

科学衛星 HiZ-GUNDAM 搭載を目的とした X 線撮像検出器開発

高田 俊介 (金沢大学大学院 自然科学研究科)

Abstract

我々は宇宙最大の爆発現象であるガンマ線バースト (Gamma-Ray Burst : GRB) を用いた初期宇宙探査のための科学衛星 HiZ-GUNDAM 搭載を目指した撮像検出器開発を行っている。現在発見されている GRB の大半は $z < 7$ のイベントである。これは赤方偏移の影響により GRB のエネルギーが低い方へシフトし、運用中の GRB 検出器の観測エネルギー帯では捉えきれていない可能性が高いためである。GRB は発生位置に偏りが無いため、光源として用いるには撮像検出器のような装置で広視野をモニターし、発生位置を特定しなければならない。特に $z > 7$ で発生した GRB を捉えるには数 keV 帯で感度を持つ検出器が必要とされる。開発中の検出器は電極がストリップ状のシリコン半導体検出器と符号化マスクを用いて GRB の発生方向を決定するが、シリコン半導体についてはまだ一つの電極からしか信号を読み出せておらず、分解能も FWHM で $\Delta E = 2.85\text{keV}$ と我々の要求値には達していない。しかし、それは素子の静電容量が大きいためであり、静電容量が 1/10 になるように設計を行えば $\Delta E \simeq 0.86\text{keV}$ まで改善すると考えられる。

また、開発中の検出器の GRB に対する感度を見積もり、他の検出器との比較を行った。結果、1keV からの読出しを行うことができれば運用中の GRB 検出器の中で最も低エネルギーに感度を持っている検出器に比べ、有効面積が 2 割程度でも 10 倍の感度を有することがわかった。

1 序論

1.1 ガンマ線バースト

ガンマ線バースト (Gamma-Ray Bursts : GRB) は数秒から数十秒の間に大量のガンマ線を放射する天体現象であり、一度に解放するエネルギーは $10^{52} \sim 10^{54} \text{erg}$ にも達する宇宙で最大の爆発現象である。ガンマ線の放射とは別に可視光～X線領域での残光現象を伴っており、この残光を精密分光することにより GRB 発生当時の宇宙の状態を探ることができる。第一世代星の崩壊時にも GRB は発生していたと考えられており、その莫大な解放エネルギーから初期宇宙探査において非常に強力なツールと言える。GRB は発生位置に偏りが無いため、初期宇宙探査の光源として用いるには撮像検出器のような装置で広視野をモニターし続け、発生位置を詳細に決定する必要がある。

1.2 初期宇宙探査計画 HiZ-GUNDAM

$7 < z < 20$ の宇宙は第一世代星の誕生や重元素合成、宇宙の再電離など宇宙が劇的に変化する時代であり、

現代宇宙論においても重要な研究対象となっているが、 $z > 7$ での GRB の観測例は極端に少なくなっている。これは赤方偏移の影響により GRB のエネルギーが低エネルギー側にシフトし、現在最も低エネルギーに感度を持つ GRB 観測器である Swift 衛星の BAT 検出器の観測エネルギー帯 (15 ~ 150keV) でも捉えきれていない可能性が高いためである。

これを踏まえ、国内の GRB 研究グループから初期宇宙探査計画 HiZ-GUNDAM (High-z Gamma-ray bursts for Unraveling the Dark Age Mission) が提案されている。HiZ-GUNDAM は BAT 検出器よりも低エネルギー帯に特化した撮像検出器と赤方偏移を同定するための近赤外望遠鏡を搭載した衛星にて高赤方偏移 GRB を発見し、可能ならば地上の大型望遠鏡と連携し早期に追観測を行い、高分散可視・近赤外スペクトルを取得することにより宇宙再電離や重元素合成の歴史の解明等を目指す計画である。

我々の研究グループはこの HiZ-GUNDAM に向けた高赤方偏移 GRB の発生位置を特定するための 1 ~ 20keV 帯に感度を持った撮像検出器の開発を行っている。

