

電波望遠鏡による
最高エネルギー宇宙線観測システムの開発

甲南大学物理学科
宇宙粒子研究室
学籍番号：10861046
細野 裕貴

目次

第1章 研究の目的

第2章 最高エネルギー宇宙線の観測

2-1 最高エネルギー宇宙線

2-2 宇宙線観測所

2-2-1 The Pierre Auger

2-2-2 Telescope Array(TA)

2-3 最高エネルギー宇宙線観測による近年の報告結果

2-3-1 最高エネルギー宇宙線の到来方向

2-3-2 化学組成

2-3-3 将来の展望

第3章 分子制動放射 (MBR)

3-1 MBR 検出の概要

3-2 分子制動放射 (MBR) の原理

3-3 コヒーレント成分

3-4 MBR の利点

3-5 MBR を応用した電波実験グループの現状

第4章 電波望遠鏡による観測システムの開発

4-1 電波望遠鏡に使用した各種機器

4-1-1 BS アンテナ

4-1-2 検波器

4-1-3 Bias Tee

4-2 検波 BOX の作成

4-3 観測システムの構成

4-4 検波器の性能

第5章 電波望遠鏡の性能評価

5-1 ノイズレベルの評価

5-2 甲南大学周辺の電波環境

5-3 ノイズ信号のイベントレートと周期解析

5-4 シミュレーションによるシステムの評価

第6章 研究成果と今後の計画

第1章 研究の目的

現在、次世代の最高エネルギー宇宙線の観測方法として分子制動放射（MBR）を利用した検出方法が提案されている。空気シャワーの測定に分子制動放射を応用できれば、天候や時間に依存しない空気シャワーの縦方向発達の観測を可能にし、近年の通信システムの発展により汎用品を組み合わせで安価で高性能なシステムを構成できる。これにより最高エネルギー宇宙線観測に画期的な進歩が期待できる。そこで、我々はBSアンテナを用いた最高エネルギー宇宙線より生成される空気シャワー起源のマイクロ波検出を目的とした電波望遠鏡を開発する。



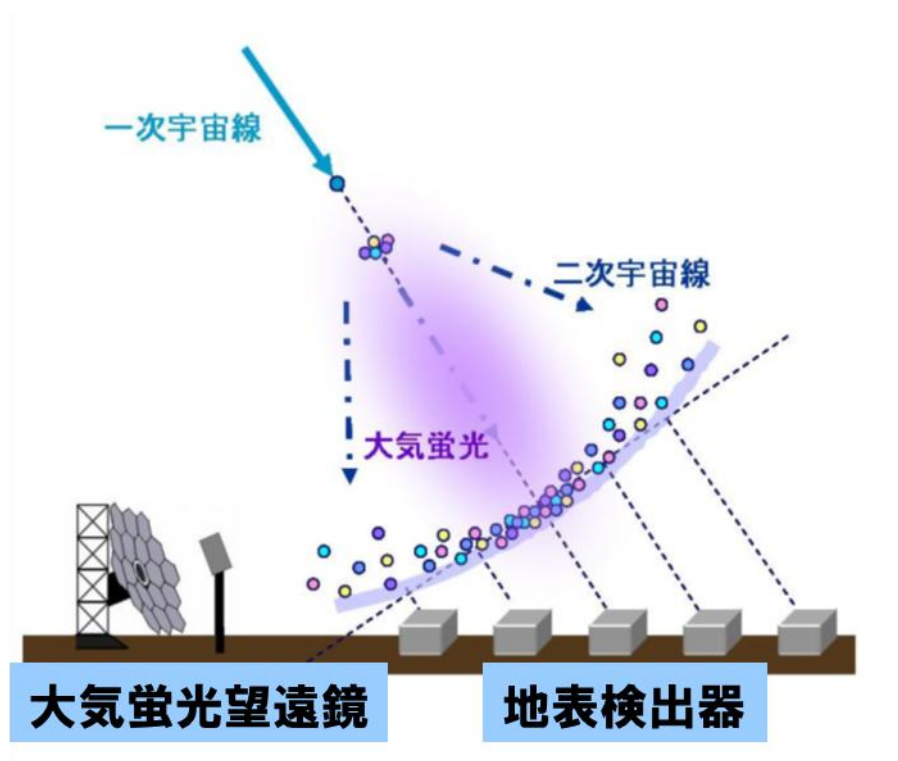
図 1.1 電波望遠鏡

第2章 最高エネルギー宇宙線の観測

2-1 最高エネルギー宇宙線

宇宙で最もエネルギーの高い粒子を最高エネルギー宇宙線と呼ぶ。この粒子の持つエネルギーは 10^{20}eV まで及ぶ。この粒子を調べることは、宇宙における莫大なエネルギー現象の解明につながる。人類が加速器により、生成できる最大の粒子エネルギーは 10^{17}eV である。つまり、 10^{20}eV を持つ粒子の高エネルギー現象についての議論は実験室では到底できない。宇宙における高エネルギー現象を議論するには、最高エネルギー宇宙線観測がとても重要なカギを握る。

宇宙線観測において 10^{14}eV 以下の低エネルギー宇宙線は天文衛星や気球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^{15}eV 以上の高エネルギー宇宙線の到来頻度は少ないので、観測には大きな検出面積と時間が必要になる。そのため、地上に検出器を設置し、1次宇宙線が大気分子と相互作用してできる2次宇宙線を検出する間接測定が行われている。



2.1 空気シャワーの観測技術

2-2 宇宙線観測所

2-2-1 The Pierre Auger

Auger 観測所は the Surface Detector(SD)と the Fluorescence Detector(FD)の 2 種類の検出器からなる SD は 1600 個の純水タンクからなり、一辺が 1.5km の連続する正三角形の頂点にそれぞれ配置する形で敷きつめられ、全体として 7000km²sr もの領域をカバーする。FD はその中央に 1 台、近傍の丘の上に 3 台設置される。純水タンクは 10m²の面積、深さ 1.2m のタンクに 12t の純水が満たされており、空気シャワー中の荷電粒子がタンクを通過する際に発するチェレンコフ光を検出する。各検出器はソーラーパネルによって電力が供給される。また、携帯電話の技術を利用した自動無線連絡網で高速のコミュニケーションを実施し、中央のデータ収取コンピュータにその信号を伝達する。各検出器での宇宙線到来時刻は、人工衛星から送られる GPS 信号でそれぞれの検出器ごとに正確に記録され、シャワー到来方向の決定に使用される。FD は fly 's Eye 型の蛍光検出器で空気シャワーから発光したシンチレーション光を検出する。そのため、澄んだ暗闇においてのみ観測可能で、年間を通してその条件を満たすデューティーサイクル（使用率）は 10%に過ぎない。しかし、この 10%に当たるデータは 1 次宇宙線のエネルギー到来方向、化学組成の識別に威力を発揮する。さらに、この 10%のデータをもとに 1600 個の SD を個別に校正チェックすることにより、FD が稼働していないときに得られた SD によるデータもより正確に解析することができる。



図 2.2 the Surface Detector(SD) the Fluorescence Detector(FD)

2-2-2 Telescope Array(TA)

