

テレスコープアレイ実験における
FD DAQシステムの開発

井口 貴裕

04M01032

東京工業大学

大学院理工学研究科 基礎物理学専攻

指導教官

垣本 史雄

2006年3月17日

目次

第 1 章	最高エネルギー宇宙線	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	宇宙線の加速	3
1.2	空気シャワー現象	5
1.3	空気シャワー発達	5
1.4	空気シンチレーション光による空気シャワー観測	7
1.5	シンチレーション光	7
1.6	光の吸収、散乱、ノイズ	7
1.6.1	空気シャワー観測	9
1.7	最高宇宙線エネルギー起源モデル	11
1.8	最近までの観測結果	16
1.9	最高エネルギー宇宙線の将来	18
第 2 章	望遠鏡アレイ実験	20
2.1	望遠鏡アレイ実験の目標	20
2.2	望遠鏡アレイ実験概要	21
2.2.1	Fluorescence Detector	22
2.2.2	Surface Detector	33
第 3 章	大気蛍光望遠鏡 DAQ システムの開発	35
3.1	大気蛍光望遠鏡 DAQ システムの概要	35
3.1.1	Network Shared Memory	36
3.2	NSM を使用した中央制御システムの開発	39
3.2.1	Run Control に要求される条件	39
3.2.2	Run Control の開発手法	39
3.3	データ収集システムの開発	42
3.3.1	データ収集システムに要求される条件	42
3.3.2	データ転送システム開発手法	42
3.4	Slow Control システムの開発	44
3.4.1	Slow Control システムに要求される条件	44
3.4.2	Slow Control システムの開発手法	44
3.5	ユーザインタフェースシステムの開発	46
3.5.1	ユーザインタフェースに要求される条件	46
3.5.2	遠隔操作システムの開発手法	46
3.5.3	完成したユーザインタフェースの機能と概観	48

第 4 章	DAQ システムの性能評価	56
4.1	DAQ レートの性能評価	56
4.1.1	DAQ の目標	56
4.1.2	ファーストイーサネット試験	58
4.1.3	ギガビットイーサネット試験	63
4.1.4	DAQ レートの性能試験の結論	68
4.1.5	DAQ レートに関する今後の課題	69
4.2	YAP、Xe flasher を使用した測定データの検証	70
4.2.1	Xe flasher イベントの取得	70
4.2.2	YAP イベントの取得	72
4.2.3	結論	72
第 5 章	総括	73
5.1	まとめ	73
5.2	今度の課題	73

abstract

It is predicted that ultra high energy cosmic rays(UHECRs) with energies above $E=10^{20}$ eV can't reach the earth from distances greater than 50 Mpc away due to interaction with cosmic microwave back ground radiation. Therefore it has been expected that there is a termination of the energy spectrum of UHECRs around $E=10^{20}$ eV observed at the earth, known as GZK cut-off. On the other hand, the AGASA group reported 11 events with super GZK energies. Although several theoretical models have been proposed to explain the AGASA results. The GZK cut-off problem still remains the most significant issue in cosmic ray astrophysics. It is required to determine the energy spectrum with more accuracies both in energies and in statistics.

From these background, the Telescope Array (TA) experiment, a Japan-US collaboration, is now constructing air shower detectors to observe UHECRs in the desert of Utah, USA. It is purpose that we make existence of UHECR exceeding this limit clear and find out the origin source of UHECR. This experiment is consisted of two kinds of detectors, those are air fluorescence detectors(FDs) and a surface detector array(SD). The aperture of TA has 12 times higher sensitivity than AGASA.

This paper describes the development method of the FD data acquisition(DAQ) and the monitoring system. For stable and accurate measurements of air showers, a full automatic DAQ system and monitoring-control system is required. FD DAQ system consists of four components: data taking system by using TCP/IP protocol, a user interface by using web application, the *slow control system* which controls and monitors environments, power generator, low voltage power supply, and so. and a central control system to control all the system.

For communications between the central control system and the other three parts, we employ the Network Shared Memory(NSM), developed at the Belle experiment. In the test run carried out at Utah in December 2005, the DAQ system worked successfully, including remote controls and monitoring of the FD from Tokyo via WWW. Therefore the FD DAQ system is now ready for the long-term observations, planned to begin in the first half of 2006.

第1章 最高エネルギー宇宙線

1.1 宇宙線

宇宙線とは宇宙空間から地球に入射するエネルギーの高い放射線のことである。1912年オーストリアの物理学者 V.F.Hess によって発見された。地球に入射する宇宙線を一次宇宙線、それが地球の大気中の原子核と相互作用して生み出した宇宙線を二次宇宙線と呼ぶ。

宇宙線はあらゆる方向からほとんど光と同じ速さで降り注いでいる。一次宇宙線の大部分は陽子で、陽子の他には5%程度の He の原子核、さらに少量の Fe に至るまでの高エネルギー原子核が含まれている。一次宇宙線の入射量 (flux) は地磁気の影響を受けるため緯度により異なるが、おおむね $1\text{cm}^2\ 1\text{sr}\ 1\text{sec}$ 当たり 0.1~1 個の割合である。

宇宙線のエネルギーは低い方は 10^8eV 程度、高い方は 10^{20}eV 程度まで観測されており、 10^{20}eV を超える宇宙線の報告もある。このような高エネルギー粒子の源が何であるか、宇宙のどこで加速されたのか、また、粒子がどのような機構で加速されたかについては現在でも未知の点が多く、宇宙線の研究における関心あるテーマの一つである。

1.1.1 宇宙線のエネルギースペクトル

観測された宇宙線エネルギースペクトルを図 1.1.1 に示す。 10^{15}eV 付近に knee と呼ばれるスペクトルの折れ曲がりがあり、 10^{19}eV 付近には ankle と呼ばれる折れ曲がりがある。太陽活動の影響を受けない 10^{10}eV を超えたエネルギー領域の宇宙線は、そのエネルギースペクトルがエネルギーの冪乗で減少するという近似式で表すことが出来る。knee より低いエネルギー領域の宇宙線 (CR I) は $\text{flux} \propto E^{-2.7}$ が非常に良い近似となっている。knee を超えたエネルギー領域の宇宙線 (CR II) の領域では ankle までは $\text{flux} \propto E^{-3.0}$ 程度である。ankle を超えたエネルギー領域では $\text{flux} \propto E^{-2.7}$ に戻る。 10^{20}eV を超えた領域での近似式はよく決まっていない。これはこのような宇宙線の頻度が極端に少なく、広い面積で何年も観測してもめったに得られない現象だからである。

宇宙線は銀河系の中で作られ、銀河磁場によって捉えられ、銀河系の中に完全に閉じ込められていると考えられている。 10^{18}eV を超える最高エネルギー領域の宇宙線 (CR III) は宇宙線粒子の曲率半径が銀河系の大きさに比べて無視できない程度になるため、その起源に関する異方性を示すことになる。

銀河磁場の強さは約 $0.3\mu\text{G}$ である。磁場の中では荷電粒子はらせん軌道を描く。その円軌道の半径 (ラーモア半径) は

$$r_L = \frac{mv}{ZeB} \quad (1.1)$$

で与えられる。ここで Z, e, v, m, B はそれぞれ、原子番号、素電荷、磁場に垂直な方向の粒子速度、質量、磁場の強さ、である。 10^{15}eV の陽子では、ラーモア半径は約 1 光年である。この値は

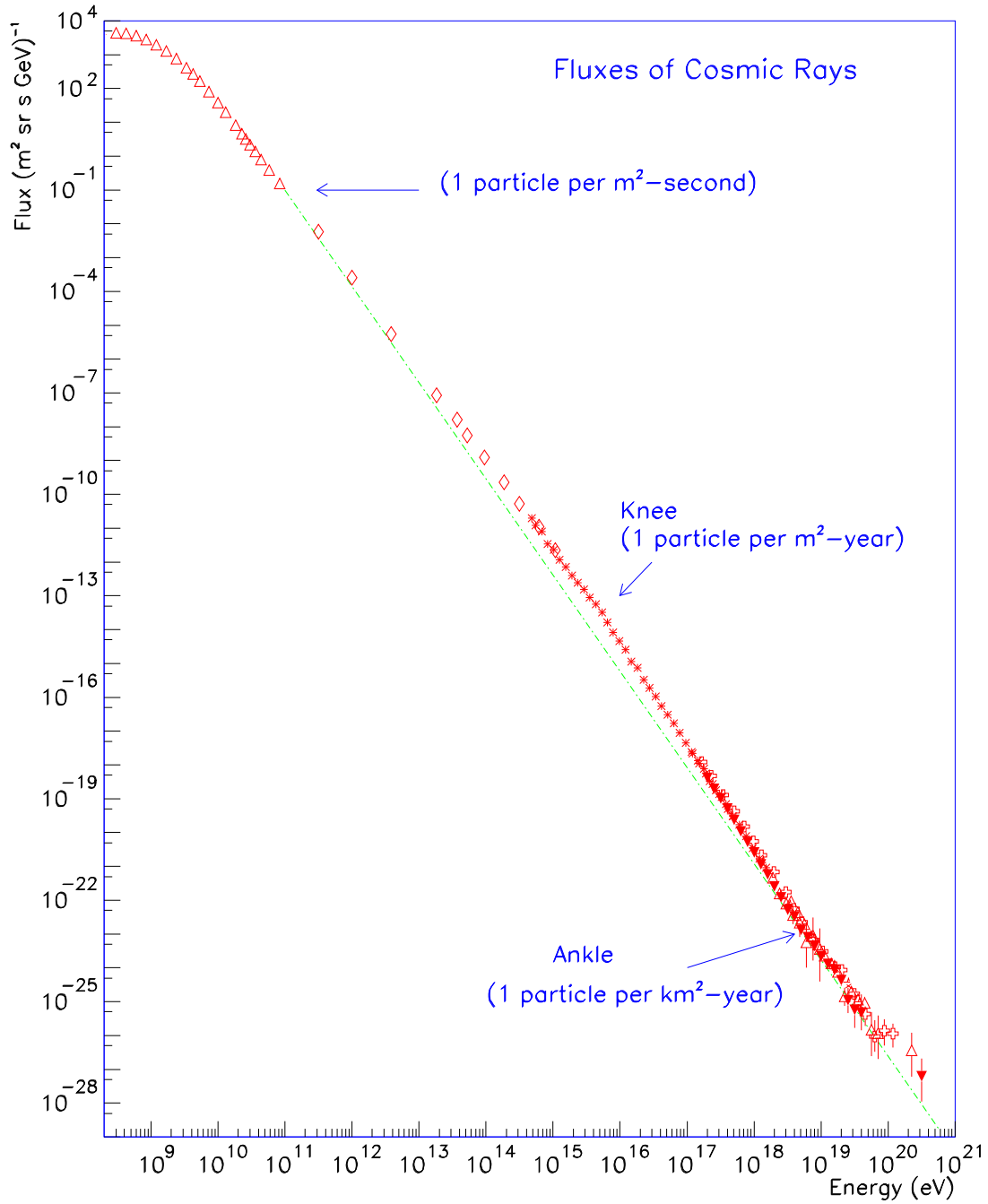


図 1.1: 1次宇宙線のエネルギースペクトル

銀河円盤の厚さよりは小さいが、無視できず、拡散運動の効果とあわせて、このエネルギーのあたりから宇宙線が銀河円盤の外へ逃げ出していく効果が現れてくる。knee 領域でスペクトルの折れ曲がりがあるのは、これ以上のエネルギーの宇宙線が銀河円盤の外へ洩れ出しているために数の減り方が急になっていると考えられている。別の考えもあって、 10^{15} eV 以上ではこれ以下のエネルギー領域とは別の機構で宇宙線が作られていて、その違いがスペクトルの違いとなっているとするものもある。これについてはまだ結論は出ていない。

10^{19} eV を超える宇宙線の場合、銀河磁場による曲率半径が銀河系の大きさに匹敵するようになり銀河系の中だけに閉じ込めておくことは出来なくなる。したがって、われわれの銀河の外、もっと活動的な銀河などでつくられた超高エネルギーの宇宙線がわれわれの銀河に飛び込んできているものであると予想されている。最高エネルギー領域の宇宙線の発生源が銀河系外であるとする銀河間の空間での 2.7K 宇宙背景放射との相互作用によるエネルギー損失が無視できなくなる。すると、地球に到達する宇宙線のエネルギーには上限が存在することになる。

1.1.2 宇宙線の加速

フェルミは宇宙線粒子が磁気雲と衝突を繰り返しながら星間空間を運動し加速されるモデルを考えた。銀河内の星間雲の存在等では磁場が強く運動している荷電粒子に対して magnetic mirror として作用する。形成されているところで粒子は反射する。今、速度 v 、エネルギー E 、運動量 p で走っている粒子に対して、この mirror あるいは反射体が速度 V で運動していて、正面衝突する場合を考える。mirror の静止系からみた粒子の衝突前のエネルギー E' は

$$E' = \gamma(E + Vp) \quad (1.2)$$

粒子の運動量 p' は

$$p' = \gamma \left(p + \frac{VE}{c^2} \right) \quad (1.3)$$

ここで γ はローレンツファクターで

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (V/c)^2}} \quad (1.4)$$

すると、実験系で見た衝突後の粒子のエネルギー E'' は

$$E'' = \gamma(E' + Vp') \quad (1.5)$$

$$\sim E \left(1 + \frac{2Vv + V^2}{c^2} \right) \quad (1.6)$$

となる。従って1回の衝突によるエネルギーの変化 ΔE は

$$\Delta E = E'' - E \quad (1.7)$$

$$= E \left(\frac{2Vv + V^2}{c^2} \right) \quad (1.8)$$

ここで $v \sim c, V \ll c$ を用いると

$$\Delta E = 2E \frac{V}{c} \quad (1.9)$$

が導かれる。正面衝突の頻度は $c+V$ に、追突の頻度は $c-V$ に比例し、追突の場合は $-2E \frac{V}{c}$ だけエネルギーを得るので、平均すると粒子のエネルギー変化 $\overline{\Delta E}$ は 1 回当たり

$$\overline{\Delta E} = \frac{(c+V) \cdot 2E \frac{V}{c} - (c-V) \cdot 2E \frac{V}{c}}{(c+V) + (c-V)} \quad (1.10)$$

$$= 2E \left(\frac{V}{c} \right)^2 \quad (1.11)$$

である。

これは、多数の重い玉が不規則に走り回っている空間に軽い玉を放り込んだ場合に、軽い玉がだんだんエネルギーを獲得していく様子と似ている。

宇宙線のエネルギー E が増加する様子は

$$\frac{dE}{dt} = \alpha E = 2E \left(\frac{V}{c} \right)^2 \frac{c}{l} \sim \frac{V^2}{cl} E \quad (1.12)$$

で表わされる。ここで、 l は雲の間隔で、 $\frac{c}{l}$ は、平均の衝突頻度を表わしている。宇宙線粒子が銀河に滞在する時間を τ とすると、定常状態は

$$\frac{\partial}{\partial E} (\alpha E N(E)) + \frac{N(E)}{\tau} = q(E) \quad (1.13)$$

であらわされる。左辺第一項は宇宙線のエネルギーロスによる減少分、 $N(E)$ はそのエネルギーを持った宇宙線数密度を表わし、右辺は宇宙線の発生率 ($q(E > E_0) = 0$ とする) 表わしている。この式から

$$N(E) = \frac{K}{E^\gamma} (E > E_0) \quad (1.14)$$

但し

$$\gamma = 1 + \frac{1}{\alpha \tau} \quad (1.15)$$

$$K = \frac{1}{\alpha} \int_0^{E_0} q(X) X^{\frac{1}{\alpha \tau}} dX \quad (1.16)$$

である。フェルミ加速モデルからエネルギーの冪乗関数のエネルギースペクトルが自然とでてくことは注目すべきである。

ただし、

$$\gamma = 1 + \frac{1}{\frac{V^2}{cl} \tau} \quad (1.17)$$

式 (1.17) に、星間空間について良く知られている値、 $V \sim 10^7$ cm/sec, $l \sim 3 \cdot 10^{20}$ cm, $\tau \sim 10^{14}$ sec などを代入すると、 $\gamma \sim 100$ となり、観測結果である $2 < \gamma < 3$ には合わない。

それに対して、かに星雲の中のプラズマの攪乱については $V \sim 10^8$ cm/sec, $l \sim 10^{17}$ cm, $\tau \sim 10^{11}$ sec 程度と考えられており、これによると $\gamma \sim 1$ となり観測結果とほぼ等しい結果を与える。このような超新星残骸の中のフェルミ加速を考える場合には宇宙線のエネルギーの源はガスの運動エネルギーである。

1.2 空気シャワー現象

極めて高エネルギーの宇宙線が大気中に入射して、多数の二次的粒子を発生し、それらが数百 m の範囲にわたってほぼ同時に地上に到来する現象を空気シャワー現象という。

高エネルギーの線が大気に入射すると、電子対生成により電子と陽電子をつくる。作られた電子と陽電子は bremsstrahlung により光子を生む。この二つの過程を繰り返すことにより、多数の電子、陽電子および光子が増殖される現象を、電磁カスケードと呼ぶ。

エネルギーの高いハドロンが大気中に入射すると、空気中の原子核と衝突して核相互作用を起こす。この結果多数の中間子を二次粒子として生成する。これらの二次粒子の一部は、さらに空気中の原子核と相互作用を繰り返し、三次、四次、と、中間子を生成してゆく。このように粒子数が膨大に増えていく過程を核カスケードと呼ぶ。この過程で生成される粒子の大部分は中間子である。このうち π^0 は、短い寿命 ($\tau = 0.84 \times 10^{-16}$ sec) で、2個の光子(2)に崩壊し、これらの光子は電磁カスケードを形成する。 π^\pm は $\tau = 2.60 \times 10^{-8}$ sec で

$$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu \quad (1.18)$$

のように崩壊する。 μ^\pm は $\tau = 2.20 \times 10^{-6}$ sec で

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e \quad (1.19)$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e \quad (1.20)$$

のように崩壊する。

以上のような電磁カスケードと核カスケードを繰り返し、多数の粒子が生成される現象を空気シャワー現象という。(図 1.2)

1.3 空気シャワー発達

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、個々の粒子のもつエネルギーは減少し、臨界エネルギー E_c 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が通過した物質質量に対する粒子数の変化は縦方向発達(longitudinal development)と呼ばれる。

エネルギーが E_0 の一個の光子が大気に入射した時に生じる空気シャワーの縦方向発達について、粒子の大気中での伝播の方程式を近似的に解いた次式が得られている。

$$N_e(t) \sim \frac{0.31}{\sqrt{y}} \exp \left[t \left(1 - \frac{3}{2} \ln s \right) \right] \quad (1.21)$$

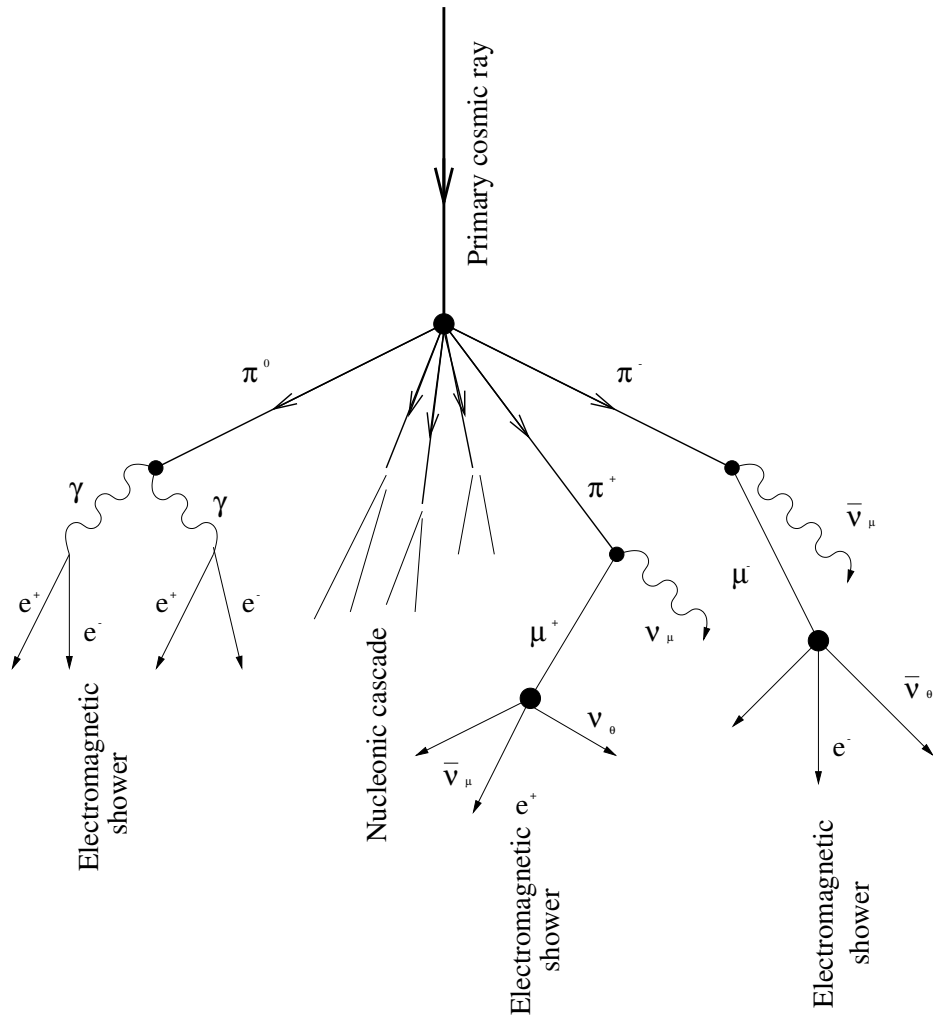


図 1.2: 空気シャワー発達の模式図

$$y = \ln\left(\frac{E_0}{E_c}\right) \quad (1.22)$$

$$s = \frac{3t}{t + 2y} \quad (1.23)$$

ここで t とはシャワーが通過した大気の厚さを、電子の大気中での radiation length(37.1g/cm²) を単位として表したものである。 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 が最大になる最大発達段階で $s = 1$ となる。

空気シャワーの横方向分布 (lateral distribution) と呼ばれる。電磁カスケードの横方向分布は、解析的な計算により得られている Nishimura-Kamata-Greisen(NKG) 関数

$$f(r, s) = C(s) \left(\frac{r}{r_M}\right)^{s-2} \left(\frac{r}{r_M} + 1\right)^{s-4.5} \quad (1.24)$$

を用いて、

$$\rho(r, s) = \frac{N_e f(r, s)}{r_M^2} \quad (1.25)$$

と表すことができる。ここで r_M はモリエールユニットで、 $C(s)$ は規格化定数、 N_e は全電子数である。

1.4 空気シンチレーション光による空気シャワー観測

高エネルギーの荷電粒子が気体中を通過すると、気体分子は発光する。Telescope Array 実験は、降り注ぐ宇宙線と大気との相互作用が起こす発光を測定して宇宙線の空気シャワー観測を行う。大気蛍光観測はシャワー粒子を直接検出する場合に比べ広い検出有効面積を与える。この観測を行なうことで宇宙線を再構成することができ、粒子のエネルギーや到来方向、最大発達深さなどが決定される。これらの情報から核種判別の解析も可能となる。

