

TA×4実験のための
境界トリガーシステムの開発

(Development of a boundary trigger system for the TA×4
experiment)

理学研究科

数物系専攻

松宮弘幸

目次

第1章	宇宙線	1
1.1	宇宙線	1
1.1.1	宇宙線のエネルギースペクトル	2
1.1.2	宇宙線の加速機構	2
1.2	宇宙線観測と空気シャワー現象	4
1.2.1	空気シャワー現象	4
1.2.2	空気シャワーの縦方向発達	6
1.2.3	空気シャワーの横方向分布	7
1.2.4	空気シャワーの観測方法	8
1.3	最高エネルギー宇宙線観測の現状	10
1.3.1	エネルギースペクトル	11
1.3.2	ホットスポット	11
第2章	TA×4 実験	13
2.1	TA 実験	13
2.2	TA×4 実験	15
2.2.1	TA×4 実験の目的：核種組成を指標とした異方性の探索	15
2.2.2	TA×4 実験の概要	15
2.2.3	TA×4 実験の地表検出器	19
2.3	TA×4 実験の空気シャワーアレイとトリガー DAQ サイクル	21
2.3.1	TA×4 実験の地表検出器	21
2.3.2	SD エレクトロニクス	23
2.3.3	中央データ収集塔(タワー)の基本構成	24
2.3.4	トリガー DAQ サイクル	26
2.3.5	トリガー DAQ サイクルにおける各種トリガー	27
2.3.6	モニターデータとモニタリングシステム	30
第3章	TA×4 実験における境界トリガーシステム	35
3.1	TA×4 実験の SD の検出面積	36
3.2	TA×4 実験における境界トリガーシステムの概要	40
3.2.1	セントラル PC の決定	40
3.2.2	境界トリガー判定条件	40
3.2.3	境界トリガーシステムのデザイン	42
第4章	境界トリガーシステムの実装に向けて	45
4.1	共有メモリを用いたホスト PC、セントラル PC 間の通信	45
4.2	境界トリガー判定の追加	48

4.3 今後	49
第 5 章 結論	50

要旨

宇宙線は宇宙を飛び交う高エネルギーの陽子や原子核であり、地球に絶え間なく降りそそいでいる。これまで 10^{20} eV を超える宇宙線 (最高エネルギー宇宙線) が観測されているが、これは人類が加速器で実現できるエネルギーの 1000 万倍にもおよび、その起源は宇宙線物理学の最大の謎の 1 つである。

北半球最大の 700 km^2 の宇宙線観測装置を運用している Telescope Array (TA) 実験は、 5.7×10^{19} eV 以上の宇宙線の到来方向が特定の領域に集中するホットスポットの兆候を見出している [1]。そこで、この兆候をとらえた到来方向の非等方性 (異方性) を有意に検証するために、TA 実験の観測面積を拡張することで、最高エネルギー宇宙線の事象数を 4 倍増させることを目的として TA×4 計画が進められている。TA×4 計画は TA 実験サイトの北側と南側に、12 基の大気蛍光望遠鏡 (Fluorescence Detector, FD) と 500 台の地表検出器 (Surface Detector, SD) を増設する計画である。現在は 12 基の FD と 257 台の SD が現地に設置され、定常観測が行われている。

TA×4 実験の北側、南側の SD アレイはそれぞれ 3 つの領域に分かれていて、現在は領域ごとに独立にトリガー判定とデータ収集が行われており、領域の境界を含めた SD アレイ全体を一つのシステムとして動かすことができていない。そのため領域の境界に落ちた宇宙線イベントは取得する事ができていなかった。

本研究の課題は、3 つの領域が独立して稼動している 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、境界にまたが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、開発を行った。このシステムが完成することで、検出面積が 1.2 倍に広がり取得できる宇宙線イベントの数も増えることが期待できる。

第1章 宇宙線

1.1 宇宙線

宇宙線とは、宇宙空間を飛び交う高エネルギーの粒子であり、1912年にオーストリアの物理学者 V.F.Hess によって発見された。宇宙線の主成分は陽子やその他の原子核であり、 10^8 eV から 10^{20} eV 以上までの広範囲のエネルギーで観測されている。宇宙線は大まかに一次宇宙線と二次宇宙線とに分かれる。一次宇宙線とは宇宙空間から地球に到来する放射線の総称であり、この一次宇宙線が地球の大気中の粒子と相互作用することによって、大規模な二次現象 (空気シャワー) を引き起こす。この時に発生した二次粒子のことを二次宇宙線と呼ぶ。宇宙線の地球への到来頻度はエネルギーのおよそ3乗に比例して減少していることが知られている (図 1.1)。

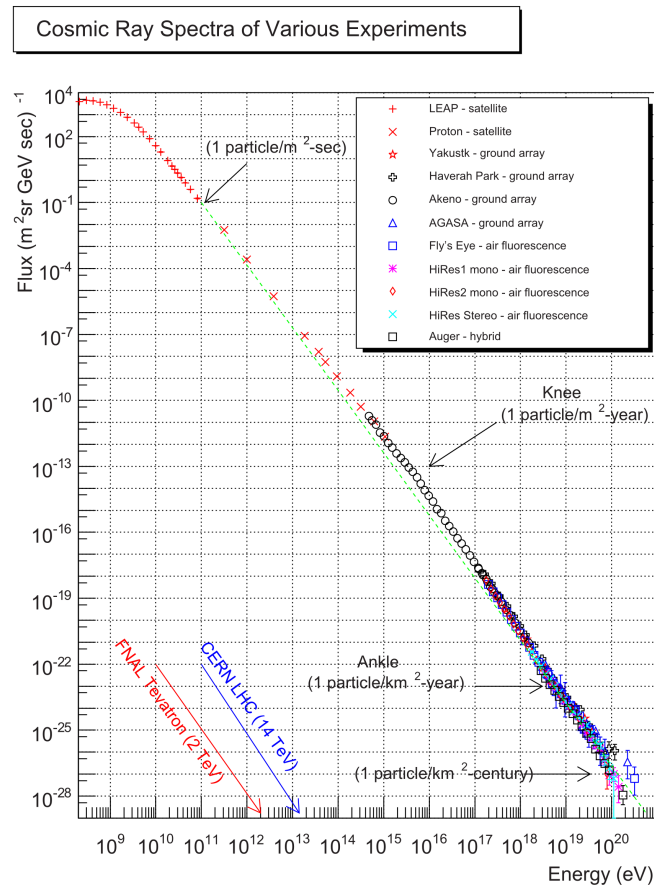


図 1.1: 一次宇宙線のエネルギースペクトル [2]

1.1.1 宇宙線のエネルギースペクトル

太陽活動の影響を受けない 10^{10} eV を超えるエネルギー領域では、宇宙線の到来頻度はエネルギーのべき乗で近似できることが知られている。

$$F(E) = K \times E^{-\gamma} \quad (1.1)$$

γ はほぼ 3 であるが、エネルギー領域によってわずかに異なる。宇宙線のスペクトルの構造を明確にするために、到来頻度に E^3 をかけたものを図 1.2 に示す。図 1.2 はいくつかの折れ曲がり構造が見られ、 $10^{17.5}$ eV あたりを”2nd knee”、 $10^{18.5}$ eV あたりを”ankle”、 $10^{19.5}$ eV あたりを”cut off”と呼ぶ。

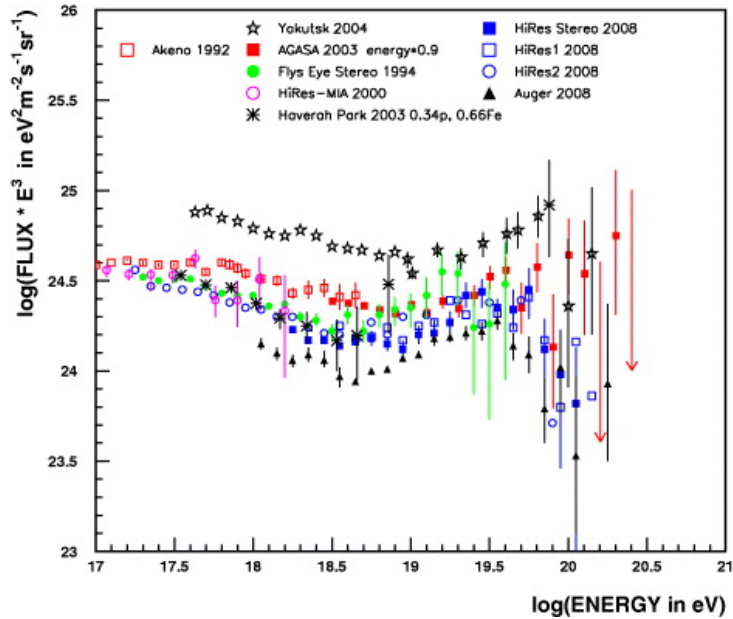


図 1.2: 一次宇宙線の到来頻度に E^3 をかけたもの [3]

$10^{18.5}$ eV 付近の折れ曲がり構造”ankle”の原因についても複数のモデルがある。1つは銀河系内起源の宇宙線に対して銀河系内への閉じ込め効果が効きにくくなることで、このエネルギーを境に銀河系内起源の宇宙線から銀河系外起源の宇宙線へと遷移しているという考え方である。この場合は ankle 周辺での宇宙線の到来方向に銀河円盤に対する異方向性が検出され、化学組成は1次エネルギーの増加とともに重い原子核から陽子や軽い原子核へと変化すると期待される。

1.1.2 宇宙線の加速機構

宇宙線の加速機構については多くの議論がなされているが、未だに解明されていないことが多い。また先に述べたようにべき型のエネルギースペクトルを満たすことが必須の条件である。現在、加速機構として有力だと考えられているのが”フェルミ加速機構”である。

フェルミ加速

フェルミ加速は1949年にE.Fermiによって提唱された荷電粒子加速理論で、荷電粒子が星間磁気雲との衝突を繰り返すことで運動エネルギーを獲得し、加速されるという統計加速モデルであ

る。フェルミ加速機構によると、星間雲と荷電粒子の衝突方向はランダムであるが、1つの粒子の1回の衝突あたりの平均的なエネルギー増加量 ΔE は正であり、 $\Delta E = \alpha E$ と粒子のエネルギーに比例することが示される。星間雲との衝突による加速はこの α が星間雲の移動速度の2乗に比例することから、2次フェルミ加速と呼ばれる。しかし、この2次フェルミ加速では加速効率が悪いいため宇宙線のスペクトルを再現することが難しい。したがって実際の宇宙線加速モデルとしては、超新星爆発などにより生じるプラズマ衝撃波による加速が有力であると考えられている。この場合、加速領域の形状の考察から α が衝撃波の移動速度の1乗に比例することが示され、1次フェルミ加速と呼ばれる。

荷電粒子の初期エネルギーを E_0 とし、荷電粒子が衝撃波との1回の衝突で $\Delta E = \alpha E$ のエネルギーを獲得するとすると、 n 回の衝突後の粒子のエネルギー E_n は以下ようになる。

$$E_n = E_0 (1 + \alpha)^n \quad (1.2)$$

よって、エネルギーが E になるのに必要な衝突回数は、

$$n = \frac{\ln(E/E_0)}{\ln(1 + \alpha)} \quad (1.3)$$

となる。

ここで、1回の衝突で加速領域から逃げ出す確率を P_{esc} とおくと、 n 回衝突後に加速領域に留まる確率は $(1 - P_{\text{esc}})^n$ となる。 E 以上のエネルギーに加速される粒子の割合は、

$$N(\geq E) \propto \sum_{m=n}^{\infty} (1 - P_{\text{esc}})^m = \frac{(1 - P_{\text{esc}})^n}{P_{\text{esc}}} \quad (1.4)$$

である。式(1.3)を式(1.4)に代入すると、

$$N(> E) \propto \frac{1}{P_{\text{esc}}} \frac{E^{-\gamma}}{E_0} \quad (1.5)$$

となる。ここで、

$$\gamma = \frac{\ln[(1 - P_{\text{esc}})^{-1}]}{\ln(1 + \alpha)} \approx \frac{P_{\text{esc}}}{\alpha} \quad (1.6)$$

である。このようにして、フェルミ加速ではベキ型のエネルギースペクトルが自然に導き出される。

宇宙線の加速モデル

宇宙線を超新星爆発による一次フェルミ加速の最高エネルギー以上の高エネルギーにまで加速するメカニズムに関しては、未だ理論的にも観測的にも謎の部分が多い。銀河系外の活動銀河核として知られる極めて活発な天体などが加速源として有力視されているが、未だ同定にはいたっていない。このように低いエネルギーの粒子を高エネルギーにまで加速させるという考え方は宇宙線起源のボトムアップモデルと呼ばれている。これとは逆に極めて大きな質量の未知の素粒子や暗黒物質が崩壊して超高エネルギー宇宙線が作られるという考え方はトップダウンモデルと呼ばれている。最近の研究ではトップダウンモデルは否定的になっている [4]。

1.2 宇宙線観測と空気シャワー現象

1.1 節で述べたように、宇宙線の到来頻度(フラックス)はほぼ E^{-3} に比例して減少するので、 10^9 eV から 10^{20} eV のエネルギー領域ではフラックスが 10^{30} 違う。低エネルギーの宇宙線は到来頻度が高く、大気原子核との相互作用によるエネルギー損失によって地上まで到達できない。したがって、 10^{14} eV 以下の低エネルギー宇宙線は、超高層大気または宇宙空間で飛行体搭載検出器(気球、人工衛星、宇宙ステーション等)によって直接観測される。しかし 10^{14} eV 以上の高エネルギー宇宙線は到来頻度が少ないために、観測には大きな検出面積と長い時間が必要であり、飛行体搭載検出器による直接観測は難しい。しかし、一次宇宙線が大気と相互作用してできる二次宇宙線群(空気シャワー)が地表に到来するのでこれを利用した間接観測が行われている。

1.2.1 空気シャワー現象

大気中に一次宇宙線が入射すると、大気中の原子核と相互作用して二次宇宙線を生成する。さらにこれらの二次宇宙線も大気中の原子核と相互作用を起こし、粒子を生成していく。この過程を繰り返し、一次宇宙線が大量の二次粒子群となる現象を空気シャワー現象と呼ぶ。この様子を模式的に表したものが図 1.3 である。

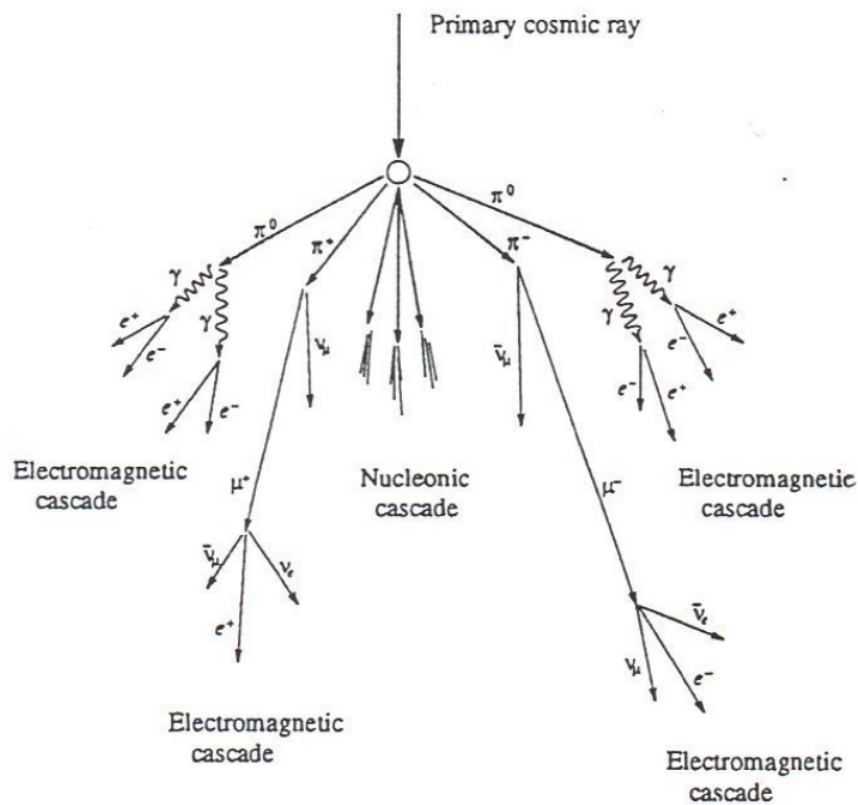


図 1.3: 空気シャワーの模式図

核カスケード

宇宙線の主成分である陽子などの原子核が大気原子核と衝突すると、陽子や中性子を叩き出し、また π 、K などのハドロンの多重生成 (核カスケード) を起こす。核カスケードで生成された二次粒子の大部分は結果的に π となる。これを π 中間子の多重発生と呼んでいる。

$$p^+ + p^+ \rightarrow p^+ + n + \pi^+ \quad (1.7)$$

$$n + p^+ \rightarrow p^+ + p^+ + \pi^- \quad (1.8)$$

$$n + p^+ \rightarrow p^+ + n + \pi^0 \quad (1.9)$$

そのうち π^0 は短い寿命 (8.4×10^{-17} s) で 2 個のガンマ線に崩壊し、電磁カスケードを形成する。 π^\pm の寿命は 2.60×10^{-8} s で、

$$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu \quad (1.10)$$

のように崩壊し、 μ^\pm を生成する。 μ^\pm の寿命は 2.20×10^{-6} s で、

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e \quad (1.11)$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e \quad (1.12)$$

のように崩壊する。大気の厚みは核相互作用の平均自由行程の約 10 倍であるため、相互作用が繰り返されることで多数の粒子が生成される。

電磁カスケード

高エネルギーのガンマ線は電子対生成によって電子と陽電子を作る。そして生成されたこれらの電子と陽電子は制動放射によってガンマ線を放出する。エネルギー E の電子による制動放射の断面積 $\sigma_{\text{brems.}}$ は、次のように Bethe-Heitler の式で表される。

$$\sigma_{\text{brems.}}(E, \nu) d\nu = \frac{4Z^2 r_e^2}{137} \frac{d\nu}{\nu} \left[\left(1 + (1 - \nu)^2 - \frac{2}{3} (1 - \nu) \right) \ln \left(184Z^{-\frac{1}{3}} \right) + \frac{1}{9} (1 - \nu) \right] \quad (1.13)$$

