

甲南大学大学院
自然科学研究科
物理学専攻
修士論文
No.360

次世代超高エネルギーガンマ線天文台 CTA における
大口径望遠鏡のカメラの開発

2014年2月21日

佐々木 浩人

甲南大学大学院自然科学研究科

概要

現在、TeV 領域のガンマ線観測を率いてきた H. E. S. S. と MAGIC の 2 グループが中心となって、次世代地上高エネルギーガンマ線天文台 CTA (Cherenkov Telescope Array) を建設する計画が進められている。CTA は現行の地上ガンマ線望遠鏡より 10 倍の感度と 3 倍の角度分解能を実現し、20GeV から 100TeV を超える帯域で全天観測をすることができる。CTA が稼動することにより、1000 以上の TeV ガンマ線が新たに発見され、高エネルギー現象に関する研究が発展すると期待されている。日本のグループは口径の違う三種類の望遠鏡のうち、最も低エネルギー側の 20GeV から 1TeV に感度を持つ大口径望遠鏡のカメラの開発に携わっている。大口径望遠鏡のカメラは 1855 画素の検出器と 265 個の読み出し回路で構成されている。これらはクラスターを形成し、アルミで出来た二枚の冷却板に固定される。この冷却板は構造を支える役割も兼ねている。冷却板にはクラスターが差し込まれる穴と、冷却水が通るための穴が開けられている。冷却板に穴を開けること冷却板の強度にどれほど影響があるのか、評価をしなければならない。評価は想定される使用環境を考慮しなければならない。CTA は数秒から数十秒の間にその膨大なエネルギーを開放してしまう、ガンマ線バーストを観測対象としている。このため、CTA-LST は 180deg/20sec という高速な動作で自身の向く方向を変えることができる能力を持っている。このことから、カメラの構造を支える役割のある冷却板は 3G 環境下でも変位の少ない、強度の高いものでなくてはならないという要請がある。この冷却板の強度が足りなければ、ガンマ線バーストの研究を満足に行えなくなってしまう。今回、我々は Autodesk 社の 3DCAD ソフトを使って冷却板の 3DCAD ファイルを作成し、冷却板の構造解析を行った。結論としてカメラ内部が、想定される 3G の加速を受けていたとしても、穴のスケール程度に注目すると冷却板は 0.5mm 程度の変位しか生じないことを確かめた。この結果を元に強度の部分補強や、重量の軽量化などの更なる議論を進める必要がある。一方、我々はクラスターに取り付けるフレームの作成も行った。フレームはクラスターと冷却板を固定する金具を含めて構成される。そしてクラスターは冷却板に固定する際、クラスターの後ろ側に取り付けた引出棒によって冷却板の穴に引き込まれる。フレームはこの構想を実現するようにも作られている。フレームの作成の結果として、フレームの試作品が完成するまでに至った。今回のフレームの作成により、固定が困難な箇所などいくつかの問題点が明らかとなった。今回の試作で得た結果は次のバージョンに反映される。本論文では、これら二つの研究について報告をする。

目次

1 高エネルギーガンマ線天文学

1-1 高エネルギーガンマ線天文学の現状

1-2 ガンマ線のが生成される機構

1-2-1 制動輻射

1-2-2 シンクロトロン輻射

1-2-3 逆コンプトン効果

1-2-4 π^0 崩壊

1-2-5 対消滅

2 地上ガンマ線天文台

2-1 チェレンコフ望遠鏡

2-2 イメージングチェレンコフ技術

2-3 チェレンコフ光の生成機構

2-3-1 電磁カスケードシャワー

2-3-2 電子対創生

2-3-2 チェレンコフ輻射

3 CTA(Cherenkov Telescope Array)

3-1 観測する天体と貢献するサイエンス

3-2 CTA 大口径望遠鏡(CTA-LST)

4 研究

4-1 冷却板の構造解析

4-1-1 冷却板

4-1-2 構造解析の原理

4-1-3 構造解析の結果

4-1-4 構造解析の考察

4-2 フレームの作成

4-2-1 フレームの仕様

4-2-2 3DCAD ファイルの作成

4-2-3 図面ファイルの作成

4-2-4 フレームの試作

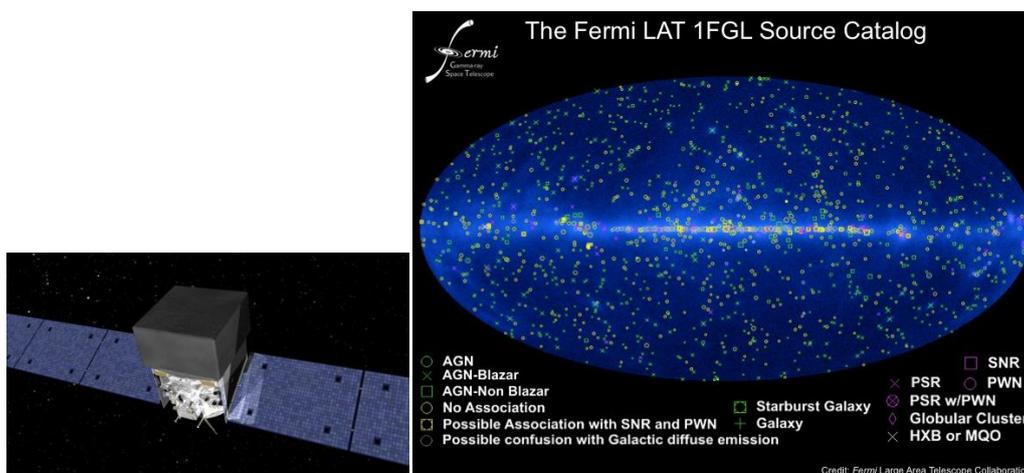
5 まとめ

1 高エネルギーガンマ線天文学

この章では始めに、高エネルギーガンマ線天文学において、次世代を牽引する超高エネルギーガンマ線天文台 CTA(Cherenkov Telescope Array)を建設する機運が高まっていることについて触れる。次に、高エネルギーガンマ線天文学が研究対象とするガンマ線がどのような機構で生成されるかについて触れる。

1-1 高エネルギーガンマ線天文学の現状

ガンマ線天文学は今、急激な発展の時代を迎えている。2008年に打ち上げられた Fermi 衛星は 20MeV から 300GeV のガンマ線に対して高い検出能力を持ち、打ち上げ後一年間で、1400 を超えるガンマ線源を発見することに成功した[1]。フェルミ衛星が就航する前に分野を率いていた、コンプトン衛星の EGRET 検出器が数百程度の発見数[2]であったことと比べても飛躍的な発展であった。また、地上では 100GeV を超える超高エネルギーガンマ線の観測が行われており、これまでに H. E. S. S. [3]や MAGIC[4]、VERITAS[5]などが 100 を超える天体を新たに発見している[6]。この Fermi 衛星は GeV 領域で天体を観測する計画の決定版とも言われていて、これ以上の大幅な感度や性能の向上は今後望みにくい状況である。しかしその一方で、地上におけるガンマ線の観測は確立してきた技術を更に発展させることにより TeV 領域の天体の発見数を飛躍的に増加させることができると期待されている。現在、TeV 領域のガンマ線観測を率いてきた H. E. S. S. と MAGIC の2つのグループが中心となって、次世代超高エネルギーガンマ線天文台 CTA(Cherenkov Telescope Array)を建設する計画が進められている[7]。



フェルミ衛星とフェルミ衛星による全天ガンマ線地図[1]



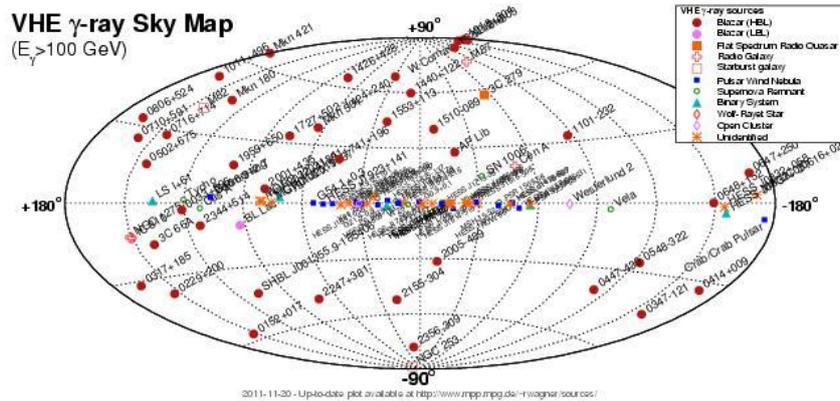
H.E.S.S.望遠鏡[3]



MAGIC 望遠鏡[4]



VERITAS 望遠鏡[5]

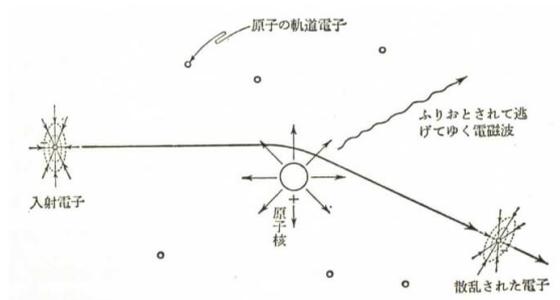


全天超高エネルギーガンマ線(>100GeV)地図[6]

1-2 ガンマ線が生成される機構

この節では、検出対象であるガンマ線が生成する機構について説明をする。高エネルギーガンマ線は、高エネルギー宇宙線が加速源で周囲の物質や電磁場と相互作用することにより多く、生成される。

1-2-1 制動輻射



制動輻射[8]

制動輻射は荷電粒子と原子核との相互作用である。

高速度で走る電子が原子核の近傍を通るとき、その電子の進路は電磁散乱により急激に曲げられる。その際、電子の周りの電磁場が振り落とされることがある。振り落とされた電磁場は電磁波として輻射される。この現象を制動輻射と呼ぶ。エネルギー E の電子が 1g/cm^2 の物質を通過して、 $\varepsilon, \varepsilon + d\varepsilon$ エネルギーの光子を放出する確率は、

$$\Phi(E, \varepsilon)d\varepsilon = \frac{r_e^2}{137} Z^2 \frac{N}{A} \frac{d\varepsilon}{\varepsilon} g(E, \varepsilon)$$

