

2009 年度 卒業論文

エアロジェル・チェレンコフ検出器による宇宙線の測定

奈良女子大学 理学部 物理科学科

高エネルギー研究室

石塚 規友紀 村上 潤

平成 22 年 3 月 9 日

目次

1. はじめに	4
2. 原理	5
2.1 宇宙線	5
2.2 宇宙線の反応	5
2.3 チェレンコフ放射	6
2.4 シンチレーション光	7
3. 実験装置の概要	8
3.1 エアロジェルとは	8
3.2 エアロジェルの屈折率の測定	8
3.3 チェレンコフ検出器	15
3.4 シンチレーションカウンター	20
3.5 光電子増倍管	21
4. データ収集・解析装置の概略	22
4.1 camdrv	22
4.2 CAMAC 規格の概略	23
4.3 NIM 規格の概略	23
4.4 データ収集プログラムの概要	24
4.5 使用するモジュールの名称とセットアップ	24
5. 宇宙線の測定	25
5.1 セットアップ	25
5.2 測定結果	27
6. 考察	30
6.1 ADCcount から光子数の変換	30
6.1.1 セットアップ	30
6.1.2 波高分布	31
6.1.3 モンテカルロシミュレーション	32

6.1.4	モンテカルロシミュレーションの結果	37
6.2	光電子数の実験値と理論値の比較	39
7.	2 段積みによる宇宙線の測定	40
7.0	<予備実験>H3983 の HV について	41
7.0.1	Block Diagram	41
7.0.2	測定結果	42
7.1	2 段積みでの宇宙線の測定のセットアップ	43
7.2	測定結果	44
8.	考察	46
9.	まとめ・課題	48

参考文献

謝辞

1 はじめに

高エネルギー物理学は、素粒子と呼ばれる物質の究極的な構成要素とそれらの間に働く相互作用の性質を実験的に明らかにする学問である。そのため生成した粒子の様々な物理量を精度よく測定する必要がある。検出器にはその役割に応じて様々な種類がある。本実験では、疎水性シリカゲルを輻射体に用いたチェレンコフ検出器に着目し、2インチの光電子増倍管によるチェレンコフ光の読み出しを伴うセットアップをくみ上げ、高速で入射した宇宙線を検出する実験を行った結果について報告する。本論文では、はじめに宇宙線とチェレンコフ放射の原理について概観し、次にシリカエアロゲルを輻射体に用いたチェレンコフ検出器について説明する。さらに、宇宙線の検出を行う実験のセットアップと、収集したデータ、その解析結果について述べ、最後にまとめる。

2 原理

2.1 宇宙線

宇宙線には、宇宙空間から直接飛来する一次宇宙線と、大気中の原子核と一次宇宙線との相互作用で作られる二次宇宙線がある。一次宇宙線の90%は陽子で、残りは He, C, O などの原子核である。一次宇宙線は、大気中の原子核と相互作用し新たな二次粒子を生成する。これが何回か繰り返されて多くの二次宇宙線が生成される。これをカスケードシャワー (cascade shower) と呼ぶ。多くの粒子は大気中で吸収されるため、地上まで到達するのはほとんどが透過力の強い μ 粒子である。

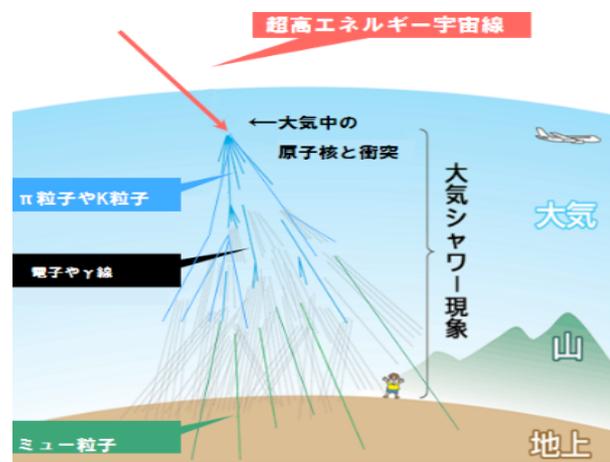


図 1: カスケードシャワーのようす

2.2 宇宙線の反応

一次宇宙線と大気中の原子核との相互作用では多くの π 中間子や K 中間子が生成される。さらに π 中間子や K 中間子は以下のように崩壊する。

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$K_s^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-, \pi^0 + \pi^0$$

$$K_L^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0, \pi^0 + \pi^0 + \pi^0$$

静止系で π^0 の寿命は $\tau_{\pi^0} = 0.83 \times 10^{-16}$ (sec)、 π^\pm の寿命は $\tau_{\pi^\pm} = 2.6 \times 10^{-8}$ (sec) である。 μ 粒子はさらに電子、ニュートリノ、反ニュートリノに崩壊する。 μ 粒子の寿命は 2.2×10^{-6} (sec) と比べて長く、高エネルギーなので相対論的効果により寿命が $1/(1 - \beta)^{1/2}$ 倍長くなること

により、崩壊せずに地上に到達できる。ここで、 $\beta = v/c$ 、 v は粒子の速さ、 c は真空中の光速である。

2.3 チェレンコフ放射

チェレンコフ放射はソ連の物理学者チェレンコフ (P.A. Cherenkov) によって発見された。屈折率 n の物質中では光の速度は c/n なので、荷電粒子が屈折率の大きな物質中を通過するとき、その物質中での光速より早く走るときに、電磁気的な衝撃波が発生する。これをチェレンコフ放射と呼ぶ。

荷電粒子が物質中を進むと、その粒子の近辺の媒質は粒子の電荷が作る電界によって分極する。粒子の速度が遅いときには、この分極は粒子を中心として対称な分布をしている。しかし、速度が速くなると、分極は粒子の進行方向に対して前後に非対称に分布するようになる。これは全体として時間的に変化する電気双極子モーメントとみなすことができる。粒子が通り過ぎてこの分極がもとに戻る際に、電磁波を放射する。隣り合った分子の位相はほとんど同じなので、放射された電磁波はコヒーレントな光になる。時間 t の間に光の通過する距離は ct/n であるが、粒子は $t\beta c$ ($\beta = v/c$) だけ動くので $\beta n > 1$ ならばこの電気双極子モーメントの放射するコヒーレント光の方向と粒子の進行方向のなす角 θ_c はホイヘンスの原理から

$$\cos \theta_c = \frac{ct/n}{\beta ct} = \frac{1}{n\beta} \quad (1)$$

となる。また、 θ_c は v の関数なので、チェレンコフ放射の発生角を測定することによってその粒子の速度を知ることができる。荷電粒子の運動量がわかっている場合には、適当な屈折率 n の媒質を選ぶことにより、 β の違い、すなわち粒子の質量の違いに起因するチェレンコフ光の有無による閾値型の粒子識別を行うこともできる。

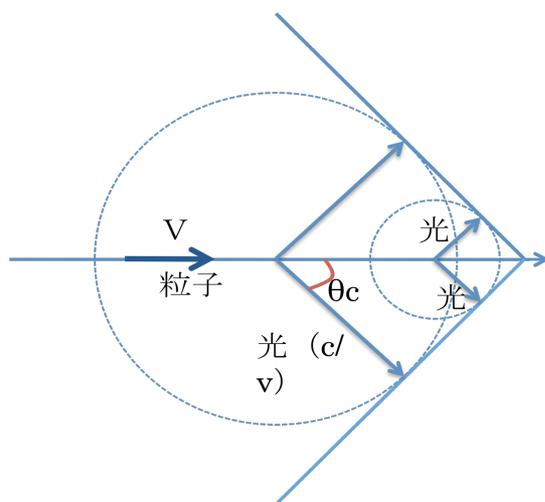


図2.チェレンコフ放射

2.4 シンチレーション光

荷電粒子が物質中を通ると原子または分子を励起して光を発生させる。これをシンチレーション (Scintillation) といい、ある種の物質ではこの発光が著しい。シンチレーション光はチェレンコフ光に比べて発光量が多く、原子などが励起して元に戻るまでの間だけ発光する。

本研究では、宇宙線がチェレンコフ検出器を貫通した事象をトリガーするために、プラスチックシンチレーターと光電子増倍管を用いたシンチレーションカウンターを2個使用した。

3 実験装置の概要

3.1 エアロジェルとは

二酸化ケイ素主体の固体が微細な気泡を多量・均一に含んだものである。90-99.8% の空気で構成されており、密度は $0.04-0.4(\text{g}/\text{cm}^3)$ である。外見はほとんど空気からできているため半透明である。見かけの色は、可視光の短波長部がナノサイズの分子構造によりレイリー散乱することにより決まる。このため黒っぽい背景に置くと青みを帯び、明るい背景では白っぽく見える。一般には乾燥剤に用いられるシリカゲルのように親水性であるが、それでは使用中に空気中の水分を急速に吸収して屈折率が大きく変化してしまうので、粒子検出器の輻射体として適さない。そこで1990年代に高エネルギー加速器研究機構（KEK）で疎水性のシリカゲルエアロジェル製造法が開発され、Belle実験、BESS実験等で採用されてきた。本研究で用いたのもこの疎水性エアロジェルである。

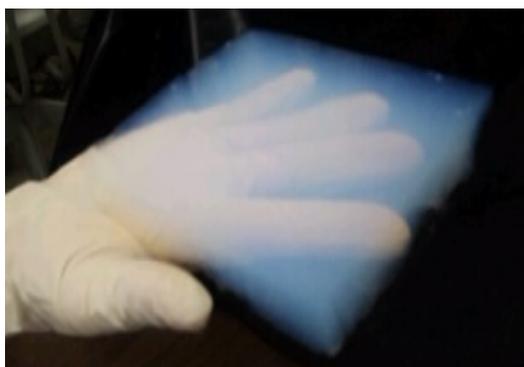


図3：実際のエアロジェル

3.2 エアロジェルの屈折率の測定

屈折率の測定には、レーザー光線ビームの屈折によるフレの角度を測定することにより行う。エアロジェルを回転台にのせ、波長 532nm の緑色半導体レーザーが回転台上のエアロジェルの角を通過すると、スクリーン上のスポットがずれる。スポットの変位が最小となるように回転台を回し、そのときのスポットの変位を d とする。最小のフレの角 θ とおき、エアロジェルの角が直角のとき、スクリーンまでの距離を L とすれば、屈折率は以下の式で表される。

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{d}{L}\right) \quad (2)$$

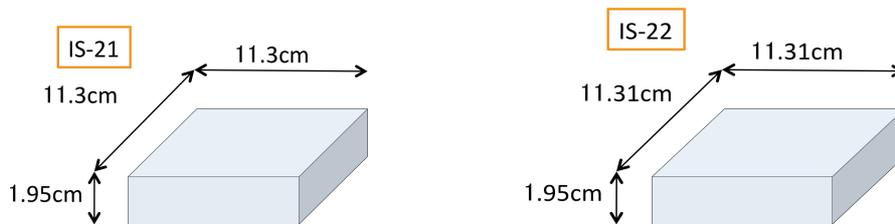
$$n = \frac{\sin\left(\frac{\theta}{2} + \frac{\pi}{4}\right)}{\sin\frac{\pi}{4}} \quad (3)$$

上記の方法で、本実験で用いるエアロジェルの屈折率を測定する。

	品名	屈折率
1	IS-21	$n = 1.089 \pm 0.007$
2	IS-22	$n = 1.089 \pm 0.006$
3	F-305	$n = 1.038 \pm 0.007$
4	F-306	$n = 1.038 \pm 0.006$
5	20-E-5-016	$n = 1.028 \pm 0.001$
6	20-A-2-055	$n = 1.014 \pm 0.001$

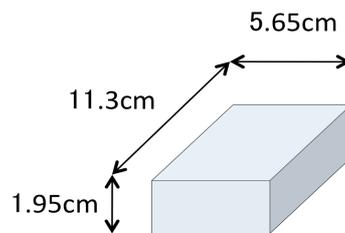
表1

以下に使用したエアロジェルの諸元を示す。



密度 : 0.22g/cm^3

F-305, F-306



密度 : 0.09g/cm^3

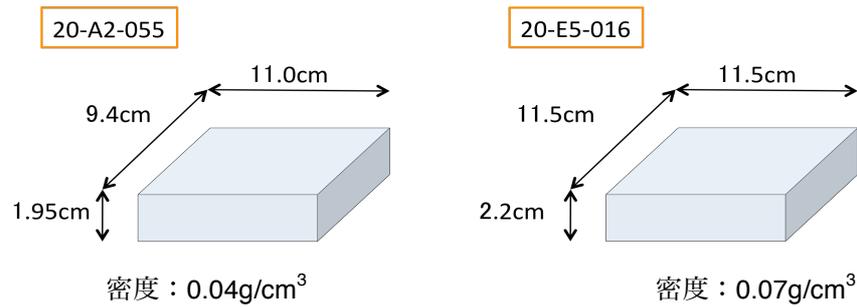


図4；エアロジェルの仕様

こうして測定した屈折率で各エアロジェルで宇宙線のミュー粒子が入射した際にチェレンコフ光が発生するのか以下に考察する。

$m_\mu=106\text{MeV}/c^2$, $P=1000\text{MeV}/c$ とすると

$$E = \sqrt{m^2 + P^2} = 1005.6(\text{MeV}) \quad (4)$$

$$\beta = \frac{v}{c} = \frac{P}{E} = 0.994 \quad (5)$$

チェレンコフ光は $\frac{1}{n} < \beta$ の時発生するので

	品名	$1/n$ ($\beta=0.994$ と比較)	光るか
1	IS-21	0.918 (< 0.994)	光る
2	IS-22	0.918 (< 0.994)	光る
3	F-305	0.963 (< 0.994)	光る
4	F-306	0.963 (< 0.994)	光る
5	20-E-5-016	0.972 (< 0.994)	光る
6	20-A-2-055	0.986 (< 0.994)	光る

