すばる望遠鏡による高エネルギーガンマ線観測・提案書

東京工業大学 理学部　谷森 達、窪 秀利、浅原明広、折戸玲子
東京大学 宇宙線研究所　森 正樹
神奈川大学 工学部　田村 忠久
理化学研究所　河合 誠之
理化学研究所　吉田 篤正
1999 年 6 月

1. すばる望遠鏡を用いたガンマ線観測の意義

今世紀になって、電波・X 線などの新たな電磁波の波長を用いた観測により、想像をはるかに超えた宇宙の姿が現れてきている。最後に残されたガンマ (γ) 線天文学も、近年、ガンマ線観測衛星 Compton Gamma Ray Observatory (CGRO) により予想を超える数のガンマ線天体が発見され、また TeV 領域の超高エネルギーガンマ線においても、米国や我々が宇宙ガンマ線が大気で発生するチェレンコフ光を捉える望遠鏡による高エネルギーガンマ線天体の観測に成功したことにより、ようやく確立してきた。これらの観測によって、多くのパルサーや活動銀河核には GeV 以上でエネルギースペクトルにカットオフが存在することが明らかになった。すなわち、このカットオフ領域の詳細な観測は宇宙高エネルギー現象解明の重要な鍵となるが、10 GeV から 100 GeV のガンマ線は衛星・チェレンコフ光観測ともに観測が最も困難であり未知の領域といえる。

現在唯一可能な方法として、高エネルギーガンマ線が大気と衝突して引き起こす粒子シャワーから放射されるチェレンコフ光を、光量が平地より 4 倍多い 4000m 高地に 10m 級の反射望遠鏡を設置して観測すればよい。ただ現実問題として、4000m クラスの高地で晴天率が高く、かつ銀河中心が見える北緯 25 度以南で、しかも道路・電気等の環境が整っているところはほとんどない。このような環境が満たされている高地は現在、ハワイ島マウナケア山が最も理想的である。ただ、この山頂で観測装置の設置は厳しく制限されている。また高地は風など自然環境が厳しく、普通の平地に設置するよりはかなりの経費の増大が予想される。現在の超高エネルギーガンマ線グループの規模では、近い将来このような高地に大型チェレンコフ光ガンマ線望遠鏡を作ることはことは不可能に近い。しかし、今 CGRO の高エネルギーガンマ線検出器 EGRET が運用を終え、今後 10 年近くは宇宙ガンマ線の測定は地上観測が唯一の手段となってしまう。そのため今後、地上から 10 GeV 領域のガンマ線測定を目指すことは高エネルギー天文学にとって非常に大切になってくる。

そこで我々はすばる望遠鏡の利用を昨年度から国立天文台の共同開発に提案し、観測装置の開発を支援していただいている。「すばる」は直径 8m の反射鏡を持ち、チェレンコフ光観測に必要な 0.5 度の広視野が取れる唯一の大型光学望遠鏡であり、最高のチェレンコフ光望遠鏡となる。さらにチェレンコフ光観測は衛星の数千倍以上の感度があり、かに星雲の百分の一の強度のガンマ線パルサーが 1 晩の観測で検出でき、短時間の観測でも特定の天体観測では衛星を十分凌駕する結果を得ることが出来る。また「すばる」を利用すると、全く独創的な利点として、主焦点に取り付けるガンマ線カメラの視野の中心に Avalanche Photodiode または CCD を置くことにより、ガンマ線と光学波長によるガンマ線天体の同時観測が計画できる。未知のガンマ線天体の光学同時観測による天体の同定が初めて可能になる。

我々の光学望遠鏡を用いる方法は、世界で最初に提案した独創的な方法であり、現在世界で計画されている 10 GeV 領域ガンマ線検出計画の中で最も確実で精度が良いので評価が高いが、「すばる」を有する日本でのみ実行可能である。また、この観測は現在、我々が進めている重点領域「超高エネルギー天体」で行なう 100 GeV ガンマ線検出と相補的であり、この「すばる」での観測を加えることによって初めて衛星の 100 MeV 領域から、地上観測の TeV 領域にわたる広波長のエネルギースペクトルが得られ、高エネルギーガンマ線天体における非熱的現象の解明が大きく進むことが期待される。

2. 観測方法・検出感度

宇宙線は大気の原子核と衝突して粒子シャワーを作り、シャワーの中の高エネルギー荷電粒子はチェレンコフ光を進行方向に約 1 度の立体角でビーム状に放射する。このチェレンコフ光を大型鏡で捉え、そのイメージからシャワーの方向すなわちガンマ線の方向を得て、さらに像の形状の解析から

バックグランドとなる陽子宇宙線が作るハドロンシャワーとの識別を行い、ガンマ線を検出する。チェレンコフ光は高度が上がると密度も上がるので、高地観測ほど検出可能なガンマ線のエネルギー閾値が下がり、10 GeV ガンマ線は 4000m の高度で 10m クラスの視野 0.5–1 度の反射望遠鏡を用いて測定可能になる。

現在、シャワーイメージ解像法による検出は地上では 1 度以上の視野が普通必要とされ、すばる望遠鏡の視野 0.5 度は狭いように見える。しかし 4000m の高度では、1 万 m 上空で発生したシャワーからビーム状に放射されたチェレンコフ光がまだ広がらずに超前方に集中しているため、ガンマ線像の視野内での分布も中心の視野 1 度以下に集中する。また、検出されるシャワーのエネルギー閾値が 10 GeV 近くまで下がってくると予想される主なバックグランドである宇宙線中の電子やミュー粒子の影響を出来る限りおさえるためにも視野を小さくして、これらのバックグランドを軽減しなければならない。チェレンコフ光によるシャワー像を捉えるために「すばる」の主焦点に光電子増倍管 (PMT) を 45 本使用した視野 0.5 度のガンマ線カメラを取り付け、シャッター時間約 10 ナノ秒で (夜光の除去のため) 光のフラッシュを捉え、ガンマ線天体を観測する。予測される感度はかに星雲で毎秒 1 イベント程度、一晩の観測 (観測時間の半分はオフソース観測) で 1 万イベント程度が得らる。

ガンマ線観測には視野中心部の 0.1 度以内はあまり重要ではない。しかしスバルの主焦点装置には補正レンズ系が付いているためにこのスペースを利用し、ここに光学素子を取りつけ、ガンマ線と光学の同時観測を可能にしたい。現在この計画でねらう天体は以下に述べるようにパルサーおよび活動銀河核 (AGN) である。どちらも時間変動を伴う点源の天体である。光学観測はガンマ線カメラの視野中心の一つの光電子増倍管にスリットを付け、DC 成分を計測する回路を増設することによって容易に実行出来る。ただ、光電子増倍管の量子効率は 20%と低いので、感度を上げるために 10 ミリ秒程度で変動するパルサーに対しては反応の早い Avalanche Photodiode Array を用い、また変動の緩やかな AGN に対してはさらに量子効率の高い小型の CCD を取りつけることにより、非常に暗い天体の同時観測も簡単に実現できる。これらの天体では広い範囲のスペクトルで時間変動が期待され、重要な意味を持っている。特にこの場合、光学、ガンマ線どちらも世界最高感度での完全な同時観測になり、画期的な試みと言えよう。

