

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 28 日現在

機関番号：82118

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26600147

研究課題名(和文) 超高輝度荷電粒子ビームの表現方法の基礎研究

研究課題名(英文) Study of expression method for high brightness charged particle beam

研究代表者

宮島 司 (MIYAJIMA, Tsukasa)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・准教授

研究者番号：50391769

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：加速器中の荷電粒子ビームの数値解析においては、ビームの運動状態の精度(位相空間分解能)と自由度の数(粒子数)の関係が重要となる。質量電荷比を保存した古典的な点電荷としてビームを表現するマクロ粒子法に対して、統計力学の手法を規範として、ビームの位相空間分解能と自由度の数を定量的に評価する手法、およびそれを用いた数値計算コードの開発を行い、空間電荷効果が支配的なビームに対する自由度の数の影響を評価する方法を確立した。本方法により、ビーム分布端部における自由度の数の重要性を定量的に評価できるようになり、今後の解析精度向上に向けた指針を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：For numerical analysis of charged particle beam in accelerator, the relation between the accuracy of the motion, which corresponds to the resolution of the phase space distribution, and the degree of freedom, which corresponds to the number of particles in the charged particle beam, is important. Based on the renormalization group in the statistical mechanics, we developed a new method to analyze the relation between the resolution of the phase space and the degree of freedom for macro-particle model, which had same mass-to-charge ratio and was widely used to express the charged particle beam. Based on the new method, we developed a new numerical simulation code. Using the new code, space charge dominant beam was analyzed, and confirmed that the degree of freedom around the edge of the beam distribution affected the resolution of the phase space distribution. The results are effective to improve the resolution for the numerical analysis of the charged particle beam.

研究分野：ビーム物理学

キーワード：荷電粒子ビーム 加速器 マクロ粒子 位相空間分布 空間電荷効果 電磁場解析 シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

粒子加速器は、荷電粒子ビームの高輝度化、大出力化が進められ、新たな素粒子の発見や、物質のナノスケールやフェムト秒での現象の観測など多くの革新をもたらしてきた。ビームの高輝度化、大出力化というのは、言い換えると、荷電粒子を如何に位相空間（位置・運動量空間）の狭い領域に集めるかということであり、これが粒子ビームの高性能化の鍵となってきた。

荷電粒子ビームの運動を解析的に扱う際には、ビームをモデル化して、幾つかの荷電粒子を一纏めにした古典的な点電荷の集まりとして表すマクロ粒子法（図1）が一般に使われる。このときビームの運動状態の精度、すなわち位相空間の分解能は、系の粒子数が決めることになる。高輝度・高出力のビームでは、必要とされる荷電粒子数が膨大になるが、原理的にはマクロ粒子数を増大させることによって分解能の向上を図れる。しかしながら、物理は対象とする系の普遍性を探求する行為であるという側面を見ると、このアプローチは思考停止状態に陥っていることに等しい。別のアプローチとして、モデル化した系の持つ普遍性に焦点を当て、系の自由度と分解能の関係を実証することができれば、「ビーム物理」そのものに対する新しい知見を与えるだけでなく、次世代加速器やその先の極限の高輝度ビーム実現に向けた道を切り開くことに繋がる。

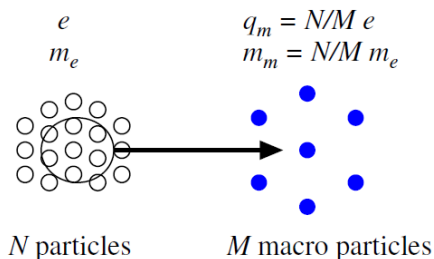


図1: N 個の電子集団から M 個のマクロ粒子集団への置き換え。質量電荷比 m_e/e は保存される。

本研究の先駆けとして、2012年の加速器学会において、荷電粒子ビームを表現するということはどういうことかという問掛けを提示し、多くの場合6次元位相空間での粗視化された粒子分布の再現性が判断基準となっているということを報告した（引用文献）。この研究報告に対して多くの反響があり、本研究のテーマとするビームのモデル化法の基礎研究は高い関心を惹く課題であり、ビーム解析における根源的な課題、言い換えると古くからあるがこれまで解決できなかった課題であることを強く確信するに至った。これらの課題に対して、多数の自由度を取り扱う統計力学の知見から類推したときに、数値解析での自由度を極限まで増加させるという力技による解析ではなくて、統計力

