



可視光で見るガンマ線？ —— 堂平山からオーストラリアへ

菊池 仙

〈元国立天文台〉

木舟 正

〈東大宇宙線研究所 〒188-8502 東京都田無市緑町 3-2-1〉

email: tkifune@icrr.u-tokyo.ac.jp

国立天文台堂平観測所にあった 3.8 m 口径望遠鏡がガンマ線観測用カンガルー望遠鏡と名を変えて、今はオーストラリア中央部の荒れ地ウーメラで稼働中である。堂平望遠鏡をガンマ線望遠鏡に変身させた経緯を紹介する。

1. はじめに

「堂平望遠鏡」(図1)¹⁾によって地上からの超高エネルギーガンマ線観測の分野にわが国のグループの参入がなかった。観測も順調に進んで²⁾、来年1999年早々には新設望遠鏡(7m口径)が観測開始の予定である。転用を可能にしたきっかけは超新星 SN1987A である。この超新星の爆発は天体物理学の分野の最近の傾向、天文と宇宙線と素粒子原子核分野の融合化の進行を象徴するイベントであった。共同研究 JANZOS もこれらの分野からの参加で結成された。超高エネルギーガンマ線天文学の特徴はまさに天体物理学のこの大きな流れに沿ったものであると考えると、堂平望遠鏡のガンマ線への転用の経緯には偶然的だけではない何かがあったような気がする。お世話になった方々にあらためて感謝したい。

2. 超新星 1987A の爆発 — 一天の恵み

超高エネルギーガンマ線は大気中で空気シャワーを引き起こす。電子陽電子のシャワー粒子を地上の粒子検出器で測定すること(空気シャワーアレイ)により $1\text{PeV} = 10^{15} \text{eV}$ 程度以上のガンマ

線を観測できるはずである。もっと低いエネルギーのガンマ線ではシャワーが減衰して地上に届かない。しかし、電子陽電子群が放出するチェレンコフ光によって地上でも $1 \text{TeV} = 10^{12} \text{eV}$ のガンマ線を検出することができる(図2)。かに星雲の観測が1950年代後半にロシアで試みられたの

