

筑波大学大学院博士課程

数理物質科学研究科修士論文

RHIC-PHENIX 実験における  $p+p$  衝突実験のための

衝突検出器の設計と開発

鶴岡裕士

2002 年 2 月



筑波大学大学院博士課程

数理物質科学研究科修士論文

RHIC-PHENIX 実験における  $p+p$  衝突実験のための

衝突検出器の設計と開発

鶴岡裕士

(物理学専攻)

指導教官 三明康郎



# 概要

2001年に米国ブルックヘブン国立研究所のRHIC加速器(Relative Heavy Ion Collider)において、世界最高エネルギーとなる $\sqrt{s_{NN}}=200\text{GeV}$ での金・金原子核衝突が行われた。RHICを用いた実験の一つにPHENIX実験がある。PHENIX実験は高エネルギー重イオン衝突で生成される光子、レプトン、ハドロンを同時に測定することにより、クォークやグルーオンが核子の閉じ込めから開放された状態、すなわちクォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)のシグナルを多種多様なプローブを用いて検出し、その性質を系統的に研究することが目的である。特に、ハドロンは衝突系におけるハドロン間の相互作用を経た後に検出器に捕らえられるため、衝突系の膨張や粒子生成時の温度などの基本的かつ重要な情報を含んでいる。

高エネルギー重イオン衝突に固有な現象を明らかにするには、同一エネルギーにおける陽子・陽子衝突などとの系統的比較が重要である。そのため、2001年12月より2ヶ月間にわたって、陽子・陽子衝突実験が行われた。ここで、PHENIX実験の既存のトリガー装置(BeamBeamCounter、以下BBCとする)は、陽子・陽子衝突には適さないという問題が発生した。BBCは粒子密度の高いビーム軸方向の粒子を捕らえることによって事象選択を行うのだが、金・金原子核衝突に比べ、陽子・陽子衝突では粒子多重度が遥かに小さいために、高エネルギー重イオン衝突では幾何学的断面積のほぼ100%を検出できるが、陽子・陽子衝突においては半分程度しか事象選択できないからである。RQMDという陽子・陽子衝突を再現するシミュレーションによると、BBCではハドロン測定の際、粒子多重度の小さなEventを逃してしまうことが分かった。そのため、収集されるデータに偏りを持つ可能性があり、我々が目指す系統的比較には不適である。また、ハドロンの粒子識別に必要な飛行時間測定の開始時間測定の時間分解能も不十分である。そのため、陽子・陽子衝突専用のトリガー兼スタートタイミング装置が必要となった。

本研究では、陽子・陽子衝突におけるハドロン識別・測定専用のトリガー兼スタートタイミング装置(Time Zero Counter、以下TZCとする)の設計・開発を行った。

TZCは、設置場所の関係上長さ1mのプラスチックシンチレーターを使用し、時間分解能を良くするためにシンチレーターを光電子増倍管で挟んだ両読み型飛行時間測定器にした。

まず、光学的モンテカルロシミュレーションによりプラスチックシンチレーター及びライトガイドの形状の設計を行った。光収集効率及びタイミングの最適化により、長さ10cmのライトガイドと長さ1m厚さ2cmのシンチレーターを組み合わせれば、 $\sim 60\text{ps}$ の時間分解能を達成できることが分かった(2001年6月)。

次に、TZCが設置される場所は、 $3\text{k[Gauss]}$ 程度の高磁場がかかっているため、高磁場用Fine Mesh型光電子増倍管(R5924HAMAMATSU)の磁場に対する性能評価を行っ

た。8 k[Gauss] までの磁場を発生できるソレノイド磁石を用いて、磁場の強さ、磁場と光電子増倍管の角度を変えながら、光電子増倍管のゲインや時間分解能への影響を調べた。その結果、3k[Gauss] 以下ならば、ゲインや時間分解能に対する磁場の影響は少なく、正常に動作することが判明した。

以上の成果をもとに、プロトタイプを製作し、KEK-T1 ビームラインを利用してビームテストを行った(2001年 T-479)。2[Gev/c] の  $\pi$ -中間子をシンチレーターに入射させる位置を変えながら、また光電子増倍管にかかる磁場を変えながら、TZC の時間分解能を測定した。その結果、3k[Gauss] の磁場中においても目標の時間分解能  $\sim 60$ ps を得られることを確認した(2001年 12月)。

2001年 8月までに TZC 本体とそれを支えるための部品の設計を完了し、PHENIX 実験磁石の実物大模型を用いた設置練習、宇宙線による性能確認テストの後、米国へ搬出し、2001年 11月下旬 PHENIX 実験にハドロン識別・測定を行う観測領域内に 8組設置した。

そして、2001年 12月より 2ヶ月間、陽子・陽子衝突実験が行われたが、TZC は正常に動作し、系統的比較のためのデータ収集は成功のうちに終わった。また、TOF(飛行時間測定器)を用いた粒子識別を設計通り行えることが確認された。

# 目次

概要	i
目次	iii
第 1 章 目的	1
1.1 RHIC-PHENIX 実験とは	1
1.2 T0 カウンターの必要性	3
1.2.1 RHIC における p+p 衝突実験	3
1.2.2 p+p 専用トリガー装置の必要性	4
1.3 飛行時間測定器	8
1.3.1 両読み型検出器	8
1.3.2 飛行時間測定法	9
第 2 章 T0 カウンターの設計	11
2.1 求められる性能	12
2.1.1 設置場所	12
2.1.2 ハドロン測定のために	13
2.1.3 対生成電子測定のために	16
2.1.4 高磁場対策	17
2.2 設計	18
2.2.1 光電子増倍管	18
2.2.2 シンチレータ	19
2.2.3 ライトガイド	19
2.2.4 PCR	20
2.3 光学モンテカルロシミュレーション	21
2.3.1 計算の概要	21
2.3.2 ライトガイド形状の決定	24
2.3.3 結果	25
2.4 プロトタイプの決定	26
第 3 章 KEK テスト実験	27
3.1 磁場に対する光電子増倍管の性能評価	27
3.1.1 目的	27
3.1.2 セットアップ	27
3.1.3 結果	28

---

3.2	テストビーム実験	30
3.2.1	目的	30
3.2.2	セットアップ	30
3.2.3	結果	32
第4章	製作・インストール	35
4.1	製作	35
4.1.1	固定装置と T0 カウンターの設計	35
4.1.2	固定装置の機械的強度	38
4.2	宇宙線によるテスト	42
4.3	インストール	44
第5章	p+p 実験	45
5.1	得られた分布	45
5.2	calibration の現状	46
5.3	T0 トリガー	47
5.4	粒子識別	48
第6章	まとめ	49
	参考文献	51
	謝辞	53
	光学 Monte Carlo Simulation コード	55

# 第1章

## 目的

### 1.1 RHIC-PHENIX 実験とは

量子色力学の予測によると、クォークとグルオンの多体系は高温高密度状態になると通常のハドロン状態から、クォークとグルオンが比較的大きな領域を自由に動き回れる状態、即ちクォーク・グルオン・プラズマ (QGP) 状態に相転移を起こすと期待されている。達成に必要なとされるエネルギー密度は、高エネルギー重イオン衝突によって十分到達が可能と考えられ、実験室においてこの QGP 状態を生成することができるだろう。

この問題に答えるべく QGP を生成検出を目指し、米国ブルックヘブン国立研究所において、世界初  $100+100\text{A GeV}$  の衝突型高エネルギー重イオン加速器 (Relativistic Heavy Ion Collider) が建設され (図 1.1)、2001 年には  $\sqrt{s_{NN}} = 200\text{GeV}/A$  の金・金原子核衝突が実現した (図 1.2)。反応中心部の数百  $\text{fm}^3$  の領域において、 $2 \sim 6\text{GeV}/\text{fm}^3$  ものエネルギー密度が達成されると予測されており、これは人類が手にしたことの無い最高エネルギー密度であることは言うまでもないが、QCD が予測する QGP 相転移に必要なエネルギー密度を十分に越えている。



図 1.1: 衝突型重イオン加速器 RHIC

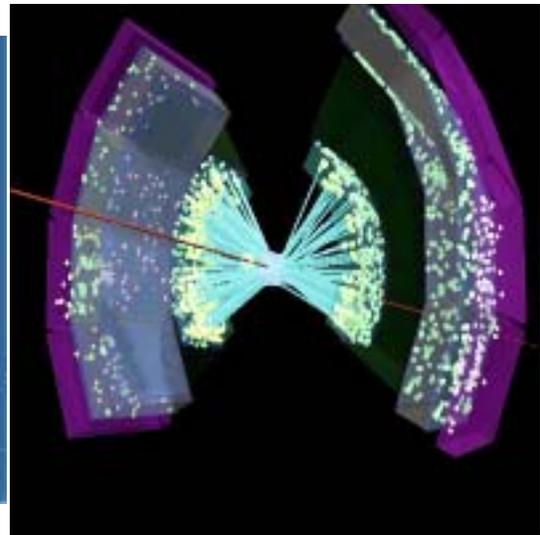


図 1.2: 金・金原子核衝突の様子

RHIC で行われる主要実験の一つである PHENIX 実験では、予想されるなるべく多くの QGP 生成のシグナルを同時に測定するために、生成されるレプトン対（ミュー粒子対、電子対）、光子、ハドロン（K 中間子、パイ中間子、ファイ中間子、陽子、反陽子等々）を測定する。そして、衝突で達成されたエネルギー密度の関数として、QGP 生成を示す変則を同時に検出することによって、QGP 生成の証拠とする。PHENIX 実験では、図 (1.3) に示すように3つのスペクトロメーターから構成され、中央スペクトロメーター飛跡再構成用の種々のトラッキングチェンバー、粒子識別用リングイメージチェレンコフカウンター、高時間分解能飛行時間測定器、電磁カロリメーターから成り立っている。筑波大学では、時間分解能が 85 ピコ秒以下の高時間分解能飛行時間測定器の開発・製作そして設置をした。飛行時間測定器を用いたハドロン測定により、QGP による横運動量  $\langle p_t \rangle$  の増大、ストレンジネス生成量増大、HBT 効果測定による巨大ハドロン生成源の発生などの効果を探る。

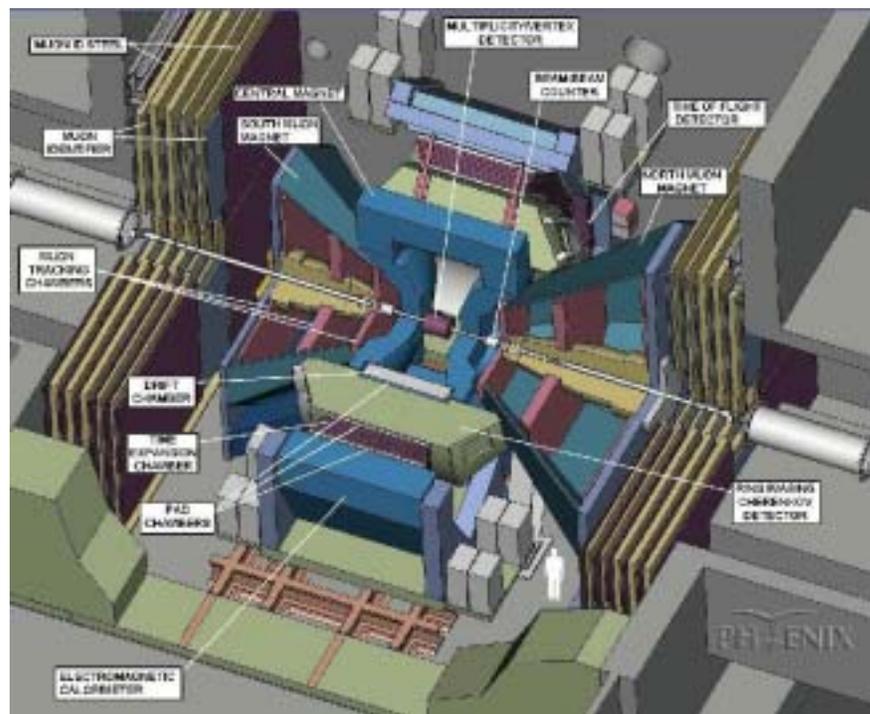


図 1.3: PHENIX 実験

## 1.2 T0 カウンターの必要性

### 1.2.1 RHIC における p+p 衝突実験

高エネルギー重イオン衝突は反応の時間発展を含む複雑な現象であり、今までの知識だけでは未知のエネルギー領域の重イオン衝突を理論的に正確に予測することは困難である。前人未踏のエネルギー領域である RHIC において、高エネルギー原子核・原子核衝突特有の現象を明らかにするためには、AGS や SPS でなされてきたように、陽子・陽子衝突～陽子・原子核衝突との系統的比較が必要である。特に QGP 相転移に伴う信号の有意性を検証する際には、同一エネルギーにおける陽子・陽子衝突～陽子・原子核衝突との比較が極めて有効な方法である。

図 1.4 (参考文献 [1]) は、異なるエネルギーの原子核・原子核衝突の実験をそれぞれ同程度のエネルギーの陽子・陽子衝突のデータを用いて比較したものの一例である。横軸は、横運動量  $p_t$ \*、縦軸は、「原子核・原子核衝突での粒子数」を「その原子核・原子核衝突を衝突初期の核子・核子衝突の和と考えたときの粒子数」で割ったものである。RHIC のエネルギーでは、大きい横運動量の粒子が抑制されていることが発見された。高エネルギー衝突では、何らかのメカニズムによって、粒子のエネルギー損失が起こっていると考えられている。

\*横運動量  $p_t$   
 ビーム軸に垂直な運動量  
 $p_t = \sqrt{(p_x)^2 + (p_y)^2}$

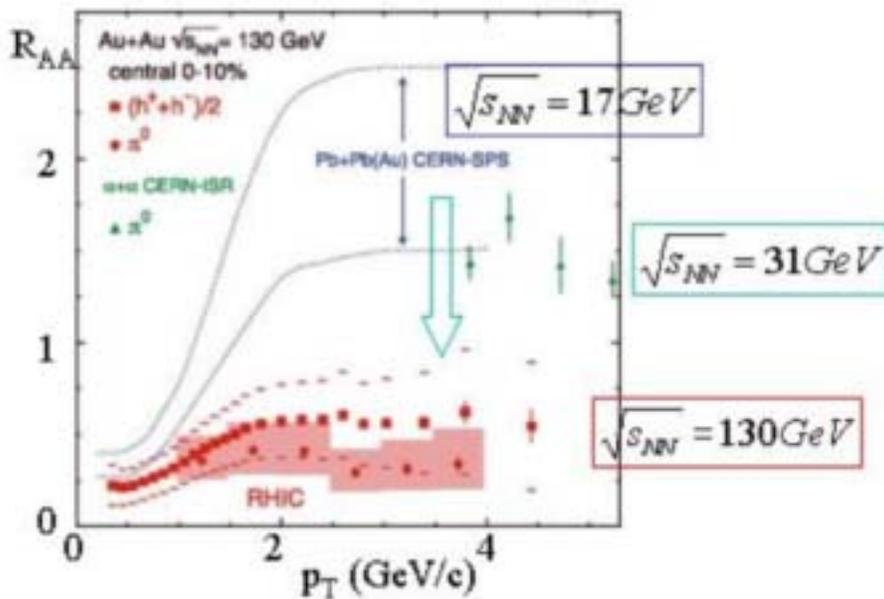


図 1.4: p+p データの利用例

### 1.2.2 p+p 専用トリガー装置の必要性

高エネルギー衝突と言えども、原子核・原子核衝突よりも陽子・陽子衝突や陽子・原子核衝突の粒子多重度は遥かに小さい。以下に、イベントジェネレーター JAM および RQMD を用いた、金・金原子核衝突および陽子・陽子衝突それぞれにおける粒子多重度の分布図 (図 1.5)、(図 1.6) を示す。 $\frac{dn}{dy}$  が金・金衝突では平均 200 に対して、陽子・陽子衝突では平均 1 程度であるため、発生粒子数の比が陽子・陽子衝突は金・金に比べ 200 分の 1 しかないことが分かる。

#### \* ラピディティー $y$

高エネルギー粒子衝突で発生した多数の高速粒子などの分布を分析するのに用いられる物理量。

発生粒子が衝突の中心領域から見て、どの領域に分布するかの目安とすることができる。

発生粒子のエネルギーを  $E = \epsilon$ 、運動量を  $p$  としたときラピディティー  $y$  は、

$$y = \frac{1}{2} \ln \frac{\epsilon + p_n}{\epsilon - p_n}$$

ここで、 $p_n$  はビーム軸方向の運動量射影成分、 $\epsilon = \sqrt{p^2 + m^2}$  である。

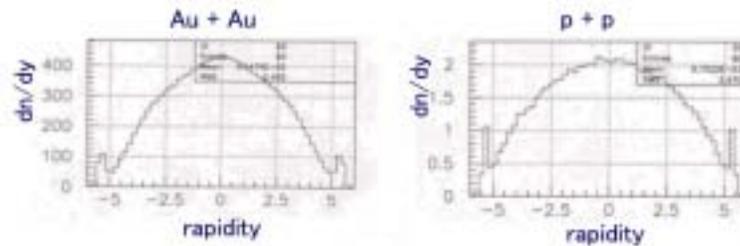


図 1.5: JAM を用いたラピディティー\*分布、左図は Au+Au、右図は p+p

#### \* 疑似ラピディティー $\eta$

$m \sim 0$  とおけるような高いエネルギーでは、 $E \sim p$  なので、 $y$  は次のように近似できる。

$$y \sim \eta = -\ln\left(\tan \frac{\theta}{2}\right)$$

(ただし、 $\theta$  はビーム軸と発生粒子の方向の角)

$y$  のように 2 次粒子の運動量を測定しなくても、生成角だけ分かれば良い。

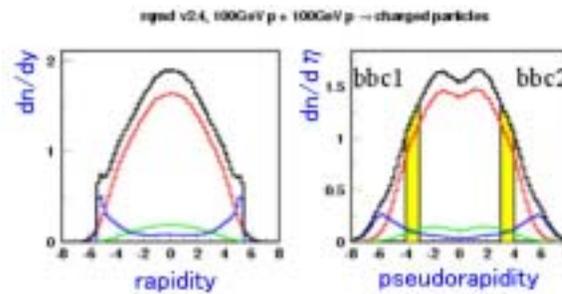


図 1.6: RQMD を用いたラピディティー\*分布 両図とも p+p

現在の PHENIX 実験ではトリガー装置として、ビームビームカウンター (BBC) を用いている (図 1.7)。この BBC は、粒子密度の高い 0 度方向に飛んでくる粒子 (疑似ラピディティー  $\eta$  で  $\pm(3.1 \sim 4.0)$ ) で事象選択を行っており、高エネルギー重イオン衝突では幾何学的断面積のほぼ 100% を検出できる。

しかしながら、粒子多重度の遥かに小さい陽子・陽子衝突や陽子・原子核衝突においては BBC のような装置は機能するのであろうか？

そこで、イベントジェネレーター RQMD と Pythia を用いて、 $\sqrt{s_{NN}} = 200 [GeV]$  の陽子・陽子衝突を再現させ、全衝突 Event のうち、どのくらい BBC でトリガーができるか計算した。その結果が表 2.2 である。

BBC では半分程度しか事象選択されないことが分かった。そのため、収集されるデータに偏りのある可能性があり、我々の目指す系統的比較には不適である。すなわち、既存のトリガー装置である BBC は、陽子・陽子衝突には適さない。

一方、ハドロンの粒子識別・測定が行える飛行時間検出器 TOF にはどのくらい粒子が来るのか？ RQMD を用いて陽子・陽子衝突を再現し、TOF、BBC 及び後で述べる T0 カウンターの Hit 数分布を求めた。結果は図 (1.8) である。

	BBC trigger	T0C trigger
Au + Au	~ 100 %	
p + p (RQMD)	42 %	29 %
p + p (Pythia)	51 %	36 %

表 1.1: p+p 衝突にて、各検出器に事象選択される確率  
イベントジェネレーター RQMD と Pythia を用いた

図(1.8)右上は TOF の HIT 数の分布であるが、HIT がない Event が 84 % である。すなわち、TOF に粒子が入る Event 数は全 Event 数の 16 % 程度と少ない。BBC トリガーを要求したときの TOF の Hit 数分布が図 (1.8) 右中である。全 BBC トリガー Event 中、TOF に Hit があったのは ~10 % しかない。粒子識別されたハドロンをより多く測定するためには、TOF のアクセプタンスに合致し、かつスタートタイミングを与える新たな検出器 (図 1.7 で赤色、以下 T0 カウンターと呼ぶ) が必要である。T0 カウンターのトリガーを要求したときの TOF の Hit 数分布を計算した結果が図 (1.8) 左中である。~33 % と BBC に比べ Event の収集効率が、3 倍近くあることが分かった。

BBC のトリガー要求したとき及び T0 カウンターのトリガーを要求したときの TOF の Hit 数分布を全 Event でノーマライズしたものが (図 (1.8) の左下と右下) である。

BBC をトリガーとして使用すると TOF の Hit 数が少ない Event を取り逃していることが分かる。しかし、T0 カウンターをトリガーとして使用すると、TOF の Hit 数に偏りが無い。

すなわち、T0 カウンターを用いることで、TOF に Hit する Event の収集効率を 3 倍近く上げることができる、また ハドロン測定において、BBC では生じる Event の偏りをなくすることができる

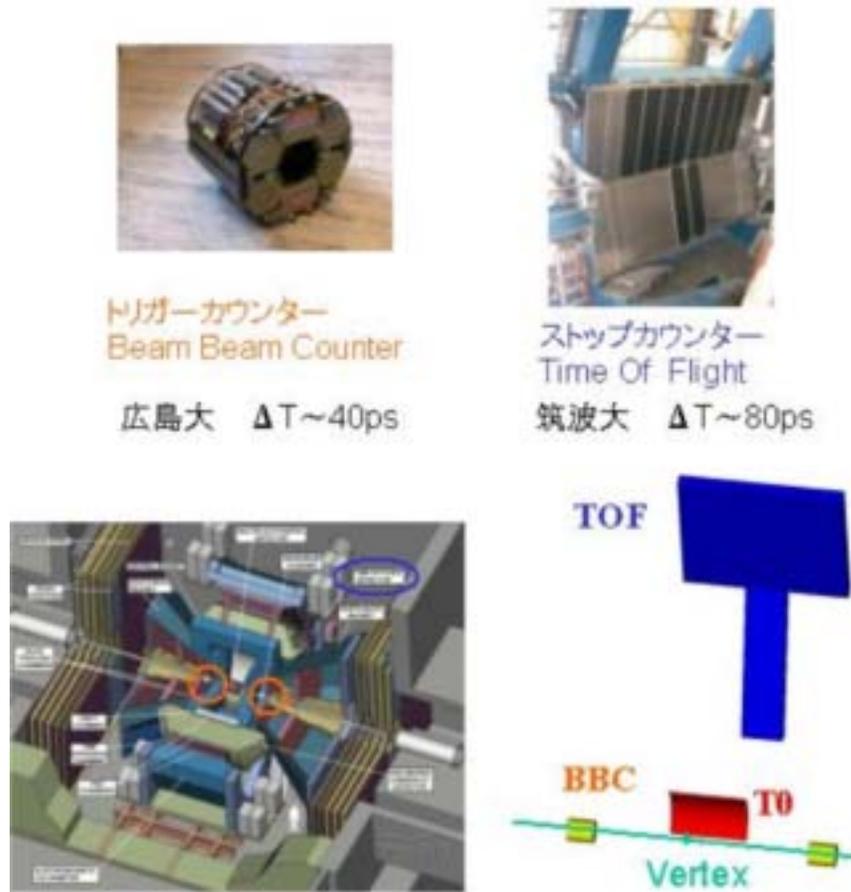


図 1.7: BBC と飛行時間検出器 TOF と新たなトリガーカウンターの位置関係

BBC はビーム軸に衝突点对称に 2 つ設置されている。TOF は衝突点より 5m 離れた場所にある。TOF のアクセプタンスに合い、飛行距離を稼げるようにビーム軸付近に新たなトリガー検出器 (T0 カウンター) を設置することにした (右下図で赤色)。