$g(E, \varepsilon)$ は E と ε の変化に対して鈍い関数で、大体 1~20 の間の値を取る。電子の持つエネルギーが非相対論的、すなわち $E \ll mc^2$ の時、 $g(E, \varepsilon)$ は以下の式となる

$$g \approx \frac{16}{3} \log\left(\frac{E}{\varepsilon}\right)$$

また、電子の持つエネルギーが相対論的で $E \gg mc^2$ の時、電子が原子核から離れて通過しても光子を輻射する。電子が原子半径程度のところを通ると原子核の電荷は外回りの電子によって大体が打ち消されている。だから原子の電子によって原子核電荷が遮蔽されている効果(screening)が効いてくる。その結果、 $g(E, \varepsilon)$ は以下の式となる。

$$g(E, \varepsilon) \approx 4\left(\log 183Z^{-1/3} + \frac{1}{18}\right)$$

粒子が距離 dx (g/cm²)走る間に制動輻射によって失うエネルギーは

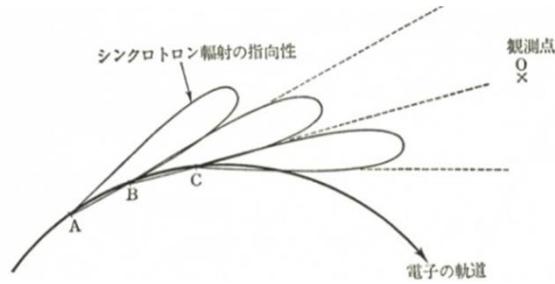
$$E \propto e^{-x/X_0}$$

ここで、

$$X_0 = \frac{1}{\frac{r_e^2}{137} Z^2 \frac{N}{A} g(E, \varepsilon)}$$

である。※今、原子核が静止し、電子が動いている運動を考える。電子に固定した座標系で考えると、ローレンツ変換により、原子核周りの電場は進行方向に平たくなり、磁場を生じる[8]。

1-2-2 シンクロトロン輻射



シンクロトロン放射[8]

シンクロトロン放射は荷電粒子と磁場との相互作用である。

磁場の中で、電子はローレンツ力 $F = -evB$ を受けてスパイラル状の軌道を描いて走る。この時、電子は軌道を含む面内で軌道の曲がる方向に加速を受けている。加速を受けることで、電子は電磁波を輻射する。この現象をシンクロトロン放射と呼ぶ。電磁波のエネルギーの周波数分布は以下の式で与えられる。

$$p(\nu) = \frac{\sqrt{3}e^3}{mc^2} B \sin\theta F(\nu/\nu_e)$$

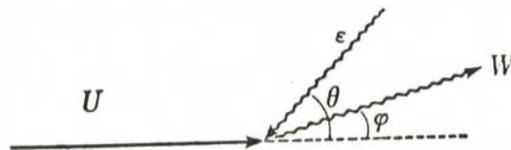
$$\nu_e = \frac{3}{4\pi} \frac{eB \sin\theta}{mc} \gamma^2$$

電子が単位時間に失うエネルギーは、

$$-\frac{dU}{dt} = \frac{4}{3} \sigma_T c \rho_B \gamma^2$$

※1-2-1 と同様に電子に固定した座標系で考えると、ローレンツ変換により、垂直方向に電場が生じる。よって電子は加速度を受け、電磁波を放射する[8]。

1-2-3 逆コンプトン効果



逆コンプトン散乱[8]

逆コンプトン散乱は荷電粒子と光子との相互作用である。

高いエネルギーを持つ電子は光子にぶつかって光子に運動エネルギーを与えることがある。この現象を逆コンプトン効果と呼ぶ。光子が空間に瀰漫していると仮定すると、光子の空間密度は以下の式で表される。

$$n(\varepsilon, \theta)d\varepsilon d\omega = f(\varepsilon)d\varepsilon d\left(\frac{\cos\theta}{2}\right)$$

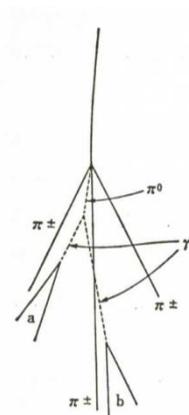
電子のエネルギー損失は以下の式で表される

。

$$-\frac{dU}{dt} = \frac{4}{3}\sigma_T c \gamma^2 \rho_s$$

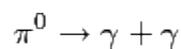
逆コンプトン効果の式はシンクロトロン輻射の式と酷似している。これは電子から見ると磁場も光子に見えるので、2つの現象の本質は同じであるからである[8]。

1-2-4 π^0 崩壊



π^0 の崩壊[8]

π^0 は中性 π 中間子とも呼ばれる。 π 中間子には他に、正負の荷電を持つ π^+ 、 π^- が存在する。 π 中間子は核子から大体、核力の及ぶ範囲にとどまり、基本的には単独で核子から遊離して存在しない。しかし、核子同士がぶつかりあって核子が激しくゆさぶられると中間子は核子から振り落とされて独立することがある。 π 中間子は不安定な粒子であり、 π^0 も寿命 $1.8 \cdot 10^{-16}$ で崩壊する。 π^0 が崩壊するとき、 π^0 は2個のガンマ線を生成する。

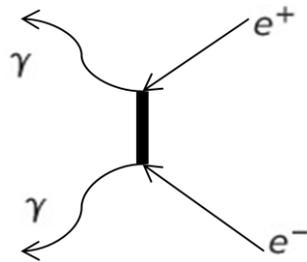


π^0 の静止質量エネルギーは、

$$m_{\pi^0}c^2 = 135.01 \pm 0.05 \text{ MeV}$$

であるので、 2γ のエネルギーは、これに π^0 の持っていた運動エネルギーを足した値に準拠する[8]。

1-2-5 対消滅



電子対消滅

粒子、反粒子の衝突によりガンマ線が輻射される現象を対消滅という。上の図は電子、陽電子の消滅の図。

電子と陽電子が衝突して、2個のガンマ線を出して消滅する過程がある。この現象を電子対消滅と呼ぶ。大部分の粒子は静止する際に消滅する。静止付近での断面積は、

$$\sigma \simeq \pi \left(\frac{e^2}{mc^2} \right)^2 / \beta$$

Δt 秒間に陽電子は $\beta c \Delta t$ だけ走り、この中に電子が N_e 個/cm³あるとすると、消滅確率は、

$$N_e \sigma \beta c \Delta t = \pi N_e \left(\frac{e^2}{mc^2} \right)^2 c \Delta t$$

である[9]。

2 地上ガンマ線天文台

我々が建設を進めるCTAは、地上ガンマ線天文台に属する。地上ガンマ線天文台には、チ

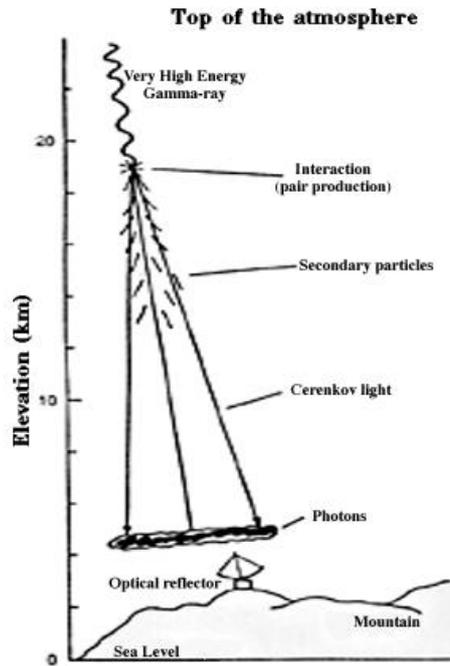
チェレンコフ望遠鏡が使われる。この章では始めに、チェレンコフ望遠鏡について説明をし、その観測技術について触れる。次に、チェレンコフ望遠鏡が検出するチェレンコフ光がどのように生成されるかについて説明をする。

2-1 チェレンコフ望遠鏡



H.E.S.S. のチェレンコフ望遠鏡[3]

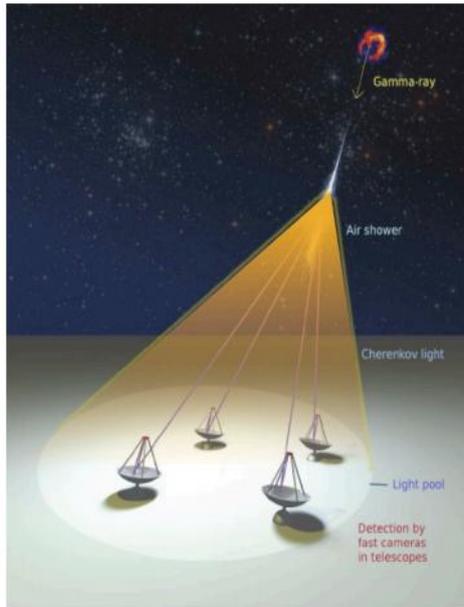
チェレンコフ望遠鏡は超高エネルギーガンマ線が地球大気に作る、電磁カスケードシャワーから放射されるチェレンコフ光を検出する。大体 300nm 以下のチェレンコフ光は大気による吸収を受けるので、チェレンコフ望遠鏡は 300nm から 600nm に感度を持つように作られる。チェレンコフ望遠鏡は検出したシャワーイメージからイメージングチェレンコフ技術により、元のガンマ線のエネルギーと到来方向を再構築することができる[7]。



チェレンコフ望遠鏡の観測イメージ[10]

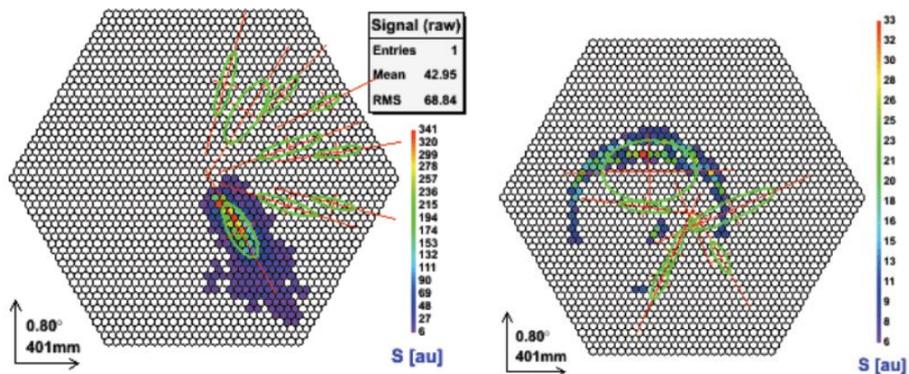
2-2 イメージングチェレンコフ技術

チェレンコフ輻射には指向性がある。地上付近の大気中（屈折率 $n \sim 1.0003$ ）において、電子または陽電子によるチェレンコフ光は、粒子の進行方向に対して 1 度程度の広がりを持つ。この光を地上に設置した複数の望遠鏡により検出することで、異なる視点からのシャワーイメージを獲得することができる。複数のシャワーイメージを得ることで、バックグラウンドとなる核カスケードシャワーイベントやガンマ線由来でない電磁カスケードシャワーイベント（電子や陽電子、 μ 中間子によるもの）を効率良く排除することができ、またシャワーイベントを高精度に立体視することもできる。シャワーイベントを高精度に立体視することは、ガンマ線の到来方向やエネルギーを精度良く決定するのに重要である。



