

CANGAROO-III チェレンコフ望遠鏡のための
新しいライトガイドの開発

甲南大学大学院自然科学研究科
物理学専攻
修士論文

真栄城 敦

March 2001

Abstract

チェレンコフ望遠鏡のカメラは多数の光電子増倍管 (PMT) で構成されているが、各 PMT の間に不感領域が生じる。望遠鏡の主鏡で反射してカメラの不感領域に入射する光を無駄なく PMT の有感領域に導くのが、ライトガイドの役割である。今回は様々な形状のライトガイドについてモンテカルロ・シミュレーションを行い、その性能を評価し最も集光率の良い形状を実際に製作する。そして製作したライトガイドの集光率を実測し、シミュレーション結果との比較も行いながら、CANGAROO-III 望遠鏡に用いるのに最適なライトガイドを決定した。

シミュレーションではライトガイドへの光の入射角度を変化させていき、その時の集光率を様々な形状について比較した。この結果、集光率が最も良くなるのは、ライトガイドの断面が Winston Cone と呼ばれる形状で入射面は六角形にし、さらにライトガイドと PMT との隙間はなくすという場合であった。

ライトガイドの集光率が向上すれば、より弱い光を望遠鏡で捕らえられるようになり、観測可能なエネルギー領域が今までよりも下がることになる。その結果、CANGAROO 計画の大きな目的である、人工衛星による GeV 領域での観測と地上におけるこれまでの TeV 領域での観測との、エネルギー領域の空白を埋めていくことが期待できる。



目次

1	Introduction	7
1.1	新しい天文学を目指す	7
1.2	宇宙線観測の歴史	7
1.3	超高エネルギー断面から見た宇宙	8
2	ガンマ線の検出原理	9
2.1	制動輻射	9
2.2	電子・陽電子対創生	12
2.3	空気シャワー現象	13
2.4	チェレンコフ光	15
3	CANGAROO Project	18
3.1	CANGAROO 計画	18
3.2	CANGAROO-III 計画	20
3.2.1	CANGAROO-III 計画の概要	20
3.2.2	観測装置	21
3.2.3	ステレオ観測	22
3.2.4	高エネルギーガンマ線観測の重要性	23
4	今回の研究の目的	24
5	CANGAROO-II ライトガイドの改良の可能性	26
5.1	CANGAROO-II ライトガイドへ入射する光の最大入射角度	26
5.1.1	CANGAROO-II 望遠鏡の直径	26
5.1.2	CANGAROO-II 望遠鏡のカメラの形状	27
5.1.3	CANGAROO-II ライトガイドへの最大入射角度	28
5.2	Winston Cone	29
5.3	ライトガイドの形状	31
5.3.1	LG-CII type1	31
5.3.2	Winston Cone を用いた形状	32
5.3.3	放物体を用いた形状	32
5.4	モンテカルロ・シミュレーション	33
5.5	シミュレーションでの集光率の定義	34
5.6	シミュレーション結果	35

5.7	シミュレーション結果と実測値との比較	37
6	CANGAROO-III 望遠鏡のための新しいライトガイドの開発	38
6.1	CANGAROO-III ライトガイドへ入射する光の最大入射角度	38
6.1.1	CANGAROO-III 望遠鏡の直径	38
6.1.2	CANGAROO-III 望遠鏡のカメラの形状	39
6.1.3	CANGAROO-III ライトガイドへの最大入射角度	39
6.2	カメラを四角形にした場合と六角形にした場合の集光率の比較	40
6.2.1	ライトガイドの形状	40
6.2.2	モンテカルロ・シミュレーション	43
6.2.3	シミュレーション結果	43
6.3	CANGAROO-III 望遠鏡に最適なライトガイドの模索	45
6.3.1	ライトガイドの形状	46
6.3.2	モンテカルロ・シミュレーション	47
6.3.3	シミュレーション結果	48
6.4	CANGAROO-III 望遠鏡に最適なライトガイドで得られる集光率	52
6.4.1	モンテカルロ・シミュレーション	52
6.4.2	シミュレーション結果	53
7	新しいライトガイドの集光率の実測	55
7.1	新しいライトガイドの内面反射率の波長依存性	55
7.2	実際に製作したライトガイドの精度	57
7.3	シミュレーションと実測による集光率の比較	58
8	まとめ	60
A	Appendix	65
A.1	CANGAROO-III 望遠鏡で用いる PMT (Hamamatsu R3479)	65
A.2	CANGAROO-III 望遠鏡で用いるカメラ	67
A.3	CANGAROO-III ライトガイドと PMT の結合器具	68
A.4	大気中の分子・微粒子によるチェレンコフ光の散乱、吸収	69
A.4.1	レーリー散乱	69
A.4.2	ミー散乱	69
A.5	ライトガイド製作にあたり協力して頂いたメーカー	70
A.5.1	芝川製作所	70
A.5.2	鴨下精衡所	70

目 次

1.1	CANGAROO-II(7m) チェレンコフ望遠鏡	8
2.1	核カスケード発達の模式図	14
2.2	1TeV ガンマ線と 3TeV 陽子による空気シャワーの発達	14
2.3	荷電粒子および光子の運動量・エネルギーの変化の比	17
2.4	Cherenkov 輻射の定性的説明	17
3.1	オーストラリア	18
3.2	(a):CANGAROO 3.8m 望遠鏡 (b):CANGAROO-II7m 望遠鏡 (c):拡張された CANGAROO-II 10m 望遠鏡	19
3.3	CANGAROO-III 計画のスケジュール (日本の会計年度は 4 月から翌年の 3 月まで)	20
3.4	4 台の CANGAROO-III 望遠鏡 (合成写真: 2003 年には実物が完成予定)	20
3.5	CANGAROO-III 望遠鏡の主鏡部分	21
3.6	チェレンコフ光によるシャワーイメージのステレオ観測	22
4.1	CANGAROO-III 望遠鏡のカメラに用いる PMT(Hamamatsu R3479)。直径 19mm の丸型で、有感領域の直径は 15mm 以上である。[Appendix A.1]	24
4.2	(a):CANGAROO-III 望遠鏡のカメラの PMT の配置 (b):各 PMT の有感領域	24
4.3	ライトガイドの有無での、カメラの有感領域の違い	25
5.1	CANGAROO-II 望遠鏡の主鏡	26
5.2	CANGAROO-II 望遠鏡のカメラに用いられている PMT(Hamamatsu R4124uv)	27
5.3	CANGAROO-II 望遠鏡のカメラの形状	27
5.4	CANGAROO-II ライトガイドへ入射する光の入射角度	28
5.5	(a)(b)(c):Winston Cone の断面 (d):Winston Cone(a,b,c の曲線を回転させたもの)	29
5.6	Winston Cone の最大入射角度と、傾き・上端の関係	30
5.7	主鏡以外からカメラに入射する、ノイズとなる光	30
5.8	LG-CII type1 : 色の着いている部分は平面	31
5.9	Winston Cone を用いたライトガイド (type3、type4 の色の着いている部分は平面)	32
5.10	放物体を用いたライトガイド (type6、type7 の色の着いている部分は平面)	32
5.11	シミュレーションの条件	33
5.12	ライトガイドへの入射光と底面を通過する光の関係	34
5.13	CANGAROO-II 望遠鏡のためのライトガイドの積分集光率の比較	36
5.14	CANGAROO-II 望遠鏡のためのライトガイドの積分集光率の比較	36
5.15	CANGAROO-II 望遠鏡のためのライトガイドの積分集光率の比較	36

5.16	CANGAROO-II ライトガイドの内面反射率の角度依存性 (入射光の波長 470nm)	37
5.17	CANGAROO-II ライトガイドの、シミュレーションと実測での集光率の比較	37
6.1	CANGAROO-III 望遠鏡の主鏡	38
6.2	CANGAROO-II 望遠鏡と CANGAROO-III 望遠鏡のカメラの形状	39
6.3	CANGAROO-III ライトガイドへ入射する光の入射角度	39
6.4	CANGAROO-III 望遠鏡のカメラに用いる PMT(Hamamatsu R3479)	40
6.5	LG-CIII type2 の上面	41
6.6	Winston Cone を用いたライトガイド	42
6.7	CANGAROO-III 望遠鏡のためのライトガイドの積分集光率の比較	44
6.8	CANGAROO-III 望遠鏡のためのライトガイドの積分集光率の比較	44
6.9	CANGAROO-III 望遠鏡のためのライトガイドの積分集光率の比較	44
6.10	ライトガイドと PMT を上から見た図	45
6.11	Winston Cone を用いたライトガイド (type3,type4,type03,type04 の色のついて いる部分は平面)	46
6.12	放物体を用いたライトガイド (type6,type7,type06,type07 の色のついて いる部分は平面)	46
6.13	ライトガイド上面に入射させる光の範囲	47
6.14	CANGAROO-III 望遠鏡のためのライトガイドの積分集光率の比較	49
6.15	CANGAROO-III 望遠鏡のためのライトガイドの積分集光率の比較	49
6.16	CANGAROO-III 望遠鏡のためのライトガイドの積分集光率の比較	49
6.17	CANGAROO-III 望遠鏡のためのライトガイドの積分集光率の比較	50
6.18	CANGAROO-III 望遠鏡のためのライトガイドの積分集光率の比較	50
6.19	CANGAROO-III 望遠鏡のためのライトガイドの積分集光率の比較	50
6.20	(a):PMT の内部構造、(b):新しいライトガイドの形状	52
6.21	PMT 表面に到達する光の割合と実際の集光率の関係 (a):入射光が PMT 内部の 有感領域まで到達する割合で、すなわちライトガイドの実際の集光率 (b):PMT 表面に入射するが有感領域には到達しない割合 (c):PMT 表面まで到達する光の 割合ですなわち (a) と (b) の合計	54
6.22	PMT 表面に到達する光の割合と実際の集光率の積分値での関係 (a):入射光が PMT 内部の有感領域まで到達する割合で、すなわちライトガイドの実際の集光率 (c):PMT 表面まで到達する光の割合 (d):ライトガイドの集光率を 100 % とし た場合のライン	54
7.1	地上で観測されるチェレンコフ光の波長分布	55
7.2	新しいライトガイドの内面反射率の波長依存性の実測装置	56
7.3	新しいライトガイドの内面反射率の波長依存性	56
7.4	シミュレーションと実際に製作したライトガイドでの、入射角度による光の像の比較	57
7.5	新しいライトガイドの集光率の実測装置	58
7.6	S_1 はライトガイド上面の厚みの内側の面積で S_2 は底面積。 $S_1/S_2=2.57$	59
7.7	Photodiode を用いた、シミュレーションと実測による集光率の比較	59
8.1	CANGAROO-III チェレンコフ望遠鏡で用いるのに最適なライトガイドの形状	61
8.2	CANGAROO-III チェレンコフ望遠鏡で用いるのに最適なライトガイドの設計図	62

8.3	(左):CANGAROO-II 望遠鏡で現在用いられているライトガイド (右):今回開発した CANGAROO-III チェレンコフ望遠鏡で用いるのに最適なライトガイド	63
8.4	ライトガイドへの光の入射角度と微分集光率の関係	64
A.1	Hamamatsu R3479 の各部の寸法	65
A.2	シンチレーターの光電陰極スペクトル反応と発光スペクトル	66
A.3	CANGAROO-III 望遠鏡のカメラ部分	67
A.4	ライトガイドと PMT の結合器具	68

表 目 次

6.1 LG-CIII type2 と LG-CIII type02 の集光率の比較	51
A.1 Hamamatsu R3478 の概要	66

Chapter 1

Introduction

1.1 新しい天文学を目指す

現在、宇宙の研究は可視光だけではなく電磁波の様々な波長領域で行われている。電波、赤外線、X線、ガンマ()線などの新しい宇宙の窓が開かれる度に想像もしなかった宇宙の姿が明らかになり、人類に驚嘆と新しい知見を与えてきた。

これから21世紀の研究として挑戦すべきテーマの一つに高エネルギー粒子を使つての宇宙の研究があげられる。その目的は、検出器の規模に制限がある人工衛星では観測不可能な超高エネルギー(100GeV ~ 100TeV : [1GeV=10⁹eV, 1TeV=10¹²eV])ガンマ線、および10²⁰eVを超える最高エネルギー領域の宇宙線の観測を通して、宇宙での高エネルギー現象を研究することにある。

1.2 宇宙線観測の歴史

宇宙線が1912年にHessによって発見され、その後に行なわれた様々な観測の結果は素粒子物理学の発展に大きく貢献してきた。そして1950年代に入り加速器建設競争に火がつくまで、宇宙線研究が素粒子物理学をリードし続けたと言えるだろう。この時代には、宇宙起源のガンマ線放射が存在する可能性が理論的に指摘されるなどして、宇宙線が天体物理と深く関わっていた。1952年頃には、宇宙線が星間ガスと相互作用して生成される π^0 中間子の崩壊に伴ってごく弱いガンマ線が放射されることが、早川らによって予言されていた。1960年代に入って、ロケット観測による予期せぬX線天体Sco X-1の発見(1962年)に刺激されて、人工衛星によるX線・ガンマ線観測が始まった。UHURU(1970)、Einstein(1978)によるX線観測やOSO-3(1972)、SAS-2(1973)、COS-B(1975)などによるガンマ線観測で、高エネルギー天体物理学が幕を開けた。そしてガンマ線の観測では、銀河面に沿って広がったガンマ線放射が確認された。それと同時に、他波長で発見されたパルサーやクエーサーなどからもX線・ガンマ線が放出されていることがわかった。

1991年には、コンプトンガンマ線天文台衛星(Compton Gamma-Ray Observatory)の登場によって、さらに多くの天体からガンマ線が放射されていることがわかり、銀河面からのガンマ線分布もその精度を増してきた。その結果、我々の宇宙のいたるところに粒子が加速される場所が存在することがわかってきた。そしてその粒子が加速される場所こそが、宇宙線の源であると考えられるようになった。また、このような加速現場の多くが、超新星爆発や中性子星やブラックホールなどが関わった天体に見られるという重要な発見もされた。

それに加えて、地上でのチェレンコフ望遠鏡によるTeVガンマ線の観測が、ガンマ線天体物理

学の更なる飛躍を可能にしようとしている。国際的な協力と競争によって、検出感度が向上してきている上に、世界各地に TeV ガンマ線望遠鏡が建設されつつあることで、ほぼ全天が観測対象となりつつある。こうしてガンマ線観測天体数が飛躍的に増加することは、かつて焦点を結ぶ X 線望遠鏡を初めて搭載した Einstein 衛星によってもたらされた X 線天文学の発展に対応する、ガンマ線天文学の質的飛躍の時代の到来を意味する。X 線天文学が Einstein 衛星以降、原子核物理や一般相対論に基づいて理論的に予想されていたに過ぎなかった中性子星やブラックホールを次々と発見しその正体を明らかにしてきたように、今後ガンマ線天文学によって未知の現象、未知の天体の発見を期待することができるであろう。

1.3 超高エネルギー断面から見た宇宙

宇宙現象の観測的研究は、これまで高エネルギー電子がシンクロトロン放射などで放出する電波から X 線に至る波長領域の電磁波の観測によって主に推進されてきた。その一方で、電子の 2000 倍もの大きな質量エネルギーを持つ陽子を主成分とする、超高エネルギー宇宙線が宇宙にあまねく存在することが知られている。高エネルギー素粒子の担うエネルギー総量は莫大で、宇宙現象のエネルギーの供給や転換、散逸などの諸過程において重要な役割を果たしている。

宇宙の高エネルギー粒子の直接的な検出手段である超高エネルギーガンマ線の観測が最近になって、日豪の国際共同研究である CANGAROO 実験などにより可能になった。

高エネルギーガンマ線観測により、超新星残骸や爆発の後に残されるブラックホールや中性子星近傍、活動銀河での巨大質量のブラックホールやそのジェット現象、銀河団などでの超高エネルギー現象の研究・解明が世界的競争になっている。



Figure 1.1: CANGAROO-II(7m) チェレンコフ望遠鏡

Chapter 2

ガンマ線の検出原理

ガンマ線を検出する方法は、直接ガンマ線を観測するのではなく、ガンマ線が作る空気シャワーからのチェレンコフ光を地上に設置された望遠鏡で集光する。

ここでは、チェレンコフ光が発せられるまでの理論を説明する。

2.1 制動輻射

高速の電子が物質中を通過すると、物質中の原子核のクーロン場で力を受けて進行方向が曲げられる。電子は加速度を受けるので電磁波を放出する。この現象を制動輻射とよんでいる。高エネルギー電子が物質中でエネルギーを失うもっとも重要な過程であると同時に、X線やガンマ線発生の重要な過程である。高温プラズマ内ではプラズマ中の電子はイオンやほかの電子の電場で曲げられてやはり制動輻射を起こす。この場合、熱平衡にあるプラズマ中の電子による輻射であるので熱制動輻射と呼ばれ、高温プラズマからの光やX線放出のための重要な過程である。熱制動輻射の過程は、束縛状態にない電子の起こす輻射であるため、自由-自由遷移とも呼ばれている。

荷電 Ze をもつ原子核に対して衝突パラメータ b の位置を電子が通過すると、電子は通路に対して垂直方向に $\Delta v = 2Ze^2/bmv$ だけ速度を得ることになる。

原子核のそばを通過する際に受けた加速度を \ddot{y} とすると、

$$\frac{2e^2}{3c^3} \int_{-\infty}^{+\infty} |\ddot{y}|^2 dt \quad (2.1)$$

だけの輻射を行なうことになる。どのような波長の電磁波を放出したかを調べるには、 \ddot{y} をフーリエ変換してその周波数成分を調べればよい。

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{+\infty} |\ddot{y}|^2 dt &= 4\pi \int_0^{+\infty} d\omega \left| \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \ddot{y} e^{i\omega t} dt \right|^2 \\ &= \frac{1}{\pi} \int_0^{+\infty} d\omega \left| \int_{-\infty}^{+\infty} \ddot{y} e^{i\omega t} dt \right|^2 \end{aligned} \quad (2.2)$$

\ddot{y} が大きな値をもつのは、電場の影響の大きい b/v の時間の範囲であることを考えると、

$$\left. \begin{aligned} \omega < b/v \text{ に対して } \int_{-\infty}^{+\infty} \ddot{y} e^{i\omega t} dt &= \simeq \Delta \dot{y} = \Delta v \\ \omega > b/v \text{ に対して } &= \simeq 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

となる。

したがって各振動数別のエネルギー放出量としては $\omega < b/v$ の場合、

$$\frac{2e^2}{3\pi c^3} |\Delta v|^2 d\omega = \frac{8}{3\pi} \frac{Z^2 e^2}{\hbar c} \left(\frac{e^2}{mc^2} \right)^2 \left(\frac{c}{v} \right)^2 \frac{1}{b^2} \hbar d\omega \quad (2.4)$$

が得られる。いろいろな衝突パラメータ b があるので、 $2\pi b db$ を掛けて積分すると、

$$\frac{16}{3} \frac{Z^2 e^2}{\hbar c} \left(\frac{e^2}{mc^2} \right)^2 \left(\frac{c}{v} \right)^2 \ln \left(\frac{b_{max}}{b_{min}} \right) \hbar d\omega \quad (2.5)$$

が得られる。放出される光子に対する微分断面積としては、上の式を $\hbar\omega$ または $h\nu$ で割って、

$$\sigma(v, \nu) d\nu = \frac{16}{3} \frac{Z^2 e^2}{\hbar c} \left(\frac{e^2}{mc^2} \right)^2 \left(\frac{c}{v} \right)^2 \ln \left(\frac{b_{max}}{b_{min}} \right) \frac{d\nu}{\nu} \quad (2.6)$$

ここで $\ln(b_{max}/b_{min})$ は遮蔽係数と呼び、また X 線、光、電波の領域の制動輻射の場合は $(\sqrt{3}/\pi) \ln(b_{max}/b_{min})$ をガウント因子 (Gaunt factor) と呼ぶ。これは物質やプラズマの性質、電子のエネルギー、放出される X 線の振動数などによって決まる係数である。

a. 制動輻射の特徴

定性的な議論で導いた (2.5)、(2.6) 両式をもとに制動輻射の特徴的な事柄をいくつか述べておく。

ひとつは断面積やエネルギー放射が Z^2/m^2 に比例していることである。これは制動輻射の量が加速度の二乗に比例しているため、原子番号の大きい物質中で極めて断面積が大きいことがわかる。トムソン散乱、コンプトン散乱、電離損失では物質中の電子の数に比例して現象が起こるので、原子当たりにおいて Z に比例する断面積をもっていた。制動輻射では Z^2 に比例している。 $1/m^2$ に比例していることは質量の小さい荷電粒子、つまり電子には重要な過程であるが、陽子のように重くなるとこの過程は重要でないことを示している。実際、陽子による制動輻射が大切な役割を演じている過程はこれまで知られていない。

第二に微分断面積が $d\nu/\nu$ の形をしていることである。エネルギーの低い光子はたくさん放出されるが、エネルギー的には単位振動数内にあるエネルギーはほぼ同じである。

制動輻射の正確な取り扱いについては数多くの計算が行われてきている。ここでは熱制動輻射のような低エネルギー電子による非相対論的な領域の場合と、宇宙線中の高エネルギー電子の起こす制動輻射のように相対論的な領域に分けて述べていくことにする。

b. 非相対論的な領域

式 (2.6) で b_{min} については古典的な取り扱いをすれば、電子の横方向からの速度変化 Δv が元の速度 v 程度になる場所が b_{min} を与えることになる。この場合は、

$$b_{min} \approx \frac{Ze^2}{mv^2} = \frac{\hbar}{mv} \cdot \frac{Ze^2}{\hbar c} \cdot \frac{c}{v} \quad (2.7)$$

与えられる。 $(Ze^2/\hbar c)(c/v)$ が 1 より小さい場合には電子の波長 \hbar/mv の方が大きくなるので、 $b_{min} = \hbar/mv$ とならなければならない。 b_{max} については放出する電磁波の周波数より速い運動の変化の成分がなければいけないので、

$$b_{max} \approx \frac{v}{\omega} \quad (2.8)$$

となる。したがって式 (2.5) のガウント因子 $g = (\sqrt{3}/\pi \ln(b_{max})/(b_{min}))$ は

○ $\frac{Ze^2}{\hbar} > 1$ の場合には

$$g \approx \frac{\sqrt{3}}{\pi} \ln \left(\frac{mv^3}{Ze^2\omega} \right) \quad (2.9)$$

程度と期待される。

ボルン近似の計算によれば

$$g \approx \frac{\sqrt{3}}{\pi} \ln \left(\frac{\gamma^2 mv^3}{Ze^2\omega} \right), \text{ただし } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad (2.10)$$

でほぼ一致した値を与えている。

○ $\frac{Ze^2}{\hbar} < 1$ の場合には

$$g = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \ln \left(\frac{mv^2}{\hbar\omega} \right) \quad (2.11)$$

となり、ボルン近似の計算によれば

$$g = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \ln \left(\frac{2\gamma^2 mv^2}{\hbar\omega} \right) - \left(\frac{c}{v} \right)^2 \quad (2.12)$$

で与えられている。

ボルン (Born) 近似は衝突前後の電子の波動関数を平面波近似したものである。実際はクーロン場の中で電子の波動関数が歪む。この影響を取り入れたより正確な答えは、

$$g \simeq \frac{\sqrt{3}}{\pi} \frac{v_i}{v_f} \frac{(1 - \exp(-2\pi\xi_i))}{(1 - \exp(-2\pi\xi_f))} \ln \left(\frac{v_i + v_f}{v_i - v_f} \right) \quad (2.13)$$

で与えられている。ここで v_i, v_f は電子の衝突前後の速度、 $\xi_i = Ze^2/\hbar v_i$, $\xi_f = Ze^2/\hbar v_f$ である。

式 (2.12) で、

$$\hbar\omega = \frac{1}{2}m(v_i^2 - v_f^2), mv^2 = \frac{1}{4}m(v_i + v_f)^2 \quad (2.14)$$

とおけば $\ln((v_i + v_f)/(v_i - v_f))$ の項がでる。前についている \exp の項は電子波が歪んだ効果を表している。断面積を書くと式 (2.6) から

$$\sigma(\nu)d\nu = \frac{16}{3} \frac{Z^2 e^2}{\hbar c} \left(\frac{e^2}{mc^2} \right)^2 \left(\frac{c}{v_i} \right)^2 \frac{v_i}{v_f} \frac{(1 - \exp(-2\pi\xi_i))}{(1 - \exp(-2\pi\xi_f))} \ln \left(\frac{v_i + v_f}{v_i - v_f} \right) \cdot \frac{d\nu}{\nu} \quad (2.15)$$

となる。これが低速電子による制動輻射の正確な式である。

2.2 電子・陽電子対創生

光子のエネルギーが電子の質量エネルギー mc^2 の2倍を超えると電子対が発生することがある。

エネルギーの高い光子、すなわちガンマ線を Wilson 霧箱や原子核乾板に当てると、Compton 散乱によってはねとばされる電子の飛跡のほかに、1つの点から2個の電子が互いに狭い角度で発生するのを観察することができる。霧箱に磁場をかけると相反する向きに曲げられることから、これが正と負の荷電をもっていることが知られる。この正の電荷を持つ電子を陽電子 (positron) とよぶ。2つの電子の運動エネルギーの和は光子のエネルギー $h\nu$ から2個の電子の質量エネルギー $2mc^2$ を引いたものに等しい。