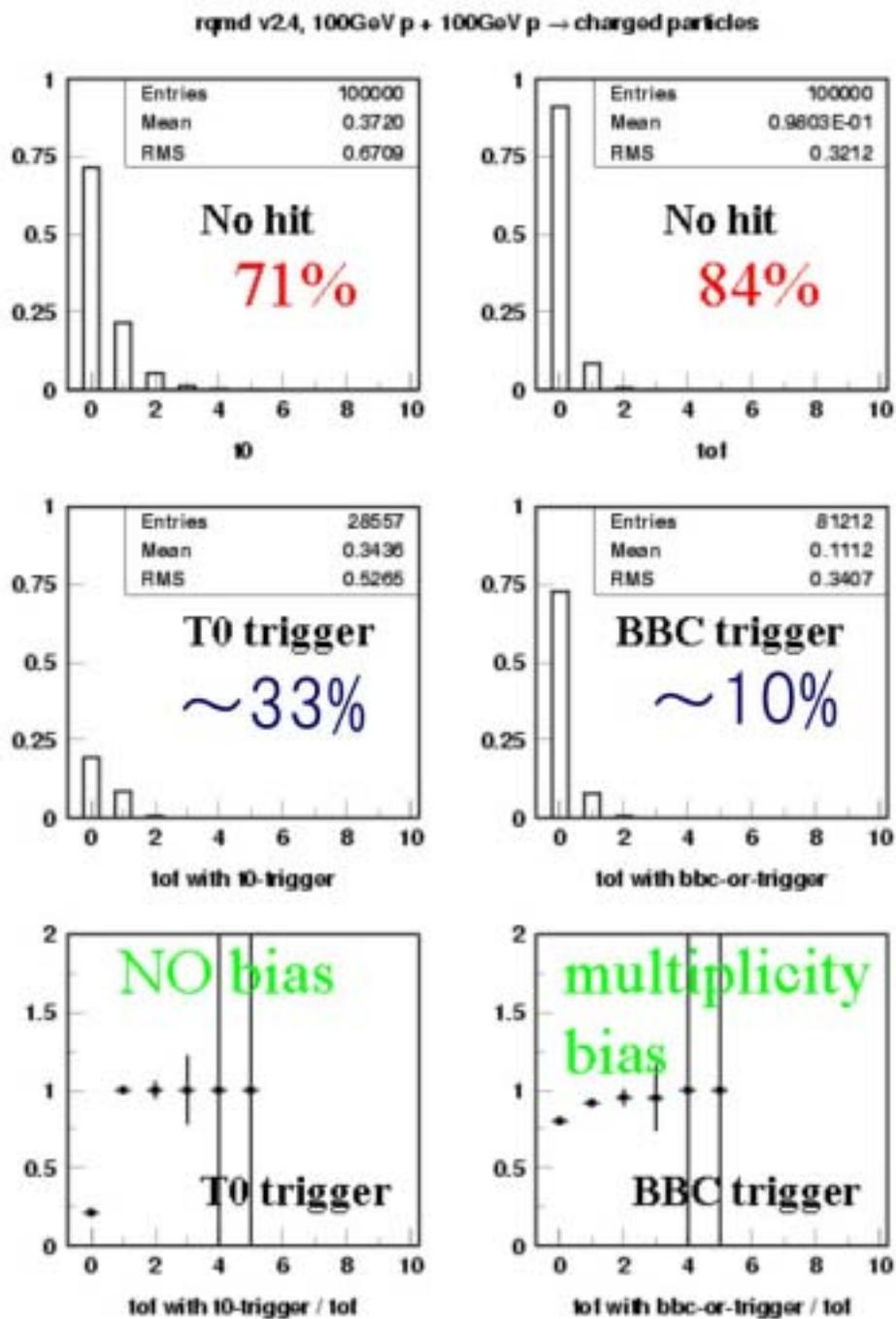


図 1.8: RQMD を用いた、各検出器の HIT 数の違い

左上: T0C の入射粒子数、右上: TOF の入射粒子数

左中: T0C と TOF 両方に入射した粒子数

右中: BBC (2 つのうちいずれか) と TOF 両方に入射した粒子数

左下: (T0C と TOF 両方に入射した粒子数) / (TOF の入射粒子数)

右下: (BBC (2 つのうちいずれか) と TOF 両方に入射した粒子数) / (TOF の入射粒子数)

## 1.3 飛行時間測定器

### 1.3.1 両読み型検出器

新たなトリガーカウンターは、シンチレーターの両端を光電子増倍管で挟んだ、両読み型検出器（図 (1.9)）にする。両読みにすることで良い時間分解能が得られるためである。この節では、両読み型検出器によって、どのように飛行時間を測定するのかを述べる。

\*

$t_0$  : 粒子がヒットした時間

$x$  : ヒット位置

$t_1$  : 右側 PMT の時間

$a_1$  : 右側 PMT の電荷

$t_2$  : 左側 PMT の時間

$a_2$  : 左側 PMT の電荷

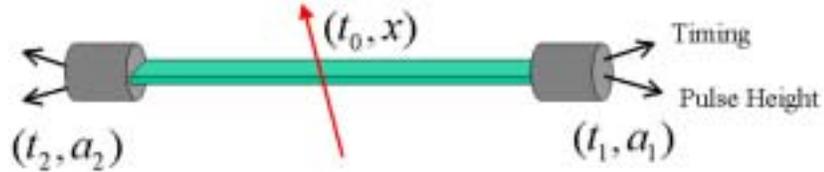


図 1.9: 両読み型測定器

$l$  : シンチレーターの長さ

$\lambda$  : 減衰距離

$v_{light}$  : シンチレーター中の光速

$a_0$  : 定数

$t_1, t_2, a_1, a_2$  は次のように表される。

$$t_1 = t_0 + \frac{x}{v_{light}} \quad (1.1)$$

$$a_1 = a_0 \cdot \exp\left(-\frac{x}{\lambda}\right) \quad (1.2)$$

$$t_2 = t_0 + \frac{l-x}{v_{light}} \quad (1.3)$$

$$a_2 = a_0 \cdot \exp\left(-\frac{l-x}{\lambda}\right) \quad (1.4)$$

従って、 $t_0, x$  は、次式で表される。

$$t_0 = \frac{t_1 + t_2}{2} - \frac{l}{2 \cdot v_{light}} \quad (1.5)$$

$$x = \frac{t_1 - t_2}{2} \cdot v_{light} - \frac{l}{2} \quad (1.6)$$

このようにして、粒子がシンチレーターに入射した時間を測定することができる。

また、時間分解能  $\delta_{t_0}$  および位置分解能  $\delta_x$  は、以下のように表される。

$$\delta_{t_0} = \sqrt{\left(\frac{\delta_{t_1}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{t_2}}{2}\right)^2} \quad (1.7)$$

$$\delta_x = v_{light} \cdot \sqrt{\left(\frac{\delta_{t_1}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{t_2}}{2}\right)^2} \quad (1.8)$$

もし両側の PMT が同じ性能を示している、すなわち  $\delta_{t_1} = \delta_{t_2}$  とすれば、

$$\delta_{t_0} = \frac{\delta_{t_1}}{\sqrt{2}} \quad (1.9)$$

$$\delta_x = \frac{v_{light} \cdot \delta_{t_1}}{\sqrt{2}} \quad (1.10)$$

である。

ちなみに、この検出器は 2 つ以上の粒子が同時にヒットした場合は、正確な時間が測定できなくなるため、occupancy level を低くしなければならない。

## 1.3.2 飛行時間測定法

この節では、飛行時間測定法 (time-of-flight method, TOF method) について述べる。飛行時間測定法の原理は簡単で、図 (1.10) に示すように粒子が飛行距離  $L$  だけ飛んだとすると、その距離  $L$  を粒子が飛行するのに要した時間  $t$  から、粒子の速度は  $v = L/t$  で求められる。

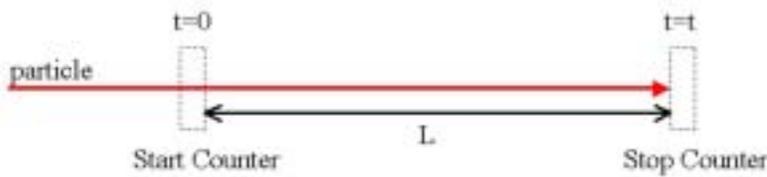


図 1.10: 飛行時間測定法で粒子識別する原理

この情報と粒子の運動量  $p$  の測定値から、次式より粒子識別ができる。

質量  $m$  速度  $v$  の物体の運動量 (4 元運動量の空間成分) は、

$$p = \frac{mv}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (1.11)$$

$$\begin{aligned} * \quad v &= \frac{dr}{dt} \\ v &= |\mathbf{v}| \end{aligned}$$

$$\therefore p^2 \left\{ \frac{1}{v^2} - \frac{1}{c^2} \right\} = m^2$$

$$\therefore p^2 \left\{ \left( \frac{t}{L} \right)^2 \cdot c^2 - 1 \right\} = m^2 c^2 \quad (1.12)$$

図 1.11 は 2000 年の PHENIX 実験のデータである。大変綺麗に粒子識別できている様子が分かる。

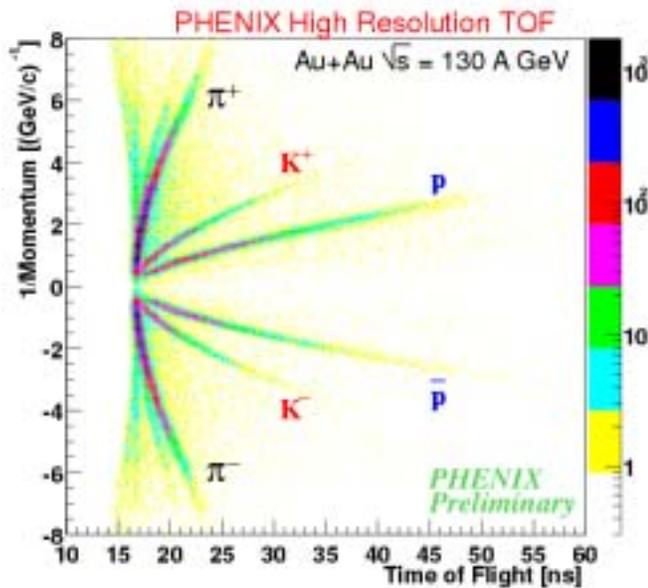


図 1.11: PHENIX-2000 年度 粒子識別の結果

ただし、縦軸は  $1/p$  横軸は  $t$ 。

では、2000年度、スタートカウンター BBC とストップカウンター TOF によりどの程度の時間分解能が得られたかについて述べよう。そのために、次式の分布を見てみる。

$$TOF - TOF_{expected} \quad (1.13)$$

TOF とは、実験で得られた飛行時間である。すなわち、ストップカウンター TOF の時間からスタートカウンター BBC の時間 (time zero) を差し引いた時間である。

$TOF_{expected}$  とは、1.12 式より計算した、飛行時間である。飛行距離  $L$  および運動量  $p$  は他の検出器 (ドリフトチェンバー) から得られる。また、質量  $m$  はデータブック [3] にある実験値を用いた。

1.12 式より、 $t = TOF_{expected}$  として、

$$\begin{aligned} p^2 \left\{ \left( \frac{TOF_{expected}}{L} \right)^2 \cdot c^2 - 1 \right\} &= m^2 c^2 \\ \therefore \left( \frac{TOF_{expected}}{L} \right)^2 \cdot c^2 &= \frac{m^2}{p^2} \cdot c^2 + 1 = \frac{1}{\beta^2} \\ \therefore TOF_{expected} &= \frac{L}{c} \cdot \frac{1}{\beta} \end{aligned} \quad (1.14)$$

図 1.12 は PHENIX 実験 1 年目 (2000 年) のデータを用いた 1.13 式の分布である。実効的な時間分解能は、 $\sim 115ps$  を達成している。

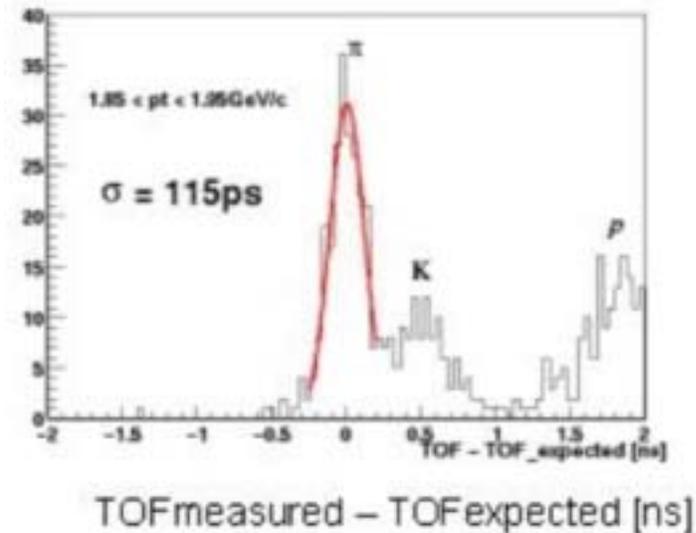


図 1.12: PHENIX-2000 年度の実効的な時間分解能  
横軸は、(飛行時間) - ( $\pi$ 中間子の期待される飛行時間) [ns]

## 第 2 章

# T0 カウンターの設計

この章では、新たなトリガーカウンター（以後、T0 カウンターと呼ぶ）に求められる性能について述べ、PMT やシンチレーターなどをどう選択したかについて述べる。

そして、それらを組み合わせた結果、モンテカルロシミュレーションによってどのくらいの性能が期待されるかについて議論する。

## 2.1 求められる性能

### 2.1.1 設置場所

粒子の飛行時間を測定するためには、Stop Counter である TOF との飛行距離距離を大きく取る必要がある。(第 1.3.2 節 (9 ページ) 参照) TOF は、衝突点から 5m のところに設置されており、T0 カウンターはできるだけ衝突点の近くに設置したい。

では、衝突点付近には T0 カウンターを設置できるスペースがあるのだろうか。図 4.1 は、PHENIX 検出器の衝突点付近の様子である。中央の細い管がビームパイプであり、左右よりビームが来て衝突を起こす。左右の緑色の円錐状のものは、ソレノイドコイルを設置するためのヨークである。円錐中央には円筒状の突起がある(ノーズコーンと呼ぶ)。ノーズコーンの周りには溝が掘られている。この溝は、ソレノイドコイルを設置するための場所であったが、現在は使用されていない。

そこで、このスペースを利用することにした。シンチレーターに光電子増倍管を挟んだ両読み型検出器(図 2.2)をノーズコーン間を橋渡しするようにして、設置することにした。

ノーズコーン間の距離は 1m、ノーズコーンの半径は 53.6cm であるため、T0 カウンターのシンチレーターの長さは 1m 程度として、設置される半径方向の位置は 60cm 程度を想定しなければいけない。



図 2.1: PHENIX 検出器 (ビームパイプ付近の様子)

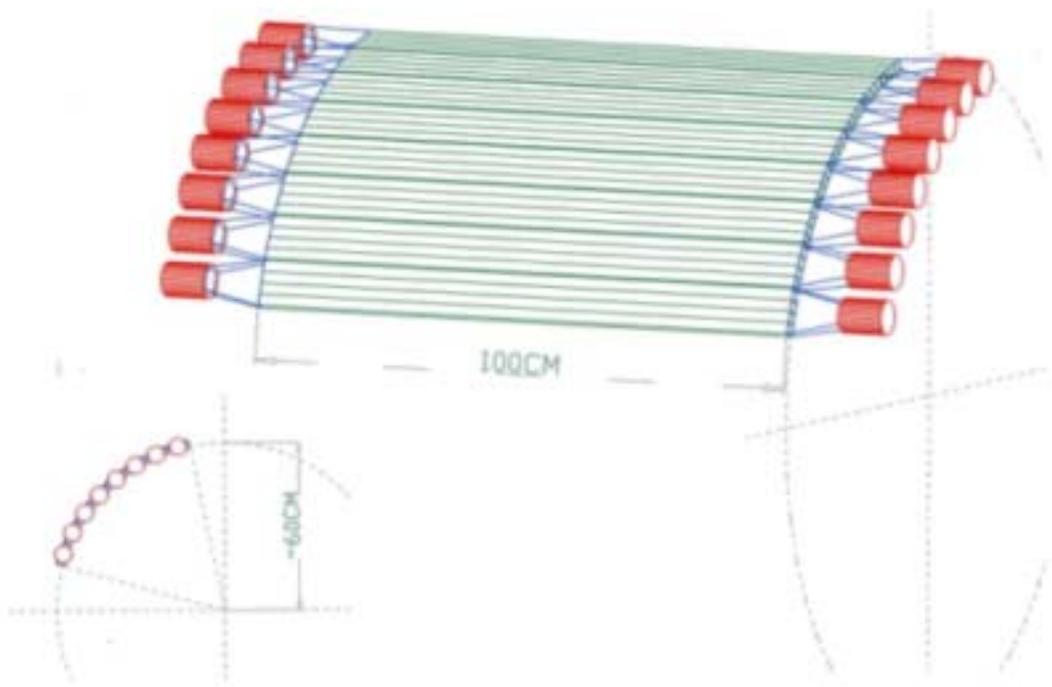


図 2.2: T0 カウンターの概要図

### 2.1.2 ハドロン測定のために

PHENIX 実験の目的は、QGP 生成シグナルを得ることであるが、その一つとして、 $\rho$ ,  $\omega$ ,  $\phi$  などのベクター中間子の質量とその幅の変化が予言されている。ベクター中間子の一つである  $\phi$  中間子は K 中間子対や電子対にすぐに崩壊するがそれらの質量 (K 中間子対崩壊) は飛行時間測定によって求められる。

この節では、ハドロンの飛行時間測定に時間分解能および立体角がどのくらい求められるかについて述べる。

#### 時間分解能

1.3.2 節 (9 ページで述べたが、PHENIX 金・金原子核衝突実験において、2000 年度の実効的な飛行時間測定の時間分解能は  $\sim 115\text{psec}$  であった。

陽子・陽子衝突においても、同程度の時間分解能を得たい。ストップカウンターである TOF は  $\sim 80\text{psec}$  の時間分解能があるため、スタートカウンターである T0 カウンター固有で、 $\sqrt{(115)^2 - (80)^2} \sim 80\text{psec}$  の時間分解能が望まれる。

## 立体角

言うまでもなく、飛行時間測定をするためには、粒子がスタートカウンター T0C とストップカウンター TOF のどちらも通過しなければならない。

そこで、ある運動量の粒子が TOF と T0C を両方通過するためには、T0C にどれだけの立体角が必要になるのかを計算した(図 2.3、表 2.1)。ちなみに、TOF は  $\phi = 168^\circ \sim 213^\circ$  をカバーしている。また、T0C は  $r = 60\text{cm}$  にあるものとした。

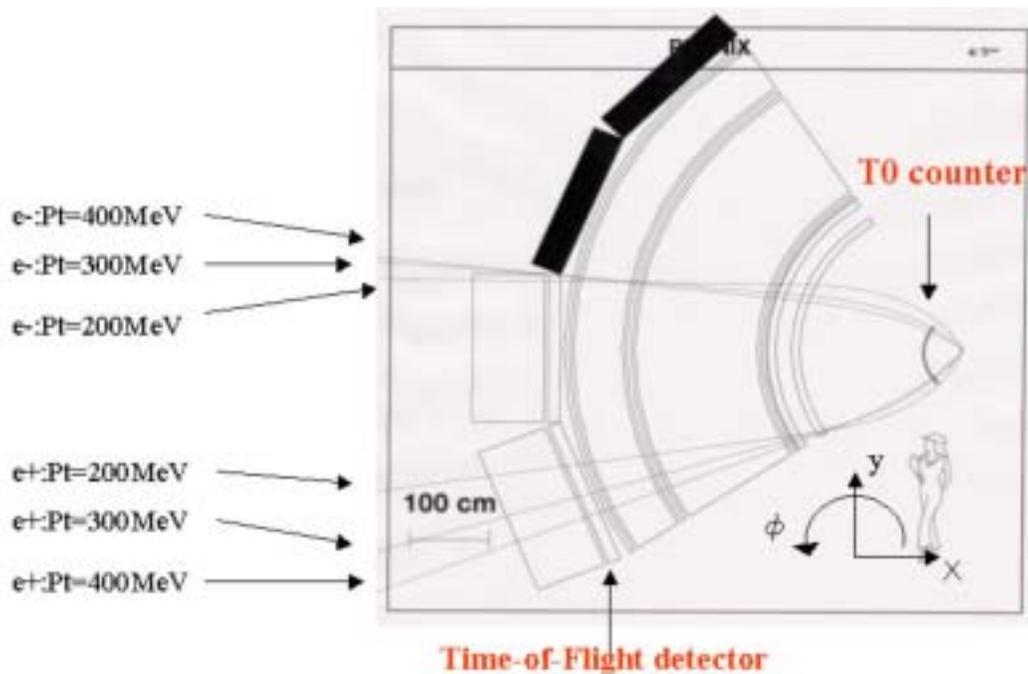


図 2.3: GEANT3 を用いた粒子の横運動量による飛跡の違い

磁場がかかっているため、電荷の違いで粒子の飛跡が異なる。

Pt [MeV/c]	Min[degree]	Max[degree]	T0C が必要な $\phi$ の角度
200	118	248	130
300	136	235	100
400	145	230	85

表 2.1: 粒子の運動量を T0C に必要な  $\phi$  の範囲

## バックグラウンド

シンチレーターの厚くすればするほど、シンチレーション光量が多くなり、時間分解能が良くなると考えられる。だが、やみくもに厚くしてしまうと、シンチレーター中で光子が対生成をする確率が増え、バックグラウンドとなる電子を多くしてしまう。

表 2.2 は、シンチレーターの厚さと対生成の確率を計算したものである。計算は 2 通りの方法で求めた。一つはシミュレーションコード GEANT3 を用いて、ガンマ線 ( $\pi_0 \Rightarrow 2\gamma$ ) が対生成を起こす確率を求めた (図 2.4)。もう一つは、シンチレーターの放射長を用いて計算した。

