

TA 実験の地表検出器における
気象観測システムの開発
(Development of weather observation system
for the TA SD electronics)

理学研究科

数物系専攻

織田浩行

目次

第1章	宇宙線	1
1.1	宇宙線とは	1
1.2	宇宙線のエネルギースペクトル	2
1.2.1	ベキ型のエネルギースペクトルを満たす宇宙線の加速機構	2
1.2.2	knee の成因	3
1.2.3	2nd knee の成因	4
1.2.4	ankle の成因	4
1.2.5	カットオフの成因	4
1.3	宇宙線の化学組成	5
1.4	宇宙線観測と空気シャワー現象	6
1.4.1	空気シャワー現象	6
1.4.2	空気シャワーの縦方向発達	7
1.4.3	空気シャワーの横方向分布	10
1.4.4	空気シャワーの観測方法	11
1.5	“2nd knee” 領域の宇宙線の観測結果の現状	13
1.5.1	エネルギースペクトル	14
1.5.2	質量組成	17
第2章	TA 実験、TALE 実験、TA × 4 実験	20
2.1	TA 実験	20
2.1.1	TA 実験の大気蛍光望遠鏡	23
2.1.2	TA 実験の地表検出器アレイ	24
2.2	TALE 実験	25
2.2.1	TALE 実験の大気蛍光望遠鏡	25
2.3	TA × 4 実験	25
2.4	TALE 実験 SD とトリガー DAQ サイクル	26
2.4.1	TALE 実験の SD エレクトロニクス	26
2.4.2	SD エレクトロニクス	26
2.4.3	データ収集塔 (タワー) の基本構成	28
2.4.4	トリガー DAQ サイクル	28
2.4.5	モニターデータとモニタリングシステム	30
第3章	気象観測装置を組み込む目的	34
3.1	気象観測装置を組み込む目的	34
3.2	データ解析に使用される気象データ	34
3.3	現状の気象データの測定精度	34
3.4	気象データによる X_{\max} の変化	34

第 4 章	気象観測装置の開発	37
4.1	気温、湿度、気圧測定装置 BME280	37
4.1.1	SPI 通信	37
4.2	気温、湿度、気圧測定装置 BME280 の仕様	38
4.2.1	BME280 のキャリブレーションデータ	38
4.2.2	BME280 の測定データ読み出し	38
4.2.3	BME280 の設定	38
4.2.4	BME280 の書き込みと読み出し	41
4.3	BME280 の PC 制御による動作テスト	42
4.4	SD エレクトロニクスの FPGA での制御	44
4.4.1	FPGA	44
4.4.2	オシロスコープによる信号の確認	44
第 5 章	結論	51

要旨

「宇宙線」とは宇宙空間を飛び交う高エネルギー放射線でその主要成分は原子核である。宇宙線は多数地球に飛来しており、そのエネルギーは広範囲にわたり、 10^{20} eV を超える高エネルギーのものも観測されている。これほど高いエネルギーの宇宙線が宇宙のどこで生成され、どのように加速されるのか、そのメカニズムについて詳しくは解明されていない。高いエネルギーの宇宙線が大気に入射すると、大気中の原子核と相互作用して二次粒子を生成する。さらにそれらの二次粒子も粒子生成を行なう。この過程をくり返し、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。TA 実験及び、その拡張実験である TALE 実験、TA_{x4} 実験では、米国ユタ州の砂漠地帯に大気蛍光望遠鏡 (FD (Fluorescence Detector)) と地表検出器 (SD (Surface Detector)) を設置して、この空気シャワー現象の観測実験を行っている。このハイブリッドシステムでは、データ解析に使用される気象のデータによって X_{max} の値が変わることがわかった。そのため、より正確な位置で気象データを取ることは X_{max} の値を決定するのに重要である。現在、気象のデータは、実験サイト内の各 FD ステーションでしか取っておらず、各 FD ステーションまでの距離は約 35km も離れている。一方、地表検出器は 1.2km 間隔で設置されており、地表検出器に気象観測システムを組み込むことで、現在の測定間隔よりも高密度で、気象データを取ることができる。そこで本研究では、温湿度気圧計を SD 制御エレクトロニクスに実装することを目指し、温湿度気圧計のテスト SD 制御エレクトロニクスのファームウェアを開発した。

第1章 宇宙線

1.1 宇宙線とは

宇宙線とは、宇宙空間を飛び交う高エネルギーの放射線であり、1912年にオーストラリアの物理学者 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、これまでに 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。宇宙を飛び交う宇宙線を一次宇宙線と総称し、これら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発生する二次粒子のことを二次宇宙線と呼ぶ。一次宇宙線はエネルギーが大きくなるにつれ、その到来頻度はエネルギーのほぼ3乗に比例して小さくなることが知られている。

図 1.1 に一次宇宙線のエネルギースペクトルを示す。

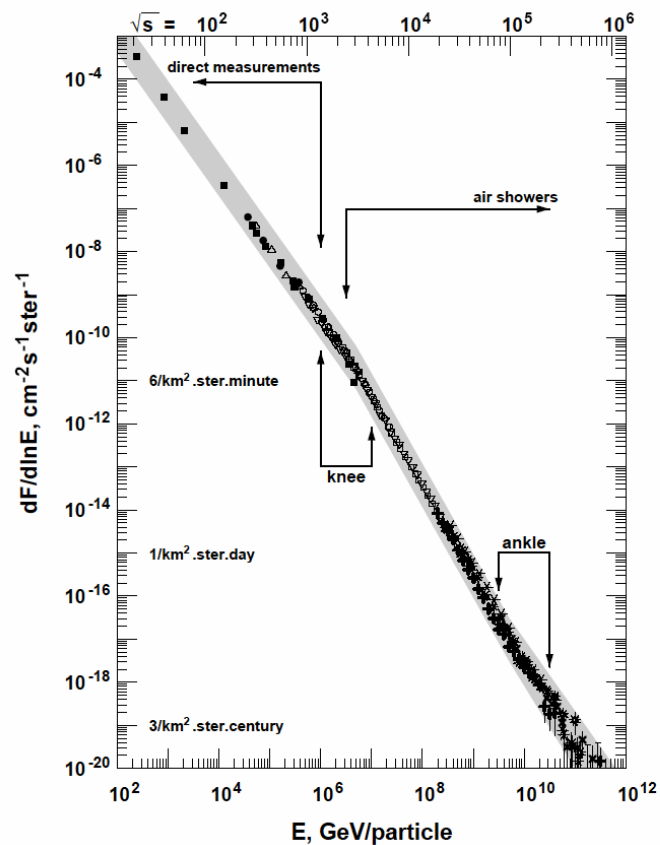


図 1.1: 一次宇宙線のエネルギースペクトル

1.2 宇宙線のエネルギースペクトル

10^{10} eV までのエネルギーの宇宙線は、惑星間空間衝撃波や太陽フレアによって加速されていると考えられている。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 $F(E) = K \times E^{-\gamma}$ で近似でき、 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。このことを極立たせるために、フラックスに E^3 を掛けたグラフが図 1.2 である。

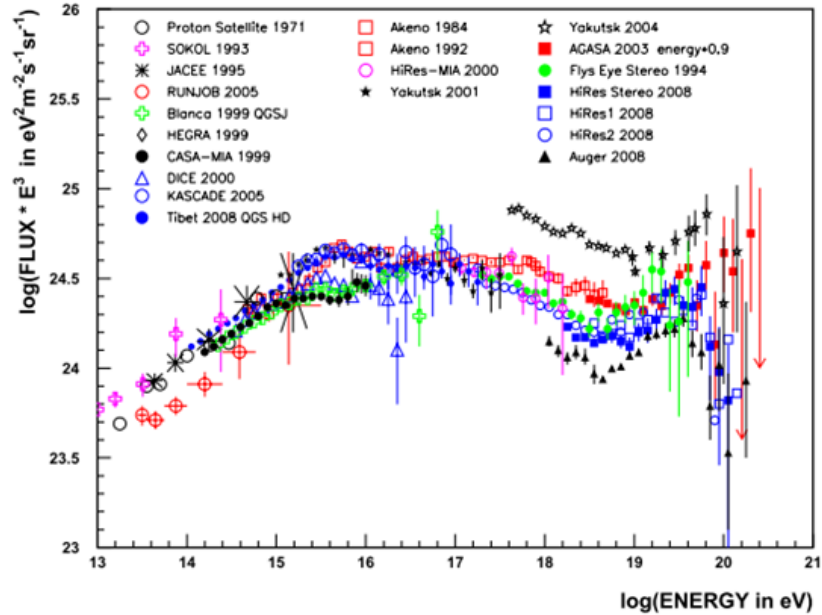


図 1.2: 一次宇宙線のエネルギースペクトル。 10^{15} eV、 $10^{17.5}$ eV、 $10^{18.5}$ eV 付近に折れ曲がり構造があることが分かる。[1]

10^{15} eV 付近までは γ は ~ 2.7 であり、そこから ~ 3.0 へと変化する。そして $10^{17.5}$ eV 付近でさらに傾きが急になり、 $10^{18.5}$ eV 付近からまた $\gamma \sim 2.7$ となる。これら 3 つのスペクトルの折れ曲がりそれぞれ “knee”、“2nd knee”、“ankle” と呼んでいる。また、 10^{20} eV 付近からカットオフが見られる。べき型のエネルギースペクトルといくつかの折れ曲り構造は宇宙線源と宇宙線の伝播経路とそのエネルギー変化を示していると考えられ、その精密測定が非常に重要である。現在考えられている解釈の一例を以下に述べる。

1.2.1 べき型のエネルギースペクトルを満たす宇宙線の加速機構

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、べき型のエネルギースペクトルを満たすことは必須の条件である。この点で最も有力なのが「フェルミ加速機構」である [5]。

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的な加速モデルである。この理論の肝は、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) が粒子のエネルギーに比例する、つまり $\Delta E = \alpha E$ となる点にある。

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

$$E_n = E_0 (1 + \alpha)^n \quad (1.1)$$

よって、エネルギーが E になるのに必要な衝突回数は、

$$n = \frac{\ln(E/E_0)}{\ln(1 + \alpha)} \quad (1.2)$$

である。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 $(1 - P_{\text{esc}})^n$ である。結果として E 以上のエネルギーに加速される粒子の数は、

$$N(\geq E) \propto \sum_{m=n}^{\infty} (1 - P_{\text{esc}})^m = \frac{(1 - P_{\text{esc}})^n}{P_{\text{esc}}} \quad (1.3)$$

を満たすであろう。式 (1.2) を式 (1.3) に代入すると、

$$N(> E) \propto \frac{1}{P_{\text{esc}}} \frac{E^{-\gamma}}{E_0} \quad (1.4)$$

と表せ、ここで、

$$\gamma = \frac{\ln[(1 - P_{\text{esc}})^{-1}]}{\ln(1 + \alpha)} \approx \frac{P_{\text{esc}}}{\alpha} \quad (1.5)$$

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

1.2.2 knee の成因

knee より低いエネルギー領域の宇宙線は、超新星残骸の衝撃波で加速されると考えられている。超新星爆発によるエネルギーの放出量は、 10^{51}erg 程度である。我々の銀河内での超新星爆発の頻度は、50年に1回程度であるので、超新星爆発によるエネルギー供給率は、

$$\frac{10^{51} \text{erg}}{50 \text{yr}} \sim 6 \times 10^{41} \text{erg/s} \quad (1.6)$$

であり、パワー的には足りている。超新星爆発の放出エネルギーから、爆発時に物質が放出される初速度 V を求めると、

$$\frac{1}{2} MV^2 = 10^{51} \text{erg} \quad (1.7)$$

放出される質量 M が太陽質量程度だと仮定すると、

$$V = 10^7 \text{m/s} \quad (1.8)$$

一方、放出された物質は、周りの物質を吐きながら進むので、爆風による膨張は、放出された物質の質量が、掃いた周りの物質の質量と同程度になるまで続くだろう。よって、爆風の寿命は、周りの物質の密度を $\sim 1 \text{proton} / \text{cc} \sim 10^{-24} \text{g/cm}^2$ とすると、

$$M = \frac{4}{3} R^3 = \frac{4}{3} (Vt)^3 \quad (1.9)$$

$$t = \frac{1}{V} \left(\frac{3M}{4} \right)^{1/3} \sim 10^3 \text{ yr} \quad (1.10)$$

したがって、爆風の寿命は 1000 年程度である。この時の超新星残骸の広がり、 $R \sim Vt \sim$ 数 pc であり、超新星残骸の磁場は $1 \sim 10 \mu\text{G}$ と考えられており、
磁場 B 、宇宙線のエネルギー E 、ラーモア半径 r_L の関係は、宇宙線の速度 $v \sim c$ とすると、

$$\frac{\gamma mc^2}{r_L} = qvB \quad (1.11)$$

$$\sim \frac{E}{r_L} = zecB \quad (1.12)$$

で与えられるから、大きさ R 、磁場 B という加速環境があった場合、そこで原理的に到達可能な最大のエネルギー E_{max} は、

$$E_{\text{max}} = zecRB \quad (1.13)$$

$$E_{\text{max}}[\text{eV}] = 3 \times 10^8 \times z \times (R[\text{pc}] \times 3.086 \times 10^{16}) \times \left(\frac{B[\text{Gauss}]}{10^4} \right) \quad (1.14)$$

$$\sim 10^{21} \times z \times (R[\text{pc}]) \times (B[\text{Gauss}]) \quad (1.15)$$

という関係にあることがわかる。よって、超新星残骸の場合、 10^{15}eV まで加速することができ、これは Knee にほぼ等しい。

1.2.3 2nd knee の成因

$10^{15.5}\text{eV}$ 付近の knee が陽子の加速限界だとすれば、鉄原子核の加速限界が 26 倍のところに現れてもよいはずである。 $10^{15.5}\text{eV}$ での陽子成分の減少に始まり、このプロセスが順に鉄まで続くと考えられる。knee よりも 26 倍高いエネルギーである $\sim 10^{17}\text{eV}$ 付近では宇宙線の主成分が鉄となり、折れ曲がり iron knee が観測されるはずである。

1.2.4 ankle の成因

ankle という構造を説明出来る一つのモデルは、銀河系外起源宇宙線と宇宙背景放射との相互作用、 $p\gamma \rightarrow pe^+e^-$ という過程を通じたエネルギー損失によるフラックスの減少というものである。このとき化学組成は ankle をはさんだ高エネルギー側、低エネルギー側どちらでも陽子のままで変化しないと予想される。

1.2.5 カットオフの成因

高エネルギーの陽子は光子と相互作用して、以下の過程で π を作る。

$$p^+ + \gamma \rightarrow p^+ + \pi^0 \quad (1.16)$$

$$p^+ + \gamma \rightarrow n + \pi^+ \quad (1.17)$$

宇宙空間は、宇宙背景放射 (Cosmic Microwave Background Radiation: CMBR) で満ちている。CMB は、 $T \sim 2.7K$ の光子であり、エネルギーは、 $= k_B T \sim 10^{-3} \text{ eV}$ 程度である。高エネルギーの宇宙線は、この CMB と相互作用してパイオンを生成し、エネルギーを損失する。

$$p^+ + \gamma_{\text{CMB}} \rightarrow p^+ + \pi^0 \quad (1.18)$$

この反応が起こる時の宇宙線のエネルギー E は、陽子の質量エネルギー $m_p c^2 = 938 \text{ MeV}$ 、パイオンの質量エネルギー $m_\pi c^2 = 135 \text{ MeV}$ として、

$$(E + m_\pi c^2)^2 + (P_{\text{proton}} c + P_{\text{CMB}} c)^2 \sim (m_p c^2)^2 + 4E \cdot \quad (1.19)$$

$$= (m_p c^2 + m_\pi c^2)^2 \quad (1.20)$$

$$E = \frac{(2m_p c^2 m_\pi c^2) + (m_\pi c^2)^2}{4} \quad (1.21)$$

よって、宇宙線陽子に対しては、 $E = 6.8 \times 10^{19} \text{ eV}$ からパイオン生成が起こり始めると計算できるが、これは、図 1.2 に見られる最高エネルギー領域でのカットオフにピッタリと一致しており、観測に現れるカットオフを説明する有力なモデルである。

1.3 宇宙線の化学組成

これまでに説明したモデルでは、Knee では銀河系内起源が主であり、化学組成は陽子から重い元素へ遷移していくと考えられる。2ndKnee では、化学組成は銀河系内起源の重い元素から、銀河系外起源の陽子へと遷移していくと考えられる。ankle では、陽子のまま変化しないと考えられる。それぞれの構造での正しいモデルを構築するためには、化学組成の決定が極めて重要である。