電子の全エネルギーは $\sqrt{m^2c^4 + p^2c^2}$ で表され、古典的な考え方ではエネルギーは正符号をとるが、Dirac の理論によれば、エネルギーの符号は正負両方をとるのである。負エネルギーの粒子というのは、たとえば力をかけて押してやれば手前にもどってくる、引いてやれば向こうに逃げていく大変奇妙な性質を持つものである。Dirac は空間のあらゆる点において、負エネルギーのあらゆる状態に電子がいっぱいにつまっている状態が真空であるとするのである。その個々の電子の存在する場所をその周辺と区別することができないから、われわれはこの状態を“何も無い”真空と認識するというのである。また、負エネルギー状態が満員になっているために正エネルギー電子がどんどん負エネルギー状態になってしまうということが起こらないのである。ところで、電子の正エネルギー状態と負エネルギー状態とは $2mc^2$ のエネルギーで隔てられているが、 $2mc^2$ 以上のエネルギーの光子 (ガンマ線) は負状態の電子を正状態に押し上げることがある。そうすると正状態の電子、すなわち、われわれが普通に電子として知っているものの他に、そこには今までぎっしり一杯だった負状態の電子の群の中に一か所穴があくわけである。この穴はちょうど液体の中の泡というものが均一な液体の中の穴であって、重力に逆らって運動するのと同じように、負状態の電子のちょうど裏返しの性質を持つ。すなわち、あたかも正状態で正電荷の電子のようにふるまうのである。結局、今まで電子のなかった所に電子と正電荷の電子のように見えるもの、すなわち陽電子とが対になって発生するのである。この現象が電子・陽電子対創生である。

光子は全く何も無いところではそのエネルギーが $2mc^2$ を超えても電子対をつくることはできない。それは何も無いところで光子だけではエネルギー保存則、運動量保存則を同時に満足させることができないからである。しかし原子核の近傍では、電子または陽電子は原子核による散乱を受け運動量を授受することによって、2つの保存則を同時に満たすことが可能になってくるので、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つくるのである。原子核1個あたりの電子対創生の断面積は $h\nu = 2mc^2$ から始まって $h\nu$ とともに増大し $h\nu \gg mc^2$ で

$$\sigma_p(\text{cm}^2) \approx \frac{Z^2}{137} \gamma_e^2 \left(\frac{28}{9} \log \frac{183}{Z^{1/3}} - \frac{2}{27} \right) \quad (2.16)$$

に近づく。ただし、 Z は物質の原子番号、 γ_e は電子半径である。 Z の2乗に比例する、すなわち原子番号の高い物質ほど電子対創生を起こしやすい。 $1\text{g}/\text{cm}^2$ の物質中で、この現象を起こす確率は

$$\cong \frac{N}{A} \cdot \sigma_p = \frac{NZ^2}{A \cdot 137} \gamma_e^2 \left(\frac{28}{9} \log \frac{182}{Z^{1/3}} - \frac{2}{27} \right) = \frac{1}{X_p} \quad (2.17)$$

である。この逆数 X_{pg}/cm^2 は、物質の中を光子がこのくらい走る間に $1/e$ の個数に減少してしまうということである。 X_p を radiation length X_0 と比べると、大体 $X_0 \approx (7/9)X_p$ である。

2.3 空気シャワー現象

極めてエネルギーの高い宇宙線粒子（陽子または原子核）が地球の外から大気中に入射すると空気中の原子核と次々に衝突、反応をおこして、最初1個の粒子が大気中を降下するとともに電子、 π (pion), μ (muon), それに K 粒子 (kaon), 粒子の大群（2次的粒子）となって大地に到着する。この現象を空気シャワーとよんでいる。空気シャワーの総粒子数は 10^5 個のものから 10^9 個のものまでがよく観察されている。

1次宇宙線がガンマ線（光子）の場合、大気中において電子・陽電子対創生 (pair creation) と電子の制動輻射 (bremsstrahlung) によるガンマ線の放出を起こす。電子と光子とは交互にこの2つの現象を繰り返して電子（陽電子）および光子を増殖させる。この様にして、電子および光子が物質中で増殖する現象をカスケードシャワーという。

それに対し、1次宇宙線がハドロン（陽子・原子核）の場合は、核カスケードを生成する (Fig.2.1)。1次粒子（ハドロン）は大気中の原子核と衝突し、多数の π^\pm 、K 粒子が生成される。このうちの大体半分程度が π^0 である。 π^0 は寿命が 0.84×10^{-16} 秒と非常に短く、

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$$

と2個の γ に崩壊し、 γ は大気中で電子と光子のカスケードシャワーを発達させる。 π^\pm は更に核反応を起こしたり、エネルギーの低くなったものは次のように崩壊 (2.6×10^{-8} 秒) して、

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

μ とニュートリノを生成する。 μ 粒子は電離損失 (ionisation loss) が小さく、寿命が 2.2×10^{-6} 秒と比較的長く、貫通力も強いために殆どが地表にまで到達する。したがって、ハドロンシャワー中の荷電粒子のほとんどが電子・陽電子である。

つまり、1次宇宙線がガンマ線である場合とハドロンである場合とでは空気シャワーを発達させる過程が異なる。またシャワーの発達イメージも異なってくる。ガンマ線のシャワーではシャワー軸の周りに粒子が集中するのに対し、ハドロンによるシャワーではシャワー軸に対して横方向に広がる (Fig.2.2)。

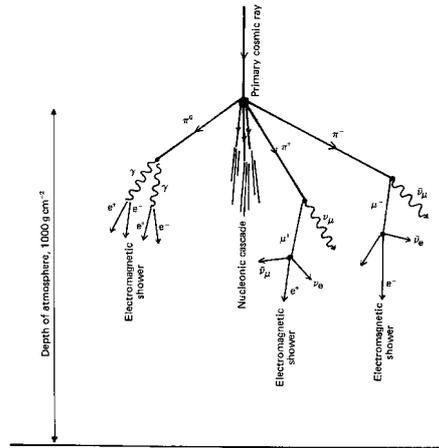


Figure 2.1: 核カスケード発達の模式図

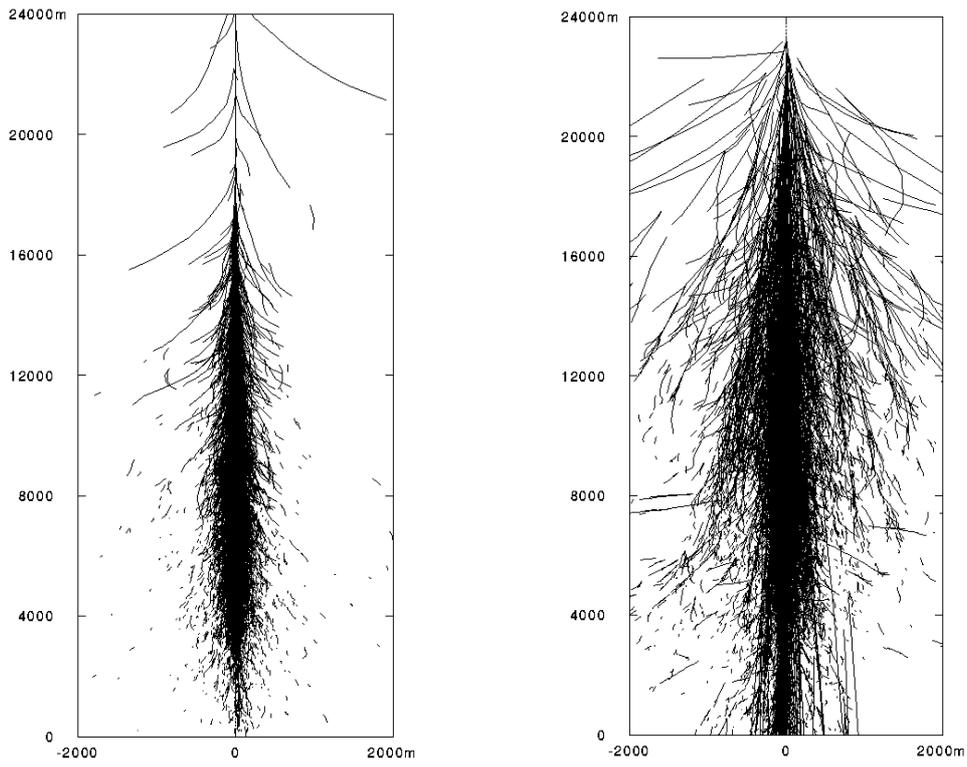


Figure 2.2: 1TeVガンマ線(左)と3TeV陽子(右)による空気シャワーの発達。空気シャワー中の荷電粒子の軌跡を描いたもの。縦軸は高度1600mをゼロにしている。

2.4 チェレンコフ光

荷電粒子が物質中を通る際、そのエネルギーの一部を通路の近傍にある原子周辺の電子に与えて、電子を原子の束縛から離すか（電離）、あるいは原子を高いエネルギー準位に励起する。これは物質中の個々の原子に原因するエネルギー損失であるが、荷電粒子はこの2つの原因のほかに原子が集団として存在していることによるチェレンコフ輻射 (Cherenkov Radiation) と呼ばれる電磁波の輻射によってエネルギーを失う。

光速で走る荷電粒子は、その周りに電磁波を伴っているような形で走っている。つまり光速の荷電粒子は、その周りに光子の群をぶら下げて走っているのである。光子が荷電粒子の周りには定性的には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てよい。ただし、荷電粒子が真空中を走っている際には、この光子は粒子から離れることはない。すなわち、真空中を走る荷電粒子はそのままでは光子を放出しない。このことは次のように証明される。

1. 光子の運動量とエネルギーとの比は $1/c$ である。

2. 荷電粒子の全エネルギーは

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4 \quad (2.18)$$

だから、荷電粒子のエネルギーの変化 δE と運動量の変化 δp との関係は式 (2.18) を微分して

$$E \delta E = p c^2 \delta p \quad (2.19)$$

である。

3. したがって、この荷電粒子が光子を放出するとすれば、その運動量とエネルギーの比は、

$$\frac{\delta p}{\delta E} = \frac{E}{p c^2} = \frac{1}{c} \left[1 + \left(\frac{m c}{p} \right)^2 \right]^{1/2} = \frac{1}{\beta c} \quad (2.20)$$

となる筈で、明らかに $1/c$ よりも大きいから、運動量およびエネルギーの保存則が成り立つ限り、光子は荷電粒子から離れて自由になることは出来ない。

ところが媒質中では、光子が抵抗を受けて運動量の一部を授受することが出来るから事情が異なってくる。媒質中（屈折率 n ）の光の速度 c' は真空中の光の速度 c と次のような関係がある。

$$c' = \frac{c}{n} \quad (2.21)$$

そうしてこの媒質中では光子の運動量とエネルギーの比は n/c となるから、式 (2.20) から

$$\frac{1}{\beta c} = \frac{n}{c} \quad (2.22)$$

すなわち、

$$v = \frac{c}{n} \quad (2.23)$$

であれば、光が粒子の進行方向に放出されるとしても、運動量およびエネルギーの保存則に反することにならない。もし、

$$v > \frac{c}{n} \quad (2.24)$$

であれば、Fig.2.3から分かる様に、粒子の進行方向に対して、

$$\theta = \cos^{-1} \frac{1/\beta c}{n/c} = \cos^{-1} \frac{c}{nv} \quad (2.25)$$

の角度で出る光に対しては、運動量およびエネルギーの保存則が満たされる。

実際、 $v \geq c/n$ の条件が満たされるときには式 (2.25) で表せる方向にチェレンコフ光を観察することが出来る。この輻射は屈折率だけに依存し、個々の原子の性質にはよらない。

また、 $v \geq c/n$ の条件が満たされる時、荷電粒子の走る単位長さ当たりに放出される光子の数 N は、光子の周波数 ν と $\nu + d\nu$ との間で、

$$N d\nu = \frac{2\pi e^2}{\hbar c^2} \left(1 - \frac{c^2}{n^2 v^2} \right) d\nu \quad (2.26)$$

と表される。

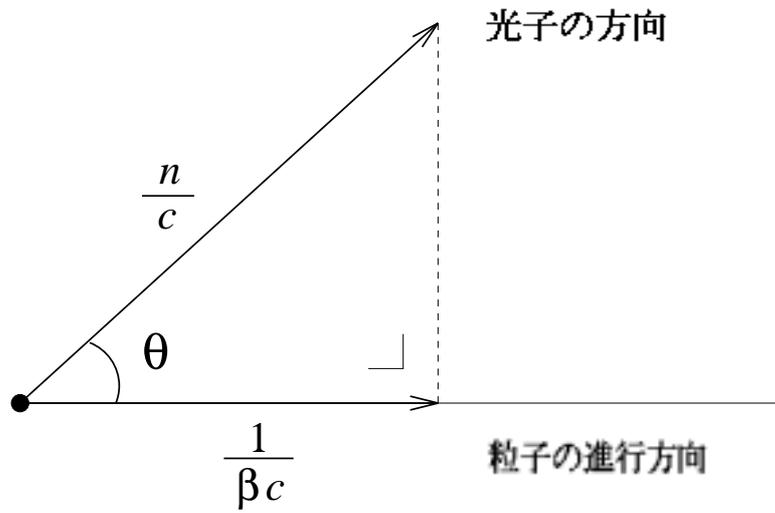


Figure 2.3: 荷電粒子および光子の運動量の変化とエネルギーの変化との比をそれぞれ矢印で表わしたものの。

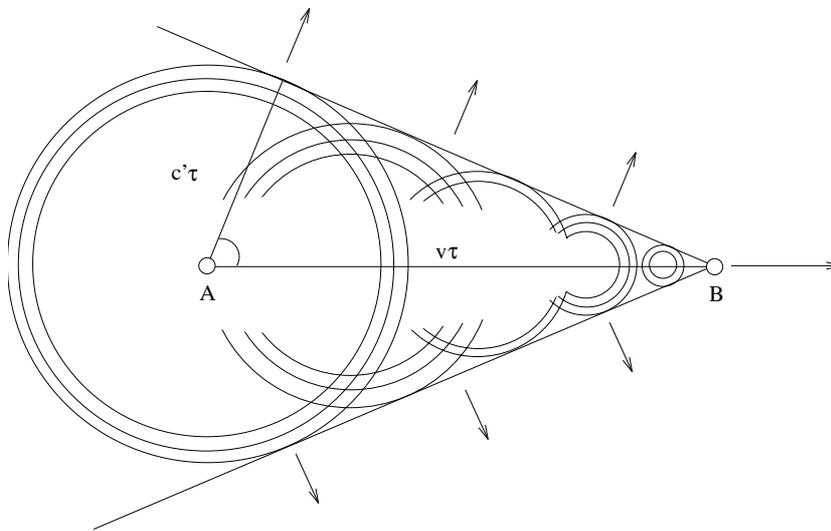


Figure 2.4: Cherenkov 輻射の定性的説明

粒子が A にあったときに出た光子は τ 秒後に半径 $c\tau$ の球面上にあり、既に B にある粒子には追いつくことは出来ず光として放出される。

Chapter 3

CANGAROO Project

我々甲南大学宇宙粒子研究室は、東京大学宇宙線研究所 (ICRR) を中心とした CANGAROO Project (カンガルー計画) に参加し、高エネルギーガンマ線の観測を行っている。

3.1 CANGAROO 計画

CANGAROO (Collaboration of Australia and Nippon (Japan) for a GAMMA Ray Observatory in the Outback) とは、天体からの超高エネルギーガンマ線の存在と性質の解明を目指した日本・オーストラリアの共同研究で、南オーストラリア州ウーメラ (東経 136 度、南緯 31 度) に設置した 3.8m 口径の反射望遠鏡に引き続いて新たに建設された 10m 望遠鏡を用い、ガンマ線がもとになり形成される空気シャワーが大気中で放出するチェレンコフ光を通して、ガンマ線天体の観測を行っている。

CANGAROO の利点は次のようなものである。ウーメラの晴天率は約 80 % と高く、周囲に明るい都市がないことからチェレンコフ光を用いたガンマ線観測には適した場所である。また、南半球の中緯度では銀河中心を天頂近くで観測できるため、北半球よりも銀河系内ガンマ線天体の観測においては有利である。そしてこれまでほとんどが北半球で行われていたガンマ線観測に加え南半球での観測を行うことで、このエネルギー領域で全天をカバーできるようになる。[1]



Figure 3.1: オーストラリア

高エネルギーガンマ線で天体を観測することで可視光ではわからない激しい高エネルギー天体現象を明らかにするために、CANGAROO グループは南天から見えるパルサーやその周りの星雲、超新星、活動銀河核などをターゲットとして 1992 年から観測を続けている。その結果、EGRET(コンプトン天文台衛星に搭載されたガンマ線検出器の一つ)で見ついているパルサーのうちの 3 つ(かに星雲、ほ座パルサー、パルサー 1706-44)からエネルギーが TeV 領域のガンマ線の非パルス成分の検出に成功し、また超新星残骸 SN1006 からもガンマ線放出の証拠をつかんでいる。このように、天体における高エネルギー現象の解明に向けて世界的にも大きな役割を果たしている。

世界各地で同種の観測装置が増えてきているが、CANGAROO 3.8m 望遠鏡 (Fig. 3.2-(a)) は鏡面精度の良い反射鏡と 256 素子高分解能カメラによって、超高エネルギーガンマ線天文学のパイオニアとしての役割を果たしてきた。

CANGAROO グループは今までの成果を基に高精度の観測を目指して大口径望遠鏡 (CANGAROO-II) の建設をウーメラで進め、1999 年 3 月に 7m 口径 (Fig. 3.2-(b)) として完成させ 5 月から定常観測を開始した。2000 年 3 月にはこの望遠鏡を 10m 口径に拡張し (Fig. 3.2-(c)) 観測可能なエネルギー領域は 300GeV 程度まで下がり、高い統計精度での観測が可能となった。さらに、チェレンコフ光をステレオ (立体的に) 観測して到来方向やエネルギーの精度を上げるために、10m 望遠鏡を 4 台用いる CANGAROO-III 計画が 1999 年度より文部省科学研究費中核的拠点 (COE) 形成プログラムとしてスタートすることになった。そして 2004 年には 4 台の望遠鏡を揃えた高精度の観測が始まる予定で、7m 望遠鏡の口径 10m への拡張は、この計画の第一段階として行われた。

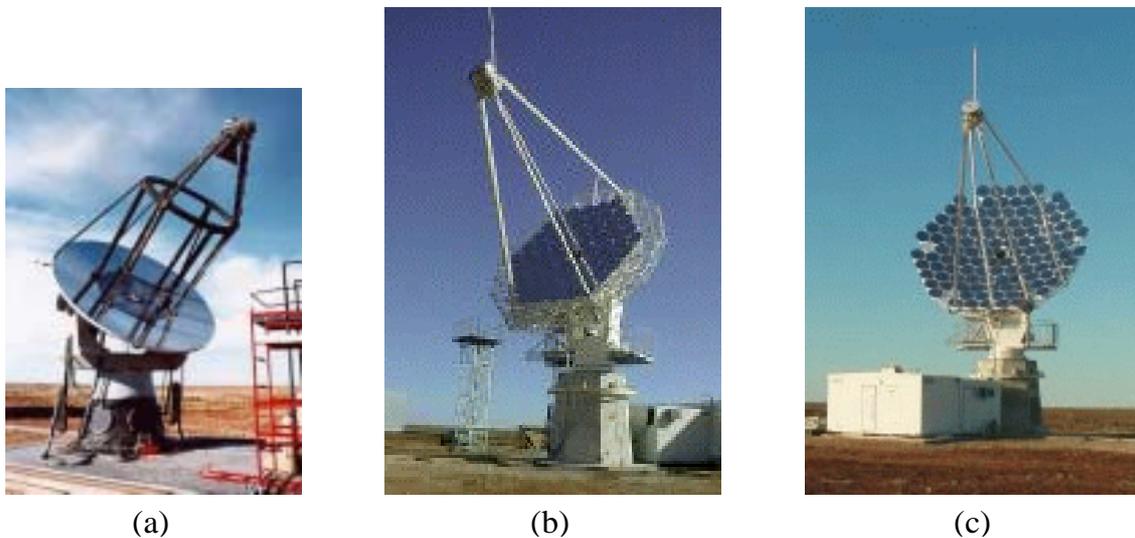


Figure 3.2: (a):CANGAROO 3.8m 望遠鏡 (b):CANGAROO-II 7m 望遠鏡 (c):拡張された CANGAROO-II 10m 望遠鏡

3.2 CANGAROO-III 計画

3.2.1 CANGAROO-III 計画の概要

CANGAROO-I(3.8m) 望遠鏡、CANGAROO-II(7m) 望遠鏡に続いて CANGAROO-III 計画は、4 台の 10m 望遠鏡を用いてチェレンコフ光を放出する空気シャワーのイメージを立体的に観測し、天体から発せられる 100GeV 領域のガンマ線の研究を可能にする計画である。CANGAROO-III 計画は、1999 年 4 月に始まり 5 ヶ年計画で進められている (Fig. 3.3)。

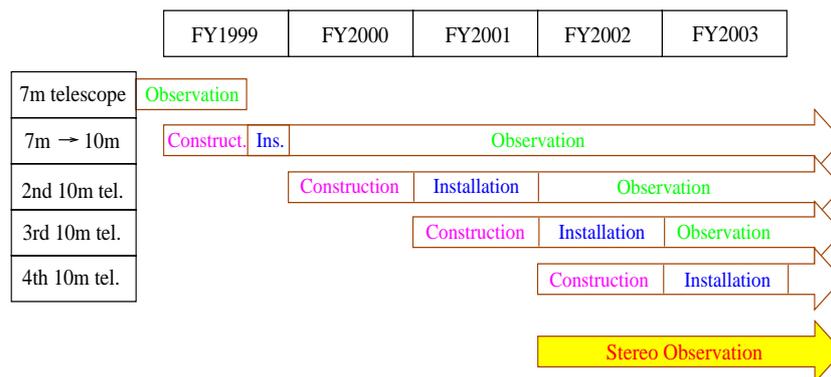


Figure 3.3: CANGAROO-III 計画のスケジュール (日本の会計年度は 4 月から翌年の 3 月まで)

現在、人工衛星によるガンマ線観測のエネルギー上限値は 30GeV 程度であり、一方地上におけるガンマ線観測のエネルギー下限値は数百 GeV 程度である。CANGAROO-III 計画で口径 10m の巨大なチェレンコフ望遠鏡を 4 台用いてステレオ観測することによって感度を上げ、人工衛星と地上による観測とのエネルギースペクトルの空白を埋めていくことが期待されている。



Figure 3.4: 4 台の CANGAROO-III 望遠鏡 (合成写真：2003 年には実物が完成予定)

3.2.2 観測装置

高エネルギーガンマ線は地球に入射すると大気上層で空気シャワーを生成し、チェレンコフ効果で青く微弱な光を放出する。この光を反射鏡で集光して焦点面で結像させ、光電子増倍管を並べたカメラで電気信号に変換し、接続した電子回路で処理した後に計算機によりデータとして記録する。

チェレンコフ光による観測に必要な焦点面における像の精度は0.1度程度であるため、CANGAROO-III 望遠鏡の反射鏡は、局所的には光学望遠鏡と同様の面精度を持つ小型球面鏡を多数並べて放物反射面を構成する方法でつくられている。このような方法にすると、光学望遠鏡では実現が困難な10m以上の大型反射鏡を安価で製作することができる。

正確には114枚の直径80cmの小型球面鏡からなる焦点距離8mの複合鏡で、鏡はプラスチックでラミネートされたものを用いる (Fig. 3.5)。このような鏡は非常に軽く支持部への負担が少なくすむ。

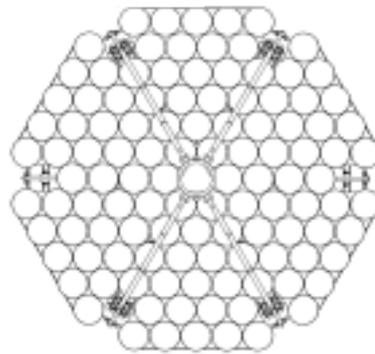


Figure 3.5: CANGAROO-III 望遠鏡の主鏡部分

3.2.3 ステレオ観測

ガンマ線の空気シャワーが放出するチェレンコフ光のイメージを複数の望遠鏡でステレオ観測すると、イメージの軸の交点としてシャワーの到来方向が精度良く定まる。イメージング法と呼ばれるこの方法を用いれば銀河宇宙線によるノイズとの識別が容易になるだけでなく、ガンマ線天体の空間構造も角度にして1分以下で調べることができる。また、シャワーの発生高度がわかることにより個々のガンマ線のエネルギー決定精度も向上する。

