シリカエアロジェル
Cherenkov カウンターの諸特性の研究

京都教育大学　物質科学専攻　素粒子物理学研究室
山下 良樹

2005 年 2 月 3 日

はじめに

「素粒子」とは物質を構成する最小単位のことである。19 世紀には原子が素粒子であった。20 世紀前半における素粒子は電子, 陽子, 中性子, および π 中間子等であった。現在、素粒子はクォークまで達している。このように、より微細な対象を調べるため、加速器によって到達できる粒子のエネルギーをますます高くする必要が生じてきた。それと並行して、粒子衝突反応の過程の測定とデータ収集の方法も急速に進歩している。

本研究では、チェレンコフカウンターと呼ばれる粒子検出器の諸特性を調べることにより、素粒子物理学の基礎を学ぶことを目的としている。

目 次

1 基礎理論 **1**

1.1 宇宙線 1
1.2 放射線検出器の発達 1
1.3 チェレンコフカウンター 3
1.4 シリカエアロジェル 5

2 シリカエアロジェルの特性 **6**

2.1 目的 6
2.2 屈折率の測定 6
2.2.1 実験概要 6
2.2.2 測定結果 7
2.2.3 考察 7
2.3 透過率の測定 7
2.3.1 実験概要 7
2.3.2 実験結果 11
2.3.3 考察 11

3 Cherenkov カウンターの研究 **12**

3.1 Acrylic 板によるチェレンコフ光の観測 12
3.1.1 目的 12
3.1.2 実験概要 13
3.1.3 実験結果 14
3.1.4 考察 15
3.2 SILICA AERO GEL チェレンコフカウンターの研究 17
3.2.1 目的 17
3.2.2 実験概要 18
3.2.3 実験結果 19
3.2.4 考察 19

4 まとめと今後の課題 **24**

5 補足 **25**

5.1 デルタ関数 25
5.2 ポアソン分布 25

1　基礎理論

この章では、宇宙線観測の基礎知識、チェレンコフカウンター、シリカエアロジェルについて説明する。

1.1　宇宙線

電離[1]能力のある放射線源には天然放射能と人工放射能がある。これらは、その一次放射線として、質量のある荷電粒子か質量のない中性の粒子、すなわち光子とかニュートリノを放出する。

そこで我々のまわりにある天然の放射線源を調べてみると、主なものに二つあることがわかる。その一つは宇宙線および太陽からくる放射線で、地球外空間を飛来してきては大気層の外側に衝突する。これらの粒子は、主として陽子や軽い原子核や電子などであり、地球の大気と相互作用をして、寿命の短いπ 中間子やμ 粒子を含む種々の二次粒子を発生する。したがって、宇宙線の一次粒子の成分やエネルギー分布の研究は、大気外で行うのが望ましく、気球や人工衛星やスペースシャトル等が使われるのはこのためである。

地球に近いものでもっとも強い放射線源は当然のことながら太陽である。その表面から発する可視光線や、中心付近で起こっている循環核融合反応で生成されるニュートリノが飛来する以外に、質量のある粒子—主として電子と陽子—が爆発やフレアとともに太陽表面から放出される。これが地球に達すると極光 (オーロラ) や磁気嵐をおこす原因となる。またこれら太陽からの粒子が作る” 太陽風” も地球をとりまく放射線帯の原因となる。

もう一つの天然の放射能は、1896 年に Becquerel によってウラニウム鉱石中に発見された、いわゆるα , β , γ 放射能と呼ばれる自然放射能である。今回の実験とは関係が薄いため詳しい説明は省略する。

1.2　放射線検出器の発達

最初の放射能の発見が写真乾板で行われたこと、宇宙線の発見が検電器で行われたことは象徴的な意味を持っている。それは放射線を目で見る装置と、電気を通して採り出す装置の相違である。本実験はとり出す装置についての実験であるので後者について説明をする。

電気信号でとり出す検出器

電気的信号で放射線を測定する検出器は、金箔検出器から始まって、高感度の電離箱へと発展していった。原理は荷電粒子の通過によって電離箱内のガスの中に生成するイオンを集めて放射線の量を知るのである。さらに、高速で高感度の各種の計数管がつくられて現在に至っている。

[1]イオン化ともいう

1. ガイガー・ミュラー計数管、比例計数管

   1929 年になると、有名なガイガー・ミュラーの計数管が登場する。電離箱が放射線の総量を測定しているのに対して計数管は 1 個の放射線の通過を 1 個の電気信号のパルスとしてとり出す。

2. シンチレーションカウンター

   計数管の延長線上のものとして戦後登場するのがシンチレーションカウンターである。蛍光物質中を荷電粒子が通過すると分子を励起して、その物質特有の蛍光を発する。この光を集光して光電子増倍管で増幅して電気的パルスとしてとり出すのである。蛍光物質としては、NaI,CsI のように重元素を含む無機物質から、アントラセン, スチルベンのように有機物のものもある。

3. チェレンコフカウンター

   シンチレーションカウンターと似たような構造をもつカウンターに本研究の題材であるチェレンコフカウンターがある。屈折率 n の媒質中では光速は真空の $1/n$ となる。高速荷電粒子がこれより速い速度で物質竜を通過すると、ちょうど真空中を音速より速い物体が通過するとき衝撃波が出るように、荷電粒子から光が放出される。この光のことをチェレンコフ光と呼んでいて、現象自体すでに 1926 年マレー (Mallet) によって発見されていた。チェレンコフ光を光電子増倍管でとらえれば放射線の検出器として使えるが、使用されたのはシンチレーションカウンターに比べて数年の遅れがある。その理由は、シンチレーターと比較して放出される光の量が $2 \sim 3$ 桁少ないためである。

   チェレンコフカウンターは、上に述べた理由から放射線の速度選別ができる特徴をもっている。また、高速の重い原子核のように物質でのエネルギー損失が大きい場合には、シンチレーションからの光の量はエネルギー損失に比例しなくなるが、チェレンコフカウンターは宇宙線中の重い原子核の観測には欠かせない検出器として研究に使われている。

4. 半導体検出器

   エネルギーの決定精度を著しく高くするために次に考案されたのが半導体検出器である。Si や Ge の結晶の場合では荷電粒子が通過すると半導体の中に電子と対になる正孔がつくられる。したがって、半導体結晶に電場をかけて電子と正孔による電流をとりだし、放射線を検出し、また、この半導体内での放射線のエネルギー損失を知ることができる。

5. 遷移放射検出器

   遷移放射の詳細は、荷電粒子が屈折率の異なる物質に入射したとき、粒子の作る電磁場の様相が急変するために放出される放射である。

1.3　チェレンコフカウンター

粒子線を検出しようとするとき、検出の物理過程は中性粒子と荷電粒子とでは違ったものになる。荷電粒子では検出器の検出物質となっている原子の電子との電磁相互作用[2]によって直接検出することができる。今 1 個の荷電粒子が物質の層を通過するとすると、三つの過程が考えられる。物質中の原子が電離される (ionization)、荷電粒子がチェレンコフ光を放射する (Cherenkov radiation)、または荷電粒子が遷移輻射 (transion radiation) を放射する。この中のチェレンコフ光に注目し、その検出器について述べる。

チェレンコフ輻射は、荷電粒子が屈折率 n の透明な物質中を、その中での光の速度 ($v = \beta c$)、すなわち $v = c/n$ で通過する場合、その荷電粒子が放射する電磁輻射である。1.2 で述べたが、超音速で動く物体により音波の衝撃波が発生するのと同じ原理で、チェレンコフ輻射の波面は荷電粒子の通過線上から発する球状ホイヘンス (Huygens) 波面として形成される (図 1 に示す)。

