

# ガンマ線バーストの観測

\*

西村 純・小田 稔・宮本重徳\*・小川原嘉明  
藤井正美・山上隆正・田原 譲・吉森正人\*\*  
梶原正男\*\*・村上浩之\*\*・中川道夫<sup>+</sup>・桜井敬久<sup>+</sup>

## 概 要

昭和50年9月、ガンマ線バースト観測のため120時間に及ぶ気球観測を行った。この結果9月23日にガンマ線バーストと思われる現象がとらえられた。この現象は19時6分30秒付近ではじまり、約30秒後には終わった。計数増加の最大強度は $10^{-6}$  erg/cm<sup>2</sup> sec で全強度は $6 \times 10^{-6}$  erg/cm<sup>2</sup> であった。この時期は太陽及び地磁気変動とともに静穏であり、このためバーストによるものと考えられる。

観測は直交回転スタレコリメータで行ない、計数の変動割合の解析を行った結果このバースト源としては

赤経 19<sup>h</sup> 49<sup>m</sup> ± 1<sup>m</sup>, 赤緯: 45° 02' ± 10' (1950年分点)

の位置が最も確からしいことがわかった。

ガンマ線バースト源の位置決定についてはこれ迄行なわれた実験のうち最も精度のよい結果である。

## § 1 はじめに

ガンマ線バースト今から4年前、原爆探知用衛星ベラによって発見された、宇宙の彼方から数秒間にわたって大量のガンマ線が入射してくる現象である。ガンマ線バーストの発見以来、他の衛星でも、この現象の観測に努力が傾けられてきた。しかしその発生原因は、いろいろなモデルの提案 [1] があるにもかかわらず、まだわかっていない。その理由の一つはガンマ線バーストをおこした天体が不明な点にある。ガンマ線バーストの到来方向は、数個の衛星で同時観測された場合、到来時刻の時間差を利用して推定されている。しかしその精度は5°角程度で、この程度の精度では光学的に天体を同定することができない。

そこで我々は、気球による長時間観測でバーストを観測し、バースト源を精度よく決定することを計画した。気球での限られた時間での観測が可能であると考えた根拠は、衛星に比べて大型の検出器を搭載し、より小型の且つ頻度の高いバーストが観測可能であると思われるからである。実際宇宙航空研究所の大気球観測事業で過去10年のX線星の観測データの中で、偶然ガンマ線バーストが入射したと思われる例が2, 3ある [2]。その頻度は数日に一回程度で、入射エネルギーは $10^{-6}$  erg/cm<sup>2</sup> 程度のものではあった。

頻度の少ないバーストを掴めるためには、検出器の立体角を大きくとる必要がある。一方

---

\* 大阪大学理学部

\*\* 立教大学理学部    + 大阪市立大学理学部

バーストの到来方向を精度よく求めようとする、狭い立体角の検出器が望ましい。この相矛盾する条件を満たすために、以下述べるように、直交回転スタレ・コリメータという方式を、我々は採用した [3]。この方式は、広い観測視野と、到来方向に対する高い決定精度を持っている。

長時間観測を行うために、観測高度 35km 付近での、ほとんど無風に近い状態になる晩秋の時期を選んで観測を行った。観測器としては、3 台の機器を用意し、それぞれ、55 時間、65 時間、25 時間にわたる観測に成功し、計約 150 時間の観測を行うことができた。

この観測データを解析した結果、9 月 23 日 19 時 06 分付近に、ガンマ線バーストの入射していることがわかった。このバーストについて、バースト・サイズ、エネルギースペクトル、及び、バーストの到来方向の解析を行った結果について報告する。

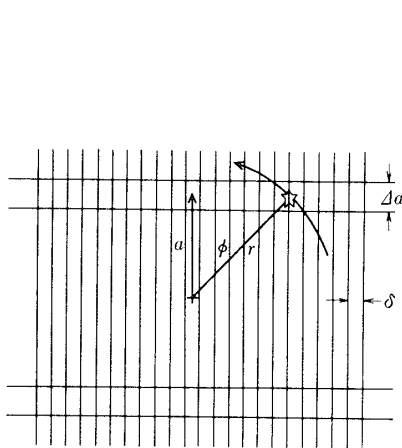
## § 2 観測装置について

### 2-1 直交回転スタレ・コリメータの原理

回転するスタレ・コリメータに短時間のガンマ線バーストが入射した場合を考えてみる。第 1 図に示すように天球上に投影したスタレ・コリメータを考える。スタレのピッチを  $\delta$  とし、天頂から  $r$  の距離のところ、バーストが起きたとする。コリメータは角速度  $\omega$  で回転しているが、便宜上コリメータを止めて、バースト源が  $\omega$  で回転していると考えてもよい。

コリメータを通過するガンマ線は、変調をうけて図のような山型のカウントを示すことになるが、この周波数（一秒間あたりの山数）を  $f$  とする。

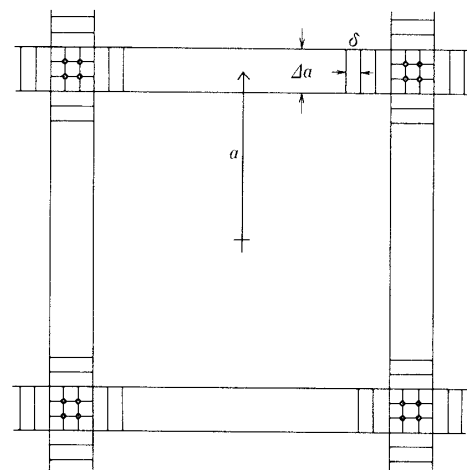
$f$  とコリメータの間には



$$\text{SIGNAL } f = \frac{a}{\delta} \cdot \frac{d\phi}{dt}$$

$$\text{POSITION ACCURACY } \frac{\Delta a}{a} = \frac{\Delta f}{f}$$

第 1 図 コリメータの原理



$$\text{POSITION ACCURACY } \left(\frac{\Delta f}{f}\right)^2$$

第 2 図 位置決定精度

$$f = \frac{r\omega \cos \phi}{\delta} \quad (1)$$

という関係が成り立つ。図に示すように

$$r \cos \phi = a \quad (2)$$

という関係が成り立つので、結局このバーストは天頂からコリメータの線に沿って  $a$  の位置で直交する線上にあることがわかる。勿論天頂を中心に反対称の位置、つまりマイナス  $a$  の位置も同じく可能である。コリメータとしてもう一個直交するコリメータを考えると、同じように解析を行うことができ、結局バースト源としては第2図に示すように、天球上の4個の場所が可能性のあるものとして求めることができる。

