

高感度ビデオカメラを用いた突発現象に対する観測環境の構築

勝倉 大輔 (青山学院大学大学院 理工学研究科)

Abstract

宇宙には突発的に可視光領域で増減光する天体 (現象) が存在する。その例として新星や超新星、ガンマ線バースト (GRB)、そして重力波の発生源である重力波イベントが挙げられる。これらはいつどこで発生するのか分からないことに加え、短い時間で減光してしまう天体も存在するため、発生位置の特定や即時観測が困難であった。これに対し、吉田研究室では民生用デジタル一眼レフカメラ及び、アマチュア用赤道儀を使用した広視野観測装置 AROMA-W (AGU Robotic Optical Monitor for Astrophysical object - Wide field) を開発した。しかしながら、ガンマ線バーストの可視光残光や可視光閃光 (optical flash) の大半は実視等級が非常に暗いものであり、かつ光度変化も数秒単位の短い時間で増減光する。従って、時間分解能が低い現行の AROMA-W のシステムではその増減光の様子がはっきりととらえられない場合がある。しかし、高感度でフレームレートの高いビデオカメラを用いることにより、これまでに比べて時間分解能が向上すると見込まれ、時間分解能の高い光度曲線が得られると考えられる。そこで私は現行の AROMA-W よりも時間分解能を向上させるため、高感度かつ高フレームレートの設定のできる Point Grey 社製 Flea3 ビデオカメラと短焦点レンズ (Tokina 12mm F1.4) を用いた広視野観測装置を開発している。本発表ではその性能と開発状況について報告する。

1 Introduction

1.1 ガンマ線バースト (Gamma-Ray Burst:GRB)

ガンマ線バーストは数秒から数百秒の間に莫大なエネルギーを主にガンマ線領域で放出する突発的な天文現象である。GRB は典型的に 50-300 keV 程度のガンマ線が観測され、最大約 $100 \text{ photon cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ の光子が飛来する。この現象は 1967 年にアメリカの核実験監視衛星「VELA」によって偶然発見され、1973 年にアメリカのロスアラモス国立研究所の研究者が GRB は太陽系外からやってきているを突き止めた。1980 年代には日本の X 線天文衛星「てんま」や「ぎんが」の観測により、GRB が X 線の領域においても輝くことが示された。さらに、1990 年代はアメリカのコンプトンガンマ線観測衛星「CGRO」(Compton Gamma-Ray Observatory) に搭載された「BATSE」(Burst And Transient Source Experiment) の観測からバーストの継続時間が約 2 秒以下の短い GRB と約 2 秒以上の長い GRB が存在することが分かった。また、様々な方向を向

いている検出器が検出するレートの違いから到来方向を数度の精度で決定し、GRB の空間分布が求められた。この観測の結果から GRB の空間分布が地球上に一樣に分布していることが分かった。その後 1997 年にイタリアとオランダの X 線天文衛星「BeppoSAX」に搭載されたガンマ線バーストモニターと広角 X 線カメラ (WFC) をもとに、バースト源の正確な位置を割り出すことに成功した。精度の高い位置の同定が可能になったため可視光や赤外線の大望遠鏡の追観測によって、バースト発生の数時間後あるいは数日後に可視光や電波の残光を検出することにも成功した。これら残光の分光観測により GRB の発生源は数十億から数百億光年もの遠方の宇宙で起こっている現象であることが解明されてきた。

1.2 可視光閃光現象 (optical flash)

1999 年 1 月 23 日に発生したガンマ線バースト (GRB990123) では、初めてバースト発生中に “可視光フラッシュ (optical flash)” 現象が観測された。こ

の観測は ROTSE-1 という 135 タイプ (ライカ型) カメラ用レンズを用いた小型観測システムによって、自動で行われた。その結果、バースト発生約 22 秒後から観測を始め、約 50 秒後には約 9 等級に増光し、その後急速に減光する様子を捉えた。その後の残光の分光観測から発生源が $z=1.6$ という高赤方偏移での天体現象であることが判明した。また、2008 年 3 月 19 日に発生したガンマ線バースト (GRB080319B) でも可視光フラッシュが観測され、そのピークは 6 等級にまで達した。これは現在知られている中で、視等級が最も明るいガンマ線バーストの可視光フラッシュである。

1.3 重力波イベント

重力波は、アインシュタイン博士が 1916 年に提唱した一般相対性理論で予想された時空の歪みが伝搬する波動現象である。この重力波の発生源の代表的なものとして連星中性子星の合体や、超新星爆発、パルサー、ブラックホールが挙げられる。これらの巨大質量を持つ天体 (現象) がその重力で周りの空間を歪め、運動することで周りの歪んだ時空が波のように宇宙空間を広がる。これが重力波である。1974 年に、ジョセフ・テイラーとラッセル・ハルスは、連星中性子星という極めて強い重力場を持つ中性子星同士が互いに近接して連星系をなしている PSR1913+16 を発見した。そして、その連星運動から強い重力波が発生し、連星系の回転の勢いが奪われ、連星の公転周期が短くなるはずだと予測した。その後 PSR1913+16 の公転周期の変化を観測し続け、その公転周期の短縮変化が重力波が原因であると仮定して得られる理論的な予想と、誤差 1% で一致する結果を得た。(Hulse, Taylor, 1975) 現在、重力波イベントにはガンマ線バーストや超新星爆発が伴うものと考えられている。従って、ガンマ線バーストや超新星を検出することにより、欧米の重力波検出装置である LIGO や VIRGO がとらえた重力波の発生源を特定できると考えられる。

