

TALE 実験用地表検出器のための
データ通信エレクトロニクスの開発
(The development of the data communication electronics
for the surface detectors of the TALE experiment)

理学研究科

数物系専攻

後藤昂司

目次

第1章	2nd knee 領域の宇宙線	1
1.1	宇宙線	1
1.1.1	宇宙線のエネルギースペクトル	1
1.1.2	宇宙線の化学組成	3
1.1.3	宇宙線の加速機構	3
1.2	2nd knee 領域の宇宙線	9
1.2.1	宇宙線起源の銀河系内から銀河系外への遷移	9
1.2.2	宇宙線源の進化	10
1.2.3	LHCと空気シャワー現象	12
1.3	空気シャワーと宇宙線観測	12
1.3.1	空気シャワー現象	12
1.3.2	空気シャワーの縦方向発達	14
1.3.3	空気シャワーの横方向分布	14
1.3.4	空気シャワー粒子の到来時刻分布	17
1.3.5	空気シャワーの観測方法	17
1.4	観測結果の現状	20
1.4.1	エネルギースペクトル	21
1.4.2	質量組成	22
第2章	TA Low Energy extension (TALE) 実験	26
2.1	TALE 実験の目的	26
2.1.1	宇宙線起源の銀河系内から銀河系外への遷移の検出	26
2.1.2	宇宙線源の進化の解明	26
2.1.3	ハドロン相互作用モデルへのフィードバック	26
2.2	TA 実験	27
2.2.1	TA 実験の地表検出器	27
2.2.2	TA 実験の大気蛍光望遠鏡	29
2.3	TALE 実験の装置の概観	29
2.4	地表検出器	31
2.4.1	地表検出器基本構成	31
2.4.2	地表検出器電子回路	32
2.4.3	通信塔基本構成	33
2.4.4	トリガー DAQ サイクル概観	34
2.4.5	各検出器におけるデータバッファリングとレベル1トリガー	35
2.4.6	通信塔におけるレベル2トリガー	36
2.4.7	モニター情報とモニタリングシステム	37
2.4.8	バックグラウンドミューオン信号に対応するエネルギー損失	40

2.5	大気蛍光望遠鏡	41
2.5.1	光学系	41
第 3 章	TA 実験用 SD のエレクトロニクス及びファームウェア	44
3.1	CPU	44
3.2	start.asm	46
3.2.1	ブートコード部分	46
3.2.2	割り込み処理ハンドラ部分	46
3.3	main.c	47
3.3.1	メモリの初期化	47
3.3.2	ハードウェアの初期化	48
3.3.3	ソフトウェアの開始	49
3.3.4	タイトル画面表示	49
3.3.5	メインのタスクループン	49
3.4	FPGA	49
3.4.1	u0_wmodem	52
3.4.2	u_wm_send_buf	53
3.4.3	u_wm_recv_buf	53
3.4.4	u_wm_if	54
3.4.5	u_wm_init	54
3.4.6	u_wm_sercmd	55
3.4.7	u_wm_recv	55
3.5	無線 LAN モジュール	55
第 4 章	TALE 実験用 SD のための通信エレクトロニクス	58
4.1	TALE 実験用 SD のための無線 LAN モデム	58
4.1.1	無線 LAN モデムの選定	58
4.1.2	Redpine Signals 社製無線 LAN モデム RS9110-N-11-02 の性能と動作の概要	60
4.2	ファームウェアの最適化	65
4.2.1	FPGA	65
4.2.2	CPU	67
4.3	アドリンクとレッドパインの通信量の比較	68
4.4	TALE 実験用 SD エレクトロニクスを用いた通信テスト	69
第 5 章	TALE 実験の現状とその性能	71
第 6 章	結論	76

要旨

宇宙線物理学という研究分野で、現在最も興味深いトピックスの一つは”2nd knee”である。2nd kneeとは宇宙線のエネルギースペクトルの $10^{17.5}$ eV 付近に見られる折れ曲がり構造である。

10^{17} eV 付近のエネルギー領域では宇宙線の組成が鉄であるという結果が出ており、また、宇宙線望遠鏡実験 (Telescope Array Experiment, TA 実験) は $10^{18.2} \sim 10^{19.5}$ で宇宙線の組成は陽子であるという結果を出している。銀河系内で陽子が 10^{18} eV 以上のエネルギーまで加速される可能性は非常に低く、また銀河系内起源で最も高いエネルギーを持つ宇宙線は、磁場による閉じ込め効果が最も高い、すなわち電荷の大きい、鉄だと考えられている。そこで、この 2nd knee という折れ曲がり構造は、宇宙線の起源が銀河系「内」から銀河系「外」へと移り変わっていることに対応しているのではないかと考えられている。

また、銀河系外起源の宇宙線は、主に、宇宙の膨張と宇宙背景放射 (Cosmic Microwave Background Radiation, CMBR) との相互作用によってそのエネルギーを失う。これらのエネルギー損失過程は、宇宙線源から地球への伝搬距離によるため、観測されるエネルギースペクトルには、距離毎の宇宙線発生源の密度の違いを反映したさまざまな構造が見られると予想される。そして、2nd knee 領域では赤方偏移パラメーター z が 1 程度の宇宙論的距離にある宇宙線源の寄与が支配的であると考えられている。

そこで、この興味深い 2nd knee エネルギー領域の組成とエネルギースペクトルを精密に測定し、宇宙線源の銀河系内から銀河系外への遷移と宇宙線源の密度と距離の変化を明かにするために TA Low Energy extension (TALE) 実験が進んでいる。TALE 実験は TA 実験に隣接して、10 台の大気蛍光望遠鏡 (Fluorescence Detector, FD) と 105 台の地表検出器 (Surface Detector, SD) を設置する。

本研究では TALE 実験用の無線 LAN モデムを選定、交換し、それに伴い SD 用エレクトロニクス内の CPU と FPGA のファームウェアを書き換えて最適化した。また TALE 用に最適化した SD エレクトロニクスで通信テストを行った。TALE 実験用無線 LAN モデムの候補機を用いて米国ユタ州にある TA 実験サイト内で通信テストをした結果、Redpine signals 社製の RS9110-N-11-02 を選んだ。このモデムはホストインターフェイスに UART や SPI を採用しており、TA 実験で使用されている ADTEK 社製無線 LAN モデム ADLINK540F.RF より扱いやすく、またモデム自体が手に入りやすいという利点がある。しかし RS9110-N-11-02 は、独自のヘッダを構成することが可能で結果的に 1 パケットあたりのデータサイズを小さくすることができる ADLINK540F.RF より、一回の無線通信にかかるデータ量が多いという問題点もある。だが TALE 実験では 1 つの通信塔がやり取りする SD の台数が TA 実験よりも少ないため、総通信量は減るということがわかっていて、このような違いを考慮し、CPU と FPGA のファームウェアを書き換えて TALE 実験用エレクトロニクスを完成させた。また TALE 実験用に最適化した SD エレクトロニクスで通信テストを実施した。その結果、通信にかかる時間は 386Byte の転送に 21.6m 秒と、TALE 実験のために必要な速度の約半分しか出せていないことがわかったが、これは FPGA のファームウェアを書き換えて、エレクトロニクス内でのデータ通信速度を向上させることで解決できる目途が立っている。

この完成させた SD エレクトロニクスを使って TALE 検出器を完成させると、ハイブリッド事象の最頻エネルギーは $10^{17.3}$ eV となり、これは 2nd knee ($10^{17.5}$ eV 付近) より低い。また、年間事象数 5000 イベントが期待でき、数年の観測からこのエネルギー領域のエネルギースペクトルと化学組成を明らかにする予定である。

第1章 2nd knee領域の宇宙線

1.1 宇宙線

宇宙線とは宇宙空間に存在する高エネルギー放射線であり、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。1核子の持つエネルギーを 10^{10} eV~ 10^{11} eVの範囲で見ると、宇宙線の成分は約82%が陽子で、約11%が α 粒子、残りはそれより重い原子核である。これまでに観測された宇宙線のエネルギーは 10^8 eVから 10^{20} eV以上までの広範囲にわたっており、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)

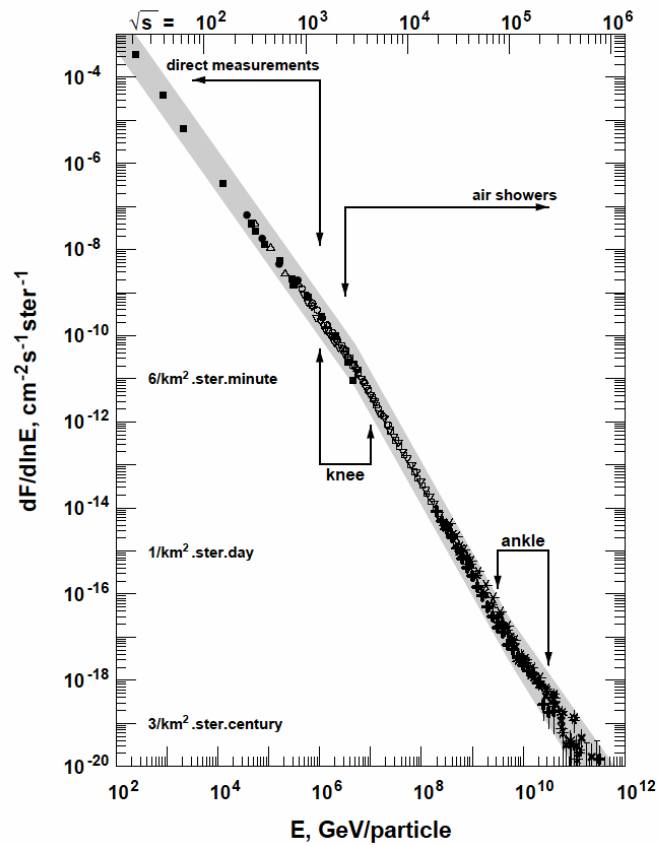


図 1.1: 一次宇宙線のエネルギースペクトル。

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を越えるエネルギー領域では、宇宙線のエネルギースペクトルはエネルギーの冪乗 $F(E) = K \times E^{-\gamma}$ で近似される。

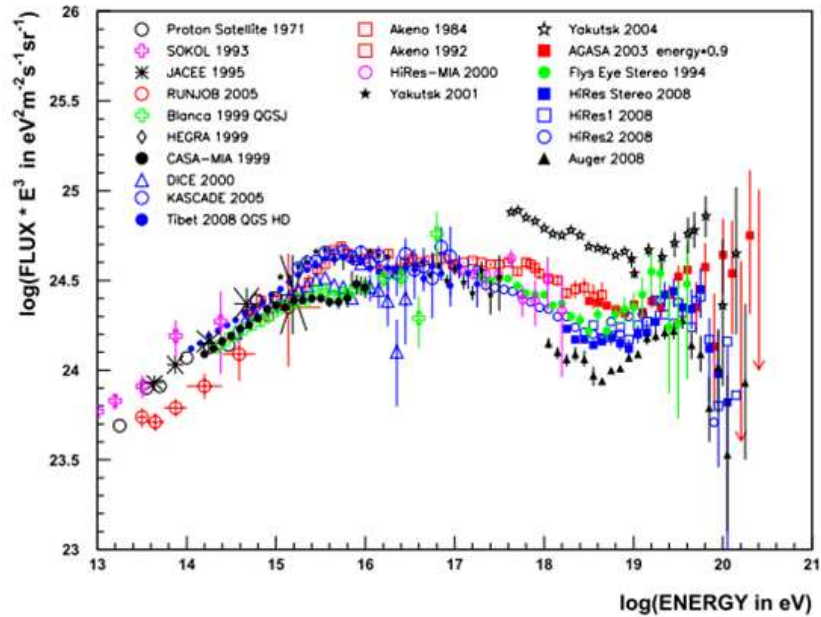


図 1.2: 一次宇宙線のエネルギースペクトル. 10^{15} eV, $10^{17.5}$ eV, $10^{18.5}$ eV 付近に構造があるの分かる. [1]

10^{13} eV から 10^{20} eV のエネルギー領域のフラックスに E^3 を掛けたものを図 1.2 に示す. 宇宙線の冪 γ は 10^{15} eV 付近までは ~ 2.7 であり, そこから $\gamma \sim 3.0$ と変化し, $10^{17.5}$ 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.

knee より低いエネルギー領域の宇宙線は, 超新星爆発の衝撃波で加速されると考えられている. また, 10^{15} eV 以上の宇宙線はこれ以下のエネルギー領域とは別の機構, 例えば, 超新星爆発の磁場がもっと強い場合や恒星とコンパクト星 (中性子星やブラックホール) の連星などで宇宙線が生成, 加速されていると考えられている.

knee でのスペクトルの折れ曲がりの原因には全く別の考え方もある. それは, このエネルギー以上では荷電粒子のラーモア半径 r_L が銀河円盤の厚さよりも大きくなるため, 粒子が銀河円盤の外に逃げ出していく効果が現れる, というものである. 銀河磁場は約 $3 \mu\text{G}$ なので, 10^{15} eV の陽子では $r_L \sim 0.3$ pc となる. この値は銀河円盤の厚さより小さいが, 銀河風の効果を合わせると, これ以上のエネルギーを持つ宇宙線に対しては銀河系内への閉じ込め効果が効きにくくなるため, エネルギースペクトルの冪が大きくなるとする考察がある [2].

ankle 領域のエネルギーの宇宙線についても複数の理論がある. 1 つは knee と同様に宇宙線に対して銀河内への閉じ込め効果が効きにくくなり, 十分に加速できないため, 主要な宇宙線の起源が銀河系内から銀河系外へと遷移するという考え方である. この場合は ankle 周辺での銀河系内起源の宇宙線の到来方向に異方性が検出されると期待される. また, 化学組成は宇宙線の起源の変化に伴って 1 次エネルギーの増加とともに鉄から陽子へと変化していると期待される. 一方, ankle 構造が $p\gamma \rightarrow pe^+e^-$ の対生成によるエネルギー損失によって生じるという解釈もある. そうすると化学組成は ankle をはさんだ高いエネルギー側, 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.

また 10^{17} eV 付近で粒子種が鉄であるという結果も出ており [2], 10^{17} eV 付近から ankle 領域

で組成が変わらなければならない。その組成の変化が $10^{17.5}$ eV 付近の折れ曲がりに見えていて、“2nd knee”に対応してるとする考えもある。

1.1.2 宇宙線の化学組成

宇宙線の化学組成は、宇宙の化学組成と比べると、図 1.3 に見られるように MeV のオーダーのエネルギー領域では、重い元素が H, He に比べて相対的に多い [3]。これは H, He が加速領域に入る際に比較的イオン化されにくいことと関係があると考えられている。しかし、大まかに見ると宇宙線の化学組成と、宇宙の化学組成はよく一致している。原子は星の中で核融合によって合成され、星風や爆発によって星間物質となり、再び凝縮して星となるというのを繰り返して、宇宙の化学組成を形成している。つまり、宇宙線の化学組成が宇宙の化学組成から大きくずれていないのは、星の中で合成された原子核が何らかの形で加速されて宇宙線となっていることを示している。宇宙線の化学組成には、宇宙線の原子核がどこで合成され、どこで加速され、どのようにして伝播してきたのかが反映されているはずである。従って、宇宙線中の放射性同位体比や重元素比を知ることで、宇宙線の起源について知ることができる。

knee より低いエネルギー領域の宇宙線の観測は人工衛星や気球、惑星探査機などの飛翔体技術の発達と測定技術の向上により Fe グループまでの元素に対しては精度よく行われている。その構成比は数 10 MeV ~ 数 10 GeV まではほとんど変わらない。図 1.3 に He から Ni までの領域での、宇宙線の組成と太陽系の組成との比較を示す [3]。ここから、Li, Be, B と Sc, Ti, V, Cr, Mn の二つの元素群が、太陽系物質に比べて宇宙線には圧倒的に多いことがわかる。これらの元素は星の核合成の最終生成物としては非常に少ないが、炭素や酸素核の破碎によって Li, Be, B が、鉄の破碎によって Sc から Mn までの原子核が生成されるためである。

それらは宇宙線と星間物質との衝突でつくられる。破碎の断面積は分かっているので、宇宙線がつくられてから観測されるまで通過した物質質量について知ることができる。宇宙線の大部分が横切る物質質量の平均値は $X = 5 \sim 10 \text{ g/cm}^2$ 程度である。銀河円盤の密度 ρ_N は、 1 cm^3 につき陽子 1 個程度であるから、物質のこの厚さは長さにして

$$l = X/(m_P \rho_N) = 3 \times 10^{24} \text{ cm} \approx 1000 \text{ kpc} \quad (1.1)$$

宇宙線がもっと薄い銀河ハローを通る可能性も考えると、この値は通過した距離の下限値である。いずれにせよ、 d を銀河円盤の厚さの半分とすれば $l \gg d \approx 0.1 \text{ kpc}$ である。このことは、宇宙線の閉じ込めは、銀河間空間に逃げ出す前に長い間飛び回る拡散過程であることを意味する。

1.1.3 宇宙線の加速機構

宇宙線の加速機構についても多くの議論がなされている。宇宙線の加速機構を考える上で、先に述べたような冪型のエネルギースペクトルを導き出せることが必須条件となる。現在、この条件を満たす加速機構として最も有力とされているのが“フェルミ加速機構”である [4]。

フェルミ加速

フェルミ加速は 1949 年に Fermi によって提唱された荷電粒子加速理論で、荷電粒子が磁場を持った星間雲との衝突を繰り返すことによって運動エネルギーを得るという統計的な加速モデルである。これによれば、星間雲と荷電粒子の衝突方向は統計的にランダムであるが、粒子の 1 回

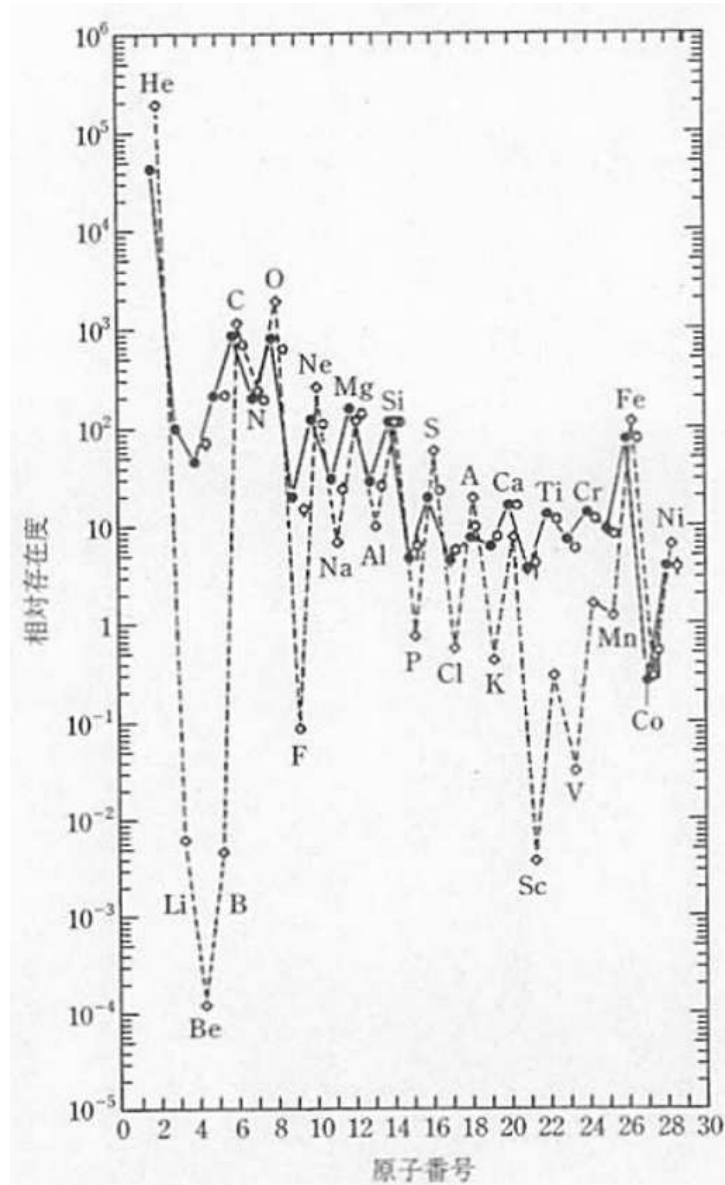


図 1.3: Si を 100 としたときの、宇宙線の組成と太陽系の組成. ● は 70~280 MeV の低エネルギーの宇宙線, ○ は 1000~2000 MeV 高エネルギーの宇宙線, ◇ は太陽系の組成を表している [3].

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 次のフェルミ加速と呼ばれる。実際の宇宙線加速モデルとしては、この 2 次フェルミ加速よりもプラズマ衝撃波による加速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 次のフェルミ加速と呼ばれる。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。

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

ここで、 E_0 は粒子の初期エネルギーである。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} とおけば、 n 回衝突後に加速領域に留まる確率は $(1 - P_{\text{esc}})^n$ であるので、 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冪型のエネルギースペクトルが導き出される。

超新星残骸での衝撃波加速

超新星爆発残骸による加速での最大加速エネルギーを計算してみる。衝撃波による加速が行われる時間は放出する物質の総量から見積もることができる。衝撃波の拡散係数を D 、速度を u とし、拡散の特徴的な長さ D/u は衝撃波の曲率半径よりも十分小さく、平面と近似する。例えば、質量 $10 M_{\odot}$ 、平均速度が 5×10^8 cm/sec、放出する物質の平均密度が 1 proton/cm³ の場合、加速される時間は $T_A \sim 1000$ yrs となり、広がり の大きさは 5 pc 程度となる。

このように、超新星爆発からの強い衝撃波が有限な寿命 T_A を持つことによって、この加速機構による 1 粒子あたりの加速エネルギーが制限される。単位時間あたりのエネルギーの増加率は、

$$\frac{dE}{dt} = \frac{\alpha E}{T_{\text{cycle}}} \quad (1.7)$$

ここで、 T_{cycle} は 1 回の衝突にかかる時間、 α は衝突ごとに得られるエネルギーの獲得率である。また、 α は以下のように求める。加速する前のエネルギーを E_1 、加速後のエネルギーを E_2 とする。動いてる衝撃波の静止系で、宇宙線粒子は全エネルギー (静止質量+運動エネルギー)

$$E'_1 = \gamma E_1 (1 - \beta \cos \theta_1) \quad (1.8)$$

を持つ。ここで γ はローレンツ因子、プライムは衝撃波とともに動く系から見た量を示す。散乱は全て磁場内での運動によるので弾性散乱である。つまりこの動く系では $E'_2 = E'_1$ となる。よって

$$E_2 = \gamma E'_2 (1 + \beta \cos \theta'_2) \quad (1.9)$$

以上より

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{1 - \beta \cos \theta_1 + \beta \cos \theta'_2 - \beta^2 \cos \theta_1 \cos \theta'_2}{1 - \beta^2} - 1 \quad (1.10)$$

よって

$$\alpha = \frac{1 + (4/3)\beta + (4/9)\beta^2}{1 - \beta^2} - 1 \sim \frac{4}{3}\beta = \frac{4}{3} \frac{u_1 - u_2}{c} \quad (1.11)$$

ここで、 u_1 は上流領域での流体の速度、 u_2 は下流領域での流体の速度である。

式 (1.7) を積分することで最大加速エネルギー E_{\max} を見積る。

$$E_{\max} = \int_0^{T_{\text{cycle}}} \frac{dE}{dt} \cdot dt \quad (1.12)$$

ここではまず、 T_{cycle} を見積もる。衝撃波の上流での粒子のカレント、 \mathbf{J} は、

$$\mathbf{J} = -D\nabla N + \mathbf{u}N \quad (1.13)$$

より与えられる。 N は粒子密度、 \mathbf{u} は流れの速度を示す。 \mathbf{u}_1 は衝撃波面に対して相対的に負の方向になって、平衡状態では正味のカレントがなくなり、

$$D_1 \frac{dN}{dz} = -u_1 N \quad (1.14)$$

となる。それゆえ上流領域では、

$$N(z) = \rho_{\text{cr}} \exp(-zu_1/D_1) \quad (1.15)$$

となる。ここで、上流領域での D_1 は衝撃波の拡散係数、 ρ_{cr} は衝撃波での宇宙線の数密度である。上流領域の単位面積あたりの粒子数は $\rho_{\text{cr}} D_1 / u_1$ となる。またショック面と宇宙線との単位面積あたりの衝突率は $\rho_{\text{cr}} c / 4$ である。そのため上流領域での滞在時間は

$$(\rho_{\text{cr}} D_1 / u_1) (\rho_{\text{cr}} c / 4)^{-1} = 4D_1 / (u_1 c) \quad (1.16)$$

となる。下流領域では滞在時間の計算に粒子が脱出するかどうかを考慮に入れる必要がある。簡単ではない。ここでは単純に上流領域と同じであるとして、滞在時間を $4D_2 / (cu_2)$ とすると [5]、衝突にかかる時間は、

$$T_{\text{cycle}} = \frac{4}{c} \left(\frac{D_1}{u_1} + \frac{D_2}{u_2} \right) \quad (1.17)$$

となる。ここで、 D_2 は下流領域での衝撃波の拡散係数である。

次に拡散係数の見積もりが必要である。拡散の平均自由行程 λ_D は、ラーモア半径よりは小さくならない。ラーモア半径 r_L は荷電粒子の磁場中でのらせん運動の半径であり、次の式 (1.18) で与えられる。

$$r_L = \frac{pc}{ZeB} \quad (1.18)$$

ここで、 e 、 Z 、 p 、 B はそれぞれ、電気素量、宇宙線の原子番号、磁場に垂直な方向の運動量、磁場の強さである。従って拡散係数の最小値 D_{\min} はこのラーモア半径を使って、

$$D_{\min} = \frac{r_L c}{3} \sim \frac{1}{3} \frac{Ec}{ZeB} \quad (1.19)$$

となるので, $u_2 = u_1/4$ の強い衝撃波については, $T_{\text{cycle}} \geq 20E/(3u_1ZeB)$ となる. $D_1 = D_2 = D_{\text{min}}$ を代入すると最大加速エネルギー E_{max} は

$$E_{\text{max}} \simeq \frac{3}{20} \frac{u_1}{c} ZeB (u_1 T_A) \quad (1.20)$$

となる. 質量 $10 M_{\odot}$ の天体の超新星爆発の放出速度 5×10^8 cm/sec, $T_A \sim 1000$ yrs, 銀河磁場を $3 \mu\text{G}$ とすると,

$$E_{\text{max}} \simeq Z \times 3 \times 10^{13} [\text{eV}] \quad (1.21)$$

となる.

ボトムアップモデル

フェルミ加速あるいはその他のメカニズムによって, 低いエネルギーの宇宙線をより高いエネルギーへと加速する放射モデルを総称してボトムアップモデルと呼ぶ.

前述の計算とは異なり, 寿命のない衝撃波による加速を考える. 荷電粒子の進行方向を曲げるのは磁場であるから, 加速領域への閉じ込め条件から加速されるエネルギーの限界が決まり,

$$E_{\text{max}} \leq cZeBR \quad (1.22)$$

となる. ここで, Z は宇宙線原子核の原子番号, B は加速領域の磁場の強さ, R は加速領域の大きさである. 図 1.4 に, 宇宙線源候補天体の大きさと磁場強度, そして最大加速エネルギーの関係を示した [6]. この図から, ほとんどの銀河系内天体は 10^{18} eV 以上のエネルギーをもつ極高エネルギー宇宙線と呼ばれる宇宙線の加速源候補となりえない (ガンマ線バースト (GRB), 中性子星が例外) ことがわかる. 銀河系外の候補天体は活動銀河核, ガンマ線バースト, 電波銀河, 銀河団などが挙げられる.

以下, いくつかの候補天体での加速と観測される特徴について簡単にまとめる.

- 中性子星: 表面の磁場が 10^{13} G を越えるような中性子星は, 鉄原子核を 10^{20} eV 以上まで加速することが可能である [7]. しかしこのような非常に強い磁場が存在すると, 荷電粒子はシンクロトロン放射によってエネルギーを失い, 実際にはそのような高エネルギーまでの加速は不可能であると考えられている. ただし, シンクロトロン放射によるエネルギー損失率は中性子星表面からの距離に強く依存し, 表面から 10^9 cm 以上離れた領域で加速された粒子は大きなエネルギー損失を伴わず外部へ脱出できる, という指摘もある [8].

このモデルが正しければ, 極高エネルギー宇宙線の到来方向分布は銀河面に集中し, 鉄原子核が主成分となるはずである.

- AGN: 活動銀河核 (Active Galactic Nuclei, AGN) では, 中心にあるブラックホールに降着する物質の重力エネルギーを粒子の運動エネルギーとして解放している [9]. 粒子加速は回転する磁場によって生ずる電場によって起こる. ただし, AGN での加速では, その周囲の放射場との衝突による荷電粒子のエネルギー損失が顕著であり, 最大加速エネルギーは 10^{19} eV までと考えられている [10].
- 電波ローブ: AGN の電波ローブと呼ばれる領域では, 中心核から放出されるジェットと銀河間空間ガスの衝突によって強い衝撃波が生じており, 100 kpc 以上にも広がっている [9]. その中で特に強い電磁波が放射されている領域 (radio hot-spot) では, 光子, 物質ともに密

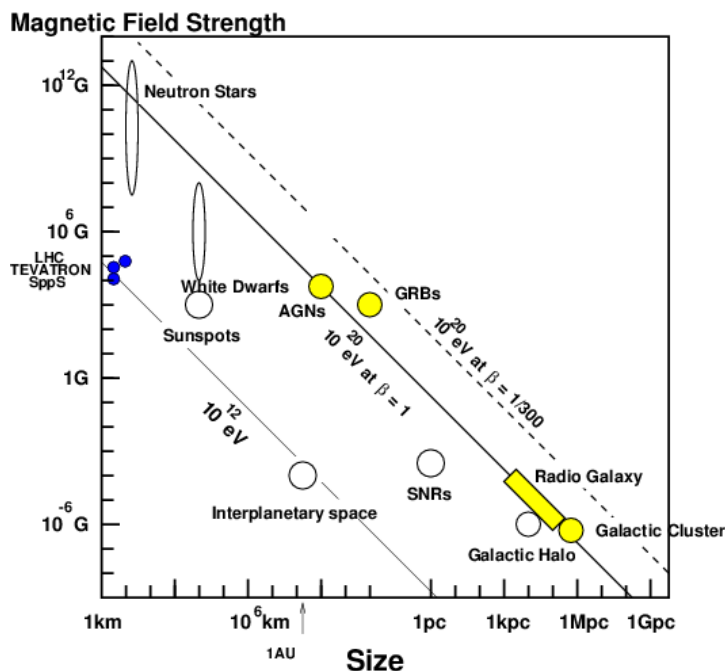


図 1.4: 磁場の強さと天体の大きさとの関係 (Hillas プロット) [6].