1.5 シンチレーション光

放射線が蛍光物質に当たる時に物質が発する蛍光のことをいう。原因となる外部の刺激が切れた後に、光の強度が比較的早く (10^{-3} s 以下程度) 減衰するものを蛍光といい、そうでないものをリン光という¹。荷電粒子の通過によって発せられる蛍光を特にシンチレーション光と呼ぶ。シンチレーション光は荷電粒子や X 線などが、物質中を通過する際に、物質中の原子、分子を励起してエネルギーを失い、そのエネルギーの一部が光として放出されるものである。

1.6 光の吸収、散乱、ノイズ

空気シンチレーション光による宇宙線観測では、空気シンチレーション光が微弱であるために得られる信号に対してさまざまな補正を必要とする。

- チェレンコフ光

¹分子内電子状態の遷移過程でのスピン多重度の変化の違いで分類することもある

物質中を通過する荷電粒子の速度 v が、その物質中での光速 c/n (c は光速、 n は物質の屈折率) より大きい時、粒子の飛跡に沿って放射される弱い光をチェレンコフ光という。

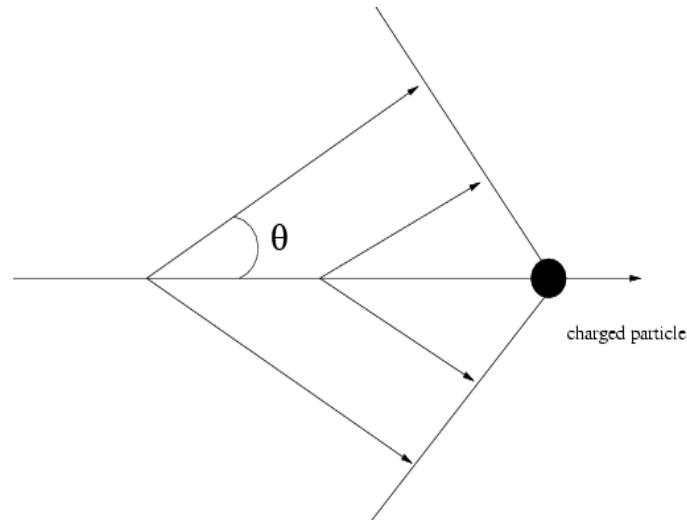


図 1.3: チェレンコフ放射。屈折率の違いにより粒子の進行方向から θ だけずれた方向に光が放射される。

$$\cos \theta = \frac{1}{n\beta}; \quad \beta = \frac{v}{c} \quad (1.26)$$

である。

粒子の電荷を ze とすると、粒子飛跡の単位長さ当たり発生する振動数が $(\nu, \nu + d\nu)$ の光子数 $I d\nu$ は、振動数とは無関係に

$$I d\nu = \frac{2\pi z^2 e^2}{hc^2} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right) d\nu \quad (1.27)$$

となる。ここで、 $\beta = v/c$ である。

- 夜天光

夜空から来る光全体を夜天光といい、主として次の3種類の光源から来る光である。

1. 大気光：地球上層大気分子、原子の発する光
2. 黄道光：太陽系内の微塵が太陽光を散乱した光
3. 星野光：星や星雲の集積光

夜天光は理科年表によると、輝度は $320 S_{10}(vis)$ [$1 S_{10}(vis) = 1.20 \times 10^{-9} \text{ erg}/(\text{cm}^2 \text{ secsr})$] と与えられている。夜天光は波長 557.7 nm に酸素原子による強いピークを持っており、連続スペクトル成分については波長が長くなるにつれて増加している。このように、夜天光が長波長側で増加傾向であること、および空気シンチレーション光は波長 $300 \sim 400 \text{ nm}$ において発光量が多いこと、更に式 (1.29) により、大気による光の吸収が短波長側で大きくなることを考えると、波

長 300 ~ 400 nm の光に対して良い検出器を使用することで、夜天光の影響を少なくし、空気シャワーからシンチレーション光を効率良く観測することができる。そのため、この波長帯の光を透過する特殊ガラスのフィルターを取り付けて可視領域に多い夜光を抑える。それでも、夜天光による光量は、1PMT あたり 20 ~ 30 photons / 200 nsec と見積もられる。

- Rayleigh 散乱 と Mie 散乱

Rayleigh 散乱は大気分子による散乱で

$$\frac{\text{散乱波強度}}{\text{入射波強度}} = \frac{8\pi^4 N \alpha (1 + \cos^2 \theta)}{\lambda^4 r^2} \quad (1.28)$$

で与えられる。ここで、 N は微粒子の数、 α は分極率、 θ は散乱角、 λ は波長、 r は散乱体から観測点までの距離である。

Rayleigh 散乱が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のに対し、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 Mie 散乱という。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。

Rayleigh 散乱による大気の透過率 t_{Ray} は近似的に以下の式で表される。

$$t_{Ray} = \exp \left\{ \frac{-X_{trans}}{X_{Ray}} \left(\frac{400}{\lambda} \right)^4 \right\} \quad (1.29)$$

ここで、 X_{trans} は光の通過する slant depth (g/cm²)、 X_{Ray} は Rayleigh 散乱の放射長で 2974(g/cm²)、 λ は光の波長 (単位は nm) である。

Mie 散乱による大気の透過率 t_{Mie} は近似的に式 (1.30) で与えられる。

$$\begin{aligned} hv_{eff} &= hv - (h_{det} - h_{hill}) \\ t &= \left(e^{-\frac{hv_{eff}}{h_m}} - e^{-\frac{h_{hill}}{h_m}} \right) \frac{h_m}{l_m \cdot \cos \theta} \frac{360}{\lambda} \\ t_{Mie} &= e^t \end{aligned} \quad (1.30)$$

h_m はエアロゾル分布のスケール高で 1200m、 l_m は Mie 散乱の平均自由行程で 3.5×10^4 m、また、 h_{det} は海面から検出器までの標高、 h_{hill} は地表から検出器までの標高を表し、図 (1.4) を参照のこと。

1.6.1 空気シャワー観測

エネルギーが 80MeV の電子が 1 気圧の大気 1m を通過して出す光子はわずか 5 個程度である。最高エネルギー宇宙線は、大気中をシャワーが通り過ぎると 30 ~ 40 μ sec の間に、 2×10^{15} 個以上のシンチレーション光を発する。Xmax 付近では 100 W 程度の光源に相当するが、遠方の空気シャワーを観測するには、望遠鏡を使って集光し、高感度な光電子増倍管のカメラを使って測定する必要がある。

空気シンチレーション光による空気シャワー観測は、球面鏡の焦点面に光電子増倍管を並べたものを一つの望遠鏡とし、多数の望遠鏡を一箇所に並べて一つのステーションとして行う。天空の各領域をそれぞれの望遠鏡が分担してモニターして空気シャワー観測を行う。

空気シンチレーション光の測定による一次宇宙線の観測は大きく分けて

1. 空気シャワーの軌道の再構成

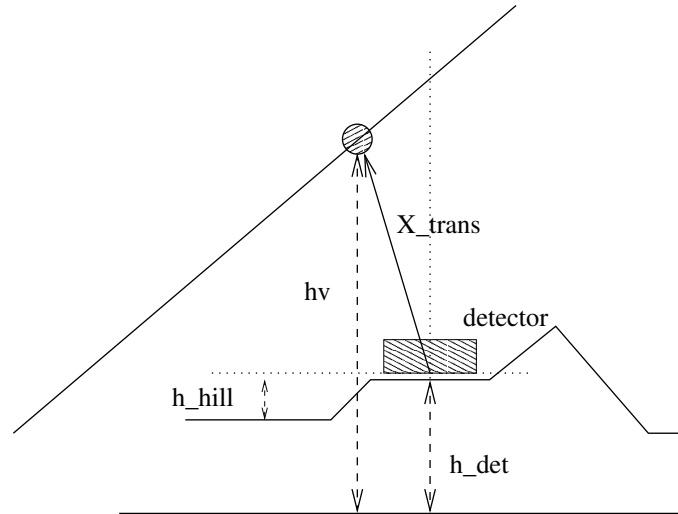


図 1.4: 各変数の説明

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。遠く離れた2つ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から宇宙線の到来方向がわかる(図 1.5)。

空気シャワーの軌道が決定すると、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行う。

1. 電子一つから光電子増倍管に到達する光子数の期待値を計算する。この光子数にはシンチレーション光だけではなく、光電子増倍管に直接入射してくるチェレンコフ光も含まれる。
2. 実際に光電子増倍管に検出された光電子数と1で計算される値から、空気シャワーの電子数を見積もり、式(1.29)と比較することにより観測結果に適合するシャワー発達関数 $N_e(X)$ を求める。

宇宙線は一次宇宙線の粒子が異なると、大気中で異なったシャワー発達をするが、シンチレーション光でシャワー全貌を記録すれば $N_e(X)$ 、特に X_{max} の深さから一次粒子の同定ができる。これは宇宙線望遠鏡の大きな特徴で、 γ 線やニュートリノが識別可能であるという点で、AGASAのような地上検出器と比べてはるかに有利である。

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ほとんどがシャワー中の電子の電離損失によるものである。よって、得られたシャワー発達関数 $N_e(X)$ から式(1.31)により一次宇宙線のエネルギー E を求める。ここで ϵ_0 は空気に対する臨界エネルギーで $74.0[\text{MeV}]$ 、 X_{rad} は大気での輻射長で $38.0[\text{g}/\text{cm}^2]$ である。

$$E = \frac{\epsilon_0}{X_{rad}} \int N_e(X) dX \quad (1.31)$$

宇宙線望遠鏡にとって、大気はエネルギーの吸収体であり、シンチレータでもある巨大な全吸収型カロリメータとして作用することになる。ただし、この方法でエネルギーを測定するには、大

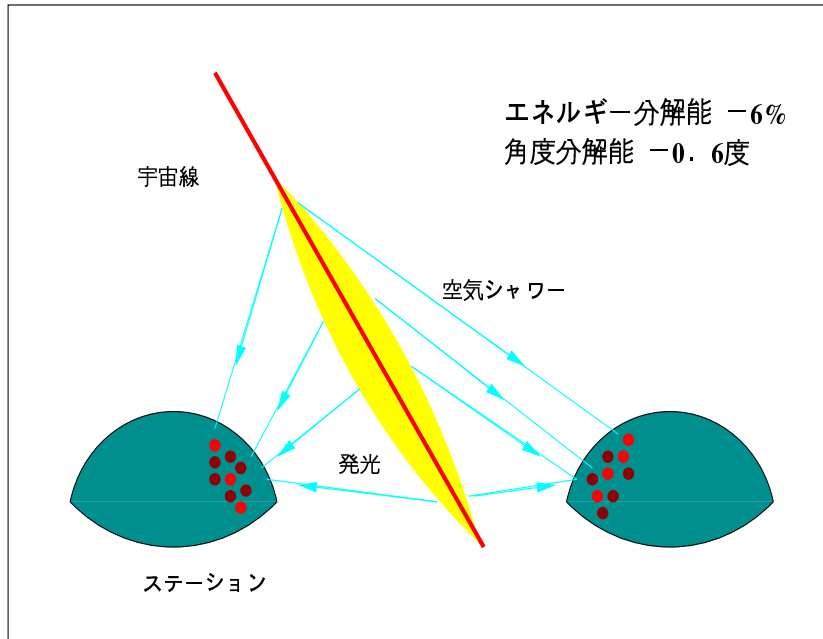


図 1.5: 宇宙線望遠鏡における空気シンチレーション光による空気シャワーのステレオ観測の概念図

気の発光効率、大気中の紫外光の散乱と吸収の割合、鏡の反射率とフィルターの吸収率、光電子増倍管の量子効率などを全て積み上げていく必要があり、系統誤差を正しく管理するのは簡単ではない。しかし、地表検出器に比べると得られる情報量が多く、エネルギーもモンテカルロ計算にほとんど依存することなく決定できるというメリットがある。

1.7 最高宇宙線エネルギー起源モデル

10^{20} eV を超えるエネルギーを持つような最高エネルギー宇宙線によるイベントは現在までに 10 例余り観測されている。このような高エネルギーの粒子がどのようにして生成されたかについては全く知られていない。様々な起源モデルが提案されているがそれらは大きく 2 つに分類され、(1) 低いエネルギーの粒子を 10^{20} eV まで加速する bottom-up モデルと、(2) GUT スケール ($10^{14} \sim 10^{15}$ GeV) のエネルギーから 10^{20} eV の粒子を生成する top-down モデルである。

• bottom-up モデル

低エネルギーの粒子を何らかのメカニズムで 10^{20} eV まで加速するためには、加速源の大きさに比べて十分な大きさの磁場が必要となる。例えば、典型的な銀河磁場の大きさ $3\mu\text{G}$ に対して 10^{20} eV の宇宙線のラーモア半径は 30kpc に達し、最高エネルギー宇宙線を銀河ディスク内に閉じ込めておくことはできない。図 1.6 には、 10^{20} eV まで bottom-up モデルで加速できる天体候補の大きさと磁場の強度を示した (Hillas)。

この図を見ると、銀河系そのものあるいは銀河系内天体のほとんどは最高エネルギー宇宙線の加速源候補から除外される。AGN や電波銀河といった銀河系外の活動的天体が候補であるが、中性子星も候補として残されている。しかしこれまでの活動的天体や中性子星を加速源とする議論では、加速源でのエネルギー損失が考慮されていない。磁場中ではシンクロ

Magnetic Field Strength

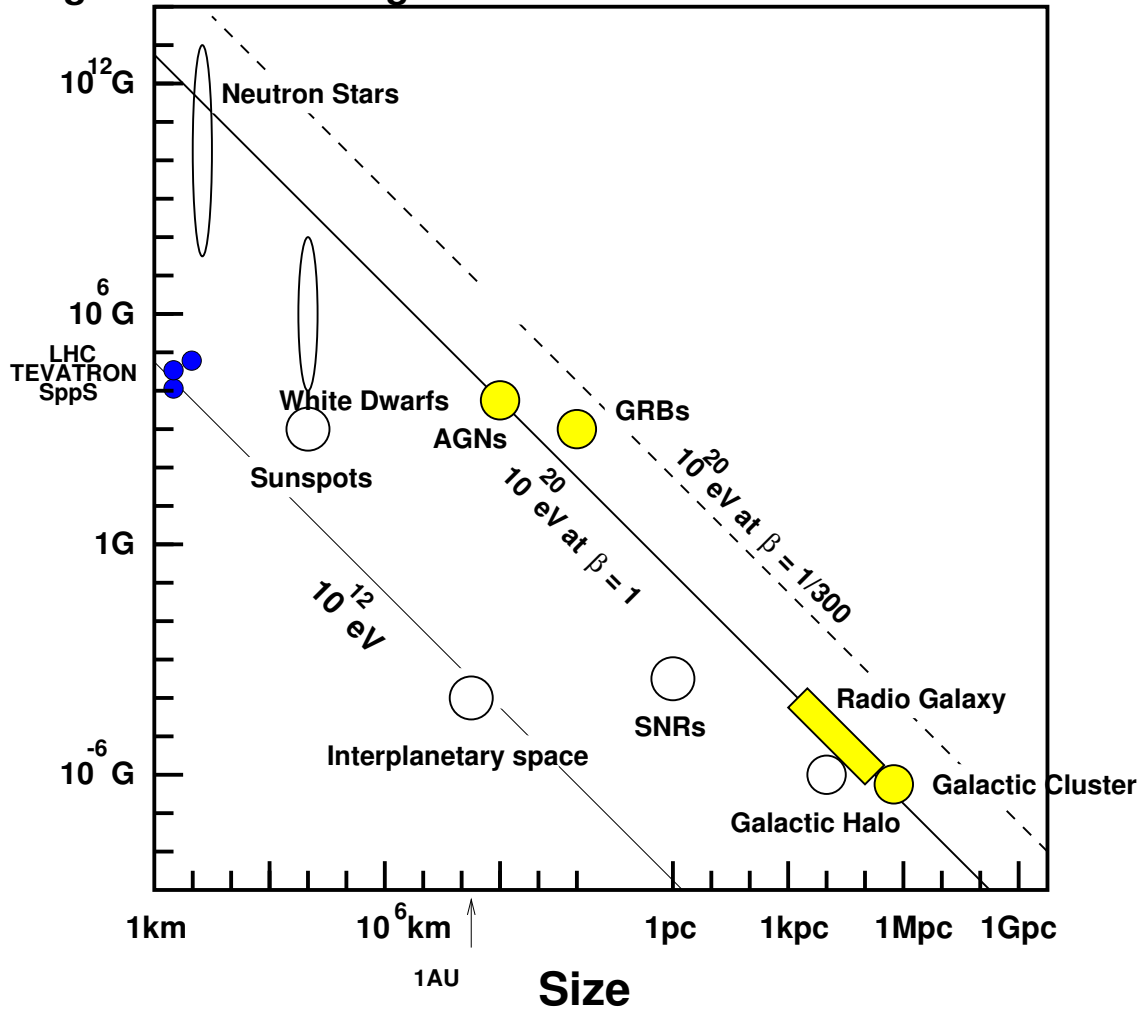


図 1.6: 10^{20} eV を超える超高エネルギー宇宙線の加速源に課せられる、磁場の強さと天体の大きさとの関係。加速源候補は、図中の斜線より上の領域に存在していなければならない

トロン放射、光子場中では photopion production、物質場中では陽子同士の衝突によるパイオン生成などである。粒子の加速エネルギー限界は加速に要する時間とエネルギー損失の時間、加速領域からの洩れ出し時間とのバランスで決まるものである。中性子星には $\sim 10^{12}$ G という強大な磁場があるため、陽子や原子核はシンクロトロン放射により急激にエネルギーを損失し、 10^{20} eV というエネルギー領域まで粒子を加速することは事実上不可能である。また AGN(特に radio-quiet AGN) では、ガスが厚く、陽子同士の衝突によるエネルギー損失が支配的となり、せいぜい 10^{19} eV までしか粒子を加速できない。radio-loud AGN の Jet の先端で観測されている電波強度の強い領域 (radio hot-spot) では、光子場、物質場ともに密ではなくエネルギー損失が少なく、かつ粒子を閉じ込めておけるだけの turbulent な磁場が存在するということが電波観測によって予想されており、陽子を最高エネルギー宇宙線まで加速することが可能であると提案されている。

その他にも、太陽風の類推による「銀河風」による加速や、ミニブラックホールのポテンシャルドロップを利用した加速などの説がある。銀河風によるモデルでは、鉄を 10^{20} eV まで加速するのが限界で、陽子を最高エネルギー宇宙線まで加速するためには、複数の銀河間でのプラズマのコネクションがあり大規模なプラズマ風が吹いていると仮定する必要があること、また、ポテンシャルドロップでは観測されているベキ乗のエネルギースペクトルが説明できないなど、最高エネルギー宇宙線の加速モデルとしては難点がある。

- top-down モデル

宇宙初期の相転移の際に生じた位相欠陥 (Topological Defect) は、GUT 時のエネルギー ($\sim 10^{15}$ GeV) を現在まで保持し続けており、これが時おり崩壊することで、 $\sim 10^{24}$ eV までの粒子を放出するというモデルである。cosmic string の崩壊や基底状態のモノポール対 (monopolonium) の対消滅などによって、保持されていた GUT スケールのエネルギーが不安定な超重粒子の形で解放され、これらの粒子が崩壊してハドロンジェットを生成することで最高エネルギー宇宙線が放射される。このモデルは、位相欠陥そのものの存在すら証明されていない状況下ではあるが、観測事実の解釈という点から有力な最高エネルギー宇宙線の生成モデルとして議論されている。

図 1.7 は宇宙線陽子の銀河間空間における減衰距離で、宇宙膨張によるエネルギー損失以外にも宇宙背景放射光子との相互作用によるエネルギー損失が非常に大きいため、例えば 10^{20} eV の陽子は 100Mpc しか伝播できない。したがって bottom-up、top-down どちらのモデルであっても、最高エネルギー宇宙線源は我々の比較的近くに存在しなければならない。

従って、地球で観測された 10^{20} eV の宇宙線は、途中でエネルギー損失を起こしたのでないとなれば、その源は伝播距離にして地球から 100Mpc 以内になければならないことになる。逆にそれより遠方の源から放射された高エネルギー粒子は伝播中にエネルギーを失い、地球に到達する際には 10^{20} eV より低いエネルギーの粒子となる。このため、銀河系外起源の宇宙線のエネルギースペクトルには GZK cutoff と呼ばれる急激な減衰が現れる。図 1.8 は様々な宇宙線源の分布モデルから予想されるエネルギースペクトルを示してある。

例えば、源が宇宙空間に一様に分布する場合は 5×10^{19} eV で急激な減衰が現れると予想されている。観測される最高エネルギー宇宙線のエネルギースペクトルがどのような構造を示すががこのような最高エネルギー宇宙線源を研究する上での重要なかぎとなっている。

また、化学組成を知ること極めて重要で、例えば top-down モデルでは陽子以外の原子核成分は生成されないと予想される。また、bottom-up モデルでも、仮に重い原子核が加速され放射され

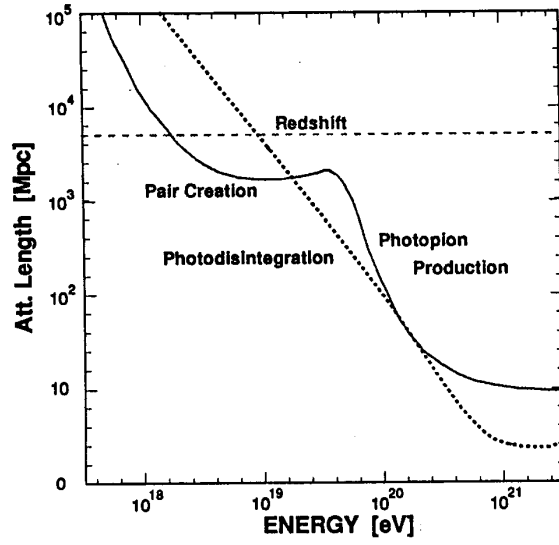


図 1.7: 最高エネルギー宇宙線の減衰距離

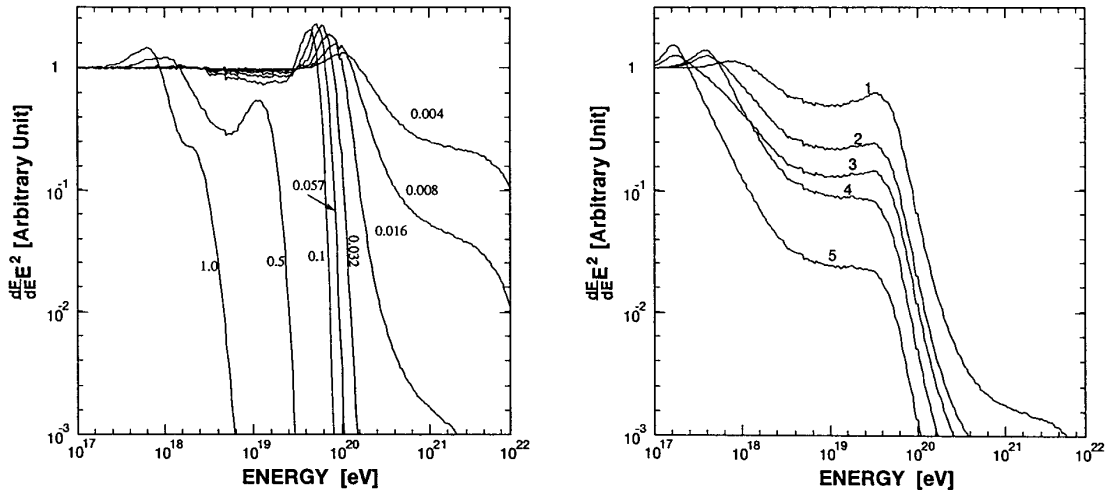


図 1.8: 宇宙線のエネルギースペクトルに予想される GZK cutoff。左は 1 つの源が特定の red shift ($z = 0.004 \sim 1.0$) にあると仮定した場合。右は源が一様に空間分布しているとしてその分布がいくつか異なる evolution model に従うと仮定した場合。

