

田老宇宙線観測所報告 (I)

佐久山博史*・鈴木 昇**

はじめに

超高エネルギー宇宙線空気シャワーの中心構造及びたて方向の発達を観測し、超高エネルギー核相互作用並びに一次宇宙線の組成の研究を行なう。

空気シャワーのたて方向の発達を忠実に観測するには、空気と性質のよく似た水のようなものを、少なくとも 100 m ぐらい広い範囲にわたって通過させることが必要である。今回の計画は岩手県宮古市にある、本大学田老キャンパス内にある内径 30m、水深 3 m の大水槽を中心として、その回りに観測装置を設置するものである (写真1)。

昭和56年度に研究費が認められたので、比例計数管をはじめ、色々な観測装置の本格的製作に取りかかった。ここでは宇宙線観測装置の進行状況について報告する。以後さらに詳しい報告を出して行きたいと考えている。

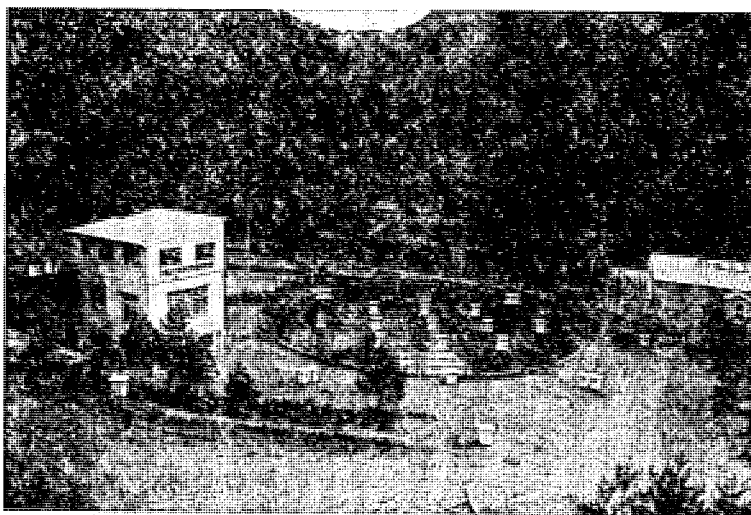


写真1

昭和58年9月現在、各検出器の設置状況は 2m 比例計数管 360 台、1m 比例計数管 16 台完成作動中、 0.25 m^2 (25 台)、 1 m^2 (2 台) シンチレーション検出器そして角度検出器 4 台はすべて設置作動中である (写真2)。残りの検出器は完成次第、随時設置する予定である。

* 理工学部物理学科教授 宇宙線

** 理工学部物理学科助手 宇宙線

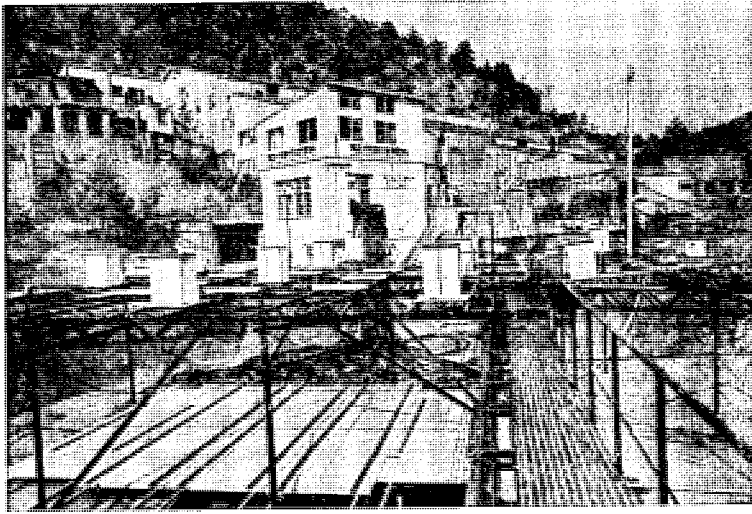


写真2

記録器部分は各検出器からの信号を取り込み、磁気テープに記録し、情報科学研究センターにある大型コンピューター HITAC M-160 H により処理を行なっている。

