

TOFカウンター

高エネルギー加速器研究機構・素核研 吉見弘道

TOFカウンターは、高エネルギー実験の基本的な検出器として長い歴史をもつ。最近100ps時間精度TOFカウンターが実現され、BELLE、CLEO、CDF実験で1.2GeV/c以下の運動量領域での π/K 中間子の判別に用いられている。

1) TOFカウンターの概要と動作原理

1. 飛行時間差測定法

粒子速度は飛行距離 d および時間差 TOF から次の式で与えられる。

$$v = d [\text{cm}] / \text{TOF}[\text{ns}] \quad (1)$$

一方、粒子速度は粒子質量 m と運動量 p から次の式で与えられる。

$$\beta = v/c = m/E = p/\sqrt{m^2 + p^2} \quad (2)$$

従って、運動量 p および速度 β を精度よく測定することにより、粒子質量 m を決定できる。パイ中間子とケイ中間子の判別を例に取ると、飛行時間の測定精度を (TOF)ps として 3 の分離は、近似的に次の式で与えられる。

$$\Delta m^2 = 2(m_K^2 + p^2)\sigma(\text{TOF})/\text{TOF} \sim 2p^2\sigma(\text{TOF})/\text{TOF} < (m_K^2 - m_\pi^2)/3 \quad (3)$$

$$p_{\text{max}} < \sqrt{(m_K^2 - m_\pi^2)(d/c)/6\sigma(\text{TOF})} \quad (4)$$

飛行距離 $d = 1.2\text{m}$ 、時間分解能 $\sigma(\text{TOF}) = 100\text{ps}$ として $p_{\text{max}} = 1.22\text{GeV}/c$ が導ける。

粒子の運動量および飛行距離は中央ドリフトチェンバーのような飛跡測定器により精度よく測定される。この例では、1.2mの飛行距離で、飛行時間の測定精度100psで1.22GeV/cの運動量までの π/K 中間子の3識別ができる。

2. プラスチックシンチレーター

時間を測定する検出器としてプラスチックシンチレーターが広く用いられている。環状分子構造をもつプラスチック(ポリビニルトルエン、ポリスチレンなど)母材に、蛍光物質を微量(重量比1%以下)溶かし込んだものである。まず、荷電粒子が通過すると母材の環状分子の励起がおこり、Forster エネルギー変換[1]により1次蛍光物質を励起して紫外線(約340nm)を発光する。この紫外線は数mmの減衰長であるが、2次蛍光物質に吸収され、最終的には長波長の光(約420nm)が発光する。蛍光物質には芳香族の環状炭素化合物が用いられる。蛍光物質の種類と混合比により、波長スペクトラム、時間特性、発光量、減衰長などに特徴がでる。

表1に市販されているプラスチックシンチレーターのおもな特性を示す。図1には発光スペクトラムを示す。典型的な光減衰長は2~4mである。一般にピーク波長の短いものは時間特性が早い、減衰長は短い。光減衰長は、カウンターの大きさ・形状に依存する。加工方法および加工後の環境条件による光減衰長の時効効果が見られ

る。特殊ガスによる化学反応あるいは外部応力による表面の変化が起こり、表面の反射率の劣化が起こることがある。遮光材の選択、取付・固定法に注意が必要である。

[表 1] 代表的な TOF カウンター用プラスチックシンチレーターと特性表

Scintillator	Light yield %anthracene	T _{rise} Nsec	T _{decay} nsec	FWHM Nsec	発光波長 nm	光減衰長 cm
NE102A	65	0.9	2.4	2.7	423	250
NE110	60	1.0	3.2	4.2	434	400
NE114	50	-	4.0	5.3	434	400
BC404	68	0.7	1.8	2.2	408	160
BC408	64	0.9	2.1	2.5	425	380
BC412	60	1.0	3.3	4.2	434	400
SCSN-38	-	0.7	2.3	4.0	428	210
SCSN-81	-	0.9	2.4	4.0	437	330

3 . プラスチック TOF カウンター

粒子通過により発生したシンチレーション光は、矩形断面 (4cm 厚さ x6cm 幅) 長さ 3 m 程度の TOF カウンターの内表面で全反射を繰り返し端部に到達し、光電子増倍管により検出される。その信号到達時刻から、カウンター中での光の伝播時間を考慮して、実際の粒子の通過点での時刻を決定する。