以下にこのすばる望遠鏡によるガンマ線観測で最も期待されるガンマ線パルサーおよび活動銀河核についてその意義を述べる。

3. 観測対象 I. ガンマ線パルサー

1991 年に打ち上げられたコンプトンガンマ線天文台衛星 (CGRO) によりガンマ線天文学は大きな飛躍を遂げた。ガンマ線領域で検出されているパルサーは 7 個となり、うち 6 個は GeV 領域までエネルギースペクトルが伸びている。これらは他の波長と同期したパルス成分を持ち、回転する中性子星付近 (中性子星と共に回転する光円錐内) で放射が起きていることを意味している。放射の源は中性子星近傍で加速された荷電粒子 (電子と陽電子) と強い磁場の相互作用と考えられるが、理論的にはこの加速が起きている場所を中性子星の表面近くとするモデル (ポラーキャップモデル) と、やや離れた場所とするモデル (アウターギャップモデル) が提案されている。前者では、中性子星近傍の強く湾曲した磁力線によって生じる高電位差によって荷電粒子が超高エネルギーに加速され、磁場内の曲率放射としてガンマ線を放出し、さらにこのガンマ線が磁場内でカスケードを起こし、広いエネルギー領域にわたる放射を生み出すとする。後者では、パルサー磁気圏外部の開いた磁力線と中性面との境界にできる真空ギャップで荷電粒子が加速され、曲率放射または逆コンプトン散乱によりガンマ線が放射されるとする。現在の観測データを説明する上では両者の決定的な差は出ていない。しかし、CGRO によって観測されているエネルギーの上限値 (約 30 GeV) 以上では二つのモデルの違いは大きくなり、ポラーキャップモデルでは磁場中での電子・陽電子対生成が効いてくるためパルス放射は大きく減衰すると考えられるが、アウターギャップモデルでは高エネルギーまで伸びたスペクトルが予想される。すなわち、このエネルギー領域の観測はパルサー磁気圏の物理を理解していく上で大きな意味を持っている。

一方、地上における解像型チェレンコフ望遠鏡による TeV 領域の観測では、かに星雲、パルサー 1706-44、及びほ座パルサー方向からのガンマ線の信号が検出されているが、これらの信号にはパルス成分が見つかっていない。これら三つの天体からはいずれも GeV 領域でパルスが見出されていることから、これらのパルサーでは 10 GeV から ∼1 TeV の間のエネルギースペクトルにおいてパルス成分にカットオフが存在するはずである。前述のパルサーにおける粒子加速のモデルもこれを予言する

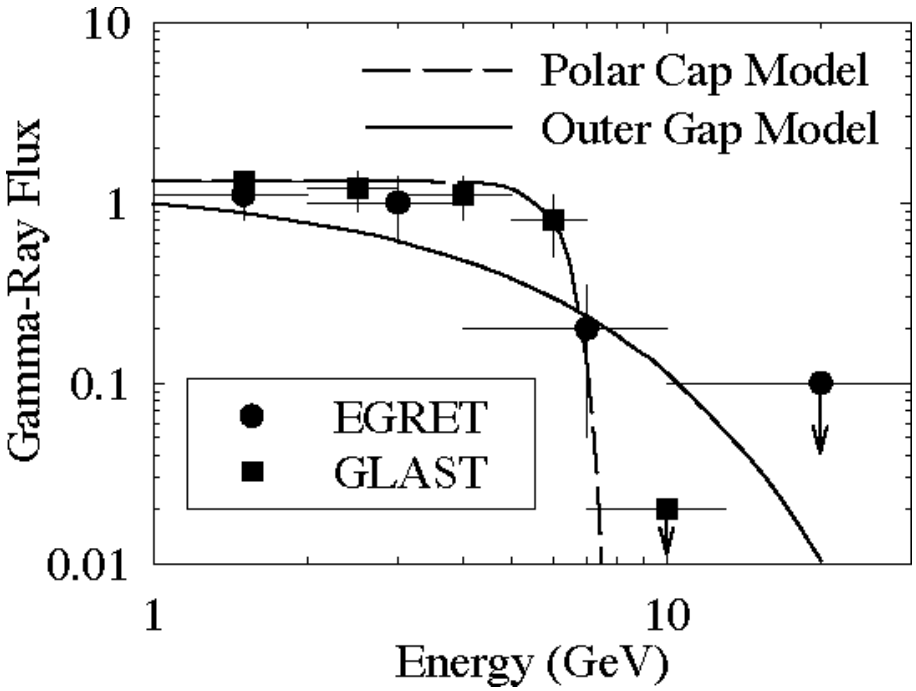

Figure 1: パルサーの放射モデルによるガンマ線スペクトルの違い。ポラーキャップモデルでは高いエネルギーのガンマ線はカットオフされるが、アウターギャップモデルでは高いエネルギーまで伸びていることが予想される。(GLAST 計画ホームページより)

が、カットオフ以上のエネルギーにおけるガンマ線の非パルス成分の存在は、パルサーの磁気圏より遠いところで別の粒子加速機構が働いていることを意味している。最近の X 線観測により、たくさんのパルサーの周囲に広がった放射が見つかってきており、パルサー星雲と呼ばれている。パルサーからの粒子風が周囲の星間物質と衝突して衝撃波面がつくられ、電子・陽電子が衝撃波により高エネルギーに加速され、磁場中でシンクロトロン放射を起こして X 線にいたるまでの放射が起きていると考えられている。このシンクロトロン放射を起こしているのと同じ荷電粒子が、パルサー星雲中の光子を高いエネルギーまで跳ね飛ばす逆コンプトン散乱によってガンマ線がつくられているとするモデルが TeV 領域のガンマ線のモデルとして有力である。

以上のように、10 GeV から ∼1 TeV の領域のガンマ線のパルス成分及び非パルス成分のエネルギースペクトルが測定できれば、パルサーにおける粒子加速理論の解明の鍵となるだけでなく、パルサー周囲の磁場やプラズマ密度についても貴重な情報が得られることになる。

「すばる」望遠鏡にガンマ線カメラを搭載すれば、30 GeV 以上のガンマ線を衛星観測の場合に比べ圧倒的に優れた統計精度で観測できる。かにパルサーの場合では、CGRO 上の EGRET 検出器のデータを外挿すると、0.7Hz の頻度でガンマ線が検出されることになる。パルス成分は電波望遠鏡で観測されている精密なパルス周期との同期から、非パルス成分はオフソース観測との比較で求め、それぞれのエネルギースペクトルを測定していく。Geminga はガンマ線領域でほとんどのエネルギーを放出している特異な天体であるが、EGRET の観測では 4 GeV 以上ではエネルギースペクトルが急になっており、上限値しか得られていない。しかし、「すばる」の統計精度であれば有限値を与えることが可能である。他にも、300 MeV 以上の高エネルギーガンマ線でのみ観測されているパルサー 1951+32 など、EGRET で見つかっているパルサーが当面の観測対象になる。

また、衛星搭載の検出器のガンマ線到来方向決定精度は高くなく、これらパルス成分が他の波長と同期しているために同定されたパルサー以外にも位置が電波パルサーと矛盾しない未同定ガンマ線源も多く存在する。これらのパルサーを観測し、未同定ガンマ線天体の正体を明らかにしていくことも重要である。

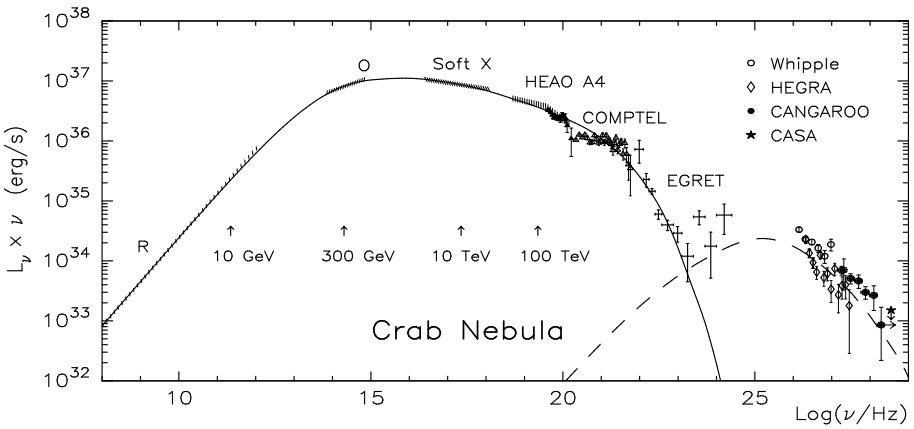

Figure 2: かに星雲の広域エネルギースペクトル。実線、破線はそれぞれシンクロトロンと逆コンプトン散乱による放射の計算結果を示している。(Aharonian and Atoyan 1997)

