

氏 名	ほん だ よう すけ 本 田 洋 介
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 2846 号
学位授与の日付	平 成 16 年 11 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	理 学 研 究 科 物 理 学 ・ 宇 宙 物 理 学 専 攻
学位論文題目	Experimental studies of a low emittance electron beam in the KEK-ATF damping ring with a laserwire beam profile monitor. (KEK-ATF ダンピングリングに於けるレーザーワイヤービーム形状モニターを用いた低エミッタンス電子ビームの実験的研究)
論文調査委員	(主 査) 教 授 笹 尾 登 教 授 野 田 章 教 授 今 井 憲 一

論 文 内 容 の 要 旨

超低エミッタンス電子ビームの生成は、近年関心の高まっている技術である。特に高エネルギー物理学の分野では、将来建設が計画されている TeV 領域の電子陽電子線形衝突型加速器（リニアコライダー）に於いて必要不可欠な技術である。リニアコライダーでは要求される高いリミノシティを達成する為に、低エミッタンスのビームが要求される。

高エネルギー加速器研究機構に建設された Accelerator Test Facility (ATF) はリニアコライダー初段部分を想定した試験加速器であり、入射リニアック、ダンピングリング及び取り出しラインから構成されている。主な研究項目は、要求される低エミッタンスビーム生成の実証試験である。ダンピングリングに入射された電子ビームはリングを周回する間に放射光の放出によるエネルギーロスと高周波による加速によってエミッタンスを減少し（放射減衰）、やがて平衡状態に達する。水平エミッタンスはビーム光学系の設計によって決まり、 $1.1\text{nm} \cdot \text{rad}$ である。一方、垂直エミッタンスは電磁石の設置精度やビーム調整によって決まる量であり、水平方向の 1% 以下、即ち $11\text{pm} \cdot \text{rad}$ を目標としている。

ATF での研究において良いビームサイズモニターが必要不可欠であることは言うまでもない。特にダンピングリング内で、エミッタンスの平衡状態にあるビームを非破壊的に精度良く測定できる装置は極めて重要である。測定すべき垂直方向の実際のビームサイズは $10\mu\text{m}$ 以下である。このような小さなサイズを測定できる新しい装置として、レーザーワイヤー電子ビーム形状モニターの開発を行った。このモニターの原理は次のようである。細く絞ったレーザー光（レーザーワイヤー）を標的として用いて電子ビームを直交方向にスキャンし、電子とレーザー光との衝突によって発生したコンプトン散乱光の強度をレーザーワイヤーの位置の関数として測定することによってビームの形状を得ることができる。このモニターにとって最も重要な点は次の 2 つである。測定される電子ビームサイズ以下にレーザー光を絞ること、そして、十分な信号強度を得る為に高強度のレーザー標的を生成することである。2 枚の凹面鏡を用いた光学共振器の技術を用いることで、上記 2 点を同時に実現できることに注目して新しい測定器の開発・改良を行った。

低垂直エミッタンス生成の実証、そしてバンチ体積がビーム強度に依存して変化するメカニズムの理解を目的として、単バンチビーム運転下でビーム測定を行った。水平、垂直エミッタンスの測定をレーザーワイヤーモニターを用いて行い、同じ条件の下でバンチ長さ、エネルギー拡がりも測定した。それぞれの量はビーム強度の関数として測定され、強度が上がるにつれバンチサイズが各方向に増加していく様子が観測された。低電流では垂直エミッタンスの値は $4\text{pm} \cdot \text{rad}$ を示し、ATF の目標を達成していることが実証された。また、エミッタンスは 10^{10} electrons/bunch のビーム強度で低電流時の約 1.5 倍に増加した。これらの測定結果を統一的に説明するためバンチ内散乱と縦方向誘起電場を考慮したモデルを考案し観測物理量が矛盾なく説明できることを示した。

リニアコライダーでは一回のマシンサイクルで使用される電子、陽電子数を出来るだけ増やす為に多バンチビームが用いられる。ビームの多バンチ化によって様々な不安定性が引き起こされる可能性がある。2.8nsec のバンチ間隔で 20 個のバンチを並べた多バンチ運転を行い、多バンチビームでの低エミッタンスビームが生成の実証、あるいはそこで生じる不安定性