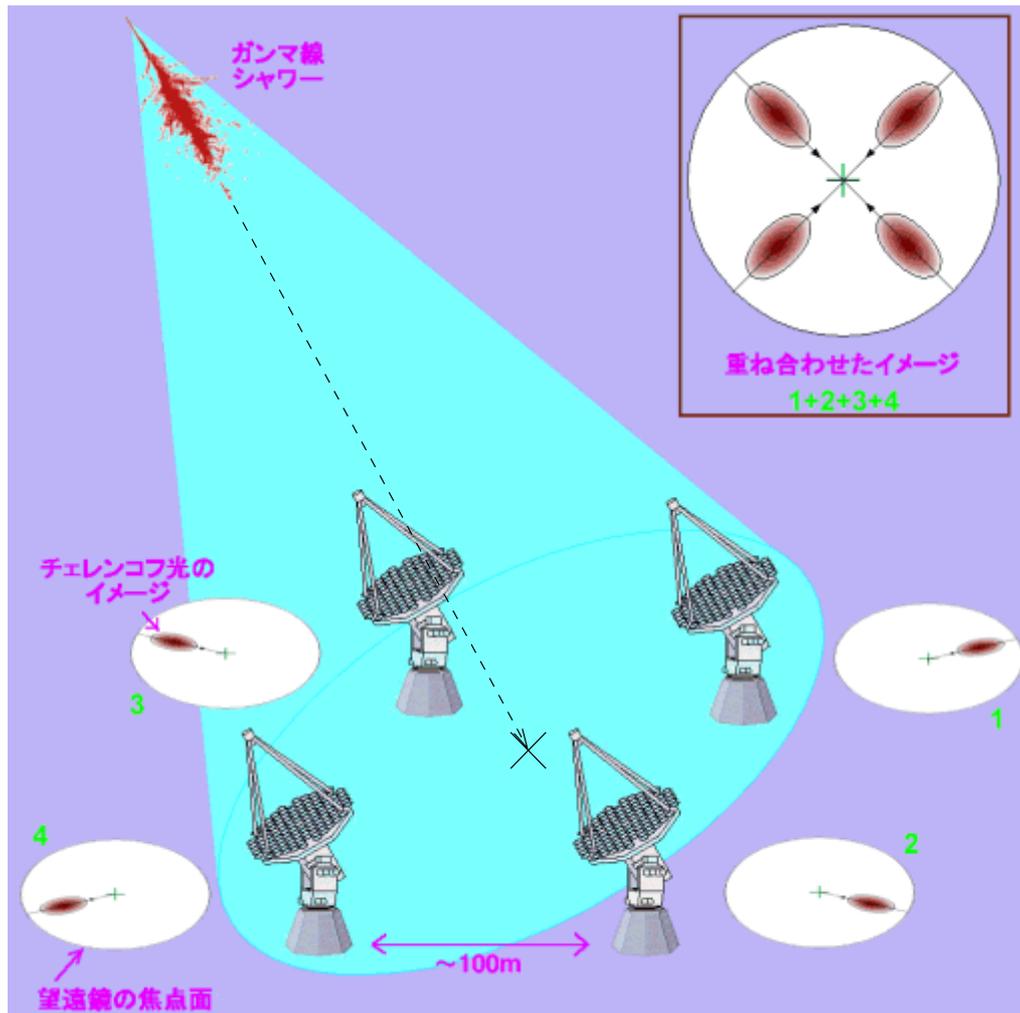


Figure 3.6: チェレンコフ光によるシャワーイメージのステレオ観測

3.2.4 高エネルギーガンマ線観測の重要性

高エネルギーガンマ線観測の重要性について以下に述べる。

- 周囲の温度をはるかに超えるエネルギーを持つガンマ線は、天体で起こる超高エネルギー素粒子反応過程を探る手段である。
- 超新星爆発や活動銀河、ガンマ線バーストなど、現在の宇宙の最も激しいエネルギー現象を最高エネルギーの光子であるガンマ線で切り拓く。
- ガンマ線で明るい天体の発見数が急増している。
- ガンマ線天体は、人工の加速器では及ばない超高エネルギー粒子が生成加速される舞台となっている。
- ガンマ線天体の活動はパルサー（中性子星）やブラックホールなどからのエネルギー供給に基づいているらしい。地上の実験室では実現不可能な「極限的状态」での物理過程を探る。
- これまでさかんに行われてきた電波や可視光、X線での観測にガンマ線の波長域の観測データが加わることにより、高エネルギー天体の活動を支えるエネルギー源が何であるか、定量的に明らかになる。
- 回転駆動型パルサーにおいて、総放射エネルギーの相当部分がまだ観測から隠されている。パルサー風など運動エネルギーへの寄与が超高エネルギーガンマ線などによるパルサー星雲の観測から明らかにされつつある。
- 活動銀河において、電波からX線に至る総放射量でブラックホールに降着する物質質量や、中心核のブラックホールの質量が推定されてきた。光速度近い速度で動くジェットの方角への高エネルギーガンマ線のエネルギー放出量はジェットの物理機構を解明する鍵になる。
- 超新星爆発など宇宙線の起源において、電波やX線によってその放射が知られてきた電子に比べ、電子の2000倍の質量を持つ陽子は圧倒的に大きなエネルギーを担っている。高エネルギーガンマ線によって、超高エネルギー陽子からの放射の検出が可能になる。
- (超)高エネルギーガンマ線の観測結果は、対生成による電子陽電子が、パルサーや活動銀河中心核などでふんだんに作られ加速されていることを示している。
- 活動銀河の中心核では、放射場がガンマ線とすぐに衝突し電子陽電子対生成に変換されるほど高密度である。実験室では実現不可能な高密度放射場での高エネルギー反応を探る。
- 宇宙線強度が銀河毎に異なることがガンマ線観測によって明らかにされた。他の銀河との比較は、われわれの銀河の宇宙線を新しい視点から見ることである。磁場の強さなど銀河円盤の構造、超新星爆発が果たす役割などを明らかにできる。
- 近傍の銀河や銀河団など、超新星爆発が活発に起きている銀河からのガンマ線を観測し、銀河の進化を探る。銀河団に閉じ込められた宇宙線からのガンマ線は、銀河の過去の活動度を示し、また銀河団の構造に関係している。
- 銀河ハローからのガンマ線は銀河形成の謎にも関係している。銀河に付随した物質の広がり
の指標となり、暗黒物質の果たす役割にも関係している。

Chapter 4

今回の研究の目的

CANGAROO-III 望遠鏡のカメラは 427 本の丸い光電子増倍管 (photomultiplier tube : PMT) (Fig. 4.1) を Fig. 4.2-(a) のように六角形のハニカム状に配置する予定であるが [Appendix A.2]、その際各 PMT の間に隙間 (dead space) が生じる。また、各 PMT の実際の有感領域は Fig. 4.2-(b) の赤い丸で表されている面積だけである。そのため、Fig. 4.2-(b) の空白部分に入射した光は感知することができず、その光を無駄にしてしまうことになる。CANGAROO-III 望遠鏡ではこのような dead space がカメラ全体の約 65 % にも達する。



Figure 4.1: CANGAROO-III 望遠鏡のカメラに用いる PMT(Hamamatsu R3479)。直径 19mm の丸型で、有感領域の直径は 15mm 以上である。[Appendix A.1]

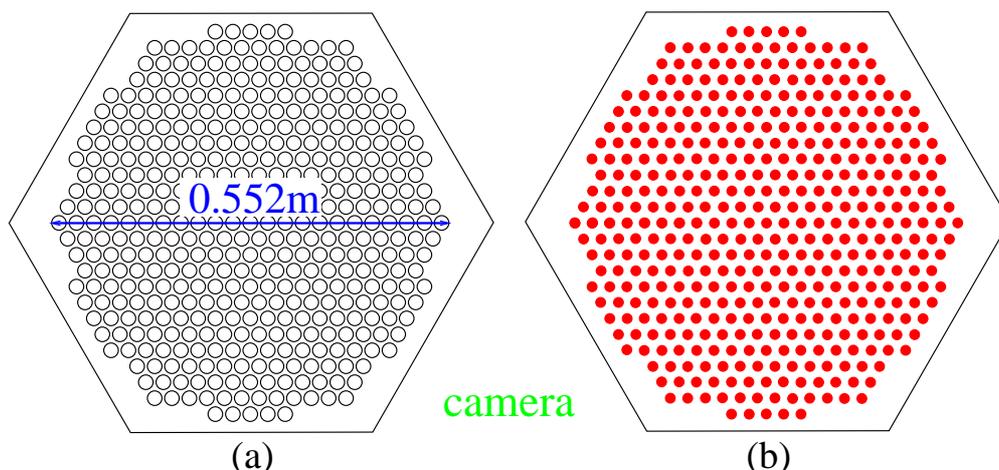


Figure 4.2: (a):CANGAROO-III 望遠鏡のカメラの PMT の配置 (b):各 PMT の有感領域

カメラの dead space をできるだけ小さくするために個々の PMT に取り付け、望遠鏡の鏡で反射して dead space に入る光を無駄なく PMT の有感領域に導くのがライトガイド (Light Guide) の役割である。

Fig. 4.3は現在 CANGAROO-II 望遠鏡で実際に用いられているカメラの PMT の配置とライトガイドを取り付けたときのイメージであるが、ライトガイドが無ければ、PMT の有感領域である Fig. 4.3-(a) の斜線部分だけがカメラ全体としての有感領域になり、それ以外の場所に入射した光は感知することができない。しかし、ライトガイドを取り付けることによってカメラ全体の有感領域が Fig. 4.3-(b) の斜線部分の面積まで大きくなる。

CANGAROO-II 望遠鏡では、ライトガイドを取り付けることによりカメラ全体の有感領域の面積は約 3 倍の大きさになる。

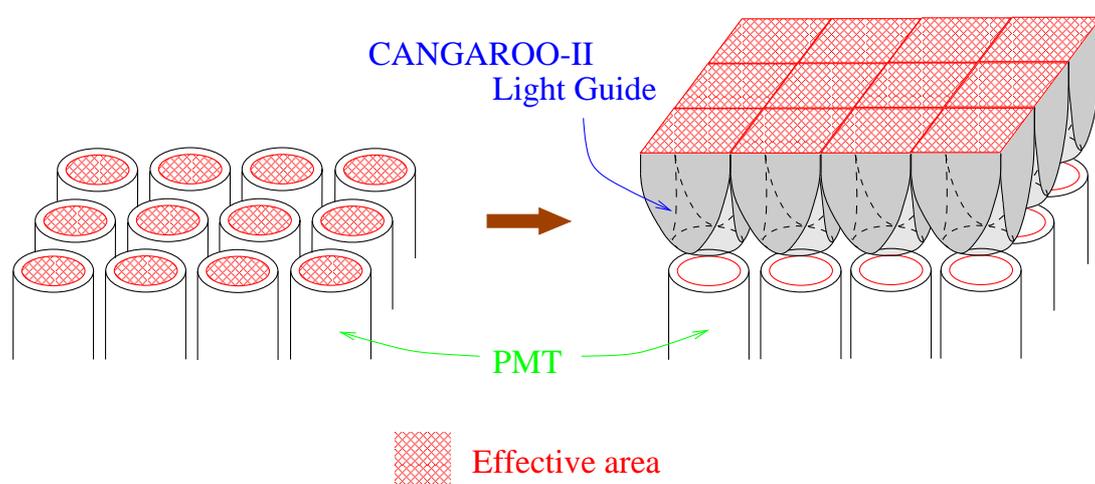


Figure 4.3: ライトガイドの有無での、カメラの有感領域の違い

今回の研究の目的は、カメラの dead space をできるだけ小さくした上でさらに集光率の良い、CANGAROO-III 望遠鏡で用いるのに最適なライトガイドを決定する事である。

ライトガイドの集光率が向上すれば、より弱い光を望遠鏡で捕らえられるようになり、観測可能なエネルギー領域が今までよりも下がることになる。その結果、CANGAROO-III 計画の大きな目的である、人工衛星と地上による観測とのガンマ線のエネルギースペクトルの空白を埋めていくことが期待できる。

Chapter 5

CANGAROO-II ライトガイドの改良の可能性

CANGAROO-III 望遠鏡に用いるためのライトガイドを開発する前に、CANGAROO-II 望遠鏡で現在用いられているライトガイドに関して、改良による集光率向上の可能性について探る。

現在 CANGAROO-II 望遠鏡で用いられているライトガイドと新しく 6 種類の形状のライトガイドに関して、モンテカルロ・シミュレーションを行いそれぞれの集光率を比較する。

5.1 CANGAROO-II ライトガイドへ入射する光の最大入射角度

5.1.1 CANGAROO-II 望遠鏡の直径

現在の CANGAROO-II 望遠鏡の直径は 10m であるが、鏡の配置の関係により実際の反射鏡としての直径は 10m ではなく、一番大きな所で半径 4.85m である (Fig. 5.1)。

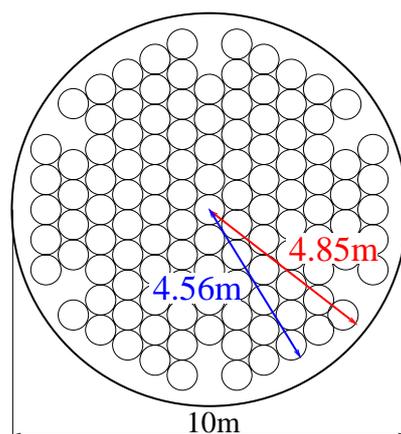


Figure 5.1: CANGAROO-II 望遠鏡の主鏡

5.1.2 CANGAROO-II 望遠鏡のカメラの形状

CANGAROO-II 望遠鏡のカメラは、552本の丸いPMT(Fig. 5.2)を四角のグリッドパターンに配置した形状であるが、四つの角の部分にはPMTは配置していない(Fig. 5.3)。

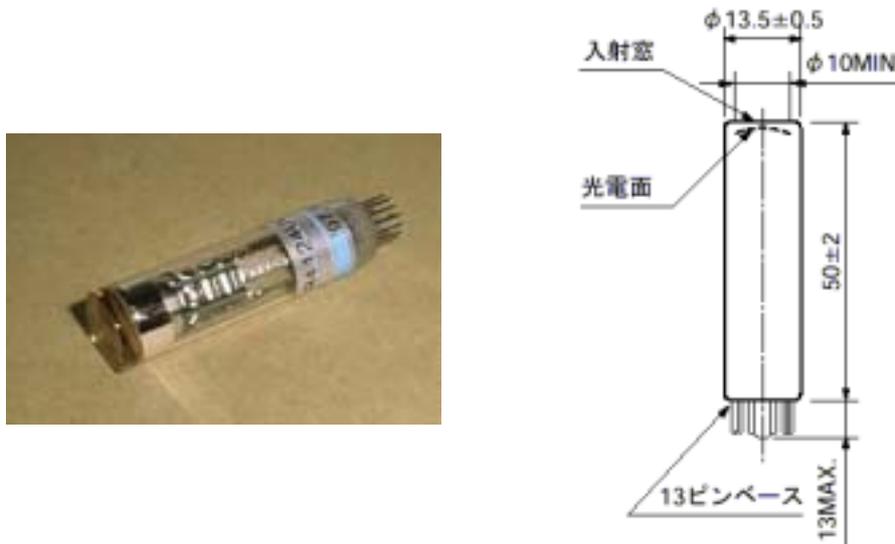


Figure 5.2: CANGAROO-II 望遠鏡のカメラに用いられている PMT(Hamamatsu R4124uv)

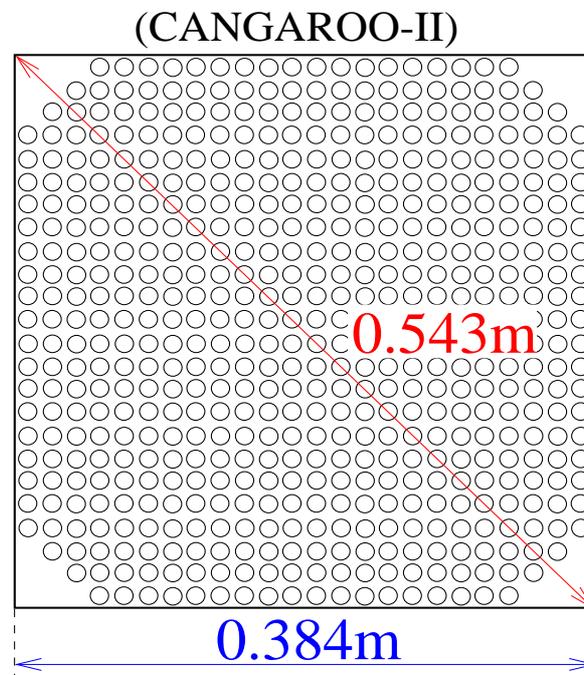


Figure 5.3: CANGAROO-II 望遠鏡のカメラの形状

5.1.3 CANGAROO-II ライトガイドへの最大入射角度

主鏡からライトガイドへ入射する光の最大角度は、主鏡の端 (Fig. 5.1より半径 4.85m の位置) からカメラの逆の端に入る光の入射角度である。この最大入射角度を、CANGAROO-II 望遠鏡のカメラについて求めたものが Fig. 5.4である。

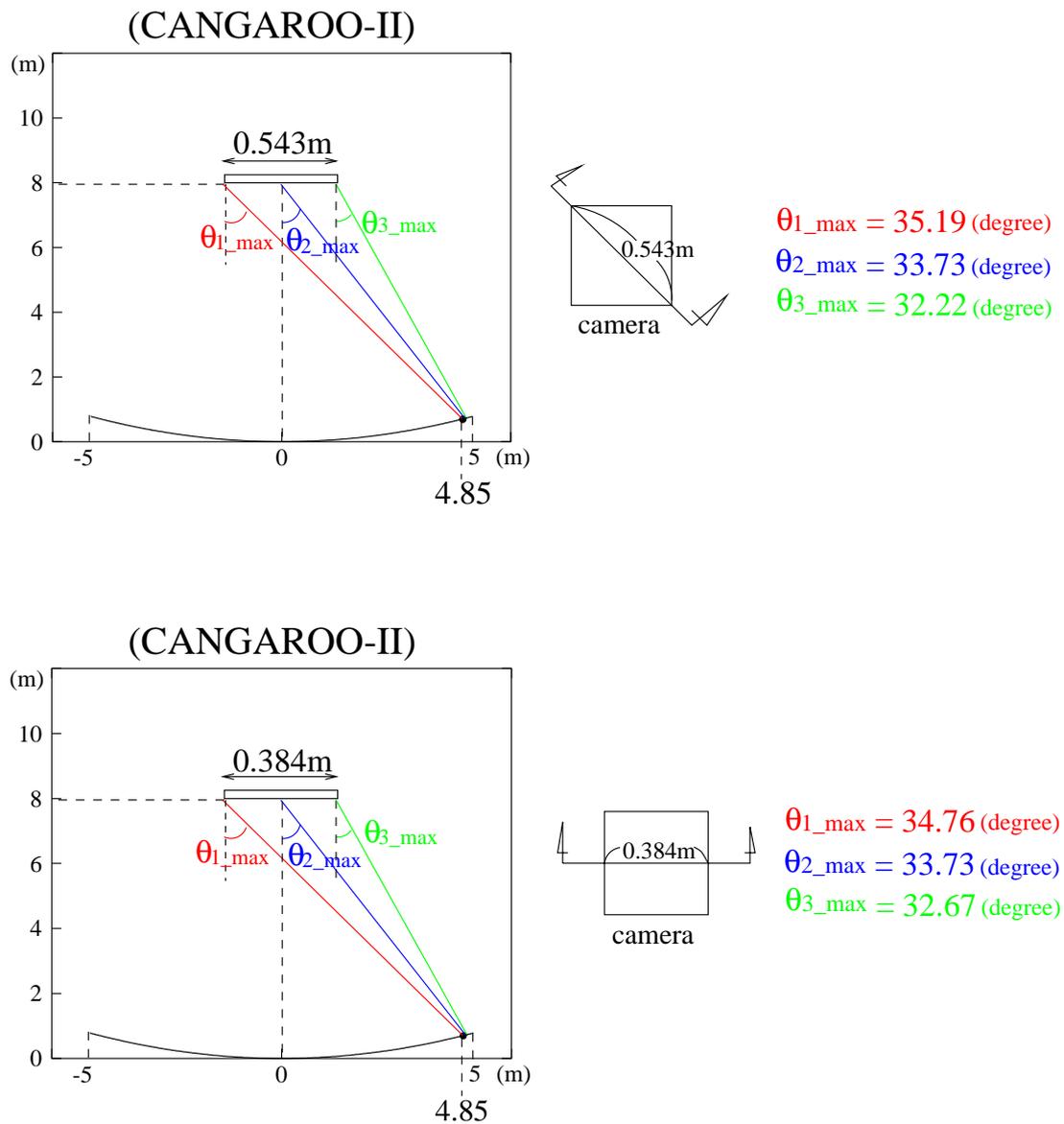


Figure 5.4: CANGAROO-II ライトガイドへ入射する光の入射角度

5.2 Winston Cone

今回シミュレーションを行う新しいライトガイドの形状には、Winston Coneを用いる。Winston Coneとは、ある角度以内で入射してきた光をすべて捕らえる事を目的とした曲面である。

例えば、Coneの上面に0度から θ_2 度(最大集光角度)までの角度で入射した光を、上面よりも小さな半径を持つ下面に集光させたいとする。まず2次元で考え、角度 θ_2 で入射したすべての光が1回の反射で下面の反対側の端にくるような形状を作る (Fig. 5.5-(b))。このとき、 θ_2 より小さな角度で入射する光は下面の内側へと反射されていき (Fig. 5.5-(a))、 θ_2 よりも大きな角度で入射した光は反射を繰り返してすべて外へ出て行く (Fig. 5.5-(c))。このような曲線を回転させれば3次元のWinston Coneが完成する (Fig. 5.5-(d))。

Winston Coneは2次元では完全に、3次元でもほぼ完全に働く。[2] [3] [4] [5]

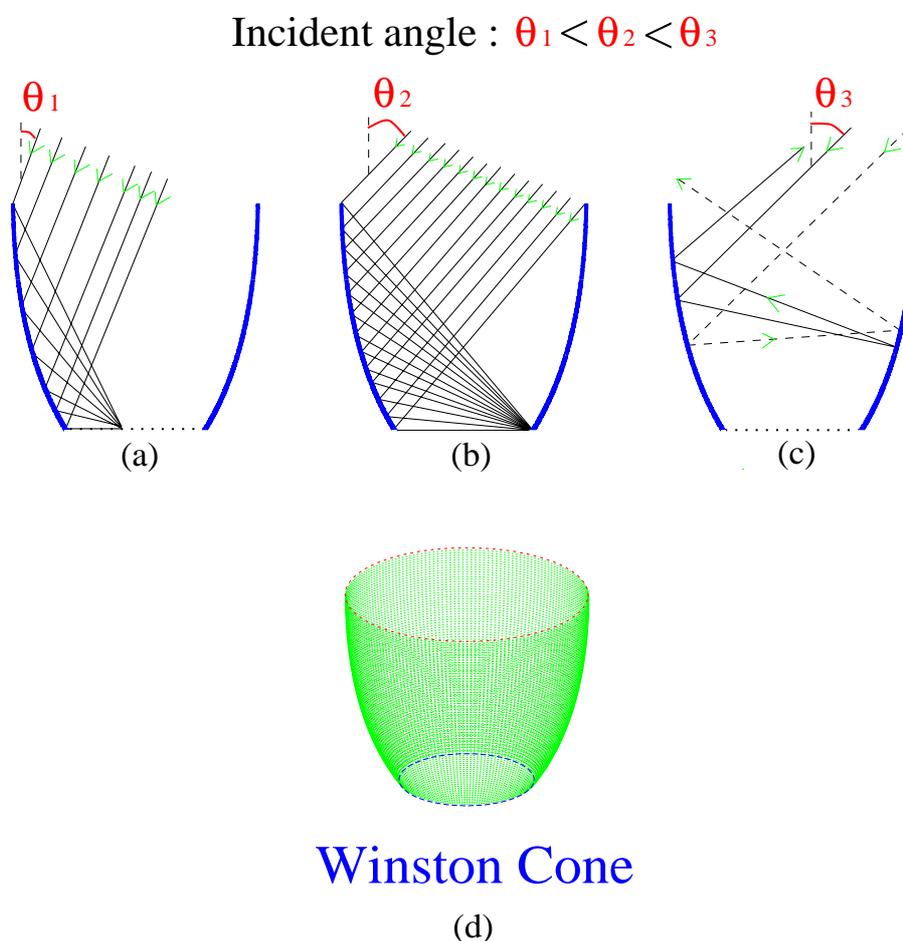


Figure 5.5: (a)(b)(c):Winston Cone の断面 (d):Winston Cone(a,b,c の曲線を回転させたもの)

- Winston Cone の特徴

- 任意の最大入射角度以内で入射した光をほぼ 100 % 集光する
- 上記の最大入射角度以上で入射した光は反射を繰り返してすべて外へ出て行く
- 最大入射角度が大きいほど、Winston Cone の傾きは急になり高さの上限は低くなる (Fig. 5.6)

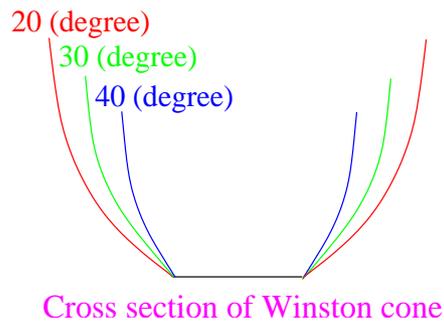
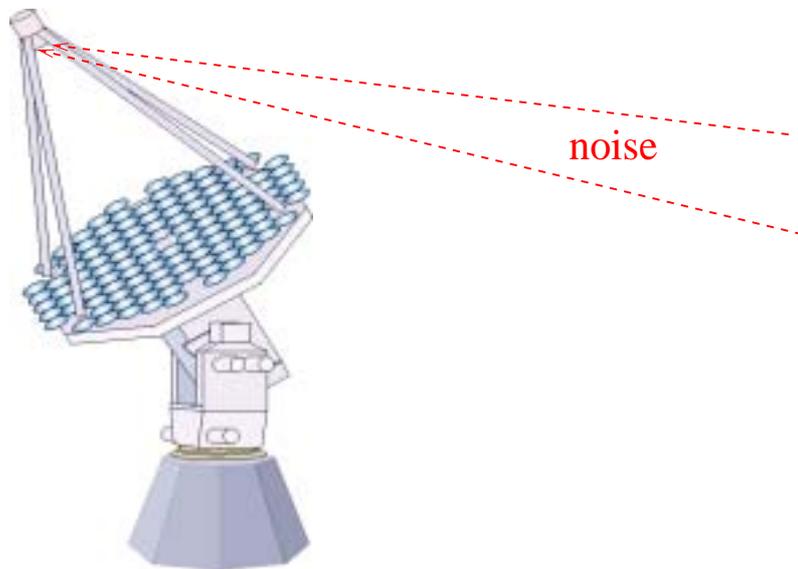


