

田老における超高エネルギー宇宙線の観測

II. 超高速チェレンコフ検出器

鈴木昇¹⁾ 佐久山博史²⁾ 山崎航也³⁾ 倉持浩司⁴⁾ 佐久本功達⁵⁾ 中野秀典⁶⁾

1. 序論

田老宇宙線観測所において、宇宙線空気シャワーの芯部（コア）近傍での現象を中心に観測を続けている。シャワーのコア近傍における電子密度分布は、一般的に見て非常に複雑な構造を持っている。このシャワーの電子密度分布と時間軸構造及び個々のシャワーの発達状況や揺動を調べることは、一次宇宙線の相互作用や組成を知りうる有力な手段の一つと考えられている。過去においては、シャワーの到着時間分布の観測は、主としてシンチレーション検出器が使われていたが、最高速の検出器でもパルスの立ち上がり時間 (t_r) は2.51ns、半値幅 (FWHM) は4.37nsという応答時間のものではあった^[1]。しかしコア近傍におけるシャワーフロントの厚さや曲率 (図1) は2~3 nsしかないため^[2]、その時間構造や揺動をより詳しく測定するには、シンチレーション検出器より数倍速いシステム

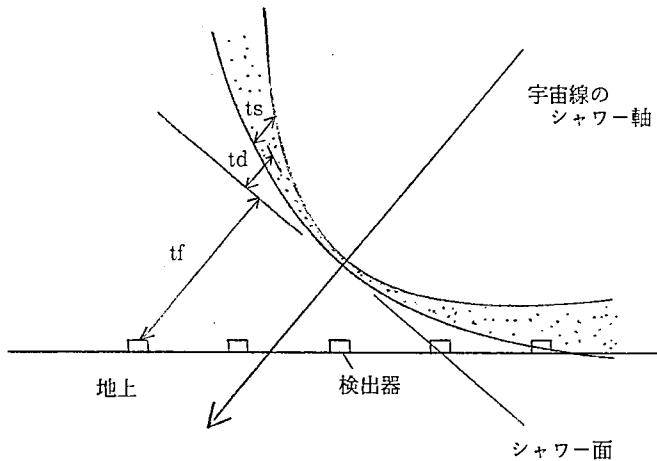


図1 空気シャワーフロントの概念図
 t_s : シャワーフロントの厚さ(約2~3)
 t_d : シャワー面からの平均遅れ時間
 t_f : シャワー面が検出器に到達する時間

- 1) 明星大学理工学部物理学科助手 宇宙線物理
- 2) 明星大学理工学部物理学科教授 宇宙線物理
- 3) 明星大学理工学研究科修士課程 物理学専攻
- 4) 国際短期大学情報通信科助手
- 5) 明星大学情報科学研究センター
- 6) 日本データコム株式会社

が必要不可欠である。今回、アクリル板を用いたチェレンコフ光による超高速粒子到着時間測定用0.25㎡チェレンコフ検出器 (Ultra Fast Cherenkov detector:UFC検出器) システムを開発した。このUFC検出器システムからは、 $tr=1.37$ ns、 $FWHM=2.15$ nsのシステムレスポンスが得られた^[3]。このシステムを明星大学田老宇宙線観測所の空気シャワーアレイの中心部に3台設置した。UFC検出器の基本的動作特性および空気シャワーアレイとの連動観測により得られた基礎的データを報告する。

2. チェレンコフ波形観測システム

2-1 本システムの概要

このチェレンコフ波形観測システムは従来の明星大学田老宇宙線観測所の空気シャワー・アレイ (ASアレイ)^{[4] [5] [6]} に新たに粒子到着時間観測用の超高速チェレンコフ検出器 (UFC検出器) 3台を加えたものである。UFC検出器用トリガー検出器はASトリガーとは別に設置した。

3台のUFC検出器は3辺が5.51m、7.65m、9.43mの直角三角形の各頂点位置するように配置し、この直角三角形の内接円の中心が芯部検出器の中心から6.15m離れた位置に設置した。また、UFC検出器用トリガー検出器として、面積が0.25㎡の速いシンチレーションカウンターを3台のUFC検出器の上にそれぞれ設置し、3-fold coincidenceトリガー方式とした。本システムのブロック・ダイアグラムを図2に示す。

