

OBSERVATION OF THE POSITRON BUNCH BY A STREAK CAMERA

I. Sato, K. Nakahara, A. Enomoto, T. Urano, S. Ohsawa,
Y. Ogawa, Y. Otake, T. Oogoe and K. Kakihara
National Laboratory for High Energy Physics

Bunch length of the positron beam was observed using a streak camera. Differences in the bunch length between the positrons and the primary electrons were studied. The analysis shows these differences are due to debunching effects by different speeds of the positrons emerging from the target and by different orbits in the focussing solenoid.

ストリークカメラによる陽電子ビームのバンチの観測

1. 序

陽電子は一次電子を重い金属に当たった時に発生するガンマ線の電子対生成によって得られる。こうして発生する陽電子はエネルギーが数 MeV の低いところに多く分布している。しかし、このようにエネルギーの低い陽電子は β も 1 より小さく、速度差や集束コイル内での軌道差によってビームのバンチが広がるため、ビームのエネルギースペクトルを悪くする。

例えば、SLC の陽電子源は 3.3 GeV の電子を標的に当て、2 MeV から 20 GeV までの陽電子を集束することにより電子 1 個当り陽電子を 2.5 個得る設計になっている。そのため標的と加速管の距離を短くしたり、高電界加速管を使用してデバンチを抑えている。

KEK の陽電子源は SLC のようにテーパソレノイド型の集束コイルを採用していないので、このように極端に大きなエネルギー範囲の陽電子が集束できるわけではなく、8.5 MeV から 11.5 MeV 程度（パルスコイル電流 5000 A のとき）の陽電子を集束する設計になっているが、計算によるとそれでもデバンチが生じる。一次電子に比べどの程度のデバンチがあるか、バンチ幅がトランスポートのなかでどの様に変化するかを調べることは興味深い問題である。

2. 測定装置

図 1 は測定の設定アップをしめす。陽電子発生装置のビームダンプのビームラインに金属ミラーをおき、真空ダクトから大気中にでたビームの出すチェレンコフ光をクライストロンギャラリーに導きストリークカメラ¹⁾で観測する。光を時間分解することにより光源であるビームのバンチ長を測定する。

ストリークカメラのトリガーは加速器のビームトリガーを直接用いたが、ジッターは特別問題にならないほどであった。ストリーク速度は公称最高 200 ps / 10 mm である。10 mm 幅のスクリーン上にできるストリーク像は 256 ch の走査線を持った SIT カメラで分析される。システムの時間分解能はストリーク像の集束能力と掃引速度によって決まる。図 2 (a)、図 3 (a) はストリーク掃引をしない時の集束像をとった写真である。1 ch 当りのストリーク

速度は0.8 p sなので、このシステムが約2 p sの時間分解能を持つことが分かる。尚、ストリークカメラの掃引直線性誤差は±6%程度あるが、今回の目的では特に問題にできなかった。

ストリークカメラ自体の感度は単一光子に対しても有しているが、実際の検出限界は光電面やMCPの発するノイズで決まり、ストリークカメラのスリット面で約5000光子/m²程度とされている。一方、チェレンコフ放射で電子1個が単位長さ当りに放射する光子数は²⁾、

$$dN/dl = 2\pi\alpha(1/\lambda_1 - 1/\lambda_2)(1 - 1/(n\beta)^2)$$

で与えられる。ここで、 $\alpha = 1/137$ 、 λ_1 、 λ_2 は光の波長範囲、 n は空気の屈折率である。例えば、

$$\lambda_1 = 3500(\text{\AA}), \lambda_2 = 5000(\text{\AA}), n = 1.00028,$$

$$\beta = (\gamma^2 - 1)^{1/2} / \gamma = 0.9999980 \text{ (at } \gamma = 500),$$

