

熱ルミネッセンス [TL] シートを用いた 電磁カスケードシャワーの読み取り I

山本 勲・高橋 信介・富山 毅・今枝国之助
伊代野 淳・小畑 正貴・和田 俱典*・山下 敬彦*

岡山理科大学工学部電子工学教室

*岡山大学理学部物理教室

(昭和63年9月30日 受理)

1. はじめに

今迄に、熱ルミネッセンス [TL] シートを使ったチェンバーを富士山頂に設置 (富士山 TLC) し、このチェンバーから20TeV 電磁シャワーの読み取りを行い、X線フィルム等の従来の感光材料による読み取りと一致した結果を得た^{1,2)}。しかし、この段階での読み取りだけでは TL シートの長所である広範囲にわたる動的特性を活かしきっていない。高強度放射線量での二次元 TL 強度分布については既に読み取りを行った^{3,4)}ので、我々の開発した二次元 TL 強度分布読み取りシステム^{1,2,5,6)}及び二次元光子計測法⁶⁾を用いて X線フィルムでは検出できないような1 TeV 以下のシャワーを読み取った例を報告する。

又、電子が TL シートに入射した時の発光光子数の計測を行い、TL シートを用いた場合の超重・超低速度粒子検出の可能性を検討する。

2. 低エネルギーシャワー読み取り

当初から低エネルギーシャワーの読み取りを目的として設置した *Norikura TL Chamber* の断面図を Fig. 1 に示す。これを乗鞍山頂に160日間設置した。2次元シャワー読み取りシステムを用いると、1 TeV シャワーは半径300 μ m の円形領域の中に約6個の光子が検出できるはずである。しかし、300 μ m の半径の宇宙線バックグラウンドは、30日間の露出で同程度の光子を出す。従って、半径300 μ m の領域を積分してしまうと160日間の露出による宇宙線バックグラウンドからの TL 発光量が積算され、1 TeV シャワーからの量をはるかに越えてしまい、シャワーの検出は不可能になる。(Fig. 2 に電磁シャワーの横拡がり と宇宙線バックグラウンド160日の露出時の電子数強度を示す。文献6の Fig. 3 に対応する。この図には計測された結果も示されているが議論は後述する)。

しかし、電磁シャワーが三次元的に構造を持って発達する (宇宙線バックグラウンドは一樣) ことと二次元 TL 強度分布読み取りシステムを用いた二次元光子計数を行うことにより低エネルギーシャワーでも読み取りが可能となる。

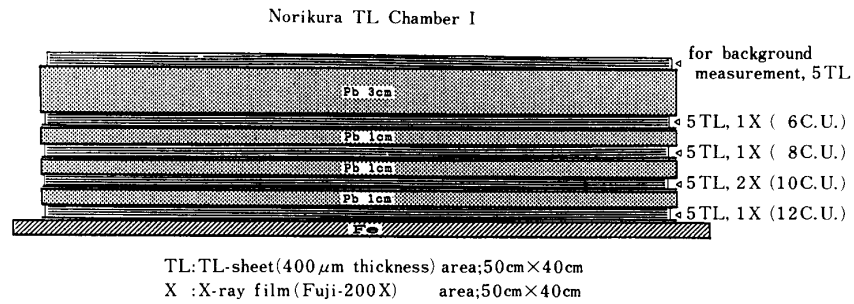


Fig. 1 乗鞍山頂に設置した *Norikura TL Chamber I* の断面図。それぞれの層には TL シートが 5 枚重ねてある。

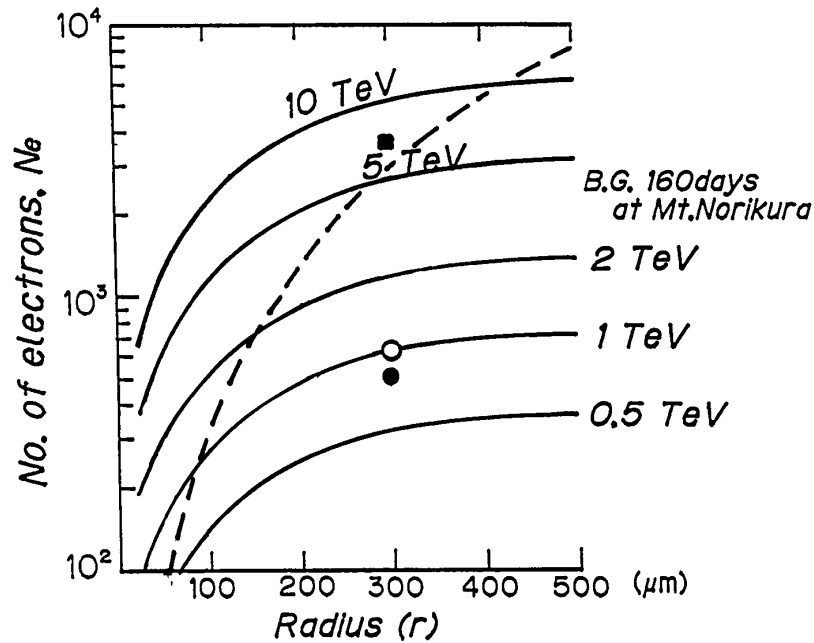


Fig. 2 電磁カスケード・シャワーのシャワーマキシマムでの横拡がり分布。
L : ○, R : ● : TL シートからの読み取り値, ■ : 宇宙線バックグラウンドの読み取り値。破曲線は推定計算。