1.4 宇宙線観測と空気シャワー現象

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、大気中の原子核との相互作用によってエネルギー損失し、地上に到達しないため、 10^{14} eV 以下の低エネルギー宇宙線は、超高層または宇宙空間で飛翔体 (気球、人工衛星、宇宙ステーション等) 搭載検出器によって直接観測される。しかし、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^{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、飛翔体搭載検出器による直接観測は難しい。そこで、このような高エネルギー宇宙線に対しては一次宇宙線が大気と相互作用してできる二次宇宙線 (空気シャワー) を地表で検出するという間接観測が行われる。

1.4.1 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、一つの一次宇宙線によって二次粒子群が生成され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。

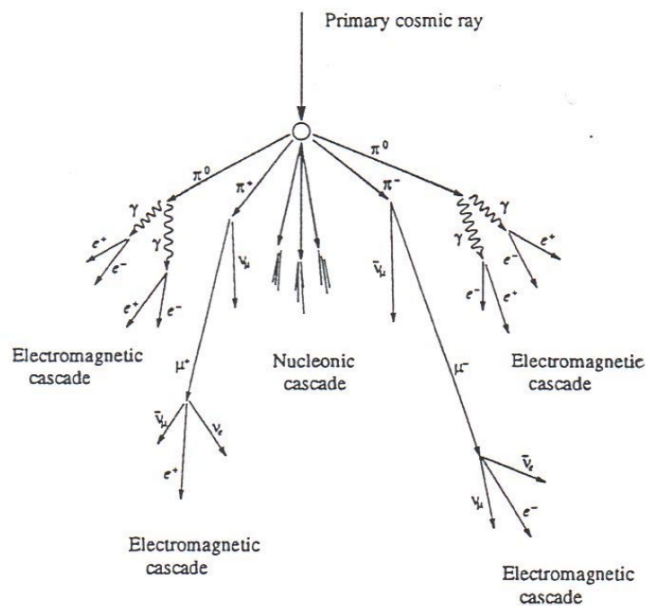


図 1.3: 空気シャワーの模式図

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を起こす (核カスケード)。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。

$$p + N \rightarrow p + N' + \pi \dots \quad (1.22)$$

多数生成される 中間子のうち π^0 は短い寿命 (8.4×10^{-17} s) で 2 個のガンマ線に崩壊し、次に述べる電磁カスケードの親となる。これに対し、 π^\pm の寿命は 2.60×10^{-8} s と比較的長いため、さらに - 原子核 相互作用をおこし、これをくりかえす。

$$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu) \quad (1.23)$$

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、

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e \quad (1.24)$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e \quad (1.25)$$

のように崩壊する。大気の厚みは原子核-原子核相互作用または、 - 原子核相互作用の平均自由行程の約 10 倍であるため、これらの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 の電子について、単位厚さ当たりの制動放射によるエネルギー損失 $(dE/dX)_{\text{brems.}}$ は以下のように表される。

$$\left(\frac{dE}{dX}\right)_{\text{brems.}} \simeq -\frac{E}{X_0} \quad (1.26)$$

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、以下の量である。

$$\frac{1}{X_0} = \frac{4Z^2 r_e^2 N}{137 A} \ln\left(184Z^{-\frac{1}{3}}\right) \quad (1.27)$$

ここで、 r_e は古典電子半径、 N はアボガドロ数、 Z 、 A はターゲット原子核の原子番号、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、電子対生成によるガンマ線のエネルギー損失は、放射長を使って、

$$\left(\frac{dE}{dX}\right)_{\text{pair}} = -\frac{7 E}{9 X_0} \quad (1.28)$$

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していくので、やがて、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に転ずる。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 [7]。一次宇宙線が原子核の場合、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ることになる。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。

1.4.2 空気シャワーの縦方向発達

前述で述べたように、核カスケードで電磁カスケードからなる空気シャワーでは、制動放射と電子対生成を繰り返すことで、各電子成分粒子のエネルギーが、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 $E_c \simeq 85 \text{ MeV}$) にまで下がると、粒子生成を起こさずにエネルギーを失って大気に吸収され、結果として、シャワー中の粒子の総数は減少に転じる。この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を表現する以下の近似式が知られている。

$$N_e(t) \sim \frac{0.31}{\sqrt{y}} \exp \left[t \left(1 - \frac{3}{2} \ln s \right) \right] \quad (1.29)$$

$$y = \ln \left(\frac{E_0}{E_c} \right) \quad (1.30)$$

$$s = \frac{3t}{t + 2y} \quad (1.31)$$

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・成分粒子) が最大になるときに $s = 1$ となるパラメータである [5]。

一次宇宙線が陽子の場合には、Gaisser と Hillas の提案に基づく以下の式 (GH 関数) が用いられることが多い。

$$N_e(X) = N_{\max} \left(\frac{X - X_0}{X_{\max} - X_0} \right)^{\frac{X_{\max} - X_0}{\lambda}} \exp \left(-\frac{X_{\max} - X}{\lambda} \right) \quad (1.32)$$

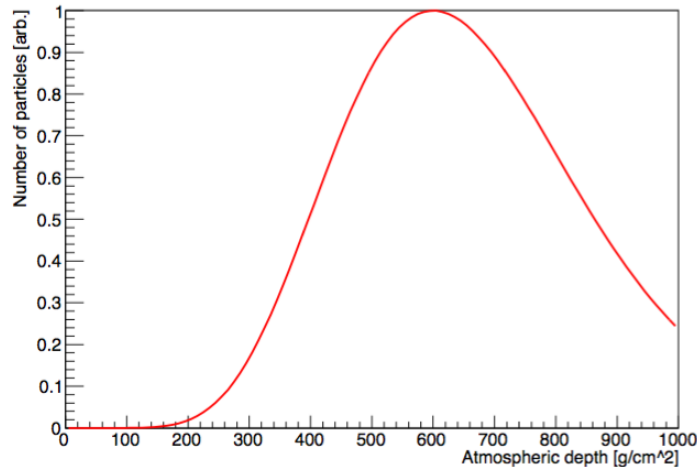


図 1.4: 空気シャワーの縦方向発達 (GH 関数)

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 $N_{\max} \sim 2 \times E_0 \times 10^{-9}$ (E_0 は一次宇宙線のエネルギー、単位: eV) の関係とがある。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} の値が小さくなる傾向がある。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ことにより上空で発達が始まること、核子当たりのエネルギーが小さくなるため、エネルギーの細分化が早く進むことが原因である。

図 1.5 のように、電子またはガンマ線は放射長 λ 進んで 1 回の制動放射または電子対生成を起し、臨界エネルギー E_c までねずみ算式に増えていくという単純なモデルを考えると、 n 段の反応で粒子数 N は、

$$N = 2^n \tag{1.33}$$

となり、一次宇宙線のエネルギー E_0 が生成された各粒子に等分配されて、生成された粒子のエネルギーが臨界エネルギー E_c に等しくなるまで粒子が生成されるとすれば、 E_0 のエネルギーを持つ一次宇宙線によって生成される最大の粒子数 N_{\max} は、

$$N_{\max} = \frac{E_0}{E_c} \tag{1.34}$$

となる。 n_{\max} 段で N_{\max} に到達するとすると、

$$n_{\max} = \frac{\ln N_{\max}}{\ln 2} \tag{1.35}$$

$$n_{\max} = \frac{\ln(E_0/E_c)}{\ln 2} \tag{1.36}$$

である。 $X_{\max} = n_{\max}$ とおくと、

$$X_{\max} = \frac{\ln(E_0/E_c)}{\ln 2} \tag{1.37}$$

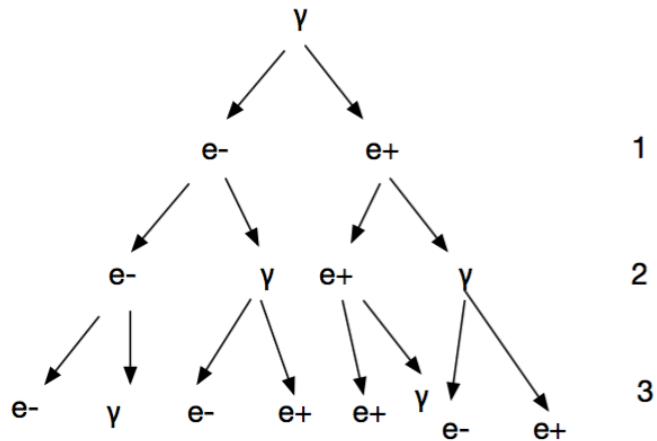


図 1.5: 電磁カスケード中の粒子の増え方

となる。質量数 A の原子核の場合、粗い近似では、エネルギー E の質量数 A の原子核の作る空気シャワーは、エネルギー E/A の陽子が作る空気シャワー A 個の重ね合わせと考えることができるので、 $E \rightarrow E/A$ とすれば、簡単なモデル計算から、 $X_{\max} \propto \ln(E_0/A)$ (A は一次宇宙線の質量数) の関係があることが示される。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 1.6 に示す。

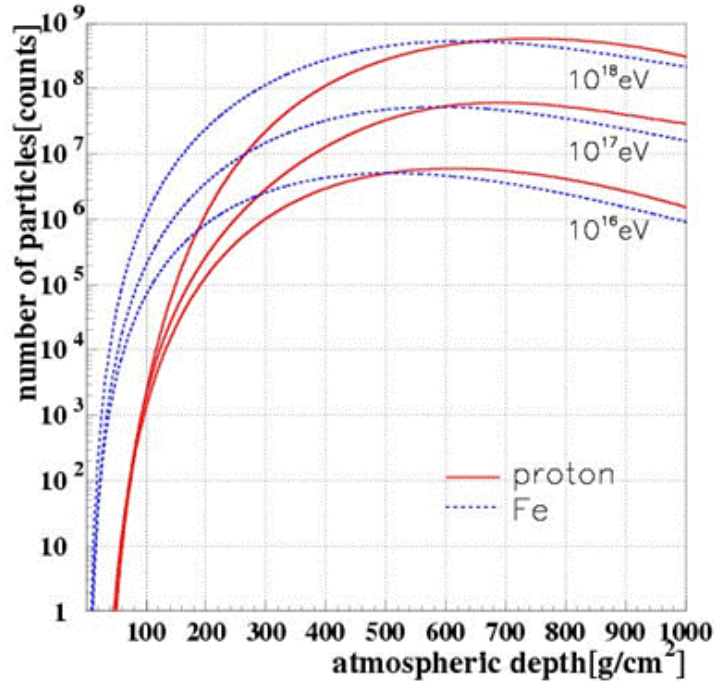


図 1.6: 空気シャワーの縦方向発達

1.4.3 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。

$$\rho_e(R) = C \frac{N_e}{R_M^2} \left(\frac{R}{R_M} \right)^{s-2.0} \left(1 + \frac{R}{R_M} \right)^{s-4.5} \quad (1.38)$$

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た距離 (厚さ) であり、 $R_M \sim 9.3 \text{ g/cm}^2$ である。

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徐々に生成される 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

$$\rho_e(R) \propto \left(\frac{R}{R_M}\right)^{-\alpha} \left(1 + \frac{R}{R_M}\right)^{-(\eta-\alpha)} \quad (1.39)$$

と表される。AGASA 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 (1.39) 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]。

$$\rho_e(R) = C \left(\frac{R}{R_M}\right)^{-1.2} \left(1 + \frac{R}{R_M}\right)^{-(\eta-1.2)} \left(1.0 + \left(\frac{R}{1\text{km}}\right)^2\right)^{-\delta} \quad (1.40)$$

1.4.4 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同時観測すると、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 (ステレオ観測)。

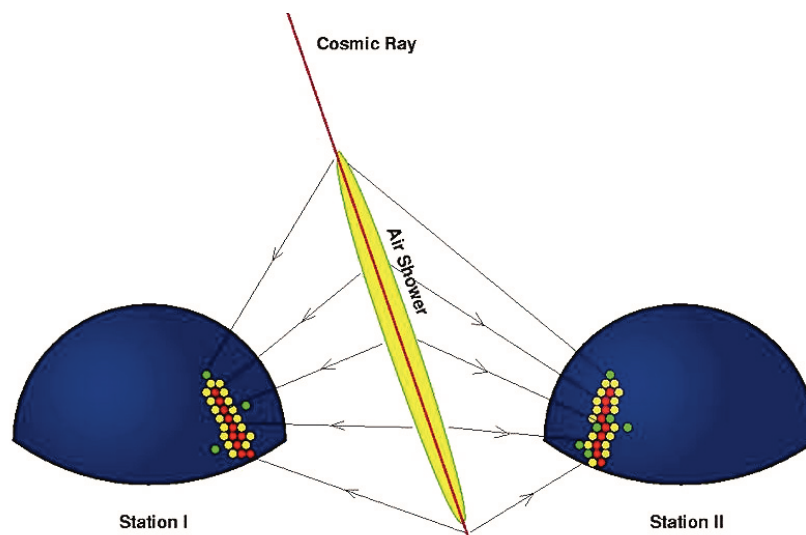


図 1.7: 大気蛍光による空気シャワーのステレオ観測の概念図

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 (1.32) 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 $N_e(X)$ から次の式により一次宇宙線のエネルギー E_0 が求まる。

$$E_0 = \frac{\epsilon_0}{X_{\text{rad}}} \int N_e(X) dX \quad (1.41)$$

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、一次宇宙線の粒子種の決定が可能である。

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、一次エネルギーを高エネルギーハドロン相互作用モデルに依存することなく決定できる。しかし、エネルギー決定には、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。

地表に設置する粒子検出器として、水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。空気シャワー中のミュ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 1.8 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、相互作用モデルを考慮したモンテカルロ計算を必要とするので、ハドロン相互作用モデルの正確さ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。

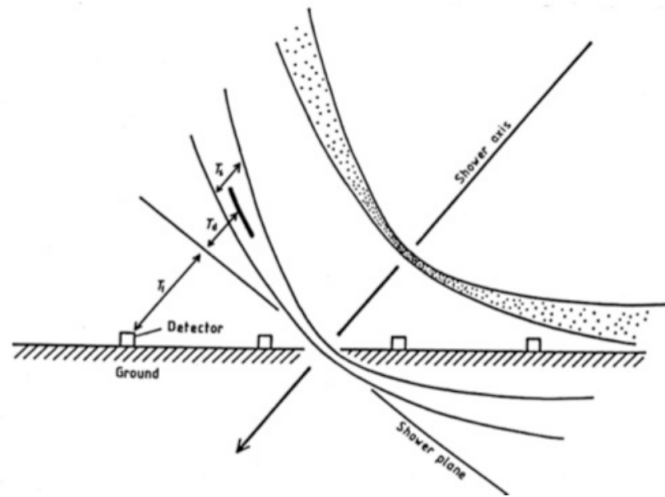


図 1.8: 地表付近の空気シャワー断面の概念図

1.5 “2nd knee” 領域の宇宙線の観測結果の現状

2nd knee 領域の宇宙線は宇宙線起源についての重要な情報を持っていると考えられており、観測結果が注目されている。この 2nd knee 領域付近の宇宙線を観測している (していた) 実験として、KASCADE-Grande 実験、Yakutsk 実験、Tunka 実験、IceTop 実験がある。これらの実験の結果には、ある程度の一致は見られるものの、統一的理解は得られていない。本節ではこれらの実験について簡単に紹介し、観測結果をまとめる。

KASCADE-Grande 実験

KASCADE-Grande 実験はドイツのカールスルーエ工科大学で展開されていた実験である。KASCADE-Grande 実験は KASCADE アレイの南西側に 10 m^2 のシンチレータ検出器を 137 m 間隔で 37 台配置し、検出面積を $700 \text{ m} \times 700 \text{ m}$ に拡張したものである。KASCADE アレイは 3.2 m^2

のシンチレータ検出器 252 台を 200 m×200 m の範囲に展開した検出器群に加え、20 m×16 m×4 m のハドロンカロリメータ 1 台と 128 m² のミュオントラッキング検出器 1 台から構成される。KASCADE-Grande 実験はおよそ 10¹⁶ ~ 10¹⁸ eV のエネルギーを持つ宇宙線を 1996 年から 2009 年にかけて観測していた [14]。

Yakutsk 実験

Yakutsk 実験はロシアの北東部のヤクーツクに展開されている実験である。58 台の地表シンチレータ検出器 (2 m²) と地下に配置された 6 台のミュオン検出器 (20 m²) で 8.2 km² をカバーしている。さらに 48 台のチェレンコフ光検出器で空気シャワーが発するチェレンコフ光を観測する。これによっておよそ 10¹⁵ ~ 10¹⁸ eV のエネルギーを持つ宇宙線を観測する [15]。