ても、伝播中に photodisintegration によって、より軽い原子核へと壊れていく。従って、重い原子核成分の最高エネルギー宇宙線が検出されれば、その起源までの距離に対してより厳しい制限がつけられることになる (図 1.7 参照)。

1.8 最近までの観測結果

過去に稼働していた最高エネルギー宇宙線測定装置による観測結果をまとめると以下のようになる。

- エネルギースペクトルには $3 \times 10^{18} \sim 10^{19} \text{eV}$ 付近で折れ曲がりが見られ、高エネルギー側ではよりフラットになる ($\sim E^{-2.7}$)。図 1.9 に各測定装置で観測された最高エネルギー宇宙線のスペクトルを示す。これらは 10^{19}eV の少し手前でスペクトルがフラットになるという共通した特徴を示しており、この折れ曲がりが存在することは、ほぼ確定した事実と考えてよさそうである。(AGASA、Fly's Eye は折れ曲がりの有意性はそれぞれ 3.8σ 、 3.5σ と報告している。)

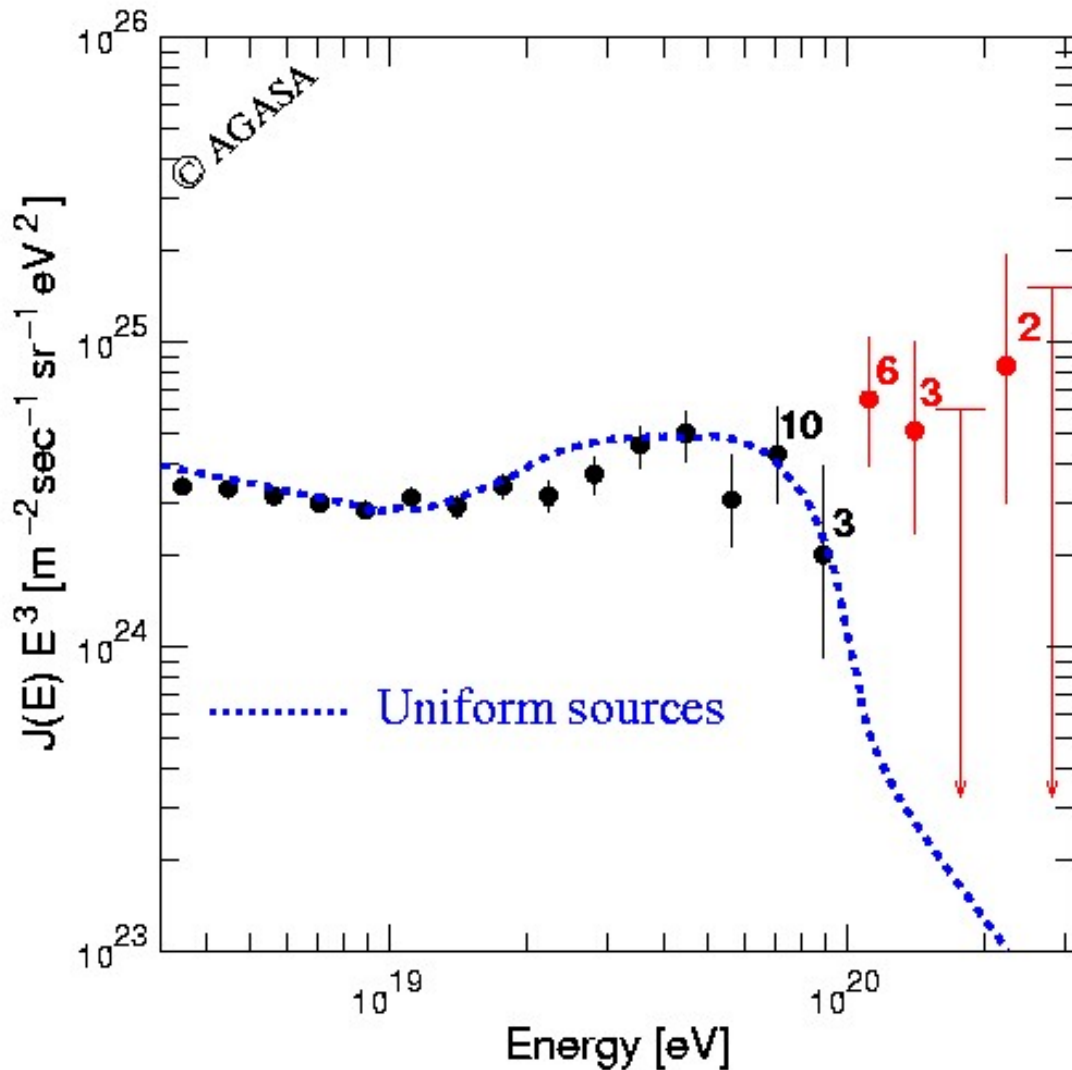


図 1.9: 最高エネルギー宇宙線のエネルギースペクトル

- $10^{19.9}$ eV 以上では cutoff の存在については議論が分かれている。

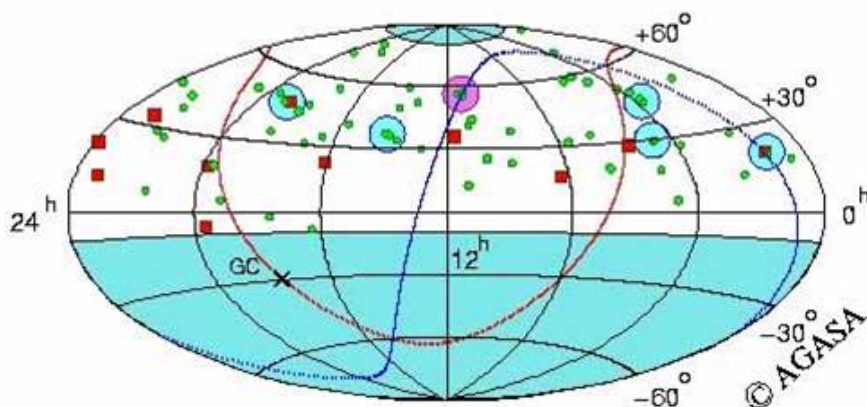
Fly's Eye による観測結果では、 10^{20} eV 以上のイベントは cutoff が無いとした場合には 5.4 期待されるのに対して、1 イベントのみで、cutoff の存在を示唆している。これに対して AGASA では、エネルギースペクトルは cutoff が無いかあるいは、 $10^{19.8} \sim 10^{20.1}$ eV 付近に cutoff が存在しそれ以上のエネルギーの宇宙線に対しては別の成分が寄与しているのではないかと結論している。

- 10^{19} eV 以上での到来方向異方性

Haverah Park、Fly's Eye、Yakutsuk による観測結果は到来方向分布は等方的である。銀河面集中も無いと結論している。

AGASA はこの点についていくつか報告している。

- $10^{19.0} \sim 10^{19.4}$ eV の宇宙線は超銀河平面集中を示す。(有意性は $\sim 2\sigma$)。
- $10^{19.0}$ eV 以上の 7 イベントがある方向を中心とする 2.5° 以内に集中している。この chance probability は 0.001 である。Haverah Park でも 4×10^{19} eV 以上の 27 イベントが銀河面方向に集中している傾向があり、chance probability は 0.006。
- $10^{19.6}$ eV 以上のイベントで互いの到来方向の差が 2.5° 以内であるイベントペアクラスターが 3 例見つかっている。このうち 10^{20} eV 以上の 1 つのクラスターは超銀河平面である。



- 化学組成については観測グループごとに結論が異なっている。Fly's Eye は空気シャワーの最大発達深さ (X_{\max}) を測定することで、宇宙線の平均質量数を求めている。Fly's Eye の結果では、 3×10^{17} eV 以上で X_{\max} が急激に上昇する。エネルギーが 1 桁大きくなったときの X_{\max} の増加率 elongation rate は 3×10^{17} eV 以下では ~ 50 g/cm² であるのに対して、それ以上のエネルギーでは 78.9 ± 3 g/cm² と報告している。もし化学組成が一定ならば、どのような相互作用モデルを仮定しても、このような大きな elongation rate は得られない。Fly's Eye グループは、これは宇宙線の主成分が鉄から陽子など軽い原子核へ、エネルギー増加とともに変化しているためであり、エネルギースペクトルに見られる折れ曲がりと合わせて、鉄などの重い原子核を主成分とする銀河系内起源の宇宙線から、陽子を主成分とする銀河系外起源の宇宙線へと変化している証拠であると結論している。

これに対して AGASA ではシャワー中のミューオン成分と電子成分の数密度から化学組成を推定しており、Fly's Eye が報告している化学組成の変化は観測されていないと報告している。

- 10^{20} eV を越えるエネルギー領域にイベントが存在する。

10^{20} eV を越えるイベントは AGASA で 11 例、Haverah Park で 4 例、Fly's Eye、Yakutsk で各 1 例報告されている。特に Fly's Eye では $3.2 \pm 0.9 \times 10^{20}$ eV、AGASA では $2.1 \pm 0.4 \times 10^{20}$ eV というイベントが報告されている。これらのイベントは予想される GZK cutoff エネルギー値のはるかに上に存在している。

例えば 2×10^{20} eV の宇宙線の平均到達距離は ~ 30 Mpc となるが、少なくともこれらのイベントの到来方向の 50Mpc 以内には点源の候補となるような電波銀河などは見つからない。

1.9 最高エネルギー宇宙線の将来

今後の最高エネルギー宇宙線研究において重要な研究課題を列挙する。

- 最高エネルギー宇宙線の化学組成

陽子かそれとも重い原子核といった化学組成の情報が得られれば、起源モデルに対して厳しい制限がつけられるだけでなく、異方性の解析によって銀河間磁場について重要な情報が得られるであろう。すでに AGASA で検出されたイベントクラスターは超銀河面集中を示唆しており、これらの化学組成に関する情報が得られれば、磁場に関する厳しい上限値を与えることになる。

- GZK cutoff を越えるエネルギーイベントの検出

10^{21} eV を越えるエネルギー領域の宇宙線では磁場による宇宙線の伝播方向が曲げられる影響をもはや無視でき、天体が起源であれば容易に同定できることになり、荷電粒子天文学が誕生することになる。もしそのような天体が同定できれば、top-down モデルが極めて有力になり宇宙初期の位相欠陥の存在を示唆する有力な実験事実となる。

- $10^{19} \sim 10^{20}$ eV 領域の diffuse gamma 線の検出

宇宙線陽子と宇宙背景放射との衝突で生ずるガンマ線のフラックスと宇宙線陽子のフラックスの比は、起源モデルによって大きく異なる。bottom-up モデルでは 10^{20} eV では 10^{-2} であるのに対して、top-down モデルでは 1 以上である。また、 10^{19} eV 領域のガンマ線フラックスは銀河間磁場によるシンクロトロン放射にも依存するため、銀河間磁場についての情報が得られる。

- $10^{19} \sim 10^{20}$ eV 領域の高エネルギーニュートリノの検出

ニュートリノが大気と相互作用してカスケードを生成する確率は陽子の 10^{-5} 以下であるが、その検出は大きな意味を持つ。予想されるニュートリノフラックスも起源モデルによって大きく異なり、bottom-up モデルでは 10^{19} eV で陽子と同程度であるのに対して、top-down モデルでは陽子に比べて 30 ~ 100 倍程度多くなる。ニュートリノはガンマ線と違い、透過するため、そのフラックスは宇宙初期での高エネルギー粒子生成率に大きく依存し、ニュート

リノ検出によって源の宇宙進化の情報が得られることが特徴である。更に high redshift の時代に高エネルギーニュートリノが生成されれば、宇宙背景輻射ニュートリノとの衝突でカスケードを起こし、フラックスが増加するばかりでなく、その増加率がニュートリノの質量に依存する。

第2章 テレスコープアレイ実験

2.1 テレスコープアレイ実験の目標

前章の問題を解明するために、日米共同研究のテレスコープアレイ実験が提唱された。前章のような現在までの最高エネルギー宇宙線観測の問題点を踏まえて、本実験では以下の大きな目標を掲げている。

- 従来の最高エネルギー観測実験よりも観測精度、観測有効面積を格段に向上させ、 10^{20} eV を超える super-GZK 宇宙線の存在を確立する。
- 最高エネルギー宇宙線の点源問題を解決する。テレスコープアレイ実験では AGASA に対して全体で約 12 倍の観測有効面積を有するので、これにより系統量を増やし、同時に一次宇宙線の到来方向を 1.0° 以下の精度で決めることを目指す。
- 最高エネルギー宇宙線の粒子種を同定する。最高エネルギー宇宙線は起源モデル毎に一次宇宙線の組成として陽子、鉄、ガンマ線やニュートリノなどが予言されており、組成判別が起源解明の大きな鍵となる。

2.2 テレスコープアレイ実験概要

このテレスコープアレイ実験は、AGASA の約 4 倍の観測有効面積 ($\text{km}^2 \cdot \text{sr}$) を持つ大気蛍光望遠鏡 (Fluorescence Detector、以下 FD と略す) と、約 9 倍の観測有効面積を持つ地上粒子検出器 (Surface Detecotr、以下 SD と略す) で最高エネルギー宇宙線の空気シャワーを観測する。観測場所は米国ユタ州ミラード郡にある標高 1400m の西部砂漠地帯にある。図 (2.1) に示すように、SD576 台を約 1.2km 間隔の碁盤目に設置し、その周囲 3ヶ所に約 35km 間隔で FD12 台からなるステーションを設置する。設置の敷地面積は約 800km^2 となる。この観測装置の配置から、観測イベントの約 10 % は SD と FD によるハイブリット観測が可能となる。

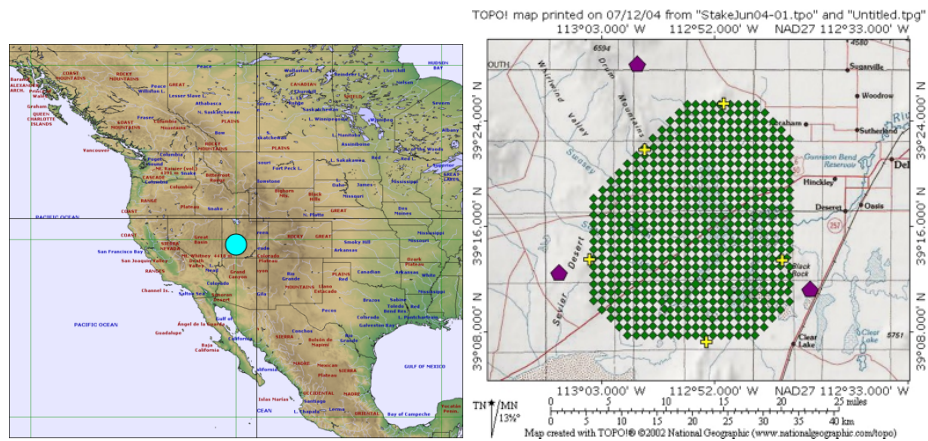


図 2.1: 左図が米国ユタ州のテレスコープアレイ 実験の行われている位置を示す。(<http://www.sitesatlas.com>) 右図はテレスコープアレイの FD と SD の配置図。3 点の紫点が FD の位置、576 点の緑点が SD の位置を示す。

2.2.1 Fluorescence Detector



図 2.2: Black Rock Mesa に建設された FD ステーション。日中はシャッターが閉まり、カメラを保護する。

FD は空気シャワーによる大気蛍光を球面鏡で集光し、集光した光を PMT からなる撮像カメラで観測する装置である。図 (2.1) に示したように、碁盤目上に並べられた SD を取り囲むように、約 35km 間隔で、Black Rock Mesa、Long Ridge、Middle Drum の 3ヶ所に FD ステーションが設置される。1 ステーションは 12 台の FD で構成され、それぞれのステーションが方位角 108° 、仰角 $3^\circ \sim 33^\circ$ を観測するように設置されている。将来的にはそれぞれのステーションが方位角 360° をカバー出来るよう、拡張が可能である。またステーションの中には、データを収集するコントロールルームと居住区が設けられている。

望遠鏡と光学系

大気蛍光を集光する FD のミラーは、広角視野を得るため、また放物面鏡に比べると設置と調整が簡単である球面鏡を使用している。FD1 台の視野は、方位角が 18.0° 、仰角が 15.5° である。これを放射状に並べ、FD1 ステーションとして方位角 108° を視野とする、さらにこれを 2 段にする事によって仰角は上段のカメラが $3^\circ \sim 18^\circ$ 、下段のカメラが $17.5^\circ \sim 33^\circ$ と、全体では $3^\circ \sim 33^\circ$ をカバーする。次項で説明する FD カメラで結ぶスポットサイズは、ほとんどの視野で 30mm 程度で、これは FD カメラの 1 本の PMT の大きさ (hexagonal, 60mm diagonal) に比べ十分に小さい。

FD の集光部に使われる球面鏡は、18 枚の六角形をしたセグメントミラーからなる口径 3.3m の合成鏡である。セグメントミラーの取り付け角度は、2 方向に調整可能である。また、合成球面鏡の中心はセグメントミラーは配置されておらず、光学角度キャリブレーション、PMT ゲインキャリブレーションのための Xe flasher 装置が取り付けられる。

セグメントミラー (hexagonal, 660mm between opposing edges) の概要は図 (2.3) に示した。曲率半径は $6067 \pm 40\text{mm}$ である。素材には、Tempax glass を使用し、表面は劣化に強い Anodization という方法で Al_2O_3 がコーティングされている。反射率は 330nm ~ 450nm で 80 % 以上である。

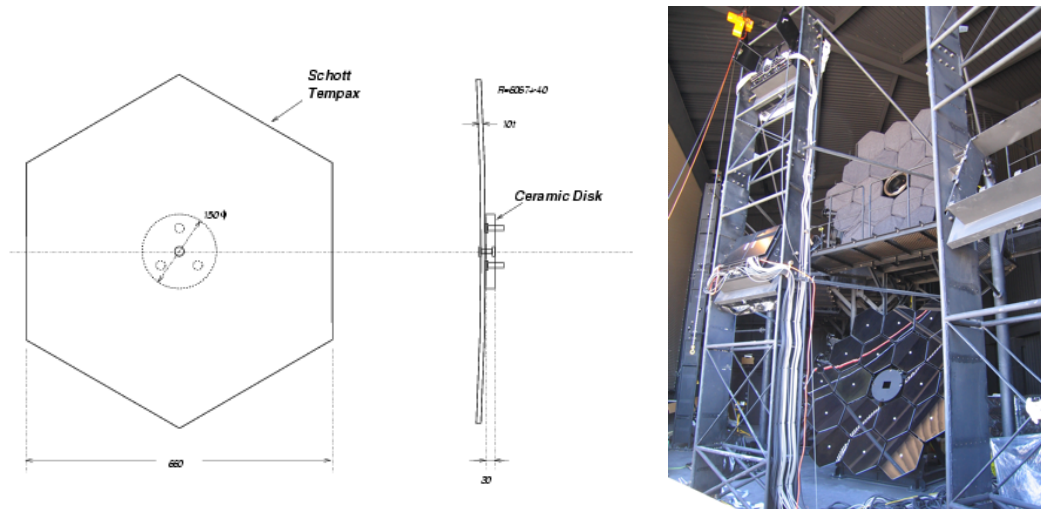


図 2.3: 左図はセグメントミラーのデザイン、右の写真は現地 (米国ユタ州 Black Rock Mesa) に建てられた FD ステーション内で組み立てられた望遠鏡。

FD カメラ

FD カメラは、集光部の球面鏡からの光を検出するために 16×16 のマトリックス上に並べられた 256 本の PMT から構成されている。FD カメラは球面鏡の焦点面に設置される。このカメラは PMT とカメラ内エレクトロニクスを保護するために密封された箱として作られている。また、観測するシンチレーション光の波長域は主に $300\text{nm} \sim 400\text{nm}$ であり、その他の波長域の光をカットするために個々の PMT の光電面上にはバンドフィルターとして SCHOTT BG3 が取り付けられる。さらに、FD カメラの窓材として、 300nm 以上の波長域に対して透過率が 90 % 以上であるパラガラスが用いられる。

カメラに使用する PMT の概要を図 (2.4) に示す。光電面の形状は六角形で光電材としてバイアルカリ、最大量子効率率は 30 %、ゲインは 1000V 印可時で 2.5×10^5 である。



図 2.4: 写真が実際に使用される PMT(HAMAMATSU R6234)。

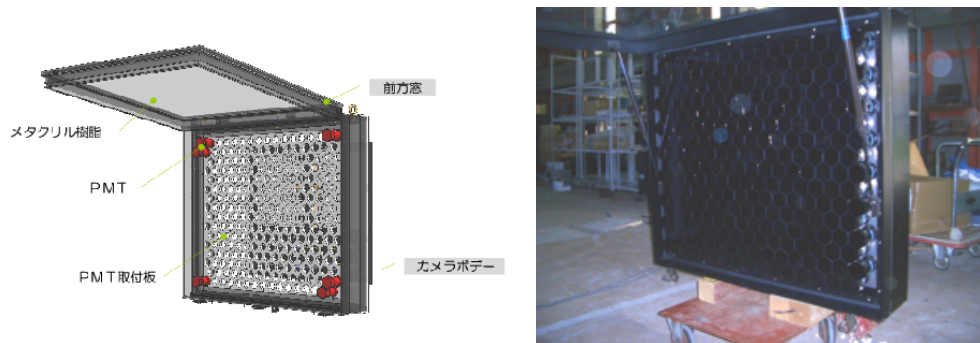


図 2.5: 写真左は FD カメラ躯体、写真右はカメラフレームに PMT を装着したときのもの。

FD エレクトロニクスと DAQ システム

FD 装置のデータ収集システムは、システム内のタイミングとコントロール関係を管理するモジュール群 (1 クレート分) と各 FD の読み出しシステム、コントロールシステムと電源システムよりなる。1 台の FD の読み出しシステムは、SDF(Signal Digitize/Finder) モジュール 16 枚、TF(Track Finder) モジュール 1 枚からなる。1 台の FD カメラが 1 クレートに相当するようにシステムを組む。図 (2.6) に望遠鏡アレイ実験の FD エレクトロニクスの概念図を示す。また図 (2.6) の PC 部分については本研究のテーマとなるので第 3 章で詳しく述べる。