時間分解能はシンチレーションのスペクトル、時間特性、カウンター内表面での分散効果などにより決まる光子の到達時間分布、および光検出器の光検出効率、時間特性により決定される。時間分解能は、光の伝播距離が短い場合は、シンチレーション光の時間特性 (立ち上がり時間) に大きく依存するが、大きな TOF カウンターでは表面反射による分散効果、光減衰長などが重要となる。

4 . 光電子増倍管

このようにしてカウンター端部に到達する光子数は4cm厚さ x6cm幅のカウンターでは約 1000 個程度である。光電子増倍管で検出され、 $10^{+6} \sim 10^{+7}$ 倍に増幅されて約 1Volt 程度の幅約 10ns の信号として出力される。この出力信号の時刻 (T) および信号振幅 (Q) を読みだし、オフライン処理をして、最終的には 100ps の時間分解能を実現できる。図 2 には種々の光電面についての波長感度特性を示す。通常はバイアルカリ光電面が波長 420nm のシンチレーションに用いられる。スペクトラムと感度特性の積の積分から実効量子効率が計算できる。典型的な実効量子効率は約 20% である。さらに、光電子増倍管の種類によっては、光電子の収集効率を考慮する必要がある。

図1. 代表的シンチレーターの発光スペクトラム (Bicron社カタログ)

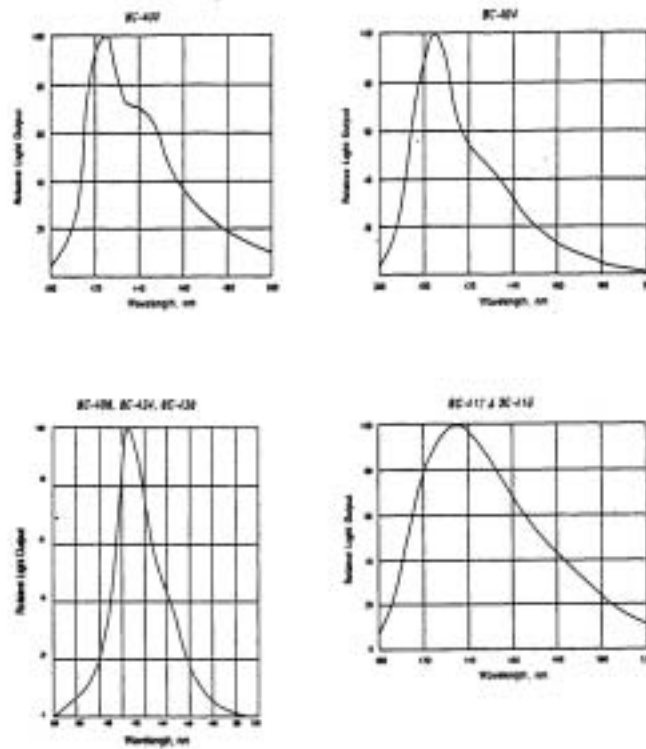
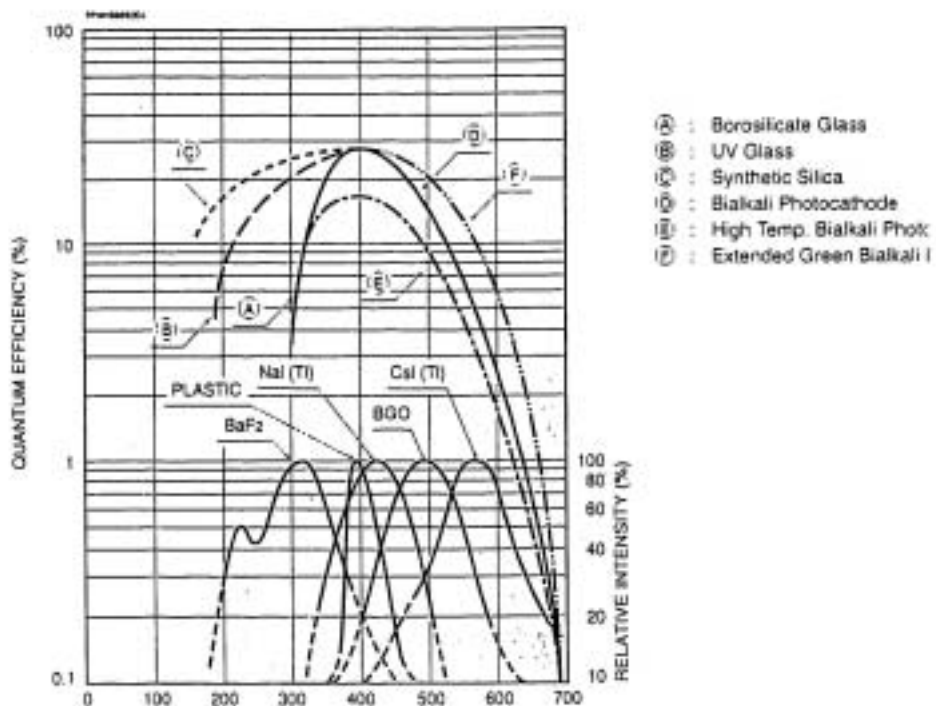