4個の可能性のある場所を減らすには、更に別な角度を持つコリメータを用意すれば、可能性は2個となる。いろいろな角度のコリメータをふやしていけば、結局普通の回転スダレ・コリメータと同じになる。2個の可能性のうちから更に1個にしばるには、コリメータの回転軸をやや中心からずらしておけばよい。直交回転コリメータの場合、バーストの継続時間がスダレの  $1/4$  回転以上ある場合には、普通の回転スダレ・コリメータとまったく同じことになる。その場合の位置の決定法には、回転コリメータの解析法として使われている、スダレの透過関数と計数率との相関を調べる方法を使うことができる。

## 2-2 位置決定の精度

実際の観測では、周波数  $f$  の決定に若干の誤差が伴う。その原因はバックグラウンドおよびバーストのガンマ線の統計的変動によるものである。極端な場合、バーストガンマ線の入射量が少ないと、周波数の決定のみならずバーストの存在さえ検出することができない。

(1)式と(2)式とから、周波数は  $f = a\omega/\delta$  で表わされる。

従って  $f$  に  $\Delta f$  程度の誤差があると

$$\frac{\Delta a}{a} = \frac{\Delta f}{f}$$

となり、同程度の位置の相対誤差をもたらすことになる。 $\Delta f$  は1程度と考えられるので、 $\Delta f/f$  を下げるには、ピッチ幅  $\delta$  をせまくすればよいことになる。しかし  $\delta$  をせばめると、1山の中に入るガンマ線のカウント数が減少する。従ってあまりせばめると、バックグラウンドガンマ線の統計的変動に、コリメータによる変調の山がかくされ、周波数  $f$  を求めることが難しくなることが予想される。

この関係についての計算による解析の詳細は Appendix-1 で述べることにし、ここではその結果についてだけ述べることにする。

まずガンマ線バーストのためにふえたカウント数を  $S$  とする。 $S$  はコリメータを通して観測された総カウント数である。次にバーストのおきている間に入射したバック・グラウンドの総カウント数を  $N$  とする。 $S/N$  比は

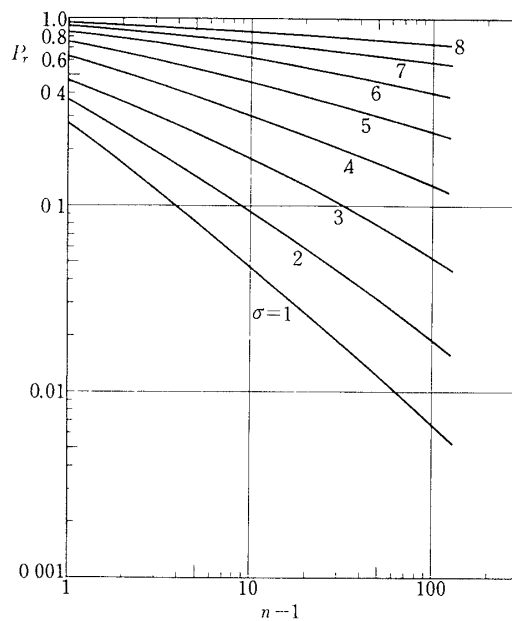
$$\sigma = \frac{S}{\sqrt{S+N}}$$

で与えられる。

次に、このバーストのおきている間にかかった変調の数を  $n$  とする。  $n$  は観測された山数である。ピッチ幅が狭ければ  $n$  が増えて、  $f$  の決定精度が上がったことになる。

バースト生起期間のカウント数をフーリエ分解して、パワー・スペクトルを出す。  $\sigma$  が大きければ、バーストカウントの変調に対応した周波数にパワーの山が出るはずである。  $\sigma$  が小さいと、パワー・スペクトルの中で、一番高い山になるとは限らない。バーストに対応するパワーが一番高い山になる確率を計算し、これが90%以上であれば、バーストの解析が可能であると考えてよいと思われる。

第3図にその結果を示した。図からわかるように、ピッチ幅  $\delta$  をせばめ、変調の山数をますと、予想通り  $S/N$  比が大きくなるとバーストの変調を見つけることが難しくなる。しかし  $S/N$  比に対する依存性はゆるやかで、実用性のある90%以上の確率では、変調による山数を1から100に変えても、  $\sigma$  は7から9に移動するにすぎない。別な表現をすれば、この方式は  $S/N$  比が数倍以上のものでないと充分な解析を行うことができないことを示し



第3図  $n$  , 変調周波数

$P_r$  ; Signal Power が最大である確率

$\sigma$  ;  $S/\sqrt{N+S}$

$S$  , Signal Counts

$N$  , Background Counts

ている。S/N比のより大きいバーストが観測された場合には、山数つまりスタレのピッチをできるだけせまくしておいた方が、精度のよい結果がえられることになる。

### 2-3 バースト検出器について

前節の考察から、S/N比の大きいバーストについてはピッチ角をせまくとることが得策であることを述べた。しかし実験を行うにあたっては、ゴンドラの吊り下げ精度、地磁気センサーによる方向精度等が問題となるので、これらの点を考慮してピッチ幅を決定することが必要となる。

