

# 科学衛星 CORSA-b による X線バースト源のモニター

宮本重徳\*・村上敏夫・西村 純  
小田 稔・小川原嘉明・田原 譲

## A Wide Field X-ray Burst Monitor Using A Rotating Modulation Collimator System

By

S. MIYAMOTO, T. MURAKAMI, J. NISHIMURA, M. ODA  
Y. OGAWARA and Y. TAWARA

**Abstract:** A design of a rotating modulation collimator system which is appropriate to monitoring the occurrence of X-ray bursts in a wide field of the sky is described. Whenever the burst occurs in the field of view, its celestial position is determined to an accuracy of  $\sim 0.5^\circ$  with the coarse collimator system, and when a certain burst source is continually active, the fine collimator system may be pointed to its approximate direction and the source position is determined to an accuracy of  $\sim 2$  arcminutes which may be adequate to lead to the optical and/or radio identification. This system, which combines the precise determination of the source position with a wide field of view, is suited to a small satellite. A specific design is proposed for a small Japanese satellite CORSA-b which is due early in 1979.

### 1. ま え が き

1975 年以來 X線バーストと呼ばれる現象が X線天文学の中で大きな位置をしめるようになって来たがその起源は未だ解明されていない。X線バーストはあらかじめどの方向で、いつ発生するか予想するのが難しいので、X線バーストを系統的に観測するためには天空の広い領域を監視し、バーストが出現した場合に、その位置を高い精度で決定する必要がある。この一見相矛盾する要請に答えるために科学衛星 CORSA-b に回転モジュレーションコリメーターを使用した X線望遠鏡を搭載して観測を行うことを計画している。この方法によって天空の広い領域を監視して、X線バーストの発生の様子をモニターし、ひとたびバース

---

\* 大阪大学理学部

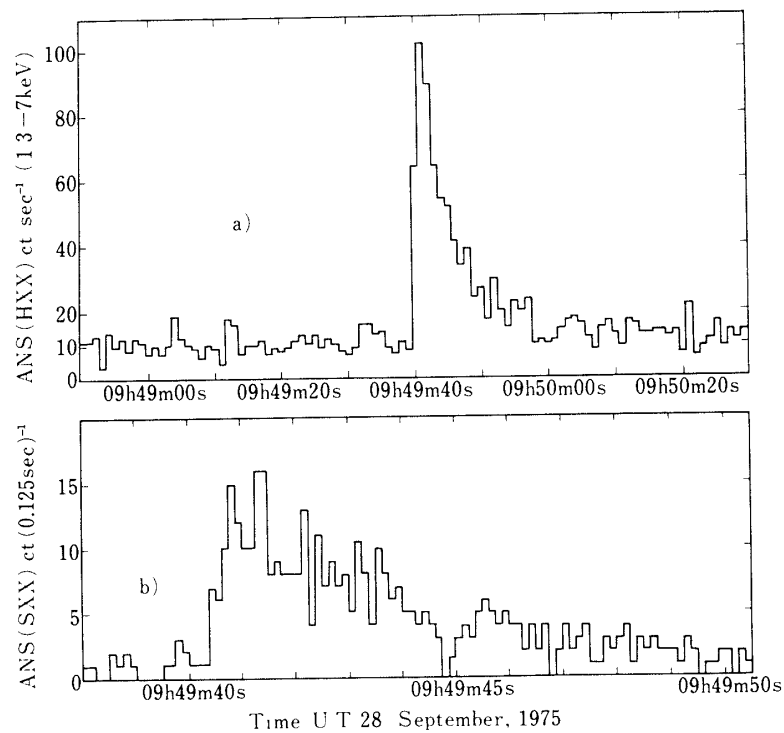
トが出現した時には、その位置を角度にして数十分角の精度で決定し、個々のバースト源の識別を行うことができるであろう。更に必要があれば精密な観測によって数分角の精度で個々のバースト源の位置を決定して、可視天体、電波源等との同定を企てることが考えられる。

