

極高エネルギー宇宙線観測のための  
テレスコープアレイ実験における  
大規模地表粒子検出器  
境界トリガーシステムの開発

東京大学大学院  
理学系研究科物理学専攻  
山川 雄一

指導教官  
佐川 宏行

2009年1月申請

## 概要

GZK カットオフが提唱されて以来、 $10^{20}$ eV を超える最高エネルギー宇宙線は地球まで到達することが非常に困難だと考えられてきた。しかし 1990 年代後半、日本を中心とする AGASA グループは、地表粒子検出器アレイを用いて GZK カットオフを超える最高エネルギー宇宙線を予想を上回る数観測したと発表した。一方アメリカを中心とした HiRes グループは大気蛍光望遠鏡を用いて GZK カットオフの予想数程度の最高エネルギー宇宙線を観測したと発表した。しかし両実験ともエネルギーの決定精度・検出頻度が低く  $10^{20}$ eV を超える宇宙線の存在は確定されず、GZK カットオフの存在を確かめるには至っていない。また、超高エネルギー宇宙線の起源、発生メカニズムや粒子種も判明しておらず、これらの問題を解決するためにエネルギー、到来方向、一次宇宙線粒子などを精度良く、高頻度で観測できる実験を行う必要があった。

テレスコープアレイ (Telescope Array : TA) 実験では、プラスチックシンチレーターを用いて宇宙線を直接観測する地表粒子検出器 (Surface Detector : SD) アレイと、高エネルギー宇宙線が大気と相互作用することにより発生する蛍光を観測する大気蛍光望遠鏡 (Fluorescence Detector : FD) を用いて極高エネルギー宇宙線の同時観測を行う。現在、両検出器共に製作・試験・設置が終わっており、同時観測が 2008 年 4 月から本格的に始まっている。

SD は AGASA の 7 倍規模の広大な土地に置かれており、SD アレイの端に設置された 3 つの通信塔を通してデータの取得を行う。ただし、これまでは通信塔毎に独立にトリガー判定、データ収集が行われており、境界領域を含めた SD 全体を一つのシステムとして動かすことが出来ていなかった。そのため領域間に落ちた低エネルギーの空気シャワーイベントは、一定の条件を満たしたもののしか取得する事が出来ず、領域間ではトリガー効率が大きく違っていた。

本研究の課題は、3 領域が独立して稼動していた SD データ収集システムを 1 つのシステムとして稼動させ、SD アレイ全体の一様性を改善し、境界を跨るイベントも取得できるようにすることである。そのためにシステムの設計、開発およびインストールを行い、テレスコープアレイ実験の SD 全体のトリガーシステムの確認を行った。この改良により、低エネルギー空気シャワーイベントをトリガー数で 7% 程より多く取得することが出来、また SD アレイが領域の端の影響を受けなくトリガー効率が一様であると考えられる領域を 46% 増加させることが出来た。

# 目次

|     |                       |    |
|-----|-----------------------|----|
| 1   | 序論                    | 1  |
| 2   | 最高エネルギー宇宙線            | 4  |
| 2.1 | 宇宙線                   | 4  |
| 2.2 | 最高エネルギー宇宙線            | 5  |
| 2.3 | 最高エネルギー宇宙線の起源         | 7  |
| 2.4 | 最高エネルギー宇宙線観測実験の現状     | 9  |
| 2.5 | 空気シャワー現象              | 10 |
| 2.6 | 横方向発達                 | 14 |
| 2.7 | 空気シャワーの観測方法           | 14 |
| 3   | テレスコープアレイ実験           | 17 |
| 3.1 | テレスコープアレイ実験の概要        | 17 |
| 3.2 | 地表粒子検出器               | 17 |
| 3.3 | 地表粒子検出器の較正とモニター       | 20 |
| 3.4 | 大気蛍光望遠鏡               | 23 |
| 3.5 | 大気蛍光望遠鏡の較正            | 24 |
| 3.6 | 大気蛍光望遠鏡のデータ収集システム     | 29 |
| 3.7 | テレスコープアレイ実験の現状        | 30 |
| 4   | 地表粒子検出器データ収集システムのデザイン | 34 |
| 4.1 | 地表粒子検出器旧トリガーシステムの概要   | 37 |
| 4.2 | 境界トリガー判定の概要           | 44 |
| 4.3 | 他領域へのトリガーの概要          | 49 |
| 4.4 | 新トリガーシステムのデザイン        | 49 |
| 5   | 地表粒子検出器データ収集システムの開発   | 54 |
| 5.1 | トリガーテーブルの転送           | 54 |
| 5.2 | コマンドの転送               | 60 |
| 6   | 観測結果                  | 64 |

|     |                                      |    |
|-----|--------------------------------------|----|
| 6.1 | タワー PC、タワーエレクトロニクス間のコマンド転送 . . . . . | 64 |
| 6.2 | タワー PC、セントラル PC 間コマンド転送 . . . . .    | 64 |
| 6.3 | 領域ごとのトリガー数 . . . . .                 | 66 |
| 6.4 | イベント . . . . .                       | 71 |
| 7   | 結論 . . . . .                         | 72 |
| 7.1 | 今後の課題 . . . . .                      | 72 |
| 7.2 | まとめ . . . . .                        | 74 |



# 1 序論

宇宙線とは、宇宙空間を飛び回る陽子や核子、電子やニュートリノ、光子などの総称である。気球と放射線観測装置を用いて放射線強度の高度依存性から宇宙から降り注ぐ粒子として1912年 V.F.Hess により発見された。また宇宙線は宇宙から地球に直接やってくる一次宇宙線と、高エネルギー一次宇宙線が大気に突入し空気と相互作用することにより生成される二次宇宙線とに大きく分けることができる。

Hess により宇宙線が発見され以来、一次宇宙線のエネルギー分布が調べられており、測定されている宇宙線のエネルギースペクトルを図 1.1 に示す。

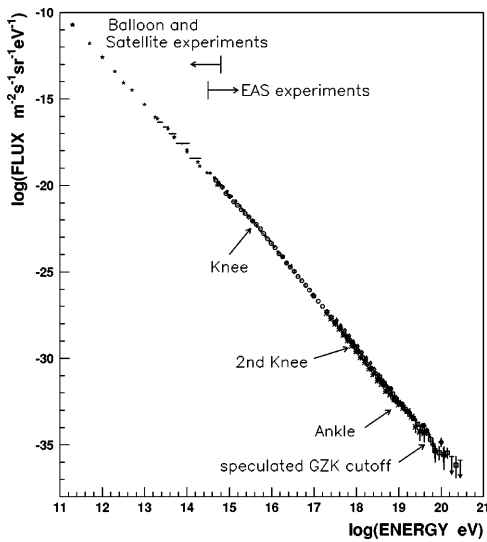


図 1.1 一次宇宙線のエネルギースペクトル

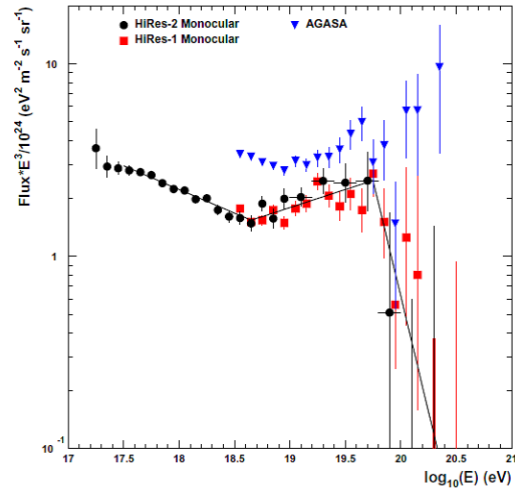


図 1.2 AGASA、HiRes 実験による  $10^{20}$  付近のエネルギースペクトル

一次宇宙線のエネルギースペクトルの特徴として  $10^{15} \sim 10^{16}$  eV、 $10^{19}$  eV 付近で分布の折れ曲がりが見られ、それぞれ knee 領域、ankle 領域呼ばれている。knee 領域よりエネルギーが低い側でのスペクトルのべきは  $-2.7$ 、knee 領域と ankle 領域の間では  $-3.0$  となる。

宇宙線のエネルギースペクトルは低エネルギーから高エネルギーまで長く伸びている。しかし 1960 年代後半、 $10^{20}$  eV 程度の超高エネルギー宇宙線は、宇宙空間を満たしている 2.7K 宇宙背景放射と相互作用を起こしエネルギーを失ってしまうため、宇宙線のスペクトルが  $10^{20}$  eV 付近で急激なカットオフを持つと、Greisen、Zatsepin、Kuz'min らによって予測された [1][2]。このカットオフは 3 人の頭文字を取り GZK カットオフと呼ば

れている。

しかし、シンチレーターを用いた地表粒子検出器をアレイ状に並べて超高エネルギー宇宙線を観測していた AGASA 実験 [3] は、GZK カットオフを超えるエネルギーの宇宙線を予想数を超える 11 例観測したと発表した。これに対し大気蛍光望遠鏡を用いて超高エネルギー宇宙線を観測していた High Resolution Fly's Eye(HiRes) 実験は、GZK カットオフを示唆した [4]。ともに、一次宇宙線を直接観測するのではなく大気突入し生成される空気シャワーを観測することで間接的に一次宇宙線を観測している。地表粒子検出器と大気蛍光望遠鏡という観測方法の違いがこの結果の違いを生んでいるという可能性もある。

エネルギー決定精度と観測有効体積は、AGASA 実験で 18% と  $160\text{km}^2\cdot\text{sr}$  で、HiRes 実験では 20% と  $3000\text{km}^2\cdot\text{sr}$ (ただし効率は 10% 程度) である。ともにエネルギー決定精度が低く観測有効体積が狭いのでイベントが少なく GZK カットオフ問題を決着するには至っていない。

またこのような超高エネルギー宇宙線の発生メカニズムも解明されていない。一次宇宙線の粒子や到来方向の情報が発生メカニズムの理解へ繋がると期待されており、エネルギー、到来方向を精度良く観測し、効率よく多くの超高エネルギー宇宙線を観測する実験が必要となった。

テレスコープアレイ実験は、GZK カットオフ問題に決着をつけ、極高エネルギー宇宙線の起源を知ることを目的とした実験である。この実験では、AGASA 実験の観測方法である地表粒子検出器アレイ (Surface Detector : SD) と HiRes 実験の観測方法である大気蛍光望遠鏡 (Fluorescence Detector : FD) の 2 種類の検出器で同時に超高エネルギー宇宙線を観測する。大気蛍光望遠鏡は夜間の月が出ていない天気がよい日のみの観測になってしまうが、空気シャワーの縦方向発達の様子が観測でき、核種を決定することが出来る。これに対して地表粒子検出器は 24 時間稼働し、大気蛍光望遠鏡に比べ観測数が多く異方を統計的に精度良く決定できる。また、AGASA 型および HiRes 型の検出器で同じ空気シャワーイベントを独立に観測するために両方の検出器の特性、測定法の違いをきちんと理解することによって、AGASA と HiRes 実験でエネルギースペクトルに関して違う結果が出てしまった原因の究明に繋がるであろう。

本論文では、地表粒子検出器のトリガーシステムに関して議論する。高エネルギー一次宇宙線が観測サイト上空に到来すると大気中の空気と相互作用を起こし空気シャワーを生成する。第二章では最高エネルギー宇宙線について述べ、第三章では、超高エネルギー宇宙線を観測するテレスコープアレイ実験の全体像について述べる。第四章で、地表粒子検出器のトリガーシステムの新旧のデザインについて述べ、第五章では、地表粒子検出器の

新しいデータ収集システムの実装と試験について述べる。第六章では、実際に取得したデータからトリガーシステムの確認を行ない、第七章で、結論を述べる。

## 2 最高エネルギー宇宙線

### 2.1 宇宙線

宇宙線とは宇宙空間を飛び回る高エネルギー放射線の総称である。図 1.1 で示されているように一次宇宙線は低エネルギー側から  $10^{19}\text{eV}$  程度まで大きなカットオフもなく減少し宇宙線強度は  $f(E) = k \times E^\alpha (\alpha \sim -3)$  と表すことが出来る。宇宙線強度が冪型のエネルギースペクトルを持って観測されることは、宇宙線の起源を推定する上で非常に重要であり様々な加速原理が考えられてきたが、完全には解明されていない。

#### 2.1.1 加速機構と到来方向

観測される宇宙線強度が冪型のエネルギースペクトルであり、これを導き出せる加速機構のモデルとして、フェルミ加速が広く知られている。フェルミ加速とは、1949 年に Fermi によって提唱された加速理論で荷電粒子が星間雲との衝突を繰り返すことによって加速されるという統計的な加速である [5]。プラズマ雲と荷電粒子との散乱方向はランダムであるが、粒子 1 回あたりの平均的なエネルギー増加量  $\Delta E$  は、正面衝突の頻度が高いため正となり

$$\Delta E = aE \quad (\text{ただし } a > 0) \quad (2.1)$$

と表せる。星雲間との衝突による加速では、星間雲の速度を  $v$ 、平均自由行程を  $l$ 、粒子の速度を  $u$  とすると、

$$a = 2 \left( \frac{v}{c} \right)^2 \frac{u}{l} \quad (2.2)$$

と示すことができる。星間雲の移動速度の 2 乗に比例することから 2 次のフェルミ加速と呼ばれている。しかし、星雲間での加速機構では加速効率が悪く加速時間がかかり過ぎるため実際の宇宙線を説明できない。実際の宇宙線加速モデルとしては、この 2 次フェルミ加速よりもプラズマ衝撃波による加速機構が有力であると考えられている。プラズマ衝撃波による加速機構とは、密度・圧力などの急激な変化が起こる衝撃波面を粒子が往復し、その際にエネルギーを得るというモデルである。その時のエネルギー増加  $\Delta E$  は、衝撃波上流の速度を  $v_1$ 、下流の速度を  $v_2$  として

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{4}{3} \frac{v_1 - v_2}{c} \quad (2.3)$$

と表すことが出来る [6]。加速効率は速度差  $v_1 - v_2$  に比例しておりこれを 1 次のフェルミ加速と呼ぶ。加速効率は速度差に比例するので、2 次フェルミ加速と比較して加速効率はよいが、この加速機構では衝撃波の広がりには制限があり  $E = 10^{15}$  eV 程度が加速限界だと考えられている。

宇宙線の到来方向を考える上では銀河内に存在する銀河磁場の影響を考えなければならない。銀河内では銀河磁場の影響で極性を持った宇宙線は、ローレンツ力を受けて螺旋運動をする。その軌道のラーモア半径  $R_L$  は、

$$R_L \cong \frac{E}{ZeB} \quad (2.4)$$

で与えられる。ここで  $E$  は宇宙線のエネルギー、 $Ze$  は電荷量、 $B$  は銀河磁場である。一次宇宙線が陽子である場合のラーモア半径を銀河磁場  $B \cong 3\mu\text{G}$  として簡単に計算してみると、knee 領域付近である  $E = 10^{15}$  eV で、0.3pc となる。これは銀河円盤の厚さより小さいが拡散の運動の効果を含めるとこれより大きいエネルギーの宇宙線を銀河内に閉じ込める効果が効きにくくなり、これが knee 領域のスペクトルとなって現れているとも考えられている。<sup>\*1</sup>

またエネルギーが  $10^{19}$  eV の宇宙線ではラーモア半径が 3kpc となり、銀河半径 (15kpc) に対して無視できず、これより大きいエネルギーの宇宙線は銀河内に閉じ込めることが出来ない。到来方向を調べることにより最高エネルギー宇宙線の発生源を突き止める大きな手がかりとなる。

## 2.2 最高エネルギー宇宙線

宇宙線研究の興味深い対象の一つとして最高エネルギー宇宙線がある。ここで最高エネルギー宇宙線とは、 $10^{20}$  eV 付近、あるいはそれ以上のエネルギーを持った宇宙線のことを指す。最高エネルギー宇宙線については、AGASA や HiRes グループなどにより観測されてきたが、その存在や起源、伝播についてまだ解明されていない。

### 2.2.1 GZK カットオフ

1963 年に宇宙背景放射 (Cosmic Microwave Background Radiation: CMBR) の存在が発見された直後、Greisen、Zatsepin、Kuzmin によって高エネルギー宇宙線が伝播中に宇宙背景放射と相互作用を起こし、大きなエネルギー損失を落とすことを指摘した [1][2]。

---

<sup>\*1</sup> knee 領域の折れ曲がりについては、オーダーとして  $100\text{ZTeV}$  がショック加速の限界と考えられており、加速限界が見えてきている可能性もある。

2.7K の宇宙背景放射は、宇宙線陽子の静止系では 100MeV を超える高エネルギーガンマ線と同等であり、陽子は高い確率で核子共鳴状態に励起され、式 (2.5) から (2.7) の 3 種類の反応が起こりえて反応時に陽子は大きくエネルギーを落とす。



図 2.1 に高エネルギー宇宙線の銀河間空間における減衰距離を示す。これによると、一次宇宙線が陽子の場合だけでなく陽子より重い鉄の原子核でも  $10^{20}$ eV 付近で減衰距離が急激に短くなることわかる。

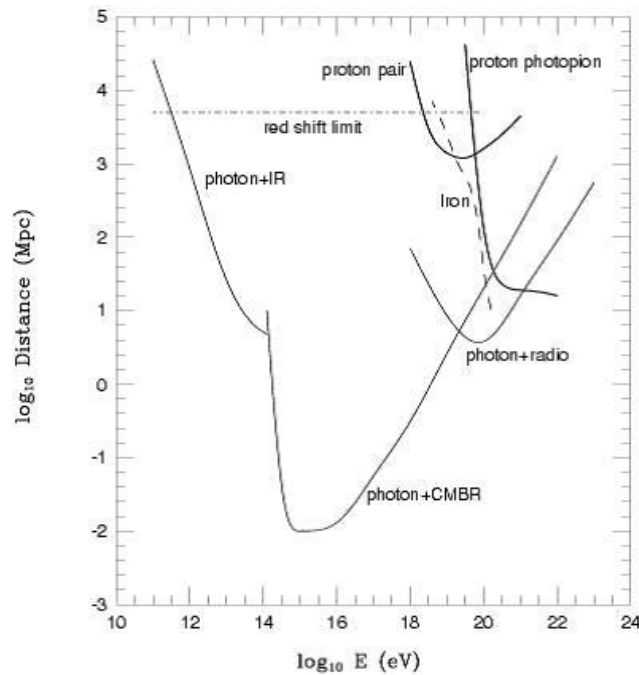


図 2.1 最高エネルギー宇宙線の減衰距離とエネルギーの関係。 $10^{20}$ eV 付近で陽子、鉄ともに急激に減衰距離が短くなっている。

一次宇宙線が陽子であると仮定して  $10^{20}$ eV 以上の陽子の減衰距離は 100Mpc 程度であることがわかる。つまり彼らの主張が正しいのであれば、地球から 100Mpc 以上離れた場所から  $10^{20}$ eV を超えた宇宙線が発生したとしても、伝播中に相互作用を起こしエネルギーを失うため、地球に到達することはない。もし  $10^{20}$ eV 以上の一次宇宙線が地球に到来した場合、100Mpc 以内に最高エネルギー宇宙線の起源があることを示している。

以上のような反応により地球に観測される宇宙線のエネルギースペクトルには  $10^{20}$  eV 付近に大きなカットオフがあると考えられており、これが GZK カットオフと呼ばれている。GZK カットオフによって予想される宇宙線のスペクトルを図 2.2 と図 2.3 に示す。観測される最高エネルギー宇宙線のスペクトルがどのような構造を示すかが宇宙線の起源を研究する上で重要な鍵となっている。

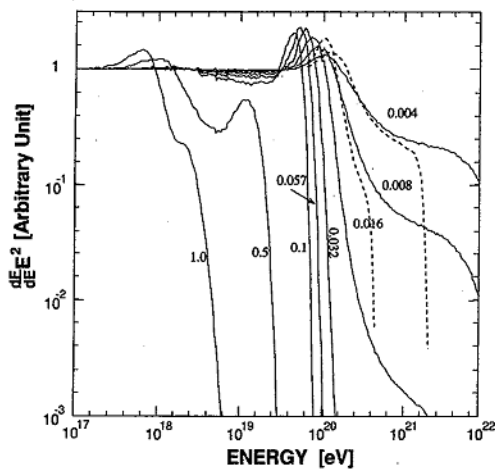


図 2.2 GZK カットオフによる宇宙線のスペクトル。起源が点源で赤方偏移 ( $z = 0.004$  から  $1.0$ ) にあると仮定した場合。

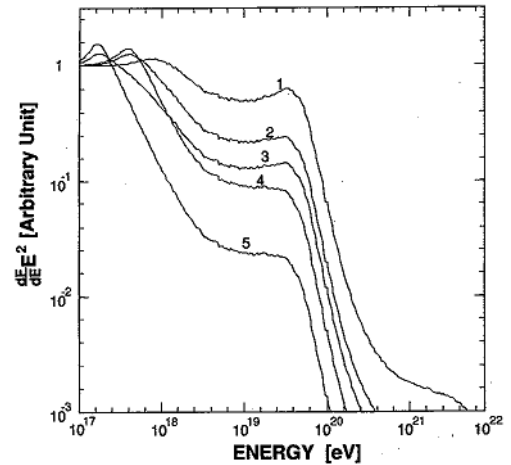


図 2.3 起源が点源ではなく空間的に分布している時の GZK カットオフによる宇宙線スペクトル。グラフ中の数字は空間分布のモデルの違いであり、モデルによりスペクトルの形が変わる。

## 2.3 最高エネルギー宇宙線の起源

最高エネルギー宇宙線の起源はまだ解明されていない。しかし、最高エネルギー宇宙線の起源として、低エネルギー粒子が加速され最高エネルギー宇宙線となるボトムアップモデルと未知の粒子の崩壊などにより最高エネルギー宇宙線が生成されるトップダウンモデルが考えられている。

### 2.3.1 ボトムアップモデル

2.1.1 節で述べたように宇宙線は宇宙空間に存在するプラズマ衝撃波によって加速される。宇宙線を高エネルギーに加速するためには、閉じ込めるためのラーモア半径が加速領域



域より小さい必要があり、ここで加速限界が決まり

$$E_{\max} \leq A \cdot eZBL\beta c \quad (2.8)$$

となる [7]。ここで  $\beta c$  は衝撃波の速度、 $eZ$  は加速される粒子の電荷、 $B$  は磁場、 $L$  は加速領域の大きさで  $A$  は正の定数である。図 2.4 に粒子の起源や加速の候補となる天体の候補とサイズ、磁場の強さ、最大加速エネルギーの関係を示す。  $10^{20}\text{eV}$  at  $\beta = 1$  と書いてある線より下側の天体は、ショック加速で  $10^{20}\text{eV}$  まで加速することが出来ない。  $10^{20}\text{eV}$  at  $\beta = 1/300$  と書いてある点線は、天体の衝撃波について典型的な値である  $\beta = 1/300$  による陽子の加速を想定したものである。宇宙線のエネルギーを  $10^{20}\text{eV}$  以上に加速可能な天体の候補は、ガンマ線バースト (Gamma Ray Burst:GRB)、活動銀河核 (Active Galactic Nuclei:AGN)、中性子星 (Neutron Stars) などがある。GZK カットオフ効果を考慮すると、これらの天体が 100Mpc 以内に存在している必要がある。他にも銀河中心

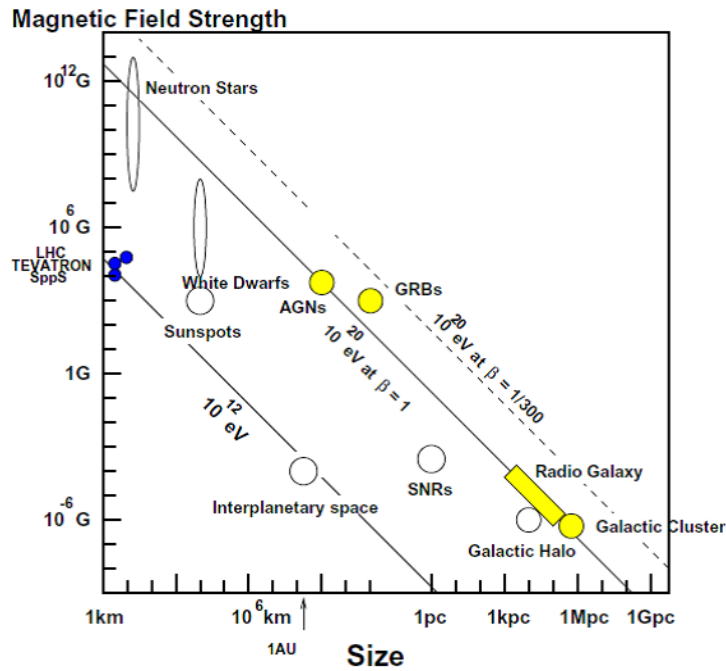


図 2.4 高エネルギーまで加速できる天体候補のサイズと磁場の強さ。

にあるブラックホールによる加速などがモデルとして上がっているが、いずれも今までの実験結果を満たさないため、ボトムアップモデルの候補としては未だこれといった天体が存在しない。



### 2.3.2 トップダウンモデル

一方、未知の粒子が崩壊し超高エネルギー宇宙線を生成するというモデルが考案されている。超高エネルギー宇宙線の存在が確立されれば、標準的な理論を越えた新しい物理が開拓される可能性がある。

例えば、ビッグバン初期の温度は大統一理論、あるいは超対称統一理論のエネルギーに到達していると考えられることから、この時期に宇宙ひもなど大統一理論のスケールエネルギーである  $10^{24}$ eV 程のエネルギーを持った位相欠陥が生成され、この粒子が崩壊や対消滅を起こすことで超高エネルギー宇宙線を生成すると考えるモデルがある [8]。他にも  $10^{22}$ eV のニュートリノと背景ニュートリノが相互作用して生成される  $Z^0$  ボソンが崩壊することによって超高エネルギー宇宙線を生成するモデルなど考察されている [9][10]。これらの場合粒子種の割合分布に偏りが生じるので、超高エネルギー宇宙線の核種を判別することによりモデルの検証が出来る可能性がある。

## 2.4 最高エネルギー宇宙線観測実験の現状

今までにも、超高エネルギー宇宙線を観測するために AGASA 実験や HiRes 実験が行われてきた。それぞれの観測装置を用いてエネルギースペクトルを調べたところ AGASA 実験グループと HiRes 実験グループでは GZK カットオフについて異なる結果が得られた。

AGASA は地表粒子検出器を用いた観測で GZK カットオフが見られないという結果 [3] を示したのに対し、HiRes 実験は大気蛍光望遠鏡による観測を行い、スペクトルは GZK カットオフと一致し GZK カットオフの存在を示唆する結果 [4] を発表した。

このように両者は矛盾した観測結果を示しているが、 $10^{19}$ eV を超える宇宙線の到来頻度は年間 1 個/ $\text{km}^2$  と極めて低く統計量の高い観測が出来ていなく、また AGASA のエネルギー決定の系統誤差は 18%、HiRes は 20% であり、GZK カットオフの存否についてはどちらも決定的な結果は出せていない。また AGASA は地表粒子検出器を用いて、一方 HiRes は大気蛍光望遠鏡を用いて空気シャワーを観測しており、観測装置固有のエネルギー決定の系統誤差がスペクトルの違いに関係しているのではないかと指摘されている。

現在では、このような問題を解決するために、地表粒子検出器と大気蛍光望遠鏡のハイブリッド観測装置であるテレスコープアレイ実験とピエールオージェ実験 (Pierre Auger Observatory : Auger 実験) が建設され実験が始まっている。

Auger 実験では 2007 年 11 月、地球に降り注ぐ最高エネルギー宇宙線の発生源が活動

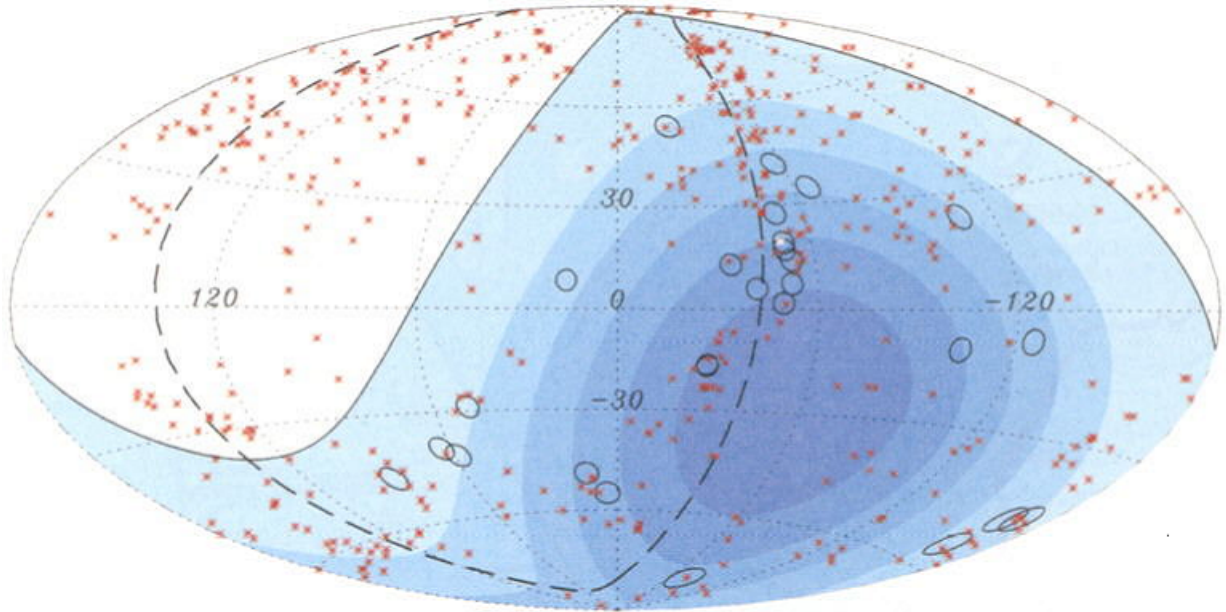


図 2.5 Auger 実験によって観測された  $10^{19.75}$  eV 以上の宇宙線 27 個の到来方向を 3.1 度の円で示している。赤い点は 75Mpc 以内の AGN を示す。青い領域は観測された領域で濃さが露出の多さを示す。

