

修士論文

テレスコープアレイ拡張実験のための
最高エネルギー宇宙線観測用
地表粒子検出器の性能評価
The evaluation of the performance
of particle surface detectors
to observe the highest energy cosmic rays
for the Telescope Array Extension

東京大学大学院
理学系研究科 物理学専攻
矢田 浩平

指導教官
佐川宏行

2019年度

目次

第 1 章	超高エネルギー宇宙線	1
1.1	宇宙線のエネルギースペクトル	1
1.2	宇宙線の加速機構	1
1.2.1	フェルミ加速	1
1.3	GZK カットオフ	4
1.4	GZK 限界を超える宇宙線の起源	5
1.4.1	ボトムアップモデル	5
1.4.2	トップダウンモデル	7
1.5	空気シャワー	7
1.5.1	電磁シャワー	8
1.5.2	ハドロンシャワー	9
1.5.3	空気シャワーの観測	10
第 2 章	テレスコープアレイ実験	11
2.1	テレスコープアレイ実験の概要	11
2.2	地表検出器 (Surface Detector, SD)	11
2.2.1	シンチレータボックス内部	15
2.2.2	SD のデータ収集	16
2.3	大気蛍光望遠鏡 (Flourescence Detector, FD)	19
2.3.1	FD のデータ収集	20
2.3.2	キャリブレーション	21
2.4	TA の現状	21
第 3 章	テレスコープアレイ拡張実験 (TAx4 実験)	25
3.1	地表検出器の変更点	25
3.1.1	PMT の変更	25
3.1.2	シンチレータボックス内の変更	25
3.1.3	通信塔	27
第 4 章	TAx4 SD の性能評価	29
4.1	1MIP peak	29
4.1.1	シンチレータの 1MIP peak 値測定	30
4.1.2	SD の 1MIP peak 値測定	36

4.2	Linearity(線形性)	44
4.2.1	測定	44
4.3	Uniformity(一様性)	50
4.3.1	測定	50
4.4	GPS Timing	53
4.4.1	測定	53
4.5	CPU Check	59
第 5 章	TASD と TA_x4SD の 仕様と性能の違いのまとめ	62
第 6 章	米国での SD の組み立ておよび設置	65
第 7 章	まとめ	74

概要

地球へ到来する宇宙線はエネルギーが大きくなるにつれ頻度が小さくなり、 $5 \times 10^{18} \text{eV}$ で $1 \text{particle}/(\text{km}^2 \cdot \text{year})$ 、 10^{20}eV で $1 \text{particle}/(100 \text{km}^2 \cdot \text{year})$ となる。そのため 2008 年にアメリカ合衆国ユタ州で始まったテレスコプアレイ実験 (TA 実験) では 507 台の地表検出器 (SD) を 1.2km 間隔で設置することによりおよそ 700km^2 の観測面積でおよそ 10^{18}eV 以上の超高エネルギー宇宙線の観測を行ってきた。11 年間でエネルギースペクトルの $10^{19.81 \pm 0.03} \text{eV}$ に理論的な予想である GZK 限界と矛盾しないカットオフを観測した。また赤経 144.3° 、赤緯 40.3° の方向に $5.7 \times 10^{19} \text{eV}$ 以上の宇宙線のホットスポット (異方性) があることも分かった。

そこでデータの取得スピードを加速するために 2019 年 4 月に稼働を開始したのがテレスコプアレイ拡張実験 (TAx4 実験) である。TAx4 実験では SD の設置数を増やすことで検出面積を最終的に TA 実験のおよそ 4 倍である 3000km^2 まで広げる予定である。これにより従来のおよそ 4 倍のデータを取得することが可能となり、 10^{20}eV 付近の最高エネルギー宇宙線のより正確なエネルギースペクトルの測定やホットスポットの確認を行い、さらに発生起源をとらえることを目標とする。

TAx4SD の測定器では、TA と比べて量子効率およびリニアリティのよい光電子増倍管 (PMT) を使って、ファイバーの取り回しを変えてファイバーの数を減らしていることが主な変更点である。本論文では 2015 年度に決定した TAx4SD のデザインをもとに量産した TAx4SD の性能評価と、2019 年 3 月に SD の設置を終了して観測を開始するまでの現地作業について記述する。

1MIP peak 値は今回 TAx4 用に製作した分を含む SD305 台について測定を行った。なお 1MIP peak 値は入射したミューオンがシンチレータでどの程度エネルギーを損失したかを示す量で、これを測定することで SD ごとの発光量の違いを補正することができる。米国での測定では最低でも $14.3 \pm 0.1 \text{p.e.}$ の 1MIP peak 値を持つことがわかり、1つのミューオン入射に対し目標値である 10p.e. より十分大きいとわかった。TAx4SD に対してリニアリティ測定を行い、FADC のレンジ内 (4095ADC カウント未満) で平均的に 4.5%程度リニアリティが低下することがわかった。TASD では平均 3000ADC カウント程度で 5%低下するため、リニアリティ性能は向上した。またシンチレータ検出器の応答の一様性を調べるテストでは、ミューオンの入射位置によって信号の大きさが $\pm 10\%$ 程度以内、最大で -19.6% 、 $+19.2\%$ 程度の平均からのばらつきがあることがわかった。SD ごとに取り付けた、時間測定用の GPS のオフセット測定では基準の GPS レシーバーに対し相対的に $-5.0 \pm 3.8 \text{ns}$ のオフセットがあることがわかり、この分布から外れたとみなした 3 個の GPS レシーバーは使用しなかった。また製作では SD エレクトロニクスの不良を見

つけ、かなりの部分が搭載した CPU であることを突き止めた。CPU 交換のために新たに購入した CPU の中に不良品がないかどうかを見つけるためのテストを 200 枚分行い、うち 3 枚が不良品であった。最終的にすべて合格した SD エレクトロニクスを SD に搭載した。

2019 年 3 月までに 257 台の SD の設置を完了し有効な検出面積は TA を含めて TA の 2.5 倍まで拡張した。2019 年 5 月～8 月の期間に稼働していた SD46 台に注目し $5.7 \times 10^{19} \text{eV}$ を超える超高エネルギー宇宙線を 4 事象観測した。今後 TA グループでは、設置した全 SD の安定稼働を目指し、より精密な最高エネルギー宇宙線の観測を行う予定である。

第1章 超高エネルギー宇宙線

1.1 宇宙線のエネルギースペクトル

宇宙線は高エネルギーで宇宙を飛び交う放射線である。宇宙線のほとんどが単体の陽子であるが、 α 粒子など Fe くらいまでのいくつかの種類の原子核が 10%程度、単体の電子 (β 線) も 1%程度含まれる。これらの宇宙線は常に地球にも降り注いでいるが、地表に到達する前に大気と相互作用を起こす。地球に降り注ぐ宇宙線のうち大気中の原子核との相互作用を起こす前のを 1次宇宙線、相互作用により二次的に発生する粒子を 2次宇宙線という。

宇宙線のエネルギーは 10^9eV から 10^{20}eV という広範囲にわたり (図 1.1)、その頻度はおよそ E^{-3} に比例して減少する。いくつかの要因がそれぞれ支配的になることでエネルギースペクトルの傾きが若干変わるところがあると考えられている。特に $E = 10^{18\sim 19}\text{eV}$ 付近での折れ曲り以降は傾きがおおよそ $E^{-2.6}$ に比例する冪関数となっている。これ以上のエネルギーを持つ宇宙線を超高エネルギー宇宙線 (Ultra-high-energy cosmic ray, UHECR) という。

1.2 宇宙線の加速機構

こういった高エネルギーの宇宙線がどのようにして加速されるかはまだわかっていない。最も観測に近いモデルとしてフェルミ加速機構が提唱されている。

1.2.1 フェルミ加速

星間雲を粒子が通過する際にエネルギーを受け取るメカニズムはフェルミ加速と呼ばれ、古典的な力学で記述できる。これによれば衝突ごとに $\Delta E = \alpha E$ だけエネルギーが増えるが、 α が星間雲を構成する粒子の速さ V の二乗に比例するため、フェルミ二次加速と呼ばれる。このモデルでは宇宙線のエネルギースペクトルが冪関数になることは説明できるが、実際の星間雲のパラメータでは加速が足りないとされる。1970年代に新しく、超新星残骸のつくる衝撃波面では効率よくフェルミ加速が起こされることが示された。

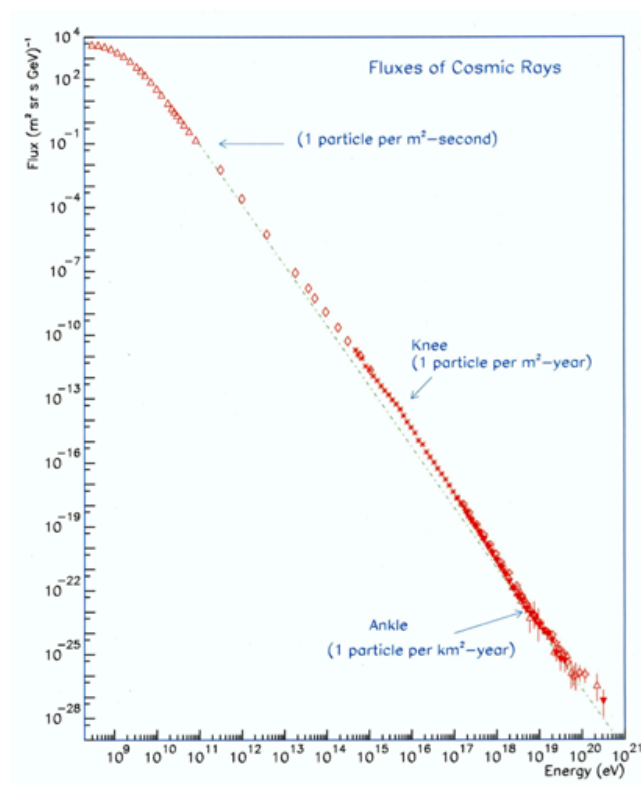


図 1.1: 地球へ到来する宇宙線のエネルギースペクトル。通常 ankle 付近より高いエネルギーを持つ宇宙線を超高エネルギー宇宙線と呼ぶ。[1]

フェルミ一次加速

速度 v_w で運動する壁に陽子など宇宙線になりうる粒子が速度 v で衝突することを考える。そのような粒子の衝突前の運動量とエネルギーは特殊相対論の要請により

$$P_x = \gamma m v_x \quad E = \gamma m c^2 \quad (1.1)$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - |v|^2/c^2}} \quad (1.2)$$

衝突後のエネルギーは

$$E' = \gamma m c^2 \gamma_w^2 \left[1 + 2 \frac{v_w v_x}{c} + \left(\frac{v_w}{c} \right)^2 \right] \quad (1.3)$$

$$\gamma_w = \frac{1}{\sqrt{1 - |v_w|^2/c^2}} \quad (1.4)$$

超新星残骸の衝撃波は光速に対し十分小さいと近似できるため、 $|v_w| \ll c$ とすると、粒子が衝撃波に一度衝突して受け取るエネルギーは

$$\left\langle \frac{\Delta E}{E} \right\rangle = \frac{4}{3} \frac{v_1 - v_2}{c} \quad (1.5)$$

と計算される。 v_1 は衝撃波の内側の速さで、 v_2 は衝撃波の外側の速さである。この過程を1回繰り返した時に外側遠方に粒子がロスする確率は

$$P_{loss} = \frac{\text{外側遠方でのフラックス}}{\text{衝撃波面に内側から流れ込むフラックス}} \quad (1.6)$$

$$= \frac{n v_2}{n/2 \cdot c/2l} \quad (1.7)$$

$$= \frac{4v_2}{c} \quad (1.8)$$

n は粒子の数密度である。ゆえに l 回衝撃波面を往復する確率は

$$S_l = (1 - P_{loss})^l = \left(1 - \frac{4v_2}{c}\right)^l \quad (1.9)$$

(1.5) と (1.9) から

$$S_l \cong \left(\frac{E_l}{E_0} \right)^{-3v_2/(v_1 - v_2)} = \frac{\int_{E_l}^{\infty} N(E) dE}{\int_{E_0}^{\infty} N(E) dE} \quad (1.10)$$

ここであるエネルギー E の粒子数を $N(E)$ とした。これにより

$$N(E) \propto E^{-p}, \quad p = \frac{v_1 + 2v_2}{v_1 - v_2} \quad (1.11)$$

となる。これは宇宙線のエネルギースペクトルが冪関数で表されたことに他ならない。

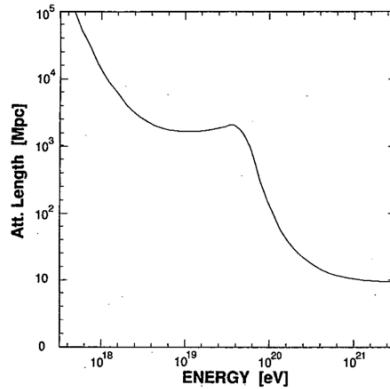


図 1.2: 宇宙線のエネルギーと宇宙空間での減衰距離の関係。 6×10^{19} eV より高いエネルギーではパイオンの生成が起こり、平均自由行程が急激に短くなる。[4]

1.3 GZK カットオフ

宇宙は宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background, CMB) と呼ばれる電磁波で満たされており、宇宙線もこれと相互作用を起こす。CMB は現在の宇宙では約 2.7K の黒体放射に非常に近いスペクトルを持つため、通常は $10^{-4} \sim 10^{-3}$ eV と小さいエネルギーしか持たないが、約 10^{19} eV 以上のエネルギーで運動する宇宙線 (最高エネルギー宇宙線) にとっては大きい効果を持つようになる。具体的にはパイオンの生成反応



が起こり、陽子はエネルギーを失ってしまう。また CMB の光子の密度は $n \sim 3 \times 10^8 \text{m}^{-3}$ 、ガンマ線によるパイオンの生成断面積は $\sigma \sim 10^{-32} \text{m}^2$ であり、その平均自由行程は $\Lambda \sim 10 \text{Mpc}^1$ ほどであるため、銀河外にその起源があるとすれば、そのエネルギーを保ったまま地球に到来することはできない。

1966 年に G.T.Zatsepin と V.A.Kuzumin[2] および K.Greisen[3] が、独立に 6×10^{19} eV の近傍に宇宙線のエネルギーの上限が存在することを予測した。この上限は提唱者の頭文字を取って「GZK カットオフ」と呼ばれる。図 1.2 に宇宙線の減衰長の計算を示す。 5×10^{19} eV より高いエネルギーで減衰長が急激に短くなっている。

¹pc : パーセク、1pc は約 3.26 光年

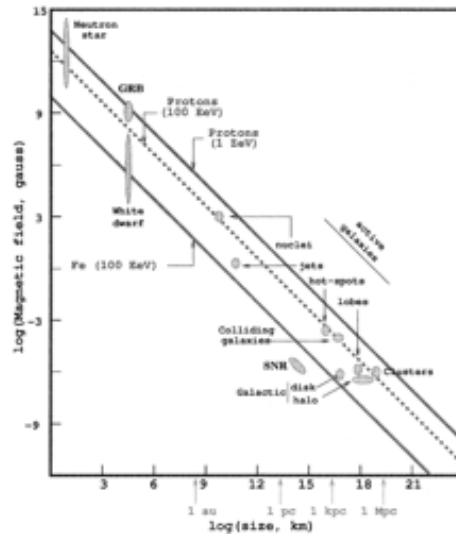


図 1.3: 宇宙線加速源の候補天体。横軸は天体の大きさ、縦軸は磁場の強さ。右上へ行くほど宇宙線を高エネルギーに加速することができるが、最高エネルギー宇宙線 ($> 10^{20}$ eV) を十分作れる天体はない。[6] ここで EeV は 10^{18} eV で、ZeV は 10^{21} eV である。

1.4 GZK 限界を超える宇宙線の起源

銀河系外の最高エネルギー宇宙線は理論上地球へは到来しないことになるが、AGASA の研究では [5] このエネルギーを超える宇宙線が発見された可能性があったため、いくつかの起源モデルが提唱された。

1.4.1 ボトムアップモデル

ボトムアップモデルは宇宙の何らかの構造により荷電粒子が加速されるというモデルである。この場合エネルギー E とラーモア半径 ($= R < \frac{1}{2}L$) の関係式

$$\frac{E}{10^{20} \text{ eV}} < \frac{1}{2} \left(\frac{L}{100 \text{ kpc}} \right) \left(\frac{B}{1 \mu\text{G}} \right) Z\beta \quad (1.14)$$

を満たす必要がある。L は加速器の大きさ、B は加速器の磁場の強さ、Z は宇宙線の電荷を電気素量で割ったもの、 β は宇宙線と加速器の相対速度 ($v = \beta c$) である。

いくつかの候補天体を概説する。

中性子星 (Neutron Star)

太陽の 8~10 倍程度の重い恒星が最期に重力崩壊を起こす際、その過程で原子が圧縮されることで電子が原子核中の陽子に捕らえられ、自由中性子となって原子から出てゆく。これによりほとんどが中性子で構成された中性子星ができる。中性子星は太陽とほとんど同じ質量を持ちながら半径は 10km 程度と非常に高密度の天体である。角運動量保存則から非常に大きい速さで自転をしているためにその表面に集まった荷電粒子が大きな磁場を形成する。

活動銀河核 (Active Galactic Nuclei, AGN)

ほとんどの銀河中心に存在する $10^6\sim 9M_{\odot}$ ほどの大質量ブラックホールが周りのガスを飲み込み、ジェットとして放出している状態である。 M_{\odot} は太陽質量である。放出されるジェットは光、X 線、ガンマ線など様々な種類の電磁波だが、このジェットは電波ローブと呼ばれる吹き溜りを作る。この領域が荷電粒子の加速機構の候補である。

ガンマ線バースト (Gamma Ray Bursts, GRB)

ガンマ線バーストはガンマ線領域の光子が短時間に多数観測される現象である。短時間とは言っても $10^{-2}\sim 3\text{sec}$ とその継続時間には差があり、ガンマ線量の時間変化の様子も観測例によって大きく異なる。1990 年代ごろから観測が活発化した、比較的新しい研究である。モデルにもよるが、ジェットの全エネルギーは $E_{\gamma} = 10^{44}\text{J}$ 程度で、そのうち電磁波成分は 0.1% と見積もられている。それでも銀河ひとつ分と同程度の光度に達する、極めて高エネルギーの現象である。ほぼ光速で放出されるガンマ線のほか、光速の数%程度の速さで運動するコクーン (cocoon : 繭) と呼ばれる領域が存在するという仮説がある。この領域は鉄など重い元素も含んでおり、最高エネルギー宇宙線の加速源の候補の一つとされる。

銀河団

銀河団は、多いもので 1000 個以上の銀河が集まって作られて、重力によって束縛された宇宙最大の天体で、その範囲は $10^6\sim 7\text{pc}$ 、質量は $10^{15}M_{\odot}$ と巨大である。銀河団は銀河同士が衝突して少しずつ大きくなると見られており、銀河団同士が衝突する際は大きな重力で 1000km/s 以上にも加速するため衝撃波が形成される。この加速器は活動銀河核やガンマ線バースト、中性子星と比べると小さい磁場しか持たないが、その系の大きさのため最高エネルギー宇宙線を生成する候補となっている。

図 1.3 にいろいろな天体の典型的なサイズと磁場を示す。たとえば点線より上にある天体であればであれば 10^{20}eV (100EeV) の陽子が加速可能である。

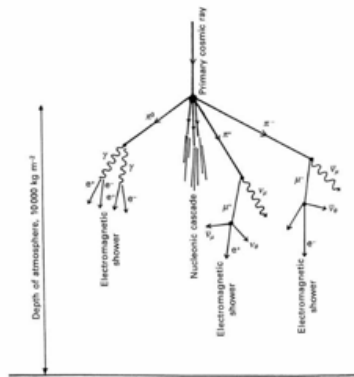


図 1.4: 1 次宇宙線としてハドロンが入射したモデル。電磁成分は多重クーロン散乱により横方向にも発達する。[7]

1.4.2 トップダウンモデル

エネルギーの低い粒子を加速するモデルだけでなく、質量の大きい未知の粒子が崩壊することで 10^{20}eV を超える宇宙線を生成するモデルも検討された。例えば宇宙初期に起きる相転移 (相互作用の分化など) が作る位相欠陥により宇宙ひもやモノポールが残り、これらが崩壊することでエネルギーを放出しているとする考えである。