4. 観測対象 II. 活動銀河核 (AGN)

90 年代に入り、γ 線、X 線観測により高エネルギー天文学は飛躍的に進歩した。その中でも最も注目を集めたのが、活動銀河核 (AGN) の中でも活動の激しい、BL Lac 天体や OVV quasar からの強い高エネルギーガンマ線放射である。これらは CGRO 以前はエネルギースペクトルがガンマ領域まで伸びているなどあまり考えられていない天体であった。CGRO では 50 個あまりの AGN からのガンマ線が検出され、さらに Blazar と分類される AGN の Mrk421 と Mrk501 からは TeV ガンマ線が検出されている。これらの AGN の特徴としてまず注目すべきことは、エネルギー放出量がガンマ線領域で最高になっていること、また多くは激しい時間変化を示していることである。特に 1996 年に観測された Mrk421 の 30 分という短い時間スケールの TeV ガンマ線フレアの観測は、AGN のジェットの根本の構造を直接捉えたものであり注目を集めた。

1994 年からはガンマ線、X 線、光学、電波との同時観測が頻繁に行なわれ、広い範囲のスペクトルの時間変化が観測されるようになった。その結果、Blazar からの放射はジェット中で加速された TeV 以上の超高エネルギー電子、陽電子が 1 Gauss 程度の磁場中での電波から X 線に至る低エネルギー側のシンクロトロン放射、及び同じ電子がそのシンクロトロン光子や周囲の紫外線との逆コンプトン (Inverse Compton: IC) 散乱によって作るガンマ線放射であるという考え方が有力になっている。しかし、同時に陽子は加速されているのか、また激しい時間変動はどういう機構で起こるか、また、TeV までスペクトルが伸びている AGN とその他の多くの GeV ガンマ線 AGN との差異など、多くの謎が残っている。

CGRO の観測からは 50 あまりのガンマ線 AGN が発見されているが、そのほとんどは TeV 領域のガンマ線が観測されていないため、10 GeV から 100 GeV の間でエネルギースペクトルにカットオフが存在するはずである。そのスペクトルをいくつかの AGN で決定することが出来れば、ガンマ線発生機構を解明する鍵となる。さらに数分程度の激しい時間変動まで捉えることが出来れば、AGN 中心での粒子加速現場を直接見ることが出来る。この「すばる」によるガンマ線観測は、CGRO の数千倍の検出面積を持つために、このような高いガンマ線の統計精度が得られこのような時間変化を捉えることが可能となる。さらにはガンマ線カメラの中心部に CCD を設置すれば、ガンマ線と光学の領域での同時観測が可能となる。

Mrk421,501 など TeV 領域に IC のピークがあるものは X 線領域にシンクロトン放射のピークがあることが知られており、上記の現在の AGN のエネルギー放射機構の理解で良く説明できる。つまり CGRO で発見された多くの AGN は、1 GeV から 10 GeV 領域で IC によるエネルギーフラックスのピークを持つと思われ、これに対応するシンクロトロン放射のピークは紫外線となり、光学のブルー領域と GeV 領域ガンマ線との時間変化が連動する可能性が高い。現在、AGN の多波長観測にはもちろん光学望遠鏡も参加しているが、小型のものばかりであり、一般に統計精度が十分でなく、さらに EGRET 検出器では観測するガンマ線の数も少なく、ほぼ寿命を終えたこととあいまって、上記のよ

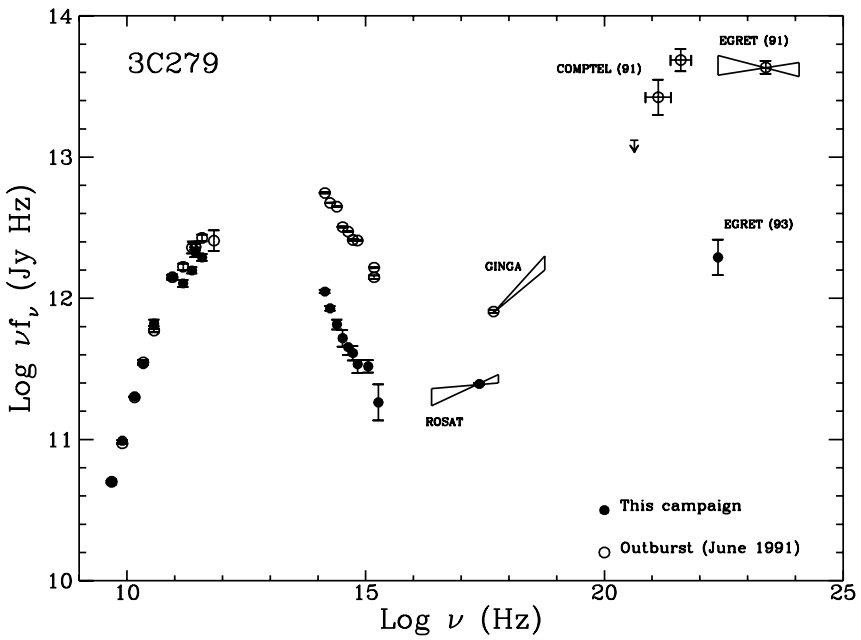

Figure 3: 3C279 の多波長スペクトル (Maraschi et al. 1994)。

うな短い時間変化を見つけることは出来そうにない。しかし、「すばる」のような大型鏡の光学観測では、比較的遠方の AGN でも十分明るいので、数分程度の時間変動までも十分捉えられる。また、衛星と地上の観測時間のずれも問題になってくるが、「すばる」では同じ装置によるガンマ線と光学の完全な同時観測が可能であり、画期的な観測となる。「すばる」での高精度の光学とガンマ線との完全な同時観測によって、いままで見えていない AGN 中心付近のブラックホールの Schwarzschild 半径程度のまさにジェットが形成される現場を初めてとらえることが出来る。

AGN は宇宙論的距離にあるために、AGN から放射されたガンマ線は、銀河間に存在する赤外線と消滅反応で電子・陽電子対に変換されるため、そのガンマ線のエネルギーが上がるにつれガンマ線に対する宇宙の光学的厚さが 1 を越えるようになる。特に $z = 0.1$ 以上の遠方の AGN のスペクトルには 100 GeV 付近でその吸収によるカットオフが見えると考えられている。遠方の AGN ほどこのカットオフのエネルギーが下がっていく。このカットオフを複数の AGN について測定することにより銀河間赤外線放射の量が測定出来ると考えられる。この銀河間赤外線放射は、銀河形成初期の星生成時期に放射された光の残骸であり、その量から銀河初期の星生成率を求めることができ、銀河形成論に非常に重要な意味を持っている。現在までこの赤外線の有意な測定結果は存在せず、Mrk421 のガンマ線スペクトルから得られる上限値が最も厳しい制限となっている。このようなカットオフは現在まだ有意に観測されていないが、10 GeV から 200 GeV の間に存在していることは確実なので、複数個の AGN でカットオフを測定することにより銀河間赤外線放射の量を測定できる。

CGRO で観測された GeV ガンマ線 AGN のうち、3C279 などの強い放射をする天体の多くは赤緯 ± 20 度以内にあり、「すばる」からの観測に好条件である。しかし、このような AGN の研究には系統的な観測が必要であり、多大な観測時間を要するので「すばる」でのガンマ線観測には不利かもしれない。それでも、いくつかの特徴的な大強度の AGN に対して「すばる」独特の光学とガンマ線同時の短い時間変動およびスペクトル観測を行えば、数日程度の観測時間で AGN の物理状態や銀河形成について重要な情報を得ることが出来る意義は大きい。