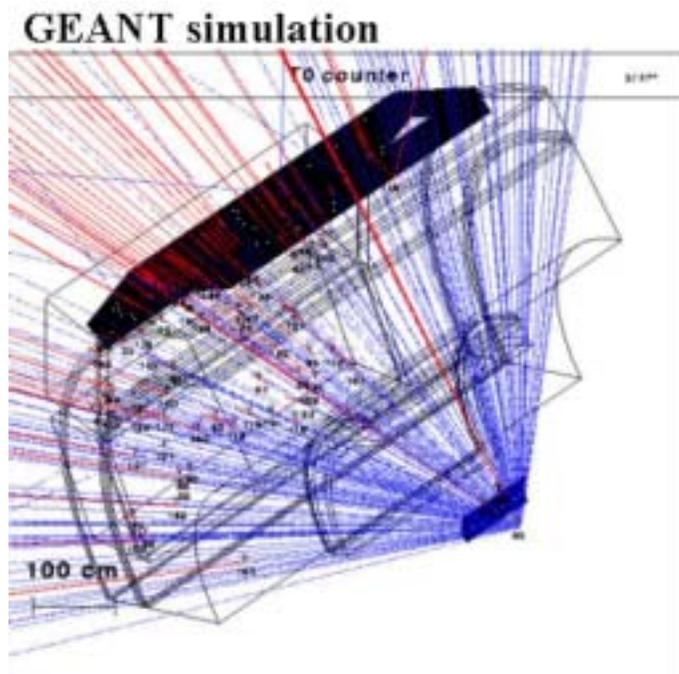


図 2.4: GEANT3 を用いた  $\gamma$  線の対生成確率計算の様子

対生成の確率		
厚さ	GEANT より	放射長より
2.0cm	2.5 %	2.4 %
2.5cm	2.8 %	3.0 %
3.0cm	3.4 %	3.5 %

表 2.2: シンチレーターの厚さと対生成の確率

時間分解能  $\sim 80\text{psec}$  達成のためには、シンチレーターを厚くしたいが、対生成を減らすことも考慮しなければいけない。

## 2.1.3 対生成電子測定のために

## Photon Conversion Rejector

陽子・陽子衝突で生じる粒子は  $\pi^0$  中間子および陽子が大部分を占める。ここで、 $\pi^0$  は崩壊して  $\gamma$  線を生じる。 $2[GeV]$  以上のエネルギーは、対生成（電子・陽電子に崩壊）することがある。相対論的重イオン衝突ではエネルギーの高い  $\gamma$  線が多く生じるために対生成が頻繁に起きる。PHENIX 検出器において、スタートカウンター T0C はビーム軸の最近接に設置される。そのため、T0C 内で対生成した電子は、後方に位置する検出器に影響を与える。このバックグラウンドを排除するために考え出されたのが PCR (Photon Conversion Rejector) である。

PCR の原理は図 2.5 の通りである。PCR を T0C の直前に設置することで対生成電子のバックグラウンドを取り除くことができる。荷電粒子は PCR と T0C の両方で検出できるが (a) T0C 上で対生成した  $\gamma$  線は T0C のみ検出される (b)。したがって、PCR と T0C の信号の組み合わせによって、バックグラウンドとなる T0C 上の対生成電子を見極めることができる。

ただし、PCR を設置する上で一つ問題がある。それは荷電粒子による信号 (a) と PCR 上で対生成した電子による信号 (c) をどのようにして区別するかという事である。この問題を解決するには、PCR をできるだけ薄くして対生成による電子 (c) を検出しないようにすればよい。一方、荷電粒子の信号 (a) を確実に検出するために PCR には十分な厚さが必要である。すなわち PCR は「 $\gamma$  線の対生成による信号 (c) を検出できないほど薄く、荷電粒子による信号 (a) を確実に検出できるほど厚い」厚さのシンチレーションカウンターであることが要求される。

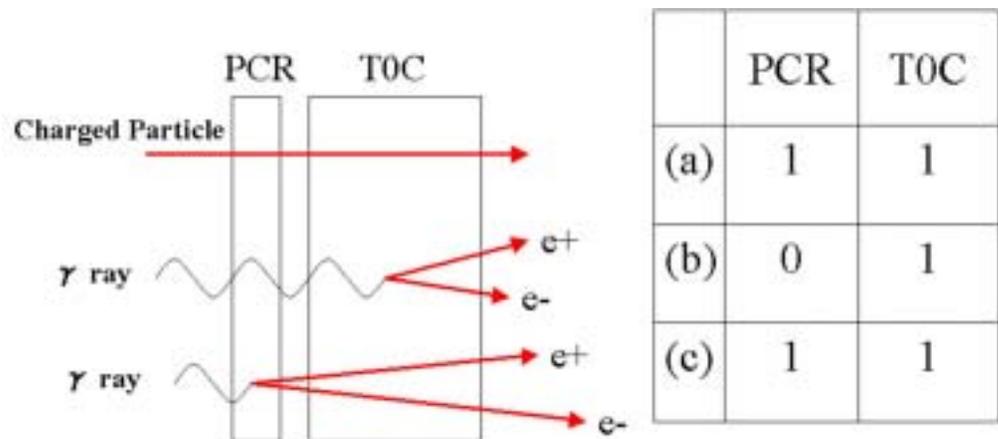


図 2.5: PCR の原理

## 2.1.4 高磁場対策

図 2.6 は PHENIX 検出器を横から見た図である。PHENIX 検出器には、磁場用のコイルをインストールする所が 2ヶ所あるが、2000 年現在内側の INNER COIL 部にはコイルが入っておらず、スペースが空いている。ここが、TOC 用の PMT を置くのに都合が良い。なぜならば、衝突によって発生する荷電粒子が PMT を通過することはできないからである。そして、シンチレーターの長さや半径  $R$  の位置などが必然的に決定される。

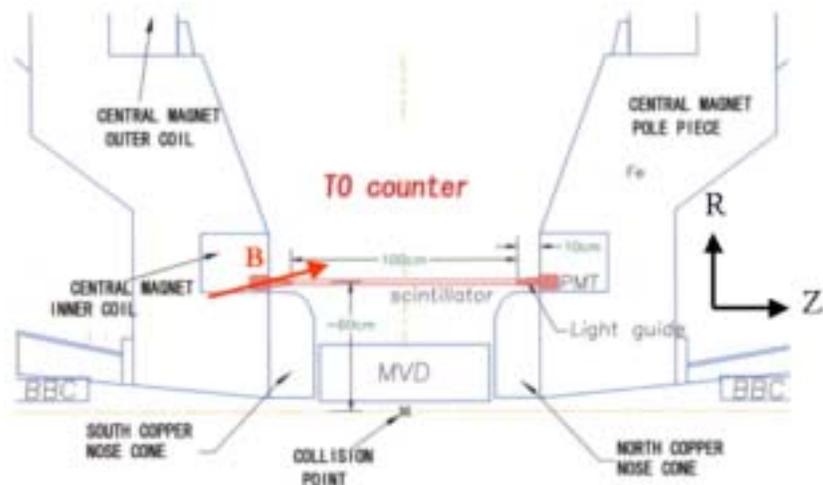


図 2.6: TOC 設置場所

しかし、大きな問題が一つある。設置場所の半径  $R$  が小さいため、この周辺は高い磁場がかかっていることである。PMT 周辺の磁場の様子を図 2.7 に示す。PMT を  $R \sim 60\text{cm}$ ,  $Z \sim 60\text{cm}$  に設置したとすると、その場所の磁場は  $3000 \sim 5000[\text{Gauss}]$  と高く、かつ角度(約 30 度)を持っており、大変厄介である。我々はこのような高磁場下でも問題なく運用できる PMT を選ばなければならない。

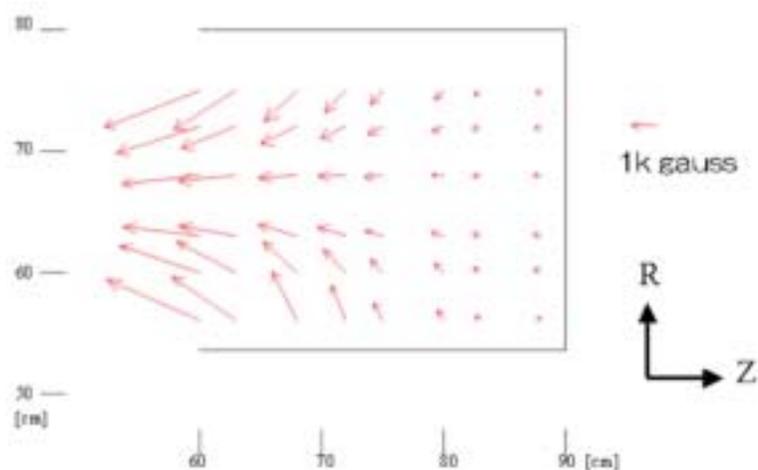


図 2.7: TOC 用 PMT 付近の磁場マップ

## 2.2 設計

### 2.2.1 光電子増倍管

2.1.4 節 (17 ページ) で述べたように、PMT が置かれる場所は、角度を持った高磁場がかかっている。そのため、高磁場下でも運用可能な PMT が必要である。

我々は、高磁場下でも動作し、高い gain が得られる ( $\sim 10^7$ 、高磁場用として知られるマイクロチャンネルプレート型では  $\sim 10^5$ ) ため、HAMAMATSU H6614-01 (R5924) を使用することにした。

Tube Diameter	51mm (2")
T.T.S	440 psec
Rise Time	2.5nsec
Anode Effective Area	$\phi 39mm$
Current Amplification	$1 \times 10^7$ at 0 Tesla
	$4.1 \times 10^6$ at 0.5 Tesla
	$2.0 \times 10^5$ at 1.0 Tesla

表 2.3: HAMAMATSU H6614(R5924) の性能

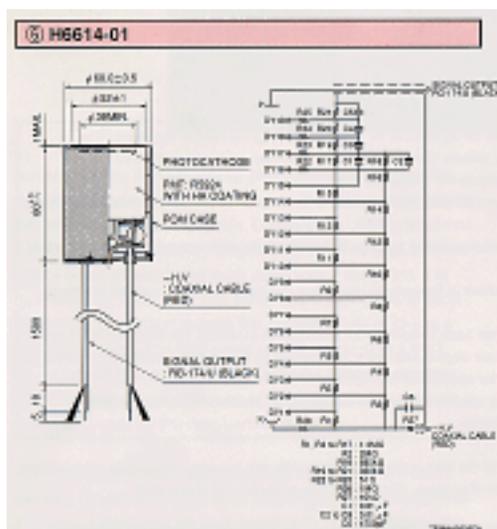


図 2.8: HAMAMATSU H6614 (R5924)

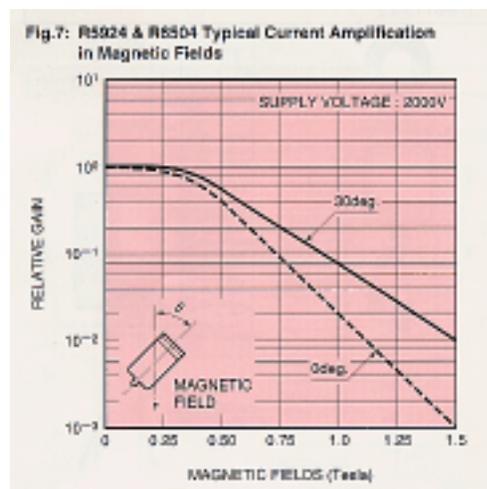


図 2.9: 磁場と増幅率の関係

### 2.2.2 シンチレーター

シンチレーターは、BICRON 社の BC-404 を使用する。なぜならば、これは我々のグループが製作した飛行時間検出器 (TOF) で使っているものと同じであり、我々は BC-404 の経年変化についてよく理解しているためである。BC-404 のシンチレーション光量は平均 120 ヶ月で  $1/e$  になる。

Base	Polyvinyltoluene
Density	1.032 g/cm <sup>3</sup>
$dE/dx _{min}$	1.956 $\frac{MeV}{g/cm^2}$
Refractive Index	1.58
Light Output , Anthracene	68 %
Rise Time	0.7 ns
Decay Time	1.8 ns
Pulse Width , FWHM	2.2 ns
Light Attenuation Length	140 cm
Wavelength os Max Emission	408 nm
Radiation Length	42.5 cm

表 2.4: BC-404 Scintillator (BICRON)

### 2.2.3 ライトガイド

光電子増倍管の有効光電面は直径 39mm の円であるが、シンチレーターの断面は長方形である。そのためライトガイドが必要となる。光量を効率良く得られるライトガイドを製作するために、モンテカルロシミュレーションを行った。このモンテカルロによるライトガイドの設計についての詳細は、2.3 節で述べる。

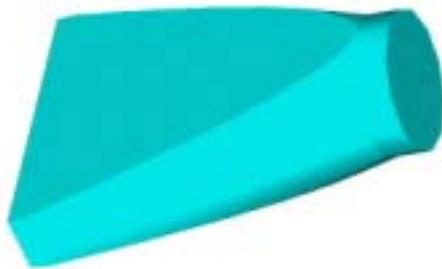


図 2.10: ライトガイド

## 2.2.4 PCR

2.1.3 節で述べたが、PCR を T0 カウンターの内側に取り付けることにした。PCR としては、図 2.11 のように、シンチレーターに深さ 1mm 幅 1mm の溝をあげ、その中にファイバーを埋め込み、光電子増倍管まで光を導く物を製作した。(詳しい R&D については、[5] を参照されたい)

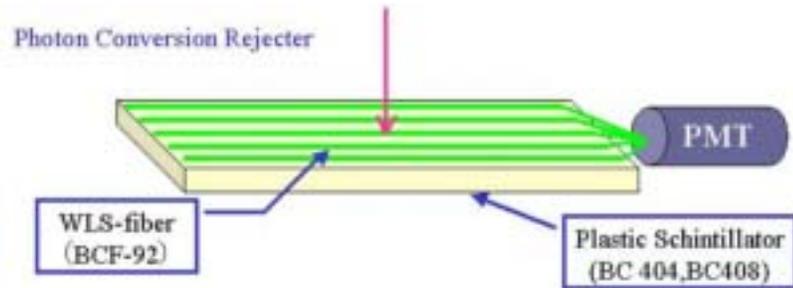


図 2.11: PCR の外観

図 2.12 は、KEK にてテストビーム実験をした際の PCR から得られた QVC 分布である。この図は、厚さ 3mm のシンチレーターを用いたときの分布で、赤は TVC がオーバーフローしたものの QVC 分布でペDESTAL である。Efficiency とは、全トリガー事象のうち光電子増倍管のサーマルノイズと思われるものをカットした事象のことである。

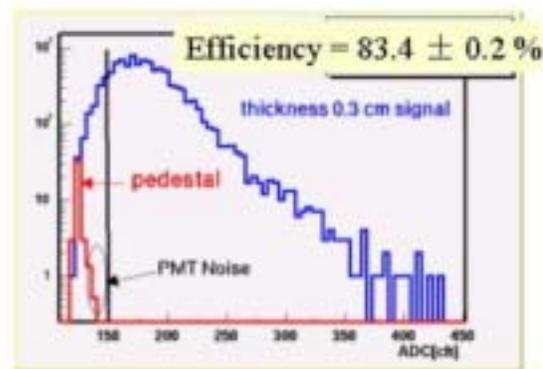


図 2.12: PCR の QVC 分布 (2000 年度 KEK テストビーム実験の結果)

表 2.5 は、結果をまとめたものである。厚さ 3mm のシンチレーターで十分に荷電粒子が通過したかどうかを区別できる。

シンチレーターの厚さ	3mm	6mm
平均光電子数	8 個	10 個
Npe 3 個以上の threshold	83.4±0.2 %	99.2±0.1 %
Npe 1 個以上の threshold	98.2±0.2 %	99.3±0.1 %
TVC オーバーフローのカットのみ	99.3±0.1 %	99.3±0.1 %

表 2.5: PCR の荷電粒子収集効率

## 2.3 光学モンテカルロシミュレーション

この章では、T0 カウンターの光学モンテカルロシミュレーションの方法と結果について述べる。コンピューター上で T0 カウンターを作り、荷電粒子が通過した際に、どのくらいの時間分解能が得られるか計算した。その結果から、KEK テストビーム実験に向けて、T0 カウンターの形状を決定した。

### 2.3.1 計算の概要

光学モンテカルロシミュレーションの概要について述べる。ソースコードは巻末を参照せよ。

- 検出器の作成
  - 3次元空間上にシンチレーターとライトガイドを作成した。また、電気信号が得られるよう R5924 と同じ時定数をもった光電子増倍管も考えた。
- シンチレーション光の発生
  - シンチレーターのある場所に荷電粒子が通過したとみなして、シンチレーターの厚さ分だけのシンチレーション光を一様に発生させる。
- 反射
  - 発生した光子一つ一つについて、光電子増倍管の光電面まで反射して到達するか判定する。シンチレーターとライトガイドの各面において、入射角が臨界角以上の場合は反射させる。そうでない場合、光子は消失させる。無事に光電面まで到達したら、次のステップに進む。この際、反射した回数と光路を記憶しておく。
- 光電子発生
  - 光電面まで到達した光子が光電子になるかどうか判定する。判定には以下の要素を考慮した（図 2.13 中の式参照）。
    - 反射回数
      - シンチレーターでは、1 回反射する毎に 98.7 % の確率で光子が生き残れることがわかっている（参考文献 [2]）。
    - 光路
      - 光子の光路と減衰長から光子が生き残れるか判定する。
    - 量子効率
      - 光電面での光子が光電子になる確率（量子効率）を 20 % とした。
- 一光電子分のパルスの生成
  - 光電子が発生できた場合は、光電子増倍管の時定数から求まる一光電子分のパルスを作る。
$$V(t) = \frac{Gain \cdot R}{\tau_s^2} \cdot t \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_s}\right) \quad (2.1)$$

ただし、 $Gain = 1.6 \cdot 10^{-19} [Coulomb] \cdot 10^7 [PMT \text{ の増幅率}] = 1.6 [ps]$ 、 $R = 50 [\Omega]$ 、時定数  $\tau_s = 2500 [ps]$
- 走行時間
  - 各パルスについて走行時間を求めなければいけない。走行時間の計算には以下の 3

点を考慮した。

– シンチレーション光の発光時間

荷電粒子が通過してからシンチレーション光が出るまでにかかる時間は、シンチレーターの時間特性による。このプラスチックシンチレーター (BC-404 BICRON) の時間特性は立ち上がり時間 0.7ns、立ち下り時間 1.8ns であることより、

$$N = \frac{1}{0.7 - 1.8} \left\{ \exp\left(-\frac{t}{0.7}\right) - \exp\left(-\frac{t}{1.8}\right) \right\} \quad (2.2)$$

のような分布となる。この確率分布を考慮した。

– 光路

シンチレーターとライトガイドでの光路を光速で割った。

– 光電子増倍管中の走行時間

光電子増倍管 R5924 の走行時間の広がり は 440ps であるが、これを標準偏差としたガウス分布を考慮した。

• 出力の生成

以上より、各パルスの走行時間が求まる。全ての光電子について走行時間を求め、全てのパルス (一光電子分) を重ね合わせると、光電子増倍管から出力される出力を作ることができる。

• threshold

その出力で threshold を越えたときの時間を記憶する。これにより、1event の TVC の値が求まる。

• 時間分解能の決定

以上の計算を繰り返し、TVC の分布から時間分解能を求める。

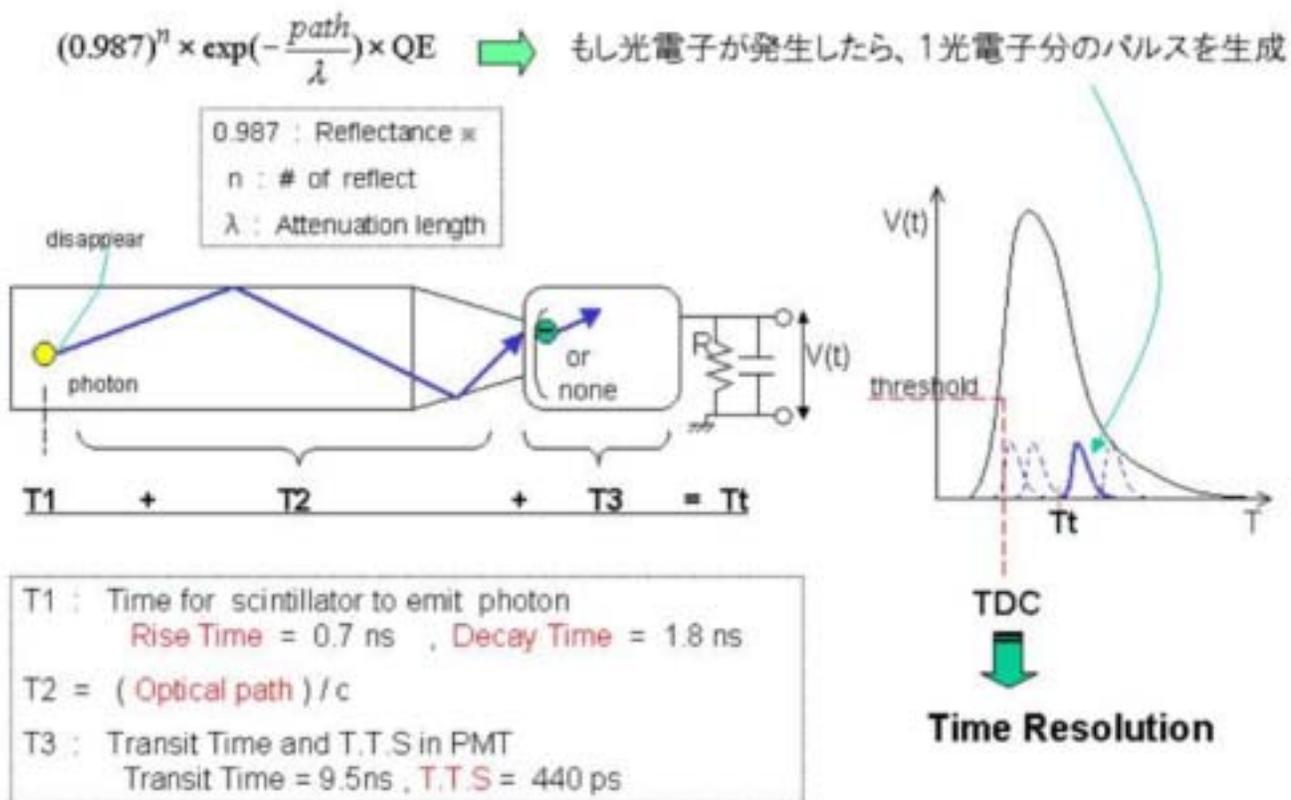


図 2.13: Optical Monte Carlo Simulation の概要

### 2.3.2 ライトガイド形状の決定

シンチレーターと光電子増倍管を組み合わせる前に、ライトガイドの形状および長さを決めるための計算を行った。シンチレーターの断面（高さ 2cm、幅 8cm）からのシンチレーション光が光電子増倍管の光電面（高さ 4cm、幅 4cm）にどのくらいの割合で到達できるか計算した。計算を行ったライトガイドの形状は以下の 4 通りである（図 2.14）。(1) ライトガイドをつけない、すなわち立体角、(2) 立方体、(3) フィッシュテイル型、(4) 立方体フィッシュテイルを組み合わせたもの。