1.5 空気シャワー

高エネルギーの宇宙線が地球へ到来すると大気中の物質と相互作用して 2 次宇宙線を作る。またこの 2 次粒子はさらに次々と相互作用を起こし、シャワーのように水平方向にも円状に広がりながら様々な粒子を降らせる。これを空気シャワーとよぶ。特に 10^{14}eV 以上の宇宙線のシャワーは地表まで到達するため、地上での観測が可能となる。ただし宇宙線の到来頻度は 10^{15}eV で $1\text{particle}/(\text{m}^2 \cdot \text{year})$ 、 $10^{18.5}\text{eV}$ で $1\text{particle}/(\text{km}^2 \cdot \text{year})$ ほどであるため、多くの空気シャワーを観測するためには広い面積を必要とする。粒子が増加するにしたがって各粒子のエネルギーは減少するため、ある段階まで粒子数が増加し最大になったのち減少する。粒子数の変化する過程をカスケードとよぶ。

1.5.1 電磁シャワー

高エネルギーのガンマ線や電子が大気に入射するとそれぞれ電子対生成、制動輻射が引き起こされる。

$$\gamma \rightarrow e^- + e^+ \quad (1.15)$$

$$e^\pm \rightarrow e^\pm + \gamma \quad (1.16)$$

これにより指数関数的に電子・陽子・ガンマ線の個数が増え、その過程を電磁カスケードとよぶ。

エネルギー E_0 の電子もしくはガンマ線が大気に入射する場合を考える。①相互作用で生成される物質にはエネルギーが等しく分配される、②2つの相互作用がそれぞれ起きるまでの平均自由行程 X_0 は等しい、という2つの近似を行うと、最初の相互作用を基準とした大気の深さ tX_0 での電子・陽電子・ガンマ線の総数 N とおのおのに分配されるエネルギー ϵ は

$$N(t) = 2^t \quad (1.17)$$

$$\epsilon(t) = E_0/N(t) \quad (1.18)$$

と表される。ここで t は相互作用の世代数を表す。空気中で電子対生成や制動放射を起こせるエネルギーの下限値、すなわち臨界エネルギーを ϵ_0 (空気中で約 85MeV) とすれば N の最大値 N_{\max} とその時点での大気の深さ $t_{\max}X_0$ は

$$N_{\max} = E_0/\epsilon_0 \quad (1.19)$$

$$t_{\max}X_0 = X_0 \log_2(E_0/\epsilon_0) \quad (1.20)$$

となる。①②とは違い、実際には分配されるエネルギーは 0~1 の間に、相互作用を起こすまでの距離は X_0 の周りにそれぞれ分布を持つため最大発達を迎えた後の $N(t)$ は緩やかに減少する。

電磁シャワー中の電子成分は空気中で多重クーロン散乱を起こすため、1次宇宙線の入射軸の周りに分布する。距離 tX_0 を進むとき、多重クーロン散乱の散乱角の二乗平均はラザフォード散乱の公式より

$$\langle \theta^2 \rangle \approx (E_s/E)^2 t \quad (1.21)$$

と計算される。なお $E_s \approx 21\text{MeV}$ である。臨界エネルギー E_c をもった電子が X_0 を進む間の平均的広がり $r_m [\text{gcm}^{-2}]$ をモリエール単位といい、空気シャワーの横広がりを表す重要なパラメータとなる。

$$r_m = X_0 \tan \langle \theta \rangle \quad (1.22)$$

$$\approx X_0 \cdot (E_s/E) \quad (1.23)$$

$$= (E_s/E) X_0 \quad (1.24)$$

また、軸からの垂直距離 r での電子成分の粒子数密度 $\rho_e(r)$ は、 $x = r/r_m$ とし
て近似的に

$$\rho_e(x) = \frac{N_e}{r_m^2} C(s) x^{s-2} (1+x)^{s-4.5} \quad (1.25)$$

と書くことができ、NKG 分布関数という。s は age parameter とよばれ、1
次宇宙線が最初に相互作用を起こす位置で 0、最大発達 $t_{\max} X_0$ では 1 となる
単調増加関数、 $C(s)$ は規格化定数、 N_e は電子の総数である。

1.5.2 ハドロンシャワー

1 次宇宙線が陽子であれば大気に入射して最初に原子核と核相互作用を起
こすことでパイオン (π 中間子)、ケイオン (K 中間子)、陽子、中性子を生成
する。大部分はパイオンで、その次にケイオンである。単体の陽子でなく
いくつかの陽子・中性子が原子核を構成して入射する場合、初めの衝突でほ
ぼ完全にばらばらになり、その後同様にハドロンを生成する。この相互作用も
エネルギーの許すかぎり連鎖し、核カスケードとよぶ。

パイオンには π^\pm 、 π^0 の三種があり、ほぼ同じ割合で作られる。生成され
たパイオンが以下に示す崩壊をするか、それとも原子核との核相互作用で次
のハドロンを生成するかは、崩壊するまでの平均距離と核相互作用の平均自
由行程との釣り合いで決定される。パイオンのエネルギー E_π が大きいほど
前者が大きくなるため各相互作用が続き、入射角が水平に近いほど平均自由
行程が延びるため先に崩壊してしまう。天頂に近い方向から入射した場合、
 10^{15} eV 以上のエネルギーをもっていれば十分に地表まで核カスケードが続く。

π^0 は次の崩壊

$$\pi^0 \rightarrow 2 \gamma \quad (1.26)$$

を起こして電磁カスケードへ移行する。

π^\pm は別の崩壊を起こす。

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (1.27)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (1.28)$$

ミューオンは電子と比べて質量が非常に大きいため、制動放射を起こさずエ
ネルギーを失いながら地表へ到達する。エネルギーの小さいミューオンは

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \quad (1.29)$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad (1.30)$$

のように崩壊する。

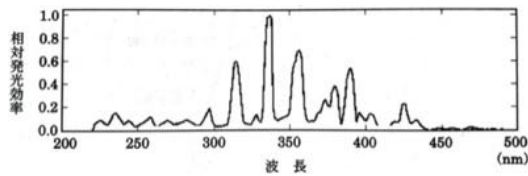


図 1.5: 大気蛍光スペクトル。300~400nm で主に光るのが窒素原子である。
[8]

1.5.3 空気シャワーの観測

ハドロンが1次宇宙線として大気に入射すると、その構成によってシャワーの最大発達の高さ X_{\max} は変化する。まず、核相互作用の平均自由行程は原子量 A に対し $A^{-2/3}$ の割合で短くなる。またすでに述べたように陽子でない原子核 (エネルギー E_0) が入射する場合は最初の衝突でばらばらになると近似できるため、はじめから E_0/A のエネルギーをもった A 個の粒子が入射すると思われる。このとき、 $X_{\max} \propto \log_2(E_0/A)$ なので A が大きいほど、すなわち入射する原子核が重いほど最大発達の高さは浅い。逆に言えば E_0 や地表での X_{\max} の測定によって A を特定することができる。

ところで、大気を高速で運動する粒子は空気中の (主に) 窒素分子を励起し、300~400nm 付近の波長の蛍光を放出する。この大気蛍光の明るさはその場所での粒子数 N に比例するため、望遠鏡を用いて観測することで縦方向の発達の様子を捉えることができ、 X_{\max} や E_0 を知るのに役立つことができる。また、1次宇宙線の到来方向を知ることでその起源を特定する手がかりとなる。地表に空気シャワーを検出する検出器アレイを広範囲に設置することで、その検出タイミングの差などから幾何学的に空気シャワーのシャワー軸を決定することができる。

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概要

超高エネルギー宇宙線に関して、主に

- そのエネルギースペクトルを観測から求め、GZK カットオフの有無を確かめること
- その到来方向を求めて、起源となる天体を特定すること
- その粒子構成を X_{\max} などから特定すること

を目的に 2003 年に建設開始、2008 年から定常運転を行っているのがテレスコープアレイ実験 (Telescope Array experiment, TA 実験) である。超高エネルギー宇宙線の到来頻度は小さいため ($10^{18.5}\text{eV}$ で 1particle/($\text{km}^2 \cdot \text{year}$)) 広大な土地を必要とし、アメリカ合衆国ユタ州中西部の砂漠地帯およそ 700km^2 に 507 台の検出器を展開して稼働中である。TA 実験に用いられる地表検出器はシンチレーション光を利用したもので、加えて大気蛍光を利用した大気蛍光望遠鏡も 3 台設置している。実験に砂漠が選ばれたのは土地の広さの他に、この大気蛍光を観測するために大気が透明で街の明かりがほとんどないことや一年を通して晴れていることが多いといった理由がある。大気蛍光望遠鏡は X_{\max} や E_0 を特定するのに優れているが、月の出していない夜であることや曇っていないことなどを要求するため稼働率は 10%ほどである。これに対して地表検出器は常時稼働が可能のため稼働率がほぼ 100%であり、大気蛍光望遠鏡同様エネルギーやシャワー軸の決定なども行うことができる。この相補的なハイブリッド観測により詳細に宇宙線を解析することができる。

2.2 地表検出器 (Surface Detector, SD)

図 2.2 に示したのが地表検出器である。外観はプラスチックシンチレータを密封したシンチレータボックス、データ収集用エレクトロニクス (図 2.3) や電源供給用バッテリーを収納するステンレスボックス (図 2.4)、電源供給用ソーラーパネル、通信用アンテナ、これらを固定するための金属フレームで構成されている。また各 SD の情報を収集し取りまとめる通信塔が 3 か所に建設されている (図 2.1)。

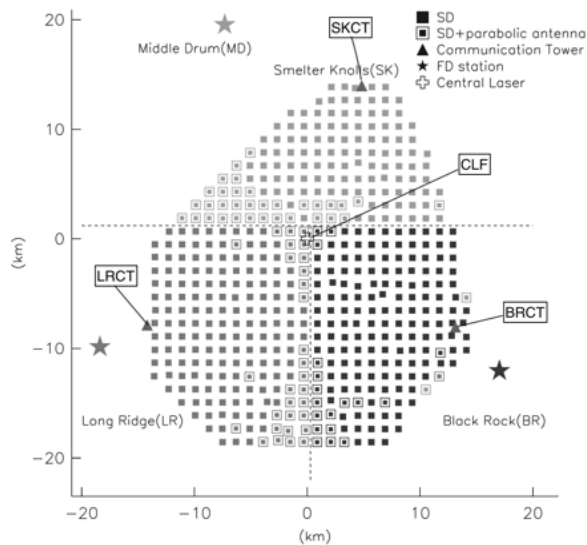


図 2.1: TA サイトの地図 [9]。SD が 507 台設置されており、破線で区切られた領域ごとにある通信塔 (MDCT、LRCT、BRCT) のデータ収集システムと通信を行う。[9]

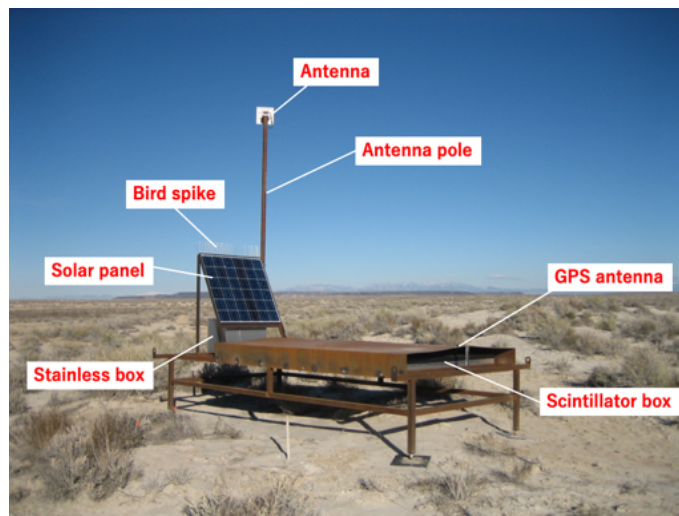


図 2.2: 地表検出器の外観。ソーラーパネルで発電し、裏のステンレスボックス内のバッテリーに充電することで曇りの日や夜も測定が行える。アンテナは最寄りの通信塔 (図 2.5) の方向を向いて情報の通信を行う。シンチレータボックスは金属製の屋根で覆われていて、この屋根の上に GPS アンテナが取り付けられている。ソーラーパネルの端に止まった野鳥による糞がパネルを覆ってしまうと太陽光が遮られてしまうため、野鳥が止まらないようバードスパイクをとりつけてある。

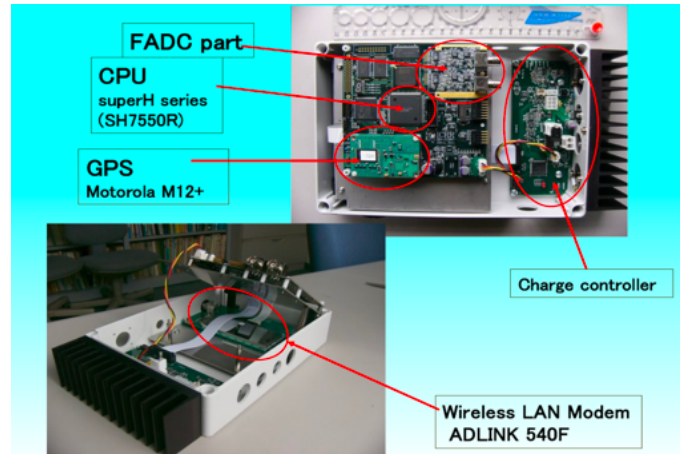


図 2.3: エレクトロニクスの内部構成 [10]。メインボードの FADC の 2 つのインプットでシンチレータ上下層からの信号をそれぞれ受け取る。またリニアリティテスト用 LED や PMT にもメインボードから電圧をかける。GPS ボードはメインボードの上に取り付けられている。メインボードの下には WLAN ボードが取り付けられており、通信塔との送受信を行う。チャージコントローラーは主にソーラーパネルからバッテリーへの過充電を防ぐ役割を持つ。



図 2.4: ステンレスボックスの中。クーラーボックスの中にはバッテリー、Reboot Timer、スイッチボードが収納してある。クーラーボックスの上にはエレクトロニクスが固定されている。



図 2.5: 通信塔 KMCT の外観。長距離通信用のパラボラアンテナ、ソーラーパネル、さらにソーラーパネルの裏に バッテリー、データ収集のための機器を格納するコンテナが設置されている。なお、これは後述の TA_{x4} 用通信塔のうち KMCT(3.1.3 節) であるが、基本的に構成は TA と同じである。

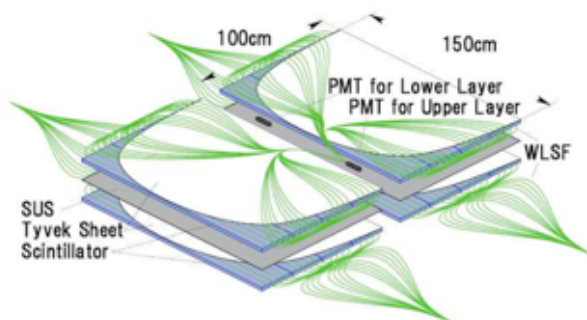


図 2.6: シンチレータボックス内部の概略図 シンチレータは遮光や蛍光を反射させる目的でタイベックシートで覆う。ここには書かれていないが一番外側はブラックシートで覆う。

2.2.1 シンチレータボックス内部

シンチレータボックス内部の構造を図 2.6 に示す。SD はシンチレータ (シーアイ工業社製、CIMS-G2) が上層と下層の 2 層構造になっている。一層に PMT¹(Electron Tube 社製、9124SA) を挟んで左右に 4 枚ずつ合計 8 枚のシンチレータが並べられ、検出面積は 3m² である。シンチレータは 4 枚ごとに反射率 90% 程度のタイベックシートで覆っている。また光漏れと他層からの低エネルギー放射線バックグラウンドを防止するため、上層と下層の間は上下層のシンチレータからの光がクロストークしないように 1mm の厚さのステンレス板で仕切られている。更に一番外側はブラックシートでシンチレータとファイバー全体を覆っている。シンチレータには 2cm 間隔で溝があり、波長変換ファイバー (クラレ社製、Y-11(200)) を張っている。シンチレータ 1 枚あたり、5m のファイバーが 13 本張ってある。片層 8 枚のシンチレータに張ってある 104 本のファイバーの両端をひとつにまとめ、1 つの PMT で光を読み取る。層ごとに 1 本の PMT で読み出すことで、各層を通過した荷電粒子を独立に検出することができる。またこれら上層と下層からの信号のコインシデンスを取ることで、環境ガンマ線等のノイズとなる信号を取り除いて S/N 比の高いデータを取得することが出来る。タイベックシートの上からリニアリティ測定用の LED が取り付けられ、シンチレータボックスの中心の支柱に温度計及び湿度計が固定されている。

¹Photomultiplier、光電子増倍管

プラスチックシンチレータ

TA 実験では2次宇宙線として地上に到達する荷電粒子（通常の宇宙線はほとんどがミューオン）をシンチレータに通過させることで、そのエネルギーの一部をシンチレーション光として光エネルギーに変換させ、検出する。表 2.2.1 はそのシンチレータのスペックをまとめたものである。

表 2.1: プラスチックシンチレータのスペック

製品名	CIMS-G2
寸法	150 cm × 25 cm × 1.2 cm
原料樹脂	MS-IM-62-01
Wavelength of Maximum Scintillation ¹	420nm
Scintillation Efficiency	60% Anthracene ²
減衰時間	3.0~3.2ns
屈折率	1.5~1.58
密度	1.04g/cm ³

¹ 透過スペクトルにおける波長

² アントラセン (C₁₄H₁₀) で作ったシンチレータの発光量を基準とする。

波長変換ファイバー

波長変換ファイバーは光ファイバーの一種であり、シンチレータの発光をPMTに伝える役割を持つ。光ファイバーは通常その側面に入射した光を全反射させることはできない。そこで波長変換材を混ぜることで光を吸収・再発光するので、伝搬する光量を増やすことができる。TAではクラレ社製 Y-11(200)M-S 型波長ファイバー 1mmφ のものを使用している。Y-11 は波長変換材の種類、(200) は配合した Y-11 の濃度とファイバーの直径をかけたものである。M はファイバーが Multi-Cladding タイプであることを示している。一般に光ファイバーは中心部のコア (core) と周りを覆うクラッド (clad) の屈折率の違いを利用するが、Multi-Cladding タイプのファイバーはクラッドが二重になっており、普通のファイバーに比べトラップ効率が良い (図 2.10)。S は S-type のことであるが、コアを形成する分子の向きが揃っているために構造上曲げに強く、Non-S type に比べ小さい半径で曲げることができる (図 2.8, 図 2.9)。シンチレータボックスにファイバーを収納する取り回しを考える上で重要な性能である。

2.2.2 SD のデータ収集

SD のデータ収集は各 SD のエレクトロニクスで行われ、サイトに複数建設された通信塔のタワーエレクトロニクスを経由して TA サイトの東方、Delta

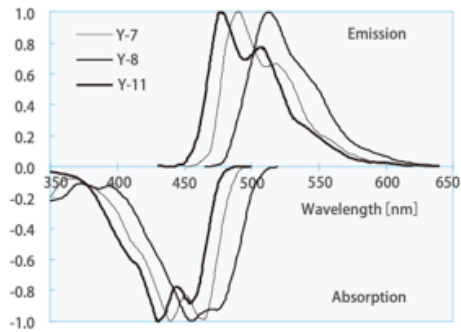


図 2.7: Y-11 波長変換材が、TA で用いるシンチレータの放出する光の波長にあうことがわかる。(表 2.1 参照)[11]

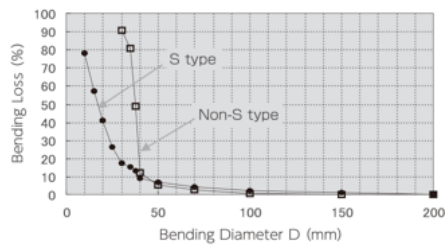


図 2.8: ファイバーの曲げ直径と曲げたことによる光の損失の関係。ロスに大きく違いが出るのは直径 40mm 以下に曲げたときだが、クラレ社は 1mmφ のファイバーの曲げの上限は Non-S type で直径 200mm、S type で直径 100mm を推奨する。[11]

