

核研ESのエネルギー表示の較正

文
美
昭
義
紀
親
和

正
一
正
隆
康
義
正

藤
川
谷
島
内
田
岡

武
江
粕
大
竹
和
吉



1981.12.25

Calibration of the Energy Indicator System
of INS 1.3 GeV Electron Synchrotron

M.Mutou, K.Egawa, K.Kasuya, T.Ohshima,
Y.Takeuchi, M.Yoshioka

Institute for Nuclear Study, University of Tokyo

Y.Wada

Department of Physics, Meiji College of Pharmacy

Abstract

An indicator system for the accelerating energy of INS 1.3 GeV electron synchrotron has been calibrated.

The system consists of a search coil mounted in the gap of the synchrotron magnet, a voltage-frequency convertor, a gate controller and a universal counter, and has worked continuously well.

The indicated energy has been compared with one deduced from the measurement of bremsstrahlung photon spectrum from the internal target of the synchrotron.

We have concluded that the indicator system is operated with a good precision of about $\pm 0.3\%$.

目 次

1. はじめに	1
2. エネルギー表示システム	1
2-1. ビームチャンネル	1
2-2. 表示システム	1
3. 較正方法	3
3-1. 較正の原理	3
3-2. 実験装置及び精度の評価	4
A ビーム条件	4
B pair magnet	5
C カウンター	6
4. 測定結果及び解析	6
4-1. 解 析	6
4-2. 分 解 能	8
4-3. 結 果	9
お わ り に	12
Appendix	13
参 考 文 献	14

1. はじめに

東京大学原子核研究所・1.3 GeV 電子シンクロトロン（以下ESと称す）のエネルギー表示装置の校正を行った。このエネルギー表示は、ESの運転エネルギーをMeV単位で表示しているもので、ESの運転並びに実験にとって重要な基準表示として用いられている。このため、表示の校正実験が数年毎に行われ、又日常的に表示系の各機器の精度がチェックされている。前回の校正実験は、1974年に行われ既に7年経過している事、この間に新たにシンクロトロン電磁石の交流励磁電流の表示がデジタル化された事、及びVFC(Voltage-Frequency Converter)の故障等もあり、再び校正実験を行ったものである。

校正の方法は、ESで加速された電子線をラジエーターに入射することによって得られる制動放射γ線のエネルギースペクトラムを、電子対生成のプロセスを利用して測定し、これを理論値と比較する事で行った。

校正は、運転エネルギー値300 MeVから1200 MeVまで、100 MeV毎に行われ、校正値に対する現行エネルギー表示値の偏差が、+0.23～-0.34% 以内にある事が確認された。

以下に、エネルギー表示システム、校正実験の方法、及びその結果について報告する。

2. エネルギー表示システム

2-1. ビームチャンネル

現在ESには、rチャンネルが2本(r_1, r_2)、電子取り出しチャンネルが2本(Tagging, SOR-RING用)、及びES-SX(シンクロトロン放射光)チャンネルの計5本のビームチャンネルがある。

今回の校正実験はこの内 r_2 チャンネルを用いて行った。

ラジエーターは中心軌道の内側に置かれているため、中心軌道上にある電子の運動量と、ラジエーターに入射する電子の運動量の間には差が生じ、その大きさは次式で示される。

$$\frac{4P}{P} = \frac{1}{\eta} 4r \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここにPは中心軌道における電子の運動量、4Pは運動量差、4rはラジエーターの中心軌道からの距離、また η はdispersion functionと呼ばれ、加速器に固有の値である。

ESの場合、 $\eta = 1.3956\text{m}$ 、 $4r = 27\text{mm}$ であり、 $4P/P = 1.93\%$ となる。またラジエーターを1mmずらした時の運動量の変化は、0.072%である。

2-2. 表示システム

現在の表示システムは、基本的には、1970年に行われた校正実験の際に確立されたものであるが、その後いくつかの機器は更新されている。

システムに関する詳細な記述は、文献1)に述べられているので、ここでは概要をのべるにとどめる。Fig-1に現在のシステムとそのブロック図を示す。又Fig-2には、シンクロトロンの磁場(B)と、システムで処理される信号(\dot{B})、及びそれらの運転時の各種タイミングパルス²⁾

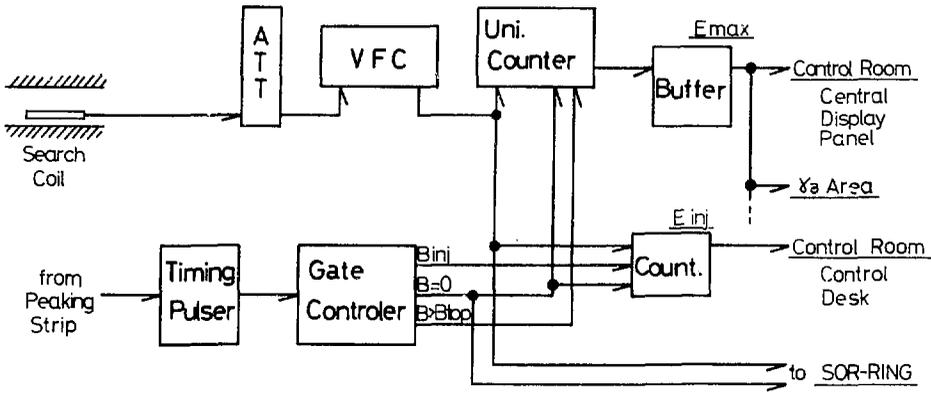


Fig - 1.

