

気球搭載用 X 線望遠鏡

小田 稔・宮本 重徳*・小川原嘉明
牧島 一夫・L. E. Peterson**・
R. M. Pelling**・W. S. Peterson**

ABSTRACT: We have developed a large balloon-borne X-ray telescope for the imaging of the Crab Nebula. The telescope consists of a 4-layer modulation collimator of 20 arcsecond resolution, a phoswich scintillation counter of 450 cm² area, and 16 mm cameras as accurate star sensors. A gondola with a sophisticated attitude control system affords accurate pointing of the X-ray telescope. Two successive flights in 1977 and 1978 have confirmed the basic performance of the system, and sufficient data of the Crab Nebula have been obtained.

概 要

かに星雲の X 線 2 次元像を観測する目的で、気球搭載用の大型 X 線望遠鏡が開発された。これは角分解能 20 秒角のすだれコリメータ、16 mm カメラを用いた星姿勢計、面積 450 cm² の大型フォスウィッチ検出器を組み合わせ、高精度姿勢制御つきのゴンドラにマウントしたものである。2 回のフライトでその動作が確認され、かに星雲の良質なデータが得られた。

1. 序 論

「かに星雲」(Crab Nebula) は西暦 1054 年に爆発した超新星の残骸であり、光や電波を放出するだけでなく、強い宇宙 X 線源でもあることが、X 線天文学の初期の頃から知られていた (かに星雲の全般的な解説は [1], [2], [3])。かに星雲の中心近くには、周期 33 msec で周期的にパルス状の電磁波を放出する点状天体、すなわちパルサーが存在する。パルサーはこの他にも全天で多数発見されているが、いずれも回転する中性子星と考えられる。

現在観測されるかに星雲の激しい活動の源が、中性子星の自転エネルギーであることはほぼ疑いがない。しかし、X 線の発生領域は大ざっぱに 1 光年ほどにも広がっているのに対し、シンクロトロン機構で X 線を出している高エネルギー ($\sim 10^{14}$ eV) の電子は数カ月の寿命でエネルギーを失ってしまう。すなわち、中性子星の自転エネルギーがどのようにして電子に伝達され、さらにその電子がどのように輸送されるかは謎に包まれている。この機構を解

* 大阪大学理学部

** カリフォルニア大学サンディエゴ分校

明することは、すなわち中性子星、星間磁場、星間プラズマ、高エネルギー粒子などから成る系の相互作用のしくみを解明することにはかならず、現代宇宙物理にとっての基本的な問題のひとつと言えよう。

この目的のためには、かに星雲のX線放射の詳しい2次元像をつくることが本質的に必要となる。現在までに、主として月によるかに星雲のえんぺいを利用してかに星雲の形状を測る試みがなされてきた([4] ~ [12])。このうち、軟X線(およそ1~10 keV)での観測はロケットによって、また硬X線(≥ 20 keV)での観測は主として気球を用いて行われた。これらの結果をまとめて図1 a, 1 bに示す。これでわかるように軟X線領域はほぼ2分角の大きさを持ち、硬X線の拡がりはそれよりやや小さい。またX線分布の中心がパルサーに対し北西に10秒角ほどずれていること、軟X線領域が北西-南東に延びてように見えるのに対し硬X線領域はそれと直角な方向に長軸をもつように見えること、なども興味深い。

しかし、月のえんぺいによる観測では得られた情報が主に東西方向に限られ、また時間が短いので統計が悪く、2次元像をつくるにはほど遠いのが現状である。

そこで我々は月のえんぺいに頼ることなくかに星雲の形状構造を観測するため、高い角分解能(~ 0.1 分角)をもった大型精密X線望遠鏡を開発した。これは日米協力の一環として行われ、日本側の提供する精密すだれコリメータを、UCSD (University of California San Diego) の有する低ノイズX線検出器および高精度姿勢制御装置と組み合わせて気球搭載用望遠鏡としたものである。飛翔体として気球が使われるのは、長い観測時間(\sim 数時間)が必要なこと、高分解能X線望遠鏡が必然的に大型(~ 2 m)になること、のためである。

この装置を用いて、1977年から1978年にかけて2回の観測が行われ、ほぼ所期の目的が達成された。データは目下解析中で2次元像に関する情報が出つつあるが、まだ最終的に報告する段階には至っていない。結果については、別な機会に譲り、ここでは主に装置および気球飛翔経過について報告したい。