ここで、 ν は $h\nu/E$ 、 ν は制動放射される光子の振動数、 Z はターゲットとなる原子核の原子番号、 r_e は古典電子半径である。制動放射による単位厚さ当たりのエネルギー損失 $(dE/dX)_{\text{brems.}}$ は以下のように表される。

$$\left(\frac{dE}{dX} \right)_{\text{brems.}} \simeq -\frac{E}{X_0} \quad (1.14)$$

ここで、 X_0 は電子のエネルギーが $1/e$ になる厚さで放射長と呼ばれ、以下のように定義される。

$$\frac{1}{X_0} = \frac{4Z^2 r_e^2 N}{137 A} \ln \left(184Z^{-\frac{1}{3}} \right) \quad (1.15)$$

ここで、 N はアボガドロ数、 A はターゲット原子核の質量数である。 X_0 は大気ではおよそ 38 g/cm^2 である。一方、電子対生成の断面積 σ_{pp} は、

$$\sigma_{\text{pp}}(h\nu, u) du = \frac{4Z^2 r_e^2}{137} du \left[\left(u^2 + (1 - \nu)^2 - \frac{2}{3} (1 - \nu) \right) \ln \left(184Z^{-\frac{1}{3}} \right) + \frac{1}{9} (1 - u) \right] \quad (1.16)$$

となる。ここで、 $u = E/h\nu$ 、 E は生成される電子のエネルギーをあらわす。この断面積から電子対生成の interaction length が求められ、結果として輻射長を使って、

$$\left(\frac{dE}{dX}\right)_{\text{pair}} = -\frac{7}{9} \frac{E}{X_0} \quad (1.17)$$

となる。従って、電子対生成と制動放射の interaction length は同程度であることがわかる。この二つの過程を繰り返して、多数の電子、陽電子、ガンマ線がつくられる現象を電磁カスケードと呼ぶ。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て粒子総数が減少する。この境目のエネルギーを臨界エネルギー E_c と呼び、空気中では $E_c \simeq 85 \text{ MeV}$ である [6]。一次宇宙線が原子核の場合の空気シャワーは核カスケードと電磁カスケードから構成され、ハドロンシャワーと呼ばれる。一方、一次宇宙線がガンマ線であった場合の空気シャワーは電磁カスケードのみで構成され、電磁シャワーと呼ばれる。

1.2.2 空気シャワーの縦方向発達

空気シャワーが大気中を進むにつれてその粒子数は増大していくが、いつまでも粒子数が増えていくというわけではない。それは、空気シャワー中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が減少していくからである。高エネルギーの電子は主に制動放射によってエネルギーを失っていくが、制動放射よりも電離損失が支配的になる臨界エネルギー E_c (空気中では $E_c \simeq 85 \text{ MeV}$) にまでエネルギーが下がると、粒子数は増えることなくエネルギーを失って大気に吸収されてしまう。したがって、シャワー中の粒子の総数はある段階で減少に転じる。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 E_0 の1個のガンマ線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達には、次の近似式が用いられる。

$$N_e(t) \sim \frac{0.31}{\sqrt{y}} \exp \left[t \left(1 - \frac{3}{2} \ln s \right) \right] \quad (1.18)$$

$$y = \ln \left(\frac{E_0}{E_c} \right) \quad (1.19)$$

$$s = \frac{3t}{t + 2y} \quad (1.20)$$

ここで t は電子の大気中での輻射長 38 g/cm^2 を単位とするシャワーが通過した大気厚さであり、 s はシャワーの発達段階を表すパラメータでエイジパラメータと呼ばれる。このシャワーエイジは N_e (全電子・陽電子数) が最大になるときに $s = 1$ となるパラメータである [7]。

一次宇宙線が陽子の場合に生成される空気シャワーについては、Gaisser と Hillas の提案に基づく以下の式が用いられることが多い。

$$N_e(X) = N_{\text{max}} \left(\frac{X - X_0}{X_{\text{max}} - X_0} \right)^{\frac{X_{\text{max}} - X_0}{\lambda}} \exp \left(-\frac{X_{\text{max}} - X}{\lambda} \right) \quad (1.21)$$

ここで、 N_{max} はシャワーの最大発達時の粒子数、 X_{max} はシャワー最大発達深さ [g/cm^2]、 X_0 は一次宇宙線の最初の相互作用点の深さ [g/cm^2]、 λ は縦方向発達の減衰長 (attenuation length) で 70 g/cm^2 である。 N_{max} は一次宇宙線のエネルギーに依存しており、およそ $N_{\text{max}} \sim 2 \times E_0 \times 10^{-9}$ (E_0 は一次宇宙線のエネルギー、単位：eV) の関係がある。また、一次宇宙線のエネルギーが同一で

ある場合、一次宇宙線の粒子種の違いは X_0 、 X_{\max} に現れ、重い原子核ほど X_0 、 X_{\max} の値が小さくなる。これは、重い原子核ほど大気との相互作用断面積が大きいためにより上空で発達が始まること、さらに核子当たりのエネルギーが小さいため、エネルギーの細分化が早く進むことが原因である。単純なモデル計算から、 X_{\max} は $\ln(E_0/A)$ (A は一次宇宙線の質量数) の一次関数で表せることが示される。陽子、鉄原子核による空気シャワーをシミュレーションして求めた縦方向発達曲線を図 1.4 に示す。

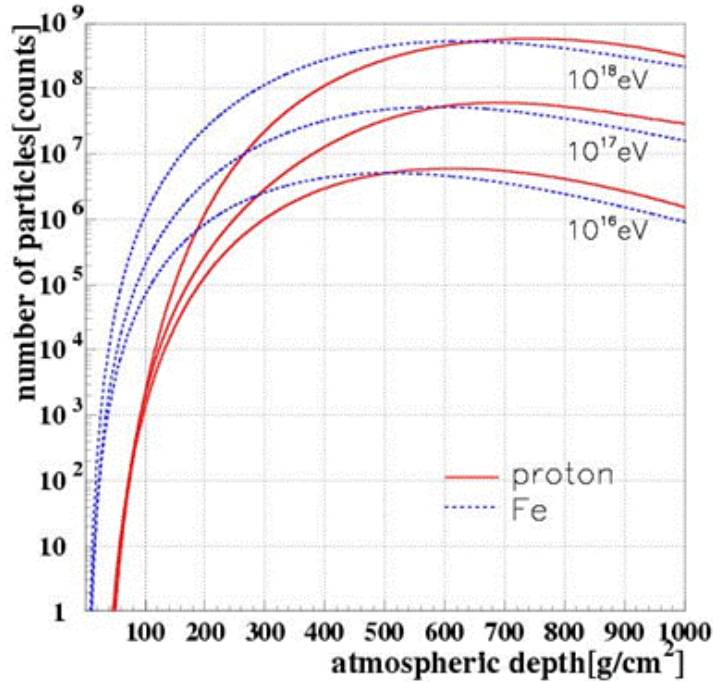


図 1.4: 空気シャワーの縦方向発達

1.2.3 空気シャワーの横方向分布

空気シャワーのシャワー軸と垂直な方向の粒子密度分布を横方向分布 (lateral distribution) と呼ぶ。空気シャワーの横方向分布は電磁シャワーとハドロンシャワーで異なる。

電磁カスケードは電荷を持った粒子が大量に発生するために、多重クーロン散乱によりシャワー粒子は横方向に広がっていく。電磁カスケードの横方向分布は西村と鎌田によって解析的に求められ [8]、Greisen により整理された NKG function が一般的によく使われる [9]。これによると電磁カスケードの中心からの距離 R の位置での電子数密度 $\rho_e(R)$ は次式で表される。

$$\rho_e(R) = C \frac{N_e}{R_M^2} \left(\frac{R}{R_M} \right)^{s-2.0} \left(1 + \frac{R}{R_M} \right)^{s-4.5} \quad (1.22)$$

ここで、 N_e は総荷電粒子数、 C は規格化定数、 s はエイジパラメータ、 R_M はモリエールユニットである。モリエールユニットは、電子が X_0 進む間にクーロン散乱により最初の進行方向とは垂直の方向にずれる距離 (厚さ) に相当し、 $R_M \sim 9.3 \text{ g/cm}^2$ である。電磁シャワーは電磁カスケードのみで構成されるのでこれで良いが、ハドロンシャワーは純粋な電磁シャワーとは少し様相が異なる。

ハドロンにより引き起こされる空気シャワーの電磁成分は、核相互作用によって生成された多世代の π_0 の崩壊からの電磁カスケードの重ね合わせであり、電磁シャワーとは異なる。シャワーの中心部は核カスケードが発達する過程で次々に生成される π_0 の崩壊による発達途上の電磁カスケードが主成分であるが、シャワー軸から離れたところでは核カスケードの初期段階で生成された π_0 の崩壊による粒子の増殖が終わった電磁カスケードが主成分となる。これにより、シャワー中心から遠く離れた場所での横方向分布は、NKG function の外挿により得られる分布よりフラットになることが予想される。このシャワー中心から遠方での横方向分布を考慮した式が Linsley により与えられている [10]。これによるとシャワー中心からの距離 R における電子数密度 $\rho_e(R)$ は

$$\rho_e(R) \propto \left(\frac{R}{R_M}\right)^{-\alpha} \left(1 + \frac{R}{R_M}\right)^{-(\eta-\alpha)} \quad (1.23)$$

と表される。2004 年まで日本で稼働していた空気シャワー観測実験である”AGASA”のグループは、電子成分の横方向分布は 1 km より遠いところで粒子数密度が減少しているため、式 (1.23) ではその構造を十分に表すことができず、横方向分布に以下のように補正項を加えるべきであることを示した [10]。

$$\rho_e(R) = C \left(\frac{R}{R_M}\right)^{-1.2} \left(1 + \frac{R}{R_M}\right)^{-(\eta-1.2)} \left(1.0 + \left(\frac{R}{1[\text{km}]}\right)^2\right)^{-\delta} \quad (1.24)$$

1.2.4 空気シャワーの観測方法

空気シャワーの観測方法には大きく分けて、空気シャワー粒子が大気中で発する紫外光 (大気蛍光) を光学望遠鏡でとらえる方法、地表に到達する空気シャワー粒子を地表粒子検出器により検出する方法の 2 種類がある。

大気蛍光を用いた観測

大気蛍光を用いた観測では、空気シャワー粒子の電離損失の一部が光に変換されることを利用する。高エネルギーの荷電粒子が大気中を通過すると、その軌跡の近傍にある窒素などの大気分子中の電子は励起し、この電子が低い準位に落ちるときにエネルギーを蛍光として放出する。すなわち、大気は宇宙線に対してシンチレータとして働く。80 MeV の電子が 1 気圧の大気中を 1 m 通過した場合に発せられる大気蛍光光子数はおよそ 4 個であるが、一次宇宙線のエネルギーが 10^{20} eV の場合、膨大なシャワー粒子数のために全体での光子数は 2×10^{15} 個に達し、その発光継続時間は $30 \mu\text{s}$ 程度になる。これを光学望遠鏡で集光し高感度で高速の光センサーカメラで撮像すれば、およそ 30 km 遠方からでも観測することができる。また、大気蛍光の放射は等方的であるので一次宇宙線の到来方向によらず観測を行うことができる。

大気蛍光を用いた観測による一次宇宙線の各種情報の推定は、大きく分けて「空気シャワー軸の再構成」と「空気シャワーの縦方向発達の再構成」の 2 段階を経て行われる。まず宇宙線の到来方向 (=空気シャワー軸) の再構成を蛍光の軌跡から求める。特に、遠く離れた 2 台の望遠鏡でシャワーをステレオ観測すると、それぞれの望遠鏡が決めたシャワー平面の交線がシャワー軸となる (図 1.5)。

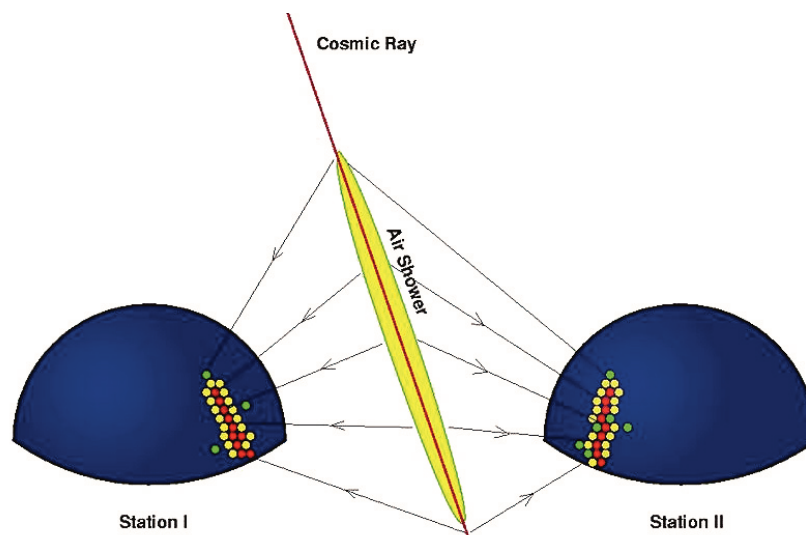


図 1.5: 大気蛍光による空気シャワーのステレオ観測の概念図

空気シャワー軸を決定した後、さらに次のような手順で空気シャワーの縦方向発達の再構成をする。

- i. 空気シャワー中の電子 1 個から光電子増倍管に到達する光子数の期待値を、その電子の空間的な位置、望遠鏡までの距離から大気による散乱・吸収、装置の検出効率などを考慮して計算する。この光子数には大気蛍光だけでなく、チェレンコフ光も考慮する。
- ii. 実際に光電子増倍管で検出された光電子数と i. で計算される値を比較し、空気シャワーの各発達点での電子数を見積もり、式 (1.21) と比較することでシャワー発達曲線 $N_e(X)$ 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、シャワー中の電子成分の電離損失によるものである。したがって、求められたシャワー発達曲線 $N_e(X)$ から式 (1.25) により一次宇宙線のエネルギー E_0 が決まる。

$$E_0 = \frac{\epsilon_0}{X_{\text{rad}}} \int N_e(X) dX \quad (1.25)$$

ここで、 X_{rad} は大気中での輻射長で 38.0 g/cm^2 、 ϵ_0 は大気に対する臨界エネルギーで 84 MeV である。また、シャワーの縦方向発達の様子 (特に最大発達深さ X_{max}) から、一次粒子の質量組成の測定が可能である。

このように、大気蛍光を用いた観測では、シャワーの縦方向発達が観測できるので、地表検出器に比べると得られる情報量が多く、一次宇宙線のエネルギーも不定性の大きい高エネルギーハドロン相互作用の詳細に依存することなく決定できる。一次エネルギーは不定性の大きい高エネルギーハドロン相互作用の詳細に依存することなく決定される。しかし、この方法でエネルギーを決定するには、大気中の蛍光発光効率、紫外光の散乱・吸収率、鏡の反射率、フィルターの吸収率、光電子増倍管の量子効率などをすべて積み上げて掛け合わせていく必要があり、系統誤差を正しく管理することは容易ではない。

地表粒子検出器による観測

粒子検出器を地表に多数配置し、到来する空気シャワー粒子を検出する装置を空気シャワーアレイと呼ぶ。空気シャワーアレイは高エネルギー宇宙線の観測装置として伝統的に用いられてきた。空気シャワー粒子は、電磁成分(電子、陽電子、光子)とミューオン成分、さらに少量のハドロン成分からなる。

地表に設置する粒子検出器として、水タンクを用いたチェレンコフ光検出器やプラスチックシンチレータなどを用いたシンチレーション検出器などがある。水タンクを用いたチェレンコフ検出器は、ミューオンが電子に比べて媒質中を通過できるという特徴を利用することでミューオンに感度を持たすことができる。プラスチックシンチレータなどを用いたシンチレーション検出器は全ての荷電粒子に感度を持つが、特にミューオン成分のみを選択的に検出するために、鉛等でシールドされたシンチレーション検出器や比例計数管でミューオン検出器を構成し、別に配置する場合もある。プラスチックシンチレータの特徴としては、応答が ns のオーダーでありシグナルの立ち上がり立ち下がりともに非常に良いので時間情報を分解能良く測定できる点、形状加工が簡単な点があげられる。

空気シャワーの粒子群は図 1.6 のようにシャワー面を形成して地表に到来する。この厚みを考慮しつつ各検出器への到来時刻差から空気シャワーの到来方向を求める。また、一次宇宙線のエネルギーは、各検出器で検出された粒子数から空気シャワー全体の全粒子数と横方向分布を推定することで得られる。

しかし、全粒子数と横方向分布から一次宇宙線のエネルギーを推定するためには、ハドロン相互作用を考慮したモンテカルロ計算を必要とするので、ハドロン相互作用の不確定性の影響を受けることは避けられない。また、空気シャワー発達のゆらぎの影響も無視できない。

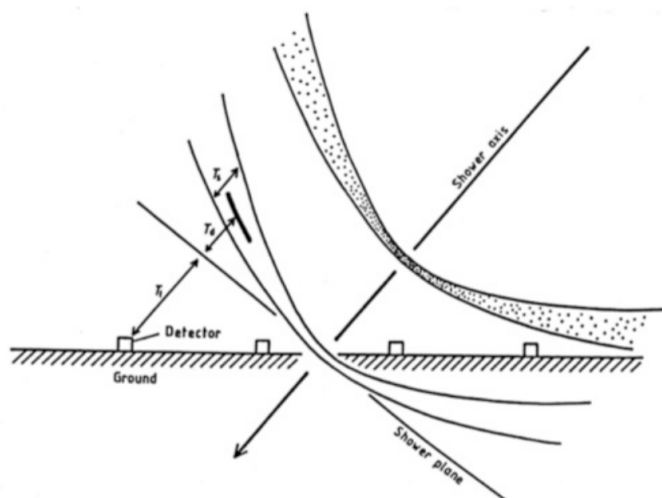


図 1.6: 地表付近の空気シャワー断面の概念図

1.3 最高エネルギー宇宙線観測の現状

10^{19} eV 以上の超高エネルギー宇宙線を観測している実験として、米国ユタ州で行われている Telescope Array(TA) 実験とアルゼンチンの Malargue(マラルグエ)で行われている Auger 実験が