以下に記すものは1979年2月に打ち上げが予定されている科学衛星 CORSA-b に搭載が決定された X線バースト観測システムの概要である。

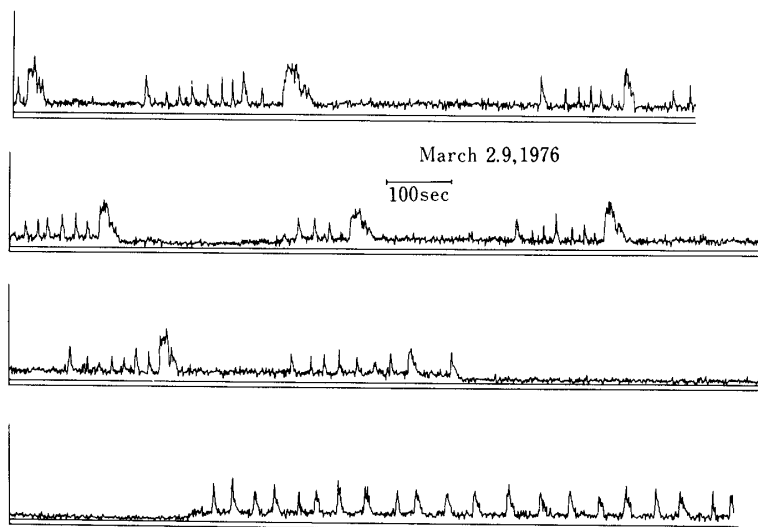
## 2. X線バーストの発見と現状

X線バーストと呼ばれる現象は独立に3つのグループにより発見され、注目されるようになった。初めての観測報告はソビエトのコスモス衛星によるもので、X線源の観測中に突然、短時間非常に強いX線強度の増加を観測した。[1] その後オランダ-アメリカ協同の ANS, アメリカの Vela衛星によっても同様な観測が独立に報告され、その現象が確認された[2][3]。とりわけ ANS 衛星によって、その発生源が球状星団 NGC 6624 に同定されるに及び、精密な X線バーストの観測が始まった。

その後アメリカのグループが人工衛星 SAS-3 を打ち上げ、これら X線バーストと呼ばれる現象の観測に力を注ぎ、その性質の一端が明らかになって来た。代表的な X線バーストの観測例を第1図(a), (b)に示す。図の X線バースト源は非常に短い周期でバーストをくり返すことで注目されたものと、ANS により発見された球状星団 NGC 6624 によるものの観測例である。



第1図(a)

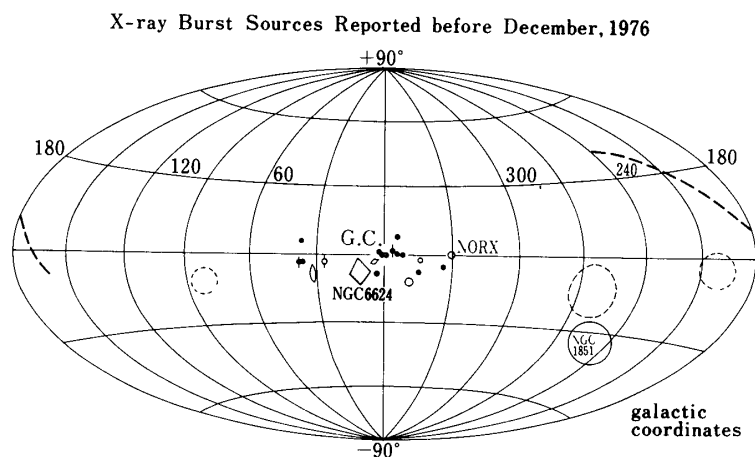


第1図(b)

X線バーストは次のような点でX線源の様々な時間変動現象，例えば flare, transient, nova,  $\gamma$ -バーストと呼ばれる現象と区別される[4].

- (a) 立ち上がり時間  $T_r$  が  $T_r \lesssim 1$  秒である.
- (b) バースト継続時間  $T_d$  はほとんどのバーストが指数関数的に強度の減少を示し， $\exp(-T/T_d)$ とした時  $T_d \sim$ 数秒 $\sim$ 1分である.
- (c) バーストの活動期と休止期がある.
- (d) 活動期に周期は正確に一定ではないが，ほぼ一定の周期で繰り返す. 多くは数時間の程度である.
- (e) バーストの平均的エネルギーは 20keV 以下にある.

