

# TRẠNG THÁI “BLOW-OUT” TRONG TRƯỜNG GIA TỐC PLASMA TẠO BỞI CHÙM ELECTRON NĂNG LƯỢNG THẤP

NGUYỄN ANH TUẤN<sup>1,2</sup>, CHÂU VĂN TẠO<sup>2</sup>, CHARY RANGACHARYULU<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Trung tâm Nghiên cứu và Triển khai Công nghệ Bức xạ, 202A đường 11, Thủ Đức, Tp. HCM

<sup>2</sup> Khoa Vật lý – Vật lý Kỹ thuật, Trường ĐH KHTN, ĐHQG-HCM, 227 Nguyễn Văn Cừ, Tp. HCM

<sup>3</sup> Khoa Vật lý – Vật lý Kỹ thuật, Trường ĐH Saskatchewan,  
Saskatoon, 116 Science Place, Saskatoon, SK S7N 5E2, Canada

Email: tuanhoang666@yahoo.com

**Tóm tắt:** Plasma nguội được kích thích bởi chùm tia electron làm nhiễu loạn sinh ra điện trường gia tốc các hạt mang điện theo cơ chế PWFA ( Plasma Wakefield Accelerator). Chùm tia electron kích thích trục xuất toàn bộ các electron ra khỏi quỹ đạo và đẩy các ion về phía sau thành các cột ion đồng nhất. Các cột ion hút các electron plasma quay trở lại quỹ đạo và gây nên sự dao động của electron quanh quỹ đạo với tần số dao động (tần số plasma)  $\omega_p$ , quá trình electron bị trục xuất rồi quay trở lại nhờ lực hút ion được gọi là trạng thái “thổi tắt” (“blow-out”). Trong báo cáo này, bán kính “blow-out” được tính toán để xác định điều kiện đồng bộ, điều kiện hội tụ và cường độ điện trường gia tốc WF (Wakefield) được kích thích bởi chùm electron năng lượng thấp. Kết quả tính toán cho thấy bán kính “blow-out” tăng tỉ lệ với năng lượng electron kích thích và mật độ plasma, tại năng lượng electron 100 MeV, mật độ plasma  $10^{12}$  hạt/cm<sup>3</sup>, điện trường đạt cực đại 3,8 GV/m.

**Từ khóa:** Chùm electron - positron, PWFA, PIC

## 1. MỞ ĐẦU

Máy gia tốc sử dụng trường plasma, PWFA, hoạt động trên nguyên lý: khối plasma trung tính chứa một lượng các electron cân bằng và tách riêng với các ion. Khi bắn tia laser hoặc chùm hạt xuyên qua plasma, tia laser hay chùm tia đẩy các electron (khối lượng nhỏ hơn rất nhiều so với ion) ra khỏi quỹ đạo còn các ion nằm dọc theo quỹ đạo đã phân vùng điện tích và tạo ra hai miền điện tích trái dấu. Hai vùng điện tích trái dấu tạo nên một điện trường WF vô cùng lớn để gia tốc các hạt mang điện.

Trạng thái blow-out được tạo ra đầu tiên bởi Rosenzweig [1] trong cơ chế gia tốc PWFA sử dụng chùm electron kích thích plasma. Tiếp đến, nhóm tác giả W. Lu và W.B. Mori [2] sử dụng thuyết phi tuyến để mô tả trạng thái blow-out và đã đưa ra được một lý thuyết về phương cách tạo ra trạng thái này. Tuy nhiên, thuyết phi tuyến cũng như các tính toán của V. Lotov [3] hay Barov [4] cũng chưa đưa ra được một dự đoán về hình dạng của cột ion và cấu trúc miền không gian trong trạng thái blow-out. Trong báo cáo này, thuật toán PIC (Particle – In – Cell) được sử dụng để mô phỏng không gian pha và xác định bán kính blow-out từ đó xác định được điện trường gia tốc WF được kích thích bởi chùm electron.