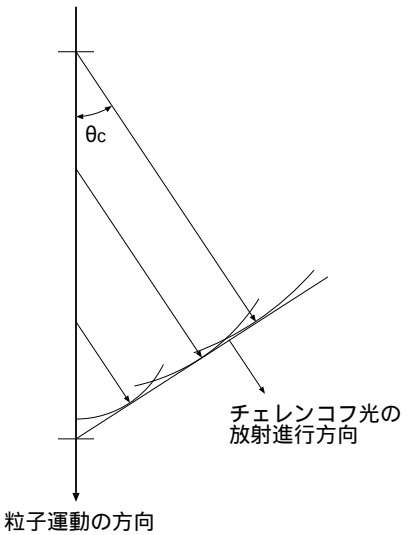

図 1: チェレンコフ放射

ある時間 t に対して、この波面は、距離 ct/n まで伝播し、一方、粒子の方は距離 $t\beta c$ だけ進む。この二つの進行距離の関係から、チェレンコフ波の伝播方向は、

$$\cos\theta_c = \frac{ct/n}{\beta ct} = \frac{1}{\beta n} \tag{1}$$

で与えられる。ここに、θ_c は、粒子の進行方向に対してチェレンコフ光が放射

[2]荷電粒子はそのまわりに電磁場を生み出すが、この電磁場を量子化したものがフォトンである。一方の荷電粒子がフォトンを放出し、このフォトンをもう一方の荷電粒子が吸収する。これによって二つの荷電粒子の間に結び付きが出来る

される方向のなす角である。このことからわかるように、チェレンコフ光は、$\beta > 1/n$ の条件がみたされたときのみ放射される。そこで、チェレンコフ輻射が起こり得る最小の粒子速度 $v_s = c/n$ をしきい値速度 (threshold velocity) と呼んでいる。また、θ_c はチェレンコフ角と呼ばれる。このしきい値速度に対応した相対論的な時間おくれの (Lorentz) 係数は

$$\gamma_s = \frac{1}{\sqrt{1 - 1/n^2}} \tag{2}$$

で与えられる。

チェレンコフ輻射過程についての詳細な議論によれば、有限長 L の輻射体に対して、チェレンコフ輻射は、単に θ_c の方向に放射されるのみならず、回折効果によって、この角 θ_c を中心とするある強度分布を示す。この強度分布は、$\theta = \theta_c$ に最大値を持ち、次々と続いて起こる回折最大値の間の距離は、$\Delta\theta(\lambda/L) \cdot \sin\theta_c$ となる。ここに λ はチェレンコフ光の波長である。単位波長間隔および $\cos\theta$ 当たり放射される光子数はつぎの式で与えられる。

$$\frac{d^2N}{d\lambda d\cos\theta} = \frac{2\pi\alpha}{\lambda}\left(\frac{L}{\lambda}\right)^2\left(\frac{\sin x}{x}\right)^2 \sin\theta \tag{3}$$

ここに、$x(\theta) = [1/(n\beta) - \cos\theta]\pi L/\lambda$。したがって波長 λ に対してじゅうぶんに長い $(L \gg \lambda)$ 輻射体については、関数 $(\sin x/x)^2 \cdot L/\lambda$ は、$x = 0$ で δ 関数となり、それゆえ、上式の光子量の式は角度積分の後の形として、

$$\frac{dN}{d\lambda} = \frac{2\pi\alpha}{\lambda^2} L \sin^2\theta_c \tag{4}$$

を得る。この式から光の波長 λ_1 から λ_2 の間に放射されるチェレンコフ光の光子数は、

$$N = 2\pi\alpha L \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \sin^2\theta_c/\lambda^2 \cdot d\lambda \tag{5}$$

チェレンコフカウンター用輻射体として通常よく利用されている物質を、その屈折率および臨界エネルギー係数 γ_s とともに表 1 に示した。

表 1 ：チェレンコフ輻射体として用いられる物質各種

物質	$n-1$	γ_s(しきい値)
ガラス	0.45∼0.75	1.22∼1.37
シンチレーター (トルエン)	0.58	1.29
プレキシガラス (アクリル)	0.48	1.36
水	0.33	1.52
エアロジェル	0.025∼0.075	4.5∼2.7
ペンタン (標準状態)	1.7×10^{-3}	17.2
CO_2(標準状態)	4.3×10^{-4}	34.1
He(標準状態)	3.3×10^{-5}	123

注意：ガスは標準状態での値とする

可能なもっとも高い屈折率のガス (たとえばペンタン) を利用した場合と、個体または液体を用いてのもっとも低い屈折率の場合との間には、従来ギャップがあったが、これは最近のシリカエアロジェル放射体の開発によって埋められた。エアロジェルについては次のセクションで示す。

1.4 シリカエアロジェル

シリカエアロジェルとは、二酸化ケイ素 (ガラスの主成分) でできた多孔質の材料である。約 90 %が空気であり、透明度が高い、熱伝導性が低い、密度が低い、屈折率が低い、などの特徴がある。

分子構造は、(SiO_2) の整数 (m) 倍と、その倍数 $(2m)$ の H_2O 成分 $(mSiO_2 \cdot 2mH_2O)$ を含むもので、その屈折率は n=1.025 から 1.075 の間にあり、チェレンコフ輻射の臨界エネルギー係数としては、γ_s=3 から 5 の間が実現可能となる。実際、$18 \times 18 \times 3[cm^3]$ の大きさのブロックで n=1.03 から n=1.05 のものが実用に供給されている。本研究においては、松下電工の SP-30,SP-50 を使用した。規格を下の表 2 に示す。

表 2：シリカエアロジェルの規格 (松下電工)

		SP-30	SP-50
形状	形	タイル状	
	サイズ	113 × 113 (t 10mm)	
屈折率		1.05	1.03
密度 (g/cm^3)		0.11	0.19
光透過率 (%)	波長 550[nm]	> 92	> 88
	波長 400[nm]	> 75	> 62

2　シリカエアロジェルの特性

2.1　目的

- チェレンコフカウンターに使用されるシリカエアロジェルについて、その用いられる理由として屈折理と透過率を挙げた。ここではその屈折率と透過率をもとめる。

2.2　屈折率の測定

2.2.1　実験概要

遊動顕微鏡によりシリカエアロジェルの屈折率を求める。

測定理論

屈折率測定における光の経路のを図 2 に示す。

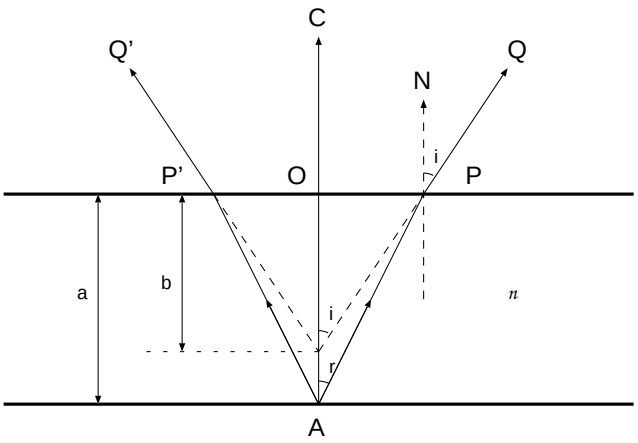

図 2: 屈折率

図のように、空気に対する相対屈折率 n の中の一点 A から発する光は、APQ,AOC,AP'Q' のような経路をとって空気中をに出るが、いま、近軸光線のみ考えるものとし、P に立てた面法線 PN と PQ および PA のなす角をそれぞれ i, r とすれば、

$$n = \frac{\sin i}{\sin r} \simeq \frac{\tan i}{\tan r} = \frac{\frac{p}{b}}{\frac{p}{a}} = \frac{a}{b} \tag{6}$$

ここで、p=OP,a=OA,b=OB を表す。すなわち、物質層の厚さ a と、O から A の虚像 B までの距離 b とを測定することにより、物質の屈折率 n を測定することができる。