Tunka 実験

Tunka 実験はロシアの南東部のバイカル湖の近くに展開されている実験である。7 台のチェレンコフ光検出器 (鉛直上方に向けた 8 インチ光電子増倍管 1 本からなる) で構成されるクラスターを 85 m 間隔で 19 クラスター円形に配置し、その中心から周囲半径 1 km の地点にさらに 6 クラスターを配置して、およそ 3 km² をカバーする。これによっておよそ 10¹⁵ ~ 10¹⁸ eV のエネルギーを持つ宇宙線を観測している [16]。

IceCube neutronino 観測所

IceCube neutronino 観測所 (以下 IceCube) は南極点のアムンゼン・スコット基地の近くに展開されている実験である。検出器は球型のチェレンコフ検出器を 60 個ストリング状に氷中に並べたもので、これが 120 m 間隔で 86 本、地表面から深く 1450~2450 m 範囲に配置され、全体で 1 km³ の検出体積を持つ。さらに上記とは別に、地表付近に 2 つのチェレンコフ検出器タンクからなるステーションが 81 ステーション展開されており、IceTop と呼ばれる 1 km² をカバーする地表空気シャワーアレイを構成している。これによっておよそ 10¹⁵ ~ 10¹⁸ eV のエネルギーを持つ宇宙線を観測している [17]。

1.5.1 エネルギースペクトル

図 1.9、図 1.10、図 1.11、図 1.12 に KASCADE-Grande 実験、Yakutsk 実験、Tunka 実験、IceTop 実験で報告されているエネルギースペクトルを示す。ここで γ_i はスペクトルの冪指数であり、 γ_i の値から、異なった観測方法を持つ 4 つの実験で似た構造が見られることがわかる。

γ	KASCADE-Grande 実験	Yakutsk 実験	Tunka 実験	IceTop 実験
2ndKnee 以下での γ の値	-2.95± 0.05	-2.92± 0.03	-2.99± 0.01	-2.91± 0.03
2ndKnee 以上での γ の値	-3.24± 0.08	-3.24± 0.04	-3.34± 0.11	-3.37± 0.08

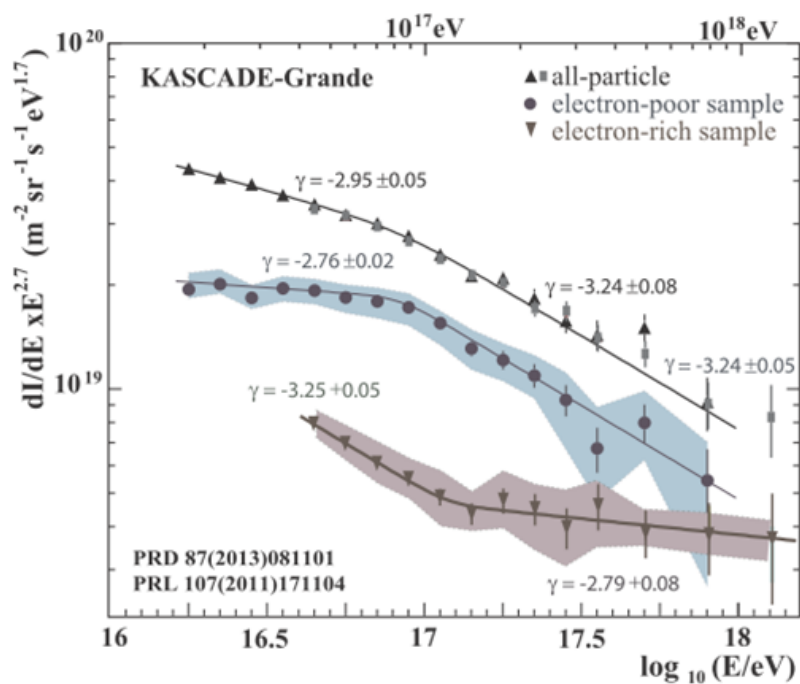


図 1.9: KASCADE-Grande 実験で観測されたエネルギースペクトル [18]。黒丸と青は muon rich、すなわち重原子核起源のシャワーのエネルギースペクトル。下三角と茶色は muon poor、すなわち軽原子核のもの。上三角と四角は全粒子スペクトルで、灰色四角が 2011 年 [19]。上三角が 2013 年 [20] に発表した結果である。色付きの領域は系統誤差の範囲を表している。

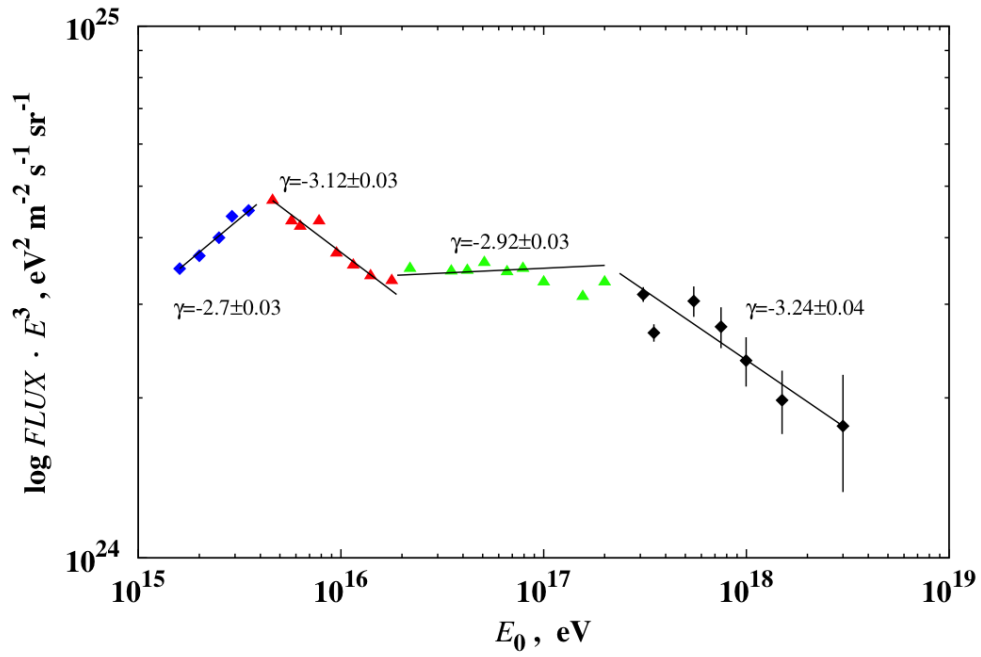


図 1.10: Yakutsk 実験で観測されたエネルギースペクトル [21]

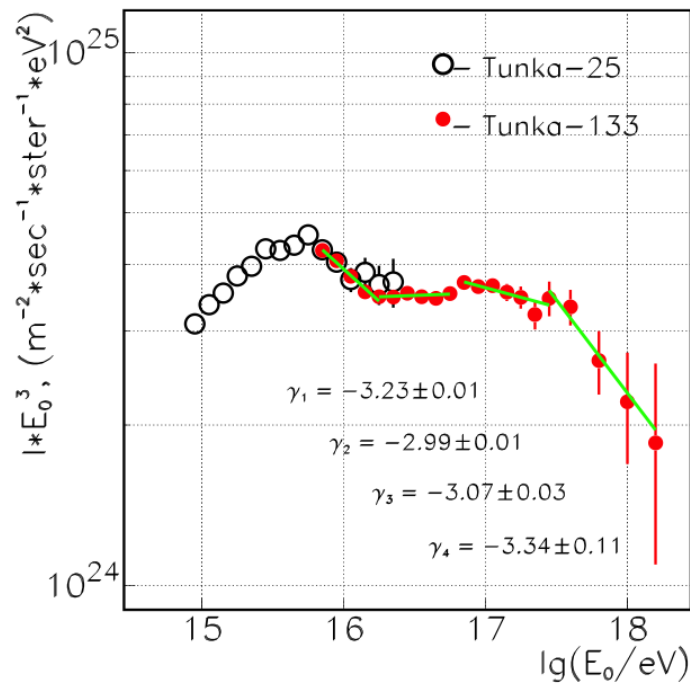


図 1.11: Tunka 実験で観測されたエネルギースペクトル [16]

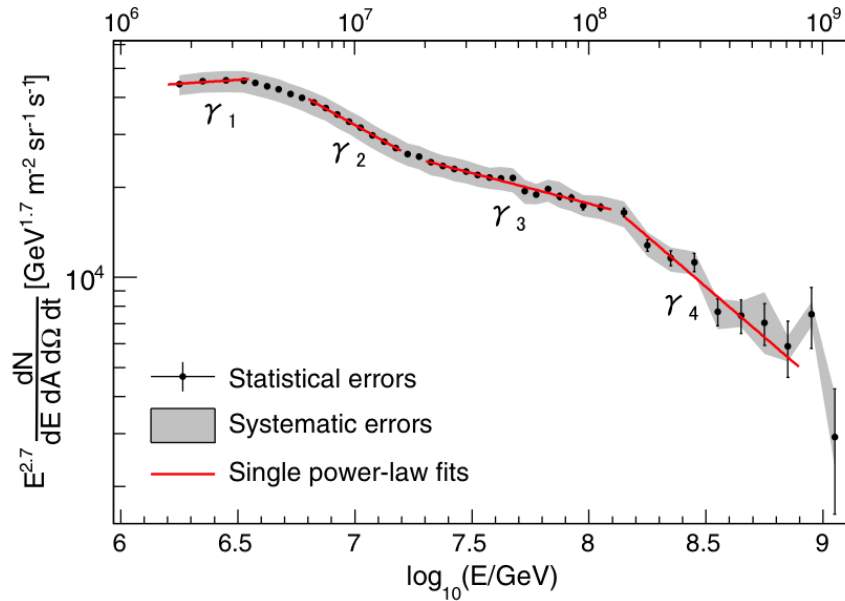


図 1.12: IceTop で観測されたエネルギースペクトル [17]

1.5.2 質量組成

図 1.13、図 1.14、図 1.15 に Yakutsk 実験、Tunka 実験、IceTop 実験で報告された一次宇宙線の質量組成を示す。横軸はエネルギー、縦軸は質量数の自然対数を取ったものである。

スペクトルにおける 2nd knee の存在は、実験的に確立されているが、2nd knee 付近のエネルギー領域での質量組成の観測結果は各実験で異なる。Yakutsk、Tunka は $10^{16} \sim 10^{17}$ eV のエネルギー領域では一次エネルギーの増加とともに重い原子核へと変化していき、それより上の領域では軽い原子核に変化していくという結果が出ている。しかし IceTop では、このエネルギー側での軽い組成への変化は見られない。2nd knee のエネルギー領域でエネルギーが上がるごとに一次粒子種が重い原子核から軽い原子核に変化していれば、2nd knee は銀河系内起源から銀河系外起源へ遷移することによるもので、また ankle は宇宙背景放射と宇宙線陽子との相互作用による電子対生成によるものだと考えることができる。しかし、2nd knee のエネルギー領域より上で一次粒子種が重い原子核のままだと、ankleこそ銀河系内起源から銀河系外起源へ遷移しているところであるかも知れず、2nd knee に関しては別の原因を考える必要がある。このように、2nd knee のエネルギー領域の質量組成はたいへん興味深いトピックである。

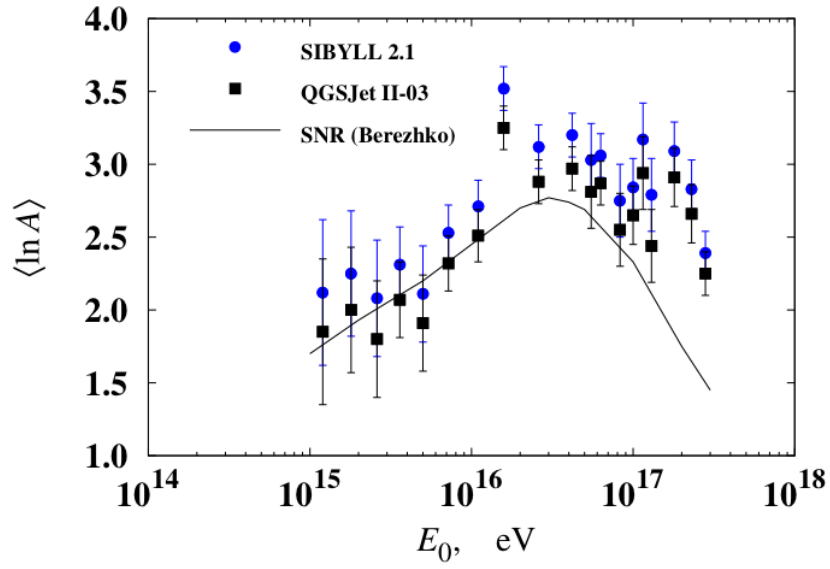


図 1.13: Yakutsk 実験で観測された質量組成 [15] .

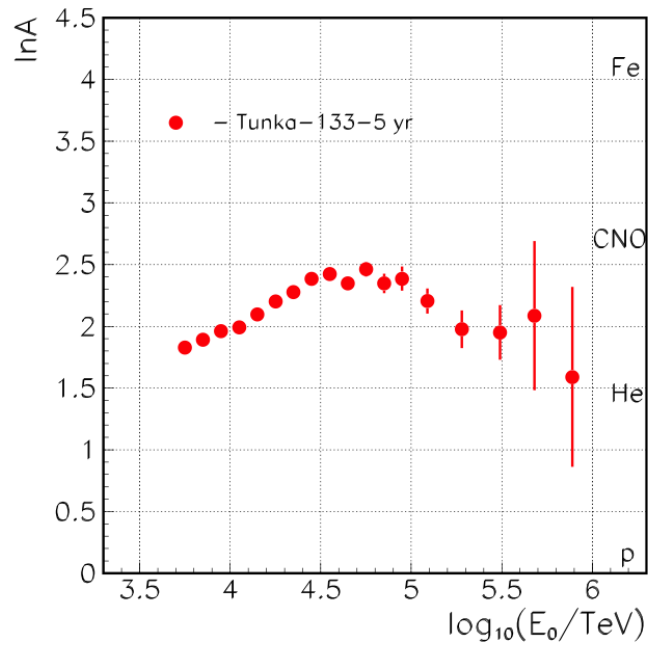


図 1.14: Tunka 実験で観測された質量組成 [16] .

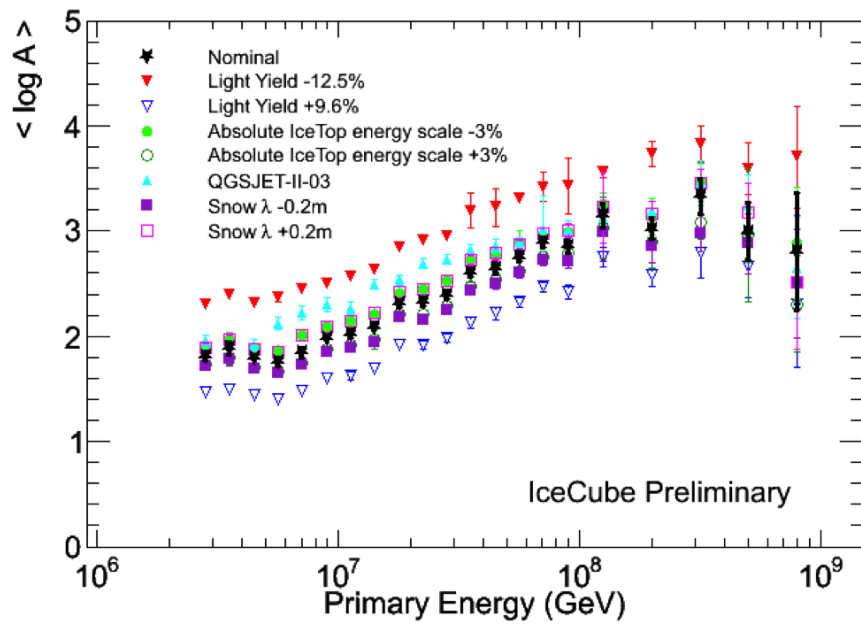


図 1.15: IceTop で観測された質量組成 [17] .

