

# チェレンコフ検出器の作成とこれを用いた粒子線の測定

太田 寛明, 中脇 稔貴

京都大学理学部

2017年4月13日

## 概要

媒質中を超光速で運動する高エネルギーの荷電粒子は、進行方向に対し円状にチェレンコフ光を放出する。我々はこの円状の放射光を検出して画像として観測するためにチェレンコフ検出器を作成し、宇宙線ミュオンおよび $^{90}\text{Y}$ 由来の $\beta$ 線について測定を行った。前者についてはそれと判別できる結果は得られなかったが、後者はリング状のチェレンコフ光を観測することができた。

## 1 序論

### 1.1 概要

本実験では、アクリルに入射した宇宙線ミュオンにより生じるチェレンコフ光を直接的に観測することを目的とした。また努力目標として、チェレンコフリングの半径から飛来してくる宇宙線ミュオンの速度を求めようとした。

### 1.2 動機

高エネルギー実験において、チェレンコフ光の検出は Super-K や LHC など重要な役割を果たしている。[1][2] また 2008 年度の P1 実験において、チェレンコフ光の検出を行っていたが、明確な結果は得られなかった。このようなことからチェレンコフ光、ひいてはチェレンコフリングを実際に、2008 年度実験とはまた別の方法で、観測してみたいと思いこの実験を行うに至った。

### 1.3 背景

Super-K では約 13,000 本の光電子増倍管を用いて、チェレンコフリングを観測している。[1] (後に説明するが、この検出器はいわゆる "直接型" で、本実験と原理的には同じである。これに対して 2008 年度 P1 実験での検出器は "間接型" である。2.2)。またチェレンコフリングの検出器において、粒子の速度を求めることができる。(2.1.1)。したがって、他に運動量等が分かれば、それらより入射荷電粒子の質量を特定でき粒子の識別を行える。この原理を用いることで、実際に Belle 実験では荷電 K/ 粒子の識別を行っている。[4]

## 2 実験原理

### 2.1 チェレンコフ光

チェレンコフ光は荷電粒子 (速度  $v$ ) が誘電体中 (屈折率  $n$ ) を、その物質中の光の伝播速度より大きい速度で通過するときが発生する。[?]

2.1.1 チェレンコフ角と速度の関係

チェレンコフ光発生条件より

$$v > \frac{c}{n} \quad (1)$$

このとき光は、次の図 1 ように粒子の進む方向に対してある一定の角度で前方に円錐状に放射される。

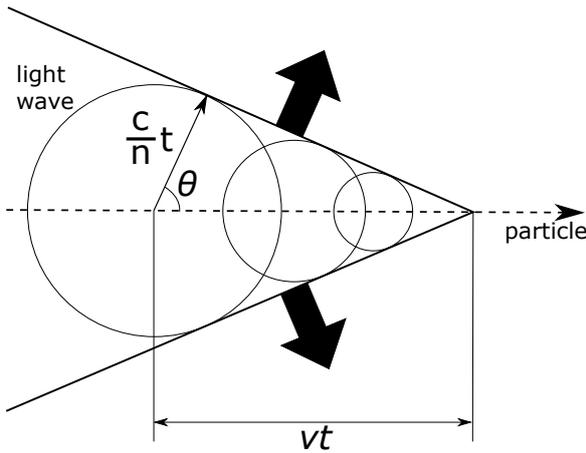


図 1 チェレンコフ放射

図 1 より ( $\beta = \frac{v}{c}$  として)

$$\cos \theta = \frac{1}{n\beta} \quad (2)$$

という関係式が成り立ち、チェレンコフ光の角度  $\theta$  から入射荷電粒子の速度を求めることができる。

2.1.2 チェレンコフリング半径

またチェレンコフ光は以上で見た特性から、位置情報を保持する光検出器を用いれば円状に観測される。したがって図 2 のような検出器を用いれば、チェレンコフリングの最大半径からチェレンコフ角  $\theta$  が求まり、粒子の入射速度が計算できる。実際に、図 2 より

$$\frac{R}{D} = \tan \theta = \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \theta} - 1} = \sqrt{(n\beta)^2 - 1} \quad (3)$$

よって

$$v = \frac{c}{n} \sqrt{1 + \left(\frac{R}{D}\right)^2} \quad (4)$$

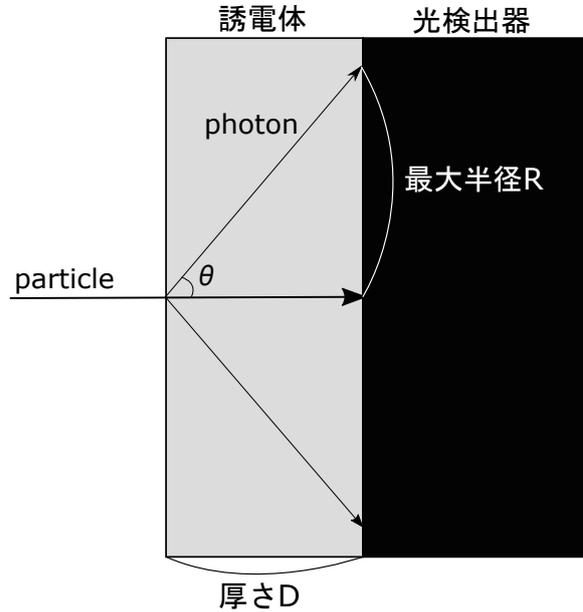


図 2 検出器全体

2.1.3 単位面積あたりのチェレンコフ光の検出数期待値

電荷  $Ze$  をもつ粒子が厚さ  $L$  の物質を通過するとき、単位振動数、単位立体角あたりのエネルギー損失は

$$\frac{d^2 E}{d\omega d\Omega} = Z^2 \frac{\alpha \hbar}{c} n \beta^2 \sin^2 \theta \left| \frac{\omega L}{2\pi \beta c} \frac{\sin \xi(\phi)}{\xi(\phi)} \right|^2 \quad (5)$$