TA 計画は、日米の共同研究により、米国ユタ州ミラード郡デルタ市近郊に建設された。地面に置いた粒子検出器(プラスチックシンチレータ検出器)で地表面での空気シャワー中の粒子数を測定して、口径 3m の反射望遠鏡で空気シャワー粒子が発生する微弱な大気蛍光を捉える。大気蛍光望遠鏡を用いた観測は、月の出ていない暗夜のみ可能で、観測時間効率は 10~12%程度だが、宇宙線の到来方向やエネルギーを精度良く測定できる。反射望遠鏡に使用する鏡は口径 3m で微弱な光を効率良く集められるように設計されている。60km 先に落ちた空気シャワーも観測することができる。そのとき大気による光の散乱、吸収が問題になるが、各ステーション上など、数ヶ所に設置されたレーザーを用いて頻繁にチェックする。1 ステーションには 12 台の望遠鏡が設置されていて、全部で方位角 120° 、仰角 $5\sim 34^{\circ}$ の領域を観測する。大気蛍光観測のための反射望遠鏡ステーションを 3 ヶ所に設置している。地上粒子検出器による観測エネルギー、到来方向の決定精度は若干落ちるが観測効率が良く、より多くの最高エネルギー宇宙線を捉えることができる。空気シャワー粒子を検出するプラスチックシンチレータ検出器を 1.2km 間隔で碁盤目状に 24×24 の合計 576 台設置し、全部で地表面積約 1000km^2 をカバーする。



図 2.3 Telescope Array (TA)

2-3 最高エネルギー宇宙線観測による近年の報告結果

2-3-1 最高エネルギー宇宙線の到来方向分布

近年、Auger グループは 57EeV を超える最高エネルギー宇宙線の到来方向分布と、 75Mpc 以内にある VCV カタログ中の AGN の分布の相関を調べたところ、最高エネルギー宇宙線のイベントの AGN から 3.1° 以内の位置から到来している宇宙線を 19event 見つけた。ほとんどのイベントは銀河磁場が最も強い銀河平面から 12° 以内の位置を通過していない。この結果の有意性は 2σ 程度で、AGN との緩い相関を示唆している。

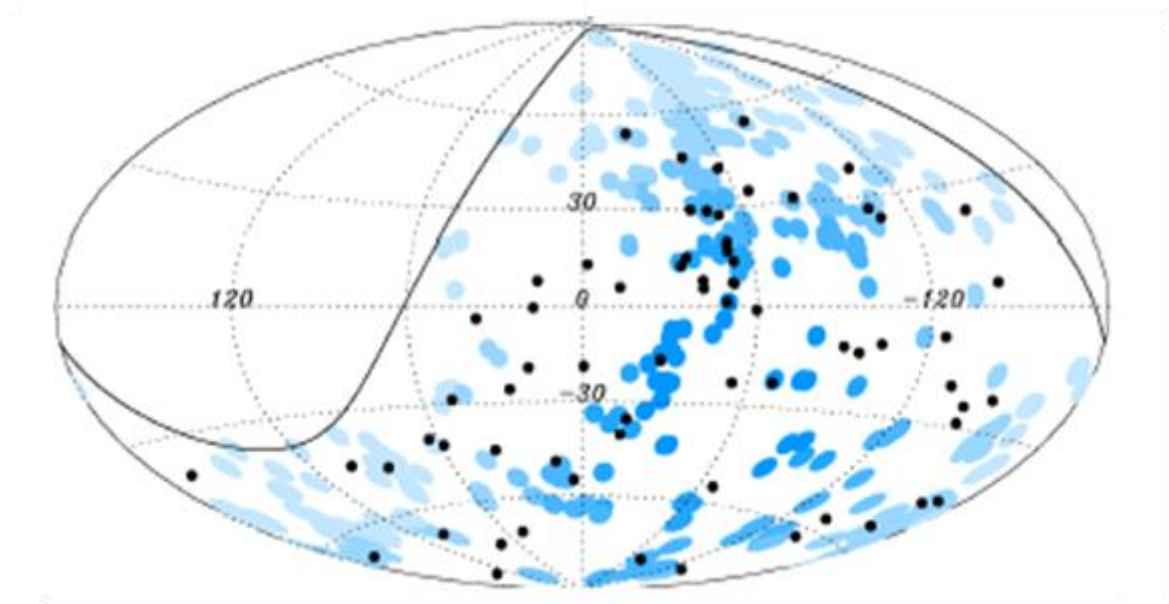


図 2.4 Auger 観測所で観測された $5.5 \times 10^{19}\text{eV}$ のエネルギーを持つ最高エネルギー宇宙線、69event の到来方向分布と近傍の AGN の位置を図に示している。マップは銀河座標である。

2-3-2 化学組成

空気シャワーのサイズは1次宇宙線のエネルギーや化学組成に依存する。空気シャワーの縦方向分布は、大気蛍光望遠鏡により測定しており、横方向分布は地上検出器により集められた2次宇宙線の情報から決定している。いずれも二次粒子の測定により空気シャワーを捉えている。宇宙線の化学組成を精度良く測定する方法は、空気シャワーの最大発達深さ $X_{\max}$ を測定することが重要になってくる。ただし、1次宇宙線の確認は空気シャワーのランダムな現象であるため、単一イベントで推定するのは不可能である。そのため、シャワー最大発達の平均深さをエネルギー毎に調べる。陽子や他の核光子は起源からの伝搬の際、磁場の影響を受けにくいからである。しかし、不運にも図 2.5 の解析結果では、高いエネルギーになる程、重い原子核が支配的である。しかし、宇宙線の測定結果とシミュレーションの結果は一致していない。この結果を明らかにするためには十分な統計量が必要である。

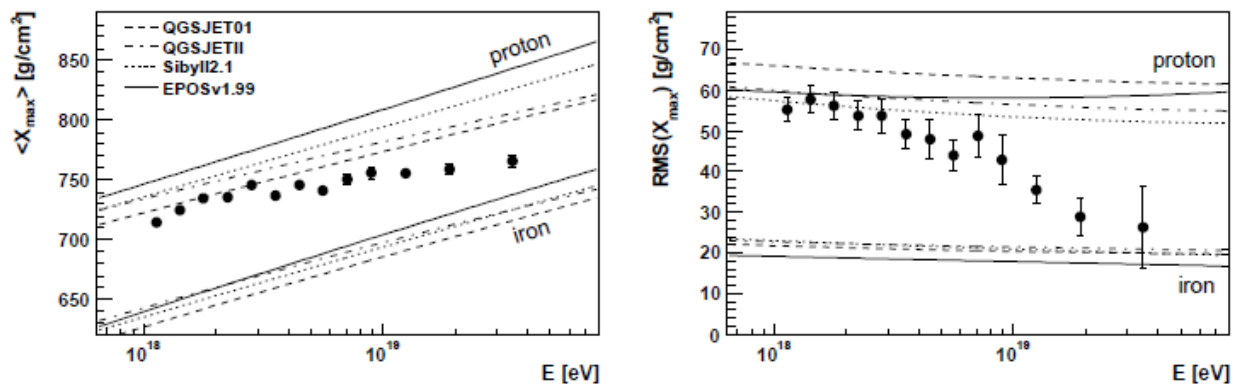


図 2.5 化学組成

2-3-3 将来の展望

40 年以上の宇宙線観測による科学研究が進められているが、いまだに有意な結果を出せていない。ここ数年の研究成果はさほど進んでおらず、統計量も思うように伸ばせていない。そこで近年、空気シャワー中の電子と大気分子との相互作用により放射される電波を利用した観測方法が提案されている。現在までに確立されている電波観測方法は、シャワー粒子による大気蛍光を検出する方法である。しかし、この方法では観測時間に限りがあることから Duty-cycle が約 15% しかない。空気シャワーの観測方法として提案された電波放射を検出に向けた、電波望遠鏡の基礎実験が世界中で盛んである。この方法は、波長帯を選べば、大気や雲による影響がほとんどなく、Duty-cycle が 100% の検出器の開発が可能になる。この手法が確立できれば、最高エネルギー宇宙線の観測において画期的な進展が期待できる。

第 3 章 分子制動放射(MBR)