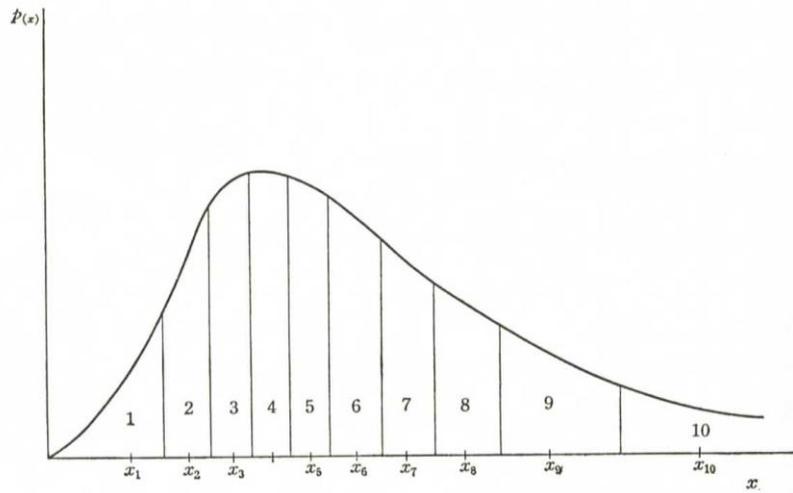
ステレオ観測

複数の角度からのシャワーイメージを得ることで、電磁カスケードシャワーを高精度で立体視する。これにより、角度分解能の向上やバックグラウンドの排除が行える[7]。



MC シミュレーションによる電磁カスケードシャワーイメージ (左図) と、
核カスケードシャワーイメージ (右図)

シャワーイメージからパラメータを取り出し、ガンマ線由来の電磁カスケードシャワーを同定する[7]。



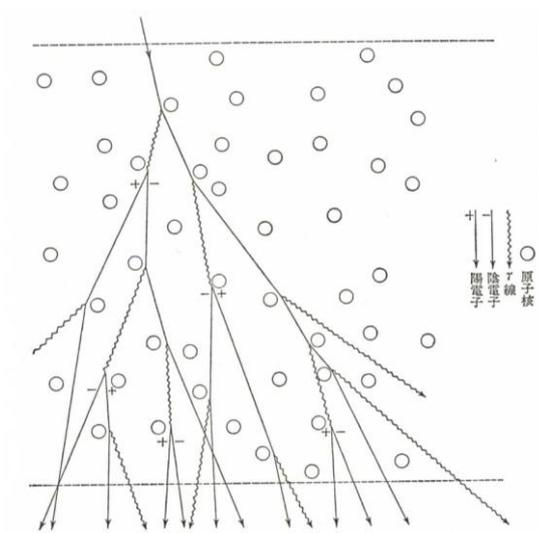
MC シミュレーション[8]

個々のシャワーの性質は平均まわりから揺らぐ。シャワーの基本方程式を解いても、シャワーの平均的な性質を得るだけである。このため MC シミュレーションは数学的解析によってシャワーの性質を求めることをしない。変数 x の現れる確率関数を $p(x)$ として、上図のよう等面積に分割しておく。このようにある種のビンを作成し、確率 $p(x)$ によって乱数表の数字がビンに配分されるようにする。概ね確率関数に形状は似るが、平均周りからの揺らぎをうまく表した結果となるだろう。

2-3 チェレンコフ光の生成機構

超高エネルギーガンマ線は地球大気に入射すると、電子カスケードシャワーを生成する。この電磁カスケードシャワーの中では、電子対創生と制動放射が交互に起きて、シャワーを発達させていく。この過程の間に、電子対創生で生成された電子、陽電子がチェレンコフ放射をすることでチェレンコフ光は放射される。この節では、電磁カスケードシャワー中で起きる現象で、既に 1-2-1 で説明した制動放射を除く電子対創生とチェレンコフ放射について説明をする。

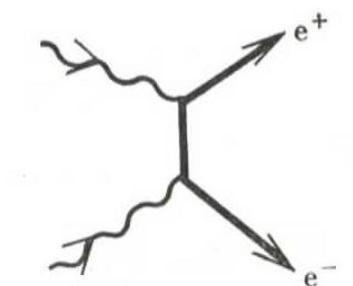
2-3-1 電磁カスケードシャワー



電磁カスケードシャワー[8]

宇宙から超高エネルギーガンマ線が入射すると電子対創生と制動輻射を交互に繰り返して、電子及び光子を増殖させる。この現象を電磁カスケードシャワーと呼ぶ。電磁カスケードシャワーはそれぞれの電子、光子が次の反応を引き起こせなくなるまで続く。

2-3-2 電子対創生



電子対創生[9]

光子のエネルギーが電子の質量エネルギーの 2 倍を超えると電子と陽電子が生成することがある。この現象を電子対創生と呼ぶ。電子対創生は光子の周囲になにもない時には、起きることはない。光子が原子核の近傍にいる時、電子と陽電子は原子核による散乱を受けて運動量を授受することができる。これにより、エネルギー保存則と運動量保存則を同時に満足することができ、光子は原子核にいくばくかの運動量を与えながら電子対を生成する。原子核 1 個あたりの電子対創生の断面積は、 $h\nu \gg mc^2$ で大体、

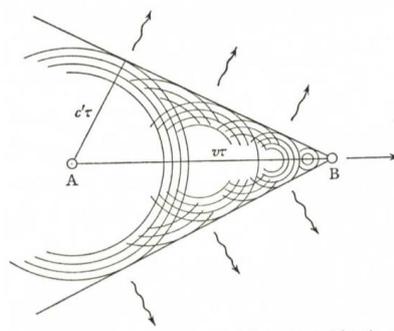
$$\sigma_p(\text{cm}^2) \approx \frac{Z^2}{137} r_e^2 \left(\frac{28}{9} \log \frac{182}{Z^{1/3}} - \frac{2}{27} \right)$$

に近づく。1g/cm²の物質中で、この現象を起こす確率は、

$$\Phi \cong \frac{N}{A} \sigma_p = \frac{NZ^2}{137A} r_e^2 \left(\frac{28}{9} \log \frac{182}{Z^{1/3}} - \frac{2}{27} \right)$$

である[8]。

2-3-3 チェレンコフ輻射



チェレンコフ輻射[8]

高速度で走る荷電粒子のまわりの電場は、電磁波をまわりにともなっているような形をしている。制動輻射の項を参照。いわば光子が荷電粒子の近傍を出たり入ったりしていると考えられる。媒質中では、この荷電粒子近傍の光子は抵抗を受けて運動量の一部を授受する。これにより、運動量およびエネルギー保存則を同時に満たして光子が荷電粒子近傍から離れることがある。この現象をチェレンコフ輻射と呼ぶ。Tamm-Frank の理論から粒子の走る単位長さあたり、光子の周波数 ν と $\nu + d\nu$ の間に放出される光子の数 N は以下である。

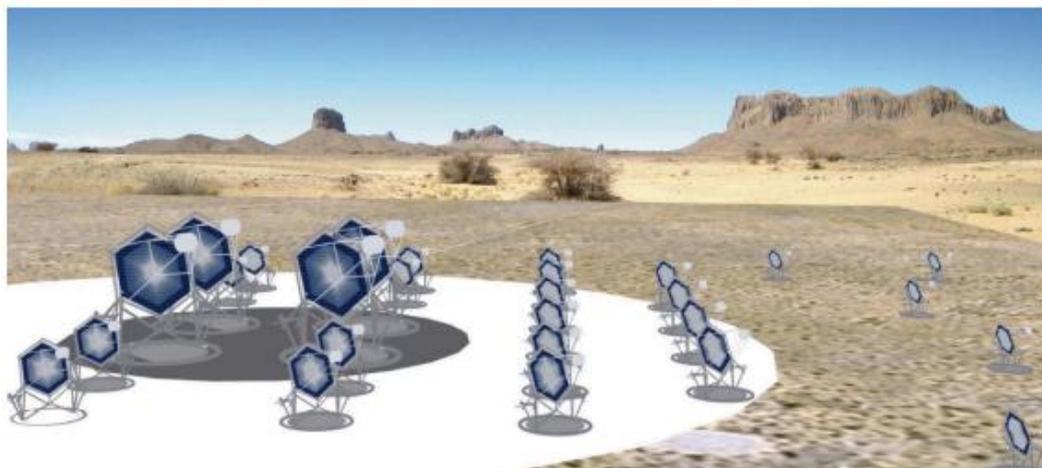
$$Nd\nu = \frac{2\pi e^2}{\hbar c^2} \left(1 - \frac{c^2}{n^2 v^2} \right) d\nu$$

また、チェレンコフ輻射によるエネルギー損失は、

$$W \propto \frac{d\lambda}{\lambda^3}$$

であり、すなわち、チェレンコフ輻射は短波長に向かって強まる。電磁カスケード中では電子、陽電子がチェレンコフ光を輻射する[8]。

3 CTA

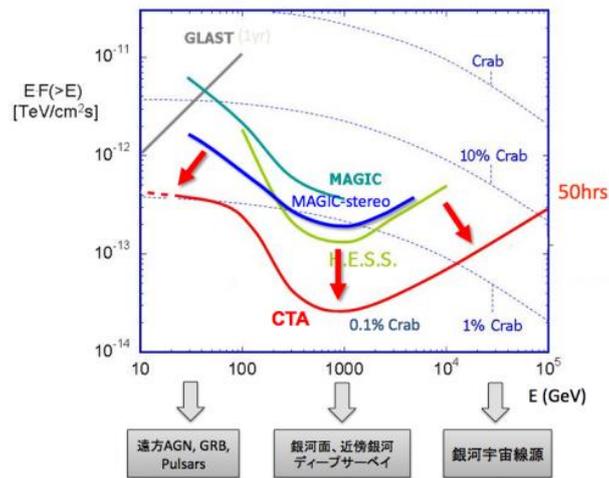


CTA 望遠鏡群イメージ[7]