ここで、

$$\xi(\phi) = \frac{\omega L}{2\beta c} (-\beta n \cos \phi) \quad (6)$$

立体角にわたって式 (5) を積分すると

$$-\frac{dE}{d\omega} = Z^2 \frac{\alpha \hbar}{c} \omega L \sin^2 \theta \quad (7)$$

これを  $\hbar\omega, L$  で割ると単位振動数、単位長さあたりに放出される光子数が得られ、

$$\frac{d^2 N}{d\omega dx} = \frac{Z^2 \alpha}{c} \sin^2 \theta = \frac{Z^2 \alpha}{c} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right) \quad (8)$$

波長で表すと,

$$\frac{d^2N}{d\lambda dx} = \frac{2\pi Z^2 \alpha}{\lambda^2} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right) \quad (9)$$

Photomultipliers の最も高感度な波長範囲は 350nm(= $\lambda_1$ ) ~ 550nm(= $\lambda_2$ ) であるからそのもとで積分を行うと

$$\begin{aligned} \frac{dN}{dx} &= 2\pi Z^2 \alpha \sin^2 \theta \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right) \quad (10) \\ &\approx 475 Z^2 \sin^2 \theta \text{ photon/cm} \end{aligned}$$

単位面積当たりの光子数は  $dS = 2\pi r dr = 2\pi d \tan^2 \theta dx$  より ( $d$  と  $r$  の関係は図 3)

$$\begin{aligned} \frac{dN}{dS} &= \frac{Z^2 \alpha}{\beta^2 n^2 d} \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right) \quad (11) \\ &\approx 75.8 \frac{Z^2}{d(\text{cm})} \cos^2 \theta \text{ photon/cm}^2 \end{aligned}$$

よって検出数期待値  $\nu$  は

$$\nu = \frac{dN}{dS} \cdot S \cdot p = \frac{Z^2 \alpha}{\beta^2 n^2 d} \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right) S p \quad (12)$$

(ここで  $S$ :検出面の面積  $p$ :量子効率 ~ 30%  $\Rightarrow p = \frac{1}{4}$ )

### 2.2 代表的なチェレンコフリング観測方法

チェレンコフリングを観測する検出器, いわゆる RICH 検出器 (Ring Image Cherenkov Counter) は二種類ある。一つが 2008 年度 P1 実験で用いられた, 球面鏡を用いた間接型検出器. そしてもう一つが本実験で用いる, 直接型の検出器である. [7]

#### 2.2.1 球面鏡を用いた間接型検出器

これは, チェレンコフ光を, 球面鏡を用いて CCD カメラで観測可能な光まで増幅して観測する検出器. メリットとしては, 高精度な角度分解能, 多光量である点があげられる. デメリットとしては, 検出器のサイズが大きくなりがちなのと, 斜め入射の場合正確に観測できないというものがある. ( 図 4). [?]

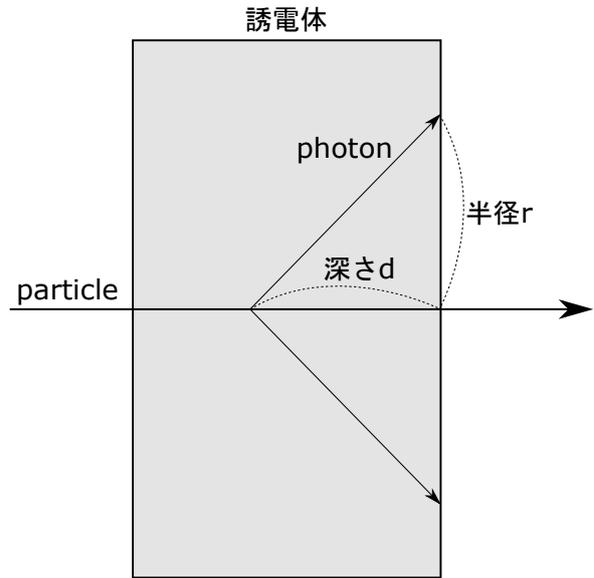


図 3 リング半径と深さの関係

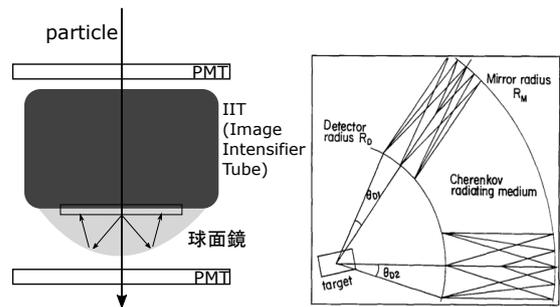


図 4 間接型検出器

#### 2.2.2 直接型検出器

これは, チェレンコフ光を, 位置情報を保持しつつ観測する検出器. Super-K では, この方法で約 13,000 本の光電子増倍管を用いてチェレンコフリングを観測している. [1] メリットとしては, 検出器をコンパクトにすることができ, 粒子の飛来方向を問わず, 発生するリングを直接的に検出できる点があげられる. デメリットには, チェレンコフ角の精度, また光量が 2.2.1 のものに及ばず, 正確に観測するために高い位置分解能が必要である, というものがある. ( 図 5).