次に検出器の概要を述べる。

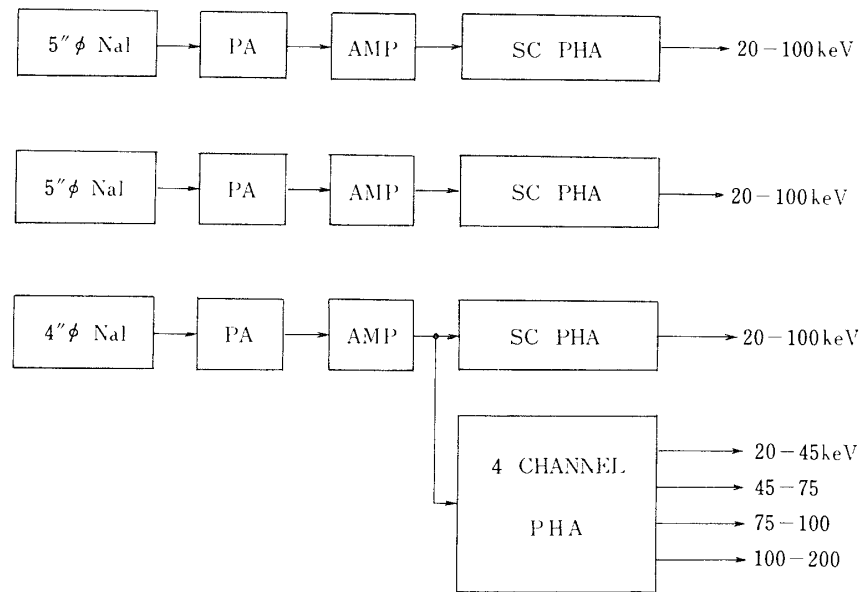
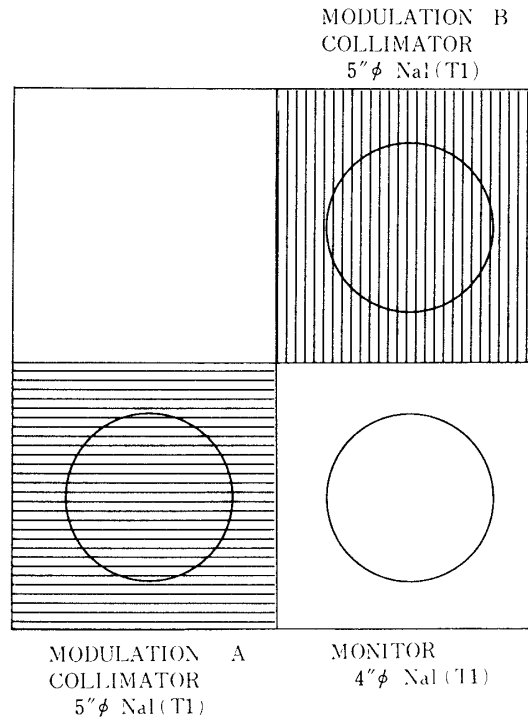
- a) ガンマ線バーストでは 100 keV 以上のガンマ線も入射するので、スタレ・コリメータのロッドは 1 mm  $\phi$  のタングステン棒を用いた。150 keV のガンマ線強度はタングステン 1 mm で吸収の結果約 1/20 となる。100 keV 以上のガンマ線は後に述べる厚さ 3 mm の NaI では検出効率がおちるので、100 keV をスタレ・コリメータによる変調観測の上限とした。
- b) カウンターの中心からみて頂角 45° の範囲を観測する。全頂角は FWHM で約 100° となる。変調の山数として約 50 をとりピッチ間隔を約 2° として、2 枚のスタレの間隔を 50 mm とした。
- c) バーストの生起時間は数秒程度であるので、この時間の間に 90° 程度回転させることにし、ゴンドラの回転速度を 2 rpm とした。
- d) ガンマ線検出器は 3 mm 厚 NaI (TI) のシンチレーションカウンターで、モニター用 4"  $\phi$ 、スタレ・コリメータ付 5"  $\phi$  ( $\times 2$  個) を用いた。モニター・カウンターは、バーストが起きた時の時間変動を観測する。この観測データとコリメータ付カウンターのデータとを組み合わせると変調の様子を知る。カウンターの有効面積は、モニター・カウンター 78.5 cm<sup>2</sup> スタレコリメータ付カウンター 60 cm<sup>2</sup> (透過率ピーク時) である。
- e) 測定エネルギー範囲は、20 keV ~ 100 keV とし、又モニター・カウンターについては、エネルギー・スペクトルを 200 keV まで 4 チャンネルで測定することにした。
- f) 装置の誤動作の影響をさけるため、光電増倍管の高電圧、回路系とその電源をすべて別系統とした。回路系のブロック・ダイアグラムを第 4 図に示した。

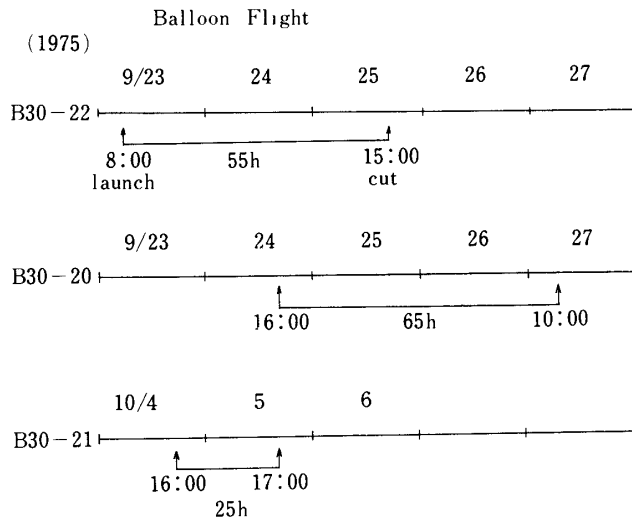
### § 3 気球飛しょうについて

前節で述べたような観測器及び気球 (B<sub>30-20,21,22</sub>) を 3 組用意し、1975年9月23日、24日及び10月4日 (JST) に三陸大気球観測所より放球した。長時間フライトをめざすために、放球の時期は、高度 20 km 以上の高層の風が夏季の東風から秋季の西風が変わるときの無風状態の時期を予測して決定した。

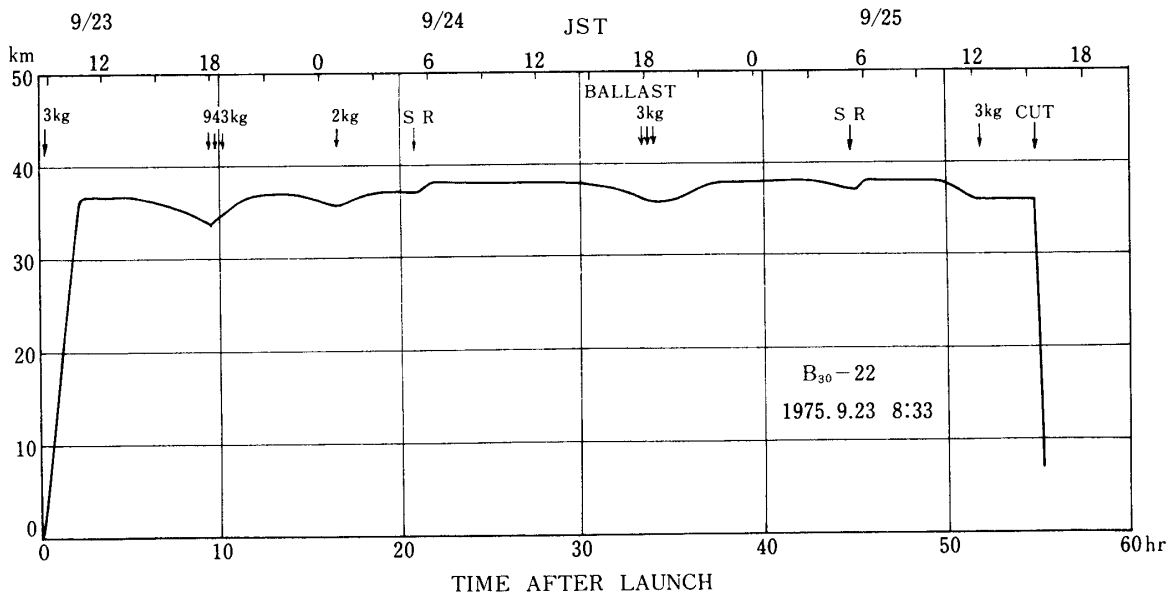
9 月下旬に行った、2 機のフライトは、予想通り上層風の無風に近い時であり、55 時間及び 65 時間にわたる観測を行うことができた。観測時間の様子については、第 6 図に示す通りである。これでわかるように、3 機による観測で合計 150 時間の観測時間が得られる。