学の知見を規範として、系の持つ普遍性を利用した別のアプローチが有効であるという着想に至った。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ビームを記述するモデルの解析精度と自由度の数との間の関係性を明らかにし、次世代加速器やその先の極限のビーム性能をも記述可能なモデル化法を構築することである。

具体的な研究目的は、加速器中の荷電粒子ビームを相対論的古典粒子集団として表現したときのビームの表現と再現性について、静的な側面（ビームの静止系における運動）と動的な側面（ビームの時間発展）に対して、下記の3つを定量的に評価する手法を確立することである。

- (1) 自由度（粒子数）を増減させたときに、運動状態に関する位相空間上の情報がどのように変化していくかを示す変換規則（自由度と位相空間の解析精度の関係性）
- (2) 系の自由度と電磁場分布の分解能（自由度と電磁場分布の解析精度・空間スケールの関係性）
- (3) 粒子分布・電磁場分布の時間発展に対する解析精度と時間スケールの関係性

また、次世代加速器では高輝度化、大出力化の行き着く先として荷電粒子が極めて高密度となり、量子力学的な側面が発露することが予想される。相対論的量子集団としてビームを表現することについての基礎的な考察を行い、古典的粒子集団として扱った場合との差がどのような条件で現れてくるかに対して、基礎的な知見を得ることも本研究の目的である。

3. 研究の方法

本研究では、理論解析、数値解析を主な手法として、加速器での荷電粒子ビームをモデル化した際の自由度と位相空間・電磁場分布の関係性を実証することを具体的な目標とした。

理論解析においては、統計力学における粗視化の手法を規範として、対称性の高い単純な荷電粒子ビーム分布に対して、強磁性体を現すモデルで用いられるブロックスピン変換（近接する複数のスピンを一纏めにして新たな粗視化されたスピンの集合を作る変換）のアイデアを基にして、自由度と位相空間・電磁場分布の分解能の関係性を定量的に評価する手法を確立した。最も単純な系である円筒対称性のあるパンチ長がゼロのビームを対象として解析を開始する。この場合、荷電粒子集団の運動は1次元となり、集団の運動状態は位置と運動量の位相空間（2次元平面）分布で表わされることになる。最も単純な1次元系の解析が終わった後に、より現実に近いビームに適用範囲を拡張していくが、理論解析は格段に難しくなることが予想さ

れるため、数値解析を並行して実施する。

数値解析においては、理論解析で求めた結果の検証と、現実の加速器中でのより複雑なビームにおける自由度と位相空間の再現性を調査するために、目的別に次に示す3つのプログラムを段階的に開発した。

- (1) 位相空間の粗視化プログラム（ブロックスピン変換を実装して位相空間分布を再現）
- (2) 電磁場分布計算プログラム（位相空間分布に対して電磁場分布を再現）
- (3) 粒子トラッキングプログラム（時間発展を計算）

これらの理論解析、数値解析においては荷電粒子ビームを相対論的古典粒子の集団として取り扱った。

また、ビームモデル化の際に荷電粒子の量子性がどのような影響を与えるかについては、電子顕微鏡での電子線の取り扱いを規範として、量子性の影響の評価を実施した。

4. 研究成果

(1) 二粒子対変換の導入

マクロ粒子数を減らす操作を定式化するための新たなアイデアとして、近接する2つのマクロ粒子を新たな1つのマクロ粒子（質量電荷比は保存）に置き換える操作、二粒子変換（Particle Pair Transformation）を定義・導入した（図2）。二粒子対変換は次の5つのステップで粒子数を減らす操作を定式化する。

- 元の粒子分布の重心を計算
- 重心から最も遠くにある粒子と、それに最近接の粒子を選ぶ
- 選んだ二つの粒子の平均位置を計算
- 選んだ二つの粒子を新たな一つのマクロ粒子で置き換える（新たなマクロ粒子：位置は で求めた平均位置、質量と電荷は元の粒子の2倍）
- 元の粒子分布のすべての粒子が新たなマクロ粒子に置き換わるまで ~ の操作を繰り返す