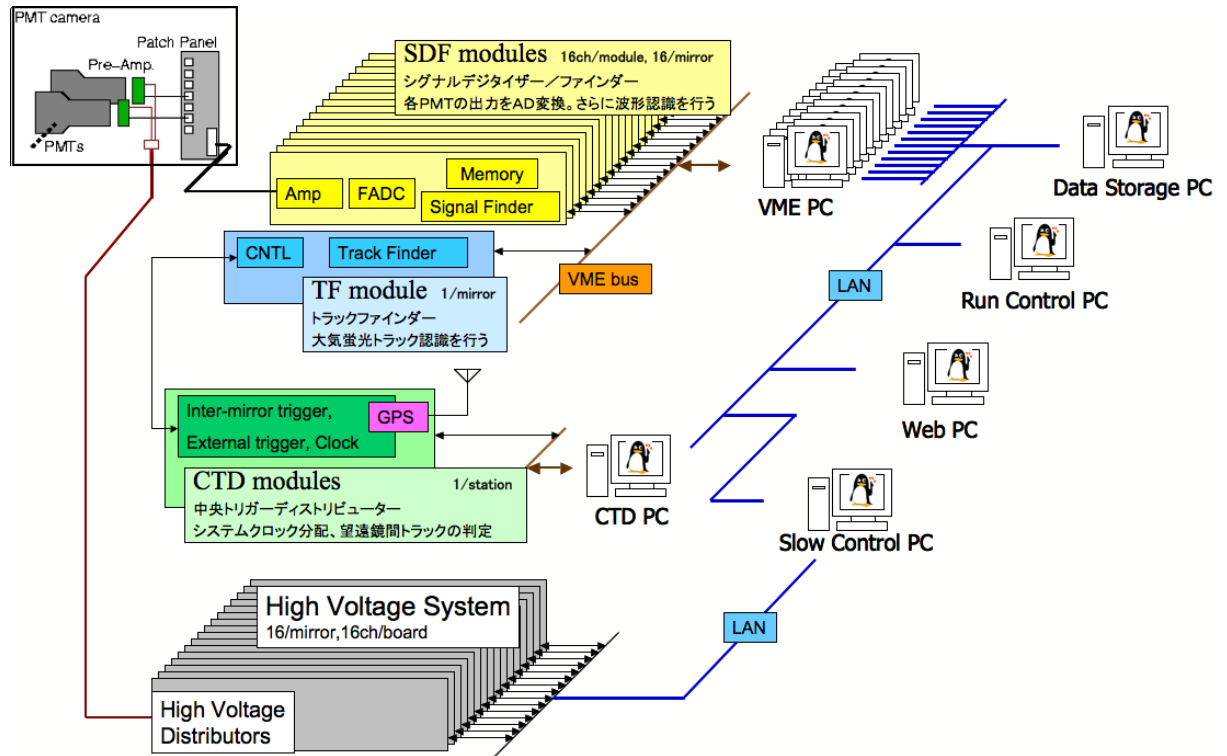


図 2.6: FD エレクトロニクスの全体図

各ブロックの役割は

- Pre-AMP : PMT 出力信号を増幅する。Pre-AMP はダイナミックレンジが $\sim 5000\text{p.e./}10\text{ns}$ 、最大出力電圧は、ADC 側が 2.0V 入力ダイナミックレンジの ADC なので、Pre-AMP の最大出力電圧は 2.0V となっている。

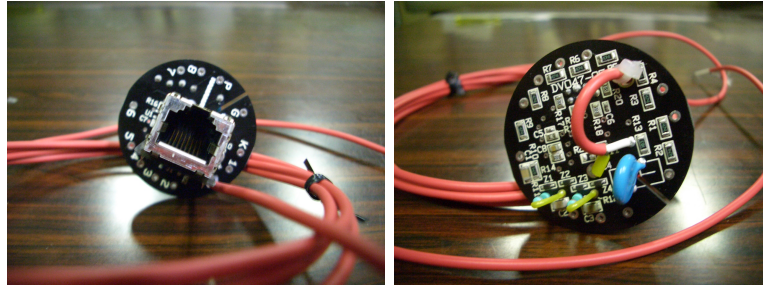


図 2.7: PMT に装着される Pre-AMP の外観。

- Patch Panel : 1 カメラあたり 256 個の Pre-AMP への電源供給および各 SDF への信号送信をまとめる中継地点としての役割をもつ。FD カメラ 1 台あたり 2 つの Patch Panel がカメラボックス内部に取り付けられる。1 つの Patch Panel から 128 本の PMT に取り付けられた Pre-AMP へそれぞれ $\pm 5\text{V}$ の電源が供給出来る。Pre-AMP、Patch Panel 間は cat.6 ケーブルで接続する。SDF は 16ch ごとに 1 枚のボードに収まっているので、Patch Panel から SDF へは、16ch 分を 1 束にして SDF へ 1 本のケーブルで送る。

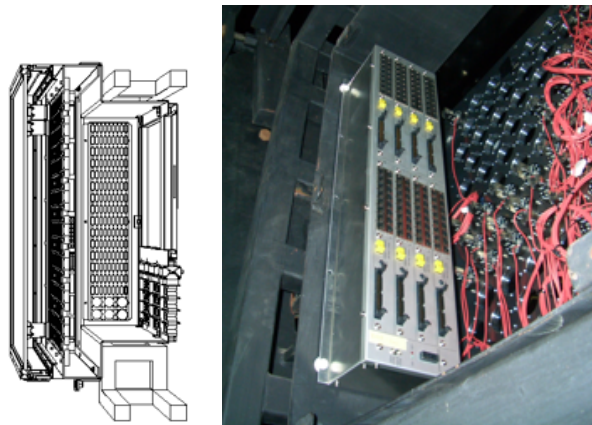


図 2.8: 左図がカメラに取り付けられた patch panel のイメージ図、右の写真が実際にカメラの背面に取り付けられたときの写真。

- SDF : 1 枚に 16 チャンネル分が組み込まれており、1 クレートに 16 枚装着される。PMT から送られてきたアナログ信号を 12bit 分解能、2V 入力ダイナミックレンジ、40MHz サンプリングの FADC で AD 変換する。その後、設定した threshold を上回る信号をキャッチしファーストレベルトリガーを行う。その後、TF にそのトリガーがかかったかどうかの 0/1 マップを送信する。
- TF : 1 クレートに 1 枚装着される、SDF から送られてきた 0/1 マップを大気蛍光による信号かどうか判定し、大気蛍光によるトラックだと判定されるとセカンドレベルトリガーをかけ、CTD へその結果を送信する。各カメラごとにシンチレーション光トラック認識を行う「セカンドレベルトリガーモジュール」としての働きを担う。

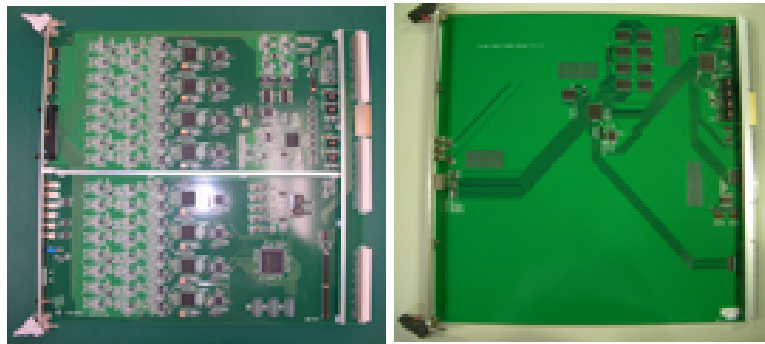


図 2.9: 左図が SDF ボード、各 PMT の出力を AD 変換する。さらにシンチレーション光波形の認識を行う「ファーストレベルトリガーモジュール」としての働きを行う。右図が TF ボード、各カメラごとにシンチレーション光トラック認識を行う「セカンドレベルトリガーモジュール」としての働きを担う。

- CTD(Central Trigger Distributor) : 1 台のステーションに 1 枚、12 台の TF と繋がっており $12.8\mu\text{sec}$ ごとに TF からセカンドレベルトリガーを集め、集められたセカンドレベルトリガーが最終的に大気蛍光によるものなのかを判定しファイナルレベルトリガーをだす。カメラ間にまたがるトラックの判定、全エレクトロニクス共通のクロックの供給、初期信号の送出などの働きを担う。

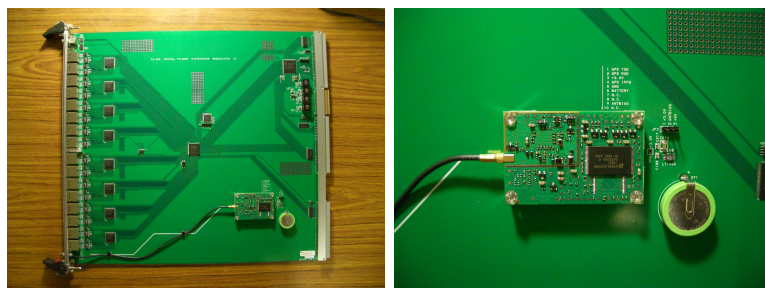


図 2.10: 左が CTD ボード、右が CTD に装備される GPS(Motorola M12+) が数 nsec の精度で時間を記録している。

そして基本的なデータの流れは次のようになる。PMT からのパルス信号は Pre-AMP で増幅され、SDF に送られる。SDF に送られた信号は、40MHz サンプリング、12 ビット分解能、2V 入力ダイナミックレンジの FADC で AD 変換される。デジタル化されたデータはバッファに記録され、同時に SDF で処理される。シグナルがあると判定された PMT は 1 と表され、それ以外は 0 と表される。この 0/1 のヒットパターンを TF に送り、空気シャワーによるイベントかどうかを判定する。最後に CTD によって全てのカメラからのセカンドトリガーコードを集めトリガーをかけるかどうかを判定する。イベントとして判定されたデータは SDF のバッファから光ファイバーを利用して PC に送信される。現在完成しているエレクトロニクスのイベント転送レートは最大 26Hz となっている。

キャリブレーションシステム

テレスコープアレイにおける FD のキャリブレーションシステムとして大きく 3 つのカテゴリに分けられる。まずカメラの PMT のキャリブレーションとして CRAY(Calibration Rayleigh scattering system)、YAP、Xe flasher、XY scanner がある。次に 1 次宇宙線エネルギー決定に対するキャリブレーションとして Linac。大気モニターとして CLF(Central Laser Facility)、Lidar がある。以下にそれぞれについて簡単に述べる。

- CRAY

波長 337.1nm の窒素レーザーからの Rayleigh 散乱を使った絶対一様光源 (CRAYS) であり、標準球の較正を行う。エネルギーの分かっている窒素レーザーからどの程度 photon が Rayleigh 散乱されるかは分かっているため、PMT の量子効率 QE、収集効率 CE、絶対ゲインをあらかじめ測定する事が出来る。

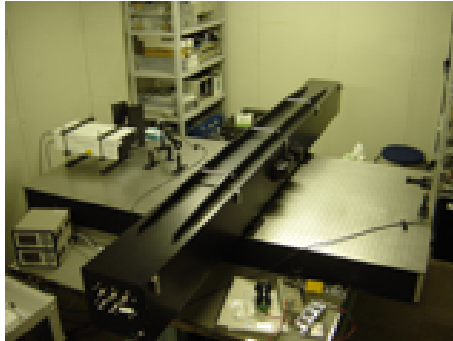


図 2.11: 左から窒素レーザーを放射し中央で Rayleigh 散乱させる。両側に PMT をつけ、散乱された photon 数をモニターする。写真右側にあるエネルギープローブで窒素レーザーの強度を測定する。

- YAP

YAP 光源は $\text{YAlO}_3: \text{Ce} + \text{Am}^{241}$ アルファ放射線 (50Bq) を使い、これをプラスチックシンチレータにあてて光源としている。放射される光は最大波長 370nm、20nsec サンプルングで 2000 ~ 3000photo electron である。しかしこの photo electron 数であると Pre-AMP と PMT の出力の線形限界を超えてしまうため、現在は減光フィルターを使用して photo electron 数は 500 ~ 1000photo electron となるように設定してある。任意の場所・時間・測定回路構成・環境温度などにおける、「光電子数の標準」となる。

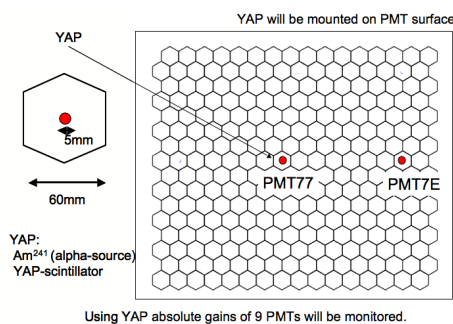


図 2.12: PMT 光電面での YAP 装着位置、およびカメラ面での YAP 装着 PMT の位置。YAP は PMT インデックス 7E と EE につけられている。

- Xenon flasher

図 2.13) に示すように鏡の中心に装備されている。これは Xenon 発光管を発光させ、カメラ面全てを照射するものである。これによりカメラに装着されている YAP 付き標準球以外の全ての PMT(255 本) の出力が標準球と等しくなるように、255 本の高電圧を調整する。これで全ての PMT(256 本) の較正係数 ($QE \times CE \times PMT\ Gain \times Electronics\ Gain$) のカメラ面での積分値が等しくなるように調整する。

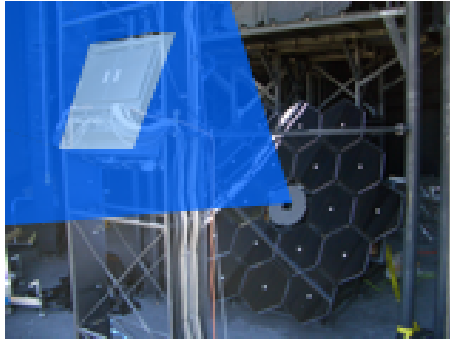


図 2.13: Xenon flasher のイメージ図。球面鏡の中心に Xenon 発光管が装備されている。

- XY scanner

紫外線 LED を用いカメラ感度 2 次元マップ作成に使用する。全カメラ面 (PMT256 本) を約 4mm のメッシュで走査する。これにより測定された 2 次元マップと YAP 付 PMT で得られた $QE \times CE$ の 2 次元マップよりカメラ全体の $QE \times CE$ 2 次元マップを得ることが出来る。

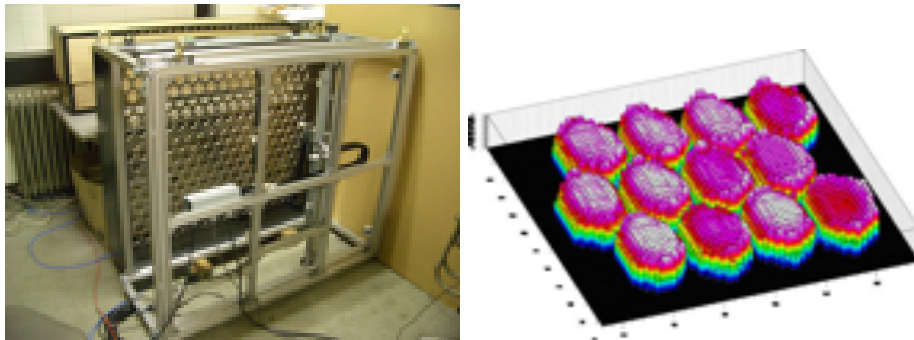


図 2.14: 左図が XY scanner の外観、右図は XY scanner を利用して測定した PMT の二次元不均一性。

- CLF(Central Laser Facility)

3ステーションから約20kmの等距離の位置に設置されている。真上にレーザー光を放射し、各ステーションで観測する。側方散乱光の強度測定により大気透明度の測定を行う。

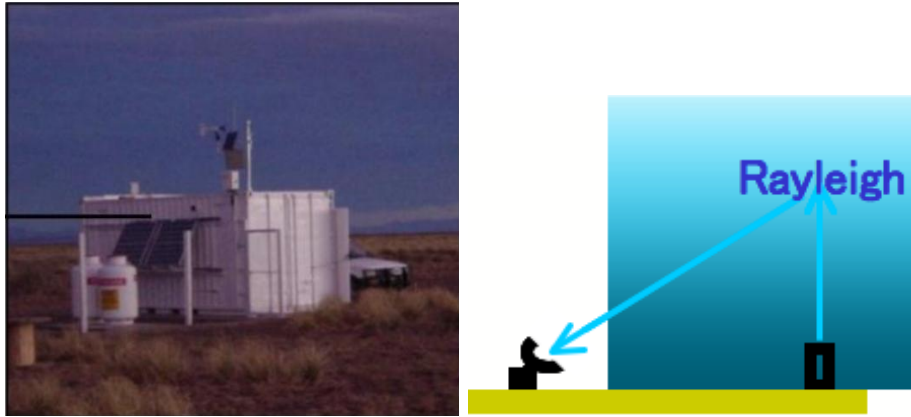


図 2.15: 図は AUGER 実験で使用されている Central Laser Facility [5]。テレスコープアレイ実験では現在製作中。右図は CLF のイメージ図、真上に laser を放射し側方に散乱された photon 数から大気の状態を測定する。

- Lidar

各 FD ステーションに 1 台ずつ設置されている。波長 355nm、最大エネルギー 5mJ、パルス幅 5nsec の紫外線レーザー (YAG) を大気中に放射する。このレーザーとエアロゾルまたは大気分子による後方散乱光を測定し、その強度から大気透明度を測定する。

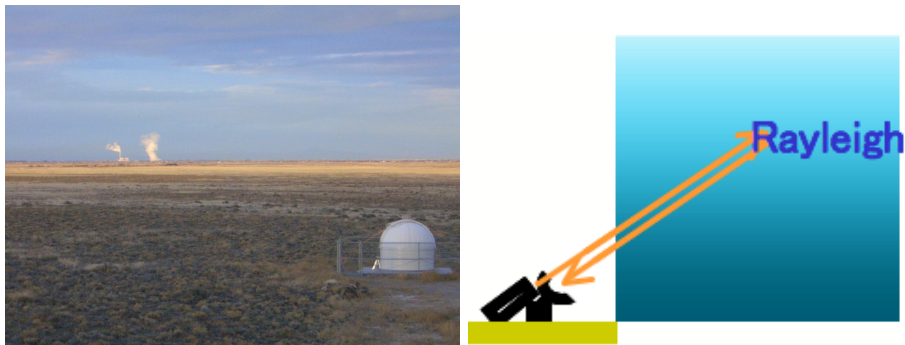


図 2.16: 写真左に見えるものが FD ステーションから見た Lidar dome。この建物の中に Lidar が装備されている。右図は Lidar のイメージ図、パルスレーザーを放射し後方に散乱された photon 数から大気の状態を測定する。

- Linac

小型線形加速器を使用して、エネルギーキャリブレーションを行う。この加速器では電子を加速し、あらかじめわかっているエネルギーの電子ビームを地上から上空に打ち上げる。そこから発せられるシンチレーション光を測定する事によりエネルギーのキャリブレーションを行う。最大 40MeV (10、20、30MeV の段階で可変) で、エネルギーの精度は 1 % 程度である。この線形加速器をトレーラに乗せ Black Rock Mesa より約 100m 前方に設置し複数のポイントからビームを出しエネルギー較正を行う。エネルギーの絶対値の分かっているシャワーを観測することになるので理想的なエネルギー較正が出来る。

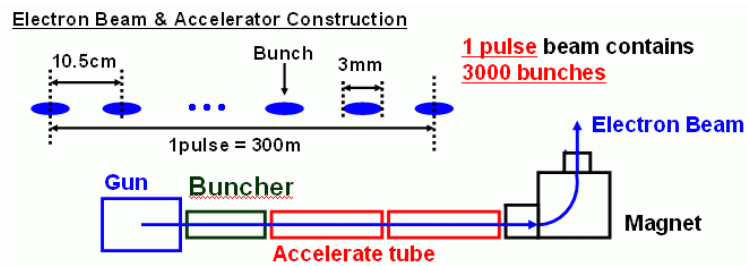


図 2.17: Linac のデザイン、電子を加速し真上に打ち上げ FD で観測しエネルギーを較正行う。

2.2.2 Surface Detector

SD1 台は、100cm × 150cm × 1cm のプラスチックシンチレータを 2 層に重ねた物が 2 つ並べられ、それが 210cm × 170cm × 8cm の容器に入れられている。それぞれのプラスチックシンチレータには直径 1mm の溝が 2cm 間隔で掘られていて、その溝に WLSF(Wave Shifting Fiber) が埋め込まれる。PMT からの信号は 40MHz の FADC で AD 変換され、記録される。データ転送には無線ネットワークを使用する。図 (2.20) はそのためのコントロールタワーである。図 (2.1) にあるように SD は、およそ 1.2km 間隔で 772km² の面積に碁盤目状に 576 台設置される。これにより、SD の有効観測面積は AGASA の約 9 倍の規模となる。

また、実験サイトには電源設備がなく、ケーブルを引く事も現実的ではないため、太陽電池とバッテリーにより自家発電を行う。

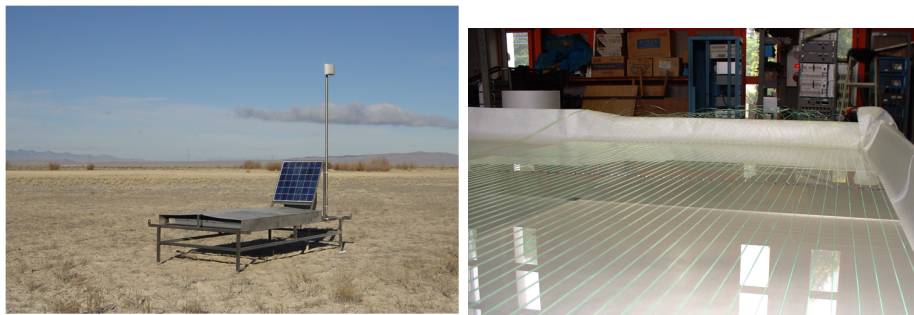


図 2.18: 左側の写真は現地 (米国ユタ州) に設置されているところ。各 SD にはエレクトロニクスボックス、ソーラーパネルが取り付けられている。右側の写真は宇宙線研究所で製作されているシンチレータに WLSF を埋め込んだ SD。SD1 台あたり 200 本の WLSF が使われる。

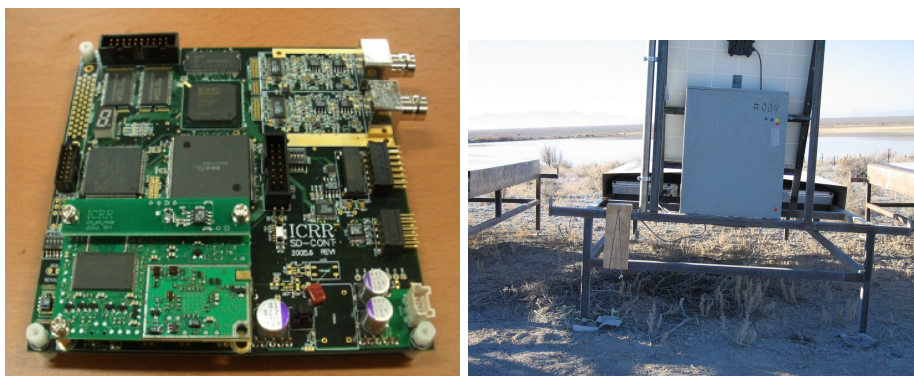


図 2.19: 左側の写真は各 SD に取り付けられたエレクトロニクスボックスに入っているデータ収集エレクトロニクス。右側の写真は SD を背後から撮った写真であるが、SD のソーラーパネルの背後にエレクトロニクスボックスが取り付けられている。