2. 観測の方法と原理

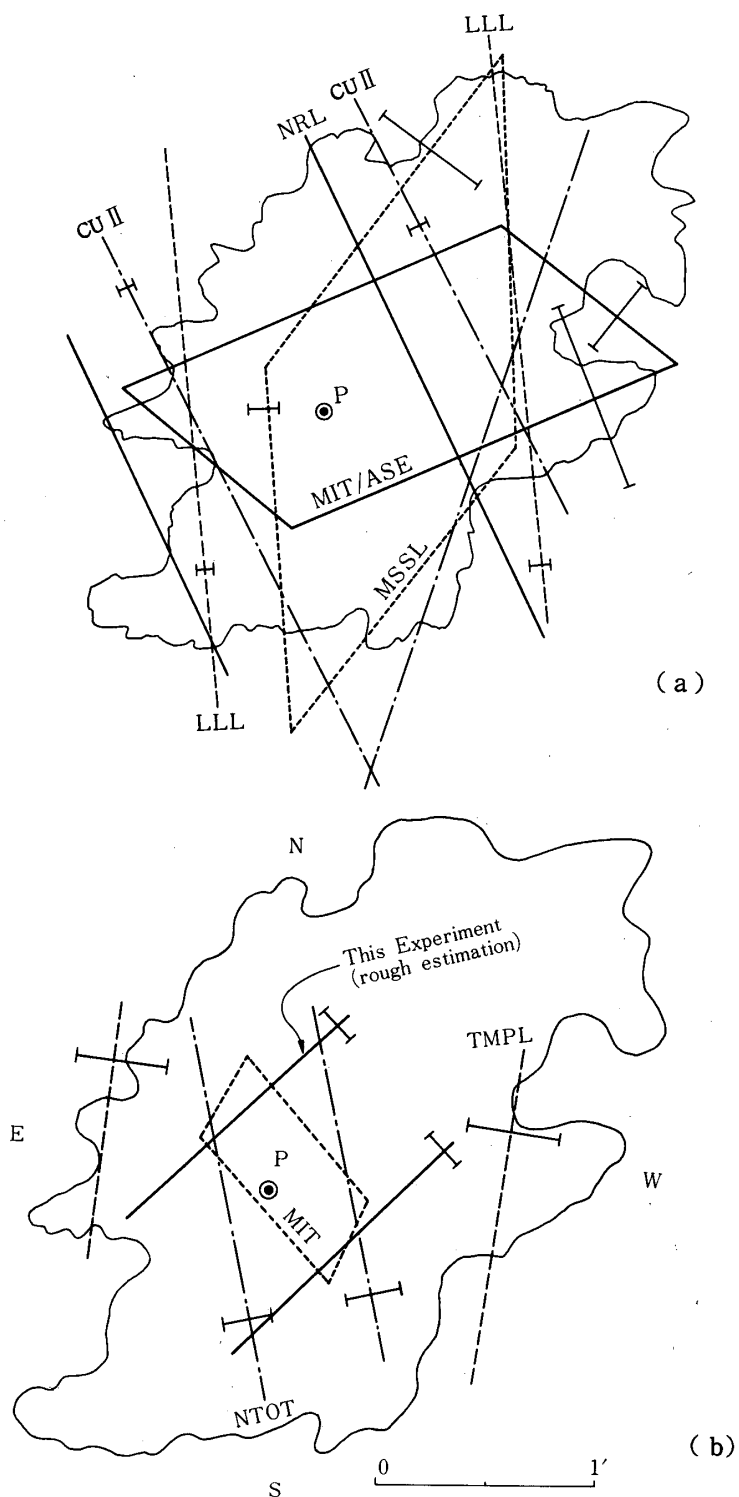
2.1 X線天文学における像形成

拡がった宇宙X線源の像を得る方法は2種類に大別される[13], [14]。ひとつは、 $\lesssim 3$ keVの軟X線が金属表面にすれすれに入射するとき全反射する、という性質を利用した一種の反射望遠鏡である。第2の方法は、特定の方向へ進むX線のみ通すよう視野を制限することであり、種々のコリメータやピンホールカメラ[14], [15], [16]がこれにあたる。気球を利用した観測の場合、残留大気による吸収のため ≥ 20 keVのX線のみ検出でき、必然的に第2の方法をとることになる。

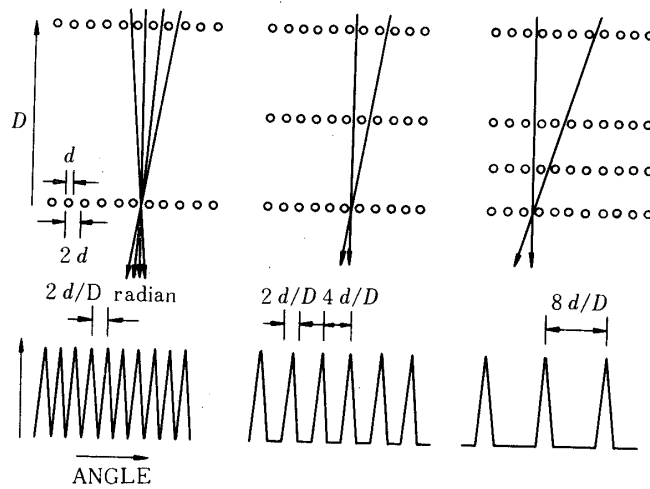
ところでかに星雲は1~2分角に拡がっており、また可視光でみられる wisp, anvil 等の特徴は ~ 0.1 分角のスケールをもっている。パルサーとX線分布中心との距たりも同程度である。従ってかに星雲観測用の望遠鏡は、数分角に拡がった対象を ~ 0.1 分角にまで分解できねばならない。

2.2 すだれコリメータ [17], [18], [19], [20], [21]

上記のような高い角分解能を実現するには、すだれコリメータ(modulation collimator)



第1図 かに星雲の空間形状に関し、これまでに得られた結果のまとめ. a) 軟X線 ($\leq 20 \text{ keV}$) での1次元分布の両端を示す. MIT/ASE はすだれコリメータによるもの, 他は月によるえんぺい. b) 硬X線 ($\geq 20 \text{ keV}$) での1次元像に Gauss 分布をフィットさせたときの FWHM. 太い実験は第1回目の観測 (1977) の結果, 他は月によるえんぺいの結果.



第2図 すだれコリメータの原理

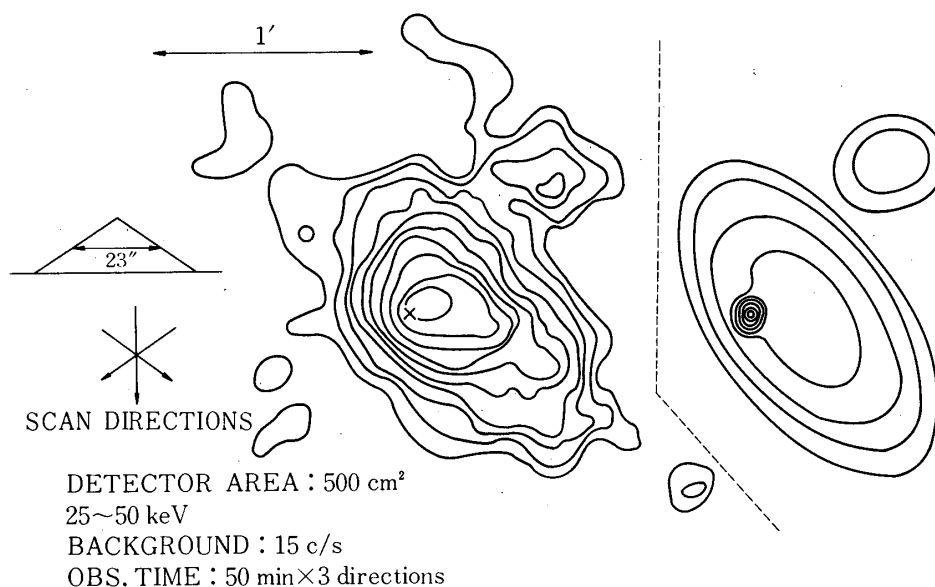
がほとんど唯一のものである。その原理を第2図に示す。すなわち2枚の「すだれ」を重ねて透かして見ると一般に複雑なモアレ・パターンが生じるが、とくに2枚の「すだれ」が完全に平行になっていれば、光の透過帯と非透過帯のくり返しから成る正確な周期パターンになる。中間に入れる「すだれ」の枚数を増してゆけば、透過帯の幅は不変のまま、隣接する透過帯の間隔が次第にひろがってゆく。すだれがX線の吸収体（ふつう金属）でできていれば、特定の方向からのX線のみが通過するので、角度分解能が生じたことになる。すだれコリメータは通常のスラットコリメータに比し圧倒的に軽量でかつ高い分解能を実現できるばかりでなく、透過帯が周期的なためX線源をくり返し見ることができるので厳密なポインティングが不要なこと、S/N比を大きくかせげること、等の利点がある [13]。