既に上の条件を満足するものとして，ほぼ25個のバースト源が発見されている. また少くとも3個のバースト源(バースター)が光学的天体に同定されている. 第2図にこれら25



第2図

個の分布を示す。25個のバースターは銀河中心に集中する傾向にある。[5] 光学的天体に同定されたものの内2つは球状星団に、残り1つ *Ser X-1* は  $B_{mag} \approx 18.5$  等の星に同定されているがこれまでのところ他のバースターの起源は明白でない。[3, 6, 7, 8]

### 3. CORSA-bによる観測

2.で見てきたように、X線バースターの研究はまだ始まったばかりである。とりわけX線バーストは、いつ、どこで発生するかあらかじめ予想が難しく、従来のような狭い視野を持ったスピル衛星では銀河全体の探査は不可能である。従来の衛星にとってX線バーストの観測は副産物的傾向があった。CORSA-bでは、これらバースト源を有効に探査できるようにシステム的设计が行われている。そのシステムの特徴は4.に詳しく述べられるがいつ、どこで発生するか不明なバーストを系統的に広い視野で待ち受け、X線バースターの分布をダイナミックにとらえることである。それぞれのバースターの性質、例えば頻度、及びその時間変化、スペクトル等々の観測を行いたいと考える。いわばバースト源の全天にわたってのカタログ作りを行いたい。このことがバースターの正体を知る上で第一に重要であろう。このカタログを通して従来観測されている様々なX線源とのバースターの関連が明白になると考える。

### 4. 観測機器の設計

観測機器設計に当たって基本となる点は、先にも記したようにバーストがあらかじめどこの方向で、いつ発生するか予想が難しいということである。従って広い領域の同時モニターを必要とする。一方ひとたびバーストが発生すれば我々はその方向を高い精度で知り、バースターを識別したい。このためにはモジュレーションコリメーターが要求を満すものとして適していると考えられる。

CORSA-bには2組の回転モジュレーションコリメーターが搭載される。一組は広い視野 ( $20^\circ \times 20^\circ$  半値幅) を持ち、位置決定精度は約0.5度を持つ、もう一組は狭い視野を ( $6^\circ \times 6^\circ$ ) 持ち、必要ならば数分角の精度で位置決定を行う。コリメーターの詳しいパラメーターは Table I, II, に示す。第3図に示すようにこれら一組の2台のコリメーターは互にモジュレーションの位相が180度異なるように取り付けられ、透過率の和が常に一定になる。これは次のような要請によるものである。バーストは短時間の現象であり、衛星の計

Table I  
Parameters of CORSA-b

total weight	100 kg
spin - rate	5 r p. m.
attitude - control	magnetic attitude control
data recording	tape recorder (6 M bits)
launch date	1979, Feb.

Table II

A) Coarse RMC system	
System A	
bigrid MC A	grid width 1.75 mm grid spacing (center - to - center) 3.5 mm distance of grids 40.0 mm band spacing 5.0° field of view (FWHM) 20.0°
proportional counter (Xe + CO <sub>2</sub> )	effective area 70 cm <sup>2</sup> energy range (two bands) 2 - 6 keV and 6 - 15 keV
Data rate	11 W (8 bit)/sec
System B	システムBはコリメーターの位相を除いてシステムAと同様である。位相はAに対し180°に置かれる。
B) Fine RMC system	
System C	
collimator C	grid width 0.175 mm grid spacing (center - to - center) 0.35 mm distance of grids 40.0 mm band spacing 0.5° field of view (FWHM) 6.0°
proportional counter	effective area 50 cm <sup>2</sup>
Data rate	11 W (8 bit)/sec
System D	システムDは、コリメーターの位相を除いて、システムCと同様である。位相はCに対し180°に置かれる。