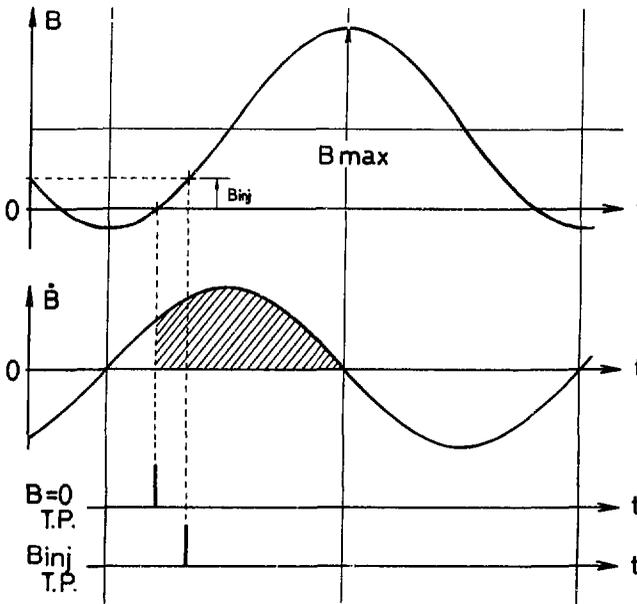


Fig - 2.

との関係を示す。

シンクロトロン軌道電磁石の、ギャップに挿入されているサーチコイルからの出力 ($\propto \dot{B}$) は、アテネーターを通し VFC に入力され、入力電圧に応じたパルス列に変換される。VFC はモノポーラータイプであり、負入力のときにはパルスを発生しない。このパルス列は次にユニバーサルカウンターに入力される。同カウンターは、同時にシンクロトロン軌道電磁石の磁場の状態に同期するゲートがかけられ、そのゲート開のタイミングはシンクロトロン磁場が $B = 0$ 、即ち、シンクロトロンのエネルギーが零のタイミングに同期している。これによりユニバーサ

ルカウンターの出力は、Fig-2 に示されるように $\int \dot{B} dt$ 即ち B_{max} の値に比例したものとなる。

ここでアテネーターの調整により、ユニバーサルカウンターの表示値をそのときの運転エネルギーに合わせておけば、運転エネルギー (E_{max}) を表示する事が出来る。尚、システムのエネルギー表示分解能は 0.1 MeV である。

現在は以上の E_{max} 表示の他に、同様な方法で、ライナックからの入射エネルギー E_{inj} の表示を行っている。また、ES から SOR-RING へのビーム取り出しのタイミングをとるため、VFC の出力と $B=0$ のタイミングパルスが、直接 SOR-RING コントロールデスクに伝送されている。

3. 校正方法

3-1. 校正の原理

高エネルギー電子が物質を通過する時、制動輻射により r 線を放出する。今この物質が十分に薄く、その内部での多重散乱やエネルギー損失が無視できる程度であれば、 r 線のエネルギースペクトラムはよく知られているように、Schiff の thin target formula³⁾ であらわされる：

$$\sigma(k) = \frac{d\sigma}{dk} = \frac{2Z^2}{137} \left(\frac{e^2}{m_0 c^2} \right)^2 \frac{N_r(k)}{k} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$N_r(k) = \left(\frac{E_0^2 + E^2}{E_0^2} - \frac{2E}{3E_0} \right) (\ln M(0) + 1 - \frac{2}{b} \tan^{-1} b) \\ + \frac{E}{E_0} \left[\frac{2}{b^2} \ln(1+b^2) + \frac{4(2-b^2)}{3b^3} \tan^{-1} b - \frac{8}{3b^2} + \frac{2}{9} \right] \quad \dots\dots (3)$$

$$\left. \begin{aligned} b &= \frac{2E_0 E Z^{1/3}}{111 m_0 c^2 k} \\ \frac{1}{M(0)} &= \left(\frac{m_0 c^2 k}{2E_0 E} \right)^2 + \left(\frac{Z^{1/3}}{111} \right)^2 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 E_0 は入射電子のエネルギーであり、我々が求めたいものである。また、 E は物質通過後の電子のエネルギー、 k は r 線のエネルギー、 $m_0 c^2$ は電子の静止エネルギー、 Z は物質の原子番号である。