存在している。TA 実験は北半球の空から到来する宇宙線を観測し、Auger 実験は南半球からの宇宙線を観測するという相補的な観測という側面を持っている。ここでは TA 実験で得られた結果について示す。

1.3.1 エネルギースペクトル

図 1.7 に 2008/05/11 から 2019/05/11 までの TA 実験の地表粒子検出器で取得されたデータから得られた宇宙線のエネルギースペクトルを示した。 p_1, p_2 は ankle の前後でのスペクトル指数であり、 E_A は ankle のエネルギーである。また、 p_3 は GZK cutoff 後のスペクトル指数であり、 E_2 は GZK cutoff のエネルギーである。 $10^{19.81}$ eV での GZK cutoff の有意度は 8.4σ と見積もられた。

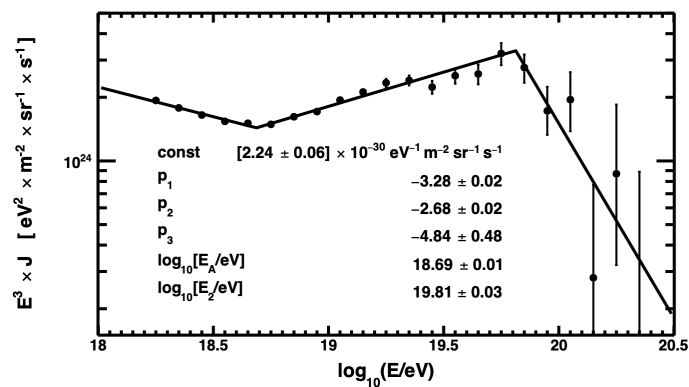


図 1.7: TA 実験 11 年間の観測より得られた 宇宙線のエネルギースペクトル [11]

1.3.2 ホットスポット

図 1.8 に TA 実験 11 年間で取得した 57 EeV 以上のエネルギーの宇宙線 168 事象の到来方向を示した。図 1.8 のそれぞれの到来方向に対して、半径 20 度の領域でオーバーサンプリングを行い、等方的な到来方向分布の場合に期待される数からのズレの有意度を示したのが図 1.9 である。有意度が最大となる方向が赤経 144.3 度、赤緯 40.3 度の方向で、この付近の赤い領域をホットスポットと呼んでおり、有意度は 2.9σ と見積もられた。

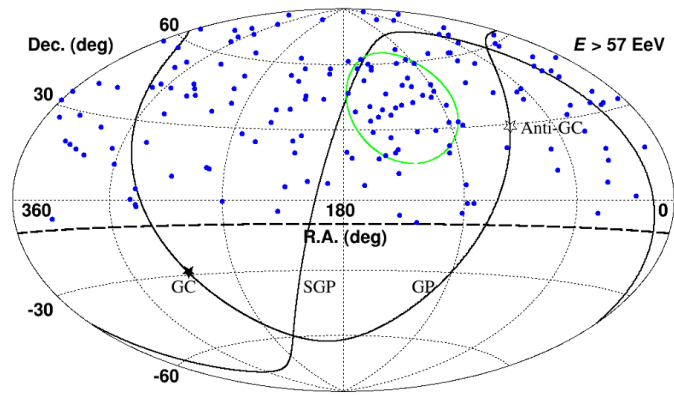


図 1.8: 最高エネルギー宇宙線 (57 EeV) の到来方向 [12]

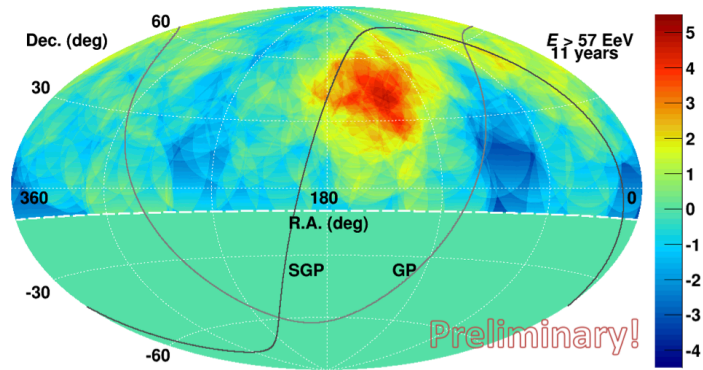


図 1.9: 一様な到来方向からの有意度マップ [12]

第2章 TA×4 実験

2.1 TA 実験

Telescope Array 実験 (TA 実験) は日米韓露ベルギーチェコの国際共同研究で、米国ユタ州に約 700 km^2 の空気シャワーアレイと、38 台の大気蛍光望遠鏡からなるハイブリッド観測装置 (図 2.2) を設置し、2008 年から定常観測を継続している。TA 実験はエネルギー決定精度にハドロン相互作用のモデル依存が少ない大気蛍光望遠鏡 (Fluorescence Detector, FD) と、稼働時間が長く大きな統計量が見込める地表検出器 (Surface Detector, SD) による空気シャワーアレイのお互いの利点を生かし、極高エネルギー宇宙線の空気シャワーを観測する実験である。SD アレイは 1.2 km 間隔で並べられた 507 台のプラスチックシンチレーション検出器からなり、検出面積は約 700 km^2 である。FD ステーションは SD アレイ周辺の 3ヶ所に約 35 km 間隔で設置され、方位角 108° 、仰角 $3^\circ - 33^\circ$ でアレイ上空を観測している。1つのステーションに 12 台または 14 台の望遠鏡が設置され、全部で 38 台である。地表近くで発生する霧などの影響を避けるために、ステーションは周囲から $100 - 200 \text{ m}$ 高い場所に置かれている。TA 実験の検出器配置を図 2.1 に示す。SD アレイ上空を FD の視野で覆い、到来する宇宙線を 2つの異なる検出器でハイブリッド観測することが可能となっている。また、TA 実験を低エネルギーに拡張した実験として、Telescope Array Lowenergy Expansion 実験 (TALE 実験) も行われている。

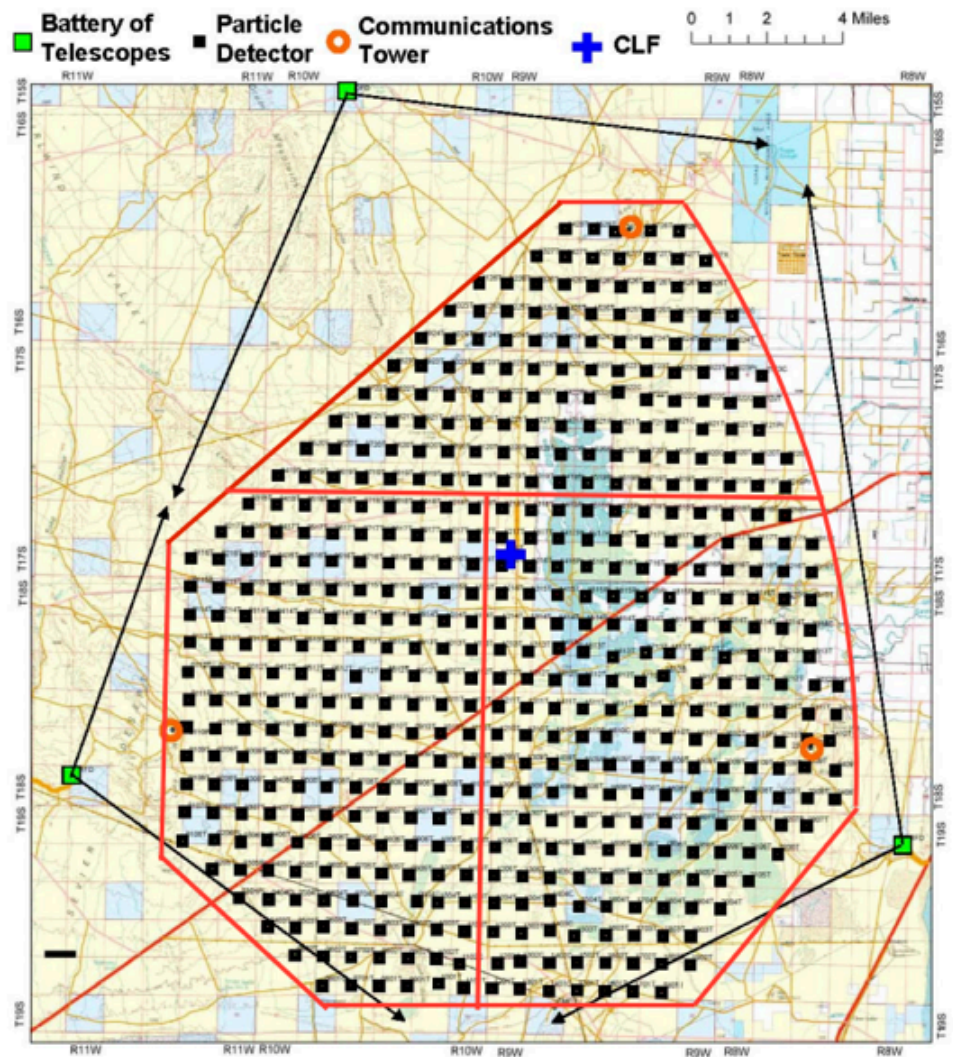


図 2.1: TA 実験における装置の配置図。黒の四角が SD の設置場所、黄緑の四角が大気蛍光望遠ステーション、橙丸が SD のデータ収集に使われる通信塔の設置場所を表している。

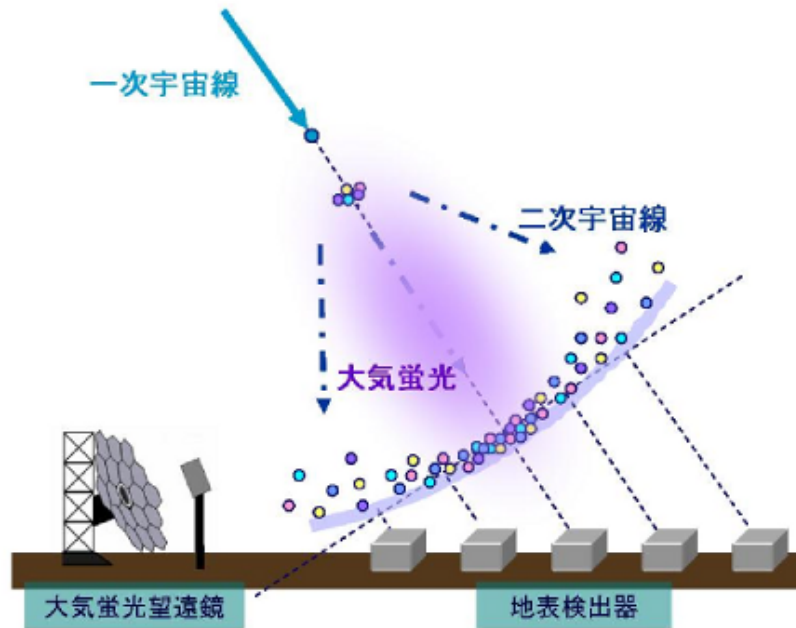


図 2.2: 空気シャワーのハイブリッド観測装置の概念図

2.2 TA×4 実験

TA 実験の結果より、 $10^{19.75}$ eV 以上のエネルギーの宇宙線の到来方向の異方性が約 3σ で示唆された。観測精度を向上してこの異方性を確認するためには、超高エネルギー宇宙線の検出数を増やす必要がある。そのため、TA 実験の検出面積を 4 倍に拡張する計画 (TA×4 実験) が進められており、TA 実験の有効観測面積 700 km^2 から約 4 倍の 3000 km^2 に拡張する予定である。TA×4 実験では、異方性の兆候が見られた 10^{19} eV 以上のエネルギーの宇宙線をより重点的に観測している。

2.2.1 TA×4 実験の目的：核種組成を指標とした異方性の探索

TA×4 実験は TA 実験で確認されたホットスポット (図 1.8) を有意に検証するため、観測事象取得ペースを加速するために行われている。TA 実験で得られた 10 年間のデータ量を、TA×4 実験では 2 年半で得られる予定である。得られた結果から宇宙線の起源に関する解釈を進め、最高エネルギー宇宙線の異方性が確定された場合には、その集中方向、広がり、エネルギーと核種組成から、起源天体の周辺環境、種族が推定でき、天体までの距離も制限できる。どのような激烈な天体現象あるいは極限宇宙と相関があるかを明らかにし、その発生・加速・伝播機構を探る。

2.2.2 TA×4 実験の概要

TA×4 実験は TA 実験と同様に、エネルギー決定精度にハドロン相互作用のモデル依存が少ない FD と、稼働時間が長く大きな統計量が見込める SD による空気シャワーアレイの相互の利

点を生かし、極高エネルギー宇宙線の空気シャワーを観測する実験である。

SD アレイが TA 実験サイトの北側と南側に置かれ、2.08 km 間隔で並べられた北側 250 台、南側 250 台の合計 500 台のプラスチックシンチレーション検出器からなる予定である。また予測される検出面積は約 3000 km^2 である。現在は、北側に 130 台、南側に 127 台の合計 257 台設置が完了している。また、FD ステーションが北側南側それぞれの SD アレイ周辺に設置され、北側の FD ステーションには 4 台の望遠鏡が設置され、方位角 64° 、仰角 3° - 17° でアレイ上空を観測している。また、南側の FD ステーションには 8 台の望遠鏡が設置され、方位角 128° 、仰角 3° - 17° でアレイ上空を観測している。TA \times 4 実験の検出器配置を図 2.3 に示す。TA 実験と同様に SD アレイ上空を FD の視野で覆い、到来する宇宙線を 2 つの異なる検出器でハイブリッド観測することが可能となっている。

TA 実験のこれまでの観測では、図 2.4 のように $10^{18.2} \text{ eV}$ 以上のエネルギースペクトル上にいくつかの構造が確認されている。これらの構造はそれぞれ、電子・陽電子生成による dip($10^{18.7} \text{ eV}$)、GZK pileup($10^{19.4} \text{ eV}$)、GZK cutoff($10^{19.7} \text{ eV}$) によるものと解釈できる。また図 2.5 のように、 X_{max} の測定結果から、このエネルギー領域全体で一次宇宙線が純粋に陽子のみからなると仮定した場合と矛盾しないことがわかった。これらの結果を統合して、最高エネルギー宇宙線は銀河系外起源の陽子であり、CMB 光子との相互作用による強い減衰が起きていると考えられる。

