

レーザー加速ビームラインによる大電流ビーム輸送 PIC コードの検証

VERIFICATION OF HIGH-CURRENT BEAM TRANSPORT PIC CODE USING LASER ACCELERATION BEAMLINE

松本悠椰^{#, A, B)}, 榊泰直^{A, B)}, 永島圭介^{B)}, 畑昌育^{B)}, 遠藤友随^{B)}, 渡辺幸信^{A)}

Haruya Matsumoto^{#, A, B)}, Hironao Sakaki^{A, B)}, Keisuke Nagashima^{B)}, Masayasu Hata^{B)}, Tomoyuki Endo^{B)},

Yukinobu Watanabe^{A)}

^{A)} Kyushu University

^{B)} Kansai Institute for Photon Science (KPSI), National Institutes for Quantum Science and Technology

Abstract

In recent years, dependence on high-current ion accelerators has increased for medical and industrial applications. High-current accelerators have the unique feature of electrically neutralizing the ion beam to prevent beam loss due to the space charge effect. The feature makes it difficult to use conventional design codes for high-current accelerators. On the other hand, the ion beam produced by laser-driven ion acceleration is predicted to contain features similar to that of high-current accelerator. In this study, we plan to develop a new Particle-In-Cell simulation code that can be used to design a high-current accelerator. For the first step, we tried to match the laser accelerator with the code we developed.

1. はじめに

近年、核廃棄物に含まれる長寿命放射性核種の核変換処理や医療用アイソトープ製造等の医療・産業への応用のため、大電流加速器のニーズが高まってきている。しかし、大電流加速器では加速ビームの大電流化に伴ってビーム内荷電粒子間に働く斥力(空間電荷効果)の増大が生じるため、エミッタンスの増大やビームの不安定化等によるビーム損失が問題となる。その対策として、輸送ライン中にガスを注入して真空度を悪化させ、ガスとの衝突によってビームの電荷中和を引き起こす電荷中和法等の手法が提案されている。

一方、高強度レーザー科学の研究分野において、極短パルス高強度レーザーによる数十 MeV 級のイオン加速現象がビーム加速技術の一つとして研究されている。このレーザー加速によるビームは空間的に高品質であり、メガアンペア以上のピーク電流を持つ[1]。さらに、レーザー加速ビームは大電流である一方で、電流値に対して空間電荷によるビーム発散が抑制されていることが知られており、このことから電子が付帯することによって電荷中和が生じていると考えられているが、ビーム輸送時の具体的な挙動についての研究は十分に行われていない。

そこで、本研究では、電荷中和を考慮できる大電流ビーム輸送計算コードとして Particle-In-Cell コード(PIC コード)を提案し、レーザープラズマ相互作用のフェムト秒領域からビーム輸送のナノ秒領域まで連続的に計算可能な汎用性の高い PIC コードを新たに開発することにした。開発したコードを用いて、レーザー加速ビームの輸送過程での挙動を明らかにし、レーザー加速ビームラインの設計への有用性を確認する。この検証を踏まえて、大電流加速器へ適用可能なベンチマーク済みの汎用的 PIC コードの開発を行う。ここでは、開発の現状とレーザー加速実験結果との比較について紹介する。

[#] matsumoto.haruya@qst.go.jp

2. Particle-In-Cell シミュレーション

大電流加速器のように空間電荷効果が大きく、ビーム輸送過程で電離や再結合が起こる場合や、レーザー加速のようにレーザープラズマ相互作用が起こる場合等、非平衡状態であり非線形性を示す現象が支配している現象を扱うシミュレーションでは、電磁流体コードを用いることができず、粒子法による電磁粒子コードを用いる必要がある。電磁粒子コードには、代表的なものとして計算粒子の時間発展を運動方程式から解く PIC シミュレーションや 6 次元位相空間上の粒子分布関数の時間発展を Vlasov 方程式から解く Vlasov シミュレーションがある。Vlasov シミュレーションは 6 次元位相空間上の粒子分布関数を保持する必要があることから膨大なメモリが必要になる[2]という問題点から、近年限定的に開発が進められてきている状況であり、主流とはなっていない。本研究では、レーザープラズマ相互作用のためにレーザー波長以下のメッシュサイズが必要になったり、ビーム輸送のようにビーム拡がり程度のウィンドウサイズが必要になったりすることから、Vlasov シミュレーションを用いることは現実的でない。以上の理由から PIC シミュレーションを用いる。