この r 線のエネルギースペクトラムを、以下に述べる方法により r 線の電子対創成を通じて測定し、 E_0 を精度よく求める。

エネルギーが E_+ 、 E_- の陽電子及び電子が対創成される断面積 $\sigma_{pair}(E_+, E_-)$ は、次の式で与えられる⁴⁾；

$$\sigma_{pair}(E_+, E_-) = \frac{4Z^2}{137} \left(\frac{e^2}{m_0 c^2} \right)^2 \left[\frac{E_+^2 + E_-^2 + (\frac{2}{3})E_+ E_-}{(E_+ + E_-)^3} \ln \left(\frac{183}{Z^{1/3}} \right) - \frac{1}{9} \frac{E_+ E_-}{(E_+ + E_-)^3} \right] \quad \dots\dots\dots (5)$$

この電子対を Pair Spectrometer で検出する。検出される電子対の数を N_{pair} とすると、

$$N_{\text{pair}}(k) = \eta(k) \cdot N_T \sigma(k) \Delta k \cdot N_{\text{conv}} \cdot \int \sigma_{\text{pair}}(E_+, E_-) dE_+ \dots (6)$$

となる。ここに $\eta(k)$ は電子対の検出効率, N_T 及び N_{conv} はラジエーター及びコンバーターの単位面積当たりの原子数, Δk は Pair Spectrometer の acceptance である。(6)式を k_{max} の近傍のみで考えれば, (2), (3)式より

$$N_{\text{pair}}(k) \propto N_T(k) \dots (7)$$

となる。

従って $k \approx E_0$ の附近において $N_{\text{pair}}(k)$ を測定し, その結果を(3)式で最適化する事により E_0 の値を求める事が出来る。

3-2 実験装置及び精度の評価

今回の実験に用いたセットアップを Fig. 3 に示す。コンバーターにより入射 γ 線から対創成された電子対は, 運動量分析用電磁石により左右に曲げられ, 磁石の後方に左右対称に set された各々 3 連のシンチレーション・カウンターにより検出される。電子対創成 event は, 左右のカウンターの coincidence により識別される。

ビーム, 並びにカウンター寸法, 各種実験パラメータを Table-1 に示す。

Table - 1.

Radiator	material	Pt, 50 μm
	position	27 mm
Collimator	1 st	3 mm ϕ
	2 nd	8 mm ϕ
Converter	material	Al, 50 μm
Counter Size (mm)		
	R_1, L_1	8W \times 50H \times 3T
	R_2, L_2, R_3, L_3	40 \times 50 \times 3

A ビーム条件

ESからのビーム取り出し時間幅(スピル・タイム)はビーム・エネルギーの拡がりの観点から, $\pm 0.3 \text{ mgec}$ とした。このスピル・タイムによるエネルギーの拡がりは $\Delta E/E \approx 0.04\%$ であり, 実験精度に比べて無視出来る。ESへのビーム入射時の dB/dt は, 通常使用されている値 $\approx (2.0 \sim 2.2) \times 10^5 \text{ gau}\beta/\text{sec}$ を用いた。また,

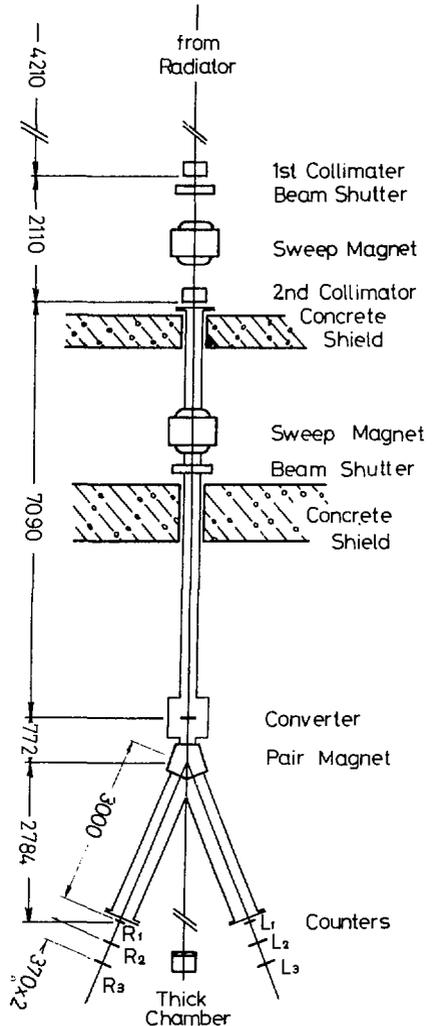


Fig - 3.

r線のトータル・エネルギー強度は±0.5%の精度をもつ thick-walled ionization chamber⁵⁾ でモニターした。この精度は、電子対創成測定 of 統計誤差に比較して十分に良く、E_{max} 導出の際の誤差としては無視しうる。