すだれコリメータの角分解能は、すだれの細かさと両端に置かれた2枚のすだれの間隔との比で決まる。対象が広がっている場合は、中間に入れるすだれの枚数を適当に増やし、隣り合った透過帯の間隔がX線源の広がりより大になるようにすればよい [19], [20]。

すだれコリメータはX線天文学の初期以来、ScoX-1 [22] や Cyg X-1 の位置決定、かに星雲の広がり測定の前がけ [5] など重要な貢献をなし [21]、最近では Ariel-5, SAS-3, HEAO-A などの外国の科学衛星に搭載されて、多数のX線源の精密な位置決定（精度 $\sim 20''$ ）に威力を発揮している [23], [24]。我々は今回の日米協力のかに星雲望遠鏡にも、すだれコリメータを採用した。従来すだれコリメータは主に点源の位置決定に用いられてきたのに対し、この計画は像形成が主眼であり、多くの新しい意味を含んでいる。

2・3 2次元像の合成

すだれコリメータでX線源をスキャンして得られる情報は、本質的に1次元像である。しかし多数の方向での1次元像がわかれば、一定の数学的手続き [19], [25] によって、2次元像を合成することができる。たとえば第3図は実際の観測のパラメータおよびきとうなかに星雲のモデルを用いて行ったシミュレーション計算の例である。「パルサー」に対応



第3図 かに星雲の2次元像合成のシミュレーション計算. 右側が仮定した分布. これを実際の条件に近い条件下で3方向にスキャンしたデータをつくり, ART 合成法で合成した2次元像が左側のものである.

する点源はぼやけているが, たった3方向の1次元像から, もとの2次元像がかなり忠実に再現されていることがわかる.

実際の観測においては, すだれコリメータのグリッドワイヤは水平に保たれているので, 気球ゴンドラの微小な振子運動や地球自転に伴うかに星雲のドリフトにより, かに星雲は鉛直方向にスキャンされる. この方向は地球の自転に伴い, X線源に対して連続的に変化するので, 結果として多くの方向の1次元像が得られ, そこから2次元像が合成されることになる.

2・4 X線望遠鏡の姿勢計

気球に吊り下げられたゴンドラは一般に複雑な振子運動を行うが, この運動は地上から制御できない. 従って高分解能の望遠鏡を用いる場合は, 時々刻々の望遠鏡の姿勢を, 望遠鏡の角分解能を上回る精度で決定しなければならない.

分解能が0.1分角ほどになると, 地磁気や重力に準拠した姿勢決定法では十分な精度が得られない. そのため我々は2台の16mmカメラを星姿勢計として使い, 既知の星に準拠してX線望遠鏡の刻々の姿勢を求める方式 [5], [18], [22] を採用している.

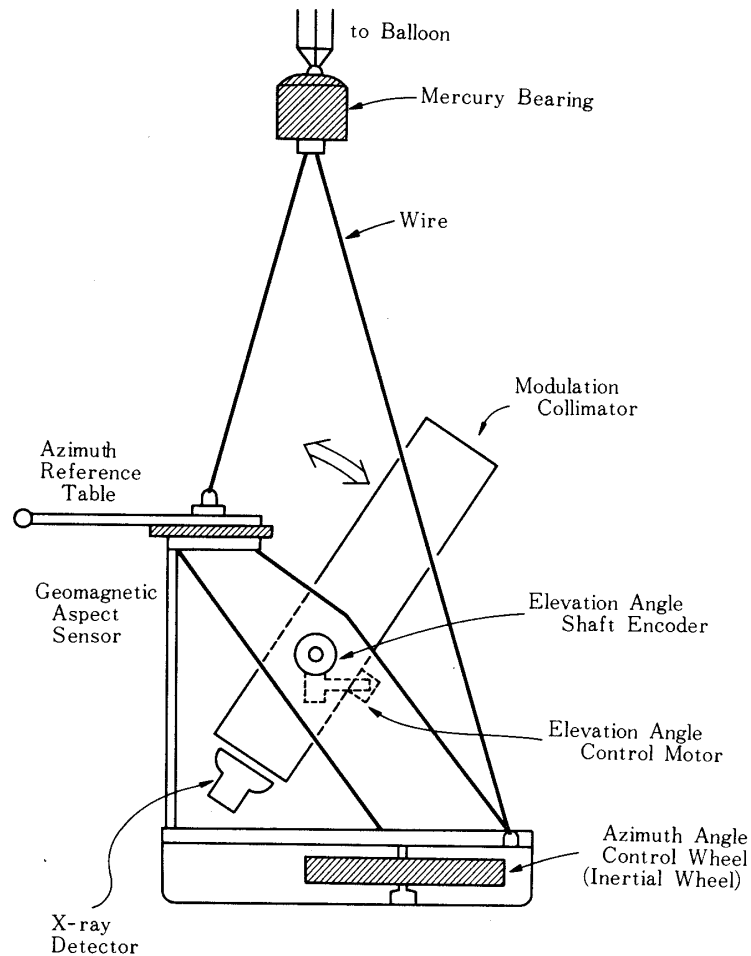
実際の観測にあたっては, X線カウント数はテレメータで地上に伝送され, また望遠鏡の姿勢は回収された16mmフィルムを読むことで決定される. この姿勢データから, 刻々のかに星雲のモジュレーションのフェーズが知られるので, このフェーズごとにX線のカウント数を集計してゆけば, その時刻付近でのかに星雲のX線1次元像が求められる.

3. 観測装置

3・1 装置の概観

第4図に示すように、装置全体は大別してX線望遠鏡部とそれをマウントするゴンドラ部とから成る。このうちX線望遠鏡はすだれコリメータ、コリメータの姿勢決定のための2台の16mm星カメラ、そしてX線検出器から構成されている。ゴンドラ部は望遠鏡を支えるとともに、望遠鏡の姿勢制御系、電源、種々のエレクトロニクス系などを内蔵する。