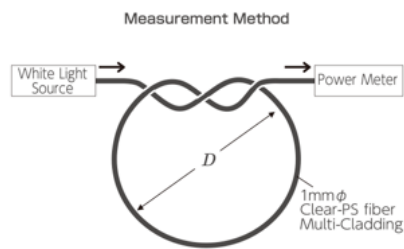


図 2.9: 曲げの直径の定義 [11]

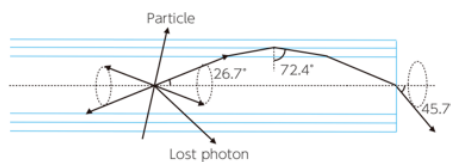


図 2.10: Multi-Cladding ファイバー内での光の伝播の模式図。Multi-Cladding では第一層のクラッドで全反射しなくとも、第二層で拾える場合がある。[11]



図 2.11: サブエレクトロニクスでのデータ収集

市内にある CRC(Cosmic Ray Center) へ送られる。その間以下に述べる 3 種類のトリガーを生成する仕組みが存在する。

サブエレクトロニクス

PMT で増幅された信号は上下層別々にサブエレクトロニクスの 2 つのチャンネルが受け取る。この信号は FADC(Flash ADC) がデジタルサンプリングして波形を記録する。FADC は最大 2V の電圧を 12bit(2 進数で 4095 まで)、50MHz(1bin/20ns) でサンプリングするが、精度を上げるためにローパスフィルタ (カットオフ周波数:9.7MHz) を通して高周波数成分は取り除く。

- level-0 トリガー
 こうしてデジタル化した信号について、FPGA 内のプログラムで判定を行う。まずある時間 $T = T_0$ までの 8bin 分の信号の積分値 S_0 を、 $T = T_0 - 12\text{bin}$ から $T = T_0 - 4\text{bin}$ までの 8bin 分の信号の積分値 S_{-1} と比較する。上下層で $S_0 - S_{-1} > 1/3\text{MIP}$ であるとき (MIP については 4.1 節で詳述)、バッファに T_0 と、 $T = T_0 - 35\text{bin}$ から 128bin 分の信号が記録される。判定が完了すると 4bin 進めて繰り返される。
- level-1 トリガー
 $S_0 - S_{-1} > 3\text{MIP}$ であるとき、level-0 トリガーとは別に level-1 トリガーを生成する。level-1 トリガーテーブルには T_0, S_0 のほかバッファ中の対応する場所へのポインタが記録される。

タワーエレクトロニクス

TA サイトには 3 台の通信塔があり、各サブエレクトロニクスはあらかじめ決められた通信塔 (ホスト) と通信を行う。通信塔にはタワーエレクトロニクスが設置されていて、1Hz で各 SD にデータ送信の要求を送る。

- level-2 トリガー

要求を受けて各 SD からタワーエレクトロニクスに level-1 トリガーテーブルが送られる。隣接した 3 台の SD から $8\mu\text{s}$ 以内の level-1 トリガーを受け取った時、空気シャワーと判定して level-2 トリガーが生成され、各 SD の相当する波形を記録する。

境界トリガー

前述したように T ASD アレイには通信塔が 3 台設置されており (図 2.1)、各 SD は決められた通信塔とトリガーテーブルなどのやりとりを行う。

各通信塔の担当する SD 領域ごとに空気シャワーの判定を行う level-2 トリガーを生成してしまうと、SD 領域をまたぐシャワーの検出がされたときそれらをひとつのイベントとして認識できず、正しいデータを取得することができなくなる。これを防ぐために境界付近の SD のトリガーテーブルのみ別に用意されたセントラル PC (SKCT に設置) へ送られ、独立したトリガー判定を行う。トリガー条件は level-2 トリガーと同じ、隣接した 3 台の SD から $8\mu\text{s}$ 以内の level-1 トリガーを受け取ったときになっている。ただしここでの「隣接」は境界をまたぐこともあるため、最も境界に近い SD だけでなくそのひとつ内側の SD のトリガーテーブルも確認される必要がある。セントラル PC でトリガーが生成されると全通信塔の全波形情報が収集される。

2.3 大気蛍光望遠鏡 (Flourescence Detector, FD)

TA では大気蛍光望遠鏡を 3ヶ所で運用しており、それぞれ図 2.1 の MD (Middle Drum) サイト、LR (Long Ridge) サイト、BRM (Black Rock Mesa) サイトと呼ばれる場所に設置されている。MD は HiRes 実験¹から移設された望遠鏡である。LR と BR の構成は等しく、12 台の反射望遠鏡はそれぞれ六角形の鏡が 18 枚、ハニカム状に並べられ球面鏡をつくる。これらの球面鏡は仰角を $3^\circ \sim 33^\circ$ 、方位角を CLF 中心に 108° カバーする。これらの鏡で集められた光は PMT カメラにより増幅されて電気信号として収集される。PMT カメラはさらに 256 個の PMT で構成されている。FD で用いる PMT は浜松ホトニクス社製 R6234 を使用しており、Schott 社製 BG3 フィルターで窒素分子の

¹High-Resolution Fly's Eye 実験は TA が稼働する前に 2006 年までユタ州で行われていた宇宙線観測実験。FD のみで超高エネルギー宇宙線の観測が行われた。HiRes の FD を再利用した MDFD は反射望遠鏡が 14 台であり、仰角は $3^\circ \sim 31^\circ$ 、方位角は 114° をカバーする。

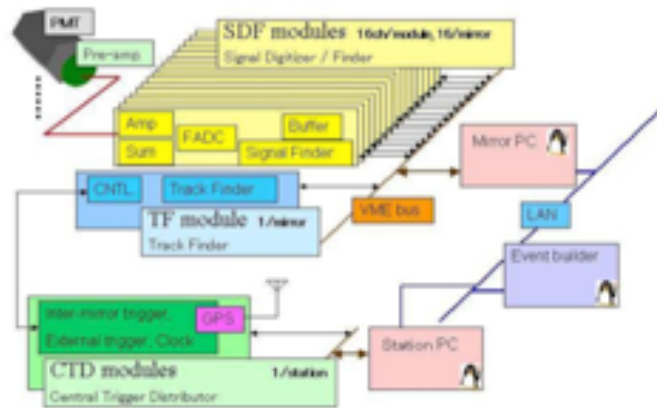


図 2.12: 望遠鏡のデータ収集の流れ

蛍光のスペクトル 300nm~400nm 以外の光をカットするようにしている (図 1.5)。信号は PMT とプリアンプでゲインが 4×10^6 となるよう印加電圧が調整される。

2.3.1 FD のデータ収集

増幅された信号は一連のトリガーシステムに送られる (図 2.12)。すなわち、SDF(Signal Digitizer and Finder) モジュール、TF(Track Finder) モジュール、CTD(Central Trigger Distributor) モジュールの三種類である。

SDF

1つの鏡につき16枚のSDFが割り当てられる。SDFモジュールではFADCによって12bit、40MHzのサンプリングをおこなう。サンプリングデータは4つ(100ns)ごとに積分され、バッファに記録される。この積分データに対し閾値との比較で信号の判定が行われる(ファーストレベルトリガー)。この判定の結果はTFに送られる。

TF

1つの鏡につき1枚のTFが割り当てられる。TFではSDFでトリガーした信号に空間的広がり・時間的連続性があるかの判定が行われる。具体的には次の三種類の基準を設ける(セカンドレベルトリガー)。

- 連続した5つのPMTで信号がある。
- カメラの端で連続した3つのPMTで信号がある。

- 1つのPMTで閾値を超えた信号がある。

この判定の結果はCTDに送られる。

CTD

1つのステーションに1枚のCTDが割り当てられる。データ収集をする最終的なトリガー(ファイナルレベルトリガー)を全信号記録系に発信するほか、カメラをまたいだトラックを判定したり各エレクトロニクスへのクロックや初期化を行う。GPSモジュールによってイベント発生時刻の決定も行う。

2.3.2 キャリブレーション

大気蛍光望遠鏡を使って X_{\max} や E_0 を求めるにあたって、その過程には大気の状態やPMTの量子効率など物理的状況で変化するさまざまなパラメータがあり、それぞれを精度良く測定しておくことが重要である。そのため多くのキャリブレーションが行われており、以下はその一部である。

PMTゲインの較正のため、決められた光量の光源を用いて印加電圧とゲインの関係を調べるCRAYS(Calibration using RAYleigh Scattering)で基準PMTを決めておく。

大気状態をモニタリングする方法としてCLF(Central Laser Facility)を用いる。CLFは3つのFDステーションから等距離(20.8km)の位置にあり、大気へ向かって垂直に紫外線レーザーを射出する。このレーザーの散乱を各FDステーションが観測することで大気の透明度を測定することができる。大気蛍光望遠鏡を用いての観測中には30分に一度このキャリブレーションを行っている。

2.4 TAの現状

TA実験は2008年5月に定常運転を開始し、2019年5月で11年が経過した。超高エネルギー宇宙線の観測数も増えてきたため、その現状を記述する。

エネルギースペクトル

TA実験で2019年5月までのデータを元に作成されたエネルギースペクトルを図2.13に示す[12]。これによればカットオフが $\log(E/eV) = 19.81$ 付近で存在しており、GZKカットオフの存在を示唆する。また南半球で行われている超高エネルギー宇宙線の研究であるPierre Auger実験との比較は、図2.14に示す[13]。これを見るとカットオフエネルギーの値が両者で異なっていることがわかる。Pierre Auger実験は主に南半球を観測し、TA実験は

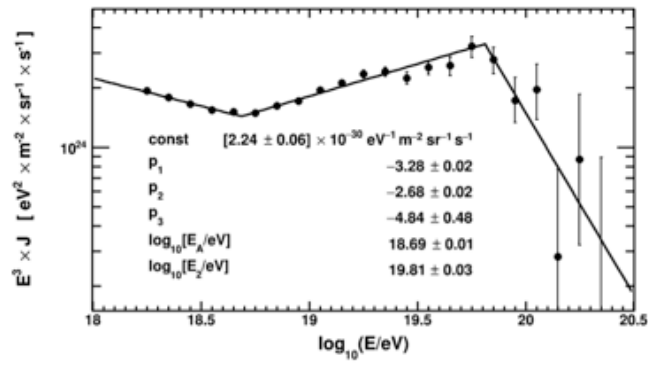


図 2.13: TA 実験に基づく高エネルギー宇宙線のエネルギースペクトル。[12]

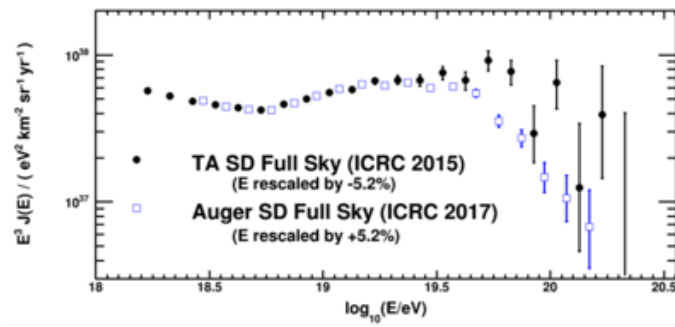


図 2.14: TAsD と Pierre Auger 実験に基づく高エネルギー宇宙線のエネルギースペクトル。TA のスペクトルと Auger のスペクトルをそれぞれ示した。

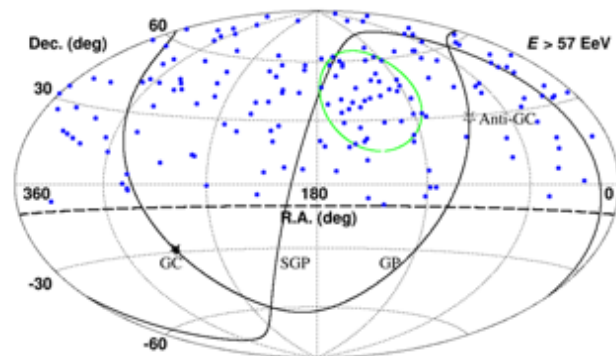


図 2.15: TA で観測した 57EeV 以上のエネルギーをもつ宇宙線の到来方向の赤道座標のプロット。[14] 宇宙線の到来方向を青印で示した。緑の曲線は最も有意度の高い方向を中心とした視半径 25 度の円である。黒い破線より上は TA の視野である。SGP は超銀河面、GP は銀河面、GC は銀河中心を示す。

主に北半球を観測している。観測領域の違いによってカットオフエネルギーの位置が違っている可能性がある。また Pierre Auger 実験は TA 実験と同じく地表検出器と大気蛍光望遠鏡のハイブリッド観測であるが、地表検出器は TA 実験で用いるプラスチックシンチレータでのシンチレーション光ではなく、水タンクを用いたチェレンコフ光の検出を行うので、観測に感度がある粒子が異なる。そのため測定器の違いあるいは解析方法の違いに関連した系統誤差の影響によりカットオフエネルギーの違いが生まれていないか今後精査する必要がある。

到来起源

TA 実験では 2008 年から 2019 年までの間に 57EeV 以上の宇宙線 (最高エネルギー宇宙線) を 168 イベント観測した。これらの到来方向を赤道座標でプロットしたのが図 2.15 である。さらに視半径 25° でオーバーサンプリングして求めた、バックグラウンド数に対する観測数の有意度のマップを図 2.16 示した。TA 実験はアメリカで行われているため主に北半球の情報だが、この図によると赤経 144.3°、赤緯 40.3° の方向に事前確率は 5.1 σ 、事後確率は 2.9 σ の有意度を持つホットスポットがあることがわかる。

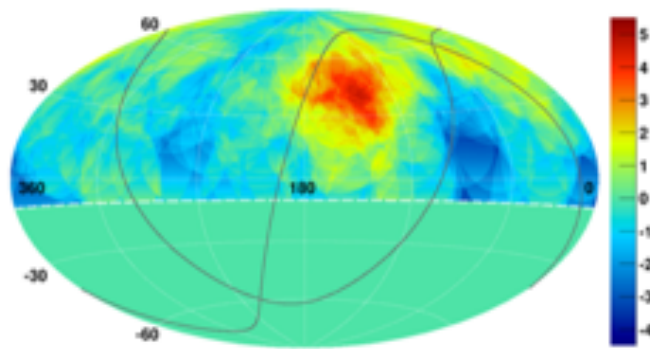


図 2.16: TA で観測した 57EeV 以上の宇宙線の到来方向に対し 25° の視半径でオーバーサンプリングした図。カラーコードは事前確率を表す。バックグラウンド数と比較して、赤色は観測数が過剰であることを示し、青色は観測数が少ないことを示す。[14]

第3章 テレスコープアレイ拡張実験 (TAx4 実験)

2.4 節に記述したような TA 実験の結果を受けて、より大きな検出面積を使って宇宙線データ収集のペースを上げて効率よく超高エネルギー宇宙線の詳細を知るために始まったのが TAx4 実験である。TA 実験の検出面積は約 700km^2 であるのに対し、TAx4 実験では最終的に約 3000km^2 までアレイを展開する計画である (図 3.1)。アレイの間隔は TA 実験での 1.2km に比べ 2.08km と広がっているが、高いエネルギーの ($\gtrsim 57\text{EeV}$) 宇宙線では情報の質は大きく落ちないことがわかっている [15]。大気蛍光望遠鏡も TA 実験の MDFD と BRFD サイトに TAx4 アレイの方向に向けて増設された。

3.1 地表検出器の変更点

3.1.1 PMT の変更

TASD の PMT は Electron Tube 社の 9124SA が使われていたが、TAx4 では浜松ホトニクス社の R8619 へ変更された。これにより PMT の量子効率がおおよそ 10% から 19% 程度まで向上した [16]。PMT に入射した光は光電面で電子に変換されるが、この変換効率 (光電子数/光子数) を量子効率といい、これが大きいと高感度といえる。

3.1.2 シンチレータボックス内の変更

ファイバーを集めて固定し PMT の入射窓に接触させるクッキーと呼ばれる部品は、TASD では透明のアクリル製であったものを白色の POM¹ 製に変更した (図 3.2)。これにより透明のアクリルの場合には PMT とファイバーの接続部分の隙間から逃げていた光が反射され、PMT へ入射する光量が $10.6 \pm 0.6\%$ 増加した [16]。PMT とクッキーの変更で PMT の光電面から放出される光電子数は向上したため、TAx4 実験では光ファイバーの本数や取り回しを削減・再検討することで同程度の光量を保ったまま製作費用を削減した。最終的には ① シンチレータに沿わせるファイバーは 2cm 間隔であったものを 4cm 間

¹ ポリアセタール (polyacetal) またはポリオキシメチレン (PolyOxyMethylene)

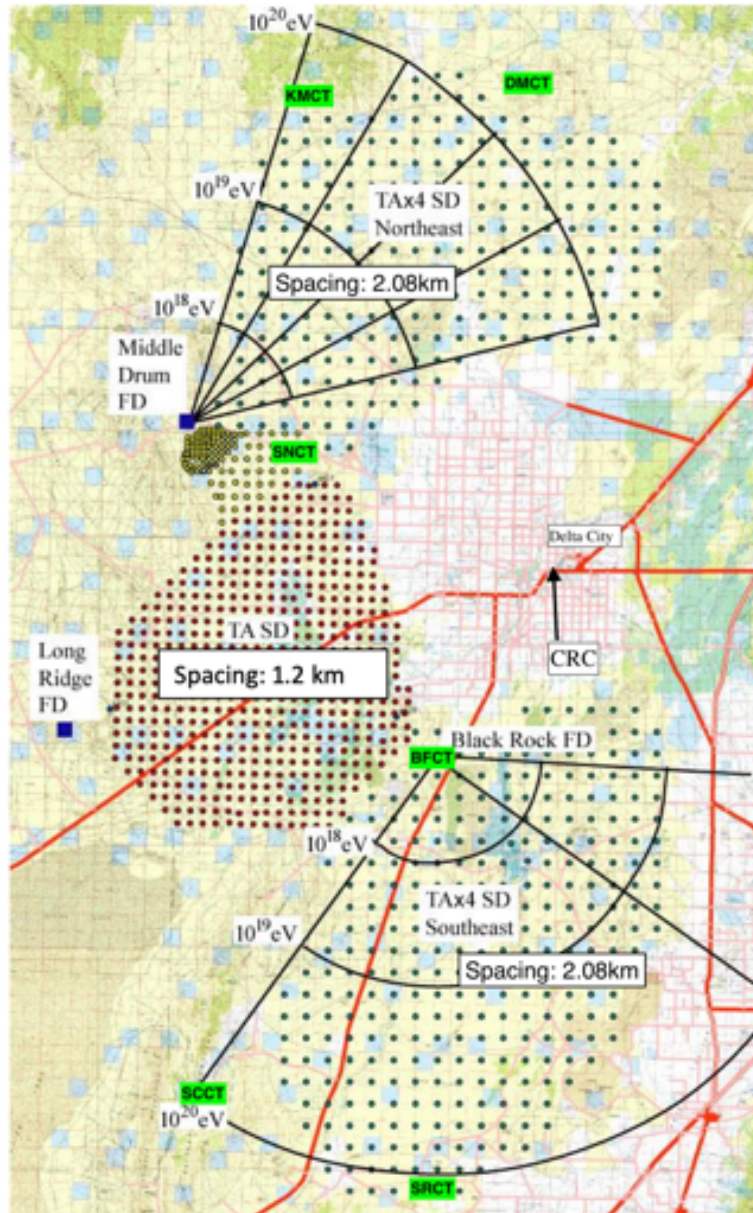


図 3.1: 図中央付近の赤点で示した 507 台の SD が TAsD アレイである。TAsD の北側と南側に緑色の点で示した領域が、最終的に TAx4SD を追加する予定の SD 領域である。TAsD アレイと比べて大幅に面積が増していることがわかる。北側の領域および南側の SD 領域にある扇の要に TAx4 FD を建設した。扇は FD の視野を示す。緑色の四角形の背景を付けて示したのは TAx4 用の 6 つの通信塔である。



図 3.2: ファイバーの端を束ねて端面を PMT の入射ガラス窓に接触させて固定する道具 (クッキーと呼ぶ) (左) これまで用いていたクッキー。透明な材料でできているので光が一部逃げてしまっていた。(右)TAx4 で用いるクッキー。白い材料で光を反射させてロスを減らすことが可能になった。