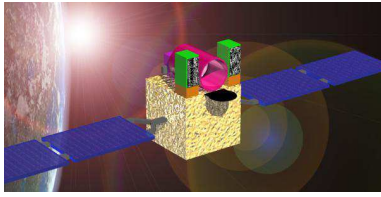


図 1: HiZ-GUNDAM 構想図

2 撮像検出器概要

発生方向の特定には符号化マスクとストリップ型半導体検出器を用いる。符号化マスクは X 線を遮蔽する材質と厚さで作られた板に開口率が 50% になるようにランダムで穴が空けられたものである。ストリップ型半導体検出器は電極がストリップ状に何本にも分かれており、検出器上で X 線が反応した位置を特定できる構造のものである。

図 2 のように GRB から放射された X 線やガンマ線が符号化マスクを通過することによりマスクの影が X 線の強度の強弱として半導体検出器に写し出される。半導体検出器に写し出された陰影と、マスクのパターンの対応をとることにより GRB の発生方向を決定することができる。

半導体検出器には $\sim 20\text{keV}$ 帯に感度を持つシリコン半導体 (Si)、もしくはシリコンよりも高エネルギー帯 ($\sim 100\text{keV}$) に感度を持つテルル化カドミウム半導体 (CdTe) との 2 層構造を考えている。

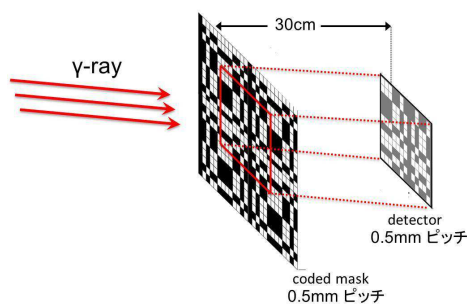


図 2: 撮像検出器の概要

半導体検出器、マスク共に 0.5mm ピッチ、マスク検出器間距離を 30cm で構成すれば幾何学的には 11arcmin 、光子統計による重み付けにより 5arcmin の方向決定精度を有する。

半導体素子	Si, Si+CdTe
観測帯域	1 ~ 20keV, 1 ~ 100keV
有効面積	1000cm ² or 500cm ² × 2
視野	1.0sr@half coded

表 1: 開発中の検出器の概要

3 検出器感度の見積り

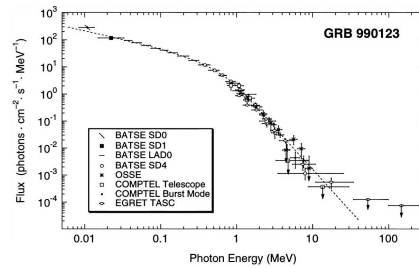


図 3: GRB の光子スペクトルの一例

検出器は常に全天の約 1/10 をモニターしており、銀河や高密度天体等からの X 線もバックグラウンドとして流入する。GRB のような突発天体がモニターに入り込むと急激に光子流入量が増加するため、その増加量がバックグラウンドの揺らぎに比べて非常に大きい際にトリガーをかけ、検出判定を行う。バックグラウンドとして流入する光子数はポアソン分布に従うため、 1σ あたり「検出器に流入した光子数の 0.5 乗」で揺らぐ。GRB の光子スペクトルは図 3 のような折れ曲がったべき関数で表され、折れ曲がりのエネルギー (ピークエネルギー: E_P) によって同じ観測エネルギー帯であっても光子流入量が変わる。GRB と宇宙からのバックグラウンド成分のスペクトル関数をそれぞれ $N_{\text{GRB}}(E, E_P)$ 、 $N_{\text{BG}}(E)$ とし、有効検出面積を A 、マスクの開口率を f_{mask} 、視野を Ω 、積分時間を Δt 、観測帯域を E_1 から E_2 、半導体の光電吸収率を $\epsilon(E)$ とする。バックグラウンドの揺らぎの n 倍の光子流入の際にトリガーをかけるとし、簡単のために宇宙 X 線背景放射 (Cosmic X-ray Background: CXB) のみをバックグラウンドとして考えると次の式が成立する。

$$A f_{\text{mask}} \Delta t \int_{E_1}^{E_2} N_{\text{GRB}}(E, E_P) \epsilon(E) dE$$

$$\geq n \sqrt{A \Omega f_{\text{mask}} \Delta t \int_{E_1}^{E_2} N_{\text{CXB}}(E) \epsilon(E) dE} \quad (1)$$

