

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 4 月 8 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24340053

研究課題名(和文) 実験室加速器物理の創成～非中性プラズマ制御技術に基づく先進粒子加速器の設計研究

研究課題名(英文) Establishment of the basis of laboratory accelerator physics

研究代表者

岡本 宏己 (Okamoto, Hiromi)

広島大学・先端物質科学研究科・教授

研究者番号：40211809

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：加速器中を運動する荷電粒子ビームと線形場で集束された非中性プラズマの物理的等価性に着目し、小型のプラズマトラップシステムをビームダイナミクスの基礎研究に応用する新奇な実験手法を発展させた。高周波および磁気トラップを用い、大強度ビームの集団共鳴不安定性、共鳴横断効果、ビームハロー形成等に関する系統的实验を実施した。いくつかの典型的なビーム集束パターンに対する共鳴不安定条件を明らかにすると共に、加速器の動作点が整数共鳴領域を横断した際に発生する粒子損失率を実験的に評価した。また、初期不整合に起因するビームハロー形成過程を近似的に再現し、そのパラメータ依存性を調べた。

研究成果の概要(英文)：It is possible to show that the collective motion of a charged-particle beam in a modern accelerator is physically almost equivalent to that of a non-neutral plasma confined in a compact trap system. Making use of this fact, we developed novel tabletop apparatuses for the systematic experimental study of intense beam dynamics. The developed trap systems have been employed to explore several fundamental issues including coherent resonance instability in high-density hadron beams, the effect of resonance crossing, mismatch-driven halo formation processes, etc. Through a number of systematic measurements, we revealed the parameter-dependence of resonance stop bands in a few typical beam-focusing lattices and the rate of particle losses during integer-resonance crossing. We also succeeded in reproducing the mismatch-induced beam halo and examined the condition of halo generation.

研究分野：数物系科学

キーワード：加速器 荷電粒子ビーム 非中性プラズマ 空間電荷効果 イオントラップ ソレノイドトラップ

1. 研究開始当初の背景

粒子加速器は近年めざましい発展を遂げており、基礎物理学の範疇を超え、医療、物質・生命科学、放射光生成、産業利用など、様々な領域で積極的に活用されるに至っている。その有用性が各方面で認識されるに伴い、加速器が生み出す荷電粒子ビームの性能に対する要求もますます高度化しつつある。とくに最近では、ハドロンビームの大強度化あるいは高密度化が進んでおり、いわゆる“空間電荷効果”(クーロン自己場による集団的なビーム不安定化現象)に対する物理的理解の深化が強く求められている。

しかしながら、荷電粒子ビームの性質を系統的に調べる作業には多くの困難が伴う。たとえば、加速器は通常きわめて複雑かつ高価で、ビームダイナミクス上重要な基本パラメータの可変範囲にも厳しい限界がある。そもそも、いったん建設された加速器の基本構造を実験目的に合わせて大きく変更することはできないし、また相対論的速度で運動する粒子ビームの挙動を高精度で観測するのは容易ではない。最近では、高性能の並列計算機を用いた数値シミュレーションが多用されているが、クーロン場を介して相互作用している膨大な数の荷電粒子の運動を高い精度で追跡するのは至難の業である。結局、或る種の近似的な理論モデルを使って計算時間の短縮を図らざるを得ない。

2. 研究の目的

荷電粒子ビーム物性の基礎研究に付随する様々な困難を回避するため、本研究では従来のいかなる手法とも本質的に異なる実験的アプローチの創出とその有効性の実証に取り組んだ。上述した通り、現在入手可能な計算機の能力では大強度ビームのように複雑な非線形多体系の振る舞いを正確にシミュレートするのは非常に難しい。言うまでもなく、自己無撞着な数学的理論の構築は不可能に近い。加速器に依拠する限り、実験的研究手法にも様々な限界がある。そこで本研究代表者により提唱されたのが“実験室加速器物理”という新しい概念である。実験室加速器物理はあくまでも荷電粒子ビームの基礎物性研究を目的としているが、しかしながら加速器は一切使わない。代わりに、加速器中の荷電粒子ビームと物理的に等価な“非中性プラズマ”をコンパクトな卓上装置中に生成し、その振る舞いを観測することによって、ビームの安定化に必要な条件を明らかにする。広島大学で開発された、この斬新な実験システムは“S-POD”(Simulator of Particle Orbit Dynamics)と呼ばれている。