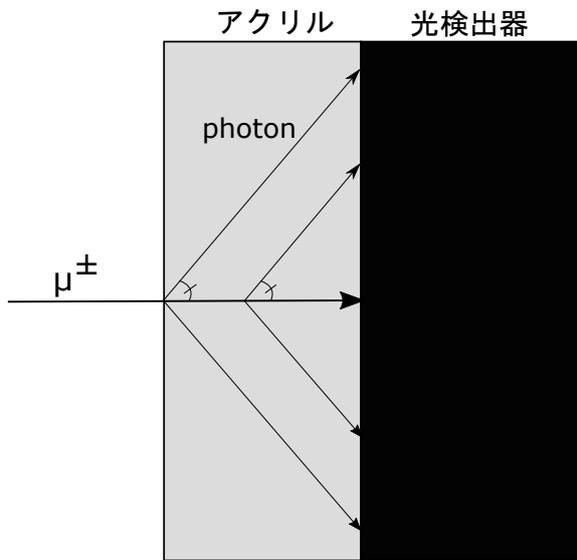


図5 直接型検出器

### 2.3 今回の実験

今回の実験では、地上付近で容易に観測できる宇宙線ミュオンがチェレンコフ光発生の原因と考え、発生するチェレンコフリングを明確に観測できるように各材料の用意を行った。

今回チェレンコフ光を発生させるための誘電体として、アクリルを用いた。アクリルの屈折率は  $n = 1.49$  で、宇宙線ミュオン速度は、因子が  $\gamma \approx 9.0 \pm 2.5$  であるから  $\beta \approx 0.992 \pm 0.004$  である。[?]これと式2よりチェレンコフ角  $\theta$  は  $\theta \approx 47.4 \pm 0.2 \text{ deg}$  と分かる。さらに全 64channel 中の 1channel 当りの検出面の面積  $S$  は図6より、 $S = \left(\frac{2.3}{4}\right)^2 \times \frac{1}{2} \approx 0.17 \text{ cm}^2$  ここで  $\frac{1}{2}$  倍したのは、リングの縁を掠めるセルについて、セル中の面積の半分がリング内にある場合に 1光子が期待できるような厚さを求めようとしているからである。

これらの情報と、2.1.3 で導出した式より、最大リング半径  $R$  と検出光子数期待値  $\nu$  は

$$R = D \tan \theta \sim D (\text{cm}) \times 1.092 \quad \text{cm} \quad (13)$$

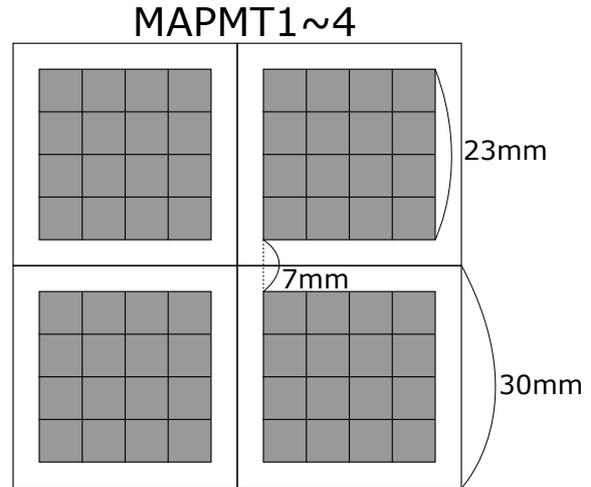


図6 総検出機の検出面

$$\nu \sim \frac{1.47}{D (\text{cm})} \text{ photon} \quad (14)$$

これらより、1channel 当たりの photon 数期待値が 1 に近く、また最大リングが検出器に収まるようにアクリルの厚さを  $D=14\text{mm}$  と決定した。この場合、最大リング半径  $R \sim 15 \text{ mm}$  で、1channel 当りの photon 数期待値  $\nu \sim 1.05 \text{ photon}$  となる。

今回の検出器の概要図は図7の通りである。この検出器には 64ch あるが、実験環境の問題により実際に PC に接続されているのは色がより濃い部分の 32ch のみとなっている。この検出器では、およそ中心に垂直に入射した宇宙線ミュオンから生じるチェレンコフリングに着目して円形の信号を観測することを目的としている。

### 2.4 補足

アクリルの透過長を考慮した方がいいのでは、という指摘があったので補足という形で見てみる。アクリルの透過率は図8のよう。

PMMA がアクリル樹脂を指している。この図によれば、波長が 400nm 以下の光はほとんど透過しないことがわかる。よって大雑把ではあるが 2.1.3 で波長について 350nm ~ 550nm で