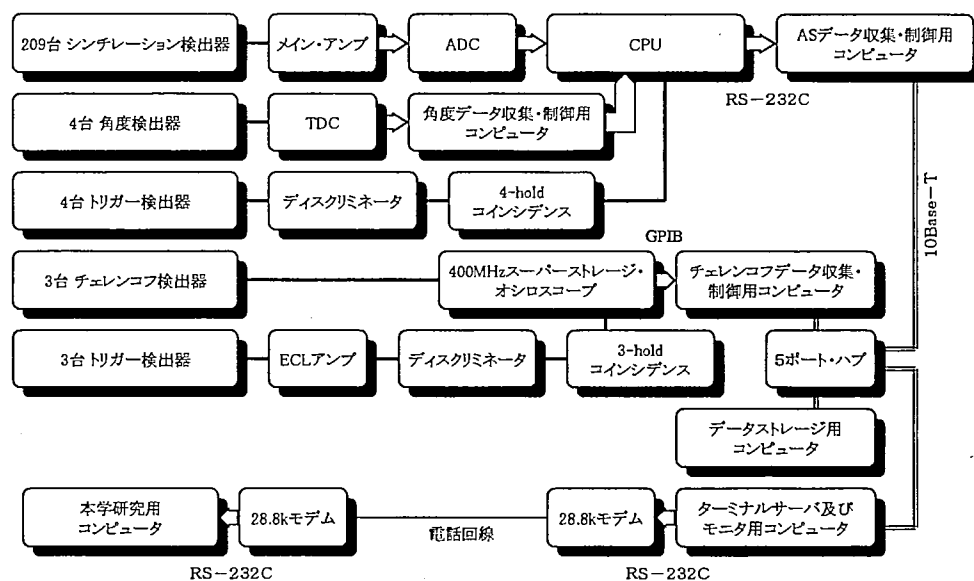


図2 田老宇宙線観測所における観測システムのブロック図

2-2 超高速チェレンコフ検出器の構成

荷電粒子が媒質 (透明な気体、液体、個体) 中を通過すると、媒質中の原子又は分子を励起する。この励起状態から基底状態に移るときに出す蛍光をシンチレーション光という。有機物を混合することでシンチレーション光の発光効率は良くなる。現在用いられている

プラスチックシンチレータの発光時間は3 ns程度である。また、発光機能の全く違ったチェレンコフ輻射は、荷電粒子が媒質中を一定以上の速さ ($v \geq c/n$ c : 真空中の光速、 n : 媒質の屈折率) で通過した場合、電場による誘電分極が起こる。この荷電粒子が通過した後、分極が元に戻る際、位相の合った光だけが輻射される。これをチェレンコフ輻射という。この光は発光時間が2 ~ 3 psと極端に短いため、粒子の速度や進行方向を決めることができる。しかし発光量がシンチレーション光に比べて極めて少ない。

UFC検出器は面積が0.25 m² (50cm×50cm) で厚さが5 cmの亚克力板 (BICRON製) を発光体として使用し、3台の検出器のうち2台は浜松ホトニクス社製の光電子増倍管 (PMT) R1828-01 (Bialkali Photocathode) を採用し、残りの1台は同社製のR4004 (UV Glass) を使用した。この2種類の光電子増倍管の電気的特性は同一である (各2インチ管、パルスの立ち上がり時間 $t_r=1.7\text{ns}$ 、印加電圧H.V.= -3000V)。

PMTの出力波形を観測して正確な粒子到着時間分布を求めるために、亚克力板の入った容器の内側には黒いラシャ紙を貼り付けて荒いサンドペーパーで処理を施し、容器内の乱反射によるチェレンコフ光の時間のずれ (約2.1ns以上) をなくした。また、チェレンコフ光信号は非常に周波数が高いため、リングングパルスを出しやすい。これを防ぐためブリーダとケーブル、オシロスコープ等とのミス・マッチングを無くし、ダイノード間の電界分布を直線的にし、しかも陽極電流の20倍以上の電流を分割抵抗に流した。さらに終段になるほどコンデンサーの容量を増加させて、空間電荷をおさえた。このため、分割抵抗による熱負荷を軽減するように抵抗のワット数を増した (図3)。

UFC detector Voltage Divider Networks
R1828-01

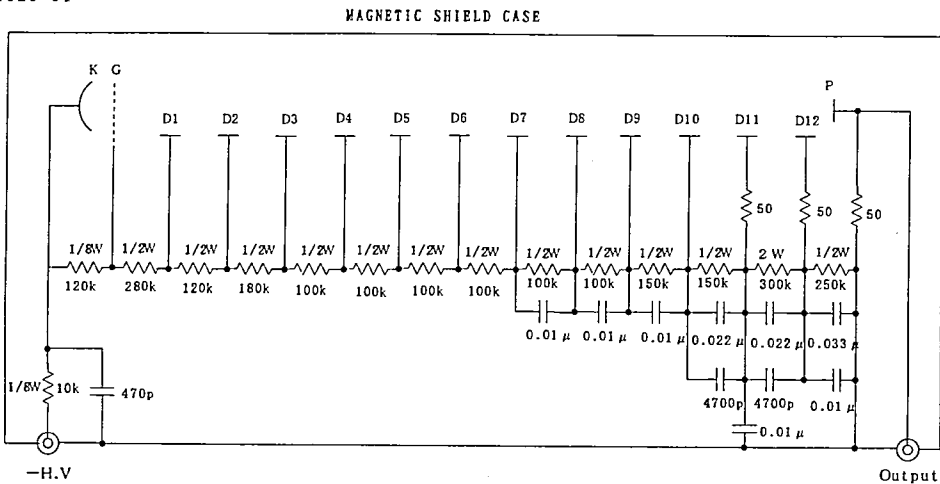


図3 超高速チェレンコフ検出器

PMTの出力パルスは減衰の少ない高周波同軸ケーブル (10D-SFA、減衰量0.059dB/m) を通して伝送する。UFC2 (ケーブル長38m) とUFC3 (35m) からのパルスはケーブル長の差により15nsの時間差を付け、アダー (帯域2 GHz、 $t_r=0.1\text{ns}$) で加算し、他の1台UFC1 (36m) からのパルスは直接、それぞれ50Ωの終端抵抗を通してストレージ・オ