度が低いためエネルギー損失が少なく、かつ粒子を封じ込めるだけの十分な強さの乱流磁場が存在していることが電波観測から予想されている [11]. しかし、hot-spot を伴う電波ローブを持つ AGN はまれで、地球からの距離も遠く、しかもこれまでに観測された極高エネルギー宇宙線の到来方向分布と合わない。仮に M87(地球からの距離: 約 18 Mpc) がそのような放射源であれば、M87 の方向に観測事象が集中するはずである。

- GRB: ガンマ線バースト (Gamma Ray Bursts, GRB) は、既知の天体現象の中でも最も激烈なものの一つであり、極高エネルギー宇宙線の到来方向と同様に等方的に分布している。GRB によるエネルギー放出率は、極高エネルギー宇宙線源が一様に分布していると考えた場合の 10^{19} eV 以上の宇宙線としてのエネルギー放出率にほぼ等しく、非常に有力な候補天体である [12]. しかし、GZK 機構のために地球近傍 50 Mpc 以内に存在しなければならない。このような GRB は 100 年に 1 回程度しか発生しないと予想されているので、観測される宇宙線の到来方向分布は GRB の方向に集中することが容易に予想できる。
- 銀河団: 数 μ G オーダーの磁場が 500 kpc 程度の広がりを持って観測されており、これは最大加速の条件 (式 1.22) を満たしている [13]. しかし、 10^{20} eV 以上まで宇宙線が加速されたとしても、銀河団内部での GZK 機構によるエネルギー損失が大きく、銀河団の外には放射されないと考えられている。

トップダウンモデル

前述のように、これまでに観測された極高エネルギー宇宙線を既知の天体現象や素粒子物理、宇宙論の標準的な枠組の中で説明するのではなく、素粒子物理の標準的な理論を越えた新しい物理に基づくモデルや、未知の超高エネルギー天体現象に基づくモデルが提案されている。こうした

モデルは、従来のような低エネルギー粒子が加速されて極高エネルギーに達するというボトムアップモデルに対して、トップダウンモデルと呼ばれる。

以下はそのいくつかの例である。

- 宇宙紐や超重粒子の崩壊・対消滅: 宇宙の初期, すなわちインフレーションの最後または直後に生成された宇宙紐などの位相欠陥 (topological defect), または超重粒子 (super heavy relic particles) が, 銀河近傍で崩壊して極高エネルギー宇宙線を生成しているとするモデルである [14]. 位相欠陥は互いの衝突や対消滅によって, 超重ゲージボソンやヒッグスボソンに崩壊すると考えられている. これらはパイオンのハドロンジェットを作り最終的にガンマ線, 電子, ニュートリノに崩壊し, ハドロンのうち数%だけが核子となる. GZK 機構を考慮すると, このシナリオでは, GZK カット オフより低いエネルギーでは陽子が, 高いエネルギーではガンマ線が主成分になると予想される. 超重粒子も崩壊によってハドロンジェットを作るが, 超重粒子は cold dark matter として銀河ハロー内にも存在すると考えられるため, GZK 機構の影響を受けず, 粒子種がエネルギーとともに変化することはないと予想されている.
- Zバースト 模型: 極高エネルギーのニュートリノが, 重力によって銀河近傍に集積している宇宙背景ニュートリノと相互作用して Z^0 粒子を作り, その崩壊生成物が極高エネルギー宇宙線として観測される, とするモデルである [15]. この反応で生成されるのはほとんど光子である. また, 宇宙背景ニュートリノは銀河近傍に大きな半径を持つクラスターを作るので, 到来方向分布は等方的になると予想される.

もしトップダウンモデルが正しければ, 標準的な素粒子物理と天体物理の理論を越える新たな物理への糸口となる可能性がある。

1.2 2nd knee 領域の宇宙線

宇宙線物理学という研究分野の中で, 現在最も興味深いトピックスの一つは”2nd knee”である. 2nd kneeとは図 1.2 に示されるエネルギースペクトルの $10^{17.5}$ eV 付近に見られる折れ曲がり構造である. この節では 2nd knee 領域の宇宙線が持つ重要な項目についていくつか説明する.

1.2.1 宇宙線起源の銀河系内から銀河系外への遷移

$10^{15.5}$ eV 付近の knee とそれより高いエネルギーでの空気シャワー観測から, 一次宇宙線の平均質量数が徐々に大きくなり, 宇宙線の主成分がエネルギーの増加とともに重い元素へ移行していく様子が示されている. これは 1.1 節で述べたように, 加速領域あるいは閉じ込め領域からのみれ出しによるもので, 電荷の小さな原子核ほど閉じ込めが効かず, 結果としてフラックスが減少していく. $10^{15.5}$ eV での陽子成分の減少に始まり, このプロセスが順にヘリウム, 炭素と, 鉄まで続くと考えられる. knee よりも 26 倍高いエネルギー, すなわち $\sim 10^{17}$ eV 付近では主成分が鉄となり, 折れ曲がり ”iron knee” が観測されるはずである.

一方, 陽子以外の原子核が銀河系外で加速されているとしても, 地球へやってくる宇宙線は陽子が主成分として見え始めると考えられている. これは, 同じエネルギーで考えると, 鉄の場合は遠くにある発生銀河から我々の銀河まで, 磁場による散乱のために到達することが出来ない一方で, 陽子の場合は同じエネルギーで磁場による偏向が鉄の 26 分の 1 と小さいため, 陽子の方がより低いエネルギーから我々の銀河まで到達することができるからである.

よって、銀河系内から銀河系外への遷移が起きているエネルギー領域では、宇宙線の主成分が鉄から陽子へ極端に変化する。この遷移領域では、 X_{\max} (空気シャワーの最大発達深さ)がエネルギーとともに急激に変化し、さらにその分布が鉄成分と陽子成分の両方を含むため、非常に広がるはずである。このような X_{\max} とその分布幅のエネルギーに依存した変化が見つければ、宇宙線源の銀河系内から銀河系外への遷移の決定的な証拠になると考えられている。

1.2.2 宇宙線源の進化

高エネルギーの宇宙線は、主に宇宙の膨張と宇宙背景放射 (Cosmic Microwave Background Radiation, CMBR) との相互作用によってそのエネルギーを失う。これらのエネルギー損失過程は、宇宙線源から地球への伝搬距離によるため、観測されるエネルギースペクトルには、距離毎の宇宙線発生源の密度の違いを反映した各種の構造が見られると予想される。(図 1.5, [16]) この

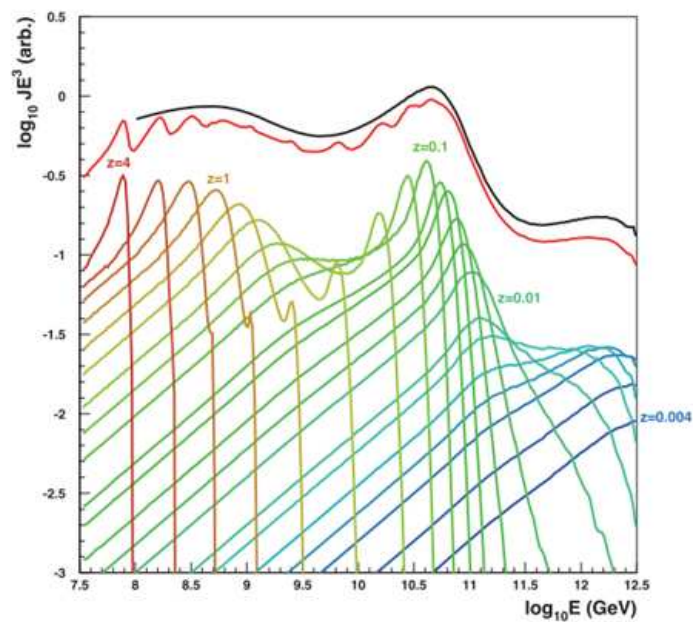


図 1.5: 各エネルギーで宇宙線フラックスに寄与する宇宙線源の赤方偏移量 z [16].

スペクトルの構造を宇宙線伝搬シミュレーションと比較することによって、宇宙線源の空間密度の赤方偏移依存性、 $\rho \propto (1+z)^m$ の evolution parameter m が求められる。

図 1.6 は宇宙線のエネルギースペクトルの構造へのスペクトルインデックスの変化の寄与と、 m の変化の寄与を示したものである。 10^{19} eV 半ば付近の形状はスペクトルインデックスに強く依存し、 $10^{18.7}$ eV のすぐ下のエネルギー領域は m に強く依存することが予想されている [16]。このため、2nd knee 領域の宇宙線のエネルギースペクトルを詳しく調べることによって、これらの重要なパラメータを個別に制限することが出来る。これによって「エネルギースペクトル」「質量組成」「到来方向分布」という観測量に加えて、宇宙線源の研究のための新しい「進化」という座標軸を切り開くことが出来る。

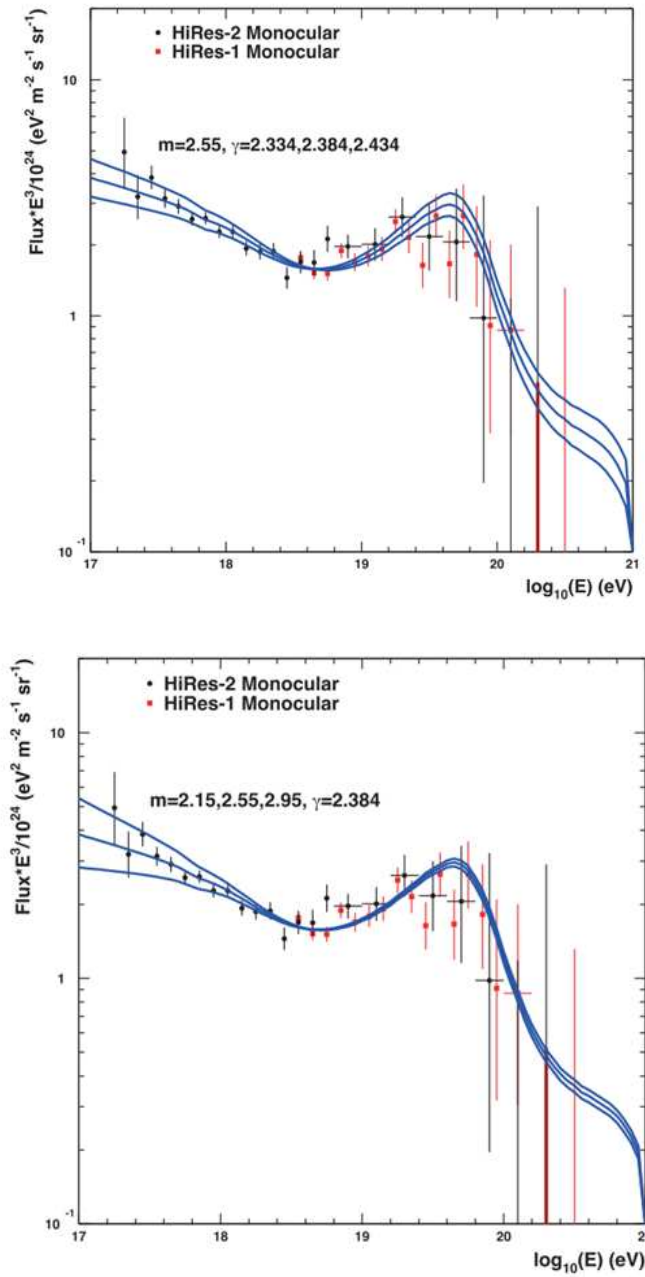


図 1.6: 極高エネルギー領域のエネルギースペクトルの構造へのインデックスの変化の寄与 (上), evolution parameter(m) の寄与 (下). スペクトルインデックスの違いは, GZK 領域, 2ndknee 領域の両方に現れるのに対して, m の違いは 2nd knee 領域で顕著であることがわかる [16].

1.2.3 LHCと空気シャワー現象

2nd knee 領域は、LHC(Large Hadron Collider)による実験室系での到達エネルギー $\sim 10^{17}$ eV と重なっており、この領域の空気シャワー観測と LHC 実験の結果は外挿なしに同一のエネルギーでの比較が可能である。LHC 実験による全断面積などの新しい測定結果が相互作用モデルに組み込まれれば、2nd knee 領域の空気シャワー観測はモデルのテストとして非常に有用になる。特に、 10^{17} eVでの陽子・陽子あるいは陽子・原子核相互作用の全断面積や粒子生成の多重度の情報が加速器実験から得られれば、さらに正確な X_{\max} のシミュレーションが可能になる。これは高エネルギーの宇宙線観測実験にとって極めて重要である。

1.3 空気シャワーと宇宙線観測

1.1 節で述べたように、宇宙線のフラックスはほぼ E^{-3} で減少するので、 10^9 eV $\sim 10^{20}$ eV のエネルギー領域ではフラックスの変化は 10^{30} にもなる。フラックスの大きい 10^{14} eV 以下の低エネルギー宇宙線は、気球や人工衛星などの飛翔体に搭載された観測装置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、観測には大きな検出面積と長い露光時間が必要であり、そのため飛翔体搭載検出器によって直接観測をすることは難しい。そこで、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)を検出するという間接測定が行われている。

1.3.1 空気シャワー現象

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し、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、一次宇宙線が結果的に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。通常空気シャワーは高エネルギーハドロンによる核カスケードと、高エネルギーガンマ線から生成される電磁カスケードからなる。

宇宙線の主成分である陽子などのハドロンが大気原子核と相互作用した場合には、 π 、K などのハドロンの多重生成(核カスケード)が起きる。生成された二次粒子の大部分は結果的に π となる。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、

$$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu \quad (1.23)$$

のように崩壊する。 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。これを核カスケードと呼ぶ。図 1.7 はこの様子を模式的に表したものである。

高エネルギーのガンマ線は電子対生成により電子と陽電子を作る。これらの電子、陽電子は制動放射によってガンマ線を放射する。エネルギー E の電子による制動放射の断面積 σ_{brems} は、次の Bethe-Heitler の式で表される。

$$\sigma_{\text{brems.}}(E, v)dv = \frac{4Z^2 r_e^2}{137} \frac{dv}{v} \left[\left(1 + (1-v)^2 - \frac{2}{3}(1-v) \right) \ln \left(184Z^{-\frac{1}{3}} \right) + \frac{1}{9}(1-v) \right] \quad (1.26)$$

ここで、 v 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。従って、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。

$$\left(\frac{dE}{dX}\right)_{\text{brems}} \simeq -\frac{E}{X_0} \quad (1.27)$$

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。

$$\frac{1}{X_0} = \frac{4Z^2 r_e^2 N}{137 A} \ln\left(184Z^{-\frac{1}{3}}\right) \quad (1.28)$$

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、

$$\sigma_{\text{pp}}(h\nu, u) du = \frac{4Z^2 r_e^2}{137} du \left[\left(u^2 + (1-u)^2 - \frac{2}{3}(1-u) \right) \ln\left(184Z^{-\frac{1}{3}}\right) + \frac{1}{9}(1-u) \right] \quad (1.29)$$

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、

$$\left(\frac{dE}{dX}\right)_{\text{pair}} = -\frac{7 E}{9 X_0} \quad (1.30)$$

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、ガンマ線がつけられる現象が電磁カスケードである。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と呼び、空気中では 84 MeV である。

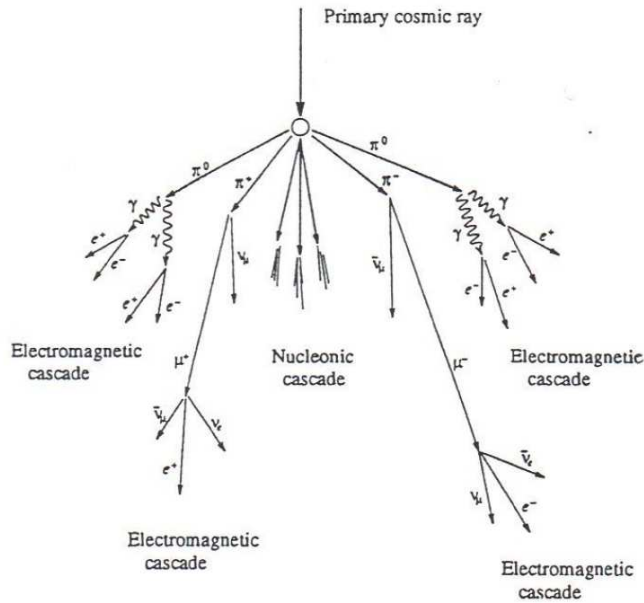


図 1.7: 空気シャワーの模式図.

1.3.2 空気シャワーの縦方向発達

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は減少する。空気シャワー中の電子成分の場合、臨界エネルギー E_c (空気中では $E_c=84$ MeV) に近付くと大気中の原子、分子による電離損失が大きくなり、急速にエネルギーを失って大気に吸収されてしまう。そのため、空気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ついては、次の近似式が用いられる。

$$N_e(t) \sim \frac{0.31}{\sqrt{y}} \exp \left[t \left(1 - \frac{3}{2} \ln s \right) \right] \quad (1.31)$$

$$y = \ln \left(\frac{E_0}{E_c} \right) \quad (1.32)$$

$$s = \frac{3t}{t + 2y} \quad (1.33)$$

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る。 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シャワーの発達とともにその値は増加し、 N_e (全電子・陽電子数) が最大になるとき、 $s = 1$ となる [4]。

宇宙線陽子がつく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。

$$N_e(X) = N_{\max} \left(\frac{X - X_0}{X_{\max} - X_0} \right)^{\frac{X_{\max} - X_0}{\lambda}} \exp \left(-\frac{X_{\max} - X}{\lambda} \right) \quad (1.34)$$

ここで、 N_{\max} は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 attenuation length で 70 g/cm^2 である。

一次宇宙線のエネルギーの違いは N_{\max} の違いとなって現れ、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) の関係がある。また、同一の一次エネルギーである場合、一次宇宙線粒子種の違いは 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、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こと、エネルギー細分化が早く進むことによる。単純なモデル計算から、 $X_{\max} \propto \ln(E_0/A)$ (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 1.8 に示す。

1.3.3 空気シャワーの横方向分布

電磁カスケードは大気中で電子の多重クーロン散乱により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 [22]、Greisen により整理された NKG function が一般的に使われる [23]。空気シャワー中心からの距離 R の位置での電子数密度 $\rho_e(R)$ は次式で表される。

$$\rho_e(R) = C \frac{N_e}{R_M^2} \left(\frac{R}{R_M} \right)^{s-2.0} \left(1 + \frac{R}{R_M} \right)^{s-4.5} \quad (1.35)$$

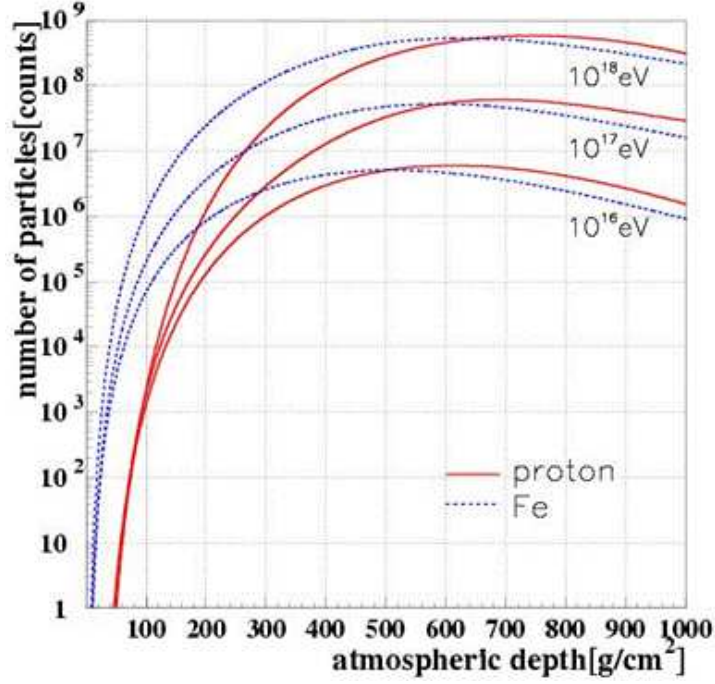


図 1.8: 空気シャワーの縦方向発達.

ここで、 N_e は総荷電粒子数、 C は規格化定数、 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、 $R_M \sim 9.3 \text{ g/cm}^3$ である．また s はエイジパラメーター、電磁カスケードの発達の度合いを示すものであり、

$$s = \frac{3t}{t + 2\ln(E_0/\epsilon_0)} \quad (1.36)$$

である．ここで、 E_0 はカスケードの親粒子のエネルギー、 t は X_0 を単位とした大気の厚さである．

ハドロンにより引き起こされる空気シャワーは純粋な電磁カスケード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、シャワー軸からはな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 の崩壊からの粒子の増殖が終わった電磁カスケードが主成分となる．このため、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ており、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 [17]. 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

$$\rho_e(R) \propto \left(\frac{R}{R_M}\right)^\alpha \left(1 + \frac{R}{R_M}\right)^{-(\eta-\alpha)} \quad (1.37)$$

と表される．AGASA グループは、電子成分の横方向分布は 1 km 以遠で粒子数密度が減少しているので、式 (1.37) 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 [17].

$$\rho_e(R) = C \left(\frac{R}{R_M} \right)^{-1.2} \left(1 + \frac{R}{R_M} \right)^{-(\eta-1.2)} \left(1.0 + \left(\frac{R}{1[\text{km}]} \right)^2 \right)^{-\delta} \quad (1.38)$$

次に、高エネルギーミューオンは、上空でのハドロン相互作用の情報を持っているが、その多くはコア近傍(～数10m)に集中している。しかし一般に観測有効面積を大きくとる必要のある大規模な空気シャワーアレイによる観測では高エネルギーミューオンの観測は難しく、遠方まで広がる低エネルギーミューオン(～1 GeV 領域)が観測対象となる。その横方向分布は Greisen による以下の実験式で表される [18].

$$\rho_\mu(\geq E_\mu, R) = g(E_\mu, R) \frac{N_\mu C_\mu}{R_0^2} \left(\frac{R}{R_0} \right)^{-\alpha} \left(1.0 + \frac{R}{R_0} \right)^{-\delta} \quad (1.39)$$

$$C_\mu = \frac{\Gamma(\beta)}{2\pi\Gamma(2-\alpha)\Gamma(\alpha+\beta-2)} \quad (1.40)$$

$$g(E_\mu, R) = [51/(50 + E_\mu)][3/(2 + E_\mu)]^{0.14R^{0.17}} \quad (1.41)$$

$$\alpha = 0.75, \beta = 2.5 \quad (1.42)$$

ここで、 E_μ はミューオンのエネルギー閾値、 N_μ は総ミューオン数、 R_0 はミューオンの平均的な広がりを示す距離である。

いくつかのエイジにおける横方向分布を図 1.9 に示した。

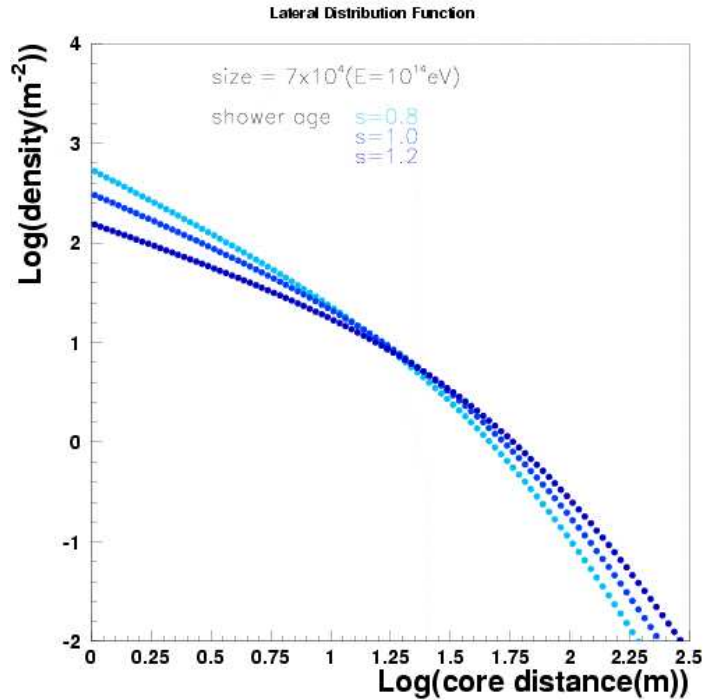


図 1.9: 空気シャワーの横方向分布.

1.3.4 空気シャワー粒子の到来時刻分布

図 1.10 に空気シャワー断面の概略図を示す。地表へのシャワー粒子の到来時刻はシャワー軸からの距離に応じてシャワー平面 (シャワー軸に垂直でシャワー軸上のシャワー粒子を含む仮想平面) に時間差が生じる。また、シャワーフロントは厚みを持っているため、その厚みも考慮する必要がある。粒子の平均到来時刻分布 $\langle\sigma_t\rangle$ は Linsley により実験的に与えられており、シャワー中心からの距離を R 、空気シャワーの天頂角を θ 、一次粒子のエネルギーを E として次式で表される [19]。

$$\langle\sigma_t\rangle = \sigma_{t_0} \left(1 + \frac{R}{R_t}\right)^b [\text{sec}] \quad (1.43)$$

ここで、 $\sigma_{t_0}=1.6 \text{ ns}$ 、 $R_t=30 \text{ m}$ 、 $b = (2.08 \pm 0.08) - (0.40 \pm 0.06)\text{sec}\theta + (0 \pm 0.06)\log(E/10^{17} \text{ eV})$ である。

この関数は AGASA グループにより改良されており、シャワー平面に対するシャワー粒子の遅れの平均 T_D と、その標準偏差 T_S は

$$T_D(\rho, R) = 2.6 \left(1 + \frac{R}{3000[\text{cm}]}\right)^{1.5} \rho^{-0.5} \times 10^{-9} [\text{sec}] \quad (1.44)$$

$$T_S(\rho, R) = 2.6 \left(1 + \frac{R}{3000[\text{cm}]}\right)^{1.5} \rho^{-0.3} \times 10^{-9} [\text{sec}] \quad (1.45)$$

で表される [24]。ここで、 ρ は粒子数密度 $[\text{m}^{-1}]$ である。

1.3.5 空気シャワーの観測方法

現在の空気シャワーの観測方法は大きく分けて、地表粒子検出器による観測法と大気蛍光法の 2 種類がある。

地表粒子検出器による観測法

多数の粒子検出器を地表に配置して空気シャワー粒子を検出し、宇宙線を間接観測する装置は空気シャワーアレイと呼ばれ、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、約 90% の電磁成分 (電子, 陽電子, 光子) と約 10% のミューオン成分、さらに少量のハドロン成分からなる。これらの検出器として最も一般的に用いられているのが、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である。また、特にミューオン成分のみを選択的に検出するために、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。さらに、空気シャワー軸に近いハドロン成分を観測するために、ハドロンカロリメーターを備えている空気シャワーアレイもある。

空気シャワーアレイの場合、一次宇宙線の到来方向は比較的簡単に求められる。空気シャワーは図 1.10 のようにシャワー面は粒子群 (シャワー平面) 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。一方、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密度から空気シャワー全体で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大規模なモンテカルロ計算を必要とする。その際の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。

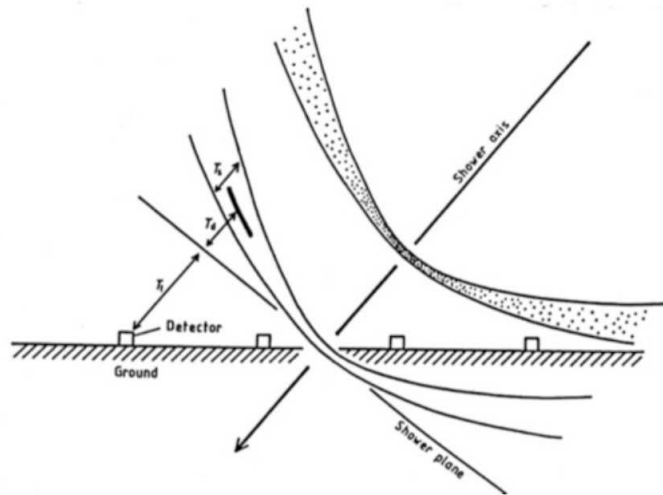


図 1.10: 地表付近の空気シャワー断面の概念図.