序 論

10^{15} eV 以上の一次宇宙線（陽子又は原子核）が地球大気に突入して空気の原子核と激しく衝突すると、多数の π^0, π^\pm 中間子、K-中間子などの二次粒子が作られる。このうちの π^0 中間子は非常に短い時間（ 10^{-16} 秒程度）で2個のガンマー線（光子）に崩壊し、これらのガンマー線は大気中で電子対創性を起こし、できた電子は制動輻射を起こして光子を作る。この光子が又電子を作るというように、ねずみ算的に電子光子カスケードシャワーとなって発達する。二次宇宙線のエネルギーの高い π^\pm 中間子、K 中間子等の一部は μ 粒子に崩壊する。崩壊しなかった π^\pm 中間子、K 中間子、生き残り核子等は空気核と相互作用し、沢山の π^0, π^\pm 中間子、K 中間子などを作る。核子が衝突後もまだ多くのエネルギーを持っている場合、空気核と相互作用して π^0, π^\pm, K 中間子等を生成し、 π^0 中間子は電子光子カスケードとなって増殖し、K 中間子の一部は μ 粒子に崩壊し、 π^\pm 中間子、K 中間子や核子などは再び空気核との衝突を繰り返し核カスケードが生長する。 10^{15} eV 以上の超高エネルギー宇宙線が地球大気に突入すると、その進行方向（軸）から数 m 以内に高いエネルギーの核活性粒子が集中し、核カスケードの各世代で作られた電子光子カスケードが重なり合って、粒子総数はぼう大な数になり、シャワーのように地上に降り注ぐ。これらの粒子群の大部分を占めている電子光子成分は主に電子の空気中での多重散乱により、軸から数 100 m ~ 1 km の広い範囲にわたって分布する。これを図1のように空気シャワーと呼んでいる。 μ 粒子は大気中ではほとんど吸収されず、エネルギーが高ければ μ -e 崩壊もしないから、空気シャワーの発達の過程で作られた μ 粒子は全部が地上に到達する。

一次宇宙線が大気に入射すると、大気の深さとともに急速に粒子数が増加し、ある深さで極大に達し、核カスケードの世代が進むにつれて、核活性粒子のエネルギーが細分化され小さくなるので、新たに作られる中間子の数も減り、逆に空気核との衝突による吸収が