を上式の式に代入すると、

$$dN/dl = 22 \text{ (m}^{-1}\text{)}$$

が得られる。1バンチ当りの陽電子の個数は、ピーク電流を20 mAとすると、

$$20 \times 10^{-3} \text{ (A)} \times 10^{-9} \text{ (sec)} / 1.6 \times 10^{-19} \text{ (C)}$$

$$/3(\text{bunch}) = 4 \times 10^7 \text{ 個}$$

となり、光の量は少し空気中を走らせれば十分である。今回の測定では測定系の立体角 ($6/8000 = 7.5 \times 10^{-3}$)の方がチェレンコフ角 ($\theta = \cos^{-1}(1/n\beta) = 2.4 \times 10^{-2}$)より小さく全ての光子を集めることが出来なかったため、大気中を約2 m走らせた。

チェレンコフ光の波長の違いによる光の到達時間差は、 $(1/n_1 - 1/n_2) / (1/n_1) \times 8000 \text{ (mm)}$ でストリークカメラのフォトカソードの感度範囲の2500Å - 8000Å ($n_1 = 1.0003, n_2 = 1.000275$)を取ったとしても0.2 mm程度である。また電子の多重散乱角は約10 mradあり、それによるバンチの歪みは $2000 \times 0.01^2 = 0.2 \text{ (mm)}$ で、何れも今回の測定に大きな影響を与えない。