3-1 分子制動放射 (MBR) 検出の概要

MBR を空気シャワー観測に応用する方法は Gorham により提案された。提案された当初、高エネルギーニュートリノが生成する空気シャワーからのチェレンコフ電波による検出を目指しており、MBR 測定に時間を取れなかったが、いくつかの実験を行った後 2008 年にこの提案の詳細が論文に公表された。特に反射のない Faraday Chamber の中に 2 通りの電子ビームを照射し、Chamber 中のマイクロ波を測定した。この測定により検出されたマイクロ波は MBR によるものと解釈された。

MBR は電子が中性原子により散乱されることにより、GHz~THz 領域の電磁波を発する現象である。この現象は中性原子の中にある希薄なプラズマで起こるよく知られた過程である。理論計算より空気シャワーからの MBR の信号強度を計算する解は求まっていない。このため複数の過程において計算しなければならない。特に電子の散乱過程で、小さな距離のスケールではコヒーレントな過程が期待されている。このコヒーレントな成分は空気シャワーのエネルギーが上がれば大きくなると考えられている。Gorham による電子ビームの測定は空気シャワーの大きさの 2 乗に比例するスケールで放射が強くなることを示唆しており、彼らの測定エネルギーではコヒーレントな成分が支配的であると解釈されている。

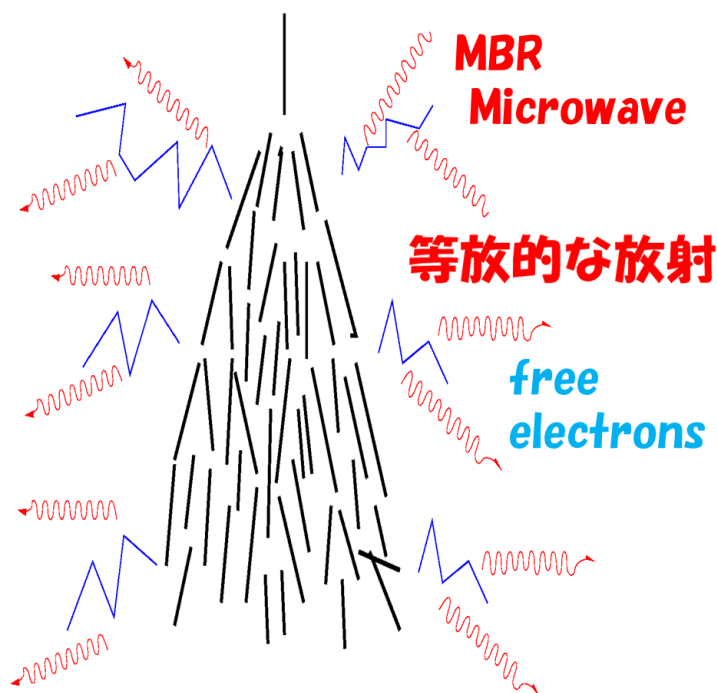


図 3.1 大気分子制動放射 (MBR)

3-2 分子制動放射 (MBR) の原理

MBR は弱くイオン化された状態の自由電子と大気分子との相互作用により生成される。弱くイオン化された状態は、最高エネルギー宇宙線による空気シャワー中の電子と大気分子との衝突により、弱いプラズマ状態を形成する。そのプラズマ中の自由電子が大気分子の影響で散乱されて、マイクロ波放射するこの過程を MBR と呼ばれている。MBR は古典的な熱放射として扱われており、10eV 以下から来る放射が等方性を持ったマクスウェルの速度分布に従うと仮定された。電子と中性分子との衝突を古典的に扱うと制動放射の強度 $\eta_\omega(u)$ は以下の式で表わされる。

$$\eta_\omega(u) = \frac{e^2}{16\pi^3\epsilon_0 c^3} u^2 v_{en}(u) \zeta(v_{en}, \omega)$$

ω はマイクロ波の角周波数、 u は電子の速度、 v_{en} は電子と中性電子の衝突頻度、 $\zeta(v_{en}, \omega)$ はプラズマ分散である。電子の速度分布が等方・定常であると仮定すると、プラズマ分散は以下の式で表わされる。

$$\zeta(v_{en}, \omega) = \frac{1}{1 + (v_{en}(u)/\omega)^2}$$

ここで $\xi \geq 1$ はコヒーレント係数で、プラズマ中の電子のコヒーレントな成分による効果を表す。この効果は電子の速度分布がマクスウェル分布に従うとき、 $\xi=1$ でコヒーレント成分が増えると、分布がベキ関数になり、 ξ の値が大きくなる。ここで、 $\xi=1$ の場合を考える。 $v_{en}(u)$ は大気密度と電子の速度に依存するが、5km 上空だと 2eV の電子で $v_{en}(u)=3\text{THz}$ 、室温程度の電子 ($E=k_B T$ より $3 \times 10^{-3}\text{eV}$) で $v_{en}(u)=40\text{GHz}$ になる。このときそれぞれ $\xi=5 \times 10^{-5}$ 、0.4 になる。つまり電子の温度により ξ が極端に変わってしまう。したがって、MBR から気体される放射強度は解析的に計算することは困難で、実験により測定しなければならない。

3-3 コヒーレント成分

1つの電子が作る電場は MBR 理論により正確に計算できるが、複数の電子が作る電場はコヒーレントな電子の速さに大きく依存する。このコヒーレントな成分の量は空気シャワーの構造や電子ビームの中の電子・光子の相関や他のプラズマの性質により異なるが、放射に関わる荷電粒子が作る電場のベクトル和により計算できる。この電場を以下の式より表わす。

$$\vec{E} = \sum_{j=1}^{N_e} \vec{E}_1(\mathbf{v}) \exp(-i \vec{k} \cdot \vec{x}_j)$$

ここで、 N_e はプラズマの電子数、 $\vec{E}_1(\mathbf{v})$ は1つの電子が放出する電場、 $\mathbf{k}$ は放射の波数ベクトル、 $\vec{x}_j$ は j 番目の電子の位置ベクトルである。単位面積あたりの全放射強度 P/A はポインティングフラックス S_{tot} により以下の式で表わされる。

$$P/A = |S_{\text{tot}}| = |\vec{E}|^2 / Z_0$$

Z_0 は自由空間のインピーダンスで約 377Ω である。完全にコヒーレントな状態を仮定すると、 $\mathbf{k} \cdot \mathbf{x}$ は全て同じ値になるので、 $|\vec{E}| = N_e |\vec{E}_1|$ となる。

ここで1つの電子から放出される放射強度を P_1 とすると、 $P_{\text{coh}} = N_e \cdot P_1$ となる。 N_e は空気シャワーのエネルギーに比例するので、 P_{coh} はシャワーのエネルギーの2乗に比例することになる。コヒーレントな成分がなく電子の速度が完全にランダムなとき、各電子からの放射はお互いに弱め合うので、全放射量は P_{coh} の2乗根に比例する。すなわち、 $P_{\text{coh}} = N_e \cdot P_1$ である。今、 N_e 個の電子を M 個のサブグループに分けて μ_e 個の電子からなるとすると、 $N_e = M \mu_e$ である。 M 個の電子はコヒーレントであるとし、 M 個のサブグループ同士はランダムであるとする、 μ_e 個の電子が放出する放射強度は $P_\mu = \mu_e^2 \cdot P_1$ である。この一部がコヒーレントな系からの放射強度 P_{part} は $P_{\text{part}} = M \cdot \mu_e^2 P_1$ で表わされる。このとき、この系が完全にインコヒーレントだったときの放射強度 P_{incoh} と P_{part} との比は次式で表される。

$$\frac{P_{\text{part}}}{P_{\text{incoh}}} = \frac{M \mu_e^2 P_1}{N_e P_1} = \mu_e.$$