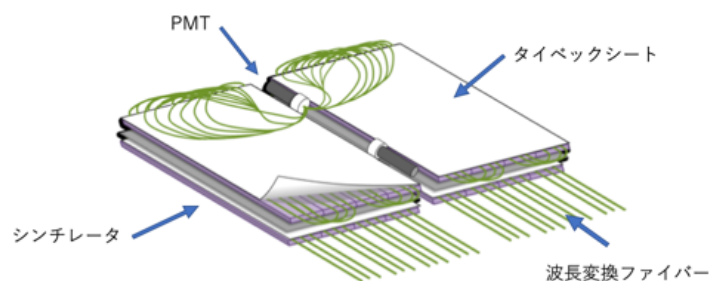


図 3.3: TAx4SD のシンチレータボックス内の図。

隔にする ② シンチレータ表面の溝ひとつにつき一本のファイバーを使用して両端とも PMT へ接続していたところを、片側を U ターンさせて隣の溝を通して両端を読み取ることで二つの溝につき一本のファイバーを使用する方法へ変更することによってファイバーの使用量を 67%減らすことができた。(図 3.4, 図 3.5)

3.1.3 通信塔

TAx4 実験ではアレイの拡大に伴って 6 つの通信塔が増設された (図 3.1)。北側アレイ用に Desert Mountain Communication Tower(DMCT)、Keg Mountain CT(KMCT)、Smelter Knoll North CT(SNCT)、南側アレイ用に Black Rock Mesa FD CT(BFCT)、South Crickets CT(SCCT)、Sand Ridge CT(SRCT) と呼ばれる通信塔がある。

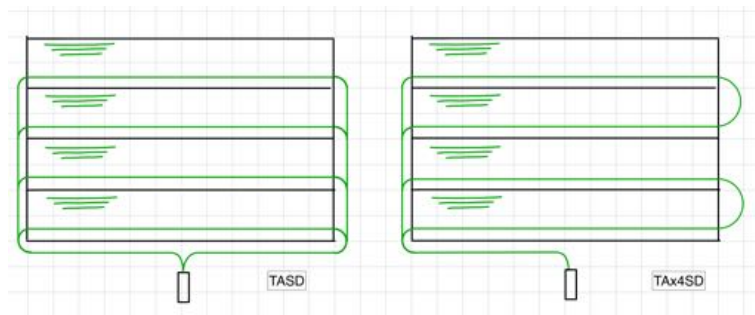


図 3.4: (左)TASD のファイバー取り回しの図。溝一本につき一本のファイバーを使用し、両側をまとめて PMT に接続する。(右)TAx4SD のファイバー取り回しの図。ファイバーを折り返して他の溝を通し片側からファイバーをまとめて PMT へ接続する。

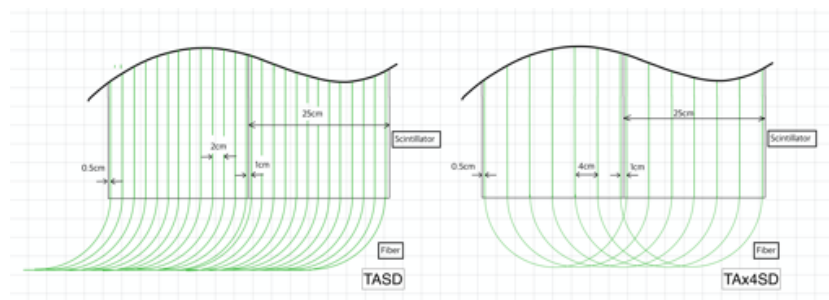


図 3.5: (左)TASD のファイバー間隔は基本的に 2cm で一枚のシンチレータに 13 本使用する。(右)TAx4SD のファイバー間隔は基本的に 4cm で一枚のシンチレータに 7 本使用する。

第4章 TA_x4 SDの性能評価

3章で述べた TA_x4SDの大量製作に伴い、性能評価・故障チェックを目的としていくつかの測定を行った。4.1節ではシンチレータを通過する1粒子の信号の大きさの較正に使われる1 MIP peakの測定の結果を示した。4.2節ではシンチレータから読出回路まで含めた信号のLinearity(線形性)の測定の結果を示した。4.3節では粒子がシンチレータを通過する場所によって信号の大きさがどのように依存するか(Uniformity)を測定した結果を示した。4.4節では地表検出器で時間測定に使われるGPS Timingのオフセットと分解能を測定した結果を示した。4.5節ではTA_x4用エレクトロニクスで使用するCPUのチェックの結果を示した。

4.1 1MIP peak

シンチレータに荷電粒子が入射するとき、損失するエネルギーはBethe-Blochの式によって記述される。

$$S = \left\langle -\frac{dE}{dx} \right\rangle = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right] \quad (4.1)$$

なおKは比例定数、Aは物質の原子量、 T_{max} は粒子が物質中の電子に渡す最大のエネルギー、Iは平均励起ポテンシャルと呼ばれ物質中の原子が粒子から受け取るエネルギーの平均量を表す物質固有の定数である。 δ は物質密度による補正項で、入射する粒子のエネルギーが大きいほど相対論的に大きい効果をもたらす。これも物質固有の関数である。この式によればプラスチックシンチレータ中でミューオンが損失するエネルギーはその速さ(エネルギー)のみに依存する。入射粒子のエネルギーが大きくなるにつれその損失エネルギーは大きくなるが、ある点で極値をむかえた後は緩やかに減少する(図4.1)。この最小のエネルギーを物質中で損失する粒子をMinimum Ionizing Particle(MIP)とよぶ。二次宇宙線としてシンチレータが検出するミューオンの多くはMIPとして振る舞うため、各SDであらかじめMIPがシンチレータで損失したエネルギーによって発生したシンチレーション光の大きさ(光量)を測定し、その差を較正するようにPMTのゲインを調整する。

ただし図4.1の曲線で表される入射粒子の各エネルギーでの損失エネルギーは平均値であり、粒子が入射する物質が薄いほど構成する原子との衝突回数

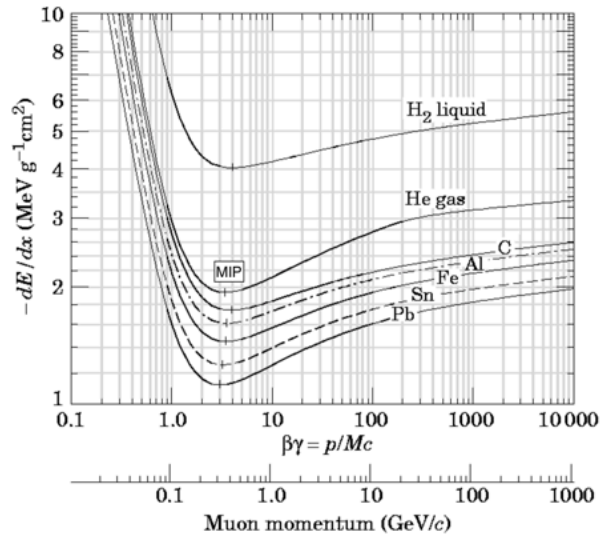


図 4.1: いろいろな物質中における荷電粒子の電離損失によって失われるエネルギーの割合。同一物質中でのミュオンのエネルギー損失はその入射の速さによる。入射対象の物質の種類によっても MIP の大きさは変わる。[17]

にばらつきが生まれ、ポアソン統計によって高エネルギー側に広がりを持ったランダウ分布と呼ばれる形にエネルギーが分布する (図 4.2)。ランダウ分布の確率密度分布は式 4.2 で表される。

$$p(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \exp(-t \ln t) \sin(\pi t) dt \quad (4.2)$$

TA 実験や TA_{x4} 実験ではこの分布のピークのエネルギーを 1MIP peak 値とよび MIP の損失エネルギーとしてそれぞれのシンチレータや SD について測定を行った。

4.1.1 シンチレータの 1MIP peak 値測定

シンチレータは材料が溶けている状態で攪拌し成形して固めるが、この過程において性能に個体差が生じることがわかっている。そのため SD に組み込む前に 1MIP peak 値を測定し基準のシンチレータと比べて基準値の 80% に満たないものは不良品として SD に使用しないことにした。

測定方法

このシンチレータの光量の抽出測定はシンチレータが納品されるたびに東京大学柏キャンパスの宇宙線研究所の一階の実験室にて行なった。測定する

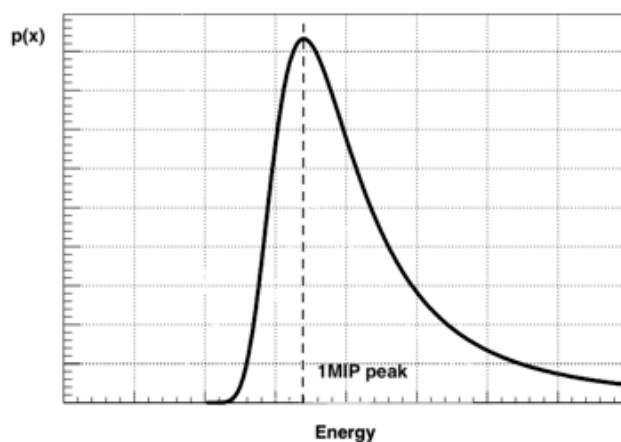


図 4.2: ランダウ分布の図。MIP がシンチレータで損失するエネルギーはこの分布に従うため、ピーク値をとるエネルギーを 1MIP peak 値と定義した。

のは製作した全てのシンチレータのうち #50 ごとに 1 枚抜き出したものであり、UPPER とする (上層側に置く)。これと別にコインシデンスさせるためのシンチレータを LOWER とする (下層側に置く)。どちらも光ファイバーを沿わせ PMT に接続するが、検査用のシンチレータは試験が済んだら入れ替えるために UPPER の光ファイバーと PMT が接続されるクッキーの部分は完全な固定 (接着) はしない (図 4.6)。また PMT にかける電圧はゲインが 5×10^6 になるよう調整した。また 2.2.2 で述べたように PMT が増幅させた電子は電流となってエレクトロニクス of FADC が受け取り、デジタルサンプリングを行う。デジタル化された ADC Count A と PMT の光電面から発生する光電子数 x には次の関係がある。

$$x[\text{p.e.}] \times \text{PMT Gain} \times e[\text{C}] = \alpha[\text{charge/count}] \times A[\text{count}] \quad (4.3)$$

e は素電荷、 α は使用する ADC に固有のものであり、TAx4 実験では $\alpha \sim 0.18[\text{pC/ADC Count}]$ である。 $x=1$ 個の光電子の入射に対し 4.5ADC Count とデジタル化される。

トリガーは実際のデータ収集とは異なる (2.2.2 節参照)。ある時間 $T = T_0$ を基準として、 $T_0 - 8\text{bin} \sim T_0$ の信号の積分値 S_{-1} と $T_0 \sim T_0 + 8\text{bin}$ の信号の積分値 S_0 が $S_0 - S_{-1} > 12\text{count}$ をみたすとき、 T_0 から 16bin 分を積分し MIP の積分 ADC カウントとする (図 4.3)。

測定結果

図 4.7 に示すのが、典型的な一枚のシンチレータに行った 1MIP 試験の結果である。運動中の荷電粒子が物質中を通過する際のエネルギー損失量は

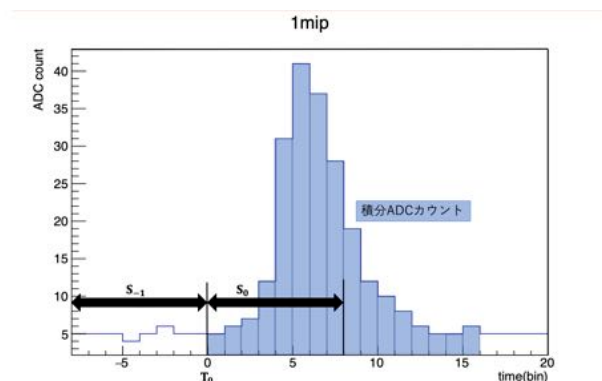


図 4.3: $S_0 - S_{-1} > 12\text{count}$ をみたすとき、 T_0 から 16bin 分の ADC カウントを積分してこの MIP の積分 ADC カウントとする。

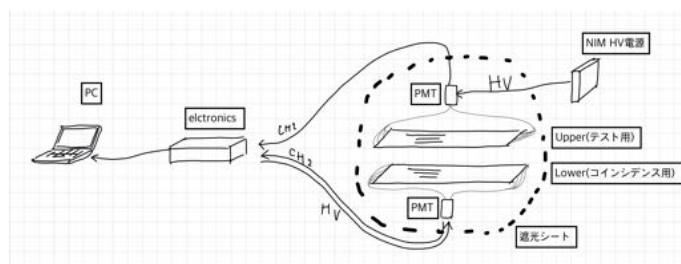


図 4.4: 測定システムの概略図。測定時の接続を示した。測定のたびに Upper のみ遮光シートをひらいて、シンチレータを交換する。

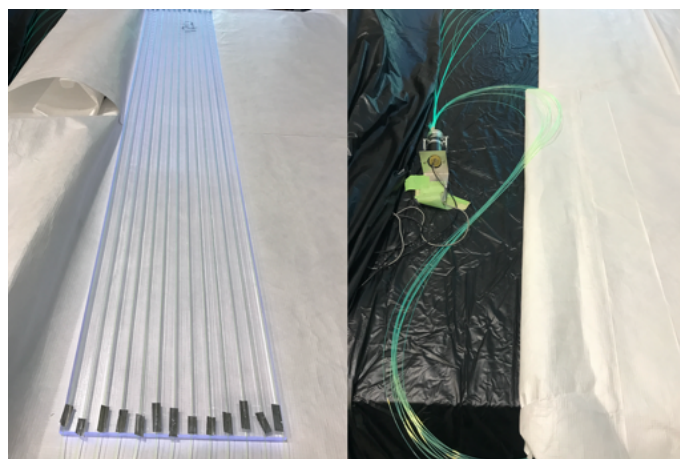


図 4.5: 左:シンチレータの上面の溝に波長変換ファイバーを沿わせ、両端をテープで止める。右:取り回しでは曲げ半径に気をつける。



図 4.6: ファイバーは接着せず、PMT の光電面に接触させて隙間はグリースで埋める。

Landau 分布に従うが、実際には光電子の発生数のばらつきなどでさらに広がった分布になるので、ガウス関数を畳み込んだ Landau-Gaussian 分布関数でフィットする。このピークのカウント数はペDESTALを含むため、 5×10^4 カウントごとに PMT からの入力とは別にトリガーをさせ、この値をペDESTALとする。見かけの 1MIP peak 値 227.7 ± 1.3 ADC Count から、測定されたペDESTAL (図 4.7 右図) の peak 値 80.03 ± 0.077 ADC Count を引いた 147.63 ± 1.28 ADC Count が真の 1MIP peak 値となる。また図 4.7 左側の山はノイズなので、これが入らない範囲で関数をフィッティングする (赤線)。

図 4.8 は全てのシンチレータの基準シンチレータに対する光量 (1MIP peak 値) 比をシンチレータの番号に対してプロットしたものである。同じシンチレータでも温度の影響などで測定の際に値が変化する [16]。事前に十分光量があると判断されたシンチレータを用意し、各測定日の始めと終わりに 3 回ずつその 1MIP peak 値を測定し、これを各日の基準値として各シンチレータとの比を縦軸とした。

プロットの色が変わるのは製造ロットの区切りで、# 3000 付近 (オレンジ) までは 2016 年までの製作、# 4000 付近 (緑) までは 2017 年の製作分、それ以降 (黒) は 2018 年の製作分である。製作時期ごとに光量にギャップがあることがわかる。

また光量の変化はシンチレータ製作時の工場内の温度の変化がゆっくりであることなどから連続的と予想されるが多少のばらつきが見える。これは各シンチレータの測定の際に全ての光ファイバーを外し、付け直す手作業があることが大きな要因と考えられる。ファイバーと PMT の接続面も完全な固定はされていないため、実際に SD に組み込まれて運用する際にはこの結果よりは良い性能を示すことが予想される。

日付：170406, 番号：B1050

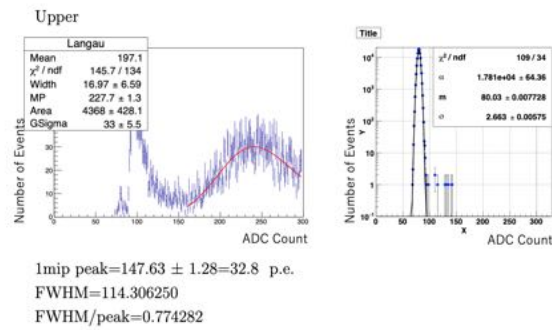


図 4.7: 典型的な 1MIP peak 値測定の結果。(左図)MIP が失うエネルギーにはばらつきがあるため、Landau-Gaussian 分布でフィッティングする。実際にはガウス分布を畳み込む前のランダウ分布のパラメータを取り出し、ピークをとる ADC カウントを 1MIP peak 値とする。左の尖った山はノイズ成分であり、トリガーはしたものの MIP による発光ではなかったと考えられるイベントである。(右図) 左図の 1MIP peak 値はベDESTAL を含むため ADC Count が実際より大きく測定されている。そのため 5×10^4 カウントごとにベDESTAL トリガーを入力し、その分布のピークをベDESTAL 値とする。最終的な 1MIP peak 値は左図の peak 値から右図の peak 値を引いた値となる。(この測定では 32p.e.)