大気蛍光法

大気蛍光法は、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ものである。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は励起され、これらの励起された大気分子から蛍光が発せられる。すなわち、大気は宇宙線に対してシンチレーターとして働く。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} 個にも達し、その発光の継続時間は $30 \mu\text{s}$ 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。さらに大気蛍光の放射方向は等方的であるため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という利点がある。この大気蛍光法は、1960 年代初めに菅などによって提案され、1968 年に原、棚橋らによって初めて検出された。

大気蛍光法による一次宇宙線の各種情報の推定は、大きく分けて

1. 空気シャワー軸の再構成
2. 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。宇宙線の到来方向 (=シャワー軸) は蛍光の軌跡から簡単に求めることができる。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差した線がシャワー軸となる (図 1.11)。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 (1.34) 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ので、求められたシャワー発達曲線 $N_e(X)$ から式 (1.46) により一次宇宙線のエネルギー E_0 が決まる。

$$E_0 = \frac{\epsilon_0}{X_{\text{rad}}} \int N_e(X) dX \quad (1.46)$$

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、大気蛍光法による観測では、シャワーの縦方向発達が推定され、一次エネルギーはモンテカルロ計算に依存することなく決定される。ただし、この方法でエネルギーを測定するには、大気中の大気蛍光発光効率、大気中での紫外光の散乱・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。

大気中での発光過程と散乱・吸収において考慮する必要がある系統誤差として、チェレンコフ光、レイリー散乱、ミー散乱がある。チェレンコフ光は大気蛍光のバックグラウンド光となり系統誤差の原因となるため、データ解析の際には事象ごとに混入するチェレンコフ光を見積もる必要がある。レイリー散乱は大気分子による散乱で、波長より十分小さな直径の誘電体球による光の散乱である。それに対し、波長に対し無視できない大きさの誘電体球による散乱をミー散乱と呼び、主に大気中のダスト、エアロゾル (霧、もや、塵、煙など) によって起こる。レイリー散乱による大気の透過率は大気分子の密度から簡単な計算で求められるが、ミー散乱による透過率は大気中のダストやエアロゾル分布の様子に依存するため、大気モニターによる実測から測定する必要がある。

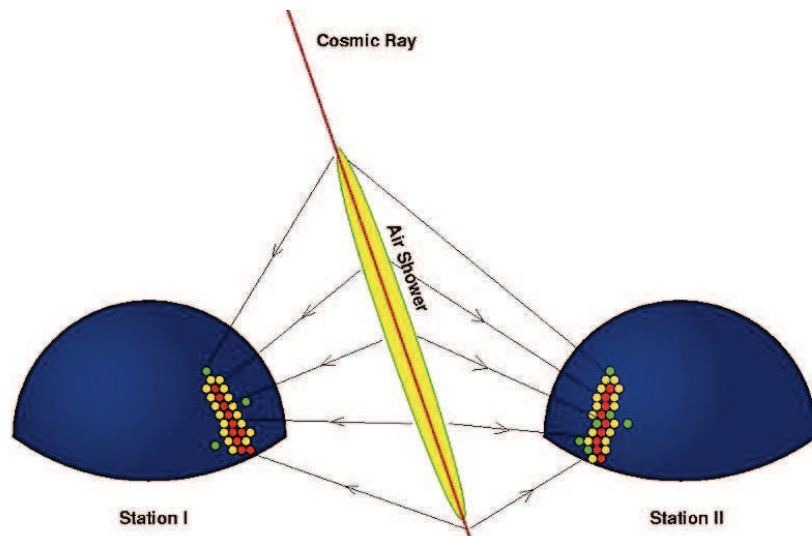


図 1.11: 大気蛍光による空気シャワーのステレオ観測の概念図。

1.4 観測結果の現状

1.2 節で述べたように、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する実験として、KASCADE-Grande 実験、Yakutsk 実験、Tunka 実験、IceCube 実験がある。これらの実験結果にはある程度の一致が見られるものの、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、そのあと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に展開されていた。KASCADE-Grande 実験の前身である KASCADE 実験は $200\text{ m} \times 200\text{ m}$ の範囲に展開された検出器群からなり、 $20\text{ m} \times 16\text{ m} \times 4\text{ m}$ の大きさを持つ 1 台のハドロンカロリメータ、 128 m^2 のミュオントラッキング検出器 1 台と、 3.2 m^2 のシンチレータ検出器 252 台からなる。その 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 $700\text{ m} \times 700\text{ m}$ に拡張したものが KASCADE-Grande 実験である [25]。これによっておよそ $10^{16} \sim 10^{18}\text{ eV}$ のエネルギーを持つ宇宙線を観測していた。1996 年から観測を開始し、2009 年に観測を終えた。

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。58 台の地表シンチレータ検出器 (2 m^2) と 6 台の地下シンチレータ検出器 (20 m^2) で 7.2 km^2 をカバーし、空気シャワーの電磁成分とミュオン成分を分けて観測している。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 $10^{15} \sim 10^{18}\text{ eV}$ のエネルギーを持つ宇宙線を観測する [29]。

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。6 ないし 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 クラスター円形に展開し、その中心から周囲半径 1 km の地点にさらに 7 クラスターを配置して、およそ 3 km^2 をカバーする。これによっておよそ $10^{15} \sim 10^{18}\text{ eV}$ のエネルギーを持つ宇宙線を観測している [31]。

IceCube neutronino 観測所

IceCube neutronino 観測所 (以下 IceCube) は南極点のアムゼン・スコット 基地の近くに展開されている。検出器は、氷の中、表面から深く $1450 \sim 2450\text{ m}$ 範囲に配置されている。検出器は球型のチェレンコフ検出器を 60 個ストリング状に並べたもので、これが 120 m 間隔で 79 本配置され、全体で 1 km^3 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 ステーション約 125 m 間隔で展開されて地表空気シャワーアレイを構成しており、これは IceTop と呼ばれ、IceCube の施設の一部である。これによっておよそ $10^{15} \sim 10^{18}\text{ eV}$ のエネルギーを持つ宇宙線を観測している [33]。

1.4.1 エネルギースペクトル

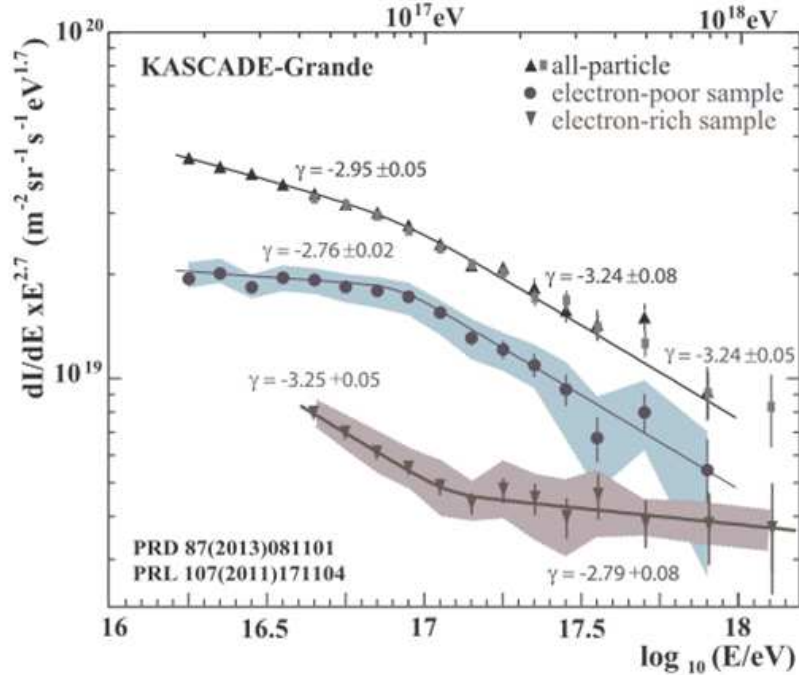


図 1.12: KASCADE-Grande 実験で観測されたエネルギースペクトル [26]. 黒丸と青は muon rich, すなわち重原子核起源のシャワーのエネルギースペクトル. 下三角と茶色は muon poor, すなわち軽原子核のもの. 上三角と四角は全粒子スペクトルで, 灰色四角が 2011 年 [27], 上三角が 2013 年 [28] に発表した結果である. 色付きの領域は系統誤差の範囲を表している.

	γ_1	γ_2	γ_3	γ_4
KASCADE-G	-	-	2.95 ± 0.05	3.24 ± 0.08
Yakutsk	2.70 ± 0.03	3.12 ± 0.03	2.92 ± 0.03	3.24 ± 0.04
Tunka	2.73 ± 0.06	3.23 ± 0.01	3.00 ± 0.01	3.33 ± 0.15
IceCube	2.65 ± 0.06	3.14 ± 0.03	2.90 ± 0.03	3.37 ± 0.08

表 1.1: 各実験で観測されたエネルギースペクトルの指数. 上からそれぞれ KASCADE-Grande[26], Yakutsk[30], Tunka[31], IceTop[33] による報告.

図 1.12, 図 1.13, 図 1.14, 図 1.15 に各実験で報告されているエネルギースペクトルを示す. また表 1.1 に各実験で観測されたエネルギースペクトルの冪を示す. ここで γ_i はスペクトルの冪指数である. それぞれ γ_1 は knee 以下, γ_2 はそこから冪が急になる領域, γ_3 は γ_2 から 2nd knee の間, γ_4 は 2nd knee より上のエネルギー領域での冪指数である.

このように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から, 2nd knee の存在は実験的に確立したと良い. しかし, 2nd knee 付近のエネルギー領域での一次粒子種の観測結果は各実験で異なる. 後述するが (1.4.2 節), Yakutsk, Tunka の結果では 2nd knee より上の領域で, 一次宇宙線粒子が徐々に軽い原子核へと変化しているのに対し, IceCube では重い原

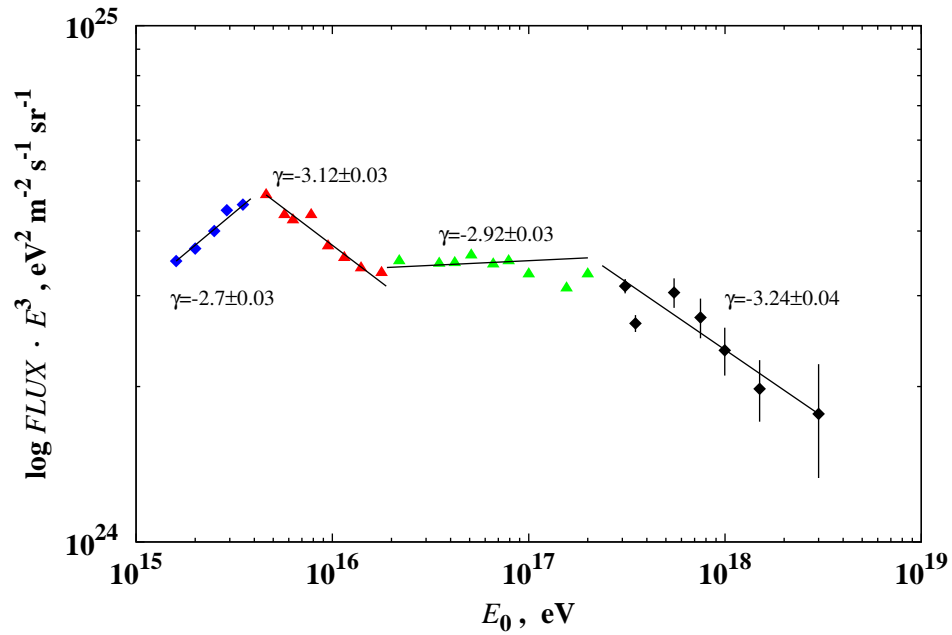


図 1.13: Yakutsk 実験で観測されたエネルギースペクトル [30]. フィットに使った点の違いで色を分けている.

子核のままである. 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 は宇宙線源が銀河系内から銀河系外へ遷移することによるもので, また, ankle は宇宙背景放射と一次宇宙線との衝突による電子・陽電子対生成によるものだと考えることができる. 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こそ宇宙線源が銀河系内から銀河系外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.

1.4.2 質量組成

図 1.16, 図 1.17, 図 1.18 に Yakutsk 実験, Tunka 実験, IceCube 実験で報告されている質量組成を示す. 横軸はエネルギーで, 縦軸は原子核の質量数の自然対数を取ったものである.

Yakutsk, Tunka は $10^{16} \sim 10^{17}$ eV のエネルギー領域で, 一次エネルギーの増加とともに粒子種が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. それに対し IceCube では $10^{15.5} \sim 10^{17.5}$ eV の全てのエネルギー領域で粒子種が重い原子核へと変化していく.

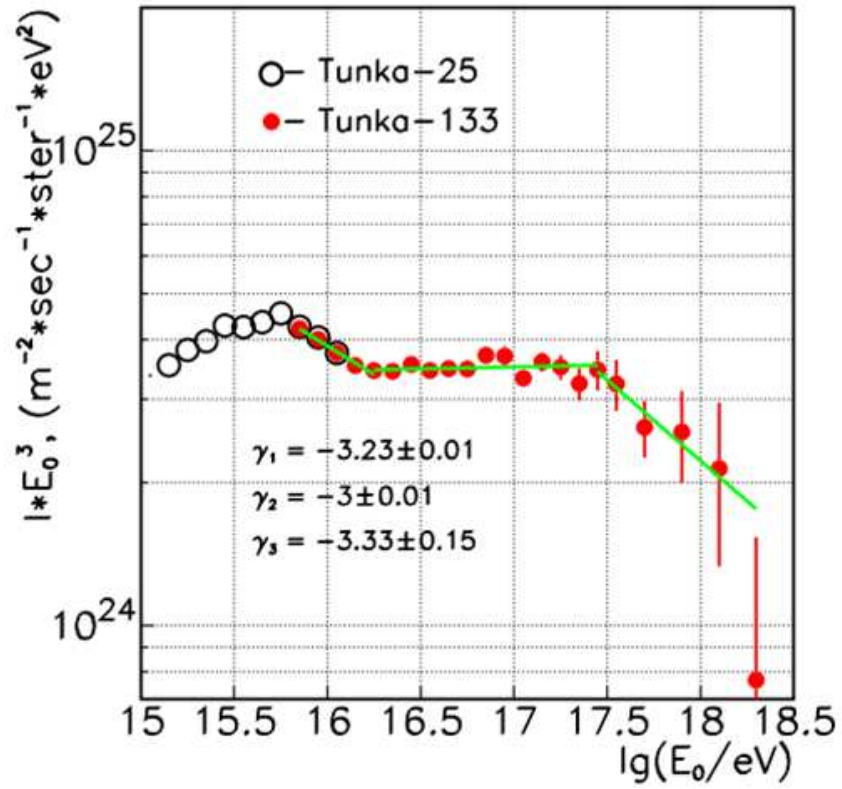


図 1.14: Tunka 実験で観測されたエネルギースペクトル [32].

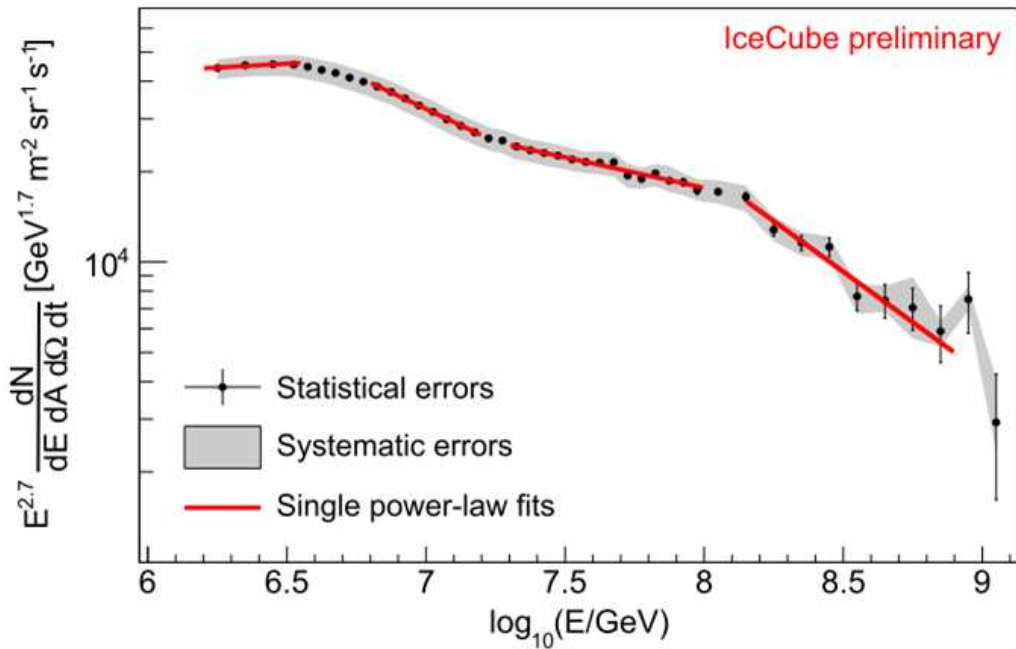


図 1.15: IceTop で観測されたエネルギースペクトル [33].

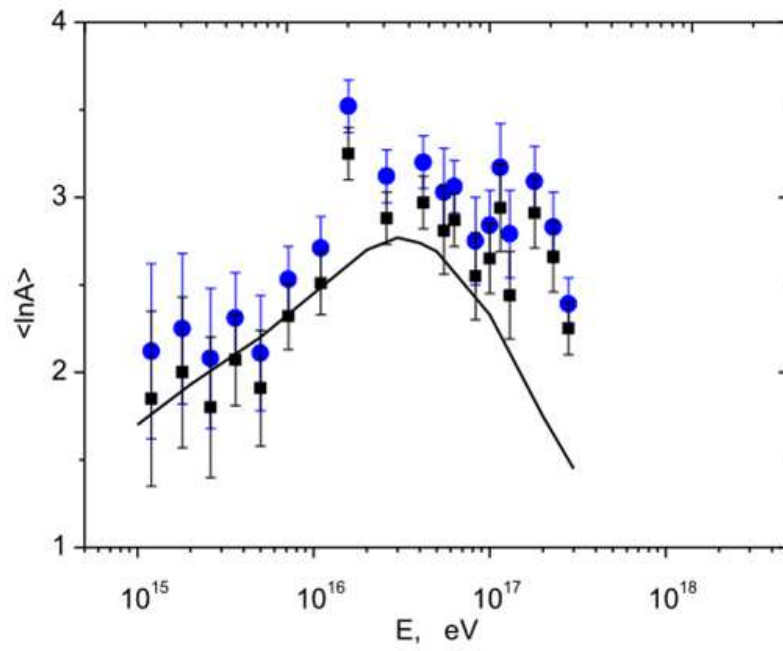


図 1.16: Yakutsk 実験で観測された質量組成 [30].

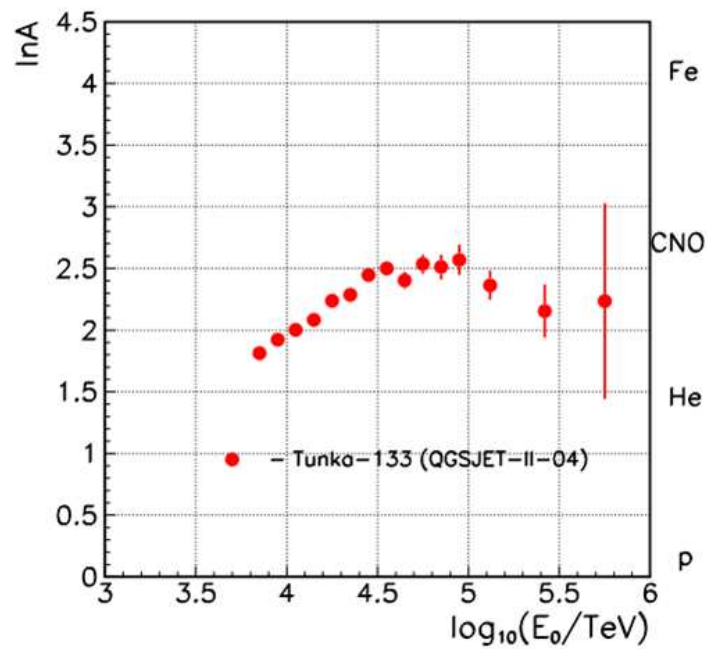


図 1.17: Tunka 実験で観測された質量組成 [32].

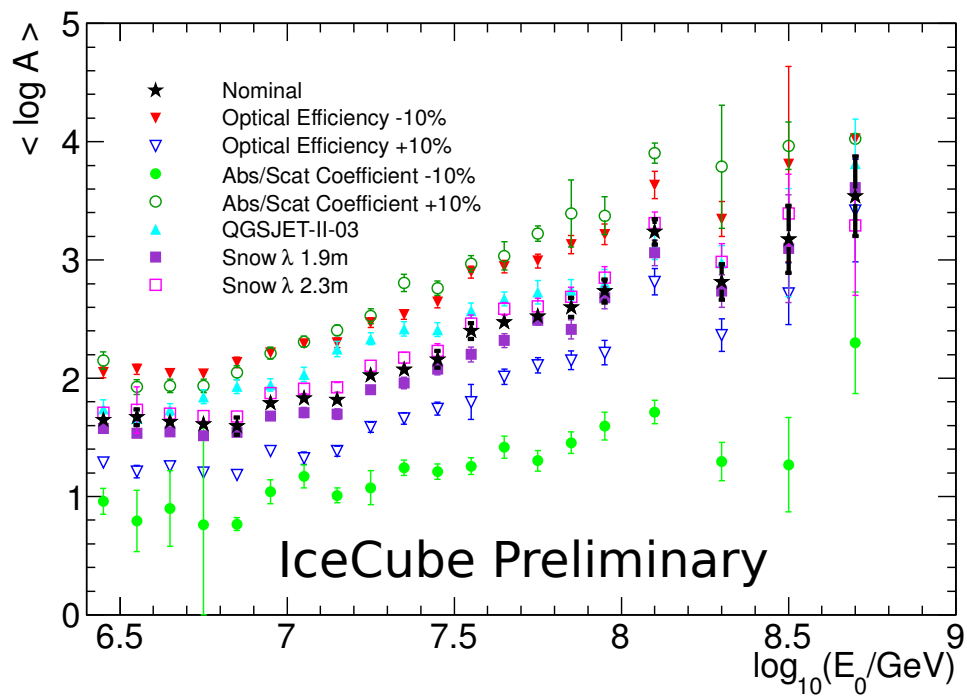


図 1.18: IceCube で観測された質量組成 [33].

第2章 TA Low Energy extension (TALE) 実験

宇宙線望遠鏡実験 (TA 実験) は日米韓露ベルギーの国際共同研究で, 米国ユタ州に 700km^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 $10^{16.5}\text{ eV}$ から $10^{20.5}\text{ eV}$ までの4ケタに拡大し, シャワー再構成分解能に優れたハイブリッド観測でカバーする計画である. このエネルギー範囲は, 銀河系内宇宙線とその終わり, 系内から系外への遷移, 銀河系外宇宙線とその GZK 終端のすべてを含むエネルギー領域である. TA+TALE は, 統合された一つの実験であり, 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よく測定する.

2.1 TALE 実験の目的

2.1.1 宇宙線起源の銀河系内から銀河系外への遷移の検出

1.2 節で述べたように, 2nd knee 領域では宇宙線源が銀河系内から銀河系外へ遷移していると考えられている. この遷移領域では, X_{max} 分布が鉄成分と陽子成分の両方を含むため, elongation rate(= X_{max} を $\log_{10} E$ の関数としてプロットした時の傾き)が小さくなり, X_{max} の分布は広くなるはずである. TALE 実験では, ハイブリッド観測という高精度の X_{max} 測定によって, X_{max} の elongation rate と分布幅のエネルギーに依存した変化を見つけ, 宇宙線源の銀河系内から銀河系外への遷移の決定的な証拠をつかむ.

2.1.2 宇宙線源の進化の解明

1.2 節で述べたように, 2nd knee 領域では赤方偏移パラメーター z が 1 程度の宇宙論的距離にある宇宙線源の寄与が支配的である (図 1.5, [16]). TALE 実験では, ハイブリッド観測による優れたエネルギー分解能と加速器較正による小系統誤差によるエネルギースペクトルの精密測定によって, 2nd knee($z \simeq 1$) から GZK cut off($z \simeq 0.001$) までの宇宙線源の密度の変化を明かにする. これによって「エネルギースペクトル」「質量組成」「到来方向分布」という観測量に加えて, 新しい「進化」という座標軸を切り開く.

2.1.3 ハドロン相互作用モデルへのフィードバック

TALE 実験と TA 実験のハイブリッド観測領域である $10^{16.5}\text{ eV}$ から $10^{20.5}\text{ eV}$ は, LHC の実験室系到達エネルギー限界 $\simeq 10^{17}\text{ eV}$ を十分に含んでおり, TALE 実験と LHC での各実験の結果は同一エネルギーで外挿なしに比較可能である. そこで, 地表検出器アレイによる 2 次元的横方向

分布, 大気蛍光望遠鏡による縦方向発達, 時間的发展に加え, 電磁成分とミューオン成分の区別という第5の軸を加え, 5次元的なシャワー構造を LHC エネルギーから明かにし, 超高エネルギーハドロン相互作用の物理の解明に貢献する.

2.2 TA 実験

TA 実験は, エネルギー決定精度にシミュレーション依存性の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の蓄積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ものである.

SD アレイの設置場所は設置, 運用, 修理作業に適した地形, 植生, 立地が望まれる. さらに太陽光電池パネルの有効な稼働のため高い晴天率, 良好で安定した検出器通信のため平坦な地形が望ましい. また, FD の建設場所は観測時間を長く取るため高い晴天率, 測定のノイズ源となる人工光が少ない, 大気の透明度が高い, 周囲に視界を遮るものが無い地形が望ましい. これらの条件を考慮して, TA 実験の実験場として米国ユタ州ミラード郡の西部砂漠地帯 (平均標高 1400 m, 大気深さ 860 g/cm^2) が選ばれた. この地域は年間降雨量 250 mm, 晴天率 60% と理想的な気候であり, 人工光も極めて少ない.

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 $3^\circ \sim 33^\circ$ でアレイ上空を観測している. 一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 高い所に置かれている. TA の検出器配置を図 2.3 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同時観測することが可能となっている.

これまでの 5 年間の観測では, 図 2.1 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 [20].

これらの構造は, CMB と一次宇宙線陽子の衝突によるパイオン生成を起源とする GZK cutoff ($10^{19.7} \text{ eV}$), GZK pileup ($10^{19.4} \text{ eV}$), 電子・陽電子生成による dip ($10^{18.7} \text{ eV}$) が見えていると解釈出来る. 同時に X_{max} の測定から, 図 2.2 のようにその平均値と分布は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分かった [21]. これらの結果を総合して, 「最高エネルギー宇宙線は銀河系内起源の陽子であり, CMB 光子との相互作用による強い減衰が起きている」という描像ができる.

2.2.1 TA 実験の地表検出器

TA の SD アレイは間隔 1.2 km の碁盤目上にならべられた 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 つの通信塔と無線 LAN 通信を通じて接続されている. 従って, TA の SD アレイは 3 領域の部分アレイから構成されている. 各通信塔はそれぞれ Smelter Knoll (SK) 通信塔, Black Rock Mesa (BRM) 通信塔, Long Ridge (LR) 通信塔と呼ばれる. SD は基本的に TALE 実験のものと同じであるので, 2.4 節で詳しく説明する.

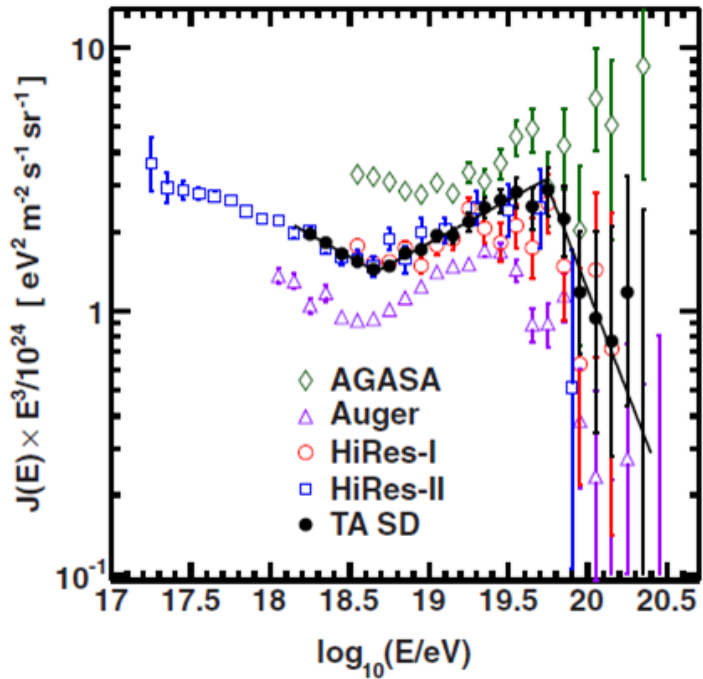


図 2.1: TA 実験といくつかの実験によるエネルギースペクトル [20]. 微細構造を見やすくするためにスペクトルに $E^3/10^{24}$ を掛けている。

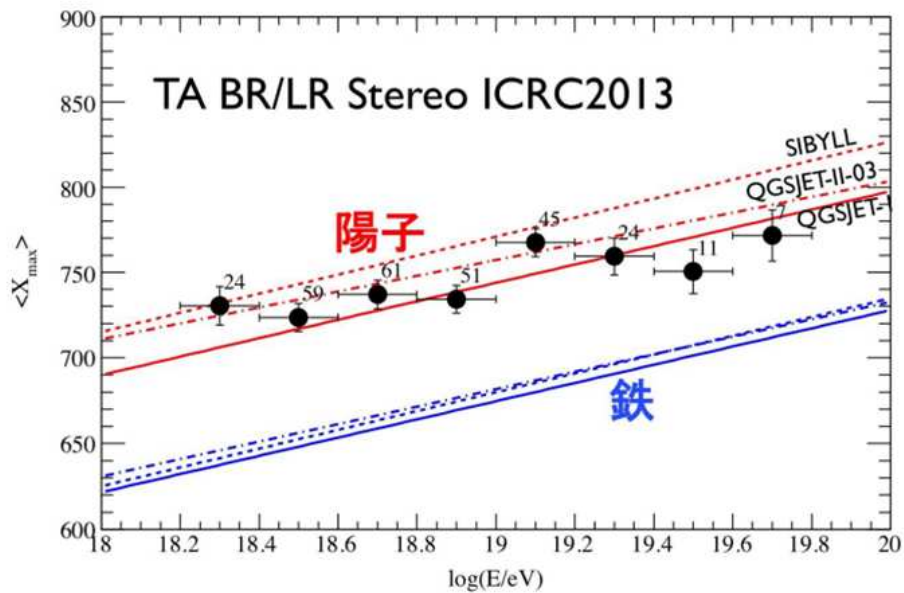


図 2.2: TA 実験による平均 X_{\max} [21]. $10^{18.2}$ eV 以上のエネルギー領域で 100%陽子である組成と矛盾しない。

2.2.2 TA 実験の大気蛍光望遠鏡

TA 実験の FD は空気シャワーによる大気蛍光を球面鏡で集光し、それを PMT カメラで撮像して観測する装置である。TA 実験では、FD は 3ヶ所のステーションに集中して設置されているが、それらのうち Middle Drum(MD)ステーションにある 14 基は、HiRes 実験で使用されていた望遠鏡を移設したものである [38]。一方で、BRMステーションと LRステーションには TA 実験のために新たに設計、製作された口径 3m の球面鏡を持つ望遠鏡が各々 12 台ずつ設置されていて、ステーション全体で方位角 108° 、仰角 $3^\circ \sim 33^\circ$ の範囲を見る。

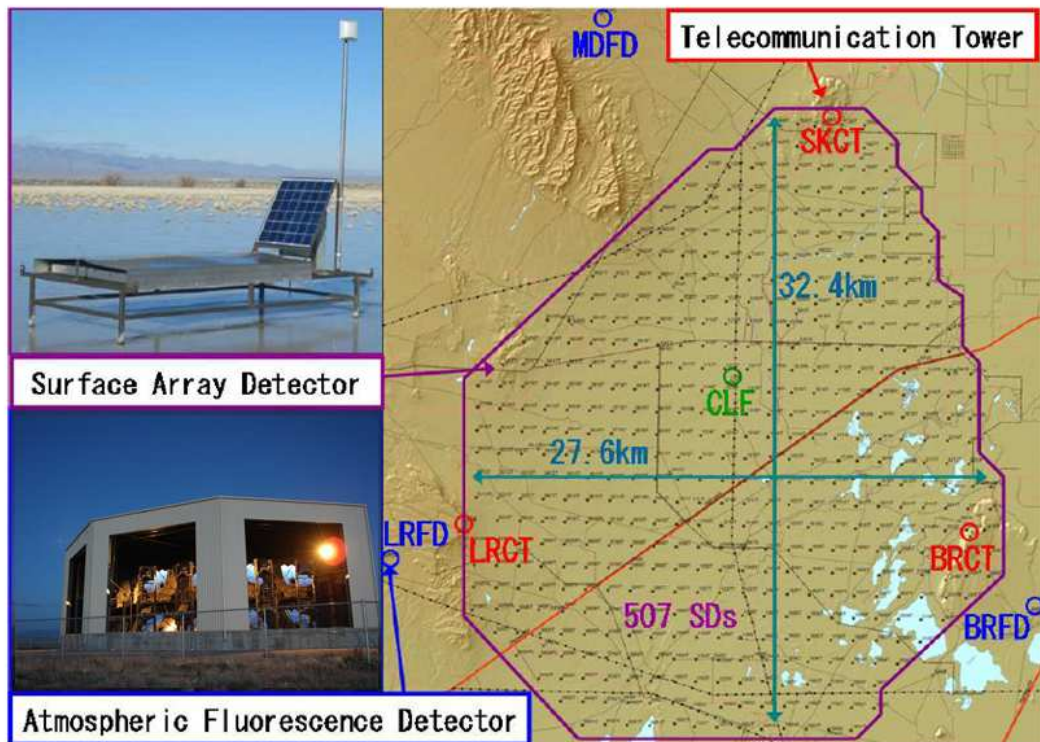


図 2.3: TA 実験における装置の配置図。黒点が SD の設置場所，赤丸が大気蛍光望遠鏡ステーション，青丸が SD のデータ収集に使われる通信塔を表す。左上は SD，左下は大気蛍光望遠鏡ステーションの写真。