シロスコープ（岩通、TS-8422）に接続する。3台の検出器信号は1台のストレージ・オシロスコープで測定している。

使用したストレージ・オシロスコープは CCD を装着したスキャン・コンバータ管 2 本を内蔵した方式で、アナログ400MHz、10div/ns、100Gサンプル/sec以上で入力信号をデジタル化し、2現象の同時観測を行うことが可能である。このストレージ・オシロスコープはトリガー・パルスにより外部トリガーされ、PMTのパルスをアナログ波形として記録した後、管面（縦横8、10division）を縦511ドット、横766ドットに分割しデジタル化する。現在の掃引時間は5ns/divに設定されており、50nsまでの現象が測定可能となっている。解像度は1ドット当たり0.065nsである。データは766個のドット数から成り、それぞれ1バイトのバイナリで、したがって1データは1532バイトとなり、GPIBインターフェースを介してパソコンに送信される。

2-3 超高速チェレンコフ検出器用トリガーシステム

各トリガー検出器からの信号は高速処理を行うために、50Ω系入力インピーダンスECL

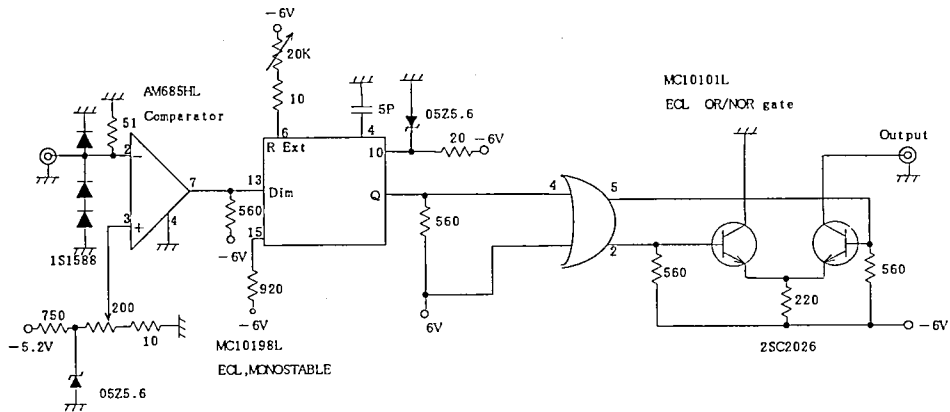


図4 UFC用高速ディスクリミネータ回路

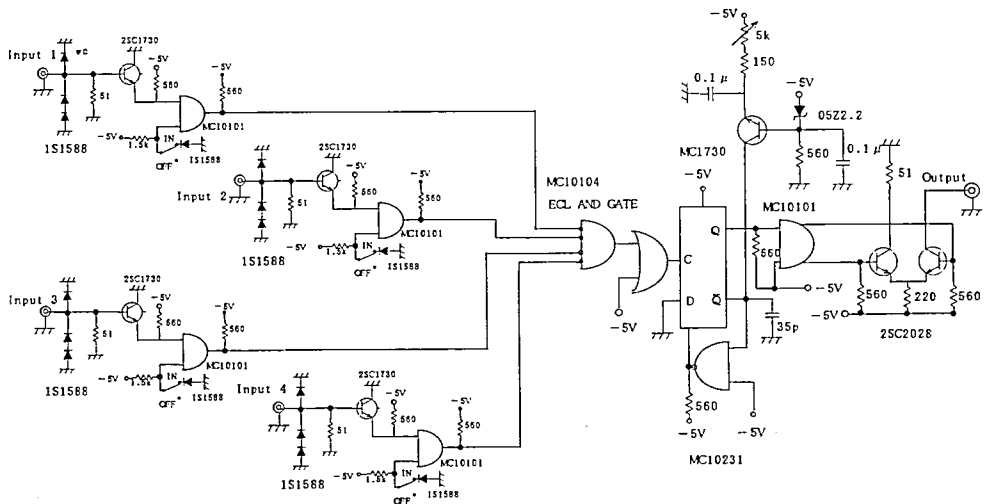


図5 UFC用高速4-Fold Coincidence回路

(Emitter-Coupled Logicモトローラ社製) Amp (tr, tf (立ち下がり時間) < 2 ns、Gain ≈10)、ECLタイプDiscriminator (tr, tf<1 ns、delay time<11ns、pulse width=13 ~230ns、図4) に接続され、それぞれの信号は3-hold ECL coincidence (tr, tf<1 ns、delay time<13.5ns、pulse width=6 ~180ns、図5) 回路に送られトリガーパルスが作られる。トリガーシステム系の遅れ時間は29ns以内に押さえることができた。

2-4 収集ネットワーク

メインCPU内のメモリーに蓄えられているASデータは、パソコンのハードディスク(HDD)に記録される。これには、クオート社製のCOSMO-IIという宇宙線観測用にカスタマイズされたソフトウェアを用いる。このソフトウェアはデータ収集以外にも、メインCPUのコントロールや、イベントカウンタのリセット等をおこなうことができる。一方、チェレンコフデータはN₈₈-日本語BASIC (86) (MS-DOS版)で作成されたプログラムを用いて、パソコンに記録される。また、オシロスコープによる測定条件等もこのプログラムで設定の変更が可能である。

以前はそれぞれのパソコンのHDDに記録されたデータをフロッピー・ディスクに移し、それを本学に郵送していたが、1996年8月より観測所内にWindows95でLANを構築し、観測所から本学のパソコンにモデム経由でデータを転送できるようにした。