表2

と上記の表より今回屈折率を計ったエアロジェルは、いずれも $1\text{GeV}/c$ のミュー粒子が入射した際にチェレンコフ光が発生する。

逆に測定した各エアロジェルでのPのしきい値について考える

$$\beta = \frac{P}{E} = \frac{P}{\sqrt{m^2 + P^2}} = \frac{1}{n} \quad (7)$$

より

$$P = \frac{m}{\sqrt{n^2 - 1}} \quad (8)$$

次に、これらのエアロジェル中で発生するチェレンコフ光の光子数はどのくらいかを考える

放射される光子数Nは、以下の式をエアロジェルの厚さと光電子増倍間の感度波長 λ_1 と λ_2 の領域で積分すると求められる。

$$\frac{d^2N}{dx d\lambda} = \frac{2\pi\alpha z^2}{\lambda^2} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right) \quad (6)$$

α : 微細構造定数=1/137

z : 入射粒子の電荷 (通常 1)

今回使用する光電子増倍管H7195UVの感度を考慮し、波長の積分範囲を $\lambda_1=350\text{nm}$, $\lambda_2=550\text{nm}$ とした。

これらを考慮した上で各エアロジェルについて計算すると

	品名	光子数N
1	IS-21	130
2	IS-22	130
3	F-305	49
4	F-306	49
5	20-E-5-016	38
6	20-A-2-055	7

表3

となる。

従って各エアロジェルについて計算すると

	品名	運動量のしきい値 (MeV)
1	IS-21	245
2	IS-22	245
3	F-305	380
4	F-306	380
5	20-E-5-016	445
6	20-A-2-055	631

表5

となり、今回用いたエアロジェルでは、ミュー粒子に対する閾値は245MeVから631MeVの範囲に分布している。

図5に、鉛直方向から来る μ 粒子の運動量分布を示す。 μ 粒子は大気中でエネルギーを失いながら地上に到達するので、通過する距離の差のために天頂角分布を持ち、エネルギーの低い方で $\cos^3 \theta$ 、高い方で $\cos^2 \theta$ の依存性を持つ。強度は、鉛直方向から約 $0.8 \times 10^{-2} / \text{cm}^2 / \text{sr} / \text{sec}$ 、全方向から約 $1.7 \times 10^{-2} / \text{cm}^2 / \text{sr} / \text{sec}$ である。この値は、おおまかに言って 1cm^2 あたり1分間に1個粒子が到達す

ることになる。

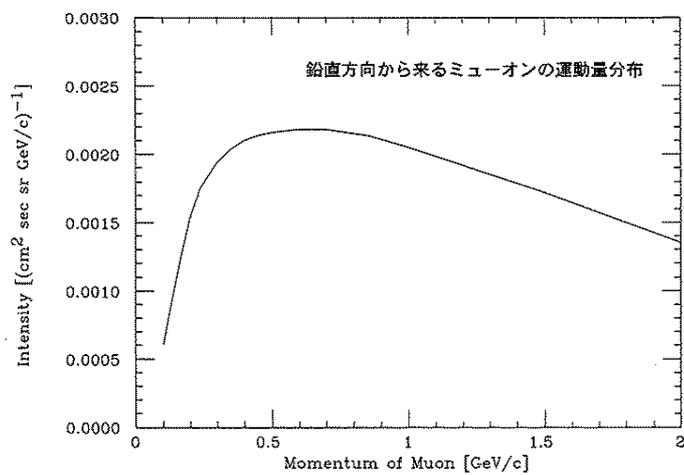


図5；鉛直方向からくるミュオンの運動量分布

図5に上記の運動量のしきい値を対応させると、以下のようなになる。

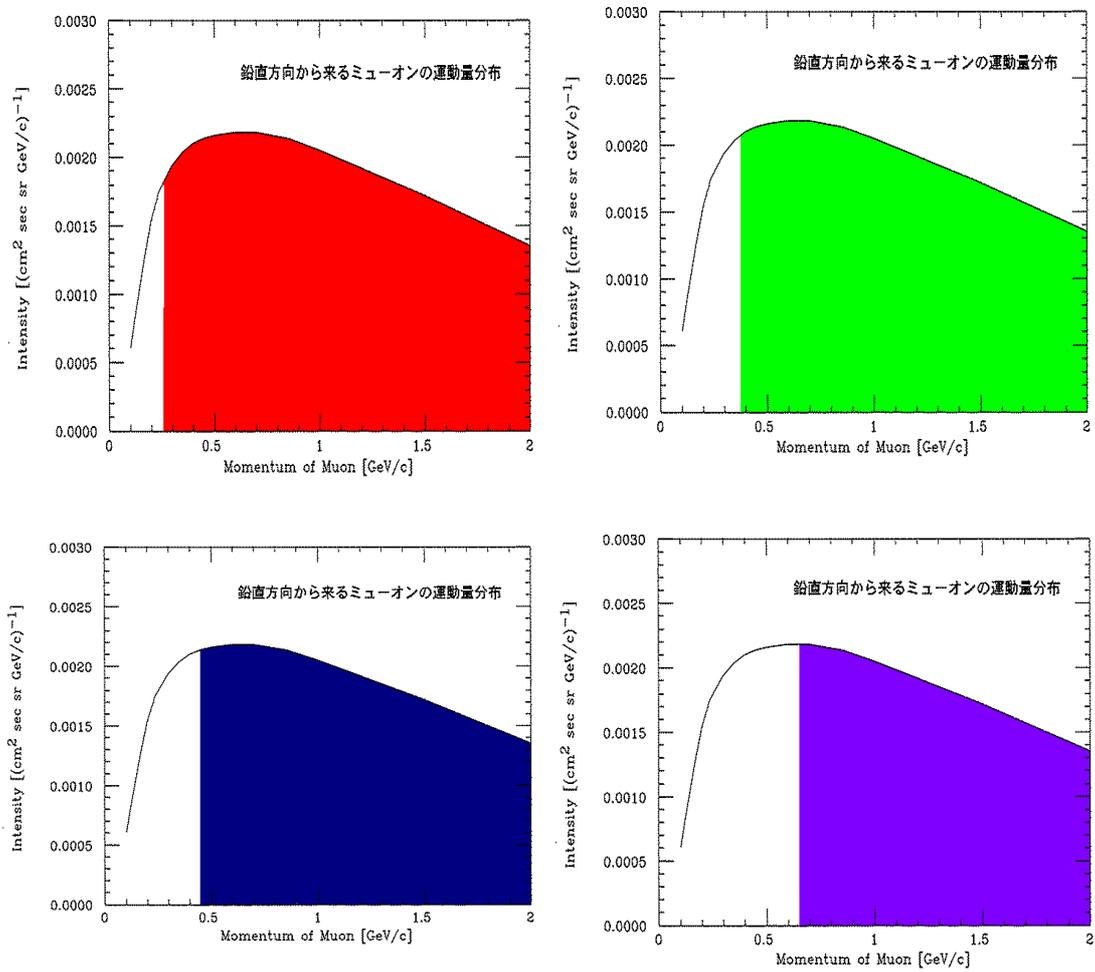


図6 運動量のしきい値の比較

3.3 チェレンコフ検出器

本実験では、エアロジェルを輻射体として発生したチェレンコフ光を反射鏡で反射させ、光電子増倍管でとらえる原理のチェレンコフ検出器を製作した。

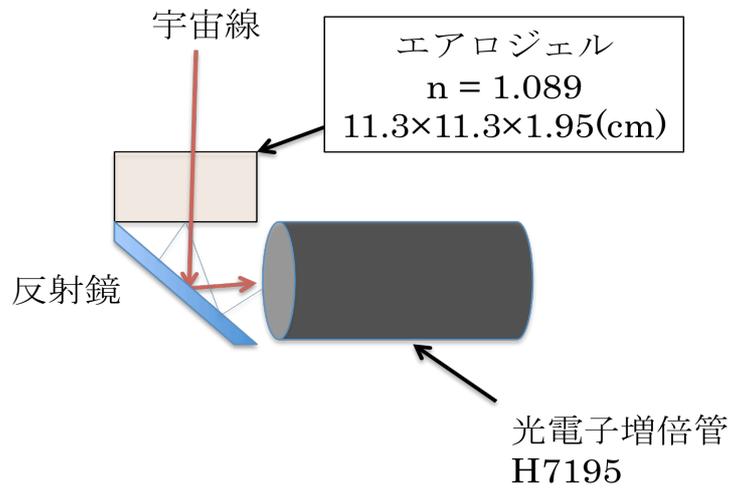


図7

チェレンコフ検出器を設計するため、第一にエアロジェル、反射鏡、光電子増倍管をセットする距離 $L+d$ についての制限を求める。

まず、下記の式でチェレンコフ角 θ を求める。

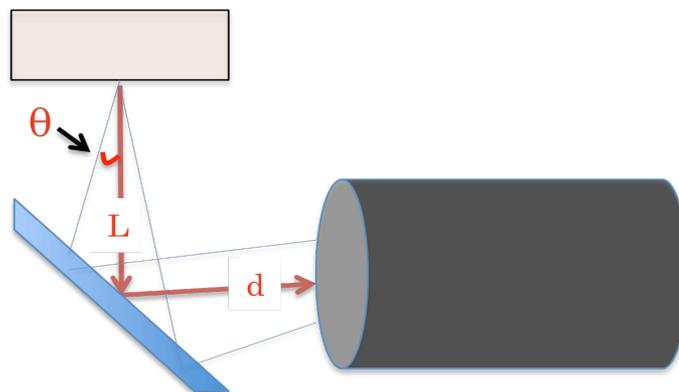


図8

$$\cos\theta = \frac{1}{n\beta} \quad (9)$$

宇宙線の運動量 $P = 1(\text{GeV}/c)$, $m_\mu = 106(\text{MeV}/c^2)$ とすると、

$$E^2 = P^2 + m_\mu^2 \text{ より、}$$

$$E = 1.01 (\text{GeV})$$

よって、

$$\beta = \frac{P}{E} = 0.99$$

ゆえに、(9) より、 $\theta = 22^\circ$ が得られる。これに本実験で使用する PM は 2 インチ即ち受光面の直径は 5cm であることを考慮して $L+d$ の最大値を求めると、

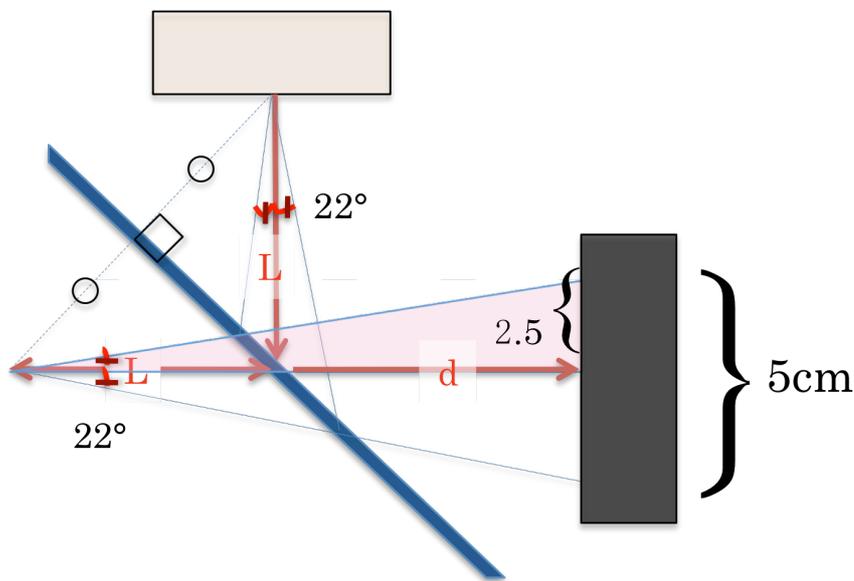


図9

$$L + d = \frac{2.5}{\tan 22^\circ} = 6.1(\text{cm})$$

この長さを超えてしまうと、チェレンコフ光のリングイメージが受光面の大きさよりも大きくなり、エアロジェルの中央を垂直に貫通した宇宙線であっても、チェレンコフ光を検出できなくなる。 $L+d$ を短くして、光電子増倍管の受光面におけるチェレンコフ光のリングイメージの半径を小さくすると、集光効率を上げられると考えられる。そこで、6.1(cm) を超えないように、可能な限り最短の距離でエアロジェル、反射鏡、光電子増倍管をセットできるようにアルミ製のチェレンコフ検出器を設計した。