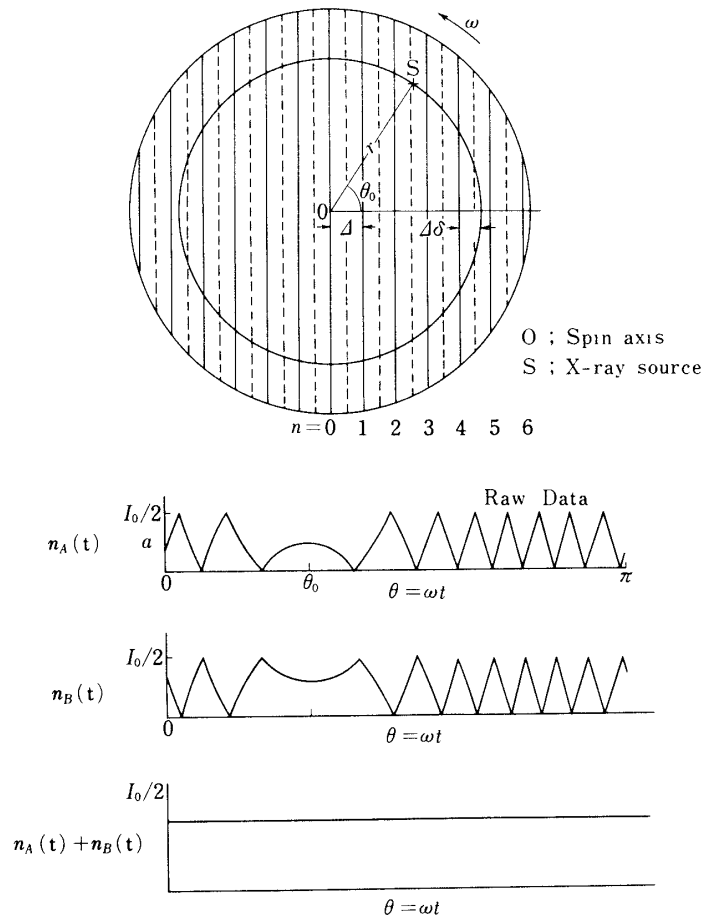
数管により計数されたX線カウンターの時間変化が衛星の回転にともなう透過関数の変化によるものか、あるいはバースト自身の強度変化によるものか区別できない。このためにバースト自身の強度変化を知る必要がある。一対のモジュレーションコリメーターの位相を180度ずらし、その和をとることによってコリメーターによる変調をうけない強度変化をモニターすることが出来る。

これら2台のコリメーターの出力を使用して以下のように位置決定を行う。この方法は観測されたX線カウンターの対し、最も良く一致するデータを作る天球上のX線源の位置を探すもので相関法と言われている。[9]

今A, Bのコリメーターによる計数率を  $n_A, n_B$  とすると  $N(t)$  はモジュレーションのわからない成分を表わし

$$N(t) = n_A(t) + n_B(t) - \overline{(n_A(t) + n_B(t))}$$

はバーストの強度変化を示す。ここで  $\overline{(n_A(t) + n_B(t))}$  はバースト以前、以降の長い時間データによるバースト以外の成分、例えば定常X線、バックグラウンドをさし引くことに相当する。



第3図

一方

$$M(t) = (n_A(t) - n_B(t)) - m(t)$$

はモジュレーションのかかった成分を表わす。  $m(t)$  は同様にバースト以外の成分によるモジュレーション成分を、バースト以前、以降の統計の良い長時間データで差し引くことを示す。  $m(t)$  は透過関数による変化を保存するために、スピンの同期した  $n_A(t) - n_B(t)$  の長時間平均である。このデータ  $N(t)$ 、 $M(t)$  が使用され、バーストの発見、位置決定が行われる。

位置決定の様子は次のようである。今スピンの軸に対し  $\vec{r}_0 = (r_0, \phi_0)$  にある X 線源は衛星の回転に従い  $f(t, \vec{r}_0)$  で示す透過関数を作る。(詳しくは第3図、Appendix Aを参照のこと) この透過関数に対し観測データ  $d(t)$  との相関をこの全平面でとることによって相関係数の高い所として位置は決定される。この相関係数を  $C(\vec{r})$  とすると

$$C(\vec{r}) \simeq \int_{t_1}^{t_2} d(t) f(t, \vec{r}) dt$$

となる。今回の場合，バーストの強度変化を規格化し，かつ2台のコリメーターのデータを使うので  $C(\vec{r})$  は以下のようなになる。

$$C(\vec{r}) \simeq \int_{t_1}^{t_2} \frac{M(t)}{N(t)} (f_A(t, \vec{r}) - f_B(t, \vec{r})) dt$$

一般にこの相互相関係数は高次の項を無視すると，0次の Bessel 関数となり，X線源を中心として，ほぼコリメーターのピッチで振動する同心円となる。その様子は第6図に示す。ところで透過関数の山，あるいは谷をスピン軸に一致させると相互相関図はスピン軸に対称な虚像を持つようになる。しかし第6図に見られるようにスピン軸に対し透過関数のある一定の位相だけずらして取りつけることによって，この解の不定性は取り除かれる。又，一方バーストの継続時間に比し短いと分布は完全な Bessel 関数にはならない。しかし一般にバーストの継続時間は衛星 1/2 回転  $\approx$  約6秒より長く，問題は少いであろう。バーストの  $S/N$  と位置決定精度との関係は同様な方法で行われた  $\gamma$  バーストバルーン実験の報告に詳しく述べられているので省略する。[10] 相関図の性質に関することは Appendix A にまとめられているので参照されたい。