S-PODの開発プロジェクトは10年ほど前にスタートし、過去の基盤研究等を通じて多くのノウハウが蓄積されてきた。その成果を背景に、S-PODがビーム物理学上の幅広い問題に適用可能であることを具体的に示すのが本基盤研究の主な目的である。

3. 研究の方法

(1) 実験原理

加速器中の荷電粒子ビームは、多くの場合、周期的に配列された線形集束力(磁気四重極場)によって空間的に集束されている。ビームの進行方向に直交する x - y 平面上での粒子運動は以下のハミルトニアンに支配されている:

$$H = \frac{p_x^2 + p_y^2}{2} + \frac{1}{2}K(s)(x^2 - y^2) + I\phi \quad (a)$$

ここで、 (p_x, p_y) は空間座標 (x, y) に共役な運動量、 ϕ は荷電粒子集団が創るクーロン平均場のポテンシャル、 I は荷電粒子の種類やビームのエネルギーに依存する定数、独立変数 s はビームが設計軌道に沿って進んだ距離を表す。また、 $K(s)$ は s の周期関数で、加速器のラティス構造に依存する。“ラティス”とは四重極集束要素(通常、電磁石)の規則的な配置パターンを指し、加速器によって大きく異なる。

本研究代表者が理論的に示したように、或る種の非中性プラズマトラップ中に捕獲された荷電粒子群の集団運動は式(a)と同形のハミルトニアンに従う。よって、加速器中のビームにおいて観測される現象はプラズマトラップにおいても観測されなければならない。この単純な数学的事実に基づき、荷電粒子ビームが示す複雑な非線形集団運動の実験的シミュレータとして開発されたのが S-POD である。言うまでもなく、S-POD は加速器に比べ遙かにコンパクトかつ安価である。各種パラメータの可変範囲も圧倒的に広い。また、大量の粒子損失によって装置が放射化する心配も無い。S-POD で得られた観測データをビーム重心系へ変換することにより、加速器中で起こる空間電荷効果をあらかじめ予測することができる。

(2) S-POD システム

S-POD に応用可能な小型の非中性プラズマ生成・捕獲装置には2種類ある; ひとつは高周波電場を利用する、いわゆる“線形ポールトラップ”(LPT)、もうひとつは一樣磁場を使った“ペニング・マルンバーグ型トラップ”(PMT) である。LPT に基づく S-POD は過去の準備研究を通じて既に複数が構築済みである。これら既存の S-POD に加え、本研究では新たに小型の PMT を設計・試作した。各トラップシステムの仕様は以下の通りである:

① LPT: Linear Paul Trap

高周波四重極によって x - y 自由度のプラズマ集束を実現する。閉じ込め領域の内径は 10 mm、基本運転周波数は 1 MHz である。トラップ軸方向 (z 自由度) の荷電粒子閉じ込めは分割電極に直流電圧を加えることで達成する。本実験では主に $^{40}\text{Ar}^+$ イオンのプラズマを使用した。ただし、ドップラーレーザー冷却実験を行う場合は $^{40}\text{Ca}^+$ イオンを用いる。いずれの場合も必要な高周波電圧の振幅は最

大 100 ボルト程度である。 $^{40}\text{Ar}^+$ は中性のアルゴンガスを真空容器に導入後、小型電子銃からの低エネルギー電子線で Ar 原子をイオン化して生成する。 $^{40}\text{Ca}^+$ プラズマの生成には原子オープンを使う。イオン密度はガス圧やイオン化時間、電子ビーム電流などを加減することにより、一定の範囲で調整可能である。イオン化終了後、所定の実験過程を経て、プラズマを測定器方向へ排出する。現在利用可能な測定器はファラデーカップ、マイクロチャネルプレート(MCP)、CCD カメラである。これらを用いて、残存イオン数や x - y 平面上でのプラズマプロファイルを計測できる。尚、四重極電極に加える高周波電圧波形やバイアス電圧、それらをオン・オフするタイミング、プラズマ生成等、一連の実験過程は自動化されており、必要なパラメータをあらかじめパソコンに入力しておけば短時間で大量のデータが取得できる。