第2章 TA実験、TALE実験、TA × 4実験

Telescope Array 実験 (TA 実験) は日米韓露ベルギーチェコ 6ヶ国による国際共同実験で、米国ユタ州に約 700 km² 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を設置し、2008 年から定常観測を継続している。

TA Low energy Extension (TALE) 実験は、TA 実験よりも低エネルギー領域の宇宙線を観測する実験で、TA 実験との同時観測と相互較正によって TA 実験のエネルギー範囲を $10^{16.5}$ から $10^{20.5}$ までの 4 桁に拡大し、このエネルギー領域をシャワー再構成分解能に優れたハイブリッド観測 (図 2.1) でカバーする実験である。このエネルギー範囲は、銀河系内起源宇宙線、銀河系外起源宇宙線と GZK cut off のすべてを含むエネルギー領域である。TA+TALE は統合された 1 つの実験であり、加速器で較正された唯一のエネルギースケールを用いて、この領域のエネルギースペクトルと質量組成の変化を精度良く測定する。

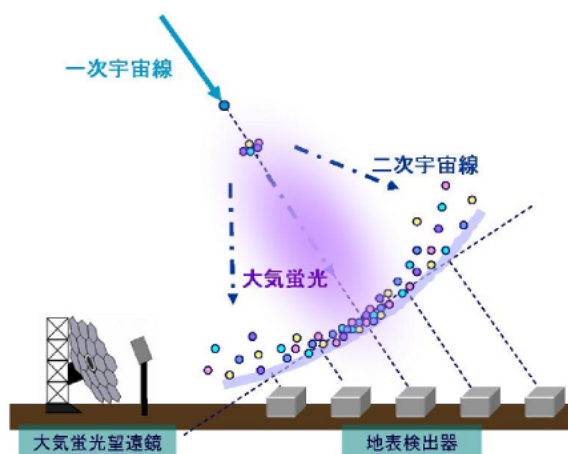


図 2.1: 空気シャワーのハイブリッド観測

2.1 TA 実験

TA 実験はエネルギー決定精度にハドロン相互作用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観測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、最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 km² である。FD ステーションは SD アレイ周辺の三ヶ所に約 35 km 間隔で設置され、方位角 108°、仰角 3°-33° でアレイ上空を観測している。3 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 m 高い場所に置かれている。TA の検出器配置を図 2.2 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。

これまでの観測では、図 2.3 のように $10^{18.2}$ 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($10^{18.7}$ eV)、GZK pileup($10^{19.4}$ eV)、GZK cutoff($10^{19.7}$ eV) によるものと解釈できる。また図 2.4 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。

また、TA 実験では 57EeV 以上のエネルギーを持つ宇宙線の到来方向分布について図 2.5 のように 5.1 の有意度をもつ領域を観測し、この領域をホットスポットと呼んでいる。宇宙線の到来方向について等方的な分布を仮定した場合にこの 5.1 の有意度をもつような偶然確率は 3.4 であると計算されている [24]。このホットスポットの証拠をより早く確実に検証するために、望遠鏡アレイの面積を拡張する TA×4 計画が進んでいる。

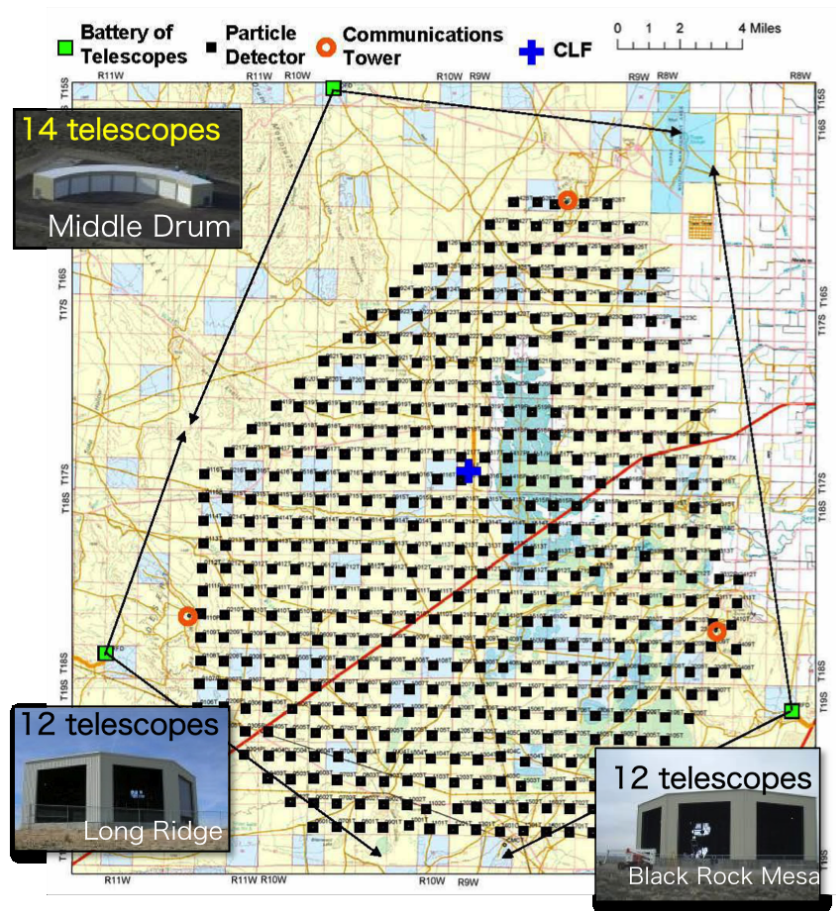


図 2.2: TA 実験における装置の配置図。1.2 km 間隔で 507 台の SD アレイが配置されている。FD ステーションは SD アレイ周辺の三ヶ所に約 35 km 間隔で設置されている。

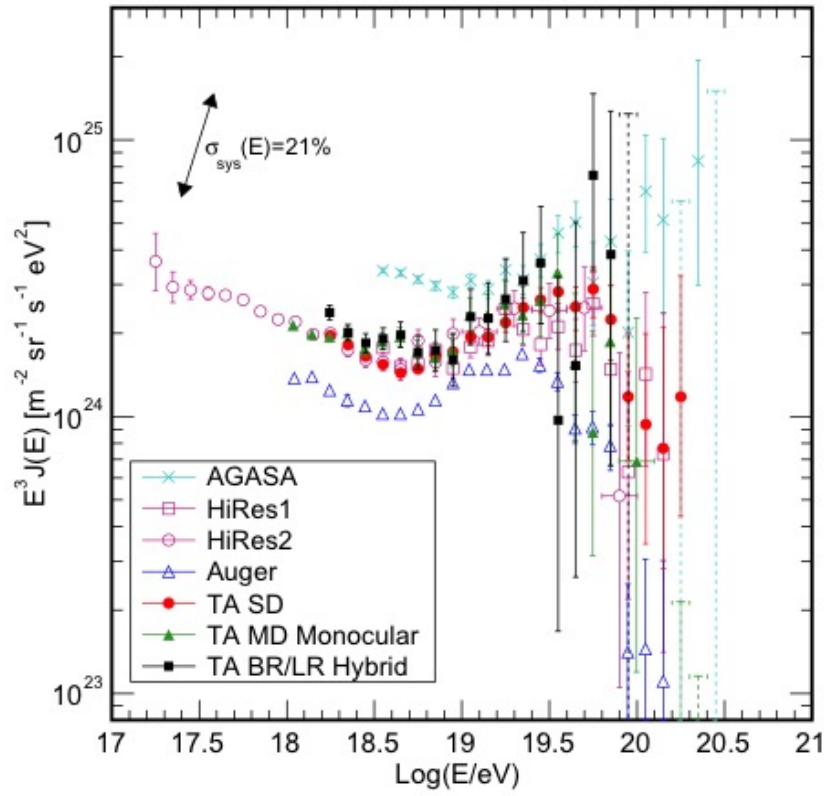


図 2.3: TA 実験といくつかの実験によるエネルギースペクトル [22]。スペクトルの微細構造を見やすくするためにスペクトルに E^3 を掛けている。 $10^{18.2}$ eV 以上のエネルギースペクトル上にいくつかの構造があることがわかる。

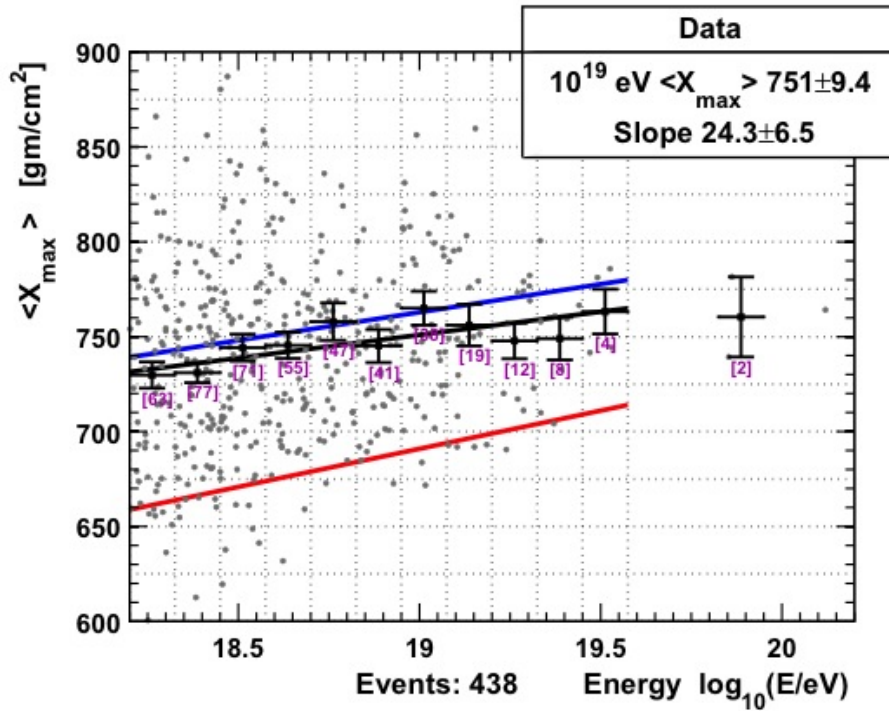


図 2.4: TA 実験による平均 X_{\max} [23]。黒が観測データ、青が陽子と仮定したとき、赤が鉄と仮定したときのシミュレーションの結果。 $10^{18.2} \text{ eV}$ 以上のエネルギー領域での観測データは、100%陽子と矛盾しないことがわかる。

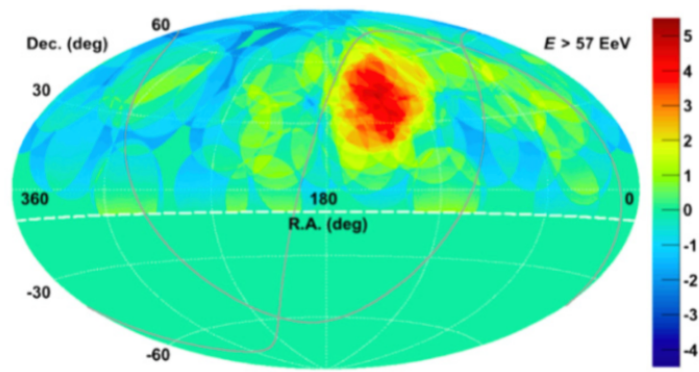


図 2.5: TA 実験で観測された 57 EeV 以上のエネルギーをもつ宇宙線の到来方向 [24]

2.1.1 TA 実験の大気蛍光望遠鏡

TA 実験の FD は 3ヶ所のステーション、すなわち、Long Ridge(LR) ステーション、Black Rock Mesa(BRM) ステーション、Middle Drum(MD) ステーションに設置されている。LR、BRM ステーションに設置されている FD は、TA 実験のために新たに設計されたもので、口径 3 m の球面

鏡を持つ望遠鏡である。各ステーションに 12 台の FD が置かれ、ステーション全体で方位角 108° 、仰角 3° - 33° の範囲を見る。図 2.6 に Long Ridge(LR) と Black Rock Mesa(BRM) の FD の外観を示す。Middle Drum(MD) ステーションに設置されている 14 台の FD は、HiRes 実験で使用されていた望遠鏡を移設したものである [25]。

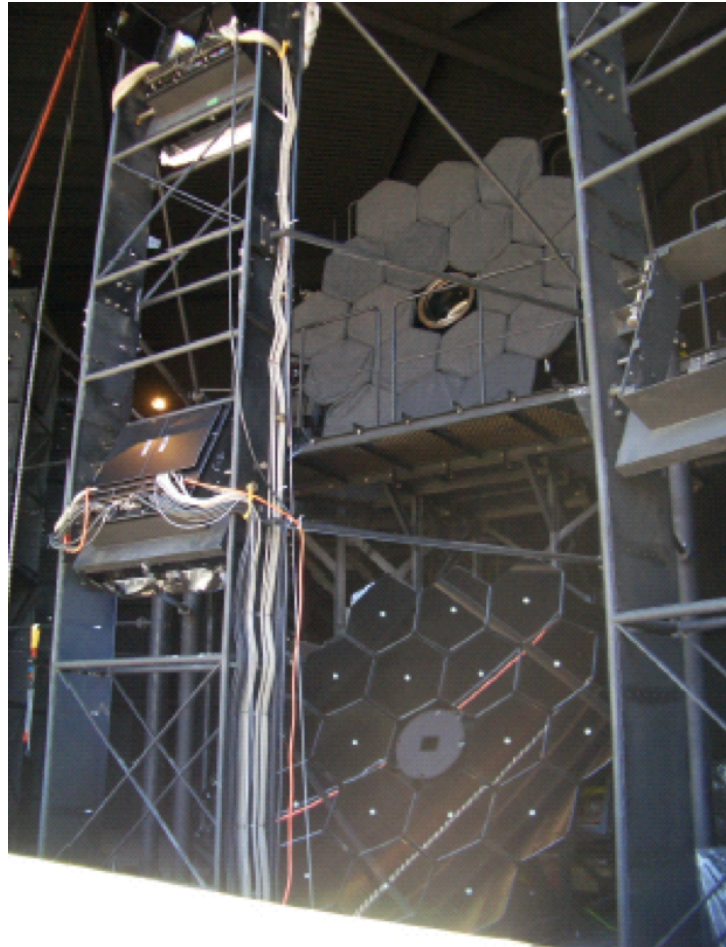


図 2.6: LR、BR ステーションの大気蛍光望遠鏡

2.1.2 TA 実験の地表検出器アレイ

TA 実験の SD アレイは間隔 1.2 km の碁盤目上に並べられた 507 台の SD からなり、 700 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 通信で接続されている。TA の SD アレイは 3 領域の部分アレイから構成されており、各中央データ収集塔はそれぞれ SKCT(Smelter Knoll Communication Tower)、BRCT(Black Rock Mesa Communication Tower)、LRCT(Long Ridge Communication Tower) と呼ばれる。SD は基本的に TALE 実験のものと同じである。

2.2 TALE 実験

2.2.1 TALE 実験の大気蛍光望遠鏡

TALE 実験は、TA-FD より高仰角をみる大気蛍光望遠鏡と、より高い設置密度の地表検出アレイを追加することで、観測のしきい値エネルギーを $10^{16.5}$ eV まで下げ、エネルギースペクトルと質量組成をハイブリッド観測により測定する実験である。TALE 実験の配置図を図 2.7 に示す。

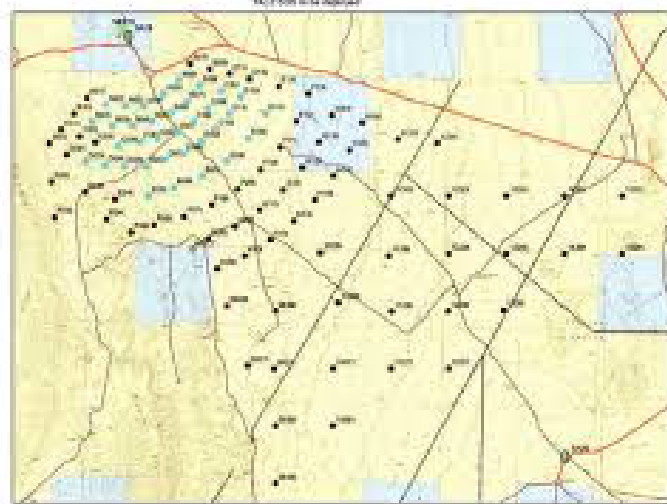


図 2.7: TALE 実験の検出器の配置図。80 台の SD が、400m 間隔、600m 間隔、1.2km 間隔で設置されている。

TALE 実験の FD ステーションは TA 実験の Middle Drum ステーションに隣接して設置され、TA-FD の視野のさらに上、仰角 31° - 59° を見ている。これにより、より高い高度で最大発達を迎える空気シャワー、すなわち、より低いエネルギーの宇宙線を観測する。TALE-FD ステーションには現在 10 台の FD が設置され、稼働している。