文末にスバルの位置から観測可能な EGRET カタログにあるガンマ線 AGN のリストを載せてある。この中のスペクトルが比較的硬い 17 個の AGN の観測が可能であり、４個程度のスペクトルを求めることが出来れば銀河間の赤外線量を求めることが出来る。

・ガンマ線バーストからのガンマ線観測の可能性

さらに最近ガンマ線バーストが宇宙論的な距離にある天体であることがはっきりして来た。「すば

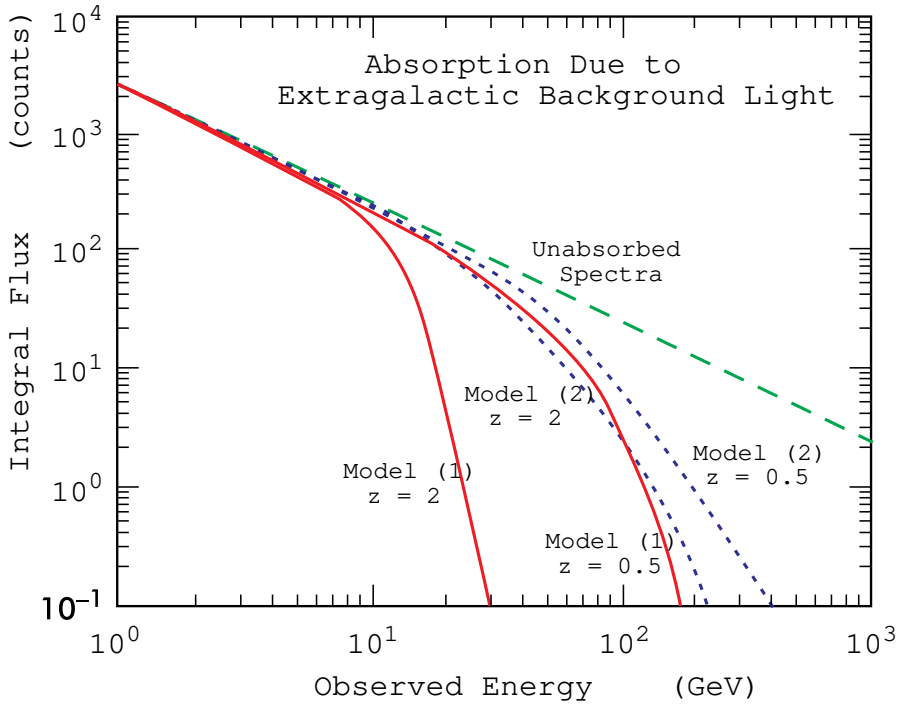

Figure 4: 銀河間赤外線放射によるガンマ線の吸収 (GLAST 計画書より)。

る」でも残光現象 (afterglow) の観測が行われると思われる。光学観測が最も重要であるのは当然であるが、1 時間以上遅れた 10 GeV ガンマ線が EGRET で観測されており、高エネルギーガンマ線領域の afterglow も期待されている。GeV ガンマ線の観測は、EGRET が通常運用を中止してしまったのため、次期ガンマ線衛星 GLAST が打ち上げられる 2005 年以後までは観測が不可能である。それまではガンマ線バーストのガンマ線発生機構解明にとって非常に重要な高エネルギーガンマ線のデータを供給できるのは地上観測のみである。光学観測では afterglow はダストなどで隠される場合があるが、ガンマ線は透過性が高く、そのような場合などはガンマ線観測に切り替える意義は大きい。ガンマ線観測はカメラの視野 (0.5 度) 以内に天体が入っていれば、その位置が精度良く判明しなくてもガンマ線放射の検出が可能であり、現在の X 線衛星から供給されている程度の位置精度で十分である。10 GeV ガンマ線では、銀河間赤外線による吸収の影響も少なく、$z = 2$ 程度の遠方まで観測可能であり、「すばる」ガンマ線観測のの特徴である衛星の数千倍の高感度により、多くの高エネルギーガンマ線 afterglow が期待できる。このような観測が可能なのは当分「すばる」だけである。

5. ガンマ線カメラ

1997・1998 年度の国立天文台共同利用開発からの資金を中心に、科研費、山田財団からの資金を加え、チェレンコフ光をとらえる視野 0.5 度のガンマ線カメラを製作した。Figure 5 に示すように、このカメラは主焦点の焦点面に 1 インチ角の高速光電子増倍管 (PMT)45 本を並べたアレイで構成されている。この PMT からの信号に対し、実質 10 ナノ秒という短時間のシャッタを開いてチェレンコフ光のフラッシュをとらえる。夜光や宇宙線によるシャワーからのチェレンコフ光は分散したイメージとなるが、ガンマ線シャワーからのチェレンコフ光は集中したイメージをつくるので、この識別に有利なようにカメラのピクセルサイズを選定してある。信号の電荷量からはガンマ線のエネルギーを測定できる。信号を増幅するアンプ、TDC、ADC、トリガー回路、オンライン CPU 等測定システムは Figure 5 に示すように全てカメラ内に格納され、デジタル化したデータはネットワークを通じて外部の計算機に送り記録する。各 PMT がヒットした時間、および電荷量のデータを用いてオフライン解析でさらにバックグランド イベントを落し、ガンマ線イベントの S / N を上げて信号を引き出す。同様の回路・カメラは今年 3 月に完成したオーストラリアの CANGAROO-II 7m チェレンコフ望遠

鏡で使用され、非常に短期間で立ち上がり、予想以下のノイズレベルで現在安定に動作している実績を持つ。このカメラ全体は Suprime-Cam と同じインターフェイス内に組み上げられ、取り付けも同様に行うことができる。

カメラ全体の電気消費量は約 1kW である。この熱はカメラ上部のファンで外部に逃す。我々の観測ではシーイングは問題にならず、また主焦点観測の場合、一夜占有になるので他の観測装置に影響を与えることもないので、最も安全な方法を採用する。

ガンマ線シャワーのイメージは本来 0.1 度以上の広がりを持つので、コマ収差は問題にならず、またチェレンコフ光は青い光なので補正レンズによる吸収を受けるため、補正レンズを外したほうが集光率が 50%以上上がるため有利になる。しかし、そのためにはガンマ線カメラ専用の主焦点取り付けインターフェイスが必要となる。この費用はガンマ線カメラ本体の数倍になってしまうため、今回は上述のように Suprime-Cam のインターフェイスを使用させていただき、現在の財源内で観測の早期実現を目指す。このように集光率がある程度犠牲になるので、最初に観測する天体としては、ガンマ線の強度が強く、しかも周期性を持っている Crab パルサーを狙う。Crab パルサーからは、33 ミリ秒の周期を持ったパルスが 10 GeV 領域のガンマ線まで放射されているのが EGRET により観測されており、30 GeV 程度までこのパルス成分が伸びていることが期待されている。パルス成分に対しては、その周期性を用いて検出感度を数倍向上する事ができるので、今回のような発見を目指す観測では有利である。そのためにガンマ線カメラは、GPS を利用し、分解能 10 マイクロ秒でイベントの到来時刻を記録するモジュールを内蔵している。

Figure 6 に 10 GeV 以上までパルスガンマ線が 10 GeV 以下と同様のスペクトルで放射されていた場合に、3 時間の観測で期待されるライトカーブを示す。(実際にはオフソース観測を同量行うため、観測時間としては 6 時間を必要とする。) スペクトルのカットオフが存在し、シグナルが 5 分の 1 程度になったとしても、パルスガンマ線の存在をとらえることが十分可能である。