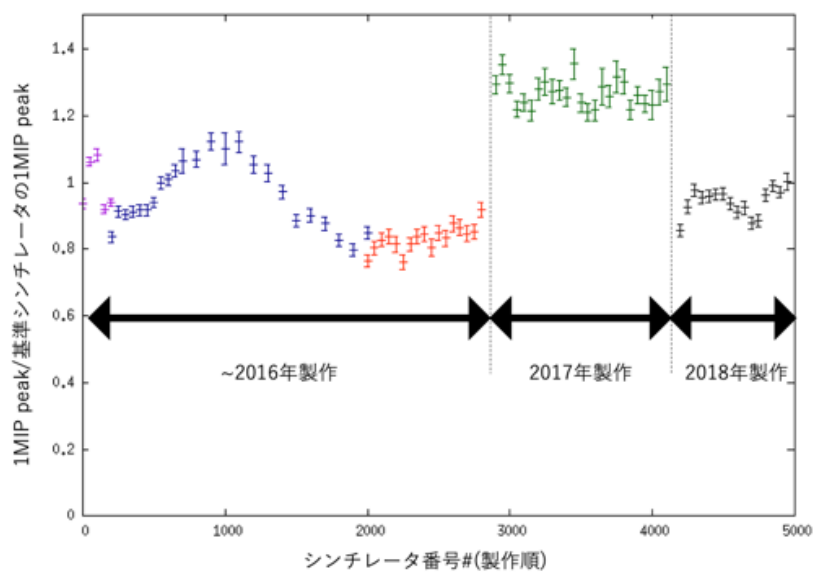


図 4.8: #50 ごとにシンチレータを 1 枚抜き出し 1MIP peak 値測定を行った。縦軸は基準のシンチレータとの 1MIP peak 値の比である。ロットごとにプロットの色を変えている。同色プロットのシンチレータは連続して製作されているため 1MIP peak 値の変化も連続である。はじめの 3 回のロットは 2015 特に橙→緑→黒のロット間は半年あるいは一年ほどの時間的ギャップがあり、1MIP peak 値も不連続に変化している。

不良シンチレータ

図 4.8 は十分な光量があると認められ実際に SD に組み込まれたシンチレータのみの情報である。一部シンチレータについては上記の検査により光量が不十分と判断されたため SD には組み込まれておらず、またこの図にもプロットしていない。2018 年 2 月に行った 1MIP peak 値の測定で、#4100 のシンチレータの 1MIP peak がうまく決定できず、光量が小さいことがわかった(図 4.9)。

そこで #4051~ #4150(この時期のロットでは #1 ~ #100)については別で詳しく 1MIP peak 値測定を行った。図 4.11 の横軸のロット番号はこの製作期における番号を示すものである。縦軸はこれまでの 1MIP peak 値測定で用いたものと同じ基準シンチレータを比べた相対 1MIP peak 値である。TA 実験や TA_{x4} 実験では基準のシンチレータに対し 1MIP peak 値が 80%以上であれば十分光量があるとしており、この図によれば通し番号で #4051 ~ #4100 はこの基準以下とみなされ、TA_{x4}SD には使用しなかった。

製作期ごとの 1MIP peak 値のギャップ

図 4.8 を見ると、2017 年製作のシンチレータは他と比べて 20~40%ほど 1MIP peak 値が大きいことがわかる。測定の系統誤差には代表的なものとして温度変化の影響があるが、この測定では基準となるシンチレータの 1MIP peak 値を各日の測定の始めと終わりに測定し、これらの平均をその日の基準とすることで温度の違いの影響を除くようにした。また複数回の測定でも 10%を超える差は確認できなかったため、このギャップは測定時の誤差ではなく製作期ごとの品質の違いであると結論づけた。シンチレータの製作は、表 2.1 の原料を攪拌したのち決められた形に押し出してカットするという順序で行われるが、主に攪拌のフェイズでシンチレータの品質が決定する。2017 年製作のシンチレータ(図 4.8 の緑色で示された製作時期)はこの攪拌がなんらかの理由で比較的うまくいったことが考えられる。また添加剤の質も関係があるかもしれないが、この情報は得られていない。いずれにしても 1MIP peak 値が大きい分には SD の品質に問題がないので、これ以上の原因追求はしなかった。

4.1.2 SD の 1MIP peak 値測定

シンチレータは日本でシンチレータボックスに組み込まれた後(30 台は韓国で組み込み)、Delta 市に輸送されたのち SD として組み立てられる。シンチレータボックスの状態での 1MIP peak 値を日本あるいは韓国で測定し、輸送後の Delta 市でも SD 組み立て前に 1MIP peak 値の測定を行った。これらは各組み立てがうまくできているか、輸送時の破損がないかを確認する目的が

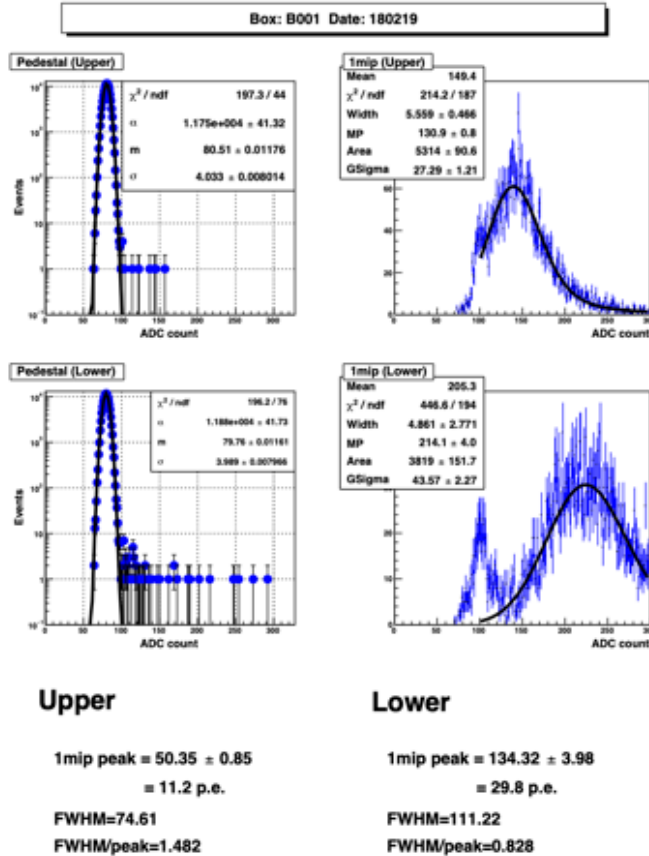


図 4.9: upper が通し番号で#4100(この時期のロットでは#50)の1MIP peak 値の測定結果。上の2つの図が upper の結果で、下の2つの図が Lower の結果である。左の2つの図は Upper と Lower のペデスタル分布で、右の2つの図はシンチレータの信号である。フィッティングがきれいにできていないので upper、lower 共にパラメータの値はおおよその参考値だが、コインシデンス用の lower に比べて50%以下の光電子数しか発生していないことがわかる。

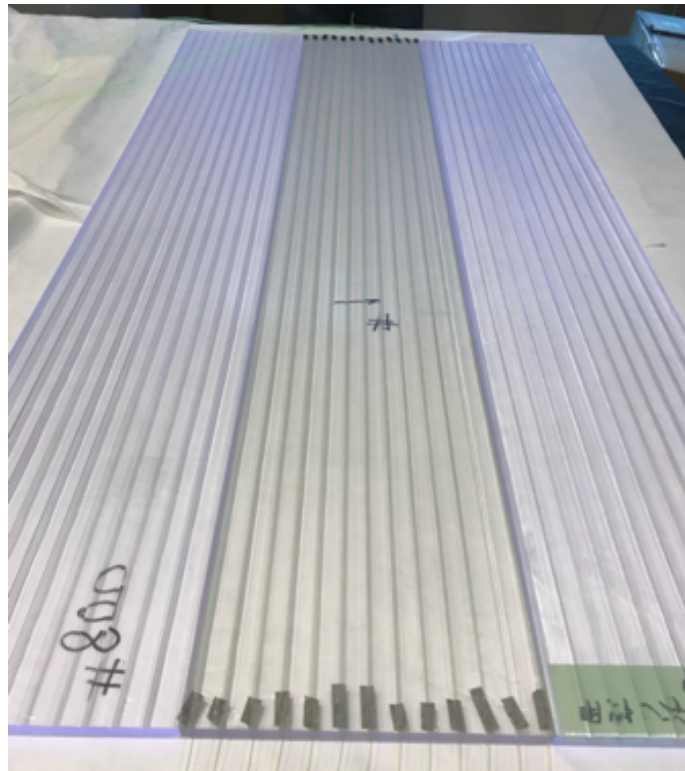


図 4.10: 蛍光灯下でのシンチレータの蛍光発光の肉眼での比較。中央のシンチレータ (#1) は測定した光量が低かったもので、見た目でも両側の正常なシンチレータとは違って見えた。ただし見た目には蛍光の発光が弱くとも測定する光量が小さいとは限らない。

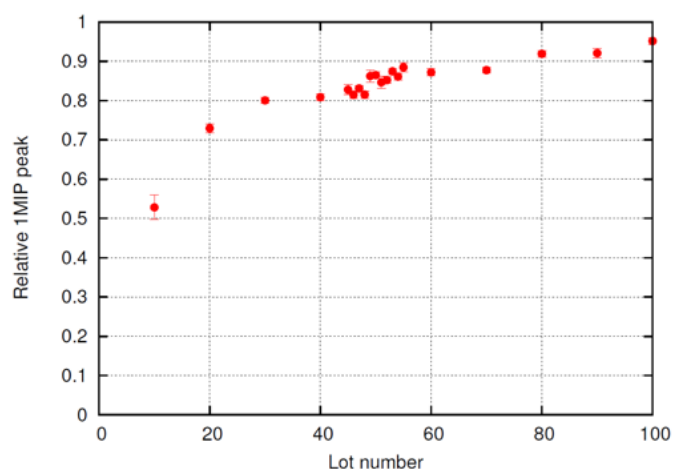


図 4.11: 縦軸は基準シンチレータとの相対光量。横軸はこのロットにおける製作順につけられた番号。#50(通し番号では#4100) 付近以降で基準のシンチレータの 85%程度の光量であるため、TAx4SD に使用できると判断された。

ある。既にシンチレータの光量には問題がない事は確認されているため今回は具体的な基準値は設けず、おおよそ 10p.e. 以上の 1MIP peak 値があることが確認されればよいとした。また今回の測定ではそれぞれのシンチレータボックスに PMT の取り付けが完了しているため、各 PMT ゲインが 5×10^6 になるよう浜松ホトニクス社からのデータシートをもとに印加電圧を調整した。

輸送前

シンチレータボックスを組み立てた後に測定した典型的な 1MIP peak 値は図 4.12 で、シンチレータボックスの組み立て順に 1MIP peak 値をプロットしたものが図 4.13 で、ヒストグラムにしたのが次の図 4.14 である。シンチレータはほぼ番号順に SD に組み込まれているため、図 4.8 の結果ともほぼ一致したことがわかる。

輸送後

Delta 市輸送後にも同じテストを行い、輸送前と比較した。

図 4.15 と図 4.16 がその結果であり、1MIP peak 値は一番小さくとも 14.3 ± 0.1 p.e. だった。また輸送前と輸送後で 1MIP peak 値を比較するため図 4.13 と図 4.15 の値の比を取ったのが図 4.17 である。

縦軸は、同じシンチレータボックスで輸送後の 1MIP peak 値を輸送前の 1MIP peak 値で割ったものである。これが 1 であれば輸送前後で 1MIP peak 値が全く変わらなかったということだが、図 4.17 によると全体的には輸送後

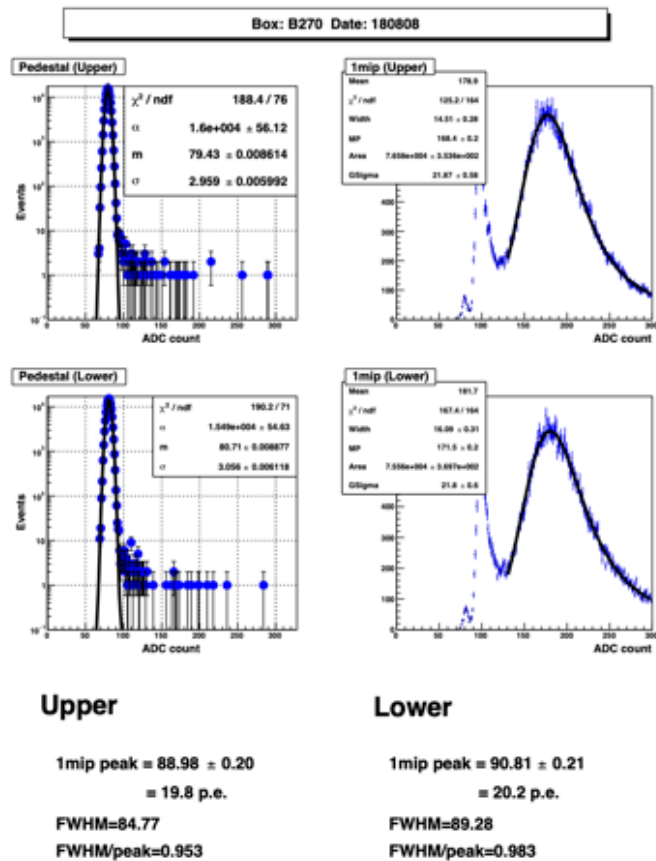


図 4.12: シンチレータボックス組み立て後の典型的な 1MIP peak 値測定結果。上の 2 つの図が upper の結果で、下の 2 つの図が Lower の結果である。左の 2 つの図は Upper と Lower のペデスタル分布で、右の 2 つの図はシンチレータの信号である。今回は各層に対し各 PMT が固定してあるため、印加電圧は固定でなくゲインが 5×10^6 となるようそれぞれ異なる値を設定した。

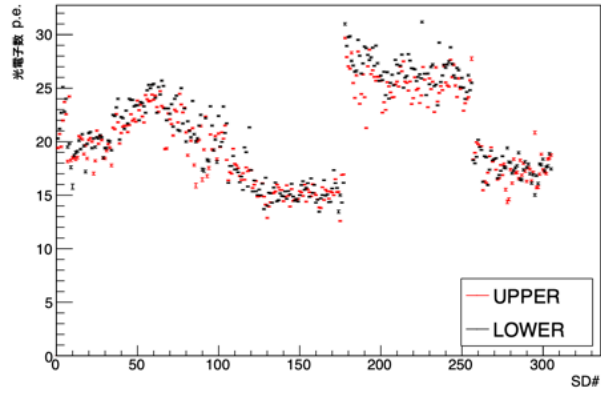


図 4.13: シンチレータボックス組み立て後の 1MIP peak 値を光電子数に変換したプロット。ほぼシンチレータの番号順に SD に組み込むため、図 4.8 と似た形のグラフになっている。

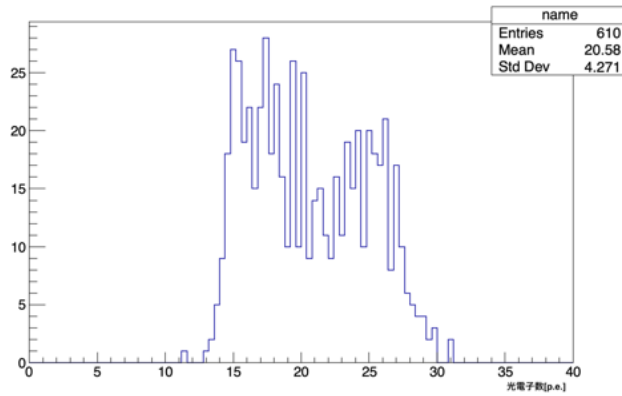


図 4.14: 日本及び韓国でシンチレータボックス組み立て後、米国への輸送前に測定した 1MIP peak 値

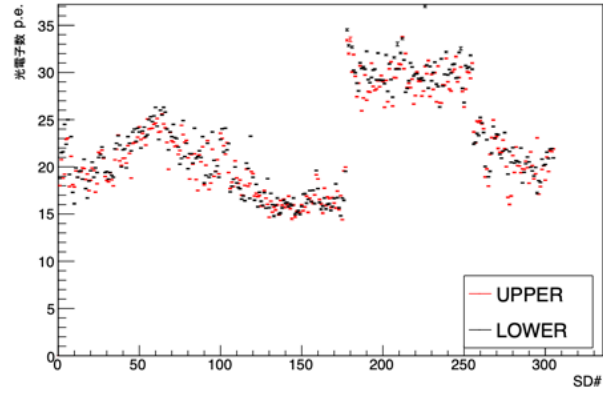


図 4.15: SD 製作順に並べた、輸送後の SD の 1MIP peak 値

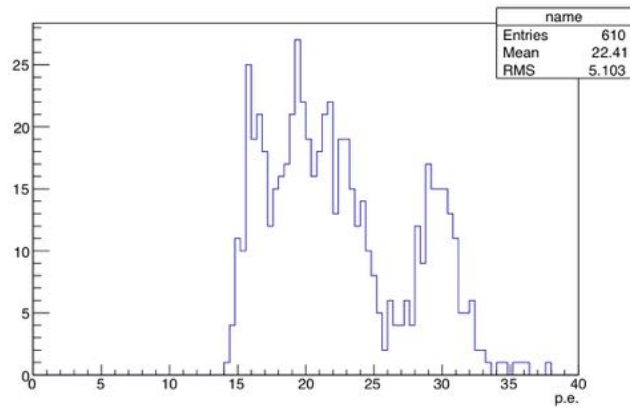


図 4.16: 輸送後の全シンチレータボックス (305 台 × 2 層 = 610 層分) の 1MIP peak 値をヒストグラムにしたもの。

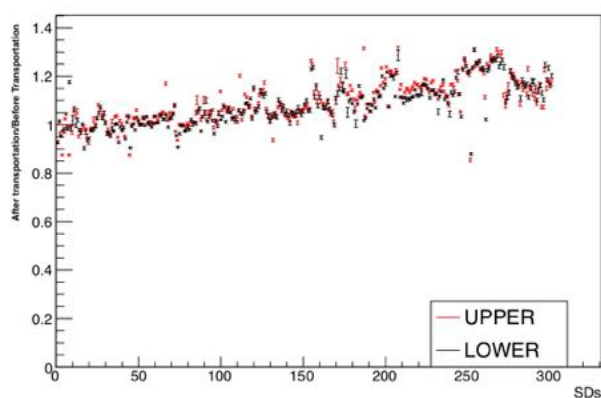


図 4.17: 輸送後の 1MIP peak 値を輸送前の 1MIP peak 値で割った値を SD ごとにプロットしたもの。赤色が上層で、黒色が下層の結果である。輸送後 Delta 市での測定は冬だったので 1 より大きくなる傾向にある。

に 1MIP peak 値が大きくなる傾向にあり、最大で 30%程度増加したのものもあった。シンチレータには温度が低いほど光量が大きくなる性質があることがわかっていて、実際に日本での測定は夏に、Delta 市での測定は冬に行われたためにその温度差によって 1MIP peak 値が増加したと考えられる。

そこで 1MIP peak 値測定時にモニタリングしているシンチレータボックス内の温度を用いて、温度差 $\times 1\%$ の補正を行ったのが図 4.18 である。なお参考文献 [16] によれば TA_{x4SD} のシンチレータ検出器にはおよそ $-1\%/C^{\circ}$ の温度依存性がある。シンチレータには温度差に対しおよそ 10%以内に収まるようになったが、#260 付近～#302 の SD の 1MIP peak 値は輸送前後で 10%以上と比較的大きな差があることがわかった。Delta 市での 1MIP peak 値測定は、屋外に保管してあるシンチレータボックスを架台にのせて屋内へ運び入れ、速やかに開始される。このとき室内は $15^{\circ}C \sim 20^{\circ}C$ 保たれているのに対し、外気の温度は日にもよるが $0^{\circ}C$ を下回ることもある。そのため測定の始めと終わりでもシンチレータの温度が変わってしまうので測定の前に温度を測ったか、後に測ったかといった作業上の違いでシンチレータの温度を正確に測れていないことが、輸送前後の光量差が測定時期によって異なる理由の一つと考えられる。

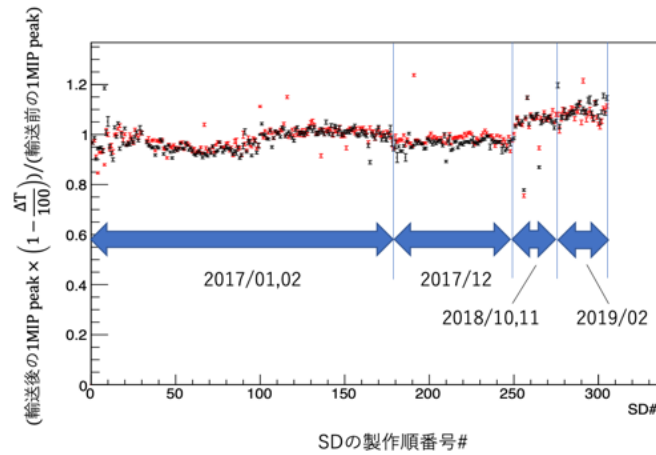


図 4.18: 図 4.17 の結果に温度差 $\times 1\%$ の補正をくわえた。また Delta 市での測定を行った時期ごとに区切った。

4.2 Linearity(線形性)

SD の重要な性質のひとつにダイナミックレンジがある。シンチレータの光量に対し FADC を通してデジタル変換した後の信号が比例した応答をすることをリニアリティがあるといい、どれだけの光量までリニアリティがあるかをダイナミックレンジと呼ぶ。サブエレクトロニクスのアナログ部分は ADC カウントで 4095 カウントまで線形に測定できる。PMT の出力のリニアリティを調べるために、PMT からの出力信号の電圧を 12bit、50MHz でサンプリングした値 (FADC Count) を $f(x)$ とし、シンチレータに取り付けた 2 つの独立な発光源 (LED) から入力される光子数 x_1, x_2 に対して式 4.4 が成り立つ $f(x_1 + x_2)$ の範囲を測定した。

$$f(x_1 + x_2) = f(x_1) + f(x_2) \quad (4.4)$$

これはシンチレータに複数のミュオンが入射した際にほぼ同時に複数箇所で発光が起きることに対応する。基本的にダイナミックレンジを超えた光量を受け取った場合は到来粒子数を正しく評価することが困難になるため、特にエネルギーの高い宇宙線が到来したときや、シャワー中心などでは重要となる。

4.2.1 測定

日本での 275 台、韓国での 30 台のシンチレータボックスの組み立てを行ったあと、リニアリティ測定を行った。シンチレータボックス内には上層・下層にそれぞれ 2 つずつシンチレータの側面 (1.2cm の厚さ側の面) LED を設