測定方法

1. 遊動顕微鏡の水平台のみがき傷 A にその焦点を合わせたときの z 軸上の副尺を読み z_A とした。
2. その上にエアロジェルを置いてみがき傷 A の虚像 B に顕微鏡の焦点を合わせたときの副尺を読み z_B とした。
3. さらに、エアロジェル上の小さな傷 O に焦点を合わせたときの副尺の読みを z_O とした。
4. z_A, z_B, z_O より、

$$n = \frac{a}{b} = \frac{z_A - z_O}{z_B - z_O} \tag{7}$$

により算出した。

2.2.2 測定結果

遊動顕微鏡により測定した結果、下の表のようになった。[3]

表 3：遊動顕微鏡により測定した屈折率

種類	1 回目	2 回目	3 回目	平均	規格
SP-30	1.027	1.034	1.030	1.0303	1.030
SP-50	1.051	1.055	1.040	1.0487	1.050

2.2.3 考察

小数点第三位の値がばらついているが、今回測定に使用した遊動顕微鏡の精度は脚注より $0.01[\mathrm{mm}]$ なので許容範囲と考えられ、どちらのエアロジェルも規格の値を採れたとみれる。

2.3 透過率の測定

2.3.1 実験概要

実験装置

まず実験装置の模式図を、図 3 に示す。

今回実験には、様々なはたらきを持つモジュールを使用した。このモジュールを総称して CAMAC と呼ぶ。

以下で、CAMAC をはじめとする実験装置の各部分の説明を行う。

[3]今回測定に使用した遊動顕微鏡のスケールは $0.5[\mathrm{mm}]$ 目盛、副尺により最小読取 $0.01[\mathrm{mm}]$

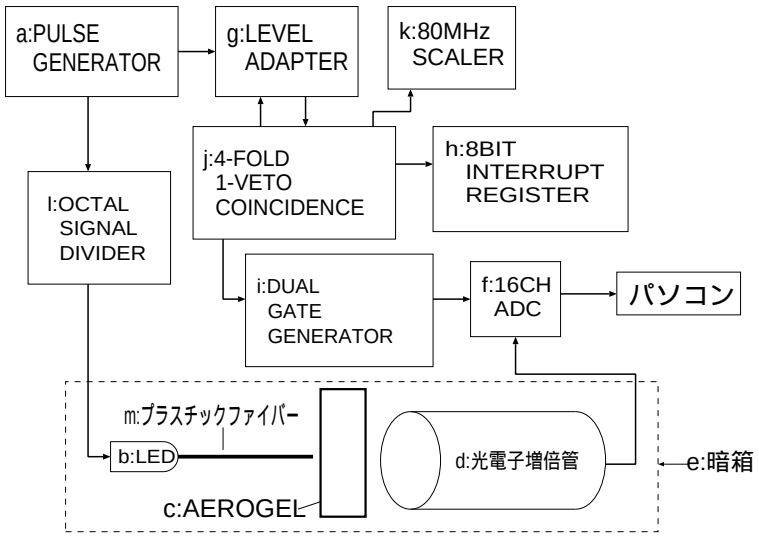

図 3: camac モジュールを用いた透過率測定装置

a. PLUSE GENERATOR

PLUSE GENERATOR(パルス発生器) では、LED に送られるパルスと、TTL シグナルがつくられる。TTL シグナルとは、メインのシグナルと同じタイミングで振幅する 5[V] 程度のアナログ信号である。TTL シグナルを利用することによって、LED のフラッシュと同じ間隔で光電子増倍管のデータをとることが可能となる。

b. LED

この実験で使用した LED(発光ダイオード) は、品番 : E1L51-3B を使用した。特性として、光度 : 1500[mcd]、順電圧 : 3.5[v]、逆電流 : 最大 10[μA]、波長 : 465[nm] の青色光である。

c. AEROGEL

基礎理論のところで既に述べたため、ここでは詳しい説明は省略する。

d. 光電子増倍管

光電子増倍管 (photomultiplier, 略称 PM) は、光を金属または半導体より成る光電面にあてて光電子を放出させる部分と、この電子を何段かのダイノード (二次電子放出面) にあて二次電子を増殖させて電流として取り出す部分より構成されている。光電面には光子を効率よく光電子に変換する物質が必要である。この変換効率を量子効率 (quantum efficiency) という。

電子増倍管は、光電子がきていない状態でも、常に一定の大きさのシグナルを出力している。これを Pedestal と呼ぶ。Pedstal を基準と考え、それに上乗せされたものとして、そのシグナルを観測することができる。Pedestal が一定にならない場合もある。このようなときに測定を行っても正確なデータを得ることはできない。ノイズによる Pedestal の揺らぎを最小限に抑えることが、実験を行うにあたっての大きな前提条件となる。具体的には、

- 電源系を変更する
- 実験装置の周辺機器のアースをとる
- ノイズカットトランスを挿入する

などの措置が考えられる。

e. 暗箱

この実験は、LED からの光量を測定するのに意味がある。そのため外部からの光が光電子増倍管に入らないための完全に光を遮断する構造物が必要になる。実験時にはさらに暗幕で箱の上部を覆った。

f. 16CH ADC

ADC(analog to digital converter) は、センサなどの出力信号がアナログ信号であるとき、それをコンピュータに取り込むのに必要なディジタル信号に変換する装置である。今回の実験において、1 つは光電子増倍管からの信号をパソコンに取り込むために使用した。もう 1 つは GATE としてのシグナルである。GATE とは、そのモジュールが機能する時間を定めるものである。ADC の場合は、GATE シグナルの幅が示す時間の間、光電子増倍管からの入力信号が内部のキャパシターにためこまれる[4]。このようにして ADC キャパシターにためこまれた電荷は、モジュール内の論理回路によって、ADC カウントというデジタル信号に変換される。 1 カウントは約 0.24pC に相当する。変換の原理は、まずキャパシター内の電荷量と、ADC カウント数 0 に相当する電荷量 (0pC) が比較される。もしキャパシター内の電荷の方が大きければ、カウント数がプラス 1 され、再び比較される。これが、ADC 側の電荷量の方が大きくなるまで繰り返され、初めて大小が逆転した特のカウント数がコンピューターへ出力される。

g. LEVEL ADAPTER

LEVEL ADAPTER は、TTL シグナルを NIM シグナルに変換する装置である。

[4]GATE シグナルは、はっきりとした幅が決まっているシグナルでなければならない。普通 GATE には NIM シグナルと呼ばれるものが用いられる。NIM シグナルとは、パルスの立ち上がりと立ち下がりがベースラインに垂直であるような、決まった幅を持ったシグナルである

h. 8-BIT INTERRUPT REGISTER

今回の実験では、INTERRUPT REGISTER をデータが入ったかどうかの Polling [5]に使用している。

i. DUAL GATE GENERATOR

GATE GENERATOR は、入力されたシグナルを操作する 2 つの機能を持つ。1 つは DELAY 機能であり、NIM シグナルを出すタイミングを調整することができる。もう 1 つは WIDTH 機能であり、これはシグナルの幅を変更できる。

j. 4-FOLD 1-VETO COINCIDENCE

4-FOLD 1-VETO COINCIDENCE は、最大 4 つのシグナルを 1 つに束ねることができる。この装置にはアンバランスにくる複数のシグナルのタイミングが一つに揃ったとき、一つのシグナルを出力する。

k. 80MHz SCALER

SCALER は、データをとった回数が表示される。

l. OCTAL SIGNAL DEVIDER

OCTAL SIGNAL DEVIDER は、 1 つのシグナルを 2 つに分ける。

m. プラスチックファイバー

今回の実験では、LED の光を光電子増倍管まで伝える手段として、約 20[m] のプラスチックファイバーを用いた。

シグナルの流れ

- 光電子によるシグナル

  PULSE GENERATOR より LED にパルスが伝わる
  → LED がフラッシュする
  →光子がプラスチックファイバーに沿って伝わる
  →エアロジェルにより減光される
  →光電子増倍管の光電面に光子があたり、光電子が飛び出す
  →増幅された電子が電流となって出てくる
  → ADC へ