3. 測定結果とその検討

図2は陽電子ビーム、図3は電子ビームの測定結果である。この測定結果によると、陽電子

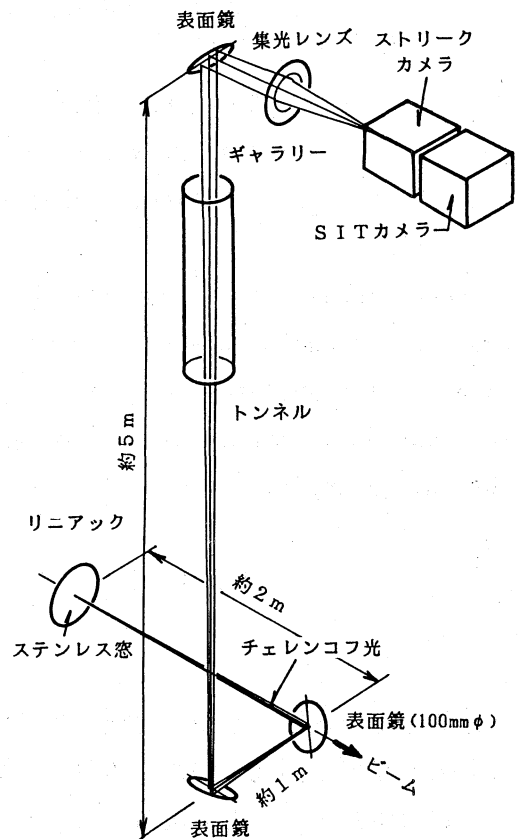


図1 測定装置

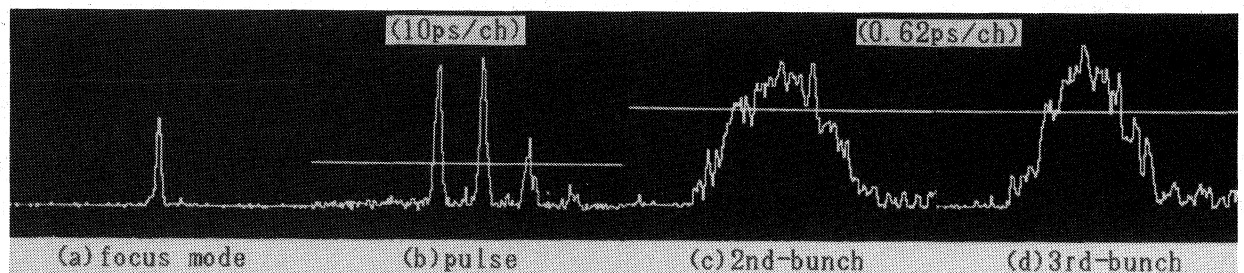


図2 陽電子ビームのバンチ観測結果

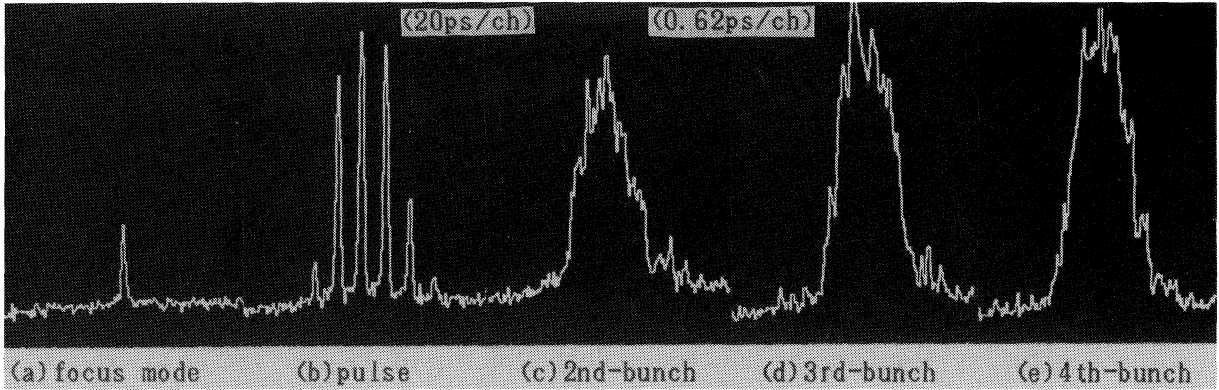


図3 電子ビームのバンチ観測結果

ビームと電子ビームのバンチは各々、40～48 ps、24 psである。電子のバンチに比べて陽電子のバンチが明らかに大きくなっていることが観測される。ここでストリークカメラの掃引速度の較正はビームのバンチ間隔(350 ps)によって行った。

陽電子ビームのバンチが電子ビームのバンチの2倍近くある原因として考えられるのは、標的から出て来る陽電子の速度の違いおよびソレノイド中での軌道差によるデバンチで、

$$\delta\phi = \underbrace{\frac{\pi}{\lambda} \int_0^z \left(\frac{1}{\gamma^2} - \frac{1}{\Gamma^2} \right) dz}_{\text{速度差による項}} + \underbrace{\frac{\pi}{2\lambda} \left(\frac{2P_t^2}{eB} \right) \frac{e}{(m_0c)^2} \int_0^z \left(\frac{B}{\gamma^2} \right) dz}_{\text{軌道差による項}}$$

によって与えられる³⁾。ここで、 λ はrfの波長(10.5 cm)、 Γ は基準となる電子の γ 、 B は加速器の軸方向の集束磁場である。実験時においてはパルスコイルの電流が低く、磁場は約7.7 kGであった。加速管上のソレノイドの磁場は2 kG、集束系のアクセプタンスは 0.15π MeV/c. cm、ビームの最大径は加速管の内径程度で18 mmである。以上のような条件では、集束する陽電子は γ が10.5から13.5、横方向の運動量は標的で0.64(π MeV/c. cm)、パルスコイルの後では、0.16(π MeV/c. cm)となる。また、加速管は定電界で、 $\gamma = \gamma_0 + \gamma'z$ ($\gamma'm_0 = 10$ (MeV/m))でエネルギーを増すものとして上記のデバンチを計算すると約5度である。これでは測定結果を総て説明できないが、仮に γ が8程度の陽電子から集めているものとするれば、デバンチは急に大きくなり12度に達する。

4. 結論

陽電子のバンチが電子のバンチより大きいことがストリークカメラによる測定で確かめられた。どの原因でどれくらいデバンチするかの精密な解析は更に検討を要するが、原因の一端は標的で発生した陽電子の速度差、ソレノイド磁場での軌道差に由来するものであると考えられる。

参考文献

- 1)土屋 裕、ピコ秒ストリークカメラとその応用(浜松ホトニクス)
- 2)三浦 功 他、放射線計測学第5章
- 3)R. B. Neal edit., The STANFORD TWO-MILE ACCELERATOR, New York, Benjamin, (1968) 555