実際の空気シャワーではエネルギーと共にプラズマの密度が高くなるので、 μ_e が大きくなると考えられている。したがって、空気シャワーの放射強度はエネルギーがあげるにつれてエネルギーの1乗より大きく増えるはずである。

3-4 MBR の利点

MBR による GHz の信号の測定は、シャワーの縦方向発達観測の最も効率のよい方法になる可能性がある。衛星通信のために開発された技術によりパラボラアンテナを使った電波望遠鏡を安く作ることができる。例えば、汎用の 3~4m 口径のアンテナに low-noise blocks、low-noise pre-amplifier、さらに伝送信号の周波数を 1~2GHz にする mixer modules をつけば 10km の距離に落ちた 10^{19}eV 以上のエネルギーの空気シャワーを検出することが期待される。

空気シャワーがアンテナの視野を通過するとき、放射は電子のプラズマが熱せられている間続く。この時間 (thermalization time) τ_{th} は電子と大気分子の弾性・非弾性衝突と冷却時間により決まるが、乾いた 1 気圧の大気の場合、 $\tau_{\text{th}}=10\text{ns}$ である。これは大気蛍光の放射と同じ程度の時間である。MBR のこのシャワー軸に沿って短時間に放射される性質により、大気蛍光と同様に、空気シャワーの縦方向発達の測定が可能になる。複数の Pixel で測定する電波観測 (Multi-Feeds) は干渉計が発達しているので一般的ではないが、サブミリ電波天文学では確立した手法である。

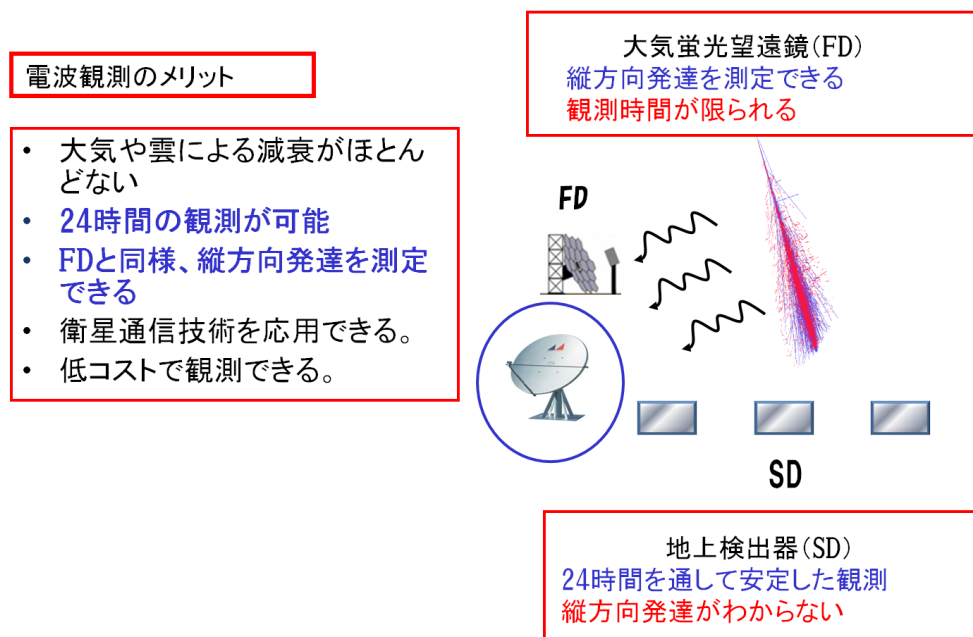


図 3.2 空気シャワーの観測技術

3-5 MBR を応用した電波実験グループの現状

MIDAS

MIDAS はシカゴ大学で MBR 検出を目的とした基礎実験をしているグループである。

MIDAS で使用している電波望遠鏡は 4.5m のパラボラアンテナに、C バンド

(3.4GHz-4.2GHz) の受信機 53 個を並べて取り付けしている。望遠鏡の視野は受信機の仰角の位置に依存するが、合計で $20^{\circ} \times 10^{\circ}$ である。受信機は商業用の通信衛星テレビの受信に使用する LNBF を使用している。53ch のアナログ信号は、coaxial 社の検波器を通して出力される。検波器は $-55\text{dBm} \sim 0\text{dBm}$ の範囲の信号を $2.1\text{V} \sim 0\text{V}$ の DC 信号として出力している。検波器の典型的な反応速度は、 100ns である。検波器から出力された信号は、FADC で処理される。FADC の分解能は 12bit で処理速度は 20MHz である。この望遠鏡は $1.15 \times 10^{19}\text{eV}$ の空気シャワーであれば、検出器から最大 15.2km 離れた位置まで検出できる。



図 3.3 シカゴ大学の MIDAS グループの 4.5m パラボラアンテナに 53ch のカメラを取り付けている。

AMBER

AMBER グループは、2.4m 口径のパラボラアンテナに、C バンド(3.4-4.2GHz)と Ku バンド(10.95-14.50GHz)をそれぞれ 2 つずつ使用して、2 偏光測定できる。視野は 30° である。受信機で捉えた信号は low-noise black(LNB)を通して 2GHz までダウンコンバートして検波器に出力している。AMBER 観測システムは、南 Auger 観測所の地上検出器との連動実験により、空気シャワー検出を目指している。



図 3.4 AMBER アンテナ

EASIER

EASIER グループは Auger 観測所の地上検出器にアンテナを取り付けて、空気シャワーから MHz と GHz の両方の周波数帯の放射を測定するシステムを構成している。各々のアンテナの視野は天頂角 60° 付近をカバーしている。アナログ信号は南 Auger 観測所の SD 検出に使用している 40MHz サンプリングの処理速度を持った DAQ システムで処理を行う。



図 3.5 EASIER グループは GHz 帯のアンテナを Auger SD に取り付けている。

CROME

CROME 実験はチェレンコフ放射と MBR からの放射の検出を目指すグループである。アンテナのセットアップには、1.0~1.8GHz、3.4~4.2GHz(C-band)、10.7~11.7GHz(Ku-band)の範囲の周波数領域を受信できるマイクロ波受信機で構成している。1.0~1.8GHz の受信機は口径 2.3m のアンテナに取り付けている。また、口径 3.4m のアンテナに C-band の受信機を 9 個取り付け、そのアンテナを 2 つ使用している。口径 0.9m のアンテナには、Ku-band の受信機を取り付けている。このグループは KASCADE-Grande 実験と連動させた測定を行っている。KASCADE-Grande で測定された空気シャワーのイベントと CROME の電波望遠鏡の測定データとの coincidence をとっており、装置のトリガーは KASCADE-Grande でとっている。



図 3.6 CROME 実験

第 4 章 電波望遠鏡による観測システムの開発

甲南大学の屋上に 12 台の BS アンテナを設置した。このアンテナを用いた空気シャワーから放出されるマイクロ波の検出を目的とした電波望遠鏡の開発に取り組む。まず、この電波望遠鏡を構成している通信機器について説明する。

4-1 電波望遠鏡で使用した各種機器

4-1-1 BS アンテナ



図 4.1 甲南大学の屋上に設置している 12 台の BS アンテナ

1.2m 口径のアンテナに垂直偏波と水平偏波の電波を測定できる受信機を 1 つ取り付けている。収差による干渉がなく、短波長観測を可能にして感度を上げることが狙いである。また、12 台のアンテナを並べることで、広い視野を確保する。

望遠鏡台数	12台
アンテナ口径	1.2 [m]
受信周波数	12.25～ 12.75 [GHz]
受信機1台の視野角	1.5 [degree]
Gain	77 [dB]
Ch数	24ch
FADCの信号処理速度	65MS/s