実際、今までの TL シートからの二次元分布の読み取り結果から判った特徴として、X 線フィルムには見られなかった多量の塊状の TL 発光があることである。それ故、同一領域で積分された TL 発光量を比べると、1 TeV シャワーから得られるより宇宙線バックグラウンドによるものの方が多い。しかも、いまだに原因のはっきりしていない多量の塊状 TL 発光がある中から 1 TeV シャワーを検出することは容易ではない。にもかかわらず以下のような手順 [I ~ IV] を施すことによって 1 TeV シャワーの検出に成功した。

- I. 二次元 TL 強度分布読み取りシステムを用いて二次元光子計数を行う。
- II. 二次元光子計数から得られた画像に対して二次元スムージングを行う (これらの I,

IIは文献6で詳述した)。

III. 一枚の TL シートを読み取り時に時間分割し相関をとる (画像の時系列における自己相関処理)。

IV. 同一層の複数シート間の相関をとる (複数画像における相互相関処理)。

以下に *Norikura TLC* の場合の具体的な処理方法について述べる。

画像の時系列における自己相関処理

TL シートから読み取りを行う場合、温度上昇と共に TL 強度が変化の様子をそのまま録画して、あとで解析処理を行う方法は TL の特徴を最大限に活用しているといえる。何故ならば原子核乾板や X 線フィルムでは現象の時間積分結果を解析する。従って、途中のプロセスを見ることができない。一方、TV カメラで連続撮影し、VTR に録画する方式の二次元読み取りシステムの場合は、途中のプロセス (発光の時間変化) を読み取ることが可能である。TL シート特有の発光温度領域があるので、それ以外の温度領域の発光は偽グローとして、真の発光と区分できる。Fig. 3 のグロー曲線に見るように、今回使用した TL シート [Teflon-400] の放射線刺激による発光温度領域は120°Cから254°Cの間である。この温度領域を2分割して、夫々画像加算を行い、両方の温度領域の画像に対応する発光イベントがあれば信頼の高い信号とみなせる。この処理方法は「画像の時系列における自己相関処理」と呼ばれており、一枚のシートから得られる画像の異なった時間 [温度] での相関を見る。放射線刺激による発光であるならばグロー曲線で表わされている温度 (時間、加温速度は0.5°C/sec) の領域で発光し続けている。この特性を活用する訳である。ここでは簡単のために“自己相関法”と略称する。

“自己相関法”の例として、*Norikura TLC* 8 C. U.層の一枚目のシート [Fig. 1 参照] の読み取りを示すが、10 C.U., 12 C.U.層についても各々5枚、計15枚の TL シートに対して行った。この処理を行うとき、読み取りの領域の設定は *Norikura TLC* に同時に組み込まれている X 線フィルムに唯一のシャワーイベントがあった点を中心になるように、

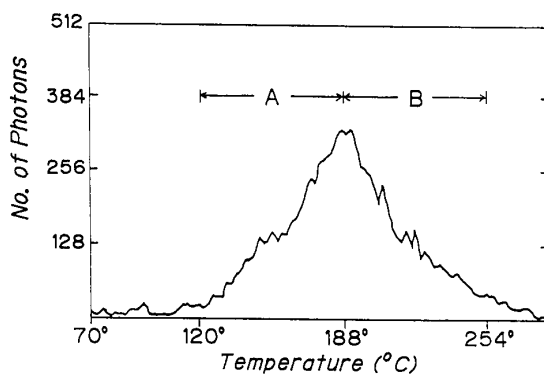


Fig. 3 *Norikura TLC* I の TL シートのグロー曲線。

9 mm×11mmを切り取った。ここで、6 C.U.の層のシートは処理しなかった。その理由は、6 C. U.の層の X 線フィルムに対応するであろうシャワーイベントが見当らなかったからである。Fig. 4A は Fig. 3 のグロー曲線に図示した温度領域 A [120°C→188°C] での画像加算により得られたものである。同様に Fig. 4B は温度領域 B [188°C→254°C] で得られたものである。これらの画像は上に述べた二次元光子計数法と二次元スムージング法が施されている。以降のどの画像も、断わらないかぎりこれらの手法が施されている。両図で円で囲んだ (R, L と表示されている) 箇所が後に判明した電磁カスケードシャワーであるが、多数の TL 発光の中にあるためこの時点では特徴をもっていない。Fig. 4A と 4B との相関=自己相関 (両図に共通する発光部分だけを残す) をとった結果が Fig. 4C である。この図を Fig. 4A 及び 4B と比較すると、塊状の発光部分の個数がかなり減少したことが分かる。Fig. 4C と同様な自己相関処理を行った画像を各層 5 枚、計 15 枚作製した。後述の相互相関処理の場合もこの自己相関処理後の画像を使用する。