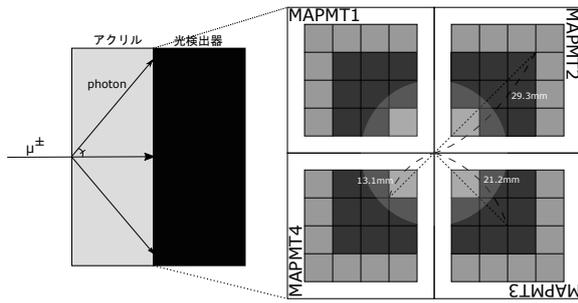


図7 検出面とリング半径の関係

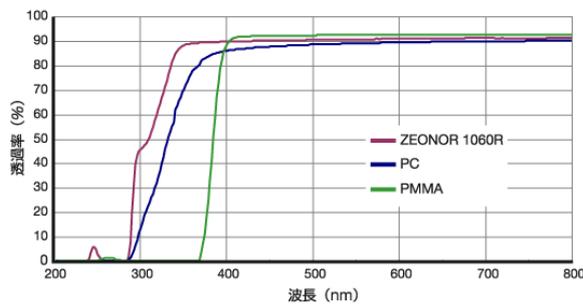


図8 光の波長に対するアクリルの透過率

積分を行っていたのを 400nm~550nm で積分を行えば、より現実に即した結果がでると考えられる。すると検出光子数期待値は

$$\nu \sim \frac{0.968}{D(\text{cm})} \text{ photon} \quad (15)$$

$$\Rightarrow \nu \sim 0.69 \text{ photon}$$

この結果から、リングの縁では正確に検出を行えていなかったと考えられる。[3]

### 3 実験概要

我々が行った2つの実験について、概要を説明する。

#### 3.1 宇宙線ミュオンの測定

今回の実験の当初の目的である。シンチレーションカウンターの信号をトリガとして32chの光検出器からの信号を読み出し、チェレンコフリングを観測する。

宇宙線ミュオンはエネルギーが高いため、

チェレンコフ光を絶えず放出しながら放射媒質を貫通する。従って、観測されるリングは中が詰まった円状になることが期待される。

#### 3.2 $^{90}\text{Sr}$ の $\beta$ 線の測定

本来は実験装置の機能を確認するための予備実験であった。 $^{90}\text{Sr}$ の放射線源を放射媒質の上に乗せ、その $\beta$ 線が放出するチェレンコフ光を検出する。トリガリングは検出器の信号を用いたFADCのセルフトリガを利用する。

$\beta$ 線はエネルギーがあまり高くなく、2枚のシンチレータを介すると大幅に減衰してしまう<sup>1)</sup>ため、シンチレーションカウンターをトリガに用いることができない。また、媒質中を進む間にもエネルギーを大きく失っていくので、ある時点で光速を下回り、リングは中空の環状になると期待される。

こちらの実験では、予め線源を一部を除き遮蔽しておくことで、 $\beta$ 線の検出器への入射位置と角度を制限できる。今回は専用の遮蔽パーツを作ることはせず、消しゴムと手近なところにあったアルミニウムらしき穴の空いた金属板で即席の $\beta$ 線遮蔽を行った。また、 $\beta$ 線だけでなくその制動放射も遮蔽する必要があるため、部屋の隅で拾った鉛らしき金属板を、媒質の上、穴のまわりに図9のように配置した。

## 4 実験装置

### 4.1 概念図

今回の実験で最終的に用いた装置の概略を図10に示す。以下では、各部位に関する詳細を述べる。

### 4.2 チェレンコフ光検出器

4×4 マルチアノード光電子増倍管アセンブリ H6568 を4本、2×2の正方形に束ねて使用

<sup>1)</sup> 上下に並べた2つのカウンターによるトリガリング頻度の違いで確認。

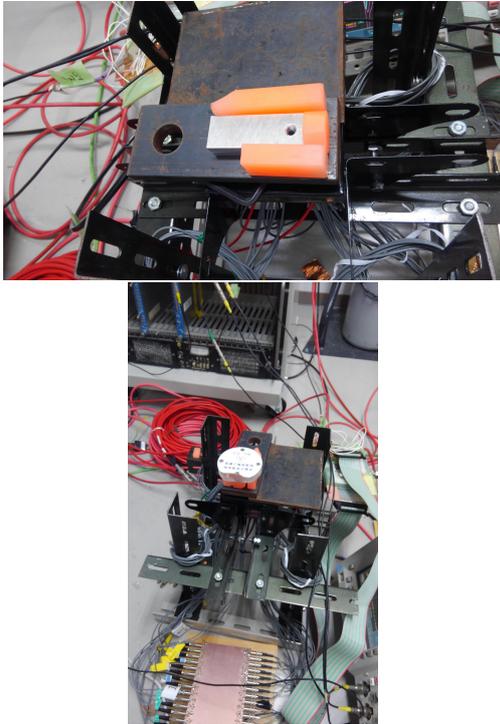


図9 上: $\beta$ 線遮蔽フレームの写真. 下: $\beta$ 線源を配置した状態.

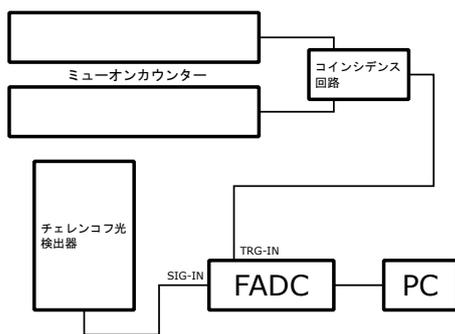


図10 実験装置の概念図. 宇宙線が真上から飛来することを想定し, カウンター2つのシンチレーション部と検出器は縦に並べている.