## 2. TÍNH TOÁN CÁC ĐẶC TRƯNG CỦA TRẠNG THÁI “BLOW-OUT”

Sử dụng chùm electron có dạng hàm bi-Gaussian kích thích plasma, phương trình chuyển động của electron plasma được mô tả qua [5],

$$\frac{d}{d\xi} \left[ (1+\psi) \frac{d}{d\xi} r_b \right] = r_b \left\{ -\frac{1}{4} \left[ 1 + \frac{1}{(1+\psi)^2} + \left( \frac{dr_b}{d\xi} \right)^2 \right] - \frac{1}{2} \frac{d^2 \psi_0}{d\xi^2} + \frac{\lambda(\xi)}{r_b^2} \right\} \quad (1)$$

trong đó,  $\xi = ct-z$ ,  $r_b$ : bán kính blow-out,

$$\psi_0 = \frac{r_b^2(\xi)}{4} (1+\beta) \quad (2)$$

$$\psi = \psi_0 - \frac{r^2}{4} \quad (3)$$

$\beta = \beta(r_b)$ : hàm đặc trưng của  $r_b$

Thay (2) và (3) vào (1) và rút gọn thu được:

$$A(r_b) \frac{d^2 r_b}{d\xi^2} + B(r_b) r_b \left( \frac{dr_b}{d\xi} \right)^2 + D(r_b) r_b = \frac{\lambda(r_b)}{r_b} \quad (4)$$

với

$$A(r_b) = 1 + \left( \frac{1}{4} + \frac{\beta}{2} + \frac{1}{8} r_b \frac{d\beta}{dr_b} \right) r_b^2 \quad (5)$$

$$B(r_b) = \frac{1}{2} + \frac{3}{4} \beta + \frac{3}{4} r_b \frac{d\beta}{dr_b} + \frac{1}{8} r_b^2 \frac{d^2 \beta}{dr_b^2} \quad (6)$$

$$D(r_b) = \frac{1}{4} \left[ 1 + \frac{1}{\left( 1 + \frac{\beta}{4} r_b^2 \right)^2} \right] \quad (7)$$

$$\lambda(\xi) = \int_0^{r_b} r n_b dr \quad (8)$$

$n_b$  là hàm phân bố mật độ của chùm electron kích thích plasma. Chùm electron được bắn vào plasma có dạng hàm bi-Gaussian:

$$n_b = [N/(2\pi)^{3/2} \sigma_r^2 \sigma_z n_p] [e^{-r^2/2\sigma_r^2} e^{-z^2/2\sigma_z^2}] \quad (9)$$

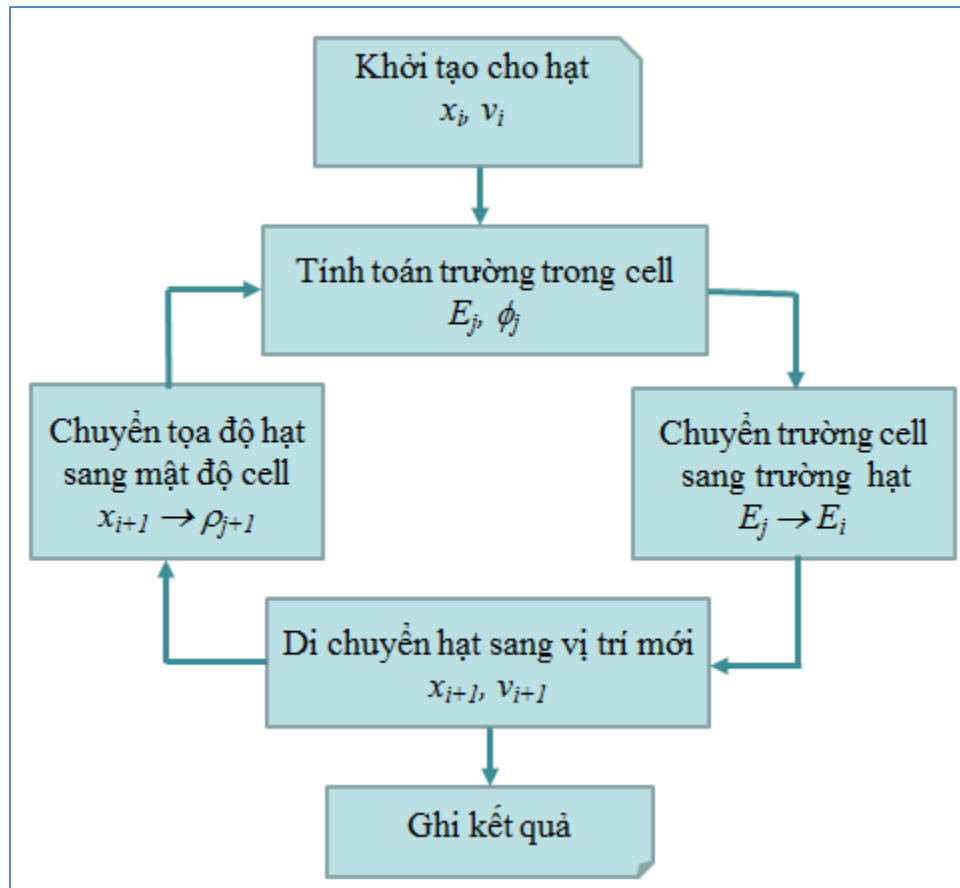
trong đó,  $n_p$ : mật độ plasma,

$\psi$ : hàm sóng electron,

$c$ : vận tốc ánh sáng,

$t$ : thời gian.