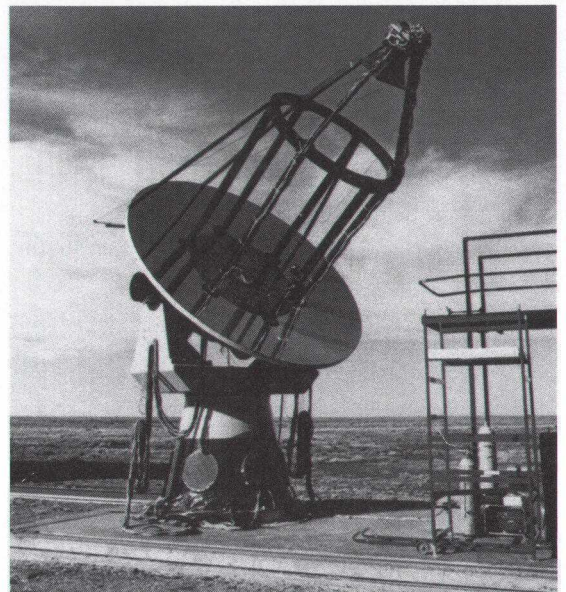


図1: ガンマ線望遠鏡としてオーストラリアで稼働中の 3.8 m 口径堂平望遠鏡

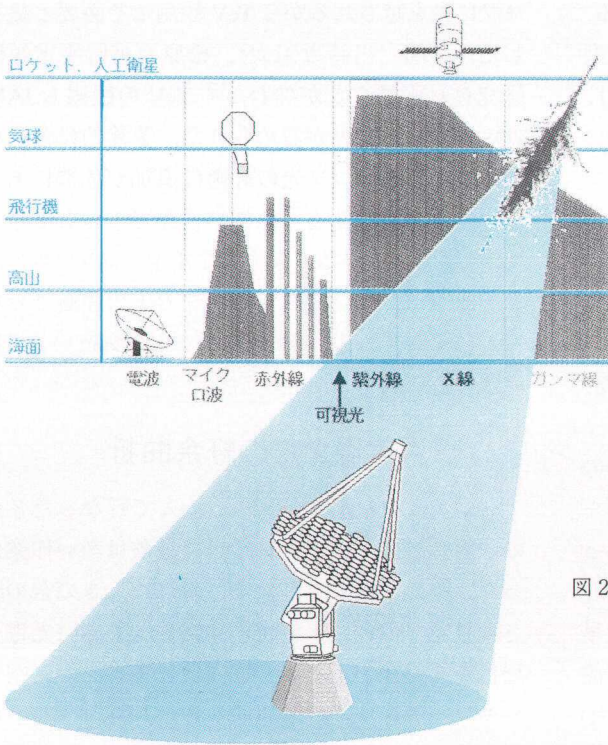


図2: 超高エネルギーガンマ線検出の原理. 大気は紫外線より短い波長の電磁波に対して不透明になるが, 超高エネルギーガンマ線は多量の電子陽電子からなる空気シャワーを生成する. 電子陽電子が放出するチェレンコフ光を可視光に感度のある望遠鏡で検出する.

が最初である³⁾. その後、アメリカ、イギリスなどのグループも観測を開始し、1970年代末から1980年代になってX線連星 Cyg X-3 などからの TeV, PeV のガンマ線信号検出が報告された。世界的に多くのグループが参入したが、わが国ではもっぱら空気シャワーアレによるガンマ線観測に限られてきた。英国ダラム大の Turver のグループは宇宙線シャワーの発生高度を知るためにチェレンコフ光の観測を行っていた。観測目的をガンマ線探索に切替えようとしていた1981年に、その観測地米国ユタを訪ねたことがある。もしCyg X-3からのガンマ線信号を確立できなければ early retirement だと冗談めかして言っていたことを思い出す。楽観的ではない状況が続いた。

微弱なチェレンコフ光を観測するためには、夜光の影響の少ない観測地がそして頻度の低いガンマ

線観測には長時間の露出すなわち安定した観測が必要である。チェレンコフ光の源は高度10km程度の大気上層であるから、ガンマ線の真の方向とチェレンコフ光の到来方向には視差がある。且つ広がりを持っている。広い視野が必要であり、点源を対象とする通常の可視光観測よりも夜光雑音の影響が厳しい。人里離れ乾燥した観測場所が絶対条件である。わが国でも80年代の後半に、太陽エネルギー用の集光鏡を使用し山梨県の明野観測所で観測しようとするグループがあったがうまくいかなかった。故須田さん(神戸大)のグループの、外国に適当な望遠鏡を見つけてチェレンコフ観測用カメラを設置する計画に1989年から科研費がついたが、結局、1990年以降に堂平望遠鏡を用いる計画に合流することになった。

ガンマ線の頻度を何桁も上回る宇宙線荷電粒子

によるシャワーが深刻な雑音となる。チェレンコフ光が広がっていることをうまく利用する道がある。チェレンコフ光の像の形状測定を行なう「解像型チェレンコフ望遠鏡」により、角度精度を上げ、ガンマ線を識別する可能性である。しかし、かに星雲からの超高エネルギーガンマ線信号を実際に得て方法を確立するブレイクスルーが起きたのは1989年である。堂平望遠鏡を譲り受けて解像型チェレンコフ望遠鏡へ転用できる見通しがはっきりしたのはその直前の1988年のことであった。

1987年に大マゼラン星雲に超新星が出現した。宇宙線研究者全体に与えた影響は神岡でのニュートリノ検出のみにとどまらなかった。誕生直後のパルサーが超新星爆発に伴って強い超高エネルギーガンマ線を放出するかも知れないとの期待があったからである。たまたま京大基研で研究会があり、村木さん(名大)と森君(当時京大大学院生)が素早く動いて、南半球の適地に大至急観測装置を建設する実験グループの責任者を佐藤文隆さん(京大)にお願いすることに成功した。さらに、実験屋をとりまとめる労を政池さん(京大)がとってくれて、宇宙線屋を大同団結するに加えKEKの素粒子実験屋を含む大グループJANZOS (Japan, Australia and New Zealand Observation of Super nova) が結成された。10の14乗eV程度の超高エネルギーガンマ線による空気シャワーを検出するシンチレーション検出器群をニュージーランド、ブラックバーチに建設する計画が一月以内に動き出した。

