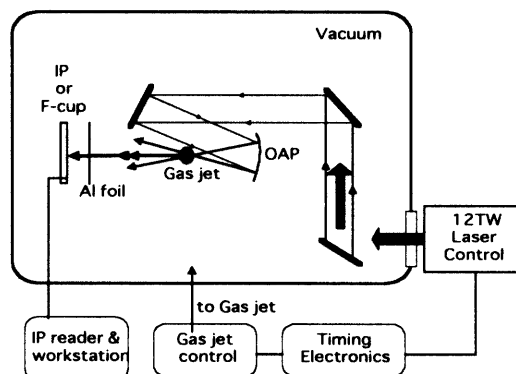


図 4: 電子発生実験体系

長器、増幅器、圧縮器の複合体 (ALPHA-10 S-12) から構成されている。レーザー設備の詳細な運転手順と性能は文献[2]に記述されている。

第4章では実験結果について述べる。真空中に設置されたファラデーカップによって電子ビームの全電荷量が測定された。図6は3つの異なった条件で生成された電子ビームの電荷量を示している。

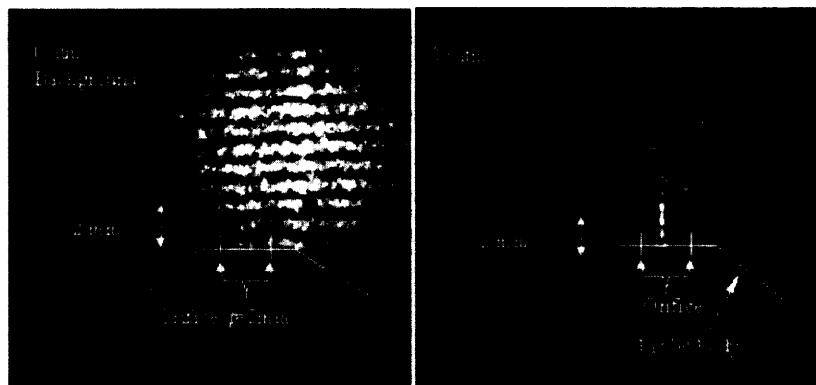


図 5: ガス密度プロファイルの Mach-Zender 干渉模様

ヘリウムガス圧および

レーザーパワーはそれぞれ 50、60、70 気圧および 5、7、9 TW である。真空容器内のみで現れる特定の電気回路の問題のために測定された信号は正電荷であったが、後述するように、真空容器外での測定によって電子生成を確認することができた。電荷測定における揺らぎと不安定性は恐らく、高出力レーザーとガスジェットの空間的・時間的ジッターによるのではないと思われる。生成電荷の平均値は、図6に見られるように、レーザーパワーとガス圧に依存する。同じファラデーカップを用いて真空容器の外側でも測定を行った。ファラデーカップはレーザープラズマ相互作用の位置から 20 cm 離れた前方に設置された。電子の取り出し口として厚さ 20  $\mu\text{m}$  のチタン窓が使用された。鉛のコリメータをファラデーカップの前に設置することで、検出可能な電子の発散角を 0.07 rad ( $4.2^\circ$ ) までに抑えた。この測定の結果、パルス当たりの平均電荷は 15 pC であった。レーザーパワー 4 TW において様々なガス圧にて発生したヘリウムガスからの電子ビームの横方向分布を図7に示す。ガス圧は図7(a)から図7(c)までそれぞれ 42、52、62 気圧である。この分布は電子源から 200 mm 前方に設置されたイメージングプレートを用いて真空内で測定された。図7の各像は約 200 パルスの積算を行った物である。図7(a)および図7(b)に示された電子ビームはほぼ横方向にガウス分布を持ち、電子源からそれぞれ約  $9^\circ$  および  $7^\circ$  の角度広がり (FWHM) を持つコーン状に放出されている。図7(c)においては、より高いガス圧のため