銀河中心核 (AGN) と相関があると発表した [11]。これによると今までに  $4 \times 10^{19}$  eV 以上のエネルギー宇宙線を 81 個観測している。このエネルギーでの到来方向決定精度は数度以下であり、これらの粒子が宇宙で発生する場所を特定するのに十分であるという。そして 57EeV ( $10^{19.75}$  eV) 以上のエネルギー宇宙線を 27 個観測しているが、それらの到来方向分布が等方的でないことが確認された (図 2.5)。また超高エネルギー宇宙線のエネルギースペクトルは GZK カットオフと一致していると示唆している [12]。これに対し、HiRes 実験グループは超高エネルギー宇宙線の到来方向と AGN との相関はないと発表した [13]。これは、HiRes 実験は北半球で観測し Auger 実験は南半球で観測を行っているため一概には比較できない。北半球の HiRes 実験の結果を確認するには、北半球で実験を行っている望遠鏡アレイ実験の結果を待たなくてはならない。

## 2.5 空気シャワー現象

### 2.5.1 空気シャワー現象の概要

宇宙線の到来頻度 (図 1.1) はおよそ  $E^{-3}$  で減少するため極高エネルギー宇宙線を直接観測することは、大きな検出面積と長い露光時間が必要であり、直接観測することは難し

い。そのため高エネルギー一次宇宙線を知るためには、一次宇宙線が大気と相互作用をして出来る二次宇宙線 (空気シャワー) を測定する方法が使われている。

一次宇宙線が大気に入射すると大気中の原子核と相互作用を起こし、陽子、中性子、 $\pi$ 、 $K$  等のハドロンを生成する。これらの二次粒子は大気中の原子核と次々相互作用を起こしハドロンが生成されていく。この現象をハドロンシャワーと呼ぶ。ハドロンシャワーで生成される粒子のうち  $\pi^0$  は寿命が短いため、大部分が大気中の原子核と相互作用を起こす前に  $2\gamma$  に崩壊する。

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma \quad (\tau = 0.84 \times 10^{-16} \text{sec}) \quad (2.9)$$

高エネルギー  $\gamma$  は電子陽電子対を生成し、これらは制動放射や電子陽電子対消滅により複数の  $\gamma$  を放出する。ハドロンシャワーで生成された  $\pi^\pm$  も後に以下のような崩壊を起こし電子、陽電子を放出する。

$$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu) \quad (\tau_\pi = 2.6 \times 10^{-8} \text{sec}) \quad (2.10)$$

$$\mu^\pm \rightarrow e^\pm + \nu_e(\bar{\nu}_e) + \bar{\nu}_\mu(\nu_\mu) \quad (\tau_\mu = 2.2 \times 10^{-6} \text{sec}) \quad (2.11)$$

これらの電子、陽電子も同様に  $\gamma$  を放出する。このように  $\gamma$  線と荷電粒子が転換を繰り返すことで増幅される現象を電磁シャワーと呼ぶ。粒子数が増大し1粒子あたりのエネルギーが減少すると、大気中での電離損失が優勢となり電子成分が大気に吸収され粒子総数が減少する。この臨界エネルギーは空気中では 74MeV であり、これよりエネルギーが小さくなるとシャワー発達が止まる。このように高エネルギー宇宙線が地球に突入することで形成されるハドロンシャワーと電磁シャワーをあわせて空気シャワーと呼ぶ。空気シャワーの模式図を図 2.6 に示す。

### 2.5.2 縦方向発達

空気シャワーに含まれる粒子の総数が増大するにつれて、個々の粒子の持つエネルギーは減少し、臨界エネルギー  $E_c$  に近づくと大気分子による電離損失が大きくなり急激にエネルギーを失って大気に吸収される。その為、空気シャワー中の粒子数はある発達段階から減少し始める。このような空気シャワーの通過した物質質量に対する粒子数の変化は縦方向発達 (longitudinal development) と呼ばれる。

エネルギーが  $E_0$  の一個の光子が大気に入射したときに生じる空気シャワーの縦方向発

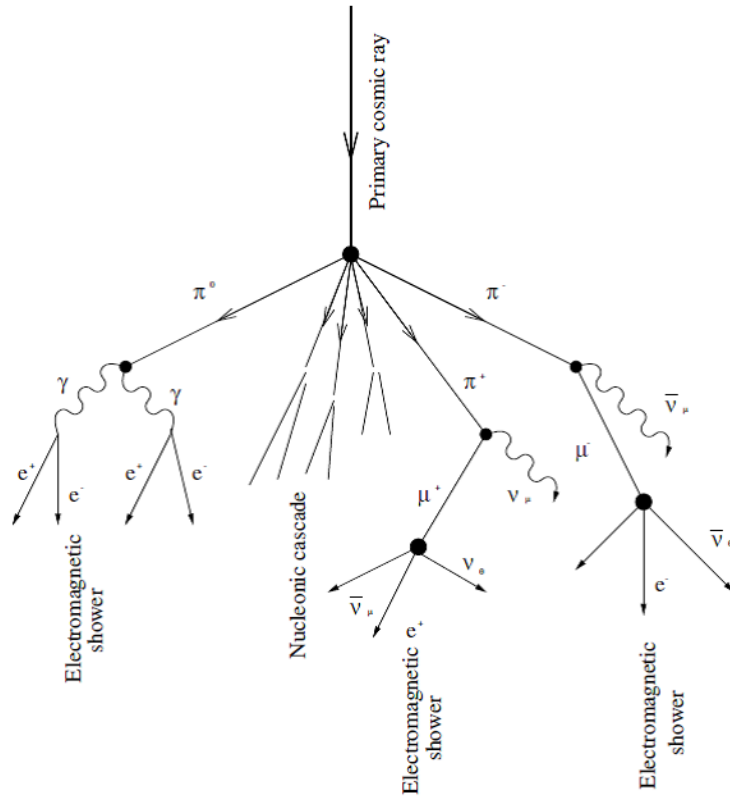


図 2.6 空気シャワーの模式図

達について、次の近似式が用いられる。

$$N_e(t) \sim \frac{0.31}{y} \exp \left( t \left( 1 - \frac{3}{2} \ln s \right) \right) \quad (2.12)$$

$$y = \ln \frac{E_0}{E_c} \quad (2.13)$$

$$s = \frac{3t}{t + 2y} \quad (2.14)$$

ここで  $t$  は、電子の大気中での放射長 ( $37.1\text{g/cm}^2$ ) を単位とするシャワーが通過した大気厚さである。 $s$  はエイジパラメータと呼ばれ、シャワーの発達段階を表すパラメータである。エイジパラメータはシャワーの発達とともにその値が増加し、 $N_e$ (全電子・陽電子数) が最大になる段階で  $s = 1$ 、発達段階で  $s < 1$ 、減衰状態で  $s > 1$  となる。一次宇宙線のエネルギーとシャワーを構成する粒子の数の関係は空気シャワーシミュレーションによって求める。陽子から始まる空気シャワーシミュレーションの結果からシャワーサイズ

は Gaisser と Hillas の提案 [14] に基づく以下の式が用いられる。

$$N_e(X, X - X_1) = S_0 \frac{E}{\epsilon} \exp\left(\frac{X_{\max}}{\lambda} - 1\right) \left(\frac{X - X_1}{X_{\max} - \lambda}\right)^{\frac{X_{\max}}{\lambda} - 1} \exp\left(-\frac{X - X_1}{\lambda}\right) \quad (2.15)$$

$$S_0 = 0.045 \times \left(1 + 0.0217 \ln \frac{E}{100\text{TeV}}\right) \quad (2.16)$$

ここで  $\epsilon$  は空気に対する臨界エネルギーで  $74.0[\text{MeV}]$ 、 $X_{\max}$  はシャワー最大発達深さ  $[\text{g}/\text{cm}^2]$ 、 $X_1$  は一次宇宙線の最初の相互作用の深さ  $[\text{g}/\text{cm}^2]$ 、 $\lambda$  は縦方向発達の減衰長で  $70[\text{g}/\text{cm}^2]$  である。

一次宇宙線のエネルギーの違いは  $N_{\max}$  (最大発達時の粒子数) の違いとなって現れる。一次宇宙線粒子種の違いは  $X_1, X_{\max}$  に現れ、重い原子核ほど  $X_1, X_{\max}$  の値が小さくなる傾向がある。陽子、鉄原子核による空気シャワーのシミュレーションを行って求めた縦方向発達曲線を図 2.7 に示す。

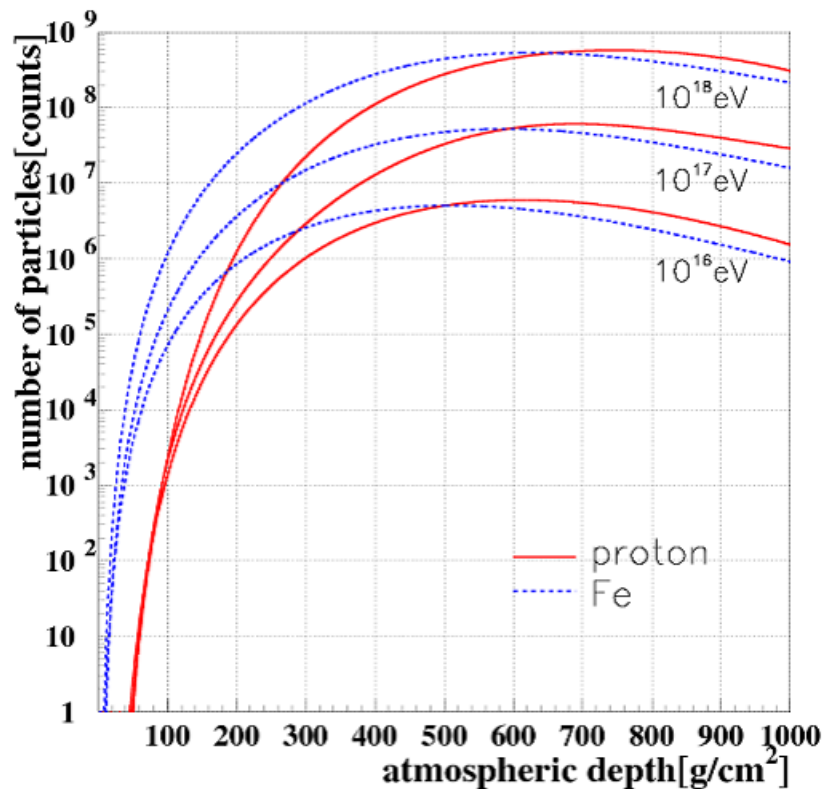


図 2.7 一次宇宙線のエネルギー、核種による空気シャワー発達の違い

## 2.6 横方向発達

電磁シャワーは、電荷を持った粒子が大量に発生するため多重クーロン散乱によってシャワー粒子はシャワー軸から離れ広がっていく。シャワー軸と垂直な方向の粒子密度分布は横方向分布 (lateral distribution) と呼ばれる。電磁シャワーの広がりハドロンシャワーによって形成される横広がりよりも大きいので、空気シャワーを電磁シャワーの横方向発達で近似することを考える。

西村、鎌田によって電磁シャワーについての横方向分布粒子密度  $\rho(R)$  が 3 次元で解析的に計算されており、それを Greisen が近似して得られた Nishimura-Kamata-Greisen(NKG) 関数 [14] がよく用いられている。

$$\rho(R) = C \frac{N_e}{R_M^2} \left( \frac{R}{R_M} \right)^{s-2} \left( 1 + \frac{R}{R_M} \right)^{s-4.5} \quad (2.17)$$

ここで、 $R$  はシャワー中心からの距離、 $C$  は規格化定数、 $s$  はエイジパラメータ、 $N_e$  は全電子数、 $R_M$  はモリエールユニット (電子が 1 輻射長進む間に進行方向からずれる距離) である。

この電磁シャワーの横方向発達の式は空気シャワーの横方向発達としてもよい近似になるが、空気シャワーでは核カスケードシャワーで生成されるハドロンの  $\pi$  中間子によって始まる電磁シャワーの効果も考えなくてはならない。そのため空気シャワー全域に渡って NKG 関数で記述しようとしてもうまくいかない。そこで空気シャワーに適用する際には NKG 関数を修正・拡張して使用する。

例えば永野らは

$$\rho_e(R, s) = C_1 \left( \frac{R}{R_m} \right)^{s-2.0} \left( 1 + \frac{R}{R_m} \right)^{s-4.5} \left( 1 + C_2 \left( \frac{R}{R_m} \right)^d \right) \quad (2.18)$$

とし、 $d = 1.3, C_2 = 0.2$  とした [15]。ここで  $C_1$  は規格化定数である。

## 2.7 空気シャワーの観測方法

空気シャワーの観測方法には、地表に到達する二次宇宙線を直接観測する地表粒子検出器をアレイ上に多数並べる観測方法と、大気蛍光法の 2 種類がある。



### 2.7.1 地表粒子検出器

多数の地表粒子検出器を地表に配置し、空気シャワーによって生成された二次宇宙線を直接捕らえることで、宇宙線を観測する装置を空気シャワーアレイという。空気シャワー粒子は、90%の電磁成分(電子、陽電子、光子)と5%のミュオン成分、少数のハドロン成分から成る。地表粒子検出器として用いる検出器は、実験や目的により様々であるが、プラスチックシンチレーター検出器や、ミュオン成分のみを選択的に検出するためのミュオン検出器やハドロン成分を観測するために特化したハドロンカロリメーターを備えている空気シャワーアレイもある。

空気シャワーアレイの場合、一次宇宙線の到来方向は比較的簡単に知ることが出来る。空気シャワーは図 2.8 のようにシャワー面は粒子の厚みをもって地表に到達する。この厚みを考慮しつつ各検出器への到来時間差から空気シャワーの到来方向を求めることが出来る。一方エネルギーは各検出器で検出された時間差情報からシャワー軸、粒子数密度から、横方向分布、全粒子数を推定することで得られる。しかし、横方向分布はハドロン相互作用を考慮した大規模なモンテカルロ計算を必要とする。その際ハドロン相互作用の不確定性の影響を受けることとなる。

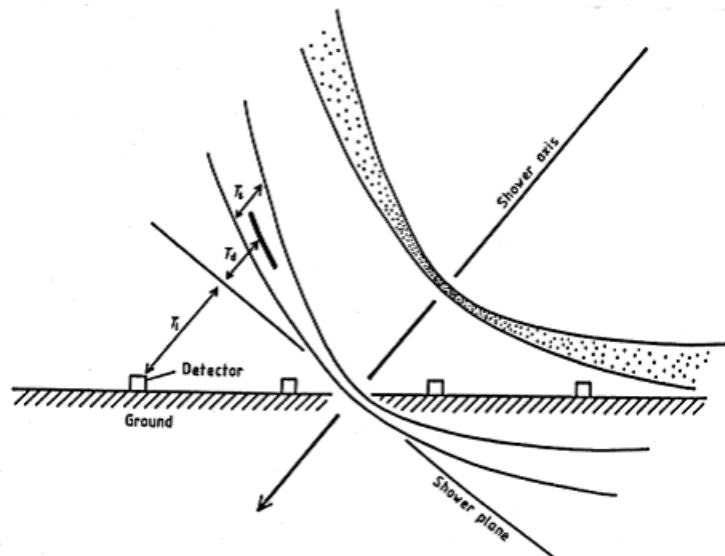


図 2.8 地表付近の空気シャワー断面の概念図

## 2.7.2 大気蛍光望遠鏡

大気蛍光望遠鏡では空気シャワー粒子が大気中の分子を励起し、この励起分子が基底状態に戻る際に蛍光する光を検出する装置である。80MeV の電子が 1 気圧の大気中を 1m 通過した場合の発光光子数はおよそ 4 個であるが、一次宇宙線が  $10^{20}$  eV の場合、膨大な数のシャワー粒子のため光子数は  $2 \times 10^{15}$  個にもなり発光時間は  $30\mu s$  程度になる。この光を光学望遠鏡で集光し高感度高速の光センサーからなるカメラを使用して撮像することにより、およそ 30km 遠方からでも観測することが出来、宇宙線を捕らえる事ができる体積を大幅に増やすことになる。またこの大気シンチレーション光の放射は等方的であるため一次宇宙線の方向によらず観測を行う事が出来る。

大気蛍光望遠鏡による一次宇宙線の種類の推定は、空気シャワー軸の再構成、空気シャワーの縦方向発達の再構成で行われる。空気シャワー軸の再構成は、蛍光の軌跡から簡単に求めることが出来る。特に遠く離れた 2 台の望遠鏡から同じ空気シャワーが観測された場合、視差からより精度良くシャワー軸を決定することが出来る。

空気シャワーの縦方向発達は、

1. 各光電子増倍管で得たシグナルから入射した光子数を見積もる。
2. 空気シャワー中の電子 1 つから光電子増倍管に到達する光子数の期待値を、電子の空間的な位置、大気による散乱・吸収、装置の検出効率などから算出する。

これらの情報から、空気シャワーの各点での電子数を見積もり、式 (2.15) と比較することでシャワー発達関数  $N_e(X)$  を求める。空気シャワーが地表に到達するまでに失うエネルギーの 90% 以上はシャワー中の電離損失によるものであるので、観測されたシャワー発達関数  $N_e(X)$  から

次のように一次宇宙線のエネルギー  $E$  が決まる。

$$E = \frac{\epsilon_0}{X_{\text{rad}}} \int N_e(X) dX \quad (2.19)$$

ここで  $X_{\text{rad}}$  は大気中での輻射長で  $38.0\text{g}/\text{cm}^2$ 、 $\epsilon_0$  は大気に対する臨界エネルギーで 74MeV である。

大気蛍光望遠鏡による観測ではシャワーの縦方向発達の様子を観測でき、一次宇宙線のエネルギー決定ではモンテカルロ計算に依存することなく決定することが出来る。ただし、この方法でエネルギーを決定するためには大気中での発光効率や散乱・吸収効果、鏡の反射率やフィルターの吸収率、光電子増倍管の量子効率などすべて積み上げていく必要があり、積算およびその系統誤差を正しく管理する必要がある。



## 3 テレスコープアレイ実験

### 3.1 テレスコープアレイ実験の概要

テレスコープアレイ (Telescope Array:TA) 実験は、507 台の地表粒子検出器 (Surface Detector:SD) と 3 箇所の大気蛍光望遠鏡 (Fluorescence Detector:FD) を用いて  $10^{20}$ eV 付近の超高エネルギー宇宙線の観測を行う実験である。以前行われていた超高エネルギー宇宙線観測実験 AGASA 型の地表粒子検出器と HiRes 型の大気蛍光望遠鏡の両方の検出器を使って同一のイベントを観測できるのが特徴である。設置場所は米国ユタ州のソルトレイクシティから南西の北緯 39 度、西経 113 度、平均標高 1400m の砂漠地帯である。この場所は晴天率が高く湿度も低いいため大気蛍光望遠鏡の観測に都合が良い。また 500 台以上の地表粒子検出器を設置することが出来る広大な盆地状になっており、検出器や施設を結ぶ長距離無線にも都合が良い場所となっている。

実験サイトと実験設備の配置を図 3.1 に示す。地表粒子検出器は 1.2km 間隔に碁盤の目状に 507 台配置されている。それを囲むように大気蛍光望遠鏡が 3 台、視野をサイト中央に向けて設置されている。各望遠鏡ステーションから等距離の位置には Central Laser Facility (CLF)、Black Rock Mesa (BRM) FD ステーションでは Light Detection And Ranging (LIDAR) を設置し、大気透明度を測定している。Black Rock Mesa FD ステーションから 100m 離れた場所に線形加速器を設置し、大気蛍光望遠鏡の絶対エネルギー較正を行う予定である。また実験サイト内の丘の上に 3 つの通信塔を設置し、地表粒子検出器と通信塔、通信塔間、通信塔とステーション間で無線通信を実現している。特に地表粒子検出器では、空気シャワーイベント取得に無線通信は非常に重要な機能となっている。

テレスコープアレイ実験は地表粒子検出器と大気蛍光望遠鏡の両検出器で同時観測を行うことで地表粒子検出器と大気蛍光望遠鏡の系統誤差の見積もりを行えるだけでなく、お互いの利点を活かす事により高い精度でエネルギーや到来方向を決めることが出来る。観測の概念図を図 3.3 に示す。

### 3.2 地表粒子検出器

#### 3.2.1 地表粒子検出器の構成

テレスコープアレイ実験では、図 3.4 と図 3.5 で示したような地表粒子検出器 (以下、SD) を、現在 507 台サイトに設置している。1 台の SD は、大きく分けて宇宙線を検出するシンチレーターボックス、通信塔と通信するためのアンテナ、自立して稼動するため

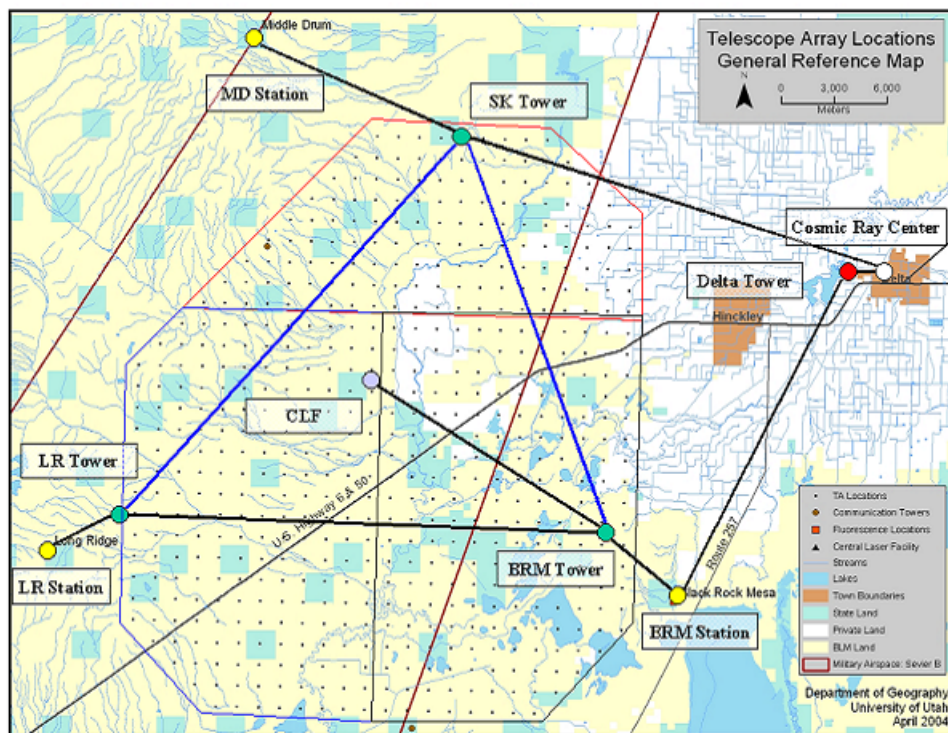


図 3.1 テレスコープアレイ実験のサイト全体図。各施設間は無線 LAN ネットワークが構築されており図中青が地表粒子検出器データ収集用ネットワーク、黒がそれ以外の一般ネットワークとなっている。長距離ネットワーク用機器として、Motorola 社の Canopy PMP 100 を使用している (図 3.2)。地表粒子検出器の詳細は図 3.30 に示した。

のソーラーパネルとバッテリー、各構成要素を制御するエレクトロニクスで構成されている。

シンチレーターボックスには、宇宙線を直接検出するため  $3\text{m}^2$  の面積で  $1.2\text{cm}$  厚のプラスチックシンチレーター (シーアイ工業製) が 2 層、信号を検出する光電子増倍管 (PMT:Electron Tubes 社製 9124B) が上層用、下層用に 1 つずつ、リニアリティ測定用の LED が各層 2 つずつ、ボックス内の状態を知るための温度計・湿度計が設置されている。プラスチックシンチレーターが発する光を効率よく集めるため、シンチレーターに  $20\text{mm}$  毎にある溝に波長変換ファイバー (WLSF:Kuraray 社製) が張られ、また反射率が  $90\%$  ほどのタイベックシートでシンチレーターが層ごとに覆われている。[図 3.6]。また各層で発生した光が交わらぬようタイベックシートで覆われた上下層の間には  $1\text{mm}$  厚のステンレス製の板が設置されている。上下層の信号を分離し上下層コンシデンスを取るこ



図 3.2 テレスコープアレイ実験では、長距離無線ネットワークの構築に Motorola 社の Canopy PMP 100 を使用している。各タワーに複数の Canopy が設置されているが、周波数を変え Canopy 間の間隔を広げることで干渉を防ぐようにしている。

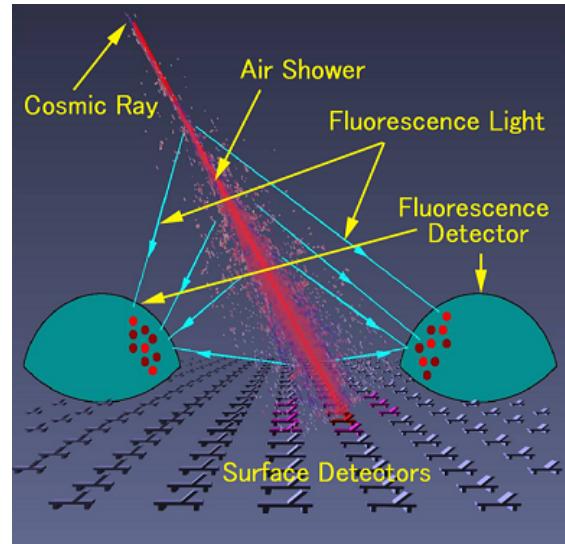


図 3.3 地表粒子検出器と大気蛍光望遠鏡による高エネルギー宇宙線の検出の概略図

とで環境ガンマや PMT のダークカレント等のノイズを分離することが出来、S/N 比の高いデータを取得することが出来る [図 3.7]。シンチレーターで発生した光は波長変換ファイバーによって光電子増倍管に伝わる。ファイバーと光電子増倍管の間には光学グリスが塗ってある。光電子増倍管はパワーベース (Electron Tubes 社製 PS1806/12F) に接続されて高電圧を得て光信号を電気信号に変換する。この電気信号がエレクトロニクスに送られ、後述するある条件以上のものを記録するようになっている。各層 2 つずつ設置された LED はリニアリティ測定のために使用され、温度計・湿度計はシンチボックスの真ん中の支柱に取り付けられている。またシンチレーターボックスに直接日光が当たらぬよう屋根 1.4mm 厚の鉄製の板がつけられており急激な温度変化を避けている。

各 SD は最大出力 120W のソーラーパネル (京セラ社製 KC120J。または KC125TJ) と、12V,100Ah のバッテリー (C&D Technologies DCS-100L) を持ち外部からの電源供給なしに独立して動作する。また指向性アンテナ (ADTEC ADAF2414。もしくは ADTEC ADAP2424)<sup>\*2</sup>を持ち通信塔 [図 3.8] と 2.4GHz 帯の無線通信を行う。

<sup>\*2</sup> 通信塔との距離や位置によって 2 種類を使い分けている。前者が平面アンテナ、後者はパラボラアンテナである。





図 3.4 サイトに設置された SD の概観



図 3.5 ソーラーパネルの下の箱にはエレクトロニクスとバッテリーが格納されている。L字型の上蓋を開けた状態。

ソーラーパネルの下にはエレクトロニクスとバッテリーを含んだ市販のクーラーボックスがステンレスボックスの中に設置されている。バッテリーは温度により充放電性能が大きく変わってしまうため温度変化を和らげるためクーラーボックス内にある。また、フィルムヒーターがバッテリーに用意されており冬季に必要なに応じてバッテリーを暖めて充放電機能を維持することが出来る。

SD で使われているエレクトロニクスを図 3.9 に示す。このエレクトロニクスは、充放電をコントロールするチャージコントローラー、通信塔と交信する無線 LAN モジュール、20ns 以下の精度で他の SD と同期をとるための GPS モジュール (Motorola 社製 M12+ Timing Oncore Receiver)、PMT からのシグナルをフラッシュ ADC (FADC) でデジタル化しその後の処理を行い、またエレクトロニクス全体をコントロールする FPGA や CPU が配置されているメインボードで構成されている。

### 3.3 地表粒子検出器の較正とモニター

各 SD は、デルタ市にある Cosmic Ray Center で組み立てられた時やサイトに設置される直前、サイトに設置後と宇宙線を用いて性能評価が行われた。シンチレーター中での粒子のエネルギー損失が最小となるエネルギーは粒子によって異なるが、地表に到来す

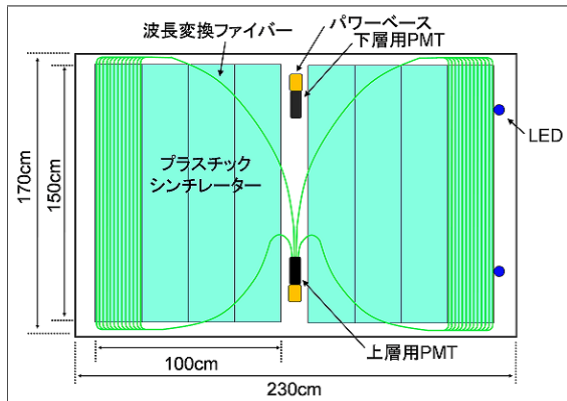


図 3.6 シンチレーターボックスの内部構造。簡略化のためファイバーは上層分の一部だけ表示している。

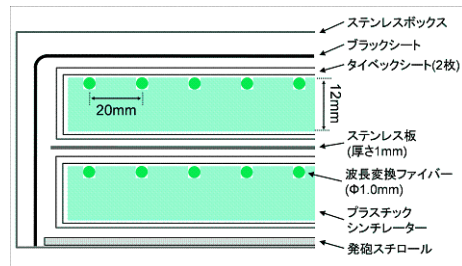


図 3.7 シンチレーターボックスの断面図。発生した光を出るだけ集めるようシンチレーターはタイベックシートで覆われている。

る宇宙線は主にミュオンであり様々なエネルギーを持つので、これを平均した形での 1MIP<sup>\*3</sup>を測定することで SD を較正することが出来る。

図 3.11 にサイト設置後のモニター情報から得た 1MIP ヒストグラム<sup>\*4</sup>とペDESTALヒストグラムを示す。ミュオンによるエネルギー損失、すなわち 1MIP は一定であるため、1MIP を使うことで各検出器の応答を一様に扱うことができる。SD では、1MIP で FADC の積分値が 45 カウントになるよう PMT のゲインが調整されている。サイトに設置された SD のうち 488 台のゲイン調整の結果を図 3.12 に示す。