今回開発した PIC コードに組み込んだ機能について Fig. 1 に示す。PIC の基本機能として、粒子の時間発展については Boris 法[3]を、電磁場の時間発展については時間領域差分法(FDTD 法)を用いた。それぞれで用いる微分方程式は Eq. (1), (2)の通りである。また、レーザー加速をシミュレートするため、レーザーによってターゲットがイオン化する Field Ionization や生じた電子が他の粒子に衝突することによってイオン化する Collisional Ionization、近距離粒子間相互作用としての Collision の機能等を追加している。Field Ionization はレーザーの集光強度に応じて多光子イオン化[4]とトンネルイオン化[5]を選択できるようにし、それぞれのイオン化レートを Eq. (3), (4)で算出後、モンテカルロ法によって各粒子に

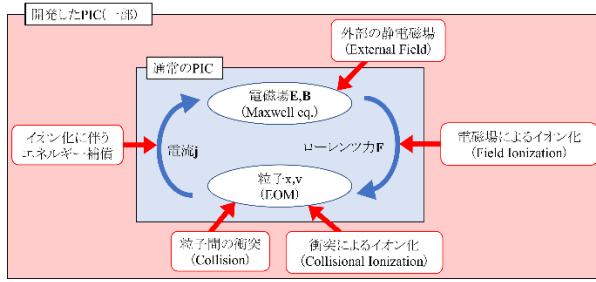


Figure 1: Overview of the flow of developed Particle-In-Cell simulation code.

ついてイオン化するか否かを判定している。どちらのプロセスを用いるかについては、Eq. (5)で求めたケルディッシュパラメータ γ_K を用いて、 γ_K が1より十分大きいときはトンネルイオン化を、その他のときは多光子イオン化のプロセスが優勢となることから判定する[6]。Collisional IonizationはLotsの経験式[7]によってイオン化レートをEq. (6)で算出後、こちらもモンテカルロ法によって各粒子についてイオン化するか否かを判定している。CollisionはBinary Collision Model[8]を採用している。また、ビーム輸送過程をシミュレートするために途中で入る四重極電磁石のような静電磁場を導入する機能等を追加している。なお、開発したPICコードは粒子の時間発展を3次元、電磁場の時間発展を2次元で計算するPIC2D(3V)であるが、四重極電磁石のような外部静電磁場の効果は3次元的效果であることから、静電場のみ3次元で導入し、粒子位置に作られる静電磁場を用いて計算する。

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{q}{m}(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{E} &= \rho / \epsilon_0 \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\partial \mathbf{B} / \partial t \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \\ \nabla \times \mathbf{B} &= \mu_0 \mathbf{j} + \epsilon_0 \mu_0 \partial \mathbf{E} / \partial t \end{aligned} \quad (2)$$

$$W_{\text{MPI}} = (CE)^{2N_{\text{MPI}}} \quad (3)$$

$$W_{\text{ADK}} = C_{nl}^2 f(l, m) |E_{\text{ion}}| \left(\frac{3E_{\text{laser}}}{\pi k} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{2k}{E_L} \right)^{2n-|m|-1} \exp\left(-\frac{2k}{3E_L}\right) \quad (4)$$

$$C_{nl} = \left(\frac{2e}{n} \right)^n (2\pi n)^{-\frac{1}{2}} \quad f(l, m) = \frac{(2l+1)(l+|m|)!}{2^{|m|}|m|!(l-|m|)!} \quad (4)$$

$$k = (2|E_{\text{ion}}|)^{\frac{3}{2}}$$

$$\gamma_K = \sqrt{\frac{E_i}{2U_p}} \quad U_p = \frac{q^2 E_0^2}{4m\omega^2} \quad (5)$$

$$\sigma_{ci} = 4.5 \times 10^{-18} N_v \frac{\ln(E/I_{\text{ion}})}{EI_{\text{ion}}} \quad (6)$$