### 5. 計算機シミュレーション

CORSA-bの搭載計器として，実現可能な大きさ，重量等の制約の中でどの程度の観測結果が期待できるか計算機シミュレーションが行われた。必要なパラメーターは科学衛星の大きさを考えて Table I, II にまとめられている。

まずどのような強度のバースターまで発見できるか計算された。一般にバースターのシグナルがバックグラウンドに対し有意であるかどうかは次に定義される  $S/N$  で与えられる。

$$n_\sigma = \frac{S}{\sqrt{S+B}}$$

ここで  $S$  はバースト成分， $B$  はバックグラウンドを表わし， $B$  の内容は定常X線源，スプリアスカウント等を含んでいる。各， $S$ ， $B$  は次のように計算される。

$$S = \int_{t_1}^{t_2} \varepsilon(t) f(t) a(t) 2A dt$$

$$B = \left[ \frac{1}{4} (F_s + B_d) \Omega + b \right] 2A (t_2 - t_1)$$

$A$  ; X線検出器の有効面積

$t_1 \sim t_2$  ; バースト継続時間

$f(t)$  , モジュレーションコリメーターの透過関数

$\varepsilon(t)$  ; 視野を粗く限るスラッツコリメーターの透過関数

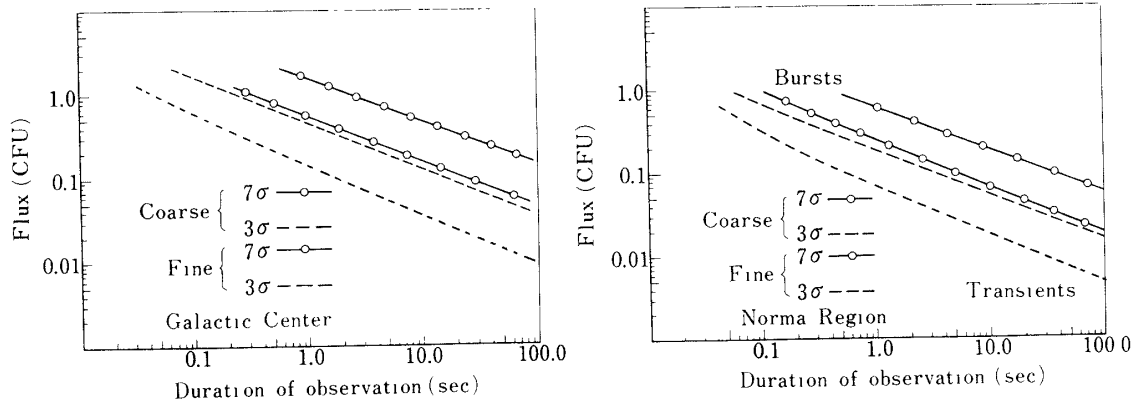
$a(t)$  ; バーストの時間変化

$F_s$ , 定常 X 線源

$B_d$ , 一様 X 線成分 diffuse X-ray

$b$ , その他のバックグラウンド

計算結果を第4図に示す. 第4図は単純化のために X 線バースターはスピンの軸上にあり, かつ  $a(t)$  としては矩形波を仮定した.



第4図 銀河中心及び Norma 領域での X 線バースト継続時間及び強度に対する S/N 比.  $3\sigma$  レベルでバーストの発見が可能,  $7\sigma$  レベルで位置の決定が充分な精度で行いうる

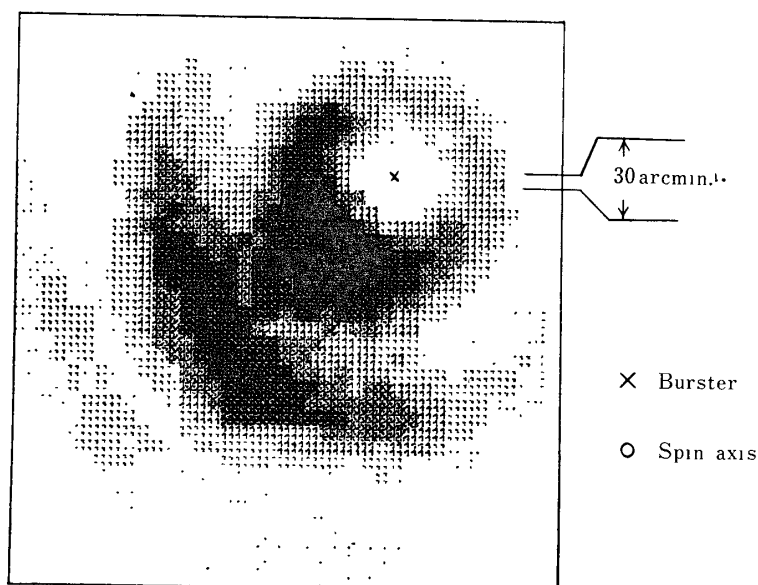
シミュレーションから  $n_\sigma = 3$  あれば, バースターは発見でき  $n_\sigma = 7$  あれば充分な精度で位置決定ができると考える. 第4図(a)は銀河中心を見た場合で, 銀河中心には定常 X 線源が数多くありバースターの発見を困難にする. 第4図(b)は銀河中心より  $30^\circ$  離れた Norma 領域である. この領域にも過去の観測では多くのバーストの報告がある.