B<sub>30-22</sub> 号機について、気球高度曲線、及び航跡図を第 7 図、第 8 図に示した。気球高度は 3 機とも約 35 km に達し、観測高度の気圧は 5 ~ 6 mb である。

第4図  $\gamma$ 線検出器の回路系の Block Diagram第5図  $\gamma$ 線検出器, Collimator 系の配置



第6図 Balloon Flight の経過

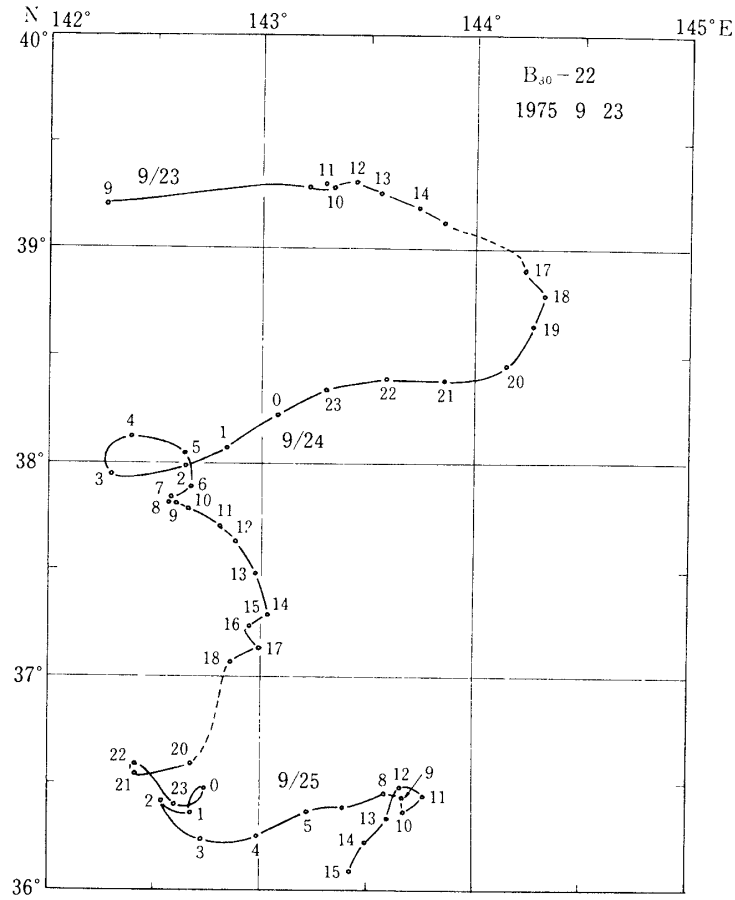


第7図 B<sub>30</sub>-22 高度曲線

§ 4 観測結果及びデータ解析

4-1 バーストの検出

気球から送信されてくるデータは 1680 MHz の受信機で受信され、副搬送波復調器で復調した。復調されたデータは、ペンレコーダーとデータレコーダーに同時に記録した。このようにして得られたデータは、地磁気センサー及び気圧計からの出力、モニター・カウンター及びスダレ・コリメータ付カウンターのカウントの計3種類、及びモニター・カウンター

第8図 B<sub>30</sub>-22 航跡図

で測定したエネルギースペクトルである

送信はFM-FM方式で送信周波数1685MHz, 副搬送波の周波数は30kHz, 39kHz, 5.4kHz, 7.35kHz, 10.5kHz, 14.5kHzの6chであった. モニター・カウンター及び, 2個のスタレ・カウンターのカウント用の副搬送波は10.5kHz, 7.35kHz, 5.4kHzの高い周波数を用い, バースト観測の時間分解能を高めた. さらにカウントは16ステップの階段波の形で送信した. この方式は, バースト生起時に計数率が大きく変化した時に, その変化に追従できる方式であり最終的には1カウントあたりの時間分解能は副搬送波の本来の時間分解能より著しく, 改善されている.

上記のようにして得られたデータから, バーストを検出するために, 次の2つの方法

- i) 16ステップの階段波形を簡単なアナログ回路を通して, 計数率に直し, これをペンレコーダーに記録し, 計数の増加している部分を検出する方法
- ii) 16ステップの階段波をAD変換器により, デジタル値に変え, 計数率への変換と計数の増加部分検出を計算機で処理する方法.

を平行して行った.



増加部分の検出には次のような基準を用いた。モニター・カウンターについて、0.5秒間のカウントが局所的な一分程度の平均値に対して $2.5\sigma$ 以上増加しており、かつ、2つのスタレ・コリメータ付カウンターの両方について、カウントが $1.5\sigma$ 以上増加していること。このような基準をとると、3つのカウンターが統計的に同時に増加するものはii)の処理方式で行った処理データ長75時間に対して、15個期待されるが、実際に検出されたものは13個であって、統計的に期待される量とよく一致している。

#### 4-2 検出された増加現象について

前項で述べた、バースト検出処理の結果  $B_{30-22}$  号機の9月23日19時06分付近に第9図に示すような計数の増加が検出された。この増加は、次の項で述べるような理由に基づいてガンマ線バーストと推定した。

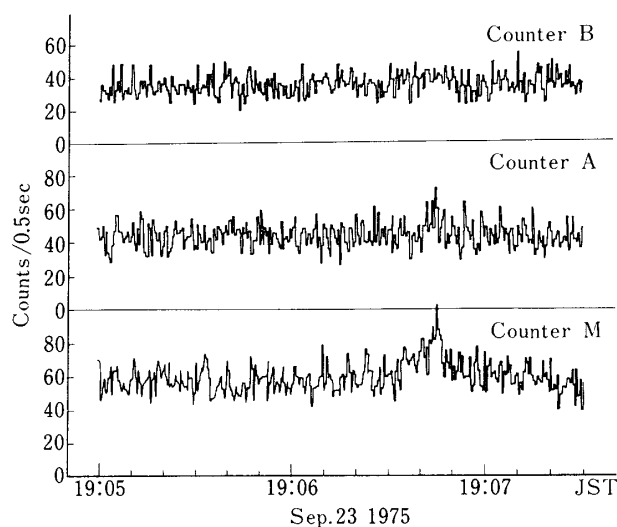
計数の増加は19時06分31秒から始まり、41秒付近で最大値を示している。その後減衰して19時07分付近で消滅し約30秒間にわたっている。ピークでのエネルギー・フラックスは、 $10^{-6} \text{ erg/cm}^2 \cdot \text{sec}$  であり全体のエネルギーは  $6 \times 10^{-6} \text{ erg/cm}^2$  である。