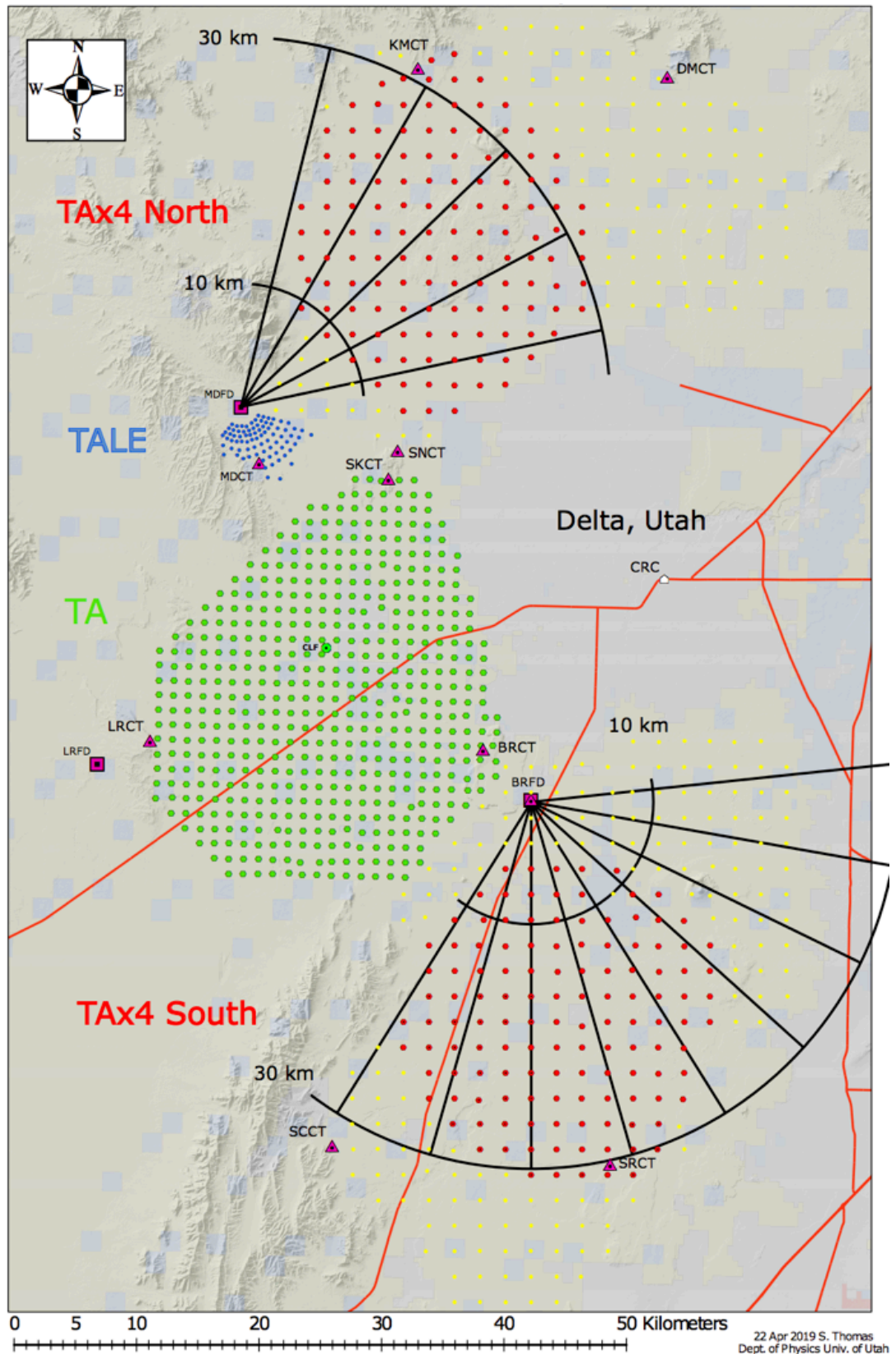


図 2.3: TA×4 実験における装置の配置図

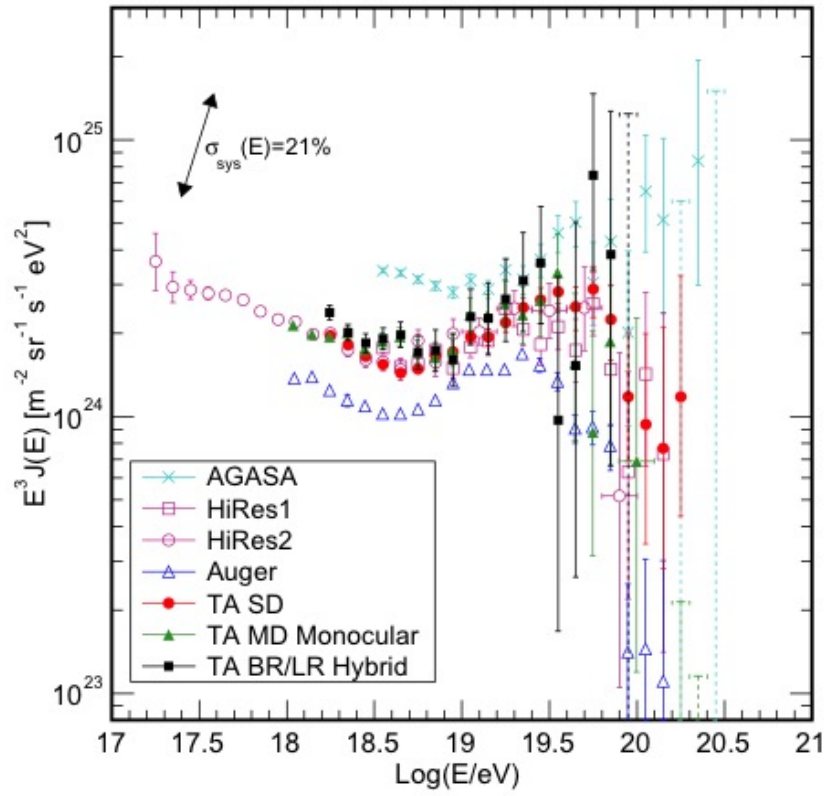


図 2.4: TA 実験といくつかの実験によるエネルギースペクトル [13]。スペクトルの微細構造を見やすくするためにスペクトルに E^3 を掛けている。

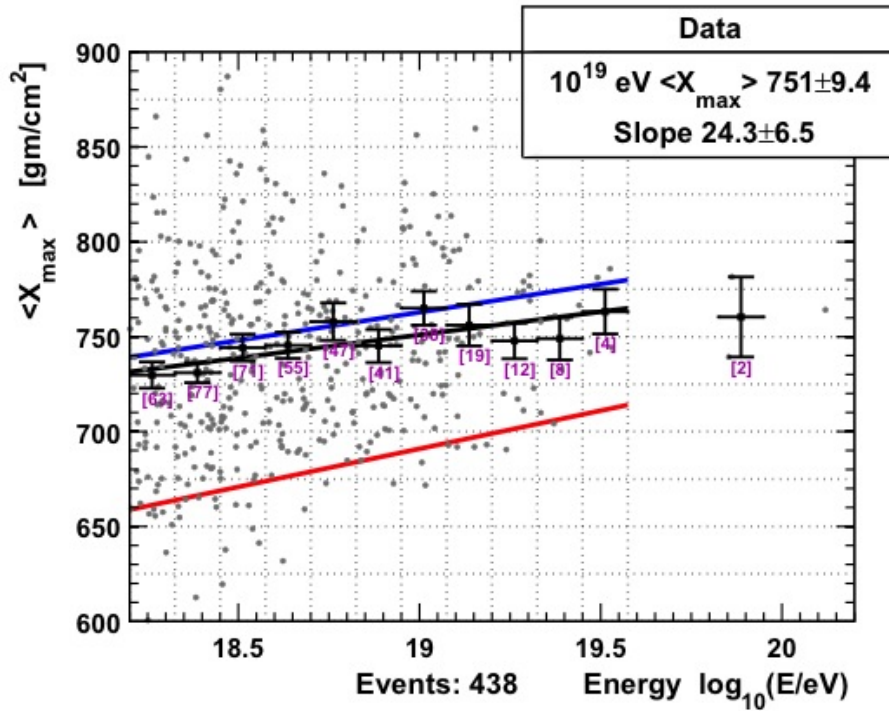


図 2.5: TA 実験による平均 X_{\max} [14]。黒が観測データ、青が陽子と仮定したとき、赤が鉄と仮定したときのシミュレーションの結果。 $10^{18.2}$ eV 以上のエネルギー領域での観測データは、100%陽子であると仮定した時の組成と矛盾しない。

2.2.3 TA×4 実験の地表検出器

TA×4 実験の SD アレイは間隔 2.08 km の碁盤目上に並べられた合計 500 台の SD からなる予定であり、TA 実験と合わせると、合計 3000 km^2 の検出面積を持つ。この SD アレイは、各領域ごとに 1 つの中央データ収集塔と無線 LAN 通信で接続されており、各 SD は各領域の中央データ収集塔とデータ通信することでデータ収集を行なっている。1 つの中央データ収集塔でデータ収集を行える SD の数は、データ収集の時間制限のため最大で 100 台ほどとなっている。

TA×4 の SD アレイは北側南側それぞれ 3 領域ずつの合計 6 領域の SD アレイから構成されており、北側の中央データ収集塔はそれぞれ KMCT(Keg Mountain Communication Tower)、DMCT(Desert Mountain Communication Tower)、SNCT(Smelter Knoll North Communication Tower) と呼ばれる。南側の中央データ収集塔はそれぞれ SCCT(South Crickets Communication Tower)、BRCT(Black Rock Mesa Communication Tower)、SRCT(Sand Ridge Communication Tower) と呼ばれる。

図 2.6、図 2.7 に北側南側それぞれ 3 領域ずつの合計 6 領域の SD アレイ領域の配置図を示す。

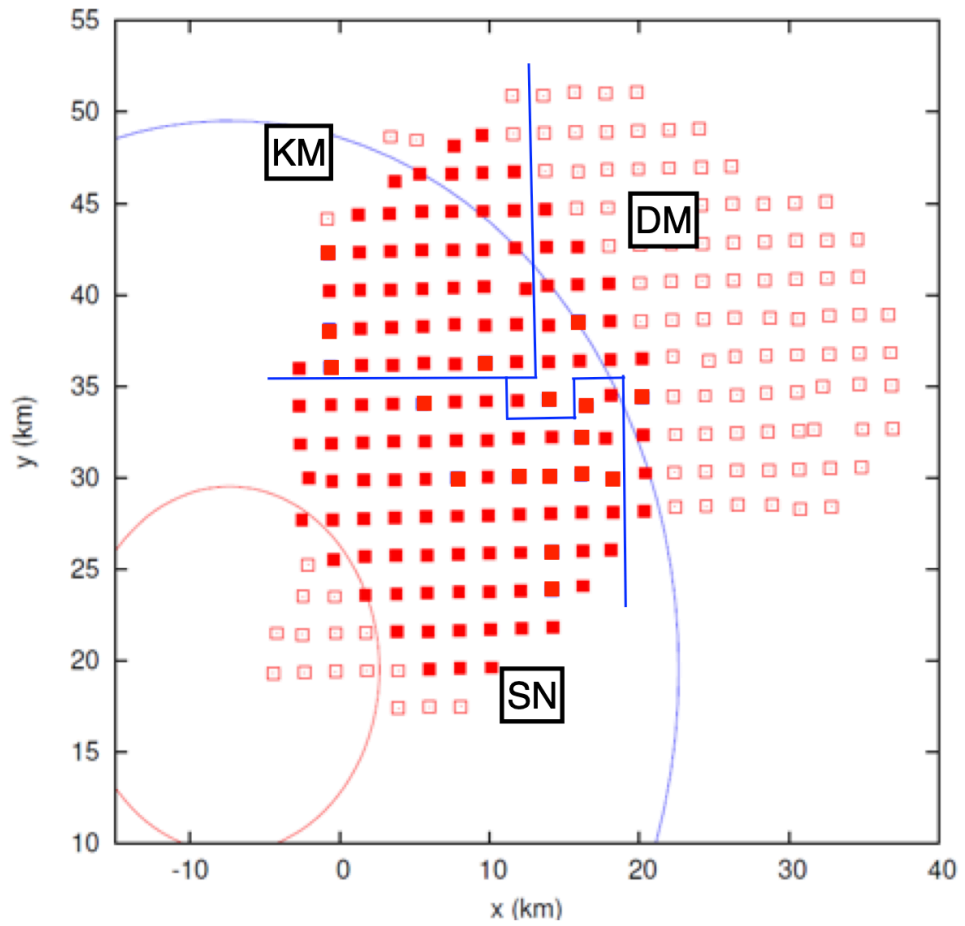


図 2.6: 北側 3 領域の TA×4 実験の SD アレイ領域の配置図。赤塗りの赤色四角形は既に設置が完了した SD を表しており、白抜きの赤色四角形は設置予定の SD を表している。また、青色の線は各領域の境界線を表している。

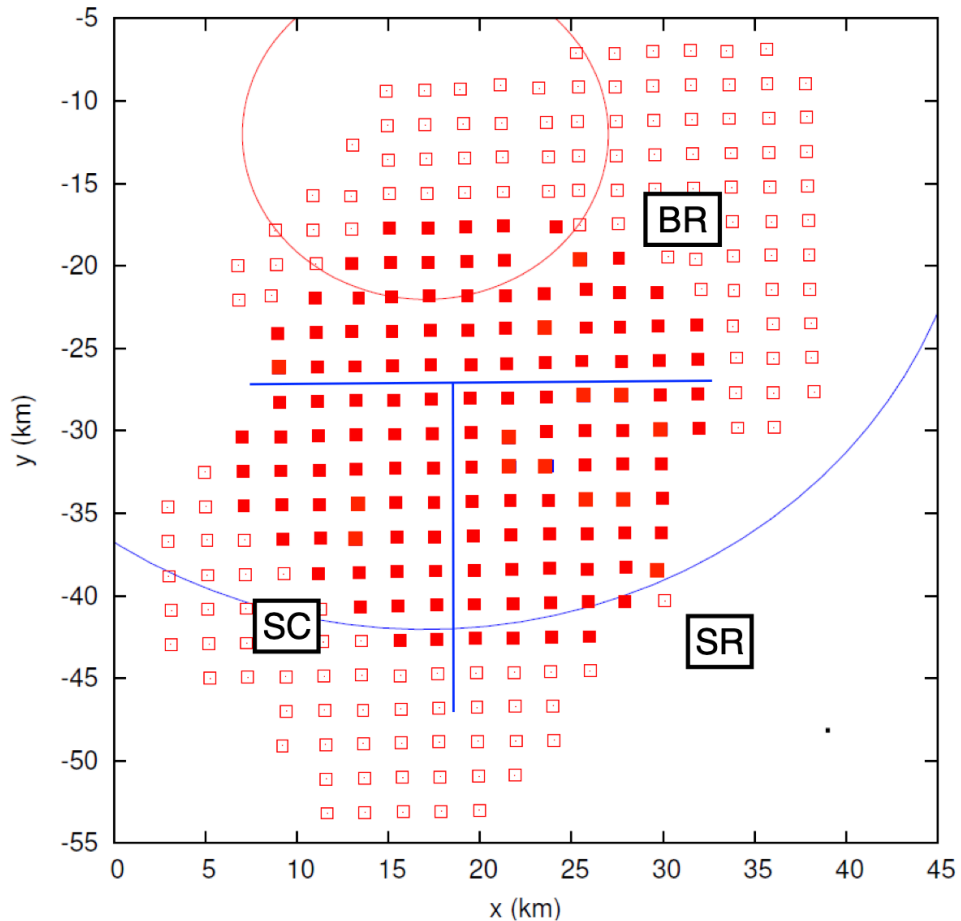


図 2.7: 南側 3 領域の TA×4 実験の SD アレイ領域の配置図。赤塗りの赤色四角形は既に設置が完了した SD を表しており、白抜きの赤色四角形は設置予定の SD を表している。また、青色の線は各領域の境界線を表している。

これ以降、各 SD アレイ領域の名称について、北側 3 領域は KM、DM、SN、南側 3 領域は SC、BR、SR と呼ぶことにする。北側領域の 130 台のうち、KM 領域には 42 台、DM 領域には 19 台、SN 領域には 69 台の SD が設置されている。また、南側領域の 127 台のうち SC 領域には 37 台、BR 領域には 45 台、SR 領域には 45 台の SD が設置されている。

2.3 TA×4 実験の空気シャワーアレイとトリガー DAQ サイクル

この章では、TA×4-SD アレイの概要と、データ収集方法であるトリガー DAQ サイクルについて説明する。

2.3.1 TA×4 実験の地表検出器

図 2.8 は現在設置されている SD の外観である。SD の粒子検出部分には、1.2 cm 厚、2.0 m×1.5 m のプラスチックシンチレータ (CI 工業製 CIMS-G2) を 2 層重ねたものが用いられている。上下層のシンチレータからの信号のコインシデンスをとることで、環境ガンマ線によるノイズを取り除き、



図 2.8: 設置されている TA×4 実験の地表検出器 (SD)。茶色の屋根の下にシンチレータボックスが格納されている。



図 2.9: ソーラーパネルの裏の箱に SD エレクトロニクスとバッテリーが格納されている。

二次宇宙線荷電粒子からの信号を区別する。なお、1層のシンチレータは8枚のシンチレータパネルで構成されている。荷電粒子が入射するとシンチレータは発光し、その光は各層ごとに波長変換ファイバー (Kuraray 製 Y-11) を通じて光電子増倍管 (浜松ホトニクス製 R8619、PhotoMultiplier Tube、以下 PMT) に導かれる。上記のシンチレータ、ファイバー、PMT は、シートで遮光した上で、厚さ 1.2 mm のステンレス製の箱に収納されている。これをシンチレータボックスと呼んでいる。

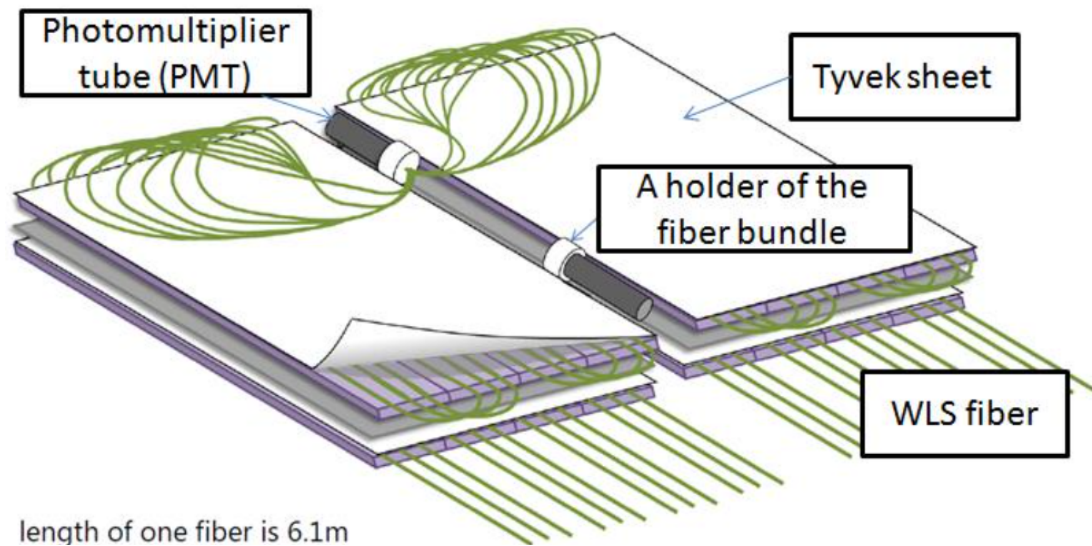


図 2.10: 現在設置している SD のファイバーの取り回し。画像は 2 枚のシンチレータに 3 本のファイバーを張っているが、実際は 2 枚のシンチレータに 7 本のファイバーを張っている。[15]

PMT の出力はフラッシュ ADC (AD9235BRU-65) により、上下層のチャンネルごとに、12 bit の分解能、50 MHz のサンプリング周波数でデジタル化して記録している。SD のシステムクロックのタイミングと周期は、各 SD に搭載された GPS 受信機 (Motorola M12+) によって、GPS の PPS と常時比較されており、異なる SD 間でのタイミングのずれは約 14 ns 以内に抑えられている。

電力源として 120W のソーラーパネル (京セラ社製 KC120J) とバッテリー (DYNASTY 社製 DCS-100L) を使用しており、現地の日照、気温などの環境下では外部からの電源供給なしに 365 日 24 時間連続に自立稼働している。図 2.9 のように、ソーラーパネルの裏側にはステンレスボックスが置かれており、その中に SD を制御する役割を担う SD エレクトロニクスが入っている。

2.3.2 SD エレクトロニクス

SD エレクトロニクスの電子回路は、主に以下の 6 つの要素で構成される。

- PMT 波形のデジタル化のための FADC。12 bit の分解能、50 MHz サンプリングのものが上下層のシンチレータ用に 2 チャンネルあるため、処理される情報量は 1.2 Gbps である。
- 高速信号処理のための FPGA (Xilinx 社製 XC3S1000)。ゲート数は 100 万。主に PMT 波形の処理と保存、PMT 印加電圧コントロール、シリアルインターフェースコントロール、無線 LAN 通信の初段処理、GPS 通信の初段処理を行なっている。