この急速な動きは東京にすぐ伝わった。木舟はこのころ行なっていた空気シャワーアレイによる方法に楽観的でなかった。むしろチェレンコフ光観測に着手する絶好の機会だと感じた。宇宙線研究所明野観測所でもう使用されてない口径2mの球面鏡3台を利用できるかも知れないと思いついた。この球面鏡のボケをすぐ測定して1度程度以下でなんとか使用可能であることを確認した(天文屋さんには信じにくいことかも知れないが)。もしPeVガンマ線が検出できる強度で放出されている

ならば既存のオーストラリア、アデレード大のグループに先を越されるからTeV観測こそ必要と提案した。手嶋(当時東工大)、松原(当時宇宙線研究所)両君などが加わってTeVの観測もJANZOSに含めることが認められた。予算的に苦しい状況でチェレンコフ光の計画の追加が危機にあった8月ごろ、文部省へ陳情に佐藤さんのお供を木舟がしたことがある。超高エネルギーガンマ線はバクチ的なヤクザな稼業だと承知の上の佐藤さんには、必ずネクタイを締めてこいよとの気遣いまで頂いてしまった。

3. 転用実現までの紆余曲折

1987年の11月に松原君と2人で行なった3台の球面鏡の悪天候下の据え付け調整は辛い作業だった。強風に悩まされたが、晴れたときの空の暗さは日本でのテストに比べ100V以上高い光電子増倍管の電圧が可能だったことで実感した。空気シャワーアレイの観測開始から一月遅れで、手動で高度角だけを調整する、いわゆるドリフトスキャンであるが、TeVガンマ線検出の試みが実現した。

1988年1月のSN1087AのX線フレアの時にTeVガンマ線と解釈できる計数率の増大を検出して、チェレンコフ観測を発展させる欲が生じた。故長谷川博一先生(京大)が堂平観測所の3.8m口径の望遠鏡を紹介してくださったのはこのころであった。木舟の第一印象は国外に持ちだすのは手に余るとの危惧だった。しかし、何度か堂平通いをして望遠鏡を見慣れてくるうちになんとかなりそうだと思えてきた。

チェレンコフ観測に、KEKからの素粒子実験屋、JANZOSの1年めは空気シャワーアレイに専念して森君と共に最終調整と立ち上げをやった谷森君も参加することになって、堂平望遠鏡によるチェレンコフ観測の検討を開始した。KEKの予算援助を得ることができ宇宙線研究所の研究費を合わせて、堂平望遠鏡の使用計画が一步前進した。すなわち、月レーザー受信に使用していた時の

状態から、(1) ガンマ線望遠鏡に必要なとしない部分を取っばらい、計算機などをできるだけ最新のものに置き換え小型簡便化すること、(2) 副鏡の代わりに主焦点に新規製作の光電子増倍管カメラを設置すること、(3) 駆動部分をトルクの大きいモーターに置き換えること、に取り掛かった。ブラックバーチの風に耐えるトルクを計算し、パルスモーターとギヤ系の設計製作を神和光器の金子さんに頼んだ。東工大大学院生だった荻尾君がパソコンでの望遠鏡駆動ソフトを作って堂平望遠鏡がガンマ線観測の制御下に入る雰囲気ができた。

当時堂平を切盛りしていた菊池と望遠鏡の貰い得の方の木舟は学部学生当時の同級生である。無理そうなことも気安く進行できたことが非常に助けとなった。

堂平望遠鏡の移送に対する天文台側の状況も当初はあまりすっきりしたものではなかった。その原因は、菊池の私見では、国立天文台が発足して間もない時期で、内部の諸体制がまだ整備されていなかったこと、特に堂平観測所では、歴史的なしながらみなどによって、国立天文台発足前後に運営体制が効率的でなかったことにある。また、1988年3月末で所期の目標とはほど遠い形で打ち切りとなった月レーザー測距計画に10年以上参加していた人たちにとっては、思いは複雑であったであろうことは想像に難くない。さらに、この望遠鏡が新たに目指すものについての理解が天文台内で十分でなかったことも確かで、その傾向は、可視域と堂平に近いほど強いという印象であった。