4-1-2 検波器

今回の観測システムでは、ZX47-60-S+(Mini Circuits 社)の検波器を使用している。



Power detector/ZX47-60-S+ (Circuits社)
帯域:10MHz-8GHz
パルス応答: 400ns
出力電圧: 2.1-0.6
高周波信号をDC成分に変換して出力

図 4.2 検波器

4-1-3 Bias Tee

バイアスティーは受信機からの信号をインピーダンス変換する。

また、バイアスティーは検波器とブースターに電力を供給する役割も担っていて、高周波成分と電力成分を分ける必要があるため、出力側に DC カッターが取り付けられている。



図 4.3 Bias Tee

4-2 検波 BOX 作成

電力供給を安定して行うために BS アンテナの裏にプラスチック製の検波 BOX を取り付け
た。この BOX 内で Bias-Tee と検波器に電力を配給している。各機器の使用電圧は、Bias-Tee
で 15V、検波器で 5V である。この検波 BOX を使用することで、天候の影響を受けずに 24
時間稼働できる。このシステムを合計 4 セット作成した。



図 4.4 検波 BOX

4-3 観測システムの構成

今回開発した電波望遠鏡について説明する。観測システムの設計はBSアンテナを12台並べて合計24chのアナログ信号を測定できるように組んだ。1.2口径のBSアンテナに12.25GHz-12.75GHzの受信機を1つ取り付けている。1つの受信機で2偏波の信号を受信できる。受信した信号は受信機に取り付けているコンバータによって0.95MHz-1.45GHzにダウンコンバートして信号を出力して、6mの同軸ケーブル（インピーダンス75Ω）で受信機から出力信号を伝送する。受信機から出力されたアナログ信号は検波BOX内の検波システムでDC信号に変換して同軸ケーブル50m（インピーダンス50Ω）で伝送したのち、FADCで信号処理をして信号波形を観測する。また、検波器では-60dBm~10dBmの範囲のアナログ信号を2.1V-0.6Vの信号範囲で出力する。典型的な信号の反応速度は400nsである。検波器を通して出力された24chの信号は65MHzサンプリングの信号処理速度を持つ、VME規格のFADCモジュールで信号処理を行い、Optical Linkを通してPCに信号データを蓄積する。

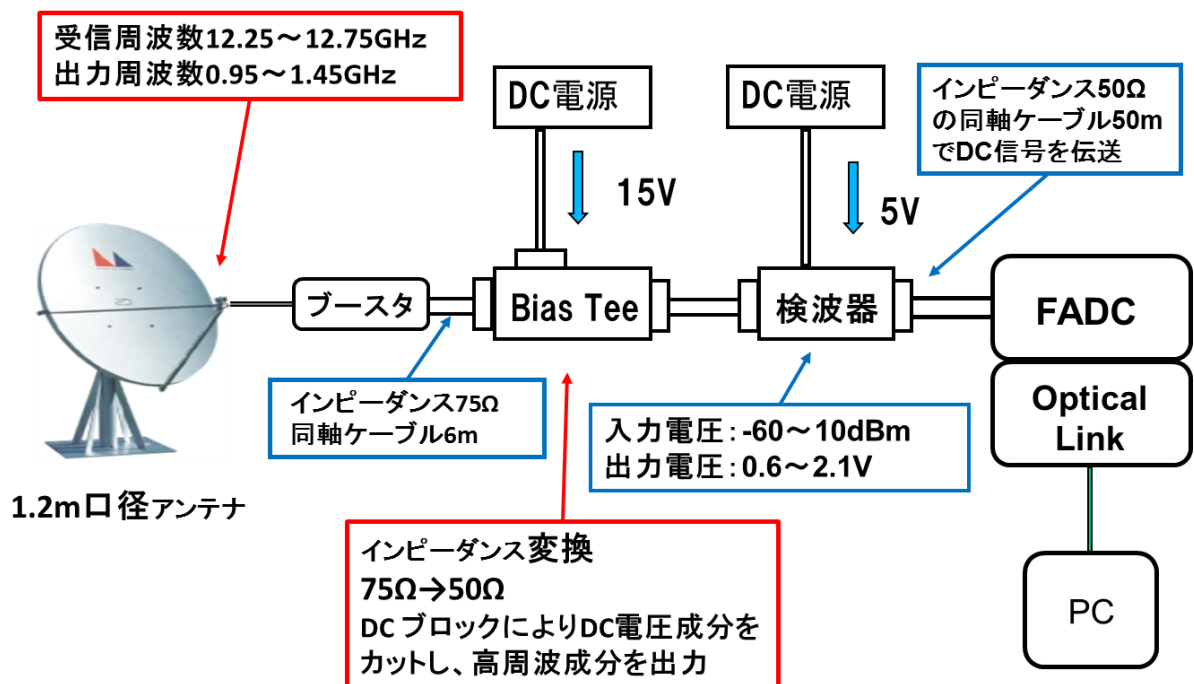
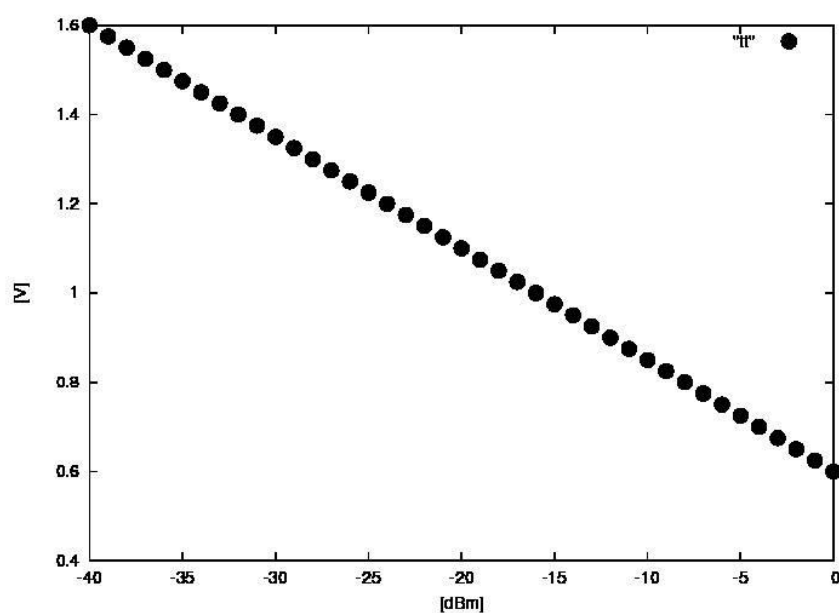
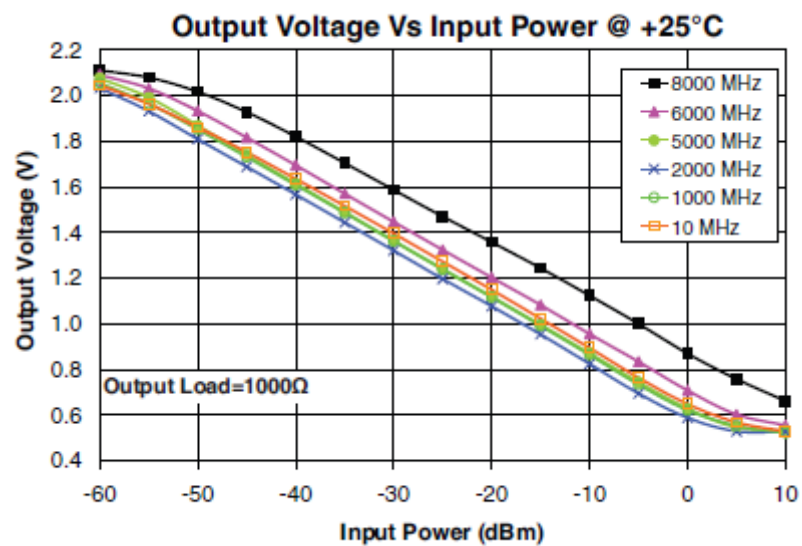