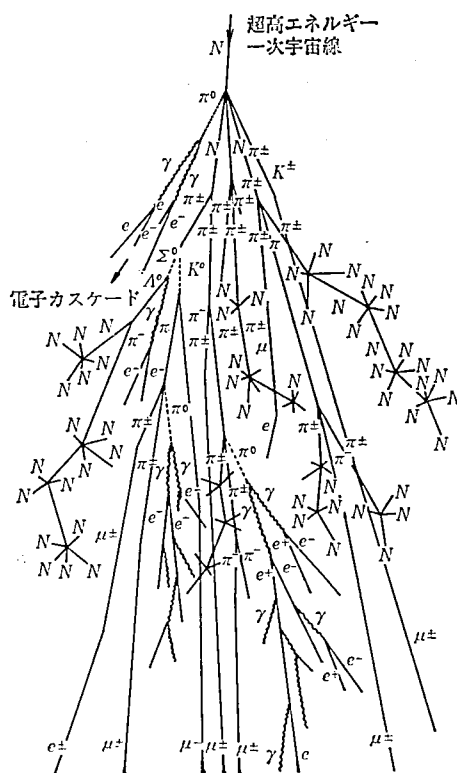


図1 空気シャワー

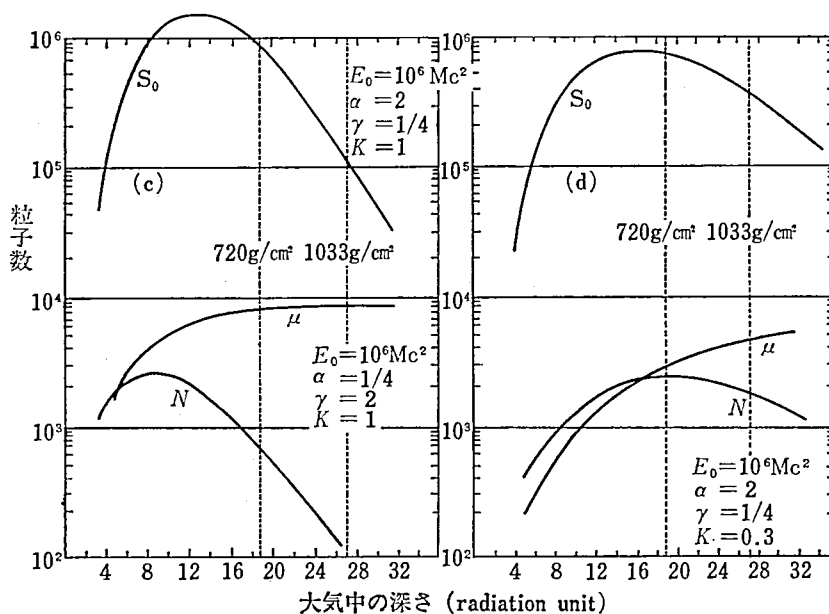


図2 空気シャワー各成分の大気中での遷移曲線, S_0 : 全粒子数, N : 核活性粒子数, μ : μ 粒子数, 2次粒子としては π のみを考え, 非弾性度 K , 核衝突における二次粒子の多重度 $n = \alpha(KE)^\alpha$.

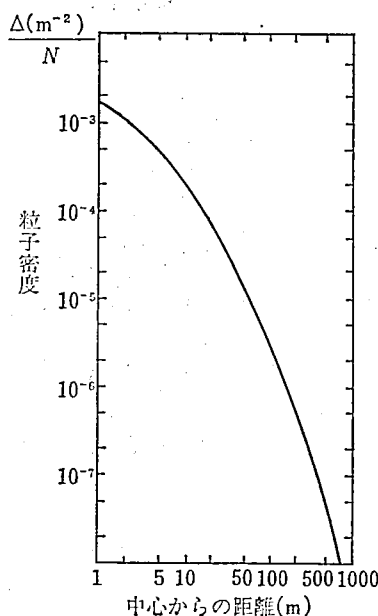


図 3 地上における空気シャワー粒子の横分布

大きくなり、数の増加は減少に変わる。電子光子カスケードについても同様である。図 2 は理論的に計算した各成分の大気中での遷移曲線⁽¹⁾、図 3 は地上でみる空気シャワー粒子の大部分をしめる電子、光子成分の横分布であり、粒子密度 Δ が中心に高く、中心から離れると単調に減少することを表わしている。

空気シャワーコアの観測、減衰長さの測定

宇宙線空気シャワーを一口で言えば、 10^{15} eV 以上の超高エネルギー一次宇宙線が地球の大気に突入して作られた、 $10^4 \sim 10^{10}$ 個に及ぶ電子光子、 μ 粒子、 π 中間子、陽子、中性子などのシャワーである。このような超高エネルギー現象を調べるための唯一の方法は、現在のところ宇宙線による方法しかない、しかし近年急速に発達した人工加速器のエネルギーは $\sim 10^{14}$ eV まで達しており、近い将来は 10^{17} eV までいく予定である。

実際、空気シャワーカーブ (図 2) を観測すると、大気の深さと共に急速に増加し、ある深さで粒子数最大となり、それから指数関数的に減少すると思われる。この減少カーブを調べることにより、一次宇宙線の組成及び超高エネルギー核相互作用の貴重な情報が得られる。これを調べるには、空気シャワーを地上と上空で同時に観測することにより、それぞれの場所での横広がり分布と、全粒子数を地上と上空とで比較することにより減衰率が求まる。この観測方法は上空に検出器を多数設置することであるが、實際上不可能である。これに変わる方法としては、電子が制御輻射、光子が電子対生成を起こしエネルギーが $1/e$ になるまでの距離 (輻射長さ) が似ていて、密度が空気と比較して非常に大きい物質を空気の代りに吸収層として使えばよい。水は原子番号、質量数が空気とほぼ等しいので輻射長さも似ているため、相互作用の仕方も非常に似ていることになる。しかし空気と水とでは密度が約 1,000 倍も大きいので、粒子の横への広がり方は空気に比べて非常に