TALE-FD ステーションの前には、80 台の SD からなる高密度空気シャワーアレイを展開されている。

一次エネルギーが 10^{16} eV 台の空気シャワーに対しては、TALE-FD によって検出可能なコア距離は FD ステーションから半径 3km 以内に限定される。なので、FD ステーションから 3km 以内では、SD の設置間隔をせまく 400m とし、低エネルギーの空気シャワーに感度を持たせる。そしてその外側の部分、FD ステーションから 3~5 km の範囲では、600 m 間隔とし、 10^{17} eV 以上の宇宙線に対して 100% の検出効率を持たせた。

2.3 TA × 4 実験

TAx4 実験では、 57EeV 以上の最高エネルギー領域の宇宙線に注目して、合計の観測面積を TA 実験の 4 倍に拡張する。観測面積を増やし、宇宙線の観測頻度を増やすことで、2 年半の観測でテレスコプアレイ 10 年分のデータ取得を目指す。TA × 4 の検出器配置を図 2.8 に示す。SD アレイは 2.08 km 間隔で並べられ、検出面積は合計で約 3000 km^2 である。大気蛍光望遠鏡も BRM ス

テーションと MD のステーションに増設し、地表検出器アレイと同時に最高エネルギー宇宙線を観測する。2019 年 1 月現在、建設が進んでいる。

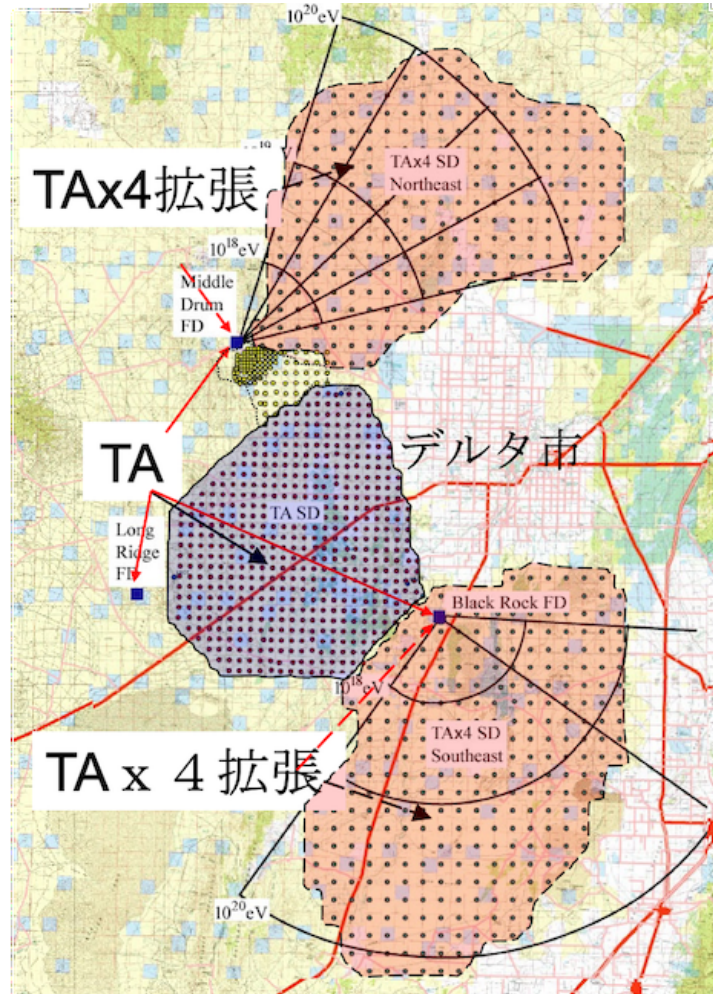


図 2.8: TA × 4 実験検出器の配置予定図。BRM ステーションと MD のステーションに FD が増設されている。500 台 SD が 2.08 km 間隔で設置される。

2.4 TALE 実験 SD とトリガー DAQ サイクル

2.4.1 TALE 実験の SD エレクトロニクス

TALE 実験 SD は、基本的に TA 実験 SD と同じものである。図 2.9 は SD の外観である。

2.4.2 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。



図 2.9: 現在設置されている TALE-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 2.10: 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。

- 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。

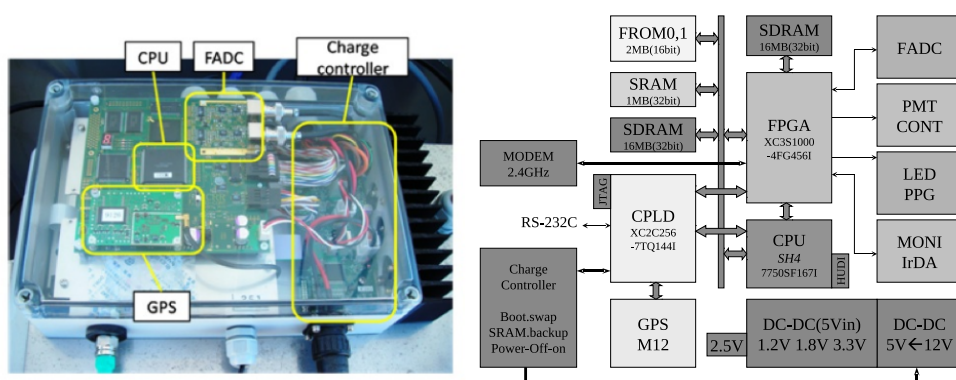


図 2.11: (左)SD エレクトロニクスの外観。(右)SD エレクトロニクスのブロック図。

2.4.3 データ収集塔 (タワー) の基本構成

図 2.12 は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、ホスト PC(Raspberry Pi 2 model B)、アクセスポイント (Cisco 社製 AIR-AP1572E-Q-K9)、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。タワーにはタワーのふもとから先まで手動による昇降が可能な箱が取り付けられており、その箱の上に無指向性アンテナ、箱の中にアクセスポイントが納められている (図 2.13)。太陽電池パネルの裏にも大きな箱があり、その中にホスト PC やバッテリー等の機器が格納されている。ホスト PC ではアクセスポイントを使用してアレイ内の SD と通信する。

2.4.4 トリガー DAQ サイクル

各 SD は、2 種類のトリガー、レベル 0 トリガーとレベル 1 トリガーを発行する。そして SD は 1 秒間のレベル 1 トリガーの情報をまとめた「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 はそれ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。そしてタワーは、これら



図 2.12: TALE 実験の SD アレイのためのデータ収集塔



図 2.13: 昇降可能な箱の中に収められているアクセスポイント

を元にレベル2トリガー（空気シャワーイベントトリガー）判定を行う。イベントとがあると判断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、その次の秒以降各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」と呼んでいる。

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次の節で詳しく説明する。図2.14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。

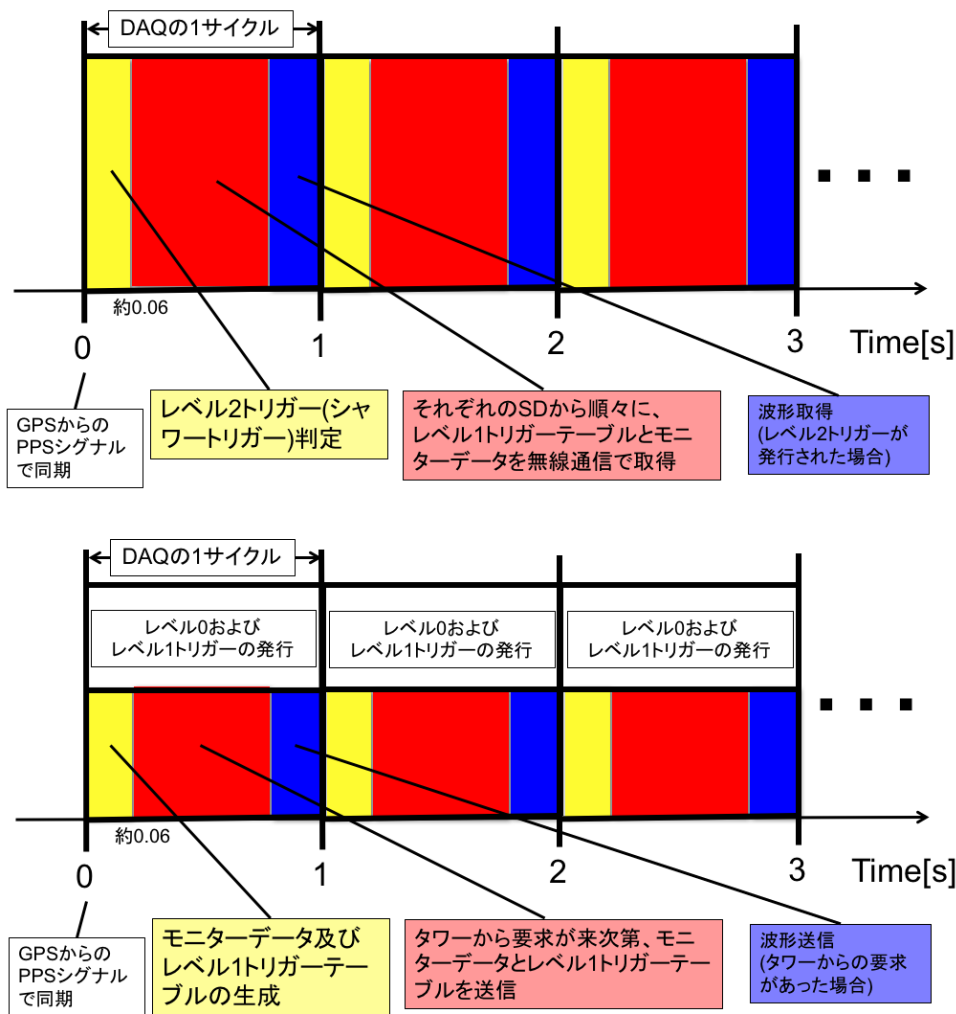


図 2.14: トリガー DAQ サイクルの概略図。上:タワーの処理、下:SD の処理

2.4.5 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決められた時間間隔で生成し、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10分のは、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。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
 - GPS タイムスタンプ
 - レベル 1 トリガーの数
 - 波形探査結果
- 収集時間間隔 1 分の情報
 - レベル 0 トリガー数。
 - バッテリーの電流・電圧。
 - 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
 - ペDESTAL のヒストグラム
 - 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。図 2.15 に、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。

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。

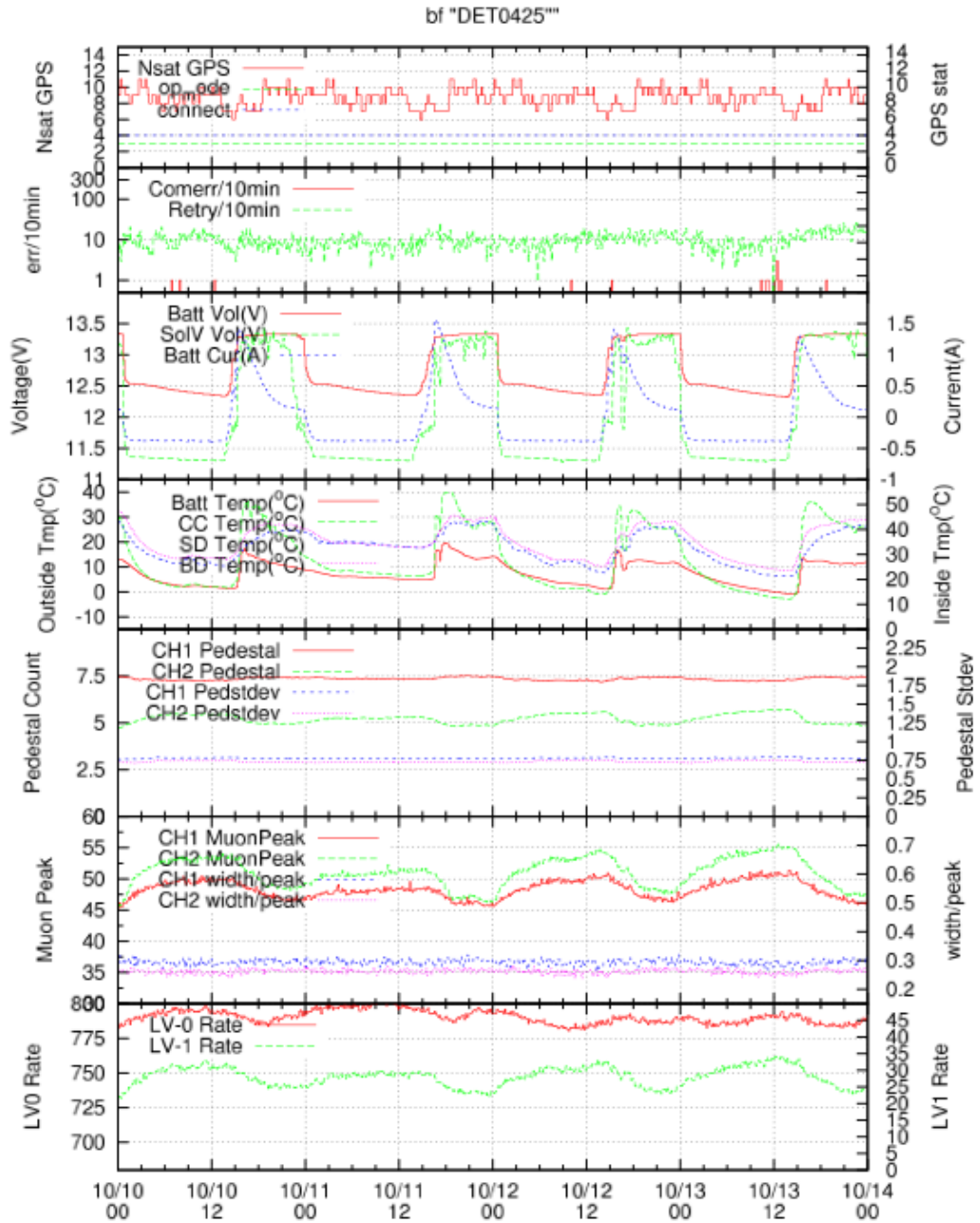


図 2.15: TALE 実験の SD のモニター例 (地表検出器ロジカルID:0425)。上から、通信できている GPS 衛星数と GPS の状態、10 分間の通信エラー数とリトライ通信数、各種電流・電圧、各種温度、ペDESTAL のヒストグラムから求めたペDESTAL 値とその標準偏差、バックグラウンドミュオン信号のスペクトルから求めた 1 MIP ピークとその幅、トリガーレートを表す。

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 2.16 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ペDESTALのヒストグラムを示す。

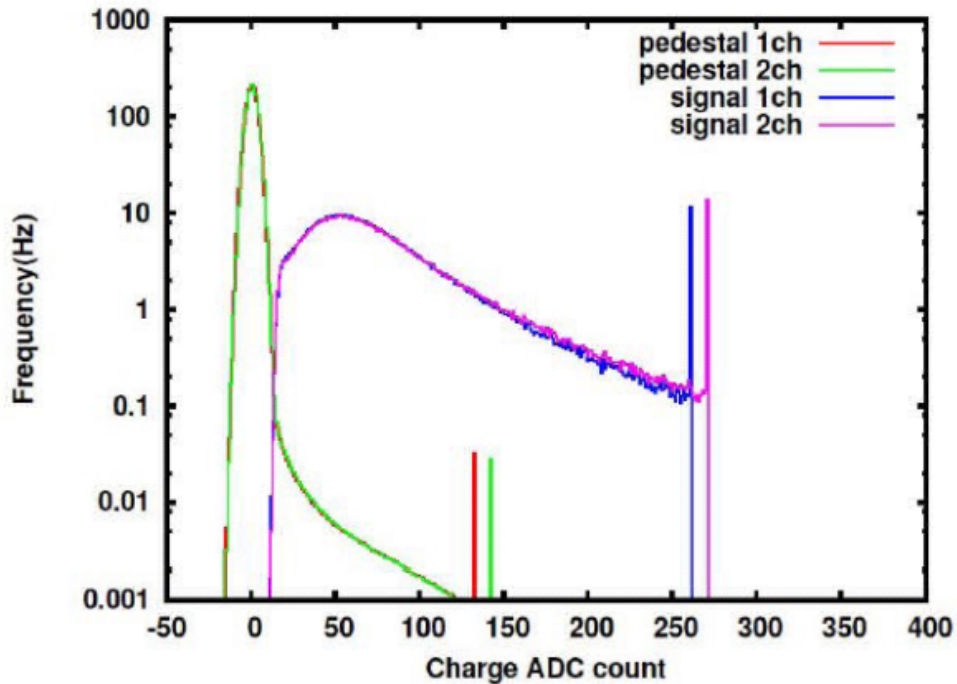


図 2.16: SD のモニター情報から得たバックグラウンドミュオン信号のヒストグラムとペDESTALのヒストグラム。緑色と赤色のヒストグラムはそれぞれ上層と下層のペDESTALのヒストグラムである。また、青色と紫色のヒストグラムはそれぞれ上層と下層のバックグラウンドミュオン信号のヒストグラムである。それぞれのヒストグラムの右側のエントリー (250 ADC カウントの後ろの立ち上がり) は over flow を示す。積分幅は 240 ns。バックグラウンドミュオン信号のヒストグラムではペDESTAL分はすでに引いてある。