エネルギー・スペクトルは、計数増加の大きい19時06分39秒から44秒までの5秒間のデータについて求めた。4チャンネルPHAの各チャンネルについてNaIの計数効率の補正を行い、ついで大気の吸収による補正を行ったものが第10図の結果である。このスペクトルは、ベキ関数

$$I(E) = \left( \begin{matrix} 0.82 & +0.63 \\ & -0.38 \end{matrix} \right) E^{-0.91 \pm 0.14}_{-0.15} \quad (\text{photons/cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{keV})$$

で近似することができ、これまで衛星で観測されたガンマ線バーストのスペクトルとよく似た形をしている。

アナログ方式の処理も含めて処理データ長100時間の中に現われたバーストである。バー



第9図 バーストのタイム・プロファイル

ストの検出限界はモニターカウンタで0.5秒の間に $2.5\sigma$ の増加が1秒続く場合を考えると $7.10^{-7} \text{ erg/cm}^2$ となる。100時間にこれ以上のバーストが1ヶ検出されたので、その出現頻度をこれまで得られているサイズ・スペクトルと比較するために、第11図に示した。この図では、ガンマ線バースト源の空間分布が、これまで衛星で観測されたデータから、バースト源が、三次元一様分布とした時に期待される分布

$$N(S) \propto S^{-1.5}$$

(ただし、 $N(S)$ はバースト・サイズ $S$ 以上のバーストの出現頻度を表わす。)と較べて少ない。むしろ円盤状の分布( $S^{-1}$ )の場合に近い値を示しているが、少数例であるので確定的なことは云えない。

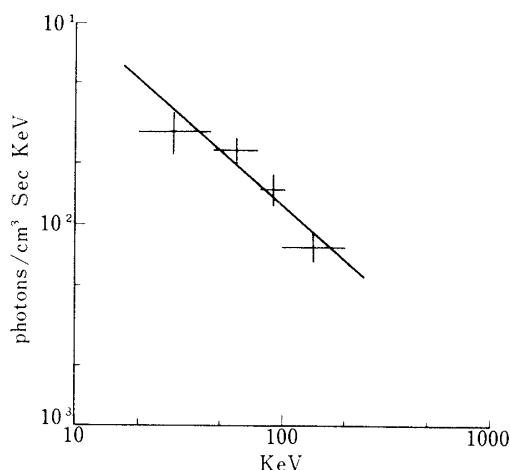
#### 4-3 検出された増加をガンマ線バーストと考えた理由

この増加が観測された時の気球の位置は、北緯 $38^{\circ} 36' 36''$ 、東経 $144^{\circ} 15' 44''$ であり、この地点での $L$ -値は1.30である。

この現象が太陽・地球起源でないと思われる理由は、

- 1) 上に述べた $L$ の値が小さなことは、観測地点の磁気緯度が低いことを表わしている。
- 2) この現象は日没後2時間以上を経て起きている。
- 3) 太陽-地球間環境はこの現象が起きた時静穏であり

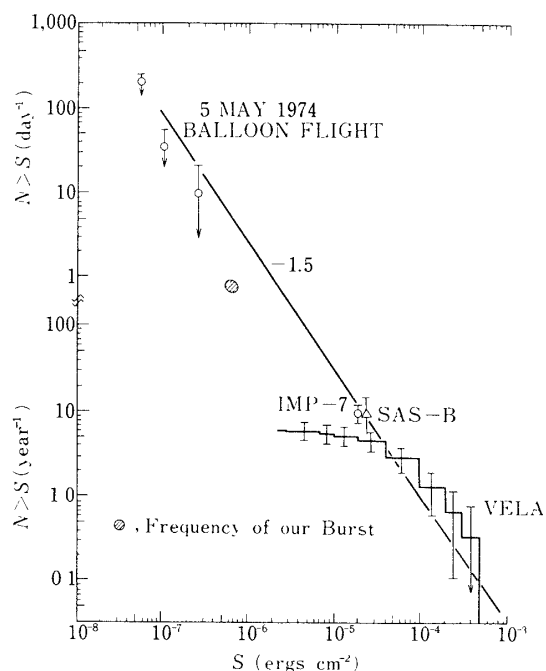
i) 太陽の活動度は9月23日の前後数日にわたり低かった。太陽黒点の指数は9月23



第10図 バーストのエネルギー・スペクトル

$$I(E) = \left( 0.82 \pm_{-0.38}^{+0.63} \right) E^{-0.91 \pm_{+0.15}^{-0.14}}$$

Photons/cm<sup>2</sup> · sec · keV



第11図 Size Distribution of Gamma-Ray Bursts

日において0であり，太陽X線は観測のカットオフ・レベル以下であった．また電波による観測も顕著な活動を示す様子はなかった．<sup>4)</sup>

ii) 地球磁場の擾乱も9月23日の前後2～3日にわたり小さく，kp指数は9月23日3時-12時(UT)まで1+または1を示していた．

4) X線のフラックスがコリメータにより変調を受けていることは，地球起源のX線源の場合に予想される拡がったX線ではないことを示している．

5) 第10図に示したように，エネルギー・スペクトルは高エネルギー側にのびており，これまでに観測されたガンマ線バーストとよく似ている．

等である．

#### 4-4 バースト源の位置決定

このバーストは継続時間が約30秒と比較的長く，回転スタレ・コリメータの約1回転分のデータを得ることができた．そのため2-1節で述べた変調周波数による位置決定のみだけでなく，次のように回転コリメータによる解析方式が可能となった．

i) バースト源の位置を仮定したとき，モニタカウンタとスタレの透過関数から計算される期待値と実際にスタレカウンタで観測された値との $\chi^2$ を出し，天球上で $\chi^2$ が最小の所をもとめる．

ii) スタレカウンタとモニタカウンタの比を作れば，この比は天球上のある場所に対応する源の透過関数になっているはずで，期待される透過関数との相関をとり天球上で相関が最大になる所をもとめる．