- 全体機能統括用 CPLD(Xilinx 社製 XC2C256)。主に CPU のブートコントロール、FPGA ブートコントロール、電源コントロールを行なっている。
- 複雑な処理を行うための CPU(ルネサステクノロジ社製 SH4 マイコン SH7750S)。動作周波数は 167 MHz である。大半の情報処理はこれによって行われる。
- 位置情報、絶対時間情報取得のための GPS(Motorola 社製 M12+)。
- 無線 LAN モジュール。

図 2.11 に SD エレクトロニクスの外観写真とブロック図を示す。

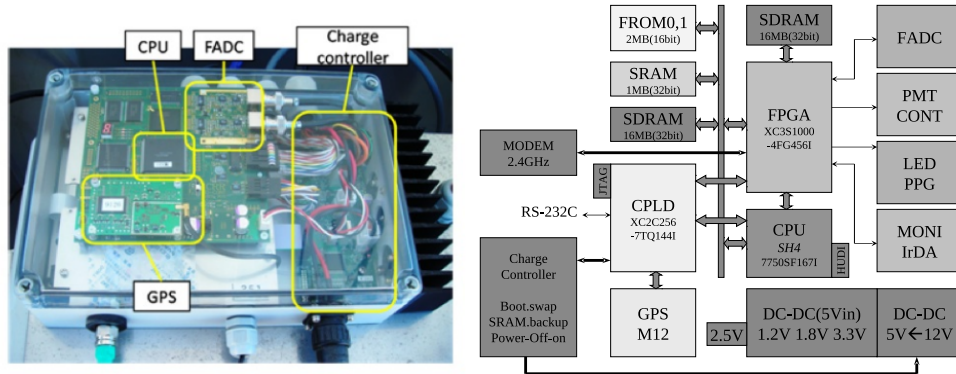


図 2.11: (左)SD エレクトロニクスの外観。(右)SD エレクトロニクスのブロック図。

2.3.3 中央データ収集塔 (タワー) の基本構成

図 2.12 は中央データ収集塔の外観である。なお、これより以後は中央データ収集塔を「タワー」と呼ぶことにする。現在、タワーは、SD と通信するための無指向性アンテナ、DAQ 用の産業用 PC、タワー同士が通信するための指向性アンテナと電子機器 (Motorola 製 Canopy PTP100)、発電用太陽電池パネルとバッテリーから構成されている。太陽電池パネルの裏に大きな箱があり、その中に DAQ 用の産業用 PC やバッテリー等の機器が格納されている (図 2.13)。DAQ 用の産業用 PC は無指向性アンテナを使用してアレイ内の SD と通信する。

TA×4 実験ではこのタワーを北側南側それぞれのサイトに各 3 箇所の合計 6 箇所のタワーが存在しており、それぞれのタワー間通信には長距離無線通信を用いている。



図 2.12: TA×4 実験の SD アレイのための中央データ収集塔

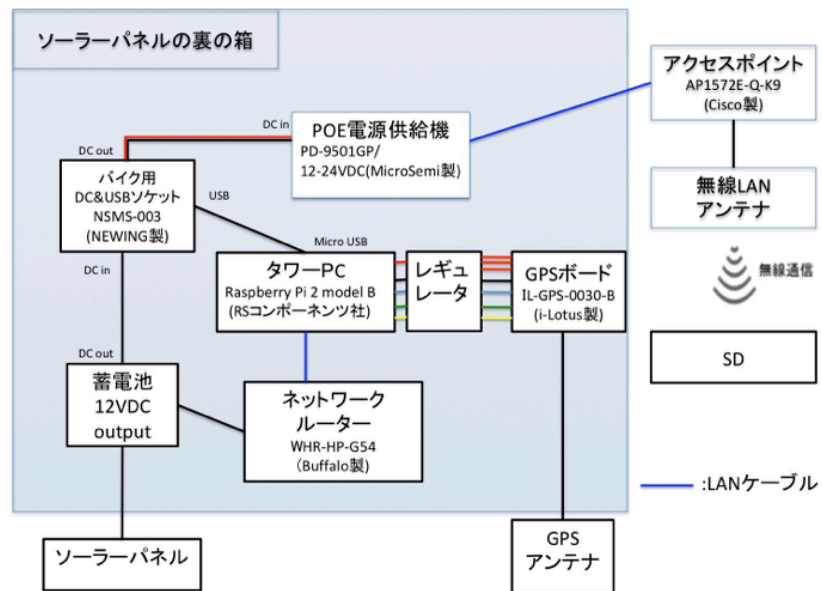


図 2.13: 太陽電池パネルの裏の箱の構成

2.3.4 トリガー DAQ サイクル

SD はある一定粒子数相当以上のシグナルを検出するたびに 2 種類のトリガーを発行する。レベル 0 トリガーとレベル 1 トリガーである。なお、各トリガーの詳しい説明については後述する。そして SD は 1 秒間のレベル 1 トリガーのタイミング情報をまとめたレベル 1 トリガーテーブルを毎秒生成する。タワーは全 SD に対してレベル 1 トリガーテーブルの送信を要求し、SD はレベル 1 トリガーテーブルをタワーに送信する。タワーはこの処理を 1 秒以内にアレイ内の全 SD に対して順々に行う。そして全 SD からレベル 1 トリガーテーブルを受信したタワーは、これらを元にレベル 2 トリガー (空気シャワートリガー) 判定を行う。レベル 2 トリガーが発行されるとタワーは次の秒で全 SD に対して波形探査を命令し、その次の秒で各 SD は波形データをタワーに送信する。このような空気シャワーデータ収集サイクルをトリガー DAQ サイクルと呼んでおり、SD アレイは常にこのトリガー DAQ サイクルを行っている。このトリガー DAQ サイクルを時系列にそって書き下すと以下ようになる。なお、ここでは 1 つの簡条書きの各項目が 1 秒に行われる処理である。

1. SD は PMT の波形信号処理をし、レベル 1 トリガーの判定を行う。レベル 1 トリガーが発行されるとレベル 1 トリガーテーブルを生成する。
2. SD はレベル 1 トリガーが発行されると、タワーの要求に従ってレベル 1 トリガーテーブルをタワーに送信する。配下にある全 SD からのレベル 1 トリガーテーブルを集めたタワーはレベル 2 トリガーの判定を行う。
3. レベル 2 トリガーが発行されると、タワーは配下の全 SD へレベル 2 トリガーを送信する。SD はタワーからのレベル 2 トリガーを受けると、レベル 2 トリガーに対応する波形が自身の中に記録されていないかどうか探索する。
4. SD は波形探索結果をタワーへ送信する。探索結果を受けたタワーは SD に波形データ送信命令を出し、SD は波形データをタワーに対して送信する。
5. ただし、波形データ送信が 1 秒で終わらなかった場合は、SD はタワーに向かって波形データ送信が終わるまで 1 秒毎に波形データの残り部分を送信し続ける。この送信はトリガー情報転送が終わった後の空き時間で行う。

また SD はモニターデータも生成しており、レベル 1 トリガーテーブルをタワーに送信する際にこれも共に送信している。モニターデータについては後に詳しく説明する。図 3.8 にトリガー DAQ サイクル中のタワーの処理と SD の処理の概略をそれぞれ示す。

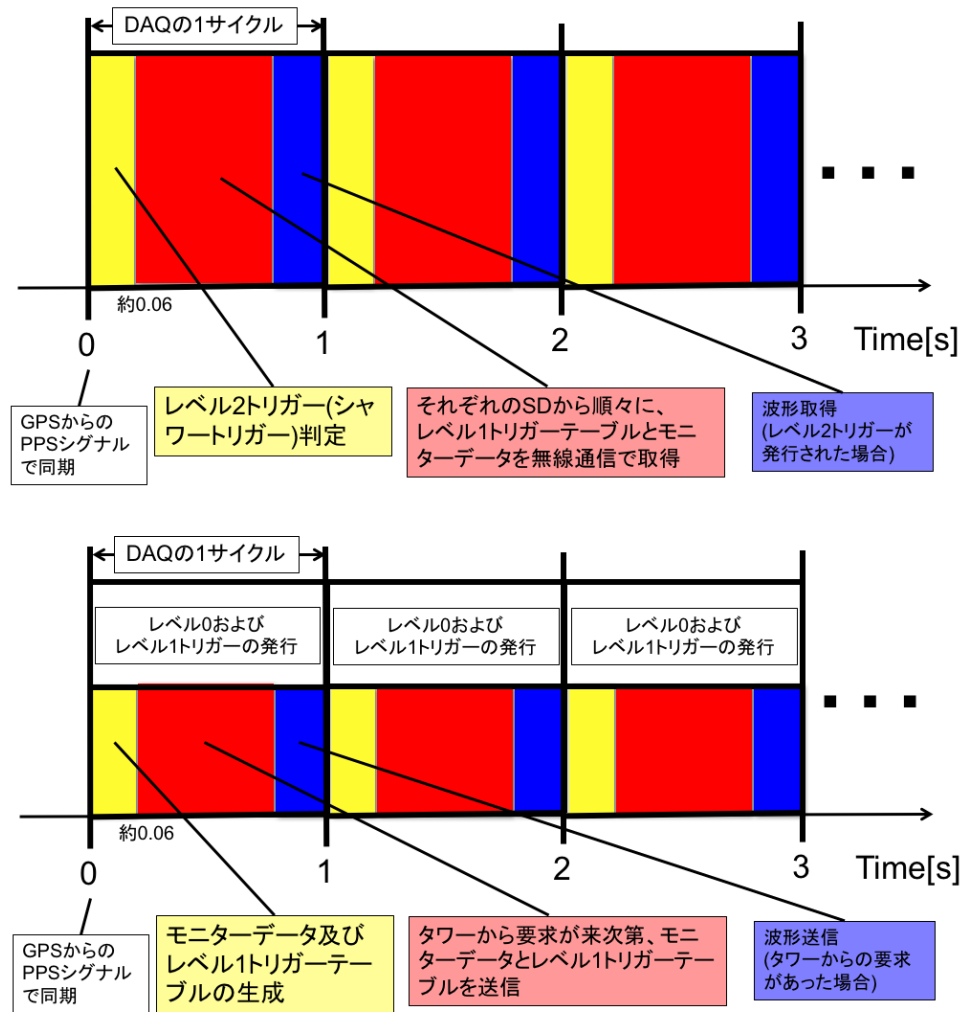


図 2.14: トリガー DAQ サイクルの概略図。上:タワーの処理、下:SD の処理。[18]

2.3.5 トリガー DAQ サイクルにおける各種トリガー

レベル0トリガー

物質中での粒子のエネルギー損失量には下限が存在する。このときの粒子を最小電離粒子 (Minimum Ionizing Particle: MIP) と呼ぶ。図 2.15 に物質中での粒子のエネルギー損失を示す [16]。シンチレータ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、地表に到来する宇宙線は主にミューオンであり、様々なエネルギーを持つので、これらを平均した形での 1 MIP を測定することで SD を較正することが出来る。また、1 個のミューオンによるエネルギー損失 (=1 MIP) は一定であるため、各 SD の 1 MIP に対する応答を常にモニターし、求めることで、全 SD の応答を規格化しそろえることができる。

空気シャワーに含まれる荷電粒子の大半は放射性物質起源の放射線に比べずっとエネルギーが大きいため、上下層のシンチレータを貫通する。よって、上下層のコインシデンスをとることでシャワー粒子に対するトリガーとすることができる。この空気シャワー粒子の入射を判定するトリガーがレベル0トリガーである。レベル0トリガーは波形積分時間 8 タイムスライス (=160 ns)

で、スレッシュホールドは 0.3 MIP に相当する 15 ADC カウントである。レベル 0 トリガー条件を満たした波形の記録長は、レベル 0 トリガーの前 32 タイムスライス (幅 640ns) から後ろ 96 タイムスライス (幅 1920ns) の計 $2.56 \mu\text{s}$ で、継続時間の長い信号は単に連続した複数の波形として保存される。これは無線 LAN を通じたデータ転送の際の packetsize を大きくしすぎないためである。

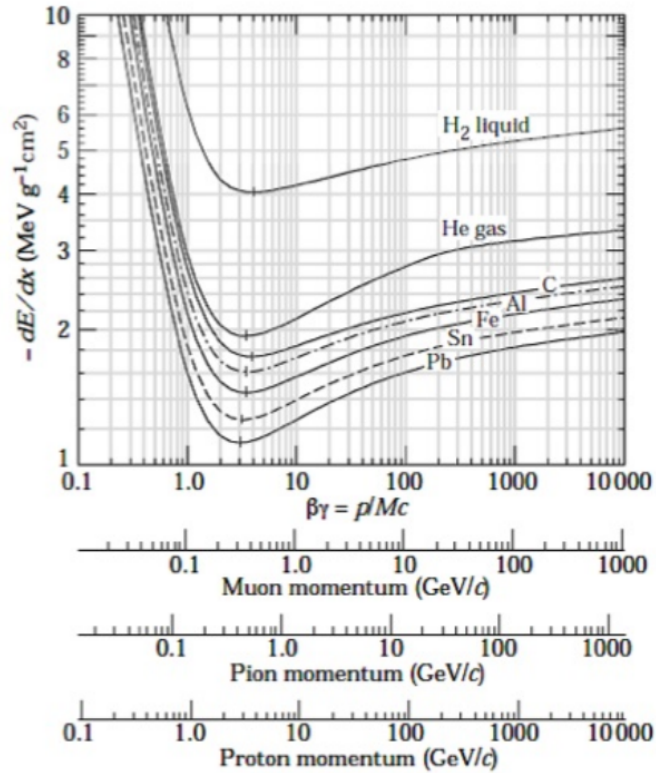


図 2.15: さまざまな高エネルギー粒子のさまざまな物質中でのエネルギー損失 [16]

データバッファリングはすべて FPGA に実装された論理回路によって行われる。以下にデータバッファリングの手順を示す。

1. 8 タイムスライス分 (幅 160 ns) の FADC 積算値の計算を、8 タイムスライス (幅 160 ns) ずつ移動させながら行い、GPS の 1 PPS 信号からの 1 秒間における FADC 積算値の最頻値を計算する。この値を次の 1 秒間のペDESTAL レベルとする。
2. 8 タイムスライス分 (幅 160 ns) の FADC 積算値を計算し、1 タイムスライス (幅 20 ns) ずつ移動させながらこの計算を繰り返し (移動和)、移動和の値からペDESTAL レベルを差し引いた値が上下層共にスレッシュホールド (0.3 MIP 相当) よりも大きければ、レベル 0 トリガーを発行する。このトリガーから 1280 ns 以内に起こったレベル 0 トリガーは全て無効化される。
3. レベル 0 トリガーが発行されると、その波形を波形記録専用の SDRAM に転送する。トリガーの前 640 ns からトリガーの後ろ 1920 ns までの波形が保存される。トリガーの後ろ 1280 ns から 2560 ns の間に二つ目のトリガーがかかった場合、波形の重複を防ぐため二つ目のトリ

ガータイミングは、一つ目のトリガータイミングの 2560 ns 後まで遅らされる。さらに波形記録専用の SDRAM へは、波形とトリガータイミング(クロック数)の転送と同時に、波形の積分値、波形の最大値、1 PPS 間のクロック数、波形番号を保存する。これらの情報は 10 ms ごとに CPU と共有の SDRAM に DMA 転送される。また、これらの情報のリストをレベル 0 トリガータブルと呼ぶ。

レベル 1 トリガー

レベル 1 トリガーは、レベル 0 トリガータブルを元にして発行される。レベル 0 トリガーがかかった波形を、波形の記録長である 2560 ns のゲート幅で積分し、それが上下層ともにスレッシュホールドである 150 カウント (=3 MIP) より大きいときに発行される。このレベル 1 トリガーの発行は各 SD の CPU で行われるもので、以下にその手順を示す。

1. GPS の 1 PPS と同時に CPU に割り込みがかかる。割り込み処理と同時にレベル 0 トリガータブルを FPGA から CPU に読み込む。
2. DMA 転送中であれば、それが終了するまで待った後にレベル 0 トリガーの処理を開始する。処理の内訳としては、クロック数から μs への変換、DMA 転送が正しく行われたかどうかの確認、モニターデータの生成がある。クロック周波数が少しずつ異なる SD 同士で同期をとるためにクロック数を μs に変換している。そして波形の積分値からペDESTAL レベルを差し引いた値がスレッシュホールドよりも大きければレベル 1 トリガーを発行する。
3. レベル 1 トリガーが発行されるとレベル 1 トリガータブルに新しいエントリーを追加する。レベル 1 トリガータブルの一つのエントリーは、 μs (20 bit) と波形の積分値の上下層の平均(4 bit) を組み合わせた 3 Byte のデータである。

各 SD は 1 秒間のレベル 1 トリガーを集めたレベル 1 トリガータブルを毎秒タワーに送信する。

レベル 2 トリガー

タワーは、各 SD から送られてくるレベル 1 トリガータブルを元に、レベル 2 トリガー判定を行う。このレベル 2 トリガーは空気シャワー事象かどうかを判定する。14 μs の時間内で隣接した 3 台以上の SD がレベル 1 トリガーを発行したことがわかったとき、タワーはレベル 2 トリガーを発行する。レベル 2 トリガーが発行されるとその時刻(レベル 2 トリガーの判定に使用された全ての SD の内、最も早くレベル 0 トリガーを発行した SD のトリガー時刻)が DAQ リストに登録される。

以下に、レベル 2 トリガー判定の手順を示す。

1. タワーはレベル 1 トリガータブルを全 SD から取得する。これと同時にモニターデータ(後述)もタワーに集められている。
2. タワーでは、GPS の 1 PPS と同時に CPU に割り込みがかかる。この後、レベル 1 トリガータブルの μs (20 bit) と SD 座標番号(12 bit) を組み合わせ、さらに時刻順に並び替えてアレイ全体のトリガータブルを生成する。1 PPS と同期させて処理を行う理由は、全 SD のトリガーサイクルと同期させることで無駄な待ち時間を発生させないためである。