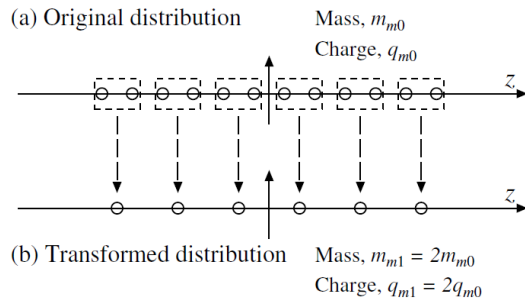


図2：一次元荷電粒子分布に対する二粒子対変換の模式図。

(2) 二粒子対変換の有効性の検証

二粒子対変換の有効性を検証するために、静的な1次元荷電粒子分布に対して変換を適用し、平均粒子間距離の変化を検証した。図

3に示すように、二粒子対変換を繰り返す毎に平均粒子間距離は大きくなっていく様子を正確に再現することができた。このように、新たに定義した変換によって、粒子数を変えたときの影響を定量的に評価することが可能になり、理論解析から得られる厳密な解と比較することが可能となった。

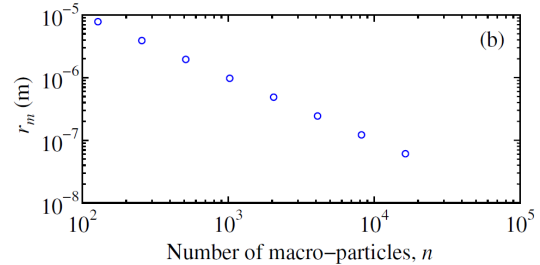


図3：二粒子対変換によって減らされた粒子数と平均粒子間距離の関係。

(3) 静的な荷電粒子分布に対する解析

二粒子対変換の有効性を確認したあと、この変換を加速器中の荷電粒子ビームを静止系で観測した場合に相当する静的な荷電粒子分布に対して適用し、解析を行った。解析に当たっては、二粒子対変換をプログラムコード MATLAB 上で実装し、幅広い粒子分布に対して適用できるようにした。静的な分布に対して位相空間の分解能を評価するために、荷電粒子間にはクーロン斥力（空間電荷効果）が働くとして、静電場と荷電粒子位置で作る仮想的な位相空間分布を定義した。

まずは、1次元荷電粒子分布に対して、変換を繰り返す毎にその分布が作る静電場が変化していく過程を定量的に評価した。この結果、粒子数が減っていく過程における位相空間の分解能の変換規則と、粒子間距離の変換規則を得ることができた。また、理論解析可能な一様電荷分布についての解と比較し、粒子数による影響を評価することができた。

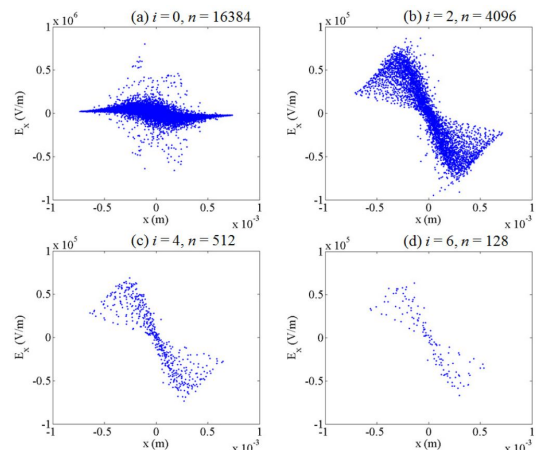


図4：二粒子対変換を繰り返したときの位相空間分布の変化（1次元電荷分布）

1次元系で二粒子対変換の有効性を確認したあと、これを2次元荷電粒子分布に拡張し、

同様の変換規則を得ることができた。2次元系では、1次元増えたことにより近接する荷電粒子が増えることによって、電荷密度の高い領域で二粒子対変換前後の位相空間分布の変化が大きいことを確認することができた。