第3章 気象観測装置を組み込む目的

3.1 気象観測装置を組み込む目的

データ解析に使用される気象のデータによって X_{\max} の値が変わることがわかった。そのため、より正確な位置で気象データを取ることは X_{\max} の値を決定するのに重要である。現在、解析に使用される気象のデータは、GDAS のデータを使用しており、空間分解能は緯度経度で 1° である (TA 実験サイトでは約 100km に相当)。実験サイト内における気象データの測定は各 FD ステーションでしか取っておらず、各 FD ステーションまでの距離は約 35km である。一方、地表検出器は 1.2km 間隔で設置されており、地表検出器に気象観測システムを組み込むことで、現在の測定間隔よりも高い空間分解能で、気象データを取ることができる。

3.2 データ解析に使用される気象データ

現在、データ解析には GDAS の気象データを使用している。使用される GDAS の気象データは、実験サイトに最も近いグリッド地点で得られた気象データであり、1日3時間おきに8回 (0h, 3h, 6h, 9h, 12h, 15h, 18h, 21h) しかデータが更新されない。解析に使用される GDAS のデータ形式の例を図 3.1 に示す。使用されるデータは図 3.1 のように各高度ごとでの気温と露点のデータである。

3.3 現状の気象データの測定精度

現在、気象のデータは、各 FD ステーションで観測時に 1 分おきに測定しているのみである。各 FD ステーションまでの距離は約 35km もあり、標高も異なるため、同じ時刻に測定された気象のデータでも、各ステーションで得られるデータには差がある。図 3.3 に BRM ステーションと LR ステーションで 1 分おきに測定された気象データの例を示す。

3.4 気象データによる X_{\max} の変化

図 3.4 に解析時に使用する気象データを変えたときの X_{\max} とエネルギーの変化を示す。図 3.4 はある実イベントに対して、使用する気象データのみを変更し、BRM ステーションの FD 単眼で解析して得られたものである。変更する気象データは、別の日の GDAS で得られたデータを使用し、UTC の 2012 年 11 月 8 日 03:00、2012 年 11 月 9 日 03:00、2016 年 5 月 11 日の 03:00、2012 年 5 月 12 日の 03:00 の地表付近の気温が 13 から 15 程度である 4 つのデータを使用した。解析に使用する気象データによって、 X_{\max} が $10\text{g}/\text{cm}^2$ 以上変化することがわかる。FD でのエネルギーの決定精度は $20\text{g}/\text{cm}^2$ なので気象データの差は無視できないため、各地点での気象データがあることが望ましい。

```

START OF EVENT *****
gdas_dst
uniq ID: 1352343600 (2012/11/08 03:00:00 UTC)
FROM 2012/11/08 01:30:00 TO 2012/11/08 04:30:00
nItem:23
*** height press pressE temp tempE dew dewE
0.091801 1000.000000 0.000000 24.100000 0.000000 -0.235319 0.000000
0.307039 975.000000 0.000000 22.649988 0.000000 -1.428524 0.000000
0.526184 950.000000 0.000000 21.225000 0.000000 -2.602339 0.000000
0.753408 925.000000 0.000000 19.800013 0.000000 -3.777347 0.000000
0.985928 900.000000 0.000000 18.249994 0.000000 -5.056809 0.000000
1.468743 850.000000 0.000000 15.899988 0.000000 -7.661218 0.000000
1.984624 800.000000 0.000000 15.749994 0.000000 -9.205357 0.000000
2.525917 750.000000 0.000000 10.975000 0.000000 -11.719587 0.000000
3.095952 700.000000 0.000000 6.399988 0.000000 -14.294906 0.000000
3.698020 650.000000 0.000000 1.700006 0.000000 -17.690901 0.000000
4.336907 600.000000 0.000000 -3.174994 0.000000 -20.823376 0.000000
5.018760 550.000000 0.000000 -8.025000 0.000000 -22.873987 0.000000
5.750970 500.000000 0.000000 -13.449987 0.000000 -29.206367 0.000000
6.543350 450.000000 0.000000 -19.450003 0.000000 -34.401215 0.000000
7.404560 400.000000 0.000000 -27.075003 0.000000 -37.015396 0.000000
8.350519 350.000000 0.000000 -34.724998 0.000000 -42.416676 0.000000
9.412450 300.000000 0.000000 -41.075005 0.000000 -52.963749 0.000000
10.627810 250.000000 0.000000 -49.775002 0.000000 -61.269348 0.000000
12.064330 200.000000 0.000000 -56.349998 0.000000 -63.203220 0.000000
13.873010 150.000000 0.000000 -60.937508 0.000000 -71.725403 0.000000
16.343519 100.000000 0.000000 -68.025002 0.000000 -75.633095 0.000000
20.536489 50.000000 0.000000 -62.643745 0.000000 -128.008255 0.000000
26.295641 20.000000 0.000000 -54.962502 0.000000 -128.008255 0.000000
END OF EVENT *****

```

図 3.1: データ解析に使用される GDAS のデータの例。図は UTC の 2012 年 11 月 8 日の 01:30 から 04:30 に使用されるデータである。各気圧ごとの気温と露点のデータが使用される。

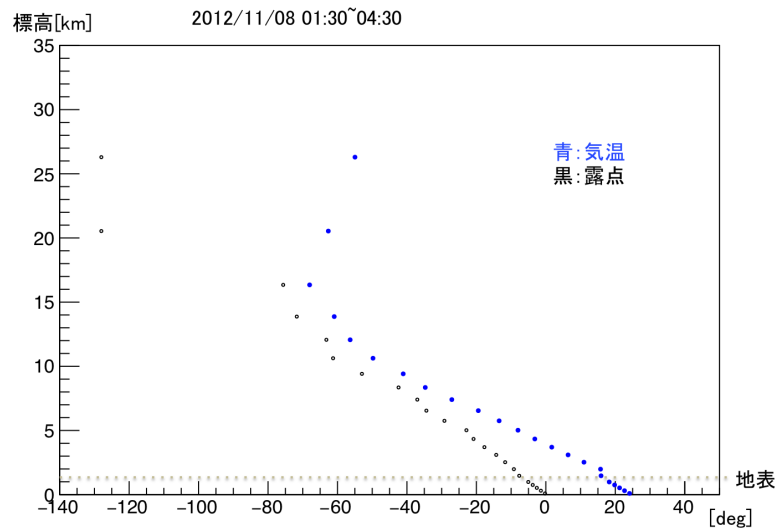


図 3.2: 図 3.1 をプロットした図。青点が各高度での気温、黒点が各高度での露点を表す。

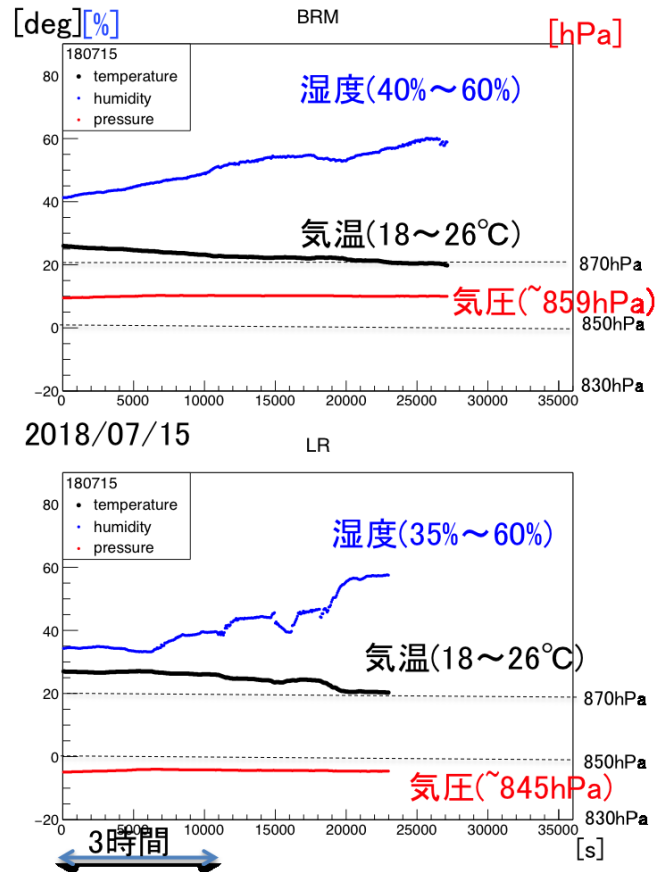


図 3.3: BRM ステーションと LR ステーションで測定された気象データの例。図は 2018 年 7 月 15 日の観測時に得られた気象データをプロットしている。2 地点間で気温差は 2 度程度、湿度差は、15% 程度、気圧差は 14hPa 程度、差があることがわかる。

使用した気象データの 日付	地表付近 での気温	X_{\max} [g/cm ²]	エネルギー [eV]
12/11/08 03:00:00	15°C	763.855	1.122 x 10 ²⁰
12/11/09 03:00:00	14°C	752.755	1.129 x 10 ²⁰
16/05/11 03:00:00	13°C	756.420	1.133 x 10 ²⁰
12/05/12 03:00:00	15°C	763.519	1.118 x 10 ²⁰

図 3.4: 気象データによる X_{\max} とエネルギーの差の 1 例。地表での気温が 1 変化すると、 X_{\max} の値が 10g/cm² 以上変化することがわかる。

第4章 気象観測装置の開発

4.1 気温、湿度、気圧測定装置 BME280

今回気象観測装置として、Bosch 社製のデジタル湿度、圧力、温度センサー BME280 を選定した。図 4.1 に BME280 の外観、表 4.1 にスペックを示す。

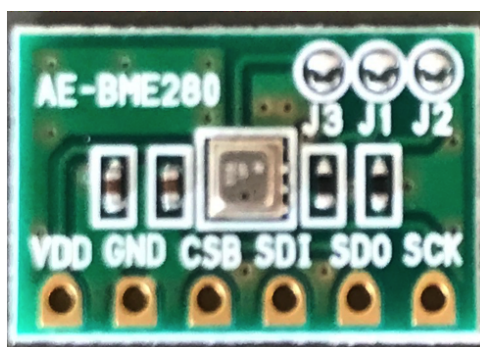


図 4.1: BME280 デジタル湿度、圧力、温度 センサー

項目	仕様
デジタルインターフェイス	I ² C, SPI
電源電圧	1.71 ~ 3.3 V
動作範囲	-40 ~ +85°C, 0 ~ 100 %, 300 ~ 1100 hPa
分解能	-0.01°C, 0.008%, 0.18 hPa

表 4.1: BME280 の仕様

4.1.1 SPI 通信

BME280 の通信方式には I²C 通信と SPI 通信とが用意されており、SPI 通信はモジュールを並列につなぐことができる。SD エレクトロニクスには FPGA が内蔵されており、現在無線 LAN モジュールの制御に使用している。そのため、SD エレクトロニクスに組み込むために無線 LAN モジュールと並列に接続することを考えて、BME280 では SPI 通信を使用することにする。図 4.2 に SPI 通信で使用する線とその役割を示す。

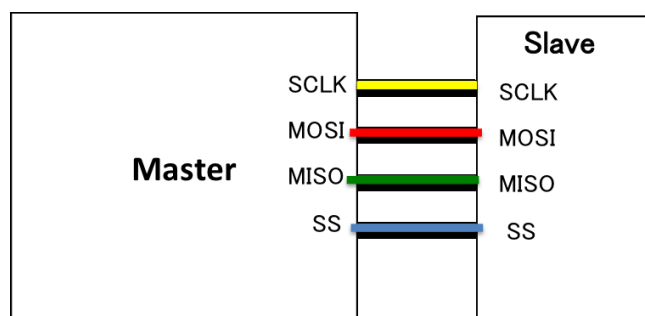


図 4.2: SPI 通信に使用される線。SCLK(黄) は Master から出力されるクロックでビット同期に使われる。MOSI(赤) は Master からのデータ出力、Slave への入力。MISO(緑) は Slave からのデータ出力、Master への入力。SS(青) は Master からの出力で Slave 選択に使われる。

4.2 気温、湿度、気圧測定装置 BME280 の仕様

図 4.3 に BME280 のメモリーマップを示す。各メモリーアドレスには 8bit のデータが格納されており、測定されたデータは、メモリーアドレスの 0xF7~0xFE に、設定データはメモリーアドレスの 0xF2、0xF4、0xF5 に、キャリブレーションデータはメモリーアドレスの 0x88~0xA1、0xE1~0xE7 に格納されている。

4.2.1 BME280 のキャリブレーションデータ

キャリブレーションデータは、製造中にデバイスの不揮発性メモリー (NVM) にプログラムされており、個々のデバイスによって異なる値を持つ。測定されたデータを、気温 [°C]、気圧 [hPa]、湿度 [%] に変換するために使用し、メモリーアドレスの 0x88~0xA1、0xE1~0xE7 に格納されている。対応するキャリブレーションデータは、温度キャリブレーション関連の値は "dig_T#"、圧力関連の値は "dig_P#"、湿度関連の値は "dig_H#" と命名されており、図 4.4 に対応表を示す。

4.2.2 BME280 の測定データ読み出し

図 4.5、図 4.6、図 4.7 に測定されたデータが格納されているレジスターを示す。

press_msb[7-0]、press_lsb[7-0]、press_xlsb[7-4] は、それぞれ、測定された気圧データの、上位 (8bit)、下位 (8bit)、最下位 (4bit) が格納されている。temp_msb[7-0]、temp_lsb[7-0]、temp_xlsb[7-4] は、それぞれ、測定された気温データの、上位 (8bit)、下位 (8bit)、最下位 (4bit) が格納されている。hum_msb[7-0]、hum_lsb[7-0] は、それぞれ、測定された湿度データの、上位 (8bit)、下位 (8bit) が格納されている。

4.2.3 BME280 の設定

BME280 の設定データは、メモリー・アドレスの 0xF2、0xF4、0xF5 に格納されている。図 4.8、図 4.9、図 4.10 に設定データが格納されているレジスターを示す。osrs_h[2-0]、osrs_t[2-0]、osrs_p[2-0] は、それぞれ湿度、気温、気圧の測定のオーバーサンプリングの設定を指定している。mode[1-0] はセンサーの測定のモードを指定している。BME280 の測定のモードは、Sleep mode、

Address	bit7	bit6	bit5	bit4	bit3	bit2	bit1	bit0
0xFE	hum_lsb<7:0>							
0xFD	hum_msb<7:0>							
0xFC	temp_xlsb<7:4>				0	0	0	0
0xFB	temp_lsb<7:0>							
0xFA	temp_msb<7:0>							
0xF9	press_xlsb<7:4>				0	0	0	0
0xF8	press_lsb<7:0>							
0xF7	press_msb<7:0>							
0xF5	t_sb[2:0]			filter[2:0]			spi3w_en[0]	
0xF4	osrs_t[2:0]			osrs_p[2:0]			mode[1:0]	
0xF3					measuring[0]		im_update[0]	
0xF2					osrs_h[2:0]			
0xE1...0xF0	calibration data							
0xE0	reset[7:0]							
0xD0	chip_id[7:0]							
0x88...0xA1	calibration data							

Registers:	Reserved registers	Calibration data	Control registers	Data registers	Status registers	Chip ID	Reset
Type:	do not change	read only	read / write	read only	read only	read only	write only

図 4.3: BME280 のメモリーマップ

Register Address	Register content	Data type
0x88 / 0x89	dig_T1 [7:0] / [15:8]	unsigned short
0x8A / 0x8B	dig_T2 [7:0] / [15:8]	signed short
0x8C / 0x8D	dig_T3 [7:0] / [15:8]	signed short
0x8E / 0x8F	dig_P1 [7:0] / [15:8]	unsigned short
0x90 / 0x91	dig_P2 [7:0] / [15:8]	signed short
0x92 / 0x93	dig_P3 [7:0] / [15:8]	signed short
0x94 / 0x95	dig_P4 [7:0] / [15:8]	signed short
0x96 / 0x97	dig_P5 [7:0] / [15:8]	signed short
0x98 / 0x99	dig_P6 [7:0] / [15:8]	signed short
0x9A / 0x9B	dig_P7 [7:0] / [15:8]	signed short