3. タワーは、アレイ全体のトリガーテーブルを $14\mu\text{s}$ のゲート幅 (=同期したとみなす最大の時間差) で走査し、同期したレベル1トリガーが3台以上のSDで見つかった場合は隣接条件を満たすかどうかを確認する。隣接するSDが3台以上という条件を満たしていれば、レベル2トリガーを発行し、DAQリストへ登録する。

レベル2トリガーが発行されると、タワーはレベル2トリガー時刻から $\pm 64\mu\text{s}$ の範囲のレベル0トリガーテーブルをSDから収集する。タワーは毎秒、1秒間で全てのSDのモニターデータ及びレベル1トリガーテーブル収集を行うが、レベル2トリガーがあれば、全SDからのレベル1トリガー収集が終わり次第、この1秒の残った時間で、このレベル0トリガーテーブルを集める。また、波形は $128\text{ サンプル} \times 12\text{ bit}$ で記録されているので上下のチャンネルを合わせて、1波形あたり合計 384 Byte である。

2.3.6 モニターデータとモニタリングシステム

それぞれのSDは、自らの動作状況を表すモニターデータを生成し、トリガーDAQサイクル中に、タワーに送信している。これは、SDの動作状況を知るため、また、取得したデータのキャリブレーションのために用いられる。モニターデータには収集時間間隔が1秒のもの、1分のもの、10分のものがある。収集時間間隔が1秒のものは合計 8 Byte あり、毎秒タワーに送信している。一方、収集時間間隔が1分のものとは合計で 9 kByte 程度あり、10分間分をまとめたもの(収集時間間隔が1分のものなら10個、10分のものなら1個)を1セットとし、トリガーDAQサイクルに負荷をかけないために、この1セットを600分割して、毎秒 16 Byte ずつ10分間かけて、SDはタワーに送信する。これを「分割モニターデータ」と呼ぶことにする。

1つのレベル1トリガー情報は 3 Byte なので、レベル1トリガー数を N とすると、レベル1トリガーテーブルは $3N$ Byte になる。したがって、トリガーDAQサイクルにおいてそれぞれのSDは、ヘッダー情報 (16 Byte)、収集時間間隔1秒のモニターデータ (8 Byte)、分割モニターデータ (16 Byte)、レベル1トリガーテーブル ($3N$ Byte)、レベル1トリガーテーブルのチェックサム (1 Byte) で合計 $(16+8+16+1+3N)$ Byte をタワーに向かって毎秒送信している。

以下に、モニターデータの詳細を示す。

- 収集時間間隔1秒の情報

- 1 PPS 間のクロック数 (4 Byte)。GPS 及びクロックの安定性の確認に用いる。25 MHz のクロックを用いているので、この値はおよそ 25 メガ辺りで安定していることが望ましい。
- GPS タイムスタンプ (2 Byte)。1 PPS が継続して出力されつづけているか、つまりSD間で同期がとれているかどうか確認するために用いる。時間情報の内、分と秒の情報を0から599までの数字に変換したのになっており、例えば5分10秒なら310、7分30秒なら450になる。
- レベル1トリガーの数 (1 Byte)。ホットチャンネル、デッドチャンネルの識別に用いる。
- 波形探查結果 (1 Byte)。レベル2トリガーが発行されたときにこの情報を使用する。

- 収集時間間隔1分の情報

- レベル0トリガー数。トリガーサイクルの安定性、ゲインが適切に設定されているかの確認に用いる。

- バッテリーの電流・電圧。解析には用いられないが、SD の安定稼働のために重要な項目である。
 - 太陽電池の出力電流・電圧。
 - 各種温湿度。
- 収集時間間隔 10 分の情報
 - バックグラウンドミュオン信号のスペクトル (2048 Byte × 上下 2 層分)。SD のゲイン較正に用いられる。詳しくは後述する。
 - ペDESTAL のヒストグラム (1024 Byte × 上下 2 層分)。SD の較正に用いられる。詳しくは後述する。
 - PMT 出力信号のピーク波高のヒストグラム。
 - GPS の状態を表すフラグ。
 - 通信できている GPS 衛星数。
 - GPS 衛星が取得している位置情報。

これらのモニターデータを確認し、不具合が生じていればメンテナンスをする。ここでは TA×4 実験で取得したモニターデータを元に、モニター用アプリケーションで出力したグラフの一例を示す。

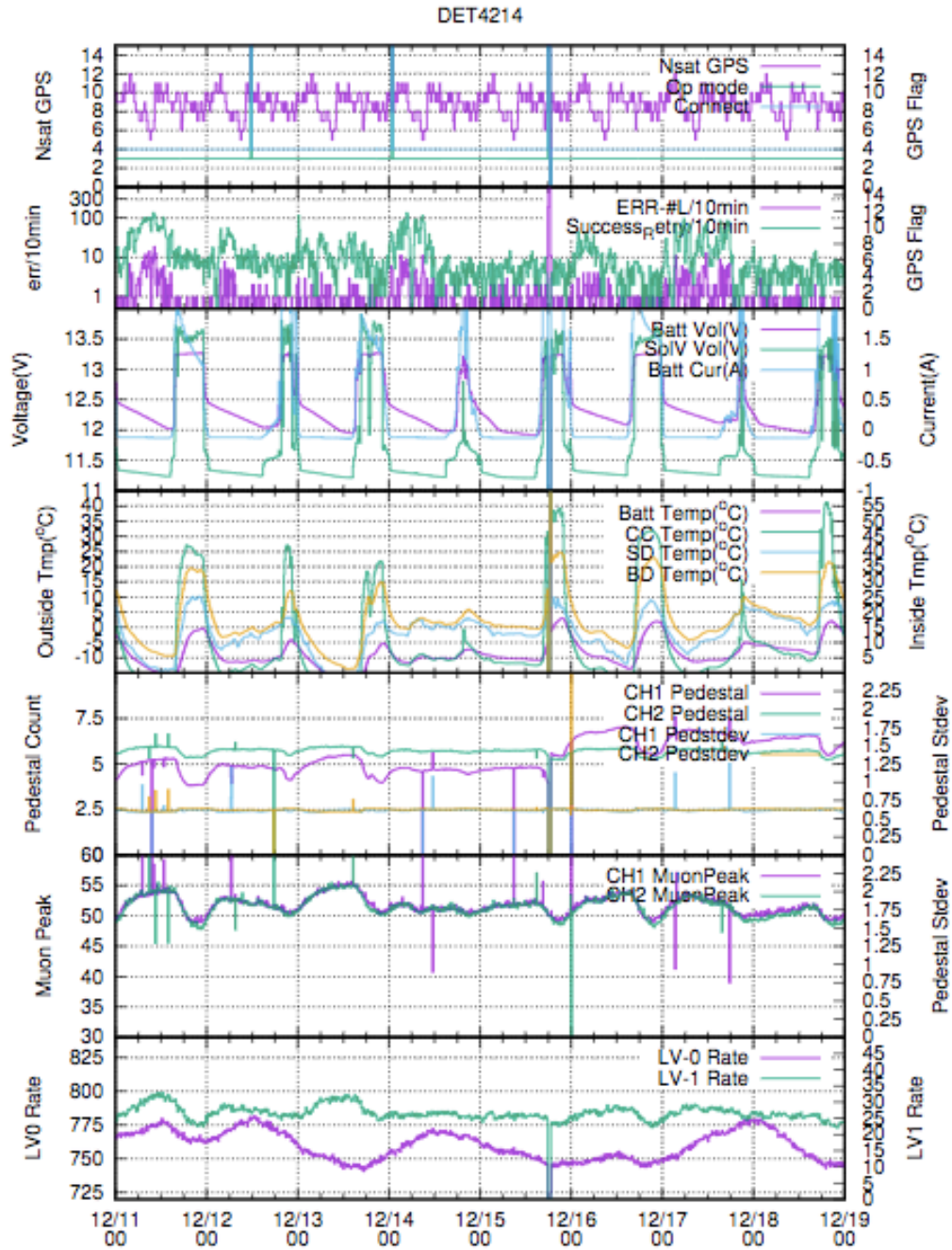


図 2.16: TA×4 実験の SD のモニター例 (地表検出器ロジカル ID:4214)。上から、通信できている GPS 衛星数と GPS の状態、10 分間の通信エラー数とリトライ通信数、各種電流・電圧、各種温度、ペDESTAL のヒストグラムから求めたペDESTAL 値とその標準偏差、バックグラウンドミュオン信号のスペクトルから求めた 1 MIP ピークとその幅、トリガーレートを表す。

バックグラウンドミュオン信号のスペクトル

FPGA 内部ではレベル0 トリガー毎に波形の積分値を求め、それらを1秒分ためてヒストグラムとしている。積分ゲート幅は240 nsで、波高の最大値の前80 ns、後160 nsである。CPUはこのヒストグラムを1秒ごとに読み取り、10分間積算する。レベル0 トリガーを満たす信号の原因の大半は、シャワーとは関係のないバックグラウンドミュオンによるものと考えられるので、これが、「バックグラウンドミュオン信号のヒストグラム」と呼ばれ、10分ごとにタワーに送られる。これは、バックグラウンドミュオンのヒストグラムがモニター情報として取得されるのが10分ごとであるためである。分解能は1カウント、レンジは0から512カウントまでである。

図2.17にモニター情報から得たバックグラウンドミュオンによる信号と、以下で解説するペDESTALのヒストグラムを示す。

ペDESTALのヒストグラム

ペDESTALレベルを得るため、FPGA 内部では8タイムスライスごとにFADC カウントの8タイムスライス分の積分値を求め、それらを1秒分ためてヒストグラムとしている。CPUはこのヒストグラムを1秒ごとに読み取り、さらに10分間積算する。これが「ペDESTALのヒストグラム」と呼ばれるモニター情報で、10分ごとにタワーへ転送される。分解能は1カウント、レンジは0から256カウントまでである。

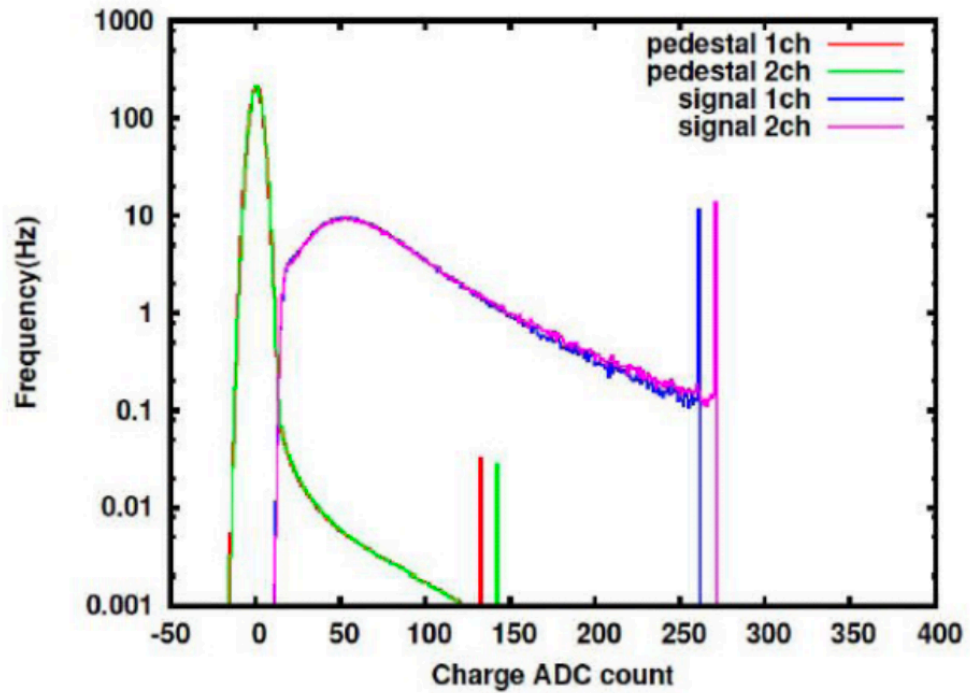


図 2.17: SD のモニター情報から得たバックグラウンドミュオン信号のヒストグラムとペDESTALのヒストグラム。緑色と赤色のヒストグラムはそれぞれ上層と下層のペDESTALのヒストグラムである。また、青色と紫色のヒストグラムはそれぞれ上層と下層のバックグラウンドミュオン信号のヒストグラムである。それぞれのヒストグラムの右側のエントリー (250 ADC カウンTの後ろの立ち上がり) は over flow を示す。積分幅は 240 ns。バックグラウンドミュオン信号のヒストグラムではペDESTAL分はすでに引いてある。

第3章 TA×4実験における境界トリガーシステム

TA×4実験の地表粒子検出器(以下、SD)は2019年4月から北側、南側それぞれ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る。各領域の中心付近に到達した空気シャワーに対しては問題なくデータを取得することができているが、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る。

- 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。
- シャワー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。
- シャワー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。

ここで、図3.1はモンテカルロシミュレーションで得られたTA×4実験のSDのトリガー効率である。トリガー効率は以下のように定義した。モンテカルロシミュレーションで生成した空気シャワーのうち、アレイ領域内に落ちたイベント数を N_{thrown} 、アレイ領域内に落ちてトリガーされたイベント数を $N_{triggered}$ とすると、トリガー効率は $\frac{N_{triggered}}{N_{thrown}}$ と定義した。

図3.1より、 10^{19} eVでのトリガー効率は低いことが分かる。このため、境界をまたいだ 10^{19} eVの宇宙線イベントは境界トリガーシステムがなければトリガーがかからない可能性が大いにあり、同じ条件でも場所によりトリガーの頻度が変わってしまい、領域の端でデータ収集の欠損が起きてしまう事にもなる。

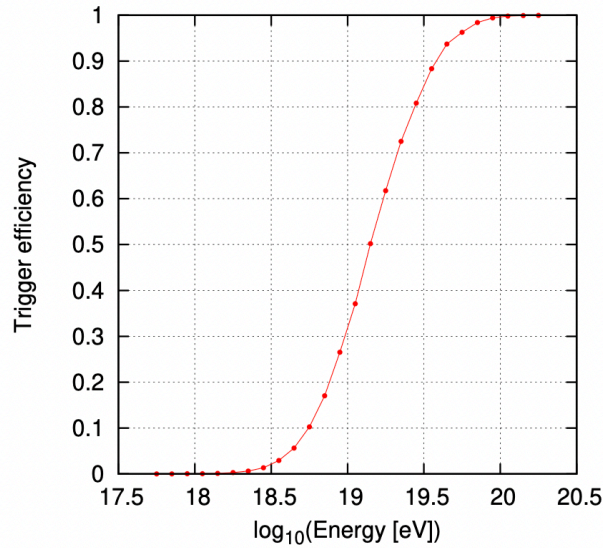


図 3.1: モンテカルロシミュレーションで一次宇宙線の天頂角を 0 度から 60 度まで変化させた時の、TA×4 実験の SD のトリガー効率。

そのため、TA×4 実験のデータ収集システムの要件として、現在のデータ収集システムに境界をまたいだイベントを取得するシステムを追加する必要がある。この境界をまたいだイベントを取得するシステムをこれ以降境界トリガーシステムと呼ぶ。つまり境界トリガーシステムを導入することで、北側、南側それぞれ 3 つの領域に対して独立にデータ収集システムが動いていたのを、北側全体と南側全体のエリアがまるでも 1 つのデータ収集システムが動いているように変更するのが目標である。

この章では、境界トリガーシステムの概要について述べる。

3.1 TA×4 実験の SD の検出面積

まず、この境界トリガーシステムを導入することでどれぐらい検出面積が変化するか調べた。SD の検出面積について、SD が GPS から取得している座標情報を基に計算した。次のように求める検出面積の領域を考えた (図 3.2)。

- 各 SD アレイ領域の一番外側の SD を線で結ぶ。
- そこから 100m 内側の領域を検出面積とする。

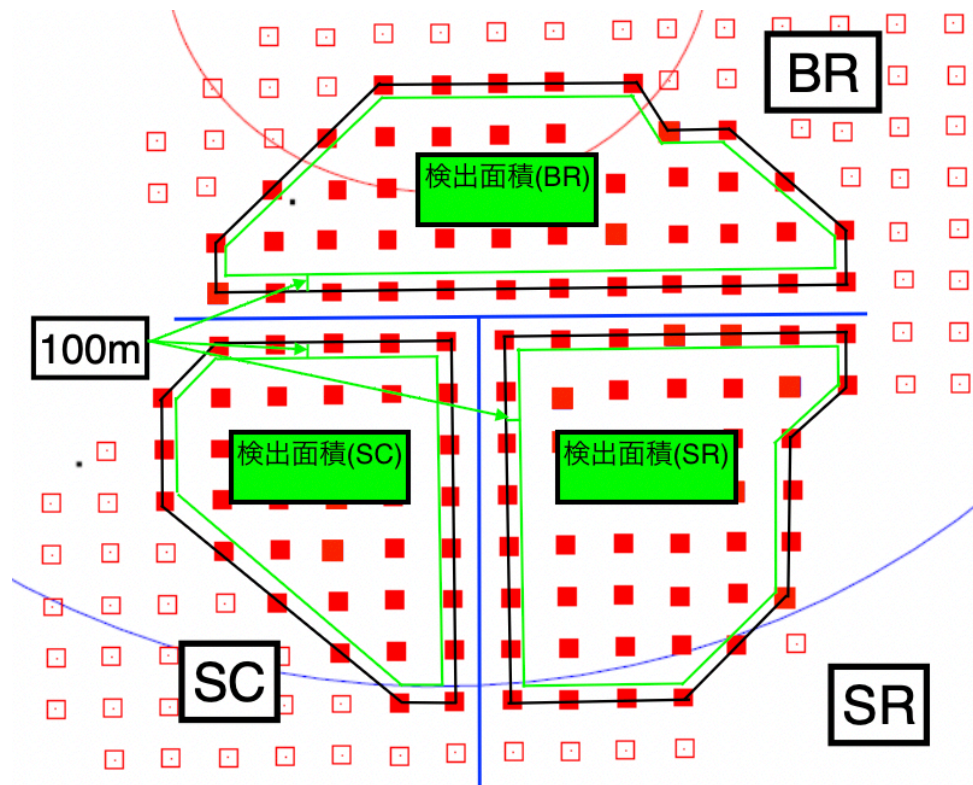


図 3.2: 境界トリガー導入前の南側全体のSD アレイ領域における検出面積。赤色の四角形はSDを、青色の線は領域の境界の線を表している。また、黒色の線は各SD アレイ領域の一番外側のSDを結んだ線、緑色の線は黒色の線から100m内側を結んだ線を表している。