2.3 TALE 実験の装置の概観

TALE 実験は、TA 実験に隣接して、TA-FD よりもより高仰角方向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により、観測の閾値エネルギーを $10^{16.5}$ eV まで下げ、エネルギースペクトルと質量組成を測定する。その概観を図 2.4 に示す。

TALE 実験の大気蛍光望遠鏡ステーションは TA 実験の Middle Drum ステーションに隣接して設置され、TA 望遠鏡の視野のさらに上、仰角 $31^\circ \sim 59^\circ$ を見る。これによって、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。また、TALE 望遠鏡ステーションの前には、101 台の地表検出器からなる高密度空気シャワーアレイを展開す

TA-TALE実験場

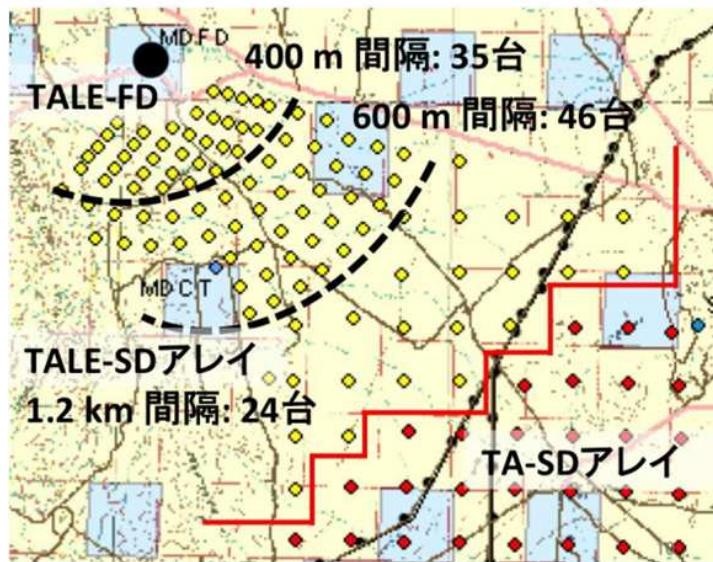
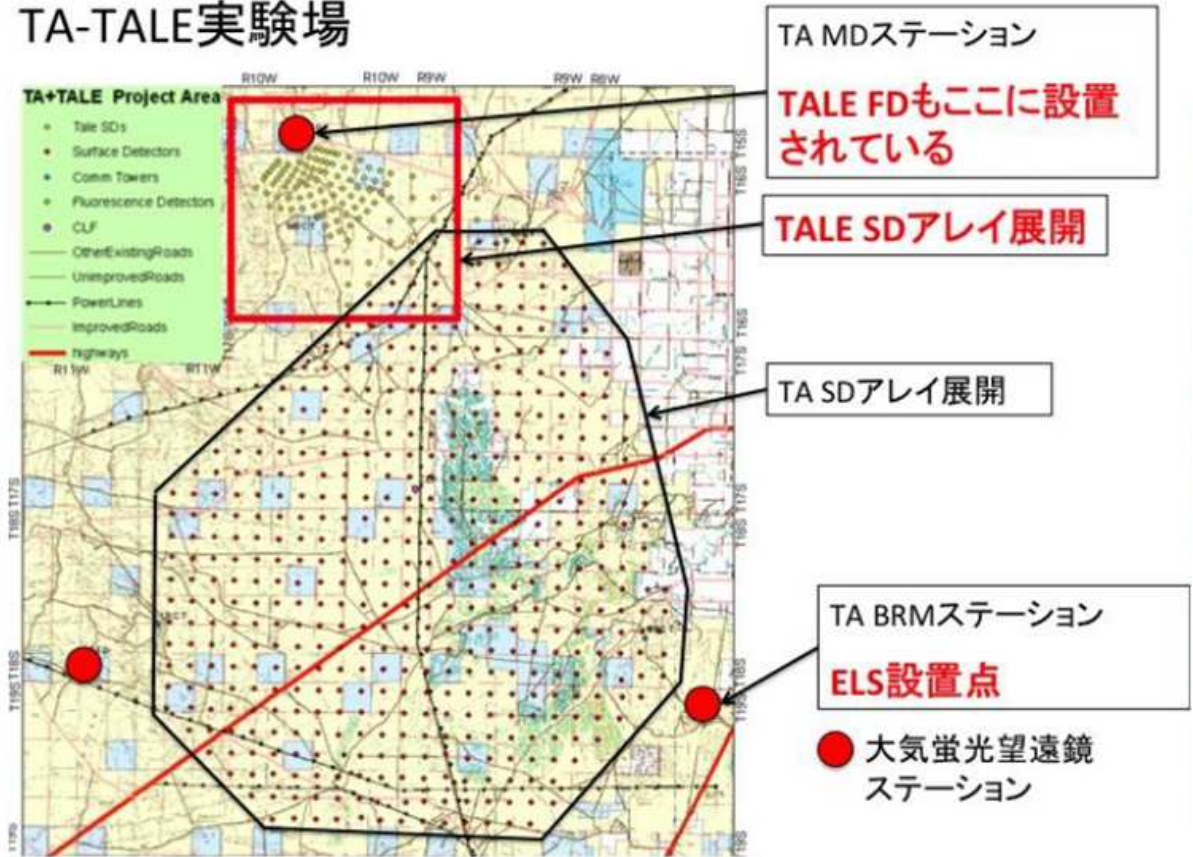


図 2.4: (上)TA 実験, TALE 実験の配置図. TALE 実験は TA 北端の四角で囲んだ領域に設置されている. (下)TALE 実験の配置拡大図. 黄色の丸の地点に TALE-SD を設置する.

る。TALE 大気蛍光望遠鏡の 10^{16} eV 台の空気シャワーに対する検出可能範囲はステーションから半径 3 km 以内に限定される。従って、ステーションから 3 km 以内の領域には、低エネルギーの空気シャワーに感度を持たせるため、地表検出器を TA-SD よりも密に配置する。そこで、TALE 望遠鏡ステーションに最も近い部分には、地表検出器を 35 台、400 m 間隔で並べ、 3×10^{16} eV の空気シャワーに対して 100% のハイブリッド検出効率を持つようにした。そしてその外側の部分、ステーションから 3~5 km の範囲では、検出器 46 台を 600 m 間隔で並べ、 10^{17} eV の宇宙線に対して 100% の検出効率を持たせる。さらに、このような高密度配置部分と TA-SD のアレイを接続するために、それらの間を埋めるように 24 台の検出器を 1.2 km 間隔で配置する。

2.4 地表検出器

2.4.1 地表検出器基本構成

TALE 実験では、TA 実験で使用している SD と同じのものを使用する (図 2.5)。ただし、TA 実験で使用している無線 LAN モデムはすでに生産終了で入手不可能であるため、TALE 実験用 SD では新規無線 LAN モデムを交換し、それに伴ってファームウェアの最適化を行った。この部分の詳しい説明については 3 章で後述する。



図 2.5: 現地に設置された TALE-SD. 左奥に MD/TALE-FD ステーションが見える。

SD 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 工業社製 CIMS-G2) を 2 層重ねたものが用いられている。2 枚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により、環境ガンマ線からの雑音信号と空気シャワー荷電粒子からの信号を弁別する。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。図 2.6 に、SD シンチレータの構成図を示す。

シンチレータで発生した光は、各層ごとに 104 本の波長変換ファイバー (Kuraray 社製 Y-11) を通じて光電子増倍管 (Electron-tubes 社製 9124SA, 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 1.2mm のステンレス製の箱に収納されている。

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, 50 MHz のサンプリング周波数でデジタル化されて記録されている。SD のタイミングは、各 SD に搭載された GPS 受信機 (Motorola M12+) によって、GPS の 1PSS に同期されており、異なる SD 間でのタイミングのずれは約 1.4 ns 以内である。

電力源としては 120 W の太陽電池パネル (京セラ社製 KC120J) と蓄電池 (DYNASTY 社製 DCS-100L) を用いており、現地の日照、気温などの環境下では 365 日 24 時間の定常安定運用が可能となっている。上記のように個々の SD は電力線、通信線などを用いずに完全に自立して運用されるので、環境負荷は非常に小さい。設置の際も環境負荷を最小にするべくヘリコプターで運搬、設置される。

図 2.7 にソーラーパネルの裏側を示す。ここにはバッテリー、クーラーボックス、エレクトロニクスが置かれ、これらは砂塵、雨滴を防ぐためステンレスボックスに収納されている。バッテリーは温度に依存して充放電性能が変化するので、クーラーボックス内に収納し温度変化を抑えている。また、バッテリー側面にはフィルムヒーターを貼付してあり、必要に応じてバッテリーを温める。

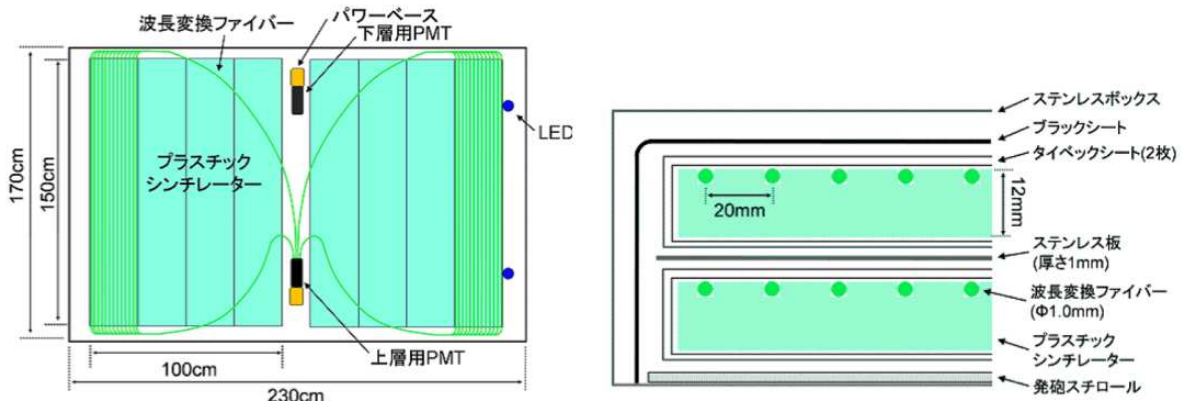


図 2.6: (左)シンチレータボックスの内部構造。(右)シンチレータボックスの断面図。

2.4.2 地表検出器電子回路

SD の電子回路は、主に以下の要素からなる。

- PMT 波形のデジタル化のための FADC. 12 bit, 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 万である。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 通信の初段処理に用いられる。
- 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, 電源コントロールに用いられる。



図 2.7: ソーラーパネルの下の箱にエレクトロニクスとバッテリーが収納されている。

- 複雑な処理を行うための CPU(ルネサステクノロジー社製 SH4 マイコン SH7750S)．動作周波数は 167MHz である．大半の情報処理はこれを用いて行われる．
- 位置情報，絶対時間情報取得のための GPS．
- 無線 LAN 通信モデム．

図 2.8 に SD のエレクトロニクスの外観写真とブロック図を示す。

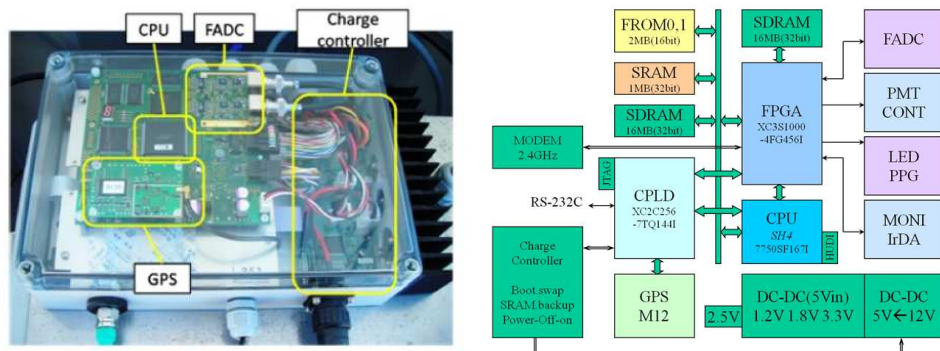


図 2.8: (左)TALE 実験で使用するものと同型の TA 実験 SD 用エレクトロニクス．各 SD と通信塔に設置されている．(右)SD 用エレクトロニクスのブロック図．

2.4.3 通信塔基本構成

図 2.9 に通信塔の外観を示す．通信塔は，主に SD と通信するための無指向性アンテナと，電子機器，トリガー用電子機器，DAQ 用の産業用 PC，通信塔同士が通信するための指向性アンテナと電子機器 (Motorola 社製 Canopy PTP100)，発電用太陽電池と蓄電池からなる．通信塔では，部分アレイのレベル 2 トリガー判定を行っている．



図 2.9: TALE 実験用の無線 LAN 通信塔. 太陽電池パネルにより電源供給している. 写真の右奥には MD/TALE-FD ステーションが小さく写っている.

2.4.4 トリガー DAQ サイクル概観

SD のトリガー DAQ サイクルを時系列にそって書き下すと, 以下のようになる.

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 トリガーがあるとレベル 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出する. レベル 1 トリガーを受けたタワーはレベル 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 SD へ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, トリガーに対応する波形を探索する.
4. SD は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 に波形送信命令を出し, SD は波形をタワーに対して送出する.
5. ただし, 波形送信が 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送信が終わるまで 1 秒毎に波形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.

ここでは, 1 つの箇条書きの各項目が 1 秒に行われる処理である. また, オーバーヘッドを減らすために, 異なる情報の送受信をまとめて同時に行う.

2.4.5 各検出器におけるデータバッファリングとレベル1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し、このときの粒子を最小電離粒子 (Minimum Ionizing Particle: MIP) と呼ぶ。図 2.10 に物質中での粒子のエネルギー損失を示す [35]。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。SD250 台で試験した結果、1 MIP の粒子の入射の結果 PMT の光電面から放出される光電子数は 24.6 ± 0.4 であった。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、各検出器の 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ので、上下層のシンチレータを貫通する。従って、シャワー粒子に対するトリガーは上下層のコインシデンスでかければ良い。この空気シャワー粒子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 トリガーのための波形積分時間は 8 タイムスライス (=160 ns) である。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 $2.56 \mu\text{s}$ 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。

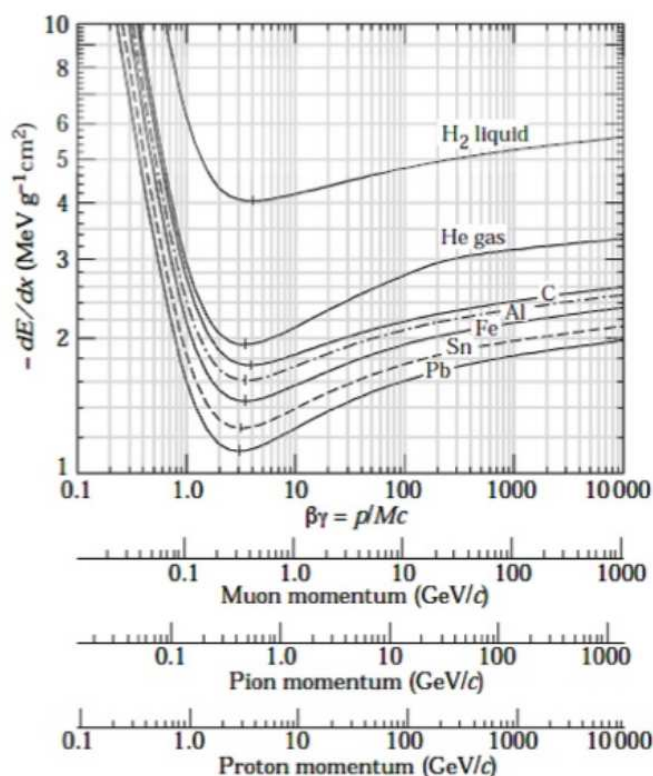


図 2.10: さまざまな高エネルギー粒子のさまざまな物質中でのエネルギー損失 [35].

以下に、データバッファリングの手順について示す。なお、以下の手順はすべて FPGA に実装された論理回路によって行われている。

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 1PPS 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ヨLD (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 以内に起こった次のレベル 0 トリガーは無効化される.
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. 波形はトリガーの 640 ns 以前から 1920 ns 以後まで保存される. トリガーの 1280 ns 以後から 2560 ns 以後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. 波形記録専用の SDRAM への転送と同時に, 波形の積分値, 波形の最大値, 1PPS 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 トリガーのスレッシュヨLD は 150 カウント (=3 MIP), 積分ゲート幅は波形の記録幅と同じ 128 タイムスライス (=2560 ns) である. このスレッシュヨLD は物理上の要請ではなく, 通信バンド幅で決まっている.

レベル 0 トリガータブルを元にして, 通信塔に送信するレベル 1 トリガーのリストを作る手順について示す. なお, 以下の手順はすべて各 SD の CPU で行われる.

1. GPS の 1PPS 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, レベル 0 トリガーの処理を開始する. 処理の内訳は, 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である. クロック数をそのまま使うのではなく μs とする理由は, データサイズを小さくするため, また, 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である. 同時に, 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ヨLD 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 トリガーがあると, 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, 3 byte のデータとして記録する. また, このリストをレベル 1 トリガータブルと呼ぶ.

2.4.6 通信塔におけるレベル 2 トリガー

通信塔では各 SD からレベル 1 トリガータブルを収集し, レベル 1 トリガーが $8 \mu\text{s}$ の時間内で 3 台以上隣接する SD から見つかったら, レベル 2 トリガーを発行する. レベル 2 トリガーがあるとその時刻 (レベル 2 トリガーの判定に使用された 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) は DAQ リストに登録される. 即座にトリガーを各 SD に配信しない理由は通信オーバーヘッドを減らすためである.

以下に, レベル 2 トリガー判定の手順を示す.

1. レベル1トリガーテーブルを SD から取得する．これと同時にモニターデータ（後述）も取得する．
2. GPS の 1PPS と同時に CPU に割り込みがかかる．この後、レベル1トリガーテーブルの 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テーブルを生成する．1PPS と同期させて処理を行う理由は、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. このトリガーテーブルを $8\mu\text{s}$ のゲート幅で走査し、レベル1トリガーが3つ以上ある場合は隣接条件を満たすかどうかの確認を行う．3台以上の隣接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、各通信塔はレベル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1秒間で全てのSDのモニターデータ及び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、この1秒の残った時間で波形データ収集を行う．また、波形は128サンプル \times 12bit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384Byteであり、モデムの通信容量の問題で1度に384Byteのデータを送れないことがわかっているため、いくつか分割して送信する．TALE実験のレベル2トリガーの頻度はおよそ10分に1回なので、この様に複数に分割して送信しても問題ないことがわかる．

2.4.7 モニター情報とモニタリングシステム

各検出器が定期的に収集・更新している自らの動作状況・状態を表すモニター情報を、任意のタイミングですべてのSDから中央へ転送することは、通信帯域の狭さから不可能である．そこで、レベル1トリガーテーブルの転送の際、各SDはヘッダー情報と共にモニター情報を分割して送信している．モニター情報は9kByte程度であり、トリガーDAQに負荷をかけないよう600分割して毎秒16Byteずつ送信される．そして、毎秒取得される情報が8Byte、1つのレベル1トリガー情報は4Byteなので、レベル1トリガー数を N とすると、1台のSDは1秒毎に合計 $(24+4N)$ Byte をタワーに向かって送信している．

以下に、モニター情報として取得されている項目を示す．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．ただし、収集時間間隔が1秒の情報は毎秒取得されるため、送信時に分割されない．つまり、上記の9kByteには含まれていない．

- 毎秒取得される情報
 - 1PPS間のクロック数(4Byte)．GPS及びクロックの安定性の確認に用いる．
 - GPSタイムスタンプ(2Byte)．1PPS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．
 - レベル1トリガーの数(2Byte)．ホットチャンネル、デッドチャンネルの識別に用いる．
- 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．
 - 充電電流．太陽電池による充電が正常かを確認する．

- 太陽電池の出力電圧.
- 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. SD のゲイン較正に用いられる. 約 50 ADC カウントが最頻となるようにゲインが調整されている.
 - ペDESTAL のヒストグラム. SD の較正に用いられる.
 - PMT 出力信号のピーク波高のヒストグラム. これを用いてダイナミックレンジを決める.
 - GPS の状態を表すフラグ.
 - 通信できている GPS 衛星数.

これらのモニター情報を確認し, 不具合が生じていればメンテナンスする. モニター用アプリケーションの出力グラフの一部を図 5.2 に示す.

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 分ごとに中央へ転送される. 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.

バックグラウンドミュオン信号のスペクトル

レベル 0 トリガーごとに FPGA 内部では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, 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, シャワーと無関係な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 分ごとに中央に送られる. 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 2.12 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.

PMT 出力信号のピーク波高のヒストグラム

FPGA から DMA 転送された信号波形のうちピーク波高の値を CPU 側でヒストグラム化する. 分解能は 32 カウント, レンジは 0 から 4096 までである.

DET0318

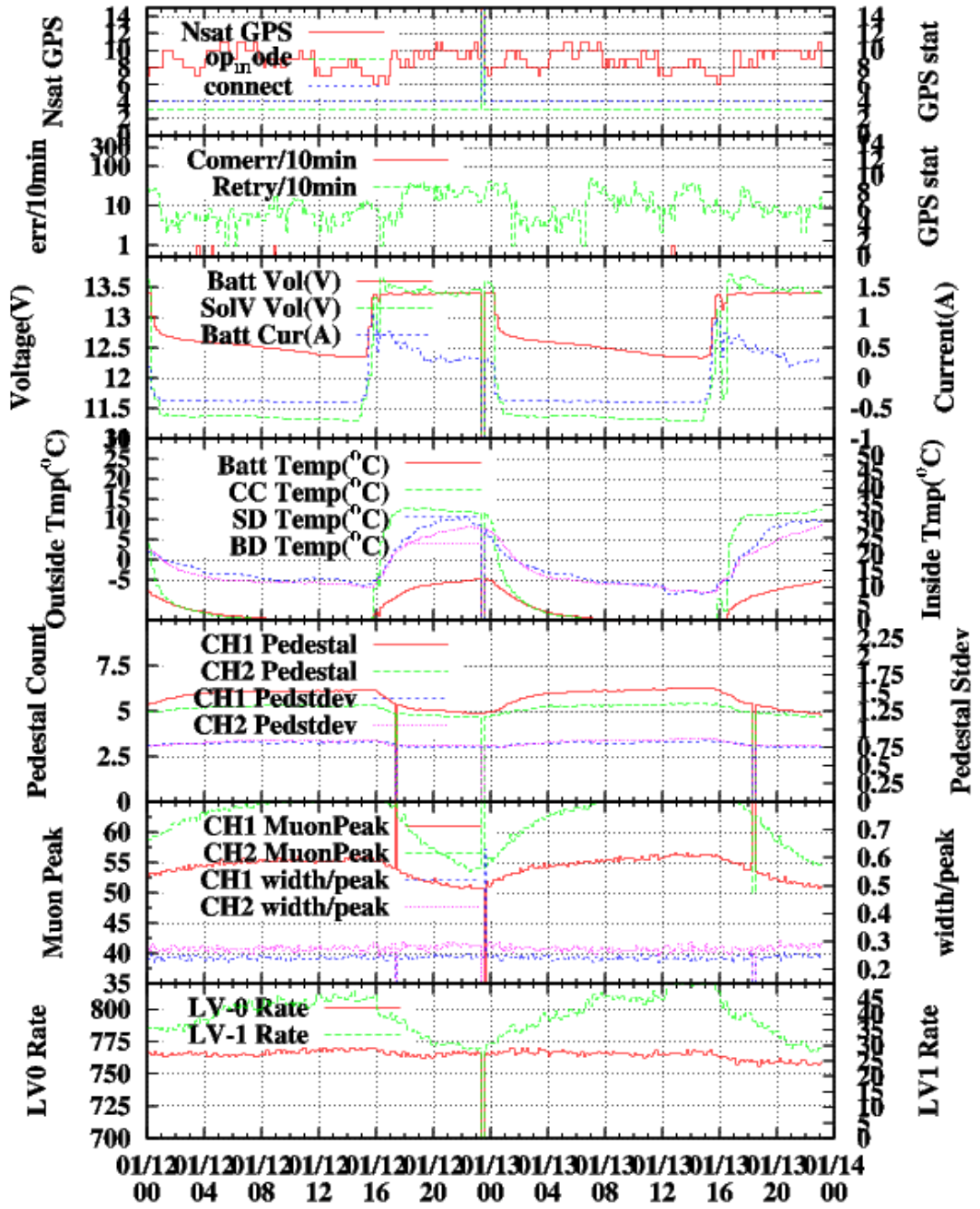


図 2.11: TA 実験の SD のモニター例. 上から, 通信できている GPS 衛星数, 通信状態, バッテリー電圧, 気温, ペDESTAL, ミューオンピーク, トリガーレートを表す.

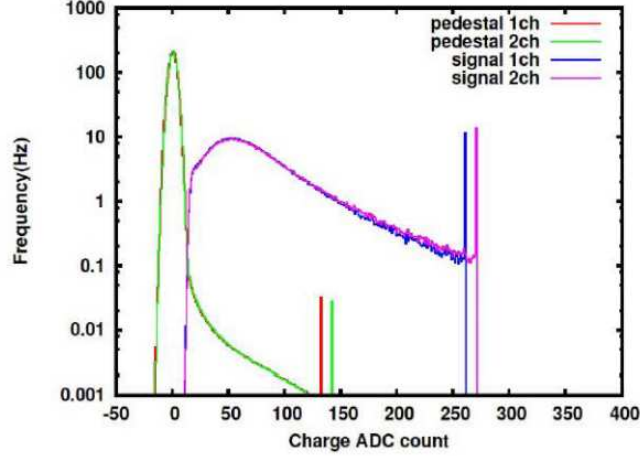


図 2.12: SD のモニター情報から得たバックグラウンドミュオン信号のヒストグラムとペDESTAL のヒストグラム。緑色と赤色のヒストグラムはそれぞれ上層と下層のペDESTAL のヒストグラムである。また、青色と紫色のヒストグラムはそれぞれ上層と下層のバックグラウンドミュオン信号のヒストグラムである。それぞれのヒストグラムの右側のエンタリー (250 ADC カウントの後ろの立ち上がり) は over flow を示す。積分幅は 240 ns。バックグラウンドミュオン信号のヒストグラムではペDESTAL 分はすでに引いてある。

2.4.8 バックグラウンドミュオン信号に対応するエネルギー損失

SD ではシンチレーターの発光量から粒子数を決定するため、発光量を詳細に調べる必要がある。シンチレーターの発光量は入射粒子によるエネルギー損失量とシンチレーターの発光効率で決まる。そこでシミュレーションを用いて検出器における入射粒子のエネルギー損失特性を調べた。

物質中でのエネルギー損失は Bethe-Bloch の式で表される。

$$\frac{dE}{dx} = Kz^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left(\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right) \quad (2.1)$$

ここで、 ze は入射粒子の電荷量、 $K/A = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 / A = 0.307 [\text{MeV}/(\text{g}/\text{cm}^2)]$ 、 T_{\max} は 1 回の衝突で自由電子に与えることができる最大の運動エネルギー、 I は平均励起エネルギー、 δ は電離損失に対する密度効果の補正である。 $-dE/dx$ の単位は $[\text{MeV}/(\text{g}/\text{cm}^2)]$ であり、この式より物質中でのエネルギー損失量は (粒子が通過する物質の密度) \times (通過距離) に比例する。

粒子が物質中を通過する距離は空気シャワーの天頂角を θ として、 $\cos\theta$ に反比例し、エネルギー損失量が通過距離に比例する。従って物質中における粒子のエネルギー損失 dE について以下の式が成り立つと考えられる。

$$dE \propto \frac{1}{\cos\theta} \quad (2.2)$$

GEANT4 を用いて、TA 実験の SD にミュオンが入射した場合のエネルギー損失を計算した。その結果の一つとして、図 2.13 に $\theta=0^\circ$ 、 60° で 1 GeV のミュオンを入射した場合のシンチレーター上下層でのエネルギー損失分布を示す。ランダウ分布で近似した場合のピーク値、標準偏差はそれぞれ

- $\theta=0^\circ$: 上層 2.00 MeV, $\sigma=0.10$ MeV, 下層 2.01 MeV, $\sigma=0.10$ MeV

- $\theta=60^\circ$: 上層 4.15 MeV, $\sigma=0.22$ MeV, 下層 4.15 MeV, $\sigma=0.20$ MeV

であり, ピーク値を $\cos\theta$ で補正すると

- $\theta = 60^\circ$ (補正後) : 上層 2.08 MeV, 下層 2.08 MeV

となる [36].

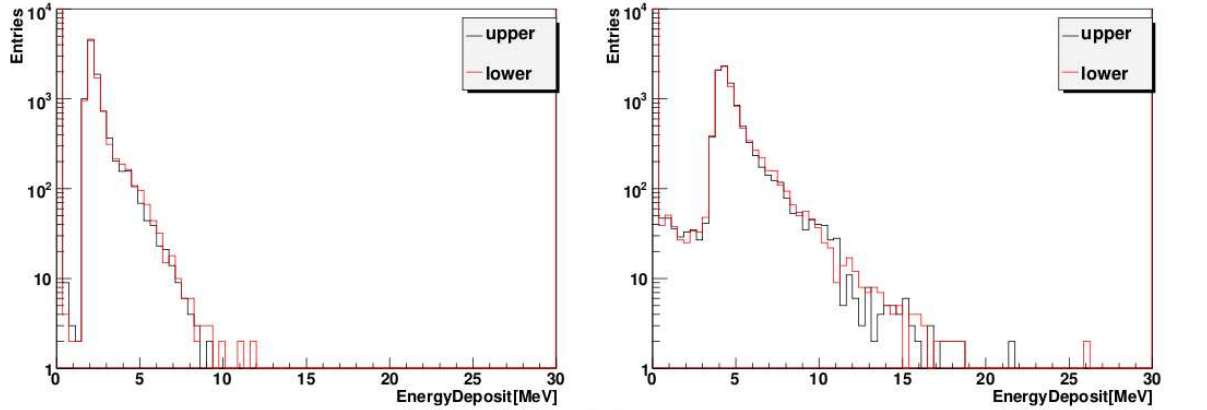


図 2.13: μ^- を入射した場合のエネルギー損失分布. $E=1$ GeV, 左が $\theta=0^\circ$, 右が $\theta=60^\circ$ である [36].