- GATE シグナル

  PULSE GENERATOR より TTL 信号が出る
  → LEVEL ADAPTER により NIM 信号に変換される

[5]Polling とは通信機器やソフトウェアが複数で連携動作する際に、送信 (あるいは処理) 要求がないか、一つ一つの相手に聞いて回る方式。

→ GATE GENERATOR により出力のを調整される
→ ADC へ

実験方法

1. 図 3 のように装置を組んだ。
2. 光電子増倍管に 2.0[kV] の電圧をかけた。
3. ADC カウンターに入る 2 つのシグナルを、オシロスコープで観測し、GATE のタイミングを調節した。

   光電子増倍管からのシグナルに GATE のシグナルを合わせなければ、測りたい値ではなく、Pedestal を測定し意味の無いシグナルを観測していることになる。
4. LED を 2000 回フラッシュさせ、コンピュータでデータをとった。
5. 光電子増倍管とプラスチックファイバーの間に SP-30 のエアロジェルを置き LED を 2000 回フラッシュさせデータをとった。
6. SP-30 を SP-50 に換え再度データをとった。

2.3.2 実験結果

実験の結果、Pedestal, エアロジェル無し,SP-30,SP-50 の ADC カウント分布は図 4 のようになった。なお、グラフ中の Entries は全イベント数を、Mean は平均、RMS は標準偏差を示している。

2.3.3 考察

図 4 において、エアロジェルを LED と光電子増倍管の間に挟んだとき、およびエアロジェル無しの Mean(Ma,Mn) から Pedestal の Mean(Mp) を引いた値により次式、

$$\text{透過率}\,(\%) = \frac{Ma - Mp}{Mn - Mp} \tag{8}$$

から透過率 (%) として求め、その結果を次の表で示す。

表 4：LED により測定した透過率

	SP-30	SP-50
光透過率 (%)	48	69

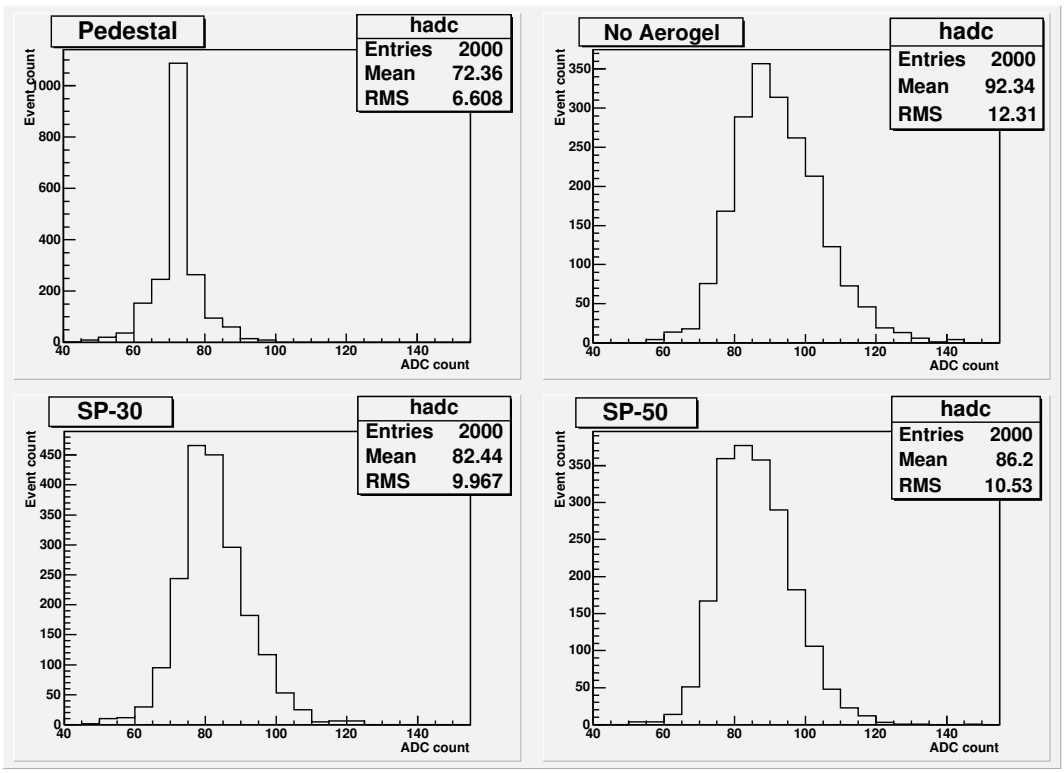

図 4: 透過率測定のための ADC カウントの分布

これを、松下電工の規格と比較する。SP-50 については、波長 400[nm] の LED で 62 %以上であることと今回使用した LED が波長 465[nm] であることとを考えると、規格通と言える。SP-30 については規格の 75 %を大きく下回った。このような値が出たの理由として考えられるのは、1 つにエアロジェルの表面の状態があげられる。今回測定に使用したエアロジェルは遊動顕微鏡による屈折率の測定や、本研究の本題であるチェレンコフカウンター実験の間に傷がついたと考えられ、その凹凸のため光が散乱し光電子増倍管により観測できなかったのではないかと考えられる。

3 Cherenkov カウンターの研究

3.1 Acrylic 板によるチェレンコフ光の観測

3.1.1 目的

エアロジェルを用いた実験の前段階として、アクリル板を用いてチェレンコフ光の測定と確認を行う。

3.1.2 実験概要

実験装置

この実験では、図 5 のように装置を組み実験を行った。

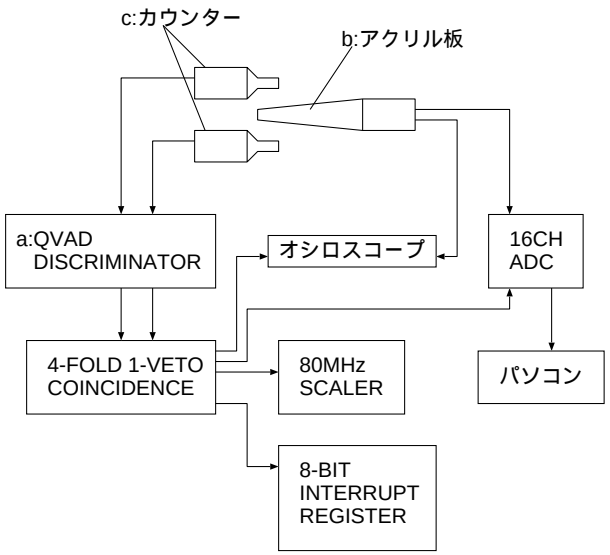

図 5: アクリル板を用いたチェレンコフ光観測装置

今回新たに用いたものに対する説明を以下に示す。

a. QVAD DISCRIMINATOR

DISCRIMINATOR は、ある値以上のシグナルが来たときに、信号を整流して発信する装置である。今回の実験では、カウンターからのシグナルが 100[mV] 以下のダークカレントを除いた。

b. アクリル板

アクリル樹脂 (Acrylic Resin) は軽い・錆びない・腐らないというプラスチックの特性に透明性・表面光沢・耐候性・加工易さ・人体に無害などの特性を有すアクリル樹脂はディスプレイ・看板・建材・照明器具・車輌部品・大型水槽・文具・ファニチャーなど幅広い分野で利用されている。アクリルのもっとも特徴的な特性は透明性である。全光透過率 (%) は塩化ビニル樹脂 (塩ビ板)84 %、ポリカーボネート樹脂 87 %に対しアクリルは 93 %とガラスの 90 %をも上回っている。アクリル (Acrylic) 板の屈折率は、1.48 として今回の実験を行っている。