ここではii)の相関関数の方法について述べることにする．

4"  $\phi$  のモニタカウンタによるカウンタを $D_4$ ，バックグラウンドを $N_4$ ，バーストによる計数を $S_4$ とすると

$$D_4 = S_4 + N_4 \quad (1)$$

となる．同様に5"  $\phi$  のスタレカウンタの場合には

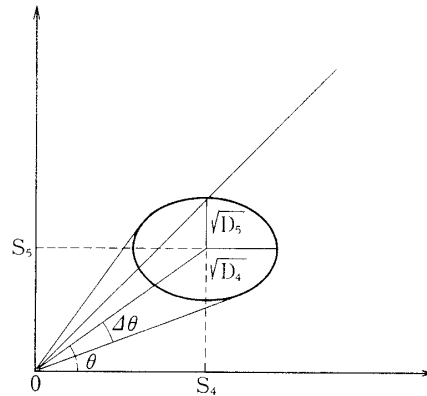
$$D_5 = S_5 + N_5 \quad (2)$$

と書くことができる．

Cyg X-1の観測からスタレコリメータの姿勢が正確にわかっており(Appendix-2)2組のスタレはどちらも極軸が絶対値で約0.4度傾いている．従って変調の位相を考慮し各カウンタの計数を加えて解析できる．(2)式の $D_5$ は統計的変動を小さくするため，直交する2組のスタレカウンタの値を位相差90°に対応して7秒ずらして加え合わせ， $D_4$ についても同じ操作を行った．なお $D_5$ ， $D_4$ ともに，0.3秒間の移動平均値を用いた．

$S_5$ と $S_4$ の比 $S_5/S_4$ を作ると，これは天球上のある場所に対応する源の透過関数になっており，時間の関数として0とカウンタの有効面積比の間の値になる．従って第12図に示す座標・( $S_4$ ， $S_5$ )の点は，有効面積比に対応する傾きの直線とx軸の間に存在するはずである．

しかし実際には $D_5$ ， $D_4$ の統計的変動によって， $S_5$ が負になることもあり， $S_4$ が0に

第12図  $S_4$  と  $S_5$  の比および誤差

近くなることもあって  $S_5/S_4$  の比は大きく変動する。そこで

$$\theta = \tan^{-1} (S_5/S_4) \quad (3)$$

という量を考える。この値は発散せずより現実に近い値となる。かつ傾きが  $45^\circ$  程度以下では  $\theta$  と  $S_5/S_4$  は概略比例している。  $S_5$ ,  $S_4$  の誤差をそれぞれ  $\sqrt{D_5}$ ,  $\sqrt{D_4}$  ととると、  $\theta$  の誤差  $\Delta\theta$  は第12図に示すように、だ円の接線の傾きと  $\theta$  のなす角の差に等しい。

以上の様なデータ処理をし、  $\Delta\theta$  が0.5以下のデータのみを使い、天球上のある位置を仮定したときの期待されるスタレの透過関数  $M$  との相関

$$C = \sum \frac{\theta}{\Delta\theta} \cdot \tan^{-1} (M) \quad (4)$$

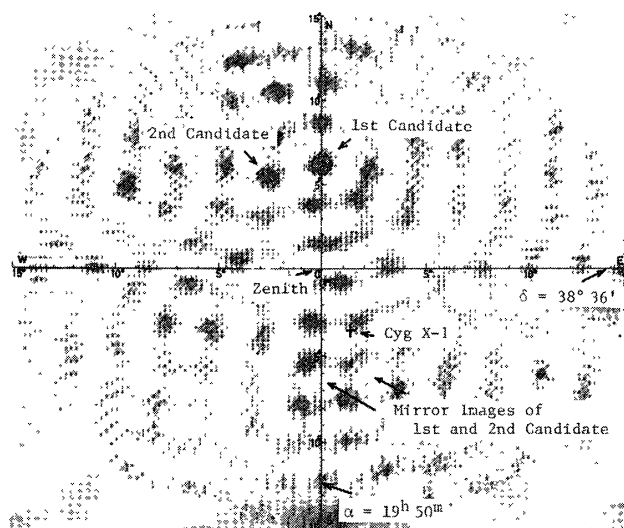
をプロットしたのが第13図に示した相関図である。スタレのスピン軸が  $0.4^\circ$  傾いておりこの値がスタレのピッチ角  $2.29^\circ$  の  $1/4$  に近いので、  $180^\circ$  で対称とならず、スタレコリメータに固有の不確定さが消え、反対称の位置には負のイメージが現われている。

図からわかるように最も確からしい点は天頂から北へ  $6.5^\circ$  の所で、赤経、赤緯に変換すると

$$\begin{aligned} \alpha &= 19^{\text{h}} 49^{\text{m}} \pm 1^{\text{m}} \\ \delta &= 45^\circ 02' \pm 10' \quad (1950 \text{ 年分点}) \end{aligned}$$

の位置である。これは Cyg X - 1 の北北西約  $10^\circ$  の位置にあたる上に述べた第1の点の約  $2.5^\circ$  西の点

$$\alpha = 19^{\text{h}} 35^{\text{m}} \pm 1^{\text{m}} \quad (1950 \text{ 年分点})$$



第13図 バースト源の相関図

コメリータの回転軸は  $0.4^\circ$  オフセットしているので天頂の対称点に負のミラーイメージが出ている。

1st candidate	$\alpha = 19^{\text{h}} 49^{\text{m}} \pm 1^{\text{m}}$
	$\delta = 45^\circ 02' \pm 10'$
2nd candidate	$\alpha = 19^{\text{h}} 35^{\text{m}} \pm 1^{\text{m}}$
	$\delta = 43^\circ 56' \pm 10'$ (1950年分点)

$$\delta = 43^\circ 56' \pm 10'$$

も相関が大きく出ているが、第1の点に比べると相対的な存在確率は約50%である。

注目すべきことは、このバーストが Cyg X - 1 がカウンターの視野の中にある時に起ったことである。Cyg X - 1 はバースト源として有力な候補の1つとして考えられており、<sup>5)</sup> このバースト源が Cyg X - 1 と考え得るかどうかは、興味のある問題である。しかし、Cyg X - 1 の場所での  $\chi^2$  を求めて、このバースト源としての確からしさを計算すると、有意水準0.1%以下となりバースト源が Cyg X - 1 である可能性はきわめて低い。

## 5 結 論

はじめに述べたようにガンマ線バーストの発生原因を考える上で、バースト源の位置を精密に決めることが不可欠である。これまでは数個の衛星によりバーストの到達時間差からバースト源の方向が求められており、精度は  $5^\circ$  程度のものであった。我々は直交回転スタレ・コリメータ方式と、150時間におよぶ長時間の気球観測により、はじめて単独の観測器で約  $0.2^\circ$  の精度でバースト源の位置を決定することができた。この方法の有効性が確認された

ので、将来衛星又はスペースシャトルの搭載を検討しているところである。

現在のところこの位置にはこれまで知られている X 線源で対応するものは見付かっている。又、電波源カタログ、近接連星などのカタログを調べても対応する天体は見付からない。バースト源にあたる天体は時間変動している可能性もあるので、この付近の光学観測を今後続ける計画を立てている。

1977 年 6 月 10 日 新設部 (工学)