6. 観測時期および観測時間

上記の理由から、今回は Crab パルサーからのパルスガンマ線観測を提案する。Crab パルサーの赤径・赤緯は 5 時 31 分、+22 度であり、ハワイではちょうど天頂付近を通過する。チェレンコフ光によるガンマ線観測では、天頂角が大きくなると、高度 1 万メートル程度で発生するシャワーまでの距離が遠くなり、チェレンコフ光の量が距離の二乗で減衰するため、エネルギー閾値が高くなってしまう。したがって、ガンマ線検出の確率が最も高い低いエネルギー閾値が得られる天頂 ±30 度以内での観測が是非必要である。この条件を満たせるのは 11 月から 2 月までの 4ヵ月間である。また月明の影響も考慮する必要がある。現在オーストラリアでは、三日月程度までの観測を行っている。「すばる」による観測は、視野も狭く、大気による散乱光も少なく、かつドームがあるため、半月までは観測が可能と思われるが、現地での経験がないのでこのあたりは調査が必要である。シーイングは全く問題にならず、風にもよらず、雲がなく晴れていればよいので、月の半分は一夜で 7 時間以上の観測時間がとれると考えられる。Figure 7-10 に 11 月から 2 月まで観測可能な日および時間を示す。

観測に必要な時間はオンソースの観測で 8 時間、出来れば 10 時間程度行いたい。オフソースも同時間必要となる。最初の Crab の観測では、調整も含め 3 日程度の観測が必要となる。これはカメラのエレクトロニクスの調整および観測パラメータ決定のための観測が必要なためであり、次回以降は 1 ~ 2 日の観測でよい。一夜の観測は、ターゲットを視野の中心に置き追尾するオンソース観測と、バックグランドの差し引きのため、ターゲットと同じ赤緯で、赤経を数度ずらして明るい星のない領域を観測するオフソース観測を、20 分程度で交互に繰り返して行う。追尾の精度は 0.01 度程度以内であればよいので、風などの影響は問題にならない。

7. 必要経費および準備状況

この装置は国立天文台共同開発費 (1997 年度 620 万円、1998 年度 430 万円) を中心に、他にグループのメンバが得た一般 C 科研費 (神奈川大・田村、250 万円)、特定研究公募研究 (理研・河合、80 万円)、山田財団助成金 (東大宇宙線研・森、230 万円) からの資金を基に大半を製作し、現在組み上げおよび全体の調整にはいっている。ただし、小さな回路部品やケーブル、および実際の主焦点取り付け装置との細かなインターフェイス部品、また全体の装置の組み立て・維持のための架台の製作が必要である。さらに現地までの輸送費が必要である。これらは今年度の天文台の共同開発費に申請している (申請額 209 万円)。これが認められない場合、輸送費を含め同程度の経費が別途必要となる。一度装置が組み上がれば、維持するための経費等はほとんど必要ない。

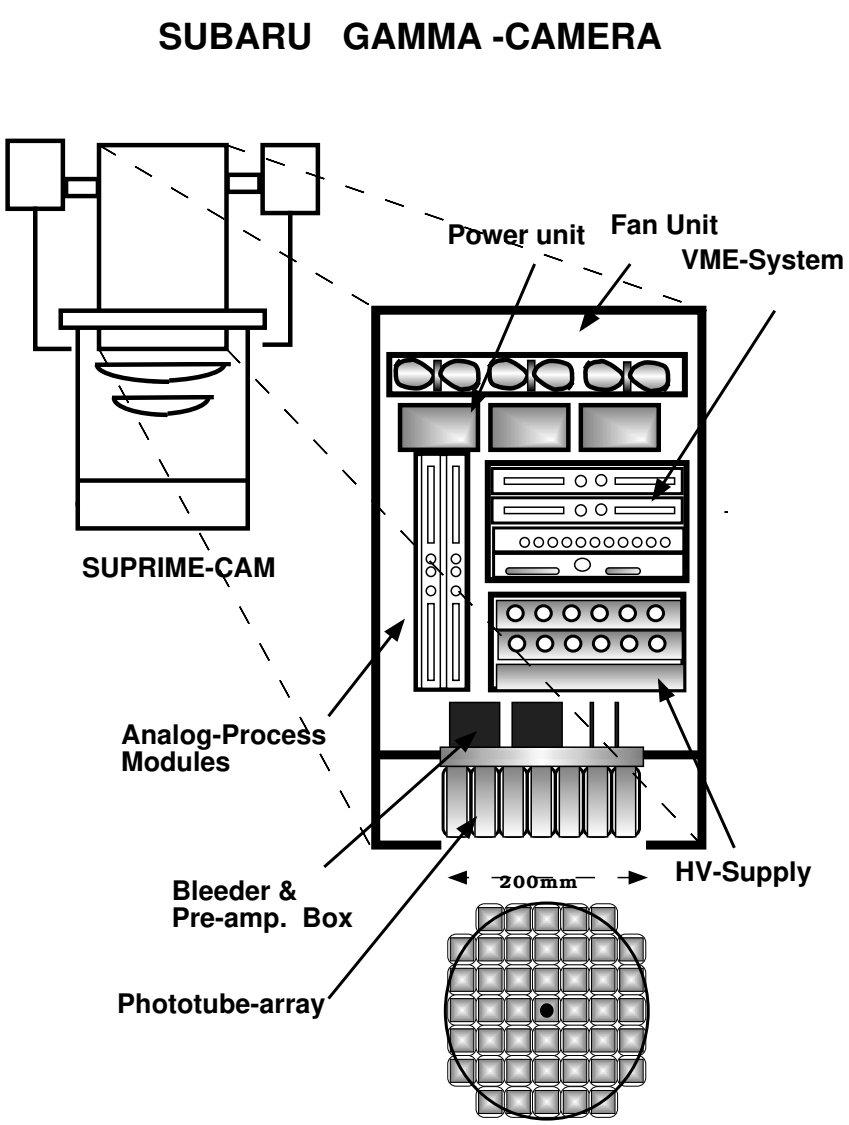

Figure 5: すばる望遠鏡焦点面に取りつけるガンマ線カメラの構成図。45 本の 25mm 角高速応答型光電子増倍管で 10ns という短時間に起こるチェレンコフ光を捉える。装置は主焦点の補正光学系の上に取り付けられる。

1999 年 6 月現在、回路部品・電源・オンライン CPU 等はすべて完成して東工大で各部の調整試験を行っている。PMT カメラ部は現在、製造者である浜松ホトニクスで調整中で、6 月末に東工大に戻され、7 月初めから読み出し装置・オンライン装置と組み合わせた試験を行う。取り付け用のインターフェイスは Suprime-Cam と同仕様となっている。そのため、Suprime-Cam が取り付けられ実際に動作した後に、最終的な取り付け部の調整を行う予定でいた。6 月に Suprime-Cam の製作者である天文台機器開発センター宮崎氏に仕様の確認、および各種接続ケーブルの最終仕様の確認を行った。7 月末には取り付けインターフェイスの最終版が東工大に納入され、装置を組み上げる。8 月にインターフェイス内に組み上げた最終的な形での試験を行い、9 月にはハワイに輸送できるようになる。

8. 現地での事前試験等

現装置は今年 3 月にオーストラリアに完成した CANGAROO-II 7m チェレンコフ望遠鏡のガンマ線カメラとほぼ同じ装置である。この装置はほとんど問題無く二日程度で動作し、5 月から定常的な観測に入っている。ハワイでは、簡単な動作試験、ネットワーク・電源・時刻等の各種ケーブル等の接続および運用試験が中心となる。また、装置の取り付け試験用機材がハワイにあるので、インターフェイスの取り付け試験が現地でまず必要である。

これらの試験には 3 ~ 4 日程度を要し、現地には装置および端末等が置ける作業台 (3m × 6m 程度) のスペースと、ネットワーク接続が必要とする。使用させていただきたい機材としては、現地で標準とされている SUN の OS が走っているワークステーション 1 台、200MHz 程度のオシロスコープ 1 台、ネットワーク用ハブ、NIM ビンおよび電源 1 台、作業台 1 台等が挙げられる。