また、荷電粒子ビームの数値計算では初期分布が重要となるため、変換前の初期分布の影響についても解析を行った。粒子分布を計算機上で再現する場合は、本研究では、元となる電荷密度分布関数を再現するように、一様分布、乱数分布、準乱数分布によって初期粒子分布を生成し、それぞれの初期分布に対して二粒子対変換を適用し、どのように分布が変化していくかを解析した(図5)。異なる初期分布から出発しても、二粒子対変換により荷電粒子分布は粗視化されるため、ある程度変換を繰り返すとほぼ同じ分布に行き着くことを確認することができた。

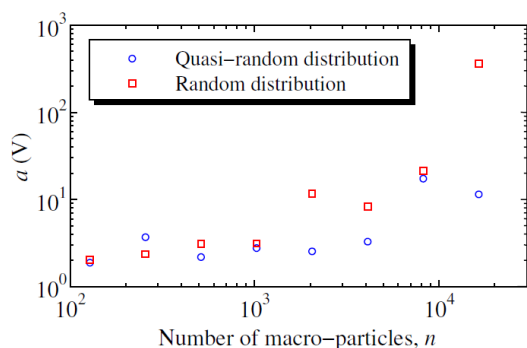


図5：初期粒子分布の影響。乱数分布と準乱数分布に対して二粒子対変換を適用したときの位相空間上の面積の変化。

本成果については、国際粒子加速器会議 (IPAC15, 米国) 及び日本加速器学会年会 (2015年) にて報告を行った。また、次の段階として、本方法を3次元分布へ拡張した。ただし、3次元化にあたっては計算量が大幅に増大するため、計算コードをMATLABからC言語に切り替え、変換の高速化を行っている。

(4) 荷電粒子分布の時間発展に対する解析

時間発展する粒子分布に対応するために、数値計算コードの拡張を行った。時間発展を含んだコードを用いて、まずは荷電粒子ビームの静止系における解析を行った。系の時間発展は、空間電荷力を含んだ荷電粒子の運動方程式を4次のルンゲクッタ法で解くことで記述される。また、二粒子対変換も含まれており、粒子数の変化も解析できるようにした。

荷電粒子分布の時間発展に対する解析では、まず初期荷電粒子分布を設定し、これに二粒子対変換を適用して粒子数を減らした初期分布を複数生成し、時間発展によってそれらの位相空間分布がどのように変換するかを解析した。粒子数が異なる初期分布から時間発展が開始された場合、初期時刻近傍ではほぼ同じ振る舞いをするが、時間が進むと

徐々に変化が大きくなっていくことが確認された(図6)。

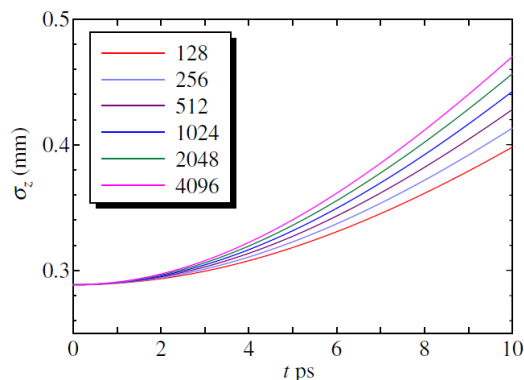


図6：異なる粒子数をもつ粒子分布のビームサイズの時間発展。

このときの位相空間分布の空間電荷効果による時間発展は図7のように、まず粒子分布の端部から進行し、それが徐々に分布中心付近に進んでくる。

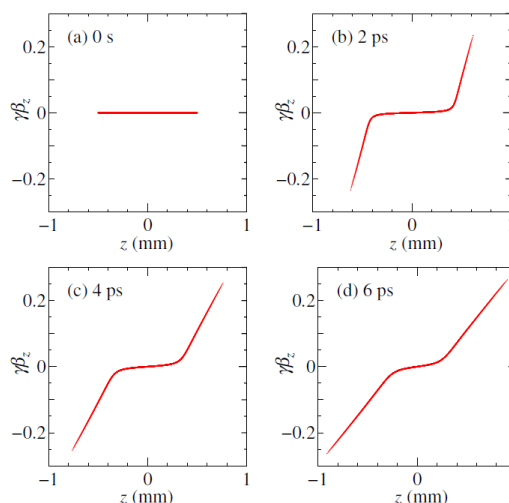


図7：マクロ粒子数 4906 個のときの位相空間分布の時間発展。

ある程度時刻が進んだときの位相空間分布を比較すると、図8に示すように、分布中心付近ではほぼ同じ分布となるが、端部において粒子数の影響が顕著に現れることが確認された。本成果については、線形加速器国際会議 (LINAC 16, 米国) 及び日本加速器学会年会 (2016年) にて報告を行った。