第3章 大気蛍光望遠鏡 DAQ システムの開発

FD DAQ システムのプロトタイプを仕上げるため、今回、米国ユタ州にて DAQ システムを開発した。DAQ システムの最終的な目標としては各 FD ステーションに搭載されている各装置の自動化である。これは観測ステーションが日本から遠く米国にあるため、FD ステーション内の装置の異常、取得データのモニターなどが他の実験に比べ大変困難であるためである。今回のプロトタイプ DAQ の目標としては自動化の初期段階として遠隔操作を行うシステムを導入する。具体的には 1 台のカメラでのデータ収集、PMT 電源である High Voltage Power Supply(以下 HV と略す)、Pre-AMP 電源である Low Voltage Power Supply(以下 LV と略す) の操作、環境モニター、取得データのイベントモニターを行えることを目指す。また最終的に FD ステーションの無人化を目的としているためにネットワーク、電力、セキュリティなどの危険性を考慮に入れたエラー処理システムについても開発する。

本章では今回の研究課題となる FD DAQ システムの開発について述べ、最終的に完成したものについて述べる。

3.1 大気蛍光望遠鏡 DAQ システムの概要

以下に FD の DAQ システムの構成について述べる、大きく分けてデータ収集系、ステーション内の管理、中央制御コントロール、ユーザインターフェースの四つに分かれる。

- データ収集系
 - VME PC : SDF からのデータ吸い出し、および Data Storage PC へのデータ送信を行う
 - CTD PC : CTD の操作
 - Data Storage PC : Analysis PC の役割も果たす。最終的には独立させる予定。12 カメラからのデータを受信し、HDD に保存。同時に online でのイベントデータの解析も行う。
- ステーション内の管理 (Slow Control)
 - Slow Control PC : 今回は HV Control PC、Environmental PC の役割も果たす。それぞれ HV のコントロールと、雲、風、雨滴、温度などの環境モニターを行う PC である。最終的には独立させる予定。今回はステーションの Shutter、LV、HV、温度、湿度、照度を管理をする。
- 中央制御コントロール・モニター (Run Control)
 - Run Control PC : 全ての PC のコントロール、ステータス管理をする。

- ユーザーインターフェース

- Web PC: ユーザーインターフェースを提供する PC。Web アプリケーションを使用する。

FD DAQ システムの全体図を図 (3.1) に示す。12 台の VME PC と Data Storage PC がデータ収集を行い、データを保存する。今回データ転送にはローカルエリアネットワークである TCP/IP を使用する。ステーション内の管理は Slow Control PC が行い、Pre-Amp 電源である LV の操作、PMT 電源である HV の操作、温度、湿度、照度などのステーション内の環境モニターを管理する。Run Control PC は中央制御を行う PC として各 PC への命令やステータスの管理を行う。またユーザーインターフェースとして Web アプリケーションを使用する。これによりどこからでも FD ステーションのコントロールを可能にすることが出来る。またこれら全ての PC のコミュニケーション手段として Bell 実験で中尾らによって開発された Network Shared Memory(以下 NSM と略す)を使用する [2]。以下では NSM について述べる。

FD1 ステーションあたり、PC は全部で 20 台あり、各 PC ごとの役割は

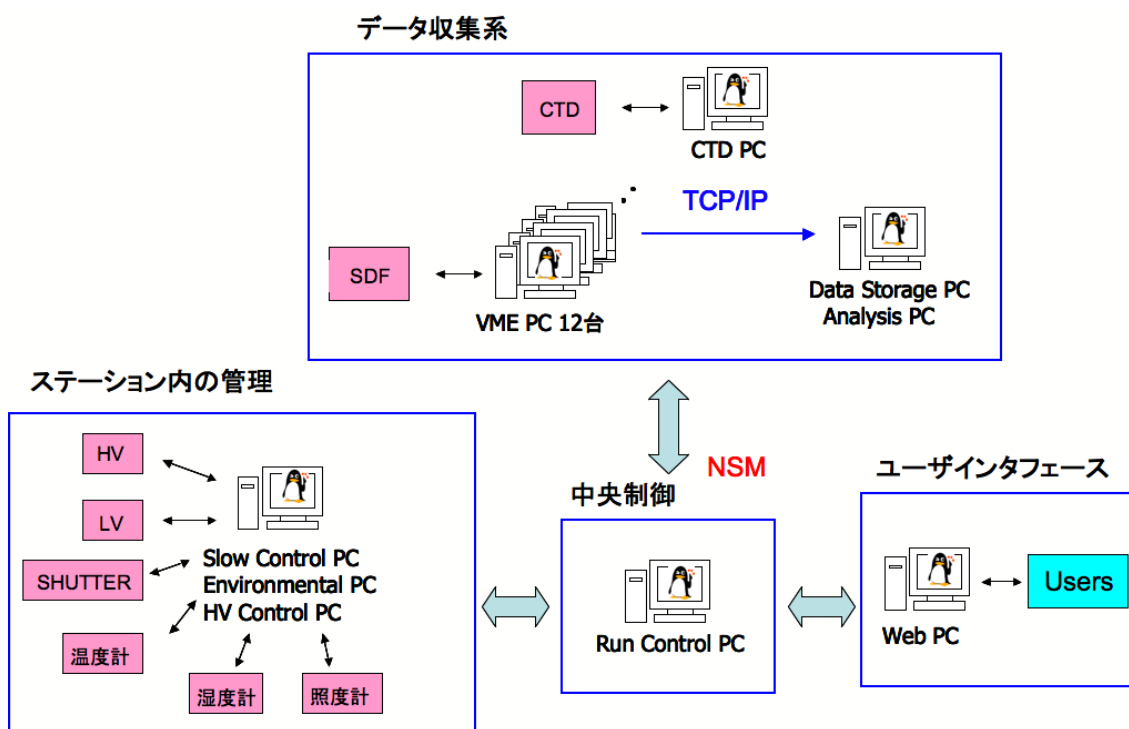


図 3.1: FD DAQ のイメージ図

3.1.1 Network Shared Memory

NSM は大規模の高エネルギー実験のための DAQ システムのコントロールとモニターをする事を目的に開発されたソフトウェアである。PC 間のコミュニケーションを行う手段として

- リクエスト
- 共有メモリ

と呼ばれるものを使用する。またこの NSM を使用するため 2 種類のプログラムが必要となる。デーモンプログラムとクライアントプログラムである。以下にそれぞれについて述べる。

デーモンとクライアント

デーモンは NSM を使用している間は常に動かす必要がある。デーモンは同じ PC 上で動作しているクライアントと通信をし、さらに他の PC 上で動いている NSM デーモンと通信する役割を持っている。つまり別々の PC 上で動作しているクライアント同士のインターフェースの役割を果たすことになる。また、クライアントプログラムはユーザが作成するプログラムであり、NSM が提供するライブラリを使用する事で作成される。図 (3.2) にイメージ図を示す。

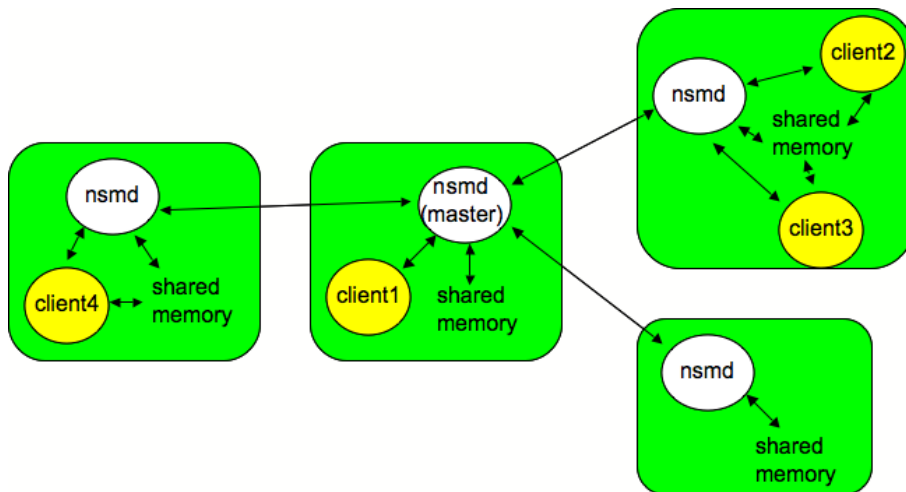


図 3.2: NSM のネットワーク構造図、緑色の四角で囲まれているのが一つの PC を表す。白丸がデーモンプログラムである。黄丸がクライアントプログラムを表す。デーモン間の矢印は TCP 通信を表す。

リクエストとメッセージ

特定の動作を他のクライアントに要求するために伝達される情報である。プロセスに対する割り込み要求となり、急な対処が必要などときに利用する。メッセージはリクエストと同じ役割を果たすが、480 バイトまでのデータも同時に送信出来る。これは情報伝達やエラー通知などに用いる。

共有メモリ

異なる PC 間でのデータ共有のため、非同期に更新され、監視などに使用される情報である。ハードウェアとしては 256 キロバイトあり、それを各クライアントが分割して使用する。1 つのクライ

アントは連続した1つの領域を確保して、他のクライアントで使用出来る情報を書き込む事が出来る。また、他のクライアントで更新されていくデータ領域を開く事が出来る。

テレスコープアレイ実験におけるFDのDAQシステムはこのNSMを使用して複数PC上にクライアントプログラムを作り、PC間通信を可能とするリクエストと共有メモリを使用して開発した。以降に具体的な開発方法について述べる。

3.2 NSM を使用した中央制御システムの開発

ここでは NSM を使用しての中央制御システム開発手法を示す。

3.2.1 Run Control に要求される条件

Run Control の DAQ システムにおける主な役割は全体の PC のコントロール、ステータスのモニター、エラー処理である。具体的には図 (3.1) に示した通り、ユーザの要求は全て Web PC から NSM のリクエストを利用して RunControlPC へ送られる。その後 RunControlPC は各 PC へユーザの要求通りにリクエストを送り、各 PC が要求通りに動作しているかを常にモニターする。この動作を正確に安定して行わなければならない。

3.2.2 Run Control の開発手法

コントロール

現在 2 種類の方法をとり中央制御をしている。主に NSM のリクエストを使用している。例えばシャッターを開けたいとき、Slow Control クライアントに「シャッターを開け」というリクエストを送る。すると Slow Control クライアントはシャッターを開ける動作を行う。もう一方の方法として共有メモリを使用する。これは VME PC、CTD PC など常に SDF や CTD からの割り込み待ちをしているものに対して使用する。リクエストは割り込み要求となるので SDF、CTD の割り込みの妨げになる恐れがあるので使用するのはいま好ましくないためである。コントロールが完了したかどうかの判断は以下に述べるステータスマニターと同様の方法をとる。

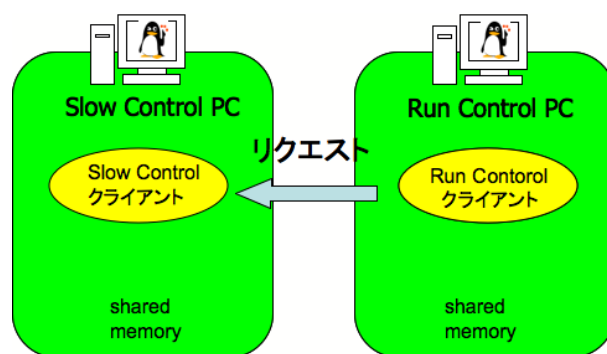


図 3.3: コントロール方法のイメージ図、デーモンプログラムは省く。リクエストをクライアントに送り動作を要求する

ステータスマニター

各 PC のステータスマニターは全て共有メモリを使用する。例えば VME PC がデータ収集している場合、VME PC 上で確保された共有メモリ上にデータ収集中という情報が書かれる。これを Run Control PC が確認する事で VME PC がデータを収集しているという事を知る。他の PC についても同様な方法でステータスをモニターする。

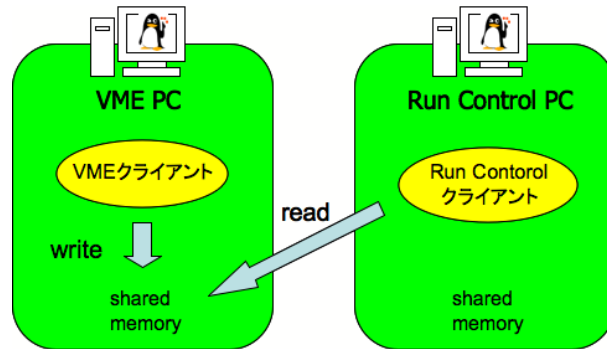


図 3.4: ステータスマニター方法のイメージ図、デーモンプログラムは省く。

エラー処理システム

エラーの発生した PC は基本的には自己管理でエラーを処理する。自己管理とはエラーの発生した PC が自分でエラーの処理を行い定常的な状態に復帰する事である。またそれとは別に各 PC は Run Control クライアントへはエラーリクエストを送る。エラーリクエストを受け取った Run Control クライアントは自分の共有メモリ上にエラーが発生した事を記述する。Run Control PC の共有メモリに記述する事により、後述する Web PC に情報が伝わり、エラーが発生したことをユーザが知る事が出来る。エラーを自己管理で処理しきれない場合、Run Control クライアントはエラーリクエストを受け取ったら直ちに予め登録してある処理方法で他の各 PC へ命令を送る。各 PC は Run Control PC の命令通りに動作する。また Run Control クライアントは全てのクライアントが正常に動作しているかも常にモニターしている。これによりステーション内におけるネットワーク異常などをすぐに発見出来るようなシステムとなっている。

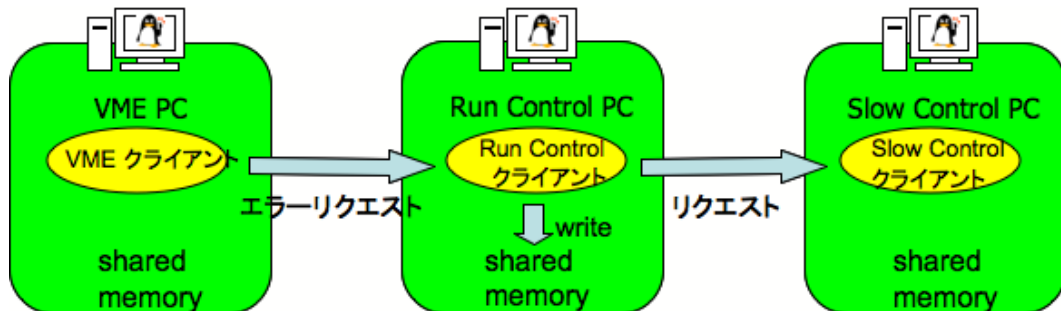


図 3.5: エラー処理システムのイメージ図。エラーの発生した PC はリクエストを Run Control クライアントへ送る。

ログメッセージシステム

基本的にログメッセージはクライアントプログラムが動いている間、全ての PC で HDD に記録され続けて行く。Run Control PC のログメッセージは後述する Web PC に送られ、現在どのような動作を行われているのかが Web PC を通して見る事が出来る。

現在以上のような中央制御システムでFDのDAQを管理している。データ収集系、Slow Control、

3.3 データ収集システムの開発

テレスコープアレイ実験の FD で観測するのは $10^{18.5}\text{eV}$ 以上の最高エネルギー宇宙線空気シャワーによる大気蛍光であり、その結果により一次宇宙線のエネルギーなどを決定する。そのために $10^{18.5}\text{eV}$ 以上のエネルギーを持つ宇宙線の到来頻度以上の DAQ レートをもつ DAQ システムを作る必要がある。そのために以下の条件を満たすデータ収集システムを開発する。

3.3.1 データ収集システムに要求される条件

1 イベントのデータ量と転送方法

テレスコープアレイ実験の FD は、1 イベントのデータ量が 1 カメラ当たり 263kbyte となっている。内訳として、1 イベント 512bin(1bin あたり 10nsec) の時間幅を持ったデータが取得され、1bin あたり 16bit で ADC 値を判別する。また 1 カメラあたり 256PMT あるため、合計 263kbyte のデータが 1 カメラから取得されることになる。転送方法としては、カメラ間にまたがるようなイベントについてもオンライン解析で再構成を行うため、全カメラから 1 台の Data Storage PC へのデータ転送を行う。

実イベントの見積もりから要求される事

最高エネルギー宇宙線の実イベントのレートを見積もる。テレスコープアレイ実験に置ける FD1 ステーションは半径 20km 以内のイベントの観測を狙っている。また図 (1.1.1) のエネルギースペクトルより一次宇宙線のエネルギーが 10^{18}eV から 10^{21}eV の到来頻度を、全天から降り注ぐものとして宇宙線頻度を概算すると約 0.005Hz と推測される。この値が DAQ 転送速度として最低限必要となる速度となる。

エレクトロニクスのデータ転送レートから要求される事

また現在、SDF から VME PC へのデータ転送は 26Hz で行われている。このため 263kbyte をデットタイムなしで VME PC から Data Storage PC へ送信するためにはこれ以上の速度が必要となる。具体的に 1 カメラ辺り 6.7MB/s の速度が出る必要がある。12 カメラ時では 80MB/s のデータ転送速度を実現する必要がある。PC 側では DAQ レートにデットタイムが出ないようにしなければならない。

3.3.2 データ転送システム開発手法

今回データ転送の手段としてローカルエリアネットワーク内での TCP/IP を使用する。TCP/IP は情報伝達手段として広く使用されているプロトコルであり、OSI 参照モデルとしては第 3 層のネットワーク層と第 4 層のトランスポート層のプロトコルを意味する。トランスポート層の TCP は、パケットの再送制御やシーケンス制御によりパケットが相手に順序よく確実に届くように制御を行う。インターネット層の IP は IP アドレスの割り振り、パケットのルーティング、パケットの分割処理、再構築処理を果たす。この TCP/IP プロトコルを使用してデータ収集システムを構築する。

データ収集系のハードウェア仕様

データ収集系におけるハードウェアの仕様を(図 3.6)に示す。FD カメラ 12 台分のデータが 12 台の VME PC から LAN ケーブルとスイッチングハブを経由し、1 台の Data Storage PC へと流れる。

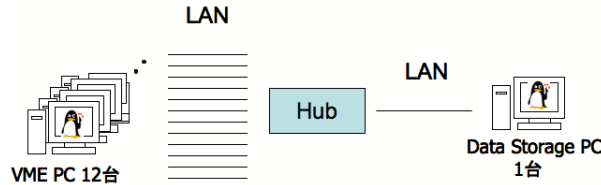


図 3.6: ハードウェア仕様

データ収集系のソフトウェア仕様

データ収集系におけるソフトウェアの仕様を(図 3.7)に示す。プログラム言語としては C 言語を用いた。図(3.7)に示されている関数は C 言語のライブラリとして標準的に用意されている関数である。送信側の VME PC はプロセス間通信が必要である socket 接続を行ってから、SDF からのデータ収集を開始し、1PMT ごとに send() を使用し、データを Data Storage PC へ送る。データ収集が終了したら、ソケットをクローズする。受信側である Data Storage PC はソケットを作ってから常に accept 状態となる。VME PC から指定しているポートに接続要求が来たときに fork() により子プロセスを生成し、子プロセスに I/O 制御、ソケットクローズまでを任せる。もとの親プロセスはすぐに accept 状態に戻り、他の VME PC からの接続要求を待つようになっている。

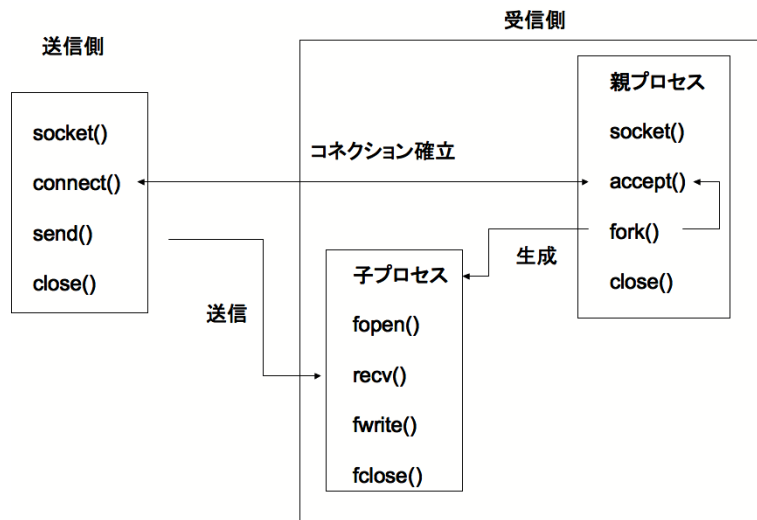


図 3.7: ソフトウェア仕様

また作成した目標値である DAQ レートの性能評価試験を第 4 章に記述する。

3.4 Slow Control システムの開発

3.4.1 Slow Control システムに要求される条件

Slow Control は主にシャッター、LV、Xenon、環境モニター、電気系統の監視・コントロールを行い、自己管理を行うための PC である。シャッター、LV、温度、湿度、照度をモニター、コントロール出来る必要がある。また FD ステーションのシャッター制御は HV、カメラ等を保護する上で非常に重要であるため、様々な対策を考える必要がある。

3.4.2 Slow Control システムの開発手法

SHUTTER 制御システム開発手法

シャッターは電力線を通信回路とする技術である PLC(Programmable logic controller) を用いてモニター・コントロールを行う。Slow Control PC は PLC と RS-232C ケーブルを用いたシリアルポートによる遠隔操作を行う事でモニター・コントロールを行う。シャッターはオープン、クローズ、ストップの 3 種類の操作を行う。シャッターを開くときには日の出、日の入り、月の出、月の入り時刻計算プログラムから現在シャッターを開ける事が可能かどうかの判断をし、開けられない時間帯であればエラーを出す。また全体のコントロールである Run Control PC との通信にネットワーク異常が生じた場合操作不能となるため、安全のため自動的にシャッターは閉まる。以下にシャッターが閉まる場合の条件を記述する。

- 現地にて手動による場合
- DAQ システムを利用しての遠隔地からの要求の場合
- 日の出、月の出時刻計算プログラムにより PC 上で太陽、月が出ていると判断された場合
- Run Control PC とのネットワークに異常が生じた場合

この他、電力に異常が生じた場合、シャッターに物理的な異常が生じた場合、SlowControlPC の異常などの対策が考えられていないため実際に利用する際には注意が必要であり、早急に対策を考えなければならない。対策としてそれぞれシャッター開閉のための緊急用予備バッテリーを用意する、シャッター以外にも FD の鏡部分を覆うようなものを用意する、シャッターを制御出来る PC を Slow Control PC 以外にも用意する、などが考えられる。

HV 制御システム開発手法

今回は Slow Control PC による制御を行った。実際は別の PC を用意する。通信には TCP/IP を用いる。1 台の HV distributor で 1 カメラの PMT256 本に電圧をかける事が出来る。1 ステーションに全部で 12 台用意されている。Web ブラウザで現在の PMT の HV 値をモニターし、表示する事が可能である。

LV 制御システム開発手法

LV は今回、RS-232C ケーブルを USB 変換して Slow Control PC に接続し、リモートコントロールを行った。LV は 12 台必要だが RS-232C では最大 4 台までのリモートコントロールしか接続可能ではない仕様であった。将来的には RS-232C ではなく、GP-IB を用いたリモートコントロールを行う。LV は電圧と電流値をモニターする事が出来る。