現在、TeV 領域のガンマ線観測を率いてきた H. E. S. S. と MAGIC の 2 グループが中心となって、次世代地上高エネルギーガンマ線天文台 CTA(Cherenkov Telescope Array)を建設する計画が進められている。これまでに確立した技術を更に発展させることで TeV 領域の発見天体数を飛躍的に増加させることができる余地があるからである。CTA は現行の地上ガンマ線望遠鏡より 10 倍の感度と 3 倍の角度分解能を持ち、20GeV から 100TeV を超える帯域で全天観測をする。CTA が稼動することで、1000 以上の TeV ガンマ線が新たに発見され、高エネルギー現象に関する研究が発展すると期待されている[7]。

Diff. sensitivity ($\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)	at 50 GeV	8×10^{-12}
	at 1 TeV	2×10^{-13}
	at 50 TeV	3×10^{-13} (S) / 10^{-12} (N)
Collection area (m^2)	at 1 TeV	$> 10^4$
	at 10 TeV	$> 10^6$ (S) / $> 5 \times 10^5$ (N)
Angular resolution	at 0.1 TeV	0.1°
	> 1 TeV	0.05°
Energy resolution	at 50 GeV	$\leq 25\%$
	> 1 TeV	$\leq 10\%$
Field of view	at 0.1 TeV	5°
	at 1 TeV	8°
	> 10 TeV	10°
Sensitivity in FoV	at 1 TeV flat out to	$> 2.5'$
Source localisation	at 1 TeV	$5''$ per axis
Repointing time	< 0.1 TeV	20 s (goal), 50 s (max)
	0.1–10 TeV	60 s (goal), 90 s (max)

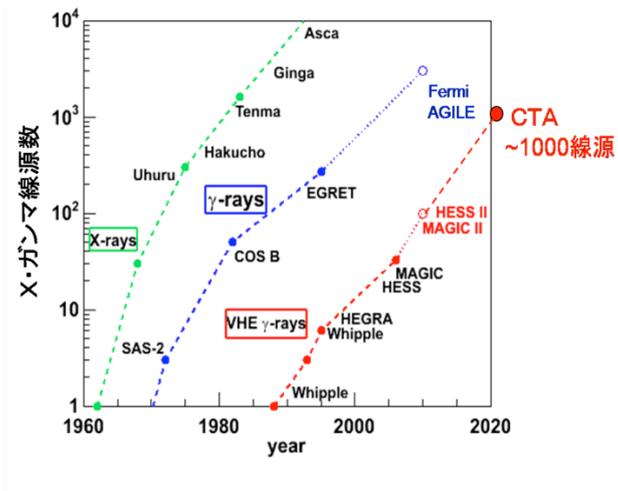
CTA が目標とする性能[7]



CTA の目標感度曲線

代表的な地上ガンマ線望遠鏡計画の H.E.S.S.,MAGIC よりも感度を一桁向上し、検出するガンマ線のエネルギーも広帯域化する[7]。

3-1 観測する天体と貢献するサイエンス

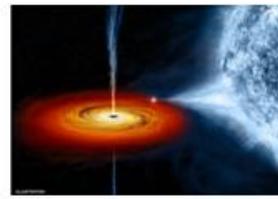


x・ガンマ線源発見個数の推移(Kifune Plot)

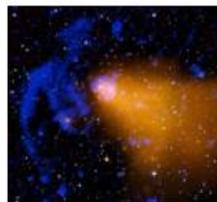
超高エネルギーガンマ線源の発見個数を時間の関数で表したもの。フェルミ衛星はコンプトン衛星の EGRET 検出器から飛躍的にガンマ線源の発見個数を増やした。CTA には 1000 を超える超高エネルギーガンマ線源の発見が期待されている[7]。



超新星残骸



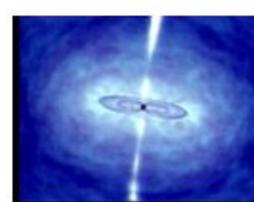
ガンマ線連星



銀河団



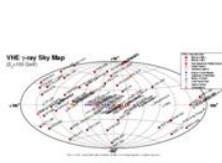
活動銀河核



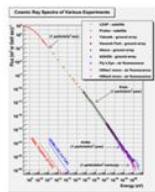
ガンマ線バースト

CTA が観測する天体の例[11][12][13][14][15]

超新星残骸は超新星爆発の名残で、良い加速源となる。ガンマ線連星はブラックホールや中性子星と大質量星が連星系を成しているもの。大質量星から質量降着が起きて、ブラックホールから逃げ出したエネルギーが噴出しているのが見て取れる。銀河団では銀河同士の合体などが起きている。活動銀河核は銀河の中心に超巨大ブラックホールを持つと考えられている。ガンマ線バーストは 10^{53} erg に及ぶ膨大なエネルギーを数秒から数十秒の間に開放してしまう爆発現象である[7]。



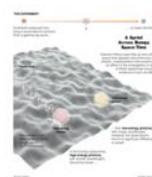
天体の探索



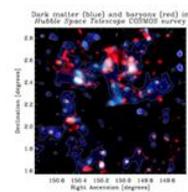
宇宙線の起源



宇宙論・星形成史



相対論の検証

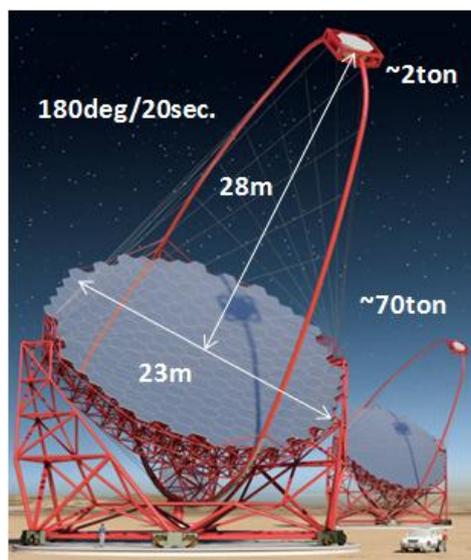


暗黒物質の探索

CTA が貢献するサイエンス[6][16][17][18][19]

CTA の稼動により 1000 以上の TeV ガンマ線源が発見されることが期待されている。天体の探索は飛躍的に進む。宇宙線の起源はどのような天体で、どのような加速が行われているかを明らかにすることで判明する。宇宙論・星形成史は宇宙再電離や宇宙初期の天体の形成について CTA は迫ることができるかもしれない。相対論の検証は標準理論を越えた新しい理論の発達の可能性を秘める。暗黒物質の探索は暗黒物質の対消滅、崩壊により生成されるガンマ線強度の予想値を、観測値と比較することで暗黒物質の質量、対消滅断面積、寿命などの情報を得ることができる[7]。

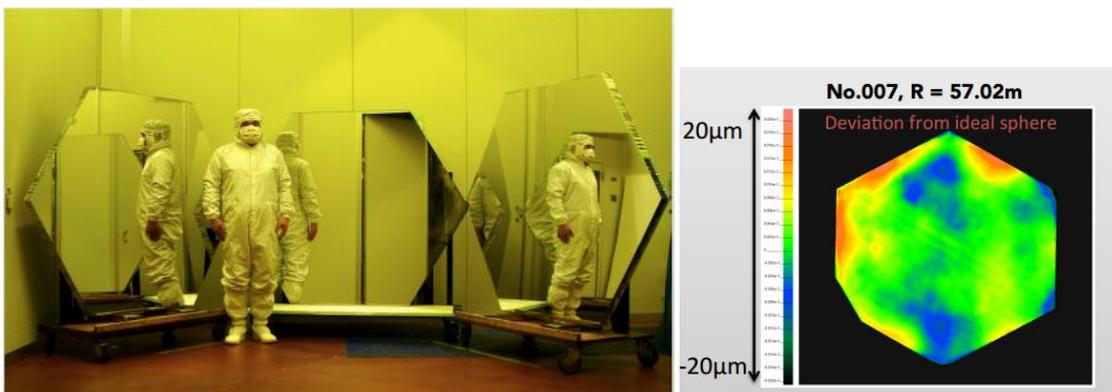
3-2 CTA 大口径望遠鏡(CTA-LST)



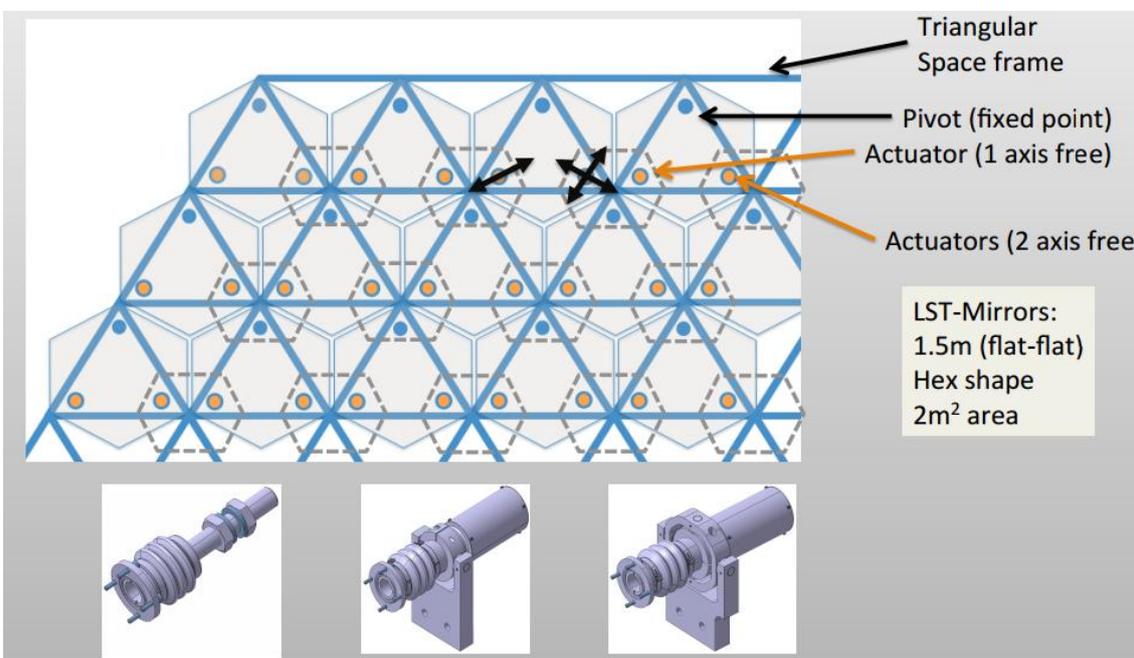
CTA-LST (大口径望遠鏡) の建設イメージ[20]