複数画像における相互相関処理

TLC の設計には複数枚のシートを重ねておくようにしている。これは TL シートのワーキングレンジの広さを活用するためと相互相関処理を可能にするためである。今回の実験の目的である低エネルギー電磁シャワーの検出のような場合は複数枚のシートを使用した

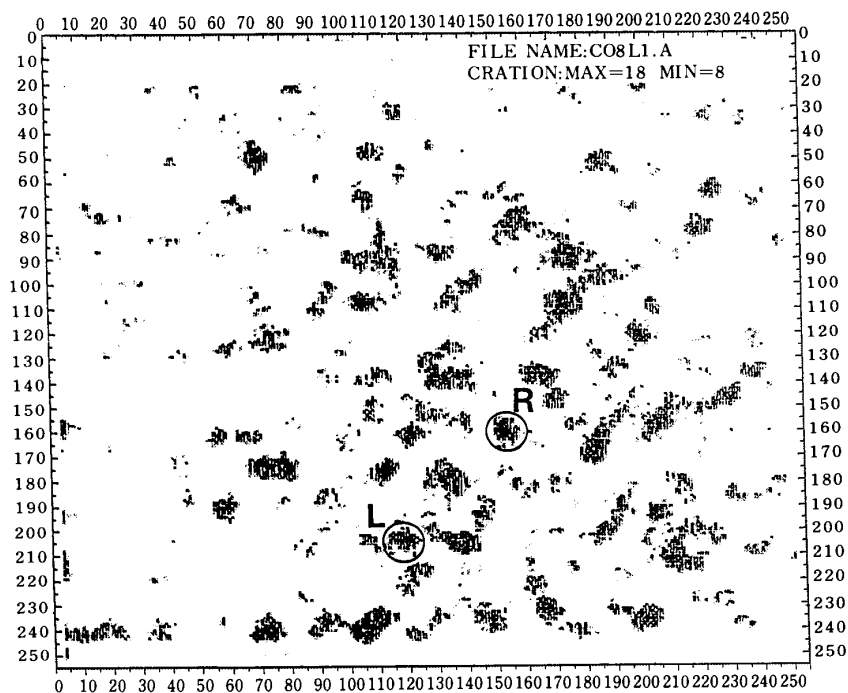


Fig. 4 A *Norikura TLC I* 8C. U.層の上から一枚目のシートからの読み取り画像。加算温度領域は Fig. 3 に示す A の部分；120°C→188°C。

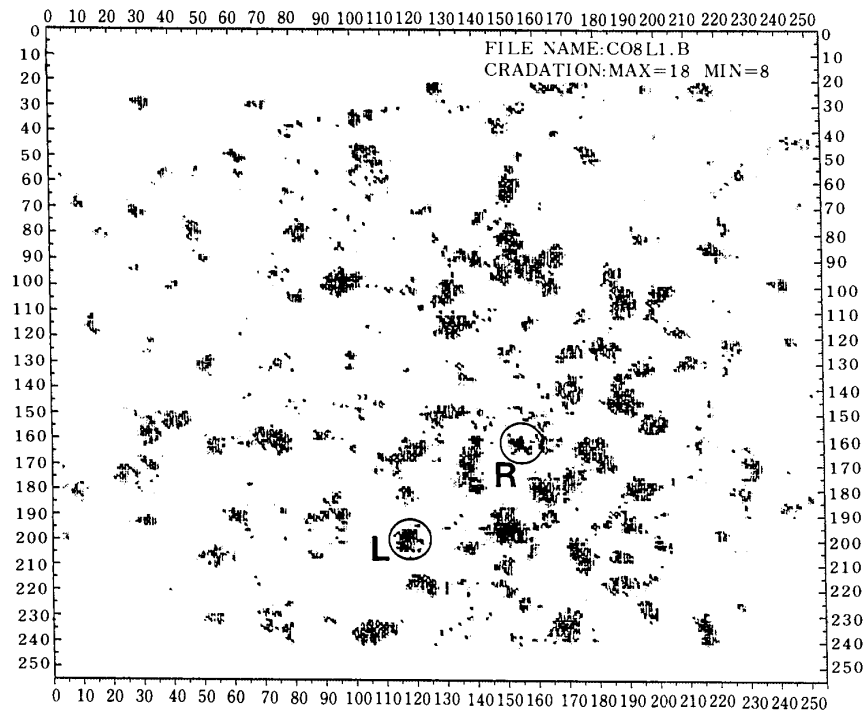


Fig. 4 B *Norikura TLC I 8C*. U層の上から一枚目のシートからの読み取り画像。加算温度領域は Fig. 3 に示すBの部分；188°C→254°C。