この転用計画については、菊池自身は1988年3月に、偶然木舟から、希望として聞いていたが、内部からの情報として知ったのは国立天文台発足の約1ヶ月前であった。従って、それまではレーザー関係の施設はそのままの状態で残り、その効果的な利用を初めて経験する共同利用の中で探らねばならないと考えていたし、人工衛星測距で活躍していた小望遠鏡をまず自動測光望遠鏡として使うという腹案で調べを進めていた。しかし、6

月に小望遠鏡が既に解体されていることを知り偏光と測光に重点をおいた特色ある観測所を目指すという構想は、スタートする前に打撃を受けたわけである。なお、菊池はそれまで堂平の91 cm望遠鏡は頻繁に利用していたが、マネージメントをやるようにという打診があったのは、国立天文台発足の2ヶ月前で、多くの人と将来の構想について議論していた状態で移送については、考慮が後回しになっていた。

どのようなタイプのガンマ線望遠鏡とするかは自明ではなかった。当時一般的だったのは、チェレンコフ光を一本の光電子増倍管で受け止める方法だった。観測対象をもっぱらパルサーなどに絞って周期解析を行ないガンマ線信号の雑音比をあげる方法である。チェレンコフ望遠鏡にとって大集光面積が最も重要で鏡面精度への要求は通常の光学望遠鏡に比べるとはるかに緩い。解像型チェレンコフ望遠鏡のパイオニアである米国スミソニアン研究所ウィップル観測所の望遠鏡は多数の球面鏡からなる複合鏡である。これに比べると堂平望遠鏡の精度は格段に優れている。堂平望遠鏡の特長を生かすことは最も自然で望ましい。約200本の光電子増倍管を用いた(ウィップルのカメラは当時光電子増倍管37本であった)高角度分解能カメラを持つ解像型チェレンコフ望遠鏡の案を1988年夏頃に手紙にして、ウィップルのWeekesと、ドラム大のTurverの意見を尋ねた。当然Weekesからは歓迎の返事、Turverからは方針は既定のようだしとりたててコメントの必要はないだろうとのことだった。

最初はニュージーランドに堂平望遠鏡を持っていくつもりだった。オークランド大学のYockさんがニュージーランドの手に余りそうだとの判断を下して、オーストラリアとの共同研究を推薦した。このころ、Turverはシドニー近くのナラブライ、同じオーストラリアで観測を開始していた。ドラム大との共同実験も選択肢の一つだったが、1988年の末にアデレードのPattersonたちとあって、観測



候補地のウーメラを見てきた。そのとき、アデレード大学と共同研究を行なう約束をした。

4. オーストラリアでの堂平望遠鏡

超新星爆発一年後の TeV ガンマ線のバーストの可能性を見た以外は JANZOS の観測は SN1987A からのガンマ線に否定的な答えをだした。ニュージーランドの夢さめて、チベットや明野へと本業に回帰する流れが高まった。多少の変化はあったものの JANZOS のチェレンコフグループがほとんどそのまま CANGAROO (Collaboration of Australia and Nippon for a GAMMA Ray Observatory in the Outback) に移行できた。JANZOS の継承的発展であるとの立場を佐藤さんや政池さんが示してくれたからである。

1990 年度から科研費総合 A と国際共同研究とが認められ、宇宙線研究所の共同利用費から輸送費などについての援助をえることに成功した。望遠鏡のオーストラリア設置のメドが急速に進行した。予算の総枠が必要最小限の設計仕様の望遠鏡土台や現地経費などの粗い評価額ぎりぎりだった。詳しい精度をつめれば否定的な答えになりそうで、「目をつぶってとびこむ」出発であった。

国立天文台発足後、木舟と菊池が話し合ったところ、それまでの打ち合わせは、非常に細かい議論がある一方で、全体の見通しに欠ける印象をぬぐえず、新たに移送計画を作り直すこととした。原則は、現地での調整作業を必要最小限とするために堂平でできることはすべて行うというものであった。仕事が進行するにつれ、細部で解らないことが出て来て、詳しくそうな人を探すとということが時に生じたが、なんとか乗り越えることができた。しかし、2 人ともずばらで、周囲の人に多大の迷惑を掛けたことは間違いない。長谷川博一先生には、“2 人でうまくやって下さいよ”と会う度に言われたものである。