一方位置決定のシミュレーションは次のように行った. バーストの強度はピークでカニ星雲強度の 1.5 倍, 時間変化は立ち上がりが 1 秒, 減衰は  $\exp(-t/t_d)$  の型で  $t_d = 8$  秒を仮定する. 第5図に示したものは, 粗いコリメーターによって, スピン軸より 5 度のところにあるバースターの位置を計算機シミュレーションで行ったものである. ほぼ 30 分角の決定精度を有することがわかる. 同様なシミュレーションにより, このバーストを細いコリメーターで観測すればモニターできる空間は狭くなるが S/N の向上に従い角度で数分角の位置決定も行えることもわかる.

最後にバースターの位置を決定する場合, 衛星のスピンの軸がどこを向いていたか, 要するに衛星姿勢の決定精度がそのままバースターの位置決定に影響を与える. それは相関図によって与えられる天球上の位置が衛星のスピンの軸上に対するもので銀河座標に対するものではないからである.

シミュレーション第6図に示すように, 衛星のスピンの軸方向は既に天球上で位置のわかった定常 X 線源を使用して行われる. 定常 X 線源の場合, X 線強度の時間変化は考えなくて良く一台のコリメーターで位置は決定できる. 長時間観測可能であることを考えると, 今考えているバースターに比べ, ピーク強度で数十分の一に相当する弱い X 線源でも高いスピンの軸





第5図 粗コリメーターによるバースト位置決定シュミレーション。  
バースト源はスピン軸より $5^\circ$ の位置にある。×印が決定された位置を示す。仮定したバーストのパラメーターは本文中参照のこと。