2台のデータ収集用PC (図6中央の2台) は別の2台のPC (図6左側の2台) とLANで接続されている。ASデータ及びチェレンコフ・データはネットワーク上のデータ・ストレージ用の2台PCのHDDにそれぞれ記録される。データ・ストレージ用のPCをファイル・サーバとして、クライアントにMS-LAN Managerを使って、リモート側、つまりデータ収集用PCのネットワーク・ドライブにマウントする。こうして、それぞれのデータをファイル・サーバに記録する。

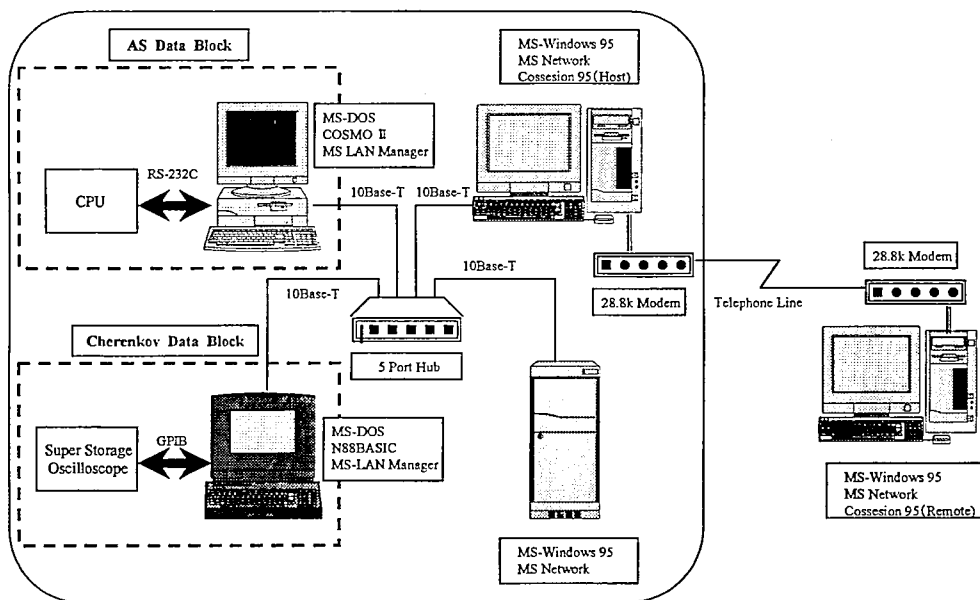


図6 田老宇宙線観測所データ収集ネットワーク

もう1台のPC [Cosession 95(Host)] には電話回線を介して、本学の研究室にあるPCからリモート接続できるようになっている。リモート・ソフトとして、Artisoft・HUCOMのCosession95を使用しており、本学のPCから田老宇宙線観測所のモニタ用PCの画面を監視し、また遠隔操作も可能となっている。モニタ用PCからはファイル・サーバの中身も見ることができるので、データが正確に記録されているかどうかを確認することができ、これにより、トリガーの監視もおこなうことが可能となっている。Cosession95 (Host)にはファイル転送機能もあるので、データファイルを圧縮した後、本学のPCに転送する。

3. 実験場所と期間

3-1 観測場所

- (1) 明星大学日野キャンパス4号館3階
- (2) 明星大学田老宇宙線観測所(岩手県下閉伊郡田老町)
(北緯39度45分、東経141度56分、平均標高200m)

3-2 観測期間

- (1) 日野キャンパス
観測期間 1995年9月～1996年1月
観測時間 552時間
- (2) 田老宇宙線観測所
観測期間 1996年8月17日～1997年8月8日
観測時間 8,544時間
有効観測時間 8,328時間

4. 測定結果

日野キャンパス及び田老宇宙線観測所における実験項目についての測定結果を以下に述べる。

4-1 日野キャンパス

検出器の基礎的測定を以下の順序で行った。

4-1-1 暗電流パルスの測定

PMTは光が入射していない状態でもわずかながら電流(暗電流)が流れている。この暗電流のパルス波形を調べた。このパルスは印加電圧の関数で表すことが出来る。PMTから出力されるパルスとしてはダイノードから出るパルスが一番trが短いのである。このパルスを測定することにより、測定系のシステムレスポンスが決定できる。観測方法は、PMTの光電面を上側に向けた場合、宇宙線が光電面(ガラス板)を通過するとチェレンコフ光が出る。これを防ぐために、PMTを下側に向ける。また、オシロスコープは自己掃引方式とした。

4-1-2 PMTパルスの測定

アクリル板を外し、宇宙線がPMTの光電面のガラスを叩いた時に出すチェレンコフ光(PMTパルス)を調べた。これはチェレンコフ光(発光時間2～3 ps)による光電子をPMTの増倍機能を使ったシステムレスポンスの測定である。観測はUFC検出器のPMT光

電面を上側に向け設置した。UFC検出器の上部に密着して置いたトリガー検出器により、3-fold coincidence外部トリガー方式とした。各PMTの光電面を叩く確率はUFC1=9%、UFC2=8%、UFC3=5%となり、各検出器当たり数%程度であった。以下に、観測時間、トリガー頻度、使用したPMTの名称を示す。

観測時間 : 6時間
 トリガー頻度 : 24例/時間
 PMT : 2インチR1828-01、R4004

4-1-3 宇宙線の μ 粒子によるシングルパルスの測定

宇宙線 μ 粒子を使い、粒子が1個、アクリル板を通過した時に出すチェレンコフ光を測定した。この時のtr、FWHMおよびパルスハイトが確定できるものをシングルパルスとする。図7に示すように、2つのトリガー検出器TFS1とTFS2からの出力信号をコインシデンスして得たパルスを、外部トリガーパルスとした。この場合PMTの光電面を直接叩いた時に出すチェレンコフ光を取り除く配置とした。測定は日野キャンパス4号館4階建ての建物の3階で行った。個々で観測される粒子は、約40cmのコンクリート層を通過した荷電粒子であることから、殆ど μ 粒子と考えてよい。以上の観測から得られたUFC検出器のシステムレスポンスを表1に示す。