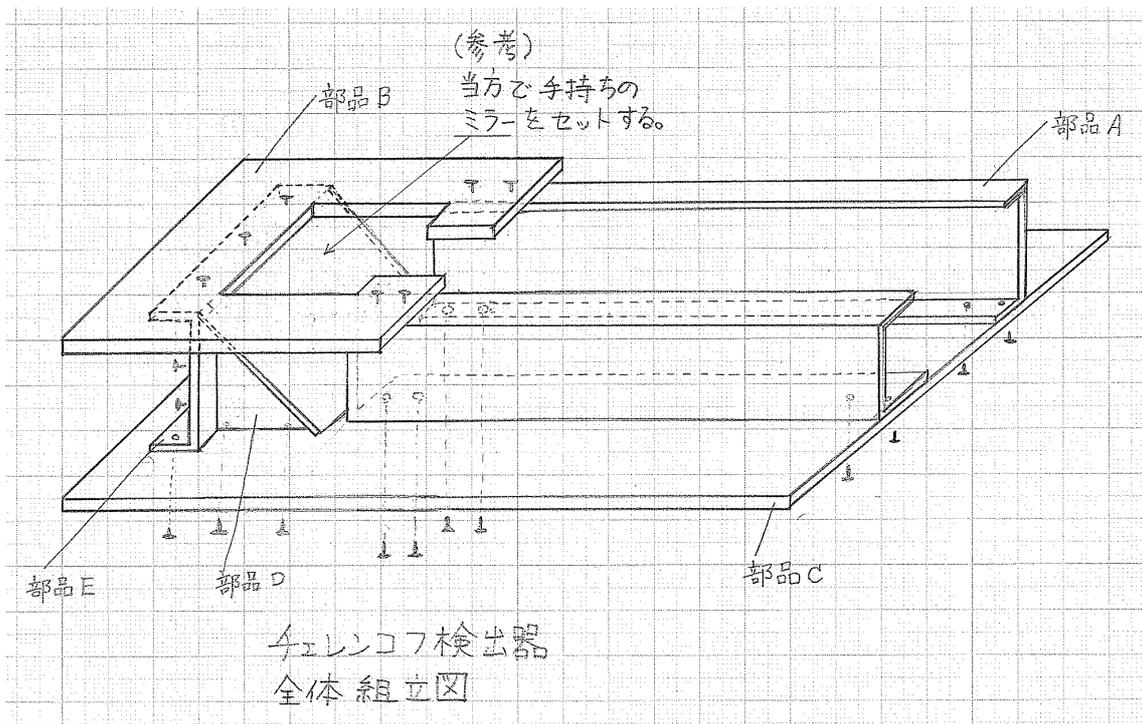


図10 チェレンコフ検出器全体組立図

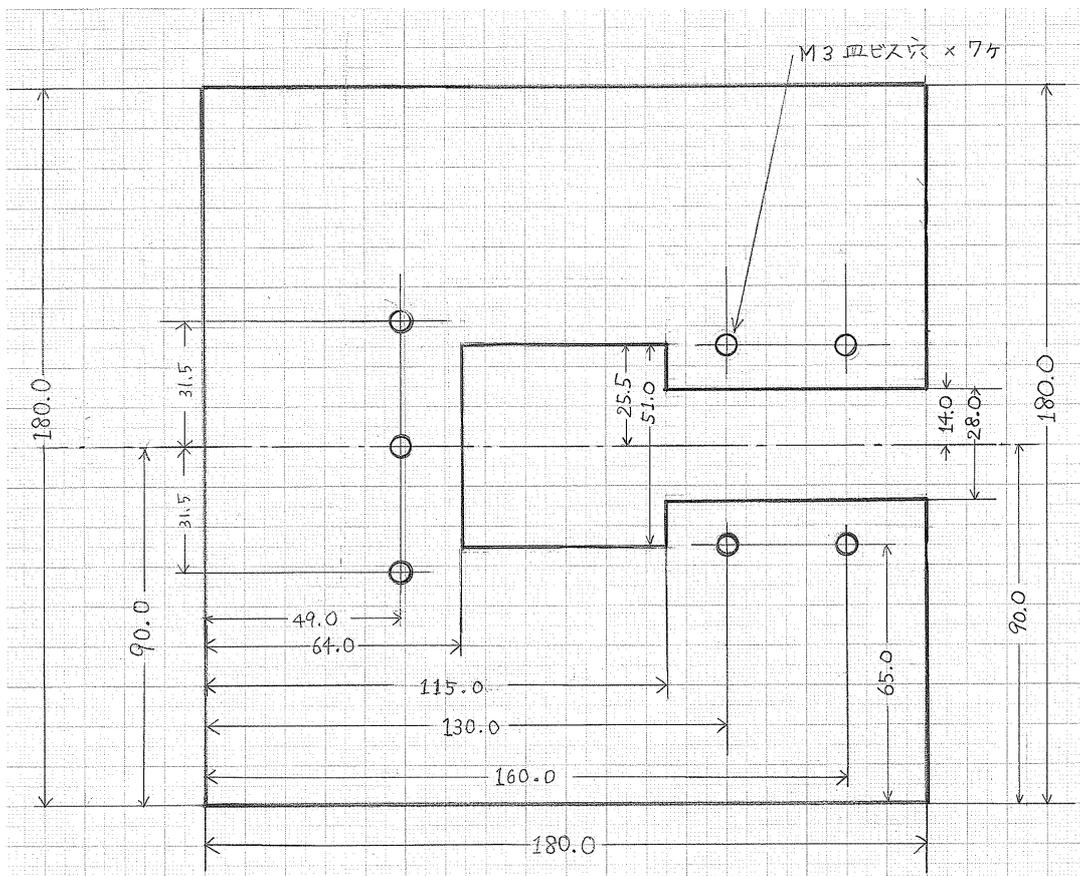


図11 チェレンコフ検出器の図面1

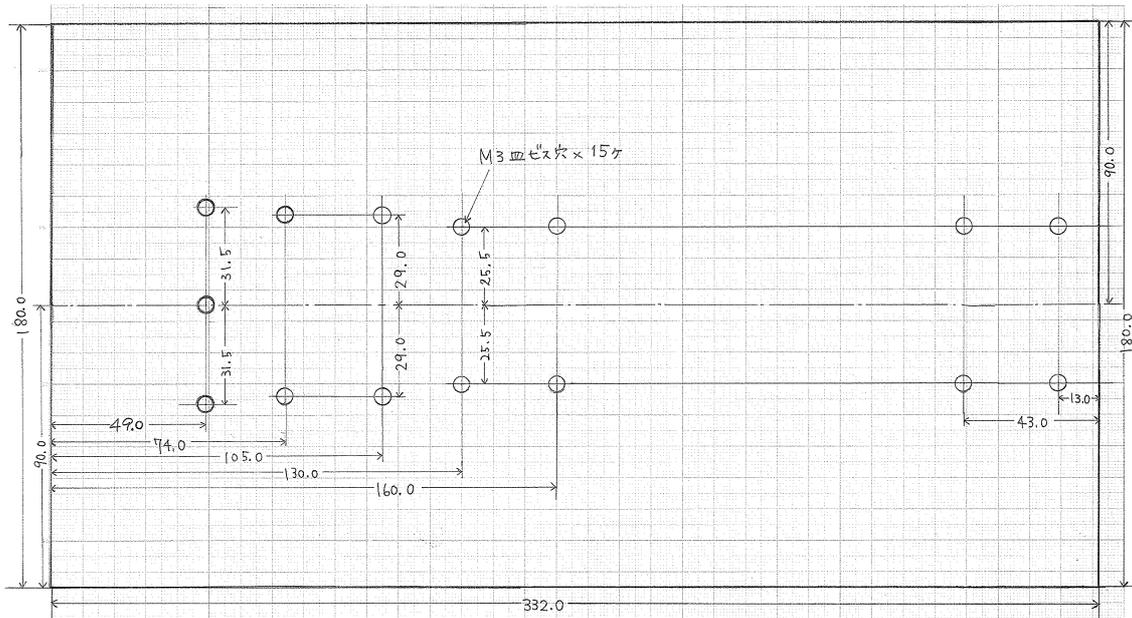


図14 チェレンコフ検出器の図面4

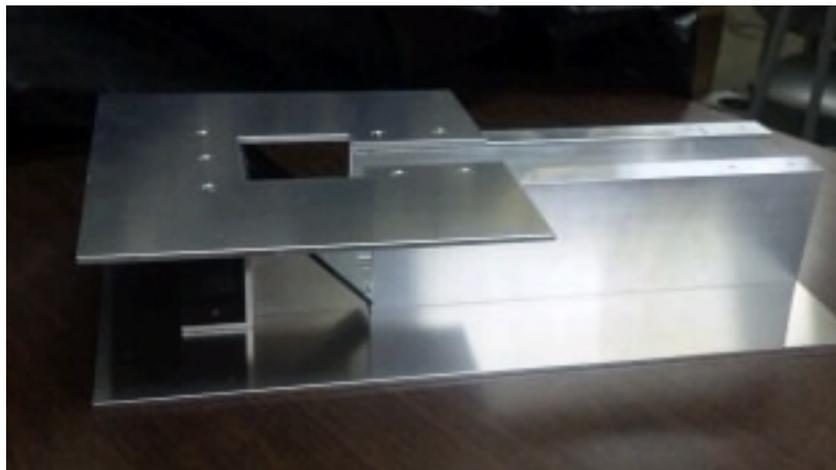


図15 完成したチェレンコフ検出器

3.4 シンチレーションカウンター

本実験では、宇宙線の入射・貫通の検出にシンチレーションカウンターを使用する。使用したシンチレーションカウンターを以下に示す。

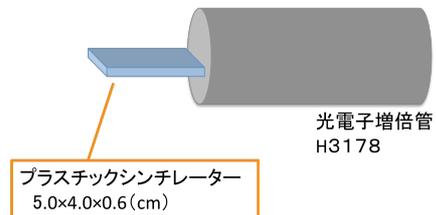


図16 シンチレーションカウンター

光電子増倍管の受光面とプラスチックシンチレーターは、オプティカルセメントで接着する。光電子増倍管の入射窓およびプラスチックシンチレーター部分にはアルミホイルを巻いて反射による集光効率を高め、さらに遮光テープを巻いて、余計な光が入らないようにした。

3.5 光電子増倍管

エアロジェルで発生したチェレンコフ光や、シンチレーターで発光した光を効率よく検出するには、光を増幅して電気信号として取り出すデバイスが必要である。そのために使うのが光電子増倍管（photo-multiplier）である。

光が金属または半導体でできた光電面に当たると光電効果によって電子が放出される。光電面としては、光子が電子に変換される量子効率ができるだけ高い物質を選ぶ必要がある。

図11のように光電面で放出された電子は電界で加速されて金属で作られた二次電子面（dynode）にあたり、電子数が増幅される。二次電子面を10段重ねておくと、電子数は光電面で発生した電子数の 10^8 倍以上に達する。この電子束を陽極からパルス信号として取り出す。

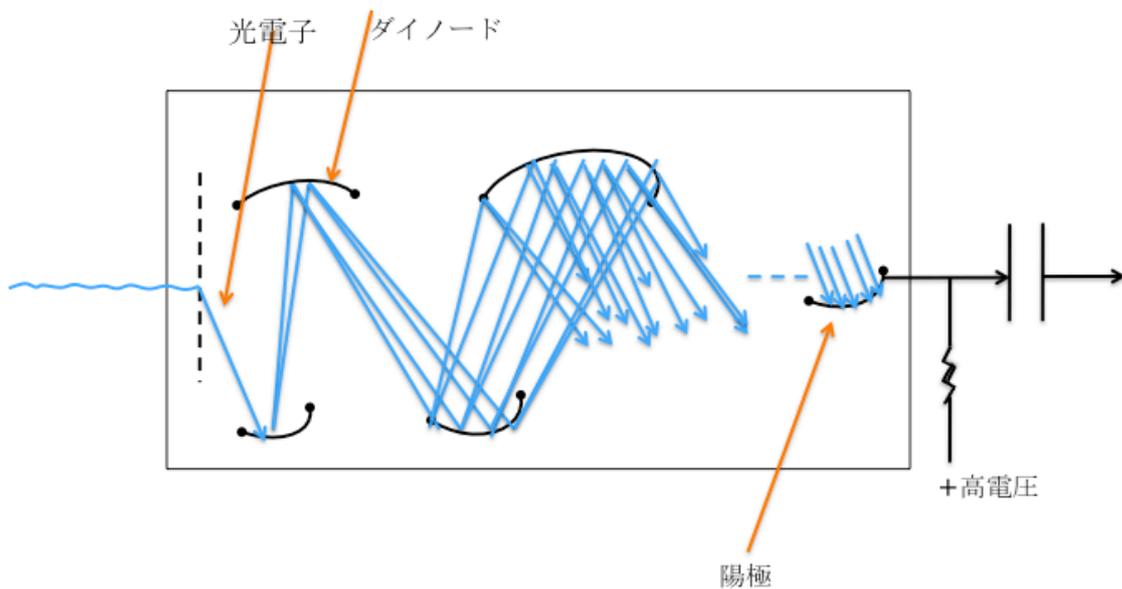


図17；光電子増倍管

本実験では、エアロジェルで発生したチェレンコフ光の検出には、口径2インチのH7195UVおよびH3983を、トリガーカウンターには口径1.5インチのH3178を用いた。いずれも浜松ホトニクス製である。

4 データ収集システム

検出器からの信号はまず NIM 規格のモジュールに送られ、トリガー用のロジックパルスを生
成する。一方、検出器のアナログ信号をデジタル信号に変換するためにCAMAC規格のADCが使
われる。ADC はクレートコントローラー (C.C) の制御下にある。このクレートコントローラ
ーと情報の授受を行う PC 側のインターフェースと PC 内のデータ収集プログラムの仲介を
行うものをデバイスドライバーという。