アクリル板内で生じたチェレンコフ光を、光電子増倍管で観測する。

c. カウンター

この実験は宇宙線によるチェレンコフ光の測定であるため、観測したチェレンコフ光が宇宙線によって発生したのかどうかを調べるために、アクリル板を挟んで上下に宇宙線観測のためのカウンターを一つずつ用意した。カウンターの先にはプラスチック・シンチレーター[6]を使用した。

プラスチック・シンチレーターにより発光し、それを光電子増倍管で観測する。

シグナルの流れ

- チェレンコフ光のシグナル

  図 6 に示した様に、宇宙線がアクリル板に飛び込む
  →チェレンコフ光を発光し、光電子増倍管により観測される
  → ADC へ

- カウンターのシグナル

  宇宙線がカウンターに飛び込む
  →シンチレーターの発光を光電子増倍管により観測される
  → DISCRIMINATOR により整流される
  → ADC へ

実験方法

1. 図 5 のように装置を組んだ。
2. アクリル板の光電子増倍管には 2.3[kV]、カウンター光電子増倍管には 1.8[kV] の電圧をそれぞれかけた。
3. カウンターからのシグナルを DISCRIMINATOR により整流した。
4. カウンターのシグナルによる GATE とアクリル板からのシグナルをオシロスコープに出力し調整した。
5. 宇宙線を 1000 回検出するまで、コンピュータでデータをとった。

3.1.3 実験結果

実験の結果、アクリル板によるチェレンコフ光の分布は、図 7 のようになった。

図 7 は右側なグラフは、左側のグラフを片対数グラフにしたものである。

[6]無色透明な合成樹脂の 1 つであるスチレンに励起発光をする有機化合物、例えば POPOP や TPB を加えて重合させたポリスチレンが主である

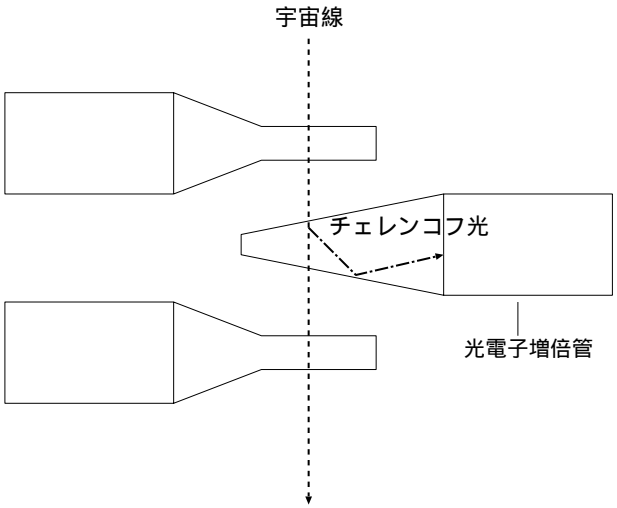

図 6: アクリル板によるチェレンコフ光

3.1.4 考察

屈折率 n=**1.48** のアクリル板による光子数

光電子数 N を求めるためには式 (5) で示した。今回波長 400[nm] ~ 500[nm] の間の単位厚さ $[\mathrm{cm}^{-1}]$ の光子数を求める。求めるには、

$$\frac{d^2N}{dEdx} = \frac{\alpha z^2}{\hbar c}\sin^2\theta_c \tag{9}$$

を使う。今エネルギー E は $E = h\nu$、ここで $\nu = c/\lambda$ より $E = hc/\lambda$ で求められる。よって ΔE は、

$$\Delta E = hc\left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right)$$

上式に $\hbar$=h/2π を当てはめると

$$\Delta E = 2\pi\hbar c\left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right) \tag{10}$$

となる。

よって、$\alpha = 1/137, \hbar c = 197[\mathrm{eV\cdot nm}], z = 1$ および波長 $\lambda_1 = 400[\mathrm{nm}], \lambda_2 = 500[\mathrm{nm}]$ より式 (9),(10) はそれぞれ、

$$\frac{d^2N}{dEdx} = \frac{\frac{1}{137}}{197[\mathrm{eV\cdot nm}]}\sin^2\theta_c$$

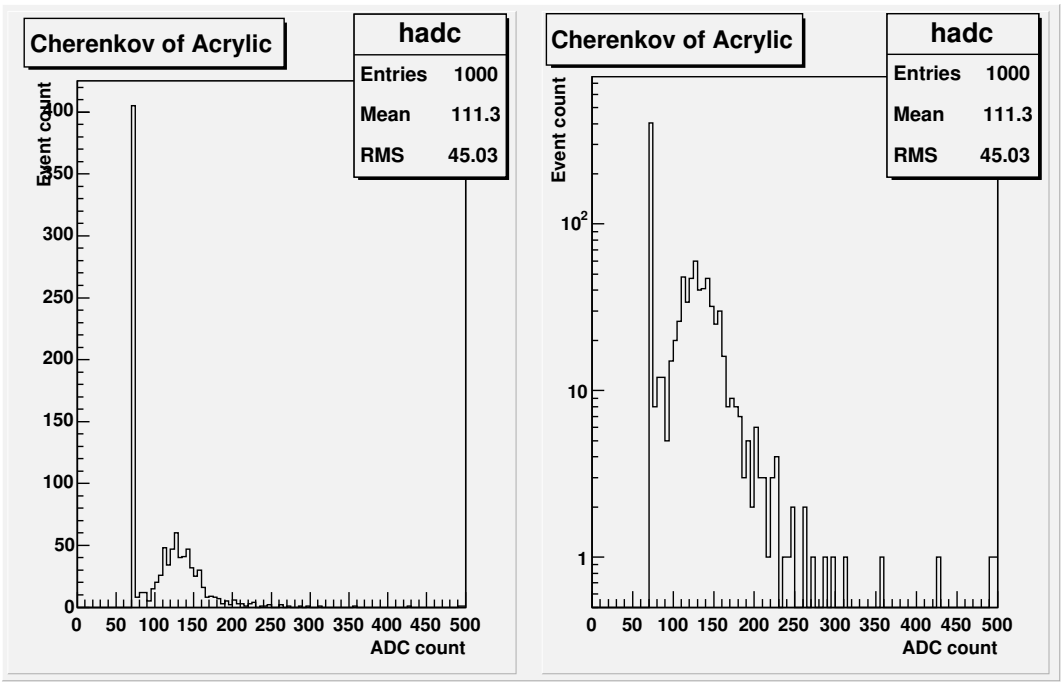

図 7: アクリル板による ADC カウント数の分布

$$
\begin{aligned}
&= \frac{1}{137 \times 197 \times 10^{-9} \times 10^{2}} \sin^2\theta_c \\
&\approx 370 \sin^2\theta_c [\mathrm{eV}^{-1}\mathrm{cm}^{-1}] \qquad (11)\\
\Delta E &= 2\pi \times 197[\mathrm{eV}\cdot\mathrm{nm}] \times \left(\frac{1}{400[\mathrm{nm}]} - \frac{1}{500[\mathrm{nm}]}\right) \\
&= \frac{2\pi \times 197}{2000} \\
&\approx 0.6[\mathrm{eV}] \qquad (12)
\end{aligned}
$$

のように求まる[7]。式 (11) 中の $\sin^2\theta_c$ は式 (1) より、

$$\sin^2\theta_c = \left(1 - \cos^2\theta_c\right) = \left(1 - \frac{1}{(\beta n)^2}\right)$$

で求められる。上式の β は $\beta = 1/\sqrt{m_\mu^2 - p^2}$ により求められ、$\beta \approx 1$ となる。よって求める単位厚さ当たりの光電子数は、

$$
\begin{aligned}
\frac{N}{L} &= 370 \times \left(1 - \left(\frac{1}{1.48}\right)^2\right) \times 0.6 \times \frac{1}{10} \qquad (13)\\
&\approx 12[\mathrm{cm}^{-1}] \qquad (14)
\end{aligned}
$$