図 4.5 観測システム

4-4 検波器の性能

検波器の入力信号と出力信号の関係を示したものである。このグラフの 1000MHz の部分を次式で近似できる。



$$V_{out}[V] = -\frac{Pin[dBm]}{40.0} + 0.6$$

例えば、検波器に-40[dBm]の信号が入力された場合、出力では 1.6[V]の信号が出力されることになる。この検波器の性能を踏まえてノイズレベルの評価について後述する。

第 5 章 電波望遠鏡の性能評価

5-1 ノイズレベルの評価

現在、開発した観測システムで測定できる典型的な信号を図 5.1 で示す。

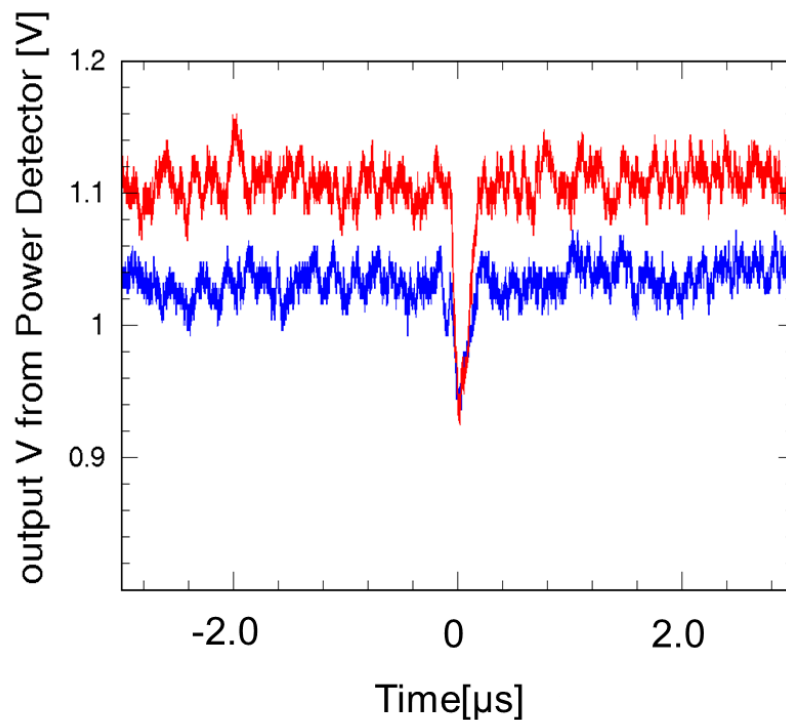


図 5.1 観測システム周辺のノイズ電波

このとき、DC レベルは 1.05V である。今回開発した観測システムのノイズレベルを計算して観測システムを評価する。まず、ノイズレベルは 1.05[V]であるが、これは検波器から出力された信号の値である。4-1-2 検波器の性能より、検波器の入力信号の大きさ $P_{in}[\text{dBm}]$ を算出すると、 $P_{in}=-18[\text{dBm}]$ になる。この信号をブースター、受信機で増幅された 77[dB] の分を考慮して、実際に受信機に入力されている信号の大きさ $F_{in}[\text{dBm}]$ を以下の計算により算出する。

$$F_{in}=P_{in}-77=-95[\text{dBm}]$$

ここで、以下の式より $-95[\text{dBm}]$ を $F_{in}[\text{W}]$ に変換して求めると、 $F_{in}[\text{W}]=3.0\times 10^{-13}[\text{W}]$ となる。

$$F_{in}[\text{dBm}]=10\log(F_{in}[\text{W}]/[\text{mW}])$$

観測システムの望遠鏡の視野を空気シャワーが通過した際に観測可能な、平均のシャワー長は以下の式で表すことができる。

$$L_{av}=R\Delta\theta[m]$$

ここで、 R はシャワーと望遠鏡との距離 ($R=10000[m]$) $\Delta\theta$ は望遠鏡のビーム幅 ($\Delta\theta=0.025[rad]$) である。このときの平均シャワー長は $L_{av}=250[m]$ となる。

この結果から電波望遠鏡の視野内で、空気シャワーからの平均放射時間を以下の式から求められる。

$$\Delta t=L_{av}/c [s]$$

したがって、我々の観測システムの視野を空気シャワーが通過した際の平均時間は $\Delta t=3.0\times 10^{-7}[s]$ となる。

我々の観測システムのノイズレベル $F_{in}=3.0\times 10^{-13}[W]$ と空気シャワーが通過した際の平均放射時間 $\Delta t=3.0\times 10^{-7}[s]$ の積をとると、ノイズレベルは以下の値になる。

$$S_{noise}=F_{in}\times \Delta t=2.5\times 10^{-19}[W\cdot s]$$

5-2 甲南大学周辺の電波環境

5-2-1 テスト観測

電波望遠鏡は1号機から3号機までの6ch分のシステムを稼働させた。このテスト観測の目的は、甲南大学周辺の電波環境を調べることである。屋上のBSアンテナを仰角40度で海側の方位に向けてテスト観測を開始した。トリガーは1号機の1ch（水平偏波）をAC結合回路に入れてDC成分を落とし、その信号をNIM規格のディスクリミネータモジュールに直接入力し、-130mV以下の波形を800mVのデジタル信号に変換して、それをデジタルオシロのトリガー用のchに入れている。



図 5.2 甲南大学屋上の電波望遠鏡

5-2-2 DC レベルの揺らぎ

図 5.3 はオシロスコープで見られる甲南大学周辺の電波波形である。検波器の出力電圧を時間の関数で示している。見やすいようにそれぞれのチャンネルの DC レベルを 0.2V ずつずらしている。実際の DC レベルはノイズに依存するが、この測定では 1.5V であった。トリガーは Tel1-V の信号を使っている。

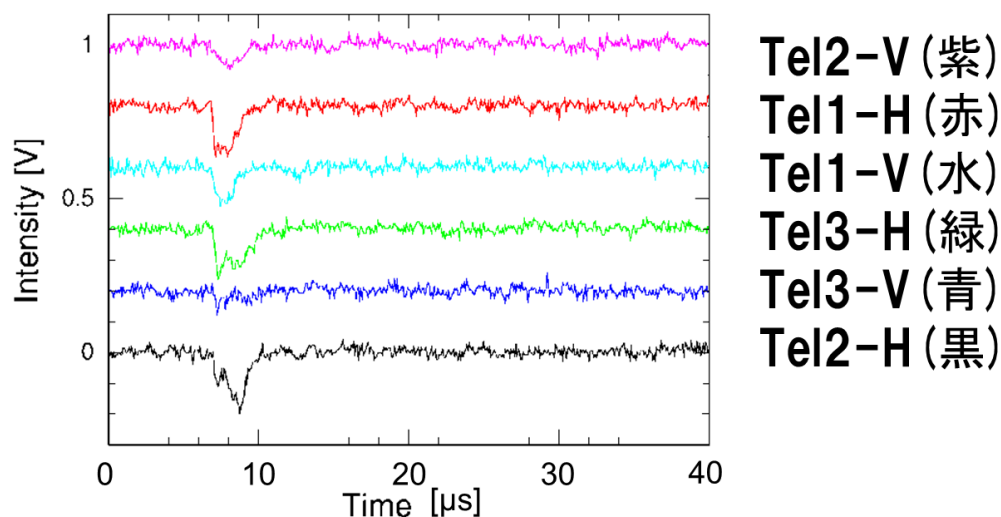


図 5.3 観測システム周辺の電波環境

図 5.4 は全チャンネルの DC レベルの揺らぎを示している。揺らぎの大きさは $1\sigma = 15\text{V}$ 程度であり、閾値電圧を 60V 程度にすれば十分安定した観測ができることが分かる。この値が検出できる信号の最小値になる。