SD はおよそ 30km×30km の広大な土地に 1.2km 間隔に設置されており、個々にアクセスし状態を知ることは現実的ではない。そのため稼動に必要なバッテリーやソーラーパネル、適切なデータ収集のために必要なシグナルや GPS の状態を常にモニターデータとして取得する事が重要である。SD のモニターデータは、毎秒トリガー情報とともにタワー PC に送信されている<sup>\*5</sup>。SD から取得するモニターデータには毎秒取得する情報と、1 分毎の環境データ、ヒストグラムなど 10 分間取得したデータを 10 分間かけて受信するものに大きく分かれる。毎秒取得するデータは、クロック数、トリガーレート、GPS 時

<sup>\*3</sup> 図 3.10 に物質中での粒子のエネルギー損失の分布を示す。物質中でのエネルギー損失量にはある下限が存在し、この時の粒子を最小電離粒子 (Minimum Ionizing Particle: MIP) と呼ぶ。Cosmic Ray Center での組み立て時に測定された 250 台の SD の試験によると、1MIP 時の光電子数は  $24.6 \pm 0.4$  である [16]。

<sup>\*4</sup> Level-0 トリガーがかかったときに、シグナル側のヒストグラムデータが取得される。ただし、積分時間は 240ns 分である。level-0 トリガーやペDESTALについては 4.1.1 節で詳しく述べる。

<sup>\*5</sup> トリガーやモニター情報の送受信の詳細については 4.1 節で説明する。



図 3.8 Black Rock Mesa の通信塔。サイト内に設置されている 3 基の通信塔のうちの 1 基。写真上部のボックスにタワーエレクトロニクスが取り付けられている。タワーエレクトロニクスが SD と通信を行うために使用しているアンテナは方位角に対して無指向性のコリニアアンテナ (COMET 社製 GP-D2422-3) を使用している。タワー PC はソーラーパネル裏のボックスの中に設置されタワーエレクトロニクスと TCP/IP と一部シリアルケーブルを用いて通信を行う。通信塔にあるタワーエレクトロニクスが SD と交信し空気シャワーイベントを取得する。通信塔は通信塔同士、あるいは FD ステーションやデルタ市と無線 LAN 通信を行いテレスコープアレイ実験全体のネットワークを構築している。

刻情報である。これらは SD が安定に動いているかを示す一番簡単なモニターのため秒毎に取得するようにしている。また 10 分毎に 10 分かけてデータを取得するモニター情報は主に以下である。

- 10 分統計の 1MIP ヒストグラム
- 10 分統計のペDESTALヒストグラム
- 10 分統計のシグナル電圧のリニアリティヒストグラム
- 10 分統計のシグナル電荷量のリニアリティヒストグラム
- 1 分毎のバッテリーの充電電圧・電流
- 1 分毎のソーラーパネルの充電電圧・電流
- 1 分毎の各種温度・湿度
- GPS の状態<sup>\*6</sup>
- Level-1 トリガーレート (4.1.1 節参照)

<sup>\*6</sup> GPS が検出している衛星数、アンテナの状態を指す。

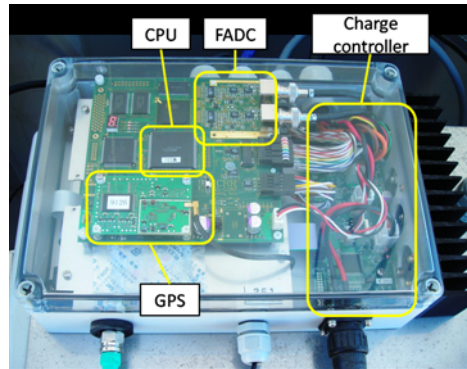


図 3.9 SD エレクトロニクス。各 SD とタワーにこのエレクトロニクスが設置されている。無線 LAN モジュールは、メインボードの下段に収納されている。

現地で作業をするときは、これらのモニター情報を確認し、不具合があれば現地に行きメンテナンスを行っている。この時に参考にするモニターデータの一部を図 3.13 に示す。

### 3.4 大気蛍光望遠鏡

大気蛍光望遠鏡 (以下、FD) は空気シャワーによるシンチレーション光を球面鏡で集光させ、PMT を用いたカメラで撮像して観測を行う検出器である。テレスコープアレイ実験には SD アレイを囲むよう 3 箇所に FD が設置されている。Black Rock Mesa(BRM) サイト、Long Ridge(LR) サイトには望遠鏡システム (図 3.14) をテレスコープアレイ実験のために新規に建設し、Middle Drum(MD) サイトには HiRes で使用されていたシステム (図 3.15) が移築されて稼働している。

Black Rock Mesa、Long Ridge ステーションはカメラが上下 2 段 6 セット並んでおり視野は方位角 108 度、仰角 3 ~ 34 度をカバーしている。望遠鏡に使われる球面鏡は、六角形の形をしたセグメントミラー 18 枚からなる口径 3.3m の合成鏡である。合成鏡の中央部はセグメントミラーが配置されておらず、そこには PMT 較正のために Xenon flasher のシステムが取り付けられている (図 3.16)。

カメラは光電子増倍管 (PMT:浜松ホトニクス社製 R9508) を 16×16 のアレイ状に 256 本並べ、球面鏡の焦点部分に設置されている。大気が発生するシンチレーション光の波長域が主に 300nm~400nm であるため、各 PMT の光電面上にはこれ以外の波長域の光をカットするための BG3 フィルタ (Scotto 社製) が被されている (図 3.19)。埃や砂への対策としてカメラ前面には紫外透過パラグラスが取り付けられ箱に収納されている (図 3.18)。また、各カメラは隣接するカメラと境界領域で視野を共有するよう PMT1 本分視

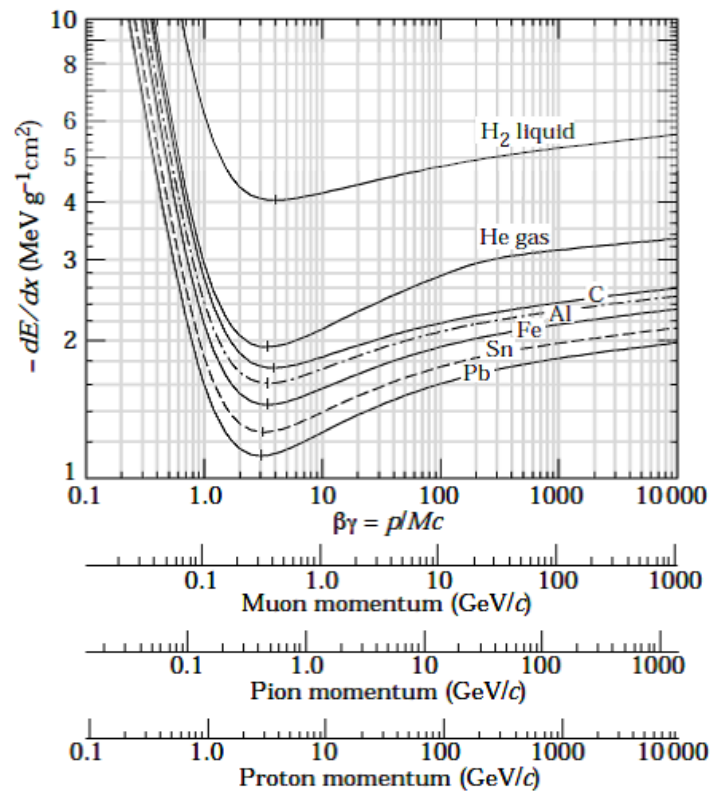


図 3.10 物質内における平均エネルギー損失分布

野が重なるよう設置されている。

### 3.5 大気蛍光望遠鏡の較正

大気蛍光法による空気シャワー観測では、大気蛍光を用いて空気シャワーの縦方向発達を観測することで一次粒子の情報を得るために、光子数の高精度な測定、および大気の状態の把握が重要になる。そこで以下のような PMT のゲイン測定、大気透明度の較正、線形加速器を用いたエネルギーの絶対較正を行う。

#### 3.5.1 PMT のゲイン較正

FD 用の PMT 較正は、1 カメラあたり 3 本の PMT を CRAYS を用いて絶対較正しておき、その時間変動を YAP で追い、Xe フラッシャーで他の PMT を相対的に較正する方法で行っている。



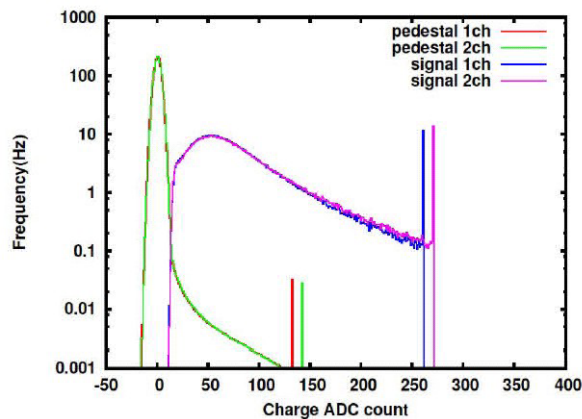


図 3.11 ある SD のモニター情報から得た 1MIP ヒストグラムとペデスタルヒストグラム。緑色と赤色のヒストグラムがそれぞれ上層と下層のペデスタルヒストグラムである。また、青色と紫色のヒストグラムがそれぞれ上層と下層の 1MIP ヒストグラムである。それぞれのヒストグラムの最も右側のエントリーは over flow を示す。積分幅は 240ns。1MIP ヒストグラムではペデスタル分はすでに引いてあり、1MIP のピークが 45 カウント程度になるようゲインが調整される。

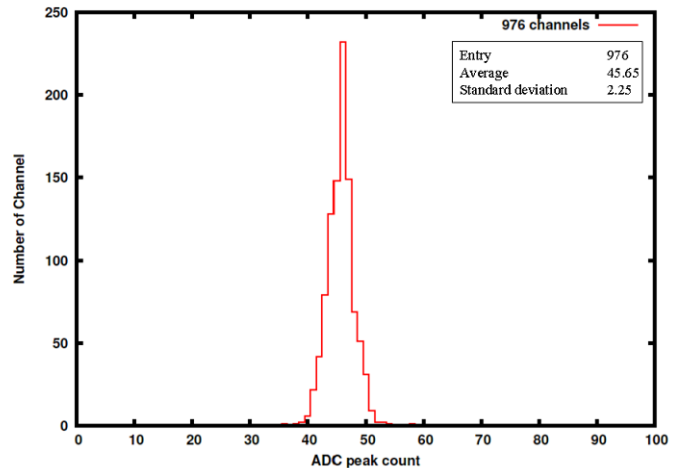


図 3.12 488 台の SD のゲイン調整後の 1MIP のピークのカウンターのヒストグラム。1MIP が 45 カウントになるよう調整されている。

CRAYS FD 用の基準 PMT は CRAYS(Calibration using RAYleigh Scattering) を用いて絶対較正を行う。N<sub>2</sub> レーザー (337.1nm) の Rayleigh 散乱光を光源に使用している。レーザーの出力と Rayleigh 散乱断面積から PMT への入射光子数を計算し、基準 PMT の QE×CE (量子効率、収集効率) を求めることが出来る。

YAP 基準 PMT の光電面の中心に取り付け、観測中の絶対光量モニターに用いる。YAP は YAlO<sub>3</sub>:Ce+<sup>241</sup>Amα 線源をシンチレーターに入射しこれを光源とする。これを光源にする事により観測中など、CRAYS 較正後の絶対較正を追う。

Xe flasher FD の合成鏡の中心部に取り付けられ、PMT のゲイン調整、モニターを行う。Xenon 光源を用いてカメラ全体を照射し、PMT の印加電圧を調整し基準 PMT と他の PMT の出力を等しくする。

XY-scanner 一般に PMT 表面の場所ごとに光に対する感度が違う。XY-scanner では、紫外 LED のスポット光をカメラ面に 4mm 間隔で走査することによりカメラの 2

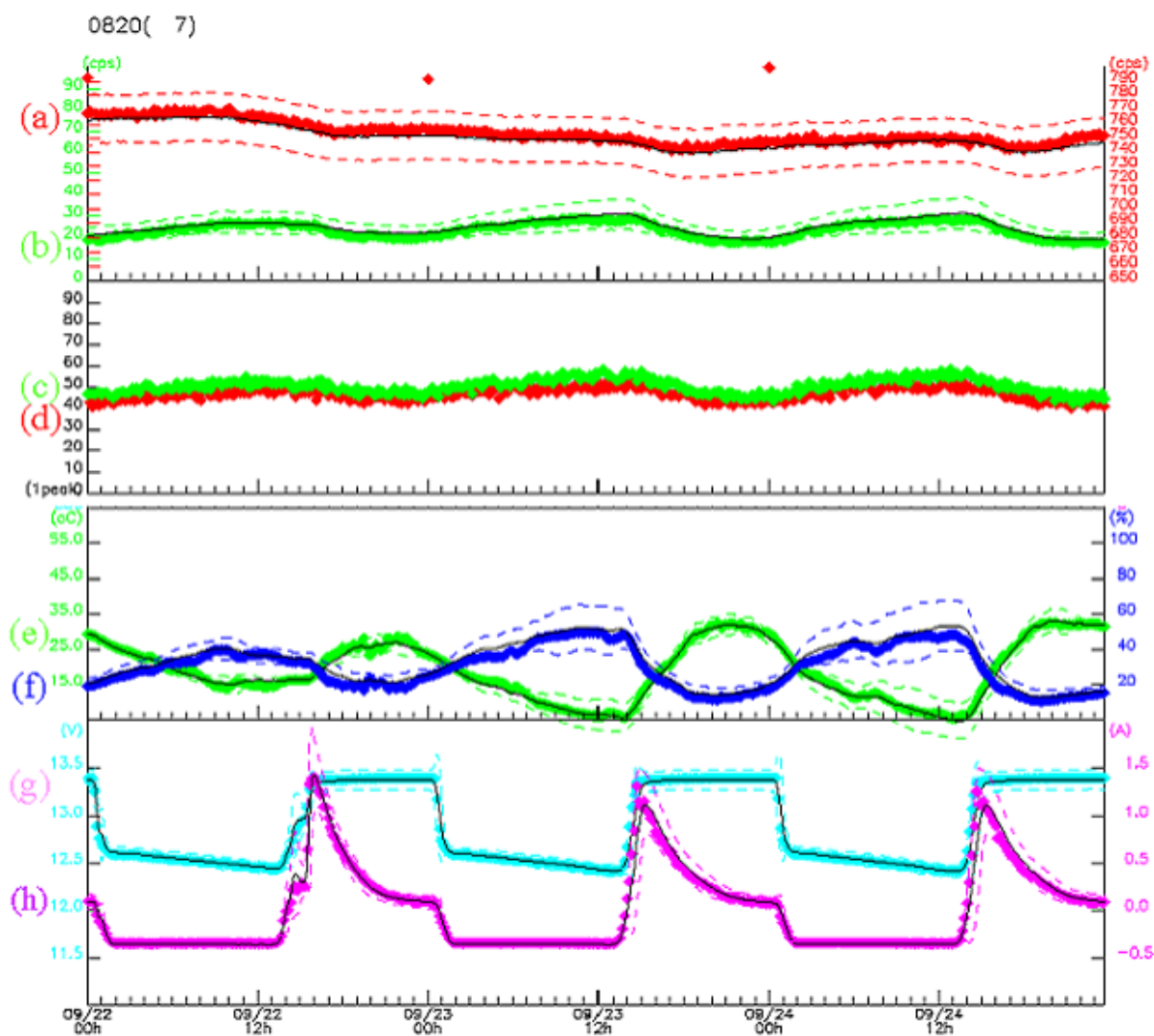


図 3.13 2008/9/22 から 2008/9/25 までの SD#0820 のモニターデータの一部。  
 (a)Level-0 トリガーレート、(b)Level-1 トリガーレート、(c)(d)1MIP カウント、  
 (e) 温度、(f) 湿度、(g) バッテリー電圧、(h) バッテリー充電電流を示す。破線は  
 95% の SD が入る範囲を示している。トリガーの種類については 4.1 章で述べる。

次元不均一性の測定を行った。

現在 CRAYS と XY-scanner は設置前、あるいは設置後に 1 度測定したデータを用いている。YAP、Xe flasher は観測中約 1 時間毎に測定し主に温度変化による時間変動を追い、精度のよいデータを得るようにしている。



図 3.14 BRM,LR 型の FD ステーション。観測期間外では PMT カメラ保護のためシャッターが閉められている。1 ステーションに上下 2 段 6 セットの 12 台の望遠鏡システムが構築されている。



図 3.15 MD の FD ステーション。こちらには 14 台の望遠鏡システムが構築されているが、1 階建ての建物に集約されている。

### 3.5.2 大気透明度の較正

高エネルギー宇宙線が大気蛍光を起こした後、FD で観測するまでの伝播を理解しておくことは非常に重要であり、テレスコープアレイ実験では Central Laser Facility(CLF)、Light Detection And Ranging(LIDAR) システム、および雲モニターを用いて大気の大気透明度の状態を計測している。

**CLR** CLF はサイト中心の各 FD ステーションから等距離の位置に設置され、垂直に打ち上げた YAG レーザー (波長 355nm) の側方散乱を各 FD ステーションで観測し大気透明度を測定する。

**LIDAR** LIDAR は現在 BRM FD ステーションから 100m 離れたところに設置されており YAG レーザー (波長 355nm) を空に打ち、後方散乱を LIDAR 観測専用の反射型望遠鏡を用いて集光し観測することにより大気の状態を測定する。

**雲モニター** 雲が空にかかっていると空気シャワーの伝播に大きな影響を及ぼす。そのため BRM FD ステーションでは赤外線カメラを使用して上空の雲の位置を測定している。



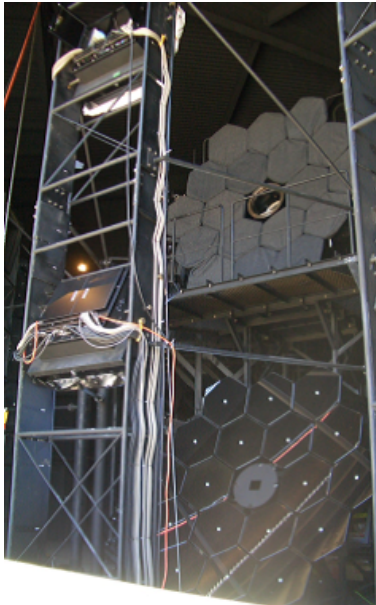


図 3.16 BRM,LR ステーション内の望遠鏡

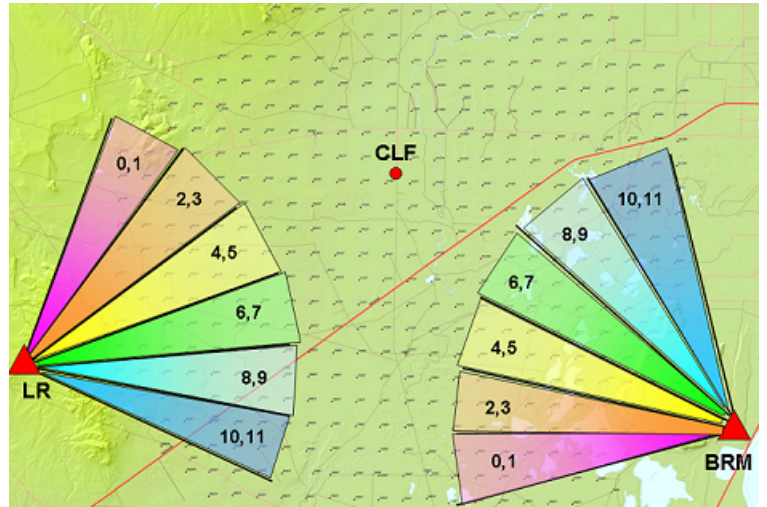


図 3.17 BRM,LR ステーションの見る視野方向。偶数カメラは上方奇数カメラは下方の空を見ている。



図 3.18 256 本の PMT で構成されているカメラ。

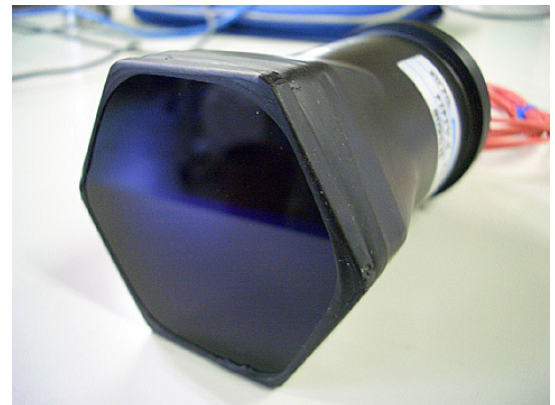


図 3.19 PMT の表面に取り付けられた BG3 フィルタ

### 3.5.3 エネルギーの絶対較正

FD のエネルギー決定の系統誤差には主に大気蛍光の発光量、大気透明度、PMT が寄与する。テレスコープアレイ実験ではそれぞれの要素のキャリブレーションを行ってそれを積算する方法だけでなく、望遠鏡全体を一括して絶対較正をするために小型電子線形加速器 (LINAC) を使用する。LINAC は FD ステーションから 100m 離れたところに設

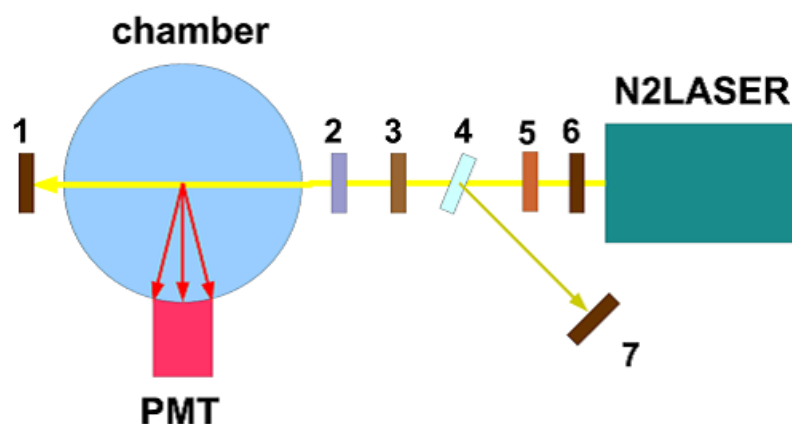


図 3.20 CRAYS のセットアップ。N<sub>2</sub> で満たされた空間で Rayleigh 散乱が起き入射光に対し 90 度の位置に設置した PMT で受光し、較正を行う。構成は、1:Si プロブ、2:波長板、3:偏向板、4:ND フィルター、5:シャッター、6:絞り、7:焦点型エネルギープロブである。

置・運用される予定である。そこから垂直に 10~40MeV の既知のエネルギー・電子数をもった電子ビームを空に打ち上げ、超高エネルギー宇宙線の空気シャワーを擬似的に再現し FD で観測する。LINAC の概略図を図 3.23 に示す。この方法で、FD をまとめて較正することが出来、系統誤差を小さく抑えることが出来ると考えている。

現在、設計・製作・ビーム試験は終了しており、ユタに輸送するための準備が高エネルギー加速器研究機構 (KEK) で進行中である。

### 3.6 大気蛍光望遠鏡のデータ収集システム

FD のデータ収集エレクトロニクスは VME を利用する Signal Digitizer and Finder(SDF) ボード (図 3.24)、Track Finder(TF) ボード (図 3.25)、Central Trigger Distributor(CTD) ボード (図 3.26) の 3 種類で構成されている。

PMT で電気信号に変わったシグナルは、プリアンプに入りその後 SDF に入力される。SDF では、増幅されたアナログ信号を FADC でデジタル変換を行い、シグナルの有無を判断し PMT 毎のファーストレベルトリガーを行い結果を TF に渡す。SDF は 1 ボードあたり 16 チャンネル持っており 1 カメラあたり 16 枚の SDF を使用している。

TF は、SDF からのトリガー情報を元にセカンドレベルトリガーとして軌跡の判定を行い、その結果を CTD に渡す。TF は 1 カメラに 1 枚ずつ設置されている。



図 3.21 LIDAR システム。  
中央の反射型望遠鏡が後方  
散乱光を中央に設置してある  
PMT に集光する。



図 3.22 LIDAR ドームの概  
観。観測時にドームが開き  
1Hz でレーザーを打ち大気  
の状態を測定する。

CTD は各ステーションに 1 枚設置されており TF からのセカンドレベルトリガーから判断し、ファイナルトリガーを出す。このファイナルトリガーにより Waveform などイベント情報が記録される。また、CTD は GPS 使って正確な時間を知ることが出来、また全エレクトロニクスに対するクロックを供給する役目をもつ。

FD のデータ収集系の全体の概略を図 3.27 に示す。

### 3.7 テレスコープアレイ実験の現状

テレスコープアレイ実験は、2007 年 6 月から Black Rock Mesa FD ステーション、Long Ridge FD ステーションで観測が始まり、2007 年 11 月から Middle Drum FD ステーションも加わり、全 3 ステーションで観測が開始された。2008 年 9 月までには BRM FD は 860 時間、LR FD は 760 時間定常的に観測を行っている (図 3.28、図 3.29)。

現在、FD の 1 回の観測において以下のモニターデータを取得している。

- 約 1 時間毎に YAP と Xe flasher による PMT モニター
- 観測の前後での LIDAR による大気モニター
- 1 時間毎の IR カメラによる雲モニター



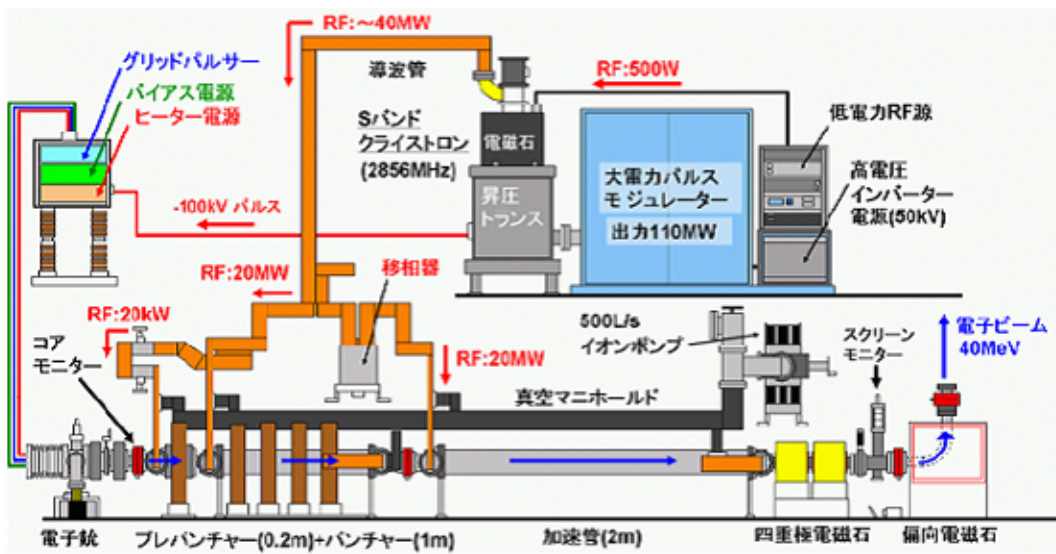


図 3.23 LINAC の概略図

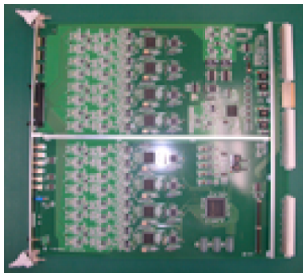


図 3.24 SDF ボード

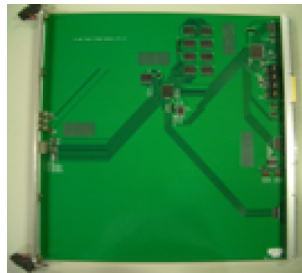


図 3.25 TF ボード

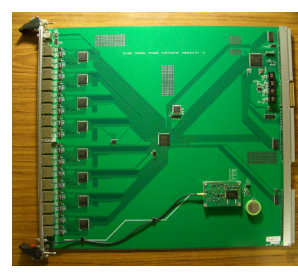


図 3.26 CTD ボード

- 数度の CLF による大気モニター

CLF による大気モニターはまだ定常的には取得が行われておらず、2009 年の 1 月頃から定常モニターとして加わる予定である。

現在、FD ではキャリブレーションのデータが解析プログラムに反映されつつあり、2009 年 7 月の宇宙線国際会議 (ICRC) での発表に向けて準備を整えている。

また、SD は図 3.30 のように 3 つの領域に分かれ各領域毎に 1 つの通信塔を設置して SD のデータ収集を行う。ただし、表 3.1 の SD は地形の影響で設置されている領域の通信塔と交信することが出来ない。そのため、パラボラアンテナを使用し他の通信塔と交信するようにしている。

2007 年 6 月から各通信塔毎約 50 台の SD を用いた観測が始まり、2008 年 4 月から 3

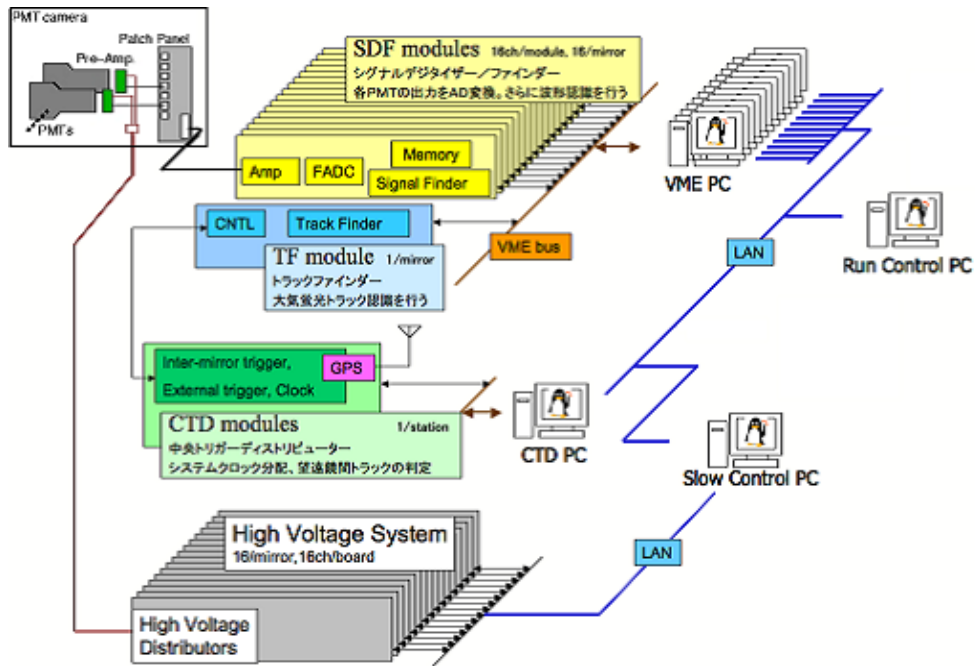


図 3.27 FD のデータ収集系概略。この LAN ネットワークは LIDAR や CLF などにも接続されている。

つの領域ごとに独立に全 SD を用いた観測が始まっている。3 領域独立に動作していた時の空気シャワーの例を図 3.31 に表示する。春から夏にかけて、SD の通信状況や電源系の改善のためにデータ収集を止めている時間が全期間の約 5% 程度発生したが、それを除くとほぼ 100% の稼働率で安定してデータ収集を行う事が出来ている (図 3.32)。

| SD     | 設置されている領域 | 交信する通信塔 |
|--------|-----------|---------|
| # 0418 | LR        | SK      |
| # 2105 | BRM       | SK      |
| # 2206 | BRM       | LR      |
| # 2412 | BRM       | SK      |