### Appendix-1 スダレのピッチ幅と周波数決定精度の関係

本文でバーストの位置精度をあげるためにはスダレのピッチ幅をせばめる必要のあることを述べた。併し、ピッチ幅をせばめると、1 ピッチあたりの入射数が減少したためモジュレーションパターンの決定精度がおちてくることが考えられる。

入射バーストの大きさによってどの程度のピッチ幅が適当であるかを調べる。計算は解析的に行ない、モンテカルロのシミュレーションの計算と比較してその正当性をたしかめた。

#### 1. ノイズのパワー分布

観測されたデータからモジュレーションの様子を調べるためにパワースペクトル解析を行なった場合を考える。

バーストがない場合でも、バックグラウンドガンマ線の変動によって解析されたパワースペクトラムは所々に山をもつ分布となっている。

ランダムな入射をしている場合、このパワーの分布は自由度 2 の  $\chi^2$  分布となることが知られている。つまり総数  $N$  ケのカウントが一定の時間の間にランダムに入射すると、そのパワー  $P$  の分布は

$$F(P) dp = \frac{1}{N} e^{-\frac{P}{N}} dp \quad (\text{A} \cdot 1)$$

となる。

実際モンテカルロ法で計算した結果と (A・1) 式との一致は図 A・1 に示すように大変よい。

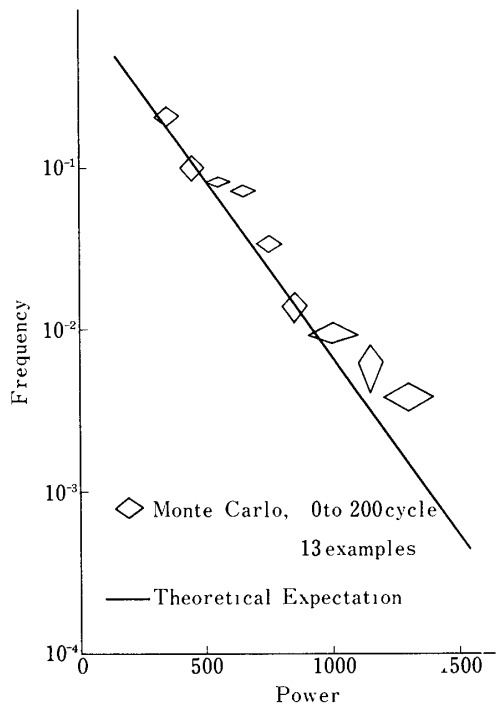
#### 2. バーストがある場合のパワーについて

バーストがおきた時には、このガンマ線はモジュレーションをうけるので、その周期に対応するパワーが大きくなることが期待される。しかし入射するバックグラウンドのガンマ線の変動のために、このパワーの大きさは変動をうける。

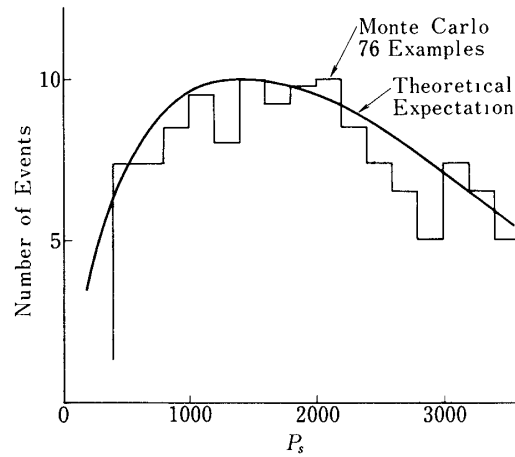
本文に述べた様に、スダレを通して観測されたバーストによるガンマ線の総カウント数を  $S$  とする。モジュレーションに対応する周期のパワーは、上に述べた理由で分布をもつ、この分布を

$$F_s(p) dp$$

とすると



A 1 図 Distribution of Noise Power Spectrum  $N = 200$



A 2 図 Distribution of Signal Power.  $N = 100, S = 200$

$$F_s(p) dp = e^{-\frac{P+16S^2}{N+S}} I_0\left(\frac{2\sqrt{\cdot 16S^2 P}}{N+S}\right) \frac{dp}{N+S} \quad (A \cdot 2)$$

で与えられることが証明できる。但しここで  $I_0$  は虚数のベッセル函数である。又  $\cdot 16$  という数値はモジュレーションの三角波の基本波成分を示している。

この式とモンテカルロで計算した結果を図 A・2 に示したが、一致は大変よい。これは情報理論で Rice 分布と呼ばれているものである。

さてシグナルのある場合、このパワーの値が他の周波数成分と比較して大きい場合でないとモジュレーションの解析を行うことができない。

コリメータの大きさが  $n$  ピッチ分であると、パワースペクトル分布の解析を行った場合、バーストの位置によって、 $n$  種の周波数のものが可能となる。

この  $n$  ケの周波数の中でシグナルのパワーが最大である確率は、(A・1) 及び(A・2) 式から

$$P_r(n) = \int_0^\infty \left(1 - e^{-\frac{P'}{N+S}}\right)^{n+1} e^{-\frac{P'+16S^2}{N+S}} I_0\left(\frac{2\sqrt{\cdot 16S^2 P'}}{N+S}\right) \frac{dP'}{N+S} \quad (A \cdot 3)$$

で与えられる.

$$\frac{P'}{N+S} = x', \quad \frac{S}{\sqrt{N+S}} = \sigma, \quad \frac{\cdot 16 S^2}{N+S} = \cdot 16 \sigma^2 = y$$

とおくと (A・3) 式は

$$P_r(n, y) = \int_0^{\infty} (1 - e^{-x'})^{n-1} e^{-x'-y} I_0(2\sqrt{x'y}) dx' \quad (\text{A} \cdot 3)$$

となる.

このようにして  $P_r$  と  $n$ ,  $\sigma$  の関係を求めた結果が本文の第3図に示したものである.

### 3. 確率 $P_r$ と $n$ 及び $\sigma$ の関係について

第3図の結果から次のことが結論される

イ)  $\sigma$  が7以上では  $n$  にほとんど無関係に  $P_r$  は70%以上になる.

ロ)  $\sigma$  が5以下になると, 確率がさがり実用性はあまりない.

ハ) カウンターを2分して, 一方で大凡その場所をきめ, ついでもう一つのカウンタでその場所の中で精密に位置をきめる場合を考えてみる.

カウンターが2分されるので,  $\sigma$  は  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  となる.

各々のカウンターのピッチ数  $n_1$ ,  $n_2$ , とする.