Figure 5.6: Winston Cone の最大入射角度と、傾き・上端の関係

最大入射角度以上で入射した光は反射を繰り返してすべて外へ出て行くという性質より、ライトガイドに Winston Cone を用いれば集光率向上の他、主鏡の端からカメラへ入射する角度以上の大角度で入射してくる、ノイズとなるような光 (Fig. 5.7) をカットすることも可能となる。



CANGAROO-III Telescope

Figure 5.7: 主鏡以外からカメラに入射する、ノイズとなる光

5.3 ライトガイドの形状

CANGAROO-II 望遠鏡に用いるライトガイドとして最適な形状を探るために、様々な形状についてシミュレーションを行い集光率を求めた。以下にモンテカルロ・シミュレーションを行った7種類のライトガイドの形状を示す。また、それぞれの形状を次のような名称で区別する。

5.3.1 LG-CII type1

CANGAROO-II 望遠鏡で現在用いられているライトガイドで、下面はPMTの有感領域に合わせ直径10mmの円とし、上面を、隣接するPMTとのdead spaceをなくすために16mm×16mmの正方形としている。具体的には下面が直径10mmの円、上面が16mm×16mmの正方形に外接する円でできている曲面体を、上面16mm×16mmの正方形の各辺から下面の円に向かって平面でカットしている形状である (Fig. 5.8)。

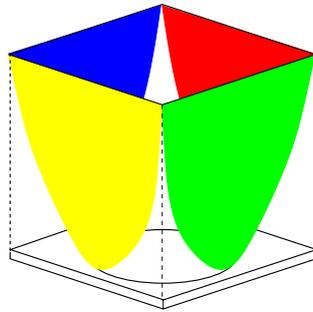


Figure 5.8: LG-CII type1 : 色の着いている部分は平面

5.3.2 Winston Cone を用いた形状

LG-CII type2 は中心線を通るどの断面も Winston Cone で、LG-CII type3 は1つの Winston Cone を鉛直平面でカットしたもの、LG-CII type4 は1つの Winston Cone を下面の円に向けて平面でカットしたものである (Fig. 5.9)。

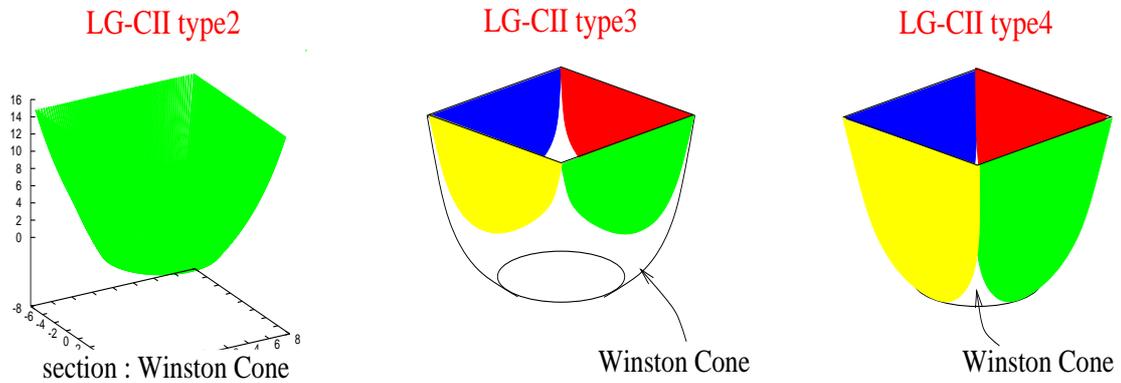


Figure 5.9: Winston Cone を用いたライトガイド (type3、type4 の色のついている部分は平面)

5.3.3 放物体を用いた形状

上記のライトガイドの曲面部分を、上面と下面は Winston Cone と同じ点を通り頂点が Z 軸上になるような放物体にしたものが、LG-CII type5、LG-CII type6、LG-CII type7 である (Fig. 5.10)。

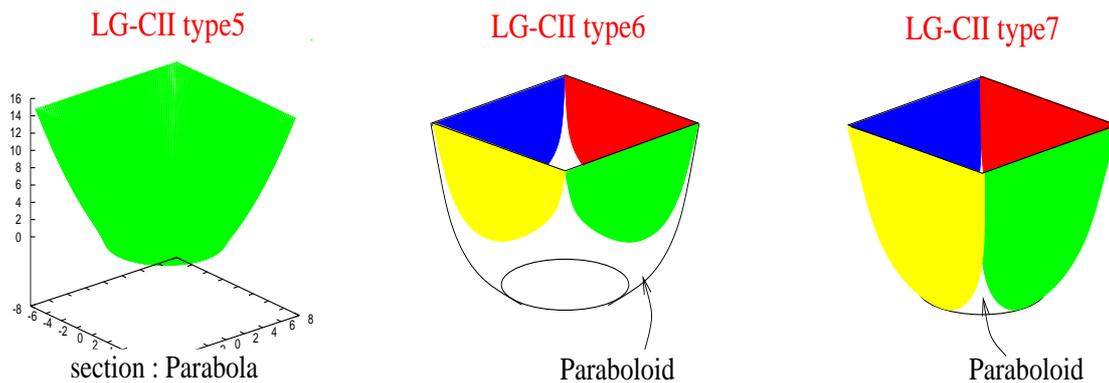


Figure 5.10: 放物体を用いたライトガイド (type6、type7 の色のついている部分は平面)

5.4 モンテカルロ・シミュレーション

7種類のライトガイドをコンピュータ上で表し、そこにランダムに作成した光を入射させる。その入射光がライトガイドの下面、すなわち PMT の有感領域に到達する集光率を調べる。

● シミュレーションの条件

- PMT は直径 13.5mm の丸型 (Hamamatsu R4124uv)
- PMT の有感領域の直径は 10mm
- 隣接するライトガイド同士は密着
- 入射光のイベント数は、それぞれの入射角度につき 10^5 とする
- 入射光はライトガイド上面の正方形の厚みよりも内側に、ランダムに降らせる
- ライトガイドの内面反射率は 100 % と 80 % の場合で行う
- PMT の光電面での反射率は 0 % とする
- ライトガイド底面と PMT の間隔は 0.0mm の場合と 2.0mm の場合で行う

入射光は一つのライトガイドだけに降らせることになるので条件としては、カメラの中心にライトガイドを一つ置き、主鏡の光軸に平行な光がランダムに入射した場合と同じ意味を持つ (Fig. 5.11)。

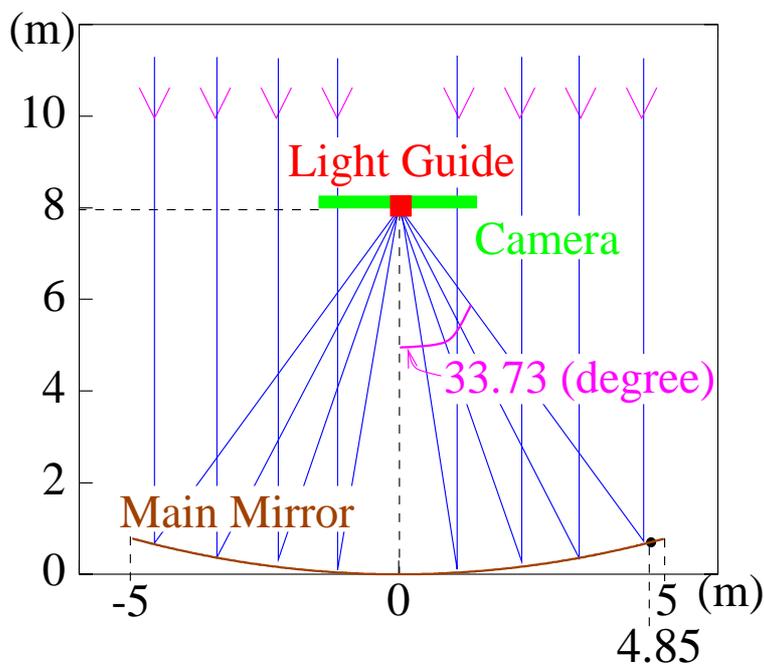


Figure 5.11: シミュレーションの条件

5.5 シミュレーションでの集光率の定義

モンテカルロ・シミュレーションによりライトガイドの集光率を求めていくが、その際の集光率の定義を述べておく。

まず微分集光率を次のように求める。

$$\text{微分集光率} : \eta(\theta) = \frac{\text{底面を通過した光子数}}{\text{入射光子数}} \quad (5.1)$$

ここで θ はライトガイドへの光の入射角度を表す。

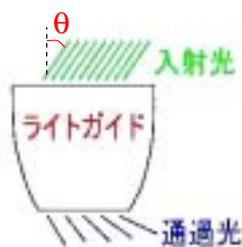


Figure 5.12: ライトガイドへの入射光と底面を通過する光の関係

θ が大きくなるほど主鏡の外側からライトガイドへ入射してくることになるので、その分光がやってくる面積は大きくなる。よって、 $\eta(\theta)$ にそのときの θ に対応する主鏡の半径 r を求め、主鏡のドーナツ状の面積を重みとしてかける。

$$f(r)dr = \eta(\theta)2\pi r dr \quad (5.2)$$

そして $f(r)dr$ について主鏡の中心から端まで、すなわち $r=0$ から $r=4.85$ まで積分する。

$$\begin{aligned} F(r) &= \int_0^R f(r)dr \\ &= \int_0^R \eta(\theta)2\pi r dr \quad (R = 4.85) \end{aligned} \quad (5.3)$$

この $F(r)$ を主鏡全体の面積で割った値を積分集光率とする。

$$\text{積分集光率} : Y(r) = \frac{F(r)}{\pi R^2} \quad (5.4)$$

この積分集光率の値を、今回のシミュレーションでのライトガイドの集光率とする。

5.6 シミュレーション結果

LG-CII type1 から LG-CII type7 のそれぞれについて、ライトガイドへ入射する光の入射角度に対応する主鏡の半径と集光率をもとめ、主鏡の半径 0m から 4.85m まで積分する。その際、積分の条件として焦点距離 8m の完全な放物面鏡のカメラの中心にライトガイドを一つ置き、光は放物面の軸に平行に入射する場合と同様と考え、ライトガイドへの入射角度に対応する主鏡の面積を重みとして考慮する。

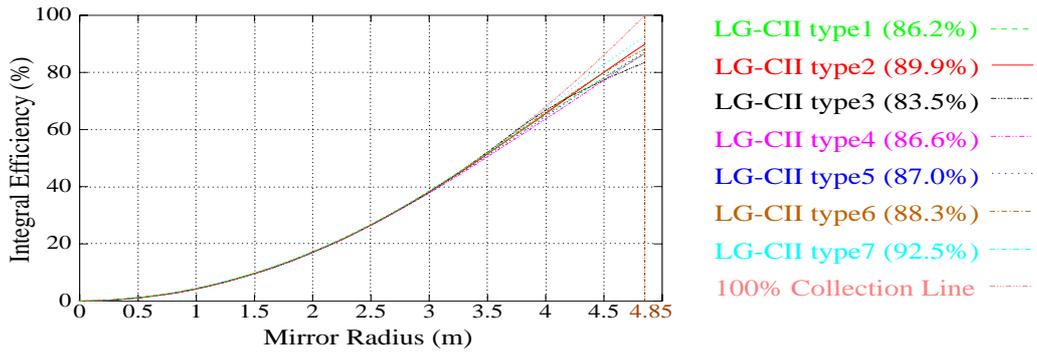
その結果を Fig. 5.13、Fig. 5.14、Fig. 5.15 に示す。横軸はライトガイドへの入射角度に対応する主鏡の半径、縦軸はその半径までの集光率の積分値である。Fig. 5.13 はライトガイド内面での反射率が 100 %、ライトガイドの底面と PMT の間隔は無い場合で、Fig. 5.14 はライトガイド内面での反射率が 80 %、ライトガイドの底面と PMT の間隔は無し、Fig. 5.15 はライトガイド内面での反射率が 80 %、ライトガイドの底面と PMT の間隔を 2.0mm とした場合で、現在 CANGAROO-II 望遠鏡で用いられている条件に一番近い条件での結果である。それぞれの図の右側に表示されているパーセンテージは、主鏡の半径 0m から 4.85m までの集光率の積分値を表している。

ライトガイド内面での反射率を 100 % とした場合 LG-CII type7 の集光率が良いが、内面での反射回数が多く反射率を 80 % とするとかなり悪くなってしまふ。現実では内面の反射率が 100 % というのはありえないので、Fig. 5.14、Fig. 5.15 より LG-CII type2、すなわち全断面 Winston Cone の形状が一番集光率が良い事がわかる。

これらの結果より、CANGAROO-II 望遠鏡で用いるライトガイドの集光率向上の可能性として次のような事が挙げられる (ライトガイドの内面反射率を 80 % とした場合)。

- (1) 現在のようにライトガイドの底面と PMT の間隔を 2.0mm のままとするならば、既存の LG-CII type1 から LG-CII type2 (全断面 Winston Cone) に変更すれば集光率は 49.2 % から 57.3 % になり 8.1 % 向上する。
- (2) ライトガイドは既存の LG-CII type1 のままとするならば、PMT にプラスの電圧をかけるようにすれば PMT の放電がなくなりライトガイドの底面と PMT の間隔を無くす事ができると考えられるので、集光率は 49.2 % から 66.8 % になり 17.6 % 向上する。
- (3) PMT にプラスの電圧をかけライトガイドの底面と PMT の間隔を無くし、さらにライトガイドを既存の LG-CII type1 から LG-CII type2 (全断面 Winston Cone) に変更すれば、集光率は 49.2 % から 74.0 % になり 24.8 % 向上する。

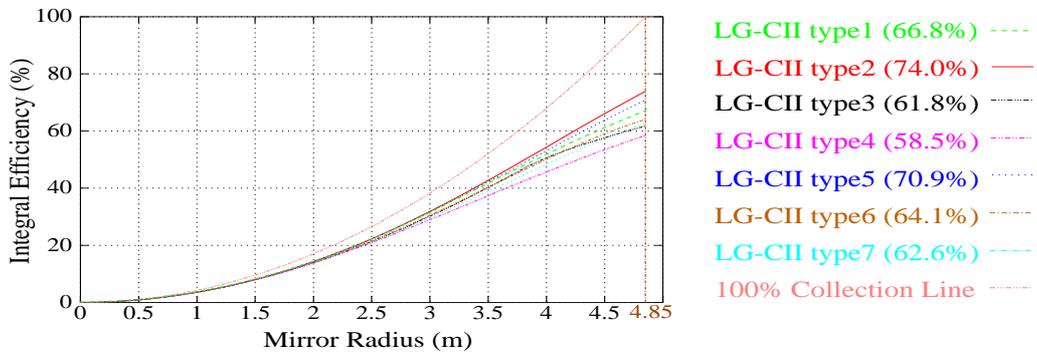
今回のシミュレーションから、CANGAROO-II 望遠鏡で用いるライトガイドの集光率向上の可能性として以上の 3 点が考えられるが、集光率を最も良くするための改良は (3) の場合である事が容易に判断できる。



$\phi = \text{random}$

Reflectance of Light Guide : 100%
Gap between Light Guide and PMT : 0.0mm

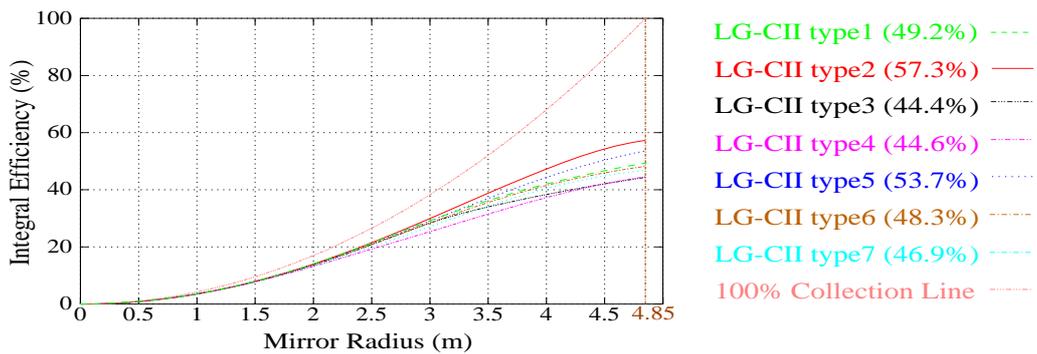
Figure 5.13: CANGAROO-II 望遠鏡のためのライトガイドの積分集光率の比較



$\phi = \text{random}$

Reflectance of Light Guide : 80%
Gap between Light Guide and PMT : 0.0mm

Figure 5.14: CANGAROO-II 望遠鏡のためのライトガイドの積分集光率の比較



$\phi = \text{random}$

Reflectance of Light Guide : 80%
Gap between Light Guide and PMT : 2.0mm

Figure 5.15: CANGAROO-II 望遠鏡のためのライトガイドの積分集光率の比較

5.7 シミュレーション結果と実測値との比較

今回行ったライトガイドのシミュレーション結果がどのくらい信頼できるのかを確かめるために、現在実際に CANGAROO-II 望遠鏡で用いられているライトガイドの集光率を Photodiode を用いて測定し、LG-CII type1 についてのシミュレーション結果と比較する。

集光率の実測には波長 470nm の LED を入射光として用いるので、その波長での CANGAROO-II ライトガイドの内面反射率を測定すると Fig. 5.16 のようになった。横軸はライトガイドへの光の入射角度で縦軸はその入射角度におけるライトガイドの内面反射率である。シミュレーションではライトガイド内面の反射率を 80 % としていたが、Fig. 5.16 より内面反射率を 89 % として再び LG-CII type1 の集光率を求める。

その結果、内面反射率を 89 % として再度シミュレーションを行った LG-CII type1 の集光率と実測値を比較すると、Fig. 5.17 のようになった。横軸は光のライトガイドへの入射角度で縦軸はそのときの集光率である。結果はほぼ一致しているので、今回のシミュレーション結果は信頼できると思われる。また、同様の方法で CANGAROO-III 望遠鏡のためのライトガイドに関してシミュレーションを行えば、信頼できる結果が得られるであろう。

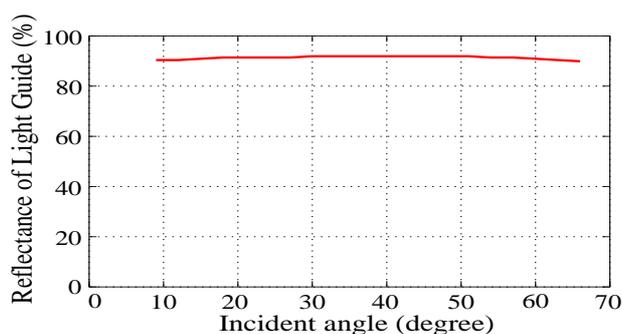


Figure 5.16: CANGAROO-II ライトガイドの内面反射率の角度依存性 (入射光の波長 470nm)

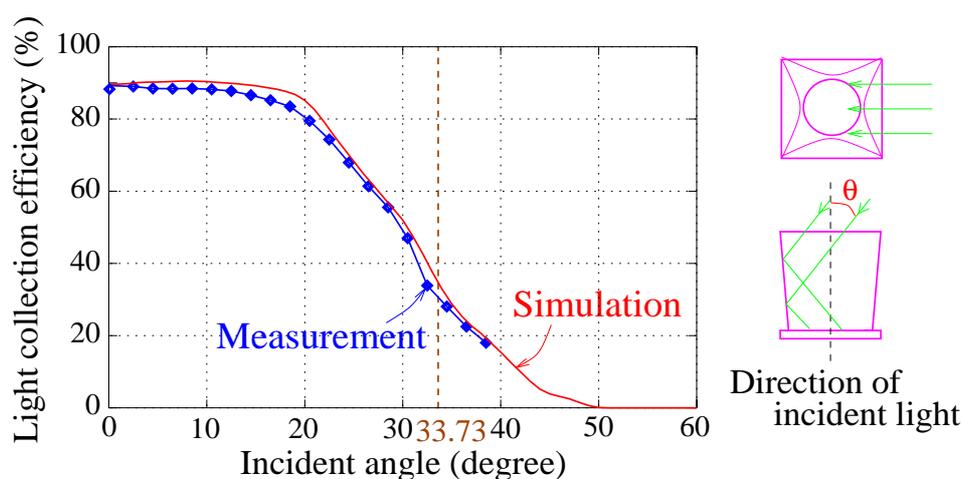


Figure 5.17: CANGAROO-II ライトガイドの、シミュレーションと実測での集光率の比較

Chapter 6

CANGAROO-III 望遠鏡のための新しいライトガイドの開発

CANGAROO-III 望遠鏡で用いるのに最適なライトガイドを決定するために、様々な形状のライトガイドについてモンテカルロ・シミュレーションを行いそれぞれの集光率を比較する。

6.1 CANGAROO-III ライトガイドへ入射する光の最大入射角度

6.1.1 CANGAROO-III 望遠鏡の直径

CANGAROO-III 望遠鏡は基本的に CANGAROO-II 望遠鏡と同じもので口径 10m だが、§ 5.1.1 で述べたように、鏡の配置の関係により実際の反射鏡としての直径は 10m ではなく、一番大きな所で半径 4.85m である (Fig. 6.1)。

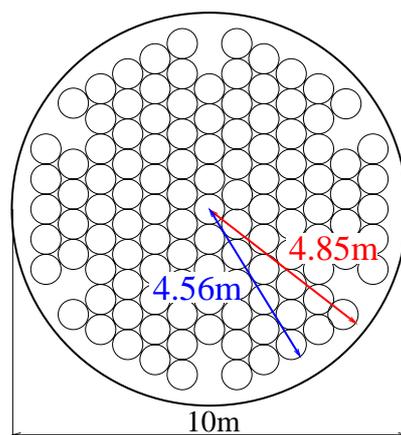


Figure 6.1: CANGAROO-III 望遠鏡の主鏡

6.1.2 CANGAROO-III 望遠鏡のカメラの形状

CANGAROO-III 望遠鏡のカメラは CANGAROO-II 望遠鏡のカメラとは異なり、丸い PMT を六角形のハニカム状に配置した形状になる予定である。Fig. 6.2は CANGAROO-II 望遠鏡と CANGAROO-III 望遠鏡のカメラにおける PMT の配置と寸法を示したもので、括弧内の値はそれぞれの部分の持つ視野角を表している。

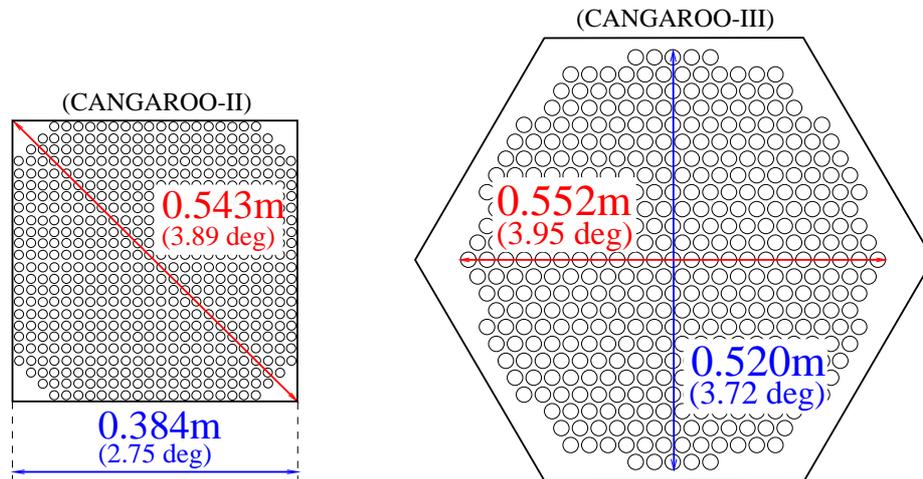


Figure 6.2: CANGAROO-II 望遠鏡と CANGAROO-III 望遠鏡のカメラの形状

6.1.3 CANGAROO-III ライトガイドへの最大入射角度

主鏡からライトガイドへ入射する光の最大角度は、主鏡の端 (Fig. 6.1より半径 4.85m の位置) からカメラの逆の端に入る光の入射角度である。この最大入射角度を、CANGAROO-III 望遠鏡で予定されているカメラについて求めたものが Fig. 6.3である。

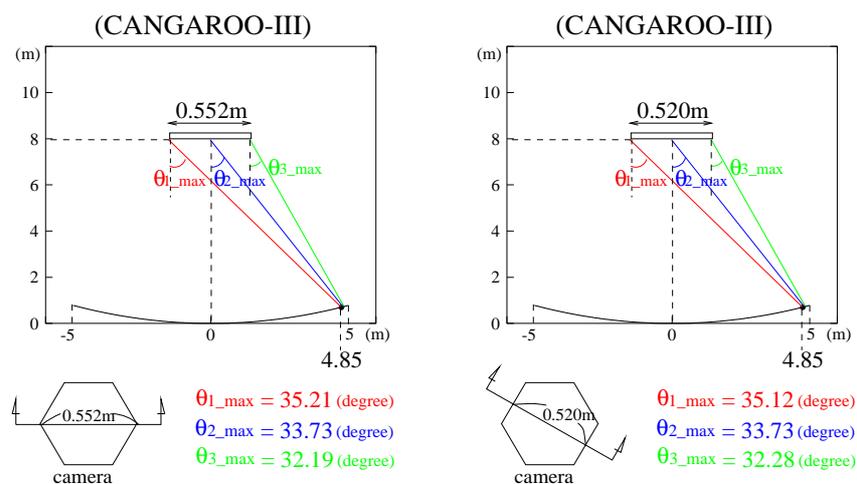


Figure 6.3: CANGAROO-III ライトガイドへ入射する光の入射角度

6.2 カメラを四角形にした場合と六角形にした場合の集光率の比較

CANGAROO-III 望遠鏡のカメラは六角形のハニカム状に丸型 PMT を配置する予定だが、ここではカメラを四角形、すなわち丸型 PMT を四角のグリッドパターンに配置した場合についても考えてみる。