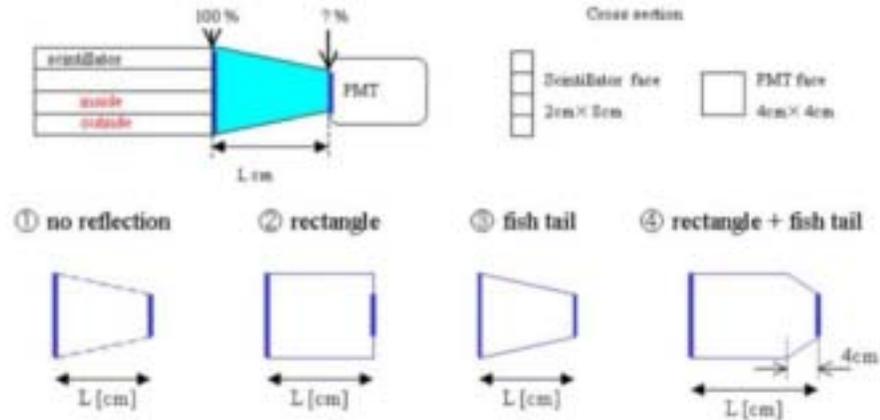


図 2.14: 4 タイプのライトガイドの形状

結果は図 2.15 である。最も収集効率が良いのは、フィッシュテイル型である。また長さ 10cm 以上では収集効率の変化が少なくなっている。

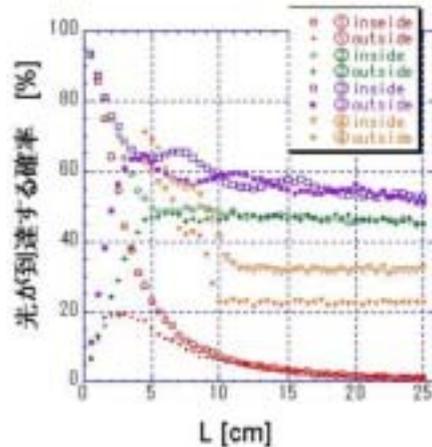


図 2.15: ライトガイドの長さとお集効率

長さ  $L$  の定義と inside と outside の違いは、図 2.14 の上図を参照せよ。シンチレーター断面で光が出てくる場所の違いである。inside とはシンチレーターの内側であり、outside とはシンチレーターの外側である。

## 2.3.3 結果

図 2.16 は、シンチレーターの厚さと荷電粒子の入射位置を変えながら、T0 カウンターの方読みの時間分解能を計算したものである。入射位置が光電子増倍管から離れるほど時間分解能が悪くなるのが分かる。また、厚さ 2cm と 3cm ではあまり差がないことが分かる。

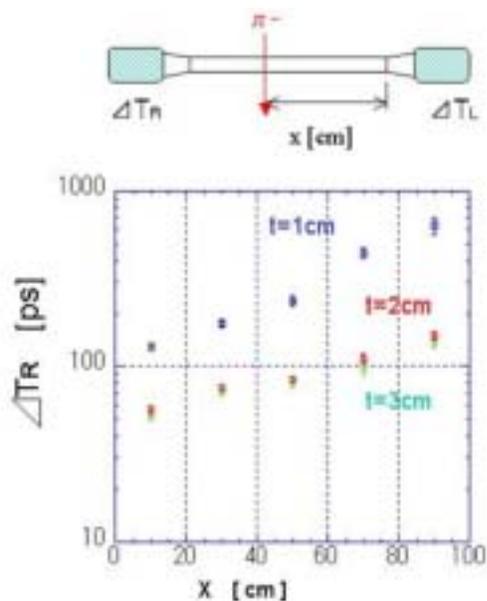


図 2.16: 荷電粒子入射位置による方読みの時間分解能の変化

図 2.17 は、方読みの結果から式 (1.7) を用いて、両読みにしたときの時間分解能を計算したものである。厚さ 2cm では、粒子の入射位置によらず時間分解能は  $\sim 80$ ps を達成している。

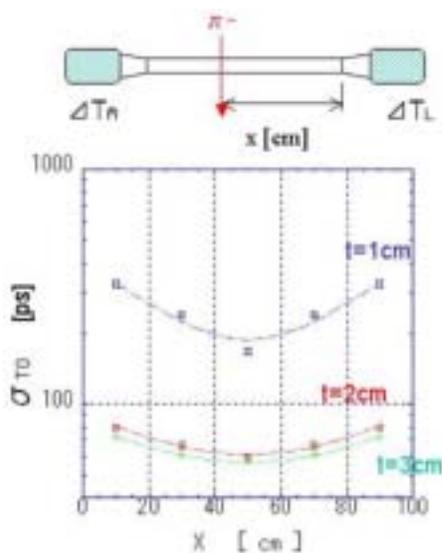


図 2.17: 荷電粒子入射位置と両読みによる時間分解能

図 2.18 は、荷電粒子がシンチレーターの中央 ( $X=50\text{cm}$ ) に入射したときの両読みの時間分解能 (赤) とガンマ線から電子対生成の起こる確率 (青) がシンチレーターの厚さによってどう変化するか見たものである。時間分解能は厚さ 2cm 以降は  $\sim 60\text{ps}$  に飽和する。一方、電子対生成の確率はシンチレーターが厚いほど大きくなる。目標とする時間分解能  $\sim 80\text{ps}$  を満たし、電子対生成を減らすことができるため、シンチレーターの厚さは 2cm に決定した。

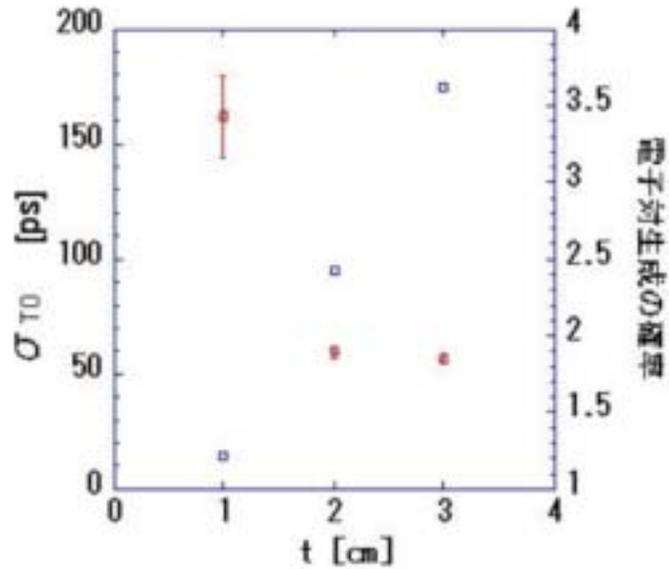


図 2.18: シンチレーターの厚さによる時間分解能 (赤) と電子対生成の起こる確率 (青) の変化

## 2.4 プロトタイプの決定

T0 カウンターのプロトタイプを次のように決めた。

光電子増倍管は R5924 (HAMAMATSU) を選択した。シンチレーターは長さ 1m 厚さ 2cm 幅 8cm のものを使用する。ライトガイドはフィッシュテイル型で長さ 10cm のものを製作した。

## 第3章

# KEK テスト実験

この章では、KEK にて行った二つのテスト実験について述べる。一つは、光電子増倍管に磁場をかけたとき性能はどうかを調べた(3.1節)。二つ目は、T0カウンターのプロトタイプをKEKのテストビームチャンネル(T1)を利用してどのくらいの時間分解能を達成できるか測定した(3.2節)。

### 3.1 磁場に対する光電子増倍管の性能評価

#### 3.1.1 目的

2.1.4節(17ページ)で述べたように、T0カウンターの光電子増倍管が設置される場所は、光電子増倍管の光電面に対して30度の角度で、3k[Gauss]の高磁場がかかっている。我々が選択したFine Mesh型の光電子増倍管はこのような状況下でも高いgainが得られるか、また時間分解能にどのような影響があるかについて調べる必要がある。

#### 3.1.2 セットアップ

図3.1、図3.2のように、光電子増倍管に磁場をかけ、半導体レーザー\*を入射させたときのgainと時間分解能を測定した。磁場は0~8k[Gauss]の範囲で変えながら測定した。また角度は、0,15,30度の3種類について測定した。

また、光電子増倍管の印加電圧は-2000V、-1600Vの2種類について測定した。各電圧において、入射させるレーザーの光量は、フィルタ\*を用いて調節した。-2000Vの際は、光電子数が40個程度になるよう調節した。-1600Vでは、200個程度になるようにした。

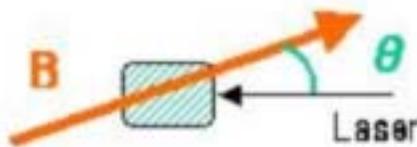


図 3.1: PMT 磁場実験の概要図

\* 使用した半導体レーザー  
PLP-02, (株)HAMAMATSU  
パルス幅 18.5ps  
波長 415nm  
同期トリガ-光出力間 <math>\pm 10ps</math>  
\*ゼラチン ND フィルタ  
(株)Kodak  
-2000V – Optical Density=0.8  
-1600V – フィルタなし

40 個としたのは、先のモンテカルロシミュレーションで、厚さ 2cm 長さ 1m のシンチレーターの中央に荷電粒子が通過した場合、400 個弱の光電子が発生すると分かっており、そのうち時間分解能を決めるパルスの立ち上がり部分を形成させるのは約 10 % だからである。-1600V では gain が低かったため、フィルタを使用しなかった。

\*図 3.2 のドーナツ状のものが電磁石である。空洞部に磁場がかかる。

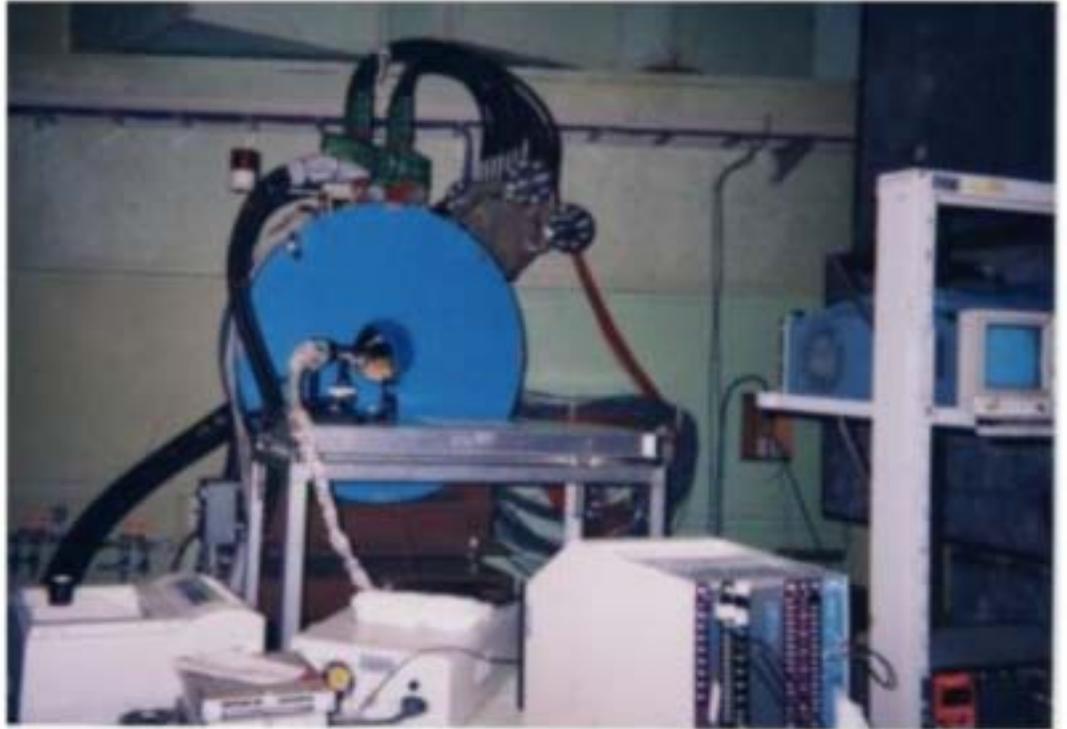


図 3.2: PMT 磁場実験の様子 電磁石提供 佐藤任弘氏 (KEK)

### 3.1.3 結果

図 3.3 は磁場を変えたときの gain の変化である。縦軸は、磁場をかけていない時の gain を 1 としている。

磁場が大きくなると gain が悪くなるのが分かる。また、角度がある方が gain の減り方が小さいことが分かった。30 度では、1k[Gauss] 付近では逆に gain が大きくなっている。

図 3.4 は磁場対する時間分解能の変化である。5k[Gauss] より大きくなると、時間分解能が悪化するの分かる。

PHENIX では、光電子増倍管は  $\sim 3\text{k[Gauss]}$ , 30 度の下で運転させることになるが、gain も時間分解能にも影響は少なく、十分に動作可能であることが分かった。

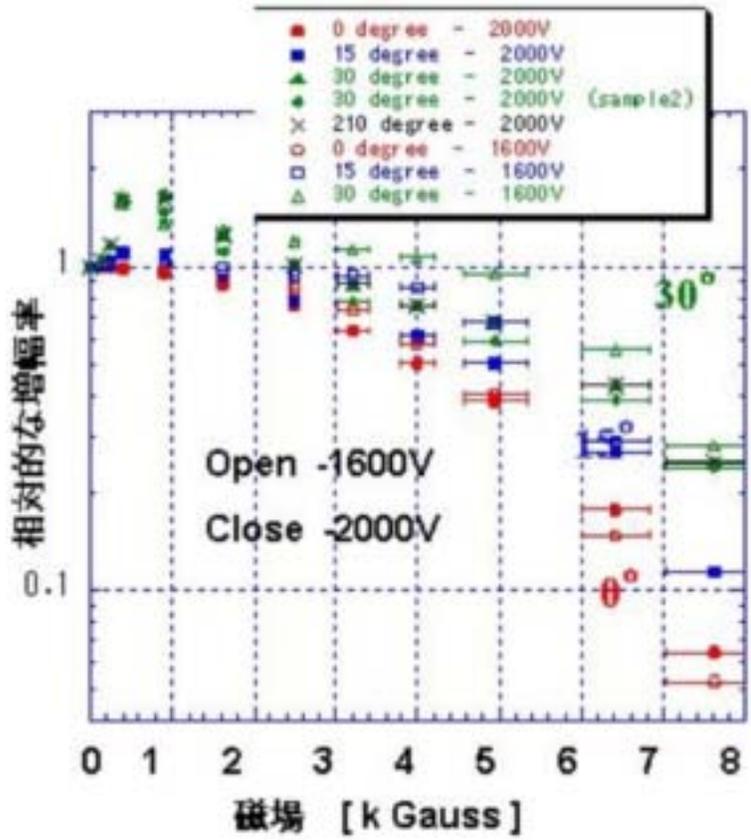


図 3.3: 磁場と増幅率の関係

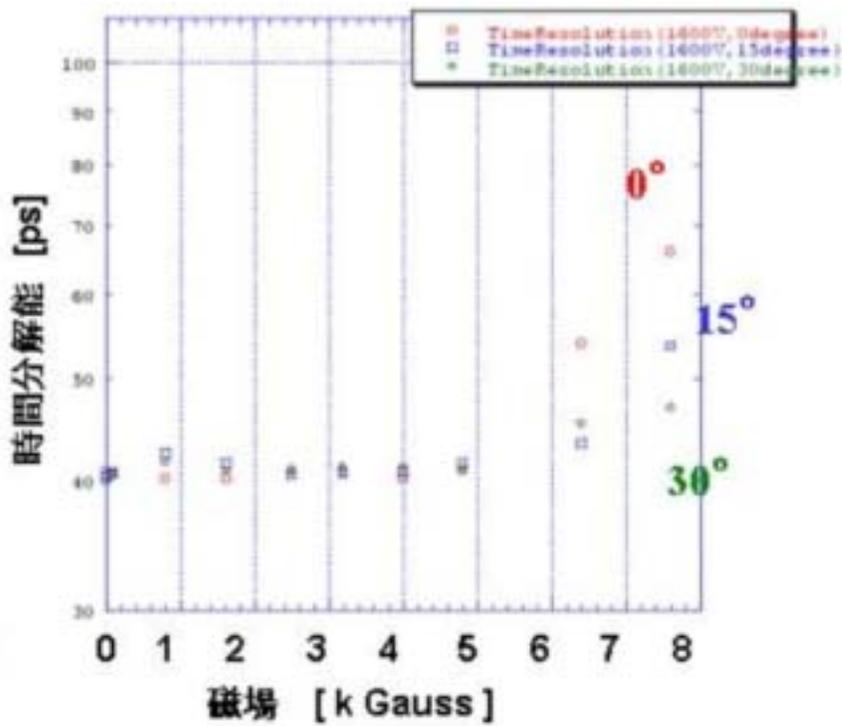


図 3.4: 磁場と時間分解能の関係

## 3.2 テストビーム実験

### 3.2.1 目的

長さ 1m 幅 8cm 厚さ 2cm のシンチレーター、ライトガイドと光電子増倍管を組み合わせたプロトタイプが目標の時間分解能  $\sim 80$  を得られるかどうかを確認する。

### 3.2.2 セットアップ

KEK のテストビームチャンネル (T1) を利用して、T0 カウンターのプロトタイプに  $2[\text{GeV}/c]$  の  $\pi^-$  を入射させて、時間分解能の測定を行った。

図 3.5 が、セットアップである。スタートカウンター (両読み) 2 つ、VETO カウンターおよび DEF カウンターを 2 つ用いた。

Counter Name	Type Number of PMT	Scintillator Size [ $\text{cm}^3$ ]
STR 1,2	Hamamatsu H3284	$2 \times 2 \times 0.5$
DEF 1	Hamamatsu R647	$1 \times 1 \times 0.5$
DEF 2	Hamamatsu R647	$2 \times 2 \times 0.5$
VETO	Hamamatsu H2431	$20 \times 10 \times 0.8$
		ただし、直径 2cm の穴がある
T0	Hamamatsu R5924	$100 \times 8 \times 2$

表 3.1: 測定に使用した PMT とシンチレーター

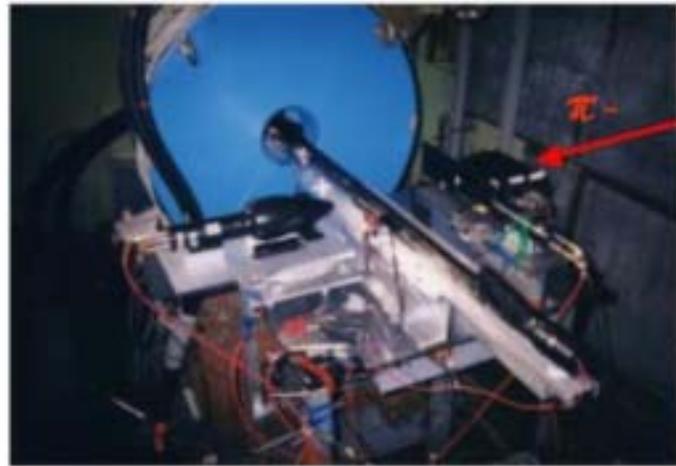
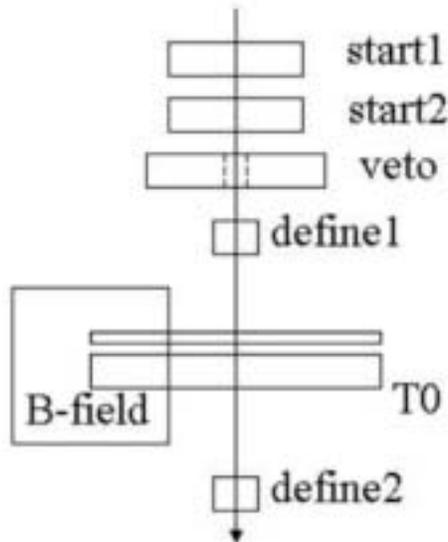
図 3.6 は回路図である。トリガーは、次のようにした。

$$\text{Trigger} = \text{STR1} \cap \text{STR2} \cap \text{DEF1} \cap \text{DEF2} \cap \overline{\text{VETO}} \quad (3.1)$$

以上のセットアップで、T0 カウンターにビームを入射させる位置を変えながら測定を行った。また、T0 カウンターの片方の光電子増倍管に、磁場をかけた測定も行った。(ただし、スペースの制限のため磁場と光電子増倍管の角度は 0 度のものしか測定していない。)

## 🔧 セットアップ

2GeV/c pi- beam



🔧 KEK , T1ビームライン , No. T-479

図 3.5: KEK テストビーム実験のセットアップ

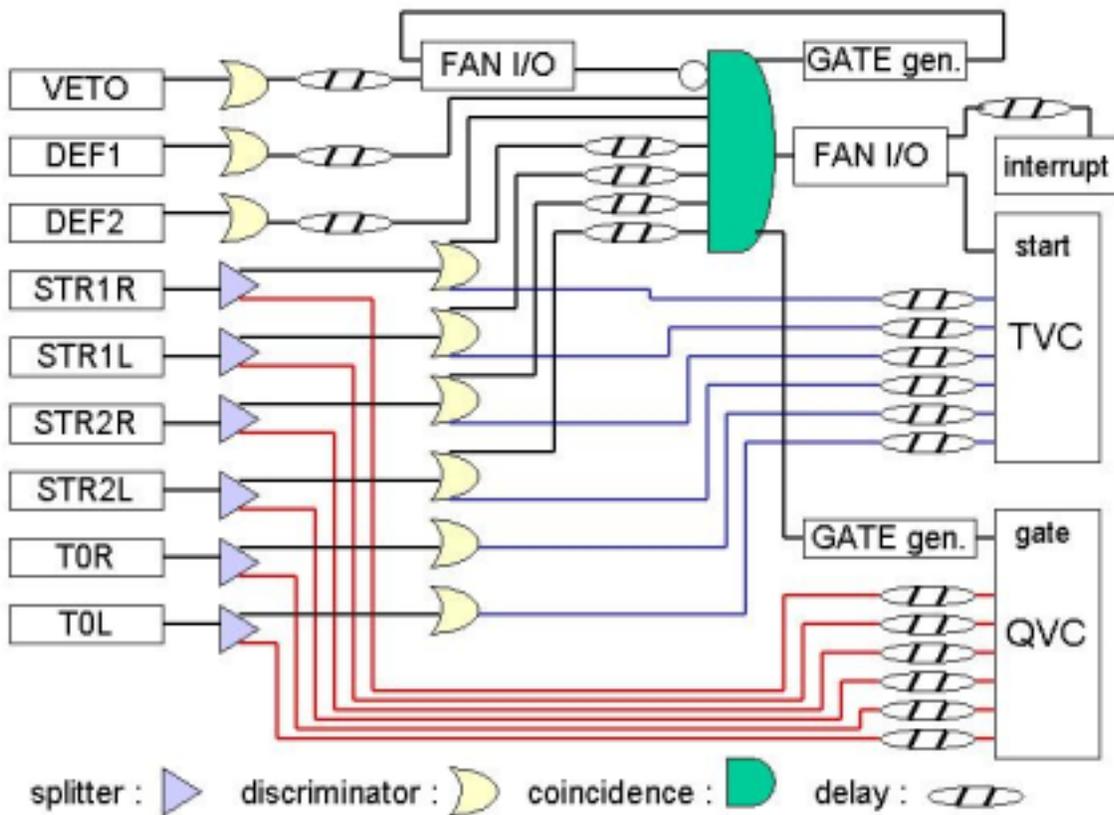


図 3.6: KEK テストビーム実験の回路図

## 3.2.3 結果

## • 解析方法

図 3.7 は実験で得られた分布の一例である。

T0 カウンター固有の時間分解能は以下のようにして求めた。まず、各光電子増倍管について Slewling の補正を行った。

$$TDC = \frac{a}{\sqrt{ADC}} + b \quad (a, b \text{ は定数}) \quad (3.2)$$

そして、飛行時間検出器が 3 つあることより連立方程式を用いて、T0 カウンター固有の時間分解能を求めた。

$$\sigma_{S1,S2}^2 = \sigma_{S1}^2 + \sigma_{S2}^2 \quad (3.3)$$

$$\sigma_{S1,T0'}^2 = \sigma_{S1}^2 + \sigma_{T0'}^2 \quad (3.4)$$

$$\sigma_{S2,T0'}^2 = \sigma_{S2}^2 + \sigma_{T0'}^2 \quad (3.5)$$

\* S1R とは、STR1 右側のチャンネルの TDC の値 (Slewling 補正後) のこと

ただし、

$$\sigma_{S1,S2}^2 \equiv V \left( \frac{S1R + S1L}{2} - \frac{S2R + S2L}{2} \right) \quad (3.6)$$

$$\sigma_{S1,T0'}^2 \equiv V \left( \frac{S1R + S1L}{2} - \frac{T0R + T0L}{2} \right) \quad (3.7)$$

$$\sigma_{S2,T0'}^2 \equiv V \left( \frac{S2R + S2L}{2} - \frac{T0R + T0L}{2} \right) \quad (3.8)$$