また 1 GeV のミューオンは物質中でほぼ電離損失しか起こさない [37]. 制動放射の反応断面積 σ は以下の式に示すように粒子の質量に反比例するので, ミューオン ($m=105.7$ MeV) の反応断面積は電子 ($m=0.511$ MeV) の約 $1/40000$ と小さい.

$$\sigma \propto \left(\frac{e^2}{mc^2} \right)^2 \quad (2.3)$$

そのため, 物質中で制動放射を起こす確率は非常に小さく, 二次粒子放出によるシンチレーター上下層でのエネルギー損失の違いは見られない [36].

以降では $1 \text{ MIP}=2.0 \text{ MeV}$ という値を用いる.

2.5 大気蛍光望遠鏡

TALE 大気蛍光望遠鏡ステーションは TA 実験の MD ステーションに隣接して設置されている (図 2.14). TA 望遠鏡では仰角 $3^\circ \sim 31^\circ$ で観測しているが, そのさらに上の仰角 $31^\circ \sim 59^\circ$ を見る. これによって, より低いエネルギーの宇宙線, すなわち, より高い高度で最大発達を迎える空気シャワーの観測ができるようになる. 方位角方向の視野は MD ステーションの 120° よりも若干狭く, およそ 110° である. TALE ステーションに設置される望遠鏡とエレクトロニクスは HiRes-II 実験で使われた装置を再調整して使われる.

2.5.1 光学系

望遠鏡の主鏡は合成球面鏡である. 望遠鏡 1 台の視野は, 方位角方向, 仰角方向ともに 14° である. TALE-FD ステーションは $31^\circ \sim 45^\circ$ の視野を向く望遠鏡 5 台と, $45^\circ \sim 59^\circ$ の視野を向く望遠



図 2.14: 左が MD ステーションで，右が TALE ステーション．

鏡 5 台からなり，全体では方位角方向に 120° ，仰角方向に $3^\circ \sim 31^\circ$ がカバーされる (図 2.15)．図 2.16 に TALE 大気蛍光望遠鏡を示す．望遠鏡に使われる球面積は，MD ステーションで使用されているものと同様の，半径 630 mm の円形のセグメントミラー 4 枚からなる面積 4.18 m^2 のクローバー型の合成球面鏡である．

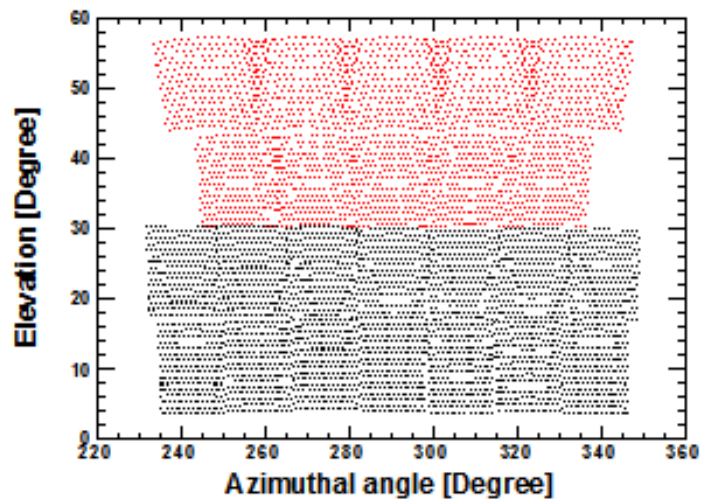


図 2.15: 上の赤い部分が TALE ステーションの視野．下の黒い部分が MD ステーションの視野．



図 2.16: TALE ステーションの大気蛍光望遠鏡.

第3章 TA 実験用SDのエレクトロニクス及び ファームウェア

2.4.1 節でも述べたように，TALE 実験では TA 実験で使用している SD と同じものを使用する。ただし，TA 実験で使用している無線 LAN モデムはすでに生産が終了し，入手不可能であるため，TALE 実験用に無線 LAN モデムを交換しなければならない。図 3.1 に SD エレクトロニクスの概略図を示す。無線 LAN モデムによってデータを送受信する際は，CPU と FPGA でデータを処理する。つまり無線 LAN モデムを交換するためには，CPU と FPGA のファームウェアを書き換えて，最適化しなければならない。そのためには，TA 実験用 SD のエレクトロニクスとファームウェアの理解が必須である。この章では TA 実験用 SD エレキで使用している CPU と FPGA のファームウェア及び無線 LAN モデムについて解説する。

また，タワー (通信塔) は SD と同じエレクトロニクスを使用しており，ファームウェアのみ若干異なる。SD と異なるファームウェア部分については適宜説明する。

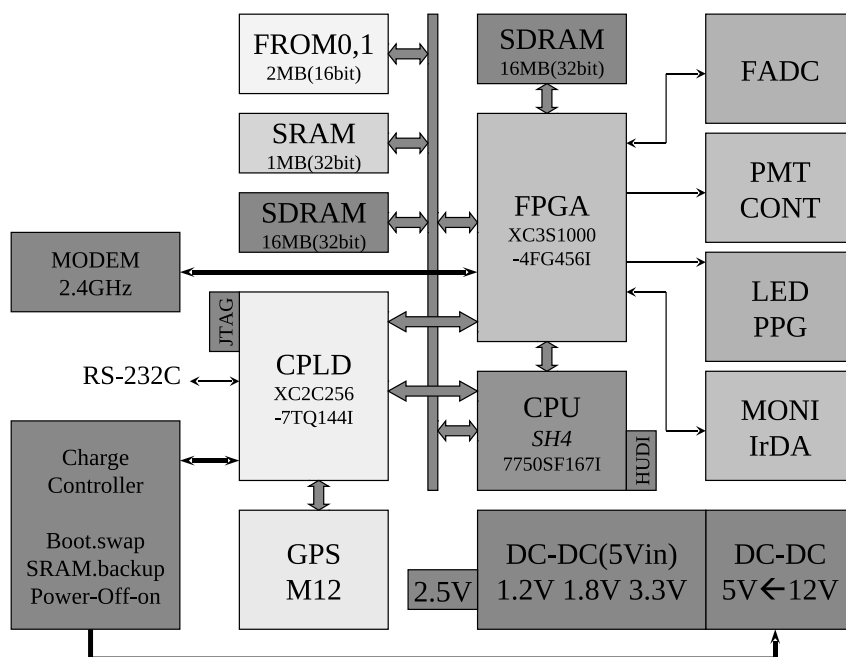


図 3.1: SD エレキのエレクトロニクスの概略図。

3.1 CPU

図 3.2 に SD エレクトロニクスに搭載されている CPU であるルネサステクノロジ社製 SH4 マイコン SH7750S を示す。動作周波数は 167MHz である。CPU のファームウェアはリンカスクリプト



図 3.2: TA 実験用 SD で使用されている CPU. ルネサステクノロジ社製 SH4 マイコン SH7750S.

ト言語, アセンブラ言語, C言語で記述されている。CPUには動作を軽くするためにOSを搭載していない。そのため, オブジェクトコードに具体的なアドレスを割り当てる際, 実際に存在するメモリの情報と, どこに何を配置するのかを, リンカスクリプトを用いて行う。このリンカスクリプトによってメモリの先頭アドレスに書き込まれているのがstart.oというオブジェクトである。つまり, SDエレキの電源が入り, CPUに電源が供給されると, まずこのstart.oが実行される。start.oがコンパイルされる前はstarm.asmというファイルで, アセンブラ言語で記述されている。start.oが実行された後, メインルーチンであるmain.oが実行される。main.oがコンパイルされる前はmain.cというファイルで, C言語で記述されている。以下start.asmとmain.cについて説明する。

3.2 start.asm

start.asmは, CPUのハードウェアに密接した動作がアセンブリ言語で記述されており, 大きくブートコード部分と割り込み処理ハンドラ部分に分けることができる。

3.2.1 ブートコード部分

CPUのリセットには, パワーオンリセットとマニュアルリセットの2種類のリセットがある。パワーオンリセットは完全なりセットであり, それに対しマニュアルリセットは, ソフトウェアリセット的な意味合いが強く, CPU内蔵レジスタのほとんどはリセットされない。

CPUではこれらのリセットが発生するとH'A000_0000番地からコードを実行する。H'A000_0000番地はP2領域という, キャッシュ不可・アドレス変更不可の領域に割り当てられる。この領域へアクセスすると, 32bitのアドレスバスの上位3bitを0にしたアドレスで外部バスにアクセスする。すなわち, H'0000_0000番地がアクセスされる。

したがって, リセットが発生すると物理アドレスのH'0000_0000番地に置かれた外部メモリからプログラムを実行することになる。このエレクトロニクスでは, アドレスH'0000_0000にはフラッシュROMに外部メモリ空間を割り当てている。

その後, メモリマップの設定, SDRAMの動作モード設定, キャッシュの設定などCPUの内蔵レジスタの設定を行う。これらの内蔵レジスタの設定を行った後, main.c内のmain()関数に飛ぶ。

3.2.2 割り込み処理ハンドラ部分

割り込み処理ルーチンはブート時には呼び出されないが, システムの通常動作時において頻繁に呼び出されるルーチンである。このルーチンは, 割り込みが発生した際にその発生要因を調べ, 発生要因に対応した処理ルーチンをコールするという動作を行う。

割り込みルーチンでは, まずPRレジスタと, SPCレジスタ, SSRレジスタおよびR0とR1の汎用レジスタをスタックに保存する。PRレジスタとはプロシジャレジスタのことで, サブルーチンコールの戻りアドレスが格納されるレジスタのことである。SPCレジスタとは退避プログラムカウンタレジスタのことで, 割り込みの発生した命令のアドレスが格納されるレジスタのことである。SSRレジスタとは退避ステータスレジスタのことで, 割り込み時にステータスレジスタの内容が格納されるレジスタのことである。ステータスレジスタとはCPU上の様々な状態を示すものである。また, SHプロセッサは32bitの汎用レジスタを16個持っていて, R0, R1は汎用レジスタの1つ目, 2つ目という意味である。

割り込みルーチンではその後、INTEVT の値を調べる。これは CPU の内蔵レジスタで、例外コードが格納されており、このレジスタを参照することで割り込みの発生要因を調べることができる。そしてコードに対応した処理をし、PRレジスタ、SPCレジスタ、SSRレジスタおよび R0 と R1 の汎用レジスタをスタックから戻し、ルーチンから抜ける。

3.3 main.c

main.c は main() 関数を記述するためのファイルであり、C 言語で記述されている。図 3.3 に main() 関数の概略を示す。

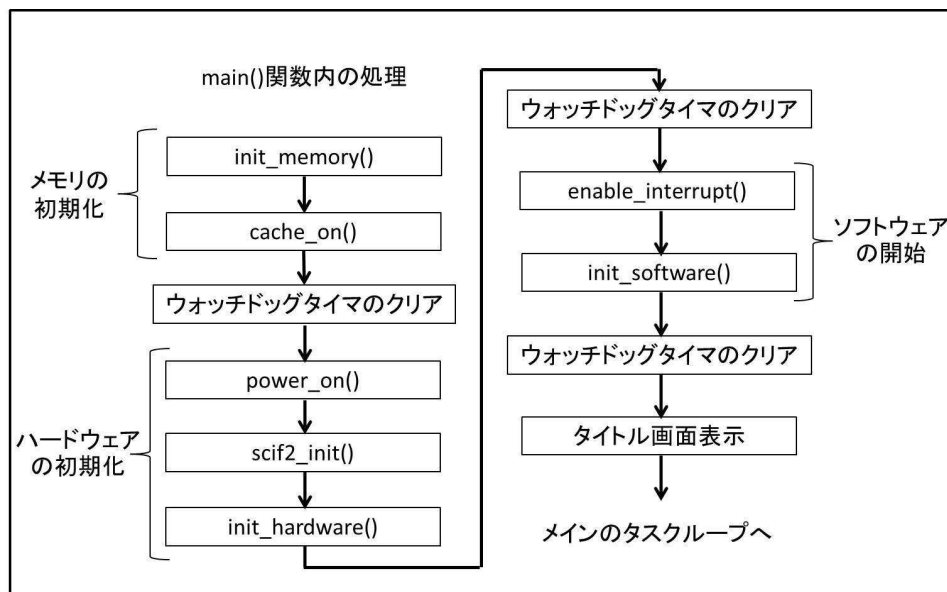


図 3.3: main() 関数における処理の流れ。

main() 関数が呼び出されると、最初にメモリの初期化を行う。そして、FPGA を含む各種ハードウェアを初期化し、割り込みを許可した後、ソフトウェアを初期化し、メインのタスクループへと移行する。本節ではこれらの処理について詳しく説明する。この間約 1 秒おきにウォッチドッグタイマのクリアを行っており、システム初期化の最中にも度々呼び出している。特に、FPGA のコンフィギュレーションなどの長い時間を要する処理は、前後にウォッチドッグタイマのクリアを行う必要がある。

3.3.1 メモリの初期化

main() 関数が呼び出されると、まず init_memory() 関数が実行される。ここではダウンロードバッファとコマンドラインバッファのクリアが行われる。ダウンロードバッファとは、load コマンドや無線 LAN 経由での更新プログラムを一時的に保存しておくバッファである。コマンドラインバッファはコマンドラインに入力された文字列を最大 16 行保存するためのバッファである。また、cache_on() 関数でキャッシュを使用する設定を行う。

3.3.2 ハードウェアの初期化

まず `power_on()` という関数で GPS, PMT, FADC の電源を入れる．次に `scif2_init()` という関数で SCIF(FIFO バッファ内蔵のシリアルコミュニケーションインターフェイス) の初期設定を行う．データ長は 8 ビット，パリティなし，ストップビットは 1 ビットと設定し，受信割り込みを許可する．そしてボーレートの自動検出を行う．

次に，`init_hardware()` という関数で残りのハードウェアの初期化が行われる．図 3.4 に `init_hardware()` 関数で行われる処理の流れを示す．

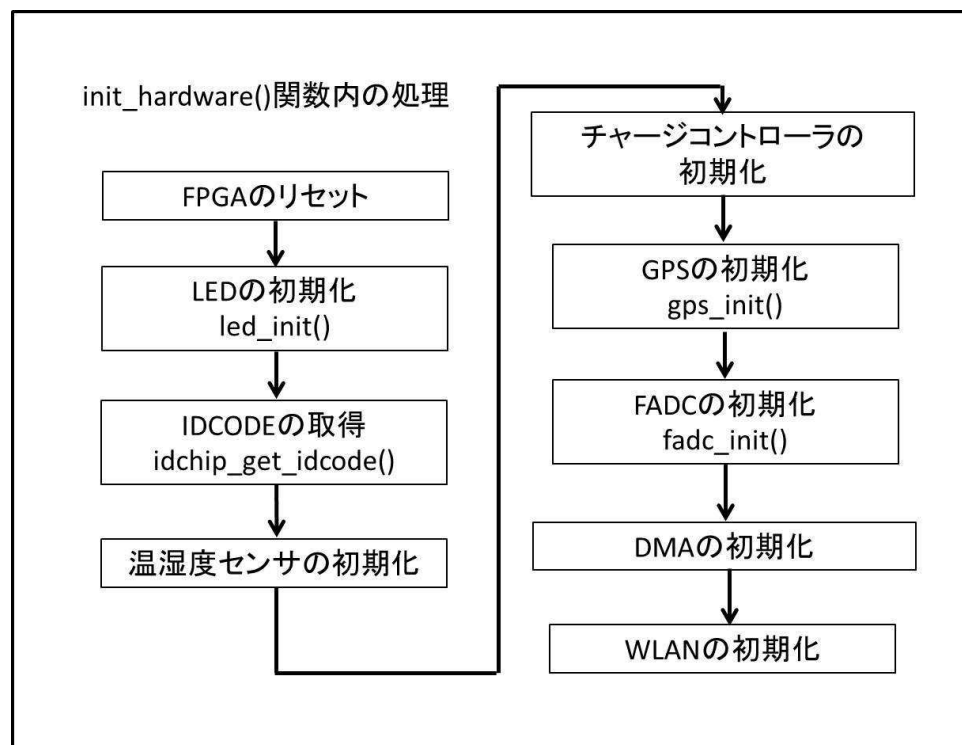


図 3.4: `init_hardware()` 関数における処理の流れ.

この中ではまず FPGA に接続されている各種回路のリセットを行い，FPGA に対する全ての割り込みフラグをリセットする．そして `led_init()` 関数で 7 セグメント LED を初期化し，CPLD の制御下に置く．また `idchip_get_idcode()` という関数で CPLD にアクセスして自分の IDCODE を取得する．IDCODE とは個々の検出器にそれぞれ与えられている固有の番号である．この番号を使用して検出器を区別する．次に，温湿度関連のセンサを初期化した後，チャージコントローラの初期化を行う．チャージコントローラが接続されていると判断されたら，チャージコントローラをスタンバイモードに移行する．そして `gps_init()` 関数で GPS を初期化する．GPS から受信した文字列を格納するバッファと各種フラグをクリアし，GPS 受信割り込み設定を行う．ここで設定する割り込みは，GPS シリアルデータ受信許可割り込みと，GPS1PPS 割り込みである．次に `fadc_init()` 関数で FADC の初期化を行う．最後に DMA と無線 LAN モデムを初期化してハードウェアの初期化は終了する．

3.3.3 ソフトウェアの開始

ハードウェアの初期化が終わったら、`enable_interrupt()` 関数で割り込みを許可する。ここで割り込みを許可しないと GPS モジュールからのメッセージを受信できない。

そして `software_init()` 関数でソフトウェアを開始する。まず FPGA 内の割り込み制御レジスタを設定して割り込みを許可する。次に GPS をスタートさせる。ここでは GPS にコマンドを送信して 1 秒ごとに時刻を送信するように設定する。GPS の 1PPS を受け取ったことを確認した後、無線 LAN モデムの受信を許可する。

3.3.4 タイトル画面表示

SD エレキは PC と LAN ケーブルで接続することができ、PC 上から SD に向かってコマンドを送信することができる。上述の”ソフトウェアの開始”部分が終了すると、PC にシリアルインターフェイスを通して、起動時に出力される文字列が転送される。PC と接続していない場合はこの部分は飛ばされる。起動時にはシステムの実行状態やファームウェアのバージョンが出力される。

3.3.5 メインのタスクループ

タイトル画面の表示が終わると、このメインルーチン部分を繰り返すという処理になっている。ここには 2.4.4 節で述べたトリガー DAQ 処理以外に、シリアル送受信時の処理と、SD 側のファームウェアにはタワーからの受信をチェックする部分が記述されている。この節では、シリアル送受信時の処理と、タワーからの受信チェックについて詳しく解説する。

シリアル送受信時の処理

`process_scirxtx()` という関数で、PC からシリアル通信で受信したコマンドを処理する。`test.c` と `command.c` というファイルにコマンドテーブルがまとめられており、受信したコマンドと一致するコマンドを、コマンドテーブルから探して、実行する流れになっている。

タワーからの受信チェック

SD 側のファームウェアには、タワーから送信されてくる信号をチェックする、`wlan_rxsub_check()` という関数が実装されている。SD は自発的にタワーにデータを送信することはなく、タワーから送られてくる信号をチェックし、その中にあるタワーからの要求命令を見て、返信が必要な命令であれば返信する、という通信の流れになっている。`wlan_rxsub_check()` 関数でタワーから信号を受信し、信号内にある要求コマンドを `wlan_rxsub_process()` 関数に引数として与えることで、命令を実行する。このタワーから送信される要求コマンドも `wlansub.c` にコマンドテーブルとしてまとめられている。

3.4 FPGA

SD エレキで使用されている Xilinx 社製 FPGA の XC3S1000 を図 3.5 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 3.6 のような階層構造をしている。



図 3.5: SD エレキで使用されている FPGA. Xilinx 社製 XC3S1000.

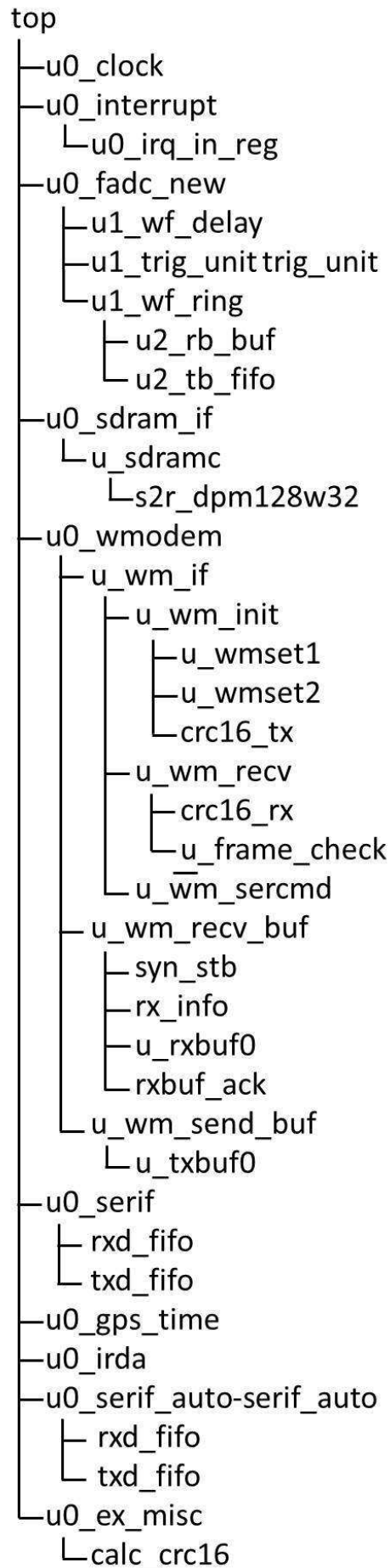


図 3.6: FPGA 内部の階層構造.

ここで、無線 LAN モデムを交換するために書き換えが必要なコンポーネントは、無線 LAN との通信を記述している `u0_wmodem` 以下のコンポーネントである。以下では、`u0_wmodem` 内をコンポーネントごとに詳しく解説する。

3.4.1 `u0_wmodem`

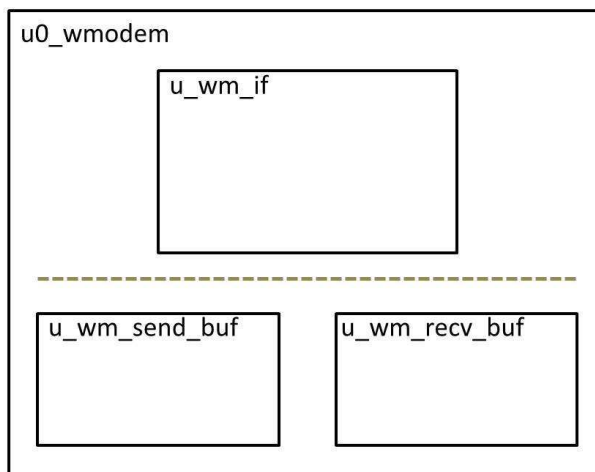


図 3.7: `u0_wmodem` 内のコンポーネントを簡略化した図。点線より上の `u_wm_if` で無線 LAN 送受信の処理のほとんどを行う。点線より下の `u_wm_send_buf` と `u_wm_rcv_buf` は送受信データのバッファの役割を果たす。

`u0_wmodem` 内を簡略化したものを図 3.7 に示す。`u0_wmodem` は `u_wm_if`、`u_wm_rcv_buf`、`u_wm_send_buf` という 3 つのコンポーネントからなっている。`u_wm_if` で無線 LAN 送受信に伴う処理のほとんどを担っている。`u_wm_send_buf` と `u_wm_rcv_buf` は送信データ、受信データのバッファの役割を果たす。

また、`u0_wmodem` 内には `cpu_adl` という 4bit のシグナルがあり、これは CPU のファームウェア内の `EXIO_SC5(func,addr)` という関数の引数 `addr` と対応している。つまり CPU 内で `EXIO_SC5()` 関数が呼び出されると、2 つ目の引数の値が `cpu_adl` にセットされる。また 1 つ目の引数 `func` は、`u0_sdram_if` や `u0_fadc_new` など、`top` の 1 つ下の階層のコンポーネントの選択に使用される。CPU から FPGA を操作するときは必ず `EXIO_SC5()` 関数を使用し、`func` と `addr` が示す FPGA 内の各種レジスタが設定される。さらに CPU からレジスタに書き込みを行う際には、`u0_wmodem` の 32bit 入力ポートである `xdi32` に CPU から信号が送られており、CPU がレジスタから読み込む際には、`u0_wmodem` の 32bit 出力ポートである `xdo32` からデータが出力される。`func=9` として `EXIO_SC5()` 関数を呼び出すと、無線 LAN モデムに対応したレジスタに対して書き込みと読み込みを行うことができる。基本的な使用法は、レジスタへの値の書き込みを、「`EXIO_SC5(9,cpu_adl)=値`」で行い、レジスタの読み込みは、「`tmp=EXIO_SC5(9,cpu_adl)`」(`tmp` は `unsigned long`) で行う。

ここではそのようなレジスタ操作が行われた際、以下が行われている。

- `cpu_adl=0`: 無線 LAN に対する、「送信許可信号・受信許可信号・受信後に送信を開始するまでの待ち時間」をレジスタに設定する。この値は `u_wm_if` に出力される。

- `cpu_adl=1`: RSSI 値を読み出す。
- `cpu_adl=2`: SD モードかタワーモードか指定する (未使用)。また無線 LAN で返送時の受信マスクのパケット数をレジスタに設定する。この値は `u_wm_if` に出力される。
- `cpu_adl=3`: 送信スピード設定 (TA 実験で使用しているアドリンクという無線 LAN モデム専用)。フレームタイプ (アドリンク専用)。送信長さをレジスタに設定する。これは `u_wm_if` に出力される。
- `cpu_adl=6`: 無線 LAN で送信されるデータのうち 32bit をレジスタにセットする。この 4Byte データはただちに `u_wm_send_buf` に出力されて、この中の RAM に保存される。
- `cpu_adl=7`: 無線 LAN で送信されるデータが格納されているバッファのポインタをレジスタにセットする。逆にこのポインタの値をバッファから読み出すこともできる。これは `u_wm_send_buf` に出力される。
- `cpu_adl=8`: `u_wm_recv_buf` に格納されている受信データを CPU に出力する。
- `cpu_adl=9`: `u_wm_recv_buf` に格納されていたる受信データのポインタを CPU に出力する。

3.4.2 `u_wm_send_buf`

このコンポーネントは無線 LAN で送信するデータを格納するバッファの役割を担っている。`u0_wm_modem` から送信データを受けると、`u_txbuf0` という Xilinx が提供しているデュアルポートブロックメモリに格納する。`txbuf` はデータ入力ポートは 32bit だが、データ出力ポートは 8bit と 32bit の 2 系統のポートがある。幅 8bit の場合は深さ 2048、幅 32bit の場合は深さ 512 のメモリサイズということになる。

そして、送信するデータのポインタを `u_txbuf0` に入力すると、送信データが 8bit ずつ `wm_if` に出力される。またバッファに格納されているデータを CPU に向かって出力することもできる。CPU のために用意されているポインタ入力部分にポインタを入力すると、そのポインタの示すデータが CPU に向かって 32bit で出力される。

3.4.3 `u_wm_recv_buf`

このコンポーネントは無線 LAN を通じて受信したデータを格納するバッファの役割を担っている。`u_wm_if` から受信データを受けると、`u_rxbuf0` という Xilinx が提供しているデュアルポートブロックメモリに格納される。`u_txbuf0` との違いは、`u_txbuf0` は入力 1 系統出力 2 系統なのに対し、`u_rxbuf0` は入力 2 系統出力 1 系統という点である。`u_rxbuf0` は、`u0_wm_if` から出力される 8bit のデータ入力ポートの他に、CPU からのデータを格納する 32bit のデータ入力ポートがある。`u_rxbuf0` は、幅 8bit の場合は深さ 4096、幅 32bit の場合は深さ 1024 のメモリサイズということになる。

`u_rxbuf0` に受信データが格納されると、受信されたという信号と受信データが格納されているアドレスが CPU に向かって出力される。そして CPU の動作状況に応じて、受信データを受け取るという信号が CPU から出力され、先程の CPU に出力したアドレスのデータを 32bit で CPU に出力する。

3.4.4 u_wm_if

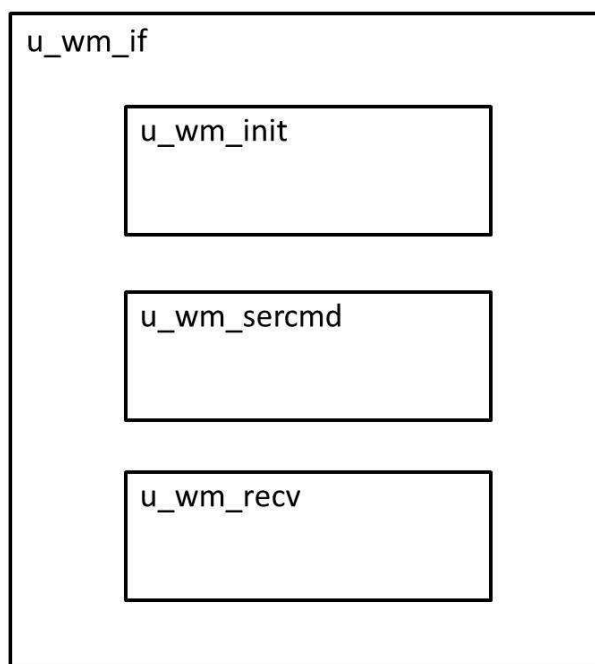


図 3.8: u_wm_if 内のコンポーネントを簡略化した図.

u_wm_if 内のコンポーネントを簡略化した図を、図 3.8 に示す。u_wm_if は、コンポーネント宣言のみで処理を行っておらず、u_wm_init、u_wm_sercmd、u_wm_recv という 3 つのコンポーネントからなっている。u_wm_init は無線 LAN モデムに向かってデータを送信するプロセス、u_wm_sercmd は無線 LAN モデムの設定を行うプロセス、u_wm_recv は無線 LAN モデムからデータを受信するプロセスである。

3.4.5 u_wm_init

このコンポーネントは無線 LAN モデムに送信データを転送する役割を担っている。

詳細は 3.5 節で述べるが、TA 実験で使用しているアドテック社の無線 LAN モデムは通信時に独自のヘッダで通信を行っており、このヘッダなどの通信に関する設定はデータの送信毎に行わなければならない。u_wm_init は、送信許可の信号を u0_wmodem から受け取ると、u_wmset1 と u_wmset2 に格納されているデータを u_wm_sercmd に出力する。u_wmset1 と u_wmset2 はそれぞれ 32bit 幅、16bit 幅のメモリになっていて、あらかじめ無線 LAN モデムの設定に必要なデータが格納されている。u_wm_sercmd はこのデータを無線 LAN モデムに転送して、通信設定を行う。

u_wm_init は、u_wm_sercmd から通信設定のためのデータの転送が完了したという信号がくると、u_wm_send_buf から無線 LAN 送信するデータを受け取り、無線 LAN モデムに転送する。アドリンクでは送信データの無線 LAN モデムへの転送は、無線 LAN モデムから出力される modem_txclk という 1MHz のクロックを使用して、シリアル転送される。

3.4.6 u_wm_sercmd

このコンポーネントは無線 LAN モデムの設定を行うプロセスである。

上述したように、アドリンクでは無線 LAN モデムの設定はデータの送信毎に行わなければならない。u_wm_init からデータ転送の合図がくると、同時に u_wm_init から出力される設定データを受け取り無線 LAN モデムに転送し、設定を行う。

設定データの無線 LAN モデムへの転送は、FPGA で使用される 25MHz のクロックを使用している。無線 LAN モデムはこのクロックを設定データと同時に受け取ることでシリアル信号を読み取っている。

3.4.7 u_wm_recv

このコンポーネントは無線 LAN モデムから受信データを受け取る役割を担っている。

無線 LAN モデムは無線 LAN データを受信すると、FPGA が混線していないか判断し、受信データを u_wm_recv に転送する。この転送は、無線 LAN モデムから出力される modem_rxclk という 1MHz のクロックを使用してシリアル転送され、この modem_rxclk が無線 LAN モデムから受信データを受け取る合図になっている。そしてシリアル転送されたデータを 8bit の信号に変換した後、u_wm_recv_buf に受信データを格納する。

3.5 無線 LAN モジュール

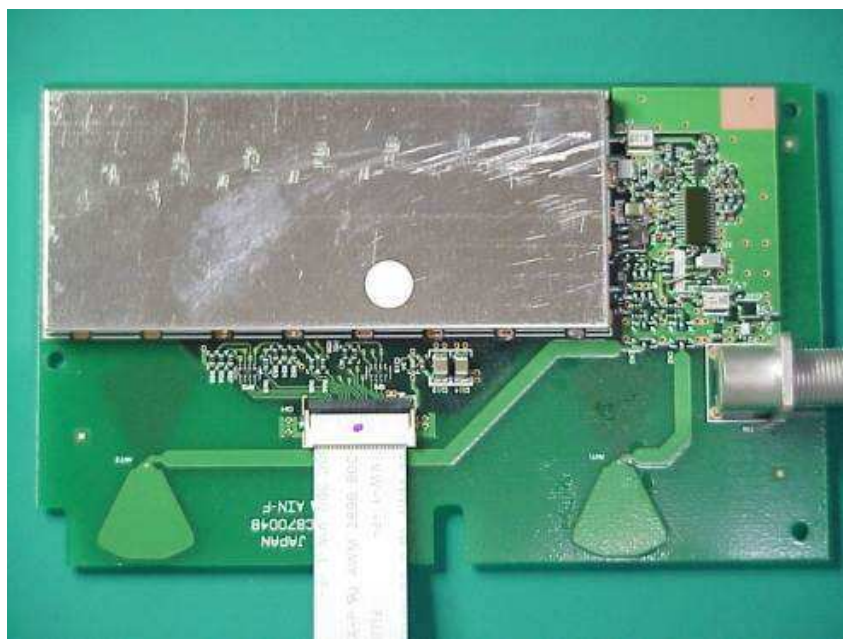


図 3.9: TA 実験で使用している、アドテック社製無線 LAN モデム、ADLINK540F.RF.