表 3.1 設置されている領域と交信する通信塔が違う SD。これらの SD は、地形の影響で設置されている領域の通信塔と交信できないため他の通信塔と交信している。そのため、これらの SD はシャワートリガー判定の隣接 3 つになり得ないためトリガー条件を満たすことはない。新しいデータ収集システムの稼働後は 1 つのシステムとして稼働しているため、この SD 付近でトリガーがかかった時に、その時刻でこの SD の波形情報収集も行うことが出来るようになった。



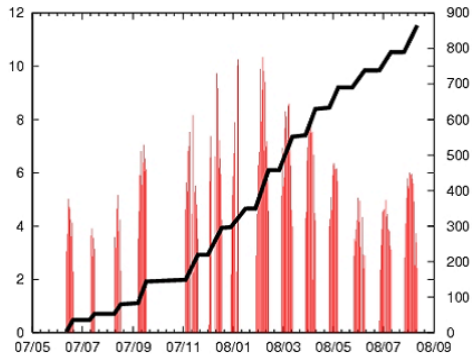


図 3.28 BRM FD の日別観測時間と累計観測時間

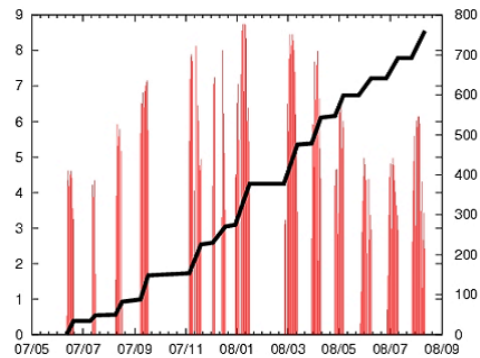


図 3.29 LR FD の日別観測時間と累計観測時間。両ステーションで観測が出来ない日は LIDAR,IR カメラのある BRM が優先されるため LR の方がやや累計観測時間が短い。

SD 解析グループは、モンテカルロによる空気シャワーや検出器のシミュレーションを構築し実データへの解析を行っている。

また、SD は 3 領域独立にトリガー判定を行いデータ収集を行っていたため、領域にまたがるトリガー判定やイベント取得をすることが出来ていなかった。2008 年 11 月下旬から領域にまたがるトリガー判定やイベントを取得できるデータ収集プログラムが稼動し、現在テレスコープアレイ実験における 507 台すべての SD が一つのシステムとしてデータ収集を行っている。次章では、このデータ収集システムを作成するにあたっての要請やデザインについて、SD データ収集システムの全体像を述べる。

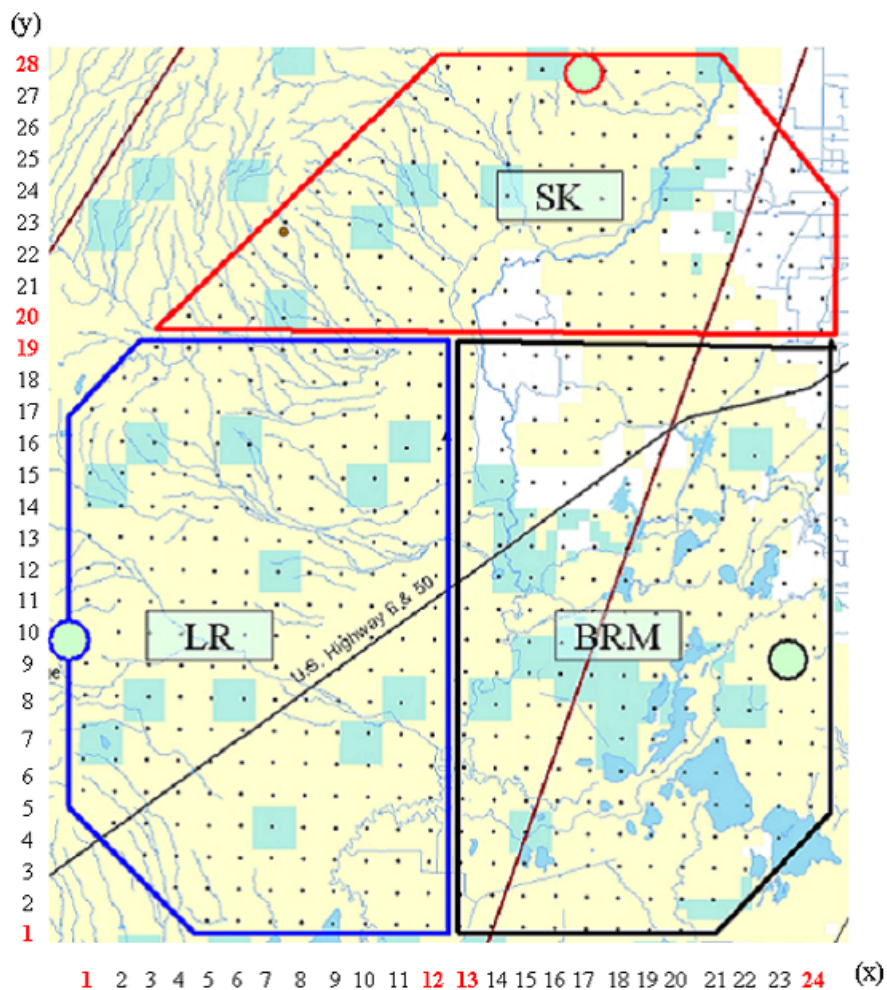


図 3.30 SD のデータ収集システムは 3 つの領域に分かれており、それぞれの領域に 1 つの通信塔 (丸印) が設置されている。領域名はそれぞれ通信塔の名前からつけられており SK 領域 (赤線)、BRM 領域 (黒線)、LR 領域 (青線) と呼ばれる。設置されている SD の台数は順に 107 台、193 台、207 台である。SD 名はアレイの西端を  $x = 1$ 、南端  $y = 1$  をとした座標名で表現する。例えば  $x = 10, y = 15$  の SD は SD#1015 と呼ばれる。SK 領域は  $20 \leq y$ 、BRM 領域は  $13 \leq x$  かつ  $y \leq 19$ 、LR 領域は  $x \leq 12$  かつ  $y \leq 19$  である。

## 4 地表粒子検出器データ収集システムのデザイン

地表粒子検出器 (以下、SD) は 2008 年 3 月から 3 つの領域に対して独立にデータ収集システムが稼動していた。各領域の中心付近に到達した空気シャワーに対しては自領域で

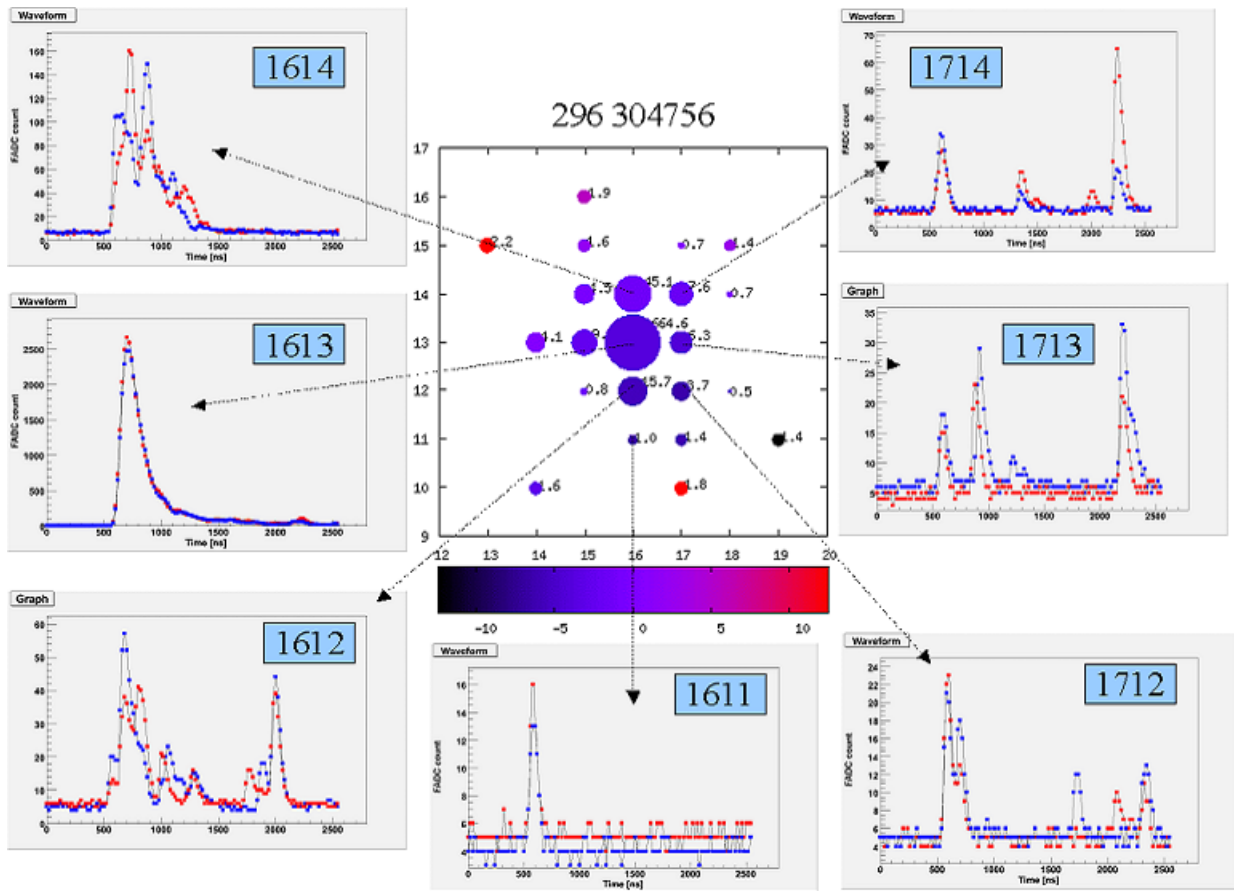


図 3.31 時刻 2008/5/30 UTC 20:34:58 に取得したシャワーイベント。図中央のマップの横軸・縦軸は座標に対応しており、半径は取得した MIP 数 (上下層平均) を  $Q$  として  $\log_{10} Q + \alpha$  となっている。色が各検出器でトリガーした時間帯の差で黒がより早く赤がより遅い時間を表す。単位は  $\mu\text{s}$  である。また取得した波形情報の一部も共に記す。波形情報は赤が上層、青が下層のシグナルを示しており、記録した波形の最初の  $2.56\mu\text{s}$  分を表示している。 $2.56\mu\text{s}$  より長い波形に対しても記録され波形情報収集が行われている。

閉じ必要なデータを取得することが出来ていたが、領域をまたがるイベントに関しては次のような制限があった。

- シャワーサイズが大きければ、両領域でトリガーがそれぞれ独立にかかりデータ収集が行われる。
- サイズが少し小さくなれば、一方の領域だけでトリガーがかかりもう一方の領域ではトリガーがかからずデータが失われる。

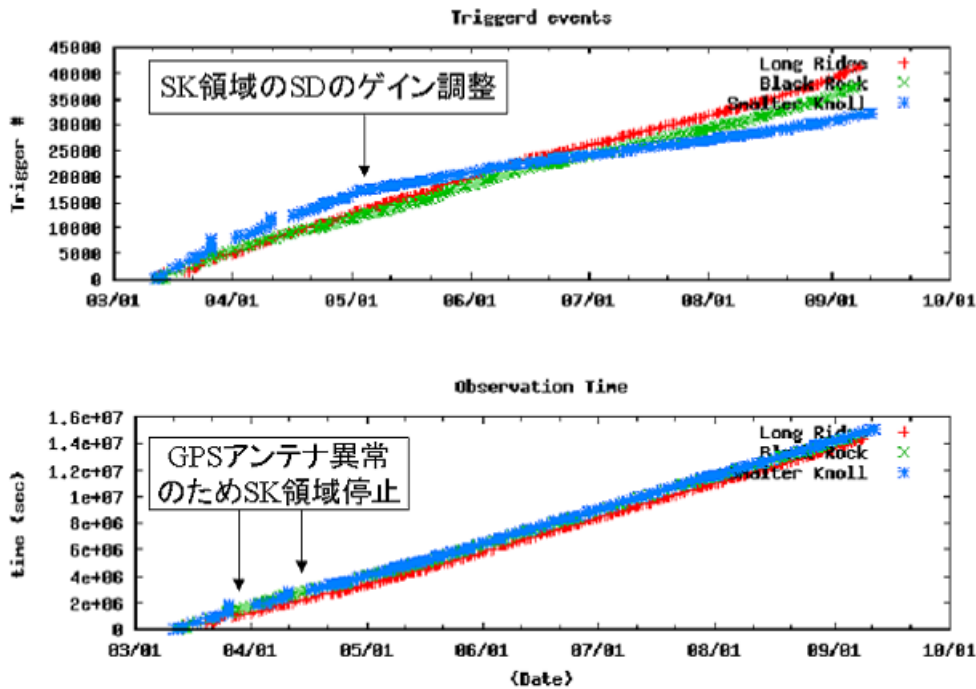


図 3.32 領域ごとの総トリガーイベント数 (上図) と累計観測時間 (下図)。赤が LR, 緑が BR, 青が SK を示す。4月に SK のデータ収集が止まってしまったのはタワーエレクトロニクスの GPS アンテナに異常があったためである。また SK で 5 月 1 日頃に大きくトリガーレートが変化した。これはこの時期に SK 領域の各 SD のゲインを調整し直したためである。

- サイズがさらに小さくなれば、どちらの領域でもトリガーがかからず両領域のデータが失われる。

これは高エネルギーシャワーイベントでは SD は設置されているにも関わらず領域の端でデータ収集欠損がおきてしまい、低エネルギーシャワーイベントでは領域にまたがるトリガーがかからず同じ条件でも場所によりトリガー頻度が変わってしまう事になる。特に低エネルギー側では観測有効体積の計算が複雑になり、エネルギースペクトルを誤ってしまう可能性がある。領域間の境界部分でも、他の場所と同様にトリガー判定を行う事が出来るようになると、トリガー効率において境界の端の効果を受けない SD の台数が境界トリガー導入後に  $46\% \left( \frac{368}{252} = 1.46 \right)$  程度向上することが見込まれる (図 4.1、図 4.2)。また、図 4.3 と図 4.4 から境界領域において、これまでトリガー効率が非常に悪くなっていた  $10^{19}\text{eV}$  より小さい空気シャワーイベントを収集できることが期待される。これは、他

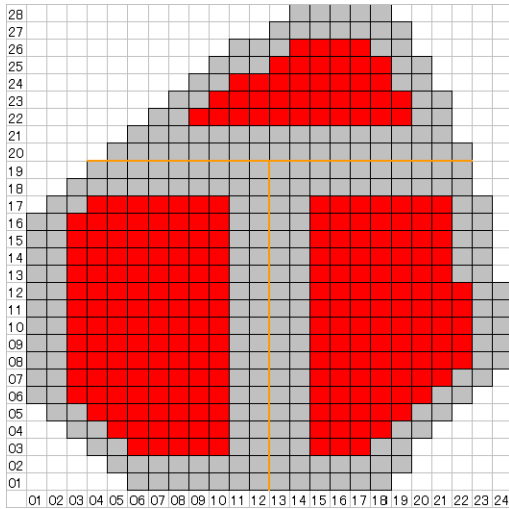


図 4.1 各領域が独立して稼動していた時のトリガー効率が同様だと考えられる SD252 台を赤く示した。領域の端ではトリガー効率が一様ではないため、端の 2 列は同様のトリガー効率ではないと考える。

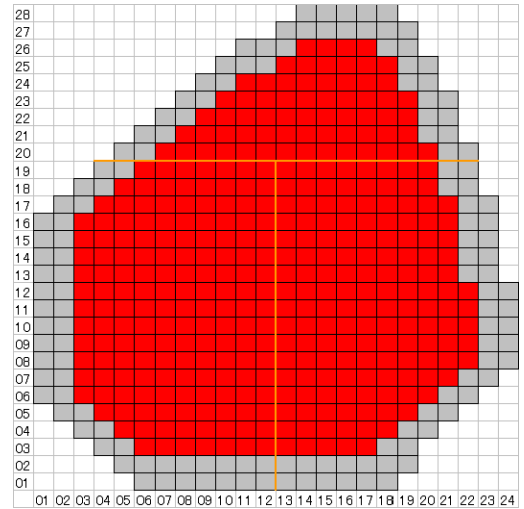


図 4.2 境界トリガーシステムが稼動した後のトリガー効率が同様だと考えられる SD を赤く示した。トリガーシステムの更新でトリガー効率が同様だと考えられる SD が 252 台から 368 台に増える。

の実験のエネルギースケールの比較のためのスペクトルの窪み付近のイベント数を増やすことが出来、到来方向の異方性を知る上でも重要となってくる。このためテレスコープアレイ実験の SD507 台を 1 つのシステムとして動作させる必要があった。

この章では、まず 2008 年春から稼動していた各領域独立したデータ収集システムについて述べた後、境界トリガーシステムのデザインについて述べる。

#### 4.1 地表粒子検出器旧トリガーシステムの概要

旧トリガーシステムは、SD、タワーエレクトロニクス、およびタワー PC で構成されていた。各領域ごとに独立したデータ収集システムとなっており、データ収集システムの構成図を図 4.5 に示す。各 SD は、PMT からのシグナル処理を行い、そのトリガー情報をタワーエレクトロニクスが毎秒回収し、タワーエレクトロニクスでシャワーイベントを探す。タワーエレクトロニクスはシャワーイベントを見つけ出すと各 SD に対して波形データ収集命令を出し波形データ収集を始める。タワー PC はメンテナンス時のタワーエレクトロニクス制御とデータ収集時のストレージとして機能していた。



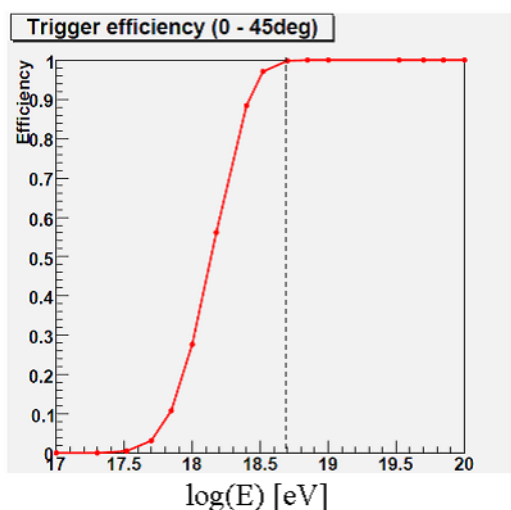


図 4.3 空気シャワーの縦方向発達に Gaisser-Hillas 関数、横方向分布に Linsley が修正した NKG 関数を用いたシミュレーションで一次宇宙線の天頂角を 0~45 度まで変化させた時のトリガー効率 [17]。 $10^{18.7}$ eV 以上でトリガー効率が 100% になる。

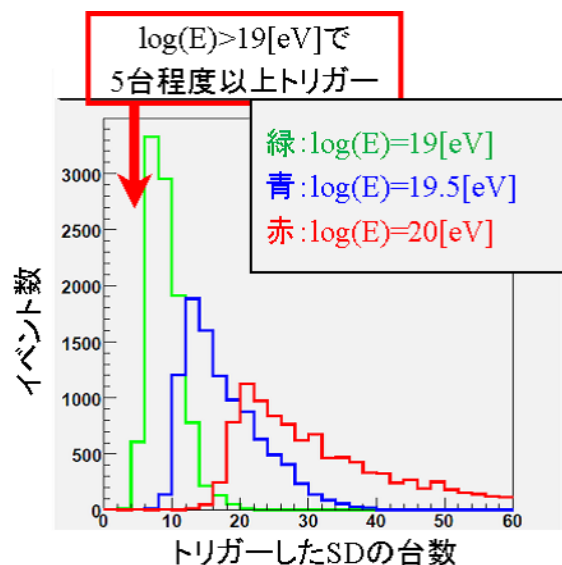


図 4.4 一次宇宙線のエネルギーごとのトリガーがかかる SD の台数の違い [17]。 $10^{19}$ eV で 5 台程度の SD でトリガーがかかる。新しいトリガーシステムでは 3 台から 4 台程度でトリガーがかかるイベントを増やすことが出来る。

#### 4.1.1 地表粒子検出器

SD では、上下 2 層のシンチレーターを持っており、独立した構造になっている。そのため上下層コンシデンスを取ることで PMT のダークカレントを取り除くことが出来る。SD 単体ごとに以下の 2 種類のトリガー判定が行われる。

level-0 トリガー level-0 トリガーとは各 SD エレクトロニクスによる波形データのバッファリングを意味する。FADC でデジタル化した波形データを FPGA を通してトリガー判定を行う。具体的には、各 SD エレクトロニクスが

1. 1pps<sup>\*7</sup>を検知したら 1 秒前のペDESTAL 値を計算する。計算方法は 8bin<sup>\*8</sup>毎に和をとりヒストグラムを書く。その最頻値を 8bin の和のペDESTAL とする。
2. ゲート幅 8bin で入力波形の移動平均をとる。
3. 移動平均からペDESTAL 値を引く。

\*7 GPS が 1 秒毎に出力するシグナル。SD はこのシグナルを用いてタイミングを決定している。

\*8 50MHz の FADC を用いており 1bin は 20ns の時間幅である。

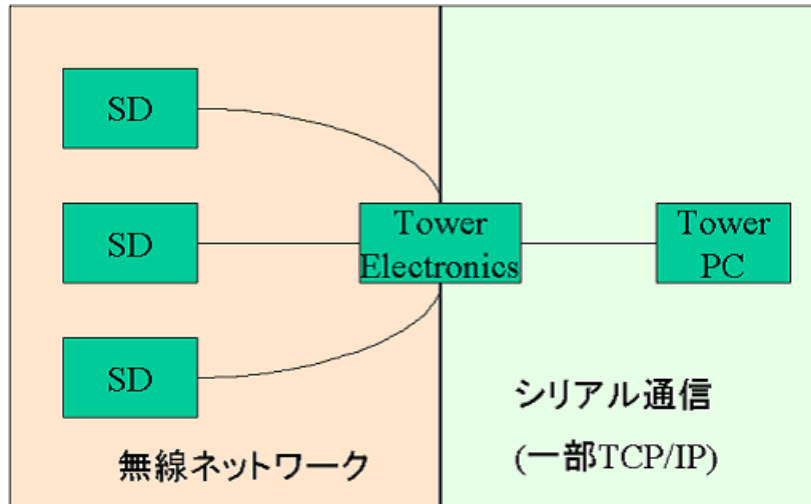


図 4.5 各タワー独立でデータ収集を行っていたときの構成図。タワーエレクトロニクスとタワー PC は各通信塔に設置されている。

4. ペDESTAL減算後の値が上下層ともに 15 カウント (0.3MIP) 以上であれば、波形データ、積分値、エレクトロニクスのクロック数<sup>\*9</sup>をバッファにコピーする。波形データは閾値を超えた部分から 32bin 遡り 128bin(2.56 $\mu$ s) が記録される。

このトリガー条件でのトリガー頻度は、現地で 700Hz 程度である。

level-1 トリガー level-1 トリガーとは、level-0 で記録された積分値が上下層ともに 150 カウント (3MIP 相当) 以上のものを示す。このトリガーにかかったものに対して、積分値情報とトリガータイミング情報が入ったトリガーテーブルと呼ばれるものを生成する。このトリガー頻度は 20~30Hz <sup>\*10</sup>程度である。

このシグナル処理の流れを図 4.6 に示す。level-1 トリガーで生成された各 SD のトリガーテーブルはタワーエレクトロニクスからの要求時に送信される。また、ヘッダーには 24Byte のモニター情報が書かれており (図 4.7)、トリガーテーブル収集と同時にモニター情報を収集する。このためデータ収集に影響を与えることなく定常的にモニターデータを回収することが可能となっている。

<sup>\*9</sup> GPS から 1 秒毎にシグナルが出力される。このシグナルを受け取ってからトリガーがかかった時刻までのクロック数が記録される。次の GPS からシグナルを受け取った際に、秒あたり何クロック時刻がかかったか計算され (Max clock と呼んでいる。)、それをういて実時間が計算される。

<sup>\*10</sup> 屋根で二次粒子が発生するため、宇宙線が入射する傾きがあるためこの程度のレートになる。

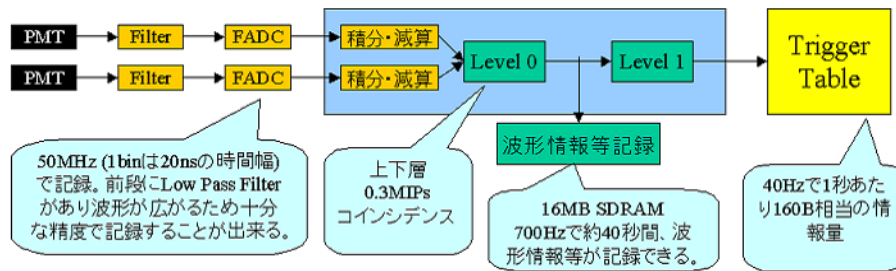


図 4.6 PMT からの信号の処理の流れ。実際は他にも 1 秒前のペDESTAL値計算やモニター情報生成などが行われているが、ここでは信号の流れが見やすいよう省略されている。

タワーエレクトロニクスがシャワーイベント判定を行い (4.1.2 節参照)、シャワーイベントを発見すると各 SD に波形探索命令を送る。SD はトリガー時刻情報を受け取ると、トリガー時刻  $\pm 32\mu\text{s}$  に波形が記録されているか探し、その結果をタワーエレクトロニクスに送信する。波形があった場合にはタワーエレクトロニクスから波形収集命令がやってきて、波形データ、信号の積分値、およびトリガー時間情報 (以下、これらをまとめて波形情報とよぶ。) を送信する。

#### 4.1.2 タワーエレクトロニクス

タワーエレクトロニクスは各通信塔に 1 台設置されている。ハードウェアは SD で用いているエレクトロニクスと同様で、SD とは違った専用のファームウェアで動作している。タワーエレクトロニクスでは、1 秒毎に各 SD からトリガーテーブルを収集し、シャワーイベントを探し出す役割をしている。具体的には以下のようにトリガー (Level-2 トリガー) を探している。

1. 各 SD からトリガーテーブルを収集し積分値情報を座標情報で上書きする。<sup>\*11</sup>
2. トリガーテーブルをトリガー時間情報でソートする。
3. 隣接 3 つ (図 4.8) 以上の SD が  $8\mu\text{s}$  以内で level-1 トリガーを取得しているかの確認
  - (a) トリガーを発見したらトリガー時間情報を各 SD に送りトリガー時刻から  $\pm 32\mu\text{s}$  の時間範囲に対して波形情報を記録しているか探させる。
  - (b) 波形探索の結果、発見した波形数を受け取る。

<sup>\*11</sup> 将来的に波形情報の積分情報を用いたトリガーをかけることも出来るように積分情報も収集しているが、現在は使用されていない。

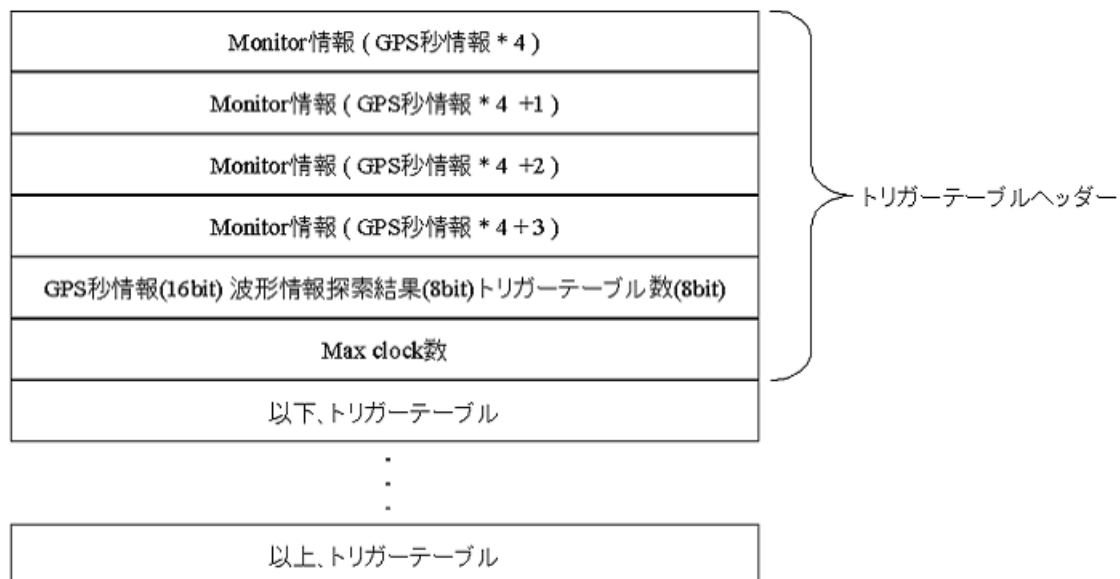


図 4.7 SD からタワーエレクトロニクスに送信するトリガーテーブルのヘッダー。四角形 1 つが 4Byte の情報量を意味している。GPS 秒情報は 0 ~ 599 までの数値が代入されており、1 秒ごとに 1 ずつ増加する。ヘッダーの最初の 16Byte にあたる Monitor 情報には、SD のモニター情報が記録されている 4Byte×2400 個の配列から順番に 4 個ずつ (16Byte ずつ) 代入される。また毎秒回収するモニター情報はヘッダーの 17Byte 目から 24Byte 目までに記録されている。このように SD は、トリガーテーブルのヘッダーにモニター情報を加えタワーエレクトロニクスへ送信する。SD は 2400 個あるモニター情報から 1 秒ごとに 4 個ずつタワーエレクトロニクスへ送信する仕組みであるため、タワーエレクトロニクスが SD のすべてのモニター情報を回収するためには 600 秒必要とする。モニター情報の種類については 3.3 節参照。