図2. 光電子増倍管の光電面の相対感度および量子効率 (浜松ホトニクス社カタログ)



5 . ファインメッシュ光電子増倍管

通常の光電子増倍管の増幅率は、地磁気（2 ガウス程度）の微弱磁場でも影響をうける。この地磁気による影響を除くために、通常はμメタルなどの外筒をつけて地磁気対策をして使用する。これに対して、最近実用化されているファインメッシュ型光電子増倍管は、1.5Tesla の強磁場でも電流増幅率 10^{+7} を実現できる。この型の光電子増倍管は、原理的に光電子収集効率 50% であり検出光電子数は約半分となる。1 光子検出時間精度(T.T.S.)は通常の光電子増倍管と変わらない。

6 . Time Walk Correction

物質中でのエネルギー損失はランダウ分布に従う。従って、TOFカウンター上の同位置を同種粒子が通過する場合でも、光電子増倍管の出力信号の大きさは、発生光子数（エネルギー損失量）に応じて変化する。簡単な場合として、信号が一定電圧閾値を超えた時刻を測定する場合を考える（Leading edge discrimination）。出力信号の振幅が相似形で変動するため、測定時刻は信号が大きくなると早くなり、信号が小さくなると遅くなる。このような効果はTime walk とよばれる。SQRT(1/Q)のTime walk 補正が有効である。

7 . TOF カウンターの時間分解能

時間分解能は、到達する光子の時間分布が相似形であれば、光電子増倍管で検出される光子数の統計に従う。到達時間分布の立ち上がりは伝播距離Lの平方根に比例する。従って、TOFの時間分解能は次のように表される[2]。Lはカウンターの全長、Nは検出光電子数である。

$$87 \text{ ps} \times \sqrt{L/N} \quad (3)$$

この式は、1980 年前後のデータをもとにした経験式であり、上記の分散効果のみが関与する場合である。この式から、検出光子数の統計が重要であることがわかる。従って、カウンター端面での光検出器の占有面積、実効量子効率等重要因子である。

8 . TOF 時間精度の基本要素について

ここでは、TOFカウンターからの読み出し回路、TOF測定の基本時間の誤差などからの時間制度への影響について述べる。

(1) 飛行時間測定の基準時間

実験の種類にもよるが、衝突ビーム型実験では、個々のイベントについて、衝突時間を直接測定することは、実際上不可能である。このため加速器制御のRF信号を基準として、時間を測定し衝突番地をオフラインで決定する方法が用いられる。ビームサイズ5mmとして、衝突時間の誤差が20psになる。

(2) 接地ノイズ

光電子増倍管からの信号のノイズの大きさを十分に小さくする。ケーブル敷設の際の接地点など、接地ノイズを小さくするために注意深い設計が必要である。

(3) 光電子増倍管の使用条件

光電子増倍管の光電面(カソード)の電位を0、アノードの電位を正極とすると、TOFカウンターとカソードの電位が同じになり、光電面からの熱電子によるノイズを軽減できる。

光電子増倍管には時効効果があり、アノード電流の積分量により寿命が左右される。高ルミノシティ実験では信号レートが高いため、光電子増倍管の増幅率を低くして、アノード電流(1 μ A以下が目標)を低く抑えなければならない。Belleでデータおよび浜松のテストによると、アノード電流を1 μ Aとしてファインメッシュ型光電子増倍管の寿命は30年程度であると推定される。Belle TOFカウンターではこのために5倍のプレアンプを併用している。