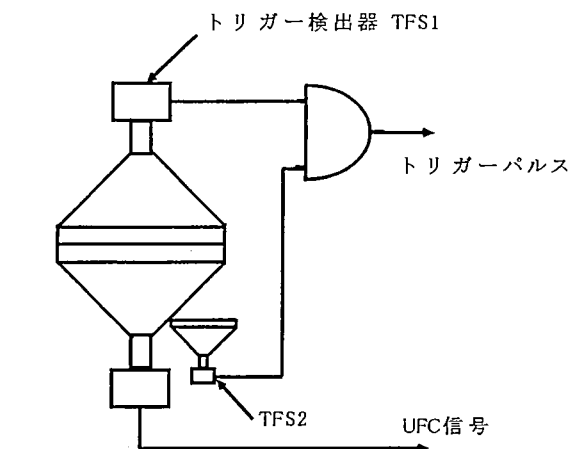


図7 μ 粒子観測装置

表1 UFC検出器のシステムレスポンス

測定方法	検出器 PMT	UFC1	UFC2	UFC3
		R1828-01	R4004	R1828-01
1.暗電流パルス	tr (ns)	1.32	1.38	1.41
	tf (ns)	1.76	1.52	1.57
	FWHM(ns)	2.23	2.08	2.13
2.PMTの光電面からの チェレンコフ光	tr (ns)	1.42	1.42	1.43
	tf (ns)	1.59	1.45	1.38
	FWHM(ns)	2.44	2.23	2.30
3. μ 粒子	tr (ns)	1.50	1.38	1.48
	tf (ns)	1.94	1.52	1.73
	FWHM(ns)	2.30	2.11	2.18

4-2 田老宇宙線観測所

宇宙線観測所の空気シャワーアレイ内に設置したUFC検出器の特性の測定を以下のように行った。

4-2-1 田老宇宙線観測所でのトリガー及び解析条件

(1) トリガー条件

ASアレイ内に設置されているコア検出器群の中心部3m四方に置いた4台に約9粒子以上が入った場合、トリガー頻度は12.5例/時間である。コア検出器群内に設置した直角三角形のそれぞれの頂点にUFC検出器上に重ねて置いたトリガー検出器3台に粒子が同時に入った場合、コインシデンスのGate幅は13nsである。天頂角約 30° 以上からの入射粒子は不採用とした。トリガー頻度は10.5例/時間である。

(2) 解析条件

- ・ASトリガーとチェレンコフトリガーが同時刻に入射した。
- ・コア検出器群内に空気シャワーの中心が入った。
- ・天頂角 θ は約 30° 以内である。
- ・チェレンコフ波形データに対して、オシロスコープの管面上でパルスハイトが1div.の20%以下のもの、およびスケールオーバーしたものは不採用とした。各検器のトリガー信号を受けた後の観測時間はそれぞれ $UFC1 < 40ns$ 、 $UFC2 < 30ns$ 、 $UFC3 < 15ns$ である。

以上の条件を満たすイベントについて解析した。

(3) ASデータとチェレンコフデータ

ASデータには、CPU内部にある時刻が記録される。一方、チェレンコフデータにはオシロスコープ内部にある時刻が記録されている。これらは、自己でトリガーされるため、両者の同期イベントを抽出するには、この時間情報を用いるしかない。しかし二つの時計は時間が経つにつれズレを生じる。そのズレは4日に1秒程度と決して小さくないが、保守の問題上時計を直すのは半年に1回程度にしている。従って解析時に、時間情報を用いて同期イベントを抽出した。

ASデータとチェレンコフデータの時計のズレ(tc)が一定の場合、ASとチェレンコフ

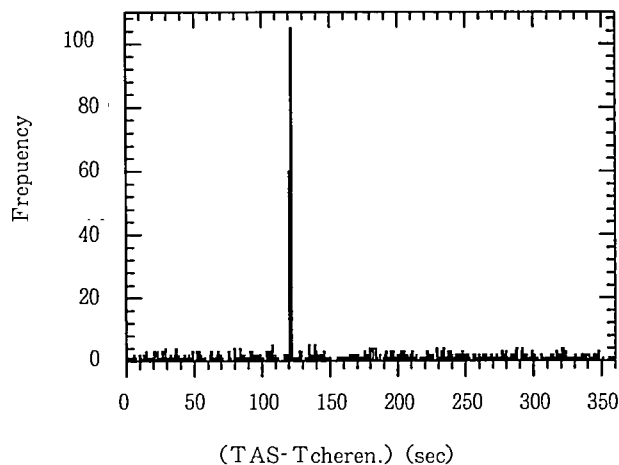


図8 ASデータの時刻とチェレンコフデータの時刻との差の頻度分布

との時刻の差 ($T_{AS} - T_{Cheren.}$) の頻度を求めると、その差が t_c と等しい時に鋭いピークをもつはずである。一例を図8に示す。図8はASデータ500例と同じ期間に観測されたチェレンコフデータ500例との時間差の頻度を示す。アクシデンタルなイベントの頻度の平均値は1.3カウントで、コインシデンスデータとの割合は0.8%である。これを見ると分かるように、 t_c 以外のある時間差で同期するイベントは必ずしも0ではなく、この方法だとアクシデンタルなイベントの混入は避けられないが、その割合は1%以下である。