(c) タワーエレクトロニクスの CPU 時間が余った時に波形情報を持った SD から波形情報を収集する。

SD とタワーエレクトロニクスの処理の概要を図 4.9 に、詳細を図 4.10 に示す。また図 3.31 はこの方法で取られたイベントである。

#### 4.1.3 タワー PC

タワー PC は各通信塔で 1 つずつ設置されている。各領域が独立に動作していた際は、タワー PC として Technologic System 社の TS-5700 を使用し、OS はカスタマイズされた Linux を使用していた。旧データ収集プログラムでは、タワー PC はタワーエレクト

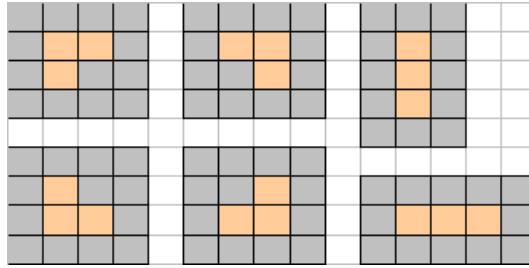


図 4.8 Level-2 トリガー探索で探す隣接 3 台のパターン一覧

|    | トリガー判定 ( $\mu\text{s}$ ) | トリガーテーブル収集 ( $\mu\text{s}$ ) | 合計 ( $\mu\text{s}$ ) |
|----|--------------------------|------------------------------|----------------------|
| BR | 60                       | 714.1                        | 774.1                |
| LR | 83                       | 765.9                        | 848.9                |
| SK | 60                       | 395.9                        | 455.9                |

表 4.1 各領域のタワーエレクトロニクスの CPU 処理時間の目安。実データでかかったトリガー判定時間を使用している。トリガーテーブル収集にかかる時間は、SK 領域で SD の Level-1 トリガーが平均 25Hz 程度の時の処理時間を参考に計算した。1 台の SD からトリガーテーブルを取得するのに 1 回あたり 3.7ms 程必要であった。通信エラーが起こると 1 台あたり 5 回までトリガーテーブルの再取得を試みるため、通信状態によってトリガーテーブル収集にかかる時間が変化する。1 秒の残りの空き時間にトリガーがあれば波形情報収集を行う。また 1 セットの波形情報取得には 1 台あたり 30~40ms 程度の時間がかかっている事が実データからわかっている。なおタワーエレクトロニクスは、SD のトリガーテーブル作成を待つために、トリガー判定が 60ms 以内に終わっても 60ms 経つまで SD からトリガーテーブル収集を始めない。

ロニクスの出力を読み出し記録する役目しか持っていなかった。

#### 4.1.4 地表粒子検出器旧トリガーシステムの考察

旧トリガーシステムでは、自領域内のトリガー判定・波形情報収集を行うことが出来ていたが、各領域独立したデータ収集システムのため図 4.11 のケースのように領域を超えての波形情報収集が出来ず、SD は波形情報を記録しているのに波形情報を収集出来ない状態であった。領域を超えた波形情報収集が出来るようになると、特に高エネルギー宇宙線イベントでは領域を超えて波形を記録している可能性が高く、より多くの情報が得られると期待される。また境界に落ちる低エネルギー宇宙線イベントは、図 4.13,4.14 のよう



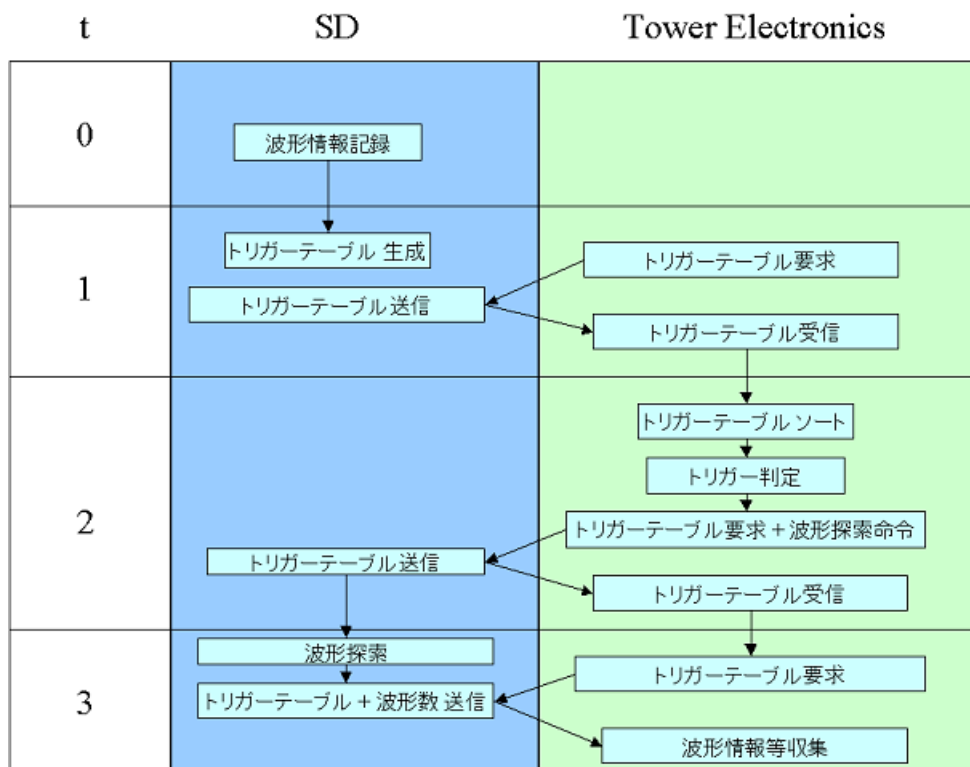


図 4.9 SD とタワーエレクトロニクスの処理。t の単位は秒である。ここでは  $t = 0$  のシグナルが処理される様子を示した。SD のデータ収集系は GPS から 1 秒毎に送られている 1pps と呼ばれるシグナルを利用し全体の同期をとっている。図の横線は 1pps を受信するタイミングを示す。

な境界を跨いだトリガー判定を行う事が出来なかった。SD は規則正しく並べられているにも関わらず場所によりトリガー条件が異なる状況は、特に低エネルギーで観測有効体積の計算が複雑になってしまい、エネルギースペクトルを誤る可能性がある。

これらのため 3 つの領域が独立に動作するのではなく、1 つのシステムとして SD アレイ全体を同一のトリガー条件でトリガーをかけ、領域全体から波形収集が行えるよう改良する必要があった。

よってテレスコープアレイ実験における SD アレイを 1 つのシステムとして動作させるためには以下のような機能を追加すればよい。

1. 領域の境界におちる空気シャワーもトリガー出来るようにする。
2. 他領域でトリガーがかかった時刻で自領域にも波形情報収集を行う。

これらを実現するためには最低限通信塔同士で情報通信を行えるようにしなくてはならな

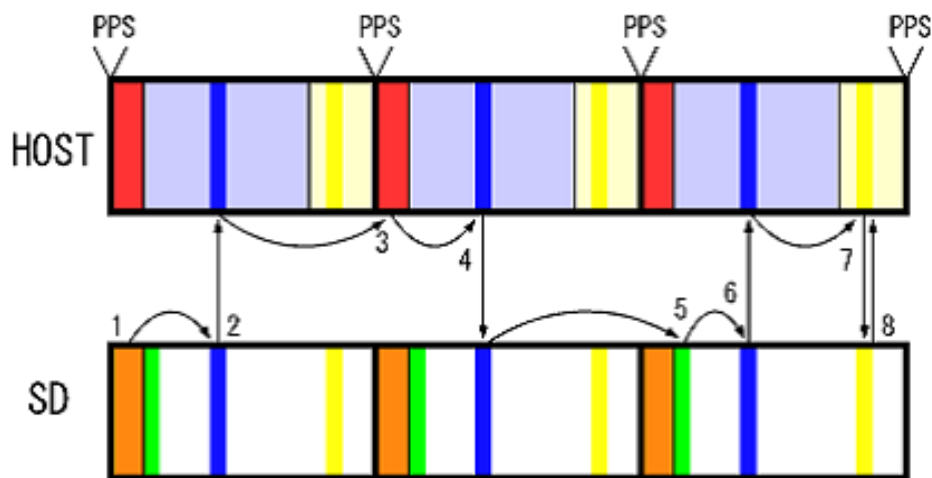


図 4.10 トリガー処理のパイプライン。図中の HOST とはタワーエレクトロニクスを意味する。1:Level-1 トリガーテーブル生成、2:Level-1 トリガーテーブル送信、3:Level-2 トリガー検索、4:Level-2 トリガー送信、5:波形探索、6:波形数送信、7:波形情報リクエスト、8:波形情報送信となっている。2 のトリガーテーブル送信時に 24Byte のモニターデータも一緒に送信される。7,8 はトリガー収集が終わった空き時間で行い、その秒内に波形情報収集が終わらない場合、次の秒に収集が持ち越される。各処理にかかる目安の時間を表 4.1 に示す。なお波形探索はタワーエレクトロニクスが波形を記録してから 16 秒以内に行う必要がある。

い。まずは、トリガーテーブルを 1 箇所を集めトリガー判定を行う方法を検討する。

## 4.2 境界トリガー判定の概要

### 4.2.1 トリガー収集通信塔の決定

各通信塔に設置されているタワーエレクトロニクスの CPU の使用時間をプロットしたものが図 4.12 である。これによるとトリガーテーブル収集に最も時間がかかり、SK が 3 つのタワーエレクトロニクスのうち最も時間に余裕があることがわかる。このため、トリガー判定をするためのトリガー情報を SK に集めるのがいいと考えられた。

### 4.2.2 SK 通信塔までのデータ転送

ここでは、各タワーエレクトロニクスから SK 通信塔まで転送する方法を考える。

トリガーテーブルを 1 箇所を集めるには、各タワーエレクトロニクス内部で処理しているトリガーテーブルの一部を外部に出力させる必要がある。タワーエレクトロニクスが持っている外部と通信を行うためのインターフェイスは、データ収集用に使用しているシ

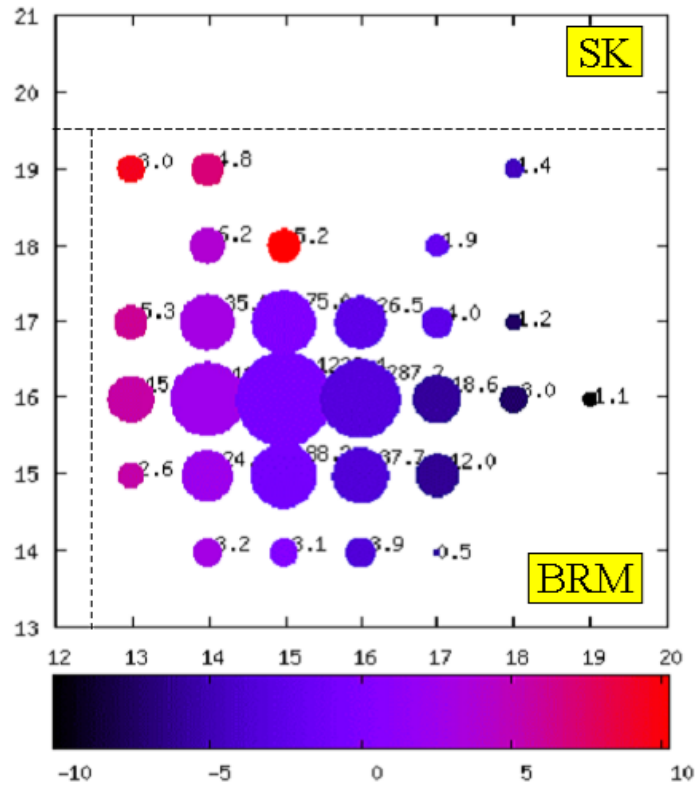


図 4.11 時刻 2008/6/10 UTC 17:05:46 BRM 領域のイベント。点線は境界を示す。BRM の領域は  $x$  軸が 13 以上で  $y$  軸が 19 以下の領域である。 $x = 12$  の列は LR 領域で独立したデータ収集が行われているため  $x = 12$  の列からデータを取得することが出来なかった。

リアルポート (もしくは IrDA)、SD と無線通信を行うための無線モジュールしかもっていない。無線通信はタワーエレクトロニクス同士で使用することが出来ないためトリガーテーブルは必然的にシリアルポートで出力することとなった。このシリアルポートからのデータはタワー PC が制御をしているため、タワー PC がトリガーテーブルを集め SK 通信塔に送信する方法が考えられる。

まず、タワーエレクトロニクスからタワー PC に引き出すことが出来るデータ量を考える。

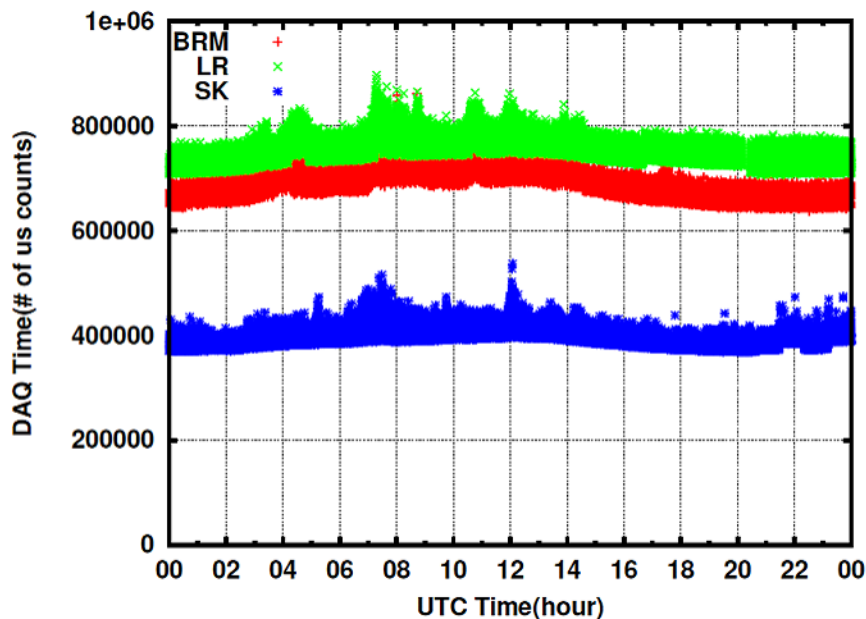


図 4.12 でタワーエレクトロニクスのトリガーテーブル取得にかかった時間のプロット。縦軸の単位は  $\mu s$  である。2008/06/18 に測定された。この他にも毎秒トリガー判定が行われているが、その時間は最大で 80ms 程度である。トリガーテーブル収集に最も時間がかかっており、台数の少ない SK が一番負担が少ないことがわかる。

タワー PC とタワーエレクトロニクス間は 921,600bps で通信が行われている<sup>\*12</sup>。LR で余っている CPU 時間を 0.1 秒だとするとトリガーテーブルの出力に 11.5KB 程度使用することが出来る。level-1 トリガー 1 つあたり時間情報をアスキーで出力すると 6Byte、SD の座標情報を含めたヘッダーとフッターをあわせて 16Byte 程度とし、SD のトリガーレートが平均 40Hz 程度まで上がってしまうと仮定すると<sup>\*13</sup>1SD あたり 260Byte 程度必要である。よって、余った 0.1 秒の CPU 時間をフルに使うと 44 台程度のトリガーテーブルを出力することが可能である。

LR 領域の場合、境界となる SD1 列からトリガーテーブルを取得しようと思うと 27 台になり限界の 44 台を十分下回る。しかし図 4.13 のようなライントリガーパターンを探索するためには、境界となる 2 列のトリガーテーブルを取得する必要がある。LR 領域での

\*12 当初タワーエレクトロニクスは、TCP/IP が使用できる専用のハードウェアを使用する予定であったが見送られたため、既存のシリアル通信を使用することとなった。

\*13 実際は平均 20~30Hz で運用されている。これ以上トリガーレートが増えるとトリガー収集が 1s 以内に終わらないことが経験的に分かってきた。

境界 2 列分は 53 台となり 44 台を超えるため不可能である。そのため、図 4.14 のような境界トリガーパターンは 1 箇所トリガーテーブルを集めトリガー判定を行い、ライントリガーパターンは違った方法でトリガー判定を行う必要がある。

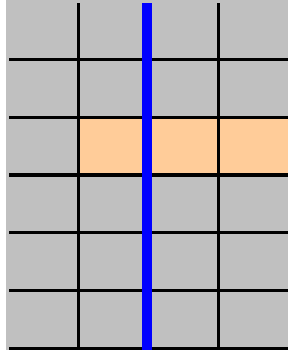


図 4.13 境界を跨るトリガーイベントの例。青い線が領域の境界線を示す。今後このように境界領域で横(あるいは縦)3 つ直線に並ぶトリガーパターンをライントリガーパターンと呼ぶ。

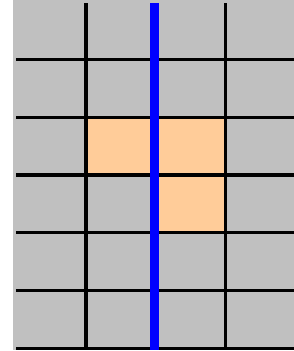


図 4.14 境界を跨るトリガーイベントの例。各領域が独立しているときこのようなイベントを取得することが出来ない。今後このような形のトリガーパターンを境界トリガーパターンと呼ぶ。

次に LR タワー PC や BRM タワー PC から、SK タワー PC にトリガーテーブルを転送する方法と限界値を確認しておく。境界トリガーを行うため BRM 通信塔と SK 通信塔、LR 通信塔と SK 通信塔間にはデータ収集専用ネットワークが構築される予定になっていた。このネットワークに要求される条件は以下の二つである。

1. データ収集に用いるため安定したネットワークであること
2. 30 台分のトリガーテーブルを 1 秒以内に転送できる 7.8KB/s 以上の速度であること

その後、通信塔間の長距離無線が実現し通信塔間のネットワーク状況がモニターされ、その時の通信状況を図 4.15 に示した。また定常的なモニターはされていないが、SK 通信塔と LR 通信塔間が約 300KB/s、SK 通信塔と BRM 通信塔間が約 270KB/s の通信速度が出ていることが確認され、トリガーテーブルだけでなくコマンドを送信するのにも十分な速度を持っていることがわかった。

#### 4.2.3 トリガー判定

SK のタワー PC に送られてきたトリガーテーブルは、このタワー PC でトリガー判定を行う。そのため SK のタワー PC は他のタワーとは違ったジョブが動きトリガー判定を



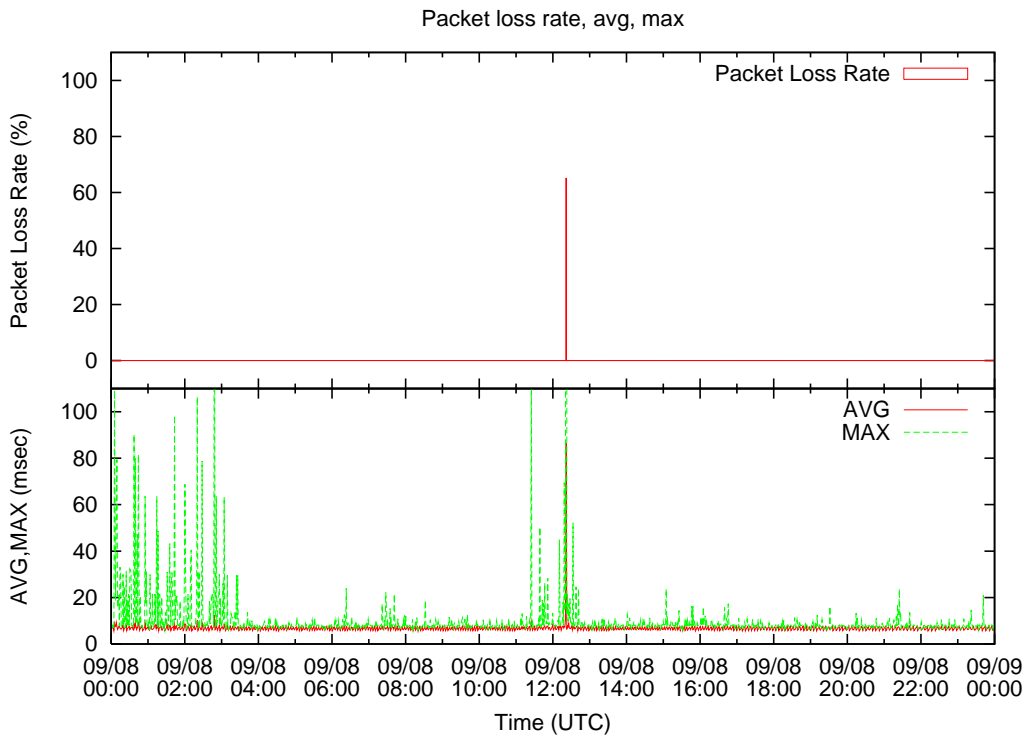


図 4.15 SK 通信塔と LR 通信塔間のネットワーク状況。毎分 40 個の ping を送信して帰ってくるまでの時間を測定した。AVG は応答を受けるまでの 40 個の平均、MAX はもっとも時間がかかったものをプロットした。1 日を通して安定したネットワークになっている。

行う中心的な PC になるので、SK のタワー PC をセントラル PC(Central PC) と呼ぶ。

セントラル PC は、各通信塔から集めたトリガーテーブルを用いてタワーエレクトロニクスと同じ条件 (隣接 3 台以上の SD で  $8\mu\text{s}$  以内に Level-1 トリガーを持つ) でトリガー判定を行う。トリガーを見つけると波形情報収集命令を各通信塔に送り、タワー PC がそれをタワーエレクトロニクスにリレーする。

また、トリガー判定時にはライントリガーパターンを考慮しなくてはならない。ライントリガーパターンに対応させるために、境界をまたがって隣接した 2 台のパターンがあった場合、その隣の SD がその時間帯に Level-1 トリガーを持っているか確認することにする (図 4.16)。この時予想されるチャンスコインシデンスは、1SD あたり Level-1 トリガーが 30Hz だと思い計算すると 3 秒に 1 度の頻度である。また、確認のためのトリガーテーブルはタワーエレクトロニクスに管理させる。これは、SD に確認をするにはセントラル PC → タワー PC → タワーエレクトロニクス → SD と多くの機器を通過するため時間ロスが多くなる。タワーエレクトロニクスがトリガーテーブルを一度収集している

ので大きめのバッファをタワーエレクトロニクスに用意し、ライントリガーパターンの可能性がある時は、セントラル PC → タワー PC → タワーエレクトロニクスと確認する。チャンスコインシデンスにより 3 秒に 1 度程度この処理が予想されるが処理内容が簡単なためタワーエレクトロニクスでも処理が可能だと考えられる。

トリガーがあったときに 4.3 節と同じ方法で他のタワーにも波形収集命令を出す。

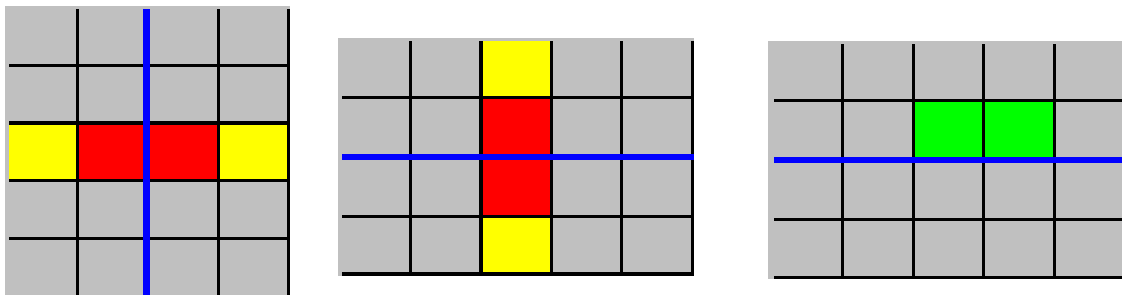


図 4.16 ライントリガーパターン確認の例。青線は境界を示す。赤 SD は境界をまたがって隣接しているため黄色 SD にトリガーがあったか確認する。緑 SD は隣接はしているが境界をまたがっていないためライントリガーパターンとは呼ばない。

### 4.3 他領域へのトリガーの概要

次に各領域でかかったトリガーで他の領域の波形情報収集を行う方法について述べる。タワーエレクトロニクスは、自分でトリガーを発見した時に #P、#e で始まるトリガーパターンやトリガー時間を示す情報を出力する。これをタワー PC が読み取り、トリガー時間とトリガーした検出器の場所をセントラル PC に送り、セントラル PC が他のタワーに配布するようにする。このようにすることで、タワー PC は他のタワー PC と直接情報の交換をするのではなくセントラル PC とだけ情報のやり取りを行えばよいことになる。

セントラル PC はその情報をセントラル PC → タワー PC → タワーエレクトロニクスとリレーしタワーエレクトロニクスが波形情報収集を行うようにする。

### 4.4 新トリガーシステムのデザイン

新トリガーシステムでは SD アレイのどこかでシャワートリガーがかかった時に、その大きさや場所に拠らず 507 台すべての検出器から波形情報探索を行い波形情報収集を行

う。これはリアルタイムにシャワーの大きさを推定するのは難しく、領域を狭めて取得すると必要なデータが取得できなくなる可能性があるからである。また、この波形情報収集によってデータ収集が滞ることもない。概要が決まったので以下のように各機器の詳細なデザインを行った。

#### 4.4.1 地表粒子検出器

SD は、すでに指定した時刻に対して  $\pm 32\mu\text{s}$  の範囲で波形情報探索が可能であり、その波形情報収集も可能であった。しかし波形を記録してから探索が起こるまでの時間が、タワーエレクトロニクスでのトリガー判定に比べ遅くなってしまうので、何秒以内に情報を収集すればよいか知っておく必要がある。図 4.6 で述べたように SD は波形情報を 40 秒程度記録しておくことが出来る。しかし、波形情報探索は波形情報を記録してから 16 秒以内に行う事を前提に作られていた。16 秒以内に波形情報探索を行う事が出来れば、地表粒子検出器側のソフトウェアを変更する必要はないが、これを超える場合は変更を加える必要がある。

#### 4.4.2 タワーエレクトロニクス

タワーエレクトロニクスに必要な変更点は次の 5 点である。

1. 境界 1 列目の SD の番号を記憶し、その SD のトリガーテーブルをタワー PC に出力する。
2. 境界から 2 列目の SD の番号を記憶し、そのトリガーテーブルをタワーエレクトロニクス自身が 16 秒程度記憶する。
3. トリガー時刻、ポジション、トリガーモード<sup>\*14</sup>をタワー PC から受け取り波形情報収集を行う。
4. ライントリガーパターン探索命令をタワー PC から受け取り 2 のステップで記録した情報から該当する SD のトリガーがあるかどうかを探し、結果をタワー PC に出力する。
5. 自領域でのトリガーと外部トリガーでのトリガーを区別しておきたいため、トリガー生成場所を示すトリガーモードをトリガー毎にタワー PC に出力するようにする。

---

<sup>\*14</sup> どこでトリガーが発生したのかを記録している情報

変更を加える際に気をつけなくてはならないことは、タワーエレクトロニクスとタワー PC 間ではすでにシャワーイベント、モニター情報などが毎秒出力されており、その中に上記の結果を出力させることである。そのため、タワー PC で処理が必要なデータは結果に関らず毎秒同じフォーマットで出力させた方が、タワー PC にとって処理が簡単になる。

#### 4.4.3 タワー PC

旧トリガーシステムのタワー PC では、タワーエレクトロニクスから出力されてくる情報を記録しているだけであった。今回タワー PC に要求される機能は次の通りである。なお、トリガー情報とはトリガー時刻とトリガー判定された隣接 3 台の SD のうち中心の SD 座標を指す。

1. タワーエレクトロニクスから出力されるデータから以下の情報を読み出し、メモリに保存する。
  - (a) 境界 1 列目のトリガーテーブル
  - (b) トリガーが発生した場合の時刻と場所
  - (c) ライントリガーパターンの結果 (毎秒表示される情報である。トリガーがあった時のみトリガー時刻とトリガーした中心の座標が表示される。)
  - (d) タワーエレクトロニクスが 1pps を受け取り、最初の処理を行う時に出力される文字列
2. 取得した境界 1 列目の SD のトリガーテーブルを時間情報でソートし 10 秒程度のバッファに保存する。
3. セントラル PC からの要求時に情報を送信する。
  - (a) セントラル PC から要求された秒のトリガーテーブル
  - (b) タワーエレクトロニクスから読み出した自領域のトリガー情報
  - (c) ライントリガーパターン探索でトリガーを発見したときのトリガー情報
4. セントラル PC からタワーエレクトロニクスへの命令を中継する。
  - (a) トリガー情報からトリガー時刻を確認し、トリガー時刻が以前トリガー収集を行った時間  $\pm 8\mu\text{s}$  以内でなければ、タワーエレクトロニクスに送り波形情報収集を指令する。これは一つの空気シャワーイベントで、自領域でトリガーがかかり他の領域でもトリガーかかった時に二重に同じ波形情報収集を行うことを防止する。
  - (b) ライントリガーパターン探索を指令する。

これらの機能を実現するために、機能ごとに以下の 3 つの Linux のプロセスに分けて処理を行うという方針で実装した。

- Host Control process  
タワーエレクトロニクスをコントロールするプロセス (上記 1 と 4 の一部)
- Sort process  
ソート専用プロセス (上記 2)
- Host Deamon process  
セントラル PC からのリクエストに答える (上記 3 と 4 の一部)