9. 今後の展望

今回の測定装置は、上述のように、我々の非常に限られた資金で早急に実現するため、Suprime-Cam のインターフェイスを借りるとう形で提案した。しかし、このインターフェースでは、カメラ前面の補正レンズによる青い光の吸収により感度が落ちてしまう。AGN やガンマ線バーストなどのパルス成分が無いガンマ線天体からのガンマ線検出を確実に行うためには感度、つまりチェレンコフ光の集光率の向上が必要となる。したがって、いずれはガンマ線カメラ専用の主焦点取り付け用インターフェイスが必要となる。ただし、ガンマ線カメラには回転機構や冷却関係が不要で、ケーブル等の数も少ないので、現存のインターフェイスに比べ安く製作できると思われる。内部のカメラは、現在のものに PMT を 30 本ほど増設して使用できる。

すばる望遠鏡は、光学、赤外線で世界最先端の装置の一つであり、多くの観測が計画されている。そのなかにガンマ線の観測を加えるのはかなりの困難を伴うものと考えられるので、数日程度の観測時間で確実に、かつ天文学のトピックスになりうる上記の課題に絞って計画を提案した。現代の天文学では多波長領域における観測が必要な分野が増えている。このような状況下でこそ、ガンマ線天文学はまだかなり未成熟でありながらその価値が認められるようになってきたと考えられる。ぜひ最先端の「すばる」を光学・赤外線分野のみならず、まだ未熟なガンマ線分野成長のためにも活用することをお願いしたい。このような新しい試みが光学の分野にも新しい可能性を開く可能性もあり、なんとか「すばる」でこの計画を実現させていただきたい。

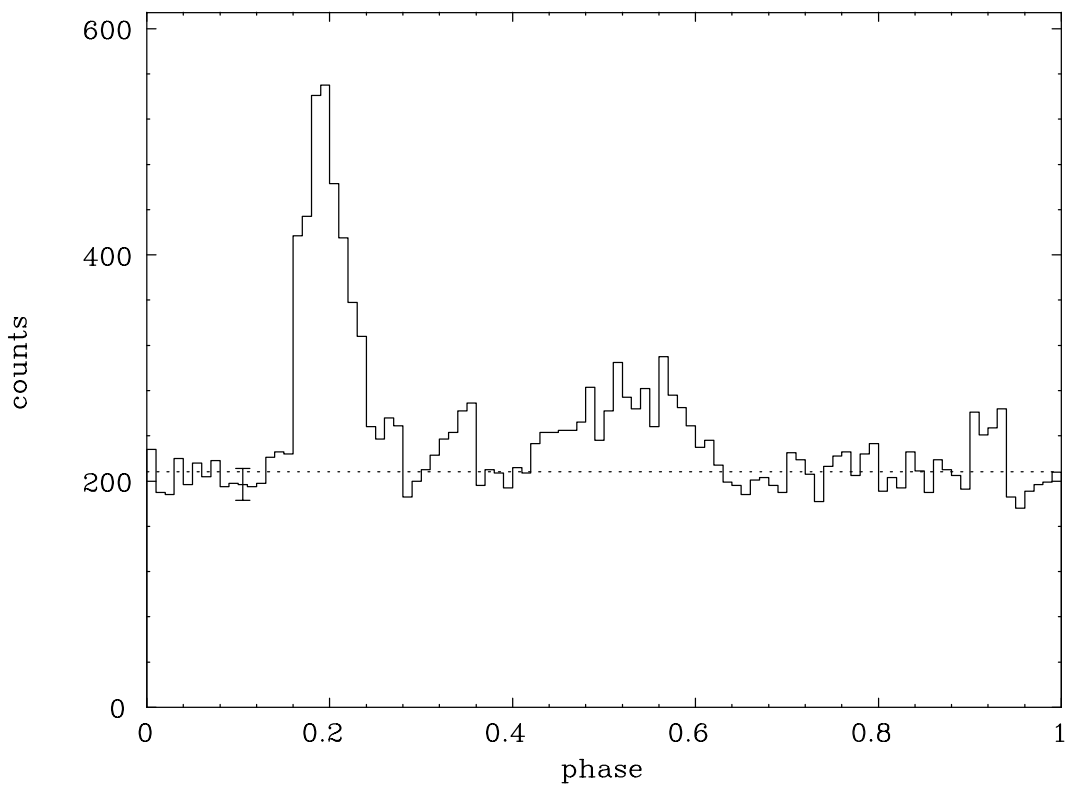

Figure 6: すばる望遠鏡主焦点で 3 時間の観測を行った時に期待されるかにパルサーからの 10GeV ガンマ線のライトカーブ。

Object name	Flux (>100 MeV) $[10^{-6}\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}]$	Spectral index	z	Flux (>10 GeV) [Crab]
0202+149	0.26	2.5	0.405	0.06
0219+428	0.3∼0.2		0.444	
0234+285	0.16		1.213	
0235+164	0.8∼0.3	2.0	0.94	1.3
0336−019	1.9∼0.1	2.4	0.852	0.4
0420−014	0.5∼0.2	1.9	0.92	1.3
0440−003	0.8∼0.2	1.8	0.844	2.9
0446+112	1.0∼0.2	1.8	1.207	3.5
0458−020	0.3∼0.1	2.5	2.286	0.05
0528+134	1.1∼0.5	2.6	2.06	0.1
0735+178	0.4∼0.1	2.5	>0.424	0.06
0827+243	0.2	2.2	2.046	0.2
0829+046	0.2∼0.1	2.5	0.18	0.03
0917+449	0.3∼0.1	1.9	2.18	0.7
1101+384 (Mrk421)	0.2∼0.1	1.9	0.031	0.5
1156+295	1.9∼0.1	2.0	0.729	2.3
1219+285	0.5∼0.1	1.9	0.102	1.0
1222+216	0.5∼0.1	1.9	0.435	1.1
1226+023 (3C273)	0.2∼0.1	2.4	0.158	0.05
1229−021	0.1	2.5	1.045	0.02
1253−055 (3C279)	2.9∼0.1	1.9∼2.1	0.538	3.4
1331+170	0.1		2.084	
1406−076	0.4∼0.1	2.0	1.494	0.6
1510−089	0.2	2.6	0.361	0.03
1604+159	0.4∼0.2	2.0	0.357	0.7
1606+106	0.5∼0.3	2.2	1.23	0.4
1611+343	0.7∼0.1	2.0	1.404	0.9
1633+382	1.0∼0.3	1.9	1.81	2.4
1741−038	0.3∼0.2		1.054	
2022−077	0.7∼0.2	1.5	1.388	10.3
2032+107	0.2∼0.1		0.601	
2200+420	0.8∼0.2	2.2	0.069	0.5
2209+236	0.4∼0.1	2.8	1.489	0.01
2230+114	0.5∼0.3	2.6	1.037	0.06
2251+158	1.3∼0.5	2.2	0.859	0.8
2356+196	0.3∼0.1		1.066	

Table 1: EGRET によって検出された活動銀河核 ($-10^\circ < \delta < +50^\circ$) から予想される 10 GeV 以上のガンマ線のフラックス。かに星雲のスペクトル指数を 2.15 として、予想フラックスがかに星雲の 0.5 倍 (0.5 Crab) 以上のものは 2 日程度の観測で検出可能である。