これら装置全体は、気球に対して自由に回転できるように、マサツの極めて小さい水銀ベアリングを介して気球に吊り下げられる。

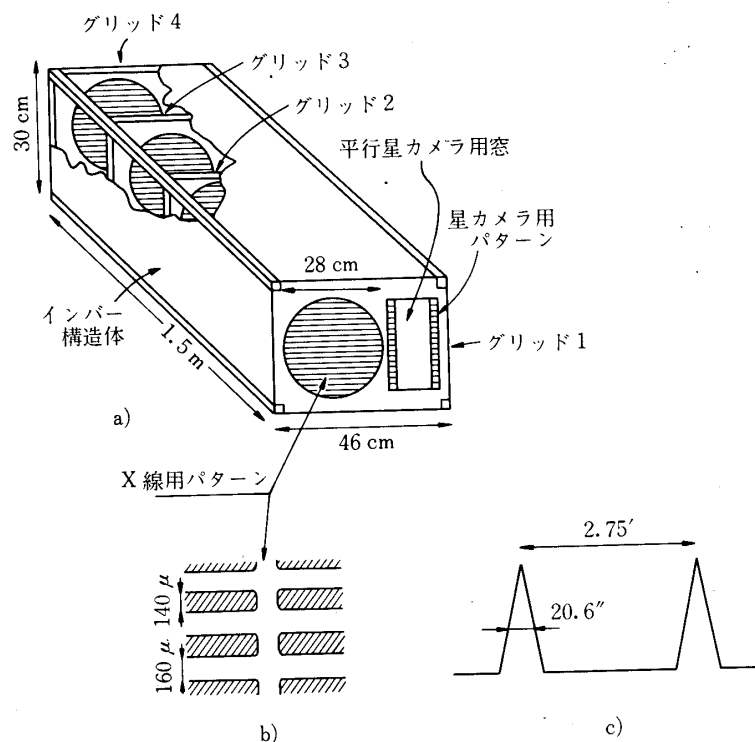


第4図 かに星雲用X線望遠鏡およびゴンドラの模式図

3・2 すだれコリメータ

すだれコリメータの概観を第5図aに示す。熱膨張によるひずみを極力小さくするため、グリッドもそれを支える箱型の構造体も、すべてインバーで作られている。グリッドは第5図bに示すようにピッチ300 μ である。ワイヤ幅が間隙幅よりやや大なのは、グリッドのわずかなミスアラインメントがあっても「もれ」が生じないようにするためである。このパタ

ーンを厚さ0.1mmのインバーの板にフォトエッチングし、それを10枚積み重ねて厚さ1mmの1枚のグリッドができる。グリッドは両側からインバーの板で補強されたのち、箱に組み込まれる。このグリッドは、60～70 keVより高エネルギーでは次第に透明になる。



第5図 すだれコリメータ a) 概観 b) グリッドパターン c) 透過パターン

両端のグリッドの距離はちょうど1.5mにつくられているので、三角形の透過山の半値幅は $150\mu/1.5m = 20.6''$ となる。三角山の高調波を利用すればこの値の3～4倍の分解能がえられる[19]ので、これではぼ0.1'の分解能が保障されたことになる。全体で4層から成るので、隣接する透過山の間隔は $20.6'' \times 8 = 2.75'$ となり、これは従来知られているかに星雲のサイズの概略値($\sim 2'$)よりも大きい。このコリメータの透過パターンを第5図cに示す。

コリメータが正しい透過パターンをもつためには、4枚のグリッドが互いに正しく平行になければならない。このため、4枚のグリッドには微調機構がついている。コリメータは可視光に対しては複雑な干渉色パターンをつくるが、この色パターンはグリッドのalignmentを敏感に反映している[26]。従ってこの色パターンをモニタしながらグリッドの並びを調整し、最終的にはX線写真[18]をとってalignmentを確認する。

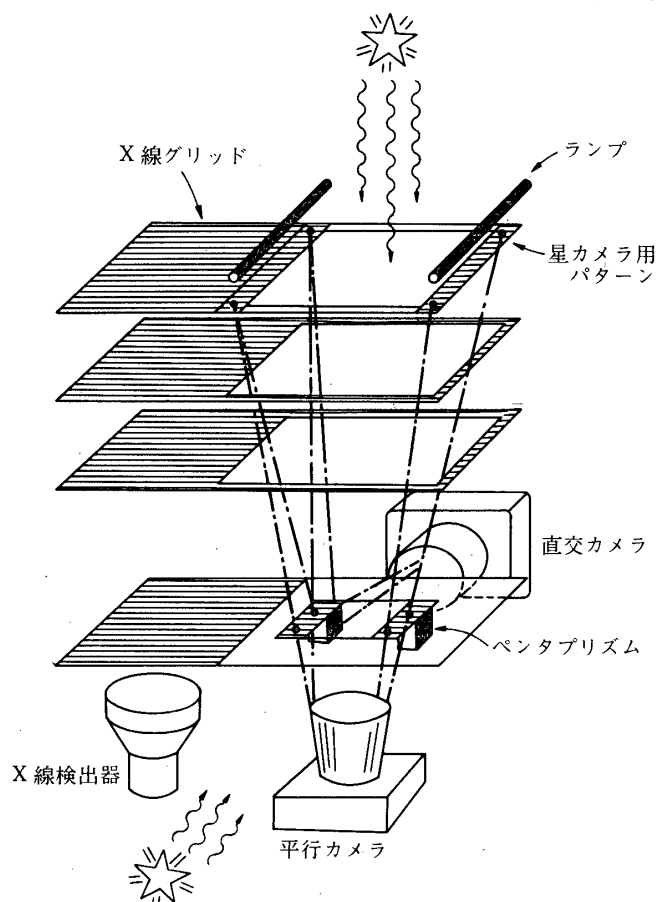
こうして調整されたコリメータは、重力によるひずみを避けるために多数のバネでひと回り大きなアルミの枠の中に吊り下げられ、この枠がシャフトを介してゴンドラに取り付けられる。

3・3 星カメラ (星姿勢計)

すでに述べたように、X線望遠鏡の姿勢は少なくとも0.1分角の精度で決定されねばならない。この目的のためすだれコリメータのアルミ枠には、2台の16mmカメラがとり付けてあり、コマ送りで星の写真を撮影する。

この星カメラの原理を第6図に示す。まず2台のカメラのうち1台(平行カメラ)はコリメータ主軸と同じ方向を向いており、グリッド板にあげられた窓を通して星の写真を撮る。この窓の縁には、X線用グリッドパターンと同じ位相でその4倍のピッチをもった縞パターンがフォトエッチされており、この部分は拡散光で照らされている。両端のグリッドに刻まれた縞パターンを通った拡散光は、モアレ・パターン(一部干渉も含まれる)を生じ、フィルム面上に明暗の縞を結像する。この縞はX線の透過パターンと同期しているので、フィルム上の星の位置を読みとる際、同じ画面に重ねて写されたこの縞を基準座標とすればよい[18]。

かに星雲の南中近く(～南中前後2時間)では望遠鏡の仰角が大になり、平行カメラの視野は気球で隠されてしまう。このためもう1台の同様な16mmカメラがコリメータ主軸と