プロセス間のメモリ共有は Linux の共有メモリ機能を用いて、プロセス間の同期はタワーエレクトロニクスから 1 秒毎に出力される文字列を使用している。

#### 4.4.4 セントラル PC

SK の通信塔に設置されるセントラル PC はセントラル PC であると同時に SK のタワー PC でもある。ここでは、セントラル PC 特有の機能について述べる。

1. 各タワー PC にリクエストを出し、指定した時刻 (秒) のトリガータブルを取得する。
2. 取得したトリガータブルを時間情報でソートし、トリガー判定を行う。
3. 境界トリガーがあった時に、各タワー PC に対して波形情報収集命令を出す。
4. ライントリガーパターンの可能性がある時に、ライントリガーパターン検索命令を該当する領域のタワー PC に出す。
5. タワー PC からライントリガーパターンでのトリガー情報を得た時、各タワーに波形情報収集命令を出す。
6. タワー PC からタワーエレクトロニクスで発生したトリガー情報を得た時、そのタワーを除いた他のタワーに波形情報収集命令を出す。

SK のタワー PC はタワー PC の機能と共に上記のセントラル PC としての機能を備えている。プロセスはタワー PC のプロセスに加え以下のプロセスが動作する。

- Host Connector process  
各タワー PC の Host Deamon プロセスと通信を行う。各タワー PC 用の独立した 3 つのプロセスが動作し、このプロセス間でも情報を共有する。(上記の 2 以外)
- Trigger Judgement process



## トリガー判定用プロセス (上記 2)

### 4.4.5 新トリガーシステムの全体図

境界領域の SD の設定を図 4.17 に、各機器のネットワークを図 4.18 に示す。また SD のどこかでシャフトリガーがかかった時は、その大きさや場所に拠らず 507 台すべての検出器に対して波形情報探索を行い、波形情報収集を行う。最後に SD が波形を記録し

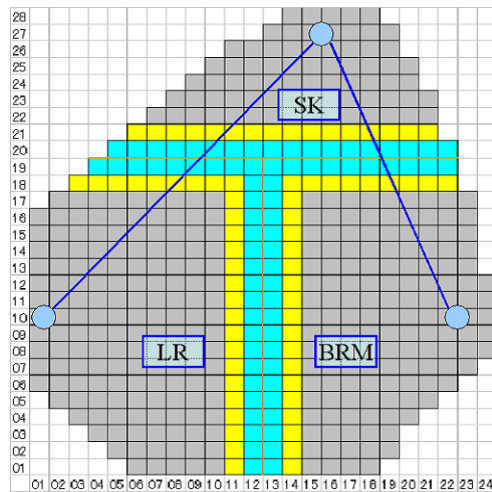


図 4.17 BR、LR、SK の境界付近の SD の境界設定図。水色 SD のトリガーテーブルを SK 通信塔にあるセントラル PC に転送し境界トリガー判定を行う。黄色 SD のトリガーテーブルはライトトリガーパターンを参照するためタワーエレクトロニクスで記録しておく。

てから波形探索が行われるまでの時間を図 4.19 に示す。どれも 16 秒以内に波形探索命令が出力され SD のソフトウェアを変える必要がないことがわかった。

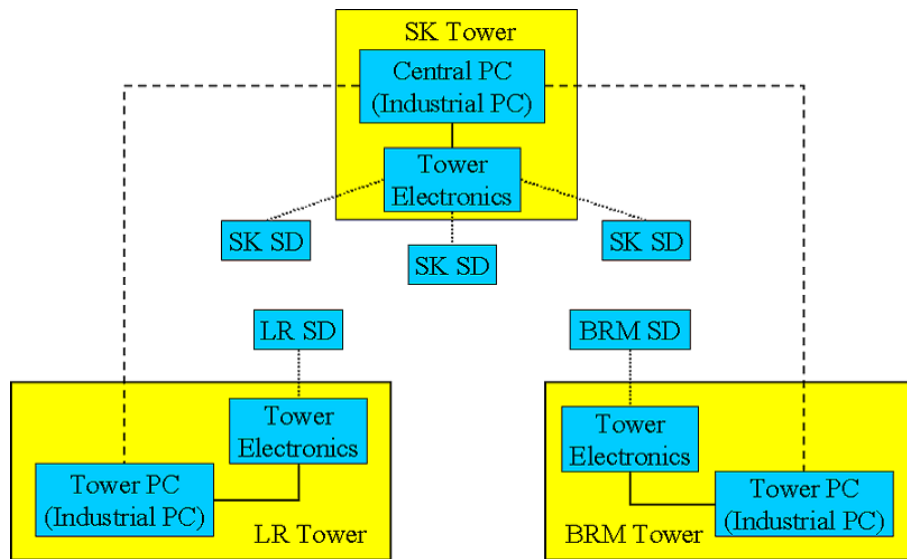


図 4.18 SD のデータ収集専用ネットワーク。メンテナンス時などデータ収集以外ではこの通信塔間のネットワークは使わず、他の通信ルートを経由して各タワー PC にアクセスできるようになっている。

## 5 地表粒子検出器データ収集システムの開発

新しい地表粒子検出器のデータ収集システムのデザインが出来たので、実装とテストを行った。ここでは、トリガーテーブルの転送とトリガー判定、コマンドの転送に分けて述べる。

### 5.1 トリガーテーブルの転送

#### 5.1.1 タワーエレクトロニクス

まず、タワーエレクトロニクスに、指定した SD のトリガーテーブルを出力させる変更を加えた。出力内容は各境界 SD ごとに以下である。

|          |                                |                      |
|----------|--------------------------------|----------------------|
| ヘッダー     | タワー PC 用読み込み開始情報、座標、GPS 秒情報    | 11Byte               |
| トリガーテーブル | Level-1 トリガーの $\mu\text{s}$ 情報 | 6Byte $\times$ トリガー数 |
| フッター     | タワー PC 用読み取り終了情報               | 6Byte                |

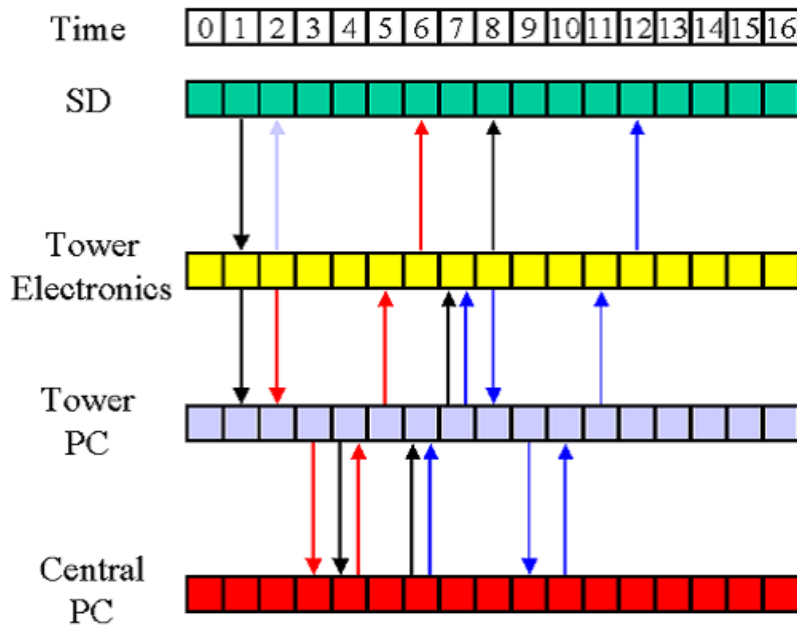


図 4.19 SD が波形情報を記録してから探索が起こるまでのタイミングチャート。Time の単位は秒。黒がセントラル PC による波形探索、水色がタワーエレクトロニクスによる波形探索、赤が他領域のタワーエレクトロニクスによる波形探索、青がライントリガーによる波形探索を示す。

また SD とタワーエレクトロニクス間で通信が悪くトリガータブルを取得できなかった場合はトリガーレート 0 として処理される。毎秒タワーエレクトロニクスに送られてきたトリガータブル数がモニター情報として表示されるので、その数とソートされた内容から問題がない事を判断した。

### 5.1.2 タワー PC

タワー PC は各境界 SD の GPS の秒情報とトリガータブルを読み取り、座標と level-1 トリガー時刻の  $\mu\text{s}$  情報を 1 トリガーあたり 1Byte の情報にして記録する。すべての境界 SD から読み取った後、この情報を時刻情報でソートする。また SD によっては、GPS の秒情報がずれている事があるので<sup>\*15</sup>、各 SD から集めた秒情報で多数決を行い一番多いものが正しい GPS の秒情報だと信じ、ソートされた結果のヘッダーに GPS 秒情報と総トリガータブル数、また Trial Number と呼ばれるデータの識別項目を加え

<sup>\*15</sup> 現地で毎日、GPS の秒がずれていないかどうかのチェックが全 SD に対して行われている。そのため、長期間 GPS の秒がずれ続けることはない。

る<sup>\*16</sup>。これを 10 秒分のバッファに保存する。

この流れを図 5.1 に示す。タワー PC はセントラル PC に秒を指定されトリガーテーブル

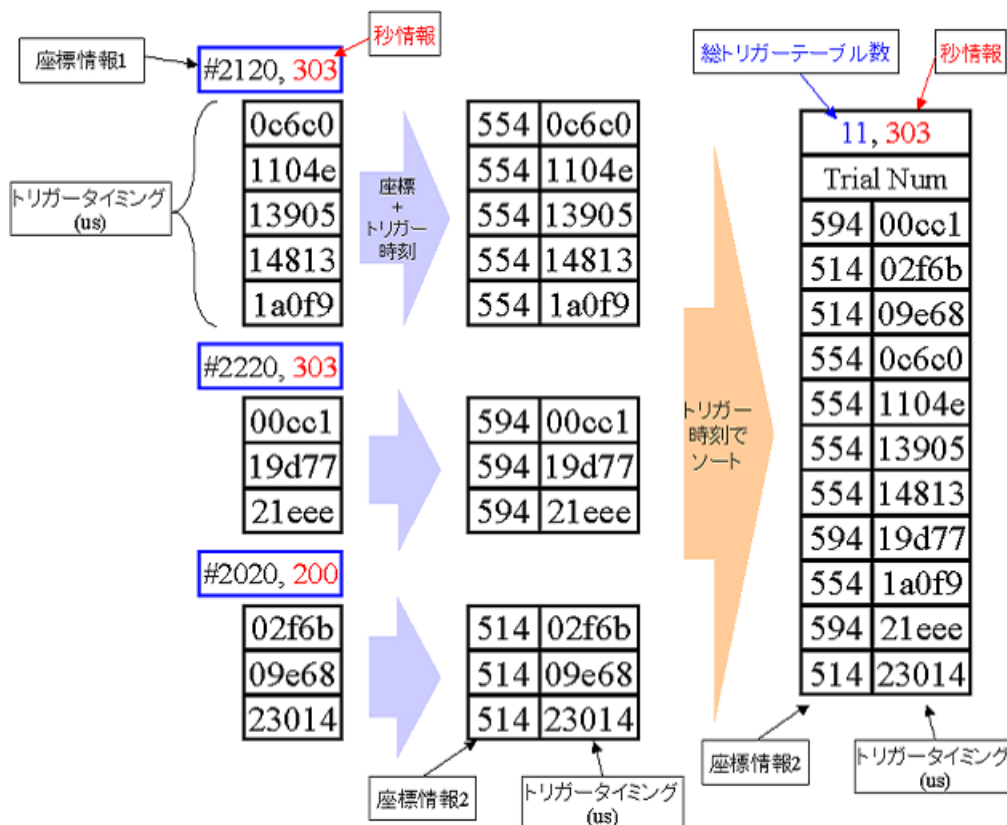


図 5.1 タワー PC でのトリガーテーブル処理イメージ。左の列がタワーエレクトロニクスから読み出す情報。#は SD 座標、赤は GPS の秒情報を意味する。中央の列は座標情報とトリガー時刻情報 (単位は  $\mu s$ ) を 1Byte にまとめた処理後。右の列はそれらを時間情報でソートし、ヘッダーを加えた。ヘッダーには、トリガーテーブル数 (図中青) と GPS の秒情報と Trial Number が含まれている。この例では SD により GPS 秒情報が 303 と 200 と違ったが多数決で GPS 秒情報には 303 が使用される。よって 200 を出力した #2020 がトリガー判定に関した結果は解析時に除く必要がある。

ルを要求される。タワー PC は、指定された秒の情報をバッファから探し、見つければ図 5.1 の右列の情報をセントラル PC に送信し、見つからないときは空情報を送る。

まずタワーエレクトロニクスから出力されるトリガーテーブルの内容とトリガーテー

<sup>\*16</sup> Trial Number はタワーエレクトロニクスがデータ収集プロセスに入ってから経過した秒をおよそ示す。トリガーテーブルの転送時に簡単なチェックとして使用していた名残で今は使用していない。

ブルの数をきちんと間違いなく、タワー PC が読み込んでいるか確認した。すべての境界 SD から内容を読み取れている事を確認した後、トリガーテーブルを  $\mu\text{s}$  の時刻情報でソートを行い、トリガー数の合計、ソートの結果をみて矛盾がないか確認を行った。またサイトに設置されている実アレイを使用すると、条件によっては\*<sup>17</sup>タワーエレクトロニクスが 1 秒以内にすべての SD からトリガーテーブルを収集することが出来ず、タイムアウトエラーを起きてしまうことがわかった。その時のここでの処理はトリガーテーブルを使用することが出来ないためトリガーテーブル数 0 として処理を行う仕様にし動作を確認した。

最終チェックとして、毎秒出力されるトリガーテーブル数の和と、毎秒ソートされたトリガーテーブル数と内容を、123 秒間連続したデータを用いて確認を行った。その結果、上記タイムエラーが 6 回起きていたがそれでも 1 度も間違えることなく正確に行われている事が確認された。

### 5.1.3 セントラル PC

通信塔間は長距離無線ネットワークで繋がっている。そのため通信のモニターと通信エラー対策が必須である。プログラムでは TCP/IP を用いてデータの順序、内容を保障してもらおう。あとは実際にネットワークが途切れた時の処理を加えた。

ネットワーク通信では、必ずセントラル PC がタワー PC に要求する事にし、以下の書式で行われる。

要求時

```
command arguments... PROMPT>
```

応答時

```
arguments... PROMPT>
```

読み取る側は、PROMPT> が表示されるまで読み続ける。通信切断により切断された場合は、タイムアウトとなりその秒の情報は捨てられ、その次の秒から再開される。通信ネットワークの状態はセントラル PC が 1 秒毎トリガーテーブル取得時に記録している。

セントラル PC は、毎秒各タワーへ図 5.1 の右列の情報を GPS の秒情報を元に要求す

\*<sup>17</sup> タワーエレクトロニクスが SD からトリガーテーブルを取得する際、通信エラーが起これると 1 台あたり 5 回までリトライするようになっている。そのため、なんらかの原因でタワーエレクトロニクスと SD 間の無線通信状態が悪くなると 1 秒以内に処理を終えることが出来なくなる。これは旧トリガーシステムから起こっていた問題である。

る。各タワーの通信状態を記録し、トリガーテーブル情報を各タワー PC から受け取る。この時セントラル PC はヘッダーにある秒の情報とトリガーテーブルの数と受信した結果を確認する。問題がなければセントラル PC はこのトリガーテーブル情報を 1 つのテーブルにしてソートし、トリガー判定プロセスに渡す (図 5.2)。

ここでは通信が途切れた時や復旧時の処理、各タワー PC でのトリガーテーブルとセントラル PC でソートされた結果を比較した。各トリガーテーブルのバッファサイズは最大 10 秒分用意してあり、132 秒連続したデータで一連の流れを検証した。データ収集開始時の時間差によるトリガーテーブル未取得や前述したタイムアウトによって 396 回中 78 回セントラル PC でデータが集められないことがあったが、132 秒すべてトリガーテーブル数を間違えることなくソートし、トリガー判定に使える状態になっているのを各通信塔で記録したデータを用いて確認した。

Level-2 トリガー判定 (シャワートリガー判定) は、 $8\mu\text{s}$  以内に隣接 3 台以上で Level-1 トリガーがあるという条件で行われる。しかしセントラル PC ではライントリガーにも対応する必要があるので、境界トリガーパターンとライントリガーパターンの二種類の判定が秒ごとに行われる。トリガー判定時におけるトリガーテーブルをイメージした処理を図 5.3 と図 5.4 に示す。

1. あるトリガーテーブル (先頭から  $n$  個目) から  $8\mu\text{s}$  以内にあるトリガーテーブルの数をカウントする。
2. 3 つ以上あれば境界トリガーパターンを探索する
  - (a) トリガーテーブルの座標情報から隣接 3 つ以上になるかどうかを確認する。トリガーが見つかりと時間情報を使用してトリガー時刻、トリガーポジション、境界トリガーモード = 0 を指定する。
3. 2 つ以上、かつ、境界トリガーパターンでトリガーがなかった場合はライントリガーパターンを探索する
  - (a) 境界越しに隣接した座標のトリガーテーブルがあるかどうかを確認する。あれば、この 2 つのテーブルの時刻情報、座標、境界トリガーモード (BR,LR 境界であれば 1,SK との境界であれば 2) を指定する。
4. 次のトリガーテーブル ( $n \leftarrow n + 1$ ) とし 1 に戻る。

各トリガー判定は、他のプログラムによって作成されたトリガーパターン数がわかっている 7 万個程度のトリガーテーブルを読み込ませトリガーパターンを落とすことなくすべてを見つけることを確認した。また境界トリガーパターン判定は、デルタ市の Cosmic Ray Center にあるテスト用 SD7 台を用いてタワーエレクトロニクスで判定した結果とセント



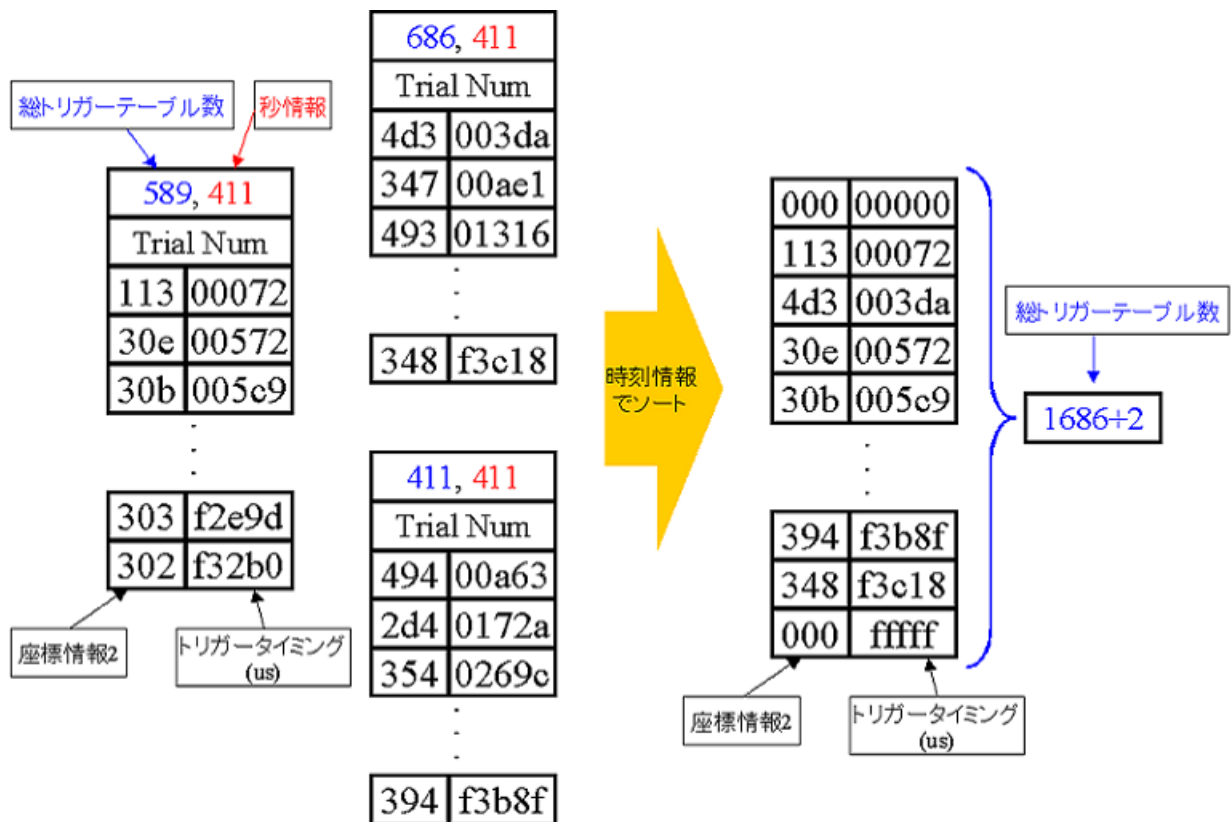


図 5.2 各タワー PC からトリガーテーブルを収集する。このときヘッダーにある GPS 秒 (赤)、トリガーテーブル数 (青) を確認し問題があればそのテーブルは使用されない。正常に受信された TrialNum と GPS 秒が別ファイルに記録されこれが秒ごとの通信記録となる。トリガーテーブルは一箇所にまとめられ時間情報でソートされ、トリガー判定プロセスに渡される。

ラル PC で判定した結果を比べることで確認した。また、トリガー判定に用いたトリガーテーブルを出力するようにしているので、誤判定を行っていないかどうかの確認を行った。

ライントリガーパターン判定ではセントラル PC が判定した結果と、ソートされたトリガーテーブルを用いてオフラインでトリガーパターン判定を行うプログラムで整合性の確認が行われた。

すべてのトリガーテーブルに対し上記の探索が終わったら、境界トリガーモードに応じた命令を関連するタワー PC に送る。

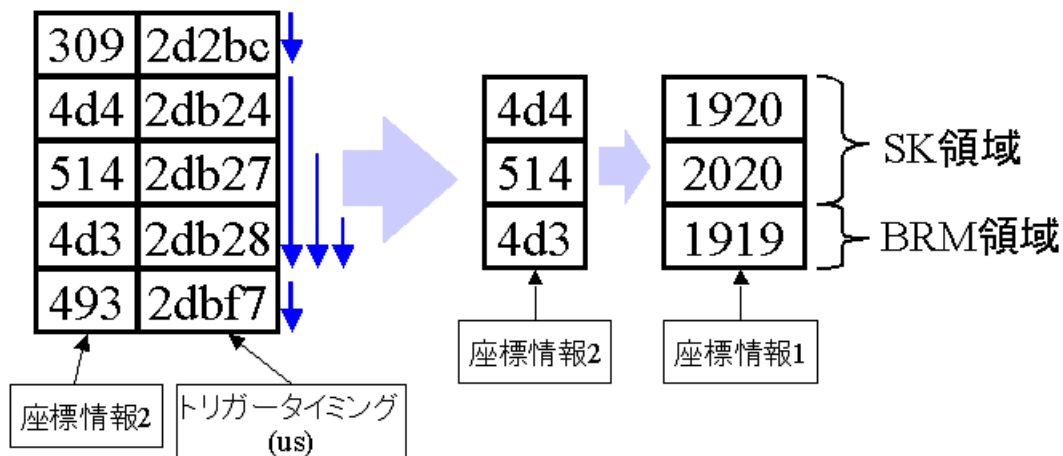


図 5.3 トリガー判定時の処理。左列の左の 12bit が座標情報を意味し、右 20bit がトリガー時刻情報 ( $\mu\text{s}$ ) を意味している。青の矢印が始点から  $8\mu\text{s}$  探索している様子を示す。 $8\mu\text{s}$  以内に 3 つ以上あったときに上位 12bit の座標データを用いて隣接判定を行う。この場合、隣接 3 つ以上だったため波形情報収集命令が記録される。

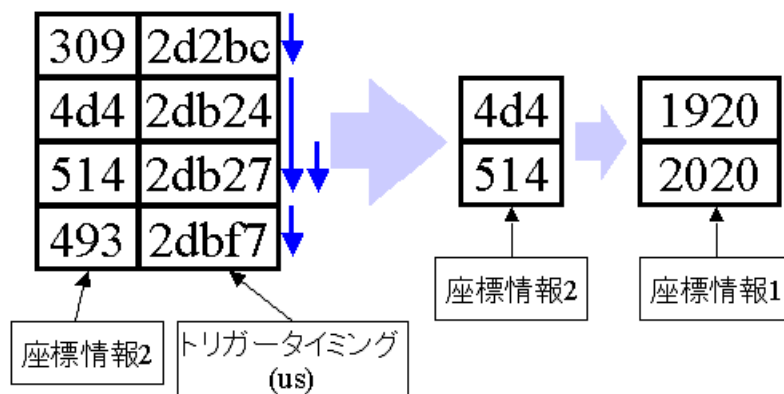


図 5.4 トリガー判定時の処理。 $8\mu\text{s}$  以内に隣接した 2 台があったが、この場合同領域での隣接なのでライントリガーパターンにはならず、コマンドが生成されない。

## 5.2 コマンドの転送

タワーエレクトロニクスからタワー PC を除いた他の機器間でのコマンド (命令) 転送は基本的にまず専用のバッファに格納され 1 秒ごと定められた時間に送信が始まる。コマンドはアスキーで可変長である。現在使用しているコマンドはおよそ 30Byte 程度であり、通信塔間やタワー PC とタワーエレクトロニクス間の通信速度を考慮しても問題な

い。このコマンド転送は、簡単なテストを行った後実際に各タワー PC で動作させ数時間のコマンド履歴を見ることができちゃんと動いていることを確認した。

### 5.2.1 セントラル PC

セントラル PC 内部では、各タワー PC 向けの命令コマンドを記録するバッファが用意されている。セントラル PC からタワー PC 向けのコマンドは以下の 4 つが用意されている。

セントラル PC がタワー PC へ送信するコマンド

1. トリガータブル要求命令
2. 波形情報収集命令
3. ライントリガーパターン探索命令
4. タワー PC のバッファに格納されているセントラル PC へのコマンド送信命令

これらのうちトリガータブル要求命令とセントラル PC へのコマンド送信命令は、毎秒要求するためコマンドバッファには入らず直接タワー PC へ要求される。波形情報収集命令は、セントラル PC により境界トリガーパターンが発見された場合は各タワー PC 向けのバッファに書き込まれる。ライントリガーパターン探索命令は、トリガー探索に該当する領域のタワー PC 向けバッファに書き込まれる。例えば、SK と LR の境界領域での探索では SK タワー PC 向けバッファと LR タワー PC 向けバッファのみに命令が書き込まれる。

セントラル PC はトリガータブルをタワー PC に要求した後、タワー PC 向けのコマンドバッファを確認し、未送信のコマンドがあると 1 つ送信する。その後タワー PC にセントラル PC 向けの未送信のコマンドがあるかどうかを確認し、コマンドが存在するとそれを受信し実行する。この時、セントラル PC がタワー PC から受け取る可能性があるコマンドは以下の 2 種類である。

セントラル PC がタワー PC から受信するコマンド

1. 他領域への波形情報収集命令
2. ライントリガーパターンによるトリガー発生命令

他領域への波形情報収集命令とは、タワーエレクトロニクス自身がシャワートリガー (level-2 トリガー) を発見した場合にその時刻の波形情報を他の通信塔領域でも取得するために、トリガーのあった領域のタワー PC から送られてくるコマンドである。セントラ

ル PC がこのコマンドを受け取ると、送られてきた領域以外のタワー PC 向け命令バッファにそのコマンドを書き込む。ライントリガーパターンによるトリガー発生命令をセントラル PC が受け取った時は、各タワー PC 向け命令バッファに波形情報収集命令を書き込む。

### 5.2.2 タワー PC

タワー PC がセントラル PC から受け取るコマンドは、5.2.1 節にも記述したように以下の 4 つである。

タワー PC がセントラル PC から受信するコマンド

1. トリガーテーブル要求命令
2. 波形情報収集命令
3. ライントリガーパターン探索命令
4. セントラル PC 向けバッファに格納されているセントラル PC へのコマンド送信命令

トリガーテーブル要求命令はセントラル PC からタワー PC に毎秒送られてくる。トリガーテーブルを送信後、セントラル PC のタワー PC 向けバッファに未送信の命令があれば、それが送られてくる。タワー PC は、過去 16 秒分の自領域でのトリガー時刻、他領域からのトリガー時刻を記録しており、波形情報収集命令を受け取ると時刻情報を確認し、以前のトリガー時刻に対して  $\pm 8\mu\text{s}$  以内になればタワーエレクトロニクスへの送信専用命令バッファに波形情報収集命令を書き込む。ライントリガーパターン探索命令をタワー PC が受け取ると、タワーエレクトロニクスへの送信専用命令バッファに書き込む。その後、セントラル PC からセントラル PC 向けの命令要求を受け取り未送信の命令があればそれを送信する。

タワー PC はタワーエレクトロニクスから出力される情報を常に監視している。そのうち以下の情報を発見するとセントラル PC への送信専用命令バッファにその情報を書き込み、セントラル PC からのセントラル PC へのコマンド送信命令を受け取った時にセントラル PC へ送信される。

タワー PC がタワーエレクトロニクスから読み取るコマンド

1. タワーエレクトロニクス自身による Level-2 トリガー
2. ライントリガーパターン発見によるトリガー

タワーエレクトロニクスによる Level-2 トリガーは、トリガー時刻情報がタワー PC が持

つトリガー時刻記録用メモリに書き込まれた後、他領域への波形情報収集命令となる。ライントリガーパターン発見によるトリガーはセントラル PC において全領域への波形情報収集命令になる。

### 5.2.3 タワーエレクトロニクス

タワーエレクトロニクスがタワー PC から受け取る命令は以下の 2 つである。

タワーエレクトロニクスがタワー PC から受信するコマンド

1. 波形情報収集命令
2. ライントリガーパターン探索命令

タワーエレクトロニクスがタワー PC から波形情報収集命令を受け取ると、その命令に含まれる時刻情報をもとに自身が Level-2 トリガーを発見した時と同様に各 SD に対し波形情報収集を行う。タワーエレクトロニクスは、境界から 2 列目のトリガーテーブルを 16 秒分記録している。ライントリガーパターン探索命令をタワーエレクトロニクスが受け取ると、探索命令に含まれる時刻と座標情報から該当する SD のトリガーテーブルを探す。タワーエレクトロニクスはライントリガーパターンを発見すると、時刻情報と座標情報をタワー PC へ出力する。