環境モニターシステム開発手法

環境モニターは現在温度、湿度、照度の 3 種類の測定を定期的に行い、その結果を残し、更に以下に述べるように Web ページで確認出来るようにした。今回温度計、湿度計を 1 つずつ、照度計を 2 つ用意し、測定にはマルチメータを用い、リモート操作は TCP/IP によって LAN ケーブルを繋いで行った。温度はサーミスタで出来ているので抵抗値を測定し、抵抗値から温度に変換している。湿度は電圧値を測定し、電圧値から相対湿度 (RH : 単位%) に変換している。照度計に関しては本来の照度の単位であるルクスで表すべきであるが、測定値である抵抗値からルクスへの変換式が不明だったため測定値である抵抗値をそのまま用いた。今後は雲モニター、風速モニター、雨モニターも行い、全ての測定値から観測が可能な条件であるかを判断し自動制御が行えるようにする必要がある。

その他の Slow Control 制御システム開発手法

PMT のキャリブレーションに使用する Xenon flasher の発光なども自動化する。また遠隔操作においての安全面で重要である電力供給システムについても PLC を用いて今後自動化する。

3.5 ユーザインタフェースシステムの開発

3.5.1 ユーザインタフェースに要求される条件

この章の冒頭でも述べたが、FDのユーザインタフェースとしては、DAQシステムを世界中どこからでも操作ができ、さらに複数のユーザがDAQシステムをモニターすることが出来る必要がある。またFDのDAQシステムのベースとなっているNSMを搭載し、ブラウザからNSMを通してリクエストを送る事ができ、さらにNSMの共有メモリをブラウザから読めるようにしなければならない。以後でWebサーバ開発手法について述べる。

3.5.2 遠隔操作システムの開発手法

DAQシステムのユーザインタフェースとしてWebアプリケーションを使用する。Webサーバを構築する事でユーザが遠隔地からDAQシステムのモニター、コントロールが出来るようになる。かつDAQシステムのPCに直接ログインする事なく、それらを可能にする事が出来る。Webサーバは一般的にHTML文書や画像などの情報を蓄積しておき、Webブラウザなどのクライアントソフトウェアの要求に応じて、インターネットなどのネットワークを通じて、これらの情報を送信する役割を果たす。以下にWebサーバを構築するために使用したソフトウェアについて簡単に述べる。大きく分けてWebサーバはJSP/Servlet、NSM、PostgreSQLの3つから構成されている。それらをどのように使用しているかについて述べる。

- JSP/Servlet の環境の構築
 - JDK : JAVA 言語でプログラミングを行う際に必要なソフトウェアのセット
 - Apache : Web サーバのこと、クライアントとサーバ間のリクエスト/レスポンスを制御するインタフェース
 - Tomcat : Servlet/JSP を解析し、実行するためのエンジンであり、それ自身が Web サーバとして機能する事が出来る。今回は Apache のプラグインとして用いる
 - mod_jk : Apache と Tomcat の間の連携を制御する実行ファイル
- データベースの環境の構築
 - PostgreSQL : データベースのこと
 - Jakarta-ANT : PostgreSQL の JDBC(Java DataBase Connectivity) ドライバを使用するためのもの。シェルベースではない make file のようなもの
- NSM : 上記記載

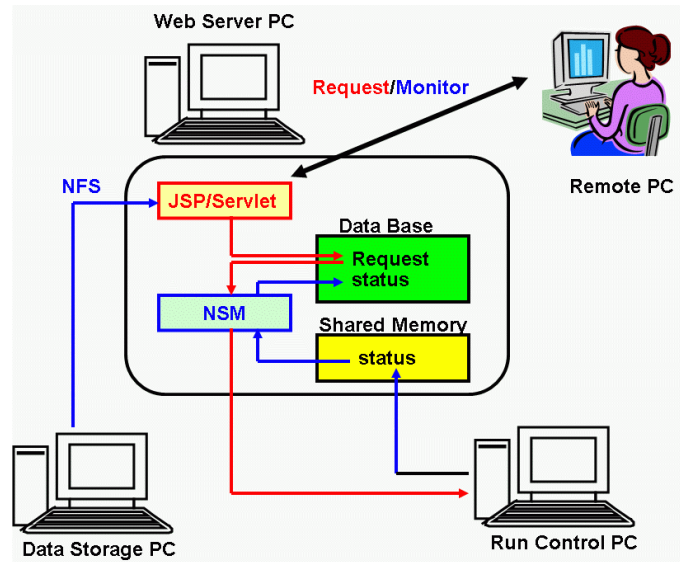


図 3.8: Web DAQ インタフェースの概要

Web サーバを立ち上げるという事は一般的には Apache を立ち上げる事である。Apache によって HTML 形式のファイルをブラウザから読む事が可能になる。しかし基本的に HTML ファイルは静的なページのみしか表示出来ない。静的とはあらかじめ HTML ファイルに書き込んだドキュメント (テキストファイル) や画像、動画を表示するという意味である。ユーザがブラウザを開いたときに表示される内容が変化するというページを HTML のみでは作る事ができない。これを可能にするのが Servlet(サーブレット)/JSP である。Servlet/JSP は JAVA ベースのプログラムである。JSP(Java Servlet Pages) を用いる事で HTML ファイルの中に JAVA 形式のプログラムを記入する事で動的なページを作る事が出来る。

またデータベースを使用する事で NSM が立ち上がっている間、常に共有メモリの値をデータベースに書き込み、そのデータベースの値を JAVA ベースである Servlet/JSP が読んで Web ページに表示する仕組みになっている。リクエストに関しては、この反対の動作になり、Web からリクエストを送った際、リクエスト情報は Servlet/JSP によってデータベースに記録され、そのデータベースの値を今度は NSM ノード中で読み、リクエストが存在する場合に NSM のリクエストを送るという仕組みになっている。以下にこの機能を利用して実際に動かしたユーザインタフェース機能を記述する。

3.5.3 完成したユーザインタフェースの機能と概観

現在 (2005 年 12 月) までに完成している DAQ の Web を利用したユーザインタフェースの詳細について述べる。DAQ のインタフェース部は大きく分けてコントロールページとモニターページがある。まず始めにコントロールページについて示し、最後にモニターページについて示す。

コントロール画面

ユーザはリクエストを出すことで DAQ のコントロールを行う事が出来る。ユーザから操作可能なコントロール系は 3 種類である。「Single Request Mode」、「Fix Sequence Mode」、「Free Sequence Mode」である。現在「Single Request Mode」で操作出来るものはデータ取得スタート、ストップ。HV の UP、DOWN。LV の UP、DOWN。シャッターのオープン、クローズ。である。他のモードはこれの組み合わせで動作する。

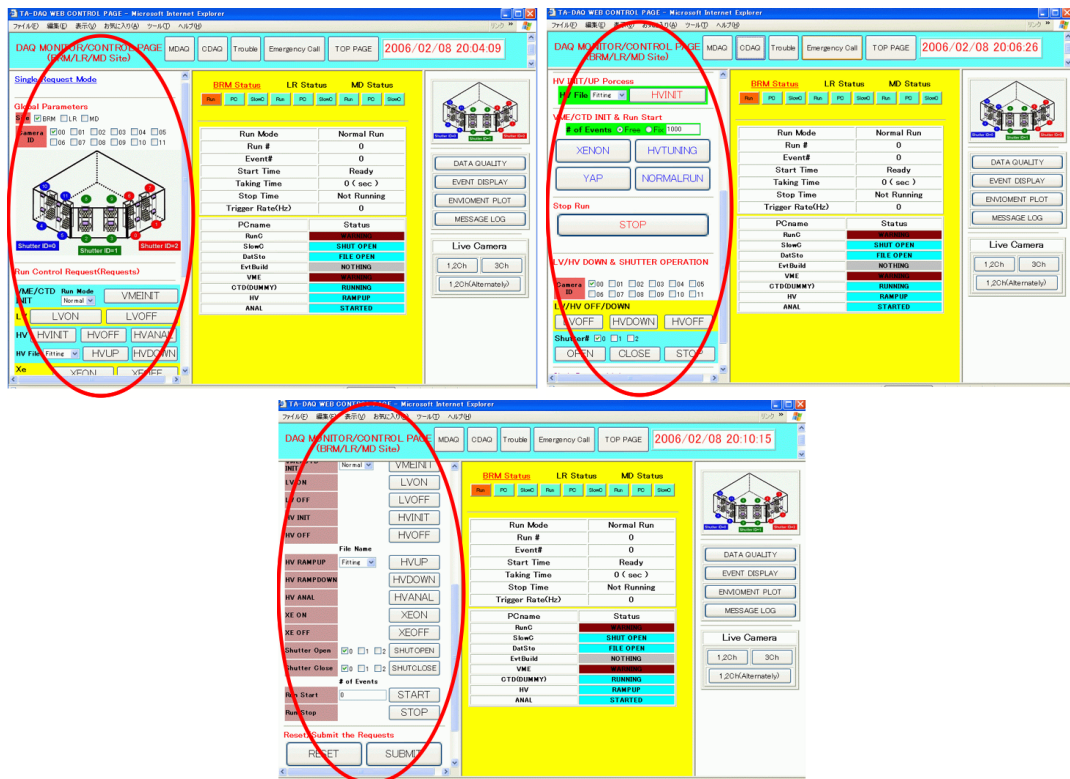


図 3.9: 左上写真は Single Request Mode でのコントロール画面、右上写真は Fix Sequence Mode でのコントロール画面、下写真は Free Sequence Mode でのコントロール画面 (囲み部分参照)

- Single Request Mode : リクエスト 1 つ 1 つを独立に送る事が出来るものであり、リクエストはボタンをクリックする事で送る事が出来る。
- Fix Sequence Mode : Single Request Mode では操作方法がわからないユーザのために実装した簡単操作バージョンである。

- Free Sequence Mode : 基本的に Single Request Mode と同じであるが、リクエストがすぐには送られず、データベースにリクエスト内容が蓄積されるようになっている。そして複数のリクエストをまとめて送る事が出来るモードである。

DAQ モニターページ

DAQ のモニターは主に Run ステータスマニター、PC ステータスマニター、SlowControl ステータスマニターの 3 種類がある。以下にそれぞれについて示す。

- Run ステータスマニター

Run Mode	Normal Run
Run #	92
Event#	2710
Start Time	Tue Dec 13 11:39:11 JST 2005
Taking Time	685 (sec)
Stop Time	Still Running
Trigger Rate(Hz)	4.0
PCname	Status
RunC	RUNNING
SlowC	LVUP
DatSto	FILE OPEN
EvtBuild	NOTHING
VME	RUNNING
CTD	RUNNING
HV	RAMPUP
ANAL	STARTED

図 3.10: Run Status Monitor(囲み部分参照)

- Run モード
Normal Run、Xe Run、YAP Run の 3 種類が用意されている。これらのどれかが表示される。今後キャリブレーションに使用する Lider、CLF などのモードを用意する。
- Run 番号
現在の Run 番号を表示する。
- イベント番号
DQM がモニターしている最新のイベントのイベント番号を表示している。
- データ取得開始時刻・データ取得時間・データ取得終了時刻
VME がデータを取得し始めた時刻を開始時刻としてデータ取得時間は後に触れる DQM モニターがモニターしている最新のイベントの取得刻までの時間をデータ取得時間。そ

して VME がデータ取得を終わった時刻をデータ取得終了時刻と定義して表示している。
将来的にはこの時間は GPS を搭載している CTD が管理する事になる。

- トリガーレート

現在のトリガーレートの数値の時間変化を表す。

- 各 PC のステータス一覧

Run Control PC、Data Storage PC、VME PC、CTD PC、HV PC、Analysis PC のステータスをそれぞれ一つのラベルに表示したテーブルの事、図 (3.10) 以上に RunControlPC、DataStoragePC、EventBuildPC(まだ実装されていない)、AnalysisPC、SlowControlPC、CTDPC、12 台の VME PC、HV ControlPC のステータスが表示されている。

- PC ステータスマニター

Run Control PC、Data Storage PC、Eventbuild PC(今回は実装していない)、Analysis PC、SlowControl PC、VME PC、CTD PC、HV Control PC のステータスを表示したもの。ステータスが正常か異常かはラベルの色で判断出来るようになっている。基本的に水色が正常、黄色が状態の変化途中にあることを示し、それ以外の色は異常を表す。HV ControlvPC に関しては 12 カメラの各 PMT の HV 値が表示出来るようになっている。

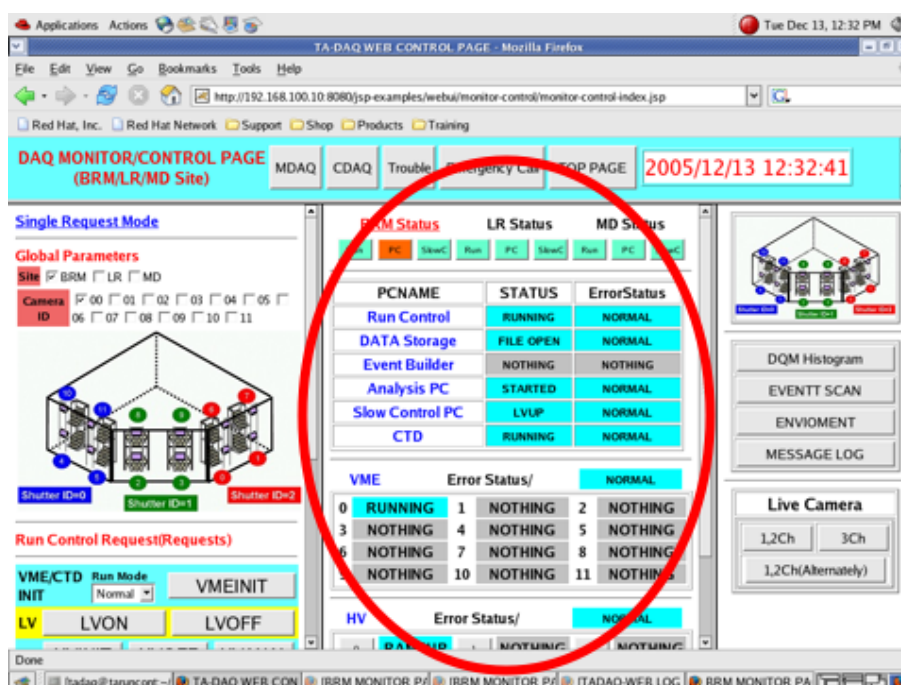


図 3.11: PC ステータス (囲み部分参照)

- SlowControl ステータスマニター

SlowControl ステータスは SlowControlPC が主に管理しているシャッター、LV、Xenon フラッシャー、電気系統のステータスを表示している。今回は Xenon フラッシャーと電気系統に関する実装は一つもしていないのでステータスが出るのはシャッター、LV に関してのみである。

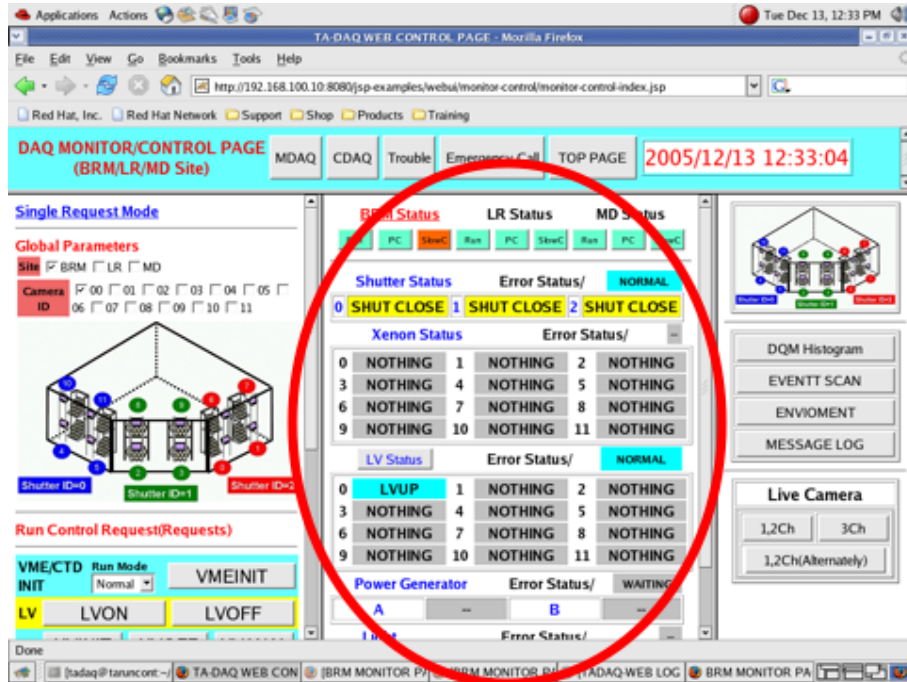


図 3.12: Slow Control ステータス (囲み部分参照)

エラーステータス

Run Control ステータス、PC ステータス、SlowControl ステータスに表示される正常なステータスは上に示した通りである。ここではエラーの表示の仕方について説明する。エラーは現在3段階に分けられて表示される。最も深刻度の低いエラーとして警告を意味する「WARNING」、深刻度は低くないが、何らかの異常を捕らえたという意味で「ERROR」、最後に最も深刻度が高く致命的で、データ収集が困難な状態を表す「FATAL」がある。それぞれの位置づけとしては、

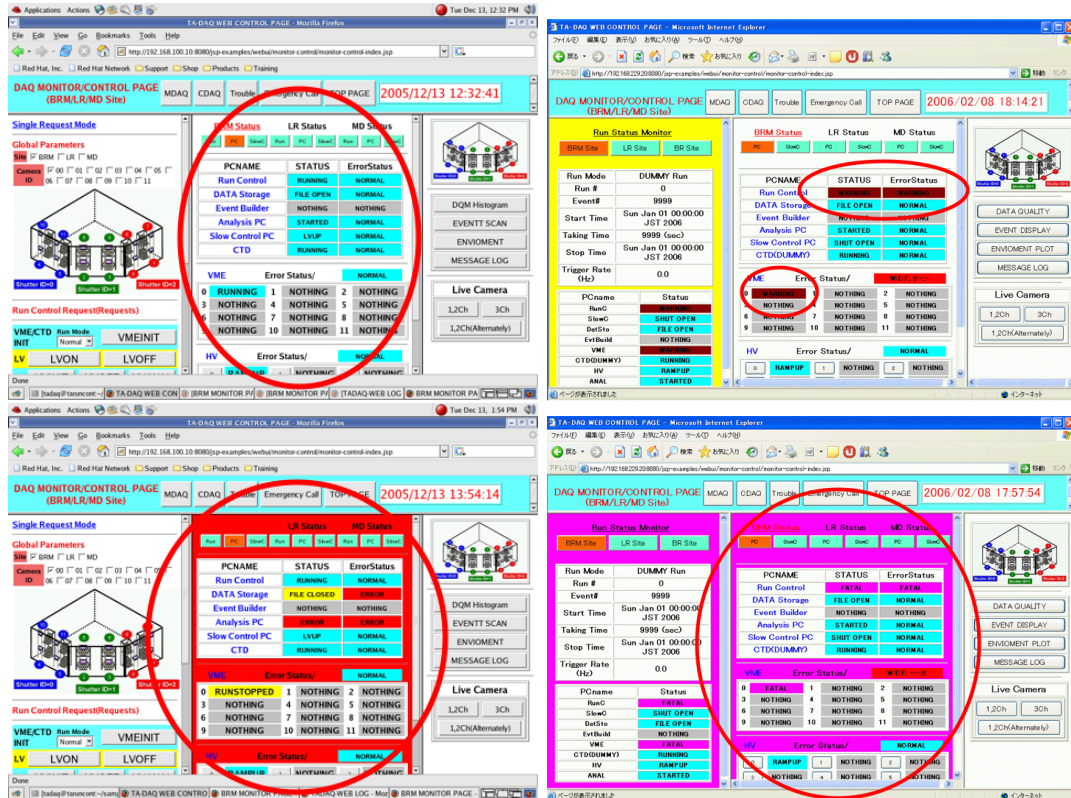


図 3.13: 左上写真は正常状態、右上写真は「WARNING」状態、左下写真は「ERROR」状態、右下写真は「FATAL」状態を表す。(囲み部分参照)

- WARNING : 基本的にユーザは無視出来るがチェックだけはしておく。このエラーに関しては警告を出した各 PC の自己管理によって解決する。
- ERROR : 基本的にユーザは無視出来ないがデータ収集が困難な状況ではなく、データ収集を止める必要はない。可能な限り各 PC の自己管理によって解決するが、トラブルの種類によってユーザが解決させる必要がある。
- FATAL : 基本的にユーザが解決させなければならない問題。データ収集も困難な状態でデータ収集は自動的にストップさせる。

DQM ヒストグラム

DQM とは Data Quality Monitor の略である。これは Analysis PC によってリアルタイム解析をされた結果を表示するページである。現在、実装されているものは 4 種類あり、各 PMT のノイズレベルの分布、各 PMT のノイズレベルの平均値、各 PMT のノイズを差し引いた ACD カウント値分布の全イベントの平均値、平均トリガーレートの時間変化である。

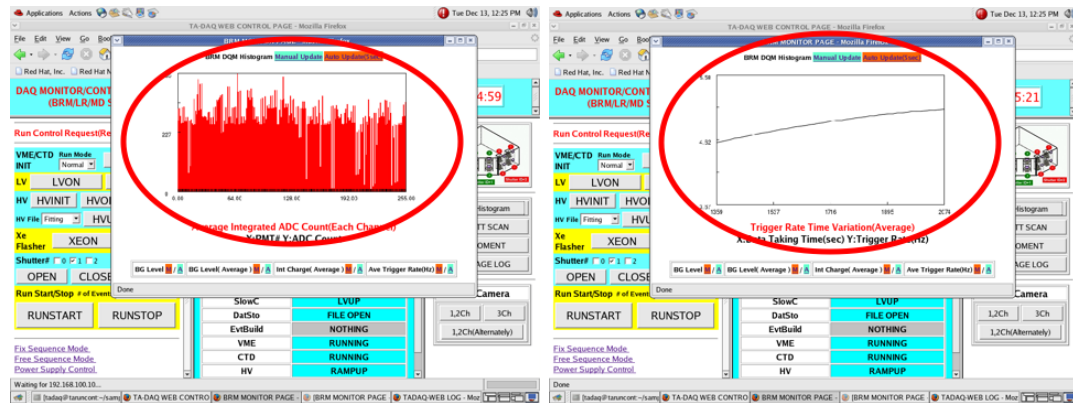


図 3.14: 左写真は各 PMT のノイズを差し引いた ADC カウント積分値の全イベントの平均値を表す、右写真はトリガーレートの時間変化。(囲み部分参照)

- 各 PMT のノイズレベルの分布
ノイズレベルの定義は、512bin ある波形データの時系列の最初の 128bin の ADC カウントの平均値の事である。
- 各 PMT のノイズレベルの平均値分布
解析されたイベントでのノイズレベルの平均値の分布図。解析されている同じ Run 中での全イベントを用いて計算された平均値を表示している。
- ノイズを差し引いた各 PMT の ADC カウント積分値の全イベントの平均値
各イベントごとにノイズを差し引いた ADC 値の積分値を計算し、解析した全てのイベントでの PMT ADC 値の平均値を出したものを表示する。
- 平均トリガーレートの時間変化
現在のイベント数をデータ取得開始時刻と現在のイベントを取得した時刻の差で割った値を横軸時間で表示したもの。

EventDisplay の表示

Analysis PC で解析されたデータを用いて、ノイズを差し引いた ADC カウントの積分値の分布や取得されたデータの ADC カウント値が最大になるピーク時間の分布を表した図。過去 50 イベントの図が蓄積されている。この図は C++ 言語のグラフィックライブラリである Qt を用いて描かれている。現在は 2 カメラ分の表示のみである。