図 4.4: BME280 のキャリブレーションデータ

アドレス	形式	7	6	5	4	3	2	1	0
F7 h	R	press_msb [7-0]							
初期値: 80h									
アドレス	形式	7	6	5	4	3	2	1	0
F8 h	R	press_lsb [7-0]							
初期値: 00h									
アドレス	形式	7	6	5	4	3	2	1	0
F9 h	R	press_xlsb [3-0]				0	0	0	0
初期値: 00h									

図 4.5: press(_msb、_lsb、_xlsb) 圧力測定データレジスター

アドレス	形式	7	6	5	4	3	2	1	0
FA h	R	temp_msb [7-0]							
初期値: 80h									
アドレス	形式	7	6	5	4	3	2	1	0
FB h	R	temp_lsb [7-0]							
初期値: 00h									
アドレス	形式	7	6	5	4	3	2	1	0
FC h	R	temp_xlsb [3-0]				0	0	0	0
初期値: 00h									

図 4.6: temp(_msb、_lsb、_xlsb) 気温測定データレジスター

アドレス	形式	7	6	5	4	3	2	1	0
FD h	R	hum_msb [7-0]							
初期値: 80h									
アドレス	形式	7	6	5	4	3	2	1	0
FE h	R	temp_lsb [7-0]							
初期値: 00h									

図 4.7: hum(_msb、_lsb) 湿度測定データレジスター

Forced mode、Normal mode、の3つがある。Sleep mode では測定は行われず、Forced mode では指定された時に1回のみ測定を行い、Normal mode では測定と待機を繰り返す。t_sb[2-0] ではNormal mode での待機時間の設定を指定している。Normal mode での測定間隔は、0.5[ms]、62.5[ms]、125[ms]、250[ms]、500[ms]、1000[ms]、10[ms]、20[ms] から選べる。filter[2-0] は、IIR フィルターの時定数を制御するパラメータを指定している。spi3w_en は、4線式SPIインターフェイスか3線式SPIインターフェイスかを選択している。

アドレス	形式	7	6	5	4	3	2	1	0
F2 h	R/W	0	0	0	0	0	osrs_h [2-0]		

初期値: 00h

図 4.8: 設定データレジスター F2

アドレス	形式	7	6	5	4	3	2	1	0
F4 h	R/W	osrs_t [2-0]			osrs_p [2-0]			mode [1-0]	

初期値: 00h

図 4.9: 設定データレジスター F4

アドレス	形式	7	6	5	4	3	2	1	0
F5 h	R/W	t_sb [2-0]			filter [2-0]			0	spi3w_en

初期値: 00h

図 4.10: 設定データレジスター F5

4.2.4 BME280 の書き込みと読み出し

SPIモードでは、メモリアドレスの先頭1bit目を除いた7ビットのみが使用される。メモリアドレスの先頭1bit目は読み出しか書き込みかを指定する。書き込みの場合、先頭1bit目を0にし、読み出しの場合、先頭1bit目を1にしてメモリアドレスを送る。読み出しは、CSBをlowにして、”読み出しを行うメモリアドレス”をMOSIから送信することによって行われる。読み出しデータは、”読み出しを行うメモリアドレス”を送信した後にCSBがhighになるまで連続的に読み出しを行う。すなわち、読み出したいデータの最小アドレスを与えると、SSがlowになっている間、データが次々に読み出される。書き込みは、CSBをlowにして、”書き込みを行うメモリアドレス”・”書き込むデータ”の一組をMOSI送信することによって行われる。CSBをhighにすることで通信処理が終了する。CSBをhighにせず、複数の”書き込みを行うメモリアドレス”・”書き込むデータ”の組を一度に送ることもできる。

4.3 BME280のPC制御による動作テスト

BME280をPCで制御するために、ラトックシステム社製のREX-USB61mk2を使用する。図4.11にREX-USB61mk2の外観を示し、ピンの番号と用途を表4.2に示す。



図 4.11: REX-USB61mk2

REX-USB61mk2を使用すると図4.12のようにMOSIの送信データとMISOの受信データを16進数表記でターミナル上に表示させることができる。REX-USB61mk2のSPIでのデータの送受信方法は、図4.12のように”trans”の後にMOSIで送信するデータの長さ(Byte)を指定し、その後送信するデータを指定する。指定されたデータの長さ分SSがhighからlowへと切り替わり、同時に指定された長さ分SCKでクロックが生成される。

```
SPI > trans 12 f7
[TRANSFER]
+0 +1 +2 +3 +4 +5 +6 +7 +8 +9 +A +B +C +D +E +F
+00 [MOSI]: F7 FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF
[MISO]: FF 5C 84 50 7F C4 F0 65 A2 80 00 00
```

図 4.12: REX-USB61mk2によって得られたデータ。”5C 84 5”(20bit)、“7F C4 F”(20bit)、“65 A2”(16bit)がそれぞれ気圧、気温、湿度の測定データである。

図 4.14 に BME280 で測定されたデータの変換プログラムコードの例を示す。これを用いて、得られたデータを、気温 [], 気圧 [hPa]、湿度 [%] に変換することができる。例として、図 4.12 で得られたデータを図 4.13 で得られた気温のキャリブレーションデータから気温に変換してみると、“7F C4 F”というデータは、23.22[]となる。

ピン番号	ピンの名称	用途
1	ExPower	電源供給
2	ExPower	電源供給
3	SCL	I2C 用クロック信号
4	SCK	SPI 用クロック信号
5	SAD	I2C 用データ信号
6	SS	スレーブセレクト
7	MOSI	SPI デバイスへの出力
8	MISO	SPI デバイスから出力
9	MOSI2	SPI デバイスへの出力 2
10	MOSI3	SPI デバイスへの出力 3
11	GND	グランド
12	GND	グランド
13	DIO0	DIO ポート 0
14	DIO1	DIO ポート 1
15	DIO2	DIO ポート 2
16	DIO3	DIO ポート 3
17	DIO4	DIO ポート 4
18	DIO5	DIO ポート 5
19	DIO6	DIO ポート 6
20	DIO7	DIO ポート 7

表 4.2: REX-USB61mk2 のピン

```

[TRANSFER]
      +0 +1 +2 +3 +4 +5 +6 +7 +8 +9 +A +B +C +D +E +F
+00 [MOSI]: 88 FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF ...
[MISO]: FF D2 6D 79 67 32 00 49 90 21 D6 D0 0B 17 0F 1E

```

気温のキャリブレーションに必要なデータ (5Byte)

図 4.13: REX-USB61mk2 でのキャリブレーションデータの読み出し。この場合、dig_T1= 6DD4、dig_T2=6779、dig_T3=32 である。

```

// Returns temperature in DegC, resolution is 0.01 DegC. Output value of "5123" equals 51.23 DegC.
// t_fine carries fine temperature as global value
BME280_S32_t t_fine;
BME280_S32_t BME280_compensate_T_int32(BME280_S32_t adc_T)
{
    BME280_S32_t var1, var2, T;
    var1 = (((adc_T >> 3) - ((BME280_S32_t)dig_T1 << 1)) * ((BME280_S32_t)dig_T2)) >> 11;
    var2 = (((((adc_T >> 4) - ((BME280_S32_t)dig_T1)) * ((adc_T >> 4) - ((BME280_S32_t)dig_T1))) >> 12) *
            ((BME280_S32_t)dig_T3)) >> 14;
    t_fine = var1 + var2;
    T = (t_fine * 5 + 128) >> 8;
    return T;
}

// Returns pressure in Pa as unsigned 32 bit integer in Q24.8 format (24 integer bits and 8 fractional bits).
// Output value of "24674867" represents 24674867/256 = 96386.2 Pa = 963.862 hPa
BME280_U32_t BME280_compensate_P_int64(BME280_S32_t adc_P)
{
    BME280_S64_t var1, var2, P;
    var1 = ((BME280_S64_t)t_fine) - 128000;
    var2 = var1 * var1 * (BME280_S64_t)dig_P6;
    var2 = var2 + ((var1 * (BME280_S64_t)dig_P5) << 17);
    var2 = var2 + ((BME280_S64_t)dig_P4) << 35;
    var1 = ((var1 * var1 * (BME280_S64_t)dig_P3) >> 8) + ((var1 * (BME280_S64_t)dig_P2) << 12);
    var1 = (((((BME280_S64_t)1) << 47) + var1)) * ((BME280_S64_t)dig_P1) >> 33;
    if (var1 == 0)
    {
        return 0; // avoid exception caused by division by zero
    }
    P = 1048576 - adc_P;
    P = (((P << 31) - var2) * 3125) / var1;
    var1 = (((BME280_S64_t)dig_P9) * (P >> 13) * (P >> 13)) >> 25;
    var2 = (((BME280_S64_t)dig_P8) * P) >> 19;
}

```

図 4.14: BME280 での測定データの変換プログラムコードの例。

4.4 SD エレクトロニクスの FPGA での制御

図 4.15 に SD エレクトロニクスの概略図を示す。SD エレクトロニクスには FPGA が内蔵されており、無線 LAN モジュールの制御をおこなっている。そこで、無線 LAN モジュールと並列に接続できる SPI 通信方式を用いて、SD エレクトロニクス内の FPGA で温湿度気圧計を制御するシステムを開発した。

4.4.1 FPGA

SD エレクトロニクスで使用されている Xilinx 社製 FPGA の XC3S1000 を図 4.16 に示す。ゲート数は約 100 万である。FPGA の動作プログラムは VHDL で記述されており、図 4.17 のような階層構造をしている。温湿度気圧計との通信を記述するのは、*u0.wmodem* 以下のコンポーネントである。

4.4.2 オシロスコープによる信号の確認

図 4.18 のように SD エレクトロニクス内の FPGA と温湿度気圧計を接続し、オシロスコープで、信号の確認を行った。

図 4.19～図 4.23 にオシロスコープで確認した波形を示す。FPGA からの送信データであるスレーブセレクト (青)、クロック (黄)、MOSI (赤) の信号が正しいタイミングで動作しており、MISO (緑) で気圧、気温、湿度のデータを読み出せていることがわかる。

図 4.19 では初期設定を行っており、FPGA 側から "72 01 74 27 75 A0" という信号を送信している。これにより、メモリーアドレスの 0xF2 に 01 が、0xF4 に 27 が、0xF5 に A0 が書き込まれる。ここでは、*osrs_h[2-0]*、*osrs_t[2-0]*、*osrs_p[2-0]* をそれぞれ "001" を指定し、オーバーサンプリングを × 1 にした。*mode[1-0]* は "11" を指定し、Normal mode で動作するようにした。*t_sb[2-0]* は "101" を指定し、1 秒間隔で測定するようにした。*spi3w_en* は "0" を指定し、4 線式 SPI インターフェイスを指定した。