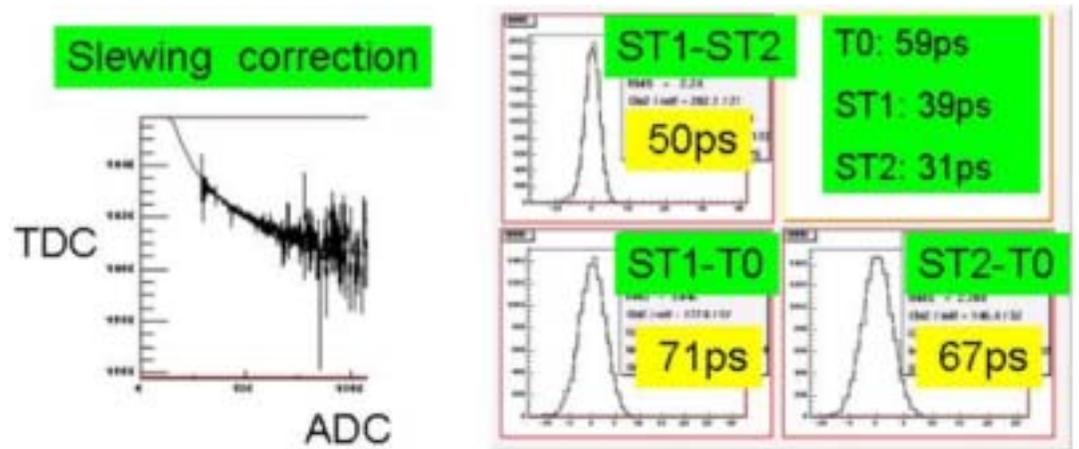


図 3.7: 得られた分布

- 印加電圧の依存性

図 3.8 は、ビームの入射位置は一定にして、光電子増倍管の印加電圧を変えたときの時間分解能である。1700V 程度が最適であることが分かる。ちなみに、T0 カウンターの threshold は-100mV とした。

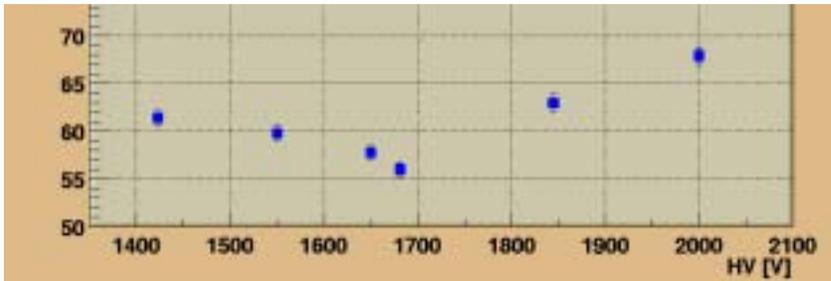


図 3.8: PMT 印加電圧と時間分解能 (縦軸 [ps])

- 磁場の依存性

図 3.9 は、T0 カウンターの片側の光電子増倍管に角度 0 度の磁場をかけて片読みでの時間分解能を見たものである。(ここでは厚さ 2cm 幅 8cm のシンチレータだけではなく、厚さ 2cm 幅 2cm のシンチレータも用いて測定をした。) 5k[Gauss] まで測定したが、時間分解能に磁場の影響は見られなかった。PHENIX での運転では、3k[Gauss] を想定しているため、問題なく動作させられる。

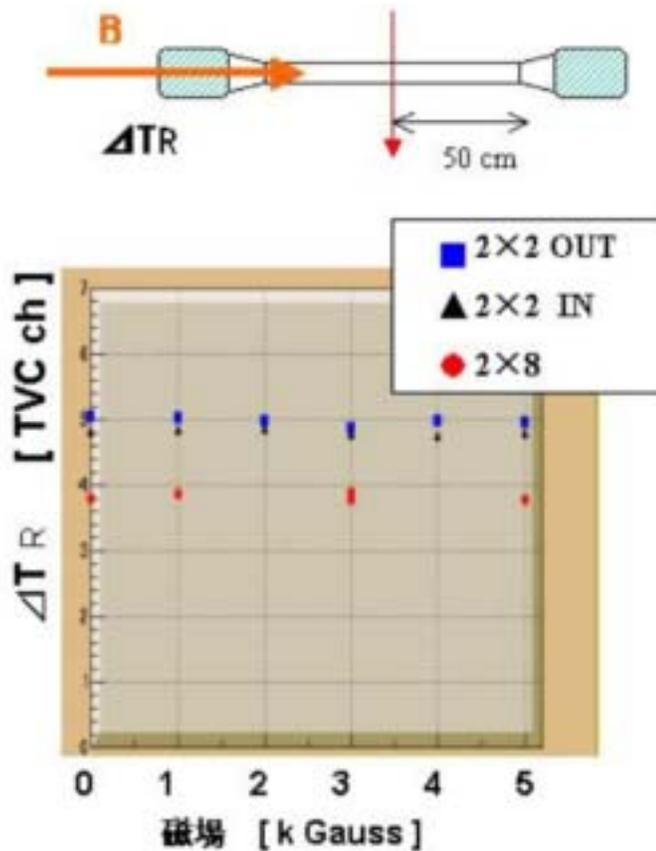


図 3.9: 磁場と時間分解能

- 時間分解能の結果

図 3.10 は、ビームの入射位置を変えた時の時間分解能である。Close した点はテスト実験の結果である。両読みした時の時間分解能は、 $\sim 60\text{psec}$  を達成しており、シミュレーションの結果とよく合っている。

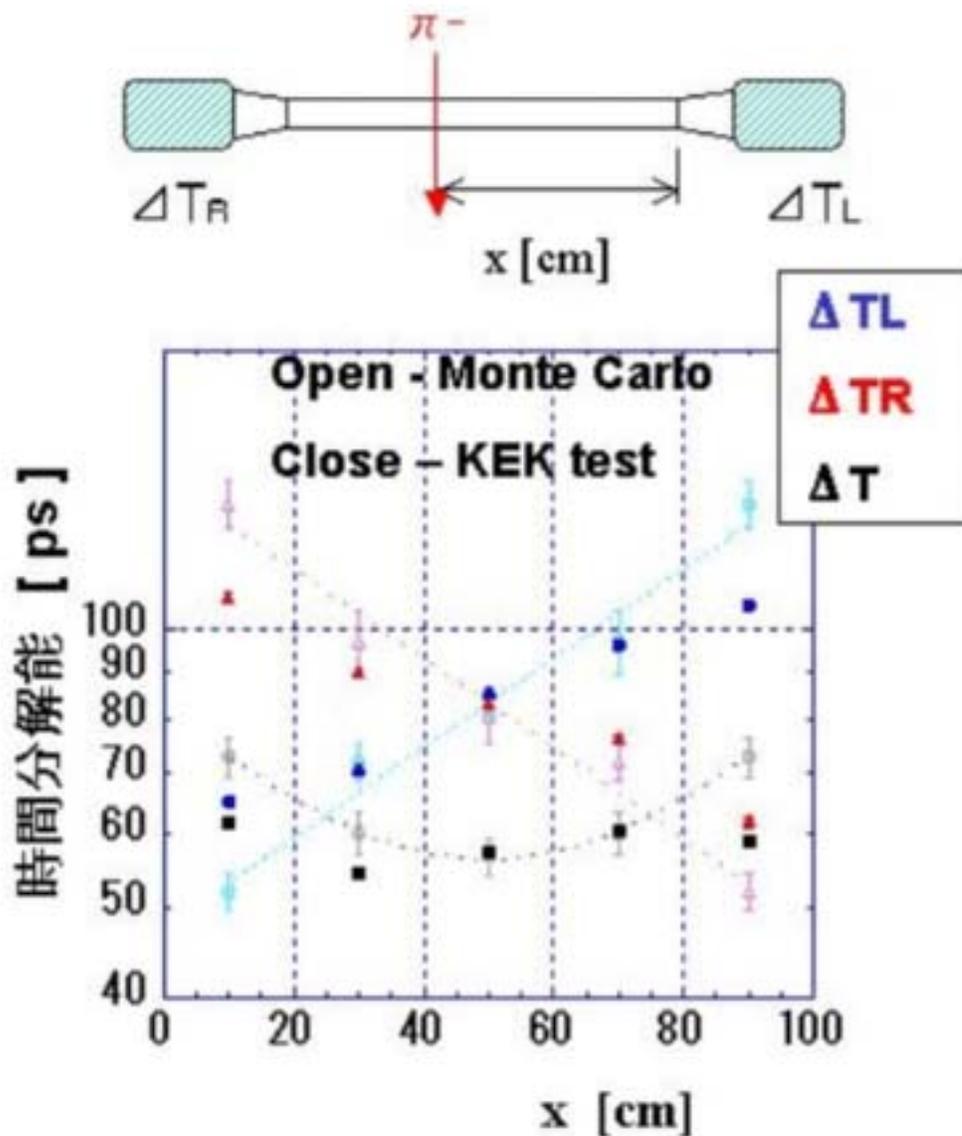


図 3.10: 時間分解能の結果

- まとめ

KEK でのテストビーム実験により、高磁場下でも目標の時間分解能を得られることが確認された。p+p 衝突実験に向けて、製作に取り掛かることになった。

## 第4章

# 製作・インストール

### 4.1 製作

T0 カウンターは、PHENIX 実験開始からあり常時設置されているものではなく、空いているスペースを活用して、陽子・陽子衝突実験が行われる2ヶ月間のみ使用される。そのため、T0 カウンターを固定するための部品も製作しなければいけない。

T0 カウンターの設置される場所は特殊な場所で、設置するためにいくつかの工夫を必要とした。ここでは、T0 カウンターとそれを PHENIX 検出器に固定する部品の製作について述べる。

#### 4.1.1 固定装置と T0 カウンターの設計

T0 カウンターの設置される場所は、ビームパイプ付近である(図 4.1)。ここに重さ約 5kg の T0 カウンター 8 組(図 4.2)をインストールしたい。



図 4.1: ビームパイプ付近の様子

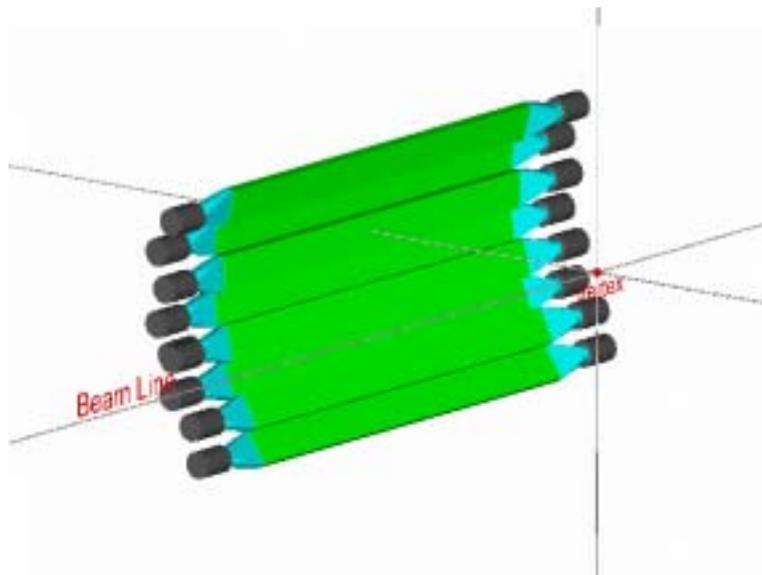


図 4.2: T0 カウンターをビーム衝突点から見た様子

そこで、図 4.3 のようなもの考えた。ノーズコーンにベルトを巻きつける。ベルトにはプラットフォームを溶接し、そこに T0 カウンターを固定するというものである。

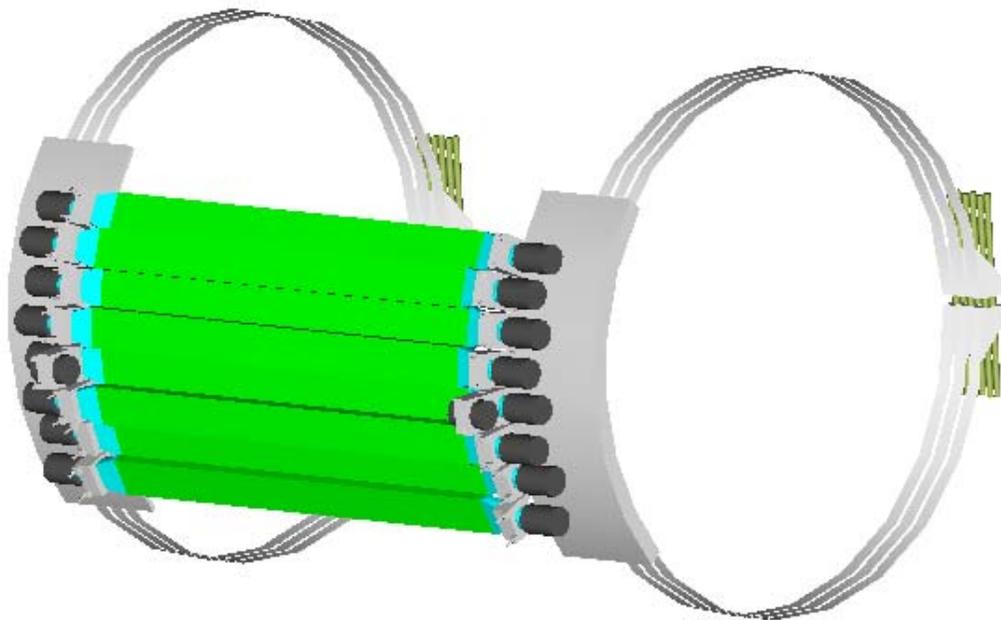


図 4.3: インストール予想図

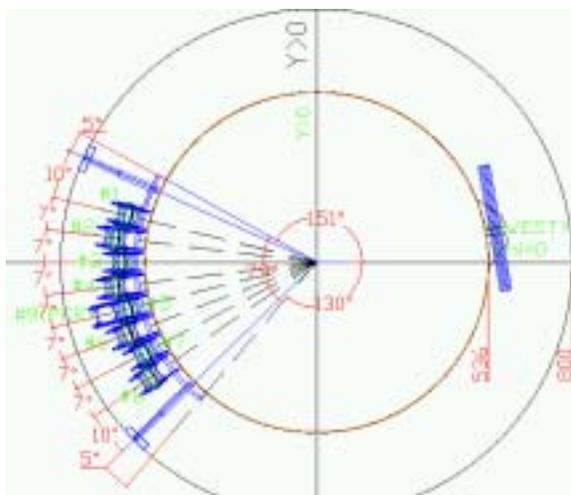


図 4.4: 側面図

このように、2 つはノーズコーン間を橋渡しにするデザインではある問題が生じた。PHENIX 検出器のマグネットはしばしばダウンすることがあるが、磁場の ON・OFF によってノーズコーンがコンマ数 mm ずれるというのである。そこで、片方のベルトについて、T0 カウンターがプラットフォーム上で、自由にスライドできる構造にした(図 4.5,4.6)。

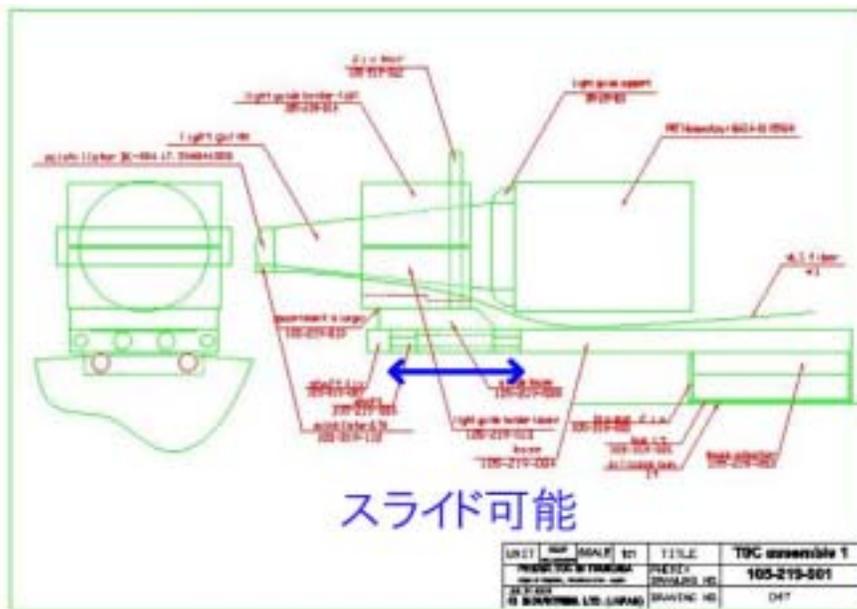


図 4.5: T0 固定部の拡大図

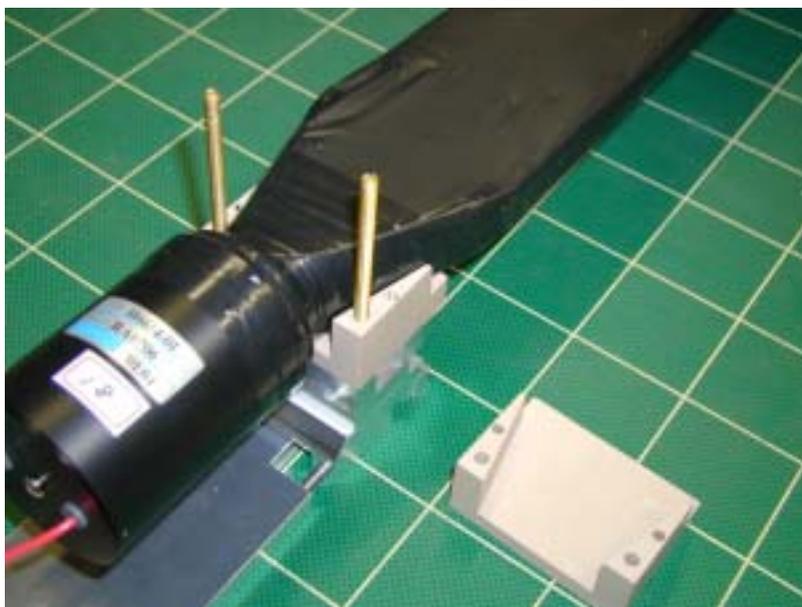


図 4.6:

### 4.1.2 固定装置の機械的強度

この節では、T0 カウンターの機械的強度について述べる。T0 カウンターは、ノーズコーンにベルトを巻きつけて固定する。そのため、このベルトが T0 自身の重みに耐えられるかどうか知る必要がある。また、T0 カウンターの外側に放射長を減らす目的で、He Bag と呼ばれる風船状の物がインストールされるが、この He Bag の圧力にシンチレータなどが耐えられなければならない。

ポイントは、次の3点である。

1. ベルトの強度
2. シンチレーターの He Bag に対する強度
3. オプティカルセメントの He Bag に対する強度

#### 1. ベルトの強度

断面積  $S$

$$S = 1[\text{mm}] \times 75[\text{mm}] \times 2[\text{本}] = 1.5 \times 10^2[\text{mm}^2] = 1.5 \times 10^{-4}[\text{m}^2] \quad (4.1)$$

$$1[\text{mm}^2] = 10^{-6}[\text{m}^2]$$

$$[\text{Pa}] = [\text{N} \cdot \text{m}^{-2}]$$

のステンレスのベルトに質量 150Kg の T0 カウンターを取り付けた場合、引張荷重  $T$  は、

$$T = (\text{質量}) \cdot (\text{重力加速度}) / (\text{断面積}) = 150 \cdot 9.8 / 1.5 \cdot 10^{-4} = 10[\text{MPa}] \quad (4.2)$$

である。

\*降伏応力

塑性変形が始まる応力。降伏応力に達するまでは、物質は弾性的に変形している。

一般的なステンレスの降伏応力\* $Y$  は、

$$Y = 200[\text{MPa}] \quad (4.3)$$

したがって、 $T \ll Y$  より、ベルトは T0 カウンターの重さに耐えられる。

また、このときのひずみ  $e^*$  は、ステンレスのヤング率は  $E = 200[\text{GPa}]$  なので、

$$(\text{ひずみ } e) = (\text{応力 } T) / (\text{ヤング率 } E) = 5 \times 10^{-2} \quad (4.4)$$

\*ひずみ

単位長さ当りの伸び

つまり、1m のベルトに T0 をぶら下げたら、 $5 \times 10^{-2}[\text{mm}]$  しか伸びない。

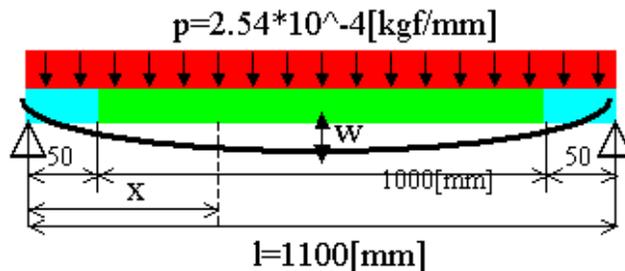
実際には、T0 カウンターは垂直にぶら下げるのではなく、巻きつけて使用するため荷重は分散され、この計算よりも安全であると言える。

## 2. シンチレーターへの He Bag に対する強度

He Bag は (1 気圧+1 インチ水柱) だけの圧力を持った風船である。この圧力により、長さ 1m のシンチレーターはどうなるのであろうか。

- 等分布荷重両端支点ばり

T0 カウンターに He Bag を接触させることは、図 4.7 のように単位長さ当り  $p = 2.54 \times 10^{-4} [kgf/mm]$  の荷重を受ける長さ  $l = 1100 [mm]$  の等分布荷重両端支点ばりと考えることができる。



\*  
赤 He Bag  
緑 シンチレーター  
青 ライトガイド

図 4.7: 等分布荷重両端支点ばり

このとき、せん断力  $F$  は、

$$F = \frac{p}{2}(l - 2x) \quad (4.5)$$

曲げモーメント  $M$  は、

$$M = \frac{px}{2}(l - x) \quad (4.6)$$

また、最大曲げモーメントは、シンチレーターの中央 ( $x = l/2$ ) で、

$$M_{max} = \frac{pl^2}{8} \quad (4.7)$$

したがって、せん断力図 (diagram of shearing force; SFD) (図 4.8) および、(diagram of bending moment; BMD) (図 4.9) が描ける

