

OBSERVATION OF THE MULTI-BUNCH INSTABILITY CAUSED BY A TRANSVERSE WAKE FIELD

Y. Ogawa, T. Shidara and A. Asami

KEK, National Laboratory for High Energy Physics
Tsukuba, Ibaraki 305, Japan

ABSTRACT

A multi-bunch instability due to a transverse wake field relevant to a future linear collider was investigated at the primary electron section of the KEK positron generator linac. An electron beam with a peak current of 15 A and a pulse width of 2 ns, containing about 6 bunches, is accelerated to 250 MeV by an RF electric field of a frequency 2856 MHz. A transverse shift of the last bunch was observed changing a transverse offset of the beam position at the entrance of the first accelerating cavity. Several tests and analyses were performed to confirm that the observed effect is due to the transverse wake field.

横ウェーク場による大電流マルチバンチビームの不安定性の観測

1. 序

将来のTeV領域リニアコライダーにおいては、衝突のルミノシティを上げることや、マイクロ波出力の効率的な利用などのためにマルチバンチの大電流電子ビームを加速する必要があるとされている。大電流マルチバンチビームの場合、一つの大きな問題として横ウェーク場によるビーム不安定性があり、衝突点でのエミッタンスやビームサイズの増大を引き起こすと考えられている。大電流シングルバンチビームにおける横ウェーク場の影響に関しては、理論的、及び実験的な研究が行なわれてきたが、マルチバンチビームについては理論的あるいは数値計算に基づく研究があるのみである。例えば、ウィルソン¹の2粒子モデルをラプラス変換の手法を用いて多粒子モデルに拡張した理論²によれば、バンチ数が増えるにしたがって加速器の長さのベキ乗（バンチ数に比例）で不安定性が急激に増す。このようなことを実験的に確認した例は、非常に長いバンチビームのBBUやパルスショートニングにおけるビームロスの観測以外はこれまでにない。KEK陽電子リニアックでは、数バンチの大電流一次電子ビームを用いてはじめて横ウェーク場による効果を定量的に観測することができた。

2. 実験装置及び方法の概要

陽電子リニアックの一次電子ビーム加速部の構成を図1に示す。電子銃から出た150 keV、4.2 ns幅、尖頭電流10 Aの電子ビームは、変調周波数119 MHzのSHBと3 mのドリフトスペースを経て2 ns幅、尖頭電流約15 Aのビームに圧縮される。さらに、周波数2856 MHzのプレバンチャー、バンチャーで集群され、数本の加速管で約250 MeVまで加速される。電磁石系はベータトロン波長が約40 mとなるように配置されている。また、ターゲット前にはエネルギー解析システムがあり、これを用いてビームのエネルギースペクトルを測定する。それによれば、約5-6からなるバンチ構造があり、バンチあたりの電荷

が数nCに及び、全エネルギー幅は約9%である。

基本的な実験方法としては、ステアリングコイルST-1によってビームを上下に振って、ターゲット前のエネルギー解析システムのプロファイルモニターPRM-A上の上下方向のビーム位置を観測する。ビームプロファイルは過渡的ビーム負荷効果等によってバンチ毎にエネルギーが異なるため図2に示すようなバンチ構造を示すので、この方法によってバンチ毎の横ウェーク場による影響を調べることが可能となる。

3. 実験結果

図2(a)に典型的な観測例を示す。ステアリングコイルST-1によってビームを上下に振りプロファイルモニターPRM-Aでのビームプロファイルを見ると、図のように最後のバンチ(右端)が上下に動く。ST-1によって上下に振った量は、直後のプロファイルモニターPRM-1上で実験的に求める。(コイルの巻き数、電流値等から出した値と一致する)ある値を越えると、最後のバンチは完全に蹴られて画面から姿を消す。図3はPRM-Aにおける最後のバンチの上下位置を、ST-1による初期ビーム変位量に対してプロットしたものである。直線は最小二乗法によるフィットであり、両者の関係は理論的予想と一致している。

次に、観測された現象が確かに横ウェーク場による効果であること調べるために、以下のような測定を行なった。まず、各点でのビーム位置を測りビーム軌道の確認を行なったが、概ねベータatron波長約40 mの振舞を示しており異常な点は認められなかった。次に、SHB ONとOFFの場合にそれぞれPRM-A上のバンチの位置を測り比較したが(図2参照(a)ON(b)OFF) SHB OFFの際にはバンチは動かない。SHB ON/OFFによって、バンチ数は5から12に変わるが、全電荷量、平均エネルギー、全エネルギー幅は不変であるから、これによって、観測された効果は、(1)バンチあたりの電荷量によること、(2)バンチ毎の運動量差によって軌道が変わったためではないことがわかった。(1)に関してはさらに、パルス幅40 ns、尖頭電流2.3 Aのセミ長パルスビーム(全電荷量は約2倍、バンチあたりの電荷量は少ない)を加速して効果を調べたが、バンチの上下方向の変化は見られなかった。したがって、バンチあたりの電荷量が重要であることが追認できた。最後に、ST-1のかわりにST-2(図1参照)によってビームを振ることによって、横ウェーク場の効果の距離依存性を調べた。それによると、ST-2の場合ST-1に比べて効果はおおよそ1/3.5に小さくなった。以上をまとめると、観測された効果としては、

[1]加速後のバンチのシフト量は、最初の加速管に入射するビーム位置に比例する

[2]バンチあたりの電荷量に依存し、全電荷量にはよらない

[3]加速器の長さに対する依存性(距離依存性)が強い

ことが明らかになった。これは、定性的には理論的予測とよく合っている。

4. 考察及び議論

マルチバンチの場合、厳密な理論的取り扱い是非常に複雑なので、ここでは、ウィルソンの2粒子モデルを用いて観測結果の定量的な説明を試みる。 X_f 、 X_i をそれぞれ最初の加速管の入口と最後の出口でのビーム変位とし、 N を全粒子数、 β をベータatron