日本のグループは口径の違う三種類の望遠鏡の内、最も低エネルギー側の 20GeV から 1TeV に感度を持つ大口径望遠鏡 (Large Size Telescope, LST) のカメラの開発に携わっている。CTA-LST は南北両半球のサイトに 4 台ずつ設置される。反射鏡の直径は 23m、

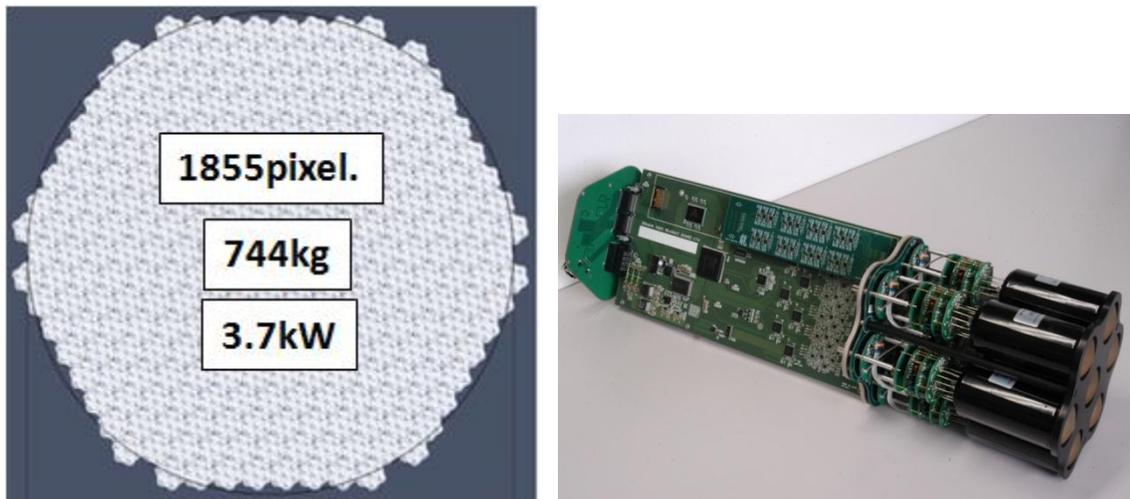
焦点距離は 28m になる。全重量は 70ton で、カメラボックスを含めたカメラの重量は 2ton になる。LST にとって GRB は重要な標的天体となる。GRB のような突発的な天体現象に対応するため望遠鏡の架台の回転速度は 180deg./20sec であるように開発されている。CTA-Japan は LST の開発に携わっており、主要なもので低エネルギー側の閾値 20GeV の達成、超高エネルギーガンマ線の地平線の拡大(AGN を $z < 2$ まで、GRB を $z < 4$ まで観測可能)などの貢献がある。反射鏡、カメラ全般にその功績を残している。以下に日本の主な功績を示す。



反射鏡と反射鏡のキャリブレーション[20]

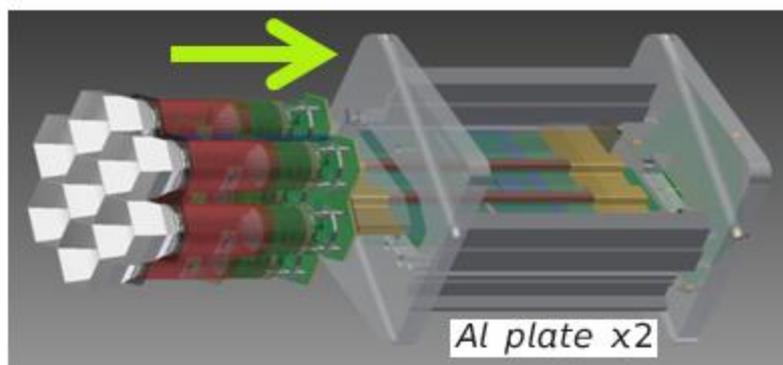


反射鏡の作動装置[20]



光電面の全体図（左図）と開発したクラスター（右図） [20]

クラスターは7本の光電子増倍管と一つの読み出し回路で構成されている。CTA-Japanは目下、LSTのカメラの開発に取り組んでいる。



クラスターの設置イメージ(H.Ohoka)

クラスターは二枚のアルミの冷却板に固定される。冷却板は望遠鏡の180deg/20secで回転する動作下でも変位が少ないものでなければならない。

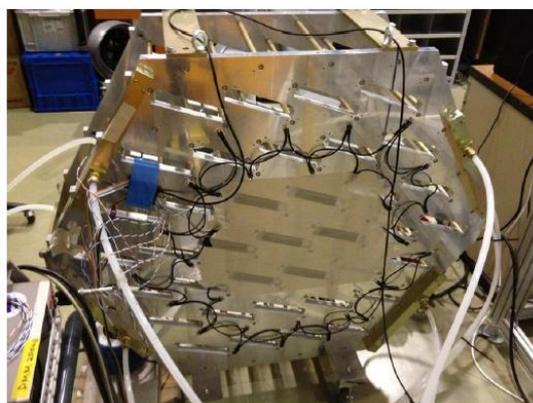
4 研究

4-1 冷却板の構造解析

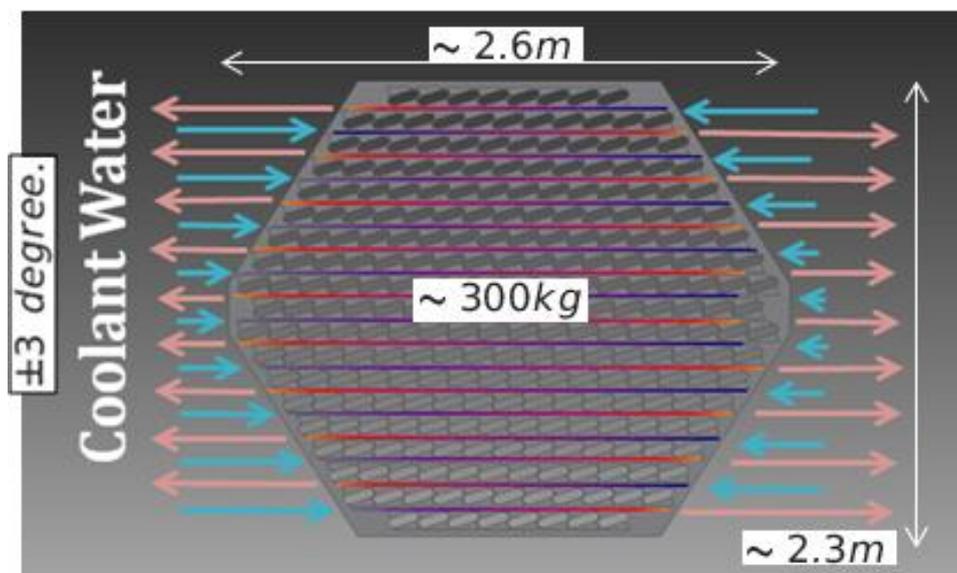
CTA-LSTは3-1にあるようにガンマ線バーストも観測対象とする。ガンマ線バーストは数秒から数十秒の間にその膨大なエネルギーの解放を終えてしまう。そのため、CTA-LSTは

180deg/20sec という高速な動作で観測する方向を変更することができる能力を持つ。従って、冷却板には想定される 3G 環境下でも変位の少ない、強度の高いものでなくてはならないという要請がある。この冷却板の強度が足りなければ、ガンマ線バーストの研究を満足に行えなくなってしまう。この節では、我々が行った、冷却板の構造解析について説明をする。始めに、冷却板がカメラをどのように支えるかについて説明する。次に冷却板の設計について触れる。最後に要求である 3G 環境下でも変位の少ない構造を達成しているかについて、解析ソフトを使用して検証する。

4-1-1 冷却板



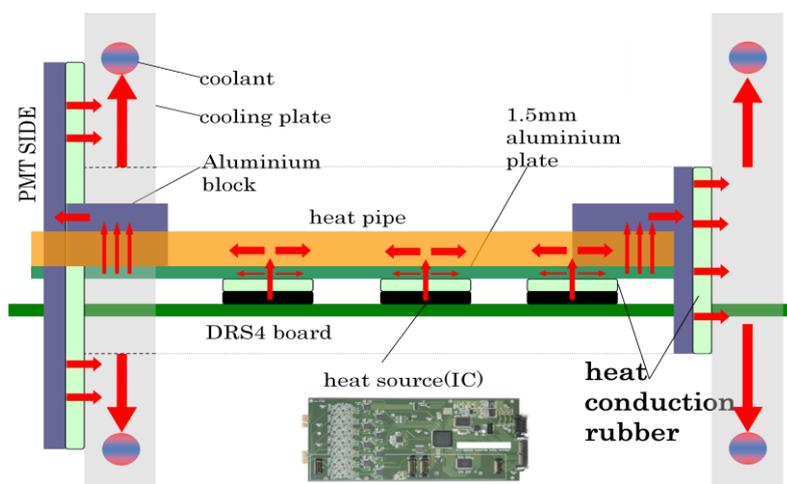
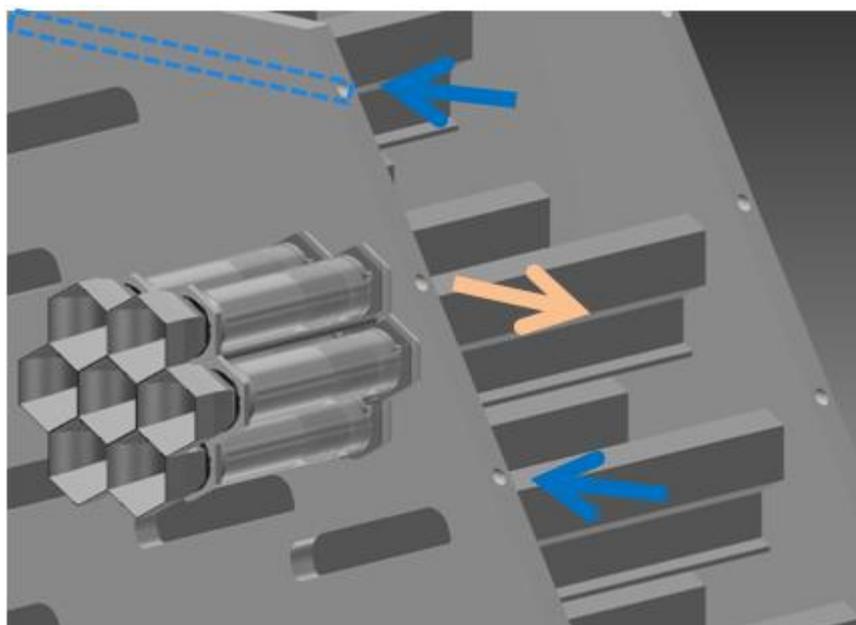
37 クラスタ用冷却板