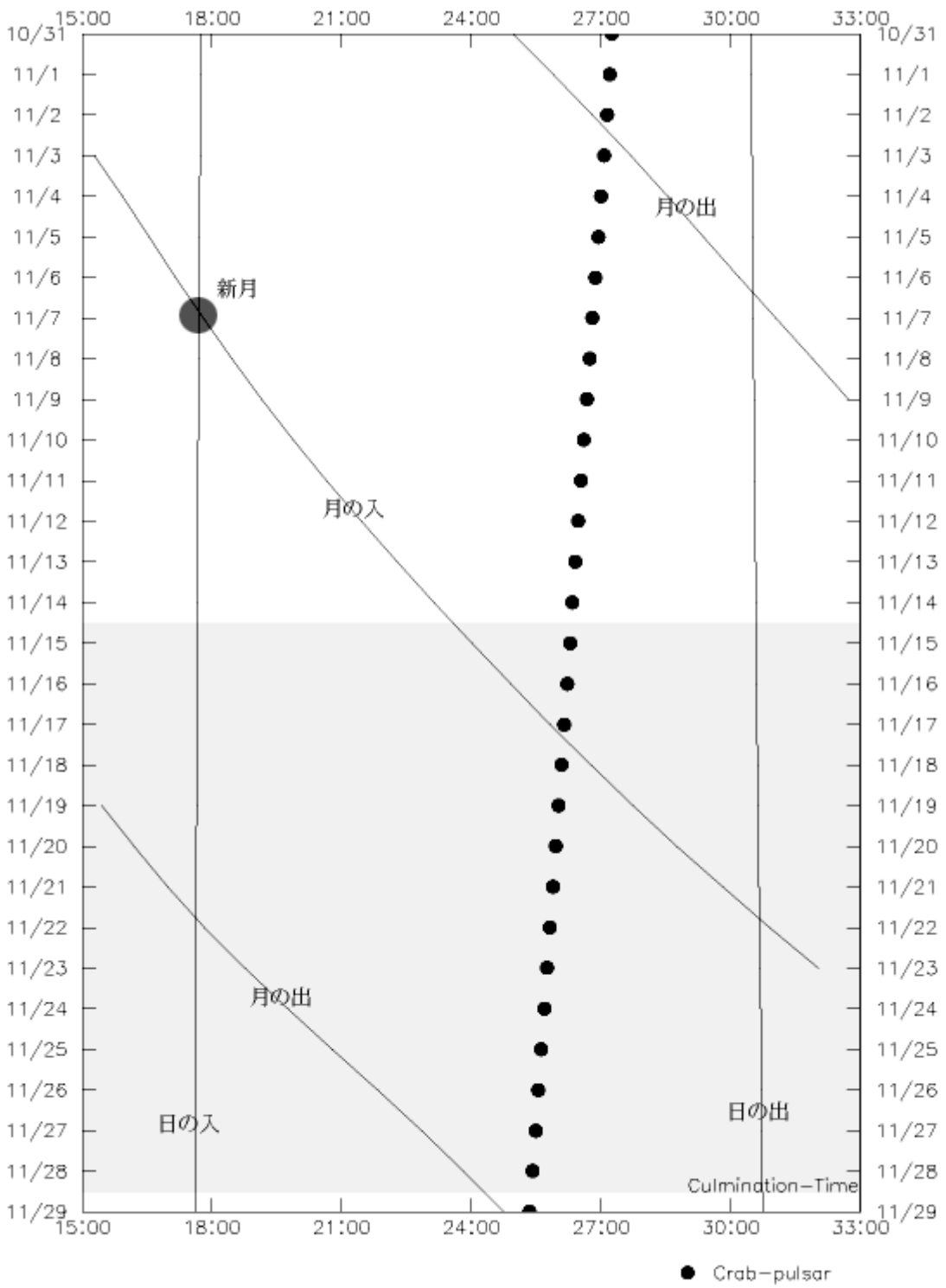

Figure 7: かに星雲の南中時刻を示したタイムテーブル (1999 年 11 月)。斜線は月の出、月の入の時刻、右の縦線は日の入り、左の縦線は日の出の時刻である。図中の薄い黒点は、新月を表す。チェレンコフカメラは半月までであれば観測可能なので、図中網掛けされた範囲以外が観測時期となる。