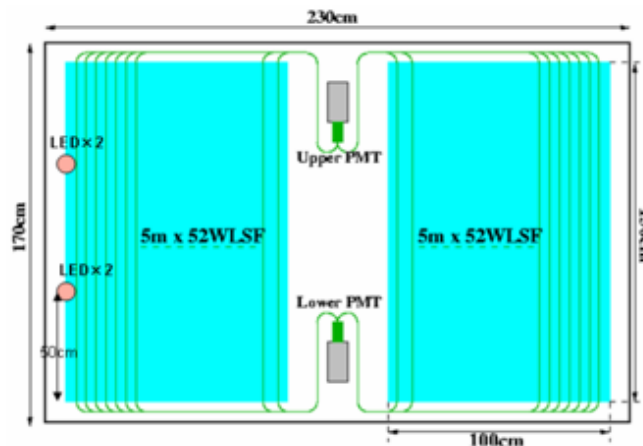


図 4.19: シンチレータボックス内の配置図。シンチレータを空色で、ファイバーを緑色で、PMT を灰色で示した。PMT に接触している緑色の四角形はクッキーを表す。シンチレータの端面に LED (ベージュ色の丸) を取り付けた。ファイバーの取り回しは TASD のものだが、TAx4SD でも LED の位置に変更はない。LEDx2 は、シンチレータの上層・下層ともに上から見てその位置に (側面に) 取り付けたことを意味する。なお、LED はタイバックシートの外側に取り付けた。

置して (図 4.19)、これらをあたかもシンチレーション光かのようにみなし¹、その光量を (3.1) の x_1, x_2 に対応させて変化させ、ダイナミックレンジの上限をはかることができる。なお LED にかける電圧が小さいと光量に誤差が大きいためリニアリティが正しく測定できないので、十分小さい x_1, x_2 に関しては PMT のリニアリティが成り立っていることを仮定する。2つの LED にかける電圧の一例を図 4.20 に示す。LED に印加する電圧は $5V \cdot 8\text{bit}$ (255 カウント) の DAC 電圧である。その結果を典型的な結果を図 4.21 に示す。横軸は PMT からの信号を FADC がデジタルに変換したあとの ADC カウント $f(x_1) + f(x_2)$ である。今回のテストではリニアリティの成り立っている度合いを量的に評価するため $f(x_1 + x_2)/(f(x_1) + f(x_2)) - 1$ という量を縦軸に設定した。FADC のサンプリングのレンジは 4095 カウントまでであるため、 $f(x_1) + f(x_2)$ のリニアリティは急激に悪くなる。PMT の性能としては 4095 カウントまでにどの程度リニアリティが保たれているかどうか重要であり、典型的な PMT の 4095 カウント付近まで測定を行った結果を図 4.22 に示す。これは TASD に用いられていた PMT の測定結果も同時に示してあり、4000 カウントまでに TASD の PMT はリニアリティが 10%程度低下しているが、TAx4SD の PMT は 1%程度しか落ちていない。

¹LED のパルス長は 400ns に設定してあり、空気シャワーによる光子の入射時間に似せてある。

LED1に入力する電圧のDAC値

	0	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
113	1	1	1																				
114	1	1	1	1																			
115	1		1	1	1																		
116	1			1	1	1																	
117	1				1	1	1																
118	1					1	1	1															
119	1						1	1	1														
120	1							1	1	1													
121	1								1	1	1												
122	1									1	1	1											
123	1										1	1	1										
124	1											1	1	1									
125	1												1	1	1								
126	1													1	1	1							
127	1														1	1	1						
128	1															1	1	1					
129	1																1	1	1				
130	1																	1	1	1			
131	1																		1	1	1		
132	1																			1	1	1	
133	1																				1	1	1

図 4.20: 左端と上端は 2 つの LED に入力する DAC 電圧のペアの一例を表す。測定前に見当をつけて DAC 電圧をかけ、出力が十分 saturate していることが確認できたらその時の DAC 値を上限とし、20 カウント遡った DAC 値を下限とする。1 が立っている DAC 値をそれぞれかけてゆく。DAC 値が y の時の光電子数を X_y とすると、この図の場合例えば $f(X_{121})$ 、 $f(X_{124})$ 、 $f(X_{121}) + f(X_{124})$ が測定されるため、 $f(X_{121} + X_{124}) / (f(X_{121}) + f(X_{124})) - 1$ を計算することができる。他のすべての組み合わせについてもこれを計算し、リニアリティ評価のための指標とする。

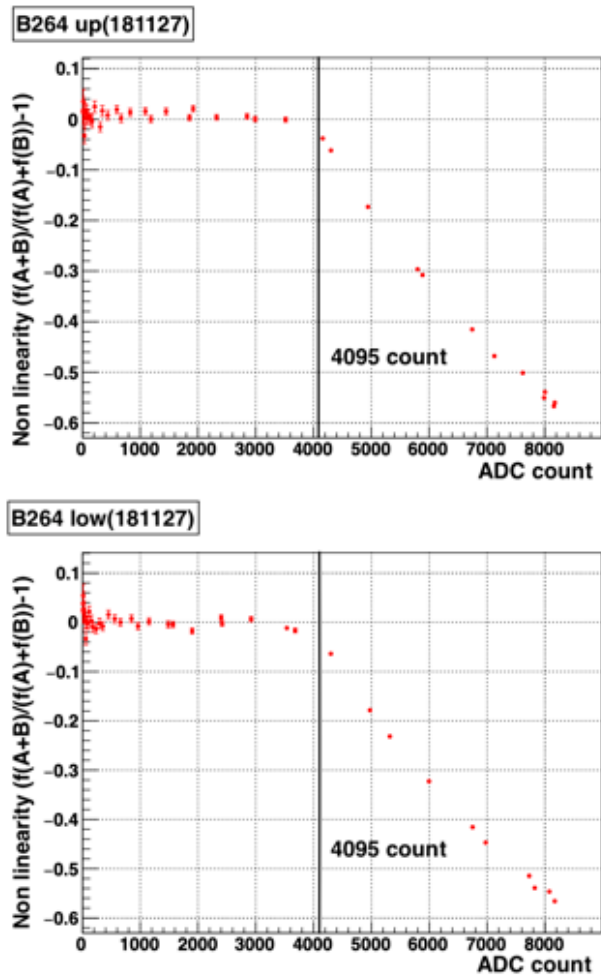


図 4.21: 典型的なリニアリティ測定の結果。上図と下図はそれぞれシンチレータボックス B264 の上層の PMT、下層の PMT のリニアリティの結果を示す。図 4.20 の 1 が立っている全てのペアについて測定を行い、プロットした。FADC は 4095 カウントで saturate するため、4095 カウント以降のリニアリティは PMT の性能と関係なく急激に低下する。

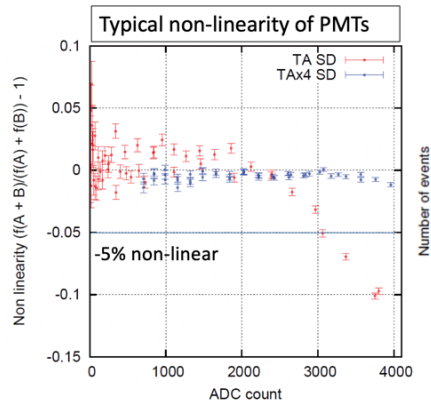


図 4.22: TAsD の PMT(Electron Tube 社製、9124SA)(赤色のデータ) と TAx4 の PMT(浜松ホトニクス社製 R6234)(青色のデータ) の典型的なリニアリティテスト結果。TAsD は FADC が saturate する 4095 カウントに到達する前に 10% 程度リニアリティが落ちているのに比べ、TAx4SD は 4000 カウント程度で 1% ほどの低下しか見られない。

米国での測定

米国ユタ州の Delta 市では輸送時の破損のチェックも兼ねて再度全ての SD についてリニアリティのテストを行った。全データのプロットを重ね書きしたのが図 4.23 である。また図 4.24 に示すのは、全層から 4095 カウントに最も近いプロットを取り出したヒストグラムである。FADC のレンジ内で SD は平均的に 4.5% 程度リニアリティが低下することがわかった。574 層分のデータのうち、4095 カウント以内にリニアリティが 5% 以上低下するのは 80 層/574 層 ~ 14% で、10% 以上低下するのは 4 層/574 層 ~ 0.7% だった。すなわち 86% 程度の SD は FADC のレンジ内で 5% 以上低下しなかった。ここで図 4.25 に TAsD のリニアリティが 5% 低下する電流値を示す。電流は 1 mA ~ 100 ADC count と変換されるため平均は 3000 カウント程度であり、TAx4SD ではリニアリティ性能が大きく向上したことがわかる。

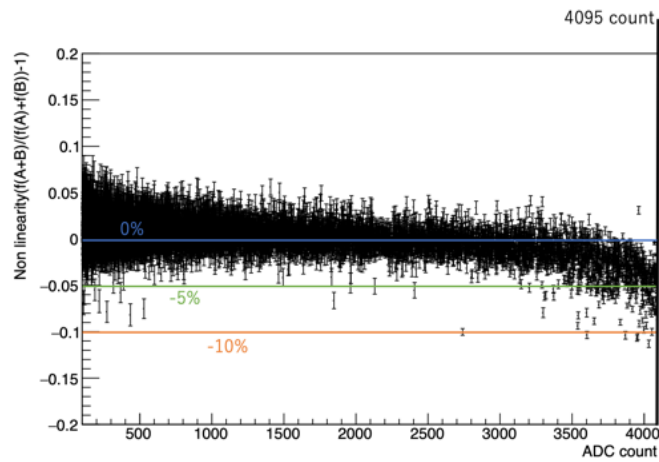


図 4.23: 米国に輸送後測定したリニアリティを全データ重ねたもの。横軸はFADCがsaturateする4095カウントまで表示してあり、典型的には5%程度リニアリティが低下することがわかった。

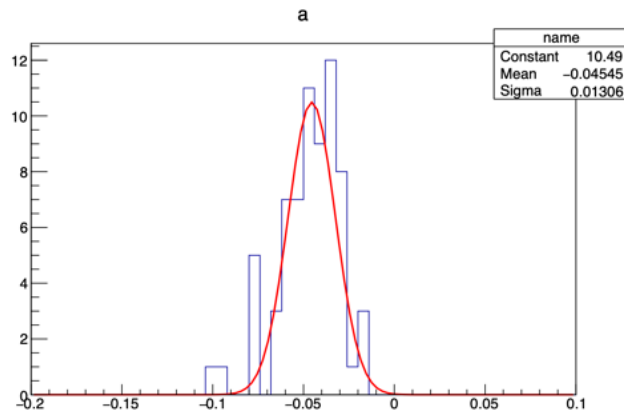


図 4.24: 4000 カウントから 4095 カウントのデータにおけるリニアリティの低下率。FADC の最大レンジ付近では平均 4.5%程度リニアリティが落ちていることがわかる。

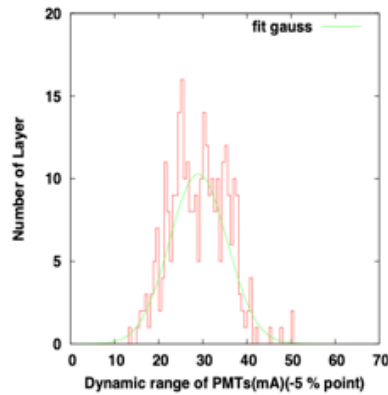


図 4.25: TASD のリニアリティが 5%低下する時に PMT に流れる電流のヒストグラム。平均値はおよそ 3000ADC Count である。なお 1 カウントに相当する電流 I は $I \sim (2V/4095)/(50\Omega) \sim 1mA$ である。[10]

4.3 Uniformity(一様性)

シンチレータは一枚が幅 25cm、長さが 150cm のものを上下それぞれ 8 枚ずつ用いて各層 $3 m^2$ の面積を占める。この面のどこを粒子が通るかで PMT の受け取る光量は変化する。シンチレータのどこが光ると 1MIP peak 値がどのくらい変化するか調べた。

4.3.1 測定

2017 年と 2018 年の夏、山梨県北杜市の宇宙線研究所明野観測所において 7 台の SD について、1MIP peak 値の位置依存性を調べた。15cm×15cm のシンチレータに直接 PMT を接した小型プローブを 8 個用意し、これと SD のシンチレータとのコインシデンスを取ることでその場所の 1MIP peak 値を測定した。今回はシンチレータの上で格子状に 8×4 の 32 箇所、上下層合わせると 64 点のデータを取得した。

その典型的な結果を図 4.27, 図 4.28 に示す。層ごとに 32 か所の 1MIP peak 値の平均値からのずれを色で示していて、上層と下層で位置によって 1MIP peak 値に偏りがあることがわかる。そこでこのカラープロットと図 4.29 を見比べると、PMT から遠い地点ほどファイバーの減衰の影響が大きく、1MIP peak 値が小さくなってしまふことが読み取れる。またシンチレータの端では発生した光子が外に逃げてしまいファイバーに伝わらない効果もあると考えられる。

次の図 4.30 に測定した 7 台 × 2 層分の測定結果のヒストグラムを示す。全データのうち 412/437~94%が ±10% 以内に収まった。



図 4.26: 作業風景。黒いシートの下に SD のシンチレーションカウンタがある。シートの上に 15cm×15cm のプローブが 8 個置いてある。

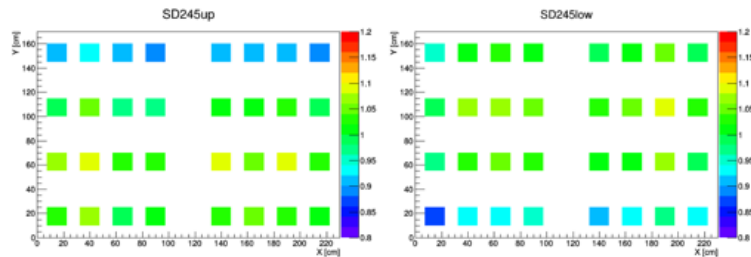


図 4.27: SD245 (左) 上層 (右) 下層の 1MIP peak 値の位置依存性の測定結果。8 個のプローブを SD の上層とコインシデンスさせる測定を場所をずらして 4 回行い、全部で 32 か所の測定を行う。中央には光電子増倍管を設置しているので、シンチレータはない。32 箇所の 1MIP peak 値を平均した値から何%ずれているかをカラープロットで示した。

また測定した 7 台のうち平均値からのずれは最大でも -19.6%、+19.2% であった。TASD の非一様性は最大 30% であった [16] ことと比較すると向上した。ところで 1MIP が入射した場合典型的な光電子数は 20p.e. 程度であるが、この光電子数はポアソン分布に従うためそのばらつきは $\sim \sqrt{20} \sim 4.5 = 22.5\%$ 程度と見積もられる。故に、シンチレータの入射位置による 1 粒子の信号のばらつきは光電子数のばらつきより小さく、シンチレータでの損失エネルギーを計算する際にランダウ分布にガウス分布を畳み込むことでこれらのばらつきもシミュレーションに反映できる。

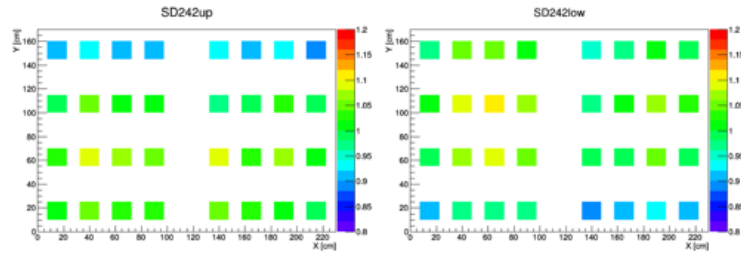


図 4.28: SD242 (左) 上層 (右) 下層の 1MIP peak 値の場所依存性の測定結果。

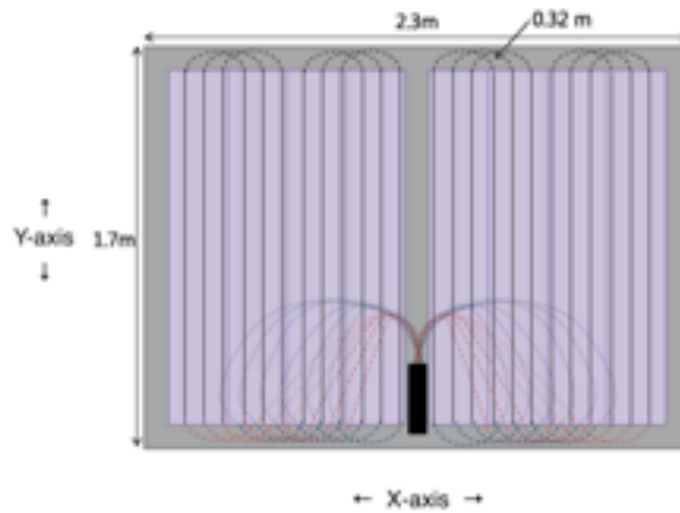


図 4.29: シンチレータボックス内のファイバーの取り回し。薄い紫色で示したのが上層のシンチレータである。ファイバーが集まっている黒い部分がPMTである。ファイバーの重なる部分が見やすいように赤と青の2色で示した。

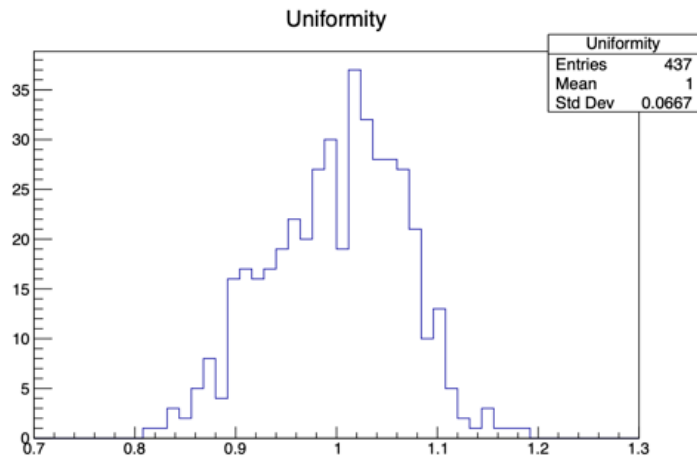


図 4.30: 各 SD・各層の 1MIP peak 値の平均値からのずれの分布。おおまかには 10%程度以内に収まっている。

4.4 GPS Timing

SD で記録するデータの時刻は GPS (Global Positioning System) のアンテナおよびレシーバーによって取得する。エレクトロニクス内に組み込む GPS レシーバーは個体ごとに異なるオフセットを持つため、これを補正するために測定を行った。TAx4 実験の前に始まった TALE 実験¹では i-Lotus 社製のシリアル番号が RD から始まる製品を使っていたが、これが生産中止になったため TAx4 では同じく i-Lotus 社製の後続製品でシリアル番号が RG から始まる製品を用いる。今回の測定では RD シリーズから基準となる GPS レシーバーとして RD4569 を選び、TAx4 に用いる RG シリーズ 281 個についてトリガータイミングの測定を行った。

4.4.1 測定

2017 年 8 月と 2018 年 8 月に山梨県明野観測所にて測定を行った。セットアップは図 4.31~4.33 の通りである。最大 5 台の SD エレクトロニクスに 1 つの GPS アンテナからの情報を送る。エレクトロニクスにはまた周波数が 0.45Hz のパルス波を入力し、そのトリガータイミングを読み取る。GPS 情報もパルス波の入力タイミングも同時刻のはずだが、各 GPS レシーバーの時計ごとに誤差があるため、読み取ったタイミングを基準とする GPS レシー

¹TA Low energy Extension 実験。TASD より密に (400m, 600m, 1200m 間隔の 3 段階) 並べられた 103 台の地表検出器と MDFD サイトに建設した低エネルギー用高仰角視野をもつ大気蛍光望遠鏡による宇宙線観測実験。 $\log_{10}(E/eV) = 16.0 \sim 18.5$ 程度の TA より低いエネルギー帯の宇宙線を精密に測定し、エネルギースペクトルをより正確に求めることなどを目的としている。望遠鏡ではこれまで $\log_{10}(E/eV) = 15.3$ までのスペクトルを測定した。

バーのものと比較することでオフセットや標準偏差の測定ができる。測定する GPS レシーバーと基準 GPS レシーバーがトリガーするタイミング差をある GPS レシーバーに対しておよそ 9 時間分記録した。図 4.34 にタイミング差を測定時間ごとにプロットし、図 4.35 にタイミング差の分布を示した。このヒストグラムをガウス分布でフィッティングし、その平均値をこの GPS レシーバーの基準レシーバーに対するオフセットとする。