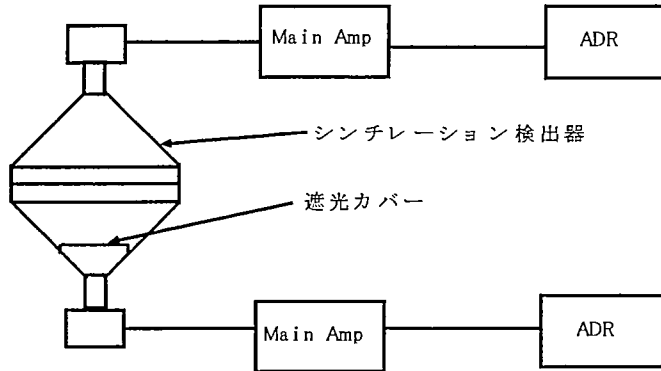


図9 PMTパルス測定装置

Rate of Frequency of knock Pulse vs. Densit

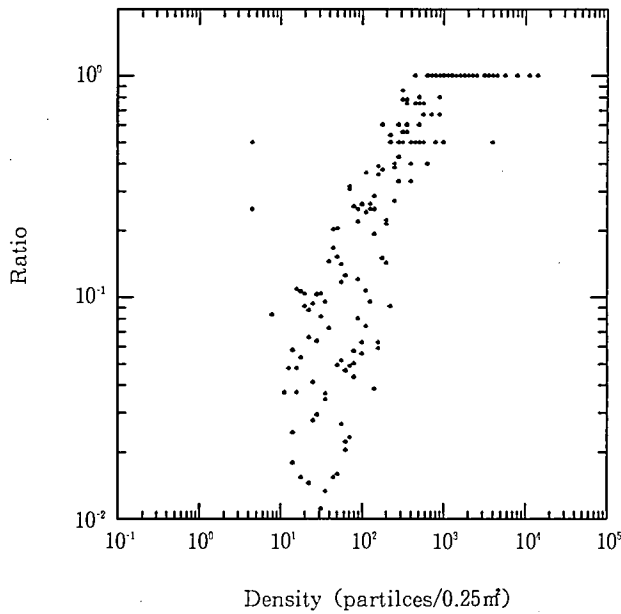


図10 PMTパルスの粒子数頻度分布

4-2-2 PMTパルスの頻度測定

宇宙線粒子が大量に検出器に入射した場合、どの程度PMT面を粒子が打つか観測した。PMTパルス測定装置を図9に示す。

観測時間 : 2週間(336時間)
 トリガー頻度 : 4例/時間
 PMT : R1848

トリガー検出器に入った粒子数に対するPMTの光電面を粒子が叩いた頻度の比を図10に示す。またADR(パルス波高値を $\exp(-t/\tau)$ に変換し8bitで換算した)値の頻度分布を図11に示す。網線部はPMTパルスを観測した頻度である。粒子が数十個以上入射した場合10%程度、数百以上ではほぼ100%近い確率でPMT面を打ったパルスが観測された。

ADR値に対するPMTパルスの微分頻度の結果から、ADR値70ではPMTパルスの発生が6%程度であるが、ADR値100ではほぼ100%となり、観測する毎にPMTパルスも同時にカウントしていることが分かった。

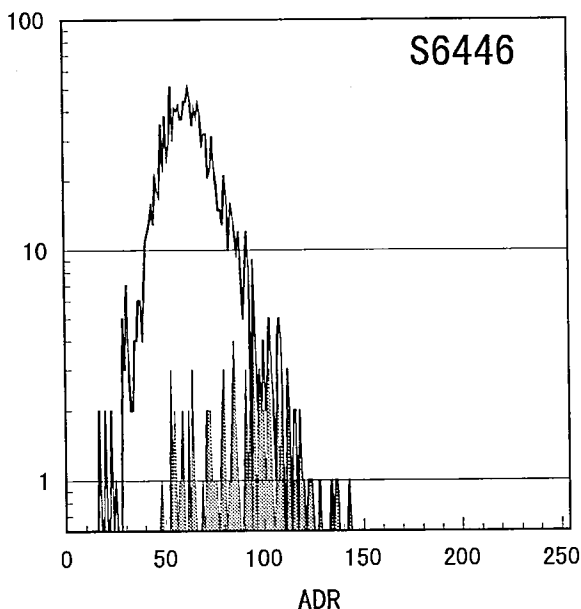


図11 PMTパルスのADR頻度分布

4-2-3 ライトパルサーによるスタート位置

ライトパルサー(ヒューレット・パッカード社製、592nmにピークを持つ発光ダイオード(LED)に半値幅10nsのパルスを加えて発光させる)による疑似光信号によりスタート位置を測定した。ライトパルサーのLEDから各UFC光電面までの光路長を一定にする。すなわち宇宙線が真上から入射する角度($\theta = 0^\circ$)の場合である。16例のデータを重ね書き表示した(図12)。

4-2-4 UFCパルス波形の立ち上がり始め時間の測定

各UFCのパルス波形の立ち上がり始める時間（パルスハイトの10%時をスタートタイム (ts) とする）の頻度分布を図13に示す。UFC3（ケーブル長：35m）とUFC2（38m）との時間差は約15nsである。UFC3とUFC1（36m）との時間差は約5 nsである。