6.2.1 ライトガイドの形状

丸型 PMT を四角のグリッドパターンに配置したカメラにすると、ライトガイドは上面が四角形で下面が丸い形状にしなければならない。一方、丸型 PMT を六角形のハニカム状に配置したカメラにすると、ライトガイドは上面が六角形で下面が丸い形状となる。

§ 5で CANGAROO-II 望遠鏡のための、上面が四角形で下面が丸い様々な形状のライトガイドについて集光率を比較したが、中心線を通るどの断面も Winston Cone という形状の集光率が一番良くなった。したがってここでは上面が四角形の場合も六角形の場合も、そのような形状のライトガイドを考え集光率を比較してみる。まず、今回モンテカルロ・シミュレーションを行う形状の中でも特に工夫した、中心線を通るどの断面も Winston Cone という形状である LG-CIII type2 のライトガイドについて、その形状の作成方法を詳しく説明しておく。

ライトガイドを作成する際に PMT の種類を決定しなければならないが、CANGAROO-III 望遠鏡では以下の PMT を用いる。カメラは§6.1.2で述べた CANGAROO-III 望遠鏡のカメラとする。

- PMT のサイズ
 - 直径 19mm の丸型 (Hamamatsu R3479)
 - 有感領域の直径は 15mm 以上
 - 隣接する PMT の中心間距離は 24mm



Figure 6.4: CANGAROO-III 望遠鏡のカメラに用いる PMT(Hamamatsu R3479)

以上の条件をみだし、隣接するライトガイド同士は密着するように作成する。その際、ライトガイドを隙間なく並べていくには、上面は直径 24mm の円に外接する六角形で、下面は PMT の有感領域の直径を持つ円とならなければならない。

下面の半径と最大集光角度を決めれば、ある 1 つの Winston Cone の形状が決まるが、上面は六角形なので、1 つの 2 次元 Winston Cone を回転させるだけでは作成したい形状にはならない。したがって、下面の直径はすべて同じで上面の直径が異なる Winston Cone の集合体という形状を作成する。

まず、ライトガイド上面での厚さを 0.3mm とする。§5.2 で述べたように、Winston Cone は最大集光角度が大きくなるほど曲線の傾きは急になる、すなわち幅がせまくなるので初めに上面の半径が一番短いところに合わせて Winston Cone を作成する。そうすると Fig. 6.5 のように半径が一番短い 11.7mm の、六角形の隣接する頂点の中点を通る断面のところでは、最大集光角度が 39.87 度の Winston Cone が作れ、その時の高さの上限は 20.8mm になるのでこの値をライトガイドの高さとする。次に方位角 ϕ を 1 度ずつずらし、高さ 20.8mm でその点での r に一致するような Winston Cone を作成していく。

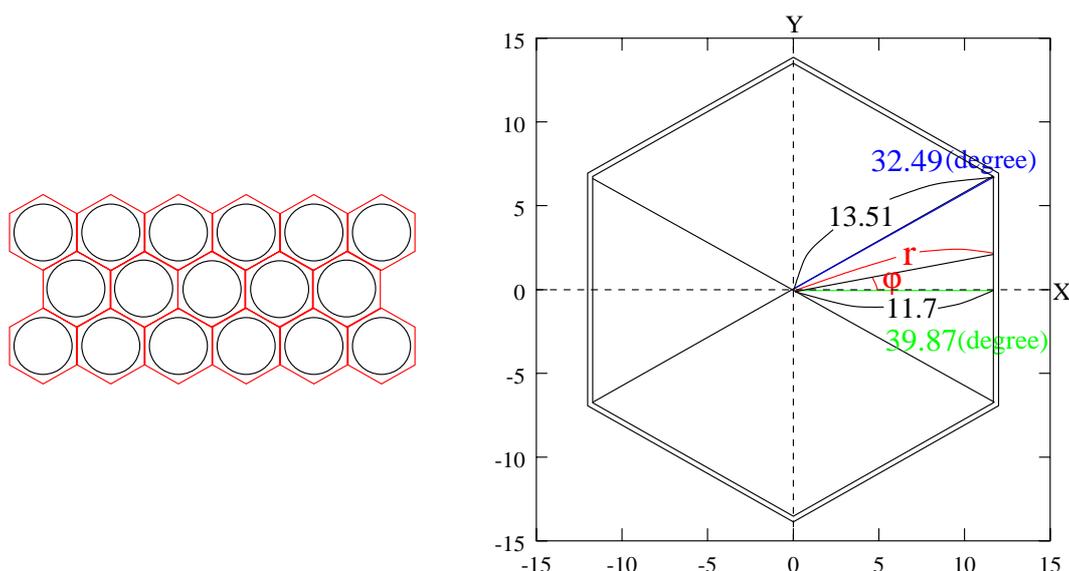


Figure 6.5: LG-CIII type2 の上面

その結果、半径が一番長い 13.51mm の、六角形の頂点を通る断面で最大集光角度は最小となり、その角度は 32.49 度となった。これらの座標を細かく求め隣接する座標同士がなめらかにつながるような曲面が、上面が六角形で下面が丸型、そして中心線を通るとの断面も Winston Cone という形状のライトガイドの内面部分である。

このようにして作成した、今回モンテカルロ・シミュレーションを行う上面が四角形の場合と六角形の場合の二つの形状を、それぞれ次のような名称で区別する。

- LG-CIII type1

- PMT の中心間距離を 24mm として四角のグリッドパターンに配置した場合を考え、中心線を通るどの断面も Winston Cone で上面は 24mm×24mm の四角形、下面は直径 15mm の円形になっている形状である。したがってこの場合、上面の厚みの内側は下面の面積の 3.10 倍となっている (Fig. 6.6-(a))。

- LG-CIII type2

- PMT の中心間距離を 24mm として六角形のハニカム状に配置した場合を考え、中心線を通るどの断面も Winston Cone で上面は六角形、下面は直径 15mm の円形になっている形状である。この場合、上面の厚みの内側は下面の面積の 2.68 倍になっている (Fig. 6.6-(b))。

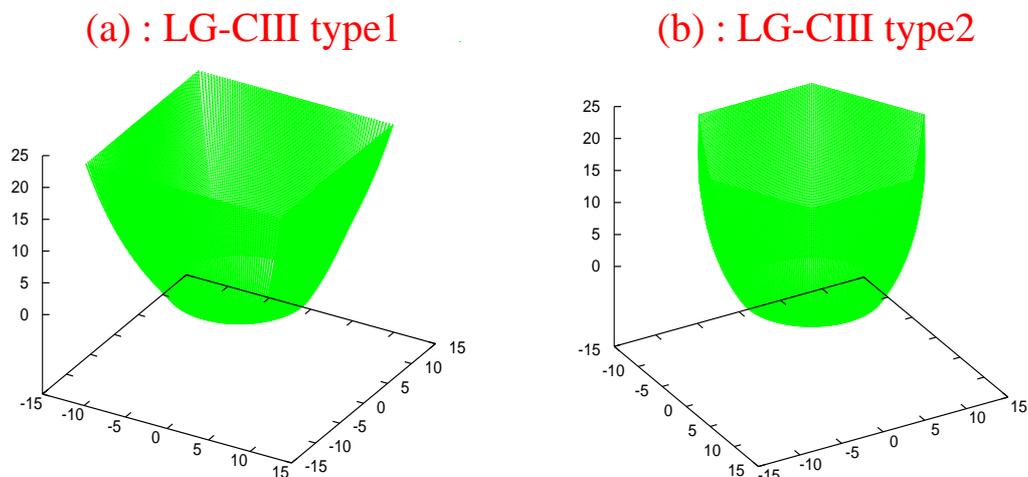


Figure 6.6: Winston Cone を用いたライトガイド

6.2.2 モンテカルロ・シミュレーション

2種類のライトガイドをコンピューター上で表し、そこにランダムに作成した光を入射させる。その入射光がライトガイドの下面、すなわち PMT の有感領域に到達する集光率を調べる。

● シミュレーションの条件

- PMT は直径 19mm の丸型 (Hamamatsu R3479)
- PMT の有感領域の直径は 15mm
- 隣接する PMT の中心間距離は 24mm
- 隣接するライトガイド同士は密着
- 入射光のイベント数は、それぞれの入射角度につき 10^5 とする
- 入射光はライトガイド上面の厚みよりも内側に、ランダムに降らせる
- ライトガイドの内面反射率は 100 % と 80 % の場合で行う
- PMT の光電面での反射率は 0 % とする
- ライトガイド底面と PMT の間隔は 0.0mm の場合と 2.0mm の場合で行う

6.2.3 シミュレーション結果

LG-CIII type1 と LG-CIII type2 のそれぞれについてライトガイドへ入射する光の入射角度に対応する主鏡の半径と集光率をもとめ、主鏡の半径 0m から 4.85m まで積分する。その際、積分の条件として焦点距離 8m の完全な放物面鏡のカメラの中心にライトガイドを一つ置き、光は放物面の軸に平行に入射する場合と同様と考え、ライトガイドへの入射角度に対応する主鏡の面積を重みとして考慮する。

その結果を Fig. 6.7、Fig. 6.8、Fig. 6.9に示す。横軸はライトガイドへの入射角度に対応する主鏡の半径、縦軸はその半径までの集光率の積分値である。Fig. 6.7はライトガイド内面での反射率が 100 %、ライトガイドの底面と PMT の間隔は無い場合で、Fig. 6.8はライトガイド内面での反射率が 80 %、ライトガイドの底面と PMT の間隔は無し、Fig. 6.9はライトガイド内面での反射率が 80 %、ライトガイドの底面と PMT の間隔を 2.0mm とした場合である。それぞれの図の右側に表示されているパーセンテージは、主鏡の半径 0m から 4.85m までの集光率の積分値を表している。

どの条件でも LG-CIII type2 の集光率が良く、ライトガイドの上面は六角形にした方が良いことがわかる。このことから、CANGAROO-III 望遠鏡のカメラはやはり、PMT を六角形の八ニカム状に配置した方が良いであろう。より良いカメラの形状がわかったので、次に上面を六角形にした様々なライトガイドに関して集光率をもとめ、CANGAROO-III 望遠鏡に用いる最適なライトガイドを決定する。

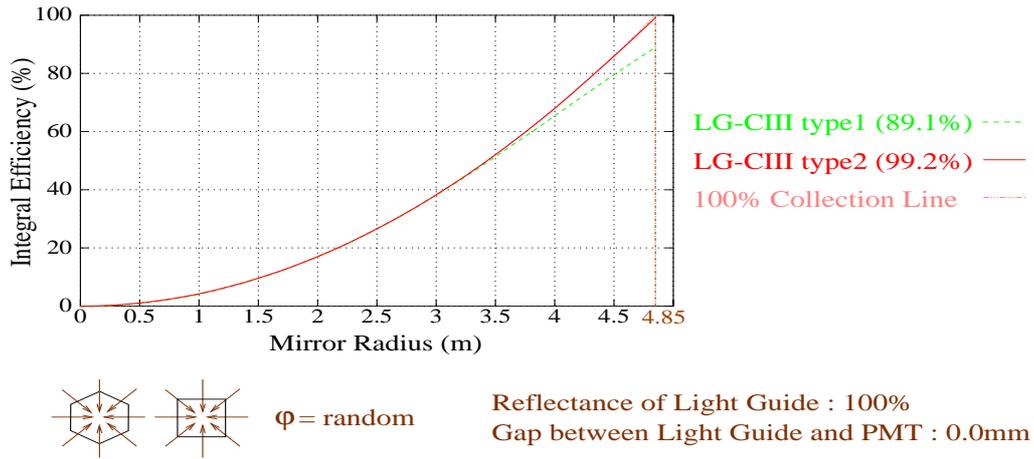


Figure 6.7: CANGAROO-III 望遠鏡のためのライトガイドの積分集光率の比較

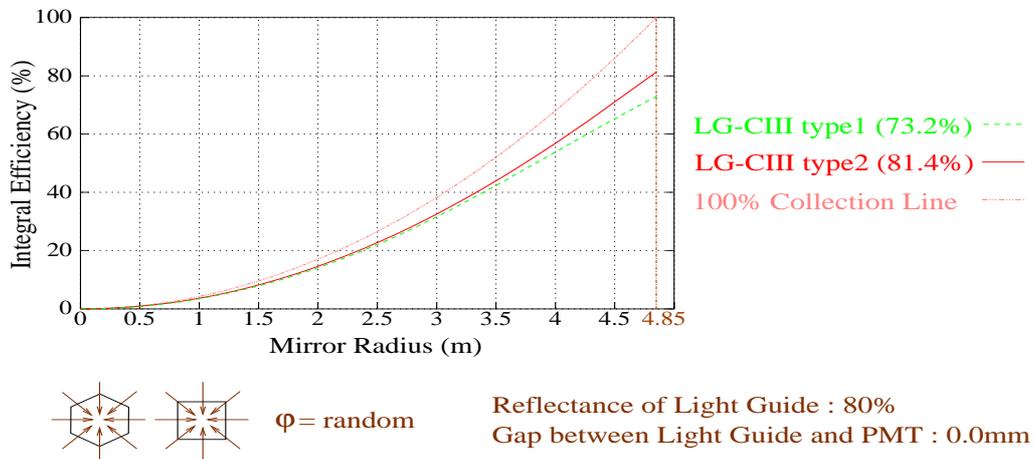


Figure 6.8: CANGAROO-III 望遠鏡のためのライトガイドの積分集光率の比較

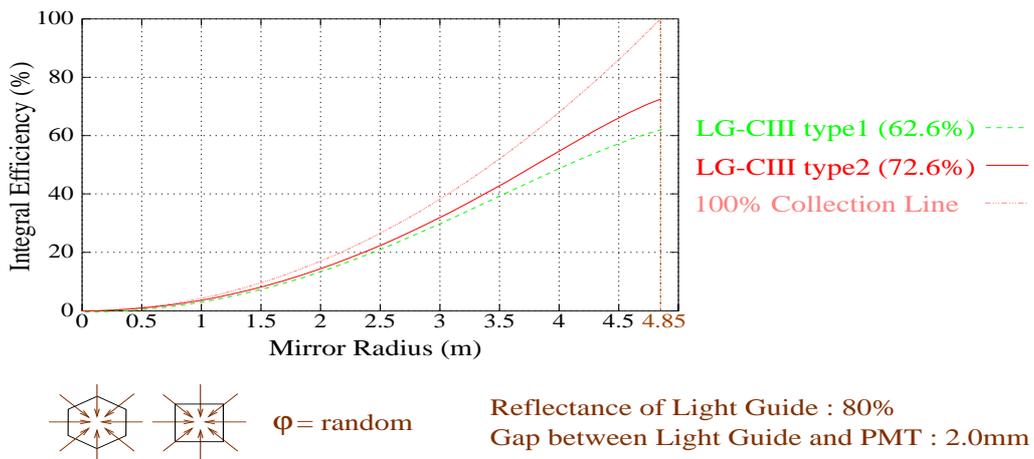


Figure 6.9: CANGAROO-III 望遠鏡のためのライトガイドの積分集光率の比較

6.3 CANGAROO-III 望遠鏡に最適なライトガイドの模索

§ 6.2で CANGAROO-III 望遠鏡のカメラは、四角形のグリッドパターンよりも六角形のハニカム状に PMT を配置した方が良いことがわかった。ここでは CANGAROO-III 望遠鏡で用いるのに最適なライトガイドを決定するために、上面が六角形で下面が円形である 6 種類の形状のライトガイドについてモンテカルロ・シミュレーションを行い集光率を比較するが、CANGAROO-II ライトガイドの場合と同様に今回も § 5.2で述べた Winston Cone を用いる。

カメラのそれぞれの PMT に一つずつライトガイドを取り付けていくとするならば、個々の PMT の寸法精度を考慮し隣接するライトガイド同士に隙間をあける必要があるので、今回は 6 種類の形状についてそれぞれ、ライトガイド同士を密着させた場合と隙間を 1.0mm とした場合の二通りについてモンテカルロ・シミュレーションを行い、それぞれの集光率を比較する。

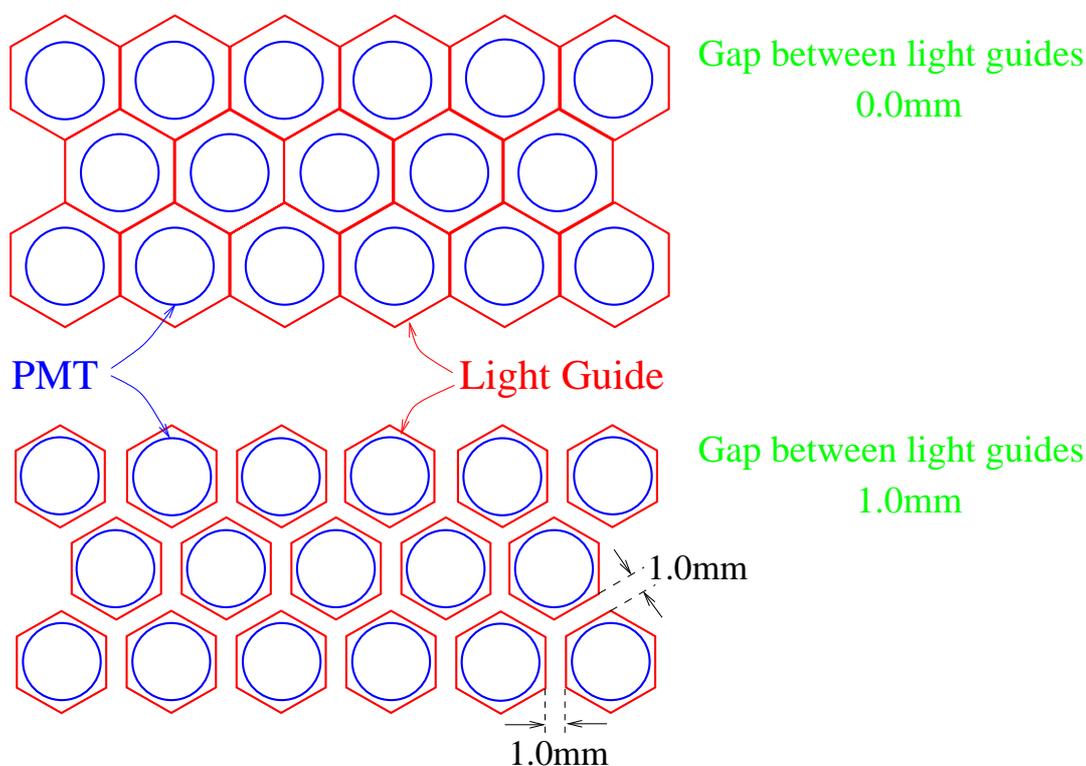


Figure 6.10: ライトガイドと PMT を上から見た図

6.3.1 ライトガイドの形状

集光率を比較する6種類のライトガイドの形状をそれぞれの形状を次のような名称で区別する。

- Winston Cone を用いた形状

PMT の中心間距離を 24mm として六角形の八ニカム状に配置した場合を考える。LG-CIII type2 は中心線を通るどの断面も Winston Cone で、LG-CIII type3 は1つの Winston Cone を鉛直平面でカットしたもの、LG-CIII type4 は1つの Winston Cone を下面の円に向けて平面でカットしたもので、これらの上面の厚みの内側は下面の面積の 2.68 倍になっている。また、それぞれのライトガイド同士の隙間が 1.0mm になるように上面を小さくしたものが LG-CIII type02、LG-CIII type03、LG-CIII type04 で、これらの上面の厚みの内側は下面の面積の 2.46 倍になっている (Fig. 6.11)。

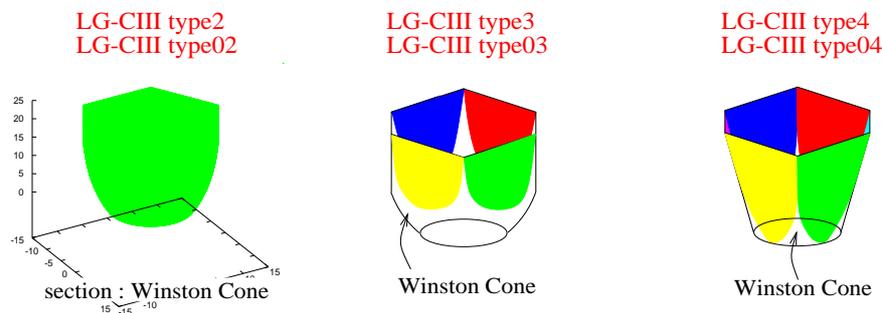


Figure 6.11: Winston Cone を用いたライトガイド (type3,type4,type03,type04 の色のついている部分は平面)

- 放物体を用いた形状

上記のライトガイドの曲面部分を、上面と下面は Winston Cone と同じ点を通り頂点が Z 軸上になるような放物体にしたものが、LG-CIII type5、LG-CIII type6、LG-CIII type7、LG-CIII type05、LG-CIII type06、LG-CIII type07 である (Fig. 6.12)。

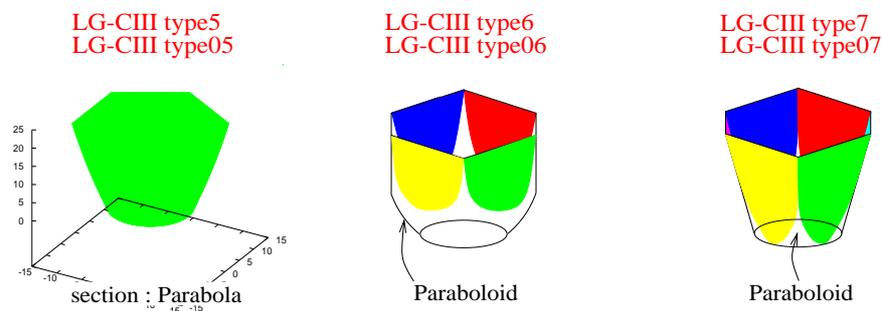


Figure 6.12: 放物体を用いたライトガイド (type6,type7,type06,type07 の色のついている部分は平面)

6.3.2 モンテカルロ・シミュレーション

シミュレーションは、次のような条件で行った。

- シミュレーションの条件

- PMT は直径 19mm の丸型 (Hamamatsu R3479)
- PMT の有感領域の直径は 15mm
- 隣接する PMT の中心間距離は 24mm
- 入射光のイベント数は、それぞれの入射角度につき 10^5 とする
- ライトガイドの内面反射率は 100 % と 80 % の場合で行う
- PMT の光電面での反射率は 0 % とする
- ライトガイド底面と PMT の間隔は 0.0mm の場合と 2.0mm の場合で行う

今までのシミュレーションでは、入射光をライトガイド上面の厚みよりも内側にランダムに降らせていた。しかし実際はカメラ上で個々のライトガイドがカバーすべき範囲があり、その範囲に入射した光の集光率について比較しなければならない。

カメラ上で隣接する PMT の中心間距離は 24mm なので、今回は一つのライトガイドに入射する光を Fig. 6.13(c) の範囲として、隣接するライトガイド同士が密着の場合と間隔を 1.0mm とした場合についてそれぞれ集光率を求める。Fig. 6.13の (a)、(b) はライトガイドの厚みを 0.3mm としたときの、厚みの内側を表している。

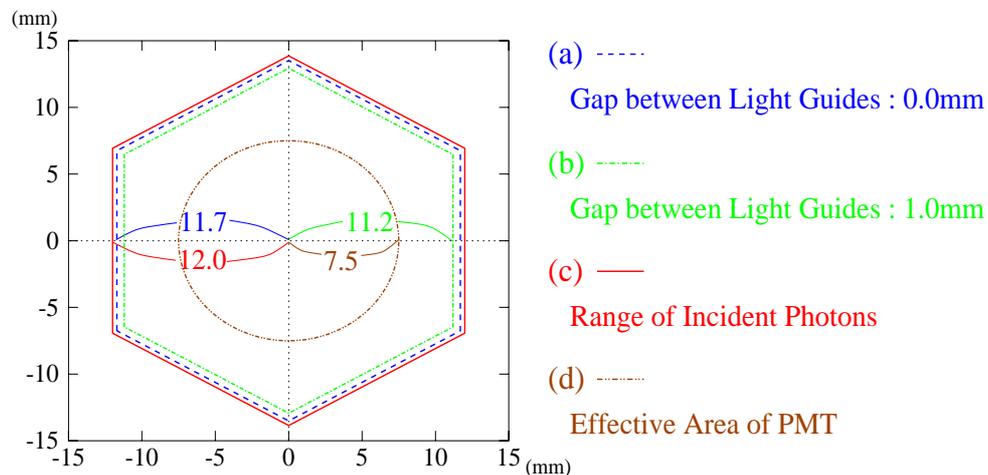


Figure 6.13: ライトガイド上面に入射させる光の範囲

6.3.3 シミュレーション結果

それぞれの形状についてライトガイドへの入射角度に対応する主鏡の半径と集光率をもとめ、主鏡の半径 0m から 4.85m まで積分する。その際、積分の条件として焦点距離 8m の完全な放物面鏡のカメラの中心にライトガイドを一つ置き、光は放物面の軸に平行に入射する場合と同様と考え、ライトガイドへの入射角度に対応する主鏡の面積を重みとして考慮する。