図 3.9 に TA 実験で使用している、アドテック社製無線 LAN モデム、ADLINK540F.RF を示す。以下アドリンクと呼ぶ。また、表 3.1 にその仕様を示す。ホストインターフェイスが 30 ピン

項目	仕様
サポート規格	IEEE 802.11b/g/n
無線周波数	2.4GHz
無線通信速度	1,2,5.5,11 Mbps
送信電力	20 dBm
ホストインターフェイス	30 PIN(独自)
電源電圧	5.0 V
動作温度	-10 ~ 40°C

表 3.1: ADLINK540F.RF の仕様.

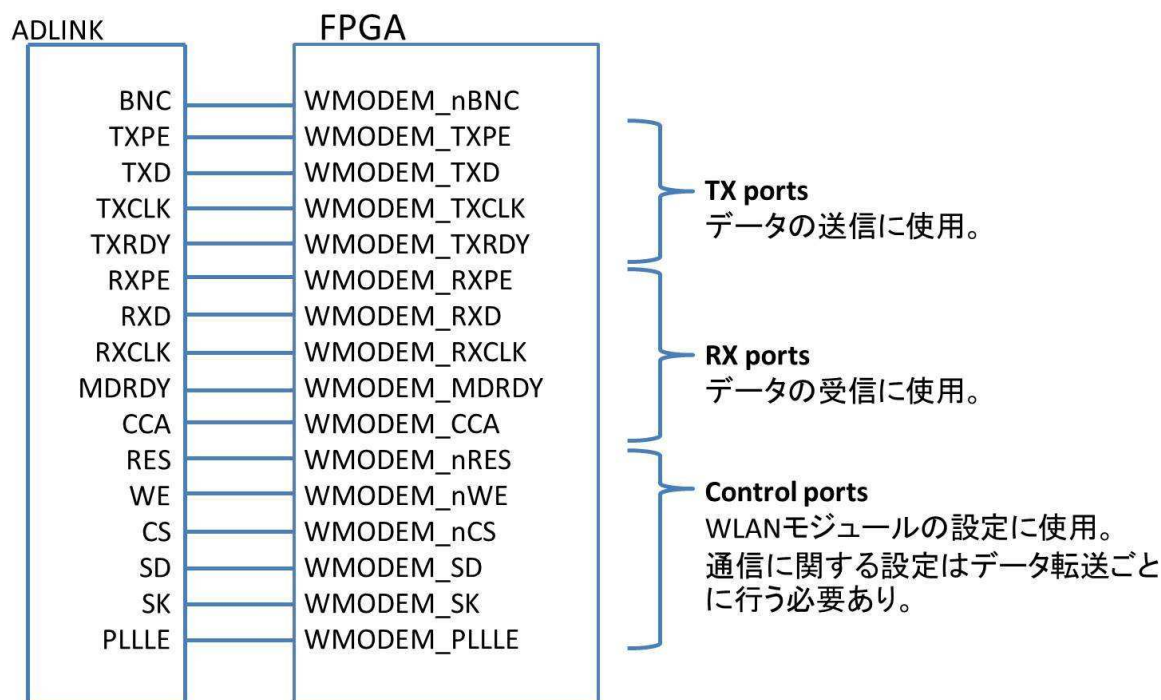


図 3.10: アドリンクと FPGA 間で使用されるポート. 大きく 3つの用途に分類できる.

の独自のものになっているため取扱いは難しいが、通信ヘッダを独自の短いものにできるという特徴がある。

図 3.10 に FPGA とのインターフェイスを示す。TX ports と記述しているポート群はデータの送信で使われる。これらは u_wm_init と繋がっている。RX ports と記述しているポート群はデータの受信で使われる。これらは u_wm_recv と繋がっている。Control ports と記述しているポート群は無線 LAN モデムの設定で使われる。これらは u_wm_sercmd と繋がっている。

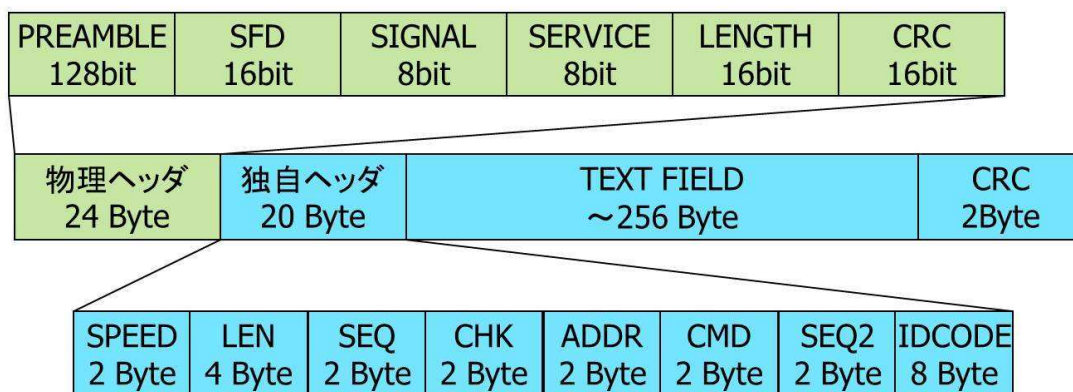


図 3.11: ADLINK 無線 LAN モデムを使っている TA 実験でのデータユニット。一つの波形データは多数のこのデータユニットからなる。

また、ADLINK 無線 LAN モデムを使っている TA 実験でのデータユニットを図 4.8 に示す。一つの波形データは多数のこのデータユニットからなる。ここで PREAMBLE とは一般的な無線 LAN 通信で送信開始の合図に使われる信号で、101010... という 1 と 0 の繰り返しからなる。ここでは 1 と 0 の繰り返しが合計 128bit 分ある。SFD とは一般的に PREAMBLE 信号の後に使用される "10101011" という 8bit のことを指して使われる。ここでは 16bit なので "1010101010101011" となる。また、SIGNAL にはデジタル変調方式の情報、SERVICE はフレームタイプ、LENGTH はヘッダを含めたデータ長、CRC は CRC チェックの結果が格納されている。以上の部分が物理ヘッダとなる。

次に独自のヘッダの説明をする。SPEED には送信スピードが情報が入っている。TA 実験では 1MHz の速度で通信を行っている。ここまでのヘッダは無線 LAN モデムが u_wm_sercmd で設定された情報をもとに、自動的に生成するヘッダである。LEN は送信長さの情報、SEQ は FPGA でカウントしたシーケンス番号が格納されている。この 2 つは FPGA で生成されるヘッダである。ここからは CPU で生成されるヘッダである。CHK には ROM や RAM などの外部信号に異常がないかという情報、ADDR には SD のアドレス番号、SEQ2 には CPU でカウントしたシーケンス番号、IDCODE には SD エレキそれぞれが持っている固有の番号が格納されている。

第4章 TALE実験用SDのための通信エレクトロニクス

TALE実験ではTA実験で使用しているSDと同じものを使用するが、TA実験で使用している無線LANモデムの生産が終了し、入手不可能であるため、TALE実験用に無線LANモデムを選定し、交換を行った。またそれとともにCPUとFPGAのファームウェアを最適化した。そして最適化したSDエレキで通信テストを行った。この章ではこれらについて詳しく説明する。

4.1 TALE実験用SDのための無線LANモデム

4.1.1 無線LANモデムの選定

TALE実験用SDのための無線LANモデムの選定は、容易に手に入ること、送信電力が大きいこと、インターフェイスがシンプルであることという3つの項目に注目して行った。TALE実験は最大20kmの通信を行うため、送信電力の強いものが必要である。また、TALE用の無線LANモデムは既存のエレクトロニクスに組み込むため、インターフェイスがシンプルである必要がある。その結果、Rohm社製無線LANモデムBP-3580とRedpine Signals社製無線LANモデムRS9110-N-11-02を交換候補のモデムとして選んだ。以下それぞれ、「ローム」、「レッドパイン」と呼ぶことにする。図4.1に交換候補の2つの無線LANモデムの外観写真、表4.1表4.2にそれぞれのスペックを示す。

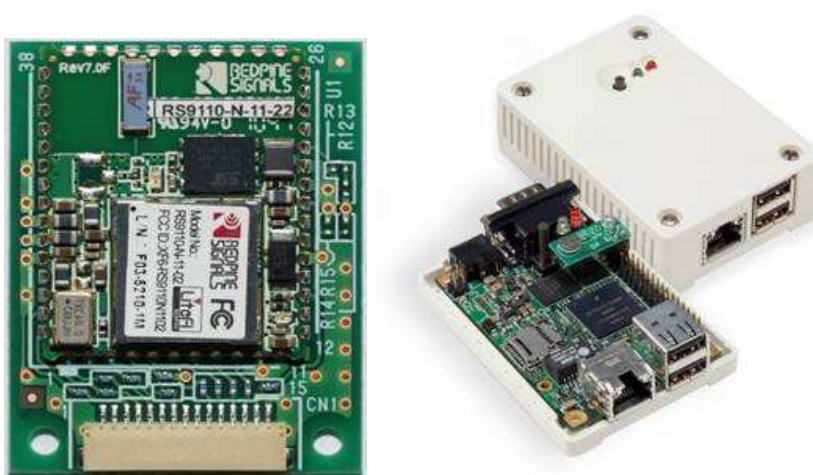


図 4.1: (左)Redpine Signals 社製無線 LAN モデム RS9110-N-11-02. (右)Rohm 社製無線 LAN モデム BP-3580.

項目	仕様
サポート規格	IEEE 802.11b/g/n
無線周波数	2.4~2.5 GHz
無線通信速度	1,2,5.5,11 Mbps
送信電力	17 dBm
ホストインターフェイス	SPI,UART
電源電圧	3.3 V
動作温度	-40 ~ 85°C

表 4.1: レッドパインの仕様.

項目	仕様
サポート規格	IEEE 802.11b/g/n/i
無線周波数	2.4GHz
無線通信速度	1,2,5.5,11 Mbps
送信電力	15 ± 2 dBm
ホストインターフェイス	UART,SDIO
電源電圧	3.3 V
動作温度	-40 ~ 85°C

表 4.2: ロームの仕様.

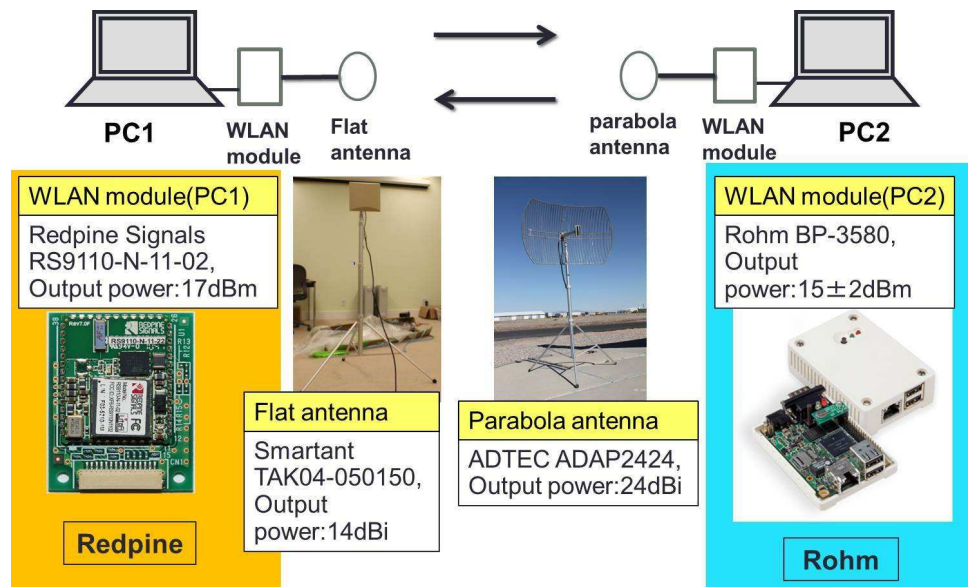


図 4.2: レッドパインの通信テストのためのセットアップ.

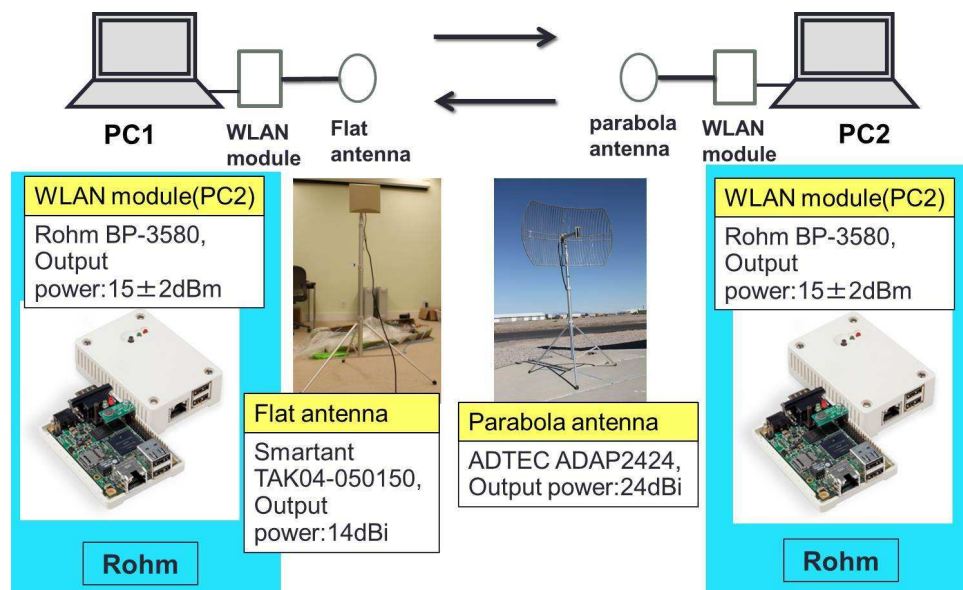


図 4.3: ロームの通信テストのためのセットアップ.

この2つの候補器の通信性能を試すために、TA 実験サイト内で通信テストを行った。通信テストのセットアップは図 4.2, 図 4.3 のように PC, モデム, アンテナをそれぞれ2台ずつ用いて行った。PC の OS は WindowsXP で、ターミナルエミュレータは TeraTerm を使用した。また、より長距離の通信を行うために、PC2 の方のアンテナは指向性の強い ADTEC 社製のパラボラアンテナを使用した。

PC1 と PC2 を徐々に離していき、PC2 から PC1 に向かって ping コマンドを実行し、通信距離と通信にかかった時間を測定した。その結果を図 4.4, 図 4.5 に示す。

ロームは最大通信距離が 14km であったのに対し、レッドパインは 20km の通信が可能であった。TALE 実験では 20km の通信距離が必要なため、TALE 実験ではレッドパインを使用することとした。

4.1.2 Redpine Signals 社製無線 LAN モデム RS9110-N-11-02 の性能と動作の概要

図 4.6 に FPGA とのインターフェイスを示す。レッドパインは TA 実験で使用しているアドリンクと異なり、非常にシンプルなインターフェイスをしており、UART という通信規格で FPGA とデータ通信を行う。TXD は FPGA からデータを受信するポート、RXD は FPGA にデータを送信するポート、RES はリセットのためのポートである。これらの UART ポートではデータ長は 8bit, パリティなし, ストップビットは 2bit, で通信が行われる。

電源電圧は 3.3V で、SD エレキではチャージコントローラから供給される。レッドパインは、3.3V の電源が供給され、RES ポートを High→Low→High にすると起動する。レッドパインはデフォルトでは 115200bps というボーレートで UART を通じた外部とのシリアル通信を行うが、レッドパインによる自動検出によって、以下の手順によって通信速度を変更することができる。送信、受信は FPGA から見たものである。

1. 電源端子及びリセット端子に 3.3V 供給。
2. リセット端子を Low にする。

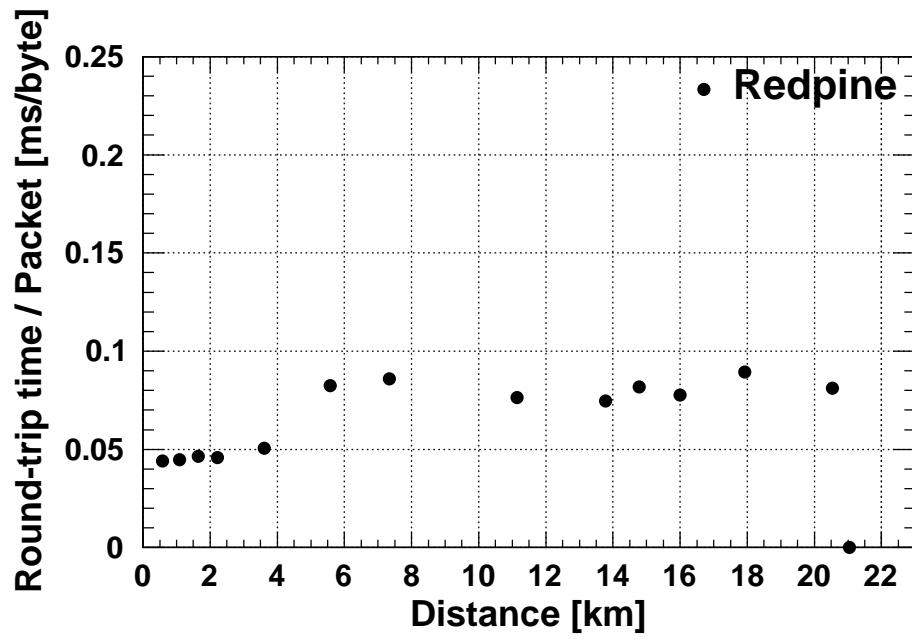


図 4.4: レッドパインの通信テストの結果. 横軸が通信距離, 縦軸が通信にかかった時間を通信バイト数で割った値.

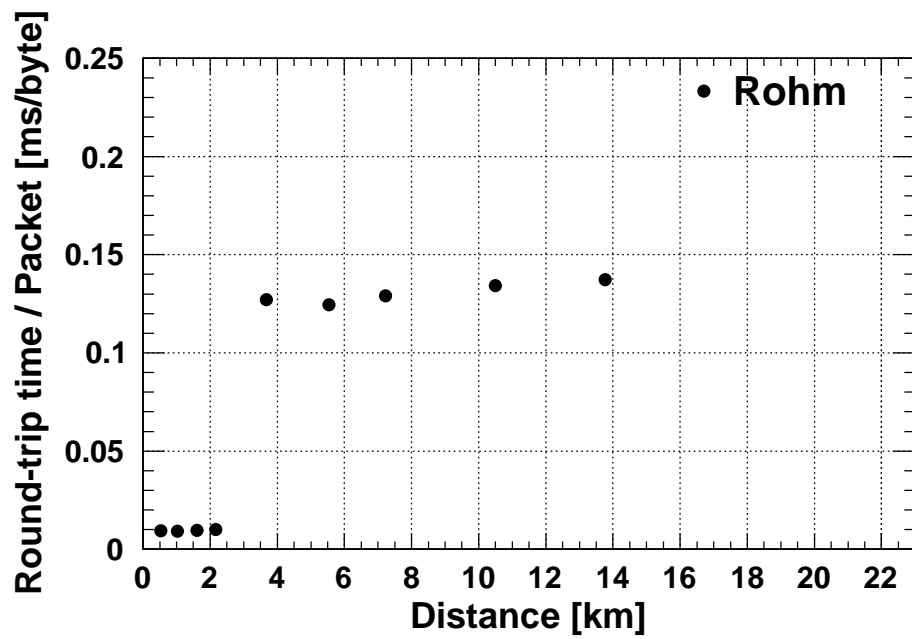


図 4.5: ロームの通信テストの結果. 横軸が通信距離, 縦軸が通信にかかった時間を通信バイト数で割った値.

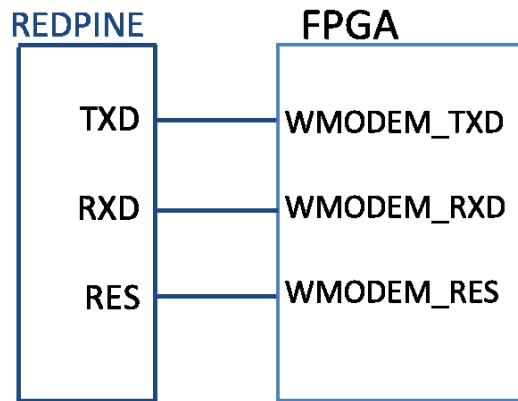


図 4.6: レッドパインと FPGA 間で使用されるポート。

3. リセット 端子に再度 3.3V 供給。
4. 約 100ms 待つ。
5. 0x1C を設定したいボーレートで送信する。
6. 0x55 を受信する。
7. レッドパインが 0x55 の送信をしなかった場合は、約 200ms 後に 5 に戻る。
8. 0x55 を送信する。
9. 起動メッセージ受信する。
10. もし、レッドパインが自動検出に失敗した場合は、FPGA による 0x55 の受信から 18 秒後に起動メッセージが受信され、115200bps で起動する。

正常に起動した場合、以下のメッセージが受信される。

```

WELCOME TO REDPINE SIGNALS

Firmware upgrade (y/n)
Lording...
Lording Done
  
```

起動メッセージ受信後、以下の手順で無線送受信を行う。

1. Band コマンド - 周波数帯域設定
2. Init コマンド - 初期化
3. Scan コマンド - アクセスポイントのスキャン
4. Network コマンド - ネットワークタイプの設定

5. Join コマンド - アクセスポイントと接続
6. IP 設定コマンド - IP アドレス設定
7. Socket オープンコマンド - ソケットのオープン
8. Send コマンド - データの送受信

レッドパインはシリアル通信を通じて FPGA から受け取ったコマンドに応じた動作をする、という仕様になっている。よって、SD エレキでは、FPGA がレッドパインにシリアル通信でコマンドを発行しなければならない。SD エレキにおいて、実際にシリアル送信しているコマンドについては 4.2 で述べる。レッドパインは `¥r¥n` をコマンドの終わりとして読み取るため、コマンドの最後には必ず `¥r¥n` を付ける。コマンドが正しく実行できたら、レッドパインはシリアル通信で”OK”と返す。

以下それぞれのコマンドについて説明する。

Band コマンド

レッドパインが正しく起動したら、まずモデムの使用する周波数帯を決める以下のコマンドを発行する。

- `at+rsi_band=band_val`

`band_val` は 2.4GHz/5GHz を表すパラメータである。2.4GHz 帯を使用する場合は 0、5GHz 帯を使用する場合は 1 を設定する。このコマンドは起動後一番最初に入力する必要がある。

Init コマンド

次に初期化を行う以下のコマンドを発行する。

- `at+rsi_init`

このコマンドは `at+rsi_band` コマンドの次に入力しなければならない。

Scan コマンド

次に全てのチャンネル、またはコマンドで指定したチャンネルのアクセスポイントのスキャンを行う、以下のコマンドを発行する。ここでチャンネルとはタワーが使用するチャンネルで、アクセスポイントとはタワーの SSID である。

- `at+rsi_scan=chan_num`

`chan_num` ではチャンネル番号を指定する。ただし、0 を設定した場合、すべてのチャンネルのスキャンを行う。

Network コマンド

次はモデムのネットワークタイプを指定するための以下のコマンドを発行する。

- `at+rsi_network=net_type,type,chan_num`

`net_type`にはネットワークタイプを指定する文字列を入れる。インフラストラクチャモード / アドホックモード (セキュリティなし) / アドホックモード (セキュリティあり) を指定する場合はそれぞれ、`INFRASTRUCTURE/IBSS/IBSS_SEC`という文字列を入れる。インフラストラクチャモードとはアクセスポイントを介して通信を行う方法で、アドホックモードとは通信機器同士が直接通信を行う方式である。TALE 実験ではアドホックモードを使用する。また `type` と `chan_num` はアドホックモードを指定した場合のみ、記述する。`type` ではアドホックモードの Joiner/Creator を指定する。0 を指定したときは Joiner, 1 を指定したときは Creator となる。TALE 実験ではタワーは 1, SD は 0 を指定する。`chan_num` ではアドホックモードのチャンネルの指定をする。ただし Joiner のときは 0 を指定しなければならない。

Join コマンド

次はネットワークに接続するための以下のコマンドを発行する。また、アドホックモードの Creator の場合は IBSS ネットワークを作成する。

- `at+rsi_join=SSID,TxRate,TxPower`

`SSID`には、アドホックモードの Creator の場合は作成する IBSS ネットワークの SSID, その他の場合は `scan` コマンドで調べた SSID を指定する。`TxRate`では、送信データ速度を設定する。オートレートの際は 0, 1Mbps の時は 1, 2Mbps の時は 2, 5Mbps の時は 3, 11Mbps の時は 4 を指定する。`TxPower`では、送信電力を指定する。Low Power(7dBm) の時は 0, Medium power(10dBm) の時は 1, High power(16~17dBm) の時は 2 を指定する。

IP 設定コマンド

次は IP アドレスの設定を行う以下のコマンドを発行する。

- `at+rsi_ipconf=DHCP_MODE,IP_address,SUBNET,GATEWAY`

`DHCP_MODE`では IP アドレスを DHCP サーバから受けるかどうかを指定する。マニュアル設定の際は 0, DHCP の時は 1 を指定する。`IP_address`には指定する IP アドレスを入れる。DHCP の時は 0 を入れる。`SUBNET`には指定するサブネットマスクを入れる。DHCP の時は 0 を入れる。`GATEWAY`には指定するゲートウェイを入れる。DHCP の時は 0 を入れる。

TCP オープンコマンド

TALE 実験ではタワーが SD に向かって呼びかけるといった関係の無線通信を行うので、以下のコマンドは IP 設定後にタワー側のモデムで実行されるコマンドである。

- `at+rsi_tcp=host,port,lport`

`host`には通信したい相手の IP アドレスを入れる。`port`には通信したい相手のポート番号を入れる。`lport`には通信したい相手のローカルポート番号を入れる。

TCP リッスンコマンド

TALE 実験では SD は自発的に無線通信することはせず、常にタワーから受信を待っているで、以下のコマンドは IP 設定後に SD 側のモデムで実行されるコマンドである。

- `at+rsi_ltcp=port`

`port` はリスニングするポートである。このコマンドは TCP リッスンソケットを開くもので、リッスンソケットが開かれた後、タワーから TCP オープンコマンドで呼びかけられるとコネクションが確立する。

Send コマンド

データ送信をする際は、tcp オープン / tcp リッスンコマンドによって接続が確立された後に、以下のコマンドを実行する。

- `at+rsi_snd=hn,sz,Dip,Dport,stream`

`hn` には TCP ソケットハンドルを入れる。ソケットは最大 8 つまでオープンすることが可能で、ソケットハンドルとはソケットの何番目をオープンするかに対応している。`sz` には送信するデータのサイズ (Byte 単位) を入れる。`Dip` には送信先の IP アドレスを入れる。TCP ソケットを利用する場合は 0 を入れる。`Dport` には送信先のポートを入れる。TCP ソケットを利用する場合は 0 を入れる。`stream` には送信データを入れる。ここで、レッドパインは `¥r¥n` をコマンド終了の合図として読み取ってしまうので、`¥r¥n` (16 進数で 0x0D,0x0A) を送信したい場合は 0xDB,0xDC に置き換えて送信しなければならない。

データ受信

Send コマンドによってデータが無線送信され、データを受け取ったモデムは以下の書式を FPGA に向かって出力する。

- `AT+RSI_READ=hn,sz,stream`

`hn` には TCP ソケットハンドルが入っている。サイズは 1Byte である。`sz` には受信したデータのサイズ (Byte 単位) が入っている。サイズは 2Byte で、リトルエンディアンで記述されている。`stream` には受信データが入っている。