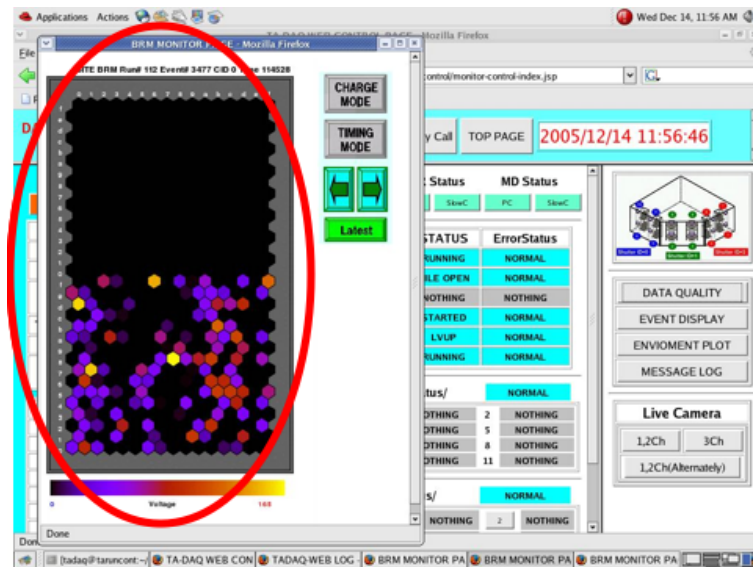


図 3.15: Event Display の概観 (囲み部分参照)

Environment Monitor

環境モニターのこと、今回は温度計、湿度計、照度計の 3 つのモニターを行い、その時間変化を表示。望遠鏡の近くにこれらの測定器を置き測定データから観測可能な条件を導き出す事である。特に照度計は夜明けの判断を行うための重要な要素となるためカメラ近くに置き常に正確にモニターしなければならない重要なパラメータである。

Message Log

Web サーバが Run Control PC にリクエストを送ったときのログや Run Control PC が出したログを表示

「WARNING」の場合は茶色、「ERROR」の場合は赤、「FATAL」の場合は紫色のログが表示される。

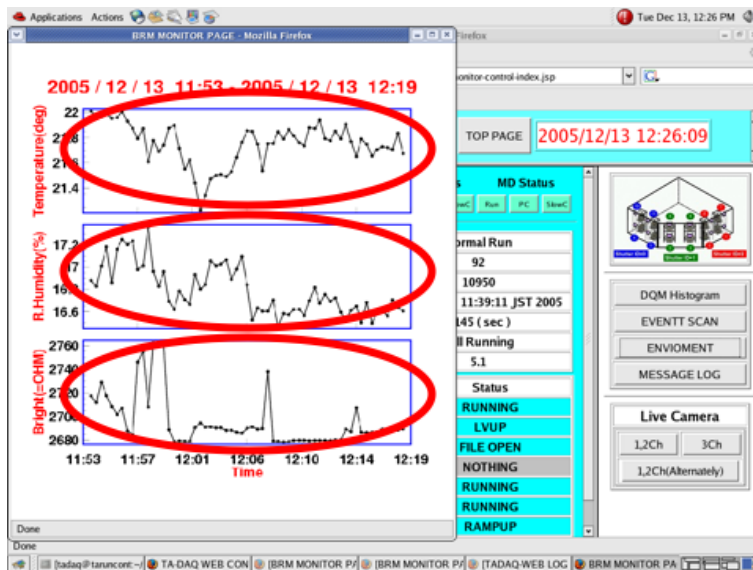


図 3.16: Environmental モニター (囲み部分参照)

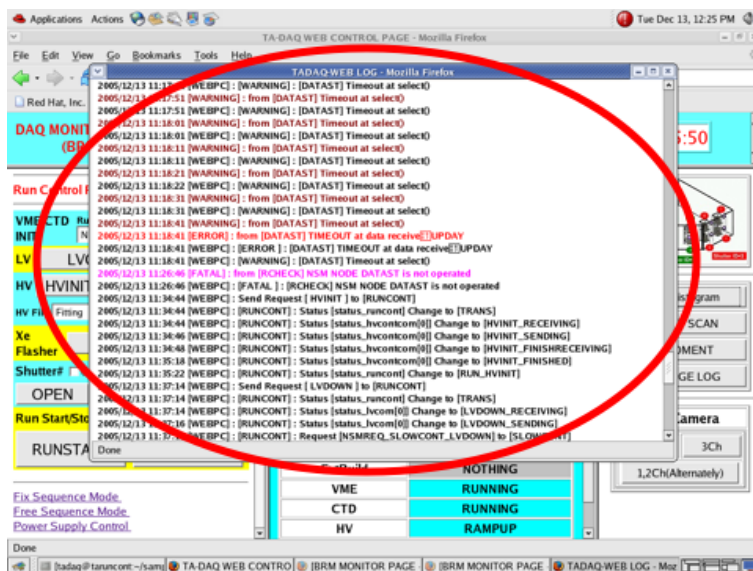


図 3.17: ログメッセージ (囲み部分参照)

第4章 DAQシステムの性能評価

今回開発した DAQ システムの性能評価として DAQ レートの検証と、DAQ システムを使用して 1.3.1 で述べた、FD のキャリブレーションに利用する YAP イベントと Xe flasher イベントを取得することにより、正確なイベントデータを取得出来ているかを検証する。

4.1 DAQ レートの性能評価

4.1.1 DAQ の目標

第 3 章で述べたようにテレスコープアレイ実験における FD の DAQ レートは 30Hz を目指したい。これは実際のイベントレートが

$$0.005\text{Hz} (E > 10^{18}\text{eV}, 1000\text{km}^2, \pi\text{sr})$$

と見積もられ、立て続けにくるイベント、実際のイベント以外のアクシデンタルなイベントなどを考慮するためである。また FD のエレクトロニクスが現在 26Hz 程度でデータ転送を可能としていることもあり、PC 間でのデータ転送速度はこれ以上の速度を出し、PC 側でデッドタイムをなくしたいためである。

DAQ システムで要求されるデータ転送速度

DAQ の PC 側でどれだけの速度が出ればいいのかを概算する。テレスコープアレイ実験の FD では 12 台の VME PC から 1 台あたり 263kbyte のデータが Data Storage PC に流れる仕様となっている。DAQ レート 30Hz を目指すとすると Data Storage PC での受信速度は 750Mbps 程度が出なければならないことになる、また送信側の速度は 63Mbps が必要となる。DAQ レートとは FD でのデータが 1 イベント、1 カメラ辺り 263kbyte となるため、このデータを送信したときの転送レートを表す。

検証するボトルネック

- イーサネットの規格による影響

イーサネットはローカルエリアネットワークにおける通信方法の規格であり、転送速度の最大値によりファーストイーサネット、ギガビットイーサネット、10 ギガビットイーサネットなどに分かれる。それぞれ最大転送速度は 100Mbps、1Gbps、10Gbps となっており、このイーサネットの規格により転送速度の限界が決まる。しかし、設定されている速度が実現するかどうかは接続されている PC の性能、TCP/IP におけるネットワークに関わる主なパラメータに影響する。今回はファーストイーサネットを使用した試験とギガビットイーサネッ

トを使用した試験を行う。ファーストイーサネットでは最大 100Mbps の速度がでること
送信側の性能としては十分であるため試験を行う。ギガビットイーサネットは最大 1Gbps の
転送速度が出るため受信側の PC に使用する事を想定して試験を行う。

- HDD への書き込み速度による影響

実際の転送速度はネットワークの速度と HDD にデータを書き込む速度の合計が評価される
値となる。このためネットワークの速度を速くするとともに HDD の速度も考えなければなら
ない。HDD の書き込み速度の性能を表す要素として

- PC と HDD のインターフェース部分の速度 (SATA など)
- HDD のキャッシュメモリ
- 磁気ヘッドがデータのあるトラックまで移動するのにかかる、平均シーク時間
- 回転速度

があり、この中のどれが一番ネックになっているかは様々な HDD がなかったため今回試験
出来ていない。代わりに HDD へのデータ書き込みを行う場合と、行わない場合で測定する
ことで、HDD のボトルネックを検証する。

- TCP/IP パラメータによる影響

データを転送する際に転送方法を変更する事が出来る。今回は次の 2 種を変更する

- パケットサイズ (Maximum Transfer Unit)
- ソケットの受信バッファのサイズ

パケットサイズは一度に送る事の出来るデータの大きさを表す。使用する接続形態 (イーサネッ
ト、PPP、FDDI など) によって最大値が決定されている。イーサネットでは最大 1500byte
である。PC の CPU 使用率はパケットの送信回数に大きく影響されるためこの値を変更して
転送速度の変化を検証する。

また、ソケットの受信バッファとはデータを受信側 PC が受け取ったときに一時的に保存し
ておくメモリ領域である。受信したデータをいったん受信側 PC のバッファに保存し、その
後それぞれのアプリケーションの read システムコールがデータを読み込むことでデータの
受信が行われる。データ受信量が多くなり、この受信バッファ領域が溢れる状態になると受
信したデータは自動的に破棄される。よってこの受信バッファの領域の大きさを決める事も
転送速度において重要な要素となるため今回検証をする。また今回 PC 上で初期設定されて
いる値はそれぞれパケットサイズは 1500byte、受信バッファは 85kbyte である。

4.1.2 ファーストイーサネット試験

目的

ファーストイーサネットを使用して DAQ レートの性能評価を行い、送信側の PC の性能を達成出来るかどうかを調べるとともに、DAQ レートの目標である 30Hz が可能であるかの検証を行う。

測定方法

以下に今回測定する項目と測定方法を挙げる。以下に示すグラフのデータは PC ごとに 263kbyte のデータを 1000 回送信するのにかかった時間から DAQ レートと転送速度を計算したものを示す。エラーは其中的の最大値と最小値と定義する。

- 送信側 PC1 ~ 12 台時の Data Storage PC の転送速度を HDD へのデータの書き込みを行う場合と行わない場合を測定。
- 送信側 PC12 台時、受信側のソケットの受信バッファを変更して Data Storage PC のデータの受信する速度を測定。
- 送信側 PC12 台時、データの packet size を変更して Data Storage PC のデータの受信する速度を測定。

測定環境

ソフトウェア環境は今回開発した物と同様の物を使用する。以下に試験時のハードウェア環境を述べる。

- ハードウェア仕様

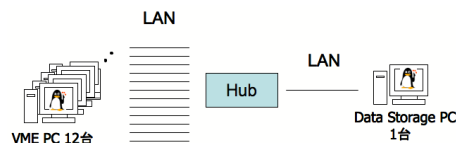


図 4.1: ハードウェア仕様

- OS Vine Linux 2.5CR
- CPU Celeron 1.10GHz
- メモリ 128MB
- HDD 20GB/5,400PRM
- ケーブル カテゴリー 5e
- ハブ BUFFALO LSW-TX-16NSR Switching Hub

- ソフトウェア仕様

今回開発されたものを使用

測定結果と考察

最初に送信 PC 台数の変化による転送レートと転送速度についての測定結果を示し、次に送信側 PC12 台時でのパケットサイズ、受信バッファ変更についての測定結果を示す。

- DAQ レート

横軸に送信側 PC 台数、縦軸に DAQ レート [1/sec] を示す。パケットサイズは 1500byte、受信バッファは 85kbyte で行った。

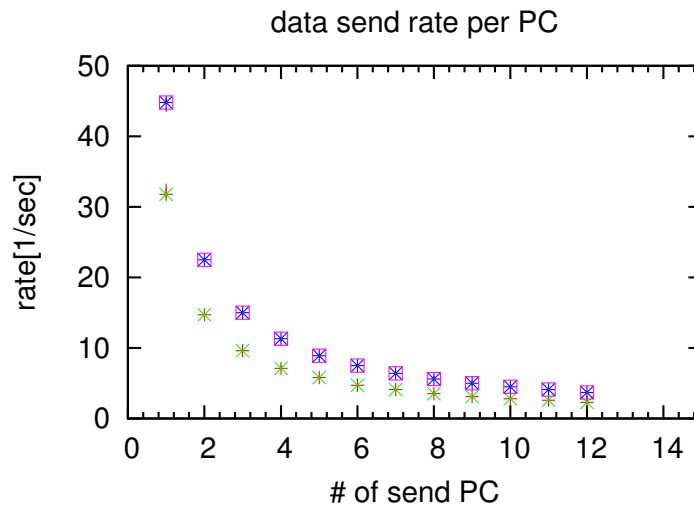


図 4.2: DAQ レート。緑が HDD にデータを書き込む場合、青が書き込まない場合。

PC 台数	DAQ レート [1/sec]	DAQ レート [1/sec] HDD 書き込みなし
1	31.8	44.8
2	14.7	22.5
3	9.6	15.0
4	7.1	11.3
5	5.8	8.9
6	4.7	7.5
7	4.1	6.4
8	3.5	5.6
9	3.1	5.0
10	2.8	4.5
11	2.6	4.1
12	2.3	3.7

表 4.1: ファーストイーサネット使用時での DAQ レート値

- 転送速度

横軸に送信側 PC 台数、縦軸に転送速度 [Mbps] を表す。パケットサイズ 1500byte、受信バッファ 85kbyte で固定。

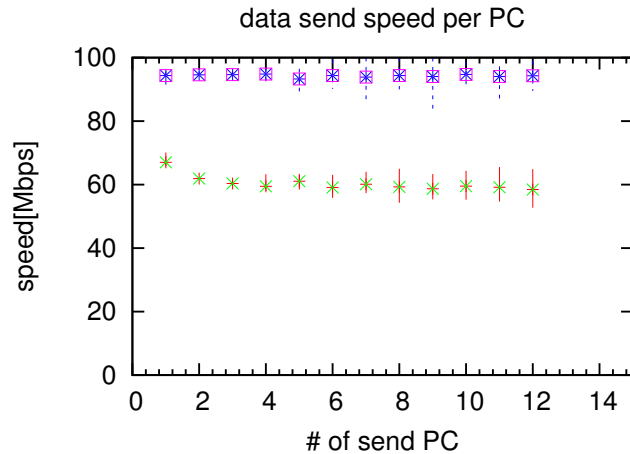


図 4.3: 転送速度。ファーストイーサネットを使用した場合の送信側 PC 台数と転送速度。緑が HDD にデータを書き込む場合。青が HDD に書き込まない場合。

PC 台数	転送速度 [Mbps]	転送速度 [Mbps] HDD 書き込みなし
1	67.0	94.3
2	61.9	94.6
3	60.3	94.6
4	59.4	94.8
5	61.1	93.3
6	59.1	94.3
7	60.1	93.9
8	59.3	94.3
9	58.7	94.0
10	59.5	94.7
11	59.1	94.0
12	58.4	94.3

表 4.2: ファーストイーサネット使用時での転送速度値。

この 2 種類の測定結果より、ファーストイーサネットを使用するとおよそ 94Mbps の速度でデータを安定して送信出来ることがわかる。また表 (4.2) よりデータを HDD へ書き込む場合と書き込まない場合で速度に 3 割の差が見られる。このことより HDD への書き込み速度が大きなボトルネックになっている事が分かる。だが HDD への書き込みをしない送信側 PC の求められる性能としては十分と考えられる。次に送信側 PC12 台時にパケットサイズと受信バッファを変更したときの測定結果を示す。

- パケットサイズの変更

送信側 PC を 12 台、パケットサイズを変更したときの転送速度と DAQ レートを示す。横軸パケットサイズ、縦軸にそれぞれ DAQ レートと転送速度を記す。受信バッファは 85kbyte で固定する。

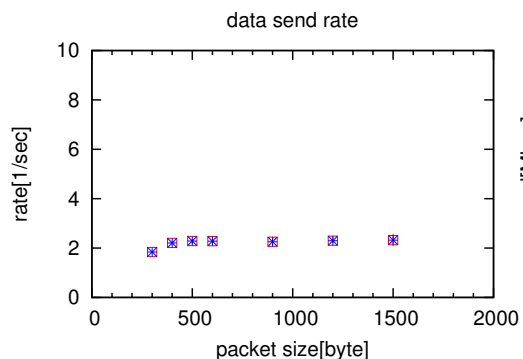


図 4.4: DAQ レート

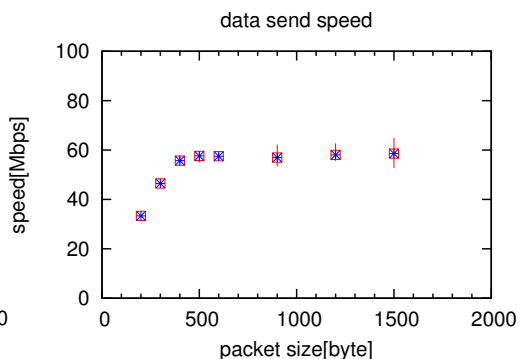


図 4.5: 転送速度

パケットサイズ [byte]	DAQ レート [1/sec]	転送速度 [Mbps]
1500	2.32	58.6
1200	2.30	58.0
900	2.26	57.0
600	2.28	57.5
500	2.28	57.6
400	2.21	55.7
300	1.84	46.5
200	1.32	33.3

表 4.3: ファーストイーサネット使用時でのパケットサイズを変更した時の、DAQ レート値と転送速度値

- ソケットの受信バッファ変更

以下は送信側 PC を 12 台、受信バッファを変更したときの転送速度と DAQ レートを示す。横軸に受信バッファ、縦軸にそれぞれ DAQ レートと転送速度を記す。パケットサイズは 1500 byte で固定する。

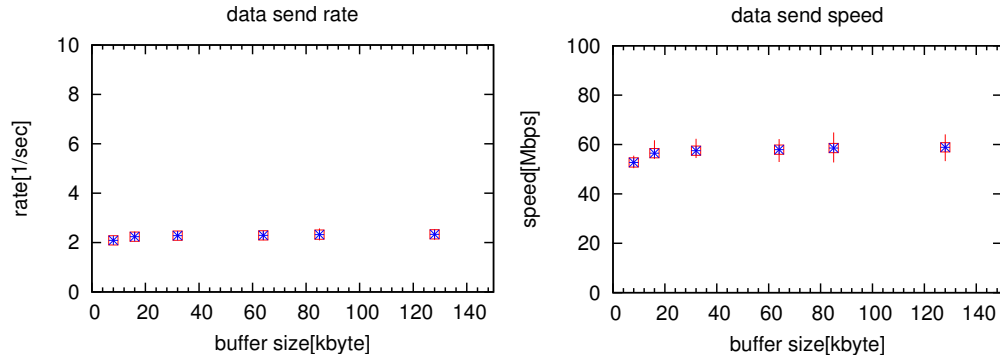


図 4.6: ファーストイーサネット使用時での DAQ レート
 図 4.7: ファーストイーサネット使用時での 転送速度

受信バッファ [kbyte]	DAQ レート [1/sec]	転送速度 [Mbps]
8	2.09	52.7
16	2.24	56.5
32	2.28	57.5
64	2.29	57.9
85	2.32	58.6
128	2.33	58.9

表 4.4: ファーストイーサネット使用時でのソケットの受信バッファを変更した時の、DAQ レート値と転送速度値

以上の結果よりファーストイーサネット使用時には受信バッファと、パケットサイズはそれほど影響がないことがわかる。次にギガビットイーサネットについての試験を述べる。

4.1.3 ギガビットイーサネット試験

目的

ファーストイーサネットではデータを送信する側の能力は十分であるが、12台のVME PCからデータを受信するData Storage PCの性能は十分でない。そのためギガビットイーサネットを使用して受信側でどの程度の速度が出るかを試験する。

測定方法

今回ギガビットイーサネットを受信側に使用した。送信側にはファーストイーサネットを使用する。またまたファーストイーサネット試験同様、受信バッファ、パケットサイズの変更も行い、変化を見る。

- 送信側 PC を 1 台 ~ 12 台と変更し、各 PC は 263kbyte のデータを送り、受信側 PC の受信速度 [Mbps] を測定する。また HDD への書き込みを行う場合と行わない場合での違いを見る。
- 送信側 PC 12 台時、ソケットの受信バッファを変更して受信側の速度を測定する。
- パケットサイズはファーストイーサネットの測定結果より 1500byte より小さいと転送速度が遅くなるためここではこの値に固定した。

測定環境

送信側の PC にはファーストイーサネットカードを使用し、PC のスペックは上記の試験と同様の物を使用する。受信側の PC にはギガビットイーサネットを使用して転送速度を測定する。スイッチングハブはギガビット対応の製品を使用する。受信側 PC、スイッチングハブの性能については以下に記述する。

- ハードウェア仕様

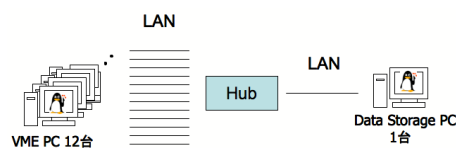


図 4.8: ハードウェア仕様

- PC Dell OPTIPLEX GX520
- OS Fedora Core 4 linux
- CPU Celeron 2.80GHz
- メモリ 512MB
- HDD 160GB/7,200PRM
- ケーブル カテゴリー 5e

– ハブ PLANEX Gigabit Ethernet FXG-08TXJ

- ソフトウェア仕様

今回開発されたものを使用

測定結果と考察

最初に1台から12台へとPC台数を変えたときの転送レートと転送速度の測定結果を示す。次にソケットの受信バッファの変更時の結果を述べる。

- DAQ レート

横軸に送信側 PC 台数、縦軸に転送速度 [Mbps] を表す。パケットサイズ 1500byte、受信バッファ 85kbyte。

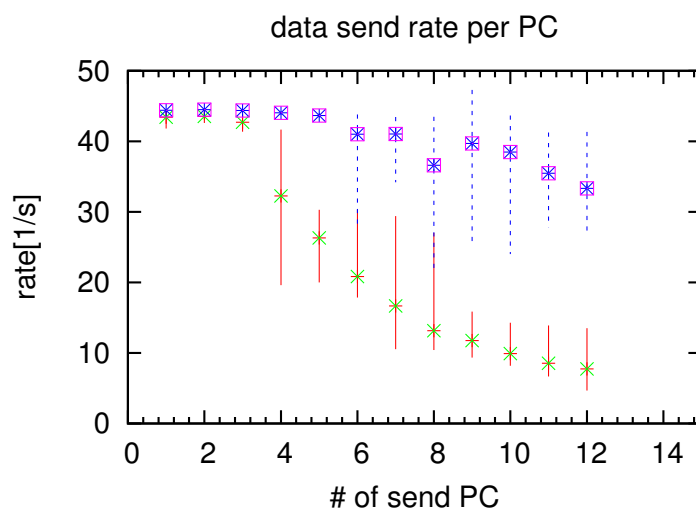


図 4.9: ギガビットイーサネットを使用した場合の送信側 PC 台数と DAQ レート。緑が HDD にデータを書き込む場合。青が HDD に書き込まない場合。

PC 台数	DAQ レート [1/sec]	DAQ レート [1/sec](HDD への書き込みを行わない)
1	43.4	44.4
2	43.6	44.5
3	42.7	44.4
4	32.3	44.1
5	26.3	43.6
6	20.8	41.0
7	16.7	41.0
8	13.2	36.6
9	11.8	39.7
10	9.9	38.5
11	8.5	35.5
12	7.8	33.3