第6図 星カメラの原理図。ランプからの拡散光は、両端のグリッドに刻まれた縞パターンの影をフィルム上に投影し、基準座標系を与える。フィルム上には同時に星の像が写される。

直交する向きに取り付けられており、この方向の星を撮影する。縞パターンは、ペンタプリズムによって90°曲げられて視野内に入る。

写真は1.31秒に1コマ撮影され、露出は約1秒である。気球の上昇中やバックグラウンド測定中には姿勢データをとる必要がないが、フィルム送りを止めると低温でフィルムが切れる危険がある。このためフィルム送りは止めず、かわりに上記の送り速度の1/2 および1/4の送り速度モードをコマンドで選択し、フィルムを節約する。またカメラおよびフィルムマガジンにはヒータをつけ、保温ジャケットをかぶせる。

レンズは $f = 135\text{mm}$, $F 2.0$ のものを使っているので、0.1分角の分解能をうるには、フィルム上の星の位置を精度 $\sim 3\mu$ で読みとることが必要となり、データ解析の主要部を占める。コダック Double-X フィルム(400フィート)を用いた場合、ほぼ8等星まで撮影が可能である。

なお補助の姿勢計として CCD 星センサも搭載され、データはテレメータを通じて収録される。現在まだ試験段階であるが、これが本格的に実用化できれば、データ解析の手間を大幅に削減できることは明らかである。

3・4 X線検出器

X線検出器は、UCSDによって開発されたフォスウィッチ式低ノイズシンチレータである[27][28]。主検出器は直径25.4cm、厚さ0.3cmのCsI(Na)結晶で、その背後に厚さ10cmのNaI(Tl)結晶を置いてシールドカウンタとする。これらの結晶からのシンチレーションは集光されて、5インチのフォトマルに導かれる。CsI イベントとNaI イベントは、出力パルスの立ち上がり時間で弁別される。このフォスウィッチ特性は温度に敏感なので、検出器のヒータはコマンドできめ細かく調節される。

検出器の前面には、FWHMで $6^\circ \times 6^\circ$ の正方形視野をもった graded shield の粗いコリメータがあり、すだれコリメータの視野をより粗く区切っている。このコリメータをとり付けた状態では、検出器の有効面積は約 450cm^2 である。

機上にはPHA(波高分析器)とPSA(波形分析器)とがあり、検出器の個々のイベントのパルス波高と立ち上がり時間を求める。通常NaI イベントでアンチコインシデンスをとったのち、CsI イベントはPHA, PSA および時刻の情報(精度約0.5ms)とともに地上に伝送される。

3・5 姿勢制御

望遠鏡のポインティングは、コマンドで望遠鏡の仰角と方位角を変えることで行われる。まず仰角を変えるには、ゴンドラと望遠鏡との結合軸の回りに望遠鏡を回転させればよい。この回転角は軸にとりつけられたシャフトエンコーダで読み出され、その値が地上からの指令値に一致するようサーボコントロールが働く。このように、仰角の基準は重力の方向である。

他方、望遠鏡の方位角を変えるには、ゴンドラ底部についている慣性ホイールを回転させ、その反動を利用してゴンドラごと向きを変える。その際ゴンドラは気球に対して自由に回転できないといけないので、気球とゴンドラとはマサツの極めて小さい水銀ベアリングで結ばれている。ゴンドラ上部には、ゴンドラに対し回転できる「安定テーブル」があり、そこに

地磁気センサの腕が固定されている。いま望遠鏡をある方向に向けようとするとき、まず望遠鏡が正しくその方位角を向いたときに地磁気センサがちょうど磁北を向く（出力が0になる）よう、コマンドで安定テーブルとゴンドラとのなす角を固定する（安定テーブルの回転軸についているシャフトエンコーダの値がコマンド値に一致するよう自動制御がかかる）。その上で地磁気センサの出力が0になるよう、慣性ホイールにサーボコントロールが働く。このように方位角の基準は地磁気なので、地上では気球の航跡を知り、地磁気変位の値を考えに入れてコマンドしなければならない。

この方法による姿勢制御はきわめて精度が良く、 $\sim 0.1^\circ$ の精度を実現することが可能である。この値は粗いコリメータの視野 $6^\circ \times 6^\circ$ に比し十分良い。

上空の風にシアアがあるとゴンドラに外部から角運動量が流入し、それを受けもって慣性ホイールの回転が速くなりすぎる場合がある。このときは水銀ベアリングにラッチをかけて回転を止め、次いでホイールの回転も止め、角運動量を気球に逃がしてやる。この操作はデスピントよばれる。

3・5 追尾の方法

実際にかに星雲を追尾する方法を述べよう。機上には仰角・方位角のバッファレジスタがある。そして仰角および方位角のシャフトエンコーダの読みが対応するバッファレジスタの内容に一致するよう、X線望遠鏡の仰角および安定テーブルの向きに自動制御がかかる。他方、機上には別に方位角・仰角の増分レジスタがあり、この内容が一定時間（84秒）ごとに対応するバッファレジスタに加算されてゆく。従ってひとたび地上からのコマンドで増分レジスタの内容とバッファレジスタの初期値とを指定してやれば、望遠鏡は一定時間ごとに一定の角度の増分をもって、段階的に追尾を行うことになる [28]。

段階的な追尾で誤差が大きくなった場合は、地上からのコマンドで4個のレジスタに新しいパラメータを入れてやればよい。これらの値は、気球の航跡を知って地上で計算される。

3・6 データ伝送・受信

気球から地上へ FM で送られるデータは、主要データ部、気球位置の決定に必要な OMEGA のデータ、コマンドの受信確認シグナル等のサブキャリアで構成されている。主要データ部は 20 kbit/sec の PCM 方式で、1 データフレーム = 16 msec = 32 ワード、1 ワード = 0.5 msec = 10 ビットである。1 フレーム中の 32 ワードのうち、PCM 同期とサブコムに 2 ワードずつ、CCD データに 4 ワードがわり当てられ、残り 24 ワードは X 線イベントの伝送に使われる。

テキサス州パレストインにある NCAR 気球基地で受信する場合は、PCM データ、OMEGA データおよび標準時刻 (WWV) の情報は、ミニコン PDP-11 を通して、リアルタイムでデジタル磁気テープに編集される。風下の受信基地ではいったんアナログテープに収録したのちデジタル化される。