これを TAx4 で使用する全ての GPS レシーバーで行った結果を図 4.36 に示す。横軸は RD4569 に対するトリガータイミングのオフセットである。赤と青は型番の違いで、RD(青)は TALE 実験で使われているもの、RG(赤)は TAx4 等で新しく使われるようになったものである。RD シリーズの測定は 2017 年に行ったが、同じく RD4569 を基準としているので比較のため表示した。RG シリーズがマイナス側にずれているのは RD シリーズから RG シリーズへの移行で内部パーツの変更があったためと考えられる。この図からわかるように TAx4SD に用いられる RG シリーズのオフセットのばらつきは $\sigma = 3.75\text{ns}$ で、SD の間隔が 2.08km であることを考慮すれば十分小さい。また 20ns 以上の比較的大きいタイミングオフセットを持つ GPS レシーバーは 3 つあったため、念のためこれらを省いたものを TAx4 で用いるエレクトロニクスに組み込んだ。

RG シリーズの GPS レシーバーの相対タイミングオフセットの標準偏差は図 4.37 である。平均は $14.89 \pm 0.354\text{ns}$ であるので、GPS レシーバー一個あたりの分解能は 10.5ns 程度であることがわかった。

基準 GPS レシーバー RD4569 について

基準として RD4569 を採用するために予備の試験などは行っていないが、次の 2 点から RD4569 のオフセットや標準偏差は典型的であり結果的に妥当であったと考えられる。

- 図 4.36 を見ると RD シリーズのオフセットの平均の分布はおよそ 0ns にピークをもつ。すなわち RD4569 のオフセットは RD シリーズの中で典型的であった。
- ある測定について図 4.39 に 4 つのヒストグラムを示す。この測定では RD4569 を基準とした 4 つの GPS に関するデータがあるが、これらの差分を取ることで基準 GPS の影響を除いたオフセットがそれぞれ示される。この 4 つのヒストグラムの標準偏差は図 4.37 の分布の平均に十分近く、基準 GPS レシーバーである RD4569 の標準偏差も典型的なものであることがわかった。



図 4.31: 屋上に設置した GPS アンテナ。フレームに乗せた 3 つの黒い色の GPS アンテナのうち、右のひとつのみ使用し、屋内の GPS Splitter で分割してサブ・ホストエレクトロニクスにそれぞれ接続した。

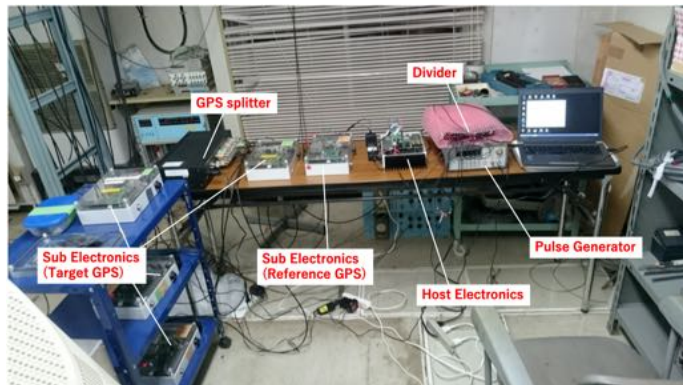


図 4.32: GPS Timing を測定したセットアップの写真。Divider をもちいて同時に複数のサブエレクトロニクスで測定する。

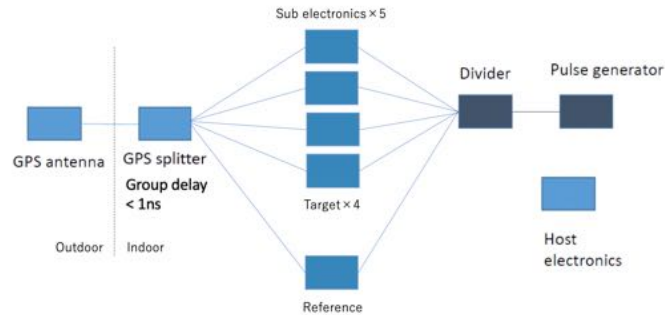


図 4.33: GPS Timing を測定したセットアップの模式図。アンテナからの信号とパルスジェネレータの信号を複数のエレクトロニクスに送信する。基準の GPS レシーバーに対し最大 4 つの GPS レシーバーについてトリガータイミングを測定する。GPS splitter の遅延はスペック値で 1ns 以下なので今回の測定でその影響は無視できる。今回の測定では通常の DAQ を行ってイベントのタイムスタンプを読むので、5 つのサブエレクトロニクスの取得データはホストエレクトロニクス (通常通信塔に設置されるもの) に無線通信で送られる。

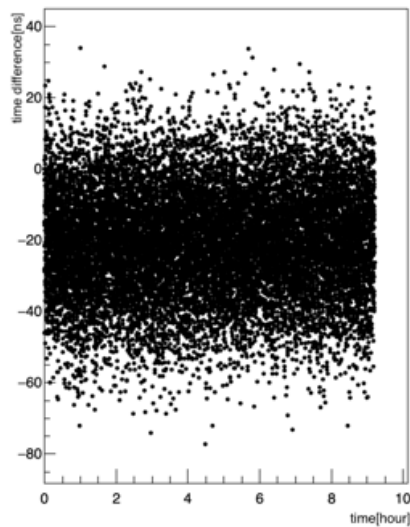


図 4.34: 基準 GPS レシーバーとのタイミング差分の時間変化。横軸は測定開始からの経過時間で、縦軸はトリガータイミングから基準 GPS レシーバートリガータイミングを引いた差分である。

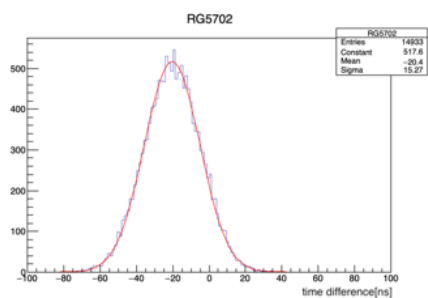


図 4.35: ある GPS Timing から基準 GPS Timing を引いた時間分布。図 4.34 をヒストグラムにしたもの。ある GPS に関して基準 GPS との相対的なオフセットとばらつきがわかる。

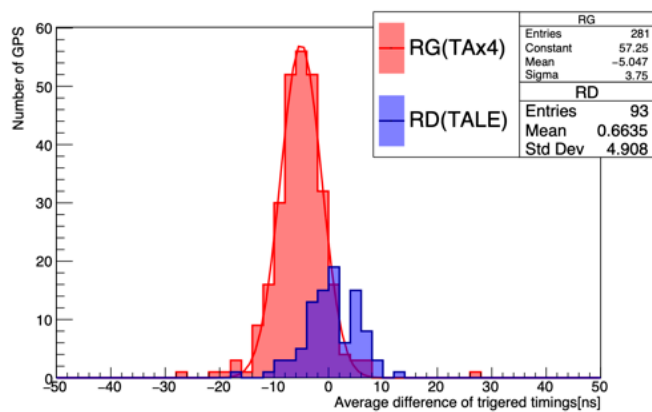


図 4.36: 全 GPS レシーバーのオフセットの平均値の分布。基準 GPS のタイミングに対するオフセットが-20ms より小さいもの2つと+側に大きくはずれている1つの合計3つはオフセットが大きすぎるとしてエレクトロニクスに使用するものから除いた。

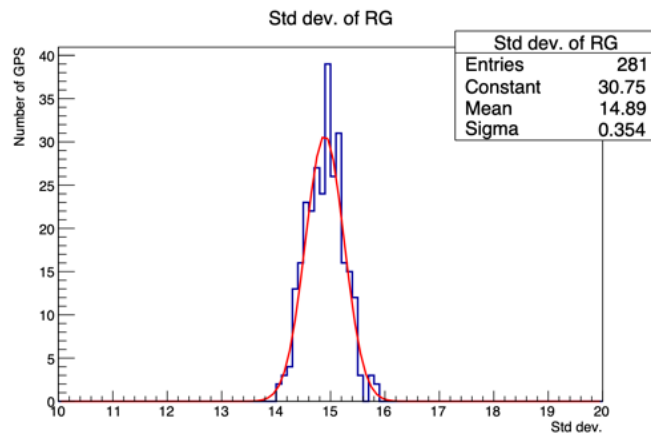


図 4.37: RG シリーズの全 GPS レシーバーの標準偏差をヒストグラムにしたもの。ガウス分布でフィッティングしたときこの分布から大きく外れる GPS レシーバーはなかったため、ばらつきの大きさが原因でエレクトロニクスへの使用を中止したものはない。

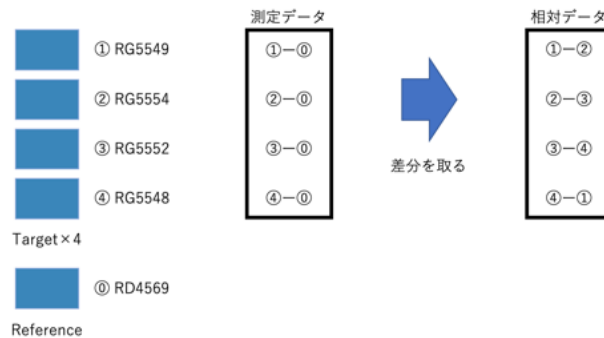


図 4.38: どの GPS レシーバーが他と違っているかを判断するためにどの組み合わせで差分を取ったかの説明。測定データは常に一つの GPS レシーバー (RD4569) を基準とするため、測定データのばらつきは RD4569 のばらつきに影響されてしまう。そのため測定データの各差分を取ることで RD4569 と無関係なヒストグラムを描くことができる。

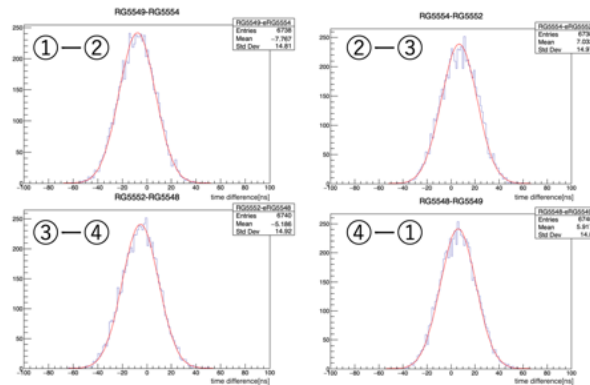


図 4.39: 図 4.38 の四つの組合せで求めた GPS レシーバーのタイミングの差分の分布。どの分布も図 4.37 の分布内に十分おさまっていることから、RD4569 のばらつきは特別大きくも小さくもない典型的なものと判断した。

4.5 CPU Check

2017年にTAx4用エレクトロニクスのためのメインボード製作が始まった。メインボード 300 枚の各素子の取り付けが完了し次第各部の電圧チェックやファームウェアの書き込みテストが行われた。その結果、300 枚中 47 枚のメインボードが起動せず、ファームウェアの書き込みができないトラブルが発生した。各部の詳細な電圧テストにより CPU(6417750S F167V) に問題があることがわかった。

そのため CPU を必要分新しく買い直し、2018 年秋以降その全てについて図 4.41 に示したテスト用メインボードを用いて事前にチェックを行った。このテスト用メインボードは CPU の取り付け位置に CPU 用のソケットがはんだ付けしてあるため、CPU を付けたり外したりすることができる。このテストではこの CPU を動かすテストファームウェアを ROM に書き込むことで CPU の動作テストを行う。テスト用のファームウェアはメインボードに外付けできる ROM(図 4.42) に書き込んであり、PC 端末からこのファームウェアを CPU のストレージに書き込むコマンドを送る。

CPU はまず 2018 年に 30 枚を新規購入し、これらについてのテストから開始した。この結果はじめは 7/30 しかチェックを通らなかったが、CPU ソケットの締めがあまいことがわかったため再チェックにより 25/30 がチェックに合格した。これらはエレクトロニクスに使用された。また残り 5 枚の不合格は取り扱い時に CPU のピンが折れてしまったり千切れてしまったりした物的破損によるものであり、チェックの際の CPU の取り扱い方法は改善する必要があるとわかった。

そこで CPU をソケットに付け外する際用いている吸着ピンセットを EN-PLAS 社製 HP-100 から HAKKO 社製 vacuum pick-up 394-01 へ変更した。



図 4.40: エレクトロニクスに組み込む前の CPU。写真のプレートに乗った状態から次の図 4.41 に示すテスト用ボードに吸着スポイトで載せる。



図 4.41: CPU チェック用メインボード。中央のソケットに CPU を置き、右の蓋を被せて締めるとピンが通電するように作られている。



図 4.42: メインボードに取り付けて使う外付け ROM。テスト用のファームウェアが書き込んである。



図 4.43: 変更前の吸着ピンセット (左上) と変更後の吸着ピンセット。

こちらは電池式なのでより安定して CPU を取り扱えるようになった。(図 4.43)

次に 2019 年夏に予備を兼ねて 50 枚の CPU を購入した。全ての CPU について同様のテストを行なったところ、50 枚全てがチェックに合格した。吸着ピンセットの変更により CPU の取り扱いが改善され、ピンの物的破損もほとんどなかった。

2019 年冬、TALE 実験拡張のために 120 枚の CPU について同様のテストを行なったところ、3 つの CPU に通電していない部分がある可能性があることがわかり、使用しなかった。

現在までに 200 枚のテストを行なったが 3 枚しか不良品が発見されなかったため、はじめに不良品が多く見つかったのはそれが偶然不良ロットであった可能性がある。

第5章 T ASD と T Ax4SD の 仕様と性能の違いのまとめ

本章では T ASD と T Ax4SD の仕様の違いをまとめる。PMT とファイバーおよびファイバー端を固定するクッキーの違い、また電源供給用のバッテリー収納 Cooler Box、ソーラーパネル、Reboot Timer、LVDM、およびデータの時刻記録用 GPS モジュールの違いを表 5.1、表 5.2 に示す。

その他、T Ax4SD に使用した SD エレクトロニクスやデータ収集システムは TALE SD のために開発されたものを使用しており、詳細については参考文献 [18] に記載されている。また長距離通信に関しては、TA について [9] に、T Ax4 について [19] に記載されている。

また、本論文で記述した SD の各性能について、T ASD と T Ax4SD の違いを表 5.3 にまとめた。

表 5.1: T ASD と T Ax4SD のシンチレータボックス内の仕様の違い (3.1 節)

	T ASD	T Ax4SD
PMT	Electron Tube:9124SA	浜松ホトニクス:R8619
ファイバー取り回し	図 2.6、図 3.4 左	図 3.3、図 3.4 右
ファイバー間隔	2cm(図 3.5 左)	4cm(図 3.5 右)
ファイバー長	1040m	341.6m
クッキー	透明 (図 3.2 左)	白 (図 3.2 右)
シンチレータボックスの高さ	100mm	66.2mm

表 5.3: T ASD と T Ax4SD の性能の違い

	T ASD	T Ax4SD
PMT の量子効率	約 10% [16]	約 20% [16]
1MIP peak の最低値	10p.e. 程度 [10]	14.3±0.1p.e.(4.1 節)
検出器の線形性	平均 2930±590count で -5% [10]	平均 4095count 程度で -4.5% (4.2 節)
検出器の一様性	最大 ±30% [16]	最大-19.6%、+19.2% (4.3 節)
GPS レシーバーの オフセットのばらつき	$\sigma = 2.8\text{ns}^1$ [20]	$\sigma = 3.75\text{ns}$ (4.4 節)
GPS レシーバーの トリガータイミングの 一台ごとのばらつき	$\sigma = 10\text{ns}$ 程度 ¹ [20]	$\sigma = 10.5\text{ns}$ 程度 (4.4 節)

¹ T ASD 用 GPS レシーバーのうち 17 個について抜き出して試験した結果



図 5.1: TAx4SD のシンチレータボックス部を横から見た写真。シンチレータボックスに屋根を取り付けると横に隙間ができ野鳥が入りこんでしまうため、金属製の板とメッシュを取り付けた。



図 5.2: 新しく使われた Reboot Timer(オムロン社製 ZEN-10C3DR-D-V2)

表 5.2: その他各部の仕様の違い

	TASD	TAx4SD
Bird Spike	無し	プラスチック製
Bird Plate	無し	メッシュのもの (図 5.1)
Cooler Box	DAIWA:GU1600	DAIWA:RX GU 1800X
Solar Panel	京セラ:KC120J	京セラ:KD145SX-UFU /DASOL:DS-A18-135
Reboot Timer	無し (一部 CN101A)	omron:ZEN-10C3DR-D-V2 (図 5.2)
LVDM(第 6 章)	無し	CZH-LABS:D1077(図 5.3)
GPS module	MOTOROLA:HAWK /Synergy Systems:AR-10N	Synergy Systems:ANT-15S



図 5.3: TAx4SD で新しく使われた Low Voltage Disconnect Module(LVDM)。disconnect と reconnect の電圧を選ぶスイッチがある。

第6章 米国でのSDの組み立ておよび設置

Delta市でのSDの組み立て作業は2017年ごろから始まり、257台のTAx4SDの設置作業は2019年2月と3月に行った。ここではその過程について記述する。

2016年5月と2017年1月から2018年12月まで

この期間は山梨県にある明野観測所で組み立てられたシンチレータボックスと米国で製作する架台以外のSD部品が日本からアメリカへ海上輸送され、現地での組み立てを行うフェーズであった。組み立ては、米国の業者によって製作された架台の上に、ソーラーパネルの取り付け、シンチレータボックスの取り付け、ステンレスボックスの取り付けを行った後、SDの故障がないか確認するテストを行った。問題がなければエレクトロニクスとバッテリーをステンレスボックスの中に設置し、シンチレータボックスとの配線を行って完了となる。SDの組み立てはCRCで行い、完成したSDはCRCの隣にある土地に並べて保管した(図6.3)。各SDを設置する予定の座標をもとに、2017年6月に四輪バギーカー(全地形対応車)で、また2017年8月にはヘリコプターで下見し、地形などの理由で設置が困難とされる時は付近の平らな場所を設置候補座標として杭を打つ作業も行った。なお各段階で現地の業者や派遣会社から派遣された作業者の補助を得て作業を行った。

バッテリーの故障

上述の作業を2017年1月、2月に行ったのち、2017年11月ごろその全てのバッテリーが電圧降下により故障したことがわかった。エレクトロニクスは電源を切っていたため電力を消費しないが、通信障害の復旧を目的に取り付けられたReboot Timerは電源を切っても少しずつ電力を消費したことが原因であった。これを防ぐため①組み立ての際にはまだバッテリーに接続せず、実験サイトに設置する直前に接続する②LVDM(Low Voltage Disconnect Module)を回路に組み込み、何らかの理由でバッテリーが故障しうる電圧(およそ10V以下)に下がる前に自動でReboot Timerやエレクトロニクスの電源を切断するようにした。

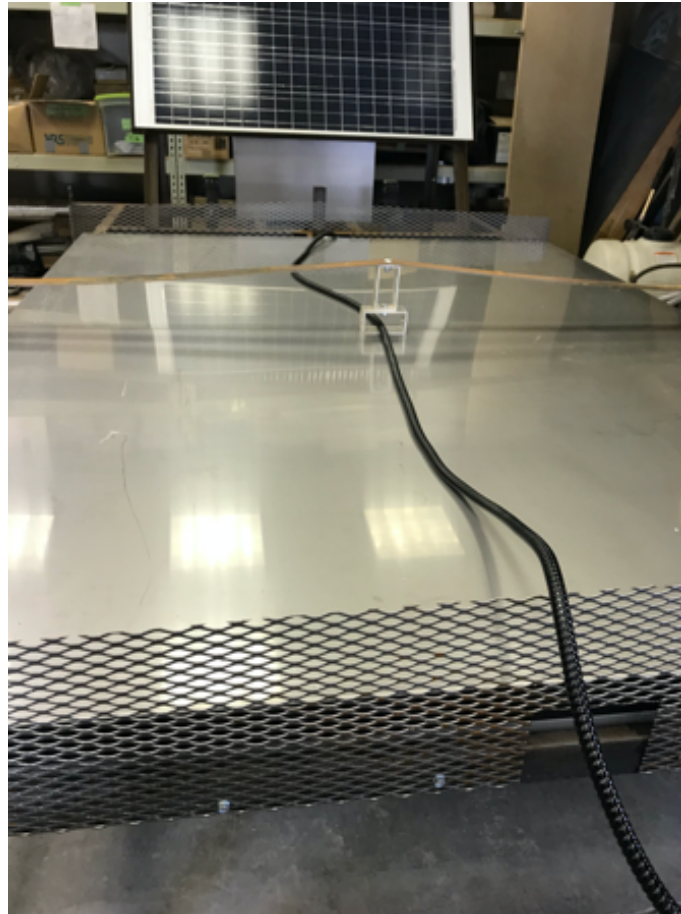


図 6.1: シンチレータボックスを架台に取り付けているところ。この後金属製の屋根をかける。シンチレータの上蓋の中央に置かれた黒いチューブの中に GPS アンテナのケーブルを通す。GPS レシーバーは屋根の端に固定する。