冷却板イメージ

CTA-Japan では、LST カメラを冷却するために二枚の冷却板を導入することを提案してい

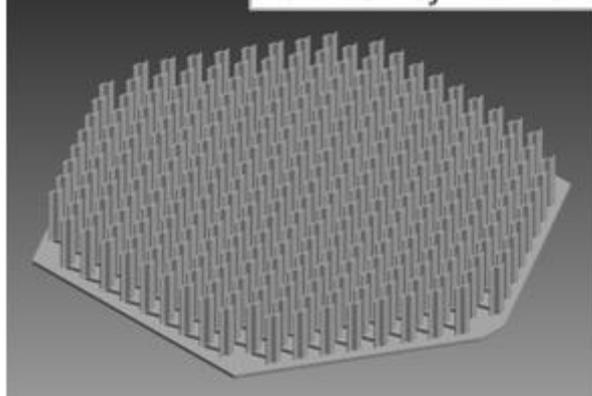
る。冷却板の厚さは 20mm あり、カメラを支える役割を兼ねている。冷却板には 265 個の穴が開けられていて、その穴にクラスターを差込んで固定する。我々は試作された 37 クラスター用冷却板を元に、265 クラスター用の冷却板を作成した。



冷却イメージ

冷却板内部には冷却水を通す。冷却水を通すため、直径 10mm の穴がクラスターを差し込む穴を避けて図の様に開けられる。冷却板内部を通って熱を回収した水は、カメラの外に運ばれる。外に運ばれた水は、望遠鏡に備え付けられたチラーで冷却される。また、冷却水は一段ごとに交互に流す。これは冷却される箇所の偏りをできる限り無くするためである。

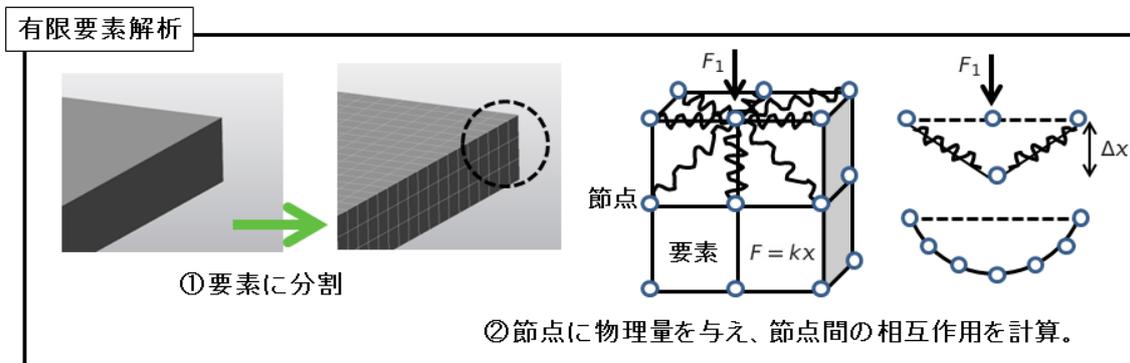
Number of rail is 284.



レール配置イメージ

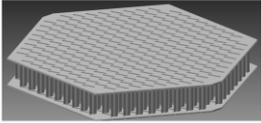
二枚の冷却板の間には 284 本のレールが敷かれている。レールはクラスターを差し込む際の手助けになるとともに、二枚の冷却板を連結する役割を担う。レールの厚みは 2mm で、長さは 350mm、重さは 473g になる。

4-1-2 構造解析の原理



有限要素法

解析ソフト Autodesk Simulation Multiphysics 2013 を使用して構造解析を行った。このソフトは有限要素法を取る。有限要素法は物体を有限個の要素に分割する。次に節点に物理量を与え、節点間の相互作用を計算する[21]。

	<ul style="list-style-type: none"> •質量密度 •弾性率など... 	<ul style="list-style-type: none"> •1G,2G,3G... •2.5kgのおもり 	<u>6自由度</u> <ul style="list-style-type: none"> •平行移動 •回転移動
	①形状データ	②素材データ	③荷重条件

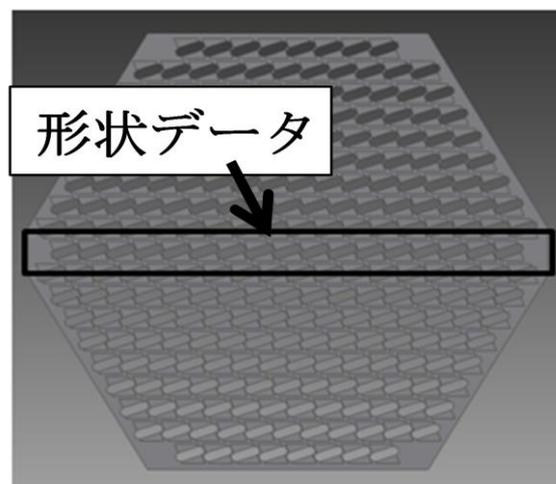
解析に必要な情報

解析に必要な情報は図にある通りである。形状データがないと要素を生成することができない。素材データがないと物理量を取得できない。荷重条件がないと計算の前後で結果は変わらない。固定条件は平行移動の3自由度、回転移動の3自由度の制限の有無を表す。3次元、2次元、1次元の計算が固定条件の適用の例である。また、固定された箇所が一切ないと、系は平行状態を取ることができずに解析は失敗に終わる。

4-1-3 構造解析の結果

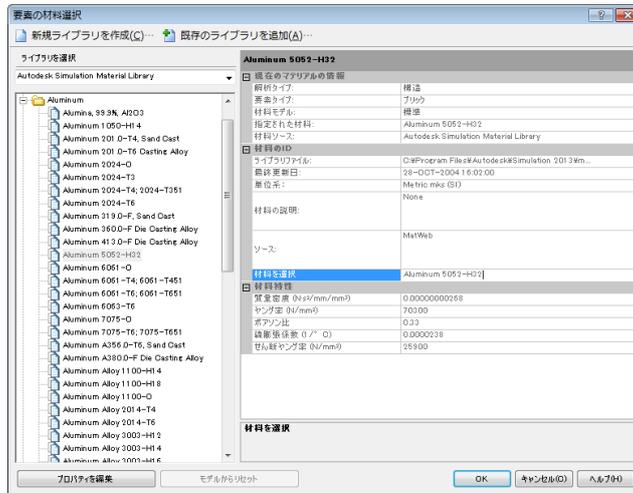
使用したソフトは Autodesk Simulation Multiphysics 2013 である。

(<http://www.autodesk.co.jp/adsk/servlet/pc/index?siteID=1169823&id=14929739>)