決定精度を有する。第6図にカニ星雲強度の十分の一強度のX線源を40分間観測した場合を示す。数分角の位置精度を有することがわかる。

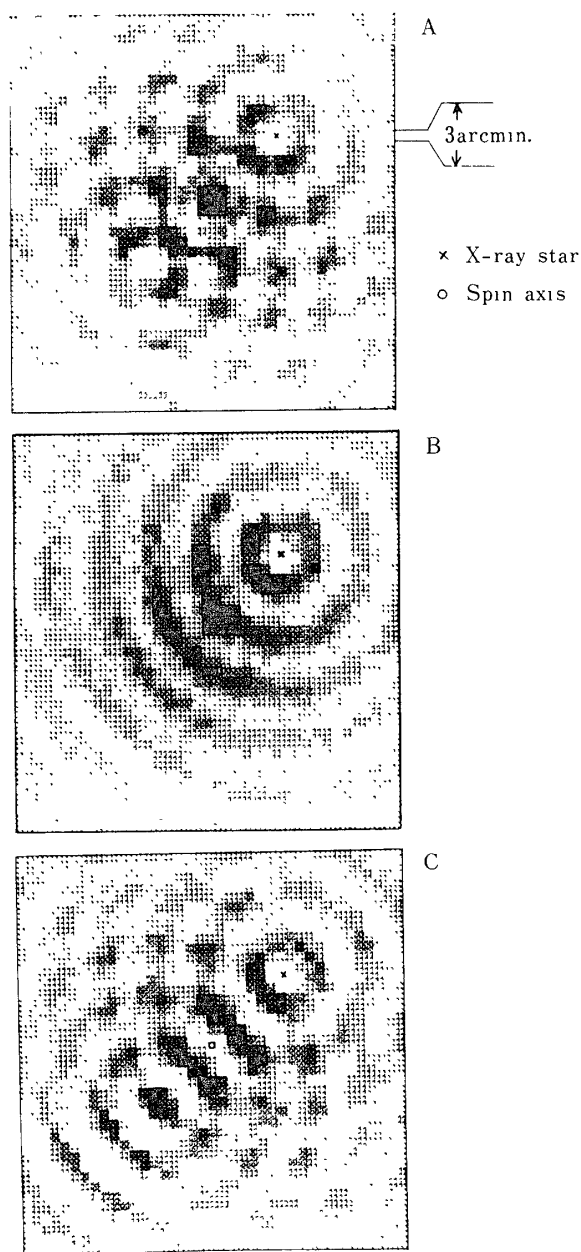
## 6. 結 語

小型衛星 CORSA - b によって、広い視野にわたって高い位置精度でX線バーストの天球分布が観測可能であると考えられる。シミュレーションより明確なように粗いコリメーターで約 $0.5^\circ$ 、細かいコリメーターで数分角の精度は出るであろう。従来の衛星にとって不向きであった広い視野で高い位置決定精度という相矛盾する要請を回転モジュレーションコリメーターによって解決できると考える。

なお、この装置はX線バースト以外に考えられる短時間内の現象も観測可能である。X線バースト以外に考えられる現象としては flare, nova, transient 等の現象がある。[11]

なお、この計画の実行は立教大学吉森正人氏及び東大宇宙航空研松岡勝氏ほかの協力ですすめられる。CORSA - b の観測器系及びデータ処理系の設計には東大宇宙線研近藤一郎氏、東大宇宙航空研田中靖郎氏ほかの協力によってすすめられている。またこの計画の選定は科学衛星専門委員会第34班(班長 早川幸男氏)によって行われた。

1977年8月20日 新設部(科学)



第6図 定常X線源を使ったスピンの決定, 及びグリッド配置による相関図の違い 図中A, B, Cはグリッドの位相を $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ に配置したものによる図である. Aでは軸対称な, Cでは軸反対称なパターンが現れる. Bでは解は一義的である. 既に位置の判明しているX線源を使用してスピンの位置は数分度の精度で決定できる.

#### Appendix A

ここでは本文中に述べた透過関数の表式化, 及び相関図の作製法, 及び性質を述べる. 最後に具体的なコリメーターグリッドの配置を Table III にしてまとめる

### A 1. 透過関数の表式化

スピンの軸に対し、位置ベクトル  $\vec{r}_0 = (r_0, \theta_0)$  にある X 線源の作る透過関数は次のように定式化される。

$$f(\vec{r}_0, t) = \frac{1}{2} + \frac{4}{\pi^2} \sum_{\text{ODD } n} \frac{1}{n^2} \cos \left[ \frac{2\pi r_0}{D} \sin(\omega t + \theta_0) \right] \quad (1)$$

ここで  $D$  はコリメーターのピッチ、 $\omega$  は回転角速度である。  $f(\vec{r}_0, t)$  の計算の結果は第3図に示されている。

透過関数  $f$  のフーリエ成分は  $n$  次の高調波が  $1/n^2$  で弱くなる、よってここでは基本波のみを考える。ちなみに基本波は全体の約 90% をしめている。今回転中心を透過パターンの山、あるいは谷よりずらして置くとする。ずれのオフセット角を  $\delta$  とすると透過関数の基本波は

$$f(\vec{r}_0, t) \propto \cos \left[ \frac{2\pi r_0}{D} \sin(\omega t + \theta_0) + \delta \right] \quad (2)$$

$$= \cos \left[ \frac{2\pi r_0}{D} \sin(\omega t + \theta_0) \right] \cos \delta - \sin \left[ \frac{2\pi r_0}{D} \sin(\omega t + \theta_0) \right] \sin \delta$$

となり  $\cos$  成分と  $\sin$  成分に分離する。

### A 2. 相互相関による作図

X 線源の位置を天球上  $\vec{r}$  に見出す確率は次のように計算される。今観測データを  $d(t)$  とする。コリメーターのオフセットがない時 ( $\delta = 0$ )、これを  $\cos$  モード ( $\sin \delta = 0$ ) とする。相互相関係数  $C(\vec{r})$  は

$$\begin{aligned} C(\vec{r}) &= \frac{1}{T} \int_0^T d(t) f(\vec{r}, t) dt \\ &\propto \frac{1}{T} \int_0^T \cos \left[ \frac{2\pi r_0}{D} \sin(\omega t + \theta_0) \right] \cos \left[ \frac{2\pi r}{D} \sin(\omega t + \theta) \right] dt \\ &= \frac{1}{2} \left[ J_0 \left( \frac{\vec{r} - \vec{r}_0}{D} \right) + J_0 \left( \frac{-\vec{r} - \vec{r}_0}{D} \right) \right] \quad (3) \end{aligned}$$