図 6.2: クーラーボックス内の配線。バッテリーには Reboot Timer、LVDM、スイッチボードが接続される。Reboot Timer は UTC で火曜日の 18 時に作動するように設定した。LVDM は 10.7V で Disconnect、11.4V で Reconnect するよう設定した。スイッチボードはエレクトロニクス側に接続されていて、バッテリーからの電力の ON/OFF が切り替えられる。また故障を防ぐためバッテリーの端子には SA 移動直前まで導線の接続を行わず、テープで覆った。



図 6.3: CRC の東側の土地。左奥に見える白みがかっている建物が CRC で、手前には 2017 年 2 月 10 日の時点で 173 台の SD が保管されている。

2019年2月

SDの組み立てがおおよそ終わると、実験サイトに合計数十か所設けられたステージングエリア (Staging Area, SA) へ輸送が行われた。輸送には、一度に6台のSDを積載できる大型トレーラーが2台用いられた。各SDには既に最終的に設置される場所が決められており、最寄りのSAに輸送された。この移動はシンチレータボックスにとって唯一の陸上輸送であり、舗装されていない道路を通ることもあるために最も振動による故障リスクが大きい。また降雪の影響でオフロードの路面がぬかるみ、移動・休憩用に用意されたトレーラーハウスがスタックするなど、作業上のトラブルが多いフェイズとなった。SAでは各SDの故障チェックとして再び1MIP peak値測定が行われた。北側のSAに輸送された130台のSDのうち3台について正常な1MIP peak値が確認できなかった。トラック輸送時のPMTの破損が原因であったため、CRCで修理が行われた。またエレクトロニクスに関しては起動できないなどのトラブルも数か所で発生した。これは予備のエレクトロニクスとの交換で対応したが、今後も多発するようであれば原因を突き止める必要がある。また通信用アンテナとアンテナポールはSAで取り付けが行われたのち、通信テストとエレクトロニクスにインストールした通信用ファームウェアのテストをかねて、ラズベリーパイコンピュータとネットワーク中継用の無線LANルータを用いてpingコマンドによる接続チェックを行なった(図6.5)。北側のSAへの移動が完了すると設置作業が始まるが、これと並行して南側のSAへの移動も行われた。127台のSDのうち、3台のSDのPMTが破損した。

アンテナポールの取り付け位置

SDの通信用アンテナポールはソーラーパネルの脇に取り付けられるが、TASDのこれまでの観測ではアンテナに野鳥がとまり、糞でソーラーパネル覆われて太陽光が遮られることでバッテリーに充電されないトラブルが頻発した。そのためTAx4SDではアンテナの位置を最適化することでこの被害を減らす工夫をした。図6.6に、4か所のアンテナ取り付け位置を示す。SDから見て通信塔がどの方角にあるかによって、アンテナのセンターフィードがSDの外側に向くよう4か所の取り付け位置から決定する。これによって野鳥がアンテナのリフレクターやセンターフィードに止まっても糞がソーラーパネルに落ちにくくなる。

SAへの移動の遅延

SAを含む実験サイトはユタ州の土地管理局 (Bureau of Land Management, BLM) の管理下にあるため、SAへの移動以降のフェイズには細かく申



図 6.4: SD を SA へ移動した作業の写真。(左上)SD をトレーラーで運んで SA へ向かっているところ。(右上) クレーンを用いて SA に到着した SD を下ろしているところ。(左下)SA への仮置きが完了した SD。(右下) 故障がないかテストを行ったのち各 SD にアンテナを取り付けた。

請と許可が必要になる¹が、2018 年 12 月 21 日ごろに始まったアメリカ政府機関の一部閉鎖の影響で BLM との交渉も停止した。計画では 2019 年 1 月に SA への移動は始まる予定だったが、閉鎖が解除される 2 月半ばまで SD の SA への移動の開始が遅延することになった。

2019 年 2 月、3 月

各 SA に輸送が完了した SD は、ヘリコプターによって一台ずつ決められた座標へ運び、設置した。1 日に輸送可能な SD ははじめ 10 数台程度であったが、軌道に乗ると 30~40 台のペースで移送・設置できた。また同時並行で通信塔の建設も行われた。各 SD の通信用アンテナの方向調整は通信塔建設の完了した 3 月に行われた。この時期までに配置の完了した SD は図 6.9、図 6.10 で示された合計 257 台である。

¹BLM からの許可を必要とした主な項目は、SD の SA への移動の開始日、通信塔の建設の開始日、ヘリコプターによる SD の設置であった。また 3 月から 8 月まで鳥の保護期間で原則ヘリコプター作業ができないが、特別に許可を得て鳥の巣の場所を注意深く確認しつつ設置を行った。

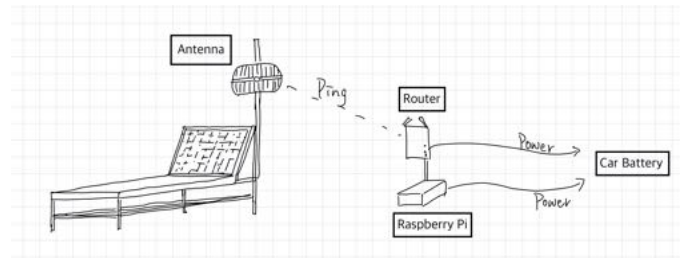


図 6.5: SA における SD の通信テストの模式図。電気の通っていない場所なので、車のバッテリーから電源を取った。

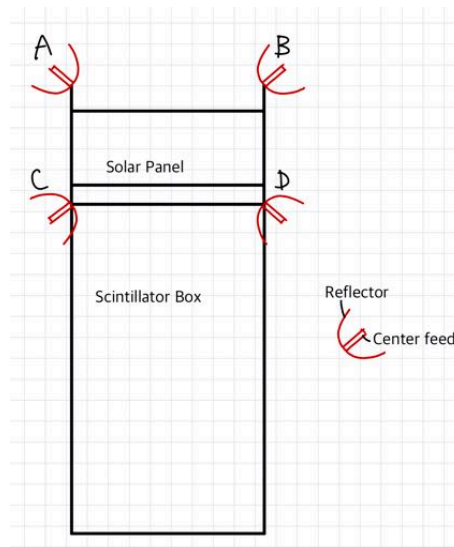


図 6.6: SD のアンテナの取り付け位置の候補を示した図。SD から見て通信塔がある方向にアンテナを向けた時、アンテナが SD の外側に向くような位置にアンテナポールを取り付ける。



図 6.7: SA に仮置きした SD はヘリコプターによって指定された座標の設置場所まで運ばれる。



図 6.8: 別のヘリコプターで向かった数名が先に設置地点で待機しており、下ろした SD を決められた地点に固定する。

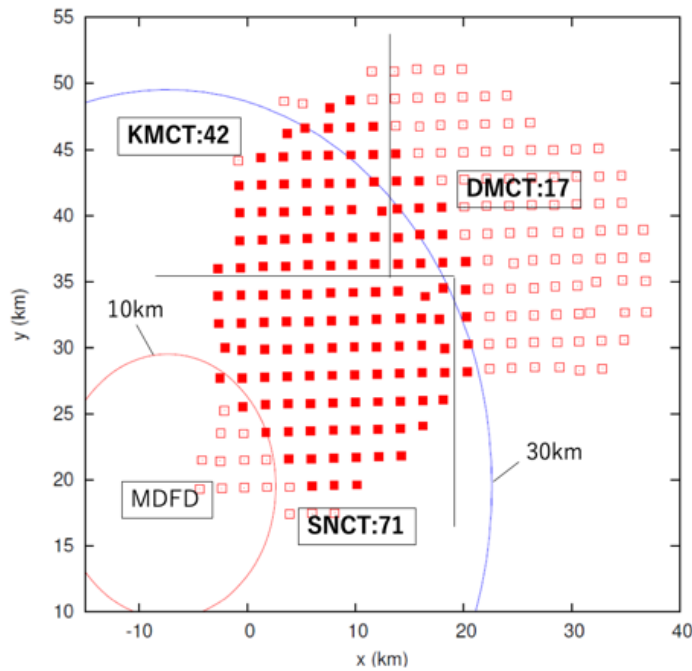


図 6.9: 北側アレイの配置。配置済みの SD130 台を赤で塗りつぶした四角印で示し、未設置の SD を塗りつぶしていない四角印で示した。

2019 年 4 月以降

4 月に DAQ を開始して以来通信塔との通信に関するトラブルが発生していたが、プログラムコードの対応する部分の書き換えや通信塔に設置されているハードウェアの交換で解決された。またエレクトロニクスの故障トラブルも、スペアのエレクトロニクスとの交換で解決された。そのほか個々のトラブルが様々あるために DAQ リストに入れる SD の数は日々変動しているものの、2019 年 12 月に同時に 248 台/257 台で DAQ を行っている。他に 4 台、以前は稼働していたものもある。2019 年 5 月から 8 月までの 104 日間、KMCT 領域に設置して DAQ に参加した 46 台の SD(検出面積に換算すると約 182km^2) の取得データに関して再構成を行った結果、最高エネルギー宇宙線の候補である 57EeV 以上の宇宙線は 4 イベント観測された。図 6.11 にそのうちの 1 つのイベントを示す [21]。

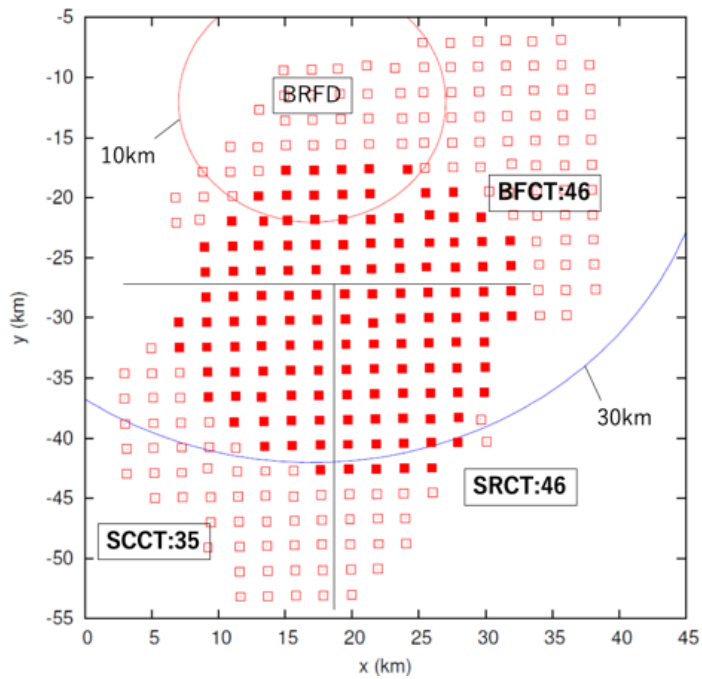


図 6.10: 南側アレイの配置。配置済みのSD127台を赤で塗りつぶした四角印で示し、未設置のSDを塗りつぶしていない四角印で示した。

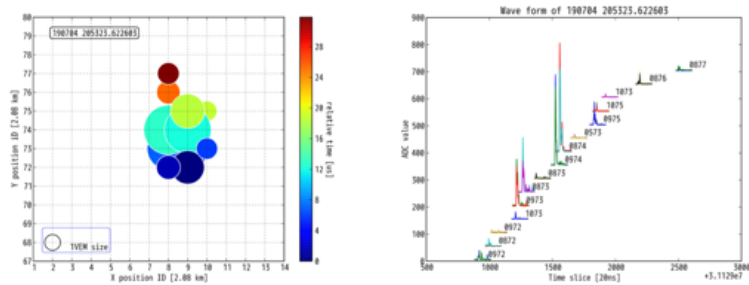


図 6.11: TAx4SD で取得した超高エネルギー宇宙線データの例。(左) 空気シャワーの footprint。各SDの信号の強さは円の大きさ、時間は色で示してある。(右) 各SDの波形情報。

第7章 まとめ

米国ユタ州で稼働しているテレスコープアレイ (TA) 実験は最高エネルギー宇宙線の起源を解明することを主目的とする。最高エネルギー宇宙線の空気シャワーを観測するために米国ユタ州の荒野に 507 台のプラスチックシンチレータで約 700km^2 をカバーする地表検出器 (SD) 群とそれを見込むように 3 か所に大気蛍光望遠鏡を建設し稼働中である。TA 実験では 11 年間で 57EeV 以上の超高エネルギー宇宙線を 168 イベント観測した。また $10^{18.2}\text{eV}$ 以上の宇宙線のデータ解析によれば、エネルギースペクトルには $19.81 \pm 0.03 \log_{10}(E/\text{eV})$ にカットオフがあることを観測し、GZK 限界に矛盾しない結果となった。さらに赤経 144.3° 、赤緯 40.3° の方向に事前確率が 5.1σ 、事後確率が 2.9σ の有意度を持つホットスポット (異方性) があることも分かった。これらの結果を受け、短期間で多くのデータを取得して確証を掴むために有効検出面積を最終的に 4 倍に拡張することを目指す TAx4 実験が 2019 年 4 月に稼働を開始した。本論文では TAx4SD の製作段階における性能評価、また現地での設置作業について記述した。

超高エネルギー宇宙線のエネルギーを決めるためには、空気シャワーから何粒子 SD を通過したかが重要である。そのために通常の宇宙線を用いて 1 粒子当たりの SD からの平均の光量 (1MIP peak 値) を SD ごとに測定した。シンチレータボックス本体は日本 (30 台は韓国) で組み立てたので、米国への輸送前後でこの測定を行って健全性を確認した。この過程で、組み込む前の 50 枚ごとのシンチレータの光量測定をもとに、シンチレータ 50 枚 (SD 約 3 台分) を光量不足と判断し除いた。

全ての SD の PMT についてリニアリティ測定を行い、4095ADC count でのリニアリティが -5% を下回る PMT が 80 本あった。4095ADC count 以下で -5% を下回る PMT に対しては、リニアリティからずれる ADC count 以上の値を持つ場合には使用しないなどの取り扱いをする必要がある。

シンチレータ上での一様性 (場所によって光量が違わないかどうかの性質) は 7 台の SD について、ひとつの層につき 32 か所の 1MIP peak 値測定を行った。PMT からの距離によって平均値の最大 -19.6%、+19.2% 程度光量が変化した。平均的なずれは $\pm 10\%$ 程度であった。TASD では最大 $\pm 30\%$ のずれがあったことと比較して、一様性は向上した。また、これはたとえば PMT の光電面での光電子数がポアソン分布の広がりを持つとすると $\pm 20\%$ 程度のばらつきがあることを考慮すれば、突出して大きい影響はもたらさないと考える

ことができる。

GPS は TA_x4 のエレクトロニクスに取り付けられるレーザー 281 個についてトリガータイミングの分解能とオフセットを測定した。GPS 一個あたりのタイミングの分解能は 10.5ns 程度で、オフセットのばらつきは $\sigma = 3.75\text{ns}$ であった。各オフセットはデータの時間補正に利用される。これは基準 GPS レーザーを基にした相対的な補正であり絶対的な補正ではないが、各 SD のデータのタイムスタンプを同期するという意味では十分である。

2016 年 5 月～2019 年春 3 月まで数回に分けてユタ州 Delta 市における SD のアセンブリ作業、サイトへの設置作業が行われた。SD は新たに 55 台のアセンブリをしたのち既に保管してあったものを含む 234 台の SD についてエレクトロニクス・バッテリーを含む電子部品の取付をステンレスボックスに行った。これらの SD と TALESD サイトに試験用に設置していた TA_x4SD の転用で 23 台、合計 257 台がサイトに設置された。

設置された 257 台の SD のうち、これまで最多で同時に 248 台でデータ収集が行われた。また通信塔の一つ KMCT がデータ収集を担当する領域に注目し、2019 年 5 月 1 日～8 月 24 日の 104 日間 (8 月 6 日～8 月 24 日はデータ取得できなかったのを除いた) に稼働していた 46 台の SD で 57EeV 以上の超高エネルギー宇宙線を 4 事象観測した。

謝辞

本論文を執筆するにあたり、数多くの助言をくださった佐川宏行教授に深く感謝いたします。また木戸英治特任助教には日米での研究を行う上で特に手厚いご指導をいただきました。深く感謝いたします。野中敏幸助教、川田和正助教、さこ隆志准教授には研究を行う上で非常に貴重なご指導やご意見頂きました。深く感謝致します。技能補佐員の関野幸市氏には実験の補助をしていただいたほか、米国での作業では数多くのご指導をいただきました。深く感謝致します。事務補佐員の木次敦子様、井戸村貴子様には、旅費の申請など事務手続き等でお世話になりました。ありがとうございました。なお、本研究は日本学術振興会の科学研究費助成事業 特別推進研究 (平成 27 年度 平成 31 年度「拡張テレスコープアレイ実験 - 最高エネルギー宇宙線で解明する近傍極限宇宙」、課題番号 15H05693、研究代表者佐川宏行) および東京大学宇宙線研究所共同利用研究などの支援を得て遂行しました。

参考文献

- [1] S. P. Swordy, “The Energy Spectra and Anisotropies of Cosmic Rays”, *Space Science Reviews*, Vol. 99, No. 1, pp. 85–94, 2001.
- [2] G. T. Zatsepin and V. A. Kuzmin, “Upper Limit of the Spectrum of Cosmic Rays”, *JETP Lett*, Vol. 4, p. 78, 1966.
- [3] K. Greisen, “End to the Cosmic-Ray Spectrum?”, *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 16, pp. 748–750, 1966.
- [4] S. Yoshida and M. Teshima, “Energy Spectrum of Ultra-High Energy Cosmic Rays with Extra-Galactic Origin”, *Progress of Theoretical Physics*, Vol. 89, No. 4, pp. 833–845, 1993.
- [5] M. Takeda et al., “Extension of the Cosmic-Ray Energy Spectrum beyond the Predicted Greisen-Zatsepin-Kuz’min Cutoff”, *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 81, pp. 1163–1166, 1998.
- [6] Graciela B. Gelmini, “High energy cosmic rays”, *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 171, p. 012012, 2009.
- [7] M. S. Longair, *High energy astrophysics*, Cambridge University Press, 2010.
- [8] 井上一, 小山勝二, 高橋忠幸, 水本好彦, 現代の天文学 17 宇宙の観測 (3) 高エネルギー天文学, 日本評論社, 2008.
- [9] T. Abu-Zayyad et al. (Telescope Array Collaboration), “The surface detector array of the Telescope Array experiment”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, Vol. 689, pp. 87–97, 2012.
- [10] 木戸英治, テレスコープアレイ実験による極高エネルギー宇宙線観測のための大規模地表検出器の開発, Master’s thesis, 東京大学, 2007.
- [11] クラレ社, Plastic scintillating fibers カタログ.
- [12] S. Ogio, Icrc 2019 presentation.

- [13] Abbasi R. et al. (Telescope Array Collaboration), “Evidence for Declination Dependence of Ultrahigh Energy Cosmic Ray Spectrum in the Northern Hemisphere”, 2018.
- [14] K.Kawata, Internal discussion.
- [15] Eiji Kido, “The TAx4 experiment”, 2016, “Proceedings of 2016 International Conference on Ultra-High Energy Cosmic Rays (UHECR2016)”.
- [16] 齊藤公紀, 拡張テレスコープアレイ実験のための最高エネルギー宇宙線観測用地表粒子検出器の開発, Master’s thesis, 東京大学, 2017.
- [17] Beringer J. et al., “Review of Particle Physics”, *Phys. Rev. D*, Vol. 86, p. 010001, 2012.
- [18] 佐原涼介, Tale 実験地表検出器のための新規データ収集システムの開発とその運用, Master’s thesis, 大阪市立大学, 2018.
- [19] T. Nonaka et al., “Long distance network link for TAx4 expansion”, Pos(ICRC2019)372.
- [20] E.Kido, Internal discussion.
- [21] Hyomin Jeong, Internal discussion.