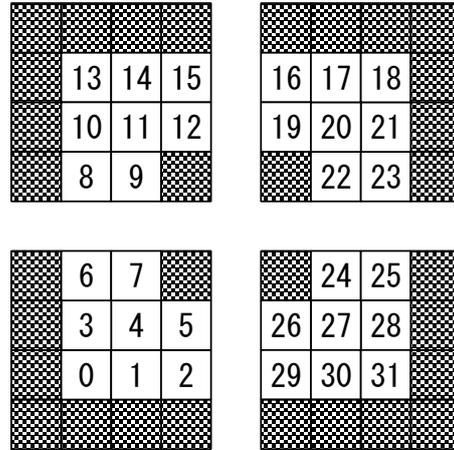


図11 検出器のチャンネル配置図. 市松柄のチャンネルは今回の実験では読み出さない.

した. 各々の検出面は  $23 \times 23 \text{mm}^2$  を 16 チャンネルに分割しており, 外周に幅 3.5mm の枠が付属する. 信号の確認および実験はすべて -950V の電圧をかけて行った. なお, FADC で読み出せるのが 32ch までであるため, 実験では図 11 のナンバリングされたチャンネルのみを読み取った.

輻射媒質には, 媒質側面での反射光の検出を避けつつ検出面近傍を通過したミュオンの放出光も検出するため,  $84 \times 84 \text{mm}^2$  のアクリル板を用いた. 光電面との間には全反射を抑えるため光学グリース TSF451-5M を充填した. 遮光はブラックテープで行い, ハンドライトで確認した.

#### 4.3 ミューオンカウンター

10cm 四方 [6] のプラスチックシンチレータと光電子増倍管を, ライトガイドで接続したものを 2 組用いた. これは 2015 年度課題研究 P1 において, スパークチェンバーに用いられていたものである.

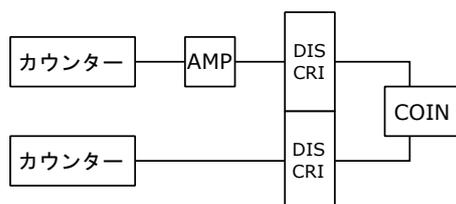


図 12 コインシデンス検出用 NIM 回路。

#### 4.4 コインシデンス回路

2つのミュオンカウンターの信号を FADC のトリガとするため、図 12 のような NIM 回路を用いた。

一方のカウンターのゲインを調節するため、倍率 10 倍のアンプを挿入している。このカウンターは極端にゲインが小さく、他方の 1/10 ほどしか無いばかりか、ディスクリミネータの閾値の下限を下回っており、アンプを通すことで初めてコインシデンスに使える信号を出すようになった。この際にノイズも増幅されたが、信号は十分に確認できた。

ディスクリミネータの閾値は、両カウンターのコインシデンスが見られる 10mV 以上の信号に反応するよう設定した。

最終的に、概ね 1Hz 程度のコインシデンス信号が見られた。

#### 4.5 アナログ-デジタル変換器

32ch フラッシュ ADC DT5740 を用いた。入力のチャンネルナンバーは図 11 のものと一致させている。

## 5 結果

### 5.1 データの画像化

この実験で得られるデータは、32ch 分の信号の ADC 分布である。ここからチェレンコフリングの画像を得るために、次の手順でデータを画像化した。

1. チャンネルごとにトリガ位置の手前までの ADC カウントを平均し、ベースラインとする。  
また、この範囲でのカウントの最大値を暗電流閾値とする。
2. 1 を行った時間領域より後のデータについて、暗電流閾値を超えるカウントを持つビンのみを抽出してベースラインを基準に積分し、そのチャンネルで検出された光量とする。
3. ROOT を用いて、32 個のチャンネルに対応する矩形を、実際の寸法に基づいて配置した図を描く。
4. 2 で得た光量を各々のチャンネルのゲインで規格化し、黒から白までのグレースケールで表して、3 の対応する矩形領域に流し込む。

以上の手順により、黒から白にかけてのグラデーション状にチェレンコフリングが観測できる。

### 5.2 宇宙線ミュオンの測定結果

図 13 に宇宙線ミュオンの測定 14 回分の結果を示す。いずれも離れた数チャンネルが光っているに留まり、リングを観測できたとは言いがたい。

### 5.3 線源からの $\beta$ 線の測定結果

図 14 に  $^{90}\text{Sr}$  を用いた  $\beta$  線の測定 10 回分の結果を示す。線源は目測で図の右下の ch0<sup>2)</sup> の真上付近に配置しており、右上から左下にかけて帯状に光っているイベントは、右下を中心とする環状のチェレンコフリングであると考えられる。

<sup>2)</sup> この節、および付録に挙げる結果の画像は、図 11 の配置から左に 90° 回転しており、従って図 11 で左下にあった ch0 は右下に来ている。