1ケのカウンターでピッチ数  $n = n_1 n_2$ ,  $\sigma = \sigma_0$  と

2ケのカウンタで  $n = n_1, n_2$ ,  $\sigma = \frac{\sigma_0}{\sqrt{2}}$

の場合の確率を考えると, 第3図から

$$P_r(n, \sigma_0) > P_r\left(n_1, \frac{\sigma_0}{\sqrt{2}}\right) P_r\left(n_2, \frac{\sigma_0}{\sqrt{2}}\right)$$

の関係が導かれる. これは  $P_r$  の  $n$  による依存性がすくなく,  $\sigma$  の依存性が大きいためである.

以上のことから精度よい観測を行うにはカウンタを細分化して数をふやすのが得策でないことがわかる.

### Appendix - 2 姿勢の決定

この節では, バースト到来方向の解析のために必要となる観測装置の姿勢について述べる.

今回の観測装置の姿勢計としては, 地磁気センサー (GA) のみにとどめ, スターセンサーは搭載しなかった. GAの方位角決定は約1度であり, ゴンドラの回転軸方向とスタレ・コリメータのグリッド面の法線方向 (以下スタレの極軸とよぶ) とのずれは, 地上で  $0^\circ$  以下に調整した. しかし放球時の衝撃等により, この方向が多少変化する可能性もあり, バ



ースト生起時に同時に視野内にあった白鳥座の X線星 Cyg X - 1 の解析をすることにより姿勢系の絶対値を求めることにした。

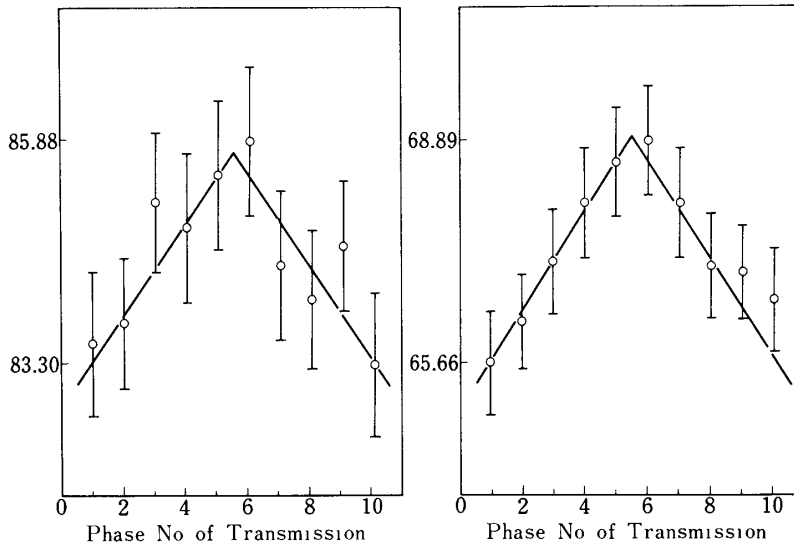
まず求めるべき姿勢のパラメータとして GA の示す方位角からのずれ及びスタレの極軸のずれを仮定し、この姿勢のもとで、各時刻における、Cyg X - 1 に対するスタレ・コリメータの透過率の位相（三角形透過率）を求める。この位相によって各スタレ・コリメータ付カウンターの計数を分類し集積する。各姿勢に対して、三角形透過率との一致を調べ、最もよく一致する値を用いて姿勢の絶対値を決める。

三角形透過率の位相を 10 段階にわけ、バーストの前後合わせて 21 分間のデータを用いて解析した。この結果は A 3 図に示した。ゴンドラの回転軸に対するスタレの極軸の傾き  $\epsilon$  は、第 1, 第 2 カウンターに対してそれぞれ

$$\epsilon_1 = -0.4^\circ \pm 0.1^\circ$$

$$\epsilon_2 = +0.35^\circ \pm 0.1^\circ$$

であった。この値は地上での組立ての精度に比べ悪いが、恐らく放球時の衝撃により傾いた



A 3 図 Cyg X - 1 の解析による観測器の姿勢

B<sub>30-22</sub> 1975. 9. 23

A - Counter

$$\Delta\varphi = -3.0 \pm 1.2^\circ$$

$$\epsilon = -0.4 \pm 0.05$$

$$a = \begin{pmatrix} 2.67 & +0.44 \\ & -0.50 \end{pmatrix} \text{ cts/sec}$$

B - Counter

$$\Delta\varphi = -3.9^\circ \pm 0.7^\circ$$

$$\epsilon = 0.35 \pm 0.03$$

$$a = \begin{pmatrix} 3.57 & +0.50 \\ & -0.54 \end{pmatrix} \text{ cts/sec}$$

ものと思われる。方位角の補正  $\alpha$  は第1, 第2カウンターに対してそれぞれ

$$\alpha_1 = -3.0^\circ \pm 1.2^\circ$$

$$\alpha_2 = -3.9^\circ \pm 0.7^\circ$$

であった。これらは誤差の範囲内で一致しているが、地上でのGAのとりつけの誤差から推定される値より若干大きい。

また、この解析で求められた Cyg X - 1 の計数率  $R$  は第1, 第2カウンターに対して

$$R_1 = 2.67^{+0.44}_{-0.50} \quad (\text{cts/sec})$$

$$R_2 = 3.57^{+0.50}_{-0.54} \quad (\text{cts/sec})$$

であった。この値から推定される Cyg X - 1 の強度はカウンターの面積, 測定エネルギー範囲, 大気の吸収, 及び 20 ~ 200 keV での平均的な Cyg X - 1 のスペクトルとして, スペクトル指数 - 1.5 のべき関数を仮定すると

$$I(E) = 0.91 E^{-1.5} \quad (\text{photons/cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{keV})$$

と推定された。

なお、同年9月24日におこなわれた、2 ~ 25 keV 領域での東大宇宙研のロケット観測において測定された Cyg X - 1 の強度は

$$I(E) = (0.846 \pm 0.02) E^{-1.29 \pm 0.01} \quad (\text{photons/cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{keV})$$

であった。

これらの値は、一般に Cyg X - 1 の静穏期におけるX線強度とよく一致している。

### References

- [1] M. Ruderman, ; Annals New York Academy of Sciences  
164 - 180, **262** (1975)
- [2] Y. Ogawara, ; M. Matsuoka, S. Miyamoto, N. Muranaka, J. Nishimura and  
M. Oda ; Astrophys. and Space Sci. **42**, 211 (1976)
- [3] J. Nishimura, ; Proc. Int. Conf. Cosmic - rays München,  
**12**, 4091 (1975)
- [4] Solar Geophysical Data **20**, 374 A (1975)  
" **8**, 378 A (1976)  
" **98 - 100**, 374 A (1976)
- [5] I. B. Strong, R. W. Klebesadel and D. Evans  
N. Y. Acad. Sci. **262**, 145 (1975)