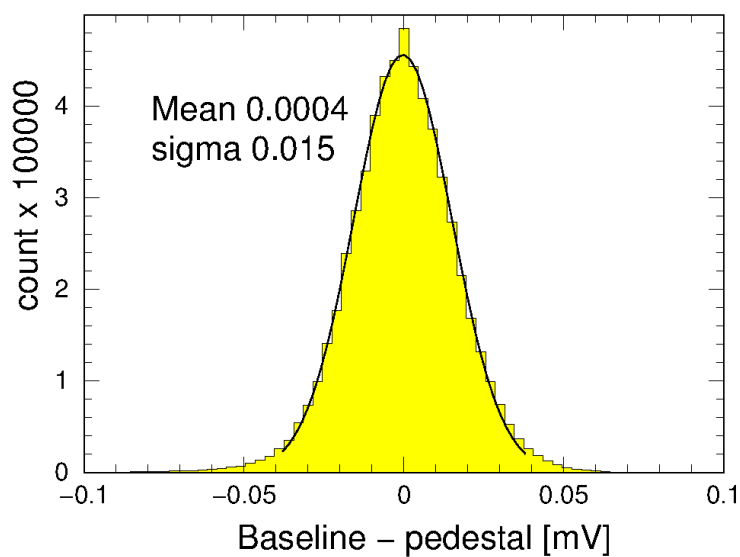


図 5.4 DC レベルの揺らぎ

5-3 ノイズ信号のイベントレートと周期解析

図 5.5 は、27 時間の測定データによる検出頻度を表している。一日を通して約 40event/min 程度の頻度で安定している。特に 24 時から 6 時にかけて一定の値を示している。電波源は特定できていないので、検出頻度が安定する原因を突き止められていない。これから人工的に生じるノイズと空気シャワー起源の信号を区別する必要がある。

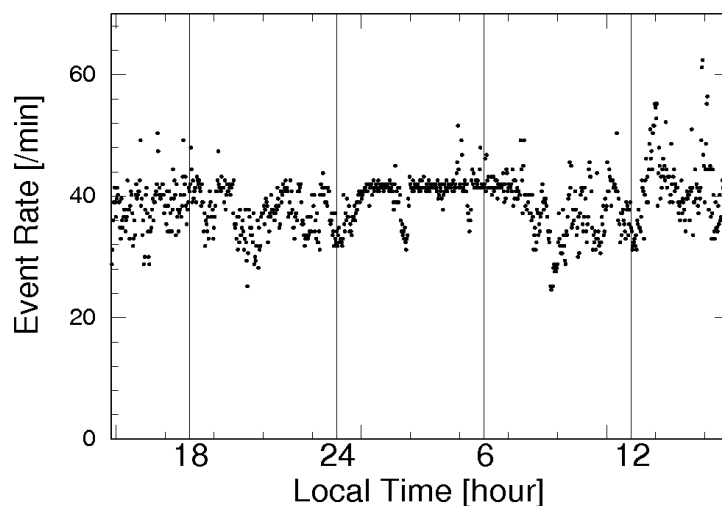


図 5.5 Event Rate の時間推移

図 5.6 は 27 時間の観測データを周期解析した結果である。オシロスコープでデータを観測していると、周期的な信号が多いように感じるが、実際に特定の信号は長続きしない。人工的に生じた電波は山や建物で反射されているため、様々な周期の信号が検出されている。

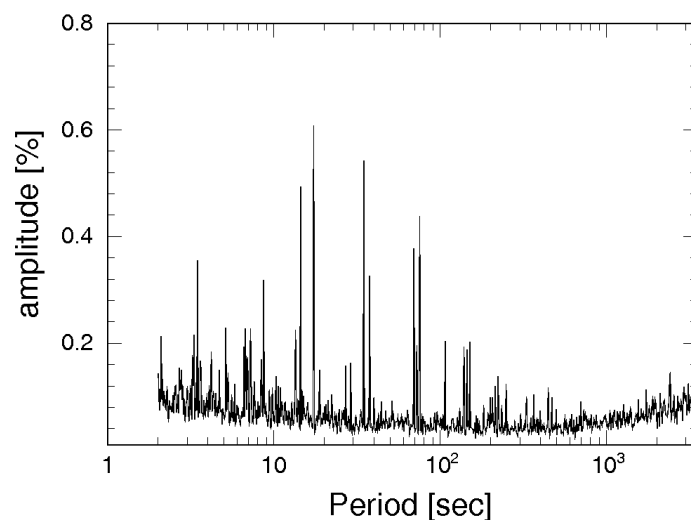


図 5.6 27 時間の観測データを周期解析した結果

5-4 シミュレーションによる性能評価

信号強度シミュレーション

電波望遠鏡の開発にあたりシステムの最適化を行うために性能評価シミュレーションコードを開発した。これにより開発段階にある電波望遠鏡の性能を評価する。

この信号強度シミュレーションは **Goham** の電子ビーム実験の結果をもとに計算している。彼らはファラデーチェンバー内に加速させた電子を入射させて $3.36 \times 10^{17} \text{eV}$ に相当する電子ビームを使用した。この測定では空気シャワーの最大発達付近を 0.5m 離れた位置で測定していたことになる。測定した空気シャワーの放射長は 0.65m であった。このとき、測定で得られた最大の信号強度は $I_0=10^{-6}[\text{W/m}^2]$ であった。この測定での検出周波数帯域は $\Delta f_0 = \Delta \omega / 2\pi = 2.5[\text{GHz}]$ である。したがって、単位時間あたり、単位周波数あたり、単位面積あたりの信号強度 I_{f0} は、 $I_{f0}=4 \times 10^{-16}[\text{W/m}^2/\text{Hz}]$ である。このビー見実験により求められた放射減衰時間は $\tau=10^{-8}[\text{s}]$ であった。つまりシャワーの光っている部分は $L_\tau = c \cdot \tau [\text{m}] = 3\text{m}$ の棒状の光の矢が光速で走っていることになる。この結果をもとに、我々の開発するシステムを想定した場合の空気シャワーからの信号強度が計算により推定できる。**MBR** の強度は大気密度と比例していると想定している。想定された大気密度 ρ は(1)式で表される。

$$\rho = \rho_0 \exp\left(-\frac{z}{H}\right)$$

ここで、 ρ_0 は地上の大気密度、 H は大気の深さ、 z は観測された空気シャワーの最大発達深さの高度を示している。電子ビーム実験ではチェンバーの大きさの 0.65m しか測定できなかったので、この分を補正して考えると $3.36 \times 10^{17}[\text{eV}]$ の空気シャワーから検出される信号の大きさ $I_{f,\text{exp}}$ は(2)式で表される。

$$I_{f,\text{exp}} = I_{f0} \frac{c\tau}{0.65} \frac{\rho}{\rho_0} \left(\frac{R}{0.5}\right)^2 [\text{W/m}^2/\text{Hz}]$$

ここで、 R は検出器と空気シャワーの最大発達した位置との距離を示す。空気シャワーのプラズマサイズは縦方向発達に依存し、カイザーヒラス関数に従った発達を想定した。

$$N_e(X) = N_{\max} \left(\frac{X - X_1}{X_{\max} - X_1} \right)^{\frac{X_{\max} - X_1}{\lambda}} \exp\left(-\frac{X_{\max} - X}{\lambda}\right)$$

