

ビーム位置モニターを用いた 電子陽電子ビームのエネルギー計測及び考察

中川 鈴彩
東北大学理学部化学科 3 年

1. 目的

加速器においてビーム位置モニターは最も重要なビーム診断装置である。線形加速器では四極電磁石や加速管はアライメントの誤差があり、それらをビームが通ることでエミッタンスが増大してしまう。エミッタンス増大を抑制するためには軌道調整を行うため、高い分解能を持つビーム位置モニターが必要不可欠である。

本実習では、線形加速器の偏向電磁石を用いてビームの軌道を偏向させ、電子陽電子ビームに対するビーム位置変化の応答の差異を、実測・解析によって定量的に検証を行うことを目的とした。

2. 実験方法

本実験では、電子陽電子入射器 (LINAC) の 2 セクター終端を用いた。Fig. 1 に示す、x 軸方向に偏向させる偏向電磁石 (PX_{27.2}, 以下 PX), y 軸方向に偏向させる偏向電磁石 (PY_{28.2}, 以下 PY) に与える電流を -5.0 A から +5.0 A まで 20 step で変化させ、ビーム位置モニター (SP_{28.4}, 以下 BPM) での電子陽電子ビーム位置変化 [mm] の応答を記録した。ここで、Fig. 1 に示す PX から BPM までの距離は 15.791 m, PY から BPM までの距離は 4.976 m であり、左から右へのビームが送られる。

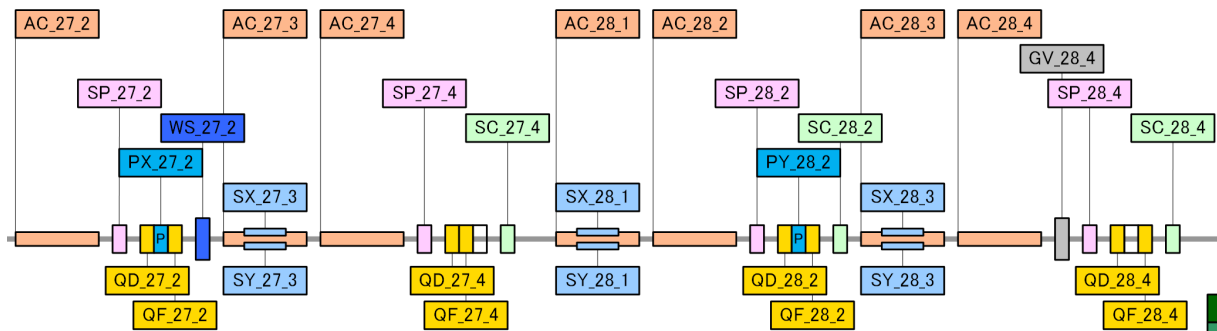


Fig. 1 使用したビームラインの概略図

3. 結果

PX, PY をそれぞれ操作した時のビーム位置を Fig. 2, Fig. 3 に示す。赤色で示すのが陽電子で、青色で示すのが電子である。横軸が偏向電磁石に与えた電流量、縦軸がビーム位置である。

PX において、陽電子は -5 mm から 1 mm, 電子は 0 mm から 4 mm へと移動しており、最小二乗法によって求めた近似直線の傾きはどちらも正であった。PY において、陽電子は 2 mm から -2 mm, 電子は -1 mm から 0 mm へと移動しており、近似直線の傾きは陽電子が負、電子が正であった。また、PX と PY どちらにおいても近似直線の傾きは電子の方が大きかった。

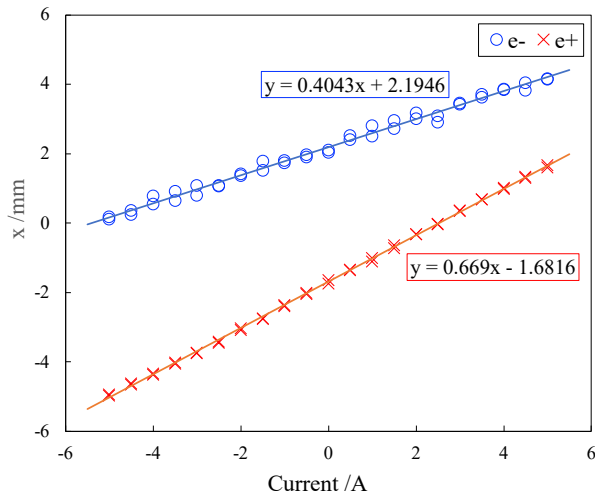


Fig. 2 PXでのビーム位置変化

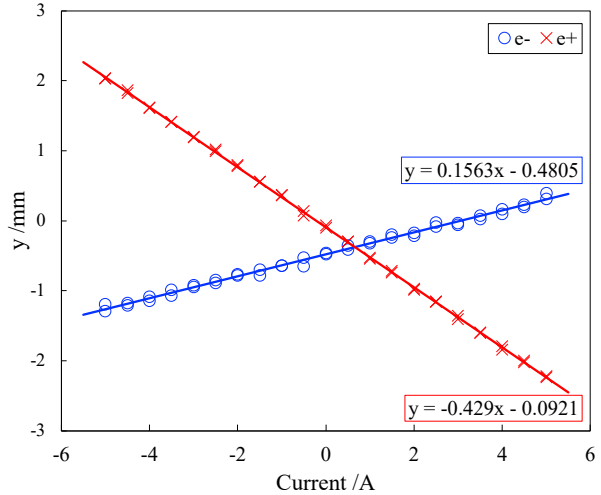


Fig. 3 PYでのビーム位置変化

4. 考察

偏向電磁石の向き

仮説として、電荷の符号が逆なので Fig. 2, Fig. 3 どちらにおいても陽電子と電子の近似直線の傾きの符号が逆になると考えたが、Fig. 2 の PX のみ陽電子と電子の近似直線の傾きの符号が同じという結果が得られた。これは、PX と BPM の距離が離れており、間にある複数の電磁石が影響を与えているためであり、この結果から PX の電磁石の向きを判断することは厳しいと考えた。