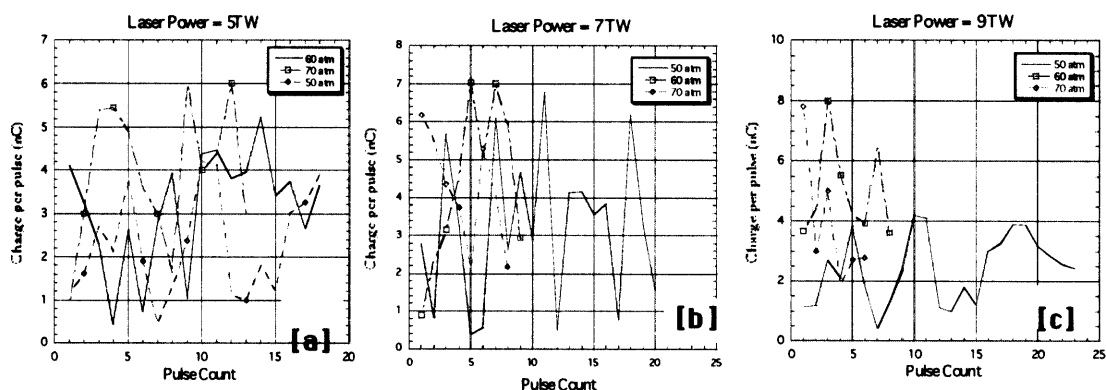


図 6: 様々なレーザーパワーおよびガス圧での電子ビーム電荷量

にビーム分布はガウス分布から外れている。さらに高圧かつ高出力レーザーを用いた測定では電子ビームの2成分空間分布が観

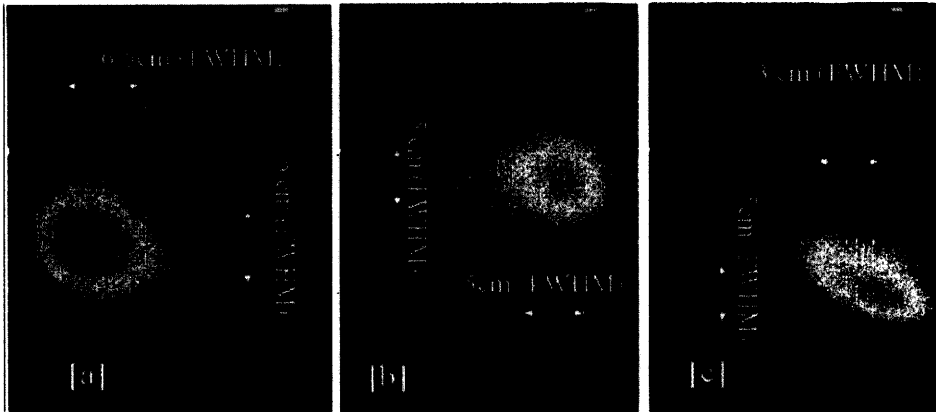


図 7: 様々なガス圧での電子ビームの IP 像

測された。同様の振る舞いはより長いレーザーパルスを用いた過去の実験例においても観測されている。

最後に第 5 章にて本研究の結論が述べられる。本研究により得られた結論は以下の通りである。

1) 2次元 PIC 計算および実験によって超短「50fs」大強度「12TW」レーザーパルスとの相互作用によるプラズマからの電子ビーム生成が確認された。

2) 比較的高いガス密度を用いた場合の数値計算結果における発生電子ビームの各特性は、(i)最大電子エネルギー 100 MeV 以上、(ii)65 MeV 以上の電子に対して、バンチ長~10 fs、電荷量~600 pC、エネルギー分散 8%、エミッタンス  $0.7 \pi \text{ mm mrad}$ 、であった。

3) 実験では超音速ガスジェットからのヘリウムガスに 12TW-50fs レーザーを集光することで、全電荷量と横方向プロファイルを測定した。ビームは発散角  $5^\circ$  程度でレーザー進行方向に放出される。多成分空間分布を持つ電子ビームが高圧ガスおよび高出力レーザーを使用した際には観測された。真空容器外の電荷測定によって 15 pC の電荷量が観測された。

#### 参考文献

[1] E. Esarey et al, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, PS-24, 252 (1996), and references therein.

[2] N. Hafz et al, *Nucl. Instr. Meth.*, vol. A455, pp. 148-154 (2000).

[3] S. Bulanov et al., *Phys. Rev. E.* **58** (1998), R5257-R5260.

[4] B. Quesnel and P. Mora, *Phys. Rev. E* **58**, 3719 (1998)

[5] A. Zhidkov, A. Sasaki, T. Utsumi et al., *Phys. Rev. E* **62**, 7232 (2000)

[6] S.Y. Chen et al., *Phys. Plasmas* **6**, (1999) 4739-4749.

[7] V. Malka, et al., *Phys. Rev. Lett.* **71**, 2329, (2000).