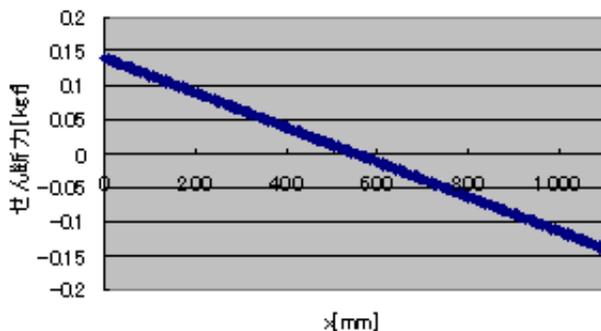


図 4.8: SFD

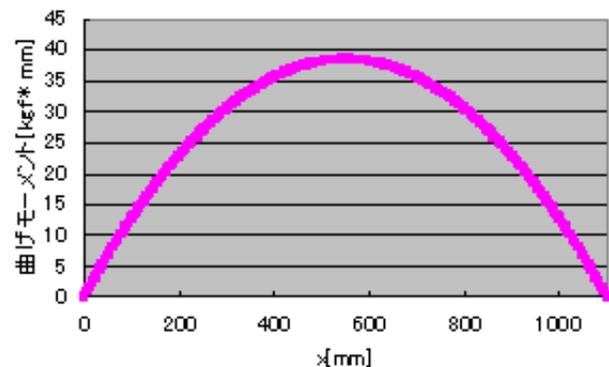


図 4.9: BMD

- 断面2次モーメント、断面係数

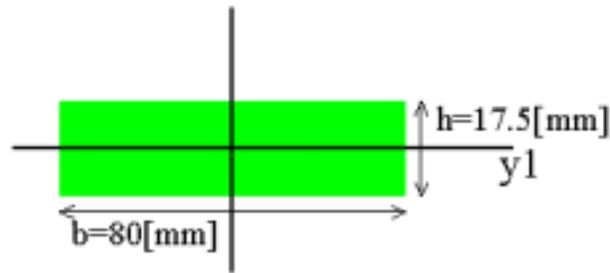


図 4.10: シンチレーターの断面図

図 4.10 の長方形断面において、主軸  $y_1$  に関する断面2次モーメント  $I$  と断面係数  $Z$  は、

$$I = \frac{bh^3}{12} = 3.5 \times 10^4 [\text{mm}^4] \quad (4.8)$$

$$Z = \frac{bh^2}{6} = 4.1 \times 10^3 [\text{mm}^3] \quad (4.9)$$

- はりの曲げ応力

一般的に、最大応力を  $\sigma$ 、断面係数を  $Z$ 、曲げモーメントを  $M$  とすると、次式が成り立つ。

$$\sigma = \frac{M}{Z} \quad (4.10)$$

このとき、はりに生じる最大引張応力は、(4.7) 式より、

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{Z} = \frac{3pl^3}{4bh^2} \quad (4.11)$$

- たわみ

等分布荷重両端支点ばりにおいて、たわみ曲線は、ヤング率を  $E$  とすると、

$$-EI \frac{d^2w}{dx^2} = M \quad (4.12)$$

$x = \frac{l}{2}$  で、 $\frac{dw}{dx} = 0$ 、 $x = 0$  で  $w = 0$  より、

$$w = \frac{px}{24EI} (x^3 - 2lx^2 + l^2) \quad (4.13)$$

$$w_{max} = w_{x=\frac{l}{2}} = \frac{5pl^4}{384EI} \quad (4.14)$$

- 結論

シンチレーター（材質は飽和ポリエステルとした）のヤング率は  $E = 210 [\text{kgf}/\text{mm}^2]$ 、許容応力は  $6 [\text{kgf}/\text{mm}^2]$  であるから、シンチレーター中央 ( $l = 550 [\text{mm}]$ ) において、(4.11) 式より、

$$(\text{安全率}) = \frac{\text{最大応力}}{\text{許容応力}} = 0.16$$

と、折れる限界の千分の一程度であり、安全である。

また、(4.14) 式より、シンチレーターの中央では  $0.64 \text{mm}$  たわむ。

\* 安全率

構造物の安全基準として使用可能な数値。静荷重であれば、90%を限界として、100%以上になると折れてしまう。

### 3. オプティカルセメントの He Bag に対する強度

He Bag の圧力により、シンチレーターとライトガイドを接着しているオプティカルセメントは剥がれてしまわないか。

オプティカルセメントのある断面 ( $l = 50, 1050[mm]$ ) に掛かる応力は、(4.5) 式より、 $1.62 \times 10^{-3}[kgf/mm^2]$ 。また、オプティカルセメントの許容応力 (引張方向) は  $BondStrength = 1.25[kgf/mm^2]$ 。

ゆえに、(安全率) = (最大応力) / (許容応力)  $\sim 0.13\%$  より、剥がれる限界の千分の一程度であるため、安全である。

## 4.2 宇宙線によるテスト

- 目的製作した T0 カウンターが KEK 実験で得られた時間分解能を再現するか、宇宙線を用いてテストを行った。
- セットアップ



図 4.11: 宇宙線によるテスト

図 4.11 のように、T0 カウンターを交互に 3 組並べ、上下 2 組の T0 カウンターのコイシデンス（次式）をトリガーとして、時間分解能を測定した。

$$Trigger = T1R \cap T1L \cap T3R \cap T3L \quad (4.15)$$

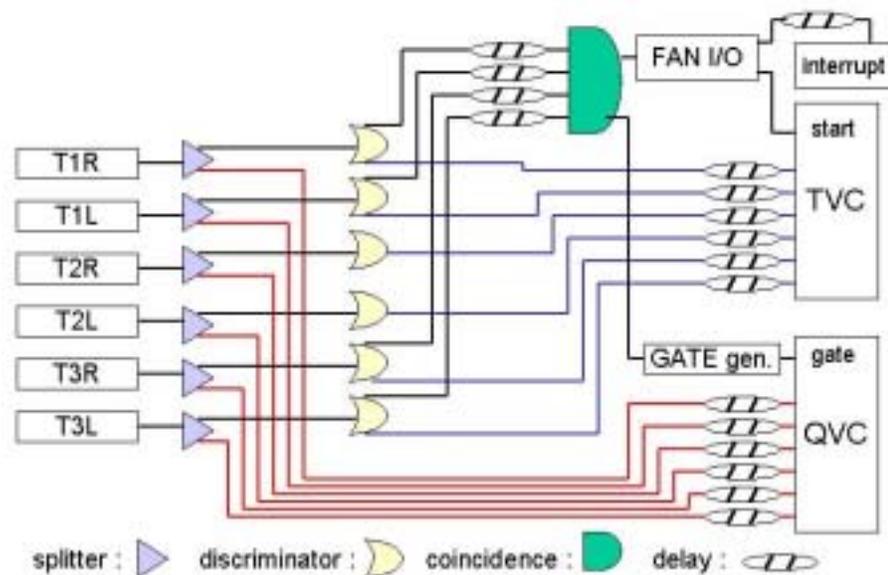


図 4.12: セットアップ

- 結果 32 ページと同様の方法で、T0 カウンターの時間分解能を出した結果が、図 4.13 である。KEK テスト実験と同様の結果 ( $\sim 60\text{ps}$ ) を得ることができた。

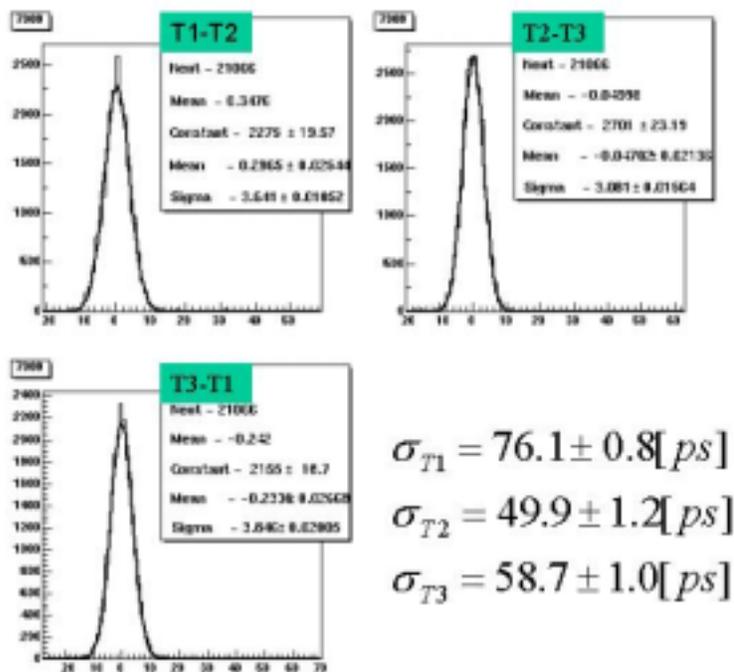


図 4.13: 実験結果

### 4.3 インストール

T0 カウンターを設置する場所は、高さ 3m 以上で足場がとても狭い。また、インストールのためにビームエリア内で作業できる時間は短い。そのため、PHENIX 磁石のモックアップモデル(図 4.14)を製作し、設置予行演習を繰り返し行った。

2001 年 11 月末、PHENIX 検出器に無事にインストールをすることができた。



図 4.14: ノーズコーン模型と T0 カウンター



図 4.15: PHENIX 検出器に設置された T0 カウンター

## 第5章

# p+p 実験

2001年12月から2002年1月にかけて、陽子・陽子衝突実験が行われた。ここでは、2001年1月31日現在の段階で解析できているデータについて述べる。

### 5.1 得られた分布

図5.1は、T0カウンターでのエネルギー損失の分布である。バックグラウンドと最小エネルギー損失のピークが確認でき、明確にT0カウンターに粒子が入射したかどうかを区別することができる。

図5.2は、T0カウンターでの荷電粒子がHITした位置である。シンチレーターの長さ1m分の幅を持っている。(ただし、シンチレーターの幅の他に、位置分解能・6mmも含まれている。位置分解能は式(1.9)より。)

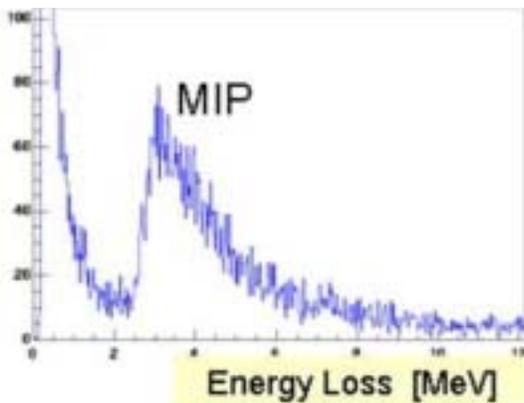


図 5.1: シンチレーターでの Energy Loss

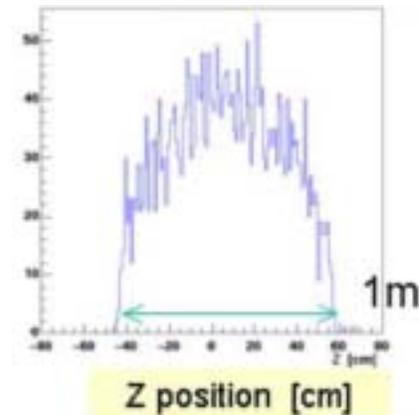


図 5.2: 荷電粒子の入射位置

図5.3は、T0カウンターに粒子がHITした時間と衝突時間の差である。つまり、衝突点からT0カウンターまでの飛行時間+ケーブルなどによるオフセットである。ピークがきちんと見えているため、T0カウンターで時間が測定できていることが分かる。ちなみに、このピークの幅は $\sim 300$ [ps]である。ピークの幅はT0カウンターの時間分解能とBBCの時間分解能および粒子の運動量の違いから決まる。飛跡の再構築ができ粒子の運動量が分かるようになれば、この幅を狭めることができる。

T0カウンターはp+p衝突実験において、正常に動作していると言える。

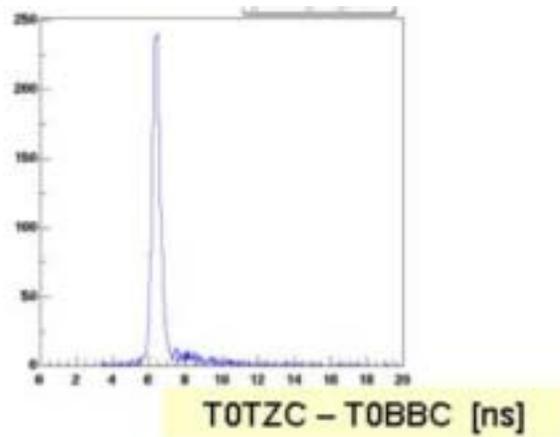


図 5.3: 衝突点から T0 カウンターまでの飛行時間

## 5.2 calibration の現状

T0 カウンターに必要な Calibration Parameter は以下の 9 つである。

1. Time Conversion Parameter
2. Charge Conversion Parameter
3. QVC pedestal
4. Light Velocity in Scintillator
5. Z Position Offset
6. Energy Loss Conversion Factor
7. Time Offset
8. Slewing Parameter
9. Global Time Offset

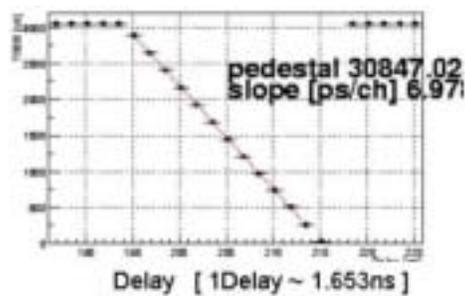


図 5.4: Delay と TVC  
(Time Conversion Parameter)

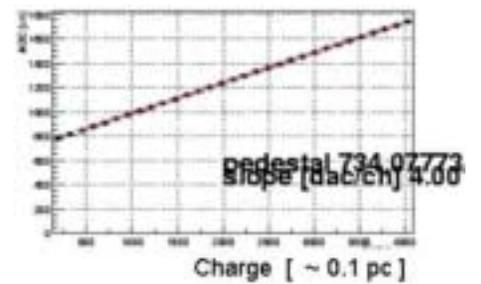


図 5.5: charge と QVC  
(Charge Conversion Parameter)

1~3 までは、Timing と Charge を測定するエレクトロニクスに関する量である。これらはすでに Calibration が済んでいる。T0 カウンターに使用しているエレクトロニクスは、Common Start であり、図 5.4 はエレクトロニクスへの計測終了信号の Delay を変えながら TVC の値を測定したものである。この傾きから、TVC1 チャンネル当りの時間

(1) が分かる。図 5.5 はエレクトロニクスへ入れる電荷の量を変えながら QVC の値を測定したものである。この傾きから、QVC1 チャンネル当りの電荷 (2) が分かる。また、切片から、pedstal (3) が求まる。

4~7 までは、第一段階の Calibration として大まかな値を得た (図 5.1~5.3)。

4 はシンチレーター中の光の速さであるが、T0 カウンターの Hit 位置の分布 (図 5.2) を作る際に使用する。図 5.2 の分布がシンチレーターの長さで位置分解能の幅を持った分布になることより求まる。

光電子増倍管からエレクトロニクスまでのケーブルの長さの違いによって、T0 カウンターの Hit 位置に一定のずれを生ずる。これが 5 である。

6 は QVC1 チャンネル当りのエネルギー [MeV] であり、荷電粒子の最小エネルギー損失がシンチレーターの厚さで決まることから求まる。

7 は各チャンネルのケーブルの長さの違いである。

8-9 は、まだ求めることができていない。解析のためのソフトウェアを製作していかなければならない。

### 5.3 T0 トリガー

ここでは、BBC ではトリガーできない陽子・陽子衝突の Event を T0 カウンターによって手に入れることができていることについて述べる。

BeamCross (ビームが衝突した、しないに関わらずビームが交差した) Event が ~192k ある Run のデータを使用した。

そのうち、BBC でトリガーできたものが 33Event と T0 カウンターでトリガーできたものが 15Event あった。BBC でも T0 カウンターでもトリガーできたものが 9Event あった。

すなわち、T0 カウンターを設置したことで、BBC でトリガーできない 6Event を救うことができる。

ちなみに、陽子・陽子衝突を再現するシミュレーションの結果では (表 2.2) BBC は全 p+p 衝突のうち 40 ~ 50 % をトリガーできると考えられるので、全 p+p 衝突は ~70Event あると思われる。

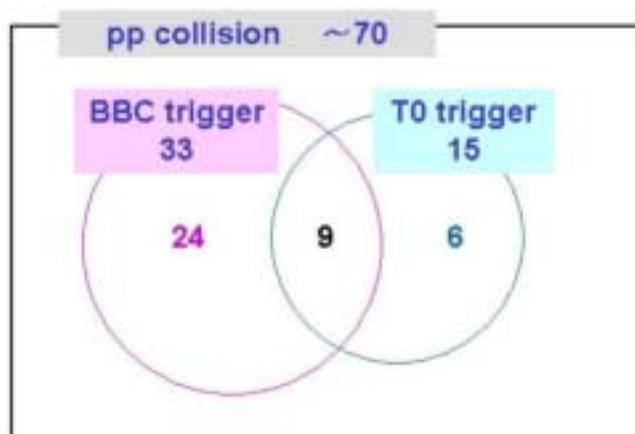


図 5.6: BBC Trigger と T0 Trigger

## 5.4 粒子識別

PHENIX 検出器には、T0 カウンターの外側にあるドリフトチェンバーにより、飛跡、運動量再構成を行う検出器がある。ドリフトチェンバーからの情報と TOF と T0 カウンターから求まる粒子の飛行時間を用いて粒子識別を行った結果が図 5.7 である。

$\pi$  中間子、K 中間子と陽子が識別できており、T0 カウンターは粒子識別を行えることが確認された。

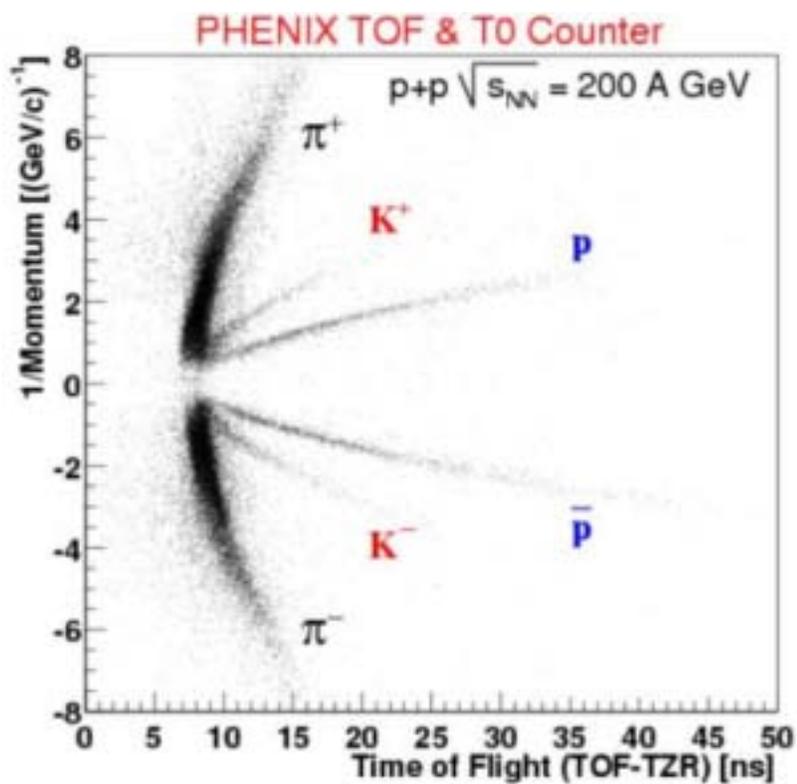


図 5.7: p+p 衝突実験での粒子識別

## 第6章

# まとめ

本研究では、陽子・陽子衝突におけるハドロン識別・測定専用のトリガー兼スタートタイミング装置 (Time Zero Counter、以下 TZC とする) の設計・開発を行った。

TZC は、設置場所の関係上長さ 1m のプラスチックシンチレーターを使用し、時間分解能を良くするためにシンチレーターを光電子増倍管で挟んだ両読み型飛行時間測定器にした。

まず、光学的モンテカルロシミュレーションによりプラスチックシンチレーター及びライトガイドの形状の設計を行った。光収集効率及びタイミングの最適化により、長さ 10cm のライトガイドと長さ 1m 厚さ 2cm のシンチレーターを組み合わせれば、 $\sim 60\text{ps}$  の時間分解能を達成できることが分かった (2001 年 6 月)。

次に、TZC が設置される場所は、 $3\text{k[Gauss]}$  程度の高磁場がかかっているため、高磁場用 Fine Mesh 型光電子増倍管 (R5924HAMAMATSU) の磁場に対する性能評価を行った。 $8\text{ k[Gauss]}$  までの磁場を発生できるソレノイド磁石を用いて、磁場の強さ、磁場と光電子増倍管の角度を変えながら、光電子増倍管のゲインや時間分解能への影響を調べた。その結果、 $3\text{k[Gauss]}$  以下ならば、ゲインや時間分解能に対する磁場の影響は少なく、正常に動作することが判明した。

以上の成果をもとに、プロトタイプを製作し、KEK-T1 ビームラインを利用してビームテストを行った (2001 年 T-479)。 $2\text{[Gev/c]}$  の  $\pi$ -中間子をシンチレーターに入射させる位置を変えながら、また光電子増倍管にかかる磁場を変えながら、TZC の時間分解能を測定した。その結果、 $3\text{k[Gauss]}$  の磁場中においても目標の時間分解能  $\sim 60\text{ps}$  を得られることを確認した (2001 年 12 月)。

2001 年 8 月までに TZC 本体とそれを支えるための部品の設計を完了し、PHENIX 実験磁石の実物大模型を用いた設置練習、宇宙線による性能確認テストの後、米国へ搬出し、2001 年 11 月下旬 PHENIX 実験にハドロン識別・測定を行う観測領域内に 8 組設置した。

そして、2001 年 12 月より 2 ヶ月間、陽子・陽子衝突実験が行われたが、TZC は正常に動作し、系統的比較のためのデータ収集は成功のうちに終わった。また、TOF (飛行時間測定器) を用いた粒子識別を設計通り行えることが確認された。