[7]式 (11) の 2 行目の分母において、10^2 をかけているのは単位を cm に換算するため

となる[8]。

結果と比較すると、グラフより宇宙線は通ったがチェレンコフ光が発生していないバックグラウンドのイベント数が $437(90$ 以下$)$ なので、関数 $P(p,n)$ のポアソン分布[9]は、

$$P(\nu,n) = e^{-\nu}\frac{p^n}{n!} \tag{15}$$

で求められるので、$P(p,n)$ にバックグラウンドのイベント数 437 よ $P = 0.4$、光らない値なので $n = 0$ を代入すると式 (14) は

$$\begin{aligned} 0.437 &= e^{-\nu}\frac{\nu^0}{0!} \\ 0.437 &= e^{-\nu} \\ \ln 0.437 &= -\nu \\ \nu &\approx 0.83 \end{aligned} \tag{16}$$

これより、光電子数は $0.83[\mathrm{cm}^{-1}]$ と求まった。

(14) と (16) の値を比較すると、明らかに違っていた。これはチェレンコフ光が発生した点から四方八方に放出され、図 6 にあるようにその内の一部分が光電子増倍管で観測されたために起こったと考えられる。また、アクリル板の屈折率 1.48 より発生したチェレンコフ光の光路は図 8 に示した、

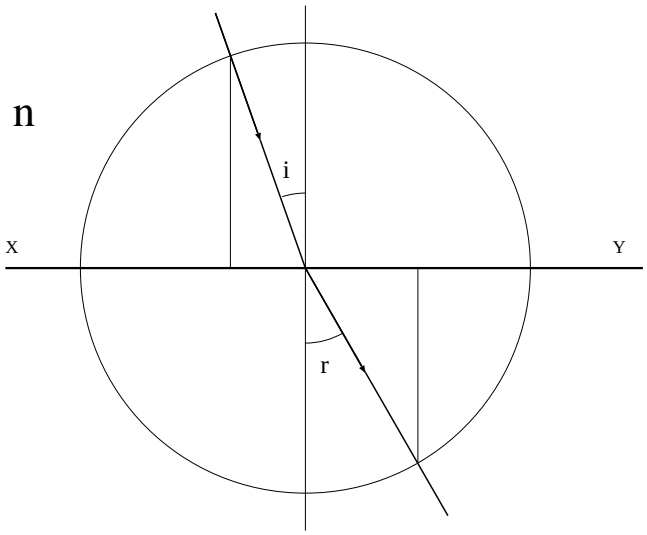

図 8: アクリル板から空気中への屈折光線

[8]単位厚さ当たりの光電子数はは輻射体の厚さ L で光子数 N を割ることで求める
[9]p:その事柄が起こった回数、n:値の個数

この図において、チェレンコフ光がアクリル板と空気の境界面 XY で全反射するとき光が光電子増倍管により観測される。その臨界角 i_0 は $i_0 = 1/n$ より求まり、アクリル板の屈折率 n=1.48 より $i_0 \approx 0.74 \approx 42°$、アクリル板のチェレンコフ角 $\theta_c \approx 0.83 \approx 47°$。よって、真上から来た宇宙線が発生させるチェレンコフ光は全反射する。さらに、今アクリル板は図 6 のより真上から降り注ぐ宇宙線と垂直でないため、発する光が境界面 XY に当たるとき θ_c 以上の角になる。しかし、図 6 は模式的に示してあるり、実際の装置は傾斜が $10°$ 未満であるため全反射せずアクリル板から飛び出す数も否めない。

3.2 SILICA AERO GEL チェレンコフカウンターの研究

3.2.1 目的

SECTION2,3.1 を踏まえた上で、本研究の題材であるシリカエアロジェルを用い、チェレンコフ光の光子数を測定するとともにカウンターとしての特性を調べる。

3.2.2 実験概要

この実験の模式図を図 9、実際の写真を図 10 に示す。先の実験と装置を同様に組み、アクリル板をエアロジェルに変更し実験を行った。

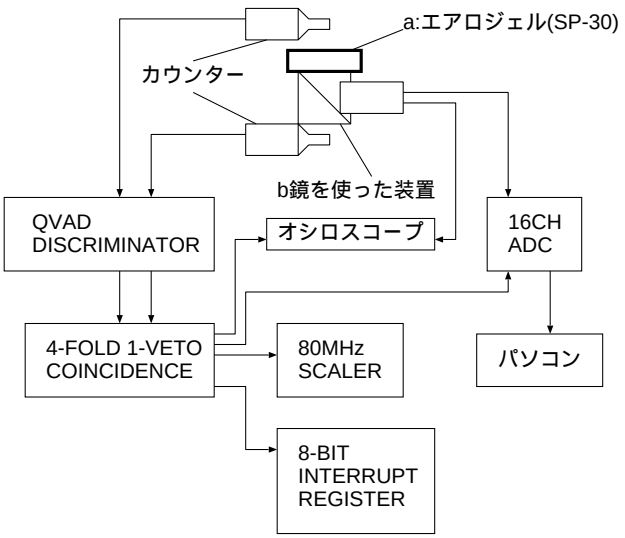

図 9: シリカエアロジェルを用いたチェレンコフ光観測装置

今回新たに用いたものに対する説明を以下に示す。

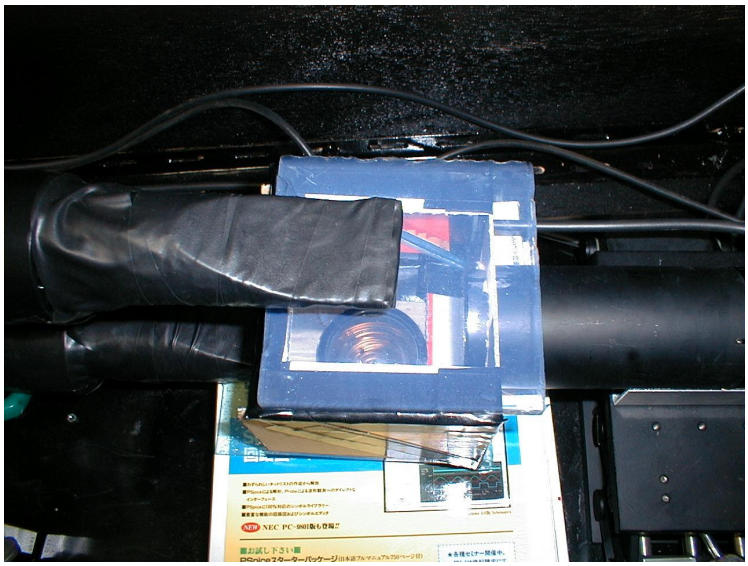

図 10: チェレンコフカウンター

a. シリカエアロジェル

　シリカエアロジェルは二酸化ケイ素 (ガラスの主成分) でできた多孔質の材料である[10]。

b. 鏡を使った装置

　この装置は発生したチェレンコフ光を横置きにした光電子増倍管で観測するため、鏡を用い光路を曲げるために作製した装置。

シグナルの流れ

　シグナルの流れは先のアクリル板と同じであり、宇宙線より GATE をとりそれに合わせてチェレンコフ光のシグナルを ADC へ流した。

実験方法

1. 図 9 のように装置を組んだ。
2. エアロジェルの光電子増倍管には 2.5[kV]、カウンター光電子増倍管には 1.8[kV] の電圧をそれぞれかけた。
3. カウンターからのシグナルを DISCRIMINATOR により整流した。
4. カウンターのシグナルによる GATE とエアロジェルによるチェレンコフ光のシグナルをオシロスコープに出力し調整した。