Phương trình phức hợp (4) không có giá trị xác định tại biên cũng như không có giá trị đầu nên các phương pháp giải thông dụng như phương pháp Runge-Kutta 4, phương pháp sai phân hữu hạn không áp dụng được. Trong báo cáo này, thuật toán PIC [6] được sử dụng để mô phỏng không gia pha và tìm lời giải tối ưu cho bán kính blow-out. Sơ đồ thuật toán PIC được mô tả trong hình 1.



**Hình 1:** Sơ đồ thuật toán PIC

Trong lưu đồ thuật toán hình 1,  $x_i, v_i$  là tọa độ và vận tốc hạt,

$E_i$ : điện trường tác động lên hạt,

$E_j$ : điện trường tác động lên cell,

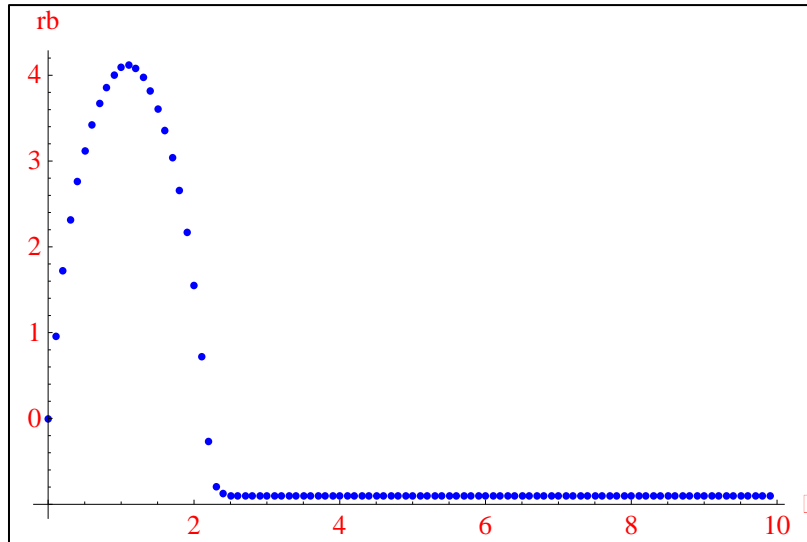
$\phi_j$ : thế năng tĩnh tác động lên cell,

$\rho_j$ : mật độ hạt trong cell

### 3. KẾT QUẢ TÍNH TOÁN

#### 3.1. Kết quả tính toán bán kính blow-out

Sau khi chương trình mô phỏng PIC kết thúc với số hạt vật lý,  $N_p = 100000$  hạt, số cell,  $N_G = 32$ , và số lần dịch chuyển thời gian,  $N_t = 200$  thu được kết quả như trong hình 2:

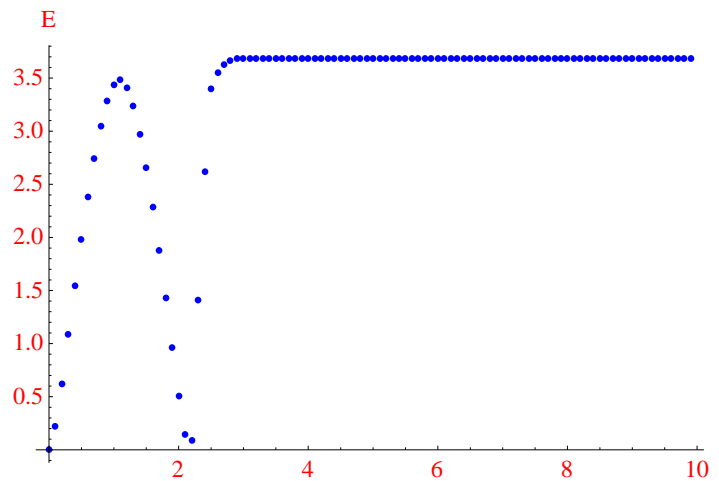


**Hình 2:** Bán kính blow-out thu được từ chương trình PIC

Bán kính blow-out tối ưu thu được là 4,2 rms, kết quả  $r_b$  tối ưu được đưa vào chương trình PIC để xác định điện trường gia tốc WF.