またタワーエレクトロニクスはタワー PC からコマンドを受け取ると、受信したコマンドをデータファイルへ出力した後に命令を実行する。この出力とタワー PC からタワーエレクトロニクスへの命令ログを見ることで、タワー PC からタワーエレクトロニクスへコマンドがきちんと伝わったのかどうかを確認することが出来る。

現在タワー PC からタワーエレクトロニクスへ命令を送る過程で不具合が起きる可能性が指摘されている。タワー PC とタワーエレクトロニクス間の一部は RS-232 のシリアル通信を使用している。通信自体にエラー修復機能がないためプログラムでチェックする必要がある。データ収集プログラム自体はエラーチェック、再送信などの機能をもっているがデータ収集時はタワーエレクトロニクスのエコー機能が使えないためチェック機能がオフになっている。そのため、ある確率でシリアル通信部分でエラーが発生し不正なコマンドを投げてしまう恐れがあると考えている。不正なコマンドを投げてしまった可能性がこれまで 1 度発生しており<sup>\*18</sup>、事前に指定したコマンド以外無効にするなど改良する必要がある。

<sup>\*18</sup> 当時ログへ出力する情報が不足して、原因を突き止めることが出来なかった。現在はタワー PC とタワーエレクトロニクス間の通信では、トリガーテーブルを除いた全ての通信記録がログに記録されており、ログを確認することで不正なコマンドの有無を確認することが出来る。

## 6 観測結果

新しいDAQシステムを各タワーに実装後、動作チェックを行った。2008年11月25日から3領域を1つのシステムに統一された新データ収集システムが本格的に稼動した。ここでは特に断りがない限り、11月25日から12月16日までに取得したデータを用いて、新データ収集システムの動作と健全性を確認した。

### 6.1 タワー PC、タワーエレクトロニクス間のコマンド転送

最初にタワー PC とタワーエレクトロニクス間の命令コマンドが問題なく行われているかどうかを確認する。問題なく通信が出来ていれば、タワー PC が認識したイベント数とタワーエレクトロニクスが認識したイベント数は同じになるはずである。ここでは、タワーエレクトロニクスからタワー PC に送られるトリガー数と、タワー PC からタワーエレクトロニクスへ送られるトリガー数をタワー PC のログとタワーエレクトロニクスのログとで確認することで、双方向の通信が出来ているかどうかチェックする。

まずタワーエレクトロニクスのデータから、自領域でトリガー判定がかかったイベント数とタワー PC によってトリガーをかけられたイベント数を抽出した。タワー PC 側でもタワーエレクトロニクスから読み取ったイベント数と、タワーエレクトロニクスにトリガーをかけたイベント数を比較した。その結果を表 6.1 に示す。

BRM タワー PC がタワーエレクトロニクスから7イベント足りないことがわかった。これは、BRM のタワー PC の出力するログのバージョンが最初の1ファイルだけ違って、7イベント分記録されていないためだと分かった。よって、すべてのタワー PC とタワーエレクトロニクス間は1イベントも間違えることなく双方向に通信が出来ていることが確認できた。

### 6.2 タワー PC、セントラル PC 間コマンド転送

12/9 01:27(UTC) から 12/09 19:27(UTC) までの BRM と SK のデータを用いてタワー PC とセントラル PC 間の通信が問題なく行われているかどうかを確認した。この時間を選んだのは、どちらの領域も連続的にデータ収集が行われており、開始時がほぼ同時で解析が行いやすかったためである。

ここでは、セントラル PC が BRM 領域に関係するライントリガーパターン探索を発見した数と、BRM のタワー PC がタワーエレクトロニクスに出力したライントリガーパ



|     | タワーエレクトロニクスがタワー PC に<br>送信したトリガー数 | タワー PC がタワーエレクトロニクスから<br>受信したトリガー数 |
|-----|-----------------------------------|------------------------------------|
| BRM | 2994                              | 2987                               |
| LR  | 3374                              | 3374                               |
| SK  | 1650                              | 1650                               |

|     | タワー PC がタワーエレクトロニクスに<br>送信したトリガー数 | タワーエレクトロニクスがタワー PC から<br>受信したトリガー数 |
|-----|-----------------------------------|------------------------------------|
| BRM | 5435                              | 5435                               |
| LR  | 5088                              | 5088                               |
| SK  | 6899                              | 6899                               |

表 6.1 タワー PC、タワーエレクトロニクス間での通信が双方向でうまくいっているかどうかをトリガー数を比べることで判断した。タワー PC がタワーエレクトロニクスへ送信するトリガー数が、他の 2 領域のトリガー数の和に合わないのは、境界部分のトリガーを入れてないためと、メンテナンスのため 3 領域が同時に動作していない時間があるためである。BRM で数が合わないのはログのバージョンが違っていたためであった。

ターン確認の命令の数で比較した。ライントリガーパターン命令を使ったのは、波形情報収集命令に比べ短時間で多くの命令が送られるためである。その結果セントラル PC からタワー PC に 10277 個の命令が送られ、そのうちタワー PC は 10277 個の命令を受信している。つまりタワー PC は一つも落とすことなくセントラル PC のすべての命令を受信し処理を行っている事が確認できた。

また、各領域間 (タワー PC とセントラル PC 間) で情報のやりとりが問題なく出来ているかどうかを確認する。双方向の通信に問題がなく、SD が一つのシステムとして動作しているのであれば、各領域の総トリガー数は同数になるはずである。そこで、同期間内の各タワー PC に残るトリガー情報のログを用いて、各領域間で矛盾のない数のトリガー数であるかどうかを確認した。この期間も 12/9 01:27(UTC) から 12/9 19:27(UTC) までである。ログファイルから抽出したトリガーの種類と数を表 6.2 に示す。この表から SK 領域では外部トリガーの数が必要以上に出力されてしまっている事がわかる。その原因を確認すると、一種の初期化ミスで起動時に古い外部トリガー情報を読み取ってしまったことがわかった。これはログを見ると時刻情報から明確にはずすことが出来るの

|     | 外部 (境界は含まない) | 境界 | 自領域 | 合計  | 差 |
|-----|--------------|----|-----|-----|---|
| BRM | 214          | 22 | 112 | 348 | 0 |
| LR  | 169          | 22 | 157 | 348 | 0 |
| SK  | 275          | 22 | 57  | 354 | 6 |

表 6.2 各タワー PC のログファイルから抽出した領域ごとのトリガー数。差は (境界トリガー数を含まない外部トリガー数) と (他領域のトリガー数の和) との差を示す。例えば SK の外部トリガー数は (SK 他領域) = (BRM 自領域) + (LR 自領域) となるはずである。ここでは左辺と右辺の差を取った。SK 領域では差が 0 にならず、また (トリガー数の合計) が他の領域と同じにならない事がわかった。

で、それを差し引いたものを表 6.3 に示す。これを見ると、タワー PC とセントラル PC 間でも双方向に 1 イベントも落とすことなく通信が来ている事がわかった。よって、タワーエレクトロニクス、タワー PC、セントラル PC 間で矛盾なく命令コマンドが送受信され、ひとつのシステムとして動作していることが確認できた。

|     | 外部 (境界は含まない) | 境界 | 自領域 | 合計  | 差 |
|-----|--------------|----|-----|-----|---|
| BRM | 214          | 22 | 112 | 348 | 0 |
| LR  | 169          | 22 | 157 | 348 | 0 |
| SK  | 269          | 22 | 57  | 348 | 0 |

表 6.3 各タワー PC のログファイルから抽出した領域ごとのトリガー数から初期不良の分を抜いたもの。矛盾なくすべてのトリガーが他領域にもかかっていることがわかった。

### 6.3 領域ごとのトリガー数

面積 × 単位時間あたりのシャワートリガー (level-2 トリガー) のトリガーレートが領域によらず一定であるかどうかを確認する。そのためにまず稼働時間を算出する。タワーエレクトロニクスは毎秒必ず 1 秒毎に時刻情報を出力するためこの数をカウントすることで秒単位で稼働時間がわかる。また、境界部分はセントラル PC が毎秒トリガーテーブルを取得できたかどうかログを残しているのので、その情報を使用する。またデータ収集プログラムが動いていても、タワーエレクトロニクスが時間内に全 SD からトリガーテーブルを収

集することが出来なくトリガー判定を行う事が出来ない場合があるので<sup>\*19</sup>、このようなケースも考慮する必要がある。BRM、LR、SK 領域に対する稼働時間を表 6.4 に示す。

|     | DAQ 稼働時間 (s) | Timeout (s) | 実質稼働時間 (s) | 実質稼働率 (%) |
|-----|--------------|-------------|------------|-----------|
| BRM | 1758516      | 9849        | 1748667    | 97.9      |
| LR  | 1747627      | 40571       | 1707056    | 95.6      |
| SK  | 1768548      | 0           | 1768548    | 99.0      |

表 6.4 BRM、LR、SK 領域の 11 月 25 日から 12 月 16 日までの稼働時間。SD のメンテナンスなどで各領域で動作していた時間が多少違う。Timeout はタワーエレクトロニクスが規定時間内にトリガーテーブル収集を終えられずトリガー判定が行えなかった秒数を示す。これは、タワーエレクトロニクスと SD 間の通信状況が悪くなりリトライを繰り返すことでタイムアウトしてしまうことがログからわかった。稼働時間から Timeout を引いた実質稼働時間がトリガー判定を行う事が出来た時間である。実質稼働率は、(実質稼働時間)/(11 月 25 日のデータ取得開始時刻から 12 月 16 日のデータ収集終了時刻までのトータル秒) を意味する。つまり SK ではメンテナンスなどで全期間の 1% データ収集が止まっていた。

境界領域では各通信塔からトリガーテーブルを取得出来た場合と、出来なかった場合とでトリガー判定に使える SD の有効面積が変わってしまう。そのため、面積 × 観測時間で評価する。各領域の面積に対して、単純に SD の数をカウントしただけでは境界の端でトリガー数が減る効果が考慮されていない<sup>\*20</sup>。そのためここでは、図 6.1 のような四角パターンや三角パターンが領域内にいくつ入るかで評価することにした (図 6.2 から図 6.4)。このようにして面積を評価し稼働時間を考慮した結果を表 6.5 に示す。



図 6.1 四角形 (左)、三角形 (右) のパターンがいくつ領域内に入るかを考えた。

単位面積 × 単位時間あたりの各領域に対するトリガー数を、表 6.1 と表 6.5 を用いてま

<sup>\*19</sup> トリガーテーブル収集時にタワーエレクトロニクスと SD 間で通信エラーが起こると 5 回までリトライが実行される。なにかしらの原因でタワーエレクトロニクスと SD 間の通信状況が悪くなると、数多くのリトライが発生し制限時間内にトリガーテーブル収集が終わらなくなる。その場合、そのトリガーテーブルを使用するトリガー判定が行われなため、デッドタイムとしてカウントする必要がある。

<sup>\*20</sup> 境界がトリガー数に与える影響は、境界の形によって異なるため単純に SD の台数でトリガー数を比較することが出来ない。

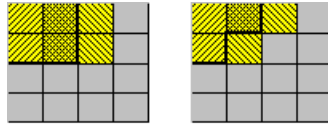


図 6.2 面積のカウントの仕方。パターンがいくつ領域の中に入るか数えるため場所によっては重複して同じ SD を数えることになる。この例の場合、四角形パターンが 9 個、三角形パターンが 36 個としてカウントされる。

|  |  |  |  |  |   |   |   |   |  |   |    |    |   |
|--|--|--|--|--|---|---|---|---|--|---|----|----|---|
|  |  |  |  |  | 1 | 2 | 2 | 1 |  | 3 | 6  | 6  | 3 |
|  |  |  |  |  | 2 | 4 | 4 | 2 |  | 6 | 12 | 12 | 6 |
|  |  |  |  |  | 2 | 4 | 4 | 2 |  | 6 | 12 | 12 | 6 |
|  |  |  |  |  | 1 | 2 | 2 | 1 |  | 3 | 6  | 6  | 3 |

図 6.3 この形の領域に四角形パターン (中央) や三角形パターン (右) が、いくつ入るか数えた時、SD が重複してカウントされた回数を示す。

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |   |   |   |   |   |   |    |    |    |   |
|--|--|--|--|--|--|--|--|--|---|---|---|---|---|---|----|----|----|---|
|  |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 | 1 |   |   |   | 4 | 3  |    |    |   |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 | 3 | 2 |   |   | 5 | 10 | 6  |    |   |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 | 3 | 4 | 2 |   | 5 | 10 | 12 | 6  |   |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 | 3 | 4 | 4 | 2 | 4 | 10 | 12 | 12 | 6 |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 3 | 6  | 6  | 6  | 3 |

図 6.4 この形の領域に四角形パターン (中央) や三角形パターン (右) が、いくつ入るか数えた時の SD が重複してカウントされた回数を示す。この形の場合、四角形パターンは 10 個、三角形パターンは 43 個入っていると数える。

とめたものを表 6.6 に示す。これを見ると、BRM 領域が他の 2 領域と比較して  $2\sigma$  程度低めに出ている。また境界トリガーのイベント数は、他領域でもトリガーがかかっている 198 イベントも含んでいる。これは本来、他領域としてカウントされるべきイベントが境界トリガーとしてカウントされているイベントもあるので、イベント数をやや大きく見積もっていると考えている。

また Level-2 トリガーの隣接 3 台の SD のうち中央と判定される SD のヒストグラムを作成した。シャワートリガーのうち隣接 4 台以上のものは、中央の定義が変わってしまうのでここでは隣接 3 台のイベントのみを使用した。境界部分を含まないマップを図 6.5 に、境界のみのマップを図 6.6 に、境界部分を含めたマップを図 6.7 に示す。これらのマップには SD は設置されているが、エンタリーが 0 となっている SD が存在するため、その SD を丸で囲んである。黒丸は境界の形から隣接 3 台の中央になり得ない SD、青丸は他

|      | 稼働時間 (s) | 四角数 | 三角数 | 稼働時間 × 四角数 | 稼働時間 × 三角数   |
|------|----------|-----|-----|------------|--------------|
| BRM  | 1748667  | 160 | 647 | 279786720  | 1131387549   |
| LR   | 1707056  | 177 | 715 | 302148912  | 1220545040   |
| SK   | 1768548  | 82  | 339 | 145020936  | 599537772    |
| 境界領域 | -        | 36  | 145 | 57759741   | 232643401.25 |

表 6.5 領域ごとの面積 × 観測時間。面積 × 観測時間の次元は  $L^2 \cdot T$ 。境界領域の計算では BRM もしくは LR からのトリガーテーブルが使えない時は、境界領域の有効面積が 1/4 になり、SK からのトリガーテーブルが使えない時は境界領域の有効面積が 1/2 になると換算した。2 通信塔からのトリガーテーブルが使用できなかった場合は 0 である。

|      | トリガー数              | トリガー数/(時間 × 四角面積)                  | トリガー数/(時間 × 三角面積)                  |
|------|--------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| BRM  | 2994               | $(1.070 \pm 0.020) \times 10^{-5}$ | $(2.646 \pm 0.048) \times 10^{-6}$ |
| LR   | 3374               | $(1.117 \pm 0.019) \times 10^{-5}$ | $(2.764 \pm 0.048) \times 10^{-6}$ |
| SK   | 1650               | $(1.138 \pm 0.028) \times 10^{-5}$ | $(2.752 \pm 0.068) \times 10^{-6}$ |
| 境界領域 | 676 <sup>*21</sup> | $(1.170 \pm 0.045) \times 10^{-5}$ | $(2.91 \pm 0.11) \times 10^{-6}$   |

表 6.6 単位時間 × 単位面積あたりのトリガー数。誤差は統計誤差でトリガー数を  $N$  とした場合に  $\sqrt{N}$  である。

の領域の通信塔と通信しているため<sup>\*22</sup>トリガー判定が行われな SD、白丸は統計量が足りなく 0 イベントとなっていると考えられる SD である。

アレイが一樣になっているか確認するため、境界トリガーが含まれていない図 6.5 から、一樣なトリガー効率であると考えられる SD(図 4.1) のトリガー数をヒストグラムにしたものを図 6.8 に、境界トリガーを含んでいる図 6.7 から、一樣なトリガー効率であると考えられる SD(図 4.2) のトリガー数をヒストグラムにしたものを図 6.9 に示す。

図 6.5 を見ると、境界トリガーを含める前にすでに LR 領域の SD #0519 のトリガーレートが境界領域にしては高い事がわかった。図 6.6 の境界トリガーのみと比較しても同

<sup>\*21</sup> この数は境界トリガーパターンでかかったイベントのみであり、ライントリガーパターンによるイベントは入っていない。これは、ライントリガーパターンが今考えている面積に入らないためである。676 イベントの内訳は、境界トリガーで波形情報収集が行われたのが 478 イベント、他の領域でも同時にトリガーがかかっていたものが 198 イベントである。

<sup>\*22</sup> 地形の影響で自分の領域の通信塔と通信が出来ない SD は、他領域の通信塔と交信するようにしている(表 3.1)。トリガー判定で使用されることはないが、波形情報収集が行われている。

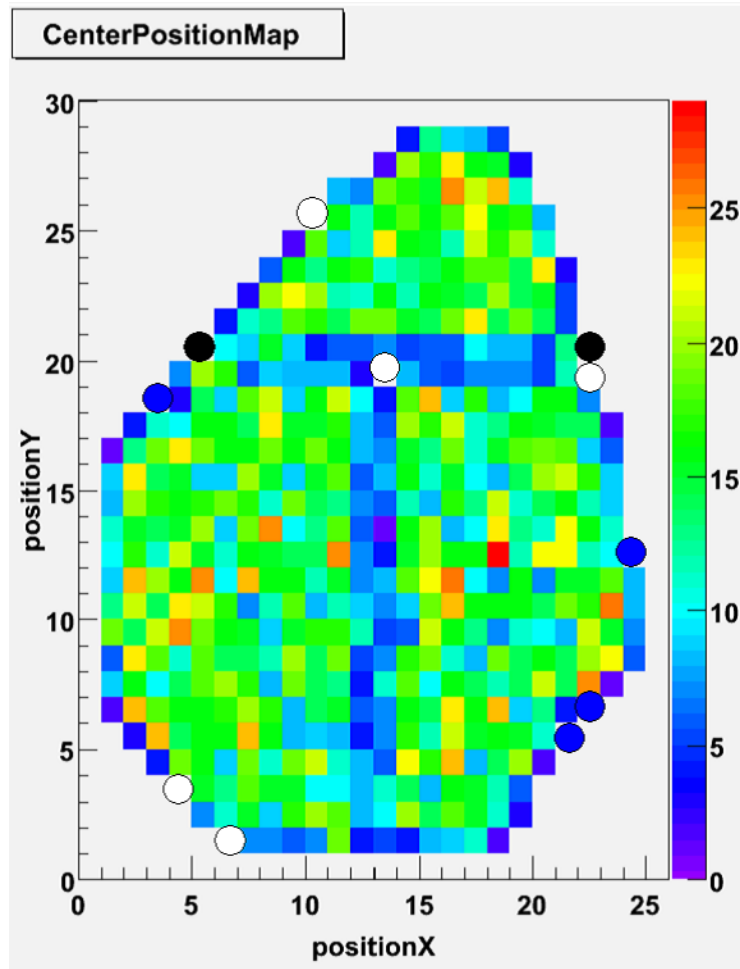


図 6.5 シャワートリガーで隣接 3 つの SD のうち中央と判定された SD の座標ごとのヒストグラム。色はエントリー数を示す。隣接 4 つ以上のものは中心の定義が変わってしまうのでここでは除いてある。この図には境界トリガー部分でトリガーがかかったものは含まれていない。

じ SD のトリガー数が多いため SD 固有の問題ではないかと考えている。次に図 6.9 を見ると、ガウス分布でフィットしたときの標準偏差 ( $4.56 \pm 0.21$ ) が平均値  $N(16.68 \pm 0.26)$  に対して  $N^{\frac{1}{2}}$  程度であるためほぼ一様であることに矛盾しない。よって、図 4.2 で赤く示した SD 368 台はトリガー効率が一様であり、その台数はデータ収集システムの更新の前後で 46% 増加したと言える。



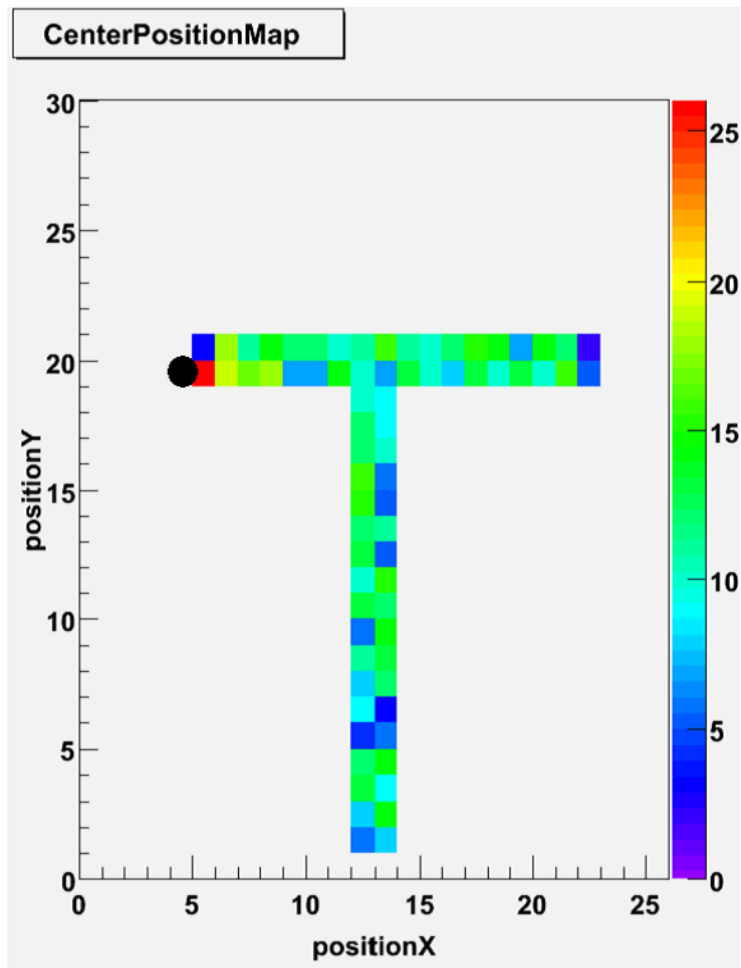


図 6.6 境界シャワートリガーで隣接 3 つの中央 SD 座標のヒストグラム。イベント数が少ないため境界トリガーパターンとライントリガーパターンを一緒にして示した。

## 6.4 イベント

最後にこの境界トリガーシステムによって新たに取得することが出来るようになった実際の取得イベントの例を図 6.10 から図 6.15 に示す。中央の図中の縦軸、横軸は SD の座標を示し、円の半径は取得した MIP 数 (上下層平均) を  $Q$  として  $\log_{10} Q + \alpha$  となっている。色の違いが到達時刻の差を表し、黒がより早く赤がより遅い。単位は  $\mu\text{s}$  である。また点線は領域の境界を示す。

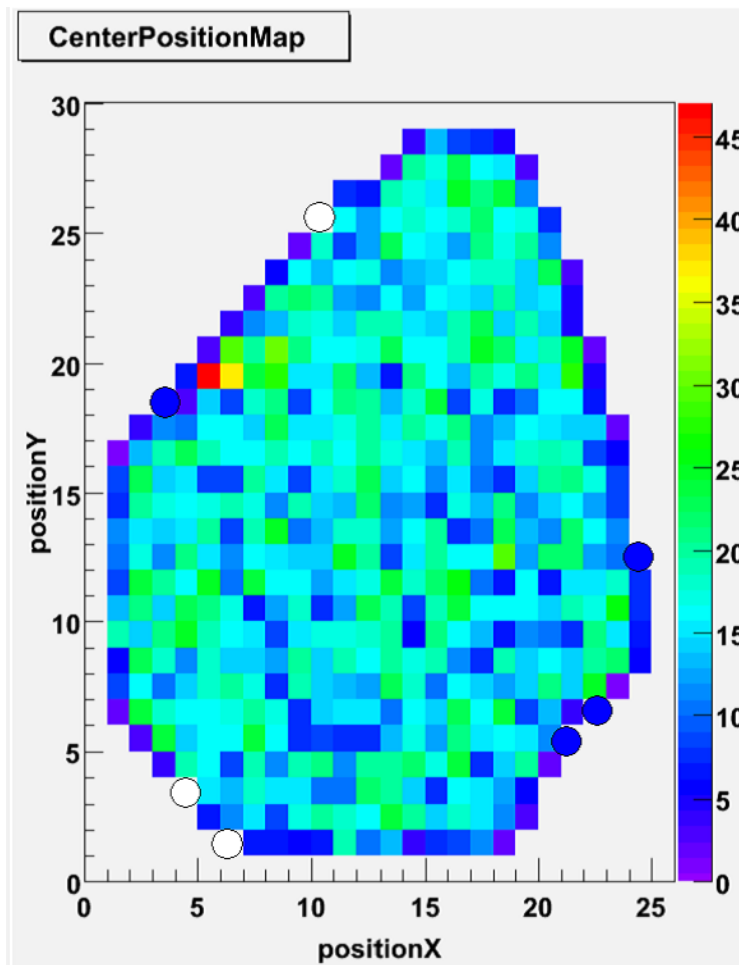


図 6.7 図 6.5 と図 6.6 の和で、この期間で取得した隣接 3 台でのシャワートリガーイベントから、隣接 3 つの中央と判定された SD 座標のヒストグラム。

## 7 結論

### 7.1 今後の課題

まず、タワー PC からタワーエレクトロニクスへ不正なコマンドが出力されてしまう場合の対処が必要である (5.2.3 節)。これは、現在は使用されていないタワー PC とタワーエレクトロニクス間のもう 1 つのシリアル通信経路を用いて、通信する方法を考えている。このシリアル通信を、タワー PC とタワーエレクトロニクス間のコマンド送受信専用線とする。そうするとタワーエレクトロニクスの echo 機能を使用することが出来る。タ

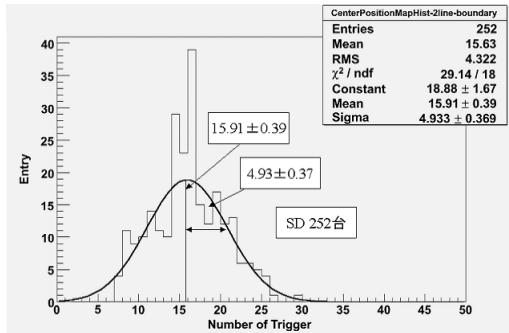


図 6.8 境界トリガーがない場合、領域の端の効果がなく同様のトリガー効率だと考えられる SD(図 4.1)のみを使用したトリガー数のヒストグラム(トリガー数は図 6.5 のデータを使用した。)

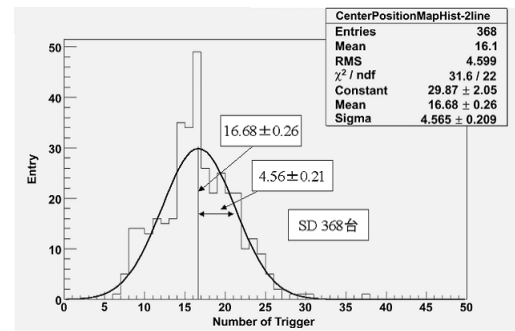


図 6.9 境界トリガーがある場合、領域の端の効果がなく同様のトリガー効率だと考えられる SD(図 4.2)のみを使用したトリガー数のヒストグラム(トリガー数は図 6.7 のデータを使用した。)

ワー PC がタワーエレクトロニクスにコマンドを送信する毎に、タワーエレクトロニクスによる echo と比較することで不正なコマンドの発見、キャンセルが出来るようになる。

また、初期化不良がありタワー PC からセントラル PC へ古いコマンドが送られてしまう不具合が発覚した(6.2 節)。これは、3 領域のうち 1 つの領域(A 領域を止めたと仮定する。)のデータ収集を止めてしまっても、他領域から A 領域向けのコマンドを他領域の A 領域向けコマンドバッファに並べ続けてしまう。そのため A 領域を稼動した際に、A 領域が他領域からの古くなった未送信のコマンドを大量に受け取ってしまう事が原因だとわかった。これは、通信塔と通信塔間の無線通信が長期間不通になったときも発生しうる。そのため、コマンドに寿命をつけるなど古くなった未送信のコマンドに対する処理を加える必要がある。

全地表粒子検出器が 1 つのシステムとして動き出したため、シミュレーションと比較することが容易になった。出来るだけ早い時期にシミュレーションで空気シャワーと地表粒子検出器アレイを作りトリガーレートなどを実データと比較する必要がある。

今後 BRM と LR 領域のトリガーテーブル収集のタイムアウトによるデッドタイムを減らすため、境界の変更が必要ではないかと考えている。具体的には SK と LR、SK と BRM の境界を 1 行、もしくは 2 行分南に下げる。この変更により BRM と LR の領域を縮小し、現在 CPU 時間の余裕がある SK の領域を拡大して、BRM と LR の領域のトリガーテーブル収集のタイムアウトによるデッドタイムを減らす事が出来る。地形も考慮する必要があるため簡単には決められないが、タワーエレクトロニクスと地表粒子検出器間

の通信エラーが、一時的に増えてもタイムアウトにならないよう対処する必要がある。

## 7.2 まとめ

テレスコープアレイ実験における地表粒子検出器は、3領域に分かれて独立にデータ収集システムが稼動していたが、本研究により2008年11月25日より全地表粒子検出器が1つのデータ収集システムとして稼動し始めた。システム自体は、21日分のデータでタワーエレクトロニクスとタワーPC間で同数のトリガーに関するコマンド送受信が行われている事が確認された。更に18時間分の連続したデータを用いて領域間の通信が問題なく行われている事が確認できた。また、人工的に作ったトリガーテーブルを用いて同じプログラムでトリガー判定を行いトリガー判定自体に問題がないこと、21日分のデータで領域ごとの単位面積当たりのトリガー数の違いが、統計誤差で $2\sigma$ 以内である事を確認した。また、新しいデータ収集システムによって地表粒子検出器アレイの周辺を除いたトリガー効率が同じである地表粒子検出器の台数が252台から368台に増加した。メンテナンス以外でもデッドタイムが生じてしまっており、一番大きなデッドタイムはタワーエレクトロニクスと地表粒子検出器間の無線通信エラーによるタイムアウトであることがわかり今後の課題である。

## 謝辞

本研究にあたりご指導頂きました佐川宏行先生、福島正巳先生に心より深く感謝致します。研究に打ち込めるよう様々な手配をしていただいたおかげで、最後まで安全に全力で研究を行う事が出来ました。

櫻井信之先生、野中敏幸氏、小澤俊介氏には数多くのご助言、ご指導を頂きました。特に野中敏幸氏には、アメリカでの生活から研究にいたるまで様々なバックアップをして頂きました。

大岡秀行氏には、エレクトロニクス全般において様々なお話や修理をしていただきました。

滝田正人先生、林田直明先生、竹田成宏先生、下平英明氏、山本邦之氏、近藤好氏、得能久生氏、芝田達伸氏、有働慈治氏、多米田裕一郎氏には、アメリカにおける研究生活で大変お世話になりました。

木次敦子さん、山川敏枝さんには数多くの事務処理を行って頂きました。

同室の武多昭道氏、木戸英治氏、池田大輔氏、川名信吾氏、小林健太郎氏には、惜しみないご協力をいただきました。特に武多昭道氏には、様々なアイデアを提供していただき、数々の相談や議論に乗っていただきました。

千葉大学の河合秀幸先生、吉田滋先生には、テレスコープアレイ実験に携わる機会を与えていただきました。

大阪市立大学の奥田剛司氏には、SDの製作から設置、運用まで様々な事を教えていただきました。

山梨大学の富田孝幸氏、岩本祥平氏、露口勇輔氏とは、柏でのSDの製作から苦楽を共にし始め、デルタへの長期出張でも一緒に苦しみました。お互いお疲れ様でした。

Mr.Dave Barr, Mrs.Cindy Barr. Thank you very much for all of my Delta life.