	臨界エネルギー	核相互作用平均自由行程	輻射長さ
空 気	84.2 MeV	89 g cm ⁻²	37.7 g cm ⁻²
水	83.8 MeV	81 g cm ⁻²	37.1 g cm ⁻²

小さい。水の深さ 1m は空気 1km に相当する。この場合水中部分の検出器は隙間なく一面に並べる必要がある。この観測法により地上と水中間の空気シャワーの減衰を調べることができ、全粒子数の比較により空気シャワーの減衰曲線の傾きから減衰長さが求まる。これらの観測結果を従来のデーターと比較検討し、シミュレーション計算を行ない超高エネルギー核相互作用を調べることができる。又超高エネルギー核相互作用の結果を反映すると思われる中心付近の構造を調べることは、空気シャワーについての重要な情報源となる。現在までにもダブルコアやトリプルコアのような複雑な形を示す現象⁽²⁾が見付けられ、超高エネルギー領域ではそれ以下のエネルギー領域と横運動量分布に違いがあるかど

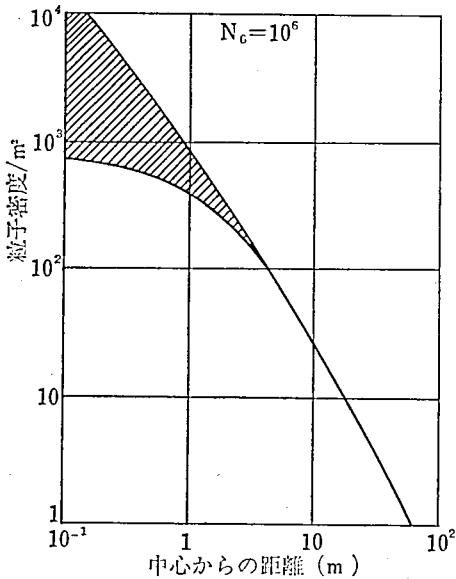


図 4

うかを世界の色々なグループで調べている。
現在は水槽に水を入れずに空気シャワーのコア（芯）付近の観測を行なっている。空気シャワーは全体として膨大な数のカスケードの複雑な現象の積み重ねであるが、図4のように中心からの距離が数 m 以上は、電子の空気中での多重散乱の平均的な性質によって決まる電子カスケードシャワーの広がりである。軸から数 m 以内の芯部分は高エネルギーの核子成分がかなりを占めている空間であり、個々の空気シャワーで超高エネルギー現象の起き方がそれぞれ違うため、斜線で示すように範囲を持ってくる。この横広がり⁽²⁾の形から芯を調べるための実験を行なっている。