② PMT : Penning-Malmberg Trap

ソレノイドコイルで z 軸方向に一樣な磁場を生成し、これによって x - y 自由度のプラズマ集束を実現する。真空容器内部には多数のリング状電極が配置されており、それぞれの電極に直流電圧を印加することによって z 軸方向にプラズマ閉じ込めのためのポテンシャル井戸を形成する。既存のシステムに加え、本科学研究費で新たに小型の PMT を構築した。コイルは常伝導で、 z 軸上に最大 1 kG 程度の一様磁場をつくることことができる。リング電極の内径は 40 mm とした。主に純電子プラズマの閉じ込めを想定した設計となっているが、(旧 PMT とは異なり) イオンの閉じ込めも可能である。電子群は真空容器末端に設置した電子銃から磁場コイル中央部に入射され、リング電極に加えた直流電圧を素早くスイッチすることによりポテンシャル井戸に捕獲される。閉じ込められた純電子プラズマは、所定の実験過程を経た後、電子銃の反対側に据え付けられた測定器へと排出される。蛍光面付き CCD カメラが使用されており、残存電子数およびプラズマの断面形状 (x - y 平面上のプロファイル) が測定可能である。また、リング電極に誘起された鏡像電荷量から、プラズマ全体が行う集団振動の振動数も必要に応じて測定している。新 PMT 本体は初年度中に完成し、2 年目より試験運転を開始した。10 の 8 乗個近い電子の安定な閉じ込めに成功しており、現在、旧 PMT システムと共にビームハロー生成実験のため活用されている。

4. 研究成果

(1) 集団共鳴

一般の加速器は(強集束の原理に基づき)離散的に配置された多重極電磁石によってビームの運動を制御している。上で触れたように、それぞれの加速器に特有な電磁石の配置パターンのことを“ラティス”と称する。ハミルトニアン(a)中の周期関数 $K(s)$ の形は

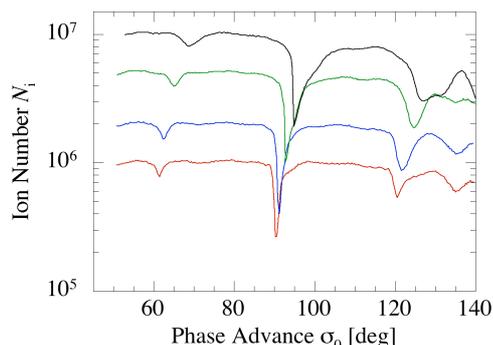


図1 FODO ラティスの共鳴不安定領域

ラティス構造に依存して決まる。S-POD 実験には「四重極電極に与える高周波電圧の波形を変えるだけで関数 $K(s)$ の形を簡単に調整できる」という大きな利点がある。すなわち、LPT 自体には触れることなく、多様なラティス構造に対応した強集束ポテンシャルを再現することが可能である。電圧波形の調整には、ソフトウェア“LabVIEW”を搭載したパソコンが使用されている。

加速器中の荷電粒子ビームは強集束ラティスによる周期的な駆動力を絶えず受けるため、共鳴的に不安定化することが知られている。共鳴条件は $K(s)$ の関数形やビームの密度に依存する。最も一般的な強集束ラティス構造は極性の異なる四重極磁石を交互に配置した、いわゆる“ダブルレット”である。中でも、隣接した磁石間の距離が一定で、かつ、その距離と磁石の幅が等しいラティスを“FODO”と称する。図1は、FODO 型の電圧波形を使って LPT に閉じ込めた $^{40}\text{Ar}^+$ イオンの内、最終的にファラデーカップで検出されたイオン数をプロットしたものである。閉じ込め時間は 10 ms であるが、これは 1 万回の FODO 周期の繰り返しに相当する。初期イオン数は 10 の 6 乗個から 7 乗個の間で 4 段階に調整してある。横軸の σ_0 は単一 FODO 周期当たりのベータatron振動位相の増分で、線形集束力が実効的に強くなるほど大きな値をとる。この図から、 $\sigma_0 \approx 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ 付近に明確な不安定領域が確認できる。また、いずれの不安定領域も初期イオン数(換言すれば、イオン密度)の増加と共に右方向へシフトしていることが分かる。最も顕著な $\sigma_0 \approx 90^\circ$ 付近のイオン損失は、主として線形の集団振動モード(四重極モード)の不安定性に起因していると考えられる。FODO ラティスだけでなく、より一般的なダブルレット集束を想定した実験を系統的に行った結果、波形の詳細に依らず常に図1とほぼ同じ不安定領域分布が得られた。