B Pair Magnet

Pair Magnet の励磁電流はシャント抵抗とデジボル、その時の Pair Magnet の中心磁場はNMR法により測定した。測定の結果を4次式で fit して得られた励磁特性を以下に示す。

$$V_{\text{digivol}} \text{ (V)} = \sum_{n=0}^4 a_n \cdot B^n \text{ (KG)} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$a_0 = 2.8594 \times 10^{-2}$$

$$a_1 = 2.4938 \times 10^{-1}$$

$$a_2 = 7.1336 \times 10^{-3}$$

$$a_3 = -7.4333 \times 10^{-4}$$

$$a_4 = 2.848 \times 10^{-5}$$

(8)式による磁場設定の誤差はσ=0.03%である。磁場の設定にあたっては、ヒステリシスの影響を含まないよう考慮して行ったが、設定値の再現性に Fig. 4 のような結果がみられた。

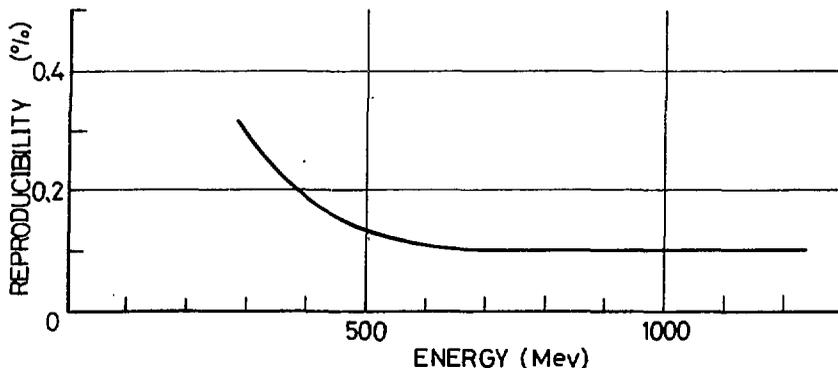


Fig. - 4.

カウンターの中心軌道を通る電子（陽電子）の運動量と電磁石の中心磁場との関係は、floating wire method により求められた。測定原理、方法及び誤差評価等については、Appendix に記述をゆずる。得られた磁場と運動量との関係式は、

$$P \text{ (MeV/c)} = \frac{X_0 - C_0 - C_1 \times B \text{ (KG)}}{C'_0 + C'_1 \times B \text{ (KG)}} \times B \text{ (KG)} \quad \dots\dots\dots (9)$$

となり、各定数は下記の如くなる。

$$\begin{array}{ll} X_0 = 300 & , \quad C'_0 = 24.1978 \\ C_0 = -891.143 & , \quad C'_1 = -0.12968 \\ C_1 = 6.80104 & . \end{array}$$

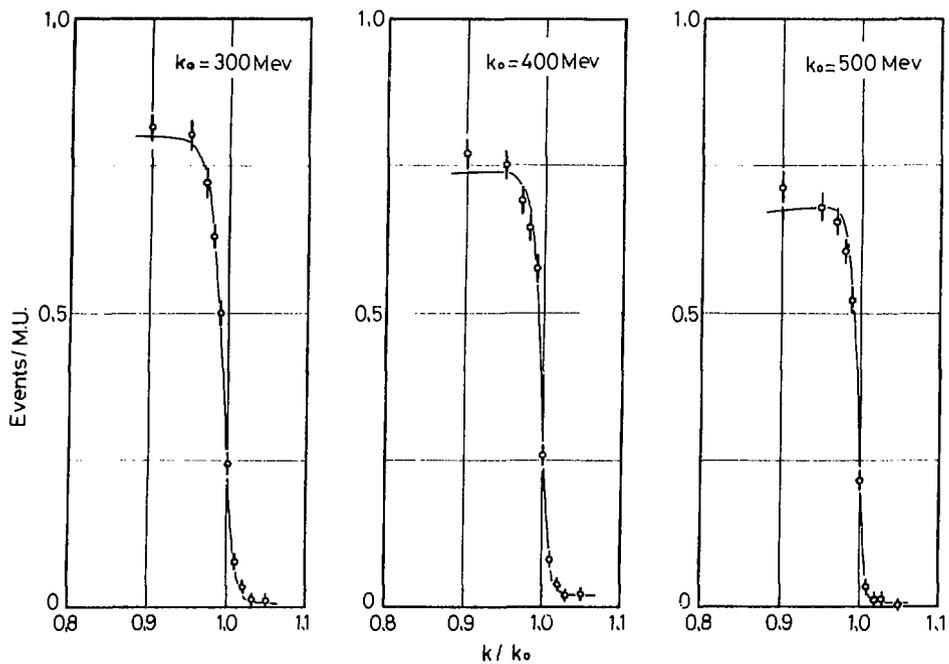


Fig - 5.