[10]詳しくは基礎理論のところで述べたため省略する

5. 宇宙線を 1000 回検出するまで、コンピュータでデータをとった。

6. エアロジェル (SP-30) を 2 枚にし、再度 1000 回コンピュータで検出した。

7. エアロジェルを取り除き、1000 回 Pedstal を検出した。

3.2.3 実験結果

実験の結果、各 ADC カウント数の分布は、図 11 のようになった。上から Pedestal, エアロジェル 1 枚,2 枚であり、右側は各グラフを片対数のグラフにしたものである。

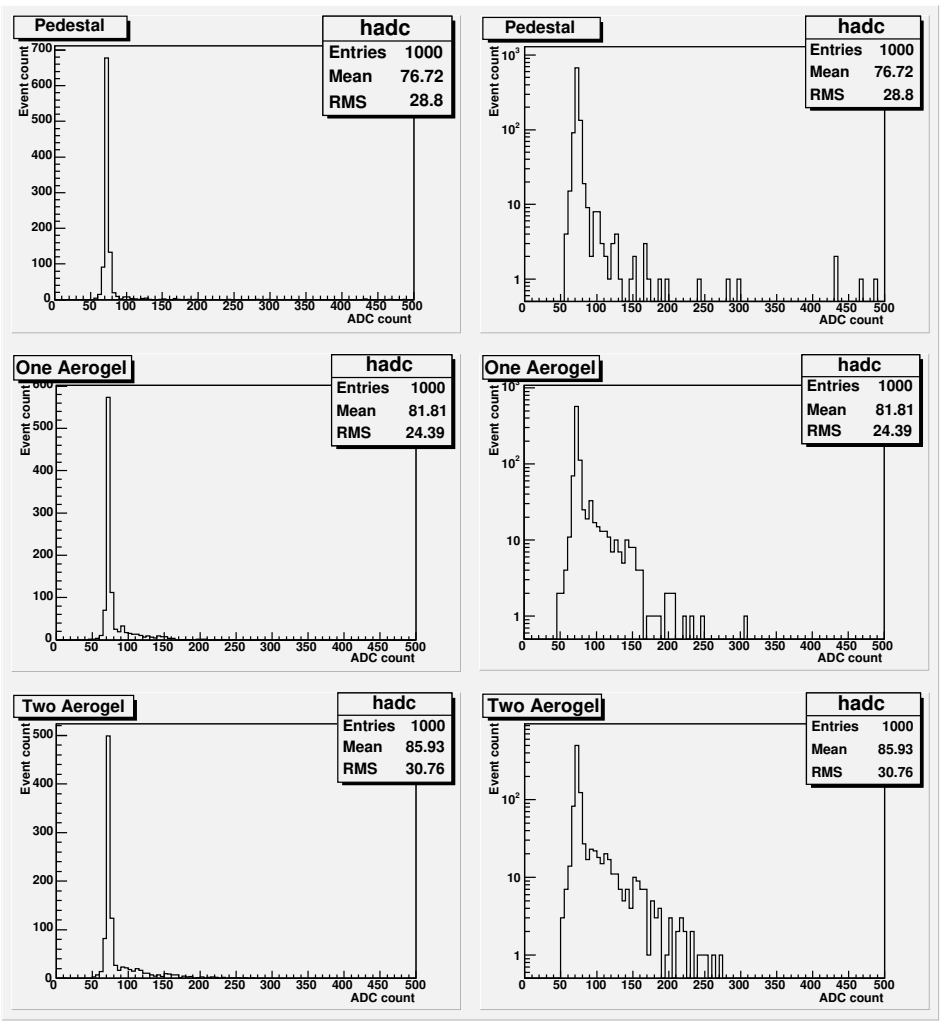

図 11: シリカエアロジェルによる ADC カウント数の分布

3.2.4 考察

屈折率 n=1.03 のシリカエアロジェルによる光子数

アクリル板と同様に式 (9),(10) より光電子数を求める。今、屈折率 n=1.03 より、式 (14) に当てはめると、

$$\begin{aligned} \frac{N}{L} &= 370 \times \left(1 - \left(\frac{1}{1.03}\right)^2\right) \times 0.6 \times \frac{1}{10} \\ &\approx 1.3[\mathrm{cm}^{-1}] \end{aligned} \tag{17}$$

と求まった。

次に 1 枚および 2 枚のエアロジェルを用いたときの光電子数は、各々のバックグラウンドを 818,773 とし、式 (15) のポアソン分布の式から光電子数 ν_1, ν_2 を求めると、

$$\nu_1 \approx 0.20[\mathrm{cm}^{-1}]$$
$$\nu_2 \approx 0.13[\mathrm{cm}^{-1}]$$

となり (18) と違った。

SP-30 におけるチェレンコフ角は、式 (1) より $\theta_c = 0.24 \approx 14^\circ$ である。図 12 において、鏡を置かないときの光路は点線で表している。この装置は一面が 10[cm] 四方であり、上面の中心に真上からきた宇宙線により発生するチェレンコフ光が底面に達するときの宇宙線とのずれ l は、$l = 10 \cdot \tan\theta_c$ で求まる。よって l は、

$$\begin{aligned} l &= 10 \cdot \tan\theta_c \\ &= 10 \times \tan 14^{circ} \\ &\approx 2.5[\mathrm{cm}] \end{aligned} \tag{18}$$

となり、2.5[cm] ずれる。今回観測に使用した光電子増倍管は 2inch[11] であるため、光電面の直径は 5.08[cm] であった。よって真上からの光は観測される。しかし、光電子増倍管は光電面のどの部分から出ても効率よく増幅されるようには設計されているが、完全に均一ではなく、端では効率が落ちてしまい、そのような結果になったと考えられる。また 1 枚目で発生した光がエアロジェルを通り抜ける前に 2 枚目のエアロジェルに吸収されたことも考えられる。

[11] 1inch=25.4[mm]