4.2 ファームウェアの最適化

4.2.1 FPGA

無線 LAN モデムをアドリンクからレッドパインに変更したことによる大きな違いの 1 つは FPGA とモデム間のインターフェイスである。アドリンクは FPGA との間に 16 個のポートがあったが、レッドパインは 3 つでよいので FPGA のポートの変更を行った。さらにモデムの設定については、アドリンクは無線送信毎にモデムの設定をする必要があったが、レッドパインは起動後の 1 度のみでよい。SD エレキは起動後に、4.1.2 節で述べた TCP リッスンコマンドまでを実行し、タワーエレキは起動後に、IP 設定コマンドまでを実行する。そして無線通信時には、タワーエレキから

TCP コマンドで TCP オープンの信号を SD に向かって送信し、Send コマンドでデータを SD に向かって送信する。そしてデータを受信した SD は、タワーからの要求にあったデータを Send コマンドでタワーに向かって送信するという通信の流れになっている。そして、エレキ内でモデムに向かってコマンドを送出する役割は FPGA が担っている。コマンドという文字列によって操作するという部分はアドリンクには無かったため、FPGA のファームウェアに新たに実装した。ここでは、これらの実装に際して、大きく変更が必要だった `wm_if` というコンポーネントについて説明する。

3.4 節でも述べたように、旧 FPGA ファームウェアの `wm_if` というコンポーネントは `u_wm_init`, `u_wm_recv`, `u_wm_sercmd` という 3 つのコンポーネントからなっている。この `u_wm_sercmd` というコンポーネントはモデムの設定を行うものであったが、モデムの設定に関して、アドリンクとレッドパインは大きく異なる。アドリンクは設定用のポート群があるのに対し、レッドパインは TXD というシリアル送信用のポートでコマンド操作によって設定を行う。そこで新しいファームウェアでは、`u_wm_sercmd` というコンポーネントを廃し、シリアル送信用のコンポーネントである `u_wm_init` でモデムの設定を行う。つまり新しいファームウェアの `wm_if` というコンポーネントは、シリアル送信用の `u_wm_init`, シリアル受信用の `u_wm_recv`, という 2 つのコンポーネントからなる。以下ではこの 2 つコンポーネントで行われる各動作について詳しく説明する。

モデムの初期設定

レッドパインは正しく起動すると、起動メッセージが、受信ポートである RXD から FPGA に向かって出力される。`u_wm_recv` は RXD から入力されるシリアル信号を常に 8bit のパラレルデータに変換しており、起動メッセージを検出すると `u_wm_init` に向かって起動完了信号を送信する。`u_wm_init` は起動完了信号を受信すると、モデムの初期化設定作業を行う。ここで、初期化作業とは、タワーエレキの場合は 4.1.2 節で述べた IP 設定コマンドまで、SD エレキの場合は TCP 待ち受けコマンドまでをレッドパインにシリアル送信することである。以下に、初期設定において、それぞれのエレキで実際にレッドパインにシリアル送信する文字列を示す。ここで `SD_ip` は SD の ip 番号が入るため、SD 毎にこの部分に ip 番号を入れたファームウェアを用意する必要がある。

- タワーエレキで行われる初期化動作

- `at+rsi_band=0`
- `at+rsi_init`
- `at+rai_scan=0`
- `at+rsi_network=IBSS,1,1`
- `at+rsi_join=TASDTEST01,1,1`
- `at+rsi_ipconf=0,192.168.10.1,255.255.255.0,192.168.10.1`

- SD エレキで行われる初期化動作

- `at+rsi_band=0`
- `at+rsi_init`
- `at+rai_scan=0`
- `at+rsi_network=IBSS,0,1`

- at+rsi_join=TASDTEST01,1,1
- at+rsi_ipconf=0,192.168.10.*SD_ip*,255.255.255.0,192.168.10.1
- at+rsi_ltcp=8765

TCP コマンドの送信

無線通信時は、タワーエレキがSDエレキに向かってTCPコマンドというソケットをオープンする信号をブロードキャストする。そのためにタワーエレキは通信するSDのIP番号を知る必要がある。SD毎のIP番号はCPUのsd_idcode.cというファイルにまとめられており、無線通信実行時にCPUからFPGAに向かって送信される。cpu_adl=4の時に、u0_wmodemの入力ポートであるxdi32にIP番号が出力される。以下に、タワーエレキのFPGAが実際にレッドパインにシリアル送信している文字列を示す。ここで*SD_ip*は、送信するSDのIP番号である。

- at+rsi_tcp=192.168.10.*SD_ip*,8765,2303

データ送信

データ送信は4.1.2節で述べたSendコマンドによって行われる。CPUからデータ送信要求の信号が来ると、送信データ分のデータをu_wm_send_bufから取得し、以下のようなコマンドをレッドパインにシリアル送信する。また、送信データの長さもCPUからu_wm_initのtx_lengという入力ポートに出力される。

- at+rsi_snd=1,*leng*,0,0,*data*

ここで*leng*は送信データ長、*data*は送信データである。

データ受信

レッドパインがデータを受信すると、4.1.2節で述べた文字列をFPGAに向かって出力する。受信コンポーネントであるu_wm_recvは、"AT+RSI_READ"という文字列を検出すると、データを受信したと判断し、その後に入力される受信データをu_wm_recv_buf内のバッファに入力する。バッファにデータが入ると、そのデータのポインタ、データ長がCPUに出力され、CPUがそのデータを出力するようにFPGAに命令する。FPGAはそれを受けてu_wm_recv_buf内のバッファから、送信したポインタにあるデータをデータ長さ分だけCPUに送信する。このようにしてデータ受信が行われる。

4.2.2 CPU

CPUにおいて、モデムの交換にともなって大きく変更した部分はIP番号をFPGAに送信する部分のみである。この動作はタワーエレキがデータ送信時に最初に行う。EXIO_SC5(9,4)の時、つまりu0_wmodemにおいてcpu_adl=4の時に、CPUからxdi32に出力される。なおIP番号はsd_idcode.cというファイルにまとめられており、FPGAで処理しやすいように、16進数のアスキーコードで送信される。

4.3 アドリンクとレッドパインの通信量の比較

図 4.7に無線通信のイメージ図を示す。アドリンクを用いる TA 実験の場合、タワーと SD でデータのやり取りを行う際、タワーエレクトロニクスは送信信号を支配下にある SD に向かってブロードキャストする。SD はタワーから送出された信号の中にある検出器番号を読み取り、自分に当てはまっていればタワーに向かって返答データを送り出す、という通信の流れになっている。つまり合計 2 アクションでデータのやり取りを行う。一方、レッドパインを用いる場合は、上述のように、ソケットをオープンするための信号をブロードキャストし、その後ソケットをオープンした SD とデータ通信を行う。つまりデータのやり取りに合計 3 アクション必要になる。このことから、データ通信の際に、レッドパインを使った場合はアドリンクより 1 アクション多くなるということがわかる。

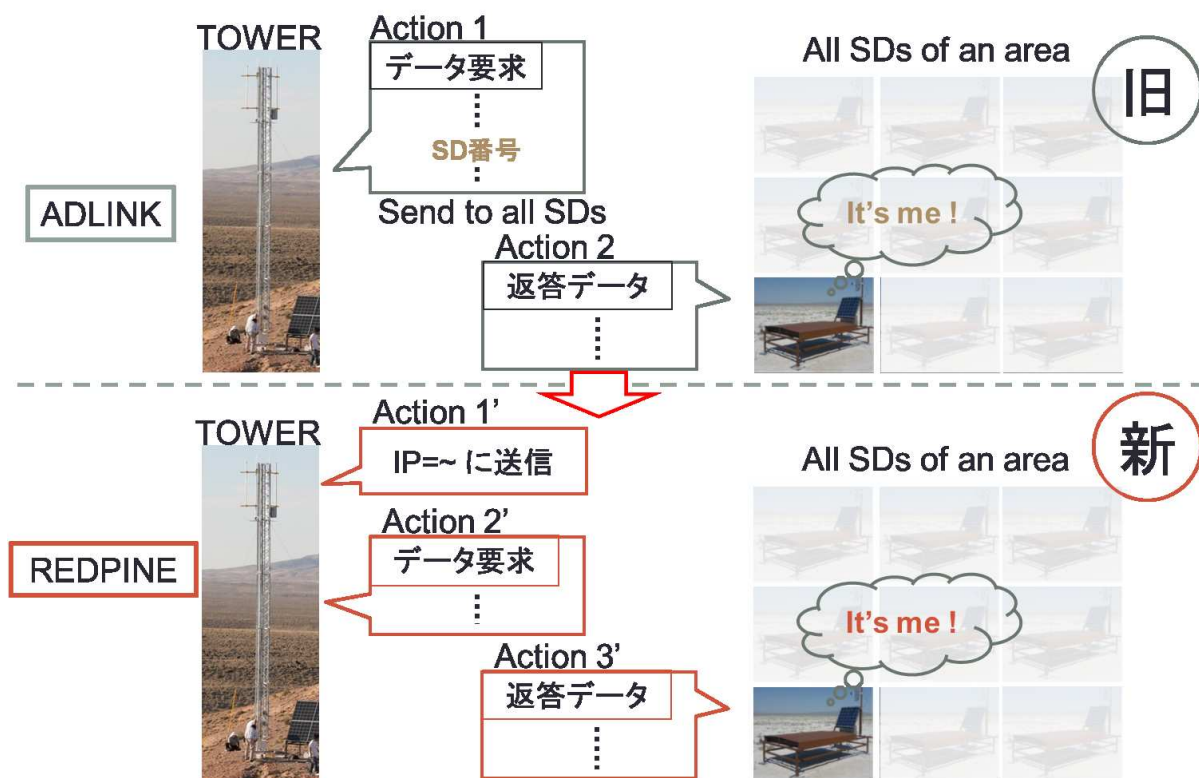


図 4.7: 無線通信の概念図。上がアドリンク，下がレッドパインの場合。アドリンクに比べてレッドパインの方が 1 アクション多い。

さらにアドリンクとレッドパインではパケットに付くヘッダも異なる。図 4.8に各モデムの送出する典型的なデータを示す。緑色の部分がモデムによって設定する部分で、青色の部分が FPGA もしくは CPU によって書き込まれる部分である。アドリンクは独自のヘッダを使用することによって、非常に短いヘッダになっている。一方、レッドパインは一般的な TCP/IP 通信のヘッダであるため、アドリンクのヘッダに比べて約 60Byte 大きいことがわかる。

そこで、各モデムが通信する際の最大バイト数を計算した。TEXT FIELD には最大 256Byte 書き込むことができ、アドリンクは通信に送受信の 2 アクションかかるので、タワーと SD がデータをやり取りするのに最大 604Byte というデータ量が無線通信される。一方レッドパインは、タワーと SD がデータをやり取りするのに、ソケット オープンのための通信と送受信で合計 3 アク

ADLINK	物理ヘッダ 24 Byte	独自ヘッダ 20 Byte	TEXT FIELD ~256 Byte*		CRC 2Byte	
REDPINE	物理ヘッダ 24 Byte	MACヘッダ ~30 Byte	IPヘッダ ~24 Byte	TCPヘッダ ~24 Byte	TEXT FIELD ~256 Byte*	CRC 4Byte

・オプションの付加によって変動

図 4.8: 各モデムの送出する典型的な 1 パケットデータ。緑色の部分がモデムによって設定する部分で、青色の部分が FPGA もしくは CPU によって書き込まれる部分である。*印のところは平均 184Byte のデータが格納される。

ションかかるので、最大 856Byte というデータ量が無線通信される。

しかし、この通信で重要なのはタワーが負担する全データ量である。つまり、1つの SD との通信量 × 1つのタワーが負担する SD 台数を考えなければならない。TA 実験のあるタワーは 188 台の SD とデータのやり取りをしているのに対し、TALE 実験ではタワーの負担は 105 台である。そこで TA 実験と TALE 実験で 1つのタワーが負担している全データ量を比較すると

$$\frac{TALE}{TA} = \frac{856[Byte] * 105[SDs\ of\ TALE]}{604[Byte] * 188[SDs\ of\ TA]} \approx 0.8 \quad (4.1)$$

となり、TALE 実験では TA 実験の約 0.8 倍の負担量になる。このことから、TALE 実験では SD の台数が少ないので、レッドパインのヘッダとアクションが増えることによる問題はないことがわかる。

4.4 TALE 実験用 SD エレクトロニクスを用いた通信テスト

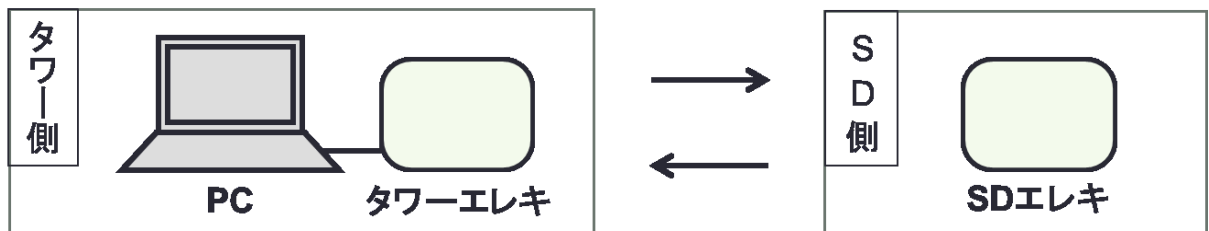


図 4.9: 通信テストのイメージ図。一方をタワー、一方を SD として通信テストを行った。

無線 LAN モデムをレッドパインに交換し、上述のように FPGA と CPU のファームウェアを書き換えて、最適化したエレクトロニクスで通信テストを行った。図 4.9 にそのイメージ図を示す。この通信テストで使用した PC の OS は Windows7 で、ターミナルエミュレータは TeraTerm を使用した。PC とタワーエレキ間には、LAN ケーブルと LANTRONIX 社製の XPORT という組み込み用小型デバイスサーバを使用し TCP/IP 通信を行った。エレキ上には XPORT を接続する部分が用意されており、そこに XPORT を接続し、LAN ケーブルで XPORT と PC を繋げる、と

いうセットアップになっている。通信テストは、PC上からあるコマンドをタワーエレキに向かって発行し、そのコマンド通りにエレキ同士が通信するというものである。このコマンドとは、SDエレキの起動時に必ず発行する”4000”というコマンドで、SDエレキにサイト内の番号を与えるコマンドである。コマンド実行時のエレキ同士が無線通信でやり取りする総データ量は386Byteである。通信テストの結果、通信にかかった平均時間は 21.6 ± 0.3 m秒であった。タワーは1秒毎に支配下にある105台のSD全てとデータのやり取りを行うため、1台のSDとの通信に許される時間は約10m秒である。つまり通信テストの結果から、基準値より倍ほど時間がかかるということがわかるが、この原因はFPGAと無線LANモデム間の通信速度にあることがわかっている。現在FPGAとレッドパインは115200bpsという通信速度でデータのシリアル転送をしている。先ほどのコマンドを実行した時に、FPGAとレッドパイン間でシリアル転送される総データ量は162Byteであり、115200bpsで転送を行うと15.5m秒程度かかる。しかしこのシリアル通信速度は4.1.2で述べたように、変更が可能で、最大で現在の32倍の速さの3686400bpsまで速くすることができる。今回の通信テストでFPGAとレッドパイン間の通信速度を3686400bpsにした場合、 $21.6 - 15.5 + (15.5/32) = 6.6$ m秒で通信することができる。このFPGAとモデム間の通信速度の変更部分は未実装であり、今後の課題である。

第5章 TALE実験の現状とその性能

TALE 実験の SD は 2014 年 2 月現在，図 5.1 のように 400m 間隔の領域と 600m 間隔の領域の一部に合計 35 台が設置されている．さらに，そのうちの 16 台は TA 実験で使われているエレクトロニクスを用いて空気シャワーアレイとして運用されている．図 5.2 はそのうちの 1 台の SD で得られたモニターデータの一部である．上はシングルミュオンに対する波高分布のピークとその分布幅で，下はレベル 0 トリガーレートの時間変化を表している．また，図 5.3 の上のグラフは稼働している 16 台の SD の稼働率で，5 月 15 日から 6 月 6 日までの稼働していない時期を除けば，ほぼ 100% の稼働率で稼働していることがわかる．真ん中は 1 日あたりのレベル 1 トリガー数で，下はレベル 1 トリガーの積算総量である．このように 1 日あたり約 700 トリガーが検出されている．

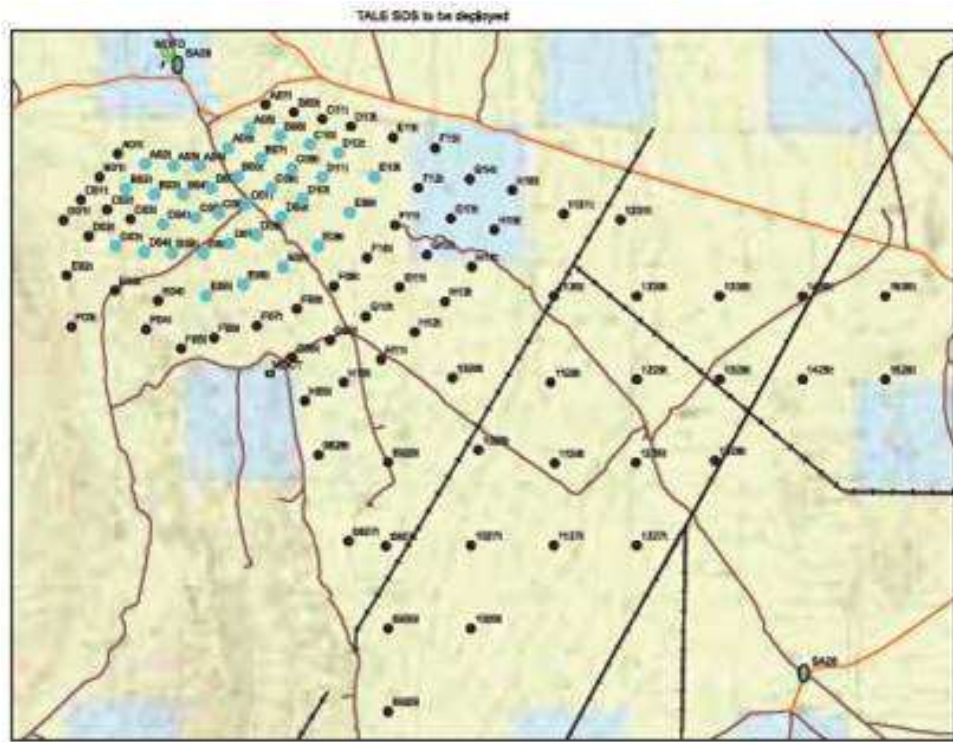


図 5.1: 水色の点は 2014 年 2 月現在で設置されている SD の設置点を示す．合計 35 台が既に置かれており，うち 16 台の SD は TA 実験のエレクトロニクスを用いて空気シャワー稼働している．

また，TALE 実験用 FD ステーションは 2012 年 11 月に完成しており，2013 年 2 月から観測を始めている．図 5.4 は TALE 実験用 FD と SD アレイで同時検出されたハイブリッドイベントの 1 例のイベントディスプレイである．

TALE 実験用の SD エレキが完成すると，図 2.4 に示したように，SD は FD ステーションから

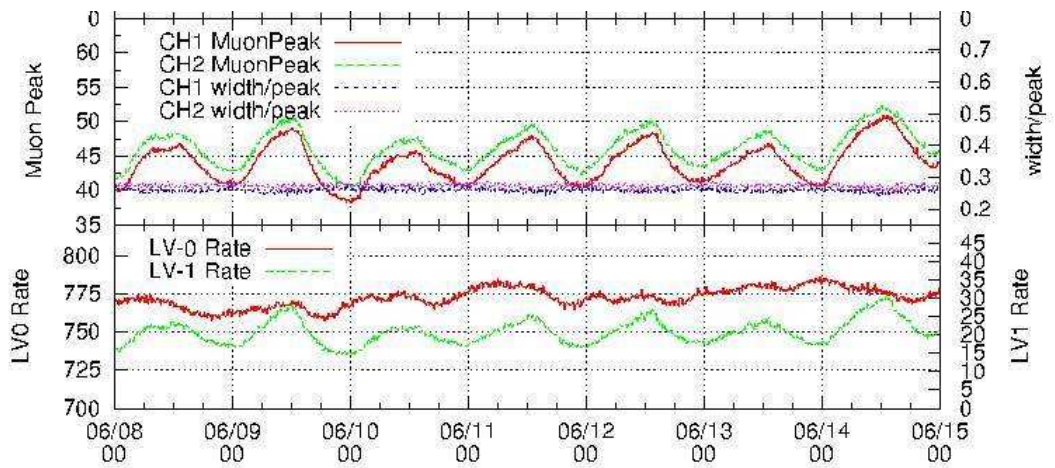


図 5.2: TALE 実験サイトに TA 実験の電子学を用いて空気シャワーアレイとして運用されている SD のモニターデータの一部。上はシングルミュオンに対する波高分布のピークとその分布幅で、下はレベル0トリガーレートの時間変化を表している。

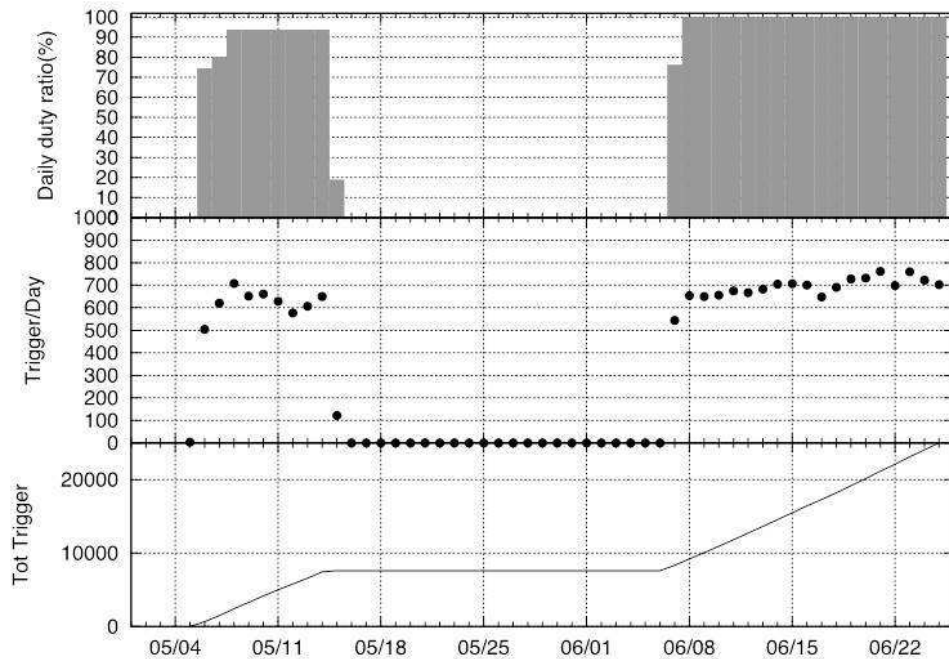


図 5.3: 上から、TALE 実験サイトに TA 実験の電子学を用いて空気シャワーアレイとして運用されている SD の稼働率、1日あたりのレベル1トリガー数、レベル1トリガーの積算総量を表す。

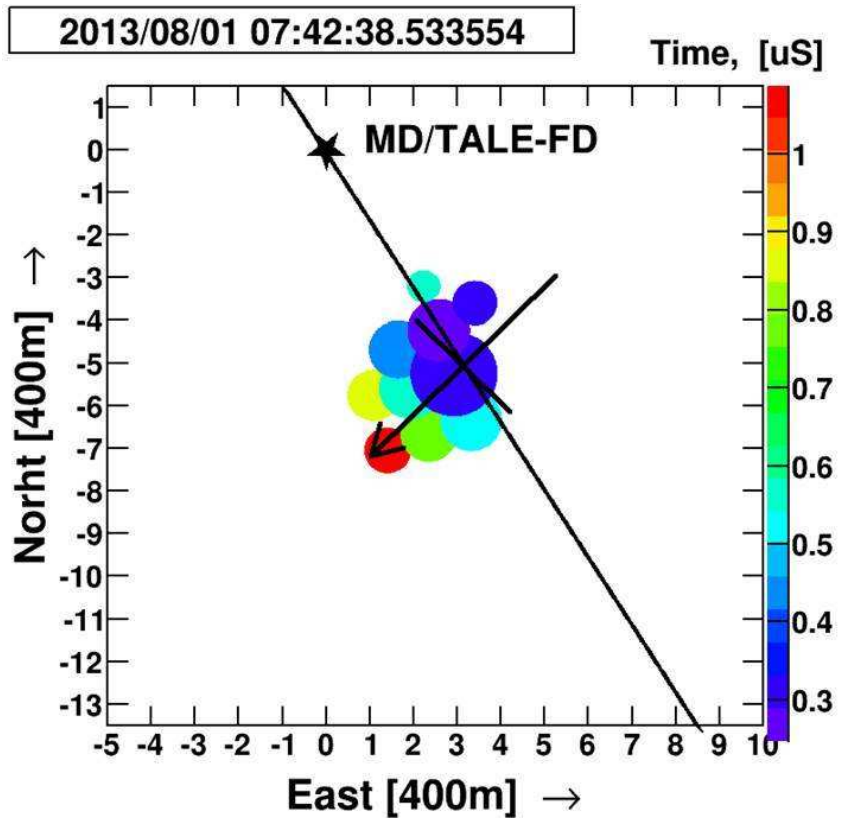
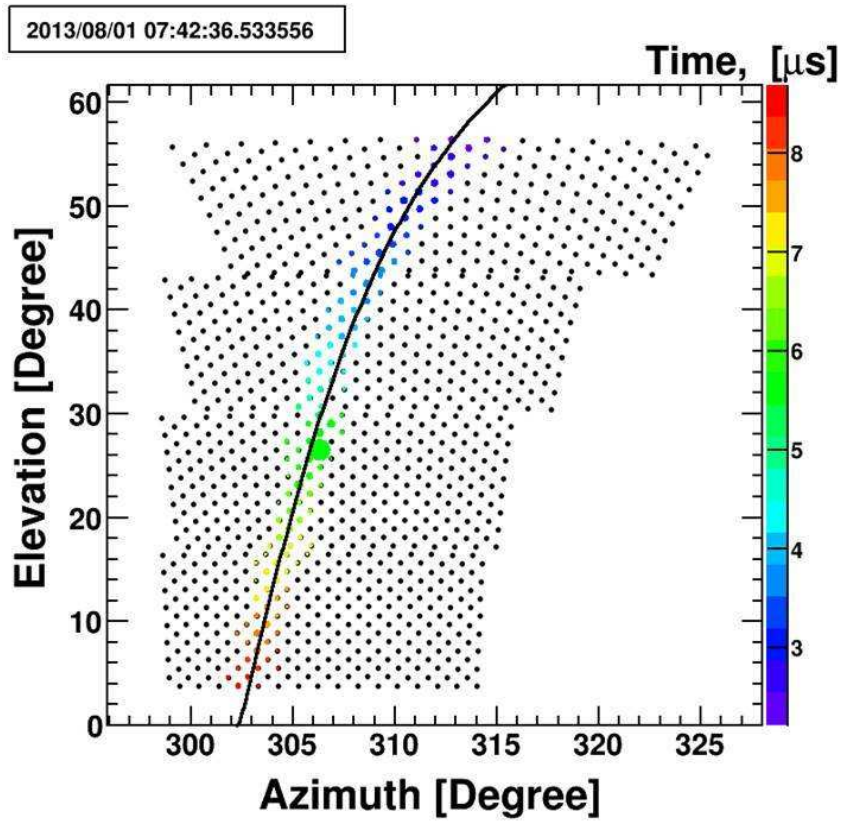


図 5.4: (上)FD によるハイブリッドイベントの 1 例のイベントディスプレイ. (下)SD によるハイブリッドイベントの 1 例のイベントディスプレイ.

3km 以内の領域に 400m 間隔で 35 台, 3~5km の領域に 600m 間隔で 46 台, そして TA アレイと接続する領域に 1.2km 間隔で 24 台並べられる. SD が 400m 間隔で並べられる領域では 3×10^{16} eV の空気シャワーに対して 100% の検出効率を持つ. また SD が 600m 間隔で並べられる領域では 10^{17} eV の空気シャワーに対して 100% の検出効率を持つ.

この TALE 空気シャワーアレイで期待されるイベントレートはモンテカルロシミュレーションによって計算されている [39][40]. TALE 空気シャワーアレイで期待されるイベントレートスペクトラムを図 5.5 に示す. SD トリガーの最頻エネルギーは $10^{16.5}$ eV で, トリガー頻度は年間約 50000 事象と予想されている.

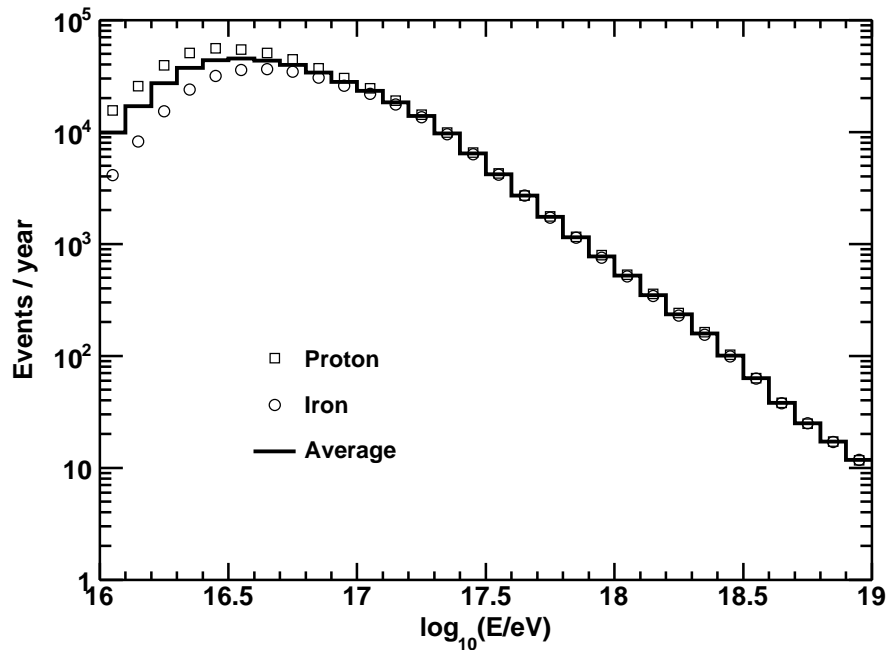


図 5.5: TALE 空気シャワーアレイによる観測で期待されるトリガー数のスペクトル. 最頻エネルギーは $10^{16.5}$ eV で, 年間約 50000 事象のイベントトリガーが期待される.