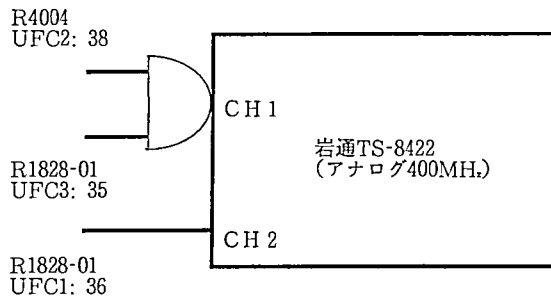
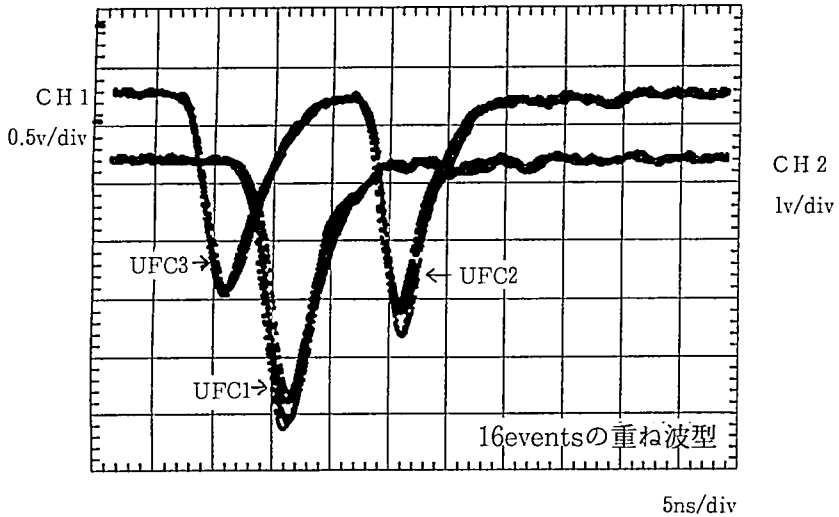


図12 信号ケーブル長の違いによるパルススタート位置
($\theta 10^\circ$ 、16例の重ね書き表示)

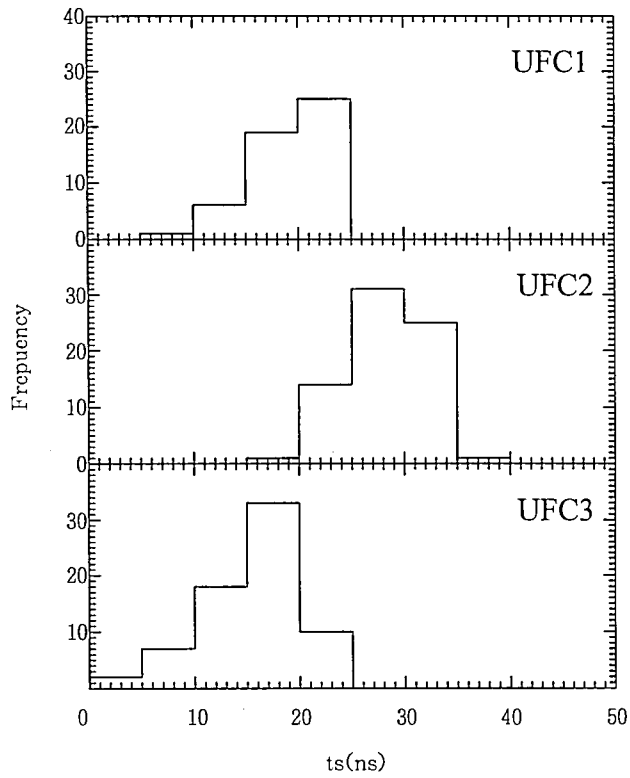


図13 UFCパルス波型の立ち上がり時間の頻度分布

4-2-5 宇宙線到来方向観測から見たUFC特性

AS用角度検出器とUFC検出器で独立したトリガー観測において、各データから計算し

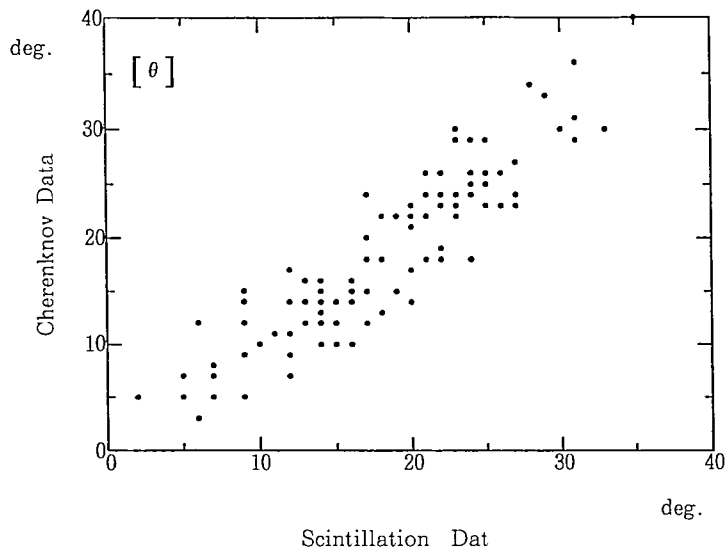


図14 AS角度検査器とCherenkov検出器による角度相関 (天頂角)