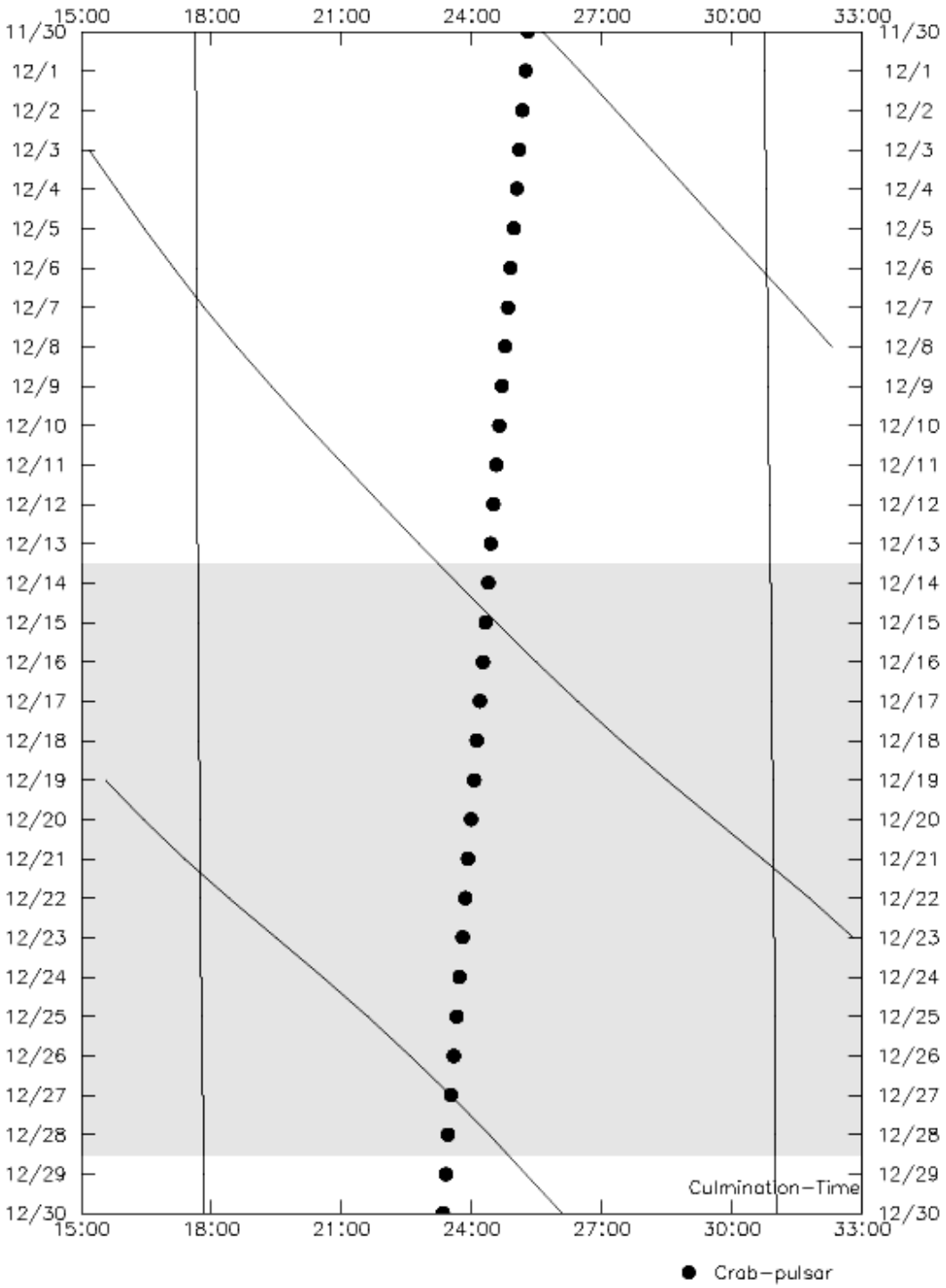

Figure 8: かに星雲の南中時刻を示したタイムテーブル (1999 年 12 月)。

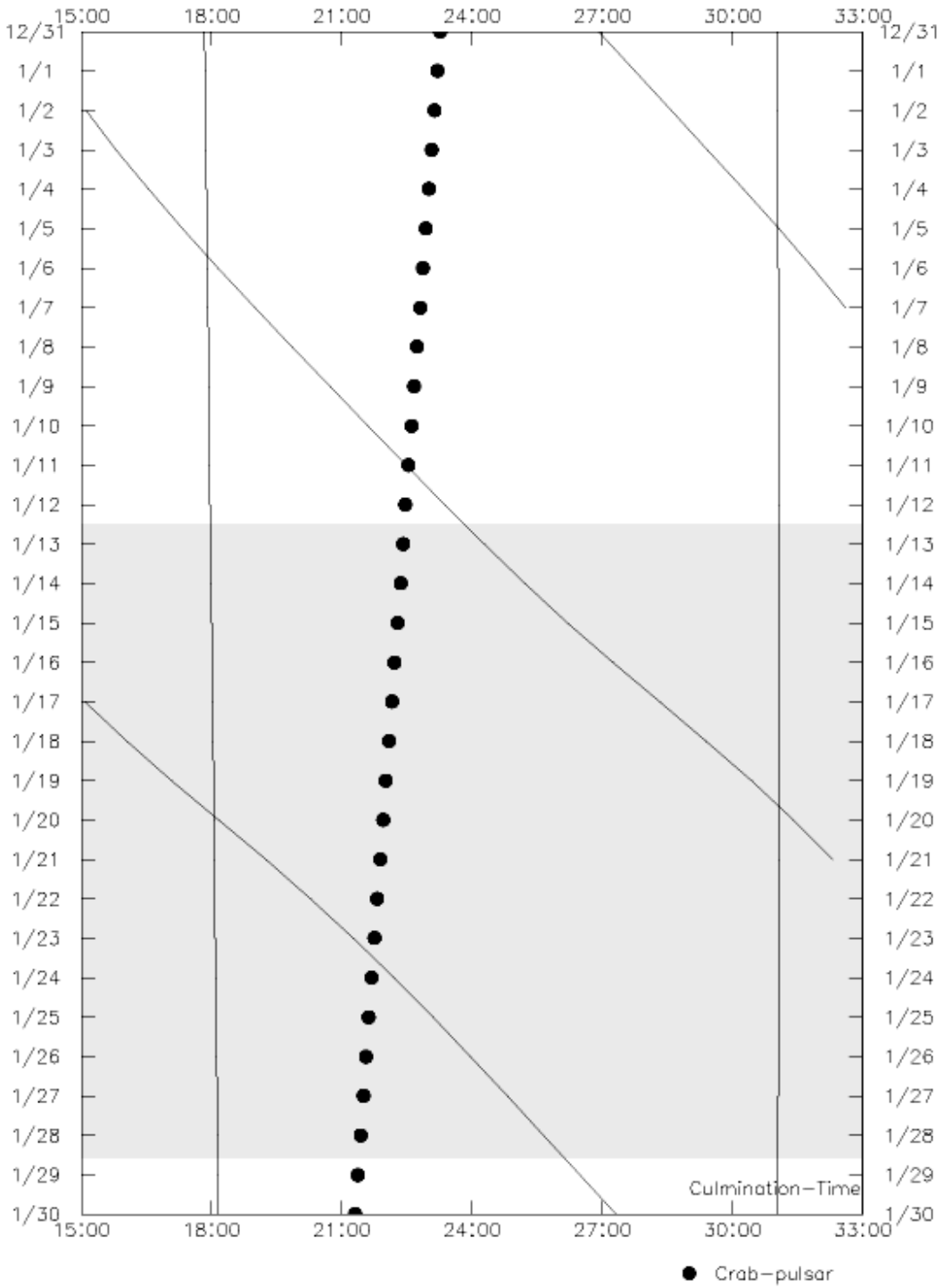

Figure 9: かに星雲の南中時刻を示したタイムテーブル (2000 年 1 月)。

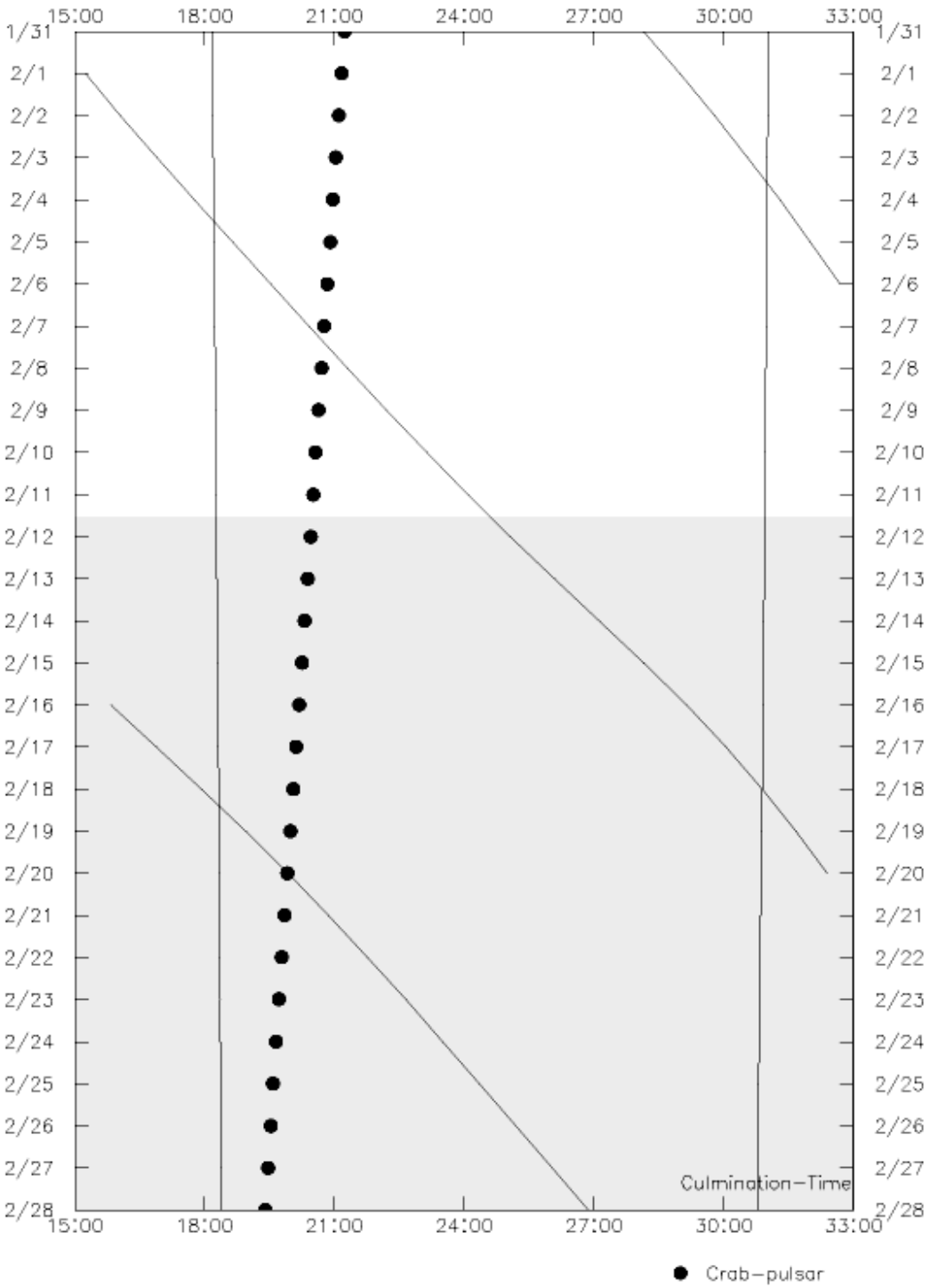

Figure 10: かに星雲の南中時刻を示したタイムテーブル (2000 年 2 月)。