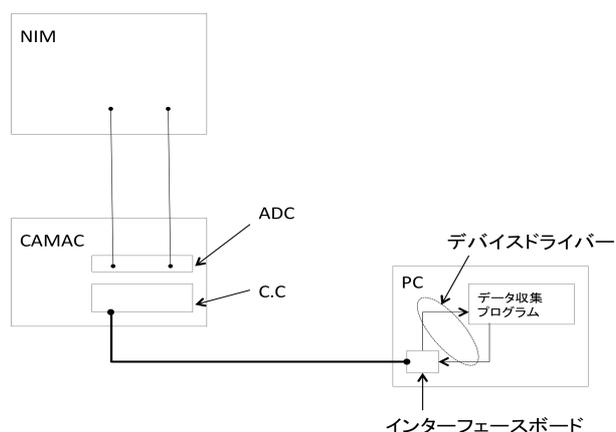


図18: 解析

4.1 camdrv

CAMAC読み出しに用いるデバイスドライバーとして camdrv を使用した。camdrv は高エネ
ルギー実験・原子核実験のための汎用データ収集ソフトウェアである KiNOKO の一部として作
成されており、東北大の榎本三四郎氏（現:ワシントン大学）が中心になって保守されてきた。
該当するホームページからソースコードをダウンロード・インストールできる。

* 参照 <http://www.awa.tohoku.ac.jp/~sanshiro/kinoko/camdrv/>

本実験では使用するPCの環境に合わせ、2.2カーネル、豊仲電子製CCPクレートコントローラ
ー+ISAバスカードの設定でインストールし、使用した。

4.2 CAMAC 規格の概略

CAMAC (computer Automated Measurement and Control)とは放射線検出器のアナログ電気信号をデジタル電気信号に数値化するエレクトロニクスの規格名である。計測や制御を目的とする装置を作成するのに、独立の単位機能を持つモジュール・ユニットを適当に組み合わせて構成することが行われる。このような複雑な装置を比較的単純なユニットの組み合わせで実現できる利点を持っている。

(1) クレート

クレートは標準ラックに取り付けられるようになっている。挿入できるモジュールは最大 7 個、ステーション 2 個分 (スロットナンバー 6、25) にクレートコントローラーを挿入している。それぞれのステーションは、モジュールをデータウェイコネクタに導き入れるためにデータウェイコネクタのソケット、モジュールを固定するためのねじ穴が設けられている。

(2) データウェイ

モジュールの相互の信号の授受はデータウェイを通して行われる。この受動多線式のハイウェイはクレート内部に組み込まれており、全てのステーションのデータウェイコネクタソケットに接続されている。

(3) モジュール

モジュールは幅約 1.7cm の整数倍、裏側の半分にはモジュールの回線配線に使われるプリント基板ヘッジが 86 ピンのコネクタとなっている。クレートに差し込むと自動ト・コントローラークレートの右端の 25 番目のステーションは特別な配線になっており、クレートコントローラと呼ばれる。クレートコントローラは 25 番目以外の通常の配線をされたステーションを少なくとも一つ占拠し、データウェイを監視する。

4.3 NIM 規格の概略

検出器に電圧をかける高電圧電源、ディスクリミネーターなどのロジックパルスを扱うエレクトロニクスのモジュールは NIM 規格の物を用いる。通常、12個のスロットを持つクレート電源を19インチ幅のラックに架装して使用する。各モジュールはバックプレーンにピン接続し、 $\pm 6V$ 、 $\pm 12V$ 、 $\pm 24V$ の電源供給を受けて動作する。

4.4 データ収集プログラムの概要

ADC や TDC で数値化されたデータは、検出器が発した電気信号パルスの大きさや時間差に比例する量である。これを、CAMAC から読み込みPCのハードディスク上にあるファイルに書き込み保存する。この部分のアルゴリズムをフローチャートとして図12に示す。こうして保存した生データは、テキストフォーマットで書かれており、PAWやROOTといったソフトウェアを起動して読み込み、ヒストグラムにbookingして、その分布を見ることができる。

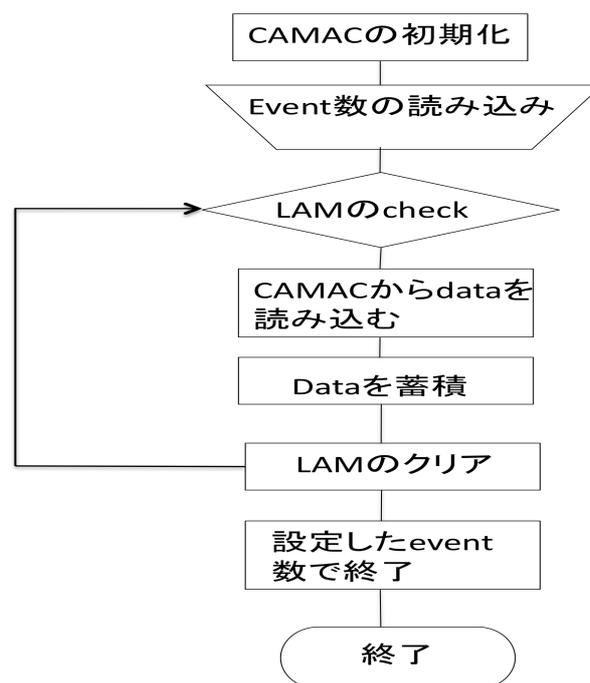


図 19: データ収集プログラムの概要

4.5 使用したモジュールとセットアップ

Clock Generator : 規則正しいパルスを発生させる装置

Discriminator : 入力信号が設定した threshold を越えたときにパルスを出力する装置

Gate Generator : 入力信号を必要な波高と幅に形成する装置

Coincidence : 複数の信号が同時にきたときに出力する装置

Signal Divider : 信号を分ける装置

Attenuator : 信号を小さくする

Amp : 信号を増幅する

Scaler : 信号の数を数える

ADC : アナログ電気信号をデジタル電気信号に変換する装置

5 宇宙線の測定

5.1 セットアップ

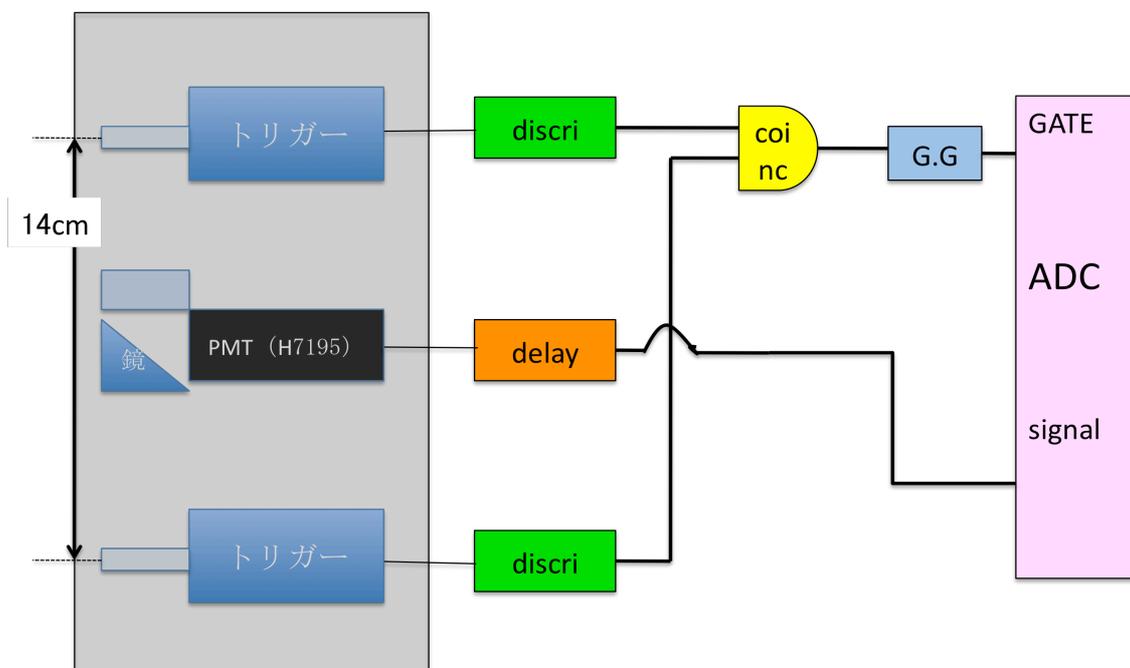


図20 : Block Diagram

トリガーカウンターには 1350[V]、光電子増倍管には 1900[V] の電圧をかけ、ADCは LeCroy2249Wを使用した。また、ディスクリミネーターのThreshold 電圧は100mV、ゲートパルスの幅は110(nsec)とした。このとき、コインシデンスのパルスが出る平均のレートは 0.02(Hz)となった。



図21：実際のセットアップ

5.2 測定結果

100[events] データを収集した結果は次のようになった。（縦； number of event/bin 横； adc counts）

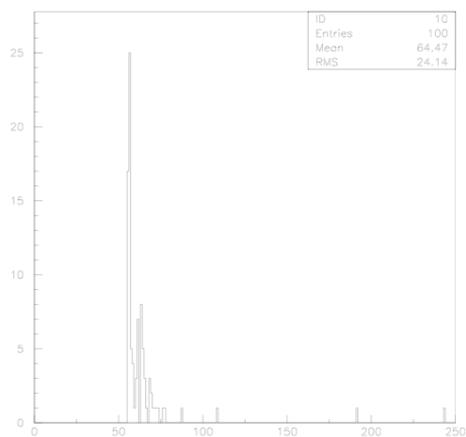


図22；エアロジェルなし

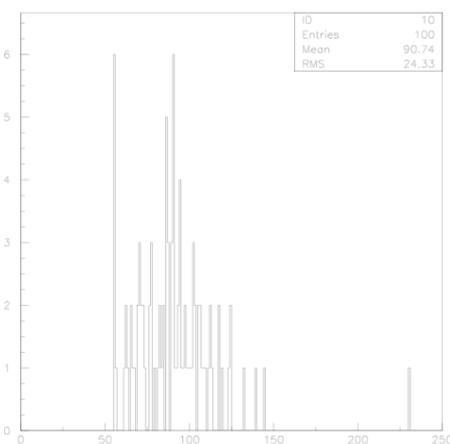


図23；エアロジェルあり

上のグラフよりエアロジェルなしとありでは分布が顕著に違うので、エアロジェルで発生したチェレンコフ光が雑音と分離して検出できていると考えられる。そこで、このセットアップで4種類（ $n=1.089$, $n=1.038$, $n=1.028$, $n=1.014$ ）の屈折率の違うエアロジェルについて1000イベントずつデータ収集した。