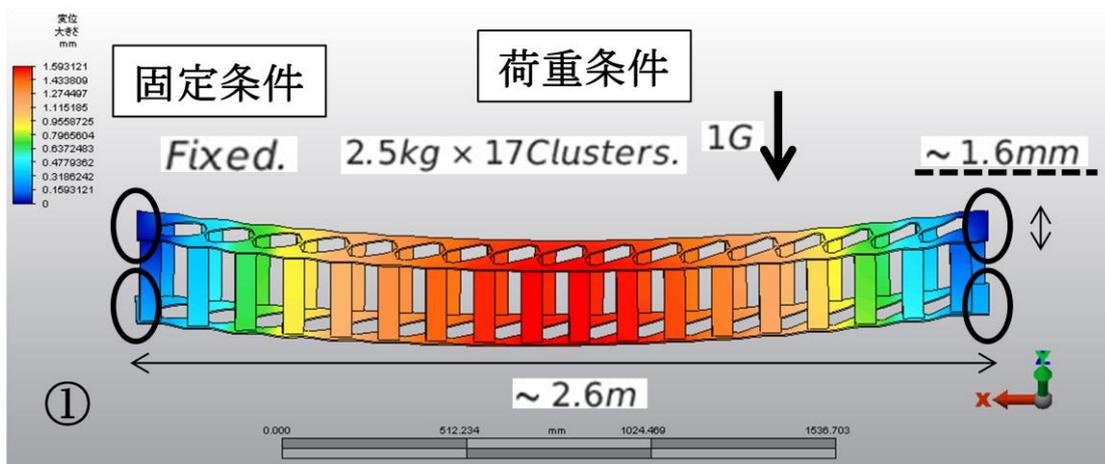
形状データ

冷却板の真ん中一列を切り出した形状をしている。



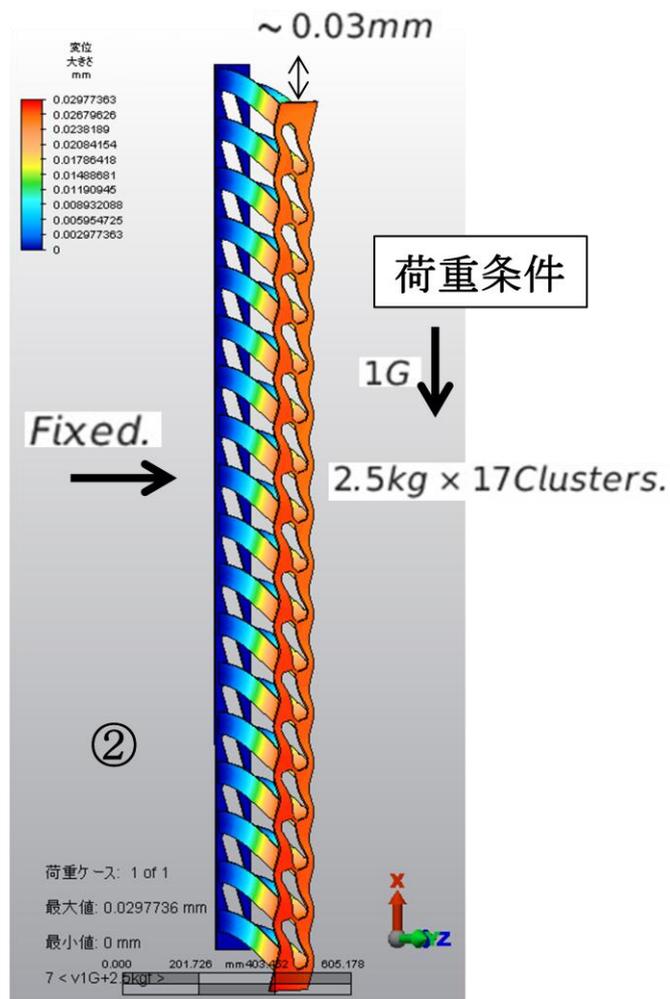
材質データ

材質データは内部データの Aluminium 5052-H32 である。



解析結果 1

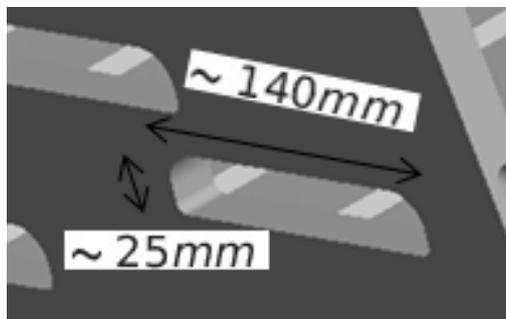
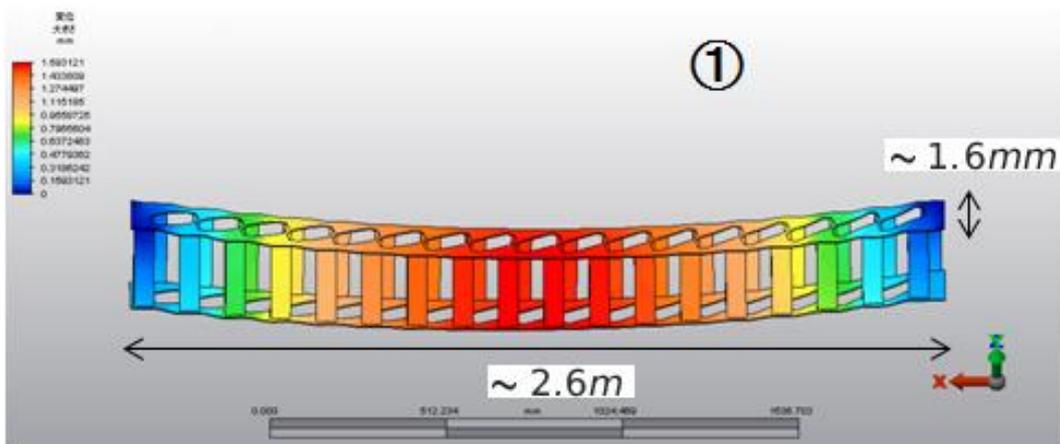
荷重条件はそれぞれの穴内側に 2.5kg を荷重し、図矢印の方向の 1G 環境下においたもの。固定条件は上下冷却板の端部を固定したもの。解析の結果~1.6mm の最大変位が見られた。



解析結果 2

荷重条件はそれぞれの穴内側に **2.5kg** を荷重し、図矢印方向の **1G** 環境下においたもの。固定条件は1枚の冷却板の表面を完全固定したもの。レールの歪を見る目的で行った。解析の結果~0.03mm の最大変位が見つかった。

4-1-4 構造解析の考察



$$1.6 \times 10^{-3} [m] / 1.3 [m] \approx 1.2 \times 10^{-3}$$

$$\rightarrow 1.2 \times 10^{-3} \times 141 [mm] \approx \underline{1.7 \times 10^{-1} [mm]}$$

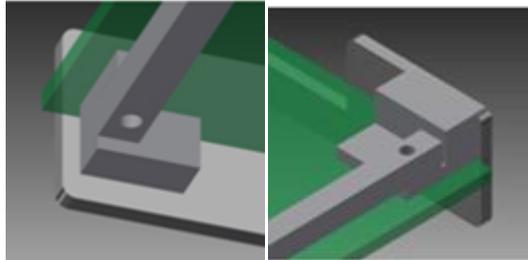
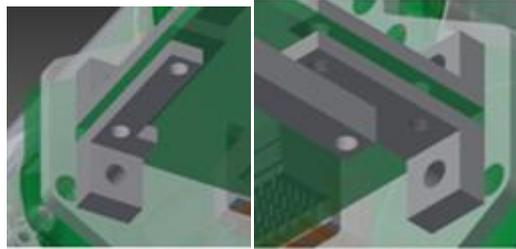
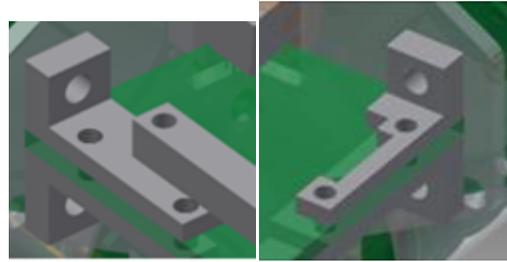
解析結果 1 について結果を分析してみた。穴の大きさ程度のスケールの変位は 0.17mm 程度である。変位は重力とよい比例関係にあった。結論として 3G の加速の時には ~0.5mm 程度の変位である。この結論を元に強度の部分補強や、重量の軽量化の議論を進める。

4-2 フレームの作成

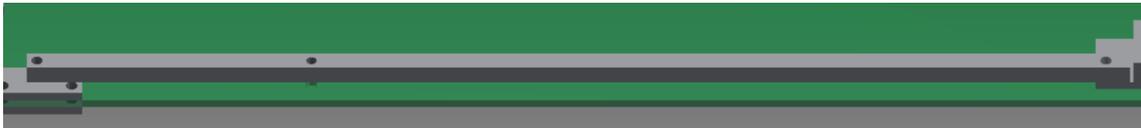
この章では、我々が行った、クラスターに取り付けるフレームの作成について報告する。

4-2-1 フレームの仕様

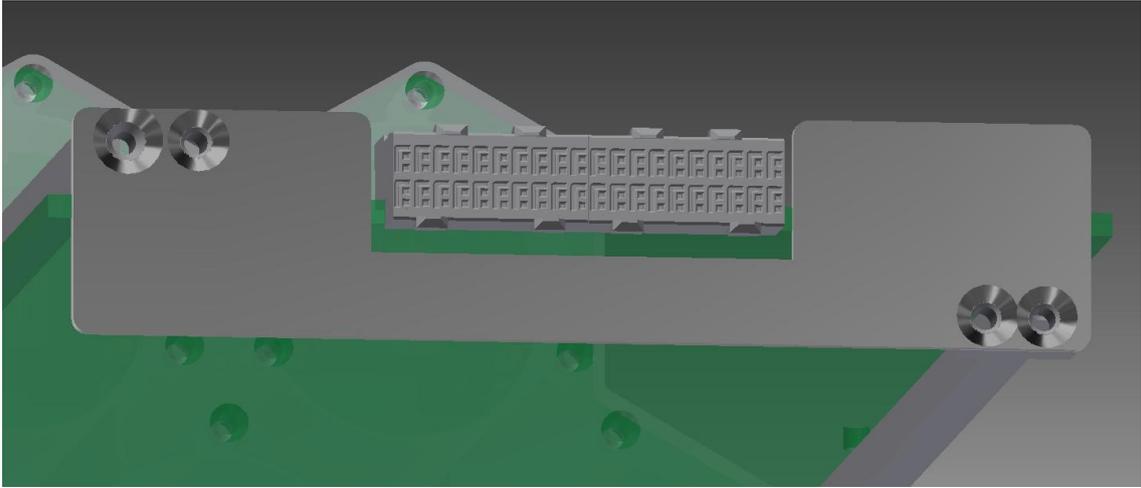
クラスターは穴の開いた二枚のアルミ板に引き出し棒を使って引き込まれ、金具で固定される。フレームはこの固定方法が行えるような仕様でなければならない。