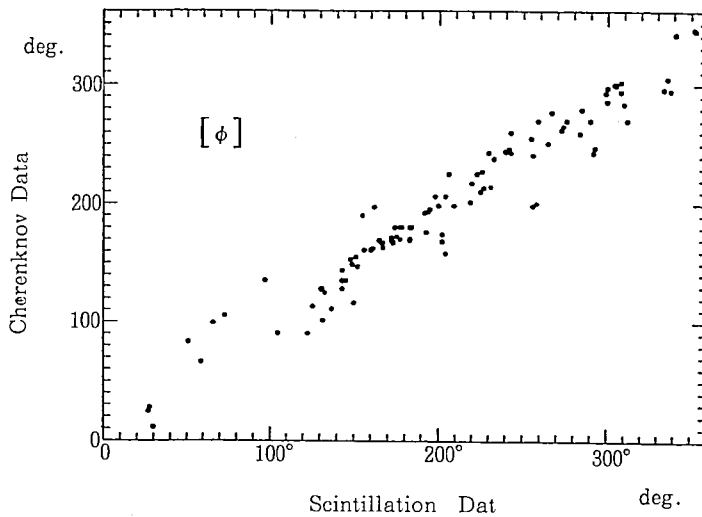


図15 AS角度検出器とCherenkov検出器による角度相関 (方位角)

た結果の角度相関を、天頂角 θ については図14に、方位角 ϕ については図15に示した。

AS角度検出器による角度 (θ 、 ϕ) 観測は4台の検出器に入射したパルス波形に -150 mVのdiscr.電圧を設定し、各検出器間に入射した時間幅を16進の0~1FFFでA/D変換した。UFC検出器による角度観測は、各検出器からのパルス波形の10%値にdiscr.電圧を設定して行った。解像度は 0.065ns/dot である。各検出システムからのデータを使い、 θ 、 ϕ をパラメータとした場合のAS用角度検出器とUFC検出器の相関を取った。

5. 結論

以下に結果をまとめて、議論を行う。

- (1) UFC検出器の平均システムレスポンスを立ち上がり時間 (t_r) とパルスの半値幅 (FWHM) で測定した。これらの値はPMT、信号ケーブル、アダー、そしてオシロスコープをデータシートから求めたシステムレスポンスと誤差の範囲内で一致した (表2)。
- (2) PMTの光電面を粒子が叩いた時に出すチェレンコフ光は、粒子数が数百以上になるとほぼ100%の確率で出ることが分かった。
- (3) 宇宙線の入射角度 (θ 、 ϕ) をパラメータとした場合、AS用角度検出器とUFCとの相関を取ると測定誤差内で良い一致を見た。

従来、粒子到着時間の観測には、プラスチックシンチレータが用いられていた。この場合のシステムレスポンスは最高速で $t_r=3.5\text{ns}$ 、FWHM= 5.5ns であった。今回我々はアク

表2 UFCと計測器とのシステムレスポンスの比較

	システムレスポンス*	シングル μ -レスポンス	データシート値**
t_r (ns)	1.37	1.45	1.53
FWHM (ns)	2.15	2.20	3.06

*暗電流パルス **PMT、オシロスコープ、信号ケーブル、アダー

リル板を使ったチェレンコフ光、400MHzアナログストレージスコープ、PMTのブリーダ抵抗と高周波同軸ケーブルとの直接接続、PMTの電圧分割抵抗の最適化等の結果、 $t_r=1.37\text{ns}$ 、 $\text{FWHM}=2.15\text{ns}$ を得た。

以上の結果より、特に空気シャワーコア付近の粒子到着時間構造（シャワー・フロントの厚み（ $2\sim 3\text{ns}$ ）、シャワー・フロントの曲率（ $r=0\sim 40\text{m}$ 、 $2\sim 3\text{ns}$ ）、シャワーの揺動等）がより詳細に波形という形で直接観測できるようになった。

今後はPMTパルスの影響の少ない検出器の開発を行い、さらに精密に空気シャワー・コアの構造を観測する予定である。

謝辞

本研究に当たりデータ解析に協力して頂いた

平成7年度大学院修士課程、高羅永嗣氏、

平成7年度卒業研究生、小平 和明氏、百瀬 晃氏、

平成8年度卒業研究生、伊藤 祐介氏、小池 康雄氏、山本 哲士氏、

平成9年度卒業研究生、浅沼 敬氏、阿部 隆氏、伊東 大吾氏、荻原 靖氏、

佐藤 大輔氏、田中 耕治氏、半田 卓也氏

に感謝いたします。

また、田老宇宙線観測所の建設、維持、運転等の業務に多大な協力をして頂いた、田老セミナーハウスの管理人である松舘忠一氏、佐々木市武氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] H. Sasaki et al., Proc. 18th ICRC Bangalore 11,225 (1983).
- [2] M. Yoshida et al., Proc. 18th ICRC Bangalore 11,371 (1983).
- [3] H. Sakuyama et al., Proc. 25th ICRC Durban 6,205 (1997).
- [4] 佐久山博史 他：田老宇宙線観測所における空気シャワーの観測：明星大学研究紀要No. 24、P19、1988
- [5] 佐久山博史 他：田老における超高エネルギー宇宙線の観測 I. 観測装置：明星大学研究紀要No.33、P15、1997
- [6] H. Sakuyama et al., Proc. 17th ICRC Paris 11,309 (1981).