観測装置

田老宇宙線観測所には各検出器の配置図（図5）に見られるように、地上 100m 四方に

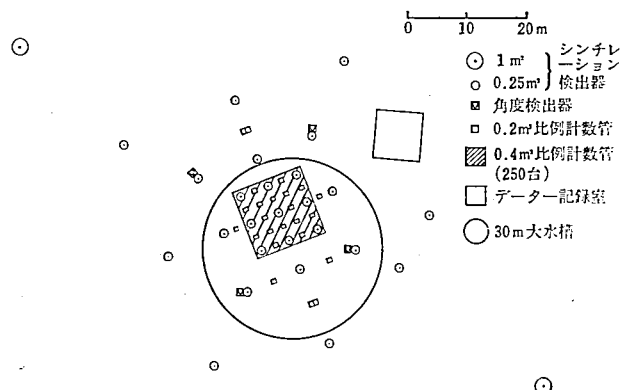


図5 田老宇宙線観測装置の配置図

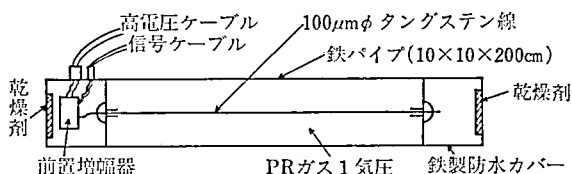


図6 角型ガス封入形比例計数管構造

宇宙線空気シャワーの大きさを測定するシンチレーション検出器 (27台) が同心円上に並べられている。又空気シャワーの入射方向を決めるための角度検出器 (4 台) が 20m 四方に置かれている。中心部には超高エネルギー宇宙線空気シャワーのたて方向の発達及びコア構造を観測するために、巨大な水槽 (内径 30m, 深さ 3m) の水底にガス封じ込め型比例計数管 (10×10×200 cm) を一面に 500 台敷きつめ、水槽上には長さの短い比例計数管 (10×10×100 cm) を 50 台等間隔に置いた装置である。データ収録はデータ収集用自動デジタル記録装置、TEAC MT-1000 型コンピューター用デジタル磁気テープ装置から構成されている。データ解析は情報科学研究センターにある大型コンピューター HITAC M-160 H により処理を行なっている。

1. ガス封じ込め型比例計数管⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾

10 cm 角, 長さ 2 m の細長い建材用鉄製角パイプの中心にハーメチックシールを介して 100 $\mu\text{m}\phi$ のタングステン線 (芯線) が張ってある。この管内を $\sim 10^{-3}$ Torr まで真空に引いた後, PR ガス (高純度アルゴン 90%, メタン 10%) を 1 気圧充填する。管壁を接地し, 芯線に +2.4 KV 程度の高電圧を印加しておく, 宇宙線が管を通過した時, ガス放電によるガス増幅機構を使って, 入射した粒子数に比例した大きな電気パルスを出す。図 6 参照。この電気パルス波高値を記録して粒子数を観測する。このガス封じ込め型比例計数管の大きな特長として, 製作コストが安価であり, 長期間の安定性及び保守が良い点にある。図 7 は比例計数管回路図, 写真 3 は水槽の中に設置された長さ 2m 比例計数管群。