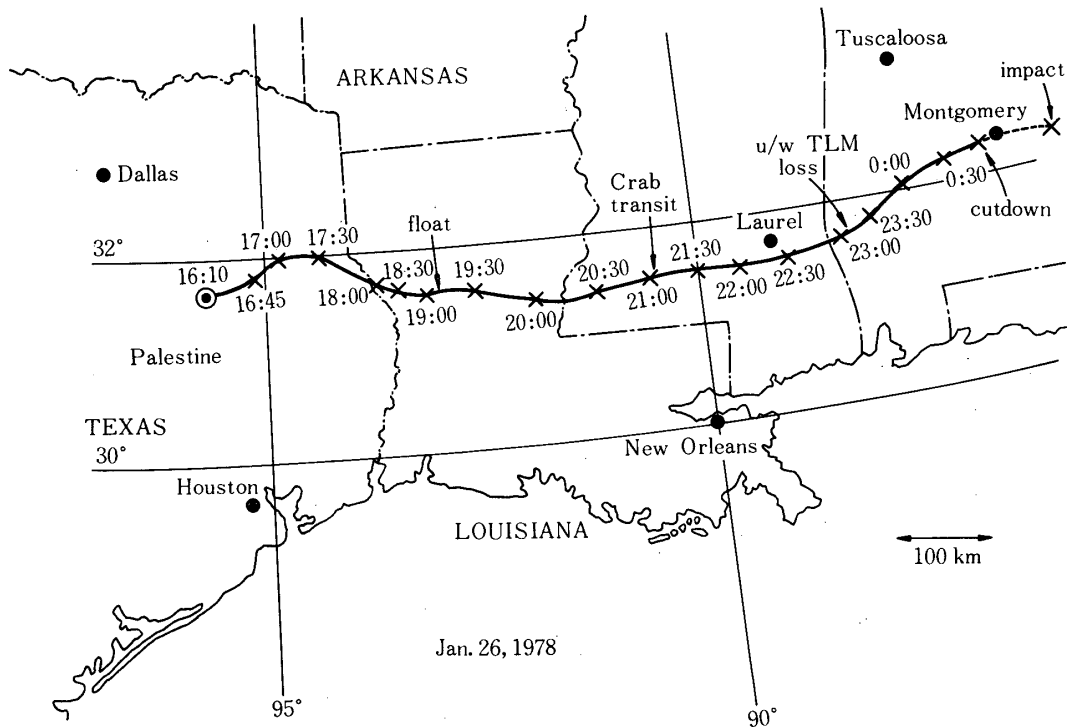
4. 観測結果

4・1 気球飛翔の経過

第1回目の放球は 1977 年 2 月 28 日午後 4 時 35 分、テキサス州パレストインにある NC

第1表 1978年1月26日のフライト経過. 時刻はアメリカ中央標準時.

16:10	NCAR基地より放球
18:09	気球日没
18:30	かに星雲の追尾開始
19:10	レベルフライトに入る
19:30	ゴンドラの振動がおさまり, 良質データがとれはじめる.
20:35 ~ 20:52	サーボ・デスピンのため追尾中止
21:02	バックグラウンド測定開始
21:11	かに星雲南中
21:24	バックグラウンド測定を終え, かに星雲の追尾再開.
22:49 ~ 23:05	デスピン
23:10	NCAR基地での受信終了・風下の基地で受信をつづける.
23:50	追尾を終了し, バックグラウンドの測定にはいる.
0:13	姿勢制御をOFF
0:50	切り離し

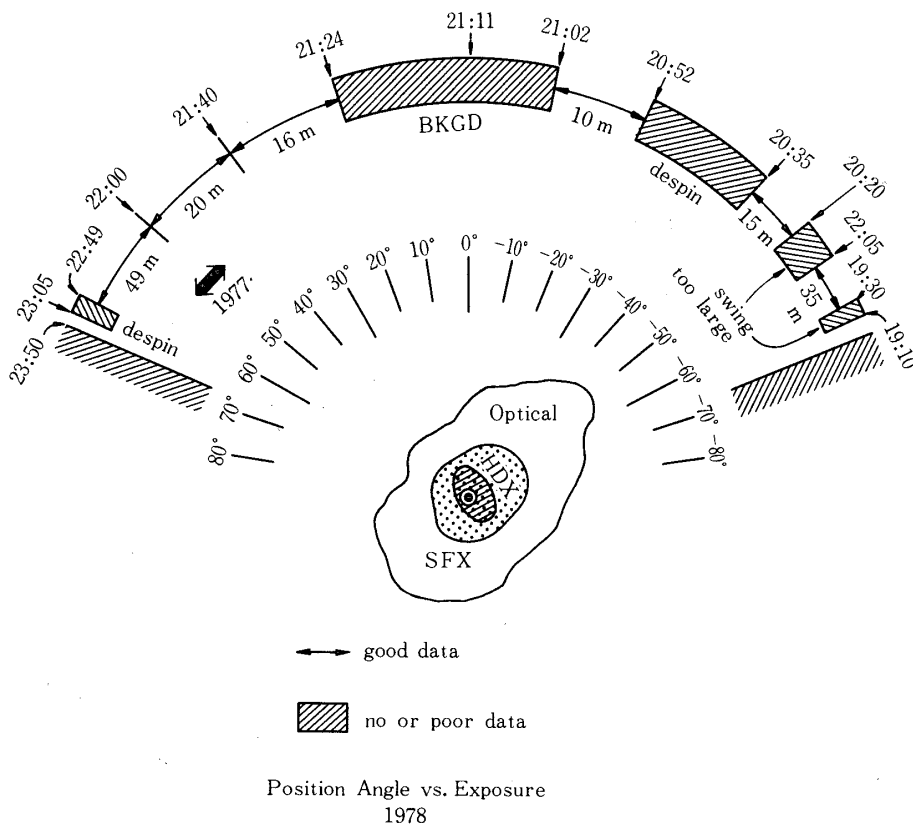


第7図 1978年1月26日のフライトの航跡図

AR気球基地より行われ、約4時間にわたり高度2.8 mbで観測を行った。この経過については報告済み [28] なので省略する。

第2回目の放球は翌1978年1月26日午後4時10分、同基地から行われた。使用気球は58万 m^3 、重さ862 kg、0.5ミル厚のストラトフィルムから成る。装置重量は約900 kgでこれにバラスト250 kgを加えた。

気球は第1表に示すように放球後約3時間でレベルフライトに達した。レベルの高度は約3.3 mbで前回のフライトの値(2.8 mb)よりやや悪いが、これは風が上空に行くほど急速に強くなっていることが判明したので、わざと高度を少し下げたためである。この高度での偏西風は時速約110 km/hと前回の値の約半分であった。気球はほぼ真東に流され、1月27日午前0時50分にアラバマ州モントゴメリ市上空で装置が切り離され、パラシュートで回収された。前回と同様、着地の際の損傷は幸いほとんどなく、とくに16 mmフィルムも無事回収された。