ここで、 X は空気シャワーの大気深さ、 X_0 は大気に入射した宇宙線の初期反応位置で $10[\text{g}/\text{cm}^2]$ を想定している。 X_{max} は空気シャワーが大気で最大発達位置で (4) 式を想定した。

$$X_{\text{max}} [\text{g}/\text{cm}^2] = 300 \times \log_{10} \left(\frac{E}{1[\text{eV}]} \right) + 1800$$

ここで、 E は宇宙線のエネルギーである。 λ は $700[\text{g}/\text{cm}^2]$ を想定している。観測する信号強度 I_{obs} は(5)式で表される。

$$I_{\text{obs}} = I_{f,\text{exp}} \times N_E \times \left(\frac{E}{3.36 \times 10^{17}} \right)^n$$

ここで、 n はコヒーレントな成分の量で決まる値である。シャワー中の電子がコヒーレントなら 2、ランダムなら 1、になる。このシミュレーションでは $n=1$ を想定した。電波望遠鏡のビーム幅 $\Delta \theta$ は(6)式で表される。

$$\Delta \theta = 1.22 \times \frac{\lambda}{D}$$

ここで、 D は BS アンテナの口径 (1.2m) λ が観測波長 (0.025m)。このシステムでの視野内でのシャワー長は(7)式で示す。

$$L_{\text{sh}} = \left(\frac{R \Delta \theta}{\sin(x)} \right)$$

ここで、 X は BS アンテナの位置とシャワー軸との角度である。期待される受信機の信号強度は(8)式で示す。

$$S = I_{\text{obs}} \times \eta \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \times \frac{L_{\text{sh}}}{c} \times \Delta f$$

ここで、 η は受信機の効率、 Δf は受信機の周波数帯域。MBR の最低検出強度 I_{sh} は以下の(9)式で推定した。

$$I_{\text{th}} = \frac{k_B T_{\text{sys}}}{\eta \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \sqrt{\frac{L_{\text{sh}}}{c} \Delta f}}$$

ここで、 T_{sys} は DAQ システムと BS アンテナのシステム温度である。

上記の方程式をもとに、開発した電波望遠鏡の性能評価シミュレーションを行った。これは 10^{16} - 10^{20} eV の空気シャワーが電波望遠鏡の視野を垂直に通過した際のシミュレーションである。電波望遠鏡はこのとき、 $\eta = 0.8$ の 1.2m 口径の BS アンテナと受信周波数 12.5GHz を想定している。

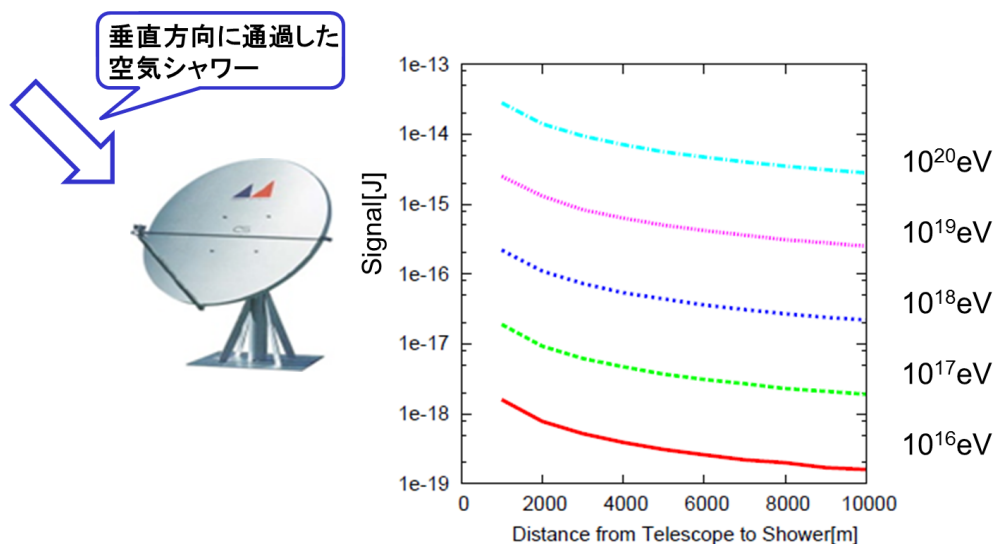


図 5.7 は望遠鏡の視野を垂直に通過した空気シャワーと望遠鏡の距離の信号強度を示している。この観測システムのノイズレベルとシミュレーション結果を比較した。この観測システムのノイズレベルは最低検出感度を満たしているのではないかと考えられる。したがって、この電波望遠鏡は 10^{17} eV 以上の空気シャワーであれば、10km 先まで検出可能であると推定される。

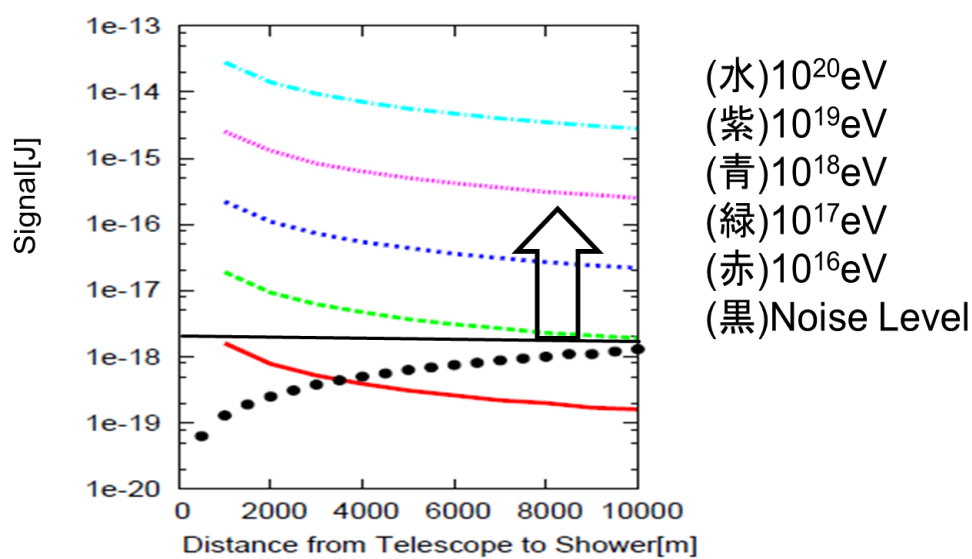


図 5.7 ノイズレベルと開発シミュレーションの比較

第 6 章 研究の成果と今後の計画

研究成果

空気シャワーから放出されるマイクロ波を検出するための電波望遠鏡の開発を行った。
この電波望遠鏡は 10^{17}eV 以上であれば、空気シャワー測定が可能であると考えられる。

今後の計画

電波望遠鏡を 12 台同時に稼働させて 24ch 分の信号を常時観測できるようにする。
人工的に生じる電波と空気シャワーから放出されるマイクロ波を区別する。

参考文献

Observations of Microwave Continuum Emission from Air Shower Plasmas
MBR (ICRC2011)

宇宙線物理学 小田稔

シリーズ現代の天文学 第 16 巻 宇宙線の観測Ⅱ 電波天文学

シリーズ現代の天文学 第 17 巻 宇宙線の観測Ⅲ 高エネルギー天文学

謝辞

電波望遠鏡の開発を進めるにあたり、教授の方々には適切な御指導、御協力を頂きました。
特に山本常夏准教授、飯島さんからは宇宙線や電波望遠鏡の開発に必要な知識をはじめ、
多くのことを教えて頂きました。また、梶野教授からもたくさんの御指導、御協力をして
頂き、同研究室の学部生、大学院生の方にも手伝って頂きました。皆さんのおかげで、こ
の論文を書くことが出来ました。本当にありがとうございました。