以上の相対論的古典粒子集団としてビームを表現したときの自由度と位相空間分解能の解析において、本研究では、

二粒子対変換によってマクロ粒子モデルに対して自由度を減らす方式を定式化し、定量的に影響を評価する方法を確立できたこと

荷電粒子密度の高い領域(粒子間距離の近い領域)における影響が大きいこと
空間電荷効果による影響は、分布中央付近では粒子数に対する依存性は小さい

が、分布端部においてはその影響が支配的であることの3つを示すことができた。

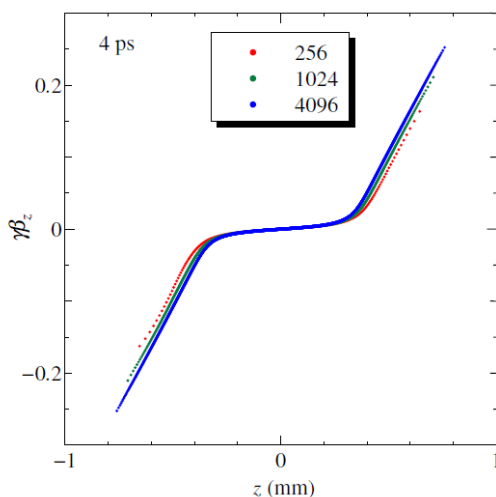


図8：マクロ粒子数 4906 個のときの位相空間分布の時間発展。

(5) 今後の展望

本研究では、自由度の数と位相空間分解能の関係について、何等かのスケーリング則を解析的な方法で構築することも一つの目標であったが、単純な荷電粒子分布においても関係性は複雑であり、研究期間内にはそこまで到達することはできなかった。しかしながら、二粒子対変換と数値解析によって、分解能に影響する領域とそうでない領域をある程度特定することができた。これらの知見は、今後効率的な荷電粒子ビームの数値計算を行う上での重要な情報となる。本研究で得られた知見を活かして、具体的な加速器中の荷電粒子ビームの数値計算精度向上を目指すことが次の課題となる。

< 引用文献 >

Tsukasa Miyajima, Proceedings of the 9th Annual Meeting of PASJ, pp.134-137 (2012).

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計0件)

[学会発表](計5件)

Tsukasa Miyajima, Effect of number of macro particles on time evolution of phase space distribution, 28th Linear Accelerator Conference, LINAC 16 (国際会議), 2016年9月27日, East Lansing (USA)

宮島 司, 二粒子対変換を用いた位相空間分解能のマクロ粒子数依存性解析の 3

次元系への拡張、第13回日本加速器学会年会、2016年8月8日、幕張メッセ国際会議場(千葉県千葉市)

Tsukasa Miyajima, Effect of number of macro particles on resolution in phase space distribution, 2015年5月4日, 6th International Particle Accelerator Conference, IPAC'15, Richmond (USA)

宮島 司, 二粒子対変換を用いた荷電粒子位相空間分布のマクロ粒子数依存性の解析、2015年8月6日、第12回日本加速器学会年会、プラザ萬象(福井県敦賀市)

宮島 司, 荷電粒子ビームの静的な位相空間分布に対するマクロ粒子数の影響、ビーム物理研究会2014、2014年11月25日、みやづ歴史の館文化ホール(京都府宮津市)

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

[その他]

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮島 司 (MIYAJIMA, Tsukasa)
高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・准教授
研究者番号：50391769

(2) 研究分担者

該当者なし

(3) 連携研究者

原田 健太郎 (HARADA, Kentaro)
高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・准教授
研究者番号：70353365

島田 美帆 (SHIMADA, Miho)
高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・研究機関講師
研究者番号：10442526

帯名 崇 (OBINA, Takashi)
高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・准教授
研究者番号：60290855

(4)研究協力者
該当者なし