2 高感度ビデオカメラを用いた広視野観測

2.1 AROMA-W の概要と問題点

ガンマ線バーストには X 線から電磁波までの多波長にわたる残光 (afterglow) が伴うことが発見され、また 2008 年にはバースト中に約 6 等級にも達する可視光閃光現象 (Optical Flash) が発見されている。Optical Flash はバースト本体、そしてその残光起源と思われるものの 2 タイプが示唆されており、非常に興味深い。この可視光閃光現象は数十秒から数百秒という非常に短いタイムスケールで増光・減光していくため、ガンマ線バースト観測衛星の位置速報を受けての追観測では捉えることが難しい。この急激な増減光の発生以前の振舞いを捉えるためには、発生前からの常時観測が必要である。これを受けて開発が始まったのが、広視野観測装置 AROMA-W である。AROMA-W (AGU Robotic Optical Monitor for Astrophysical objects - Wide field) はデジタル一眼レフカメラを 12 台用いて開発された広視野常時観測装置である。デジタル一眼レフカメラの視野をモザイク状に並べることで、 $30^\circ \times 45^\circ$ の広視野を実現している。この広視野の特性により、Swift-BAT の視野の約 10 分の 1 をカバーすることができ、また Fermi-GBM の数十平方度ある GRB 位置決定の誤差領域や LIGO・Virgo の重力波検出時の数百平方度もある誤差領域にも対応できる。これらの同時観測・追観測で可視光対応天体を発見し、その未同定天体の正体を、多波長で追観測を行うことで、明らかにすることを目指している。しかし、ガンマ線バーストの可視光残光や可視光閃光 (optical flash) の光度変化は数秒単位の短い時間で増減光するため、時間分解能の高い光度曲線 (Light Curve) を描くことができない。従って、時間分解能の高い光度曲線を描くためにはデジタル一眼レフカメラよりも高い時間分解能を持つ高感度ビデオカメラを用いた観測システムが必要となる。

2.2 使用するビデオカメラとレンズ

今回使用するビデオカメラとレンズは Point Grey 社製の Flea3 シリーズの FL3-U3-32S2M-CS (白黒) と、Tkina 社製の焦点距離 12mm(F1.4) の単焦点レンズである。以下に仕様をまとめる。



図 1: Flea3 ビデオカメラ

表 1: 今回使用するビデオカメラ (Flea3) のスペック

カメラ型番	FL3-U3-32S2M-CS
CMOS サイズ	7.3(mm) × 5.4(mm)
単位画像素子数	2080 × 1552
最大フレームレート	60fps
レンズ	Tokina 12mm F1.4
視野	25° × 19°
重量	35g

以下に Flea3 シリーズの特徴をまとめる。

- 図 1 に示すように、非常に小型かつ軽量である
- リアルタイムの空の様子を確認できる。
- 動画 1 フレーム分の RAW データが保存可能。
- 細かい時間間隔で画像の加算処理ができる。
- コンピュータで直接カメラ制御と画像の保存が可能である。

ビデオカメラを用いた観測システムの開発において、Point Grey 社製の Flea3 シリーズの FL3-U3-32S2M-CS (白黒) を採用した理由として第一に、超小型であるのに有効画素数が 300 万画素を超えるため非常に高感度であること、第二に、焦点距離が 12mm

レンズを採用することよりの 1 台でも 25° × 19° の非常に広い視野が得られること、第三に、このビデオカメラは非常に軽いため小型赤道儀でも十台以上のカメラを搭載することが可能であることが挙げられる。

3 限界等級

ビデオカメラを用いた突発天体の観測方法、特に 1 枚あたりのどの露出時間をどのようにするのかを決定するため、露出時間を変化させた時、並びに画像の加算処理を行い積分時間を変化させた時の限界等級を測定した。後者に関しては 1 枚あたりの露出時間を変化させて限界等級を比較した。この章ではそれらの結果についてまとめる。

3.1 露出時間を変化させたときの限界等級

2014 年 11 月 25 日 18:10-18:25(UT) に青山学院大学相模原キャンパス L 棟屋上において各露出時間でペルセウス座 (Persei) 周辺の星野の撮影を行った。露出時間はそれぞれ 100ms,500ms,1s,2s,5s,8s とした。それぞれの限界等級を求めた。(図 2)

これらの結果より、露出時間 5 秒以上で限界等級が 10 等級程度の天体を検出できることが示された。しかし、画像 1 枚あたりの露出時間を短くしたものを加算処理した場合、読み出しノイズの影響により、同じ積分時間でも限界等級が悪くなることが推測される。