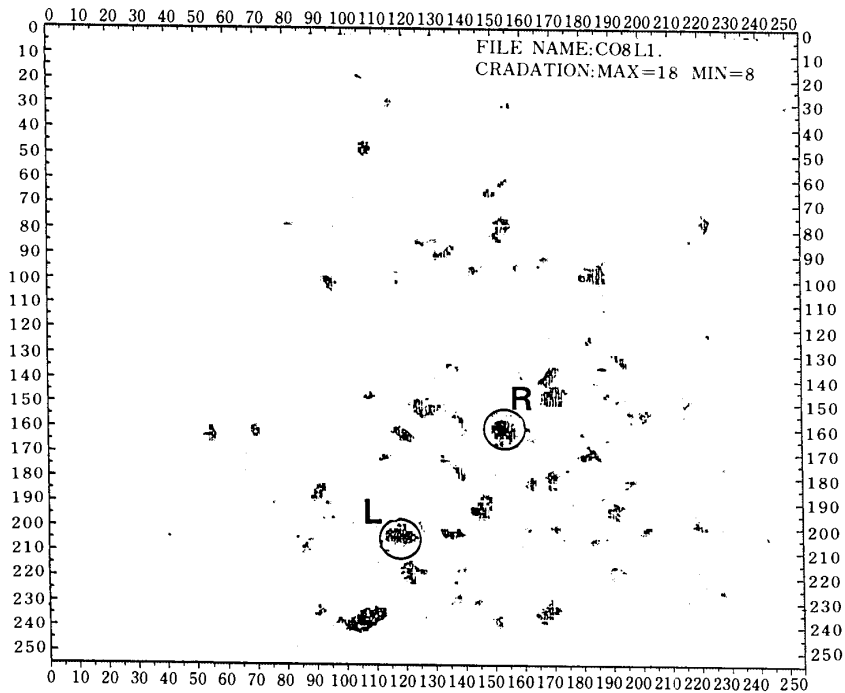


Fig. 4 C *Norikura TLC I 8C*. U層の上から一枚目のシートからの自己相関処理後の読み取り画像。全領域；120°C→254°C。

相互相関処理が特に有効である。というのは、低エネルギーシャワーの場合、信号源[TL 発光量]が小さく、一枚のシートでは実際のシャワーかどうかの判定がつきにくい。既に、指摘したように TL シートからの発光にはシャワーによる発光とみなせる候補が多数あるからである。一枚のシートによる自己相関処理の後にも結果としてシャワーからの発光ではなかった画像が得られるのは Fig. 4C から明らかである。自己相関処理のみではノイズ発光を処理しきれない。

前項で述べた自己相関処理された画像をもとに一つの層で異なるシートの相互相関を求めた。カウンター計測における「同時計数法 (Coincidence Method)」と等価なものである。このことが実行できるように、あらかじめ、*Norikura TLC* には一層につき 5 枚の TL シートを組み込んでおいた。この相互相関処理は各層に対して行なったが一例として 12C. U. の場合を示す。12C. U. 層 5 枚組 TL シートの上部から、一枚目、二枚目、三枚目に対して自己相関処理画像を作る。Fig. 4C と同質のものであるが、互いに同一の層にあることが意味を持つ。自己相関の場合は画像間のズレは全くないが、この場合シートが異なるのでわずかに並進と回転が生じている可能性がある。実験のセットアップは注意して合わせてあるが読み取り時にヒータ上で動いてしまうことが考えられる。低エネルギーシャワーの読み取りなので検出光子数をそこなわないため立体角をできるだけ大きくとる必要がある。そのため倍率が大きくなり小さいズレも拡大される。現時点での相互相関処理にはこの問題が残り、画像合わせはマニュアルで行い自動処理迄はしていない。

まず、相互相関処理 (二枚の画像間で共有するところだけを残す) を 12 C. U. の二枚目と三枚目の間で行った。その結果が Fig. 5 である。後に判明するシャワーイベント (R, L のマークされた円に囲まれたもの) 以外の発光は泡沫になってしまっている。更に、Fig. 5 と一枚目の相関を取った結果が Fig. 6 である。三枚迄の相関があって残ったのが R, L のマークをつけたイベントである。念のため残りの四枚目、五枚目にも相互相関処理を行った結果は Fig. 6 と全く同じ結果を得た。

12 C.U. 以外の 10 C.U. 及び 8 C.U. に対しても行った結果 Fig. 6 と同様に R, L のマークされた箇所のみ残り、各層での相互相関処理は完全に一致し、しかも互いの距離は実寸でほぼ 2 mm であった。

以上のことから、低エネルギーシャワーの検出には自己相関処理を施したシートからの読み取り画像が三枚あればそれらの相互相関をとることによって可能となることが判明した。即ち、二次元 TL 強度分布読み取りシステムと三枚重ねの TL シートがあれば 1 ~ 0.9 TeV の電磁カスケード・シャワーの検出ができる。

なお、これらの二次元 TL 強度分布の画像をビデオテープから光子計数で大量、且つ迅速に処理するため、BC プロセッサアレイシステム⁷⁾の使用を試みた。その結果、この BC システムが本研究に有効であり、充分実用可能であるという結論を得た。