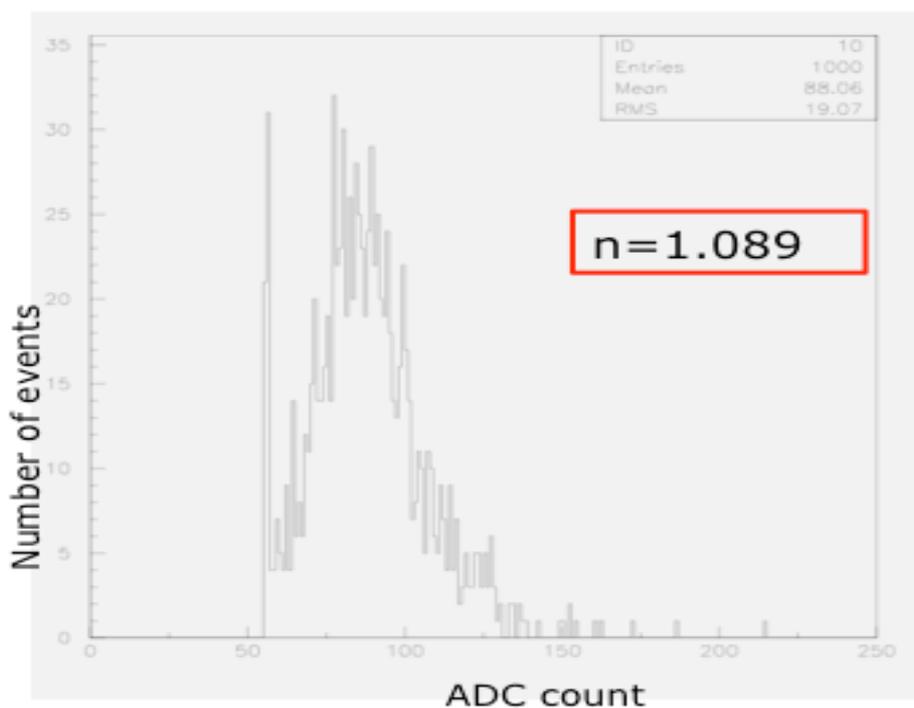


図24 ; n=1.089のADC分布

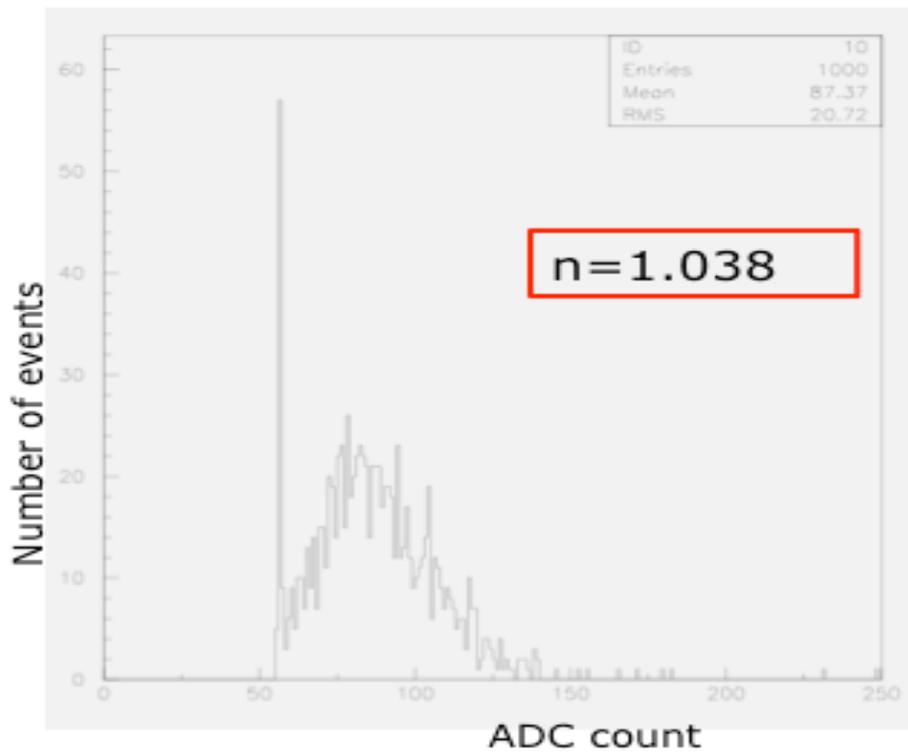


図25 ; n=1.038のADC分布

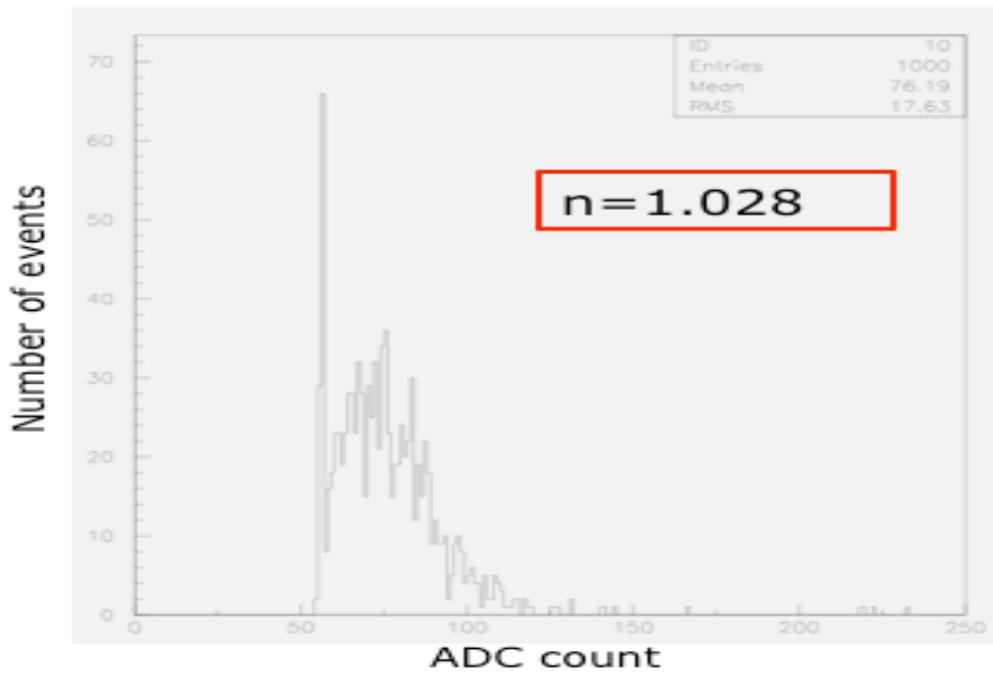


図26 ; n=1.028のADC分布

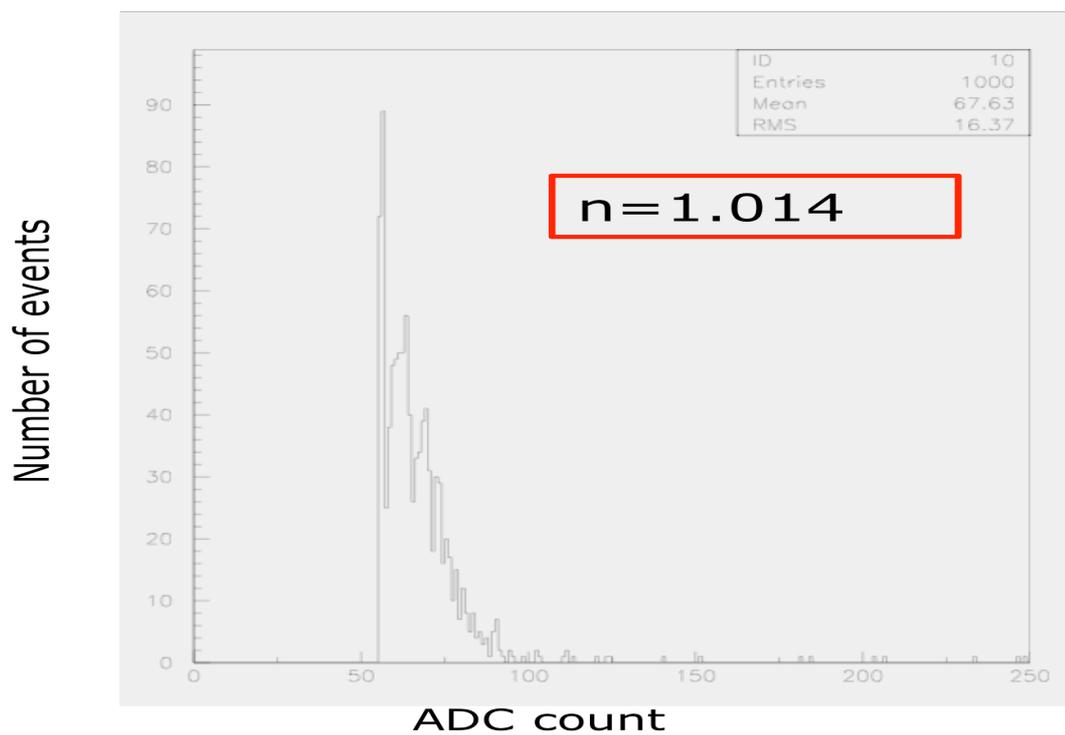


図27 ; $n=1.014$ のADC分布

屈折率 n が小さいほど運動量 P のしきい値は大きくなるので、光電子が検出されていないイベントの数（ペDESTAL= 60 ADC counts 付近のイベント数）が増えていることがわかる。

6 チェレンコフ光による光電子数の導出

6.1 ADCcount から光子数への変換

1光電子あたりのADCcountをLEDの波高分布から求めた。

6.1.1 セットアップ

Block diagram

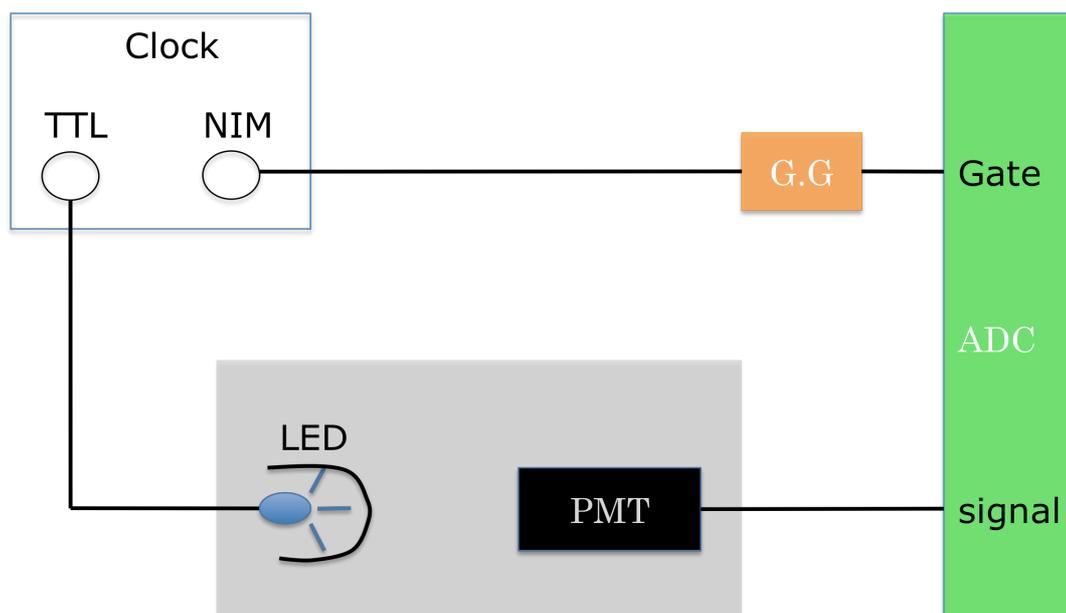


図28 ; Block diagram

図21に示すセットアップで、クロックジェネレーターから幅10(nsec)のパルスを送ってLEDを発光させた。LEDはペンで黒くぬり、遮光テープで減光した。また、LEDとPMTは段ボールに入れシートで包む等して遮光した。以下、波高分布とともに、オシロスコープで確認した平均の波高を示す。

6.1.2 波高分布

LED発光による光電子増倍管出力パルス波高が約20mVの際の波高分布を示す。

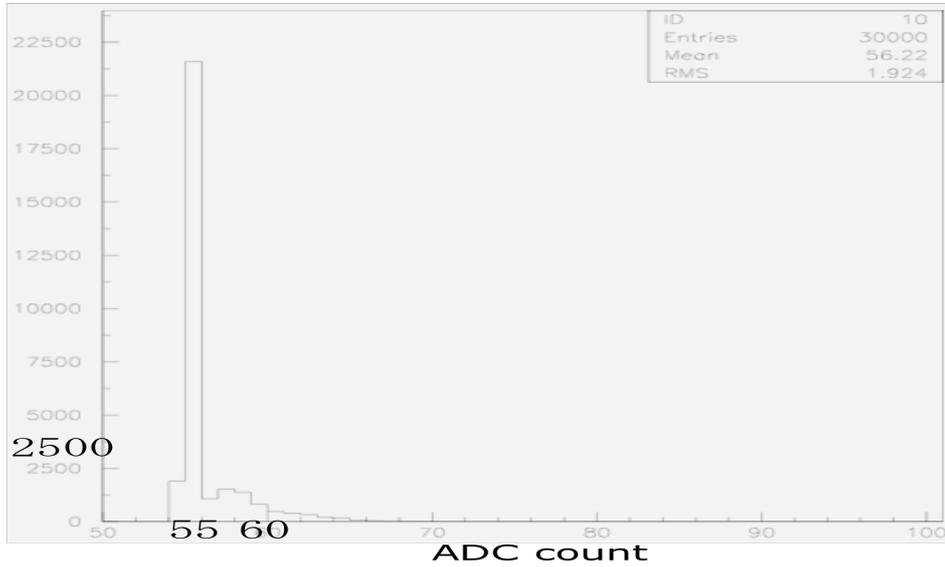


図29 ; LED (20mV) のADC分布

LED発光による光電子増倍管出力が約75mVの際の波高分布を示す。

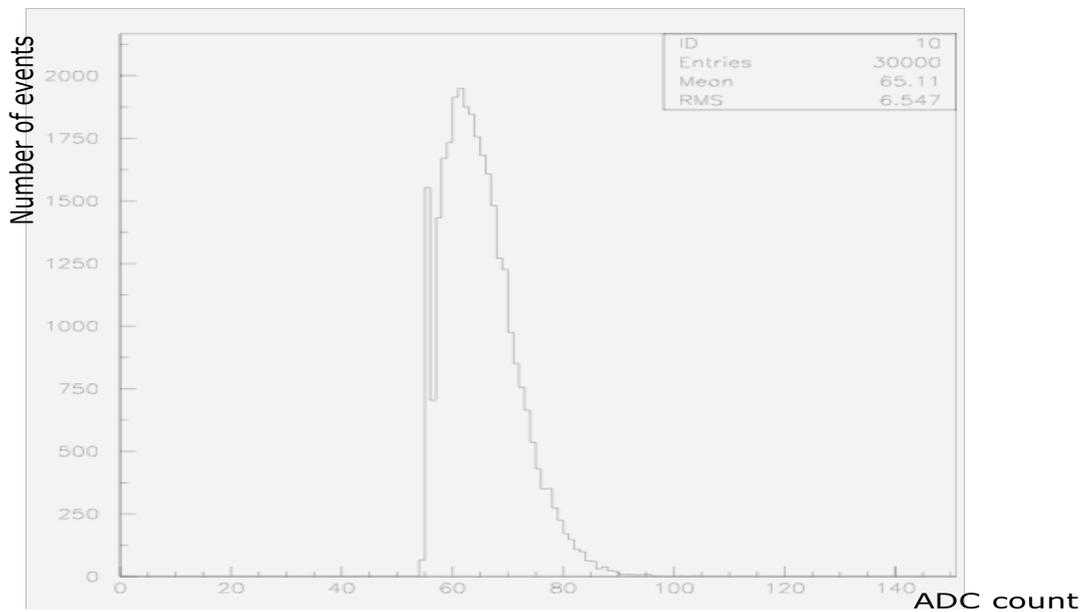


図30 ; LED(75mV)のADC分布

上記のグラフから光電子数をポアソン分布と仮定し、ペDESTALのイベント数から光電子数の平均値を求める。さらにパルス波高が約20mVのデータから、ペDESTAL以外が1光電子のイベントが支配的と仮定して、1光電子あたりのADCcountと波高分布の広がり σ を次のように見積もった。