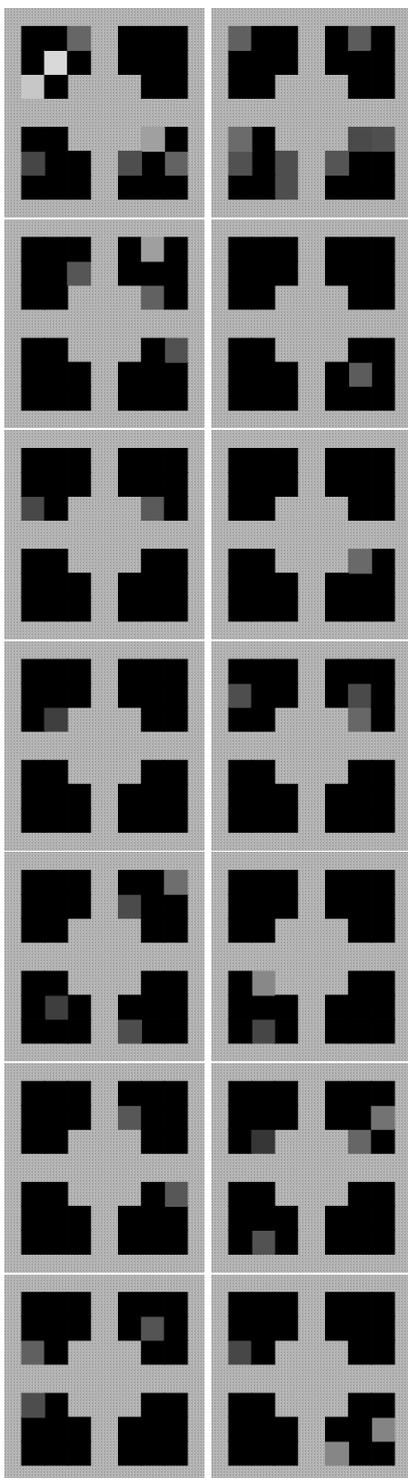


図 13 宇宙線ミュオンの測定結果. リングはおろか, 連続した構造すらほとんど見られない.

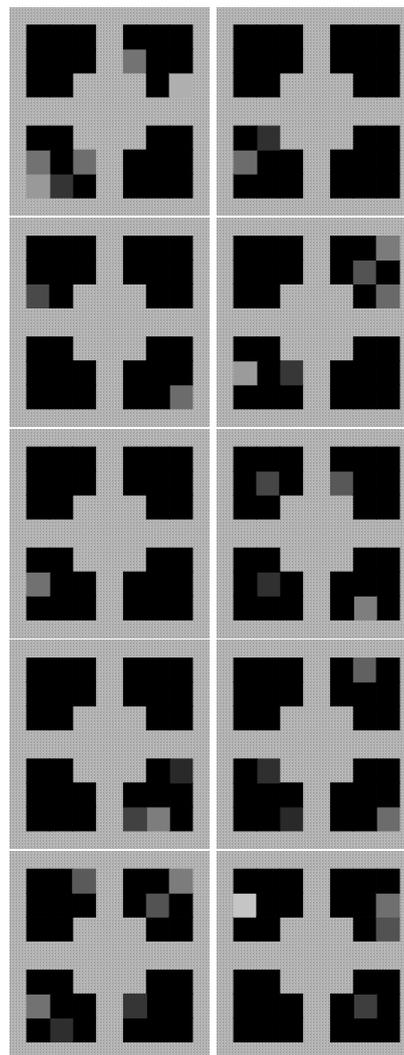


図 14 線源からの  $\beta$  線の測定結果.

## 6 考察

### 6.1 宇宙線ミュオンの測定について

宇宙線ミュオンのチェレンコフリングが観測できなかった理由として, 線源からの  $\beta$  線が観測できていることを考えると, 放出されるチェレンコフ光の光量が少なかったことが考えられる.

2.1.3 節の計算より, 検出面上でそれに垂直な入射軸から距離  $r$  離れた点での単位面積あたり

の入射光量は,

$$\frac{dN}{dS} = \frac{z^2 \alpha}{\beta^2 n^2 r \sqrt{\beta^2 n^2 - 1}} \left( \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) \quad (16)$$

で与えられ,  $\beta$  に対して単調に減少する ( $\beta^2 n^2 \sqrt{\beta^2 n^2 - 1}$  に反比例). 従って, 概ね  $\beta \geq 0.988$  ( $6.5 \leq \gamma \leq 11.5$ [5]) である宇宙線ミュオンに対し, 我々が用いた  $\beta$  線は最大でも  $\beta \sim 0.952$  ( $^{90}\text{Sr}$  の娘核  $^{90}\text{Y}$  の  $\beta$  崩壊エネルギー 2280keV[8]) なので,  $\beta$  線は少なくともミュオンの 1.16 倍ほどの光子を出すことになる.

実際は  $\beta$  線は 0 から崩壊エネルギーまでの連続的なエネルギー値をとり, その平均は最大値の約 1/3[9] なので, この場合の  $\beta \sim 0.689$  を用いると, ミュオンの 9.69 倍ほどの光子が得られることになる. よって,  $\beta$  線が有意にノイズと判別できる信号を与えたのに対し, ミュオンによる信号が小さかったために, 暗電流を除去するための閾値を下回り, 読み取れなかったものと思われる.

この問題を解決するには, 使用したものより S/N 比が良い光電子増倍管を使う必要がある. また, これを解決しても, リングの半径から速度を求める場合, 次節に述べる  $\beta$  線と同様の解像度の問題が残る.

## 6.2 線源からの $\beta$ 線の測定について

入射位置周辺を中心に環状にチェレンコフ光が検出されていることは判ったが, 光が検出面に入射しても必ずしも検出されないこと, そして今の位置分解能ではその穴を隣接するチャンネルの信号から埋めるのが難しいことから, リングの半径および幅を求めることは出来なかった.