表 4.5: ギガビットイーサネット使用時での DAQ レート値。

- 転送速度

横軸に送信側 PC 台数、縦軸に転送速度 [Mbps] を表す。パケットサイズ 1500byte、ソケットの受信バッファは 85kbyte とする。

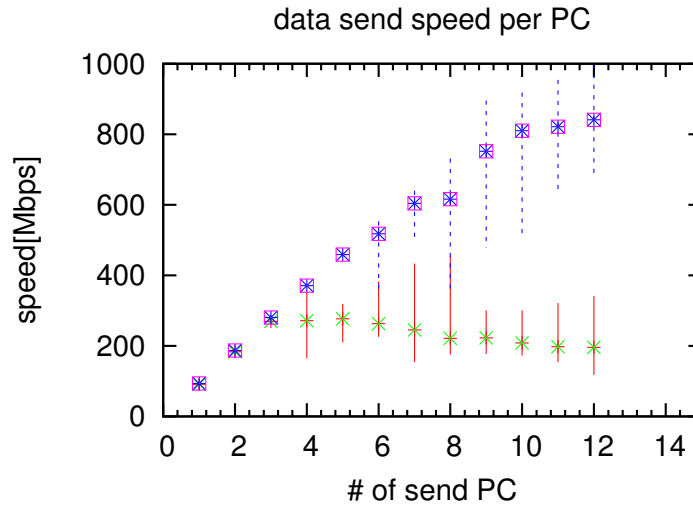


図 4.10: ギガビットイーサネットの使用した場合の送信側 PC 台数と転送速度。

PC 台数	転送速度 [Mbps]	転送速度 [Mbps] (HDD への書き込みを行わない)
1	91.4	93.4
2	183.3	187.1
3	269.5	280.2
4	271.5	370.7
5	276.8	459.2
6	263.0	517.8
7	245.5	604.3
8	221.4	616.3
9	222.8	752.0
10	208.3	809.9
11	197.8	821.3
12	195.7	841.3

表 4.6: ギガビットイーサネット使用時での転送速度値。

以上の結果よりギガビットイーサネットを使用すると 4 台以上の PC から一度に送られ、データ量が 1000Mbyte を超えるとエラーバーが大変大きくなり、安定して使用する事ができなくなる。これはデータのネットワーク受信と、HDD へと書き込みが頻繁に行われるようになり、I/O が激しく動くことにより CPU 使用率が大きくなる事が影響していると思われる。現に測定中、受信側 PC の CPU 使用率が 80 % 台を常に保っていた。また送信側の PC が 12 台の時、受信側の PC で 200Mbps の速度が出ており、8Hz 程度の DAQ レートを実現可能

であることがわかる。次にソケットの受信バッファを変更して送信側 PC12 台時での DAQ レートと DAQ 速度の結果を示す。

- ソケットの受信バッファの変更

送信側 PC を 12 台のとき、受信側の受信バッファを変更した場合。パケットサイズは 1500kbyte に固定する。

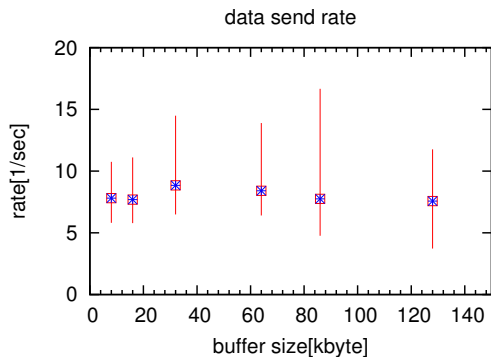


図 4.11: ギガビットイーサネット使用時に受信バッファを変更したときの DAQ レートの変化

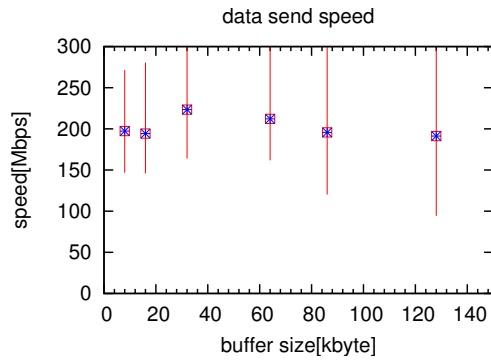


図 4.12: ギガビットイーサネット使用時に受信バッファを変更したときの転送速度の変化

受信バッファ (kbyte)	DAQ レート (1/sec)	転送速度 [Mbit/sec]
8	7.8	196.9
16	7.7	194.4
32	8.8	222.2
64	8.4	212.1
86	7.8	196.9
128	7.6	191.9

表 4.7: ギガビットイーサネット使用時にソケットの受信バッファ変更したときの DAQ レートと、転送速度の数値

以上の結果よりエラーバーが大きいが、ソケットの受信バッファを変更しても速度に変化は見られない。

4.1.4 DAQ レートの性能試験の結論

ファーストイーサネットを使用した場合とギガビットイーサネットを使用した場合での測定結果より、以上のことが言える。

- ファーストイーサネットを使用すれば送信側 PC である VME PC が必要とする性能は十分出せる。
- 受信側 PC である Data Storage PC はギガビットイーサネットを使用しても簡単には 30Hz を達成する事が出来ない。今回使用した PC よりも高性能な PC とネットワーク環境が必要となる。

4.1.5 DAQ レートに関する今後の課題

DAQ レートを 30Hz にするための今後の課題として次の 2 点が考えられる。

10 ギガビットイーサネットの導入

受信側のネットワークに 10 ギガビットイーサネットの導入を考える。またネットワークの速度の他、今回のファーストイーサネット試験での結果 (図 4.2、図 4.3) より HDD への書き込み速度が 3 割のボトルネックとなっていることと、ギガビットイーサネット試験での結果 (図 4.9、図 4.10) より、大量のデータが受信され HDD に書き込まれると I/O 制御による大きな負荷が CPU にかかってしまい動作が不安定になることがわかる。このことよりネットワークの性能を向上させる事とともに受信側の PC の性能についても高い品質のものが必要である。

取得データの suppress

VME PC から送られてくるデータ量を suppress することで、ギガビットイーサネットを使用して DAQ レート 30Hz を目指す事も可能である。今回の試験のようにギガビットイーサネットを使用すれば 200Mbps の速度を出す事ができる。取得されたデータの中でどんなデータを suppress するかは開発段階である現段階で決める事はできない。しかし概算すると少なくとも 1 カメラあたりのデータ量を 70kbyte とすれば、30Hz でのデータ転送が可能である。FD ステーション全体としては 80 % のデータを suppress することで 30Hz の DAQ レートを実現する事が出来る。

4.2 YAP、Xe flasher を使用した測定データの検証

今回作成した DAQ システムを用いて、実際にデータを取得し、正確にデータが取得出来ているかを検証する。検証方法として、テレスコープアレイ実験で使用している PMT のキャリブレーションの為に使用する Xe flasher 光源 (図 2.13) と YAP 光源 (図 2.12) によるイベントデータを取得し正確に取得出来ているかを確認する。2.2.1 の FD のキャリブレーションの説明時にも述べたが Xe flasher と YAP は、それぞれ、FD カメラに装着されている 256 本の PMT の相対ゲインを測定するための装置と 1 本の PMT の絶対ゲインを測定するためのものである。将来的にはこの 2 種類の光源からのデータを取得する事でカメラ全体の PMT の絶対ゲインをそろえる事が出来る。

4.2.1 Xe flasher イベントの取得

測定方法

作成した DAQ システムを用いて測定。Xe flasher の発光のみ手動で行う。この操作は全て Web ブラウザを使用し遠隔地から行った。コントロール画面は (図 3.9) を参照。

1. Web カメラを使用してステーション内に人がいない事を確認
2. PMT の Pre-AMP 電源である LV のオン
3. PMT 電源である HV のオン
4. SDF を使用してのデータ取得スタート
5. SDF を使用してのデータ取得ストップ
6. HV のオフ
7. LV のオフ

以上の操作より取得されたデータを以下に記述する

測定結果と考察

以下に Xe flasher 光源から取得されたデータを示す。左図が PMT ごとの ADC カウント値の分布を表した Event Display(図 3.15)。右図がカメラ中からランダムに選んだ PMT で取得されたデータの ADC カウント値の時間波形図を示す。

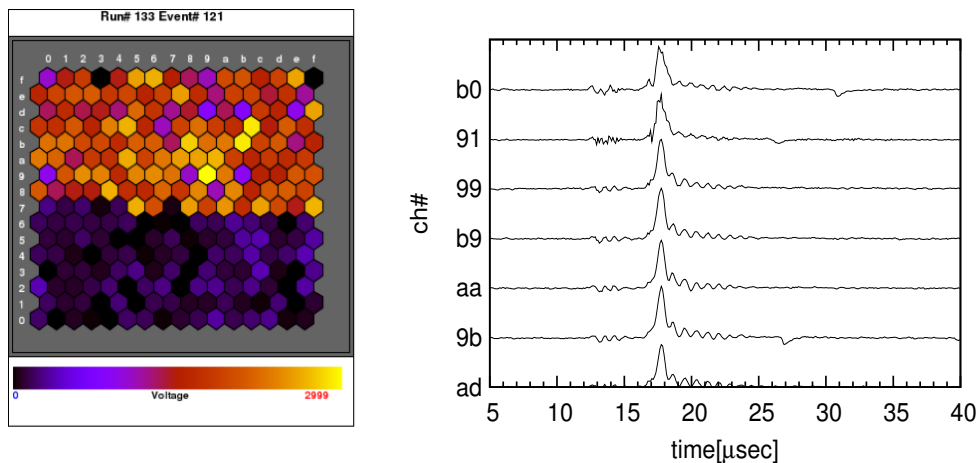


図 4.13: Xe flasher 光源からデータを取得したときに得られた Event Display(左図) と時間波形図(右図)

図中の波形図より ADC カウント値の Peak 時の時刻がどれも同じである。このことよりこのイベントは Xe flasher 光源により同時刻にカメラ全面を照射されたイベントであることが分かる。よって今回開発された DAQ システムを用いて Xe flasher からのイベントデータを取得する事に成功した。

4.2.2 YAP イベントの取得

測定方法

Xe flasher イベントを取得したときと同様のセットアップで行った。

測定結果と考察

以下に YAP 光源から取得されたデータを示す。左図が PMT ごとの ADC カウント値の分布を表した Event Display(図 3.15)、左図において黄色で表されているインデックス 7E の PMT に YAP が装着されている (図 2.12)。右図が PMT インデックス 7E から得られた ADC カウント値の時間波形図を表す。

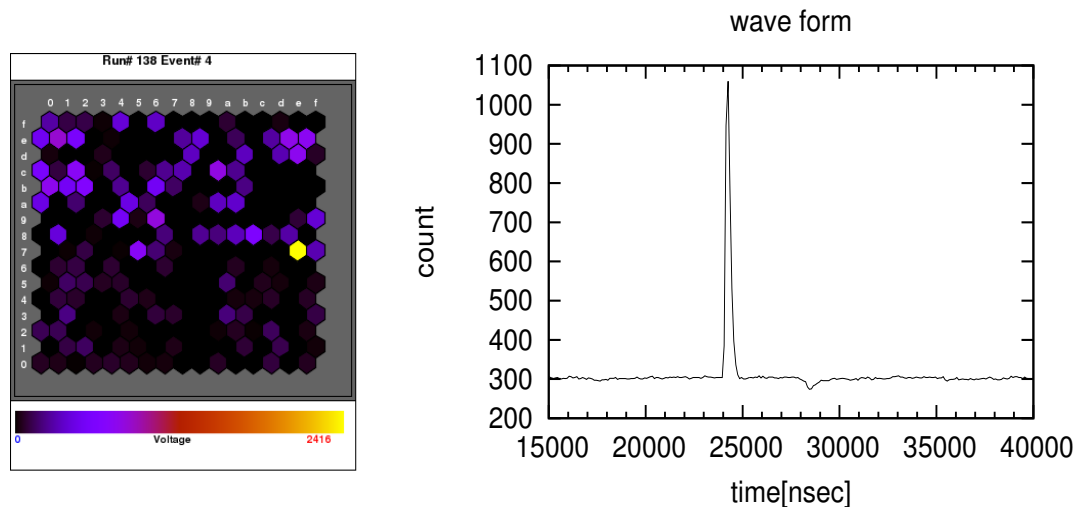


図 4.14: YAP 光源からデータを取得したときに得られた Event Display(左図) と時間波形図 (右図)

(図 4.14) の波形よりこのイベントデータが YAP 光源からのものであるかを考察する。今回 PMT のゲインは 8×10^4 、Pre-AMP でのゲインは 5 倍、SDF の仕様より 1 カウント=0.5mV とするとこのイベントの光源からの photo electron 数は Peak 時より 350 photo electron と見積もられる。これは 2.3.1 で述べた YAP 光源から発生する photo electron 数とほぼ同じである。よって YAP 光源からのイベントは今回開発した DAQ システムで正常に取得する事が出来たと考えられる。

4.2.3 結論

今回開発した DAQ システムを用いて実際に Xe flasher 光源からのデータ取得と YAP 光源からのデータ取得をする事が出来た。DAQ システムは正常に動作していると言える。

第5章 総括

5.1 まとめ

今回FDのDAQシステムを開発した。日本からの遠隔操作を可能にする事ができた。これによりFDによる大気蛍光イベントの取得などをモニターしながらコントロールする事ができるようになった。最初の目的は達成された事になる。

5.2 今度の課題

FDステーションに様々なハードウェアがそろってない今、完全にDAQが完成したとはいえない。今後テレスコープアレイ実験のFDステーションの完成に向けてDAQシステムもそれに合わせた開発を行う必要がある。2006年7月にFDステーションが完成する予定であるので、そのときまでにFDステーションの12台のカメラからのデータ取得を可能にし、またDAQレートを30Hzを目指すことも今後の課題となっている。転送レートに関しては10ギガビットイーサネットを使用することを考えている。

謝辞

本研究に当たり御指導頂きました垣本史雄教授に心より深く感謝致します。
情熱をもって御指導頂き、様々な指針を示して下さいました常定芳基助手に心より深く感謝致します。

DAQシステム開発において様々な御指導を頂いた、大阪市立大学 荻尾彰一講師、東京大学宇宙線研究所 福島正己教授、有働慈治特別研究員、芝田達伸特別研究員、得能久生特別研究員、高エネルギー加速器研究機構 田中真伸助教授、鈴木聡助手に深く感謝致します。

DAQシステム開発試験において基礎物理学実験室の使用を快く承諾して下さいました東京工業大学 菊池俊行技官に深く感謝致します。

様々な指針を示して下さいましたTA コラボレーターの皆様に深く感謝致します。

たくさんの御助言を頂き、多くの質問に答えて頂きました東京工業大学 多米田裕一郎氏、古島敦氏、町田智子氏、村野暢子氏、東龍二氏、菅原利弘氏に深く感謝致します。

参考文献

- [1] 福島正己、最高エネルギー宇宙線の起源 (平成 15 年度発足特定領域申請書)
- [2] M.Nakao,IEEE Trans. Nucl. Sci.47:267-271,2000
- [3] MALCOLM.S.Longair *High Energy Astrophysics*
- [4] *The Telescope Array Project Design Report (2000)*
- [5] *The PIERRE AUGER OBSERVATORY DESIGN REPORT*
- [6] 福田 全水、修士論文、東京工業大学 大学院理工学研究科 基礎物理学専攻 (2005)
- [7] 皆川 隆一、修士論文、東京工業大学 大学院理工学研究科 基礎物理学専攻 (2005)
- [8] W. リチャード. スティーブンス *UNIX ネットワークプログラミング第 2 版 Vol.1*
- [9] W. リチャード. スティーブンス *UNIX ネットワークプログラミング第 2 版 Vol.2*

目 次

1.1	1次宇宙線のエネルギースペクトル	2
1.2	空気シャワー発達の模式図	6
1.3	チェレンコフ放射。屈折率の違いにより粒子の進行方向から θ だけずれた方向に光が放射される。	8
1.4	各変数の説明	10
1.5	宇宙線望遠鏡における空気シンチレーション光による空気シャワーのステレオ観測の概念図	11
1.6	10^{20} eV を超える超高エネルギー宇宙線の加速源に課せられる、磁場の強さと天体の大きさとの関係。加速源候補は、図中の斜線より上の領域に存在していなければならない	12
1.7	最高エネルギー宇宙線の減衰距離	14
1.8	宇宙線のエネルギースペクトルに予想される GZK cutoff。左は1つの源が特定の red shift($z=0.004 \sim 1.0$) にあると仮定した場合。右は源が一様に空間分布しているとしてその分布がいくつかの異なる evolution model に従うと仮定した場合。	14
1.9	最高エネルギー宇宙線のエネルギースペクトル	16
2.1	左図が米国ユタ州のテレスコープアレイ 実験の行われている位置を示す。(http://www.sitesatlas.com) 右図はテレスコープアレイの FD と SD の配置図。3 点の紫点が FD の位置、576 点の緑点が SD の位置を示す。	21
2.2	Black Rock Mesa に建設された FD ステーション。日中はシャッターが閉まり、カメラを保護する。	22
2.3	左図はセグメントミラーのデザイン、右の写真は現地(米国ユタ州 Black Rock Mesa) に建てられた FD ステーション内で組み立てられた望遠鏡。	23
2.4	写真が実際に使用される PMT(HAMAMATSU R6234)。	24
2.5	写真左は FD カメラ躯体、写真右はカメラフレームに PMT を装着したときのもの。	24
2.6	FD エレクトロニクスの全体図	25
2.7	PMT に装着される Pre-AMP の外観。	26
2.8	左図がカメラに取り付けられた patch panel のイメージ図、右の写真が実際にカメラの背面に取り付けられたときの写真。	26
2.9	左図が SDF ボード、各 PMT の出力を AD 変換する。さらにシンチレーション光波形の認識を行う「ファーストレベルトリガーモジュール」としての働きを行う。右図が TF ボード、各カメラごとにシンチレーション光トラック認識を行う「セカンドレベルトリガーモジュール」としての働きを担う。	27
2.10	左が CTD ボード、右が CTD に装備される GPS(Motorola M12+) が数 nsec の精度で時間を記録している。	27

2.11	左から窒素レーザーを放射し中央で Rayleigh 散乱させる。両側に PMT をつけ、散乱された photon 数をモニターする。写真右側にあるエネルギープローブで窒素レーザーの強度を測定する。	29
2.12	PMT 光電面での YAP 装着位置、およびカメラ面での YAP 装着 PMT の位置。YAP は PMT インデックス 7E と EE につけられている。	29
2.13	Xenon flasher のイメージ図。球面鏡の中心に Xenon 発光管が装備されている。	30
2.14	左図が XY scanner の外観、右図は XY scanner を利用して測定した PMT の二次元不均一性。	30
2.15	図は AUGER 実験で使用されている Central Laser Facility [5]。望遠鏡アレイ実験では現在製作中。右図は CLF のイメージ図、真上に laser を放射し側方に散乱された photon 数から大気の状態を測定する。	31
2.16	写真左に見えるものが FD ステーションから見た Lidar dome。この建物の中に Lidar が装備されている。右図は Lidar のイメージ図、パルスレーザーを放射し後方に散乱された photon 数から大気の状態を測定する。	31
2.17	Linac のデザイン、電子を加速し真上に打ち上げ FD で観測しエネルギーを較正行う。	32
2.18	左側の写真は現地 (米国ユタ州) に設置されているところ。各 SD にはエレクトロニクスボックス、ソーラーパネルが取り付けられている。右側の写真は宇宙線研究所で製作されているシンチレータに WLSF を埋め込んだ SD。SD1 台あたり 200 本の WLSF が使われる。	33
2.19	左側の写真は各 SD に取り付けられたエレクトロニクスボックスに入っているデータ収集エレクトロニクス。右側の写真は SD を背後から撮った写真であるが、SD のソーラーパネルの背後にエレクトロニクスボックスが取り付けられている。	33
2.20	SD は無線 LAN を使用し、データの通信を行っている。この写真はそのためのコントロールタワーである。約 20km まで通信可能である。このコントロールタワーは SD 全体で 3 台設置し、サブとして 2 台設置される。	34
3.1	FD DAQ のイメージ図	36
3.2	NSM のネットワーク構造図、緑色の四角で囲まれているのが一つの PC を表す。白丸がデーモンプログラムである。黄丸がクライアントプログラムを表す。デーモン間の矢印は TCP 通信を表す。	37
3.3	コントロール方法のイメージ図、デーモンプログラムは省く。リクエストをクライアントに送り動作を要求する	39
3.4	ステータスマニター方法のイメージ図、デーモンプログラムは省く。	40
3.5	エラー処理システムのイメージ図。エラーの発生した PC はリクエストを Run Control クライアントへ送る。	40
3.6	ハードウェア仕様	43
3.7	ソフトウェア仕様	43
3.8	Web DAQ インタフェースの概要	47
3.9	左上写真は Single Request Mode でのコントロール画面、右上写真は Fix Sequence Mode でのコントロール画面、下写真は Free Sequence Mode でのコントロール画面 (囲み部分参照)	48
3.10	Run Status Monitor (囲み部分参照)	49
3.11	PC ステータス (囲み部分参照)	50

3.12	Slow Control ステータス (囲み部分参照)	51
3.13	左上写真は正常状態、右上写真は「WARNING」状態、左下写真は「ERROR」状態、右下写真は「FATAL」状態を表す。(囲み部分参照)	52
3.14	左写真は各 PMT のノイズを差し引いた ADC カウント積分値の全イベントの平均値を表す、右写真はトリガーレートの時間変化。(囲み部分参照)	53
3.15	Event Display の概観 (囲み部分参照)	54
3.16	Environmental モニター (囲み部分参照)	55
3.17	ログメッセージ (囲み部分参照)	55
4.1	ハードウェア仕様	58
4.2	DAQ レート。緑が HDD にデータを書き込む場合、青が書き込まない場合。	59
4.3	転送速度。ファーストイーサネットを使用した場合の送信側 PC 台数と転送速度。緑が HDD にデータを書き込む場合。青が HDD に書き込まない場合。	60
4.4	DAQ レート	61
4.5	転送速度	61
4.6	ファーストイーサネット使用時での DAQ レート	62
4.7	ファーストイーサネット使用時での転送速度	62
4.8	ハードウェア仕様	63
4.9	ギガビットイーサネットを使用した場合の送信側 PC 台数と DAQ レート。緑が HDD にデータを書き込む場合。青が HDD に書き込まない場合。	65
4.10	ギガビットイーサネットの使用した場合の送信側 PC 台数と転送速度。	66
4.11	ギガビットイーサネット使用時に受信バッファを変更したときの DAQ レートの変化	68
4.12	ギガビットイーサネット使用時に受信バッファを変更したときの転送速度の変化	68
4.13	Xe flasher 光源からデータを取得したときに得られた Event Display(左図) と時間波形図 (右図)	71
4.14	YAP 光源からデータを取得したときに得られた Event Display(左図) と時間波形図 (右図)	72

表 目 次

4.1	ファーストイーサネット使用時での DAQ レート値	59
4.2	ファーストイーサネット使用時での転送速度値。	60
4.3	ファーストイーサネット使用時でのパケットサイズを変更した時の、DAQ レート値と転送速度値	61
4.4	ファーストイーサネット使用時でのソケットの受信バッファを変更した時の、DAQ レート値と転送速度値	62
4.5	ギガビットイーサネット使用時での DAQ レート値。	65
4.6	ギガビットイーサネット使用時での転送速度値。	66
4.7	ギガビットイーサネット使用時にソケットの受信バッファ変更したときの DAQ レートと、転送速度の数値	68