Dr.Ilsung Cho, Miss.Jenny Hea Lim, Miss.Soonyoung Roh, Miss.Ji Hee Kim. Thank you for all of my Korea life and working long time in Delta. I expect you to contribute making SD software.

他のテレスコープアレイ実験の方々にも、現地での生活やSDの製作、SDエレクトロニクスの組立など多くの場面でお世話になりました。皆様に心より感謝致します。

## 索引

Black Rock Mesa(BRM) テレスコープアレイ実験では SD アレイ周辺に 3 つの通信塔を配置している。図 3.30 のように、SD アレイを 3 つの領域に分け、通信塔を通してデータ収集を行っている。Black Rock Mesa(BRM) は、サイトの南東にある台地であり、その台地に 3 つの通信塔のうちの 1 つが設置されている。BRM はこの東側の領域を指す。

Level-0 トリガー 各 SD が PMT から上下層共に 0.3MIP 以上のシグナルを受け取った時に生成され、波形情報を記録する (4.1.1 項)。

Level-1 トリガー 各 SD が PMT から上下層共に 3MIP 以上のシグナルを受け取った時に生成され、トリガーテーブルを生成する元となる (4.1.1 項)。

Level-2 トリガー タワーエレクトロニクス、セントラル PC で生成されるシャワートリガー。隣接 3 台以上の SD で  $8\mu\text{s}$  以内に Level-1 トリガーが存在したときに、この Level-2 トリガーが発生する。その後、各 SD にトリガー時間に対応した波形情報収集命令が送られる (4.1.2 項)。

Long Ridge(LR) テレスコープアレイ実験の SD では、図 3.30 のように、通信塔により 3 つの領域に分かれている。Long Ridge(LR) はサイト西側にある山並みであり、この西側の領域を指す。

Smelter Knoll(SK) テレスコープアレイ実験の SD では、図 3.30 のように、通信塔により 3 つの領域に分かれている。Smelter Knoll(SK) はサイト北にある丘陵であり、この北側の領域を指す。

境界トリガーパターン 境界を跨るトリガーパターンの一つ。境界 SD1 列分のみでセントラル PC でトリガー判定が可能 (図 4.14)。トリガーモードは 0 に設定される。

セントラル PC SK 通信塔に設置されているタワー PC。他の通信塔のタワー PC とは違い各領域からトリガーテーブルを集め境界トリガー判定を行う (4.4.4 項)。新トリガーシステムで導入された。

タワー PC 各通信塔に設置されている PC。旧トリガーシステムでは、TS-5700 を使用しておりデータのストレージ機能だった (4.1.3 項)。新トリガーシステムでは、TS-7800 が使用されておりタワーエレクトロニクスとセントラル PC の仲介を行う (4.4.3 項)。

タワーエレクトロニクス 各通信塔に設置されているエレクトロニクス。各 SD からトリガーテーブルを収集し、Level-2 トリガーを探す (4.1.2 項)。新トリガーシステムで



は外部トリガーをかけられるようにした (4.4.2 項)。

**トリガーテーブル** Level-1 トリガーを生成した 1 秒分の時刻情報を並べたテーブルを指す。Level-1 トリガー 1 つにつき 1Byte の情報量で、頭 12bit に SD の座標情報、後ろ 20bit に時刻情報 (単位は  $\mu\text{s}$ ) が記録されている (図 5.1)。

**トリガーモード** 外部トリガーの種類を示す情報。自領域のタワーエレクトロニクスで発生した場合は外部トリガーではなく明確に区別されるためトリガーモードで区別をする必要がない。他領域のタワーエレクトロニクスで発生した場合は 1、セントラル PC による境界トリガーパターンの場合は 0、ライントリガーパターンの場合は 2 が記録されている (4.4.2 項)。

**波形情報** Level-0 トリガーが発生した時に生成される情報。上下層ごとの波形の形を示す 128bin ( $2.56\mu\text{s}$  相当) の FADC 値とそれぞれの 128bin の積分値、トリガー時間情報を含んでいる (4.1.1 項)。

**ライントリガーパターン** 境界を跨るトリガーパターンの一つ。境界 SD1 列分のみトリガーテーブルをセントラル PC が回収してもトリガー判定を行う事が出来ない (図 4.13)。トリガーモードは 2 に設定される。

## 参考文献

- [1] Kenneth Greisen, *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 16, No. 17, pp. 748–750, Apr 1966.
- [2] G.T.Zatsepin and V.A.Kuz'min, *JETP.Lett*, Vol. 4, pp. 78–80, 1966.
- [3] M. Takeda et al, *Astropart.Phys.*, Vol. 19, No. 4, pp. 447–462, Jul 2003.
- [4] R.U.Abbashi et al, astro-ph/0208301.
- [5] ENRICO Fermi, *Phys. Rev.*, Vol. 75, No. 8, pp. 1169–1174, Apr 1949.
- [6] Shigeru Yoshida, Nova Science Pub Inc, 2003.
- [7] L.O'C Drury, *Contemporary Physics*, Vol. 35, No. 4, pp. 231–242, Jul 1994.
- [8] F.W.Stecker, astro-ph/0407311.
- [9] Eli Waxman, *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 75, No. 3, pp. 386–389, Jul 1995.
- [10] Todor Stanev, astro-ph/0411113.
- [11] The Pierre Auger Collaboration, *Science*, Vol. 318, No. 9, pp. 938–943, Nov 2007.
- [12] J Abraham, *Physical Review Letters*, Vol. 101, No. 6, pp. 061101–+, August 2008.
- [13] The High Resolution Fly'S Eye Collaboration, *Astroparticle Physics*, Vol. 30, pp. 175–179, November 2008.
- [14] Thomas K. Gaisser, Cambridge University Press, 1990.
- [15] M Nagano, *Journal of Physics G: Nuclear Physics*, Vol. 10, No. 9, pp. 1295–1310, Sep 1984.
- [16] 木戸英治, 修士論文 東京大学, 2007.
- [17] 宮田孝司, 修士論文 東京理科大学, 2008.
- [18] 武多昭道, 修士論文 東京大学, 2006.
- [19] 多米田裕一郎, 修士論文 東京工業大学, 2006.
- [20] 池田大輔, 修士論文 東京大学, 2007.
- [21] 東龍二, 修士論文 東京工業大学, 2008.

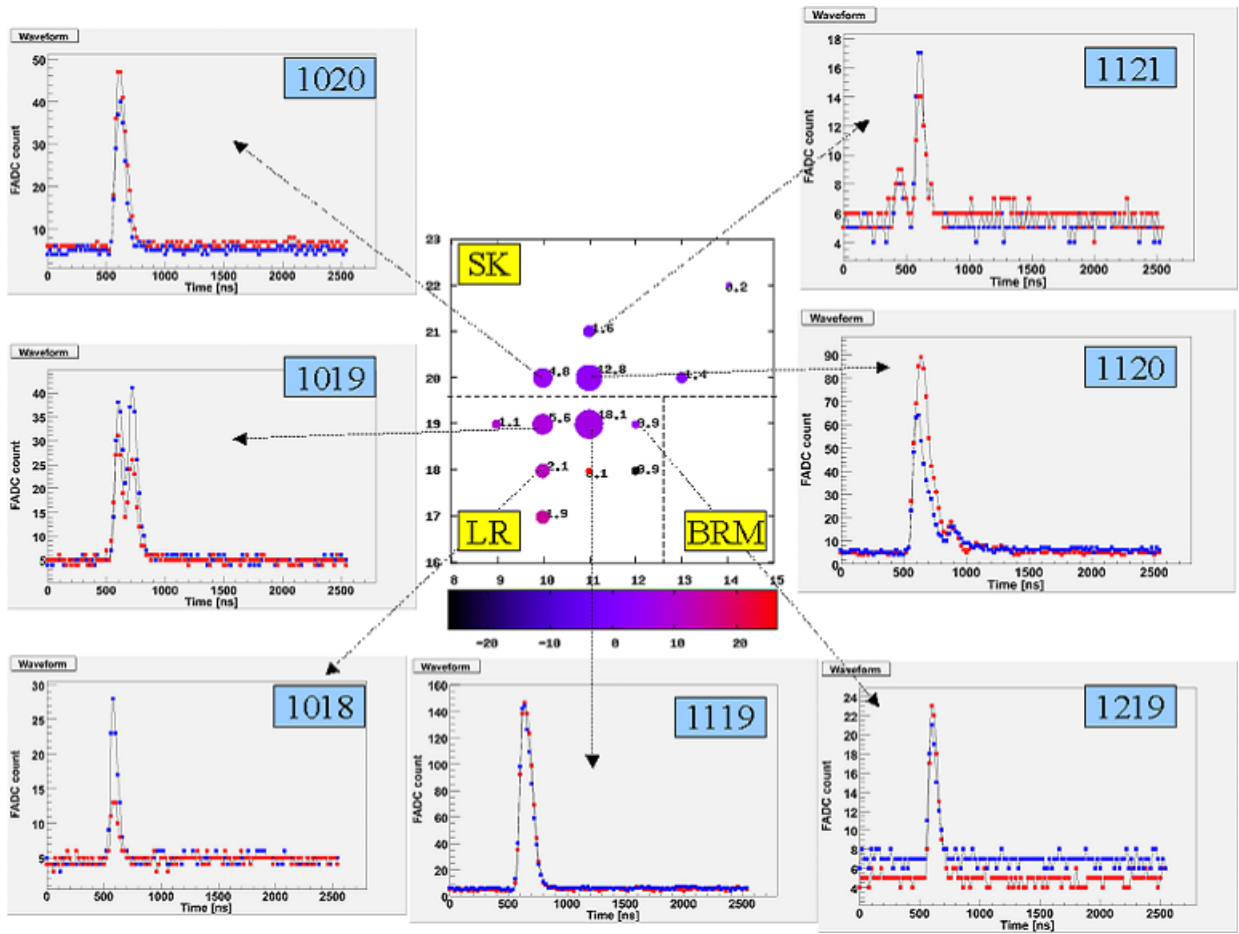


図 6.10 2008 年 11 月 26 日 22 時 47 分のイベント。各領域だけでは隣接で 3MIP を超えていないが、SD#1019、SD#1119、SD#1020、SD#1120 で  $8\mu\text{s}$  以内に SD が隣接 3 台以上で 3MIP 以上を満たし境界越しにトリガーがかかった事がわかる。

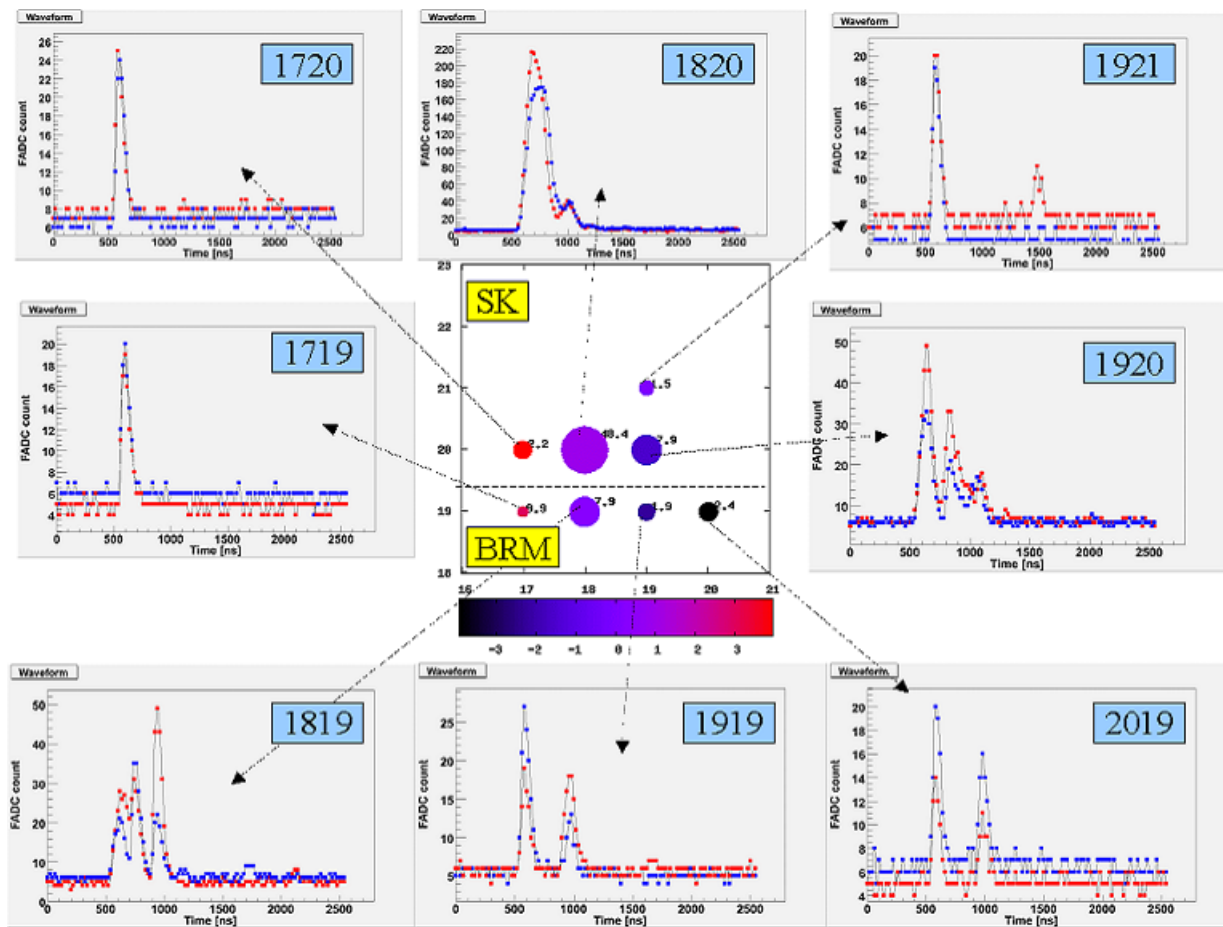


図 6.11 2008 年 12 月 13 日 13 時 23 分のイベント。各領域だけでは隣接 3MIP を超えていないが、SD#1819、SD#1820、SD#1920 が境界越してトリガー条件を満たしトリガーがかかった。

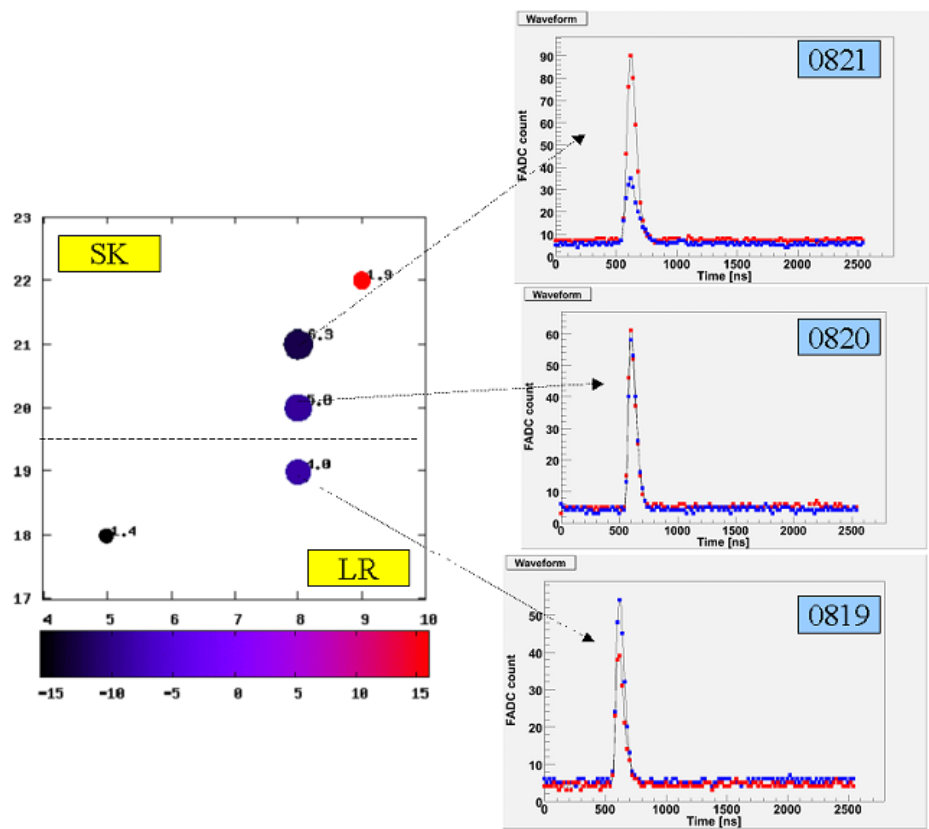


図 6.12 2008 年 11 月 28 日 20 時 19 分のイベント。SD#0821、SD#0820、SD#0819 のライントリガーパターンでトリガーがかかった。

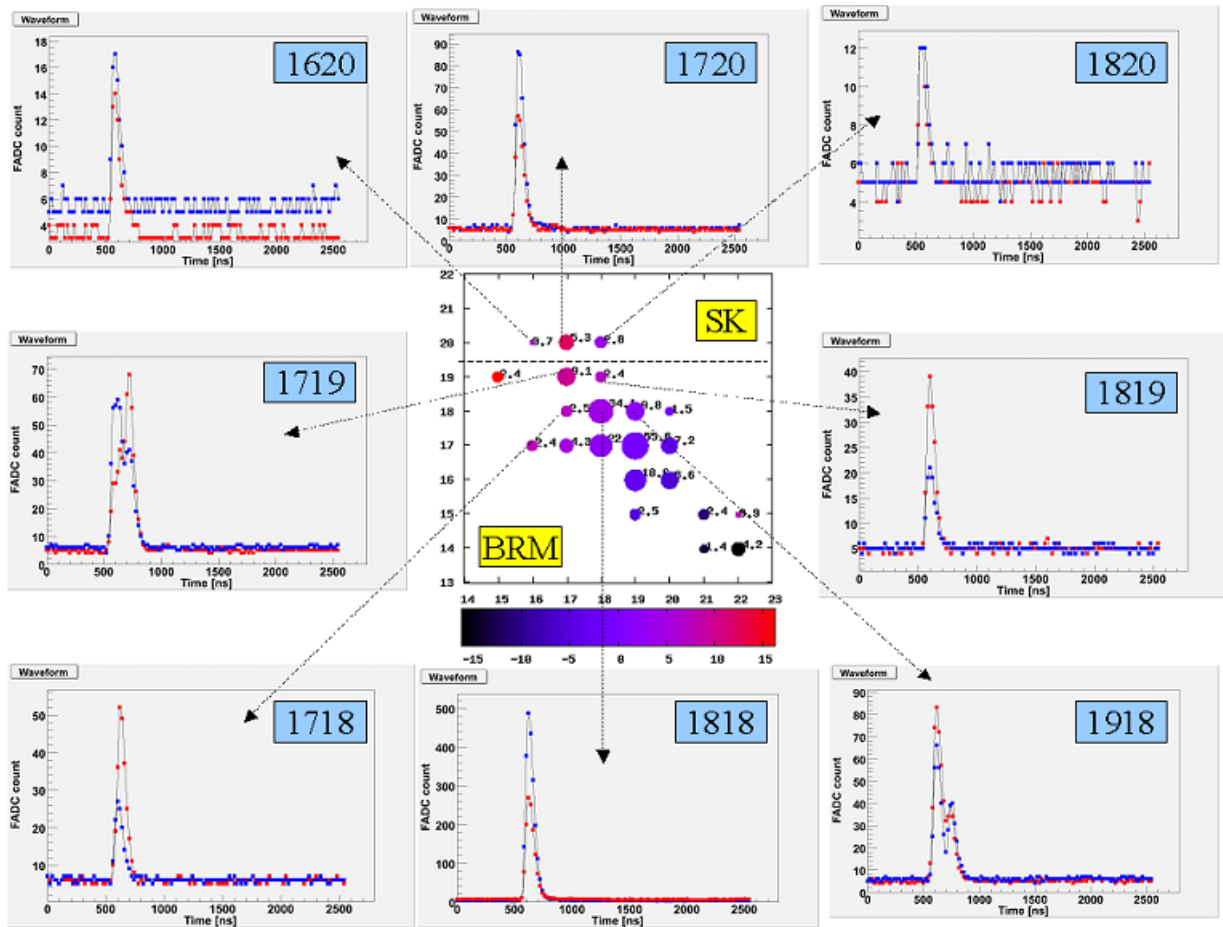


図 6.13 2008 年 11 月 28 日 23 時 35 分のイベント。境界領域ではトリガーがかかっていないが BRM 領域 (中央の図の破線の下側) でトリガーがかかったため SK 領域 (中央の図の破線の上側) でも波形情報収集を行うことが出来た。



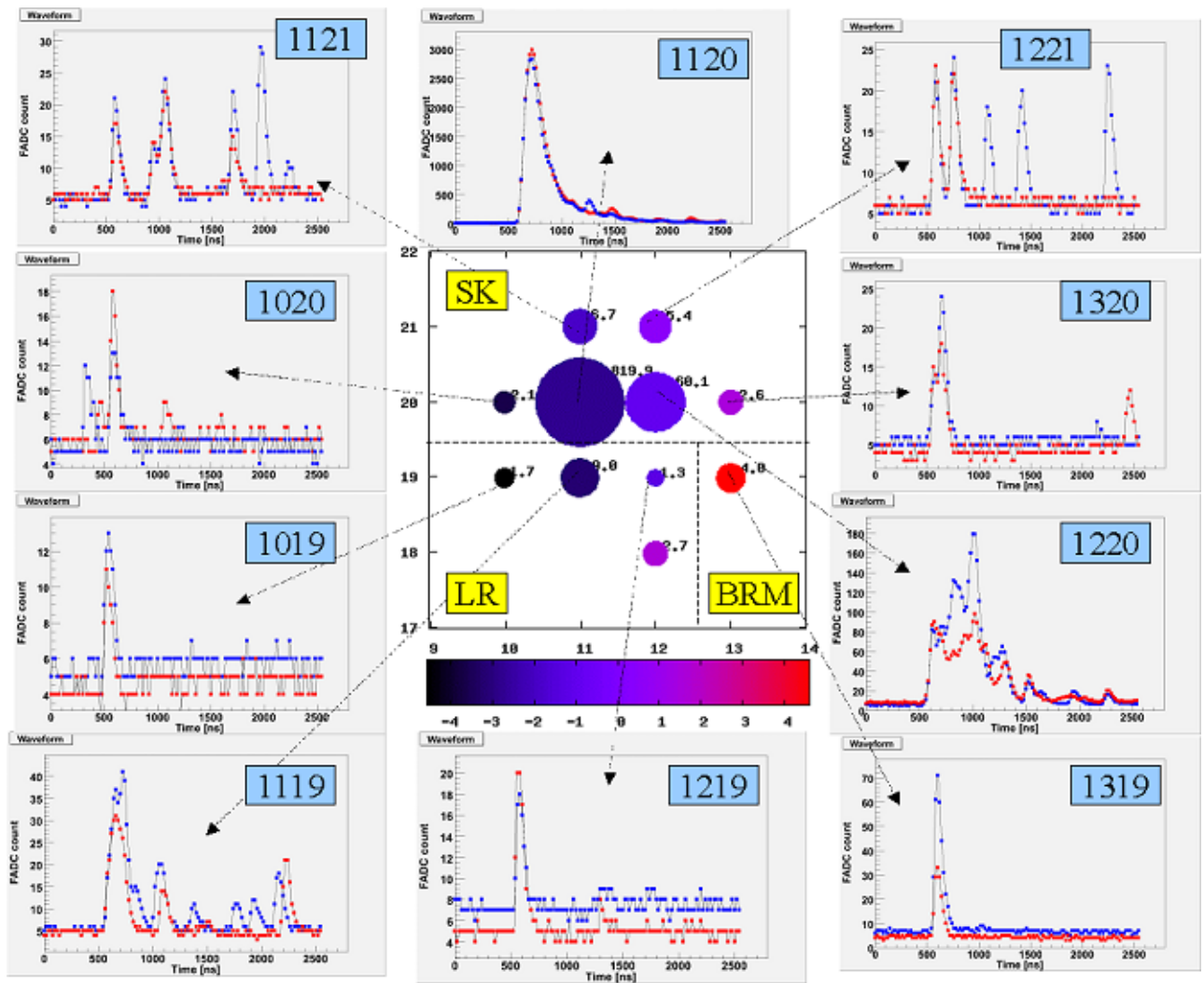


図 6.14 2008 年 12 月 04 日 14 時 49 分のイベント。SK 領域の SD#1120、SD#1220、SD#1121 でトリガーがかかり全領域で波形情報収集が行われた。境界トリガーでもトリガーがかったが (SD#1120、SD#1220、SD#1119) 波形情報収集は一度しか行われていない。

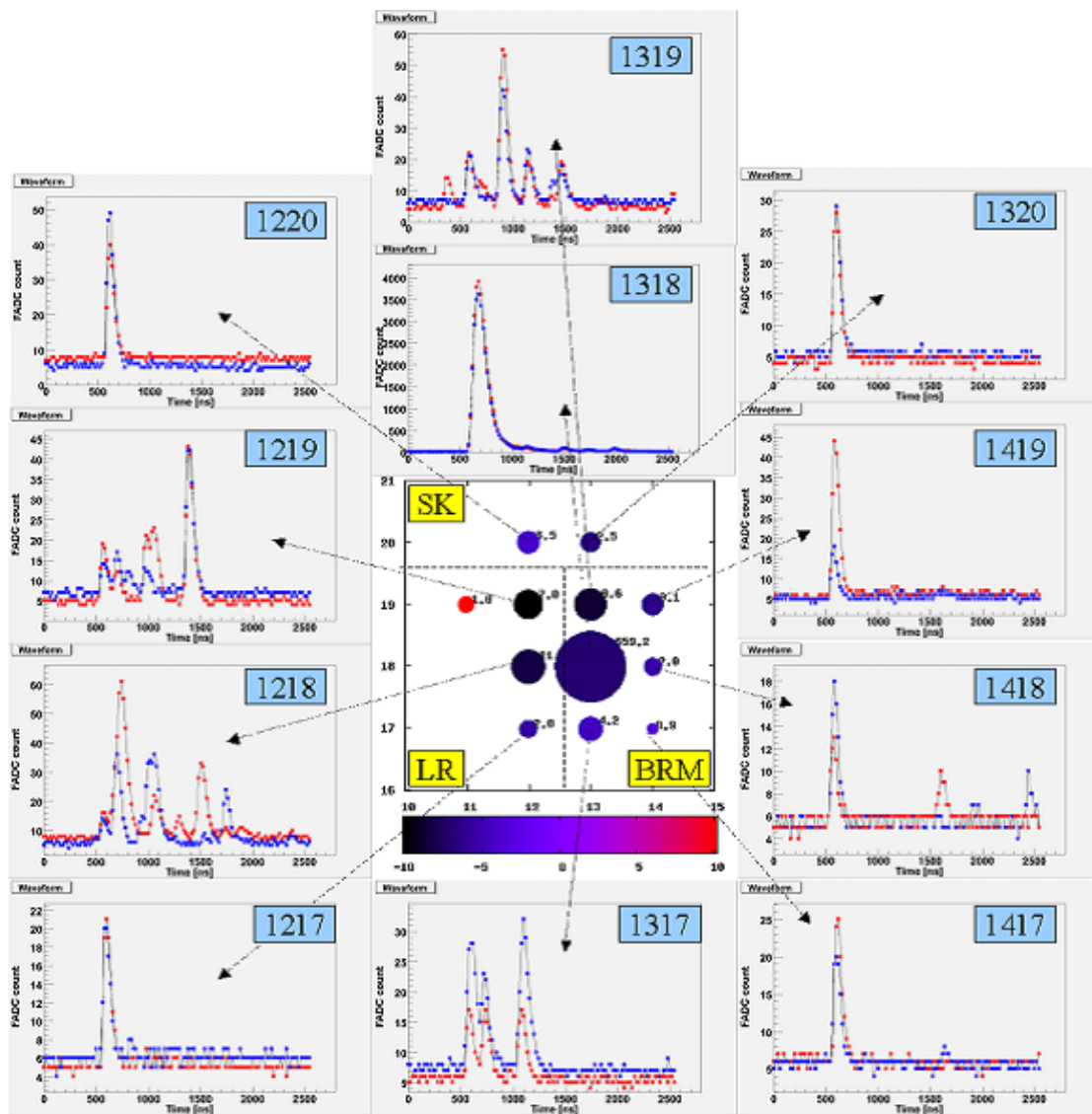


図 6.15 2008 年 12 月 04 日 16 時 40 分のイベント。BRM 領域の SD#1318、SD#1319、SD#1419 でトリガーがかかり全領域で波形情報収集が行われた。