ポアソン分布の式は以下のようになる

平均値 μ で観測値が n になる確率密度は

$$f(n; \mu) = \frac{\mu^n e^{-\mu}}{n!} \quad (10)$$

$n=0$ になる確率

$$f(0; \mu) = e^{-\mu} \quad (11)$$

$$e^{-\mu} = \frac{\text{n=0のevent数}}{\text{全 event 数}} \quad (12)$$

$$\mu = -\ln\left(\frac{\text{n=0のevent数}}{\text{全 event 数}}\right) \quad (13)$$

$$\sigma = \text{半値全幅} / ((\text{ピーク-ペDESTAL}) \div 2.35) \quad (14)$$

・ LED (出力20mV) の時

$$\mu = 0.27 \text{ (個)}$$

1photoelectronあたりのADCcount=3 ADC count

$$\sigma(1\text{p.e.}) = 0.3(\text{p.e.})$$

・ LED (出力70~80mV) の時

$$\mu = 3.0 \text{ (個)}$$

1photoelectronあたりのADCcount=3 ADC count

$$\sigma(1\text{p.e.}) = 0.3(\text{p.e.})$$

6.1.3 モンテカルロシミュレーション

見積もりが妥当か評価するため光電子数はポアソン分布、その他の条件は上記の通りとしてモンテカルロシミュレーションを行う。ソースコードを次のページに示す。

main関数では、事象数、平均光電子数、単一光子数、単一光子波高のADC値、出力ファイル名をargumentで与えられるようにした。

ポアソン分布をする乱数はiranp、その中で必要となる階乗はnfactorial、正規分布乱数はrand_normalの各関数が受け持つ。一様分布乱数は標準で用意されているrand関数を用いた。

```

// phel.cc 20100224 created.
// PMT's pulse height for PhotoElectrons
// is simulated by Monte Carlo method.
#include <iostream>
#include <fstream>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>

using namespace std;

FILE* fp; // 出力ファイルポインタを宣言

// 正規分布即ちガウス分布をする乱数を生成
double rand_normal(){
    double return_value;
    return_value = 0.0;
    for( int i=0; i<12; i++){
        return_value = return_value + ((double)rand()/((double)RAND_MAX));
    }
    return_value = return_value - 6.0;
    return return_value;
}

// nの階乗
int nfactorial(const int n){
    if( n==0 ) return 1;

    int nreturn = 1;
    int i = 1;
    while(i<=n){
        nreturn = nreturn * i;
        i++;
    }
}

```

```

    }
    return nreturn;
}

// ポアソン分布をする乱数
// 注意! Returned value は20を超えない。
int iranp(const double average ){
    double fraction[20];

    // i_fractionをクリアする
    for( int it=0; it<20; it++){
        fraction[it]=0.0;
    }

    // fractionを計算し、それらをreturn valueにしまう。
    for( int kt=0; kt<20; kt++){
        double factorial = (double)nfactorial( kt );
        double df = exp( -1.0*average )*(pow(average,kt))/factorial;
        if( kt==0 ){
            fraction[kt]=df;
        } else {
            if( fraction[kt-1]<1.0 && df<1.0e-6 ){ // 小さな範囲は無視する
                fraction[kt]=1.0;
            } else { // 積分する
                fraction[kt]=fraction[kt-1]+df;
            }
        }
    }
} // forループ終了

// 一定の分布における乱数を生成
double rand_unif = (double)rand()/((double)RAND_MAX);

// return valueを決定する

```

```

int ireturn = 0;
while( fraction[ireturn]<rand_unif ){
    ireturn++;
}

return ireturn;
}

//=====
// main funciton.
//=====
int main(int argc, char* argv[])
{

//光電子増倍管とADC の特性を述べるためのパラメーター
const double gain_fluc = 0.30; // 1光電子の増幅率のふらつき

//取り扱いの確認
if( argc < 5 ){
    cout<< "Usage : ./phel Nevents Average single_p.e_ADC Outfile."<< endl;
    return 1;
}

//出力ファイルを開く
fp = fopen(argv[4], "w");

//イベントループのための必要とされるセットアップ
const int nevents = atoi( argv[1] );
double average = atof( argv[2] );
const double adc_1pe = atof( argv[3] ); // 1光電子あたりのADC counts.
double real_adc;

//出力ファイルの一番上にイベント数を書く.

```

```

fprintf(fp,"%d¥n",nevents);

// イベントループ始め
for( int ievent=0; ievent<nevents; ievent++ ){

    // ポアソン分布をする乱数の生成
    int npe = iranp( average );
    if( npe==0 ){ // 光電子が与えられないとき.
        real_adc = 0.0;
    } else { //光電子が0個でなければ,
        real_adc = ((double)npe)*adc_1pe; // 平均の波高
        for( int i=0; i<npe; i++){ //増幅率のふらつきを考慮する
            real_adc = real_adc + rand_normal()*gain_fluc*adc_1pe;
        }
    }

    // このイベントを書き出す
    int iadc = (int)real_adc;
    fprintf(fp,"%d¥n", iadc);

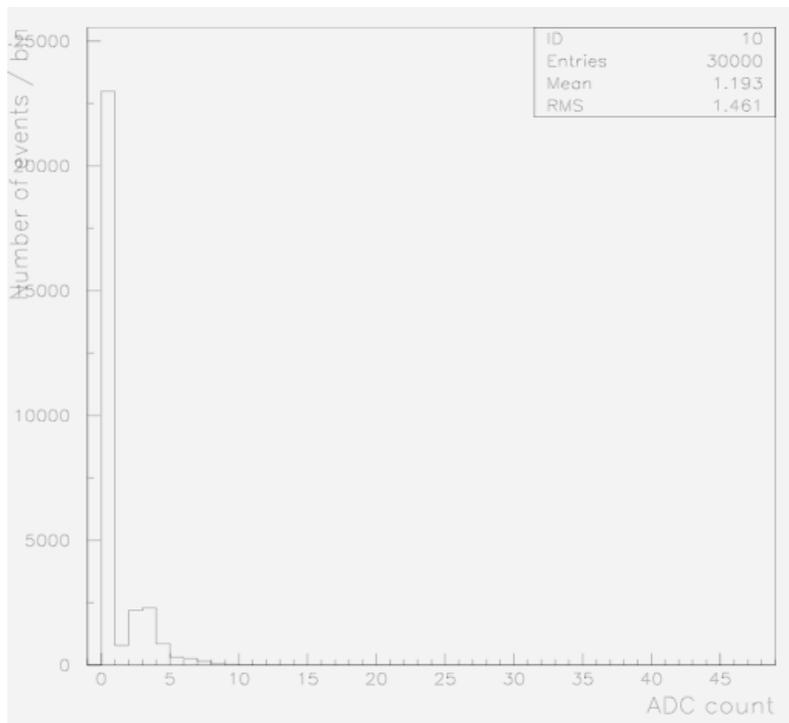
}

// イベントループ終了
// 出力ファイルを閉じる
fclose(fp);
return 0;
}

```

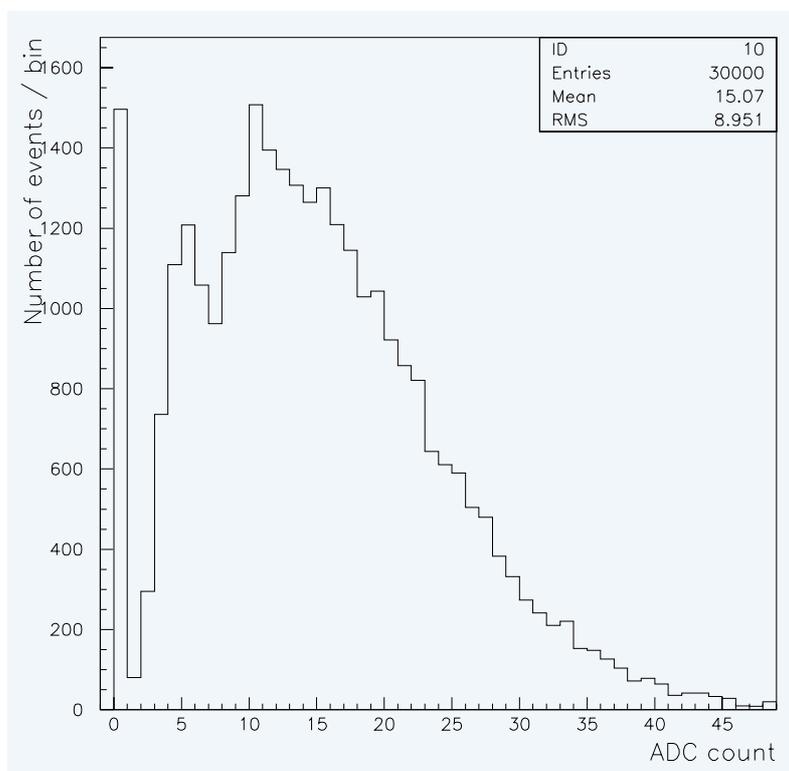
6.1.4 モンテカルロシミュレーションの結果

ここでペダスタルは実際は55だがシミュレーションでは0の位置においた。



$\mu = 0.27$ 個
1p.e.波高=3ADC count
 $\sigma = 0.3$ (p.e.)

図31 ; $\mu = 0.27$ の分布



$\mu = 3.0$ 個
1p.e.=3 ADC count

図32 ; $\mu = 3.0$ の分布

モンテカルロシミュレーションの結果をLEDを点灯させて得た波高分布と比較する。

LED(20mV)

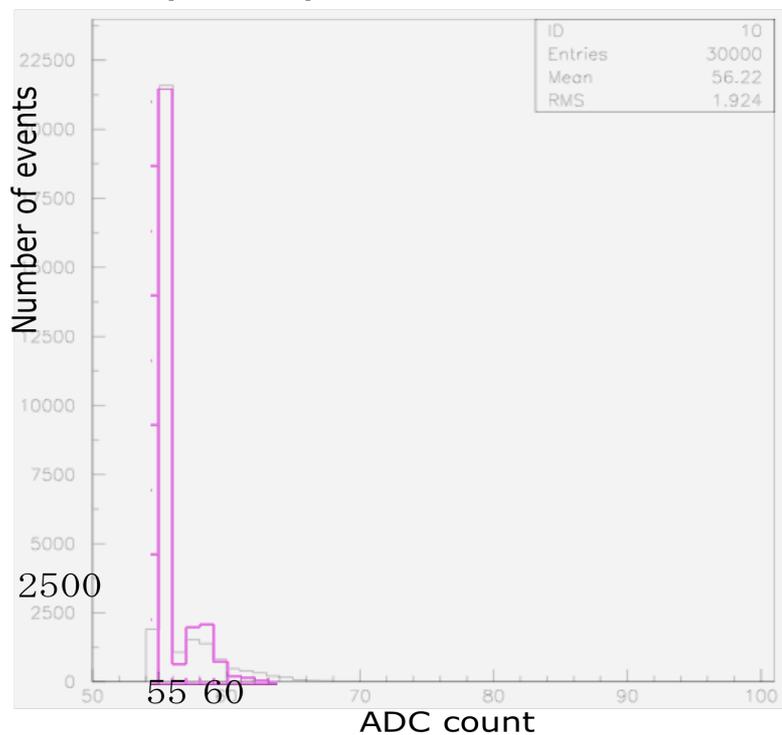


図33 ; $\mu=0.27$ のシミュレーションとの比較

LED(波高70~80mV)