(4) 粒子飛行距離の計算精度

飛跡再構成の精度の改善が必要である。飛行距離1.2mに対して3mmの誤差は10psの時間誤差に対応する。

図3。Belle TOFカウンターとビームテスト結果

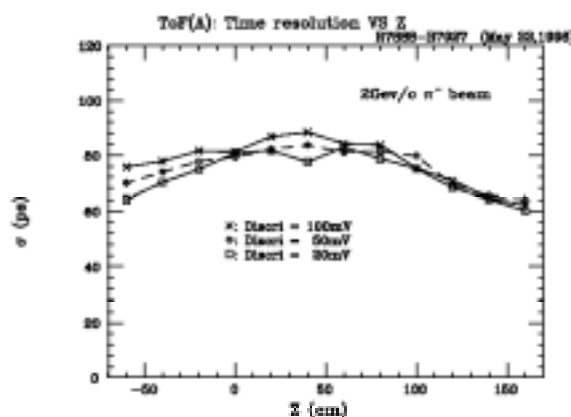


図3 : Belle 測定器用TOFカウンターは128本のカウンターから構成されている。個々のカウンターは4cm厚×6cm幅×255cm長のBC408シンチレーターである。両端にファインメッシュ型光電子増倍管が直接取り付けられている。半径が衝突点から1.2mの円筒面に配置されている。写真は、2個のTOFカウンターと1個TSC(トリガーシンチレーター(5mm厚×12cm幅×260cm長)からなるTOFモジュールの2つを示す。右図は、ビームテスト(磁場なし)で得られた時間分解能である。80psの分解能が得られている。実機では、1.5テスラの磁場の効果、衝突時間、信号読み出し回路の誤差を含めて95psの分解能がえられている。

9 . 高性能 T O F カウンターについて

9 - 1 B E L L E T O F カウンター

(1) ファインメッシュ型光電子増倍管の使用

光電子増倍管を T O F カウンターに直接取り付けることが可能となった。この方式はライトガイドで光を測定器の外に出して通常の光電子増倍管で読み出すのに比べて、余分なライトガイドの中の光伝播による分散効果および光の損失を軽減できる。100ps の時間分解能を達成し、約 2 倍改善できた。

(2) 有効光電面積の最適化

光電子増倍管の光電面積とカウンターの断面積の比を最大限とする設計をした。39mm 直径の光電面積に対してカウンターの断面積は $4 \times 6 \text{ cm}$ であり、面積比は 50% である。

9 - 2 50ps T O F カウンター

(1) 50ps T O F カウンター

(3) 式により L を小さくして分解能をあげることができる。例えば、 L を 1 m に短くすれば 2.5m カウンターでの時間分解能 80ps のデータから、50ps が期待できる。但し、カウンターの配置の設計が必要である。

(2) 光検出器の開発

現在の実効量子効率約 20% である。80% の量子効率を実現できれば、同じ設計のカウンターでも、2 倍の分解能の改善が見込まれる。また、光電面の面積率、形状を読み出しカウンターの形状に完全に一致することが可能であればさらに分解能の改善が可能である。

参考文献

- 1 . K. F. Johnson, Physical Review D66, (2002) 010001-207
- 2 . B. W. Atwood, Lecture at SLAC summer Institute, 1980, P287.
3. Timing Characteristics of a Micro-channel Plate and Fine Mesh Photomultiplier Tube in a 1 T field. H.Kichimi et. al, Nucl. Instr. And Meth. A325 (1993) 451.
4. The Cherenkov Correlated Timing Detector.
H.Kichimi et.al, Nucl. Instr. And Meth. A371 (1996) 91
5. The BELLE TOF system. Nucl. Instr. And Meth. A453 (2000) 315.
6. A detailed Monte-Carlo Simulation for the Belle TOF System.
J. W. Nam et. al, Nucl. Instr. And Meth. A491 (2002) 54.
7. Belle TOF の基本設計についての述は以下の文献を参照されたい。

TOFカウンター関連文献が多数引用されている。

Physics and Detector at KEK Asymmetric B Factory. KEK Report 90-23(1991) P148

Physics and Detector at KEK Asymmetric B Factory. KEK Report 92-3(1992) P112.

Progress report on B physics Task Force activities. KEK Report 93-1(1993) P109.

Letter of Intent for A study of CP violation in B meson decays. KEK report 94-2.(1994)P73.

A study of CP violation in B meson Decays. KEK report 95-1(1995) p5-7.

The Belle Detector. S. Mori. et. al. KEK-report 2000-4 (2000) p77.

The Belle Detector, A.Abashian et. al., Nucl. Instr. And Math. A497 (2002) 117