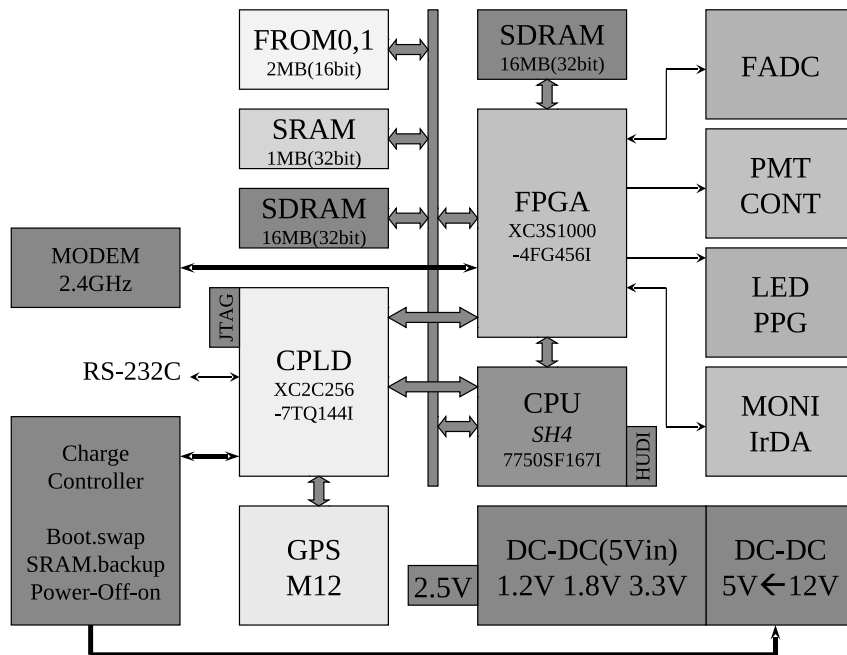


図 4.15: SD エレクトロニクスの概略図



図 4.16: SD エレクトロニクスで使用されている FPGA。Xilinx 社製 XC3S1000

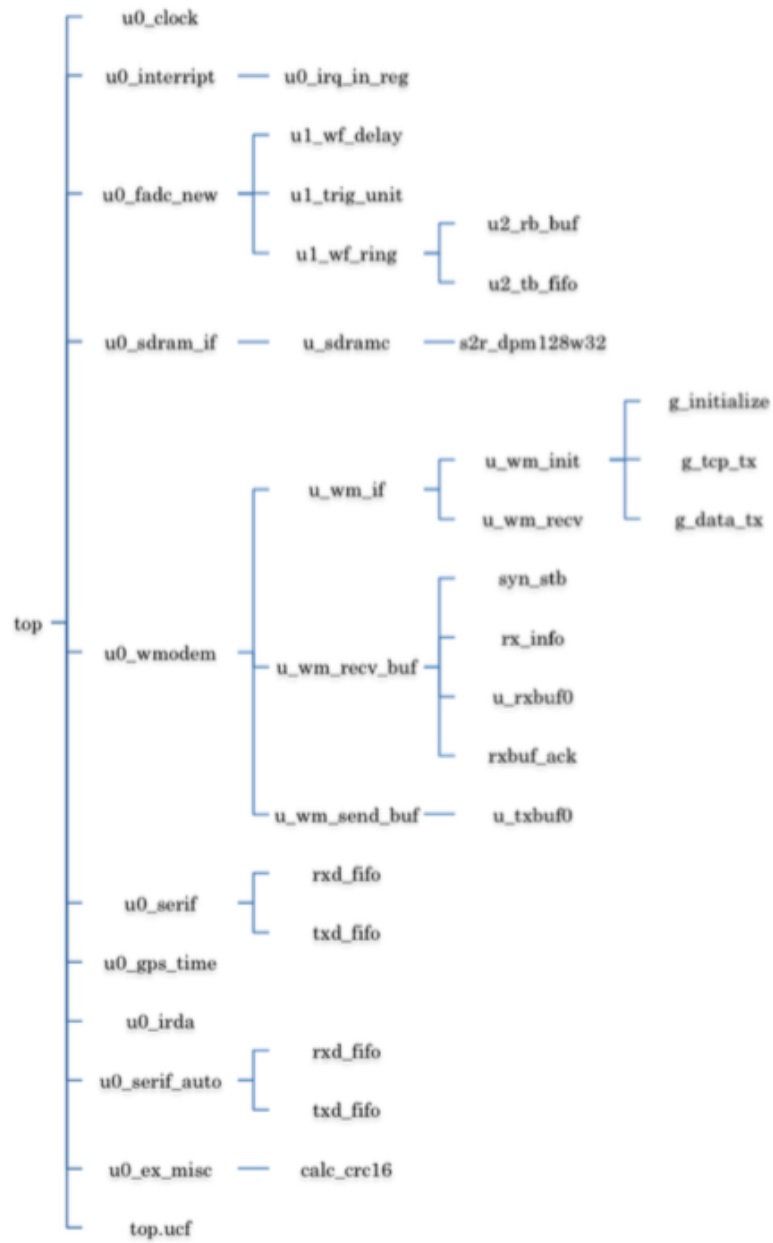


図 4.17: FPGA 内部の階層構造

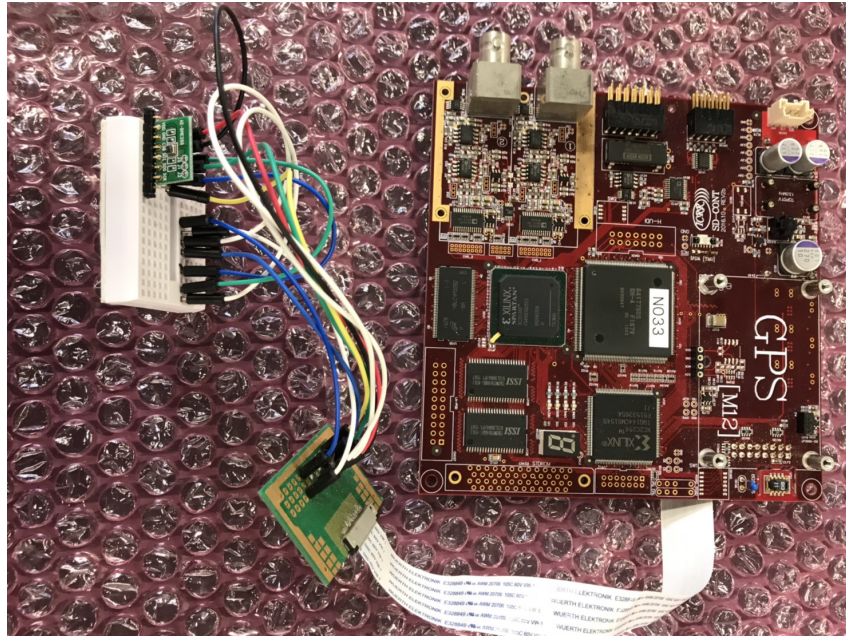


図 4.18: SD エレクトロニクスの FPGA と BME280 との接続の外観

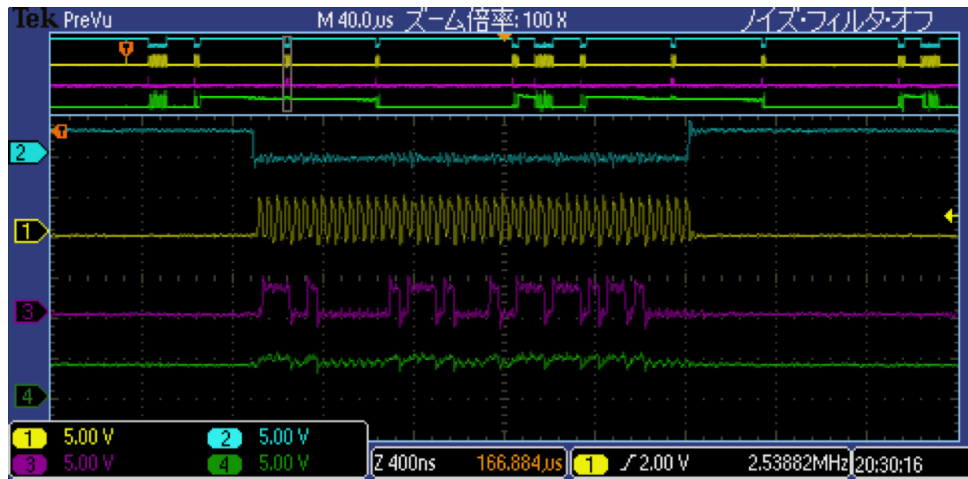


図 4.19: 設定するデータの書き込みを行っている。MOSI(赤):”72 01 74 27 75 A0”を送信している。

図 4.20 では図 4.19 で書き込みを行ったメモリアドレスに格納されているデータの読み出しを行っている。MOSI(赤)で”F2 00 ...”を送信し、MISO(緑)から”FF 01 00 27 A0”が返ってきている。図 4.19 で書き込みを行ったように、メモリアドレスの 0xF2 に 01 が、0xF4 に 27 が、0xF5 に A0 が格納されていることがわかる。

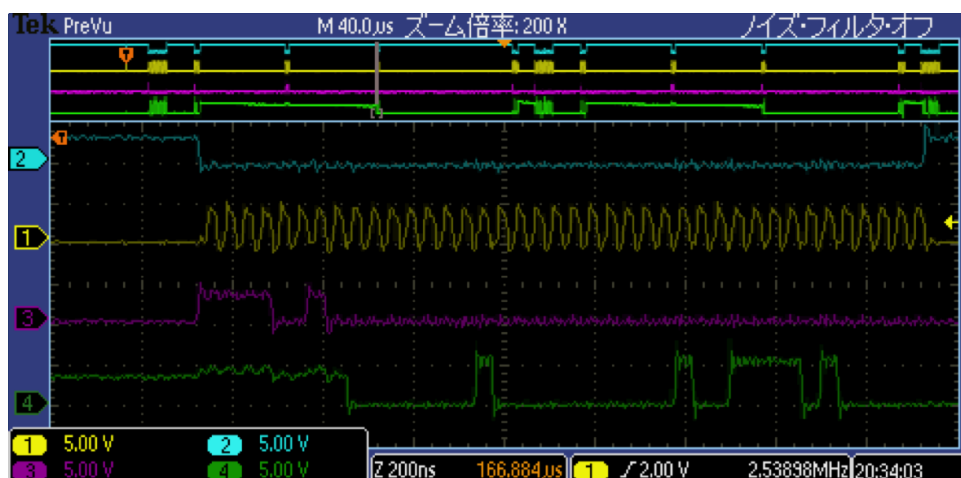


図 4.20: 設定したデータを読み出している。MISO(緑)”FF 01 00 27 A0”が返ってきている。

図 4.21、図 4.22 ではキャリブレーションに必要なデータ calib00 calib25(メモリアドレス 0x88 - 0xA1) 及び、calib26 calib41(メモリアドレス 0xE1 - 0xF0) の読み出しを行っている。

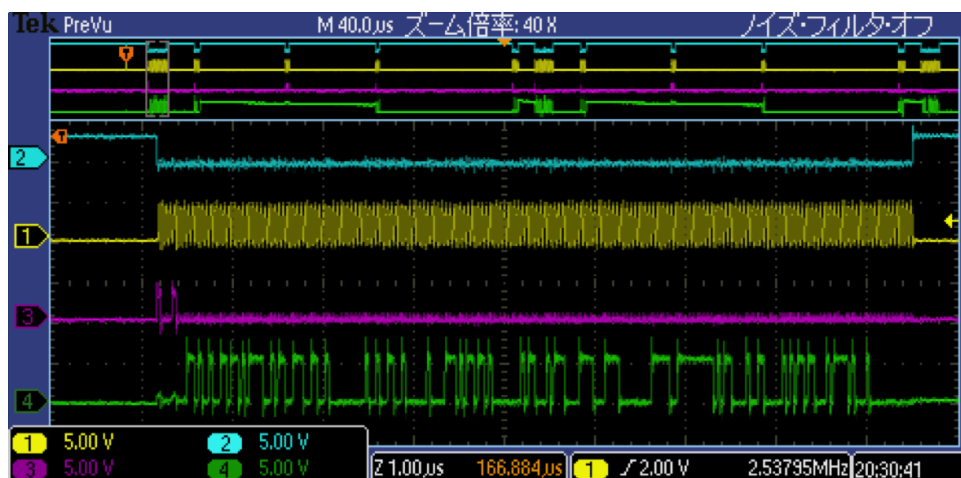


図 4.21: キャリブレーションデータを読み出している。MISO(緑)”FF D2 6D 79 67 32...”が返ってきている。

図 4.23 では、測定された気圧、気温、湿度のデータの読み出しを行っている。MISO(緑)で”FF 60 2D 00 81 33 00 ...”が返ってきていることがわかる。この得られたデータの”60 2D 0”(20bit)が測定された気圧のデータ、”81 33 0”(20bit)が測定された気温のデータである。これを図 4.21 で得られたキャリブレーションデータを用いて、気温 [] のデータに変換すると、”81 33 0”(20bit)は 25.07 を表していることがわかる。

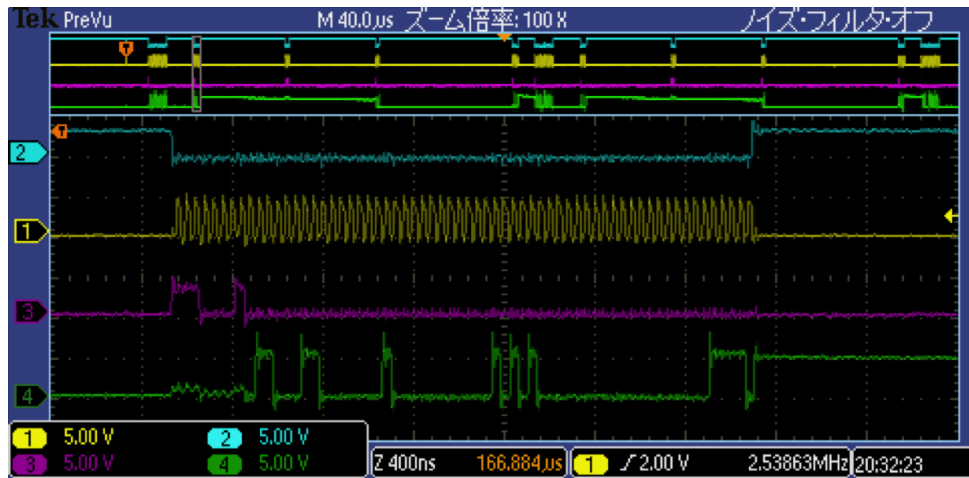


図 4.22: キャリブレーションデータを読み出している。MISO(緑):”00 63 01 00 ...”が返ってきている。

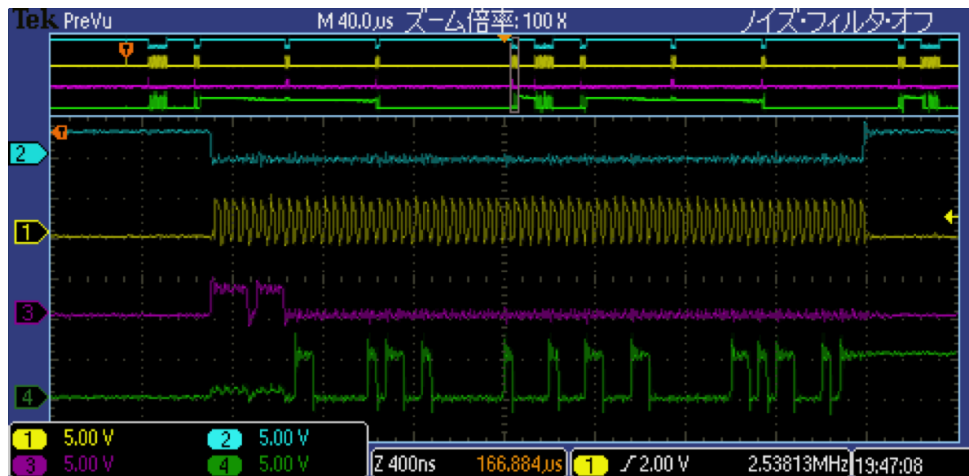


図 4.23: 測定されたデータを読み出している。MISO(緑):”FF 60 2D 00 81 33 00 ...”が返ってきている。

このように、FPGAからの送信データである、スレーブセレクト(青)、クロック(黄)、MOSI(赤)、は、スレーブセレクト(青)が1から0へ切り替わったタイミングで、クロック(黄)が生成され、クロックの立ち上がりで、MOSI(赤)の判定をしていることがわかる。また、BME280からの信号であるMISO(緑)の波形をオシロスコープで1bitずつ確認し、設定、読み出しが行えていることが確認できる。

第5章 結論

TA 実験で解析に使用される気象データを変えて X_{\max} の値を BRM の FD 単眼で解析して求めたところ、地表での気温が 1 変わると X_{\max} の値が 10 g/cm^2 程度変わることがわかった。そこで、より正確な気象データを取るために、1.2km 間隔で設置されている地表検出器に気象観測システムを組み込むことを目指し、気象観測システムの開発を進めた。気象観測装置として Bosch 社製の BME280 デジタル湿度、圧力、温度センサーを選定し、PC による SPI 通信での動作確認を行った。その後、SD エレクトロニクス内の FPGA と接続し、BME280 を制御するファームウェアの開発を行った。FPGA から BME280 への送信データについて、スレーブセレクト、クロック、送信データ、のそれぞれが正しいタイミングで送信されていることを 1bit ずつオシロスコープで確認した。また、BME280 から気温、気圧、湿度のデータが取れていることをオシロスコープで確認した。今後は、BME280 で得られた気象データを SD エレクトロニクス内の CPU で処理し、モニターデータにプロットさせるシステムの開発を行う。

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、特に進歩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、Kim Jihyun 博士、国立台湾大学の Shin Bokkyun 博士に深く感謝致します。

毎日の研究生生活の中で支えとなって頂きました大阪市立大学の高橋優一氏、大野木暲太氏、岸上翔一氏、Rosa Mayta Palacios 氏、佐原涼介氏、高木芳紀氏、尾村勇吾氏、藤田慧太郎氏、藤原亮太氏、田上裕太氏、中井慧氏、松宮弘幸氏、古賀皐氏に感謝致します。

東京大学宇宙線研究所の野中敏幸助教、木戸英治特任助教、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、ご助言を頂き、またユタでの生活全般において大変お世話になりましたことを深く感謝いたします。東京大学宇宙線研究所の竹田成宏助教、京都大学の藤井俊博博士にはユタでの観測作業において丁寧なご指導を頂き、またユタでの生活全般において大変お世話になりましたことを深く感謝いたします。

大阪市立大学技術職員の松山利夫氏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。宇宙線物理学研究室秘書の勝村美枝子さん、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。

本研究は日本学術振興会科学研究費補助金(基盤研究(S)) H27 ~ H31「広エネルギー領域の精密測定で探る超高エネルギー宇宙線源の進化」、日本学術振興会科学研究費補助金(特別推進研究) H27 ~ H31「拡張テレスコープアレイ実験 - 最高エネルギー宇宙線で解明する近傍極限宇宙」、東京大学宇宙線研究所共同利用研究費の支援を受けて行いました。関係機関の皆様には感謝致します。

最後に、研究生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] M. Nagano, *New J. Phys.*, **11**, 065012(2009).
- [2] 日本物理学会誌 *Vol.71, No 41, 2016* (2016).
- [3] S. Ogio, F. Kakimoto, *Proc. 28th Int. Conf. Cosmic Rays.*, **1**, 315(2003).
- [4] J.A.Simpson, *Ann. Revs. Nucl & Part. Sci.*, **33**, 323(1983).
- [5] T.K. Gaisser, "*Cosmic Rays and Particle Physics*", Cambridge University Press (1990).
- [6] D. R. Bergman, et. al., astro-ph/0603797(2006).
- [7] 木舟 正, 宇宙高エネルギー粒子の物理学, (2004).
- [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, et al., *J. Phys. Soc. Japan.*, Suppl A-III **91**(1962).
- [11] K. Greisen, *Ann. Rev. Nucl. Sci.*, **10**, 63(1960).
- [12] J. Linsley, *Phys. G: Nucl. Phys.*, **12**, 51(1986).
- [13] T. Hara, *Proc. of 18th ICRC.*, **11**, 27(1983).
- [14] KASCADE-Grande Home Page , http://www-ik.fzk.de/KASCADE_home.html(2017/01 現在)
- [15] A.A. Ivanov, et al., *EPJ Web of Conference* **53**, 04003(2013)
- [16] V.V. Prosin, et al., *EPJ Web of Conference* **99**, 04002(2015)
- [17] The IceCube Collaboration, *Proc. of 34rd ICRC*, 0334(2015)
- [18] A. Haungs, et al., *Proc. of 33rd ICRC*, 0300(2013)
- [19] W. Apel, et al., *Phys. Rev.Lett.*, **107**, 171104(2011).
- [20] W. Apel, et al., *Phys. Rev.D.*, **87**, 081101(R)(2013).
- [21] S.P. Knurenko, et al., *Proc. of 33rd ICRC*, 0053(2013)
- [22] T. Abu-Zayyad et al., *Astroparticle Physics*, 61, pp. 93-101(2015).
- [23] R. Abbasi et al., *Astroparticle Physics*, 64, pp. 49-62(2015).

- [24] R. Abbasi et al., *The Astrophysical Journal*, 790, L21(2014).
- [25] 米田泰久, 修士論文 大阪市立大学 (2013).
- [26] 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)
- [27] W.M. Yao, et al., *J.Phys.G. and Nucl.Phys.*, **33**(2006).
- [28] S. Ogio, et al., Proc. of 33rd ICRC, 0717(2013) .
- [29] S. Ogio, et al., EPJ Web of Conference **53**, 08020(2013) .
- [30] 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) .
- [31] 井上一 他編 『シリーズ現代の天文学 17 巻』 宇宙の観測 III -高エネルギー天文学, 日本評論社 (2007) .
- [32] 後藤昂司, 修士論文 大阪市立大学 (2014)
- [33] 小西翔吾, 修士論文 大阪市立大学 (2016)
- [34] 高橋優一, 修士論文 大阪市立大学 (2017)
- [35] 佐原涼介, 修士論文 大阪市立大学 (2018)