さて、堂平での改修とテスト開始のため、1988 年 3 月末まで機能していたシステムを分解する作業が月レーザー測距グループの人達によって行わ

れたわけだが、彼らに取っては、自分たちが長い間使ってきたものを取り壊すことであり、立ち会う者としてもつらい思いであった。2 度とこのような場面を見たくないと考えたものである。

1990 年末の 12 月、富田弘一郎先生を始め望遠鏡を製作した法月製作所からもお出ましを頂いて分解作業を実施した。万一に備え、装置に詳しい人にも最終日のトラックへの積み込みまで残って貰った。水平軸部分を釣り上げたところ、内部で物がずれるような音がし驚いたが、実害がないとその場で判断ができ作業を予定通り進められた。幸運でもあり用意周到さのおかげでもあった。堂平側の作業は、装置の搬出で終わるわけだが、ガンマ線観測にとっては始まりである。オーストラリア人技術者を招聘し望遠鏡の解体作業に立ち会わせて、現地での組み立て作業の指揮を任せ日本人研究者が奴隷となって働くという方針を選択した。組み立ての手本とできたおかげで、現地での素人による組み立てを無事成功させることができた。

1991 年 1 月から 3 月にかけて、望遠鏡土台のコンクリート打ち、望遠鏡保護の移動式小屋建設の測量から薦職まがいの作業の労を村木さんを初めとして、水本、松原、荻尾などの方々と共にやらざるをえなかった。ガクゼンとしたのは、星の追尾をする段になって、6 枚の鏡の間に 5 ミリ近い段差があることを発見したときである。富田先生に国際電話をかけたがアルゼンチン出張中とのことであった。やむなく荻尾君と木舟二人での悪戦苦闘の結果、最後は重力の助けが働いて解決した。

何年か経つと当然装置の改良が必要になる。鏡面のカニゼンメッキも、教わった通りカーボラダムでの研磨を繰り返したが、反射率はどうひいきめにみても 50% 以下であった。1996 年 10 月～11 月にアルミニウム蒸着を行なった。シドニーの近くの Anglo Australian Observatory に偶然にもわれわれに極めて近い 3.9 m 口径の鏡のための真空チェンバーがある。望遠鏡を牽引したトレーラーの片道 1500 km 大陸横断の運転、タイヤがパンクしたときの恐怖