また、PY と BPM の距離は短く、間にある電磁石の影響を受けないと仮定すると、PY に与える電流を大きくすると陽電子は負の方向、電子は正の方向に偏向したことから、N 極・S 極の位置は Fig. 4 のように、ビームが手前から奥に進行するとき N 極が左、S 極が右になるように PY が設置されていると考えられる。

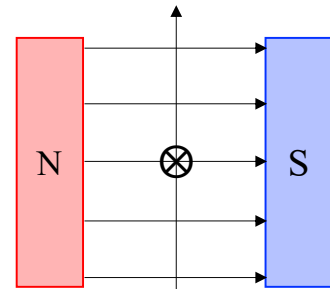


Fig. 4 PYでの電磁石の向き

電子陽電子のエネルギーの比較

本実験で使用した PX と PY の間には 4 本の加速管がある、そこで、PX と PY それぞれで測定したデータを比較することで陽電子と電子のエネルギーを間接的に比較することができると考えた。

偏向電磁石において、同じ磁力であればエネルギーの低い粒子ほど大きく曲げられる。つまり、粒子のエネルギーは Fig. 2, Fig. 3 の傾きの大きさに反比例するので、傾きの大きさの大小から、電子の方が陽電子に比べてエネルギーが大きいことが分かった。これは、LINAC では電子ビームの方が上流で生成されており、陽電子よりも多くの加速管を通るため速度が大きくなっているからだと考えられる。

計算値と実測値のエネルギー比較

偏向電磁石によって荷電粒子が偏向された角度をキック角とし、次のように定義した。

$$\theta_x = \frac{|S_x|}{L_x} \text{ [mrad/A]} \quad \theta_y = \frac{|S_y|}{L_y} \text{ [mrad/A]}$$

$|S_x|$, $|S_y|$ は Fig. 2, Fig. 3 の傾きの大きさ、 L_x , L_y は PX または PY から BPM までの距離である。このとき、偏向電磁石の長さは無視できるものとする。

上式より陽電子と電子それぞれのキック角を求めると、以下のようになった。

$$\text{陽電子：}\theta_{Xe^+} = 86.212 \text{ [mrad/A]}, \theta_{Ye^+} = 42.366 \text{ [mrad/A]}$$

$$\text{電子：}\theta_{Xe^-} = 31.410 \text{ [mrad/A]}, \theta_{Ye^-} = 25.603 \text{ [mrad/A]}$$

また、PX でのエネルギーを E_0 、PY でのエネルギーを E_1 、PX から PY で得られたエネルギーを ΔE とすると PY でのエネルギーは PX でのエネルギーと加速管で得られたエネルギーを用いてそれぞれ表すことができるので、

$$E_{1e^+} = E_{0e^+} + \Delta E_{e^+}$$

$$E_{1e^-} = E_{0e^-} + \Delta E_{e^-}$$

PX, PY が全く同じ偏向電磁石（同じ電圧を与えたとき同じ磁力を示す）だと仮定すると、

$$\theta_{Xe^+} \cdot E_{0e^+} = \theta_{Ye^+}(E_{0e^+} + \Delta E_{e^+})$$

$$\frac{\Delta E_{e^+}}{E_{0e^+}} = 1.0349$$

$$\theta_{Xe^-} \cdot E_{0e^-} = \theta_{Ye^-}(E_{0e^-} + \Delta E_{e^-})$$

$$\frac{\Delta E_{e^-}}{E_{0e^-}} = 0.2268$$

この結果を電子陽電子入射器コントロール棟の方にいただいた計算値と照らし合わせたものを Table 1 に示す。

Table 1 エネルギー計算値と測定値の比較

	陽電子		電子	
	計算値 [GeV]	測定値	計算値 [GeV]	測定値
E_0	0.990	—	4.005	—
E_1	1.062	—	4.152	—
ΔE	0.072	—	0.147	—
$\frac{\Delta E}{E_0}$	0.0727	1.0349	0.367	0.2268

電子について、計算値と測定値は近いが、陽電子は測定値と計算値が大きく異なった。陽電子の E_0 が計算値通りに約 1 GeV だとすると、陽電子が PX から PY までの加速管 4 本で約 1 GeV という非常に大きなエネルギーを得ることになるため不自然だと考えられる。よって本実験での測定値が誤っている可能性が高いといえる。

5. 結論

ビーム位置を測定することで、それぞれの荷電粒子が位置モニター内のどこに存在するかということだけでなく、電子陽電子ビームの同じ地点でのエネルギー比、線形加速器内の 2 地点でのエネルギー比を求めることができた。