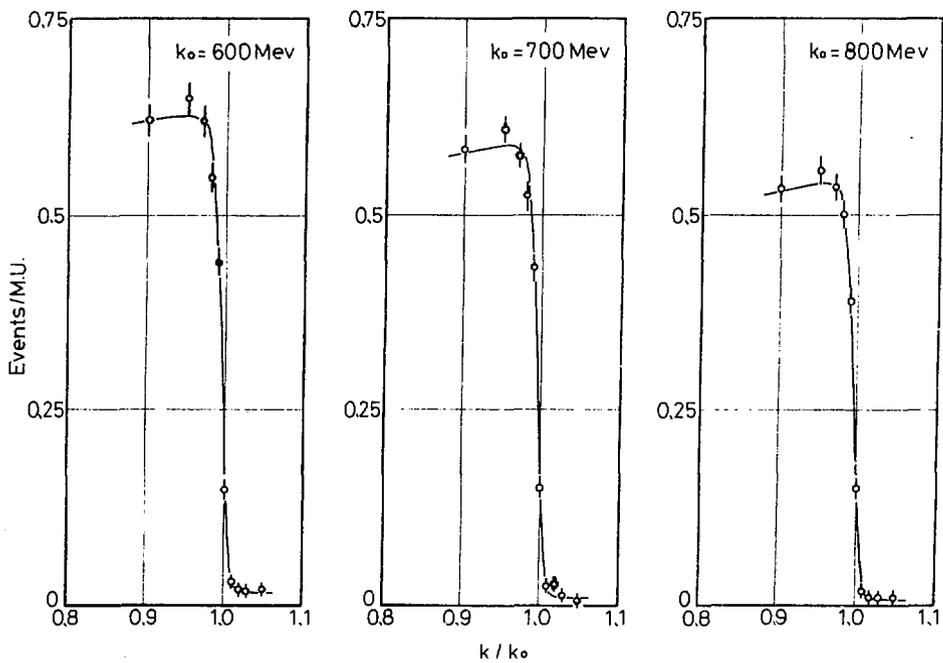


Fig - 6.

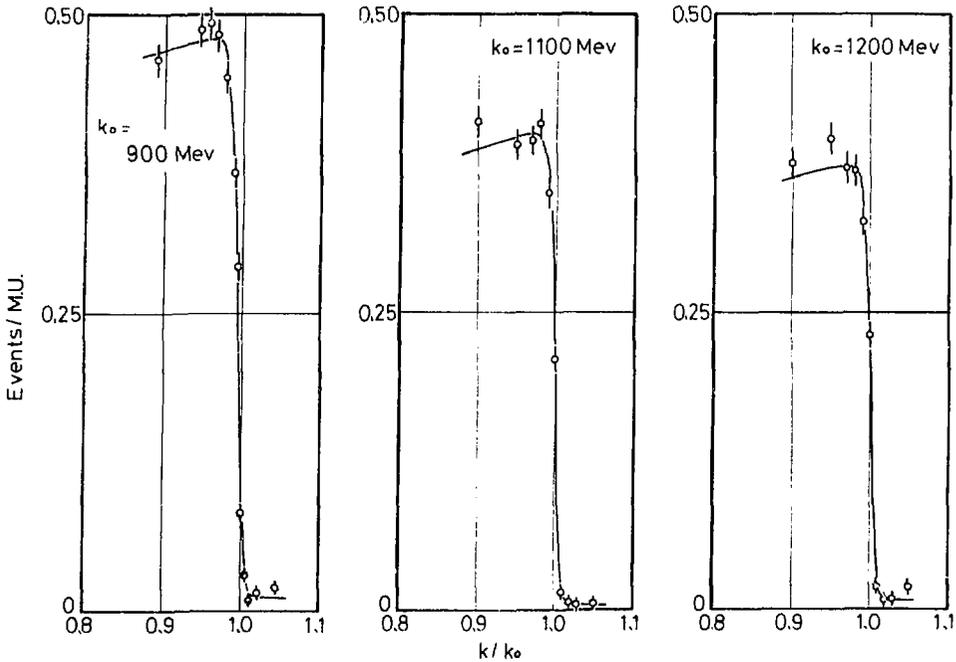


Fig - 7.

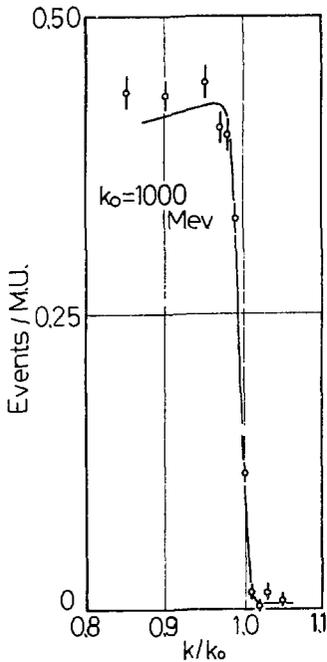


Fig - 8.