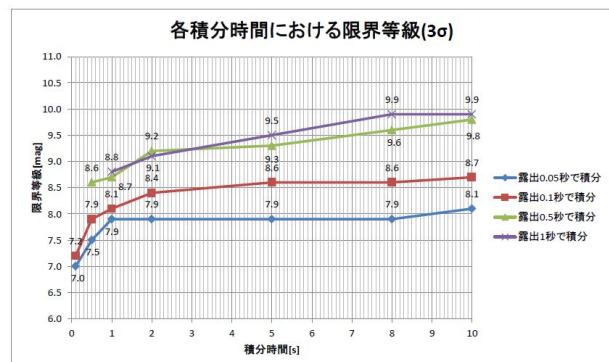


図 2: 各露出時間での限界等級

3.2 画像を加算処理した場合の限界等級

3. と同様に、2014 年 12 月 16 日 14:10-18:30(UT) に各露出時間でペルセウス座 (Persei) 周辺の星野の撮影を行い、その画像を加算処理をしたものの限界等級を求めた。1 フレームあたりの露出時間は 50ms,100ms,500ms,1s とし、各積分時間においてそれぞれの限界等級を求めた。そして、その結果を元にテスト観測に採用する 1 フレームあたりの露出時間を決定した。(図 3)

図 3 より、1 フレームあたりの露出時間が 500ms 以下になると、限界等級の低下が顕著となる。これは読み出しノイズ (固定パターンノイズ) の影響が大きいものと思われる。しかしながら、1 フレームあたりの露出時間を 100ms としても限界等級が約 9 等級であり、GRB990123 の可視光放射の明るさがそれと同程度であったことを考慮し、実際の運用においては 1 フレームあたりの露出時間を 100ms とする。

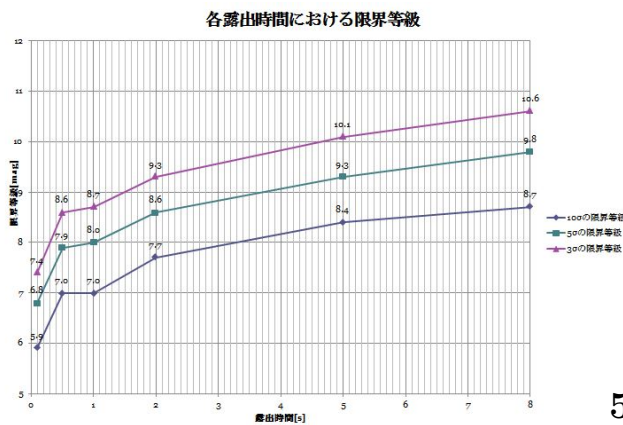


図 3: 1 フレームあたりの露出時間をさせて加算処理した場合の限界等級、1 フレームあたりの露出時間を長くすると、読み出しノイズの影響と思われる限界等級の低下が見受けられる。

4 Conclusion

1 フレームあたり露出時間を 100ms での限界等級は約 9 等級である。9 等級以上で検出された GRB の可視光閃光は最近 16 年で 2 例程度であるが、Swift-BAT の視野を追尾できる観測システムを制作すれば

GRB が起こる直前と直後の空を比較できるため、未知の閃光現象をとらえられる可能性がある。このビデオカメラとレンズの組み合わせでは、視野が $25^\circ \times 19^\circ$ であるが、今後は複数台のビデオカメラを用いた広視野観測装置 AROMA-WV(Wide Video) を開発したいと考えている。

AROMA-WV とは、 4×4 台もしくは 5×5 台の Flea3 ビデオカメラを使用し、ビデオカメラが持つ高い時間分解能を生かした広視野観測装置である。現段階では、Swift-BAT のほぼ全視野 ($120^\circ \times 90^\circ$) をカバーできる視野を確保したいと考えている。図 4 にその完成イメージを示す。今後はこの装置の開発に尽力していきたいと考えている。

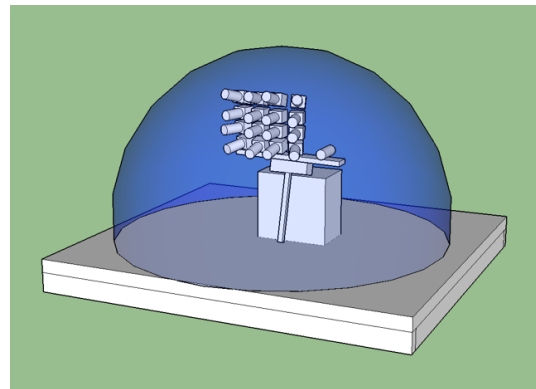


図 4: AROMA-WV 完成予想図

5 参考文献

Reference

- [1] 株式会社 ViewPULS,Flea3(USB3.0):http://www.viewplus.co.jp/product/camera/flea3_usb.html
- [2] Springer : Deep-Sky Video Astronomy
- [3] CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS : Flush!- The hunt for the biggest explosions in the universe