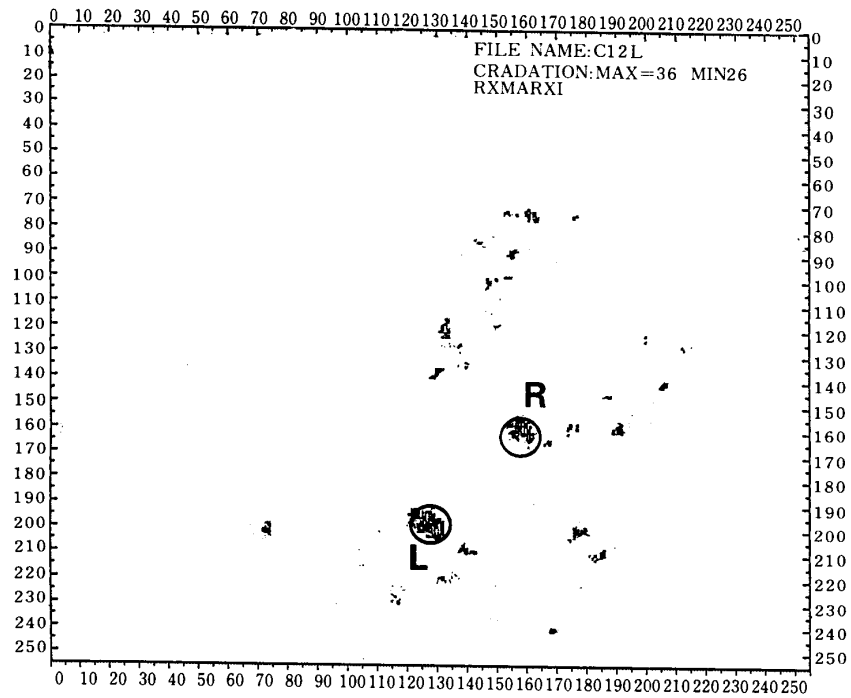


Fig. 5 二枚目と三枚目の画像での相互相関処理 [二同時計数法] による結果 (Norikura TLC I 12C. U.層)。

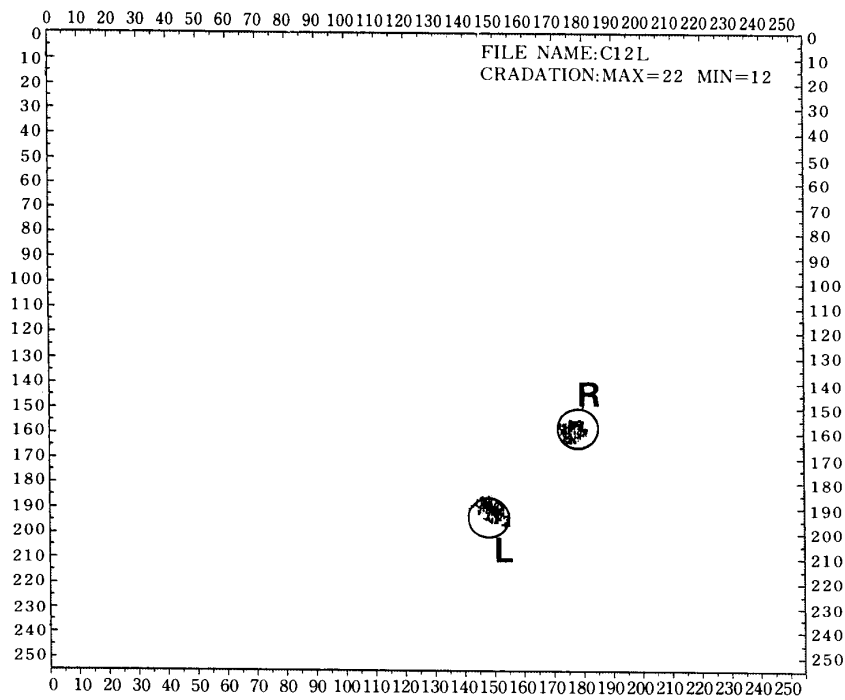


Fig. 6 一枚目と Fig. 5 の画像での相互相関処理 [三同時計数法] による結果 (Norikura TLC I 12C. U.層)。

3. 読み取り結果とカスケードカーブ

二次元 TL 強度分布読み取り装置及び光子計数法を用いて、自己相関及び相互相関で検出した R, L について各層の上から三枚のシートの読み取りを行った。シャワー領域の設定は以前に 20 TeV シャワーを読み取った場合と同じ方法である [詳細は文献 8]。その結果を表 I にまとめる。二次元光子計数システムで行ったので読み取った TL 光子数は TL シートの全 TL 発光数に戻すことができ、その数は直ちに電子数 [絶対値] に換算でき、表にはその値も表記した。

又、Norikura TLC のチェンバーの設定条件を入れ、電子の入射エネルギーに対するカスケードカーブのシミュレーション (EGS Code System Ver. 3 を使った。計算結果を Fig. 7 に示す) を電子数 [絶対値] と直接比較すると、1 TeV 及び 0.9 TeV の場合により一致が得られ、これによってシャワーエネルギーの決定 (L の曲線はシミュレーションの 1.0 TeV, 計測結果は ○ 印で表示; R の破線は同様に 0.9 TeV, 計測結果は ● 印で表示) が出来た。

一方、対応するであろうシャワーについて、Norikura TLC にシートと同時に挟み込まれた X 線フィルムの黒化度の読み取り (1 点のみ) 結果をシートからの読み取り結果と併せて Fig. 8 に図示する。X 線フィルムから読み取ることができたのはシャワー L に対応すると思われる (図の曲線は 1 TeV のシミュレーションの場合)。X 線フィルムを克明にスキャンして R (0.9 TeV) に対応するシャワーを探したが見つからなかった。1 TeV シャワーが X 線フィルム (Fuji-200X) で読み取れる限界のようである。