内側100mという値を用いたのは、図3.3のようにデータ解析ではSDアレイ領域の内側のイベントのみ使用しており、100m内側は十分内側だと考えたためである。

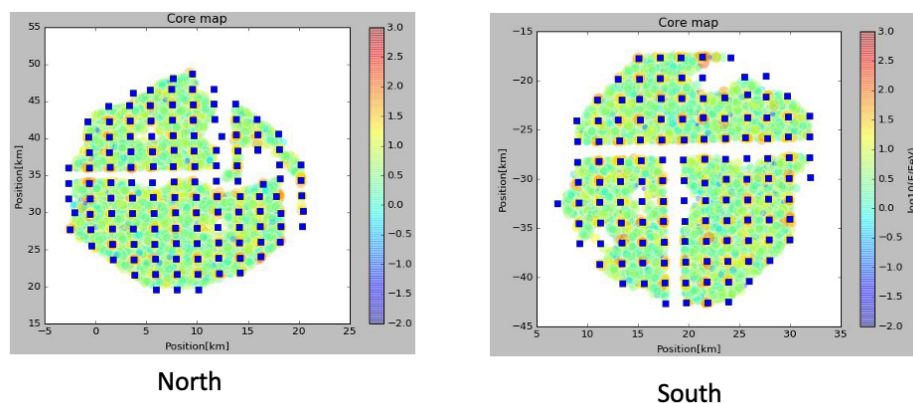


図 3.3: TA×4実験のSDで得られたデータから解析して得られた空気シャワーのコア分布。2019年10月9日から2020年9月25日までにSDで得られたデータを使用している。青色の四角形はSDを表している。

求めた各アレイ領域の検出面積を以下に示す。

表 3.1: TA×4 実験の SD の各アレイ領域の検出面積

アレイ領域名	検出面積 [km ²]
KM	116.6
DM	24.2
SN	221.1
SR	129.6
SC	93.9
BR	144.7

表 3.1 より、北側全体の SD アレイ領域の検出面積は、KM 領域と DM 領域と SN 領域の面積を足し合わせた 361.9 km²、南側全体の SD アレイ領域の検出面積は、SR 領域と SC 領域と BR 領域の面積を足し合わせた 368.2 km² と求めた。

次に境界トリガーを導入した後の検出面積を求めた。図 3.4 のように、北側全体と南側全体のエリアがまるで 1 つの領域として検出面積を求めた。つまり、境界トリガーを導入する前と境界トリガーを導入した後の検出面積の違いは境界領域の面積となっている。すると、北側全体の SD アレイ領域の検出面積は 475.1 km²、南側全体の SD アレイ領域の検出面積は 457.9 km² と求めた (表 3.2)。

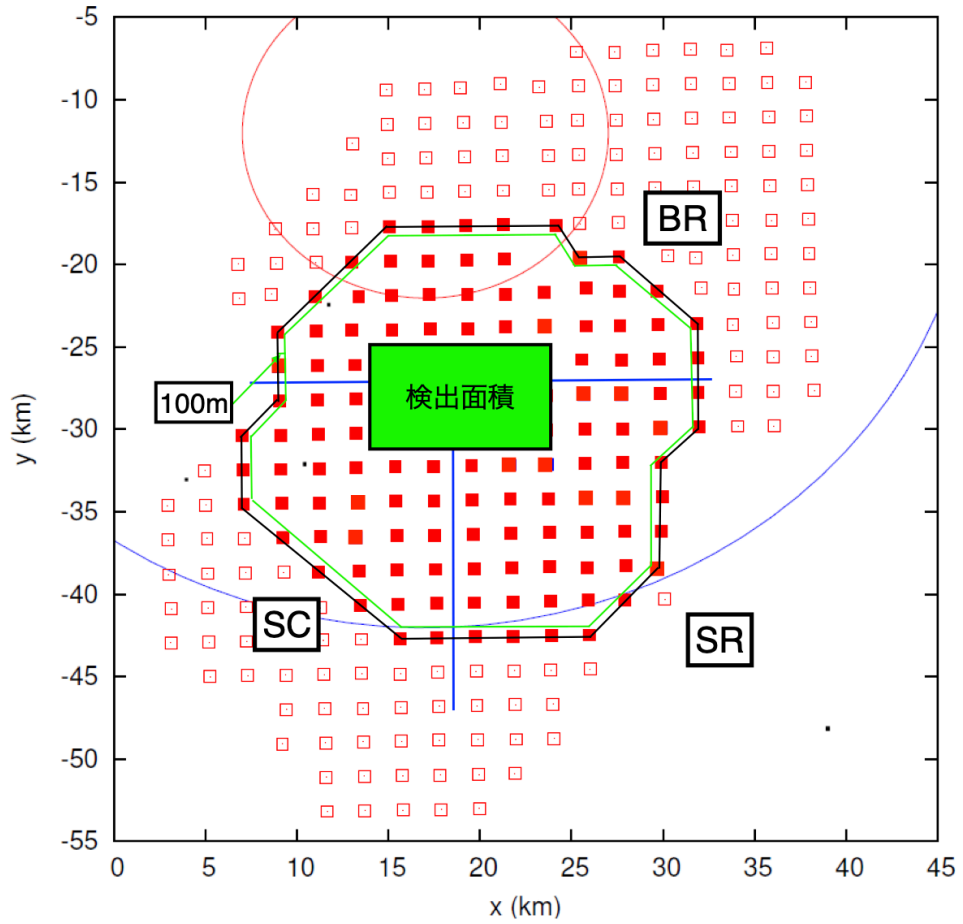


図 3.4: 境界トリガー導入後の南側全体のSD アレイ領域における検出面積。赤色の四角形はSDを表している。また、黒色の線はSD アレイ領域の一番外側のSDを結んだ線、緑色の線は黒色の線から100m内側を結んだ線を表している。

表 3.2 より、境界トリガーシステムを導入することで検出面積が1.2倍に広がることが分かった。

表 3.2: 境界トリガーシステム導入前と導入後の検出面積

エリア名	導入前の検出面積 [km ²]	導入後の検出面積 [km ²]
北側全体	361.9	475.1
南側全体	368.2	457.9

3.2 TA×4実験における境界トリガーシステムの概要

この境界トリガーシステムとして、以下の処理を実装した。

1. それぞれの領域の境界部分の SD で得られたトリガーテーブルをある 1 箇所にとどめる。
2. そこで境界イベントかどうか判定する。
3. 境界イベントがあれば、各領域から SD の波形情報を集める。

これ以降、このトリガーテーブルをまとめて境界イベントかどうか判定する PC をセントラル PC(Central PC) と呼ぶことにする。

3.2.1 セントラル PC の決定

ここでセントラル PC は北側、南側それぞれ 3 つあるタワーのホスト PC のうちどれか 1 つにする。TA×4SD 領域のタワー間通信は、SN-KM、SN-DM、BR-SC、BR-SR のみ開通しているため、セントラル PC を SN と BR 領域のタワーにあるホスト PC にすることにする。

3.2.2 境界トリガー判定条件

境界トリガーの判定条件は、トリガー DAQ サイクルにおけるレベル 2 トリガーの条件と同じく 14 μ s の時間内で隣接した 3 台以上の SD がレベル 1 トリガーを発行したときとする。すると、図 3.5、3.6 のように主に 2 パターンのトリガー状況が考えられる。

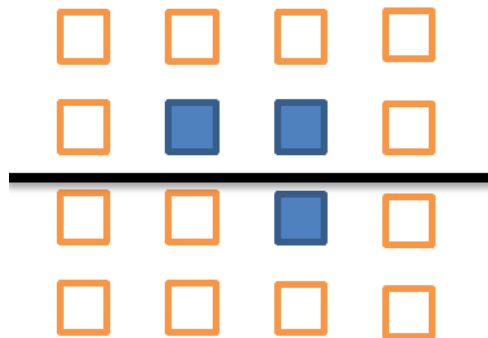


図 3.5: 境界をまたぐトリガー判定パターンの例。黒い線が領域の境界線を、オレンジの四角形は SD を示している。青い四角形はレベル 1 トリガーを発行した SD を示している。

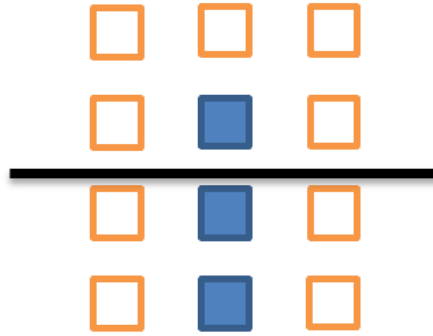


図 3.6: 境界をまたぐトリガー判定パターンの例。黒い線が領域の境界線を、オレンジの四角形は SD を示している。青い四角形はレベル 1 トリガーを発行した SD を示している。

そのため境界トリガーを判定するためには、境界線から 2 列分の SD のトリガー情報が必要となり、各領域において境界線から 2 列分の SD の数は最大で 40 台ほどである。そこで、境界トリガー判定において、各領域のタワー間通信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. 40 台分のトリガーテーブルを 1 秒以内に転送できる 40kB/s 以上の速度であること
 - トリガーレートは最大でも 30 Hz であると仮定すると、1 つのトリガー情報は 3 Byte あるので、1 秒間に送る最大送信データ量は 4 kB ほどである。データ送受信に使う CPU 時間を 0.1 秒とすると、40 kB/s 以上の転送速度が必要となる。

タワー間の通信には長距離無線ネットワークでつながっており、タワー間のネットワーク状況はモニターされている。その時の通信状況を図 3.7 に示した。また、タワー間は 100 kB/s 程度の通信速度が出ていることが確認され、トリガーテーブルを送信するのに十分な速度を持っていることが分かった。

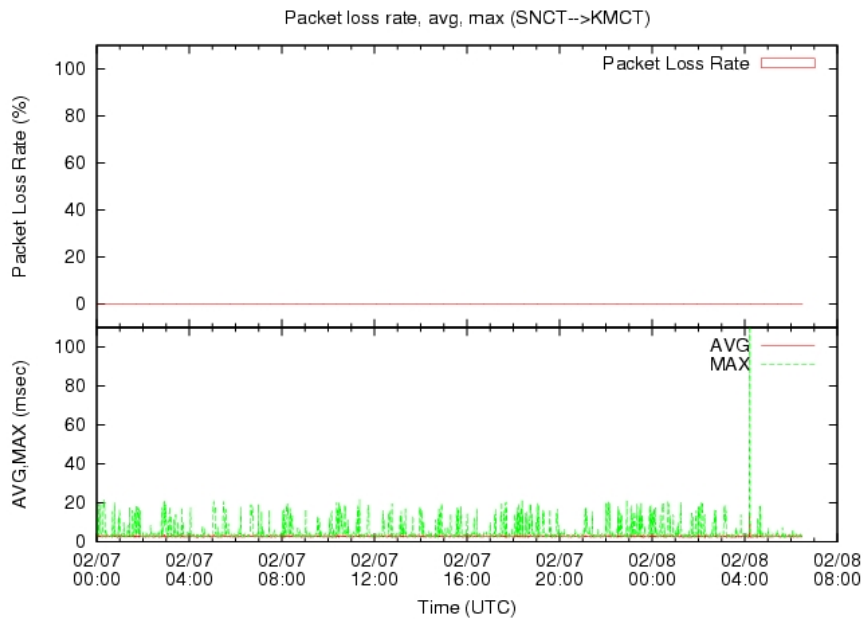


図 3.7: SN 通信塔と KM 通信塔間のネットワーク状況。毎分 40 個の ping を送信して帰ってくるまでの時間を測定した。AVG は応答を受けるまでの 40 個の平均、MAX はもっとも時間がかかったものをプロットした。1 日を通して安定したネットワークになっている。

3.2.3 境界トリガーシステムのデザイン

以下に、TA×4SD の北側の境界トリガーシステムの模式図を表す。

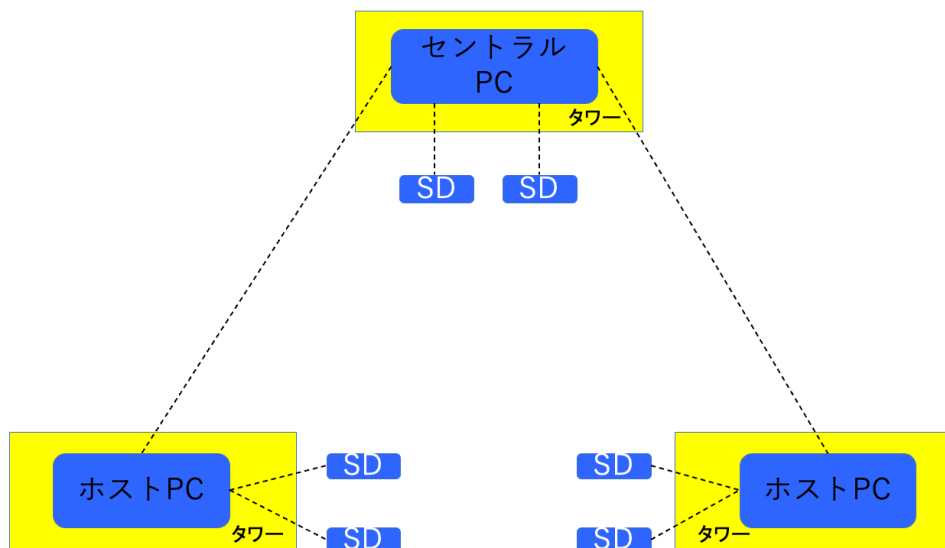


図 3.8: TA×4 実験における境界トリガーシステムの概略図

境界トリガーシステムの流れは以下ようになる。

1. SD はある 1 秒間に検出され記録された 3 粒子以上の信号の時間情報をテーブル (トリガーテーブル) にして毎秒ホスト PC に送る
2. ホスト PC は境界部分 (境界線から 2 列分) の SD のトリガーテーブルをセントラル PC へ送信する。
3. セントラル PC は境界トリガー判定を行う。
4. セントラル PC は境界トリガーと判定されれば、ホスト PC を通じて SD に波形情報収集命令を出す。

このような流れで境界をまたいだイベント情報を取得できると考えた。以下に各機器の詳細なデザインを述べる。

ホスト PC

境界トリガーシステムを導入するにあたり、今回ホスト PC に要求される機能は次の通りである。

- 配下にある全 SD からトリガーテーブルを毎秒受信する。
- 受信したトリガーテーブルの中から境界部分の SD のトリガーテーブルを別のバッファ (境界バッファ) に保存する。
- セントラル PC へ境界バッファに保存されているトリガーテーブルを送信する。
- セントラル PC からトリガー時刻情報を受信する。
- 受信したトリガー時刻情報を確認し、波形情報収集の重複を確認する。
- 境界トリガーによる波形情報収集命令を SD に対し行う。

まずはじめに、ホスト PC はそれぞれの領域の SD と毎秒データ収集を行っており、このプロセスに影響を及ぼさないため、プロセスを分ける必要がある。

このため今回は、データ収集プロセス (DAQ プロセス) とトリガーテーブルをセントラル PC へ送受信するプロセス (データ送受信プロセス) の 2 つの独立したプロセスを設定した。

DAQ プロセスでは各 SD と毎秒通信を行い、波形情報を収集している。データ送受信プロセスでは、追加した役割であるセントラル PC との通信を行う。

また、このプロセス間のやりとりも必要なのでこれには共有メモリを用いる。プロセス間通信には、DAQ プロセスで得られた境界のトリガーテーブルをデータ送受信プロセスへ渡すときと、セントラル PC から送られてきたトリガー時刻情報を DAQ プロセスへ渡すときの 2 つ存在する。これらを明確に区別するため、それぞれの用途に共有メモリを用意した。

注意すべき点として、SD からトリガーテーブルが送信されるとき、SD によっては秒情報が異なるトリガーテーブルが送られてくることがある。このときは、それぞれ送られてきたトリガーテーブルで多数決を行い、一番多いものを正しい GPS の秒情報として扱い、時間順にソートを行い共有メモリに書き込む。

また、先にも述べた通りホスト PC はそれぞれの領域の SD と波形情報収集を行っており (これ以降内部トリガーと呼ぶ)、この境界トリガーでの波形情報収集の前にそれぞれのトリガーに従っ

て波形情報収集を行っている可能性もある。そのため、同じ波形を2回収集してしまいう可能性もある。これを防ぐため、境界トリガーによる波形情報収集命令を受けると、その時刻情報を確認して、以前波形情報収集をしていないかチェックしている。

セントラルPC

今回セントラルPCは、タワー間通信の容易さからSKとBRFDのタワーにあるホストPCにすることにする。タワー間の通信には長距離無線ネットワークでつながっており、プログラムではTCP/IP通信を用い、内容や順序は保障してもらう。セントラルPCには以下の役割が要求される。

- それぞれのホストPCから境界部分のSDのトリガーテーブルが送られてくると、それらのトリガーテーブルを1つにまとめる。
- 上項でまとめたトリガーテーブルより境界トリガー判定を行い、境界トリガーかどうか判定する。
- 境界トリガーだと判定されれば、それぞれのホストPCに向かって、SDに対し波形情報収集するよう命令する。