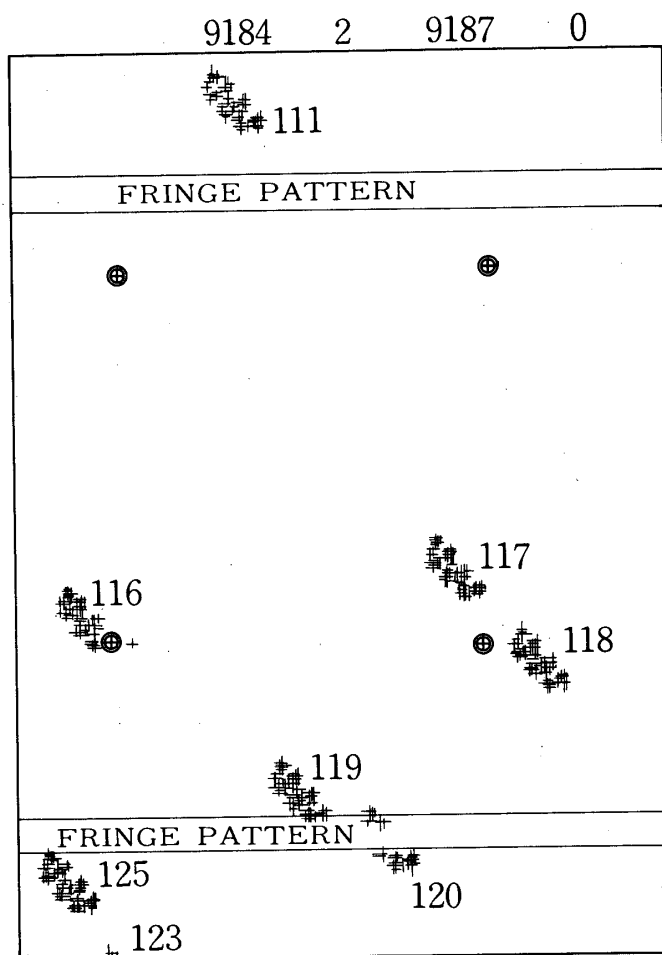


第8図 1978年のフライトにおける時刻、スキャンの position angle, およびデータの質の関係。矢印で示したぶんのデータが使える。太い矢印は、1977年のフライトで観測された方向。

気球がレベルにあった約5時間半のあいだ、かに星雲の観測は順調に行われ、姿勢制御系、X線検出器系、星カメラ系等すべて良好に作動した。また前フライトでテレメトリーが不調だったのに比し今回はテレメトリーは極めて好調で、気球がパレスティン基地の受信限界に達する23時すぎまで、良好な受信が続けられた。それ以後のデータは風下の基地（アラバマ州タスカルーサ）で収録された。気球の航跡を図7に示す。

4.2 X線データ

X線データは前回と同様、PHAとPSAの情報にもとづいて clean up された。この結果20～60 keVでのカウント数は約11 c/s となり、前回よりもバックグラウンドが減少している。また検出器の dead time がほとんどなかったので、検出器のハードウェアおよび clean up のソフトウェアの両方を通したのちの全体的なシグナル検出効率は～80%と期待される。従って4層すだれコリメータをとおしたのちの高度3.3mbでのかに星雲からの最



第9図 直交カメラに写った星の位置を、64コマ（84秒）ぶん重ねてプロットしたもの。1コマは1.3秒。⊕は人工光源による4個のfiducial markである。星の動きは、地球自転によるドリフトとゴンドラの振子運動の重ね合わせである。

終的なシグナルは、20～60 keV で約 1.6 c/s と見積もられる。

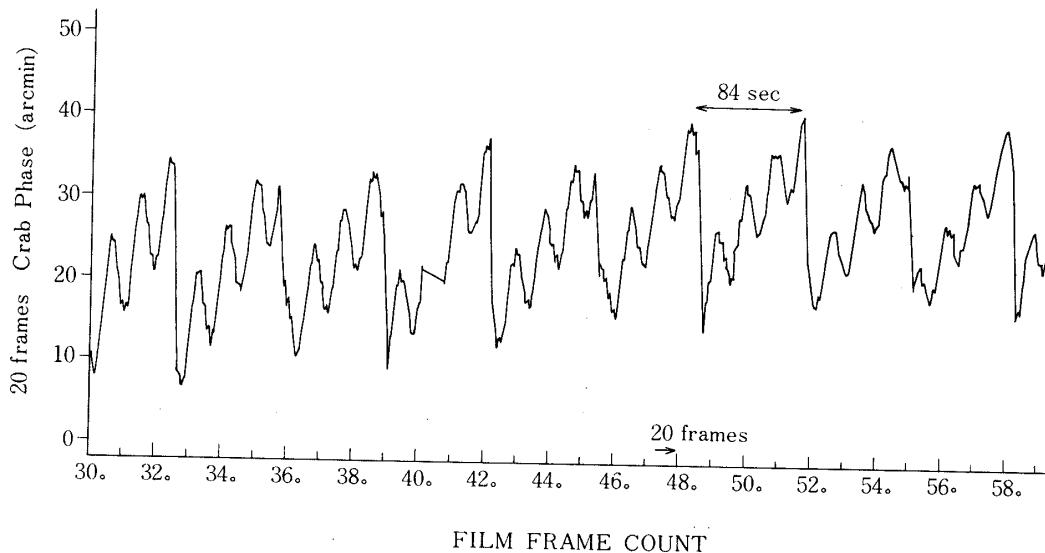
4・3 姿勢データの質

16 mm フィルム上には前回と同様、ほぼ8等星まで写っており、このフィルムのクイックルックおよび地磁気センサの出力とから、粗い姿勢を決めることができる。この結果、かに星雲の追尾はほぼ 1° の精度で順調に行われていたことがわかった。また姿勢の安定度は概して良く、レベルにいた5.5時間のうちから、かに星雲の南中前に約1時間、南中後に約1時間50分、計2時間50分にわたる良質なデータが使えると判明した。残りはバックグラウンドの測定(1.5時間)、慣性ホイールのデスピンのための追尾中止(40分)、そしてゴンドラの振子運動が大きい部分(30分)である。これらのデータの様子を、スキャンの方向と対比させて第8図に示す。

1方向の1次元像が～20分のデータ集積で求まることを考えれば、今回のデータから南中前に2方向、南中後に2～3方向の1次元像がえられることがわかる。第3図のシミュレーションからもわかるように、これらを合成して2次元像を作ることは難しくないであろう。