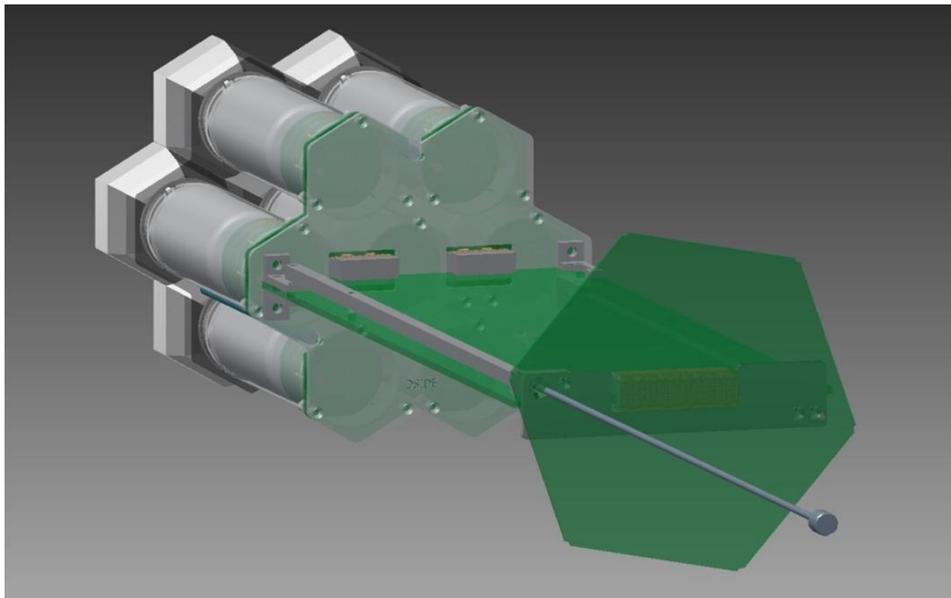
アングルの CAD ファイル



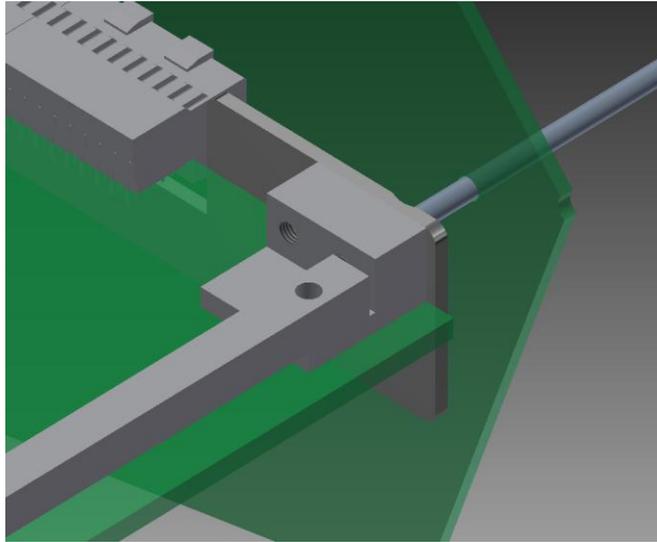
表裏共に、アングルからアングルへ梁を渡している。



DRS 後方のアルミ板。DRS とバックプレーンを繋ぎ留める役割を担う。



クラスターを引き込むイメージ

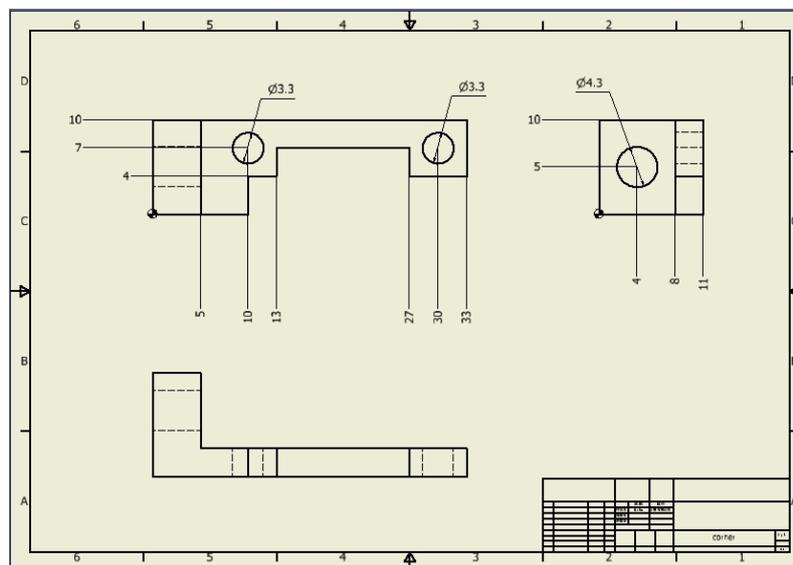


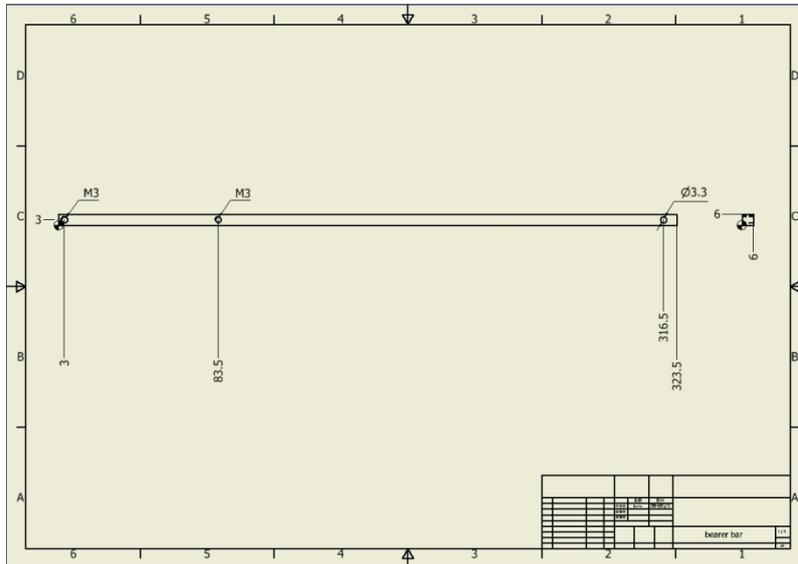
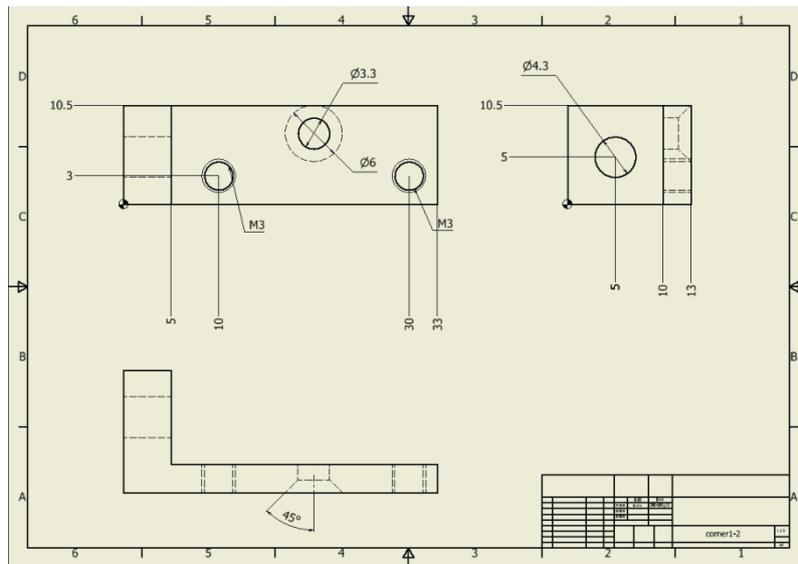
引出棒を受けるイメージ

後方から引出棒が差し込まれ、クラスター全体を後ろに引き込む。

4-2-3 図面ファイルの作成

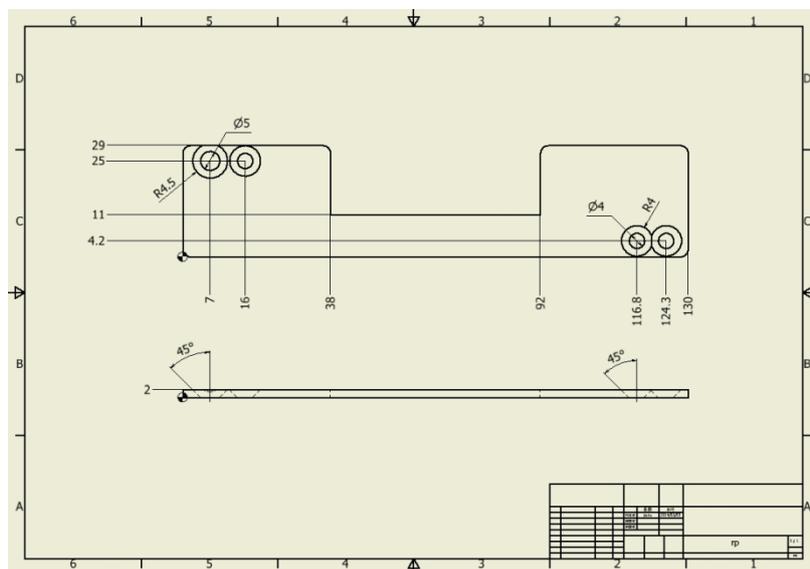
4-2-2 で作成した金具の図面ファイルを同ソフトを使用して、作成した。以下は金具の図面画像である。





以上、DRS ver.4 の表に配置される金具。

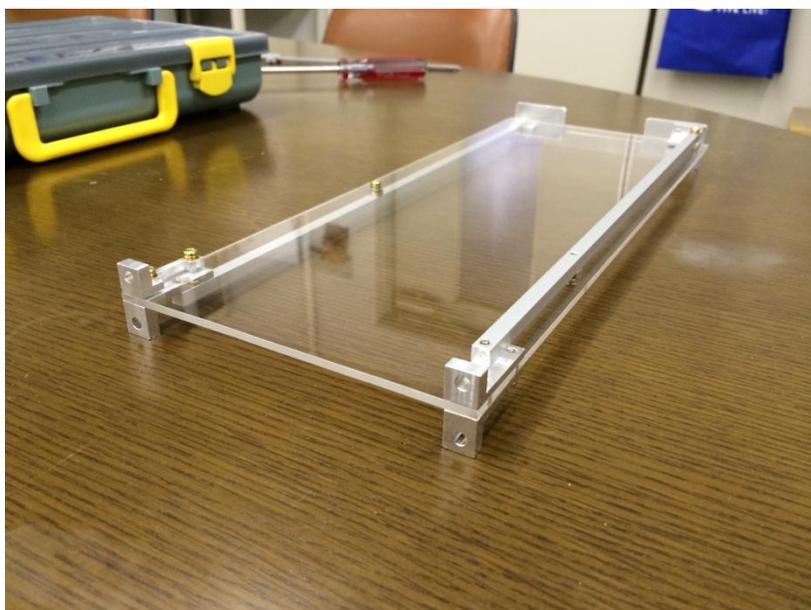
以上、DRS ver.4 の裏に配置される金具。



以上、DRSver.4 の後方に配置される金具

4-2-4 フレームの試作

製図を元に、フレームの製作を委託した。完成品を以下に示す。





5 まとめ

我々は、CTA 大口径望遠鏡のカメラの開発を行った。冷却板の構造解析を行った。結果として、要求の 3G 環境下でも穴大きさ程度のスケールの変位は 0.5mm 程度であることがわかった。この結果を元に今後、強度の部分補強や、重量の軽量化などの更なる議論を進める。また、クラスターのフレームの作成を行った。結果として試作品を完成させた。問題点を洗い出し、次のバージョンの作成につなげたい。

参考

- [1] <https://www-glast.stanford.edu/>
- [2] http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/cgro/cossc/egret/3rd_EGRET_Cat.html
- [3] <http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/>
- [4] <https://magic.mpp.mpg.de/>
- [5] <https://veritas.sao.arizona.edu/>
- [6] <https://www.mppmu.mpg.de/~rwagner/sources/>
- [7] CTA-Japan コンソーシアム:CTA 計画書
[,http://cta.scphys.kyoto-u.ac.jp/index.html](http://cta.scphys.kyoto-u.ac.jp/index.html)
- [8] 小田稔:宇宙線,裳華房(2007).
- [9] 小田稔,西村淳,桜井邦朋:宇宙線物理学,朝倉書店(1983).
- [10] http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/science/how_12/cerenkov.html
- [11] http://www.nasa.gov/mission_pages/GLAST/news/supernova-cosmic-rays.html#Uvxc3fl_tA1
- [12] http://www.nasa.gov/mission_pages/chandra/multimedia/cygnusx1.html
- [13] <http://chandra.harvard.edu/photo/2010/a3376/>
- [14] http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/science/known_12/active_galaxies.html
- [15] http://www.nasa.gov/mission_pages/swift/bursts/oddball_burst.html
- [16] William F. Hanlon: The energy spectrum of ultra high energy cosmic rays measured by the high resolution Fly's Eye observatory in stereoscopic mode. PhD thesis, University of Utah,2008
- [17] <http://science.nasa.gov/astrophysics/focus-areas/how-do-stars-form-and-evolve/>
- [18] <http://www.nature.com/>
- [19] http://subarutelescope.org/Pressrelease/2007/01/07/j_index.html
- [20] 手嶋政廣:物理学会 CTA 報告 58:全体報告(2013,9,20)
- [21] <http://help.autodesk.com/view/ASMECH/2014/JPN/>

謝辞

CTA-Japan の皆様、大変お世話になりました。甲南大学の先生方、学友の皆には感謝してもしきれません。山本先生、親身に対応下さりありがとうございました。猪目くん、CTA に最大限に貢献することを期待しています。