Norikura TLC の最上部に置いた TL シートから文献 6 で行ったと同様な方法で半径 300

表 I Norikura TLC の TL シートから読み取った検出シャワーの TL 光子数と換算電子数 [π (300 μ m)²あたり]。

シートの名称	シャワー L (TL 光子数)	シャワー R (TL 光子数)
C 08 L 01	5.1	4.6
2	4.6	3.3
3	5.0	4.3
平均 TL 光子数	4.90	4.07
換算電子数	461	383
C 10 L 01	6.2	5.2
2	6.6	5.2
3	6.9	5.5
平均 TL 光子数	6.57	5.30
換算電子数	618	498
C 12 L 01	4.7	4.7
2	4.8	5.0
3	6.3	4.5
平均 TL 光子数	5.27	4.73
換算電子数	495	445

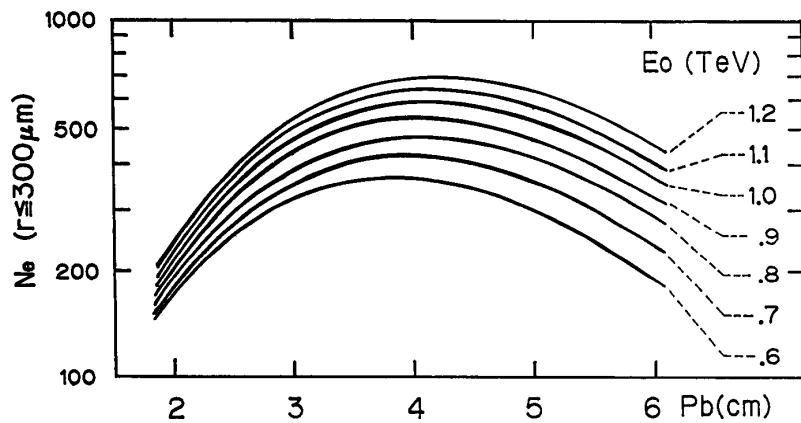


Fig. 7 電子入射による電磁カスケード・シャワーのシミュレーション [EGS Code System Ver. 3 使用]

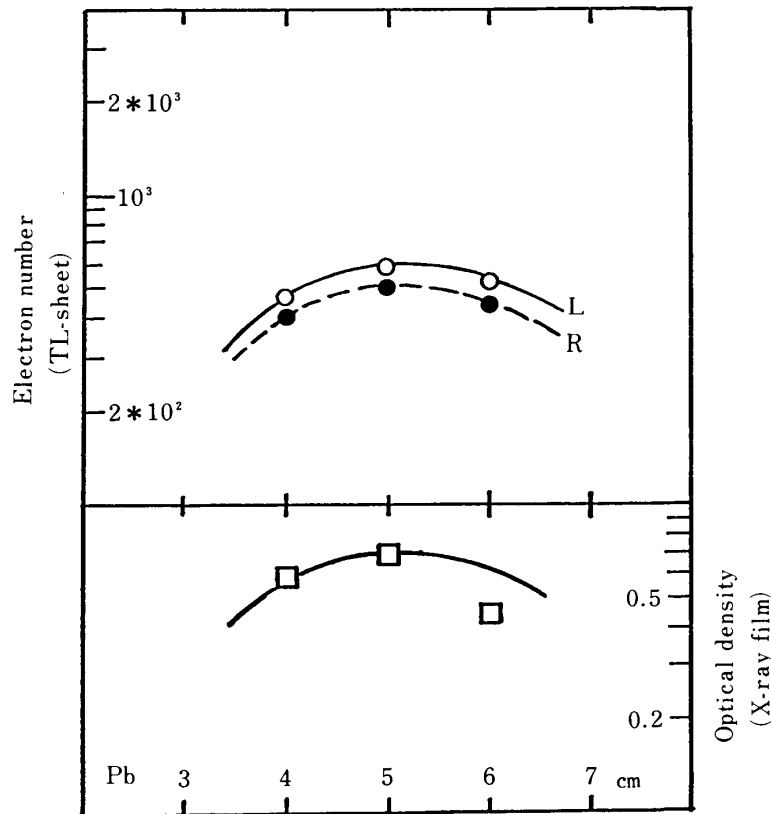


Fig. 8 電磁カスケード・シャワーカーブ。○, ● : TLシートからの読み取り値, □ : X線フィルムからの読み取り値。
実曲線 : 1.0 TeV, 破曲線 : 0.9 TeV のシミュレーションの結果。

μm の領域の宇宙線バックグラウンド量を読み取った。Fig. 2 の電磁カスケードシャワーの横拡がり分布に二つのシャワー (R : ●, L : ○) と宇宙線バックグラウンド乗鞍山頂 160 日間 (■) の測定結果を書き入れた。