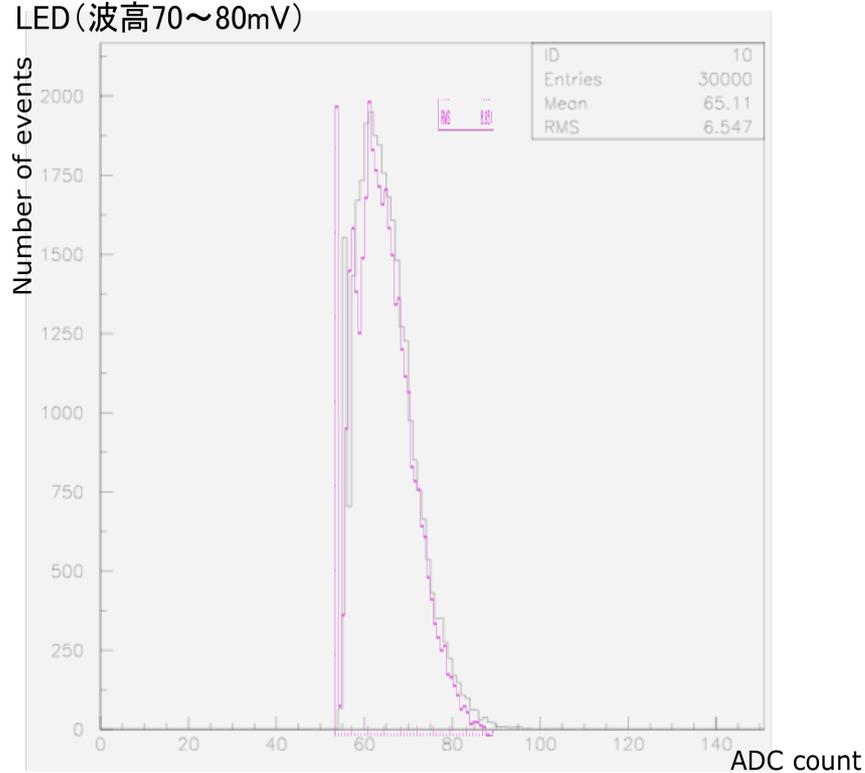


図34 ; $\mu=3.0$ のシミュレーションとの比較

図33と図34より、モンテカルロシミュレーションはLEDを点灯させて得た波高分布を良く再現させており、1photoelectronあたりのADC count=3 ADC countという見積もりは妥当であったと言える。

6.2 光電子数の実験値と理論値の比較

宇宙線データから得た光子数とチェレンコフ光子数の期待値の間の比較について議論する。

	屈折率	実験値	理論値の光子数 $N \times \text{量子効率 } 0.2$	収集効率(集光 効率 \times 透過率)
1	$N=1.089$	7.3	26	0.28
2	$N=1.038$	7.0	9.8	0.73
3	$N=1.028$	6.0	7.6	0.78
4	$N=1.014$	2.0	1.4	1.43

表6

実験値の光電子数の出し方

$$N_e = (\text{波高分布ピークのadccount} - \text{ペDESTALのadccount}) / \text{1photoelectronあたりのadccount}$$

1photoelectronあたりのadccount=3.0countとする

$n=1.089$ で収集効率がほかと比べて悪いのは、見た目からもわかるほどエアロジェルが濁っていたので透過率が悪いと考えられる。また、 $n=1.014$ の収集効率が1を超えているが、これは、理論値を計算する時に宇宙線の運動量を1GeVとして計算しているところ、実際は1GeVより大きな運動量の宇宙線では、より多くのチェレンコフ光の発生があるので、その効果が考慮されていないためである。いずれの場合も、数個の光電子と雑音は良く分離しており、 $n=1.089$ のもの以外のエアロジェルでは比較的良好な透過率であることがわかった。

7 2段積みによる宇宙線の測定

1段積みのセットアップでは、屈折率が低いエアロジェルほど、発生するチェレンコフ光の光量は少なかった。これは、屈折率の低いエアロジェルほど運動量のしきい値が大きいためである。そこで、屈折率の異なるエアロジェルを使って、2段に積むことにより、特に屈折率の低い方のエアロジェルチェレンコフ検出器で光電子が検出されていることを要求して、速度の大きい宇宙線粒子を選び、この要求の有無が他方のエアロジェルチェレンコフ検出器の波高分布にどのように影響するかを調べるため、2段積みによる宇宙線の測定を行った。

7.0<予備実験>H3983のHVについて

2段積みの宇宙線の測定をするためには、後に出てくるBlock Diagram からわかるように光電子増倍管が2本必要である。1本は前実験（1段での宇宙線の測定）で使用したH7195UVを使用するが、あと1本はH3983の光電子増倍管を使用する。このH3983の増幅率をなるべくH7195UVの光電子増倍管の増幅率に近づけるため、H3983のHVを決定するための実験を行った。

7.0.1Block Diagram

1段積みのBlock Diagramの光電子増倍管をかえたもの
使用するエアロジェルは $n=1.028$ のものを使用した。

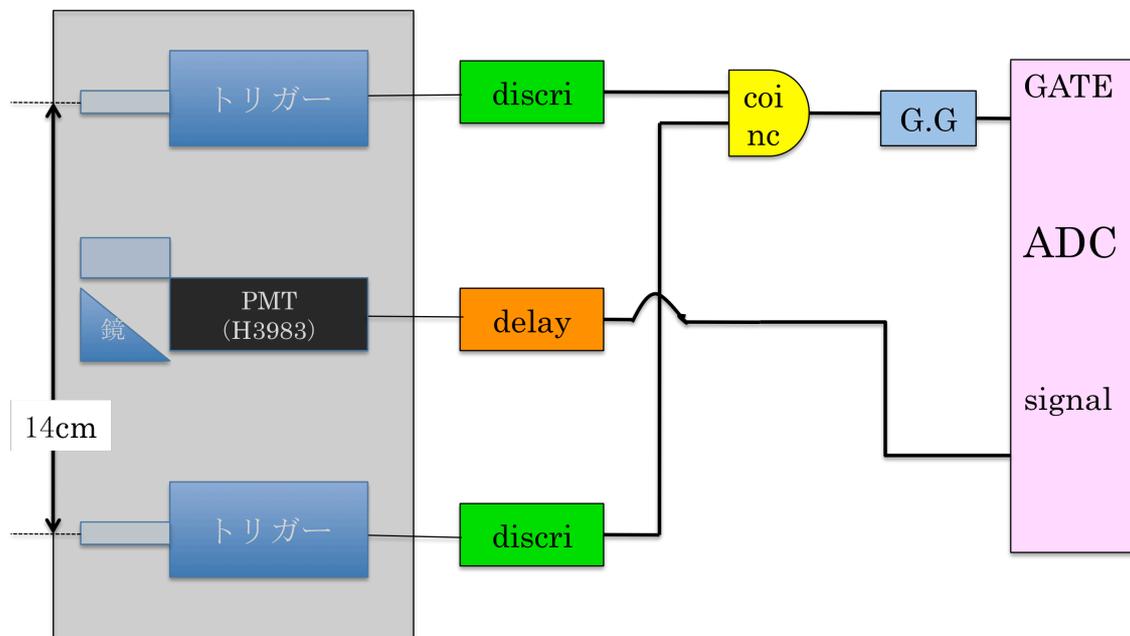
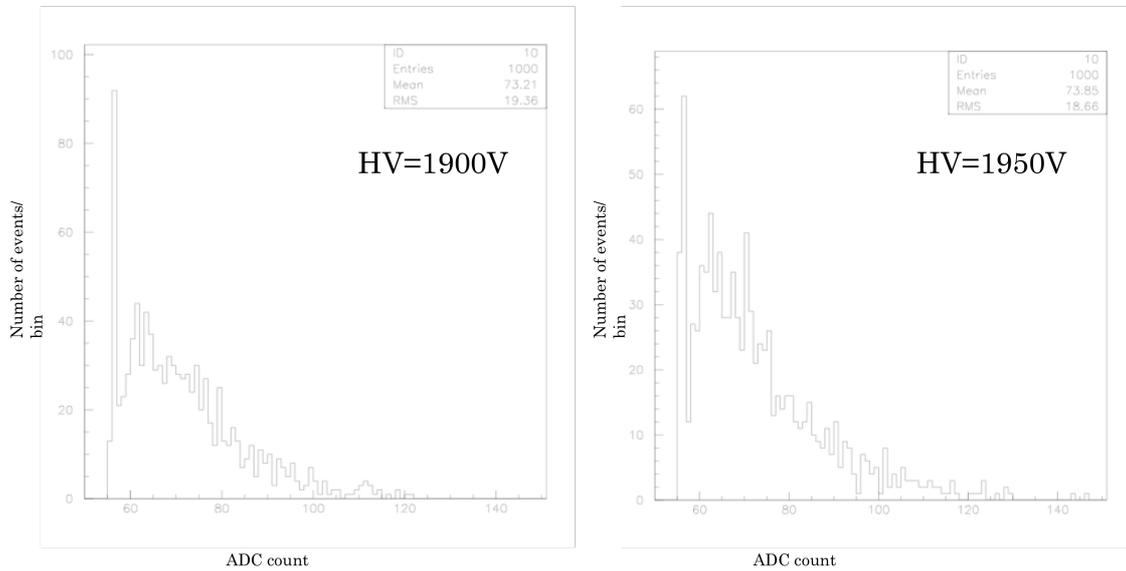


図35； Block Diagram

7.0.2測定結果

(H3983) n=1.028で1000イベント



(H7195) n=1.028で1000イベント

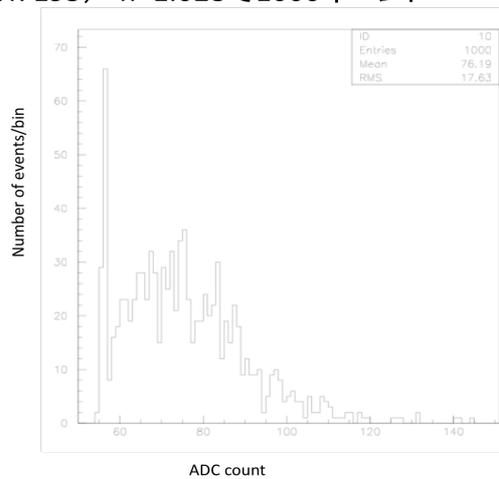


図36：HVの決定

上の測定結果よりH3198の印加電圧は1950Vにすると、H7195UVに1900Vを印加した場合に近いことがわかる。したがって、H3198の印加電圧を1950Vと設定した。