この目的を達成する場合, 先に述べたように宇宙線ミュオンに比べて光量が多いため, S/N 比は今の増倍管から大きく改善する必要は

無く, チャンネルの増加 (小型化) による分解能の向上だけで十分だと考えられる<sup>3)</sup>. あるいは, 一体型の検出器を使って中央部分の死角をなくすことでも明確なリングが得られやすいかも知れない.

また, リング全体を観測することに拘らないならば,  $\beta$  線が正確に座標の判っている媒質面上の一点に放射されるよう遮蔽を設計し, リング内外の輪郭の推定される半径から, これらが検出器の光電面上に収まるように装置を設計することで, その  $\beta$  線の速度および飛程を求めることもできる. これならば今回用いた光電子増倍管でも可能で, かつ速度とエネルギーから電子の質量を計算することで, 文献値との比較もできる.

## 付録 A 考察に用いなかったデータ

以下では, 最終的に 5.1 節での設定に至るまでに, 色々な手順やパラメータを試した際の結果をまとめる.

### A.1 宇宙線ミュオンのデータ

図 15 は, 最初に測定を行ったときの結果である. 5.1 節でデータを用いた測定との相違点は,

- ポストトリガ<sup>4)</sup>を 50% に設定しており, ベースライン算定時のサンプル数は 128(全ピンの 1/8) にしていた.
- 暗電流閾値を設定しておらず, 積分はベースラインを下回るピン全てに対し行って

<sup>3)</sup> チャンネルのサイズを据え置きにする場合は, 媒質を厚くして半径を広げることで同様の効果を得られるが, 媒質による減衰は無視できるとしても, 単位面積あたりの光量は減るため, やはり S/N 比の高いものが必要になる.

<sup>4)</sup> 固定された時間幅 (あるいはピン数) に対し, その何割をトリガ位置の後ろに割り当てるかの設定を行うパラメータ. オシロスコープでいうトリガ位置の移動に当たるが, FADC ではトリガ位置の前後でどれだけのデータを記録するかがこれに依存するため, 重要である.

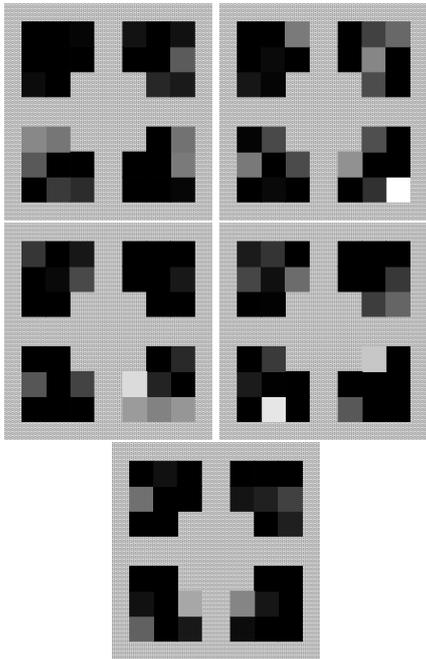


図 15 宇宙線ミュオンの第 1 回測定時のデータ.

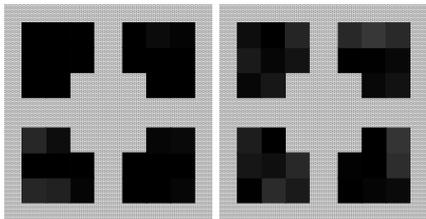


図 16 宇宙線ミュオンの第 2 回測定時のデータ.

いた.

- チャンネルごとのゲインの違いを考慮していなかった.

の 3 点である. この時点で, 画像化後は光っているにも関わらず ADC カウントのデータに有意なピークが無い (すなわち, 暗電流で光っている) チャンネルの存在は明らかだった.

図 16 および図 17 は, 最初の測定の後, ポストトリガを 80%, ベースラインサンプルを 768 として取ったデータであり, 図 18, 図 19 はそこにゲインの差異に基づいた重み付けを加えて取ったものである. 信号を入れずに取った暗電流のデータでは, トリガ位置の再設定で光り方

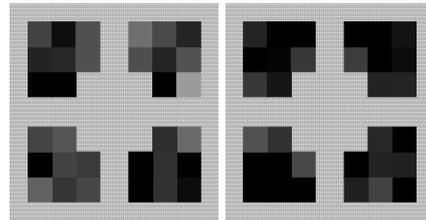


図 17 宇宙線ミュオンの第 3 回測定時のデータ. 第 2 回と比べ全体的な明度を 10/3 倍にしている.

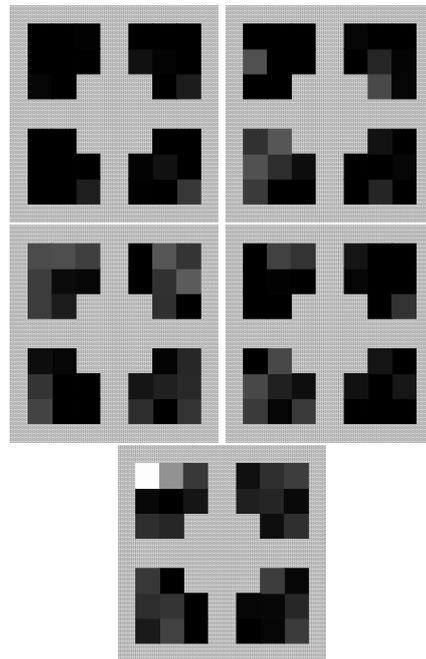


図 18 宇宙線ミュオンの第 4 回測定時のデータ.