今後の課題は、より正確に Calibration Parameter を求め、粒子識別の精度を上げることである。



## 参考文献

- [1] Suppression of Hadrons with Transverse Momentum in Central Au + Au Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 130\text{GeV}$   
*Phy. Rev. Lett.* 88 , 022301 . 14/Jan/2002  
 PHENIX Collaboration
- [2] Study of timing degradation and light attenuation in long plastic scintillation rods for time-of-flight counters in relativistic heavy ion experiments  
*Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 349 (1994) 447-453  
 Mizuki Kurata et al.
- [3] The European Physical Journal C *Volume 15 Number1-4 2000 pp1-878*
- [4] 高エネルギー重イオン衝突実験の為に高時間分解能飛行時間測定器に使用されたプラスチックシンチレーターに見られた経年変化について  
 1995 年度 筑波大学自然科学類 卒業論文  
 大熊靖夫
- [5] PHENIX 実験における陽子陽子衝突トリガーカウンターのための Photon Conversion Rejector の設計  
 2001 年度 筑波大学自然科学類 卒業論文  
 團村絢子
- [6] わかりやすい FORTRAN プログラミング、小林孝史 他 共著 、オーム社
- [7] AutoCAD ばやってみんしゃい、中村幹広著、キャドワークス
- [8] First Results from RHIC-PHENIX.  
*Pramana* 57 , 355-369 , 2001  
 PHENIX Collaboration
- [9] Overview of PHENIX Results from the first RHIC Run.  
*Nucl. Phys. A*698 , 39-53 , 2002  
 PHENIX Collaboration
- [10] Measurement of the midrapidity transverse energy distribution from  $\sqrt{s_{NN}} = 130\text{GeV}$  Au+Au Collisions at RHIC.  
*Phys. Rev. Lett.* 87 , 052301 , 2001  
 PHENIX Collaboration
- [11] Centrality dependence of charged particle multiplicity in Au+Au Collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=130\text{GeV}$   
*Phys.Rev.Lett.*86 , 3500-3505 ,2001  
 PHENIX Collaboration



# 謝辞

本研究を行うにあたり、とても魅力あるテーマを与えて下さるとともに、様々な点でご指導、ご助言を頂いた三明康郎教授には深く感謝致します。

江角晋一講師には、KEK でのテスト実験の進め方や本研究の物理など様々な面で非常に有用なアドバイスを頂きました。

佐藤進氏 (BNL) には、HV モジュール、ケーブル、エレクトロニクスの準備、放射線手続きなど、現地の責任者と交渉が必要な手間のかかる作業をしてくださいました。また、インストール後も正常に T0 カウンターを動作させるために適切な方向づけをしてくださいました。

中條達也氏 (BNL) には、お忙しい中様々な面で助けていただけました。インストールの際は、いろいろと手伝ってくださいました。

清道明男氏には、計算機について様々なアドバイスを頂きました。特に、T0 カウンターの OFFLINE での解析のためのソフトウェアを作成して頂きました。

蜂谷崇氏 (広島大) には、T0 カウンターの calibration をする際にとっても有用なアドバイスを頂きました。

小野雅也氏には、GEANT を用いたシミュレーション、KEK テスト実験の遂行、放射線の管理、検出器のインストールなど様々な面で活躍して頂きました。

黒木喜昭氏には、KEK テスト実験でとても使いやすい DAQ およびデータ解析用マクロを作って頂き、快適にデータ収集ができました。

坂井真吾氏には、 $p+p$  実験での ONLINE MONITORING ソフトを完成させて頂きました。また、検出器へのスポンジ張りやテープ張りなどの地味な仕事を手伝ってくださいました。

團村絢子氏には、T0 カウンターによる運動量分解能の悪化の計算、PCR の設計、開発などして頂きました。

技官の加藤純雄氏、益井宙メンバー、進藤美紀氏には、KEK 実験での物品の搬入搬出を手伝ってくださいました。

本研究は上記のように多くの方の支えの上で行うことができました。お世話になった皆様に心から感謝を申し上げます。



# 光学 Monte Carlo Simulation コード

```

1:*****
2:*
3:* Optical Monte Carlo Simulation
4:*
5:* by Hiroshi Tsuruoka MAY / 22 / 2000
6:*
7:*****
8:
9: IMPLICIT NONE
10:
11: INTEGER NWPAWC,ISTAT,ICYCLE
12: REAL PAW,FSPACE(200)
13: PARAMETER (NWPAWC=1000000)
14: COMMON /PAWC/PAW(NWPAWC)
15:
16: INTEGER I,L,N,Osci,Olg,Msci,Mlg,REFsci,REFlg
17: REAL VEC(4)
18:
19: REAL OAx,OAy,OAz
20: REAL APx,APy,APz
21:
22: REAL TXsci,TYsci,TZsci,LENGTHsci
23: REAL TXlg,TYlg,TZlg,LENGTHlg
24:
25: REAL TIMEscilg,TIMEpmt
26: REAL probability
27:
28: REAL INTENSITY(3),SUM(2)
29: REAL theta,phi
30:
31: INTEGER J TZlg,J,Npe,Inpe1,Inpe2
32: REAL Transit Time,RVEC(1),Tnpe,T_V(1:10000,1:2)
33: REAL Tlight,Vout,threshold,TDC,nontlight
34:
35: CHARACTER*8 tags1(2)/'Npe','TDC'/
36: CHARACTER*8 tags2(1)/'TLIGHT'/
37: CHARACTER*8 tags3(1)/'sum'/
38: CHARACTER*8 tags4(1)/'non'/
39: real event(2)
40: dimension event(2)
41:* EQUIVALENCE (event(1),TZlg),(event(2),probability)
42:
43: REAL RANDOM1
44: EXTERNAL RANSIN
45:
46: REAL RANDOM2
47: EXTERNAL RISE2DECAY
48:
49: COMMON /POINT/OAx,OAy,OAz,APx,APy,APz,L,theta,phi

```

```

50: COMMON /TSCINTI/TXsci,TYsci,TZsci,REFsci,LENGTHsci,Msci
51: COMMON /TLG/TXlg,TYlg,TZlg,REFlg,LENGTHlg,Mlg
52:*
53: CALL HLIMIT(NWPAWC)
54:*
55: CALL HROPEN(1,'MEMORY','tdc50_t2.HBOOK','N',1024,ISTAT)
56: IF (ISTAT.NE.0) THEN
57: WRITE(6,*)'FAIL TO OPEN HBOOK FILE ... SORRY!'
58: GOTO 9999
59: ENDIF
60:*
61: CALL HCDIR('/MEMORY',")
62: call hbookn(100,'npe-tdc',2,'/MEMORY',1000,tags1)
63: CALL HBOOKN(110,'LIGHT OUTPUT',1,'/MEMORY',1000,TAGS2)
64: CALL HBOOKN(120,'sum Tt',1,'/MEMORY',1000,TAGS3)
65: CALL HBOOKN(130,'none Tlight',1,'/MEMORY',1000,TAGS4)
66:* do 7000 JTZlg=10,250,10
67:
68: DO 8000 INPE2=1,400
69:
70: DO 5500 Inpe1=1,10000
71: T_V(Inpe1,1)=real(Inpe1*10.0)
72: T_V(Inpe1,2)=0.0
73: 5500 CONTINUE
74:
75:
76: N= 2.0 * 20000.0*0.5      シンチレーション光の数
77:* x[cm]
78: TXsci=2.0
79: TYsci=8.0
80: TZsci=-50.0
81:*
82: TXlg=TXsci/2.0
83: TYlg=4.0
84: TZlg=10.0
85:* TZlg=REAL(JTZlg)/10.0
86:*
87:* do 7100 J=1,10
88:*
89: SUM(1)=0.0
90: SUM(2)=0.0
91: INTENSITY(1)=0.0
92: INTENSITY(2)=0.0
93: INTENSITY(3)=0.0
94:*
95: Msci=0
96: Mlg=0
97: probability=0.0
98: Osci=0
99: Olg=0
100: Npe=0.0
101:*
102: do 10 I=1,N
103: CALL RANMAR(VEC,4)
104:*   シンチレーション光のスタート位置
105: OAx=(2.0*VEC(1)+1.0)*TXsci/4.0
106: OAy=(2.0*VEC(2)+1.0)*TYsci/4.0
107: OAz=TZsci
108:*
109: CALL FUNLXP(RANSIN,FSPACE,0.0,90.0)

```

```
110: CALL FUNLUX(FSPACE,RANDOM1,1)
111:*   シンチレーション光の方向ベクトルの決定
112: APx=SIN(RANDOM1*3.141592/180.0)*COS(VEC(3)*6.2831853)
113: APy=SIN(RANDOM1*3.141592/180.0)*SIN(VEC(3)*6.2831853)
114: APz=COS(RANDOM1*3.141592/180.0)
115:*
116: TIMEscilg=0.0
117: REFsci=0
118: LENGTHsci=0.0
119: REF1g=0
120: LENGTH1g=0.0
121: L=9
122:*
123: 1000 IF(REFsci.GE.10000) GOTO 10
124: CALL LGFACE
125: IF(L.EQ.99) GOTO 90
126:
127: IF(L.EQ.9) GOTO 200
128: 100 CALL ENDsci
129: IF(L.EQ.99) GOTO 10
130:
131: IF(L.EQ.1) GOTO 300
132: 200 CALL FACE01
133: IF(L.EQ.99) GOTO 10
134: IF(L.EQ.1) GOTO 1000
135:
136: IF(L.EQ.2) GOTO 400
137: 300 CALL FACE02
138: IF(L.EQ.99) GOTO 10
139: IF(L.EQ.2) GOTO 1000
140:
141: IF(L.EQ.3) GOTO 500
142: 400 CALL FACE03
143: IF(L.EQ.99) GOTO 10
144: IF(L.EQ.3) GOTO 1000
145:
146: IF(L.EQ.4) GOTO 900
147: 500 CALL FACE04
148: IF(L.EQ.99) GOTO 10
149: IF(L.EQ.4) GOTO 1000
150:
151: 900 Osci=Osci+1
152: GOTO 10
153:
154: 90 INTENSITY(1)=(0.987**REAL(REFsci))*EXP(-LENGTHsci/140.0)
155:
156: SUM(1)=SUM(1)+INTENSITY(1)
157:
158:* write(6,*)intensity(1)
159:*****
160:
161: OAx=OAx-TX1g
162:*center* OAy=OAy
163:* OAy=OAy+2.0
164:
165:*****
166:* Light Guide
167:*****
168:
169: L=9
```

```

170:
171: 2000 IF(REFlg,GE.1000) GOTO 10
172: CALL PMTFACE
173: IF(L.EQ.9999) GOTO 2090
174:
175: IF(L.EQ.9) GOTO 2200
176: 2100 CALL ENDlg
177: IF(L.EQ.9999) GOTO 10
178:
179: IF(L.EQ.11) GOTO 2300
180: 2200 CALL FACE11
181: IF(L.EQ.9999) GOTO 10
182: IF(L.EQ.11) GOTO 2000
183:
184: IF(L.EQ.12) GOTO 2400
185: 2300 CALL FACE12
186: IF(L.EQ.9999) GOTO 10
187: IF(L.EQ.12) GOTO 2000
188:
189: IF(L.EQ.13) GOTO 2500
190: 2400 CALL FACE13
191: IF(L.EQ.9999) GOTO 10
192: IF(L.EQ.13) GOTO 2000
193:
194: IF(L.EQ.14) GOTO 2900
195: 2500 CALL FACE14
196: IF(L.EQ.9999) GOTO 10
197: IF(L.EQ.14) GOTO 2000
198:
199:
200: 2900 Olg=Olg+1
201: GOTO 10
202:
203:* 2090 INTENSITY(3)=(0.987**REAL(REFlg))
204:
205: 2090 INTENSITY(2)=(0.987**REAL(REFsci+REFlg))*EXP(-LENGTHsci/140.0)
206:
207: SUM(2)=SUM(2)+INTENSITY(2)
208:
209:* CALL HF1(200,theta,INTENSITY(2))
210:* CALL HFN (20,theta)
211:
212:* write(6,*)intensity(2)
213:
214: IF(INTENSITY(2)*0.20 .GE. VEC(4)) THEN
215: Npe=Npe+1
216:*****
217: CALL FUNLXP(RISE2DECAY,FSPACE,0.,30.)
218: CALL FUNLUX(FSPACE,RANDOM2,1)
219: Tlight=RANDOM2*1000.0
220: CALL HCDIR('/MEMORY',")
221:
222: TIMEscilg=(LENGTHsci*158.0+LENGTHlg*149.0)/2.997
223: CALL RNORML(RVEC,1)
224: TIMEpmt=440.0*RVEC(1)/2.35482+9500
225: TransitTime=Tlight+TIMEscilg+TIMEpmt-2500
226: call hfn(110,Tlight)
227: call hfn(120,TransitTime)
228: nontlight=TIMEscilg+TIMEpmt-2500
229: call hfn(130,nontlight)

```

```
230:
231:
232:
233: do 5000 Inpe1=1,10000,1
234: Tnpe=REAL(Inpe1)*10.0-Transit Time
235: Vout=Tnpe*exp(-Tnpe/2500)*1600*50/(2500**2)
236: IF (Vout.GE.0.0) THEN
237: T_V(Inpe1,2)=T_V(Inpe1,2)+Vout
238: ENDIF
239: 5000 continue
240:*****
241: ELSE
242: ENDIF
243:
244: 10 CONTINUE
245:*****
246: threshold=500.0
247: DO 5600 Inpe1=1,10000
248: IF(T_V(Inpe1,2).GE.threshold)THEN
249: TDC=T_V(Inpe1,1)
250: goto 5800
251: ENDIF
252: 5600 CONTINUE
253:
254: 5800 WRITE(6,*)Tlight,TDC
255:*****
256:*****
257:
258:* probability=100.0*REAL(Msci)/(REAL(N)-REAL(O))
259:* WRITE(6,*) TZsci,probability,Msci,O
260:
261:* probability=sum(2)/sum(1)
262:* write(6,*) Npe
263:* call hfn(10,TDC)
264:* do 5900 Inpe1=1,10000
265:
266: event(1)=Npe
267: event(2)=TDC
268: call HFN(100,event)
269:
270:* 5900 continue
271:* event(2)=0.0
272:* DO 5950 Inpe1=1,4000
273:* event(1)=T_V(Inpe1,1)
274:* event(2)=T_V(Inpe1,2)+event(2)
275:* call HFN(110,event)
276:* 5950 continue
277:*
278:* 7100 continue
279:*
280:* 7000 CONTINUE
281:
282: 8000 CONTINUE
283:
284: CALL HROUT(0,ICYCLE,")
285: CALL HREND('MEMORY')
286:*
287: 9999 STOP
288: END
289:
```

```

290:*****
291:* scintillator
292:*****
293:* Light-guide face *****
294:
295: SUBROUTINE LGFACE
296: IMPLICIT NONE
297: INTEGER L,Msci,REFsci
298: REAL OAx,OAy,OAz
299: REAL APx,APy,APz
300: REAL TXsci,TYsci,TZsci
301: REAL A,B,C,D,t
302: REAL OPx,OPy,OPz
303:
304: REAL LENGTHsci
305: REAL r,rxy,theta,phi,tan0
306:
307: COMMON /POINT/OAx,OAy,OAz,APx,APy,APz,L,theta,phi
308: COMMON /TSCINTI/TXsci,TYsci,TZsci,REFsci,LENGTHsci,Msci
309:
310: A=0.0
311: B=0.0
312: C=1.0
313: D=0.0
314:
315: t=-((A*OAx+B*OAy+C*OAz+D)/(A*APx+B*APy+C*APz))
316:
317: OPx=OAx+t*APx
318: OPy=OAy+t*APy
319: OPz=OAz+t*APz
320:
321: IF((OPx.GE.0.0).AND.(OPx.LE.TXsci).AND.
322: &(OPy.GE.0.0).AND.(OPy.LE.TYsci)) THEN
323:
324: LENGTHsci=LENGTHsci+SQRT((OPx-OAx)**2
325: &+(OPy-OAy)**2+(OPz-OAz)**2)
326:
327: Msci=Msci+1
328: L=99
329:
330: APx=OPx-OAx
331: APy=OPy-OAy
332: APz=OPz-OAz
333:
334: OAx=OPx
335: OAy=OPy
336: OAz=OPz
337:
338:*****
339:* write(6,*)OAz,OAx,OAy
340:* write(6,*) OAz,OAx
341:* write(6,*) OAz,OAy
342:* write(6,*) 'fin',REFsci
343:*****
344:
345:* r=SQRT(APx**2+APy**2+APz**2)
346:* rxy=SQRT(APx**2+APy**2)
347:* theta=ACOS(APz/r)*180.0/3.141592
348:* tan0=TAN((90.0-theta)*3.141592/180.0)
349:*

```

```

350:* IF((APx.GE.0.0).AND.(APy.GE.0.0)) THEN
351:* phi=ACOS(APx/rxy)*180.0/3.141592
352:* ELSE IF((APx.LT.0.0).AND.(APy.GE.0.0)) THEN
353:* phi=ACOS(APx/rxy)*180.0/3.141592
354:* ELSE IF((APx.LT.0.0).AND.(APy.LT.0.0)) THEN
355:* phi=360.0-(ACOS(APx/rxy)*180.0/3.141592)
356:* ELSE
357:* phi=360.0-(ACOS(APx/rxy)*180.0/3.141592)
358:* ENDIF
359:
360:* WRITE(6,*) OAx,OAy,APx,APy,APz
361:* WRITE(6,*) OAx,OAy,REFsci
362:* WRITE(6,*) TIMEsci,REFsci,tan0
363:* WRITE(6,*) theta
364:* WRITE(6,*) theta,phi,REFsci
365:
366: ENDIF
367:
368: RETURN
369: END
370:
371:***** END END END *****
372:
373: SUBROUTINE ENDsci
374: IMPLICIT NONE
375: INTEGER L,REFsci,Msci
376: REAL OAx,OAy,OAz
377: REAL APx,APy,APz
378: REAL TXsci,TYsci,TZsci
379: REAL A,B,C,D,t
380: REAL OPx,OPy,OPz
381: REAL LENGThsci,theta,phi
382:
383: COMMON /POINT/OAx,OAy,OAz,APx,APy,APz,L,theta,phi
384: COMMON /TSCINTI/TXsci,TYsci,TZsci,REFsci,LENGThsci,Msci
385:
386: A=0.0
387: B=0.0
388: C=1.0
389: D=-TZsci
390:
391: t=-((A*OAx+B*OAy+C*OAz+D)/(A*APx+B*APy+C*APz))
392:
393: OPx=OAx+t*APx
394: OPy=OAy+t*APy
395: OPz=OAz+t*APz
396:
397: IF((OPx.GE.0.0).AND.(OPx.LE.TXsci).AND.
398: &(OPy.GE.0.0).AND.(OPy.LE.TYsci)) THEN
399:* write(6,*)'*****',REFsci,l,OAx,OAy,OAz
400: L=99
401:
402:*****
403:* write(6,*)OAz,OAx,OAy
404:* write(6,*) OAz,OAx
405:* write(6,*) OAz,OAy
406:* write(6,*) '*****',REFsci
407:*****
408:
409: ENDIF

```

```

410:
411: RETURN
412: END
413:
414:
415:* 01 01 01 01 01 01 01 01 01 01 01
416:
417: SUBROUTINE FACE01
418: IMPLICIT NONE
419: INTEGER L,REFsci,Msci
420: REAL OAx,OAy,OAz
421: REAL APx,APy,APz
422: REAL TXsci,TYsci,TZsci
423: REAL A,B,C,D,t
424: REAL OPx,OPy,OPz
425: REAL ANGLE,P
426: REAL LENGTHsci,theta,phi
427: REAL APC
428:
429: COMMON /POINT/OAx,OAy,OAz,APx,APy,APz,L,theta,phi
430: COMMON /TSCINTI/TXsci,TYsci,TZsci,REFsci,LENGTHsci,Msci
431:
432: A=1.0
433: B=0.0
434: C=0.0
435: D=-TXsci
436:
437: t=-((A*OAx+B*OAy+C*OAz+D)/(A*APx+B*APy+C*APz))
438:
439: OPx=OAx+t*APx
440: OPy=OAy+t*APy
441: OPz=OAz+t*APz
442:
443: IF((OPy.GE.0.0).AND.(OPy.LE.TYsci).AND.
444: &(OPz.GE.TZsci).AND.(OPz.LE.0.0)) THEN
445:
446: P=(A*APx+B*APy+C*APz)/((SQRT(APx**2+APy**2+APz**2))*
447: &(SQRT(A**2+B**2+C**2)))
448: ANGLE=ACOS(P)*180.0/3.141592
449:
450: IF((ANGLE.GE.90.0).AND.(ANGLE.LE.180.0)) ANGLE=180.0-ANGLE
451:
452: IF(ANGLE.LT.39.265247) THEN
453: L=99
454:
455:*****
456:* write(6,*)OAz,OAx,OAy
457:* write(6,*) OAz,OAx
458:* write(6,*) OAz,OAy
459:* write(6,*) '*****',REFsci
460:*****
461:
462: ELSE
463: REFsci=REFsci+1
464: LENGTHsci=LENGTHsci+SQRT((OPx-OAx)**2
465: &+(OPy-OAy)**2+(OPz-OAz)**2)
466:
467: APx=OPx-OAx
468: APy=OPy-OAy
469: APz=OPz-OAz

```

```

470: APC=-2.0*(A*APx+B*APy+C*APz)/(A**2+B**2+C**2)
471: APx=APx+APC*A
472: APy=APy+APC*B
473: APz=APz+APC*C
474:
475: OAx=OPx
476: OAy=OPy
477: OAz=OPz
478:
479: L=1
480:
481:*****
482:* write(6,*)OAz,OAx,OAy
483:* write(6,*) OAz,OAx
484:* write(6,*) OAz,OAy
485:*****
486:
487: ENDIF
488:
489: ENDIF
490:
491: RETURN
492: END
493:
494:* 02 02 02 02 02 02 02 02 02 02
495:
496: SUBROUTINE FACE02
497: IMPLICIT NONE
498: INTEGER L,REFsci,Msci
499: REAL OAx,OAy,OAz
500: REAL APx,APy,APz
501: REAL TXsci,TYsci,TZsci
502: REAL A,B,C,D,t
503: REAL OPx,OPy,OPz
504: REAL ANGLE,P
505: REAL LENGTHsci,theta,phi
506: REAL APC
507:
508: COMMON /POINT/OAx,OAy,OAz,APx,APy,APz,L,theta,phi
509: COMMON /TSCINTI/TXsci,TYsci,TZsci,REFsci,LENGTHsci,Msci
510:
511: A=0.0
512: B=1.0
513: C=0.0
514: D=-TYsci
515:
516: t=-((A*OAx+B*OAy+C*OAz+D)/(A*APx+B*APy+C*APz))
517:
518: OPx=OAx+t*APx
519: OPy=OAy+t*APy
520: OPz=OAz+t*APz
521:
522: IF((OPx.GE.0.0).AND.(OPx.LE.TXsci).AND.
523: &(OPz.GE.TZsci).AND.(OPz.LE.0.0)) THEN
524:
525: P=(A*APx+B*APy+C*APz)/((SQRT(APx**2+APy**2+APz**2))*
526: &(SQRT(A**2+B**2+C**2)))
527: ANGLE=ACOS(P)*180.0/3.141592
528:
529: IF((ANGLE.GE.90.0).AND.(ANGLE.LE.180.0)) ANGLE=180.0-ANGLE