の理解を目的とした試験を行った。始めに単バンチでビーム調整を行った後、多バンチビームに切替えて垂直、水平エミッタンスの測定をレーザーワイヤーモニターを用いて行った。低電流では、多バンチでも目標の低エミッタンスが実現できていることが実証された。また、バンチ毎のビームサイズの差異も見られなかった。更にビームラインの真空度を意図的に劣化させた状態で特別な測定を行い、後方のバンチでエミッタンスが増大していく現象を観測した。これはイオン化された残留ガスによって引き起こされるビーム振動による多バンチビーム特有のビーム不安定性であると考えられる。

本研究では、レーザーワイヤーと呼ばれる計測器を開発・改良し、これを用いて KEK-ATF に於ける電子ビームのエミッタンスを測定した。この結果、ATF においては $4\text{pm} \cdot \text{rad}$ (垂直エミッタンス, 単バンチ) が実現されていることを示した。またエミッタンスやバンチ長などの物理量の強度依存性を測定し、この依存性の原因となるメカニズムを明らかにした。これらの成果は今後のリニアコライダーや低エミッタンスビームを使った物理の前進の礎となるものである。

論文審査の結果の要旨

申請者の博士論文は、レーザーワイヤー電子ビーム測定器の開発改良、およびそれを用いた低エミッタンス電子ビームダイナミクスの研究に関するものである。低エミッタンス電子ビームの生成は、超高エネルギー電子・陽電子衝突型加速器 (JLC) や第 4 世代放射光 (SOR), さらに自由電子レーザー光 (FEL) 等の実現にとって欠くことのできない技術である。高エネルギー加速器機構にある Accelerator Test Facility (ATF) はこのような低エミッタンス電子ビームを研究するために建設されたものであるが、申請者は ATF 施設のダンピングリング内のエミッタンスを測定した。

本研究において重要な点は、大強度でかつ径の細いレーザー光標的を安定に実現することである。このために申請者等は Fabry-Perot 光共振器を選び、この中で特殊な光形状を実現する事に成功した。特に重要な点は光増幅を実現するために精度良く共振器長さを制御する事である。申請者等は実際、 1nm 以下の精度で制御する事に成功しパワー増幅率1300を得た。今ひとつのポイントは実際実現しているレーザー光の径を測定する事であるが、この点においても様々な工夫を行い、3つの独立な方法を考案した。この結果、3つの方法の結果は精度良く一致し測定の信頼度を大幅に改善した。

申請者は、まず低垂直エミッタンス生成の実証、そしてバンチ体積がビーム強度に依存して変化するメカニズムの理解を目的として、単バンチビーム運転下でビーム測定を行った。その結果、低電流では垂直エミッタンスの値は $4\text{pm} \cdot \text{rad}$ を示し、ATF の目標を達成していることが実証された。また、エミッタンスは 10^{10} electrons/bunch のビーム強度で低電流時の約1.5倍に増加した。これらの測定結果を統一的に説明するためバンチ内散乱と縦方向誘起電場を考慮したモデルを考案し観測物理量が矛盾なく説明できることを示した。更に、多バンチビームに切替えて垂直、水平エミッタンスの測定をレーザーワイヤーモニターを用いて行った。この結果、低電流では多バンチでも目標の低エミッタンスが実現できていることが実証された。また、バンチ毎のビームサイズの差異も見られなかった。申請者は、その後、ビームラインの真空度を意図的に劣化させた状態で特別な測定を行い、後方のバンチでエミッタンスが増大していく現象を観測した。これはイオン化された残留ガスによって引き起こされるビーム振動による多バンチビーム特有のビーム不安定性であると考えられる。

以上の結果をまとめる。申請者は、レーザーワイヤーと呼ばれる計測器を開発・改良し、これを用いて KEK-ATF に於ける電子ビームのエミッタンスを測定した。この結果、ATF においては $4\text{pm} \cdot \text{rad}$ (垂直エミッタンス, 単バンチ) が実現されていることを示した。またエミッタンスやバンチ長などの物理量の強度依存性を測定し、この依存性の原因となるメカニズムを明らかにした。これらの成果は今後のリニアコライダーや低エミッタンスビームを使った物理の前進にとり価値あるものであり、学位論文に値すると認められる。

主論文および参考論文に報告されている研究業績を中心として、これに関連した研究分野について口頭試問した結果、合格と認めた。