となる。これはシミュレーションにも示すように、二つの Bessel 関数の和となり、スピン軸対称な虚像が出現する。シミュレーション第6図Aを参照のこと。

さてもしオフセットを  $90^\circ$  とすると、この場合  $\cos \delta = 0$  となり、( $\sin$  モード) 相互相関係数は同様にして

$$C(\vec{r}) \propto \frac{1}{2} \left[ J_0 \left( \frac{\vec{r} - \vec{r}_0}{d} \right) - J_0 \left( \frac{-\vec{r} - \vec{r}_0}{d} \right) \right] \quad (4)$$

となり第6図Cとなる. この場合も正負の別はあるが第6図A同様に虚像があり, 正の像の振幅は変化しない. さて最後にオフセットを sin モードと cos モードが半々に現われるように選ぶと, この場合は式③と④の和となり解は

$$C(\vec{r}) \propto \frac{1}{2} J_0 \left( \frac{\vec{r} - \vec{r}_0}{d} \right)$$

となる. 解は一義的でゴーストを持たない. シミュレーション第6図Bに示す. この sin+cos モードは  $\delta = 45^\circ$  である.

### A 3. グリッドの配置とスピン軸

上記3モードと具体的なグリッドの配置を Table III にまとめておく. A2 で示したようにゴーストを消すため sin+cos モードを使用する. このモードでは2枚で構成される回転モジュレーションコリメーターの一枚をスピン軸に対し  $1/8$  ピッチだけずらして取りつけることによって実現する.

Table III  
Bigrid RMC configuration

Mode	cosine	sine	cosine + sine
$\delta$	$0^\circ$	$90^\circ$	$45^\circ$
Patterns	$\frac{1}{2} \left[ J_0 \left( \frac{\vec{r} - \vec{r}_0}{d} \right) + J_0 \left( \frac{-\vec{r} - \vec{r}_0}{d} \right) \right]$	$\frac{1}{2} \left[ J_0 \left( \frac{\vec{r} - \vec{r}_0}{d} \right) - J_0 \left( \frac{-\vec{r} - \vec{r}_0}{d} \right) \right]$	$\frac{1}{2} J_0 \left( \frac{\vec{r} - \vec{r}_0}{d} \right)$
Spin Axis		Grid	

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Babushkina, Q.P., L.S. Bratolyubove-Tsulukidze, M.T. Kudryatser, A.S. Melioranski, I.A. Savenko, and B.YU. Yushkov. 1975. *Sov. Astron. (L)* 1, 32.
- [ 2 ] Belina, R.D., J.P. Conner, and W.D. Evans. 1976 *Ap. J. (L)* 206, L1.
- [ 3 ] Grindlay. J., H. Gursky, H. Schnopper, D.R. Parsignaut, J. Heise, A.C. Brinkman, and J. Schrijver. 1976 *Ap. J. (L)* 205 L127.
- [ 4 ] Lewin, W.H.G. Preprint (Texas Sympo. Boston, 13-17, December, 1976).
- [ 5 ] Lewin, W.H.G., Hoffman, T.A., Daty, T. Clark, G.W., Swank. T.H., Becker, R.H., Pravdo, S.H., Serlemitsos, P.J., *Nature* 1977 267 30.
- [ 6 ] Lillev, W. IAU (Circ. No. 2936, 1976).
- [ 7 ] Doxsey, R.E., Apparao, K.M.V., Bradt, H.V., Dowe, R.G., and Jernigan, J.G., *Nature* 1977 (Preprint).
- [ 8 ] Lewin, W.H.G., *Mon. Not. R. Astr. Soc.* 1977 (Preprint).
- [ 9 ] Schnoppev, H.W., Bradt, H.V., Rappaport, S., Buughan, E., Burnett, B., Doxsey, R. Mayer, W. and Watt, S. *Ap.J. (L)*, 161, L161, 1970.
- [10] Nishimara, J. Jujii, M., Tawara, Y., Miyamoto, S., Oda, M., Ogawara, Y., Yamagami, Y., Kajiwara, M., Murakami, H., Yoshimori, M., Nakagawa, M., and Sakurai, T., ISAS, RN-39, 1977.
- [11] Ricketts, M.J., Cooke, B.A., Pounds, K.A. *Nature* 259, 1976, 547.