まず隣接するライトガイド同士を密着させた場合の結果を Fig. 6.14、Fig. 6.15、Fig. 6.16 に示す。Fig. 6.14 はライトガイド内面での反射率が 100 %、ライトガイドの底面と PMT の間隔は無い場合で、Fig. 6.15 はライトガイド内面での反射率が 80 %、ライトガイドの底面と PMT の間隔は無し、Fig. 6.16 はライトガイド内面での反射率が 80 %、ライトガイドの底面と PMT の間隔を 2.0mm とした場合である。

次に隣接するライトガイド同士の間隔を 1.0mm とした場合の結果を Fig. 6.17、Fig. 6.18、Fig. 6.19 に示す。Fig. 6.17 はライトガイド内面での反射率が 100 %、ライトガイドの底面と PMT の間隔は無い場合で、Fig. 6.18 はライトガイド内面での反射率が 80 %、ライトガイドの底面と PMT の間隔は無し、Fig. 6.19 はライトガイド内面での反射率が 80 %、ライトガイドの底面と PMT の間隔を 2.0mm とした場合である。

これらの図の横軸はライトガイドへの入射角度に対応する主鏡の半径、縦軸はその半径までの集光率の積分値である。また、図の右側に表示されているパーセンテージは、主鏡の半径 0m から 4.85m までの集光率の積分値である。

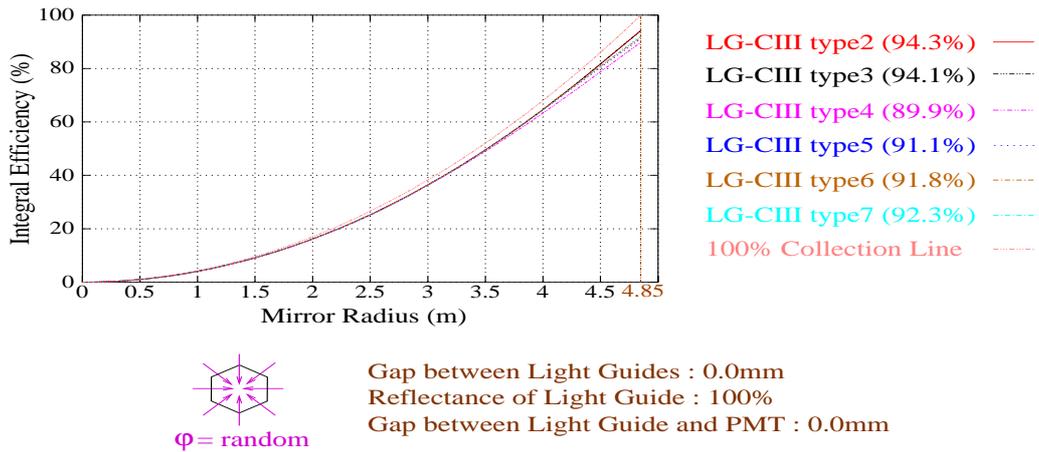


Figure 6.14: CANGAROO-III 望遠鏡のためのライトガイドの積分集光率の比較

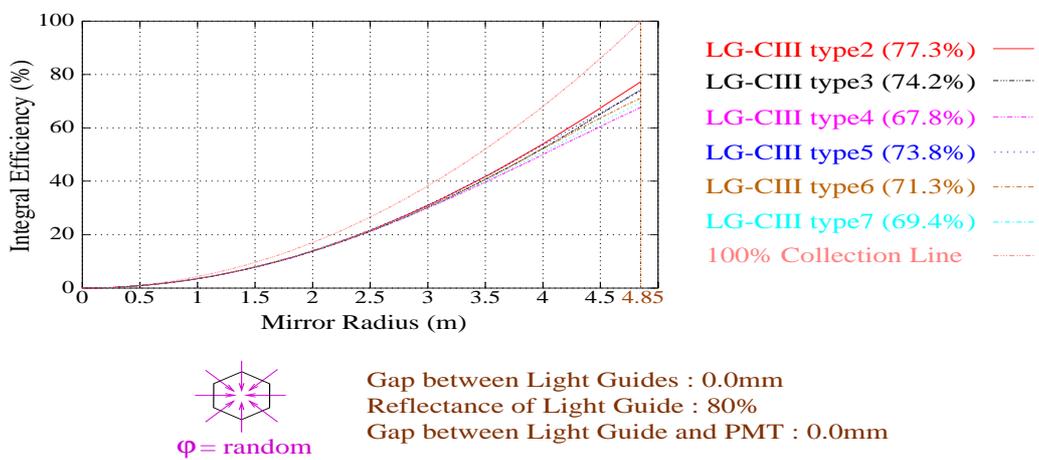


Figure 6.15: CANGAROO-III 望遠鏡のためのライトガイドの積分集光率の比較

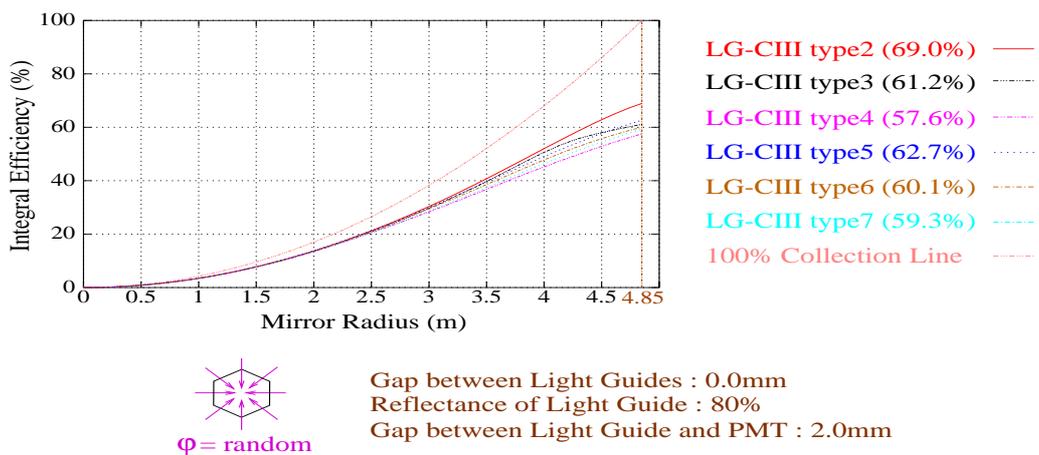


Figure 6.16: CANGAROO-III 望遠鏡のためのライトガイドの積分集光率の比較

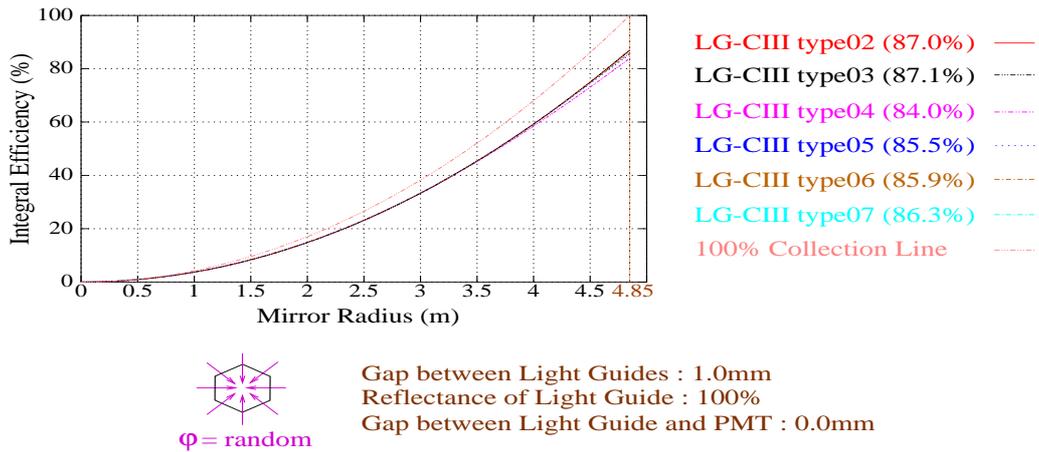


Figure 6.17: CANGAROO-III 望遠鏡のためのライトガイドの積分集光率の比較

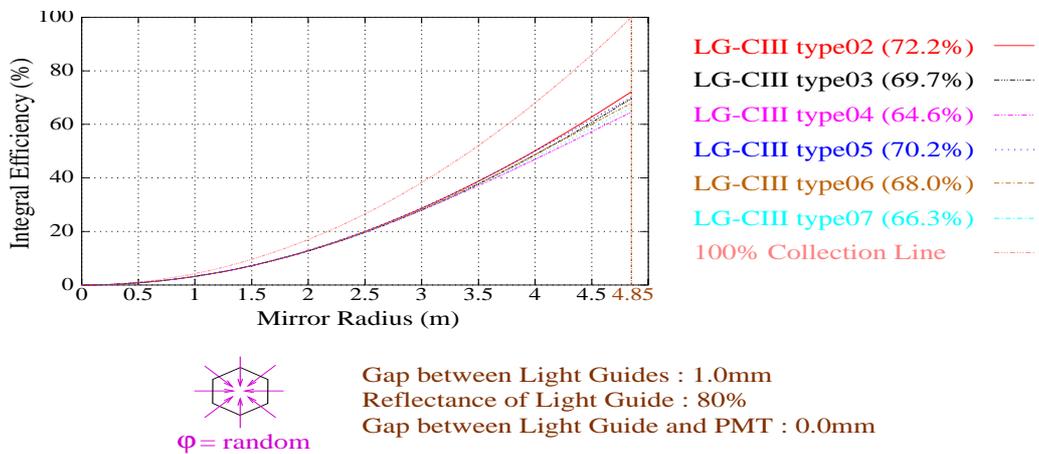


Figure 6.18: CANGAROO-III 望遠鏡のためのライトガイドの積分集光率の比較

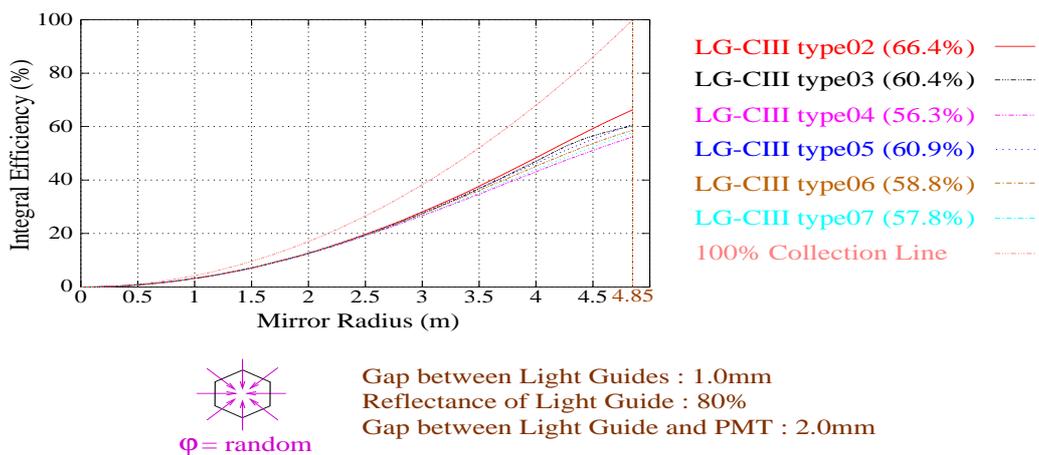


Figure 6.19: CANGAROO-III 望遠鏡のためのライトガイドの積分集光率の比較

Fig. 6.14から Fig. 6.19をみると、すべての条件において隣接するライトガイド同士を密着させた方が、間隔を 1.0mm あけた場合よりも集光率は良い事がわかる。現実ではライトガイド内面での反射率が 100 %という事はないので、内面反射率が 80 %の条件で集光率が一番良い全断面 Winston Cone の LG-CIII type2、LG-CIII type02 について今回のシミュレーション結果を Table. 6.1にまとめた。各パーセンテージは主鏡の半径 0m から 4.85m までの集光率の積分値を表している。

	LG-CIII type2	LG-CIII type02
Gap between Light Guides	0.0mm	1.0mm
Reflectance of Light Guide : 100% Gap between Light Guide and PMT : 0.0mm	94.3 (%)	87.0 (%)
Reflectance of Light Guide : 80% Gap between Light Guide and PMT : 0.0mm	77.3 (%)	72.2 (%)
Reflectance of Light Guide : 80% Gap between Light Guide and PMT : 2.0mm	69.0 (%)	66.4 (%)

Table 6.1: LG-CIII type2 と LG-CIII type02 の集光率の比較

ライトガイド同士の間隔を 1.0mm あけるとライトガイド上面の面積は小さくなるのでライトガイドに直接入射する光の集光率は良くなると思われるが、ライトガイド同士の間隔がそのまま不感領域となり入射光を捕えられないために密着させた方が集光率が良くなる。

これらの結果よりライトガイドを LG-CIII type2、すなわち全断面が Winston Cone の形状でライトガイドの底面と PMT の間隔は無し、そして隣接するライトガイド同士を密着させれば CANGAROO-III 望遠鏡で最も集光率が良くなるということになり、ライトガイドの内面反射率を 80 %とすると、隣接するライトガイド同士の間隔を 1.0mm とする場合に比べ集光率は 5.1 % 向上する。

現在 CANGAROO-II 望遠鏡ではライトガイドの底面と PMT の間に約 2.0mm の間隔があるが、その理由として PMT の放電が挙げられる。CANGAROO-III 望遠鏡では、PMT にプラスの電圧をかけるようにすれば PMT の放電がなくなり、ライトガイドの底面と PMT の間隔を無くす事ができると考えられる。

また、CANGAROO-II 望遠鏡ではライトガイド同士を密着させてひとまとまりにしているが、そうするとカメラの端の方で PMT とライトガイドにずれが生じてくるのでそれぞれの PMT に一つずつライトガイドを取り付けていく方が良いのだが、その方法で取り付けるには前述したように個々の PMT の寸法精度を考慮し隣接するライトガイド同士に隙間をあける必要がある。

したがって隣接するライトガイド同士の間隔を 1.0mm よりもできるだけ狭くし、PMT に一つずつライトガイドを取り付けていけば、少なくとも 72.2 % 以上の集光率が得られるはずである。

6.4 CANGAROO-III 望遠鏡に最適なライトガイドで得られる集光率

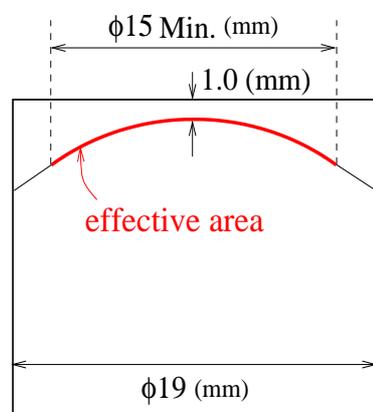
CANGAROO-III 望遠鏡に最適なライトガイドは、上面が六角形で底面は丸く、中心線を通るどの断面も Winston Cone という形状、そしてライトガイドの底面と PMT は密着させ、隣接するライトガイド同士の間隔はできるだけ狭くするというものになった。CANGAROO-III 望遠鏡で用いる PMT の寸法精度を考慮し最終的なライトガイドの形状として、隣接するライトガイド同士の間隔は 0.5mm とする。

ここでは、CANGAROO-III 望遠鏡で用いる PMT の内部構造や PMT 表面での反射率の角度依存性など、考えられる様々な条件を考慮してモンテカルロ・シミュレーションを行い、実際にこの形状でライトガイドを製作した場合に得られるであろう集光率をもとめる。

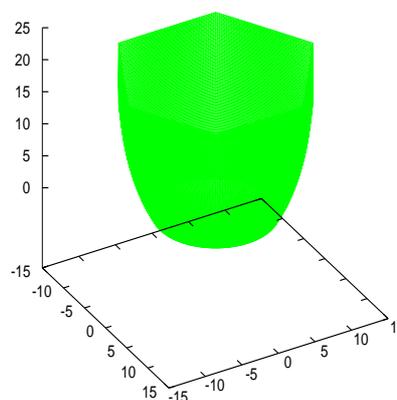
6.4.1 モンテカルロ・シミュレーション

PMT の表面に入射した光はそこで反射してしまうものがあるうえに、CANGAROO-III 望遠鏡で用いる予定の PMT (Hamamatsu R3479) の内部は Fig. 6.20-(a) のようになっており、PMT の表面から内部に入射しても、有感領域まで達しない光がでてくる。

今回は上面が六角形で、中心線を通るどの断面も Winston Cone の形状のライトガイド (Fig. 6.20-(b)) について、PMT 表面の反射率や内部構造も考慮して集光率を求める。また、これまでライトガイド内面の反射率を 80 % としてシミュレーションを行ってきたが、CANGAROO-III 望遠鏡に用いるライトガイドの内面は現在 CANGAROO-II 望遠鏡で用いているライトガイドと同じようにアルミ蒸着を施し、その上に SiO のコーティングをする予定であるので、Fig. 5.16 より内面反射率を 89 % として集光率を求める。



(a) : PMT



(b) : New Light Guide

Figure 6.20: (a):PMT の内部構造、(b):新しいライトガイドの形状

- シミュレーションの条件

- PMT は直径 19mm の丸型 (Hamamatsu R3479)
- PMT の有感領域の直径は 15mm
- ライトガイドの内面反射率は 89 %
- PMT の表面での反射率 (角度依存性) を考慮
- PMT の内部構造を考慮
- 入射光のイベント数は、それぞれの入射角度につき 10^5 とする

6.4.2 シミュレーション結果

シミュレーション結果を Fig. 6.21、Fig. 6.22に示す。Fig. 6.21の横軸はライトガイドへの光の入射角度で、縦軸は、(a) の場合入射光が PMT 内部の有感領域に到達する割合で、すなわちライトガイドの実際の集光率であり、(b) は PMT 表面に入射するが有感領域には到達しない割合、(c) は PMT 表面まで到達する光の割合ですなわち (a) と (b) の合計である。33.73° というのは、主鏡の端からカメラの中心に入射する角度である。

Fig. 6.22は Fig. 6.21の (a) と (c) を積分したもので、横軸はライトガイドへの光の入射角度に対応する主鏡の半径で、縦軸は積分集光率である。また、図の右側に表示されているパーセンテージは、主鏡の半径 0m から 4.85m までの集光率の積分値である。

これまでは (c) に相当する値をライトガイドの集光率としていたが、この結果からわかるように実際は PMT 表面に到達しても、内部の有感領域には到達しない光がある。今回開発したタイプのライトガイドの場合 Fig. 6.22より、PMT 表面に到達する光の割合は 83.8 % であるが 6.1 % が PMT 内部の有感領域には到達せず、ライトガイドの実際の集光率は 77.7 % となる。

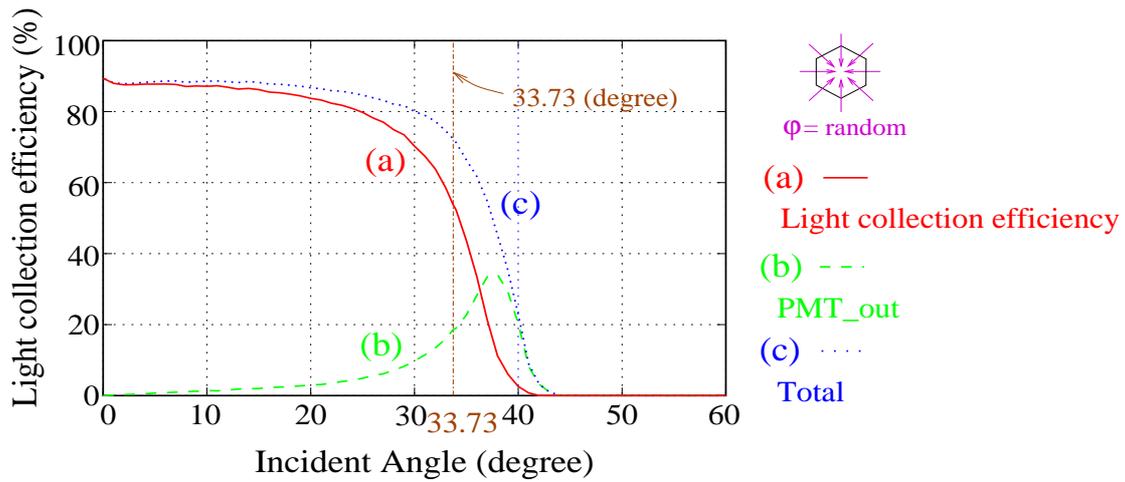


Figure 6.21: PMT 表面に到達する光の割合と実際の集光率の関係 (a):入射光が PMT 内部の有感領域まで到達する割合で、すなわちライトガイドの実際の集光率 (b):PMT 表面に入射するが有感領域には到達しない割合 (c):PMT 表面まで到達する光の割合ですなわち (a) と (b) の合計

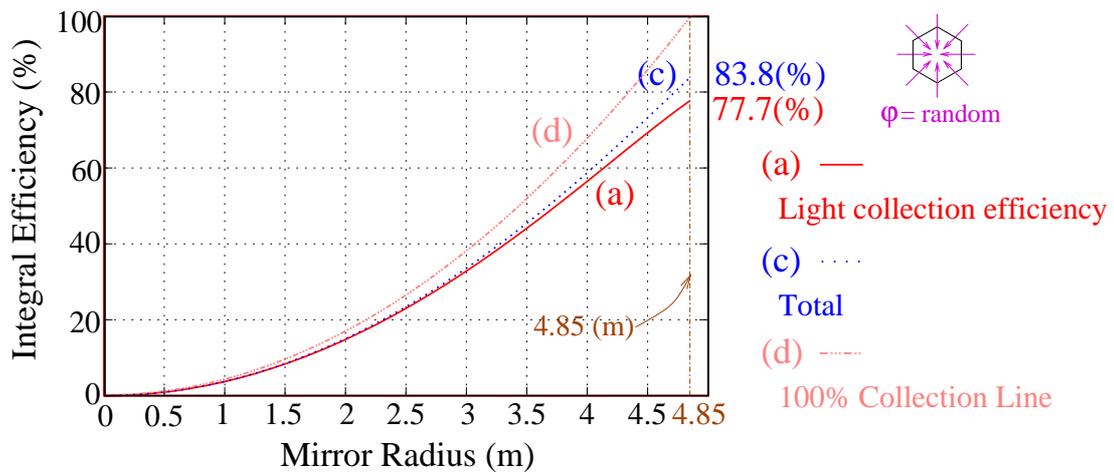


Figure 6.22: PMT 表面に到達する光の割合と実際の集光率の積分値での関係 (a):入射光が PMT 内部の有感領域まで到達する割合で、すなわちライトガイドの実際の集光率 (c):PMT 表面まで到達する光の割合 (d):ライトガイドの集光率を 100 %とした場合のライン

Chapter 7

新しいライトガイドの集光率の実測

§ 6.4でシミュレーションを行った新しいライトガイドを実際に製作して、その内面反射率の波長依存性や形状の精度を調べるとともに、集光率を測定しシミュレーション結果と比較する。

新しく製作したライトガイドは CANGAROO-II ライトガイドと同じように、ポリカーボネート・プラスチック (polycarbonate plastic) でできた型の内面にアルミ蒸着を施し、さらに SiO₂ でコーティングされている。

7.1 新しいライトガイドの内面反射率の波長依存性

空気シャワーからのチェレンコフ光は大気中の分子や微粒子 (ダスト、エアロゾル) に散乱、吸収を受けるため地上でのスペクトラムは Fig. 7.1 のようになる [Appendix A.4]。このスペクトラムから、地上で観測されるチェレンコフ光の波長は 300nm から 400nm の範囲で最も多いことがわかるが、この領域の光に対するライトガイドの内面反射率が著しく低ければいかに集光率の良いライトガイドを用いて観測を行っても、チェレンコフ光を効率良く集光することはできない。そのため新しいライトガイドの内面反射率の波長依存性を調べることは大変有意義なことである。

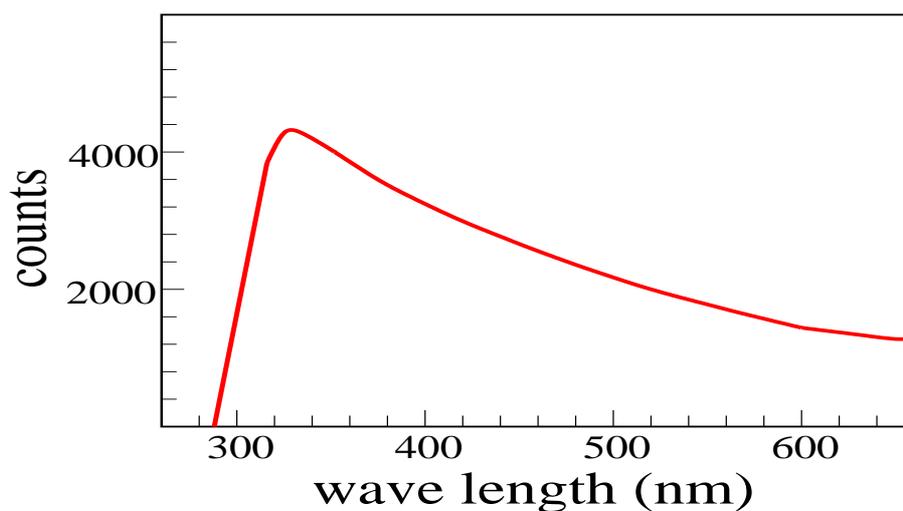


Figure 7.1: 地上で観測されるチェレンコフ光の波長分布

内面反射率の波長依存性の実測装置を Fig. 7.2に示す。ライトガイドと同じようにアルミ蒸着を施し SiO でコーティングした平面のサンプルに、サンプルの鉛直方向に対して 5° と 60° の角度で Fig. 7.2-(b) のように各波長の光をあて、Fig. 7.2-(a) のサンプルが無い場合との比で反射率を求める。