(1) 式の右辺は検出に最低限必要な光子検出数を表している。この値は観測エネルギー帯や GRB の E_P によって変わるため、一概に他の検出器と比較できない。他の検出器に対して数 keV 帯で優位に検出感度を有しているか検証すべく右辺を次のように規格化を行う。

$$F_T = \frac{\int_{E_1}^{E_2} N_{\text{GRB}}(E, E_P) dE}{\int_{E_1}^{E_2} N_{\text{GRB}}(E, E_P) \epsilon(E) dE}$$

$$\times \frac{n \sqrt{\Omega \int_{E_1}^{E_2} N_{\text{CXB}}(E) \epsilon(E) dE}}{\sqrt{A f_{\text{mask}} \Delta t}} \quad (2)$$

[photons/cm²/s]

F_T は「検出可能な GRB の明るさ」を示しており、この値が低いほど暗い GRB も検出できると言える。今回は F_T を E_P 毎に計算を行った。比較対象として BAT 検出器 (有効面積:5240cm²) についても同様の計算を行い、その結果も合わせて図 4 に示す。

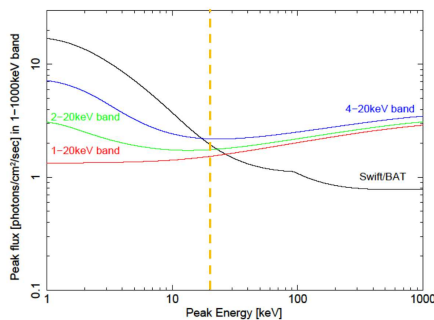


図 4: ピークエネルギー毎の検出器感度

赤、緑、青の違いは観測エネルギー帯域の違いである。図 4 からわかるように、 $E_P > 20\text{keV}$ では有効面積の差で BAT に劣ってしまうが、1keV からの読出しが実現できれば我々の目的とする $\sim 10\text{keV}$ 帯では最大で 10 倍近く優れた検出感度を有することがわか

る。4keV からしか読み出せなかった場合でも BAT 検出器に優位ではあるが、1keV からの読出しに比べるとその差は僅かである。従って、いかに低エネルギーからの信号を読み出せるかが重要である。

4 検出器開発状況

粒子シミュレータ Geant4 上で開発中の検出器を再現し、GRB のような放射源の位置が特定できるかシミュレーションし、検証を行った (図 5)。方向決定は行えているが、イメージ化には、現在の計算方法では膨大な計算が必要であるため、計算の効率化が次の課題と言える。

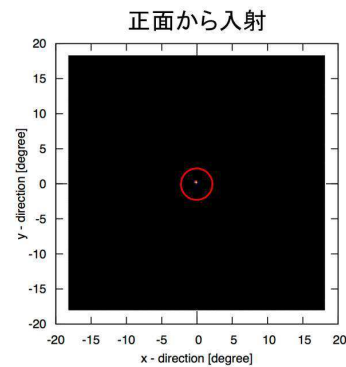


図 5: 多チャンネル信号からの画像再合成

図 6 は -20°C 下で 1 次元ストリップ型 Si 検出器に 200V 印加して取得した ^{241}Am のスペクトルである。まだ一つの電極からしか信号を読めておらず、分解能も FWHM で $2.85\text{keV}@59.5\text{keV}$ と 1keV 光子を読出せるような性能が出ていない。

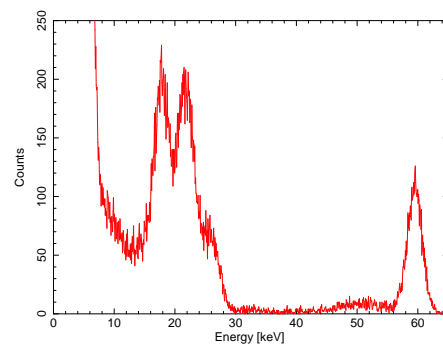


図 6: 取得した ^{241}Am のスペクトル

大きさ	48mm × 48mm
厚さ	0.325mm
電極	片面ストリップ (1.0mm ピッチ)