2. シンチレーション検出器

空気シャワーを構成している主な粒子である電子光子が大気中で散乱され直径数 100m

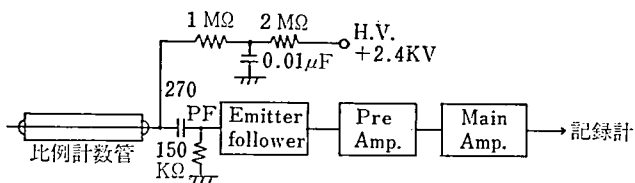


図 7 比例計数管ブロック図

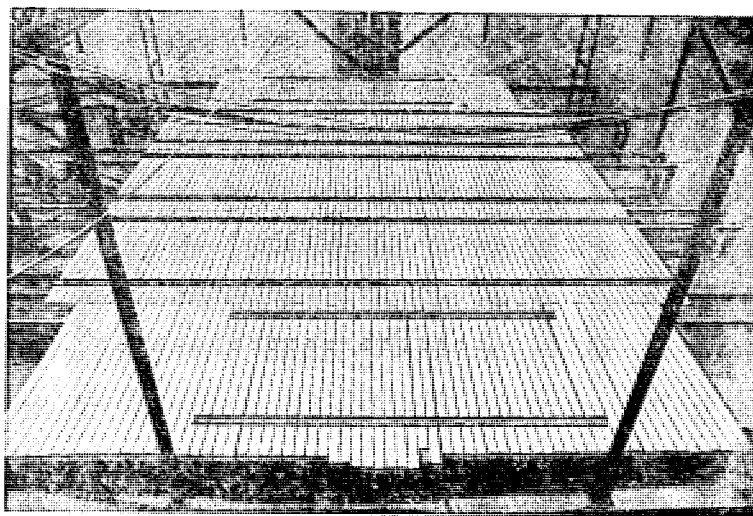


写真 3

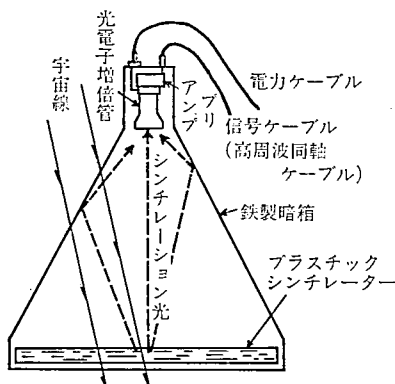


図 8 シンチレーション検出器構造

の広さに広がって降ってくる。しかも粒子密度はシャワー中心部で多く、遠方にゆく程減少する、この粒子群を観測するために、シンチレーション検出器と呼ばれる高速高分解能 0.25 m^2 検出器 25 台 (図 8)、遠方に 4 倍の面積を持った 1 m^2 大型シンチレーション検出器 2 台を配置した。

構造は図 8 に示す通り特殊なプラスチックを用いたプラスチックシンチレーターは宇宙線が通過した時、約 4200 \AA の青紫色の光を発する。この光を暗箱で上部に集め、光を光

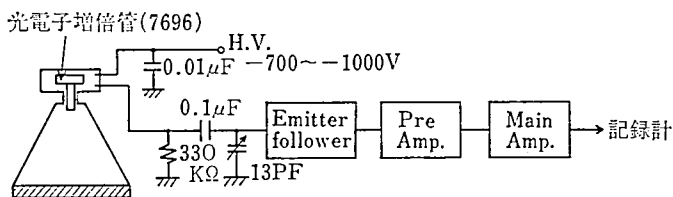


図 9 シンチレーション検出器ブロック図

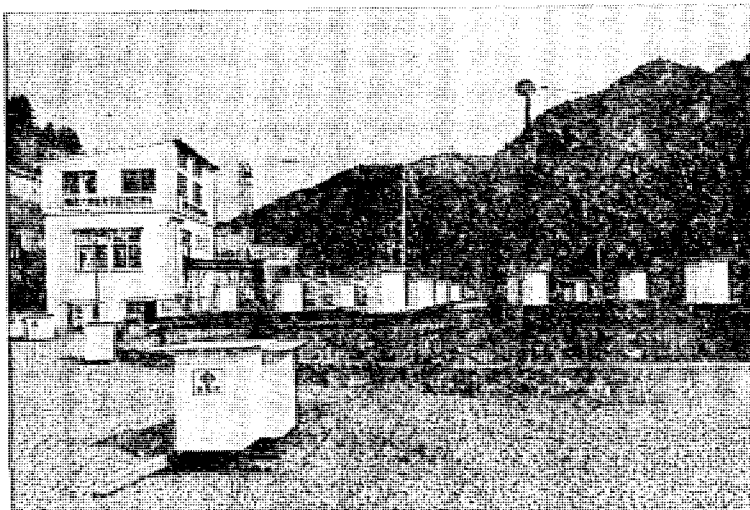


写真 4

電子に変換し、光電子を直接10万倍程度増幅し電気パルスに変える光電子増倍管を用い、このパルス状の電流は検出器内に入った電子の粒子数を観測すると共に、一千万分の一秒以上の時間的精度で粒子の到着時間をも検出できる。図9はシンチレーション検出器回路図。写真4は水槽の上部と周囲に設置されたシンチレーション検出器と角度検出器群。

3. 角度検出器

一次宇宙線の方法を軸に粒子群は軸より数 10～数 100m 遠方まで広がり、それらの粒子はほぼ 2m 程度（時間的には約 7×10^{-9} 秒）の厚みを持った平板の中に分布している。空気シャワーの広がりや厚みを利用し、直径 30m の円周上に時間分解能が極めて良い角度検出器 4 台と高速回路ロジックを配置しシャワー粒子相互の到達時間差を観測する（図 10）。このようなシャワー粒子の時間的構造はシャワー発達について重要な手掛りを与え、シャワーの到来方向を知ることができる。