波長、 W_a を粒子間の距離での二重極ウェーク場、 z を加速器の長さ、 V_0 を平均エネルギーとすると、ウィルソン公式によれば、

$$\frac{X_f}{X_i} = \frac{eN\beta W_a z}{8\pi V_0}$$

であり、 $eN=10$ nC、 $\beta=40$ m、 $W_a \sim 10^{15}$ V/C/m² (SLACでの値³)、 $z=24$ m、 $eV_0=120$ MeVとすると、 $X_f/X_i \sim 3$ になり、図3の直線の傾きとオーダが合っている。ファクターの違いは、主に W_a の値によるもの (SLACの加速管は、定インピーダンス型、KEKは、擬定勾配型である) と思われる。距離依存性については、ST-1とST-2で距離の比が22 m/16 m=1.4であるが、エネルギー依存性を考慮すると上式によれば、約1.7となる。これは、実験値3.5に比べてやや小さいと考えられる。この点に関しては、2粒子モデルの限界と考え、それを多粒子系に拡張した鈴木²理論を用いてみる。それによると距離依存性が z^{-1} なので、 $(1.4)^{-1}$ となり、エネルギー依存性を考慮すると約4.6になり改善されるので、今後、鈴木理論に基づいた解析を行なう予定である。

参考文献

[1]P. B. Wilson, SLAC-PUB-4547.

[2]T. Suzuki, AIP,156,480 (1987).

[3]P. B. Wilson, AIP, 87, 450 (1982).

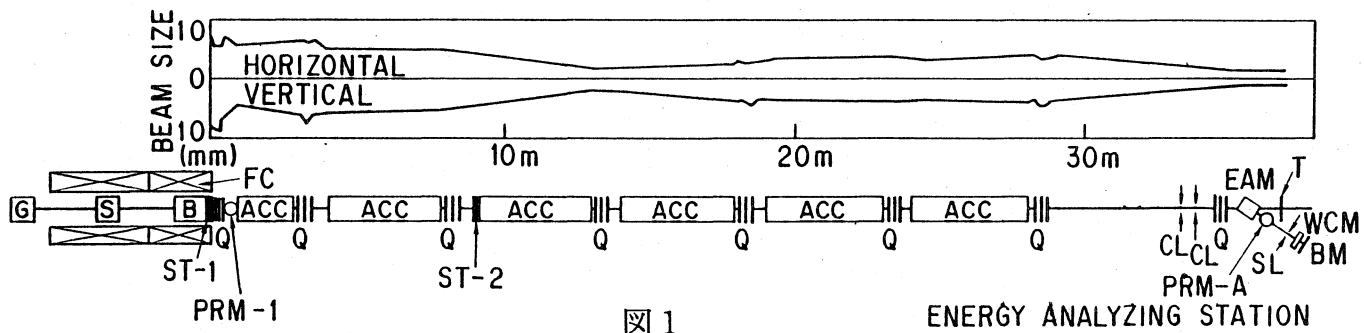


図1

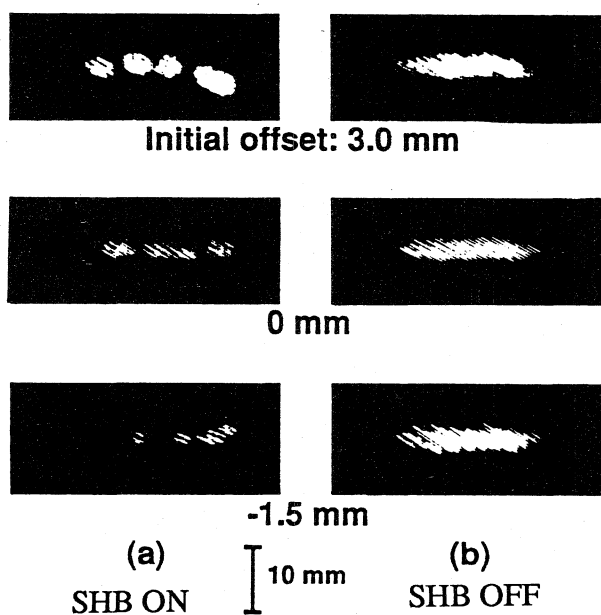


図2

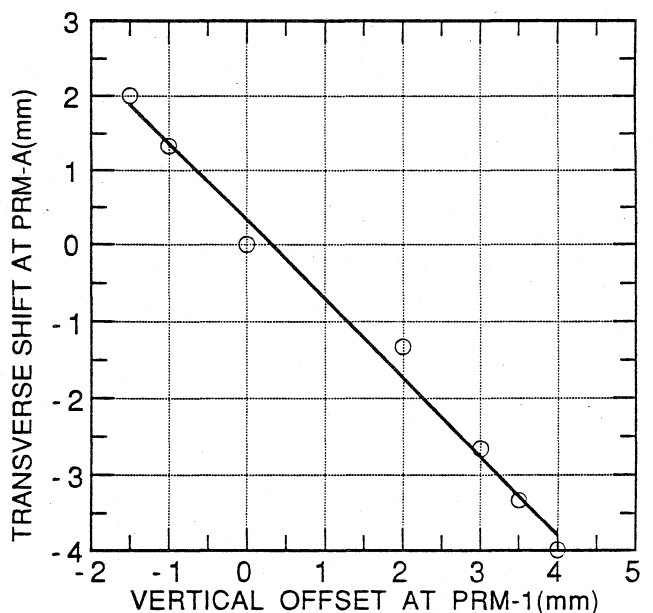


図3