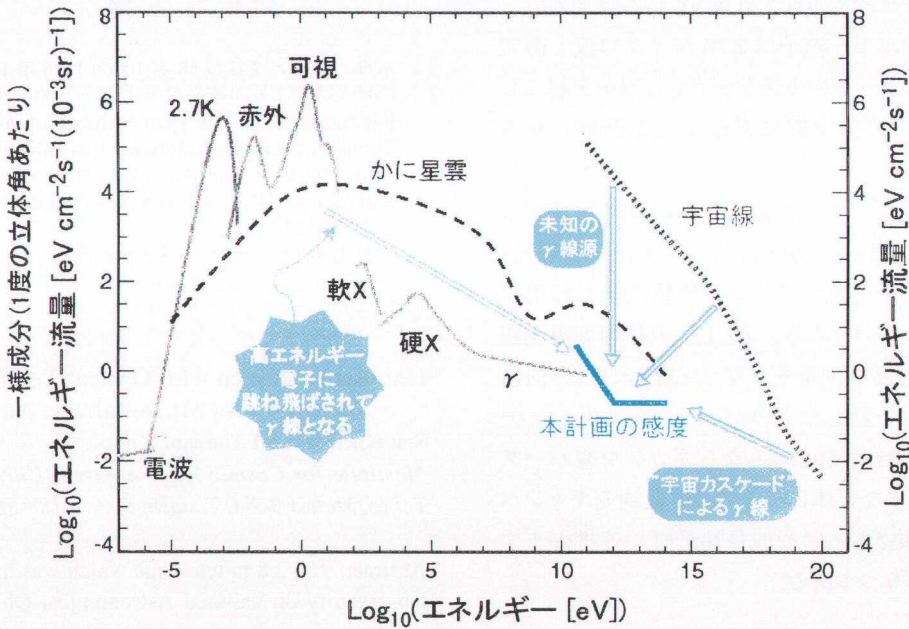


図3: 超高エネルギーガンマ線と電磁波の多波長。銀河系外からの一様な電磁放射, 銀河系内宇宙線, かに星雲からのエネルギー流量を示した。横軸は光子, 宇宙線1個あたりのエネルギー。高エネルギー電子はマイクロ波や可視光に衝突してTeVの超高エネルギーガンマ線を生成する。超高エネルギーガンマ線は長波長電磁波に衝突して電子陽電子を対生成する。10の20乗eVを越える宇宙線やガンマ線は宇宙スケールのカスケードによって, TeVガンマ線を多量に生成する。超高エネルギーガンマ線の観測データには他の波長領域の情報が組み込まれている。

的体验などの末, 反射率が90%近くまで改善された。1年半後の今, 反射率は70%程度である。

5. 天の時, 地の利, 人の和, 多波長の連携

オーストラリアでの観測を開始した1992年はガンマ線衛星コンプトン打ち上げの翌年である。1980年代にチェレンコフ望遠鏡が観測対象としたX線連星ではなくEGRETのGeVガンマ線源をターゲットに選択することができた。観測開始の時は「天の時」を得ていたといえる。当時唯一の超高エネルギーガンマ線源, かに星雲を考えると, 南半球に行くのは間違いであるという観点もあった。しかし, 大天頂角の観測で数十TeVまでの最も精度

の良い結果を出すことができた。銀河中心近くのPSR1706-44, ほ座パルサーからの信号を加えて, 「地の利」を活用することができた。観測が始まる前の予想はある程度あっていた。ほ座パルサー/星雲からの信号は期待通りだった。GeV領域と共通のガンマ線源としてW28に期待をもっていたがまだ信号を検出できていない。これまで予想もされなかった全く新しいタイプのガンマ線源と共に, 今後に残されている楽しみは多い。

100TeV程度の電子が長波長(かに星雲では可視光領域のシンクロトロン光子, その他の天体についてはおそらく2.7Kマイクロ波)の光子に衝突して叩きあげる逆コンプトン効果がこれまで観測された超高エネルギーガンマ線の主要な発生機構らしい。超高エネルギーガンマ線は赤外線などの光子



と衝突して電子陽電子を対生成する。また、より高いエネルギー領域 10 の 20 乗 eV にも達するガンマ線や高エネルギー粒子は 2.7K マイクロ波と衝突の結果宇宙スケールのカスケードシャワーを起こして TeV 領域のガンマ線に寄与すると予想される (図 3 参照)。

超高エネルギーガンマ線には他の波長領域の情報が反映されている。かけ離れたバンドとも結び付いている。堂平望遠鏡をガンマ線望遠鏡に転用する話しを進めていたころ、BL Lac 天体の可視光観測 (菊池) と超高エネルギーガンマ線 (木舟) の同時観測の可能性を話したものだ。今、BL Lac 天体 Markarian 421 や 501 のみならずガンマ線バーストなどさまざまな天体について多波長観測キャンペーンが花盛りである。多波長諸分野の連携がますます重要となりつつある。

参考文献

- 1) 木舟 正, 天文月報 88 巻 10 号: 1995 年 10 月号
- 2) CANGAROO の結果の最近のまとめは例えば, T. Kifune et al., The Proceedings of 4th CGRO Symposium (The American Institute of Physics, edited by C.D. Dermer, M.S. Strickman and I.D. Kurfess; AIP Conference Proceedings 410), pp1507-1511 (1997).
- 3) たとえば, 森 正樹, バリテイ 印刷中

**Gamma Rays seen with Optical Telescope ?
— Moving from Mt.Dodaira to Australia
Sen KIKUCHI and Tadashi KIFUNE***

**Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo, Midori 3-2-1, Tanashi, Tokyo 188-8502*

Abstract: The 3.8 m telescope which was in Dodaira Observatory of National Astronomical Observatory is now in Australia for observing Very High Energy Gamma Rays. Described are motivation and other details why and how such a transformation was done about 10 years ago.