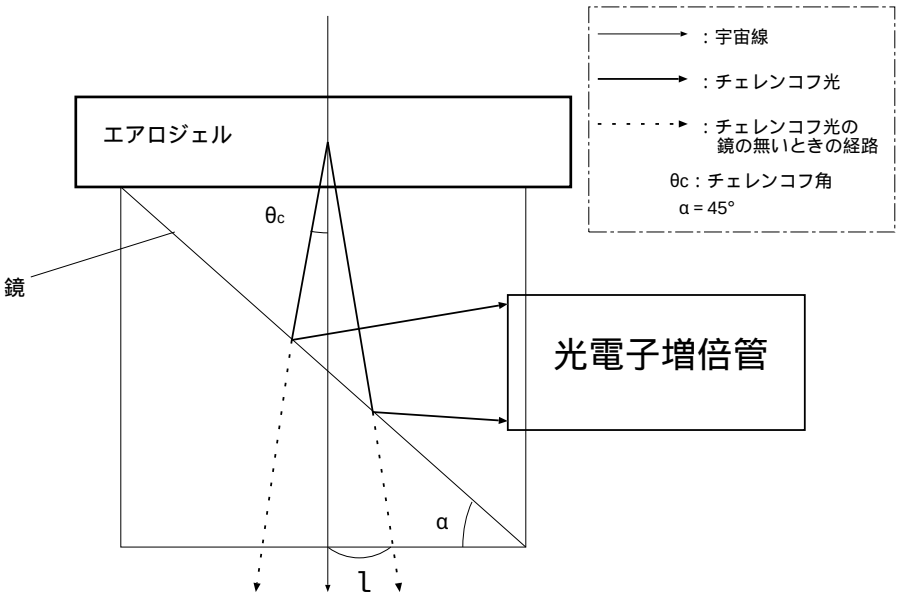

図 12: チェレンコフ光の反射鏡の模式図

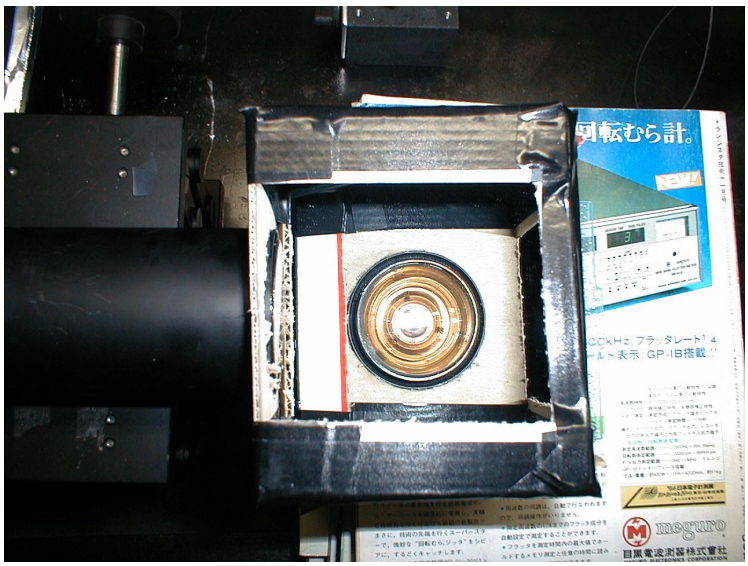

図 13: チェレンコフ光の反射鏡

4　まとめと今後の課題

今回の研究により、以下のことが分かった

- シリカエアロエアロジェルの特性
  シリカエアロジェルは屈折率, 透過率,90 %以上の空隙率を有するなど、極めて特殊な個体だと分かった。
- アクリル板によるチェレンコフ光の観測
  アクリル板を使うことにより、実際にチェレンコフ光を観測できた。
- エアロジェルによるチェレンコフ光の観測
  シリカエアロジェルによりチェレンコフ光を観測し、カウンターについての基本的な原理やその仕組が分かった。
- 本研究全体を通して
  カウンター作りや、各モジュールの性能と用途、その他観測までのセッティングを通して粒子検出器の基礎とその解析において、の考え方、計算方法を学べた。

今後の課題

- 鏡で反射したチェレンコフ光を残さず観測するため、大きなサイズの光電子増倍管を使用する。
- エアロジェルを 3 枚,4 枚 … と重ね、どのように発光するか観測し、増やす意味があるのか検討する。
- 平面ではなく、より集光できるような鏡 (反射板) の研究と開発。

5　補足

5.1　デルタ関数

$$f_\varepsilon = \begin{cases} 1/2\varepsilon & (-\varepsilon \leq \varepsilon) \\ 0 & (\text{その他の } x) \end{cases} \tag{19}$$

で与えられる関数をまず考える。この関数は ε の値によらず $\int_{-\infty}^{\infty} f_\varepsilon(x)dx$ を満たしていることに注意する。そこで、$f_\varepsilon(x)$ で $\varepsilon \to 0$ の極限をとったものを $\delta(x)$ と表すと、

$$\delta(x) = \begin{cases} \infty & (-\varepsilon \leq \varepsilon) \\ 0 & (\text{その他の } x) \end{cases} \tag{20}$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(x)dx = 1 \tag{21}$$

が成り立つ。これはディラック (Dirac) が量子力学の理論を構築する際に導入した関数で、ディラックのデルタ関数または単にデルタ関数という。

5.2　ポアソン分布

n 回繰り返されてきた過程で n 番目の結果がその前の (n-1) 回の繰り返し過程のいずれからも影響されないときをベルヌーイ (Bernoulli) 過程、1 つの過程の結果に対する確率が先行する任意の 1 つの過程の結果だけから影響を受ける過程をマルコフ (Markov) 過程という。

時間 t の間に平均して p 回現象が起こったとする。t を大きな数 N で分解した短い時間幅

$$dt = \frac{t}{N} \tag{22}$$

の間に、この現象が 1 回起こる確率 (probablity) は、

$$p\frac{dt}{t} \tag{23}$$

で、dt 内にこの現象が起こらない確率は、

$$1 - p\frac{dt}{t} \tag{24}$$

となる。同じ dt 内に 2 回起こる確率は dt^2 のオーダーで小さい値なので現象が同じ dt 内に 2 回以上起こることは無視してよい。

全時間 t の間に n 回現象が起こるとき、特定の時間 dt に 1 回づつ、合計 n 個の異常なった dt 内に起こったとしてよい。したがって $(N-n)$ 個の dt には現象は起こっていない。

t 時間に p 回起こる現象が n 個の dt に 1 回づつ起こる確率は、

$$\left(p\frac{dt}{t}\right)^n \left(1-p\frac{dt}{t}\right)^{N-n} \tag{25}$$

であって、N 個から n 個を取り出す組合せ (combination) の問題となる。

この組合せは、

$$\begin{aligned} {}_NC_n &= \frac{N!}{n!(N-n)!} = \frac{N(N-1)\cdots(N-n+1)}{n!} \\ &= \frac{N^n}{n!}\left(1-\frac{1}{N}\right)\cdots\left(1-\frac{n-1}{N}\right) \end{aligned} \tag{26}$$

したがって、確率 $P(p,n)$ は式 (22),(25),(26) より、

$$\begin{aligned} P(p,n) &= {}_NC_n(p/N)^n(1-p/N)^{N-n} \\ &= \frac{p^n}{n!}\left(1-\frac{p}{N}\right)^{N-n}\left(1-\frac{1}{N}\right)\cdots\left(1-\frac{n-1}{N}\right) \end{aligned} \tag{27}$$

となる。$N\to\infty, \frac{n}{N}\to 0$ の極限では、

$$P(p,n) = e^{-p}\frac{p^n}{n!} \tag{28}$$

この関数 $P(p,n)$ が示す分布をポアソン (Poisson) 分布という。

n の平均値 $\overline{n}$ は、

$$\overline{n} = \sum_{n-0}^{\infty} nP(p,n) = p \tag{29}$$

n の $\overline{n}$ からの SD、σ は、

$$\sigma^2 = \overline{(n-\overline{n})^2} = \frac{1}{N}\sum(n-\overline{n})^2 = \sum(n-\overline{n})^2P(p,n) = P \tag{30}$$

よって

$$\delta n = \sigma = \sqrt{\overline{(n-\overline{n})^2}} = \sqrt{p} \tag{31}$$

となり、これを標準偏差 SE(standard error) ともいう。

謝辞

本研究を行うにあたって、指導教官である高嶋隆一助教授には基礎の基礎からの指導、また実験やそれ以外の部分でも広い視野を持つ大切さを教えて頂き本当にありがとうございました。

また、本学を卒業された河内知己さんには、突然のメールでの質問など、幾度と無くアドバイスを頂き深く感謝致します。

参考文献

[1] K. クラインクネヒト 著/高橋 嘉右, 吉城 肇 共訳：粒子線検出器 –放射線計測の基礎と応用–, 培風館,(1987).

[2] 西村 純 責任編集：実験物理学講座 宇宙放射線, 共立出版株式会社,(1986).

[3] 牧 二郎, 林 浩一：パリティ物理学コース 素粒子物理, 丸善株式会社,(1999).

[4] The European Physical Journal C.

[5] http://hep.phys.s.u-tokyo.ac.jp/lab-intro/apparatus.html

[6] http://www.mew.co.jp/aerogel/

[7] 吉田 卯三朗, 武居 文助, 橘 芳寛, 武居 文雄：物理学実験, 三省堂,(2001).

[8] 河内 知己：KOPIO 実験の荷電粒子 veto カウンターの開発研究,(2001).

[9] 加藤 貞幸：新物理シリーズ 26 放射線計測, 培風館,(1994).

[10] http://e-words.jp/w/E3839DE383BCE383AAE383B3E382B0.html

[11] http://www.envision.co.jp/cutting_services/materials_acrylic.html

[12] 福井 崇時：共立物理学講座 25 粒子物理計測学入門, 共立出版株式会社,(1992).

[13] 薩摩順吉:物理の数学 岩波基礎物理シリーズ 10, 株式会社 岩波書店,(1995).