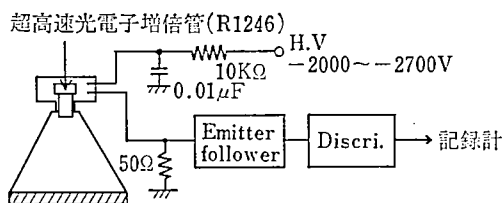


図 10 角度検出器ブロック図

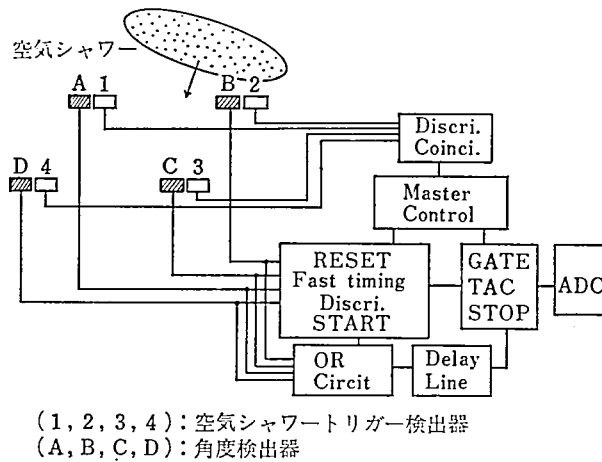


図 11 角度検出器ブロック図

角度検出器動作は図 11 に示すように、空気シャワートリガー検出器 (1, 2, 3, 4) 全部に宇宙線が入った時のみ、データー収集を開始する。宇宙線が一番初めに到達した検出器からの出力パルスを遅延回路を通し 200 ns 遅らせることにより、他の 3 台からの出力パルスの後に移動させ、3 台の出力パルスのうち一番初めのパルスをスタートパルスとする。この時 200 ns 遅らせた信号と各検出器の信号の時間差を、それぞれ波高値に変換 (TAC) し、波高値をディジタル量に変換 (ADC) し記録する。