Fig. 2に見るように、1.0TeV及び0.9TeVのシャワーは、総電子数では宇宙線バックグラウンドより少ないにもかかわらず読み取りに成功した。

4. 超重・超低速粒子検出の可能性

これ迄、TLシートを用いて電子の高密度入射[ビームプロファイル、文献4]や本稿で報告した低エネルギー電磁シャワーの読み取りは二次元光子計数方式で得られたものである。これらの研究成果として、TLシートは9桁に亘り入出力間に比例関係を保つワーキングレンジを有し、且つX線フィルムより遙かに高感度であることも確認された。又、種々のシートに対して1電子入射当たりの全発光光子数が得られた[文献6のTable 1参照]。例えば、標準TLシート[Teflon-400]では1電子入射当たりの全発光光子数は700個である。

まず、ローレンツ因子 $\gamma \geq 3$ の電子が標準TLシートを通過するとき、BaSO₄結晶によるエネルギー損失量 E_0 は、

$$E_0 = 7.4 \times 10^4 (eV)$$

と算出される。

一方実測によると、1荷電粒子が標準TLシートを通過したときの照射線量Dは、

$$D = 2.3 \times 10^{-8} (rad) = 1.44 \times 10^9 (eV/kg)$$

である。この値は照射線量が測られている γ 線源(⁶⁰Co)と照射電子数がわかっている β 線源をそれぞれ標準TLシートに照射し、光子計数システムで読み取り求めたものである。この量を立方メートル当たりのシートに対する全蓄積エネルギー E_D に換算しなおすと、

$$\begin{aligned} E_D &= D \times \rho [BaSO_4 \text{の密度}] \\ &= 1.44 \times 10^9 (eV/kg) \cdot 4.5 \times 10^3 (kg/m^3) \\ &= 6.5 \times 10^{12} (eV/m^3) \end{aligned}$$

標準シートのBaSO₄分の容積：130 μ m \times 単位面積[1cm²]=1.3 \times 10⁻⁸m³なので1個の荷電粒子の通過に対するシートの蓄積エネルギー E_0 は

$$\begin{aligned} E_0 &= 6.5 \times 10^{12} (eV/m^3) \cdot 1.3 \times 10^{-8} (m^3) \\ &\simeq 8.5 \times 10^4 (eV) \end{aligned}$$

となる。

荷電粒子等の電離放射線によって結晶に格子欠陥[電子-正孔対]がつくられ、それらが熱発光になるとして発光光子数を求めてみる。BaSO₄結晶が放射線を吸収し、励起電子及び深い正孔が作られたあと、短時間[$\sim 10^{-15}$ sec]の緩和過程を経て価電子バンド中に多

数の正孔と伝導バンド中に多数の電子がつくられる。BaSO₄結晶は誘電体なので、伝導バンドと価電子バンドのエネルギーギャップ E_g は約10eV 程度⁹⁾と考えられる。電子のエネルギーが E_g より小さくなった後はフォノンを作り出しながらエネルギーを失って熱振動として消えていく。蓄積エネルギーの2/3はフォノンに、1/3が電子-正孔対を作るのに寄与する¹⁰⁾と考えると、格子欠陥の個数 N は

$$N = \frac{1}{3} \cdot \frac{E_o}{E_g} = \frac{8.5 \times 10^4 (eV)}{3 \cdot 10 (eV)} = 2.8 \times 10^3 \text{ (個)}$$

と算定される。 N が熱発光に寄与するとして、各種シートの発光効率を表IIに示す。

磁気単極子の検出は十数年にわたり多くのグループが実験を重ねてきた¹¹⁾が未だ検出に成功していない。その最大の理由は磁気単極子の落下速度が極めて遅い為、電離損失値が小さく通常の検出器ではひっかからないためと考えられている。特に GUT [大統一理論] 型モノポールの基本的なモデルは巨大質量 [$10^{16} \text{GeV}/c^2$] で磁荷 $g=68.5e^{12)}$ とされているので Dark matter (or Quark Nugget) 等¹³⁾と同様に超低速度・超重粒子として扱わねばならない。

表II 1個の荷電粒子が各種シートに入射したときの格子欠陥モデルでの発光効率

シートの種類	1電子当たりの全 TL 数	発光効率 [%]
Teflon-400	700	26
Teflon-200	220	8
Teflon-700	750	28
Fuji Al-base	120	4.4
Norikura Al-base	40	1.5

超重粒子がゆっくりとした速度 ($\beta=10^{-3} \sim 10^{-5}$, $\beta=v/c$, v は超重粒子の速度) で標的 (BaSO₄結晶) に衝突する場合、それが重イオンのように荷電していたとしてもストリッピングプロセスで電離損失は小さく弾性衝突のみを考えるべきであろう。

計算する上では重イオンが $\beta=10^{-3} \sim 10^{-5}$ で標準シートに入射し、弾性衝突するとして検出の可能性を検討する。即ち、以下のように標的が得るエネルギー [転移エネルギー, E] を求める。

$$E = \frac{m}{2} \cdot \frac{4M^2 v^2}{(m+M)^2}$$

ここで、 M : 入射重粒子の質量, v [又は β]: 入射重粒子の速度, E : 二次粒子 (BaSO₄) の運動エネルギー, m : 二次粒子 (BaSO₄) の質量である。又,

$$M \gg m$$

であるから、

$$E \doteq 2mv^2 = 2mc^2\beta^2$$

となり入射粒子の質量に依存しないで、速度 β だけの関数になる。 $mc^2=219\text{GeV}$ を代入して、 β の各々の値に対する E を求めると以下のようなになる。