とした。最適化に際しては、(3)式を分解能で smear した関数を用いた。

$$\left. \begin{aligned} N_{\text{pair}}^{\text{obs}}(k) &= \int N_{\text{pair}}(k) R(k, k') dk' \\ R(k, k') &= \frac{1}{\sqrt{2\pi} \Delta k} e^{-\frac{(k-k')^2}{2(\Delta k)^2}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (14)$$

尚、分解能については次項にて更に述べる。

また、 r 線の角度分布を考慮し、角度上限値 θ_{max} を ES 内部のラジエーターから 1st コリメーターの、のぞき角 (0.36 mrad) として

$$\frac{d\sigma}{dk} = \int_0^{\theta_{\text{max}}} \frac{d^2\sigma(k, \theta)}{dk d\theta} d\theta \quad \dots\dots\dots (15)$$

以上データに対する最適化のパラメーターは、 $E_0, N_0, BG, \Delta k/k$ とした。

4-2. 分解能

解析に際し、 χ^2 を最小にする分解能の値 $\Delta k/k |_{\chi^2}$ が求まる。その結果を Fig.9 に示す。

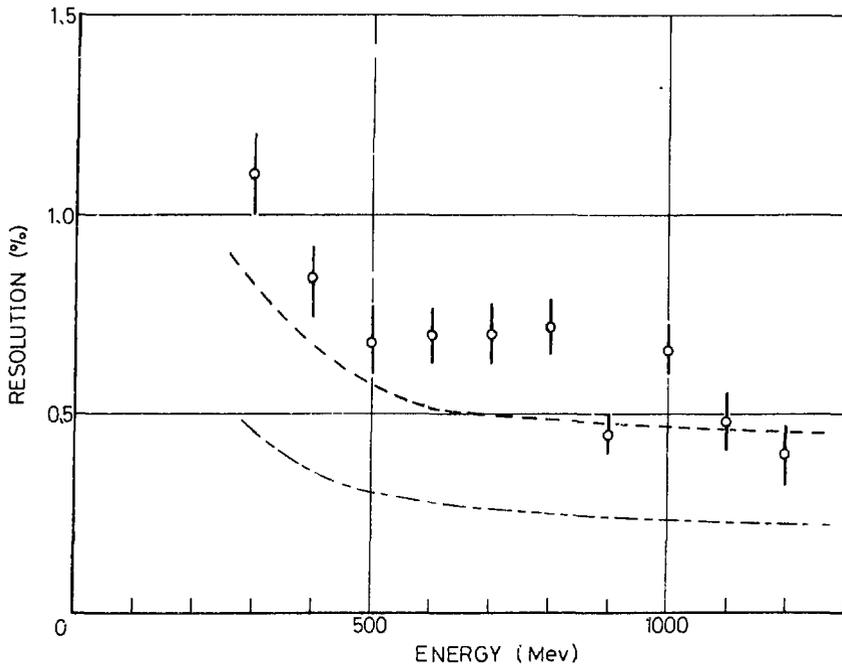


Fig - 9.

一方、Monte Carlo Simulationにより求めた γ 線エネルギー分解能 $\cdot 4k/k|_{MC}$ の値を同図に鎖線で示す。 E_0 の低い領域で分解能が若干悪くなっているのは、主にコンバーターでの多重散乱の効果による。 $4k/k|_{\chi^2}$ と $4k/k|_{MC}$ に明らかな相異が見えるが、これは3-2. B項で議論した、pair magnet の再現性の不定性及び設定誤差にもとづくものと推定し、simulation値にこれらを考慮した分解能をFig.9に点線で示した。pair magnet の再現性の不定性等はいわゆる分解能とは異質のものであり、正規分布に従うものではないが、上記の $4k/k|_{\chi^2}$ と $4k/k|_{MC}$ の違いを説明するものと解釈した。

以後の最適化に際しては、 $4k/k|_{\chi^2}$ の値を用いた。

なお、simulationで得た分解能を用いた際の最適化では、800 MeVにおいて E_0 値で約0.23%の違いを生じる。

また、コリメーターによる γ 線の角度分布への影響がない($\theta_{max}=\pi$)とした場合の最適化では、例えば800 MeVの場合で0.1%程度 E_0 値に違いが生ずる。

4-3. 結 果

以上の最適化手続きにより求めた E_0 (= E_{FIT})の結果をTable-3に示す。Table-4には校正されたエネルギー(E_{FIT})とエネルギー表示値($E_{indicator}$)及びマシン・パラメータとの関係を示す。

エネルギー表示値は、我々の測定値と $\leq \pm 0.35\%$ の範囲内で一致していることが確かめられ

Table - 3.

ENERGY INDICATOR (MEV)	E _{FIT} (MEV)	RESOLUTION (%)	χ^2	σ_E (%)	ERRORS	
					PAIR MAGNET (%)	Counter Position (%)
299.97	309.30	1.10	0.777	0.059	± 0.36	± 0.09
400.18	400.85	0.84	1.700	0.045	± 0.32	"
500.4	500.49	0.68	1.052	0.043	± 0.28	"
600.25	598.84	0.70	0.862	0.039	± 0.22	"
700.28	698.80	0.70	1.818	0.039	"	"
800.2	798.62	0.72	0.466	0.039	"	"
900.10	898.19	0.45	2.695	0.024	"	"
1000.06	998.30	0.66	1.473	0.041	"	"
1100.3	1103.08	0.48	1.325	0.033	"	"
1200.34	1204.36	0.40	2.651	0.035	"	"

Table - 4.