7.1 2段積みでの宇宙線の測定のセットアップ

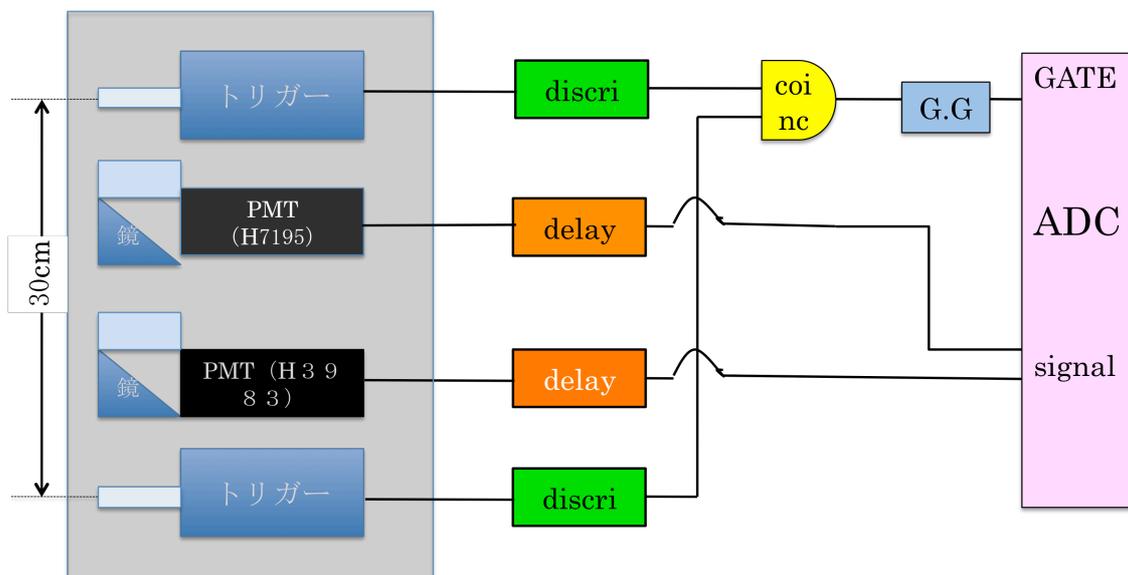


図36； Block Diagram

上下のトリガーには1350V、上のPMT (H7195) には1900V、下のPMT (H3983) には1950Vの電圧をかける。



図37；実際の2段積みでのセットアップ

7.2 測定結果

上段に $n=1.028$ (adc 0) 下段に $n=1.089$ (adc 1)で1500イベント収集したデータ

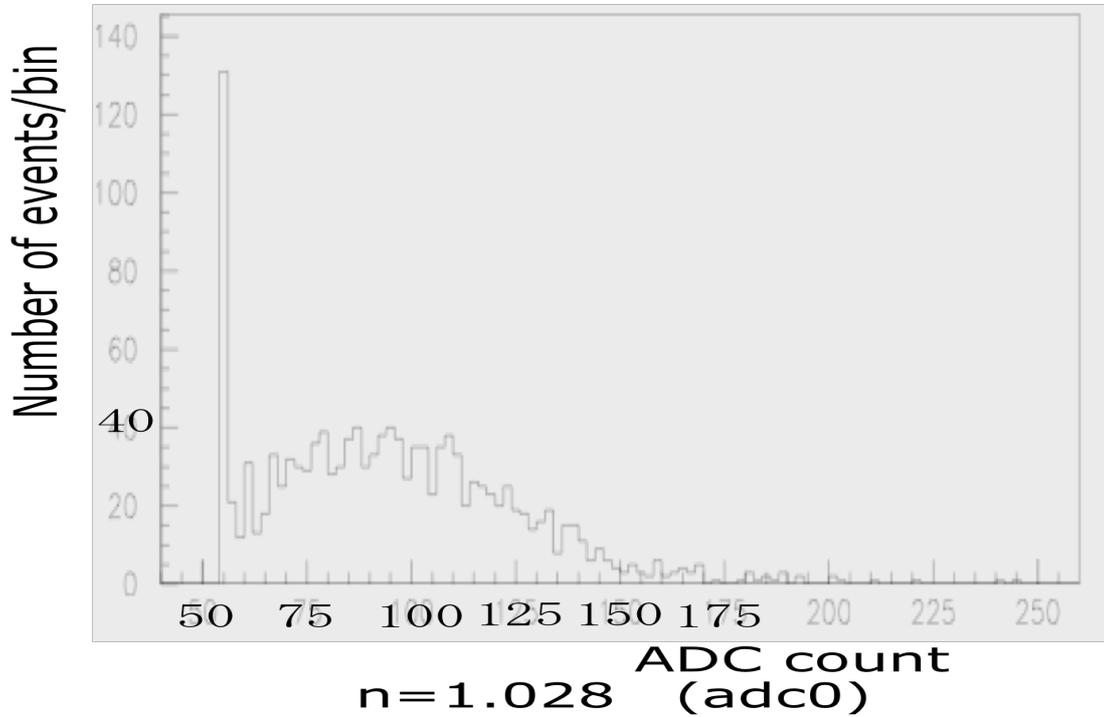


図38；上段 ($n=1.028$) のADC分布

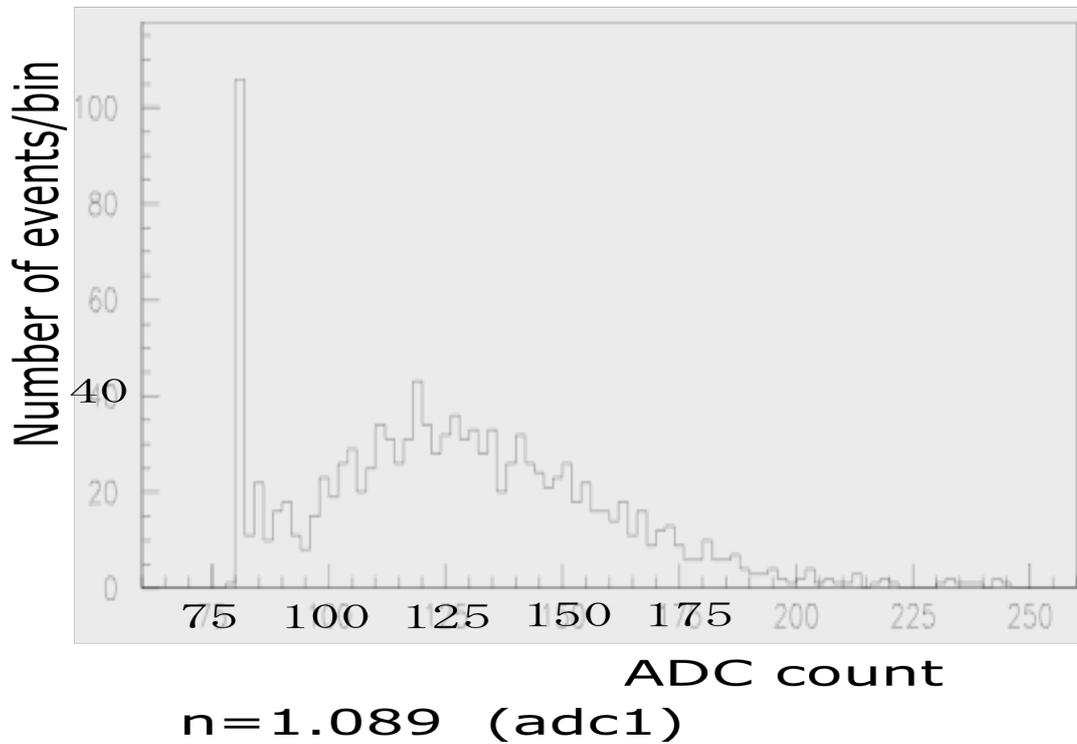


図39；下段 ($n=1.089$) のADC分布

横軸をadc 0, 縦軸をadc 1としたときの2次元プロット

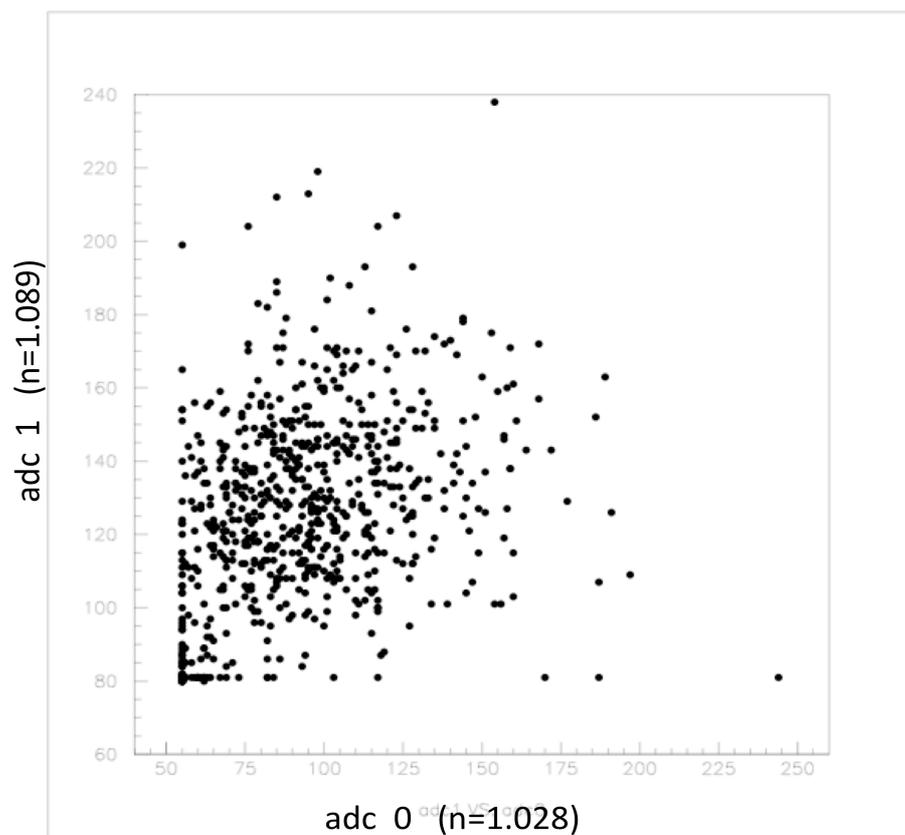


図40 ; 2次元プロット

8 考察

n=1.028のエアロジェルが光ったときのn=1.089側の波高分布を調べた。

(adc0:n=1.028 adc1;n=1.089)

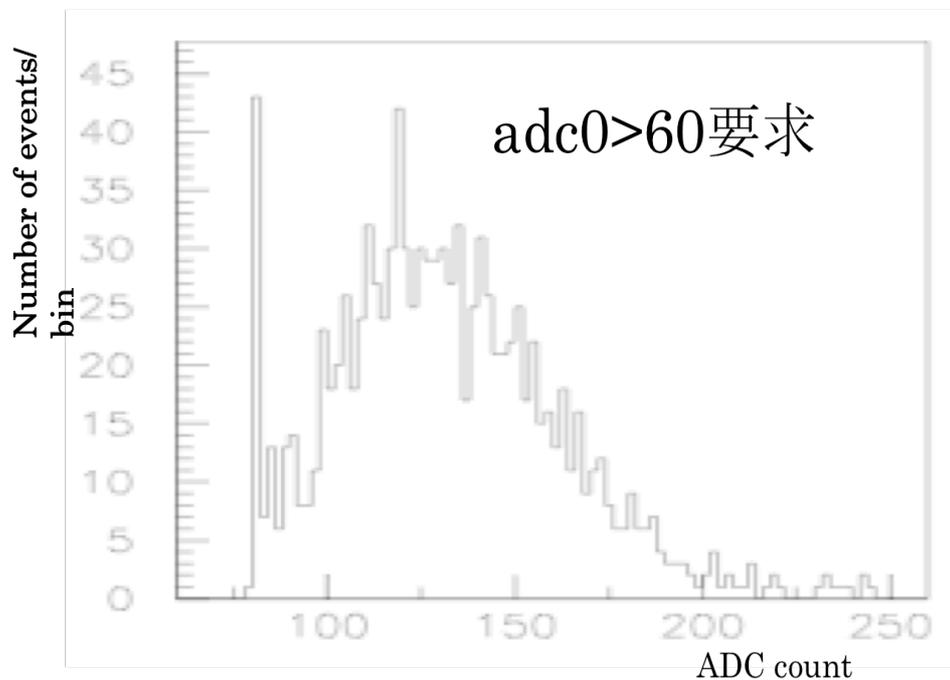


図41；adc0>60でのadc1のADC分布

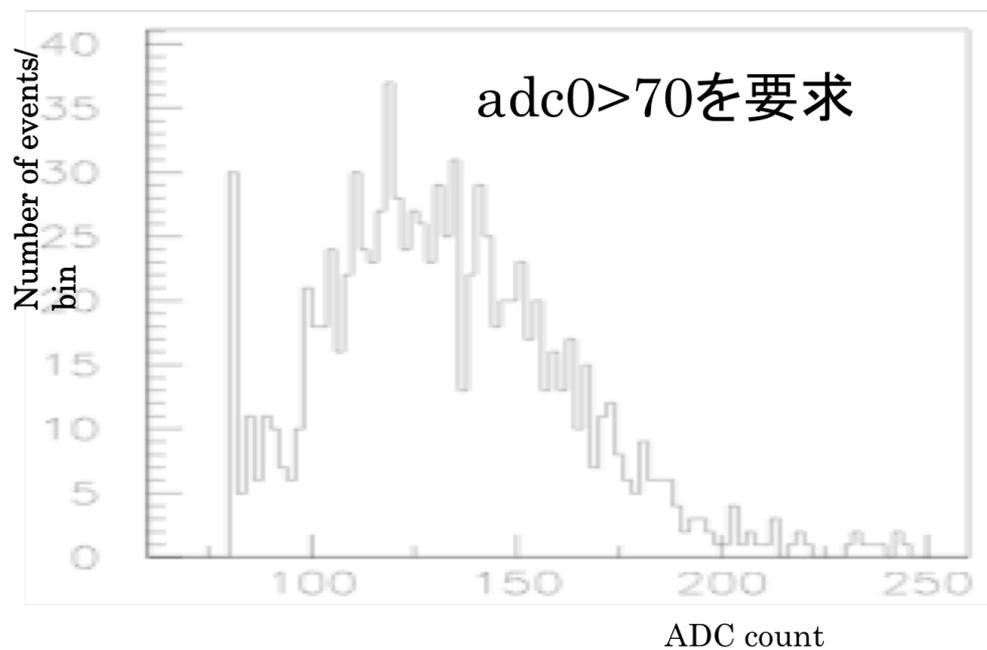


図42；adc0>70でのadc1のADC分布

図41・図42の2つのグラフのペDESTALに注目してみると、屈折率が低いエアロジェルのチェレンコフ光が認められる際にも屈折率の高い方のエアロジェルでチェレンコフ光を検出できなかったイベントが残っている。しかし、 $adc0 > 60$ と $adc0 > 70$ のグラフを見ると、ペDESTALに分布するイベント数がいずれも図39の下段に示した分布に比べ、著しく減っている。したがって、完全ではないが、速度の遅い宇宙線粒子と速い宇宙線粒子を弁別できたといえる。

速度弁別の改善策としては、平面鏡を凹面鏡に替えることによって集光効率をあげることが挙げられる。また、 $n=1.089$ のエアロジェルが、昨年度は屈折率 $n=1.06$ と測定されていたことから考えて、疎水性のエアロジェルといえども、多湿の場所に放置すると吸湿して屈折率が上昇し透明度が下がるのではないかと考えられる。

9 まとめ・課題

本研究の結果、以下の知見を得ることができた

- ・ 2インチ口径の光電子増倍管に適したチェレンコフ検出器を設計・製作した
- ・ $n=1.014$ から $n=1.089$ の4種類のエアロジェルをセットして宇宙線ランを行い、いずれも数個の光電子に対応する信号とノイズを分離し測定できた
- ・ 2段積みのセットアップでは、速度の速い宇宙線粒子と遅い宇宙線粒子を弁別する効果を調べた

今後、以下に挙げる課題に展開することが考えられる

- ・ より集光効率を上げるために鏡を凹面鏡にする
- ・ 今回は $n=1.028$ と $n=1.089$ の組み合わせを用いたが、他の組み合わせの速度弁別効果について調べる
- ・ エアロジェルを乾燥保管庫に入れ、屈折率が戻るかを調べる

参考文献

2008年度卒業論文 エアロジェルで発生するチェレンコフ光を用いた荷電粒子の測定

政池 明：素粒子を探る粒子検出器，岩波書店，2007.

Les Hancock, Morris Krieger, Saba Zamir (倉骨 彰/三浦 明美共訳)；C言語入門，アスキー出版局1984

塚越 一雄：はじめてのC++，技術評論社，2000.

謝辞

卒業研究を行うにあたり、お力添えを頂いた先生、先輩方にこそより感謝申し上げます。指導教官の宮林先生、および林井先生にはお忙しい中丁寧にご指導いただき、大変お世話になりました。また、岩下先輩を始め多くの先輩方にアドバイスを頂き、研究を行うことが出来たと感じています。

改めて、お世話になった方々全員に感謝申し上げます。本当にありがとうございました。