### 3.2. Kết quả tính toán điện trường gia tốc WF

Điện trường gia tốc WF thu được từ việc lấy đạo hàm phương trình (2) theo  $r_b$ , sau đó đưa giá trị  $r_b$  vào chương trình PIC thu được kết quả trong hình 3.



**Hình 3:** Điện trường gia tốc WF

Kết quả trong hình 3 cho thấy điện trường WF đạt cực đại 3,8 GV/m để gia tốc các hạt mang điện theo cơ chế PWFA.

## 4. KẾT LUẬN

Với việc bắn chùm electron năng lượng thấp (100MeV so với 27GeV [1, 7, 8, 9]), xung dạng hàm bi-Gaussian vào plasma có mật độ  $10^{22}$  hạt/cm<sup>3</sup> đã tạo ra trạng thái blow-out có bán kính 4,2 rms. Bán kính blow-out là thông số quan trọng quyết định đến cường độ điện trường WF. Chương trình tính toán bán kính blow-out và điện trường WF được xây dựng trên ngôn ngữ

VC++ với thuật toán PIC, kết quả điện trường WF cực đại thu được từ chương trình tính toán 3,8 GV/m. Kết quả của báo cáo này cho thấy hoàn toàn có thể sử dụng chùm electron năng lượng thấp (100 MeV) để kích thích plasma sinh ra điện trường gia tốc WF theo cơ chế PWFA.

### Tài liệu tham khảo

- [1] K.V. Lotov (2003), *Fine wakefield structure in the blowout regime of plasma wakefield accelerators*, Physical Review Special Topic – Accelerators and Beam, Vol 6, No. 061301.
- [2] M.H. Jensen (2003), *Computational Physics*, Department of Physics, University of Oslo.
- [3] P. Londrillo, C.Benedetti, A.Sgattoni, G.Turchetti (2010), *Charge preserving high order PIC schemes*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 620, pp.28–35.
- [4] R.D. Sydora (2007), Particle – In – Cell Plasma Simulation Model: Properties and Application, Advanced Methods for Space Simulations, edited by H. Usui and Y. Omura, pp. 47–60.
- [5] W. Lu, C. Huang, M. Zhou, W.B. Mori and T. Katsouleas (2006), Nonlinear Theory for Relativistic Plasma Wakefields in the Blowout Regime, Physical Review Letter, 96, 165002.
- [6] Stanford Linear Accelerator Center (2005), *The EGS5 Code System*, SLAC Report, 730, pp 20 – 61.
- [7] T. Tajima and J. M. Dawson (1979), *Laser Electron Accelerator*, Physical Review Letter, 43, pp. 267 – 231.
- [8] W.D. Kimura, H.M. Milchberg, P. Muggli, X. Li and W.B. Mori (2011), *Hollow plasma channel for positron plasma wakefield acceleration*, Physical Review Special Topic – Accelerators and Beam, Vol 14, No. 041301.
- [9] X. Wang, R. Ischebeck, P. Muggli, T. Katsouleas, C. Joshi, W. B. Mori, and M. J. Hogan (2008), *Positron Injection and Acceleration on the Wake Driven by an electron Beam in a Foil-and-Gas Plasma*, Physical Review Letter, 101, pp. 120801 - 120805.1

## **BLOW-OUT REGIME OF PLASMA WAKEFIELD ACCELERATOR EXCITED BY LOW ENERGY ELECTRON BEAM**

NGUYEN ANH TUAN<sup>1, 2</sup>, CHAU VAN TAO<sup>2</sup>, CHARY RANGACHARYULU<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Research and Development Center for Radiation Technology*

<sup>2</sup>*Faculty of Physics and Engineering Physics, University of Science, VNU-HCM*

<sup>3</sup>*Faculty of Physics and Engineering Physics, Saskatchewan University,  
Saskatoon, 116 Science Place, Saskatoon, SK S7N 5E2, Canada*

*Email: tuanhoang666@yahoo.com*

**Abstract:** Plasma wakefield excited by electron beam in blow-out regime which all electrons are expelled out axis and ions pushed back behind in uniform column. The ions column pull electrons back to the axis, plasma electrons oscillate around the axis at plasma frequency  $\omega_p$  due to momentum. In this article, radius of blow-out is calculated to determine synchronous and focusing conditions and amplitude of wakefield driven by low energy electron beam. Results of the calculation program show that radius of blow-out depends on energy of electron beam and plasma density, in case energy of 100 MeV, plasma density of  $10^{12}$  pars/cm<sup>-3</sup>, maximum wakefield amplitude of 0.8 GV/m.

**Keywords:** *electron beam, PWFA, PIC*