RESULT OF ES-ENERGY CALIBRATION AT 1981

ENERGY INDICATOR (MEV)	ENERGY _{FIT} (MEV)	SYNCHROTRON MAGNET CURRENT (A)			$\frac{(E_{IND}-E_{FIT})}{E_{FIT}}$ (%)	E _{FIT} /I _{TOTAL} (MEV/A)
		I _{ac}	I _{dc}	I _{TOTAL}		
300.0*	300.30	150.5	113.5	326.24	- 0.100	—
400.2	400.85	181.9	176.7	454.01	- 0.162	—
500.4	500.49	211.0	242.6	541.0	- 0.038	—
600.3	598.84	242.2	305.3	647.81	0.227	—
700.3	698.80	273.4	366.2	752.85	0.215	—
800.2	798.62	306.2	425.3	858.28	0.198	—
900.1	898.19	340.0	484.1	966.21	0.213	—
1000.1	998.30	382.3	548.6	1088.89	0.180	—
1100.3	1103.08	434.0	618.6	1232.03	- 0.252	—
1200.3	1204.36	492.7	696.1	1392.91	- 0.337	0.86464
1200.2**	1203.90	505.3	676.8	1391.36	- 0.307	0.86529

* dB/dt (2.0-2.2) × 10⁵ GAUSS/SEC ,** dB/dt 3.2 × 10⁵ GAUSS/SEC ,

$$I_{TOTAL} = \sqrt{2} \cdot I_{ac} + I_{dc} .$$

た。但し、 $(E_{\text{indicator}} - E_{\text{FIT}}) / E_{\text{FIT}}$ の値が、エネルギー値に対し systematic な振舞いを示しているが、この原因はまだ説明されていない。

求められた E_0 値に対する systematic error の評価は Table 3 に示してある。カウンターの位置精度による誤差は、 $\Delta x = \pm 1 \text{ mm}$ として、(12)式から求められる。また、pair magnet によるものは、3-2 Bにて検討した再現性及び設定誤差を考慮している。しかし、後者は分解能の評価にも反映されており、ここでは考えられる誤差の最大値として考慮した。

また、入射時の dB/dt の違いによる影響を 1200 MeV で測定したが、Table 4に示す通り I_{total} 、 E_{FIT} 、 $E_{\text{indicator}}$ のそれぞれの間有意の変化は見られなかった。

最後に、シンクロトロン電磁石の励磁電流と E_{FIT} の関係を Fig 10 に示す。

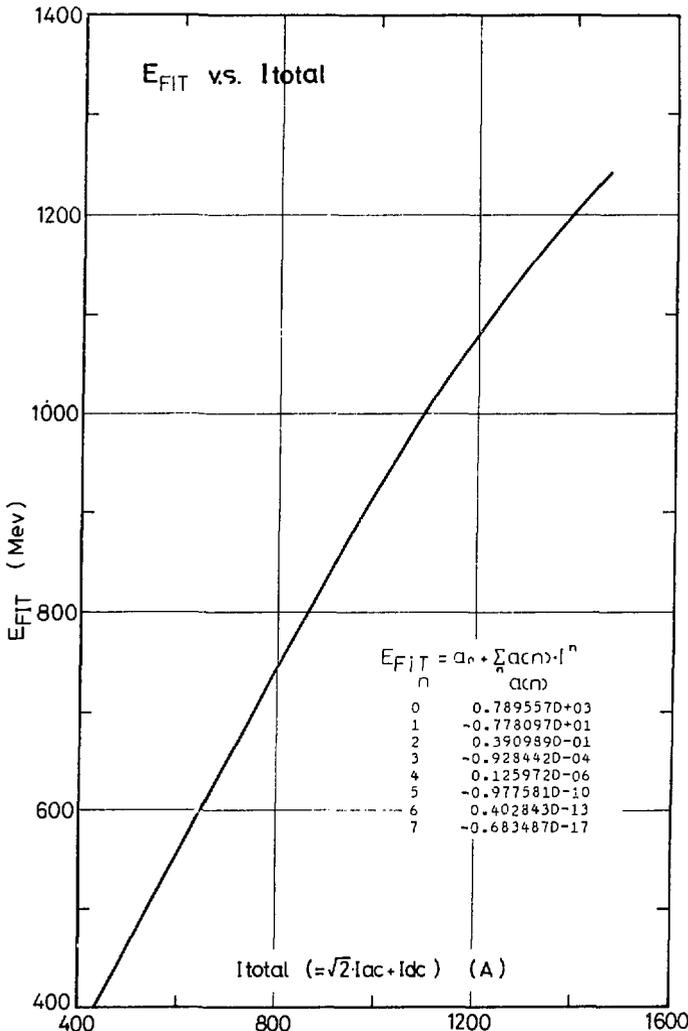


Fig - 10.