```

```

530:
531: IF(ANGLE.LT.39.265247) THEN
532: L=99
533:
534:*****
535:* write(6,*)OAz,OAx,OAy
536:* write(6,*) OAz,OAx
537:* write(6,*) OAz,OAy
538:* write(6,*) '*****',REFsci
539:*****
540:
541: ELSE
542: REFsci=REFsci+1
543: LENGTHsci=LENGTHsci+SQRT((OPx-OAx)**2
544: &+(OPy-OAy)**2+(OPz-OAz)**2)
545:
546: APx=OPx-OAx
547: APy=OPy-OAy
548: APz=OPz-OAz
549: APC=-2.0*(A*APx+B*APy+C*APz)/(A**2+B**2+C**2)
550: APx=APx+APC*A
551: APy=APy+APC*B
552: APz=APz+APC*C
553:
554: OAx=OPx
555: OAy=OPy
556: OAz=OPz
557:
558: L=2
559:
560:*****
561:* write(6,*)OAz,OAx,OAy
562:* write(6,*) OAz,OAx
563:* write(6,*) OAz,OAy
564:*****
565:
566: ENDIF
567:
568: ENDIF
569:
570: RETURN
571: END
572:
573:
574:* 03 03 03 03 03 03 03 03 03 03 03
575:
576: SUBROUTINE FACE03
577: IMPLICIT NONE
578: INTEGER L,REFsci,Msci
579: REAL OAx,OAy,OAz
580: REAL APx,APy,APz
581: REAL TXsci,TYsci,TZsci
582: REAL A,B,C,D,t
583: REAL OPx,OPy,OPz
584: REAL ANGLE,P
585: REAL LENGTHsci,theta,phi
586: REAL APC
587:
588: COMMON /POINT/OAx,OAy,OAz,APx,APy,APz,L,theta,phi
589: COMMON /TSCINTI/TXsci,TYsci,TZsci,REFsci,LENGTHsci,Msci

```

```

590:
591: A=1.0
592: B=0.0
593: C=0.0
594: D=0.0
595:
596: t=-((A*OAx+B*OAy+C*OAz+D)/(A*APx+B*APy+C*APz))
597:
598: OPx=OAx+t*APx
599: OPy=OAy+t*APy
600: OPz=OAz+t*APz
601:
602: IF((OPy.GE.0.0).AND.(OPy.LE.TYsci).AND.
603: &(OPz.GE.TZsci).AND.(OPz.LE.0.0)) THEN
604:
605: P=(A*APx+B*APy+C*APz)/((SQRT(APx**2+APy**2+APz**2))*
606: &(SQRT(A**2+B**2+C**2)))
607: ANGLE=ACOS(P)*180.0/3.141592
608:
609: IF((ANGLE.GE.90.0).AND.(ANGLE.LE.180.0)) ANGLE=180.0-ANGLE
610:
611: IF(ANGLE.LT.39.265247) THEN
612: L=99
613:
614:*****
615:* write(6,*)OAz,OAx,OAy
616:* write(6,*) OAz,OAx
617:* write(6,*) OAz,OAy
618:* write(6,*) '*****',REFsci
619:*****
620:
621: ELSE
622: REFsci=REFsci+1
623: LENGTHsci=LENGTHsci+SQRT((OPx-OAx)**2
624: &+(OPy-OAy)**2+(OPz-OAz)**2)
625:
626: APx=OPx-OAx
627: APy=OPy-OAy
628: APz=OPz-OAz
629: APC=-2.0*(A*APx+B*APy+C*APz)/(A**2+B**2+C**2)
630: APx=APx+APC*A
631: APy=APy+APC*B
632: APz=APz+APC*C
633:
634: OAx=OPx
635: OAy=OPy
636: OAz=OPz
637:
638: L=3
639:
640:*****
641:* write(6,*)OAz,OAx,OAy
642:* write(6,*) OAz,OAx
643:* write(6,*) OAz,OAy
644:*****
645:
646: ENDIF
647:
648: ENDIF
649:

```

```

650: RETURN
651: END
652:
653:* 04 04 04 04 04 04 04 04 04 04 04
654:
655: SUBROUTINE FACE04
656: IMPLICIT NONE
657: INTEGER L,REFsci,Msci
658: REAL OAx,OAy,OAz
659: REAL APx,APy,APz
660: REAL TXsci,TYsci,TZsci
661: REAL A,B,C,D,t
662: REAL OPx,OPy,OPz
663: REAL ANGLE,P
664: REAL LENGTHsci,theta,phi
665: REAL APC
666:
667: COMMON /POINT/OAx,OAy,OAz,APx,APy,APz,L,theta,phi
668: COMMON /TSCINTI/TXsci,TYsci,TZsci,REFsci,LENGTHsci,Msci
669:
670: A=0.0
671: B=1.0
672: C=0.0
673: D=0.0
674:
675: t=-((A*OAx+B*OAy+C*OAz+D)/(A*APx+B*APy+C*APz))
676:
677: OPx=OAx+t*APx
678: OPy=OAy+t*APy
679: OPz=OAz+t*APz
680:
681: IF((OPx.GE.0.0).AND.(OPx.LE.TXsci).AND.
682: &(OPz.GE.TZsci).AND.(OPz.LE.0.0)) THEN
683:
684: P=(A*APx+B*APy+C*APz)/((SQRT(APx**2+APy**2+APz**2))*
685: &(SQRT(A**2+B**2+C**2)))
686: ANGLE=ACOS(P)*180.0/3.141592
687:
688: IF((ANGLE.GE.90.0).AND.(ANGLE.LE.180.0)) ANGLE=180.0-ANGLE
689:
690: IF(ANGLE.LT.39.265247) THEN
691: L=99
692:
693:*****
694:* write(6,*)OAz,OAx,OAy
695:* write(6,*) OAz,OAx
696:* write(6,*) OAz,OAy
697:* write(6,*) '*****',REFsci
698:*****
699:
700: ELSE
701: REFsci=REFsci+1
702: LENGTHsci=LENGTHsci+SQRT((OPx-OAx)**2
703: &+(OPy-OAy)**2+(OPz-OAz)**2)
704:
705: APx=OPx-OAx
706: APy=OPy-OAy
707: APz=OPz-OAz
708: APC=-2.0*(A*APx+B*APy+C*APz)/(A**2+B**2+C**2)
709: APx=APx+APC*A

```

```

710: APy=APy+APC*B
711: APz=APz+APC*C
712:
713: OAx=OPx
714: OAy=OPy
715: OAz=OPz
716:
717: L=4
718:
719:*****
720:* write(6,*)OAz,OAx,OAy
721:* write(6,*) OAz,OAx
722:* write(6,*) OAz,OAy
723:*****
724:
725: ENDIF
726:
727: ENDIF
728:
729: RETURN
730: END
731:
732:*****
733:* Light Guide
734:*****
735:
736:* PMT face *****
737:
738: SUBROUTINE PMTFACE
739: IMPLICIT NONE
740: INTEGER L,Mlg,REFlg
741: REAL OAx,OAy,OAz
742: REAL APx,APy,APz
743: REAL TXlg,TYlg,TZlg
744: REAL A,B,C,D,t
745: REAL OPx,OPy,OPz
746:
747: REAL LENGTHlg
748: REAL r,rx,theta,phi,tan0
749:
750: COMMON /POINT/OAx,OAy,OAz,APx,APy,APz,L,theta,phi
751: COMMON /TLG/TXlg,TYlg,TZlg,REFlg,LENGTHlg,Mlg
752:
753: A=0.0
754: B=0.0
755: C=1.0
756: D=-TZlg
757:
758: t=-((A*OAx+B*OAy+C*OAz+D)/(A*APx+B*APy+C*APz))
759:
760: OPx=OAx+t*APx
761: OPy=OAy+t*APy
762: OPz=OAz+t*APz
763:
764: IF((OPx.GE.-2.0).AND.(OPx.LE.2.0).AND.
765: &(OPy.GE.-2.0).AND.(OPy.LE.2.0)) THEN
766:
767: LENGTHlg=LENGTHlg+SQRT((OPx-OAx)**2+(OPy-OAy)**2+(OPz-OAz)**2)
768:
769: Mlg=Mlg+1

```

```

770: L=9999
771:
772: APx=OPx-OAx
773: APy=OPy-OAy
774: APz=OPz-OAz
775:
776: OAx=OPx
777: OAy=OPy
778: OAz=OPz
779:
780:*****
781:* write(6,*)OAz,OAx,OAy
782:* write(6,*) OAx,OAx
783:* write(6,*) OAz,OAy
784:* write(6,*) 'fin',REFlg
785:*****
786:
787:* r=SQRT(APx**2+APy**2+APz**2)
788:* rxy=SQRT(APx**2+APy**2)
789:* theta=ACOS(APz/r)*180.0/3.141592
790:* tan0=TAN((90.0-theta)*3.141592/180.0)
791:*
792:* IF((APx.GE.0.0).AND.(APy.GE.0.0)) THEN
793:* phi=ACOS(APx/rxy)*180.0/3.141592
794:* ELSE IF((APx.LT.0.0).AND.(APy.GE.0.0)) THEN
795:* phi=ACOS(APx/rxy)*180.0/3.141592
796:* ELSE IF((APx.LT.0.0).AND.(APy.LT.0.0)) THEN
797:* phi=360.0-(ACOS(APx/rxy)*180.0/3.141592)
798:* ELSE
799:* phi=360.0-(ACOS(APx/rxy)*180.0/3.141592)
800:* ENDIF
801:
802:* WRITE(6,*) OAx,OAy,APx,APy,APz
803:* WRITE(6,*) OAx,OAy,REFlg
804:* WRITE(6,*) TIME,REFlg,tan0
805:* WRITE(6,*) theta
806:* WRITE(6,*) theta,phi,REFlg
807:
808: ENDIF
809:
810: RETURN
811: END
812:
813:***** END END END *****
814:
815: SUBROUTINE ENDlg
816: IMPLICIT NONE
817: INTEGER L,REFlg,Mlg
818: REAL OAx,OAy,OAz
819: REAL APx,APy,APz
820: REAL TXlg,TYlg,TZlg
821: REAL A,B,C,D,t
822: REAL OPx,OPy,OPz
823: REAL LENGTHlg,theta,phi
824:
825: COMMON /POINT/OAx,OAy,OAz,APx,APy,APz,L,theta,phi
826: COMMON /TLG/TXlg,TYlg,TZlg,REFlg,LENGTHlg,Mlg
827:
828: A=0.0
829: B=0.0

```

```

830: C=1.0
831: D=0.0
832:
833: t=-((A*OAx+B*OAy+C*OAz+D)/(A*APx+B*APy+C*APz))
834:
835: OPx=OAx+t*APx
836: OPy=OAy+t*APy
837: OPz=OAz+t*APz
838:
839: IF((OPx.GE.-TXlg).AND.(OPx.LE.TXlg).AND.
840: &(OPy.GE.-TYlg).AND.(OPy.LE.TYlg)) THEN
841:* write(6,*)'*****',REFlg,l,OAx,OAy,OAz
842: L=9999
843:
844:*****
845:* write(6,*)OAz,OAx,OAy
846:* write(6,*) OAz,OAx
847:* write(6,*) OAz,OAy
848:* write(6,*) '*****',REFlg
849:*****
850:
851: ENDIF
852:
853: RETURN
854: END
855:
856:
857:* 11 11 11 11 11 11 11 11 11
858:
859: SUBROUTINE FACE11
860: IMPLICIT NONE
861: INTEGER L,REFlg,Mlg
862: REAL OAx,OAy,OAz
863: REAL APx,APy,APz
864: REAL TXlg,TYlg,TZlg
865: REAL A,B,C,D,t
866: REAL OPx,OPy,OPz
867: REAL ANGLE,P
868: REAL LENGTHlg,theta,phi
869: REAL APC
870:
871: COMMON /POINT/OAx,OAy,OAz,APx,APy,APz,L,theta,phi
872: COMMON /TLG/TXlg,TYlg,TZlg,REFlg,LENGTHlg,Mlg
873:
874: A=TZlg/(2.0-TXlg)
875: B=0.0
876: C=-1.0
877: D=-TZlg*TXlg/(2.0-TXlg)
878:
879: t=-((A*OAx+B*OAy+C*OAz+D)/(A*APx+B*APy+C*APz))
880:
881: OPx=OAx+t*APx
882: OPy=OAy+t*APy
883: OPz=OAz+t*APz
884:
885: IF((OPz.GE.0.0).AND.(OPz.LE.TZlg).AND.
886: &((-0.5*TZlg*OPy-OPz+2.0*TZlg).GE.0.0).AND.
887: &((0.5*TZlg*OPy-OPz+2.0*TZlg).GE.0.0)) THEN
888:
889: P=(A*APx+B*APy+C*APz)/((SQRT(APx**2+APy**2+APz**2))*

```

```

890: &(SQRT(A**2+B**2+C**2)))
891: ANGLE=ACOS(P)*180.0/3.141592
892:
893: IF((ANGLE.GE.90.0).AND.(ANGLE.LE.180.0)) ANGLE=180.0-ANGLE
894:
895: IF(ANGLE.LT.42.155184) THEN
896: L=9999
897:
898:*****
899:* write(6,*)OAz,OAx,OAy
900:* write(6,*) OAz,OAx
901:* write(6,*) OAz,OAx
902:* write(6,*) '*****',REFlg
903:*****
904:
905: ELSE
906: REFlg=REFlg+1
907: LENGThlg=LENGThlg+SQRT((OPx-OAx)**2+(OPy-OAy)**2+(OPz-OAz)**2)
908:
909: APx=OPx-OAx
910: APy=OPy-OAy
911: APz=OPz-OAz
912: APC=-2.0*(A*APx+B*APy+C*APz)/(A**2+B**2+C**2)
913: APx=APx+APC*A
914: APy=APy+APC*B
915: APz=APz+APC*C
916:
917: OAx=OPx
918: OAy=OPy
919: OAz=OPz
920:
921: L=11
922:
923:*****
924:* write(6,*)OAz,OAx,OAy
925:* write(6,*) OAz,OAx
926:* write(6,*) OAz,OAx
927:*****
928:
929: ENDIF
930:
931: ENDIF
932:
933: RETURN
934: END
935:
936:* 12 12 12 12 12 12 12 12 12
937:
938: SUBROUTINE FACE12
939: IMPLICIT NONE
940: INTEGER L,REFlg,Mlg
941: REAL OAx,OAy,OAz
942: REAL APx,APy,APz
943: REAL TXlg,TYlg,TZlg
944: REAL A,B,C,D,t
945: REAL OPx,OPy,OPz
946: REAL ANGLE,P
947: REAL LENGThlg,theta,phi
948: REAL APC
949:

```

```

950: COMMON /POINT/OAx,OAy,OAz,APx,APy,APz,L,theta,phi
951: COMMON /TLG/TXlg,TYlg,TZlg,REFlg,LENGTHlg,Mlg
952:
953: A=0.0
954: B=-0.5*TZlg
955: C=-1.0
956: D=2.0*TZlg
957:
958: t=-((A*OAx+B*OAy+C*OAz+D)/(A*APx+B*APy+C*APz))
959:
960: OPx=OAx+t*APx
961: OPy=OAy+t*APy
962: OPz=OAz+t*APz
963:
964: IF((OPz.GE.0.0).AND.(OPz.LE.TZlg).AND.
965: &((-TZlg*(OPx-TXlg)/(2.0-TXlg)+OPz).GE.0.0).AND.
966: &((-TZlg*(OPx+TXlg)/(-2.0+TXlg)+OPz).GE.0.0)) THEN
967:
968: P=(A*APx+B*APy+C*APz)/((SQRT(APx**2+APy**2+APz**2))*
969: &(SQRT(A**2+B**2+C**2)))
970: ANGLE=ACOS(P)*180.0/3.141592
971:
972: IF((ANGLE.GE.90.0).AND.(ANGLE.LE.180.0)) ANGLE=180.0-ANGLE
973:
974: IF(ANGLE.LT.42.155184) THEN
975: L=9999
976:
977:*****
978:* write(6,*)OAz,OAx,OAy
979:* write(6,*) OAz,OAx
980:* write(6,*) OAz,OAy
981:* write(6,*) '*****',REFlg
982:*****
983:
984: ELSE
985: REFlg=REFlg+1
986: LENGTHlg=LENGTHlg+SQRT((OPx-OAx)**2+(OPy-OAy)**2+(OPz-OAz)**2)
987:
988: APx=OPx-OAx
989: APy=OPy-OAy
990: APz=OPz-OAz
991: APC=-2.0*(A*APx+B*APy+C*APz)/(A**2+B**2+C**2)
992: APx=APx+APC*A
993: APy=APy+APC*B
994: APz=APz+APC*C
995:
996: OAx=OPx
997: OAy=OPy
998: OAz=OPz
999:
1000: L=12
1001:
1002:*****
1003:* write(6,*)OAz,OAx,OAy
1004:* write(6,*) OAz,OAx
1005:* write(6,*) OAz,OAy
1006:*****
1007:
1008: ENDIF
1009:

```

```

1010: ENDIF
1011:
1012: RETURN
1013: END
1014:
1015:
1016:* 13 13 13 13 13 13 13 13 13
1017:
1018: SUBROUTINE FACE13
1019: IMPLICIT NONE
1020: INTEGER L,REFlg,Mlg
1021: REAL OAx,OAy,OAz
1022: REAL APx,APy,APz
1023: REAL TXlg,TYlg,TZlg
1024: REAL A,B,C,D,t
1025: REAL OPx,OPy,OPz
1026: REAL ANGLE,P
1027: REAL LENGThlg,theta,phi
1028: REAL APC
1029:
1030: COMMON /POINT/OAx,OAy,OAz,APx,APy,APz,L,theta,phi
1031: COMMON /TLG/TXlg,TYlg,TZlg,REFlg,LENGThlg,Mlg
1032:
1033: A=TZlg/(-2.0+TXlg)
1034: B=0.0
1035: C=1.0
1036: D=TZlg*TXlg/(-2.0-TXlg)
1037:
1038: t=-((A*OAx+B*OAy+C*OAz+D)/(A*APx+B*APy+C*APz))
1039:
1040: OPx=OAx+t*APx
1041: OPy=OAy+t*APy
1042: OPz=OAz+t*APz
1043:
1044: IF((OPz.GE.0.0).AND.(OPz.LE.TZlg).AND.
1045: &((-0.5*TZlg*OPy-OPz+2.0*TZlg).GE.0.0).AND.
1046: &( 0.5*TZlg*OPy-OPz+2.0*TZlg).GE.0.0)) THEN
1047:
1048: P=(A*APx+B*APy+C*APz)/((SQRT(APx**2+APy**2+APz**2))*
1049: &(SQRT(A**2+B**2+C**2)))
1050: ANGLE=ACOS(P)*180.0/3.141592
1051:
1052: IF((ANGLE.GE.90.0).AND.(ANGLE.LE.180.0)) ANGLE=180.0-ANGLE
1053:
1054: IF(ANGLE.LT.42.155184) THEN
1055: L=9999
1056:
1057:*****
1058:* write(6,*)OAz,OAx,OAy
1059:* write(6,*) OAz,OAx
1060:* write(6,*) OAz,OAy
1061:* write(6,*) '*****',REFlg
1062:*****
1063:
1064: ELSE
1065: REFlg=REFlg+1
1066: LENGThlg=LENGThlg+SQRT((OPx-OAx)**2+(OPy-OAy)**2+(OPz-OAz)**2)
1067:
1068: APx=OPx-OAx
1069: APy=OPy-OAy

```

```

1070: APz=OPz-OAz
1071: APC=-2.0*(A*APx+B*APy+C*APz)/(A**2+B**2+C**2)
1072: APx=APx+APC*A
1073: APy=APy+APC*B
1074: APz=APz+APC*C
1075:
1076: OAx=OPx
1077: OAy=OPy
1078: OAz=OPz
1079:
1080: L=13
1081:
1082:*****
1083:* write(6,*)OAz,OAx,OAy
1084:* write(6,*) OAz,OAx
1085:* write(6,*) OAz,OAy
1086:*****
1087:
1088: ENDIF
1089:
1090: ENDIF
1091:
1092: RETURN
1093: END
1094:
1095:* 14 14 14 14 14 14 14 14 14 14
1096:
1097: SUBROUTINE FACE14
1098: IMPLICIT NONE
1099: INTEGER L,REFlg,Mlg
1100: REAL OAx,OAy,OAz
1101: REAL APx,APy,APz
1102: REAL TXlg,TYlg,TZlg
1103: REAL A,B,C,D,t
1104: REAL OPx,OPy,OPz
1105: REAL ANGLE,P
1106: REAL LENGTHlg,theta,phi
1107: REAL APC
1108:
1109: COMMON /POINT/OAx,OAy,OAz,APx,APy,APz,L,theta,phi
1110: COMMON /TLG/TXlg,TYlg,TZlg,REFlg,LENGTHlg,Mlg
1111:
1112: A=0.0
1113: B=0.5*TZlg
1114: C=-1.0
1115: D=2.0*TZlg
1116:
1117: t=-((A*OAx+B*OAy+C*OAz+D)/(A*APx+B*APy+C*APz))
1118:
1119: OPx=OAx+t*APx
1120: OPy=OAy+t*APy
1121: OPz=OAz+t*APz
1122:
1123: IF((OPz.GE.0.0).AND.(OPz.LE.TZlg).AND.
1124: &((-TZlg*(OPx-TXlg)/(2.0-TXlg)+OPz).GE.0.0).AND.
1125: &((-TZlg*(OPx+TXlg)/(-2.0+TXlg)+OPz).GE.0.0)) THEN
1126:
1127: P=(A*APx+B*APy+C*APz)/((SQRT(APx**2+APy**2+APz**2))*
1128: &(SQRT(A**2+B**2+C**2)))
1129: ANGLE=ACOS(P)*180.0/3.141592

```

```

1130:
1131: IF((ANGLE.GE.90.0).AND.(ANGLE.LE.180.0)) ANGLE=180.0-ANGLE
1132:
1133: IF(ANGLE.LT.42.155184) THEN
1134: L=9999
1135:
1136:*****
1137:* write(6,*)OAz,OAx,OAy
1138:* write(6,*) OAz,OAx
1139:* write(6,*) OAz,OAy
1140:* write(6,*) '*****',REFlg
1141:*****
1142:
1143: ELSE
1144: REFlg=REFlg+1
1145: LENGThlg=LENGThlg+SQRT((OPx-OAx)**2+(OPy-OAy)**2+(OPz-OAz)**2)
1146:
1147: APx=OPx-OAx
1148: APy=OPy-OAy
1149: APz=OPz-OAz
1150: APC=-2.0*(A*APx+B*APy+C*APz)/(A**2+B**2+C**2)
1151: APx=APx+APC*A
1152: APy=APy+APC*B
1153: APz=APz+APC*C
1154:
1155: OAx=OPx
1156: OAy=OPy
1157: OAz=OPz
1158:
1159: L=14
1160:
1161:*****
1162:* write(6,*)OAz,OAx,OAy
1163:* write(6,*) OAz,OAx
1164:* write(6,*) OAz,OAy
1165:*****
1166:
1167: ENDIF
1168:
1169: ENDIF
1170:
1171: RETURN
1172: END
1173:
1174:*****
1175:* random numbers according to function of SINE
1176:*****
1177:
1178: REAL FUNCTION RANSIN(RANDOM1)
1179: REAL RANDOM1
1180: RANSIN=2*3.141592*SIN(RANDOM1*3.141592/180.0)
1181: RETURN
1182: END
1183:
1184:*****
1185:* Light Output - Time
1186:*****
1187:
1188: REAL FUNCTION RISE2DECAY(RANDOM2)
1189: REAL RANDOM2

```

---

```
1190: RISE2DECAY=(EXP(-RANDOM2/0.7)-EXP(-RANDOM2/1.8))/(0.7-1.8)
1191: RETURN
1192: END
1193:
1194:*****
1195:
1196:
```