ダブルレットの集束パルス(F)と発散パルス(D)の幅を独立に調整すれば、 x 方向と y 方向のベータatron振動数を任意の異なる値に設定できる。両方向の単位ダブルレット波形当たりの位相増分をそれぞれ σ_{0x} および σ_{0y} とし、これらを横軸と縦軸にとって 10 ms

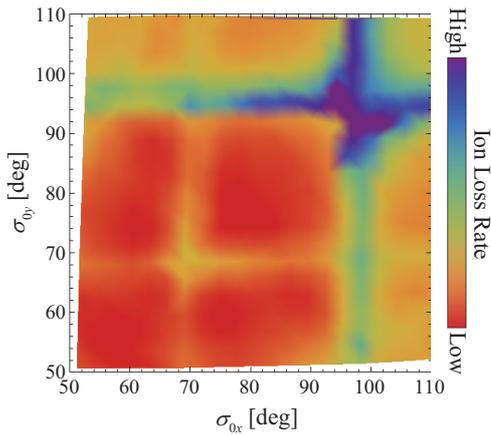


図2 イオン損失率ダイアグラム

後の残存イオン数を色分けしたダイアグラムが図2である。初期イオン数は10の7乗個である。この結果から、図1の実験条件(すなわち、 $\sigma_{0x} = \sigma_{0y}$)で確認された不安定領域はいずれも、 x および y 方向の1次元的な共鳴を同時に含んだものであると結論してよい。これらの実験観測データは、並行して行った多粒子シミュレーションの結果と非常に良く一致する。

ダブレットをより複雑化した、“トリプレット”および“FFDD”型のラティスについても同様の実験を実施した。まず、FFDD ラティスについては予想通り、図1と似通った共鳴不安定性が確認できた。FFDD は単一ラティス周期に2個の集束パルスと2個の発散パルスを含むが、全体としてはダブレットに近いので、この結果は妥当である。一方、トリプレットによる集束力は x および y 方向で非対称にならざるを得ない。一般に $\sigma_{0x} \neq \sigma_{0y}$ なので、不安定帯の分布は図1のパターンよりやや複雑になる。しかしながら、個々のイオン損失領域の位置、つまり共鳴条件は低次集団振動モードの1次元的な不安定性に基づいて説明できることを確認した。

(2) 固定磁場強集束加速器における共鳴横断
通常の間形加速器では、ビームの加速過程で“チューン”は適切な値に固定されている。チューンとはビームを構成する各粒子が加速器を一周する間に行うベータatron振動の振動数のことである(前節で扱った“ベータatron振動位相”の間形加速器一周分の増分を 360° で割ったものに対応する)。ところが、近年盛んに研究されている非スケール型の“固定磁場強集束加速器”(FFAG)においてはビームエネルギーの増加に伴ってチューンが大きく減少する。この際、加速器の動作点は必然的にいくつかの共鳴不安定領域を横断することになる。S-PODを用いて、この共鳴横断現象の系統的研究を進めた。とくに、双極磁場誤差に起因する整数共鳴に着目した実験を英国のラザフォード・アップルトン研究所(RAL)のメンバーと共同で実施し

た。RALはつい最近、非スケール型FFAG加速の実証器“EMMA”を建設している。よって本実験では、EMMAの基本設計を或る程度念頭に置いてパラメータを選んだ。

LPT中のプラズマ閉じ込め場には周期的な双極子成分は存在せず、整数共鳴は普通起こらない。本研究では、対向する2本のロッド電極にそれぞれ正負の高周波電圧を付加し、強制的に整数共鳴を誘起した。通常の運転条件で得られた不安定領域の分布(黒線)と摂動的なパルス双極場を付加した場合の測定結果(赤線)を図3に示す。縦軸は図1と同様、10ms後の残存イオン数、横軸はチューンである。摂動双極場を加えたことによって、チューンが整数値をとる毎に共鳴不安定帯が現れている。整数共鳴はプラズマの初期密度に依らず、常に整数チューンで発生していることが確認できる。

整数共鳴横断の効果のみによるイオン損失率を調べるため、初期イオン数を絞って実験を行った。図4は測定データの一例で、縦軸は単一の整数共鳴帯を横断した直後のイオン残存率、横軸はチューンの減少速度に対応するパラメータである。双極摂動高周波の振幅は、0.05V、0.1V、0.2Vに設定されている。当然のことながら、摂動場の振幅が大きいほど、また共鳴横断速度が遅くなるほど、イオンの損失量は増える。電極の設置誤差等に起因する非線形場の影響も見出されている。これらの観測データは多粒子シミュレーションの結果とほぼ一致する。理論的予想との比較も行い、平滑化近似に基づく簡易な理