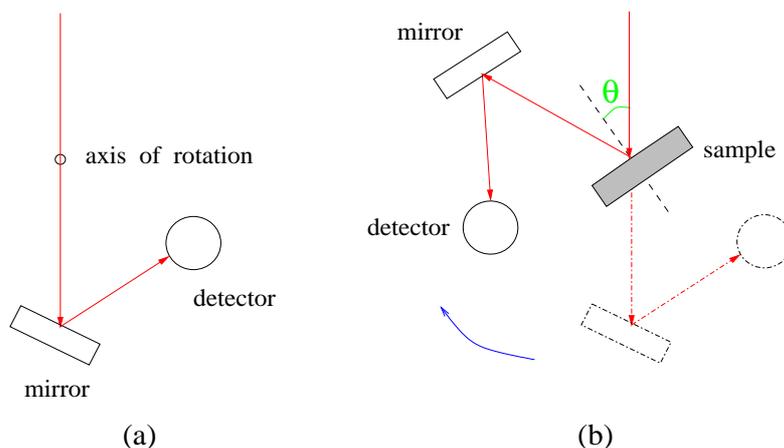


Figure 7.2: 新しいライトガイドの内面反射率の波長依存性の実測装置

このようにして新しいライトガイドの内面反射率として求めた結果を Fig. 7.3に示す。これより、前述した地上で観測されるチェレンコフ光の波長が最も多い 300nm から 400nm の範囲での新しいライトガイドの内面反射率は約 80% 以上有り、それ以上の範囲では 90% 近くの内面反射率が得られることがわかる。したがって、今回開発したライトガイドを実際に観測に用いても何ら問題はないであろう。

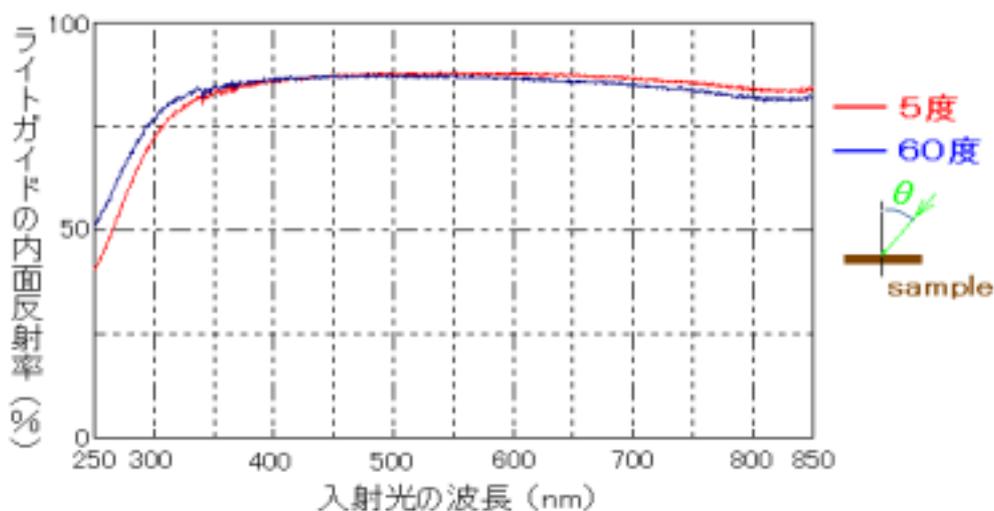


Figure 7.3: 新しいライトガイドの内面反射率の波長依存性

7.2 実際に製作したライトガイドの精度

実際に製作したライトガイドが設計図通りに精度良く仕上がっているかを、次のような方法で確認する。

まずシミュレーションにより、ライトガイドに入射した光が PMT の光電面でどのような分布になるかを調べる。そして実際に製作したライトガイドの底面に白いビニールを貼り、光 (青色 LED) をライトガイドの上面にあてたときに底面にどのような像が形成されるか、デジタルカメラで撮影して比較する。

その結果が Fig. 7.4であるが、シミュレーションでの像と実際に製作したライトガイドでの像はほぼ一致しており、設計図通りに精度良く仕上がっていることがわかる。

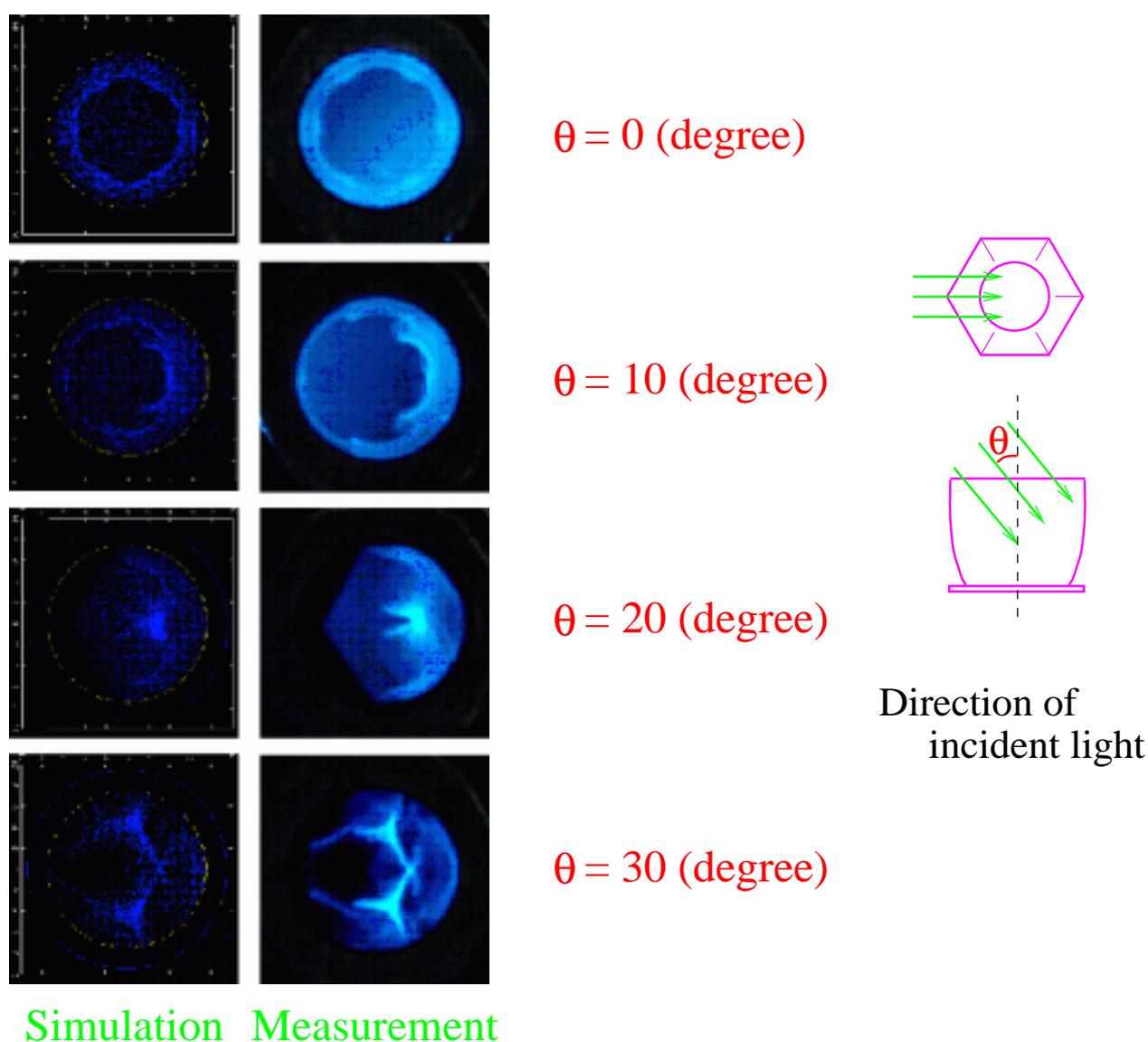


Figure 7.4: シミュレーションと実際に製作したライトガイドでの、入射角度による光の像の比較

7.3 シミュレーションと実測による集光率の比較

実際に製作した新しいライトガイドの集光率を実測によって求めるが、PMT では光電面の非一様性があるため今回の実測には Photodiode を用いる。集光率の実測装置を Fig. 7.5 に示す。

入射光には波長 470nm の青色 LED を用いるが、光の一様性を高めるために乳白色の diffuser で LED を覆う。そしてライトガイドを x 軸のまわりで回転させることによって LED から光の入射角度を変えていき、ライトガイドの集光率について光の入射角度に対する角度依存性を調べる。

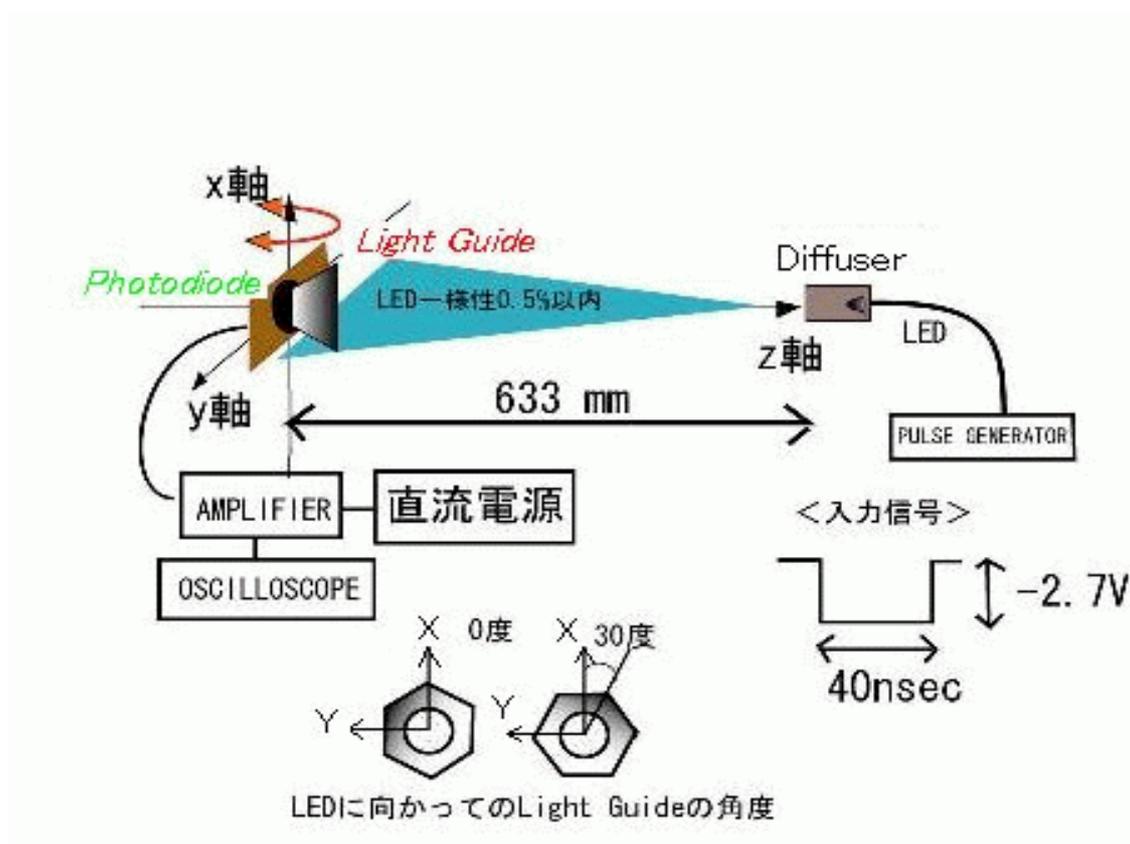


Figure 7.5: 新しいライトガイドの集光率の実測装置

実測によるライトガイドの集光率は以下のように定義する。

$$\begin{aligned}
 \text{集光率} &= \frac{\text{実測比}}{\text{面積比 (理想値)}} \\
 &= \frac{\text{LightGuide 有りのときの出力}}{\text{LightGuide 無しのときの出力}} \\
 &= \frac{S_1}{S_2}
 \end{aligned}
 \tag{7.1}$$

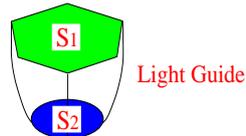


Figure 7.6: S_1 はライトガイド上面の厚みの内側の面積で S_2 は底面積。 $S_1/S_2=2.57$

このようにしてライトガイドの集光率の角度依存性を測定するが、実測の条件に合わせてシミュレーションを再度行う。入射光である LED の波長は前述したように 470nm であるので Fig. 7.3 より、ライトガイドの内面反射率は 89 % とし、LED が発する光の広がりも考慮したシミュレーション結果と実測値を比較したものが Fig. 7.7 である。横軸はライトガイドへの光の入射角度で、縦軸は各入射角度におけるライトガイドの集光率である。

シミュレーションの結果と実測で求めた集光率はほぼ一致しているので、今回のシミュレーションの方法は信頼できるといえる。また § 7.2 でも述べたが、ここでもシミュレーション通りのライトガイドが精密に製作されたことがわかる。

したがって、実際にライトガイドを PMT に取り付けたときには § 6.4 で求めた通り、77.7 % の集光率が得られるであろう。

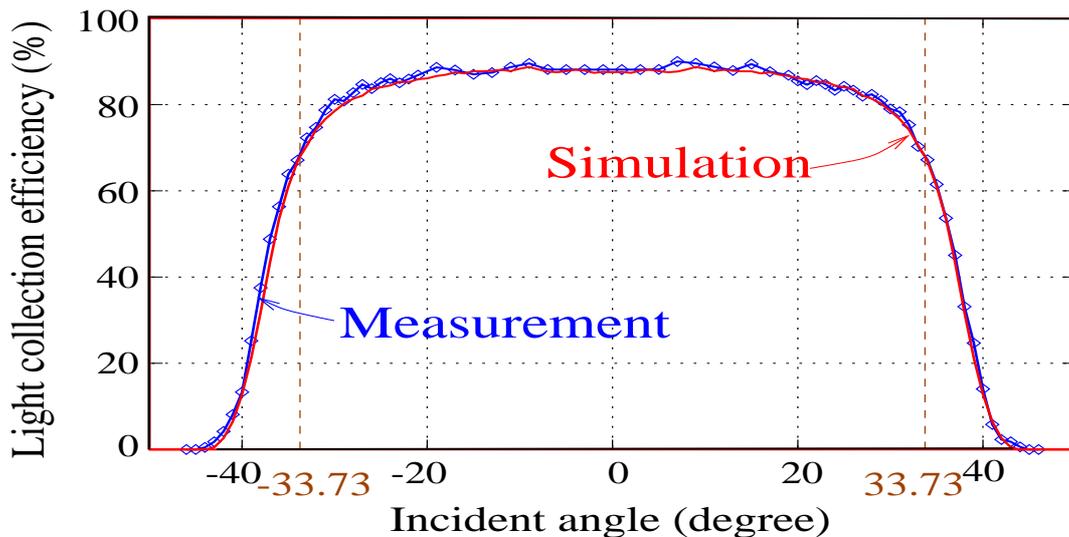


Figure 7.7: Photodiode を用いた、シミュレーションと実測による集光率の比較

Chapter 8

まとめ

様々な形状のライトガイドについてモンテカルロ・シミュレーションを用い集光率をもとめ比較してきたが、まず CANGAROO-II 望遠鏡で現在用いられているライトガイドの改良の可能性について§ 5の結果をまとめる。

- CANGAROO-II 望遠鏡に用いられているライトガイドの改良の可能性 (ライトガイドの内面反射率を 80 %とした場合)
 - (1) 現在のようにライトガイドの底面と PMT の間隔を 2.0mm のままとするならば、既存の LG-CII type1 から LG-CII type2 (全断面 Winston Cone) に変更すれば集光率は 49.2 %から 57.3 %になり 8.1 %向上する。
 - (2) ライトガイドは既存の LG-CII type1 のままとするならば、PMT にプラスの電圧をかけるようにすれば PMT の放電がなくなりライトガイドの底面と PMT の間隔を無くす事ができると考えられるので、集光率は 49.2 %から 66.8 %になり 17.6 %向上する。
 - (3) PMT にプラスの電圧をかけライトガイドの底面と PMT の間隔を無くし、さらにライトガイドを既存の LG-CII type1 から LG-CII type2 (全断面 Winston Cone) に変更すれば、集光率は 49.2 %から 74.0 %になり 24.8 %向上する。

今回のシミュレーションから、CANGAROO-II 望遠鏡で用いるライトガイドの集光率向上の可能性として以上の 3 点が考えられるが、集光率を最も良くするための改良は (3) の場合である事が容易に判断できる。

今回の目的である CANGAROO-III チェレンコフ望遠鏡で用いるのに最適なライトガイドについてまとめる。

§ 6.2の結果より、ライトガイド底面と PMT は密着させ内面の反射率を 80 %とした場合、ライトガイドの中心線を通るどの断面も Winston Cone で上面を六角形にすると、上面を四角形にする場合に比べ集光率は 8.2 % 向上する。したがって CANGAROO-III 望遠鏡のカメラは予定されている通り、PMT を六角形のハニカム状に配置した方が良いことがわかった。

次に、上面を六角形とした様々なライトガイドについてモンテカルロ・シミュレーションを行った § 6.3の結果をまとめる。ライトガイド内面の反射率を 80 %とした場合、集光率が最も良いのは中心線を通るどの断面も Winston Cone の形状でライトガイドの底面と PMT の間隔は無し、そして隣接するライトガイド同士を密着させた場合であった。しかし個々の PMT の寸法精度を考慮し、隣接するライトガイド同士に隙間をあげなければならない。CANGAROO-III 望遠鏡で用いる PMT の寸法精度を考慮すると、隣接するライトガイド同士の間隔は 0.5mm 程度まで狭くすることが可能である。したがって CANGAROO-III チェレンコフ望遠鏡で用いるのに最適なライトガイドとして、以下のような形状に決定した。

● CANGAROO-III チェレンコフ望遠鏡で用いるのに最適なライトガイドの形状

- ライトガイドの上面は六角形で下面は丸型
- 中心線を通るどの断面も Winston Cone の形状
- ライトガイドの底面と PMT は密着
- 隣接するライトガイド同士の間隔は 0.5mm

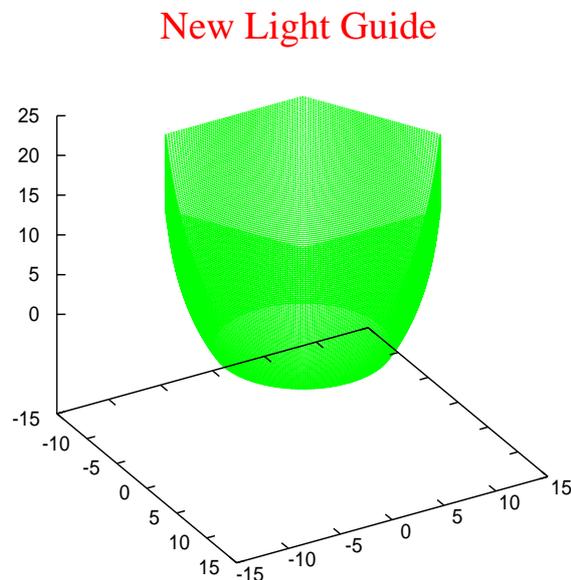


Figure 8.1: CANGAROO-III チェレンコフ望遠鏡で用いるのに最適なライトガイドの形状

このように CANGAROO-III チェレンコフ望遠鏡で用いるのに最適なライトガイドを決定することができたが、この形状のライトガイドを実際に PMT に取り付けた場合にどれだけの集光率を得ることができるか § 6.4 の結果をまとめる。

CANGAROO-III 望遠鏡で用いる PMT の内部構造や PMT 表面での反射率の角度依存性など、考えられる様々な条件を考慮してモンテカルロ・シミュレーションを行った結果、今回開発したライトガイドで 77.7 % の集光率が得られる。

このライトガイドを Fig. 8.2 の設計図をもとに実際に製造したものが Fig. 8.3 の右側の画像である。

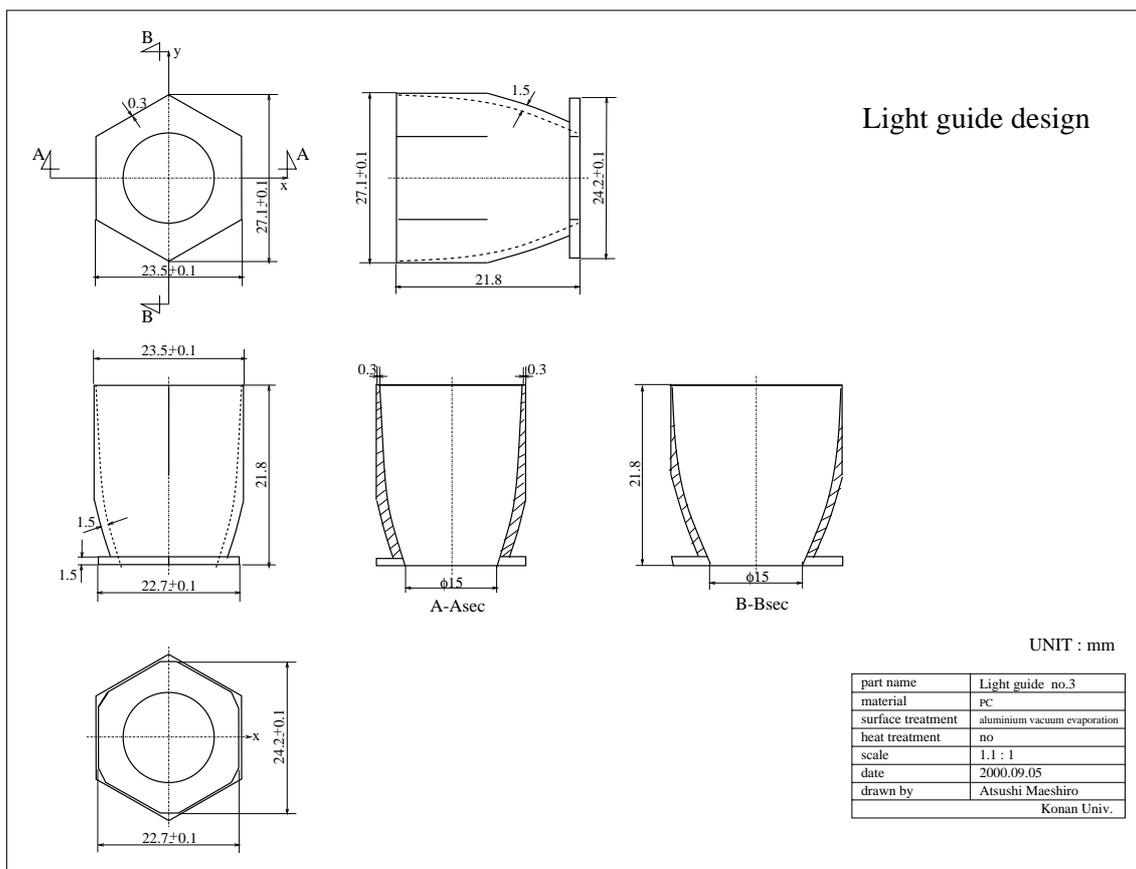


Figure 8.2: CANGAROO-III チェレンコフ望遠鏡で用いるのに最適なライトガイドの設計図

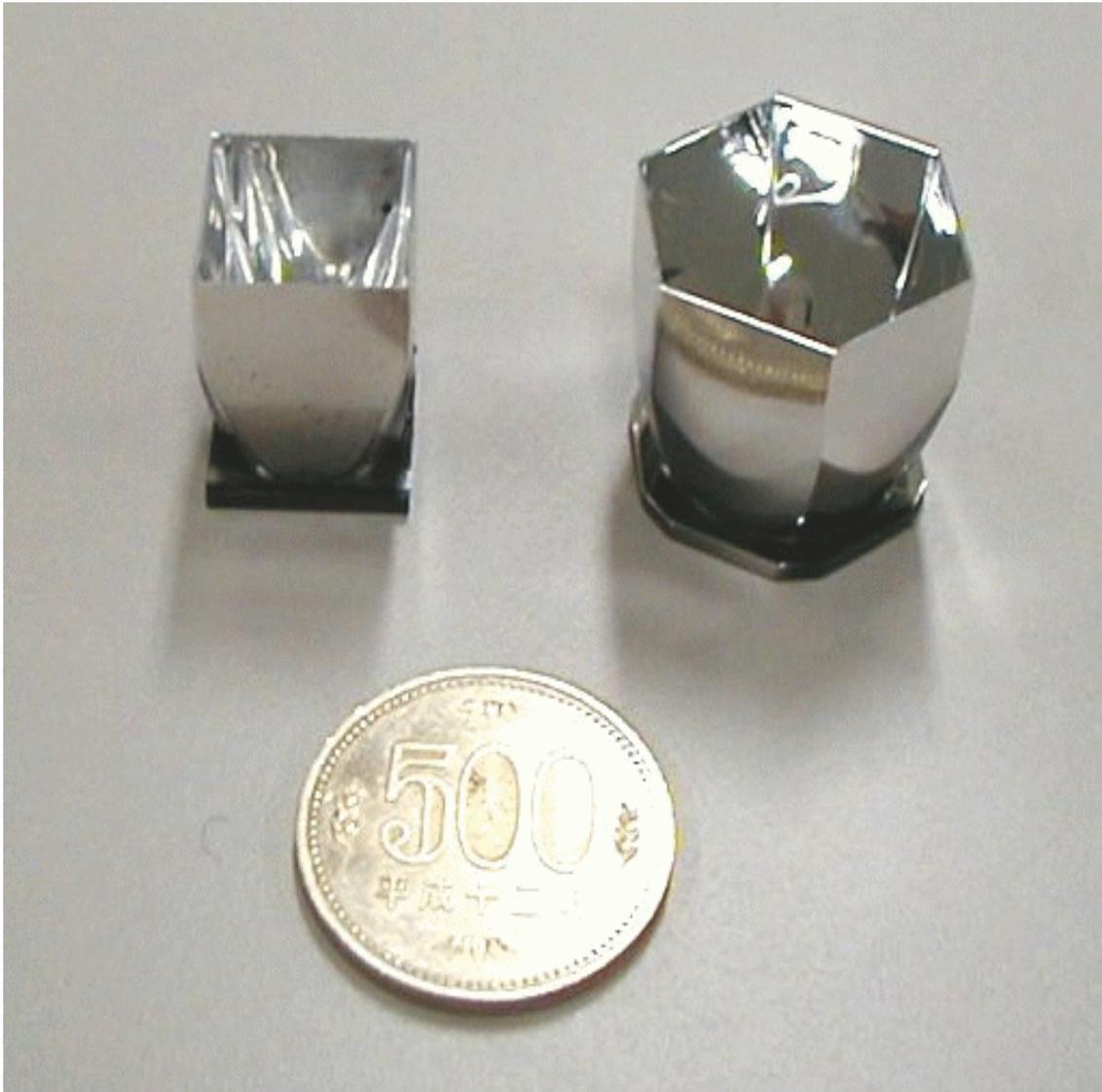


Figure 8.3: (左):CANGAROO-II 望遠鏡で現在用いられているライトガイド (右):今回開発した CANGAROO-III チェレンコフ望遠鏡で用いるのに最適なライトガイド