お わ り に

本実験は1981年6月に行われた。測定は筆者らの他，高エネルギー部全員の協力により行われた。御協力いただいた各位に感謝致します。

Appendix

Floating Wire Method の原理及び誤差の評価

1. 原理

荷電粒子が、磁場 B の存在する空間を走ると、ローレンツ力 F をうけてその進行方向を変える。このとき、粒子の描く軌道と粒子の運動量との関係は、floating wire method により知ることが出来る。

今、磁場 B は垂直成分のみとし、又粒子は水平に走るものとし、その単位ベクトルを \vec{n} とする。粒子の運動量を p 、速度を v とすると、粒子に働く力 F は、

$$\vec{F} = e(\vec{v} \times \vec{B}) \quad \dots\dots\dots (A-1)$$

となる。単位ベクトルを用い、 $s = v \cdot t$ として、

$$\frac{d\vec{n}}{ds} = \frac{e}{p} (\vec{n} \times \vec{B}) \quad \dots\dots\dots (A-2)$$

となり、これは水平力成分となる。

一方、電流 i の流れる wire が、磁場 B の空間の中で、張力 T とつり合い、平衡状態にあるとすれば、wire の微小長 ds' に働く力は、

$$\frac{d\vec{T}}{ds'} = -(\vec{i} \times \vec{B}) - \vec{G} \quad \dots\dots\dots (A-3)$$

とあらわされる。 G は重力による垂直力で、wire の単位長さ当たりの重量を ρ 、重力による加速度を g とすれば、 $G = \rho \cdot g$ である。

電流の単位ベクトルを \vec{n} とし、wire の自重を考慮して (A-3) 式を整理すると、

$$\frac{d(\vec{n}_{\parallel} + \vec{n}_{\perp})}{ds'} = -\frac{i}{T} (\vec{n}_{\parallel} + \vec{n}_{\perp}) \times \vec{B} - \frac{\rho}{T} \vec{g} \quad \dots\dots\dots (A-4)$$

となる。 n_{\parallel} 、 n_{\perp} は各々単位ベクトルの水平成分、垂直成分を示す。 \vec{n} の傾きを θ とし、 ds を ds' の水平面に投影したときの長さとするれば、

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\rho g}{i B} \right) \quad \dots\dots\dots (A-5)$$

$$ds' \cdot \cos \theta = ds \quad \dots\dots\dots (A-6)$$

と求められるから、(A-4) 式の水平成分は、

$$\frac{d\vec{n}_{\parallel}}{ds} = -\frac{i}{T \cos \theta} (\vec{n}_{\parallel} \times \vec{B}) \quad \dots\dots\dots (A-7)$$

となる。

(A-2)、(A-7) 式を等しいとして

$$P = e \frac{T}{i} \cos \theta \quad \dots\dots\dots (A-8)$$

となる。

粒子の運動量は(A-8)式から、又その軌道は、wireを水平面に投影した軌跡として求める事が出来る。

2. 誤差の評価

(A-8)式から、Pの誤差は、T、 θ 、iの測定エラーとして、もちこまれる。

wireに流れる電流iは、シャント抵抗及びデジボルで測定された。この精度は0.05%程度であり、校正精度に較べ無視出来る。

偏向角 θ は、今回の場合、測定条件から $\theta = 10$ mradと求められた。これによる誤差は約0.005%であり、無視出来る値である。

張力Tの誤差を小さくするため、friction less type pully⁶⁾を使用し、かつ測定中pullyの平衡角度の偏差 $\Delta\phi$ が $\pm 1^\circ$ 以内に入るように行った。今回の実験では $\Delta\phi$ (mrad)とTの誤差との関係は、

$$\frac{\Delta T}{T} = 2.486 \times 10^{-8} \times \Delta\phi^2 \quad \dots\dots\dots (A-9)$$

となっているので、 $\Delta T/T$ は0.076%以内に押えられている。

参 考 文 献

- 1) T. Fujii, A. Imanishi, M. Kasuya and T. Yamakawa ; "Energy Indicator of the Electron Synchrotron" JJAP Vol.10, No.6 (1971)
- 2) K. Shiino, S. Asaoka, K. Norimura and M. Yoshioka ; "Control Circuits for the 1.3 GeV Electron Synchrotron - I -" INS-TH-112 (1979)
- 3) L. I. Schiff ; "Energy-Angle Distribution of Thin Target Bremsstrahlung" Phys. Rev. Vol. 83, No. 2 (1951)
- 4) 武田暁, 宮沢弘成 ; "素粒子物理学" 物理学選書9, 裳華房
- 5) K. Gomi and K. Ukai ; "A Current Integrator Using an ADC-module" INS-TH-131 (1980)
- 6) A. Citron, F. J. M. Farley, E. G. Michaelis, H. ϕ rerås, "Floating Wire Measurements on the SC Magnet" CERN 59-8, Synchro-Cycrotron Division (1959)