受信した同じ秒情報のトリガーテーブルを時間順にソートし、同じ秒情報のトリガーテーブルを1つにまとめる。境界トリガーの判定方法は内部トリガーの判定方法と同じ方法で行う。SKとBRFDのタワーにあるホストPCはホスト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。プロセスはホストPCのプロセスに加え境界トリガーを判定するプロセス(境界トリガー判定プロセス)のプロセスが動作する。

第4章 境界トリガーシステムの実装に向けて

境界トリガーシステムの実装に向けて、大学内で実験した。

境界トリガーシステムを実装するために、既存のデータ収集システムに大まかに以下の変更をほどこした。

- 共有メモリを用いたプロセス間通信の追加
- 境界部分の SD のトリガー情報の抜き出しの追加
- ホスト PC、セントラル PC 間の通信の追加
- 境界トリガー判定の追加
- 境界トリガーによる SD の波形収集の追加

4.1 共有メモリを用いたホスト PC、セントラル PC 間の通信

共有メモリを用いたプロセス間通信が正しく動作できるのかについて、そしてホスト PC とセントラル PC 間の通信方法として TCP/IP を用いるのがこれが正しく動作するのかの2点を確認した。Raspberry Pi を3台用意し、2台をホスト PC、1台をセントラル PC とみなしてテストした。



図 4.1: 実験で使用した Raspberry Pi 2 model B

まずそれぞれのホスト PC は、図 4.2 のように、1つはセントラル PC との通信用のプロセス (通信プロセス)、もう1つは①の共有メモリに値を書き込み、②の共有メモリに書き込まれた値を表示するプロセス (仮 DAQ プロセス) の2つのプロセスを用意する。そのため、共有メモリも2つ用意している。

そして以下のような流れを考える。

1. それぞれのホスト PC で共有メモリを2つ用意する。

2. それぞれのホスト PC で乱数を生成し、① の共有メモリに値を書き込む。
3. それぞれのホスト PC は共有メモリを用いてプロセス間通信を行い、① の共有メモリに書き込まれた値をセントラル PC に送信する。
4. 乱数を受け取ったセントラル PC はそれらの値を足し合わせる。
5. 足し合わせた値をそれぞれのホスト PC へ送信する。
6. 値を受け取ったホスト PC は、その値を② の共有メモリに書き込み、② の共有メモリに書き込まれた値を表示する。

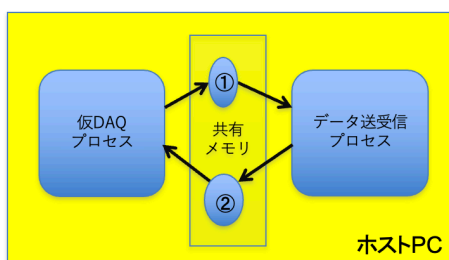


図 4.2: 共有メモリによるプロセス間通信の模式図

そのようにして得られた結果を以下に示す。

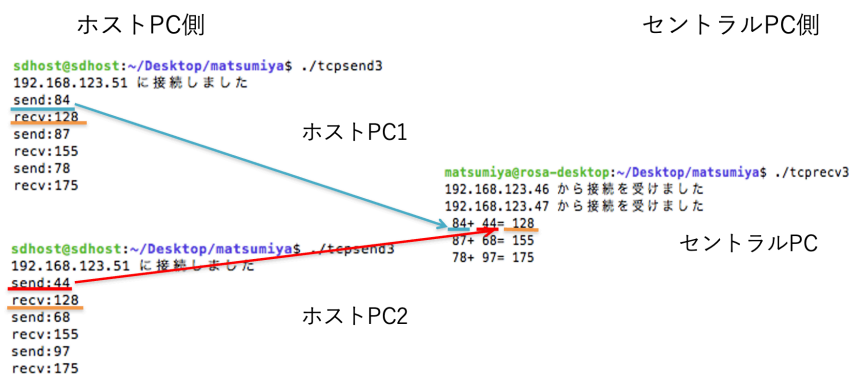


図 4.3: 共有メモリを用いた、ホスト PC とセントラル PC 間の通信。図のようにホスト PC1 で 84、ホスト PC2 で 44 の値をセントラル PC は受け取り、その足し合わせた 128 という値をそれぞれのホスト PC へ送った。きちんと受け取ることができ、データ欠損のないことも確認した。

これより、共有メモリを用いた TCP/IP 通信が正しく動作することを確認した。

次に、実際の SD を用意し、SD からデータ収集を行いながらこのデータ送受信プロセスが動作するのか以下のように確認した。

図 4.5 のように 3 台の SD(1701,1703,1705) を用意した。そして、1703 と 1705 の間に領域の境界があるとし、1701 と 1703 はホスト PC1 とデータ収集を行い、1705 はホスト PC2 とデータ収

集を行うとする。また、1703 と 1705 は領域の境界ラインから 2 列以内の SD であるとし、境界トリガー判定のためこの 2 つの SD のトリガーデータをセントラル PC へ送信するとする。

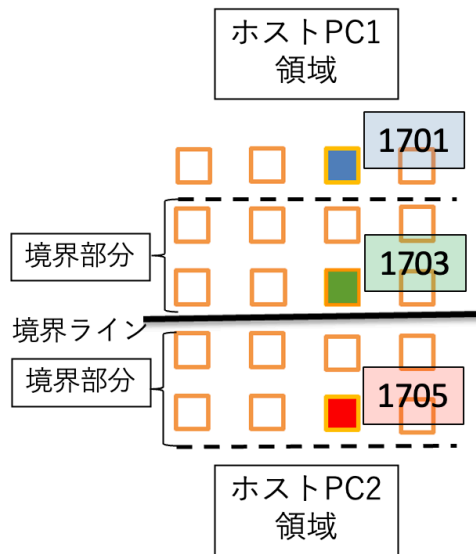


図 4.4: 大学内での実験の SD の配置図

そのようにして得られた結果を以下に示す。

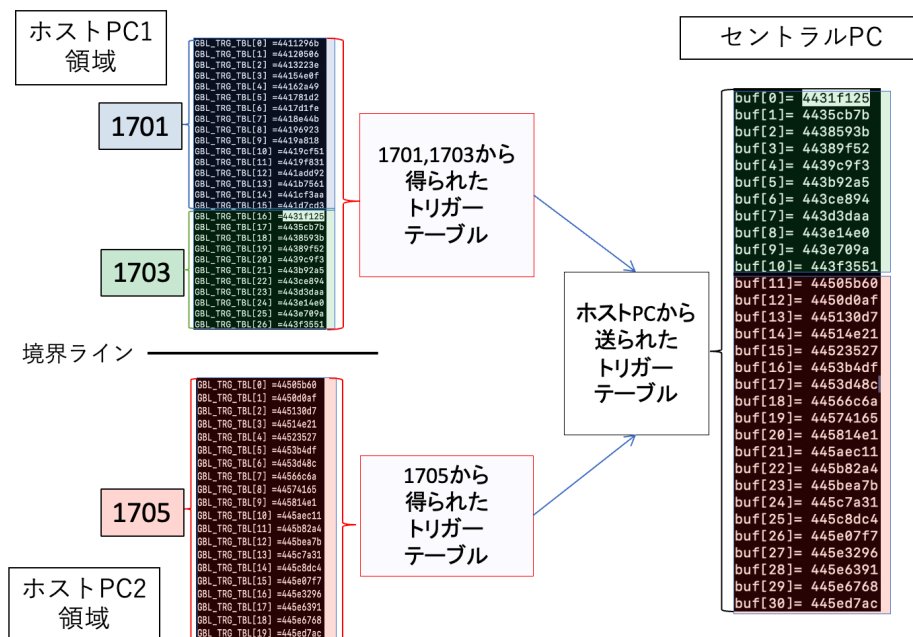


図 4.5: 実験で得られた SD のトリガーデータの例。各 SD からデータ収集で得られたトリガーデータのうち、領域の境界ラインから 2 列以内の SD のトリガーデータを送信することができることを確認した。

このように、ホスト PC はきちんと境界部分の SD のトリガーデータのみ抜き出して、セントラル PC に送信できることを確認できた。

4.2 境界トリガー判定の追加

セントラル PC で受け取ったテーブル状になったトリガーデータは、図 4.6 のように時刻情報順に並び替えられ、境界トリガー判定を行われる。

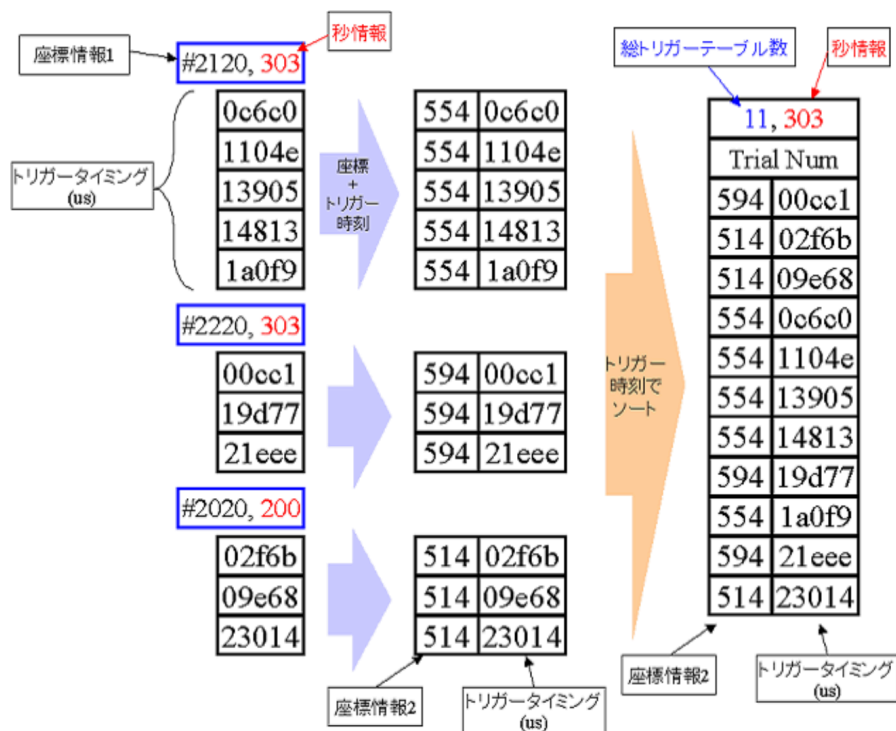


図 4.6: 時刻情報順に並び替えられたトリガーテーブルの処理イメージ。左の列がホスト PC が各 SD から得られた情報。中央の列は座標情報とトリガー時刻情報 (単位は μs) をまとめた後。右の列はそれらを時間情報でソートし、ヘッダーを加えた。

境界トリガー判定は、以下の流れで実行される。

1. あるトリガーテーブル (先頭から n 個目) から $14 \mu s$ 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
 - 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。隣接 3 つ以上あればトリガーテーブルの時間情報を使用してトリガー時刻を求める。
3. 次のトリガーテーブル ($n \leftarrow n+1$) とし 1 に戻る。

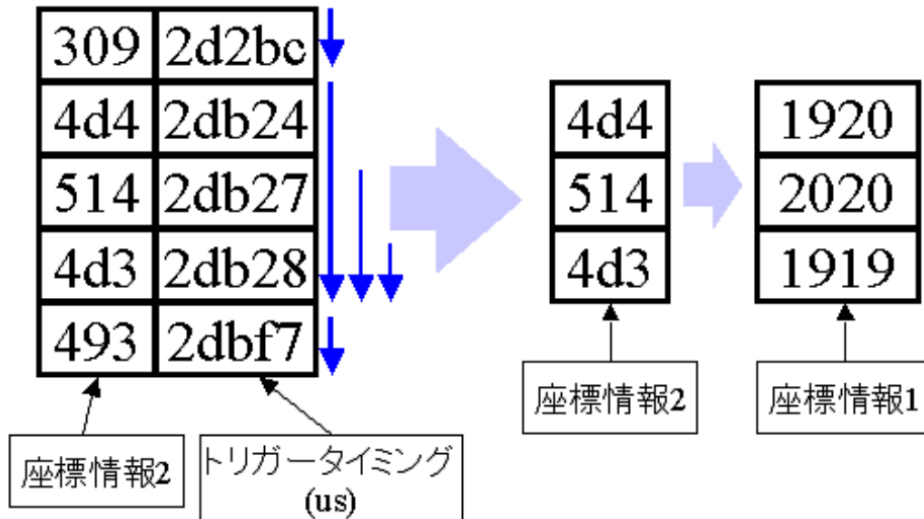


図 4.7: トリガー判定時の処理イメージ。左列の左の 12bit が座標情報を意味し、右 20bit がトリガー時刻情報 (μs) を意味している。青の矢印が始点から $14 \mu s$ 探索している様子を示す。 $14 \mu s$ 以内に 3 つ以上あったときに上位 12bit の座標データを用いて隣接判定を行う。この場合、隣接 3 つ以上だったため波形情報収集命令が出される。トリガー時刻は、最初の時刻の 2db24 と最後の時刻 2db28 の平均の値の adb26 とする。

各トリガー判定は、乱数によって生成した 100 個程度の擬似トリガーテーブルを読み込ませたところ、すべてを見つけることを確認した。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もできた。

4.3 今後

今現在、開発中のデータ収集システムについて以下の開発が終了した。

- 共有メモリを用いたプロセス間通信の追加
- 境界部分の SD のトリガー情報の抜き出しの追加
- ホスト PC、セントラル PC 間の通信の追加
- 境界トリガー判定の追加

最後に、境界トリガーによる SD の波形収集の追加プロセスの開発を完了することで、境界トリガーシステムが完成すると考えられる。

第5章 結論

TA×4 実験の地表検出器のデータ収集システムは、各領域がそれぞれ独立してデータ収集を行っていた。そのため、各領域の境界部分のイベントもデータ収集できることを目標として、境界トリガーシステムの設計と開発を進めた。この境界トリガーシステムを完成させると検出面積が1.2倍に広がることが期待される。

境界トリガーシステムの完成のため、大学内で地表検出器やDAQ用の産業用PCを用意し、境界トリガーを判定するための領域間通信のプロセスや境界トリガー判定するプロセスの開発した。それぞれのDAQ用の産業用PCが各地表検出器とデータ収集を行い、そこから境界部分のSDのデータのみ送信できていることを確認した。また、乱数を用いた擬似トリガーテーブルを用い、境界トリガーの判定がきちんと行われたことを確認した。今後は、境界トリガーによるSDの波形収集のプロセスを追加することで境界トリガーシステムの完成を目指す。

謝辞

本研究に携わる機会を与えて頂き、研究を進めるにあたっては数多くの丁寧かつ熱心なご助言、御指導頂きました大阪市立大学の荻尾彰一教授に深く感謝いたします。

本研究の、特に進捗報告の場において様々なご助言を頂きました大阪市立大学の常定芳基准教授、ユタ大学の Jihyun Kim 博士に深く感謝致します。

毎日の研究生活の中で支えとなって頂きました大阪市立大学の Rosa Mayta Palacios 博士、尾村 勇吾さん、藤田 慧太郎さん、藤原 亮太さん、田上 裕太さん、中井慧さん、佐藤 光希さん、木村 優介さん、荒井 優斗さん、津田 涼輔さん、福島 涼さん、有村 龍平さん、岩崎 葵さん、西岡美咲さんに感謝致します。

東京大学宇宙線研究所の野中敏幸助教、理化学研究所の木戸英治博士、榊直人博士、立命館大学の奥田剛司特任助教には SD に関する知識全般において数多くのご指導、ご助言を頂いたことを深く感謝いたします。

東京大学宇宙線研究所の佐川宏行教授、竹田成宏助教、川田 和正助教、神奈川大学の有働慈治准教授、大阪市立大学技術職員の松山利夫さんには数多くのご助言を頂きましたことを感謝いたします。

大阪市立大学の理学部支援室、大学経理課、研究支援課、大阪市立大学生協の皆様、東京大学宇宙線研究所の木次敦子さんには事務処理などでお世話になりましたことを感謝いたします。

最後に、研究生活を支えてくれた家族、友人に深く感謝致します。

参考文献

- [1] R.U. Abbasi et al, ApJ. 899;86, (2020)
- [2] Telescope Array experiment Home Page, <http://www.telescopearray.org/index.php/about/what-are-cosmic-rays> (2021/02 現在)
- [3] M. Nagano, New J. Phys., 11, 065012(2009).
- [4] 日本物理学会誌 Vol.71, No 41, 2016 (2016).
- [5] S. Ogio, F. Kakimoto, Proc. 28th Int. Conf. Cosmic Rays., 1, 315(2003).
- [6] 木舟 正, 宇宙高エネルギー粒子の物理学, (2004).
- [7] T.K. Gaisser, "Cosmic Rays and Particle Physics", Cambridge University Press (1990).
- [8] K. Kamata, J. Nishimura, *Suppl. Prog. Theor. Phys.*, **6**, 93(1958).
- [9] K. Greisen, *Progress in Cosmic Ray Physics III.*(ed.by J.G. Wilson), **27**(1956).
- [10] J. Linsley, *Phys. G: Nucl. Phys.*, **12**, 51(1986).
- [11] D. Ivanov et al., (Telescope Array Collaboration.), Proceedings of Science (ICRC2019), 298 (2019).
- [12] R. Abbasi et al., The Astrophysical Journal Letter, Volume 790, Number 2 (2014).
- [13] R. Abbasi et al., *Astroparticle Physics*, 80, pp. 131-140(2016).
- [14] R. Abbasi et al., *Arxiv*, 1801.09784 (2018).
- [15] 斎藤公記, TA 実験 278:TA×4 実験用地表検出器の R&D 日本物理学会第 71 回年次大会 (2016)
- [16] W.M. Yao, et al., *J.Phys.G. and Nucl.Phys.*, **33**(2006).
- [17] 木舟正 『新物理学シリーズ 34 宇宙高エネルギー粒子の物理学-宇宙線・ガンマ線天文学-』, 培風館 (2004).
- [18] 藤原亮太, 修士論文 大阪市立大学 (2020).
- [19] 山川雄一, 修士論文 東京大学 (2009).