今回開発して製作した、新しいライトガイドの内面反射率の波長依存性を § 7 で測定したが、地上で観測されるチェレンコフ光の波長が最も多い 300nm から 400nm の範囲でも内面反射率は約 80 % 以上有り、実際に観測に用いても何ら問題はないことがわかった。

また同じく § 7 で、新しいライトガイドのシミュレーションによる集光率と、Photodiode を用いた実測による集光率を比較するとほぼ一致した。したがって CANGAROO-III 望遠鏡で用いる PMT (Hamamatsu R3479) にこのライトガイドを取り付けると、§ 6.4 のシミュレーションで求めた 77.7 % の集光率が得られるであろう。

これらの結果をすべて踏まえ、今回開発した新しいライトガイドが CANGAROO-III 望遠鏡で用いられることが正式に決定した。よって以下、このライトガイドを CANGAROO-III ライトガイドとして述べていく。

現実に一番近い条件において、CANGAROO-II ライトガイドの集光率を再度もとめると 47.4 % (内面反射率 89 %、ライトガイド底面と PMT の隙間 2.0mm) となったのに対して、CANGAROO-III ライトガイドでは 77.7 % で、CANGAROO-II ライトガイドに比べ約 61 % も集光率が向上した。その要因として、ライトガイドの形状に Winston Cone を用いたこと、ライトガイドと PMT の間隔をなくしたこと、PMT を俵積みに稠密に配置したこと等が挙げられる。また、現在観測を行っている CANGAROO-II 望遠鏡は口径 7m から 10m に拡張したがその際、主鏡の面積は約 2 倍になった。したがってライトガイドの集光率も 7m 望遠鏡のときに比べ約 2 倍になってほしいが、CANGAROO-II ライトガイドでは 1.5 倍にしかならない。これは口径 8.5m の主鏡に相当し、口径 10m に拡張した利点が発揮されていないことになる。しかし CANGAROO-III ライトガイドではこれが 1.9 倍となり、10m の大口径望遠鏡の利点を最大限に引き出すことが可能であろう。

CANGAROO-III ライトガイドには、高い集光率を得られる他にも利点がある。Fig. 8.4 は CANGAROO-II ライトガイドと CANGAROO-III ライトガイドの微分集光率の比較 (内面反射率 80 % の場合) であるが、CANGAROO-II ライトガイドは入射角度が 52° の光までを捕らえているのに対して CANGAROO-III ライトガイドでは 42° 以上の角度で入射する光は捕らえない。これは § 5.2 で述べた、任意の最大入射角度以上で入射した光は反射を繰り返してすべて外へ出て行くという、Winston Cone 独特の特徴からくるものである。この結果が意味することは、主鏡の端からライトガイドに入射する角度以上の大角度で入射してくる、ノイズとなるような光をカットするという点においても、CANGAROO-III ライトガイドは優れているということである。

また、中心線を通る断面も最大入射角度の異なる Winston Cone という今回の設計方法を用いれば、ライトガイドの上面と底面がどのような形であっても対応できる。したがって今回開発した CANGAROO-III ライトガイドは設計方法そのものが非常に画期的であるといえる。

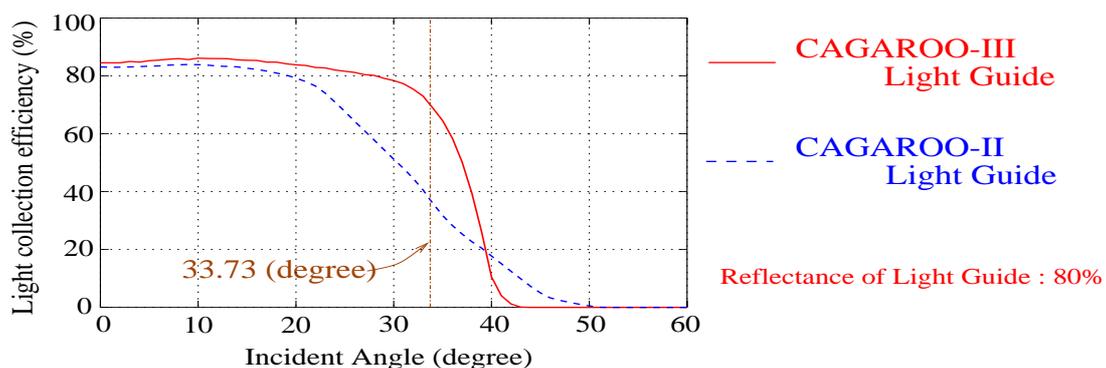


Figure 8.4: ライトガイドへの光の入射角度と微分集光率の関係

CANGAROO-III ライトガイドを CANGAROO-III チェレンコフ望遠鏡に用いればかなり高い集光率が得られ、CANGAROO-II 望遠鏡よりもより弱い光を望遠鏡で捕らえられるようになり、観測可能なエネルギー領域が今までよりもかなり下がることになる。その結果、CANGAROO-III 計画の大きな目的である、人工衛星と地上による観測とのガンマ線のエネルギースペクトルの空白を埋めていくことが期待できるであろう。

Table. A.1は Hamamatsu R3478 の概要であるが、CANGAROO-III 望遠鏡のカメラに用いる R3479 は R3478 の窓材質を UV 透過ガラスにしたものである。UV 透過ガラスとは、その名前が示すように紫外線 (UV 光) をよく透過するガラスである。透過する紫外線の波長は 185nm まで延びるので、有感波長範囲は R3478 が 300nm から 650nm であるのに対して R3479 では 185nm から 650nm までとなる。したがって分光感度特性を表した Fig. A.2からわかるように、R3478 では A-D 曲線なのに対して窓材質を UV 透過ガラスにした R3479 は B-D 曲線になり、チェレンコフ光を効率良く感知することができる。

型名	特徴	分光感度特性			光電面種類	窓材質	ダイノード数	最大定格		陰極感度		陽極-陰極間印加電圧 (Vdc)
		カーブ No.	波長範囲 (nm)	最高感度波長 (nm)				陽極-陰極間電圧 (Vdc)	平均陽極電流 (mA)	ルーメン感度		
										Min. ($\mu A/lm$)	Typ. ($\mu A/lm$)	
R3478	可視領域 高速応答	A-D	300~650	420	バイアルカリ	硼硅酸ガラス	8	1800	01	70	115	1700

音感度 (5-58) Typ. ($\mu A/lm$)	陰極感度		陽極特性						備考		
	赤感度比 Typ.	放射感度 (mA/W)	陽極感度		ゲイン Typ.	陽極暗電流		応答速度			
			ルーメン感度 (A/lm)	放射感度 (A/W)		Typ.	Max. (nA)	上昇時間 Typ. (ns)		走行時間 Typ. (ns)	
11.0	-	88	100	200	1.5×10^6	1.7×10^6	10	300	1.3	14	石英ガラス タイプ R2076

Table A.1: Hamamatsu R3478 の概要

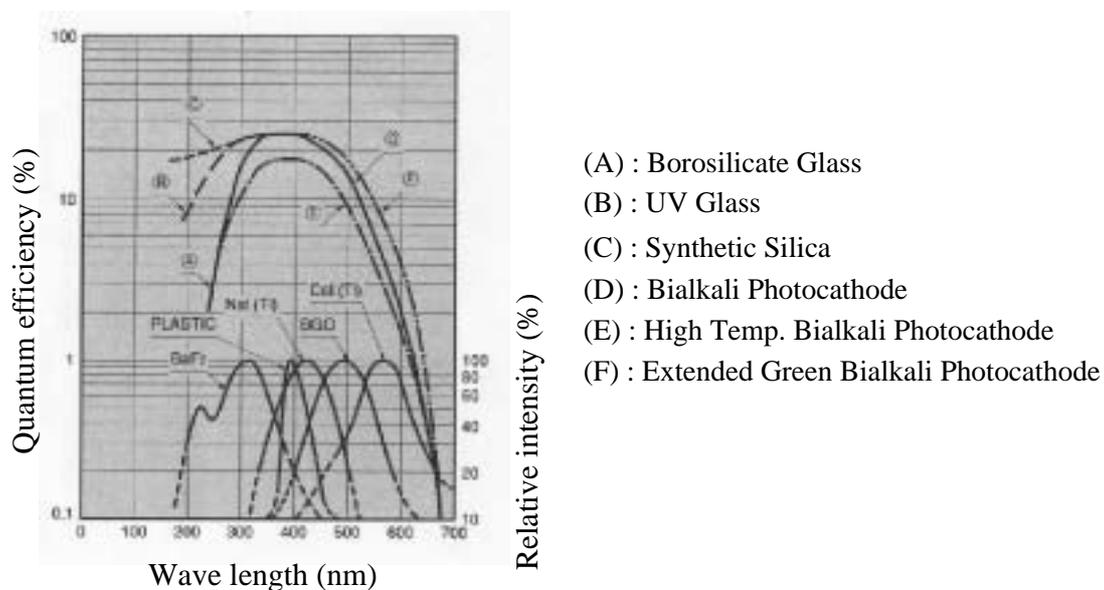


Figure A.2: シンチレーターの光電陰極スペクトル反応と発光スペクトル

A.2 CANGAROO-III 望遠鏡で用いるカメラ

CANGAROO-III 望遠鏡で用いるカメラ部分のデザインを示しておく。

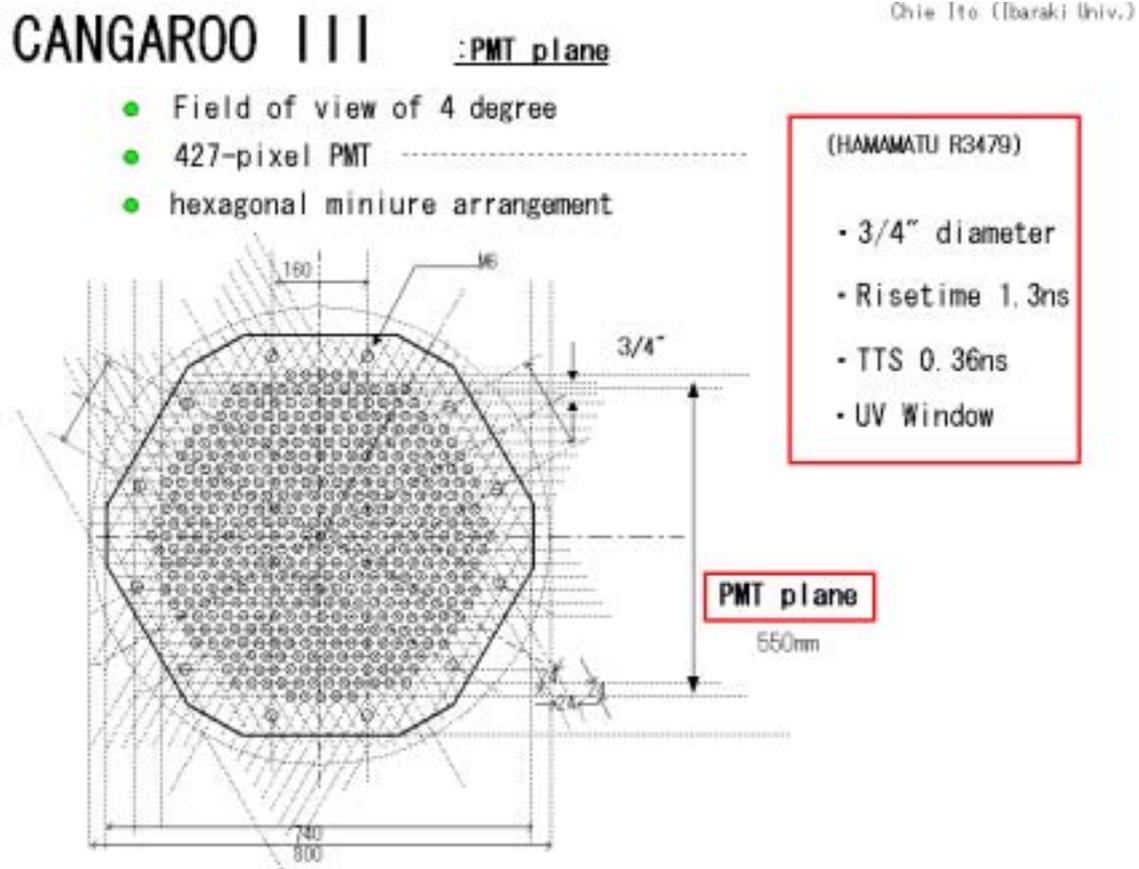


Figure A.3: CANGAROO-III 望遠鏡のカメラ部分

A.3 CANGAROO-III ライトガイドと PMT の結合器具

今回開発した CANGAROO-III ライトガイドと PMT との結合方法の一つの案として Fig. A.4 のようなものが考えられる。

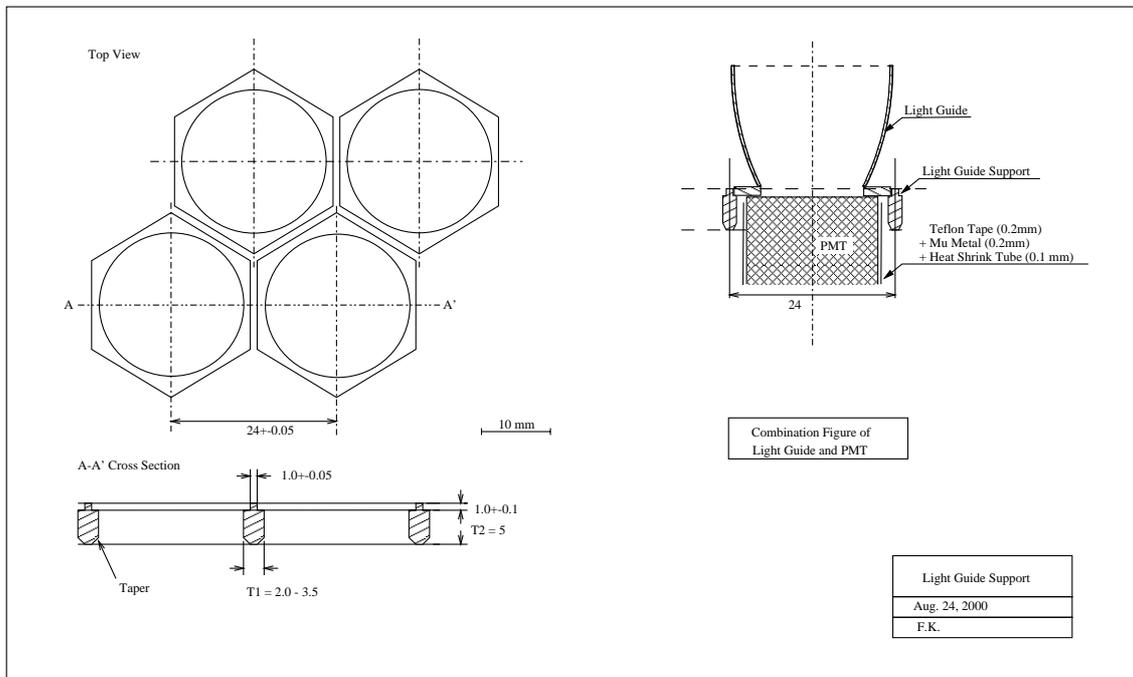


Figure A.4: ライトガイドと PMT の結合器具

A.4 大気中の分子・微粒子によるチェレンコフ光の散乱、吸収

ガンマ線が地球大気に到達すると相互作用により空気シャワーが形成される。その空気シャワーから発せられるチェレンコフ光は大気中の分子や微粒子(ダスト、エアロゾル)に散乱、吸収を受けるがその散乱、吸収過程の代表的なものにレーリー散乱とミー散乱がある。

A.4.1 レーリー散乱

地上付近ではレーリー散乱は波長 400nm の光に対して $X_R = 2974g/cm^2$ の mean free path を持つ。レーリー散乱は (A.1) 式で表され、

$$\frac{dN_\gamma}{dl} = -\rho \frac{N_\gamma}{X_R} \left(\frac{400nm}{\lambda} \right)^4 \quad (A.1)$$

である。散乱角分布は $\propto (1 + \cos^2 \theta)$ である。

A.4.2 ミー散乱

ミー散乱は光の波長と同程度の大きさのダスト、エアロゾルによって起こる。一般に、レーリー散乱ほど観測に影響を与えない。ミー散乱は (A.2) 式で表され、

$$\frac{dN_\gamma}{dl} = -\frac{N_\gamma}{L_M} e^{-h/H_M} \quad (A.2)$$

ここで、 $H_M = 1.2km$ はエアロゾル分布のスケールハイトで、 $L_M \sim 14km$ である。散乱角分布は、以下ようになる。

$$\frac{d^2N}{dl d\Omega} = \frac{dN_\gamma}{dl} 0.8 e^{-\theta/\theta_M} \quad (A.3)$$

ここで $\theta_M \sim 26.7^\circ$ である。

A.5 ライトガイド製作にあたり協力して頂いたメーカー

今回開発した CANGAROO-III ライトガイドの製作にあたり、協力して頂いたメーカーを紹介する。

A.5.1 芝川製作所

今回開発した CANGAROO-III ライトガイドは芝川製作所 (神奈川県横浜市港北区綱島西 4-17-14) で、特殊な形状にも関わらず設計図通りに精密に製作して頂いた。また内面反射率測定のためのサンプルとして、ガラス板にライトガイドと同じアルミ蒸着を施し SiO のコーティングをして頂いた。

A.5.2 鴨下精衡所

CANGAROO-III ライトガイドの内面反射率の測定は、鴨下精衡所 (東京都葛飾区金町 2-1-1) の小川氏の好意により測定して頂いた。

謝辞

本研究にあたり御指導して頂いた指導主任の梶野文義教授に深く感謝の意を表します。梶野先生には学部の頃より数多くの御指導、助言を頂くとともに、研究者としての姿勢、心構えを日々教わり心から感謝しております。梶野先生と同じく甲南大学宇宙粒子研究室の坂田通徳教授、山本嘉昭教授には、本研究に対する助言や物理学の基礎知識等、広い範囲に渡り御指導下さったことを大変感謝致します。また、木村吉武教授、水野健一教授、安藤弘明教授には実験装置に関することで様々な助言を頂き感謝致します。

東京大学宇宙線研究所の木舟正教授、森正樹助教授をはじめ CANGAROO グループの先生方には、大変興味深い研究であるこのような巨大プロジェクトに参加させて頂き心より感謝致します。また、東京大学宇宙線研究所の榎本良治助教授、京都大学の谷森達教授には本研究に対する直接的な助言を頂き深く感謝致します。特に榎本先生には数々の厳しい御指導を頂きましたが、今回開発したライトガイドが完成した際にはとても暖かいお言葉をおかけ頂き、非常に感動するとともに心より感謝致します。

東京大学宇宙線研究所の株木重人君、土屋兼一君をはじめ、CANGAROO グループの学生のみなさんには、甲南大学はグループに途中参加したにも関わらず暖かく接して頂き深く感謝しております。

甲南大学宇宙粒子研究室の林清一さん、前田昇平君には本研究の理論やシミュレーションプログラムで行き詰まった際に数多くの助言を頂き、また林慎一郎君、高島美弥子さん、小田享史君、多田逸洋君、長谷川欽也君、古川雅人君、山岡知隆君にはライトガイドの集光率の実測等に協力して頂きましたことをあわせて心から感謝致します。同じく甲南大学宇宙粒子研究室の川田和正さん、西山考文さん、石川弘君、杉山光君、大浦弘之君、高部政志君、辻川佳弘君、そして甲南大学出身で、現在早稲田大学で研究されている佐々木孝雄博士、社会人になられた菅雄一さんには公私共にお世話になり感謝致します。

ライトガイドを製作して頂いた芝川製作所、内面反射率を測定して頂いた鴨下精衡所の小川氏には大変感謝致します。

いつでも私を応援して励まし支えてくれた松田京子さんとその御家族、友人他、すべての方々に心から感謝致します。

最後に、どんなときでも心の支えになってくれた私の家族、特に小さな頃から夢に描いていた壮大な宇宙に携わるチャンスを与えてくれた祖父、両親には、心より感謝の意を表します。

CANGAROO-III Collaboration



東京大学 宇宙線研究所

University of Adelaide

茨城大学 理学部

理化学研究所

宇宙科学研究所

神奈川大学 工学部物理

国立東京天文台

東海大学 理学部物理

東京工業大学 理学部物理

京都大学 理学部物理第二

名古屋大学 太陽地球環境研究所

山形大学 理学部物理

山梨学院大学 情報学部

大阪市立大学 理学部

甲南大学 理学部

茨城県立医療大学 保健医療学部

Australian National University

木舟 正, 榎本 良治, 森 正樹, 河内 明子, 奥村 公宏, 鈴木 理映子,
片桐 秀明, 土屋 兼一, 大石 理子, 株木 重人, 津野尾 肇

J.Patterson, S.Dazeley, D.Swaby

柳田 昭平, 吉田 龍生, 伊藤 千枝

薄田 竜太郎

P.Edwards

田村 忠久

水本 好彦

西嶋 恭司, 神保 純一郎, 中瀬 友和, 粉間 和葉

桜沢 幸司, 原 敏, 荻尾 彰一, 守谷 昌代, 櫛田 淳子, 浅原 明広,
高野 一慶

谷森 達, 片岡 淳, 折戸 玲子

村木 綏, 松原 豊, 幸 昭

郡司 修一, 門叶 冬樹, 高野 朋也, 渡部 晃

原 忠生, 内藤 統也

吉越 貴紀

梶野 文義, 林 清一, 真栄城 敦, 前田 昇平

村石 浩

G.Bicknell

Bibliography

- [1] M.Mori, 2000, CP515, GeV-TeV Gamma Ray Astrophysics Workshop, edited by B. L. Dingus, et al., American Institute of Physics
- [2] M.PUNCH, 1994, Towards a Major Atmospheric Cerenkov Detector III, Universal Academy Press, Inc.215
- [3] Degrange, B., 1994, Towards a Major Atmospheric Cerenkov Detector III.
- [4] Winston, R., Welford, W.T., 1989, " High Collection for Nonimaging Optics ", Academic Press.
- [5] R.Winston, 1991, 日経サイエンス, 日経サイエンス社 86
- [6] M.Mori et al., 1999, astro-ph/9906076
- [7] Kawachi, A. et al., 2001, Astropart. Phys. 14, 261-269
- [8] Edwards, P.G. et al., 1993, Astronomical Soc. of Australia Proc., v10:4, p.287
- [9] M.Mori, 2000, International Symposium on High Energy Gamma-Ray Astronomy Heidelberg, Germany, astro-ph/0011355
- [10] H.Kubo et al., 1999, GeV-TeV Gamma Ray Astrophysics Workshop Snowbird, Utah, USA
- [11] A.Kawachi et al., 1999, GeV-TeV Gamma Ray Astrophysics Workshop Snowbird, Utah, USA
- [12] M.Mori, 1999, GeV-TeV Gamma Ray Astrophysics Workshop Snowbird, Utah, USA
- [13] T.Tanimori et al., 1999, 26th International Cosmic Ray Conference Salt Lake City, Utah, USA, astro-ph/9906078
- [14] A.Kawachi et al., 1999, 26th International Cosmic Ray Conference Salt Lake City, Utah, USA, astro-ph/9906075
- [15] 櫛田 淳子, 2000, 東京工業大学, 修士論文
- [16] 神保 純一郎, 2000, 東海大学, 修士論文