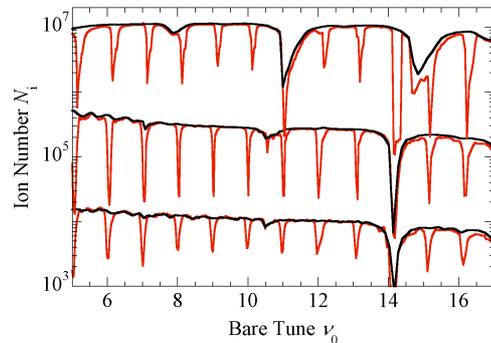


図3 整数共鳴

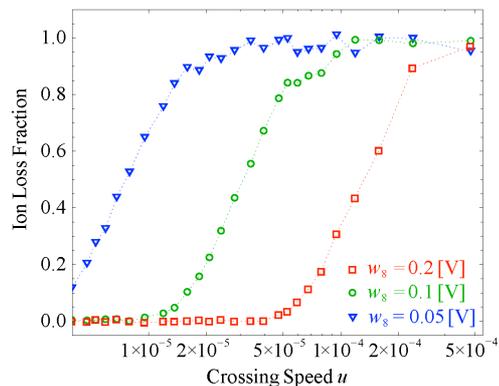


図4 整数共鳴横断による粒子損失

論式は不正確であることが判明した。

隣接する2つの整数共鳴帯を連続して横断した場合のイオン残存率測定も実施した。複数の不安定領域を続けて横切するため残存率は図4よりも悪化するが、イオン損失量が単純に2倍になるわけではないことが実験的に示された。これは「最初の共鳴横断で誘起されたプラズマ振動が次の共鳴横断の際にむしろ抑制される場合がある」ことを意味する。実際、2度目の共鳴横断に際して受ける横方向の力が、(トラップ動作点の移動速度によっては)1度目の共鳴横断で生じた双極子振動を弱める向きに作用することがあり得る。この事実は、ビーム加速過程におけるチューンの減少速度を最適化すれば、多重整数共鳴横断による粒子損失を或る程度軽減できる可能性があることを示唆している。

(3) ビームハロー生成実験

“ビームハロー”の発生は(とくにビーム強度が大きい場合)加速器の放射化等、深刻な問題を引き起こす。ハローの発生原因はいくつか考えられるが、ここではビームの初期状態が理想的な定常状態から大きくずれている場合、すなわち粒子分布関数に“不整合”がある際に生じるハローの性質を研究対象とした。この実験には、LPTではなく、PMTシステムを利用した。PMTは静的な電磁場でプラズマを閉じ込めるため、強集束ラティス構造に依存する効果を調べることはできない。しかしながら、上掲のハミルトニアン(a)を平滑化近似した力学系が実現でき、不整合駆動によるビームハロー生成過程の基礎研究には適している。

過去にPMTを使って行った実験では、純電子プラズマの閉じ込め後、リング電極の直流バイアス電圧を高速スイッチすることにより(つまり、トラップ軸方向のポテンシャル井戸の深さを瞬間的に変化させて)人為的に不整合状態をつくっていた。この際、不整合の強度に応じて、ビーム核の周りにハローが生成されることが確認されている。ところが、その後の実験で、プラズマの閉じ込めポテンシャルに人為的な攪乱を加えずとも(しばらく待つだけで)自然にハローが成長する場合のあることが分かった。図5は実験結果の一例で、プラズマ閉じ込め中、外場は一定に保たれている。左図は閉じ込め開始直後(青)および7ms後(赤)の動径方向電子分布、右図は後者のx-y断面をプロットしたも

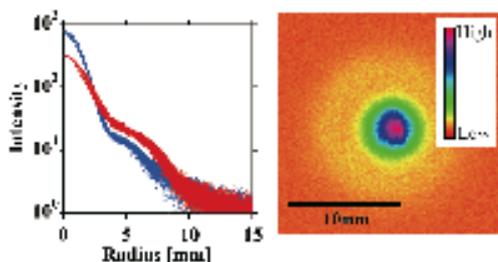


図5 PMTによるビームハロー観測結果の一例

のである。ハローの成長がはっきり確認できる。このハロー生成の原因は現時点で完全には特定できていないが、次の2つの何れか、あるいは両方である可能性が高い:

- 電子ビーム入射時および閉じ込め開始時に発生する不整合
- トラップ軸方向とそれに直交する断面方向の初期プラズマ温度不均衡

現在のPMTシステムでは電子銃側のポテンシャル障壁を上げ下げすることによって大量の電子を捕獲しているが、この過程で不可避免的にプラズマの初期分布を攪乱してしまう。また、入射された電子群は逆側のポテンシャル障壁で跳ね返されて電子銃方向へ戻ってくるため、後続の電子群と衝突することになる。加えて、電子ビームは電子銃にかけたバイアス電圧で加速されていることにも注意しなければならない。これらの点を考慮し、電子ビームの入射エネルギー、ポテンシャル障壁の高さ、閉じ込め時間等を変えながら、系統的に電子分布測定を繰り返しているところである。プラズマ振動のスペクトル測定も並行して実施しており、ハロー成長の過程で或る種の集団振動モードが励起されていることが明らかになっている。ハロー生成過程に影響を与え得る実験パラメータが多いため、明確な結論に至るには、今後も引き続き観測データを蓄積していく必要がある。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計15件)

- ① K. Moriya, K. Fukushima, K. Ito, T. Okano, H. Okamoto, S. L. Sheehy, D. J. Kelliher, S. Machida, C. R. Prior, “Experimental study of integer resonance crossing in a non-scaling fixed field alternating gradient accelerator with a Paul ion trap”, *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, **18** (2015) 034001. (13 pages) 査読有
DOI:10.1103/PhysRevSTAB.18.034001
- ② H. Okamoto, M. Endo, K. Fukushima, H. Higaki, K. Ito, K. Moriya, S. Yamaguchi, and S. M. Lund, “Experimental simulation of beam propagation over long path lengths using radio-frequency and magnetic traps”, *Nucl. Instrum. Meth. A* **733** (2014) pp. 119–128. 査読有
DOI: 10.1016/j.nima.2013.05.085
- ③ K. Fukushima, K. Ito, H. Okamoto, S. Yamaguchi, K. Moriya, H. Higaki, T. Okano, and S. M. Lund, “Experimental verification of resonance instability bands in quadrupole doublet focusing channels”, *Nucl. Instrum. Meth. A* **733** (2014) pp. 18–24. 査読有
DOI: 10.1016/j.nima.2013.05.101
- ④ 岡本宏己、伊藤清一、檜垣浩之、“実験室加速器物理”, *日本物理学会誌*, 第68巻第12号 (2013), pp. 818–822. 査読有

[学会発表] (計 28 件)

- ① Hiromi Okamoto, “Recent results from the S-POD trap systems on the stability of intense hadron beams”, 54th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on High Intensity, High Brightness and High Power Hadron Beams (Michigan, USA, November 11, 2014). 招待講演
- ② Hiromi Okamoto, “Beam dynamics studies with non-neutral plasma traps”, 5th International Particle Accelerator Conf. (Dresden, Germany, June 20, 2014). 招待講演
- ③ Hiromi Okamoto, “Plasma traps for space charge studies: status and perspectives”, 52nd ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on *High-Intensity and High-Brightness Hadron Beams* (Beijing, China, September 18, 2012). 招待講演
- ④ Hiromi Okamoto, “Radio-frequency and magnetic trap simulations of beam propagation over long paths”, 19th International Symposium on Heavy Ion Inertial Fusion (Berkeley, California, USA, August 14, 2012). 招待講演

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡本 宏己 (OKAMOTO, Hiromi)
広島大学・大学院先端物質科学研究科・
教授
研究者番号：40211809

(2) 研究分担者

檜垣 浩之 (HIGAKI, Hiroyuki)
広島大学・大学院先端物質科学研究科・
准教授
研究者番号：10334046

伊藤 清一 (ITO, Kiyokazu)
広島大学・大学院先端物質科学研究科・
助教
研究者番号：70335719

大見 和史 (OHMI, Kazuhito)
高エネルギー加速器研究機構・加速器研究
施設・教授
研究者番号：10194292

(3) 連携研究者

生出 勝宣 (OIDE, Katsunobu)
高エネルギー加速器研究機構・加速器研究
施設・教授
研究者番号：50150008

上垣外 修一 (KAMIGAITO, Osamu)
理化学研究所・加速器基盤研究部・部長
研究者番号：00260191