β	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}
E	438keV	4.4keV	44eV

一方、重イオンの弾性散乱の回数を P とすると、

$$P = N_o\sigma x$$

で表わされる。但し、 N_o 、 σ 、 x は、

N_o : m^3 当たりの BaSO_4 の個数 ($1.2 \times 10^{28}/\text{m}^3$),

σ : 重イオンの弾性散乱の断面積 (ほぼ最大で約 10^8 barn [= 10^{-28}m^2]),

x : 標準 TL シートの BaSO_4 の厚さ ($1.3 \times 10^{-4}\text{m}$)

である。従って、超重粒子が標準 TL シートを一枚通過すると、 1.6×10^4 回 BaSO_4 結晶と衝突する。

従って、格子欠陥 1 個作るのに必要なエネルギーを 30eV とすると、重イオンが標準シートに入射した時に作られる全格子欠陥数、 N は

$$N = (E \times P)/30$$

となり、この N に発光効率 (標準シートでは 26%) が掛かったものが全発光 TL 数 (γ_{TL}) になる。表 III に計算結果をまとめて示す。

表 III 最大重イオンが TL シートに弾性衝突した時の全 TL 光子数

β	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}
N	2.3×10^8	2.3×10^6	2.3×10^4
γ_{TL}	6.0×10^7	6.0×10^5	6.0×10^3

表 III に見るように $\beta=10^{-5}$ が限界値であるが、この計算は最大の重イオンをもとにしているので検出しようとしている超重粒子は遙かに大きな質量 (例えば $10^{16}\text{GeV}/c^2$) なので衝突断面積も遙かに大きいと予想される。

このような遅い速度の超重粒子は電離損失等の相互作用をしないで地球に落下してきても通過してしまう。TL シートにのみ痕跡を残す可能性があるので、宇宙線等のバックグラウンドの極めて少ない地下実験室で待ち受ければよい。既に、我々は超重粒子検出の可能性を探ろうとして、テストチェンバー 4m^2 をモンブラントンネル [$5,200\text{hg}/\text{cm}^2$] に設置し

ている。

参考文献

- 1) 山本 勲, 富山 毅, 今枝国之助, 久我 清, 蛭川清隆, 中村改樹, 高野安正, 山下敬彦, 和田俱典 : 岡山理科大学紀要, 第20号 A (1985) pp. 219—232
- 2) K. Imaeda, et. al. : Nucl. Instr. and Method, A241 (1985) pp. 567—571
- 3) 高橋信介 : 岡山理科大学紀要, 第22号 A (1987) pp. 187—203
- 4) T. Wada, N. Takahashi and I. Yamamoto : Nucl. Instr. and Method, A261 (1987) pp. 368—372
- 5) 山本 勲, 富山 毅, 今枝国之助, 高橋信介, 蛭川清隆, 中村改樹, 高野安正, 山下敬彦, 和田俱典 : 岡山理科大学紀要, 第21号 A (1986) pp. 117—128
- 6) I. Yamamoto, et. al. : Nucl. Instr. and Method, A256 (1987) pp. 567—575
- 7) M. Kohata, Y. Kaneda and Y. Miyagaki : Proc. 19th Hawaii Int. Conf. on System Science (1986) pp. 111—116
- 8) 久我 清 : 岡山理科大学大学院理学研究科修士論文 (1985)
- 9) 5 eV より大きい程度であることが以下の文献に示されている。N. Yamashita, et. al. : Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 24 No. 9 (1985) pp. 1174—1180
- 10) A. Hughes and D. Pooley : “Real Solid and Radiation” (1975) Wykeham Publications (London)
- 11) “Monopole’83” edited by J. L. Stone (1984) Plenum Press, New York.
- 12) 論文は数え切れない程あるので, G. Giacomelli : Invited paper at the Conference on “MONOPOLES IN QUANTUM FIELD THEORY” (1981) Trieste, を参考にした。
- 13) これらも沢山あるので代表的な E. Witten : Phy. Rev. 30 (1984) 272を掲載しておく。

Readouts of Electromagnetic Showers with Thermoluminescent Sheets I

Isao YAMAMOTO · Nobusuke TAKAHASHI · Tsuyoshi TOMIYAMA
Kuninosuke IMAEDA · Atsushi IYONO · Masaki KOHATA
Tomonori WADA* and Yoshihiko YAMASHITA*

*Department of Electronic Engineering, Okayama University
of Science, Ridai-cho 1-1, Okayama 700, Japan*

**Faculty of Science, Okayama University,
Tsushima-cho 3-1-1, Okayama 700a, Japan*

(Received September 30, 1988)

We have succeeded to detect 1.0~0.9 TeV electromagnetic cascade showers with Norikura TL [thermoluminescent] chamber using the spatial photon counting system. We have reported the feasibility of a new detector, the TL sheet in super-slow heavy particle searches.