4. データー自動記録装置

100m 四方に設置されている多数の検出器、比例計数管 550チャンネル、シンチレーシ

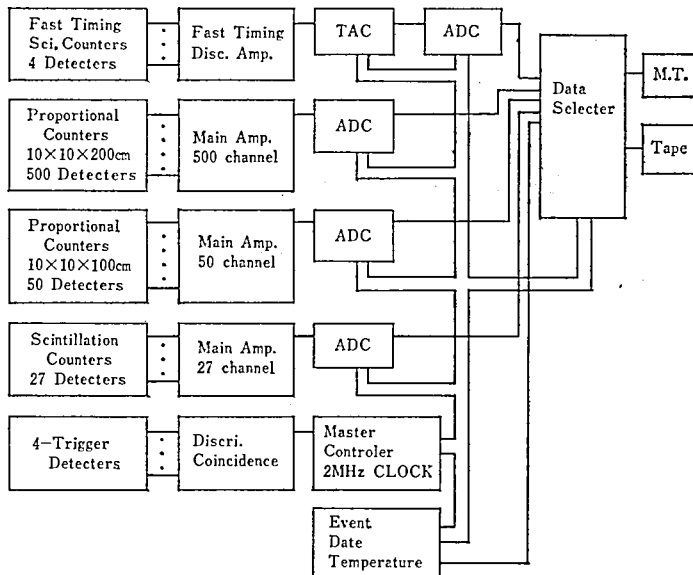


図 12 データー自動記録装置ブロック図

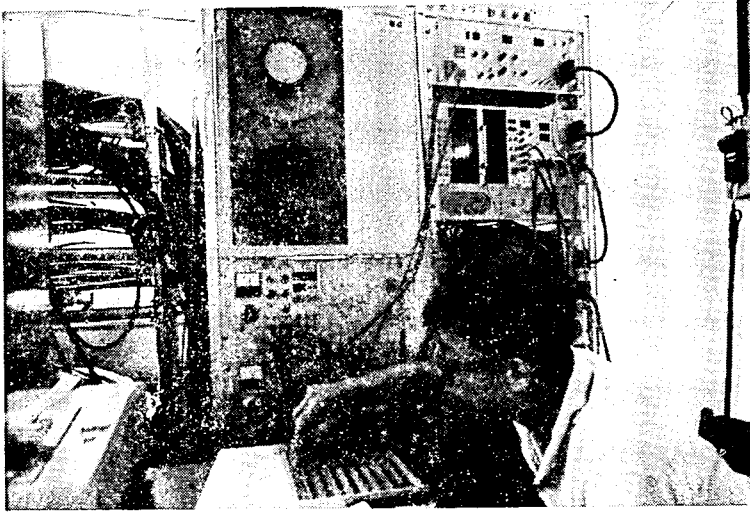
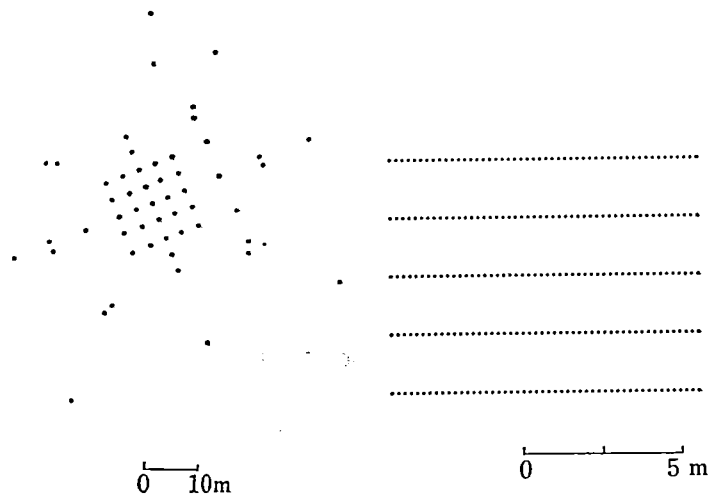


写真 5

ミオン検出器 27 チャンネル，角度検出器チャンネルとして水上，水中の温度計 2 チャンネルからの信号が同時に取り込まれ，順次自動デジタル記録装置に入り，自動的にデータを TEAC MT-1000 型コンピューター用デジタル磁気テープ装置 (MT) に DE 記録方式，1600 bpi 記録密度で磁気テープに記録される (図 12)。写真 5 は自動デジタル記録装置と磁気テープ装置。

観測方法

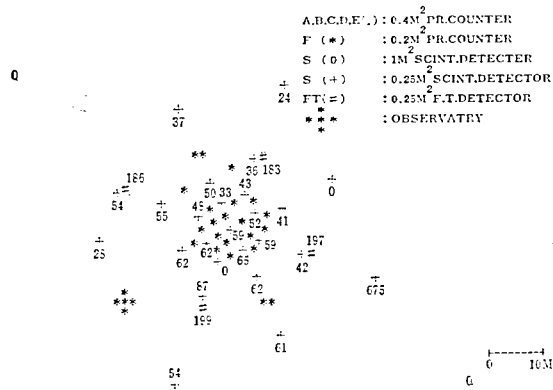
田老キャンパス内に粒子密度の測れる多数の検出器 図 13 のように，広い面積に置かれ



地上部分観測装置

水中部分観測装置

図 13 田老宇宙線観測装置図



謝 辞

鈴木辰三郎教授をはじめ物理学科の各先生方にはいろいろ議論をしていただき感謝しております。機械工学科川田雄一教授並びに電気工学科井上実教授にはいろいろ御教示をいただきました。検出器製作及び設置に関して機械工学科山田嘉久教授に御便宜をはかっていただき、坪内洋之介さんに大変お世話になりますと共に、管理営繕課、用度課の絶大な援助をいただきました。

参考文献

1. A. Ueda and N. Ogita: Progr. Theor. Phys. 18 (1957) 269.
2. 例えば第 17 回宇宙線国際会議 Rapportem paper S.C. Tonwar Vol. 13, 325 (1981).
3. 佐久山博史: 明星大理工研究紀要 10 (1974).
4. 佐久山, 鈴木: 明星大理工研究紀要 12 (1976).
5. 佐久山, 鈴木, 西野: 東大宇宙線研究所, 第 2 回超大空気シャワー観測ワークショップ報告 2 (1982).
6. 佐久山, 鈴木: 東大宇宙線研究所, 第 3 回超大空気シャワー観測ワークショップ報告 1 (1983)