はかなり抑えられたが, それでも一部のチャンネルがピークは無いのに強く光ったイベントは発生した.

尚, 5.1 節で用いた結果の測定では, さらにポストトリガを 92%, ベースラインサンプルを 896 と切り詰めている.

#### A.2 線源からの $\beta$ 線の測定

当初はミュオンと同様, シンチレータをトリガリングに用いていた. その時の結果が図 20 である. この時は既に暗電流閾値を取り入れており, 図に示した以外に, どのチャンネルも一切光っていない試行も何度かあった.

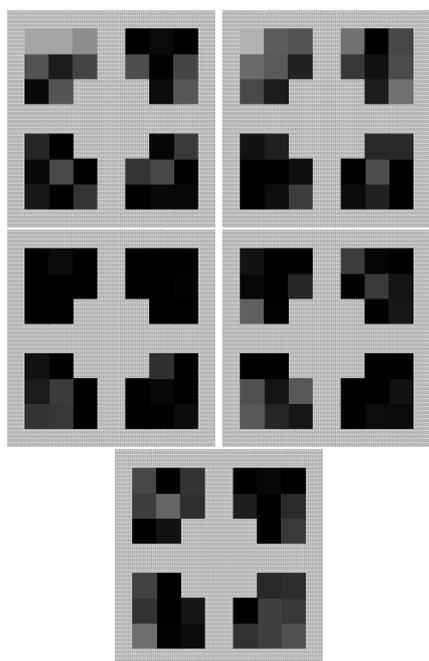


図 19 宇宙線ミュオンの第 5 回測定時のデータ。第 4 回から日を跨いだため、各種の閾値を再設定している。画像化プログラムは変更していない。

この後、2 つのシンチレータでコインシデンスとシグナルの比を測定し、図 20 は  $\beta$  線が来ていないことを示していたと発覚した。

### 参考文献

- [1] <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/detector/cherenkov.html>. スーパーカミオカンデホームページ.
- [2] <http://lhcb-public.web.cern.ch/lhcb-public/en/Detector/RICH-en.html>. LHCb ホームページ.
- [3] <http://www.zeon.co.jp/business/enterprise/speplast/purpose01.html>. 日本ゼオンホームページ.
- [4] T.Iijima et al. Aerogel cherenkov counter for the belle detector, 8 2000.
- [5] 岡村和弥, 高橋将太. 球面鏡チェレンコフ光検出器の開発と評価. [http://www-he.](http://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/gakubu/P1/P1-08/graduateThesis_final.pdf)

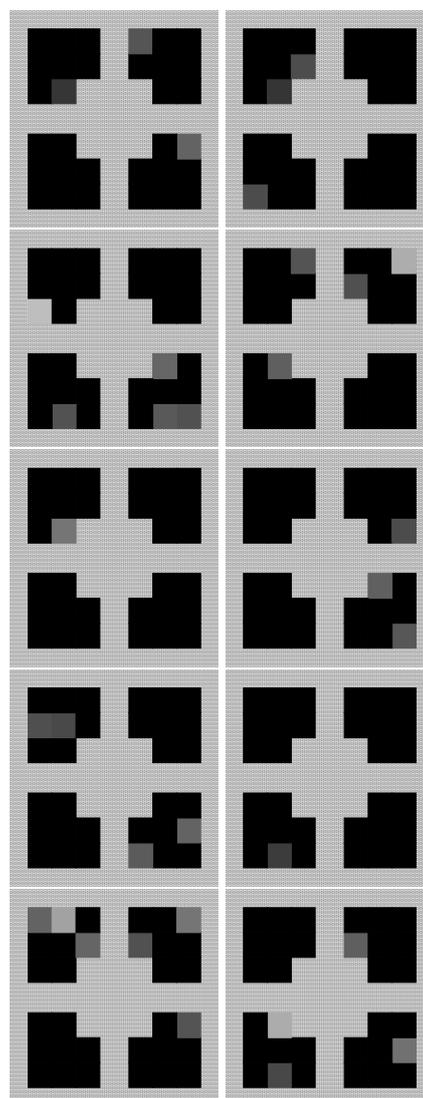


図 20 線源からの  $\beta$  線の第 1 回測定時のデータ。やはり線源は図右下部分に置いている。

- [scphys.kyoto-u.ac.jp/gakubu/P1/P1-08/graduateThesis\\_final.pdf](http://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/gakubu/P1/P1-08/graduateThesis_final.pdf), 2008.
- [6] 榊真吾, 田中裕己, 三宅聡平, 吉田将. スパークチェンバーの作成. <http://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/gakubu/P1/P1-15/FY15sparkReport.pdf>, 2016 3.
- [7] 植木泰生. リングイメージ型チェレンコフ検出器のための電子回路の開発とその性能評価. Master's thesis, 首都大学東京, 2008.

- [8] 日本物理学会（編）. 物理データ辞典. 朝倉書店, 7 2016.
- [9] 飯田博美. 放射線概論. 通商産業研究社, 2005.