ここで、Eq. (3)におけるCは任意の係数、Eはレーザー電場、 N_{MPI} は光電離に必要な最小光子数であり、Eq. (4)におけるZは原子番号、 E_{ion} はイオン化エネルギー、

E_{laser} はレーザー電場エネルギー、nは主量子数、lは方位量子数、mは磁気量子数であり、Eq. (5)における E_i はイオン化エネルギー、 U_p はポンデロモティブポテンシャルであり、Eq. (6)における N_v は対象となる価電子数、Eは電子エネルギー、 I_{ion} はイオン化ポテンシャルである。

3. レーザー加速器との比較検討

まず、レーザー加速部のシミュレーションの検証として、QST 関西研のJ-KAREN-P(チタン-サファイアレーザー: レーザー波長800nm)を用いてレーザー加速されたイオンをトムソンパラボラ分光器でエネルギー分光した。プラズマミラーでレーザーコントラストを向上させたレーザー径3 μm 、レーザー幅30fs、オンターゲットエネルギー10Jの集光強度 $4.7 \times 10^{21} \text{ W/cm}^2$ のレーザーを厚み105nmのターゲットに対して照射した結果、陽子の最大エネルギーが約55MeVだったのに対し、開発したPICコードでは、同様の条件で厚み100nm、密度 $21 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ の水素原子薄膜をターゲットとし、シミュレーションを実行したところ、トンネルイオン化、衝突イオン化、衝突の機能を入れて陽子の最大エネルギーが約59MeVと概ね一致した結果が得られた。

4. まとめと今後の計画

大電流加速器のシミュレーションおよび設計に用いられるParticle-In-Cellコードの開発を行った。まず、大電流加速器に適用可能であることを確認するため、レーザー駆動イオン加速器での実験結果と比較を行なうことにした。

レーザー加速部においては陽子の最大エネルギーが概ね一致したという結果が得られた。レーザー加速部の検証としては、ビーム粒子数の比較を行なう必要があるが、実験ではトムソンパラボラ分光器を用いるために、ピンホールを前に置く必要があることから、純粋に比較することができない。そのため、PICシミュレーションにおいてピンホールを実装するか実験でのピンホールを通過する粒子の割合を算出するかのいずれかによって比較する必要がある。

ビーム輸送部においてはレーザー加速のスケールと比較して大きいスケールで計算する必要があることから、現実的な時間で実行可能であり、計算精度を適切に担保できる空間メッシュの粗さと1ステップあたりの時間を最適化する必要がある。

謝辞

本研究は、JST、未来社会創造事業、JPMJMI17A1の支援を受けて実施された。

参考文献

- [1] T. E. Cowan *et al.*, "Ultralow Emittance, Multi-MeV Proton Beams from a Laser Virtual-Cathode Plasma Accelerator", *Phys Rev Lett*, 204801, 2004.
- [2] 梅田隆行, "第一原理無衝突プラズマシミュレーション用5次元ブラソフコードの性能評価", *スーパーコンピューティングニュース*, Vol.15, No.1, 2013, 47-55.
- [3] Bunemann, O, "Time reversible difference procedures", *J. Comput. Phys.*, 1967.
- [4] Corkum P. B., "Plasma perspective on strong field

- multiphoton ionization”, Phys. Rev. Lett. 71, 1993.
- [5] L. V. Keldysh, “IONIZATION IN THE FIELD OF A STRONG ELECTROMAGNETIC WAVE”, Sov. Phys. JETP, 20, 1965, 1307.
 - [6] M. V. Ammosov *et al.*, “Tunnel ionization of complex atoms and of atomic ions in an alternating electromagnetic field”, Soviet Physics. JETP 64 No.6, 1986, 1191-1194.
 - [7] W. Lotz, “Electron-impact ionization cross-sections and ionization rate coefficients for atoms and ions from hydrogen to calcium”, Zeitschrift für Physik 216, 1968, 241-247.
 - [8] T. Takizuka *et al.*, “A binary collision model for plasma simulation with a particle code”, JOURNAL OF COMPUTATIONAL PHYSICS 25, 1977, 205-219.