表 2: ストリップ型 Si 半導体検出器の概要

-20 °C 下での Si 半導体の分解能は次式で表される。

$$\begin{aligned}
 (\Delta E_{Si})^2 [\text{keV}^2] &= 2.53 \frac{\tau [\mu\text{s}]}{R_P [\text{G}\Omega]} \times 10^{-2} \\
 &+ 5.79 (I [\text{nA}]) (\tau [\mu\text{s}]) \times 10^{-1} \\
 &+ 2.53 R_S \frac{(C [\text{pF}])^2}{\tau [\mu\text{s}]} \times 10^{-8} \quad (3)
 \end{aligned}$$

I はリーク電流、 C は静電容量、 τ は Shaping Amp での整形時間、 R_P は帰還抵抗、 R_S は等価直列抵抗である。実際にはこれらに加えプリアンプ自身の揺らぎが加えられる。

我々の測定環境では Si の静電容量を精密に測定できなかったため、リーク電流値 (16.2pA@ -20 °C, 200V) (図 7) とプリアンプの性能 ($\Delta E_{\text{Amp}} = 0.85\text{keV}$) より容量性の雑音を見積もった。結果、容量性雑音は $\Delta E_C \simeq 2.71\text{keV}$ にも達すると判明した。従って、実験で用いた素子の静電容量が元々大きすぎたため容量性雑音が支配的であったと考えられる。(3) 式の第 3 項からわかるように、静電容量の値と容量性雑音は比例関係にある。試算では一つの電極あたりの大きさを 48mm × 1.0mm × 0.325mm から 16mm × 0.5mm × 0.5mm まで小さくすれば容量性雑音は $\Delta E_C \simeq 0.29\text{keV}$ まで抑えられ、同じプリアンプにて測定した場合は $\Delta E \simeq 0.86\text{keV}$ とほぼプリアンプの限界性能で測定できると考えられる。現在、我々は 1keV 光子に感度を有せるような電極構造の開発・評価と VATA を用いた多チャンネルからの信号読出しの検証を行っている。

5 まとめと今後の課題

5.1 まとめ

我々は GRB を用いた初期宇宙探査を目的とした科学衛星 HiZ-GUNDAM 搭載を目指した撮像検出器開発を行っている。

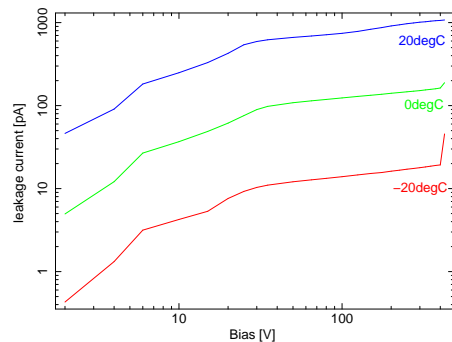


図 7: 電極一つあたりのストリップ型検出器の IV 特性

5.1.1 検出器の感度の見積り

計算上は現行の検出器に比べ小型であっても目的とする ~20keV 帯では優位に検出を行うことができる。特に 1keV からの読出しを行うことができれば現行検出器の 10 倍感度よく検出が可能である。

5.1.2 検出器開発状況

ストリップ型 Si 検出器の性能評価を行ったが、我々の要求値を満たしていなかった。しかし、それは検出器の静電容量が大きすぎたためであり、1 電極あたり 16mm × 0.5mm × 0.5mm の大きさを構成すれば容量性雑音はほとんど寄与しなくなる。

5.2 今後の課題

- 宇宙空間での検出器の放射化も含めた感度計算
- 多チャンネル信号からの画像再合成の効率化
- VATA を用いた複数の電極からの信号読出し
- 1keV の光子に対して感度を有する電極の開発

Reference

D. L. Band 2003. ApJ,588,945

<http://astro.s.kanazawa-u.ac.jp/~yonetoku/hiz-gundam/>