また, SD と FD によるハイブリッド観測のイベントレートスペクトラムを図 5.6 に示す. ハイブリッド観測による最頻エネルギーは $10^{17.3}$ eV で 2nd knee があると考えられている $10^{17.5}$ eV よりも低く, 年間約 5000 事象のトリガー数が期待される. これを TA 実験のハイブリッド観測と比較すると, 最頻エネルギーは 1.2 桁下で, 事象数は約 2 倍である.

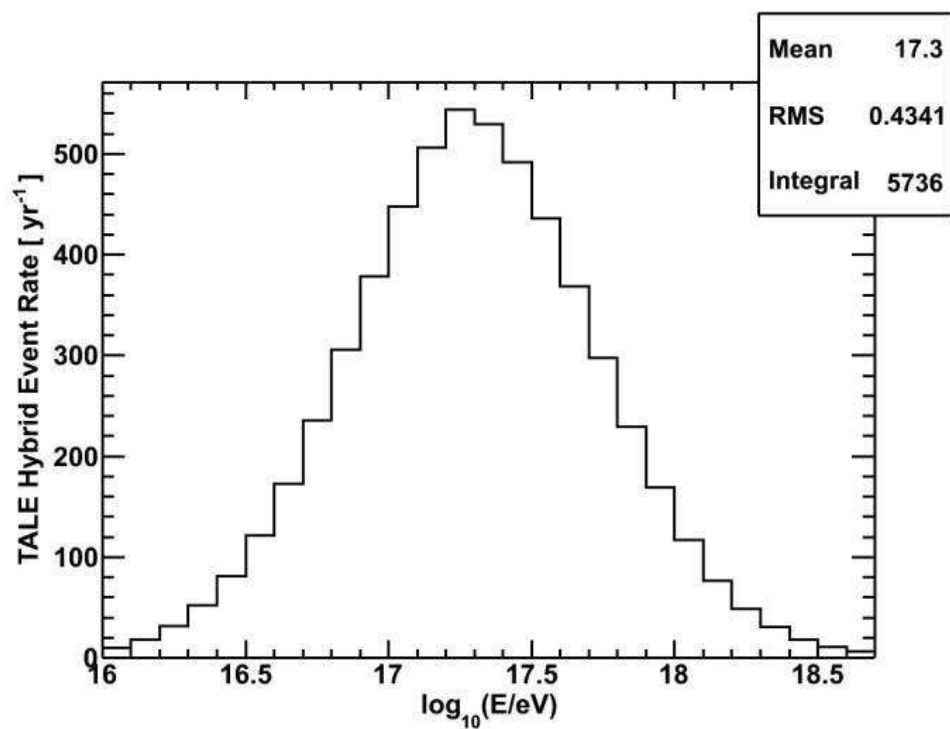


図 5.6: TALE 実験の 1 年間のハイブリッド観測から期待されるイベント数.

第6章 結論

TALE 実験用 SD のために無線 LAN モデムを選定，交換し，それに伴い，必要な SD エレクトロニクス内の CPU，FPGA のファームウェアの改良，最適化を行った。

選定のための長距離通信テストを米国ユタ州で実施した結果，Redpine Signals 社製無線 LAN モデム RS9110-N-11-02(レッドパイン)を使用することとした。レッドパインは 20km 離れていても通信が可能である。レッドパインは，これまで TA 実験で使用われてた ADTEK 社製無線 LAN モデム ADLINK540F.RF(アドリンク)と比べ，入手が容易であることと，インターフェイスが非常にシンプルで扱いやすいという点で優れている。しかし，アドリンクを用いた場合のタワーと SD の通信は 2 アクションで行われるのに対し，レッドパインは 3 アクション必要で，また，レッドパインはアドリンクに比べて約 60Byte ヘッダが大きい。しかし，1 台のタワーの取り扱う単位時間あたりの全データ量を比較すると，TALE は TA 実験に比べて 1 台のタワーエレクトロニクスが担当する SD の台数が少ないため，単位時間あたりのデータ量は，TALE 実験では TA 実験の 0.8 倍の負担量になる。このことから，レッドパインのヘッダとアクションが増えても，TA 実験に比べデータ量は多くないことがわかる。

FPGA のファームウェアの主な変更点は，レッドパインと FPGA 間のポートと，レッドパインにコマンドをシリアル通信で送信する部分である。CPU のファームウェアの主な変更点は，SD に割り振られた IP 番号を FPGA に転送する点である。

また完成した SD エレキで通信テストを行った。その結果，無線通信での総転送量が 386Byte に対して 21.6 ± 0.3 m 秒の時間がかかった。しかし，モデムと FPGA のの間のシリアル通信速度を変更することでより短い時間で通信できることがわかっており，これは今後の課題である。

そして完成した SD でデータ収集を開始すると，SD トリガーの最頻エネルギーは $10^{16.5}$ eV で，トリガー頻度は年間約 50000 事象と予想されている。SD と FD のハイブリッドトリガーの最頻エネルギーは $10^{17.3}$ eV で 2nd knee があると考えられている $10^{17.5}$ eV よりも低く，このエネルギーで年間約 5000 事象のトリガー数が期待される。

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、全てにおいて数多くのご助言、ご指導いただきました大阪市立大学の荻尾彰一准教授に深く感謝致します。また、幾度となく的確なご助言、ご指導をいただきました大阪市立大学の林嘉夫教授、小島浩司客員教授(愛知工業大学)に深く感謝致します。

東京大学宇宙線研究所の野中敏幸助教には本研究において数多くの御指導、御助言、また、アメリカにおける研究生活でお世話になりましたことを感謝致します。

大阪市立大学の櫻井信之特任助教(現 名古屋大学素粒子宇宙起源研究機構 特任助教)には本研究において数多くの御指導、御助言して頂きましたことを深く感謝致します。

大阪市立大学の藤井俊博博士(現 シカゴ大学カブリ宇宙物理研究所 研究員)、山崎勝也氏には毎日の研究生活の中で研究に関することのみならず多くの相談に応じて頂き、的確なご助言を頂きましたことを深く感謝致します。

毎日の研究生活の中で支えとなっていた大阪市の山根涼氏、米田泰久氏、小林隼矢氏、寺農篤氏、山口泰弘氏、小西翔吾氏、山本実加氏、和知慎吾氏に感謝致します。

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ついてご助言を頂きましたことを感謝致します。

東京大学宇宙線研究所の福島正己教授、佐川宏行准教授、竹田成宏助教、芝田達伸特任助教、多米田裕一郎博士、池田大輔博士、木戸英治博士、東京工業大学の常定芳基助教、得能久生特任助教、理化学研究所の富田孝幸博士、東京大学宇宙線研究所の技術職員の大木薫氏、下平英明氏、東京理科大学の屋代健太氏、高村茉衣氏、近畿大学の千川道幸教授、野里明香氏、さこ中良介氏、山梨大学の町田和広氏、CRC 管理人の Dave Barr 氏、Cindy Barr 氏にはユタ現地での生活、並びに観測作業でお世話になりましたことを感謝致します。

大阪市立大学大学運営本部学務企画課の川口幸子さん、東京大学宇宙線研究所の木次敦子さん、岡村宜子さんには数多くの事務処理を行っていただきましたことを感謝致します。

本研究は宇宙線望遠鏡実験なしには成り立ちませんでした。宇宙線望遠鏡実験コラボレーター、関係研究機関の皆様に深く感謝します。

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。

なお、本研究は日本学術振興会科学研究費補助金(特別推進研究) H21～H25「最高エネルギー宇宙線で探る極高宇宙現象」、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。これらの関係機関の皆様に感謝致します。

参考文献

- [1] M. Nagano, *New J. Phys.*, **11**, 065012(2009).
- [2] S. Ogio, F. Kakimoto, *Proc. 28th Int. Conf. Cosmic Rays.*, **1**, 315(2003).
- [3] J. A. Simpson, *Ann. Revs. Nucl & Part. Sci.*, **33**, 323(1983).
- [4] T.K. Gaisser, "*Cosmic Rays and Particle Physics*", Cambridge University Press (1990).
- [5] L. Drury, *Rep. Prog. Phys.*, **46**, 973(1983).
- [6] A. M. Hillas, *Astron. Astrophys.*, **22**, 425(1984).
- [7] C. Thompson, R. Duncan, *Monthly Notices of the Royal Astron. Society*, **275**, 255(1995).
- [8] P. Blasi, *et al.*, *Astrophys. J. Lett.*, **533**, L123(2000).
- [9] A. Hillas, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, **22**, 425(1984).
- [10] E. Blodt and P. Ghosh, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **307**, 491(1999).
- [11] J. Rachen and P. Biermann, *Astron. Astrophys.*, **272**, 161(1993).
- [12] M.J.R. Rees and R. Mészáros, *Astrophys. J.*, **93**, 430(1994).
- [13] H. Kang, D. Ryu and T.W. Jones, *Astrophys. J.*, **456**, 422(1996).
- [14] V. Kuzmin and I. Tkachev, *Soviet Journal of Experimental and Theoretical Phys. Lett.*, **68**, 271(1998).
- [15] T.J. Weiler, *Astropart. Phys.*, **3**, 303(1999).
- [16] D. R. Bergman, *et.al.*, astro-ph/0603797 (2006)
- [17] J. Linsley, *et al.*, *J. Phys. Soc. Japan.*, Suppl A-III **91**(1962).
- [18] K. Greisen, *Ann. Rev. Nucl. Sci.*, **10**, 63(1960).
- [19] J. Linsley, *Phys. G: Nucl. Phys.*, **12**, 51(1986).
- [20] T. Abu-Zayyad, *et al.*, *Ap. J.* **768**, L1(2013),
- [21] Y. Tameda, *et al.*, *Proc. of 33rd ICRC*, 0512(2013)
- [22] K. Kamata, J. Nishimura, *Suppl. Prog. Theor. Phys.*, **6**, 93(1958).
- [23] K. Greisen, *Progress in Cosmic Ray Physics III.*(ed.by J.G. Wilson), **27**(1956).

- [24] T. Hara, *Proc. of 18th ICRC.*, **11**, 27(1983).
- [25] KASCADE-Grande Home Page, http://www-ik.fzk.de/KASCADE_home.html (2014/01 現在)
- [26] A. Haungs, et al., *Proc. of 33rd ICRC*, 0300(2013)
- [27] W. Apel, et al., *Phys. Rev.Lett.*, **107**, 171104(2011).
- [28] W. Apel, et al., *Phys. Rev.D.*, **87**, 081101(R)(2013).
- [29] YAKUTSK EAS ARRAY Home Page, <http://eas.ysn.ru/index.php> (2014/01 現在)
- [30] S.P. Knurenko, et al., *Proc. of 33rd ICRC*, 0053(2013)
- [31] S.F. Berezhnev, et al., *Proc. of 33rd ICRC*, 0418(2013)
- [32] V.V. Prosin, et al., *Proc. of 33rd ICRC*, 0617(2013)
- [33] The IceCube Collaboration, *Proc. of 33rd ICRC*, 0861(2013)
- [34] 武多昭道, 博士論文 東京大学 (2011).
- [35] W.M. Yao, et al., *J.Phys.G. and Nucl.Phys.*, **33**(2006).
- [36] 宮田孝司, 修士論文 東京理科大学 (2008).
- [37] P.K.F. Grieder, *Extensive Air Showers*, **1** Springer (2010).
- [38] 米田泰久, 修士論文 大阪市立大学 (2013).
- [39] S. Ogio, et al., *Proc. of 33rd ICRC*, 0717(2013)
- [40] S. Ogio, et al., *EPJ Web of Conference* **53**, 08020(2013)

付録

SD 及びタワーエレクトロニクスのファームウェアの生成方法

SD 及びタワーのエレクトロニクスのファームウェアの生成方法を説明する。

FPGA のファームウェアの生成方法

TA 及び TALE 実験で使用する SD エレクトロニクスの FPGA のファームウェアは .bit という拡張子のデータである。その生成方法を説明する。

FPGA は Xilinx 社製 XC3S1000 というものを用いており、FPGA のソースコードの設計は Xilinx 社製の ISE という開発ソフトウェアを用いて行う。ISE で動作プログラムを VHDL で記述した後、一番上の階層 (ここでは top.vhdl) のファイルにカーソルを合わせる。そして "Design" の "Generate Programming File" をダブルクリックすると、.bit ファイルの生成が始まる (ここでは top.bit)。正しく生成されると左に緑色のチェックマークが出る (図 6.1)。

CPU のファームウェアの生成方法

CPU のファームウェアの生成は makefile によって実行される。

FPGA のファームウェアは CPU を通して FPGA にインストールされるため、まず、SD エレクトロニクスの動作プログラムファイルが入っているディレクトリに上述の .bit ファイルを置く。そして、メイクコマンドを実行しファームウェアを生成する。TALE 実験のタワーエレクトロニクスのファームウェアを生成する場合は、ターミナル上で以下のコマンドを実行する。

```
$ make tale
```

また、SD エレクトロニクスのファームウェアを生成する場合は

```
$ make sub
```

を実行する。これらによって、それぞれ tale.s ファイルと sub.s ファイルが生成される。この .s ファイルをエレクトロニクスにインストールする。

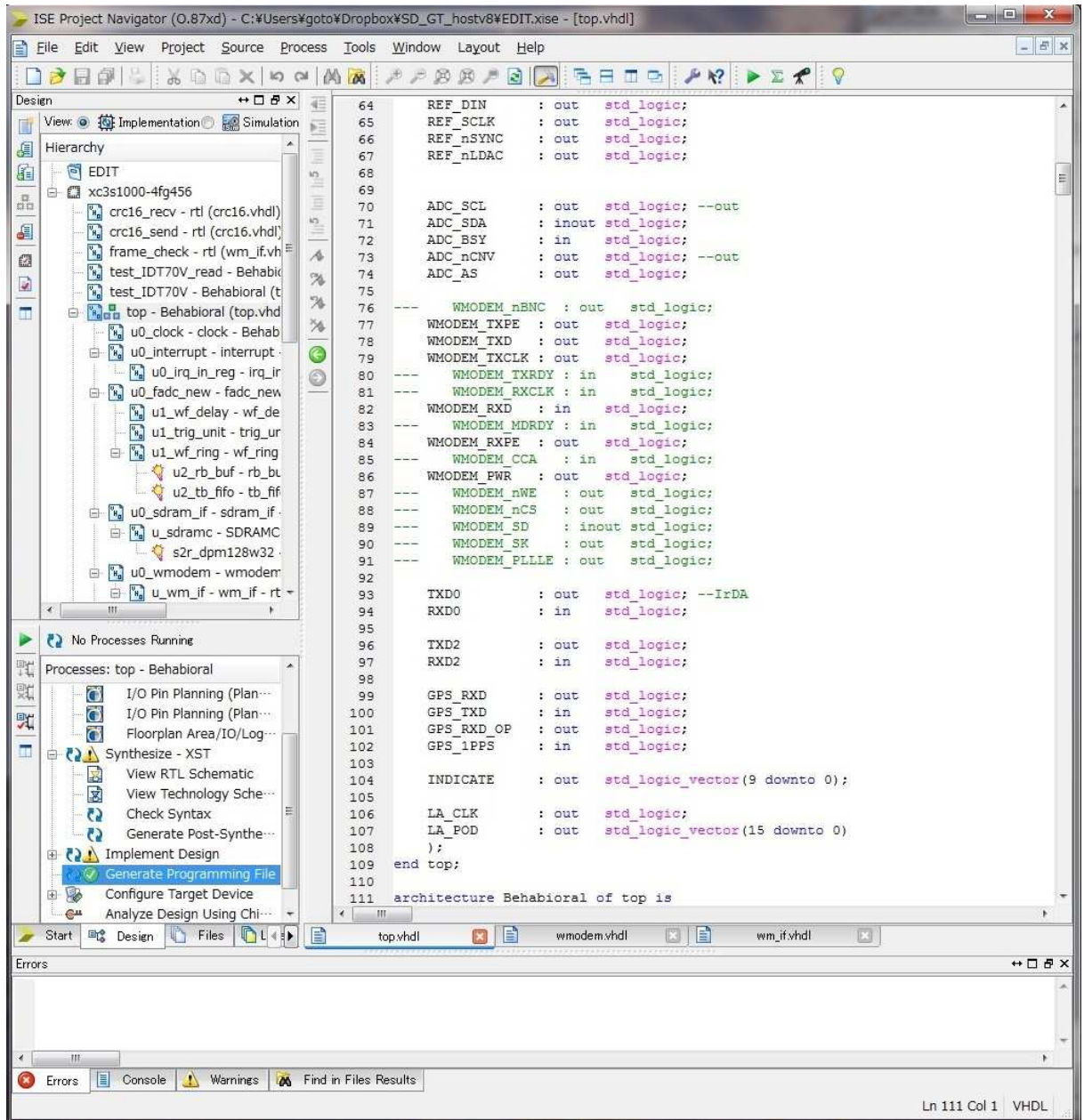


図 6.1: ISE による .bit ファイル生成画面.

エレクトロニクスへのファームウェアのインストール方法

セットアップ

エレクトロニクスへのファームウェアのインストールは、PCとエレキを接続し、PCからファームウェアを転送することによって行われる。なお、PCとエレキ間はLANケーブルとLANTRONIX社製のXPORTという組み込み用小型デバイスサーバを使用してTCP/IP通信を行う。図6.2にそのイメージ図、図6.3にXPORTの外観写真を示す。

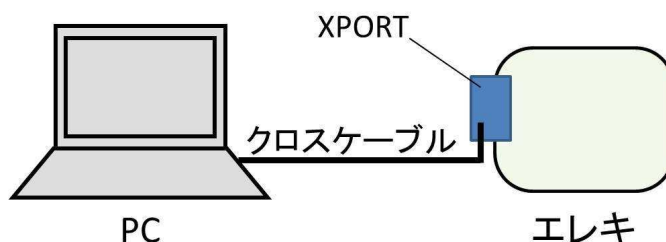


図 6.2: PCとエレキ間の接続のイメージ図。



図 6.3: XPORT の外観写真。基本的には左側の XPORT でエレキと TCP/IP 通信を行う。

XPORT の設定

XPORTはTCP/IP通信を使用するため、IP番号を与える必要がある。IP番号はLANTRONIX社製の”Dvice Installer”というソフトウェアを用いて行われる。まず、エレキに12Vの電源を供給する。XPORTはエレキから電源供給されるため、エレキの電源が入ると自動的にXPORTは起動する。そして図6.2のようなセットアップにした後、Dvice Installerを起動させる。すると図6.4のような画面が現れ、左側の”XPort”という表示がXPORTが正常に接続されているという合

図である。なおこの画面は IP 番号を与えた後のものである。次に”IP 割当”をクリックすると図 6.5 のように、IP 割当のための XPORT のハードウェアアドレスを入力する画面が出る。ハードウェアアドレスは図 6.3 のバーコードの下に書かれている番号である。ハードウェアアドレスを入力し”次へ”をクリックすると図 6.6 のように、IP アドレスの割当方法の画面が出る。ここでは”特定 IP アドレスの割当”にチェックをし、”次へ”をクリックする。すると、図 6.7 のように、IP 設定の画面が出るので設定を行う。入力後、”次へ”をクリックすると IP が設定される。

次にボーレートの設定を行う。IP の設定が終わると図 6.8 のように左側に設定した IP が出力される。これにカーソルを合わせた後、赤丸で囲んだ緑色の矢印をクリックすると、図 6.9 のように設定画面が現れる。図の”Serial Settings”をクリック後に通信したいボーレートを設定し、”OK”をクリックし、”Apply Settings”をクリックすると、設定が完了する。一度設定を行うと、次回起動時には自動的に設定した IP 番号を取得する。

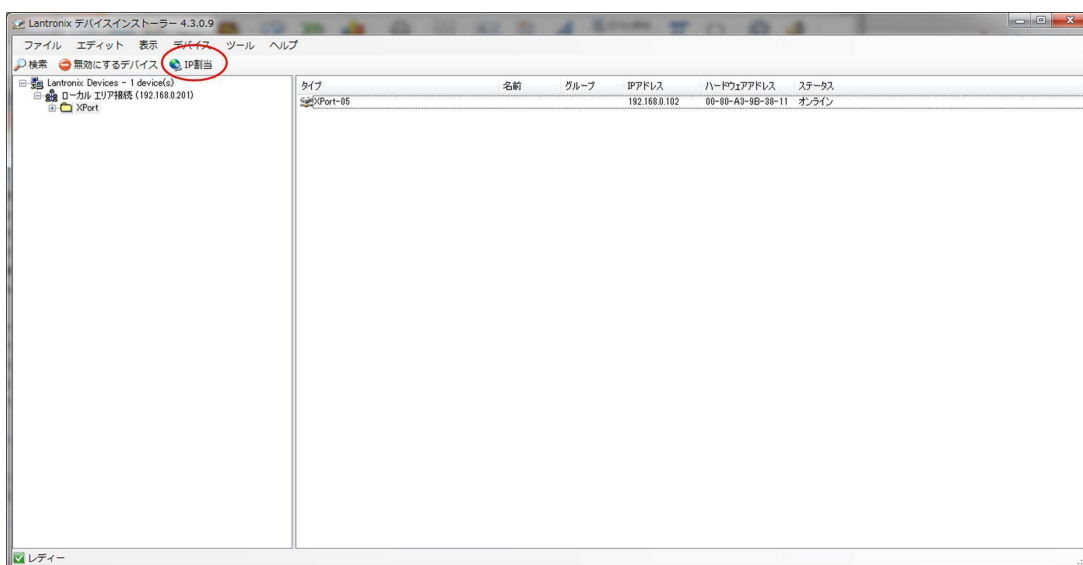


図 6.4: XPORT の設定画面。DeviceInstaller が起動するとこの様な画面が現れる。



図 6.5: XPORT の IP 割当のための XPORT ハードウェアアドレスの入力画面。



図 6.6: XPORT の IP アドレスの割当方法の選択画面。



図 6.7: XPORT の IP アドレスの設定画面。

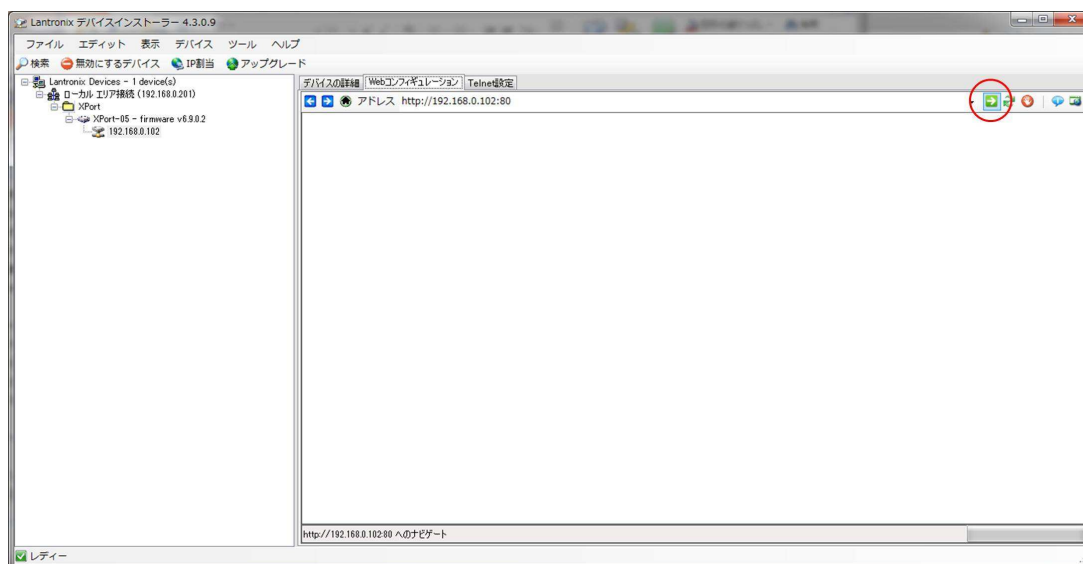


図 6.8: XPORT の IP アドレス設定後の画面。

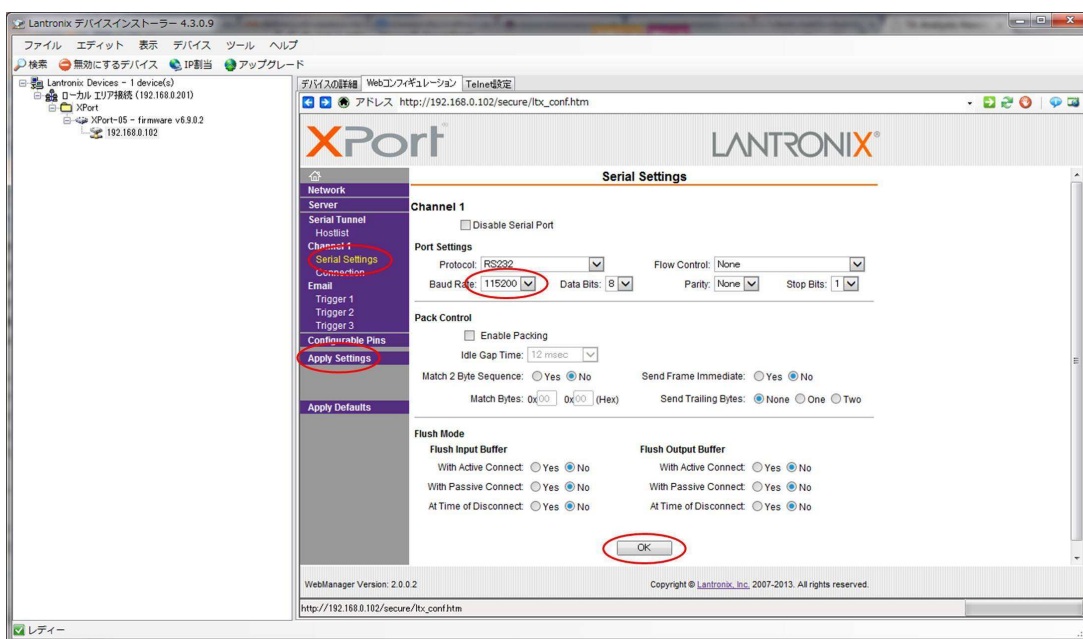


図 6.9: XPORT のボーレートの設定画面。

PCのセットアップ



図 6.10: Tera Term の接続の設定画面。

ここでは PC の OS は Windows7 の場合とする。ターミナルエミュレータは TeraTerm を使用する。接続の設定は図 6.10 のように行う。ただし、ホストの IP アドレスは XPORT の IP アドレスに合わせる必要がある。

ファームウェアのインストール

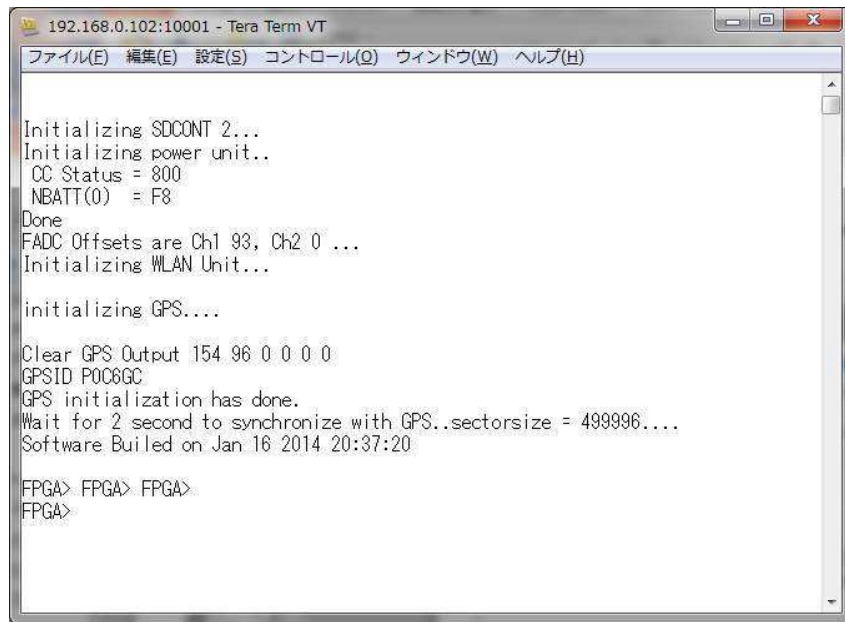
上述のセットアップ完了後、エレクトロニクスに電源を供給する。エレキに電源が入ってから、1 秒以内にエンターを押すと正しく起動し、図 6.11 のように TeraTerm 上に起動画面が出力される。起動画面が出た後、

```
$ load
```

と入力し、メニューの”ファイル>ファイル送信”でダウンロードする.sファイルを選択し、ダウンロードする。ダウンロードされたデータは dlbuf というバッファに保存される。バッファは”dlbuf”，”ram”，”rom0”そして”rom1”が用意されている。ダウンロード完了後、エンターを押すとコマンドラインに戻ることができる。次に、ダウンロードしたファームウェアで起動するために以下のコマンドを実行する。

```
$ reboot dlbuf
```

このコマンドは dlbuf にあるデータを ram に保存して ram から再起動するというコマンドである。この再起動時も 1 秒以内にエンターを押す必要がある。コマンドからの再起動は、ram に保存されているデータは消えずに、dlbuf に保存されているデータは消えるという仕様になっている。このようにして、ダウンロードしたファームウェアでエレキを立ち上げることができる。

A screenshot of a terminal window titled "192.168.0.102:10001 - Tera Term VT". The window contains the following text:

```
ファイル(E) 編集(E) 設定(S) コントロール(Q) ウィンドウ(W) ヘルプ(H)

Initializing SDCONT 2...
Initializing power unit..
CC Status = 800
NBATT(0) = F8
Done
FADC Offsets are Ch1 93, Ch2 0 ...
Initializing WLAN Unit...

initializing GPS...

Clear GPS Output 154.96 0 0 0 0
GPSID P0C6GC
GPS initialization has done.
Wait for 2 second to synchronize with GPS..sectorsize = 499996....
Software Builed on Jan 16 2014 20:37:20

FPGA> FPGA> FPGA>
FPGA>
```

図 6.11: SD エレキ起動画面.

ファームウェアを ROM に書き込む

上述のように ram に保存しただけでは電源を落とすとデータが消えてしまうため、ROM に書き込む必要がある。以下では ROM への書き込み方法について説明する。上述の "reboot dlbuf" まで行った後に、以下のコマンドを実行する。

```
$ dlretr ram
```

このコマンドは ram に書かれているデータを dlbuf に書き込むというコマンドである。ROM に書き込むためには、ram と dlbuf 両方に ROM に書き込むファームウェアを保存していなければならないという仕様になっているので、"reboot dlbuf" で ram に書き込んだデータを、dlbuf に書き込む必要がある。その後、rom0 に書き込むための以下のコマンドを実行する。

```
$ flashwr rom0
```

このコマンドは ram に書かれているデータを rom0 に書き込むというコマンドである。このようにして ROM にファームウェアの書き込みを行う。