4・4 16 mm フィルムデータ

最終的な姿勢決定のためには、 $\sim 10^4$ コマに及ぶ16 mm フィルムを1コマずつ検査し、星の像を数ミクロンの精度で読みとらねばならない。この作業は目下進行中であるが、その結果の一部を第9図に示す。これは64コマ(=84秒=階段的追尾の1ステップ)ぶんの星データを、同一の画面上にプロットしたもので、視野内にこの時点では8個の星がいたことがわかる。星は地球の自転によって一様にドリフトすると同様に、ゴンドラの振子運動(周期 ≈ 25 秒、P-P振幅 $\sim 10'$)によってジグザグな軌跡をえがいている。フィルム上



第10図 補間された aspect solution の例。たて軸はコリメータのグリッドワイヤに直交する方向へのかにパルサーのずれ、横軸は時間。ゴンドラの振動、地球自転によるドリフト、そして84秒ごとの階段的追尾による引き戻しが明らかである。

の星の位置の読みとり誤差は約 $2\sim 3\mu$ で、これは $0.1'$ の角度誤差にあたる。

4・5 姿勢の決定

読みとられた星のデータをもとに、1.31秒ごとの望遠鏡の姿勢が計算される。すなわち1コマ上の星の位置が星カタログ上の対応する星の位置に最も良く一致するように、望遠鏡のオイラー角を逐次近似で決定するのである。そしてこのfittingにおける誤差が、ほぼ姿勢データの誤差であると考えてよい。前回、今回とも、この誤差は $\sim 0.08'$ 程度におさえられることがわかった。これは当初の目標を実現するものである。

このようにして求められた1.31秒ごとの姿勢は、フーリエ補間されてなめらかな aspect solution となる。第10図は、その1例であり、かにパルサーがすだれコリメータの視野中心からワイヤに直角方向へどれだけずれているかを示したものである。ここでも第9図と同様、地球自転によるドリフトとゴンドラの振子運動とが合成され、結果としてかに星雲が複雑にスキャンされていることがわかる。また84秒ごとの追尾によって、ほぼ正しくかに星雲が視野の中心に引き戻されていることもうかがえる。

4・6 1977年の結果の中間報告

Aspect solution が求められたならば、各時刻でのかに星雲のモジュレーション・フェーズがわかるので、そのフェーズごとにX線カウント数を集積することにより、1次元像が求められる。1977年のフライトについては、ほぼ25分間ぶんのデータにつきこの作業が終了した。こうして得られた1次元像に最大エントロピー法[29]を適用することにより、ノイズの除去およびすだれの三角山の影響の除去(deconvolution)を試みた。この結果を第11図に示す。中央の鋭いピークは、パルサーの寄与と星雲からの寄与の合成と考えられる。様々な補正のパラメータを詰め切っていない現状なので、第11図はあくまで preliminary なものであり、変更の可能性のあるものである。また、生データを Gauss 分布(コリメータの三角山を考に入れて)でフィットした結果は、すでに第1図b)に示した。

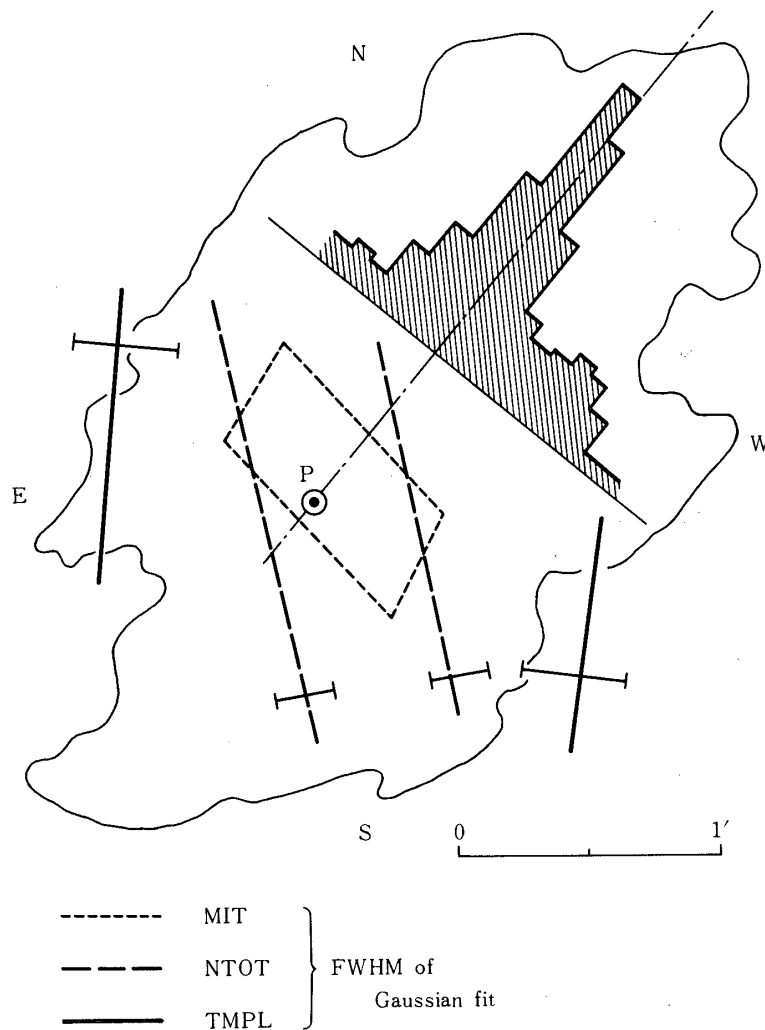
これでわかるように、我々の結果は従来のもものと矛盾していない。第11図では、パルサーの南西側にX線のもり上りが見られるが、これはまだ確定的とは言えない。

第12図は、第11図の1次元像を端から積分し、月のえんぺいによるMITのデータと比べたものである。このふたつの観測は、ポジションアングルにして 14° しか離れていない。我々の得たデータの積分曲線(実線)は、MITの生データ(黒丸)によく合っていることがわかる。

今後、1978年の観測データと解析するとともに、1977年のデータの refinement を続けてゆきたい。

5. ま と め

以上のように、我々は大型精密すだれコリメータと低ノイズ検出器と星カメラと姿勢制御つきゴンドラを組み合わせて気球搭載用X線望遠鏡を開発してきた。この装置は画期的なものであり、2回のフライトでその動作が予想通りであることが確認されたと言える。この装置は、まさにかに星雲にうってつけのものであるが、今後この装置を踏み台とし、スペースシャトル用の望遠鏡を開発することが可能であろう。その場合には、かに星雲よりずっと弱



第11図 1977年の結果の中間的な報告, 集計されたデータに対し最大エントロピー法を施してある.

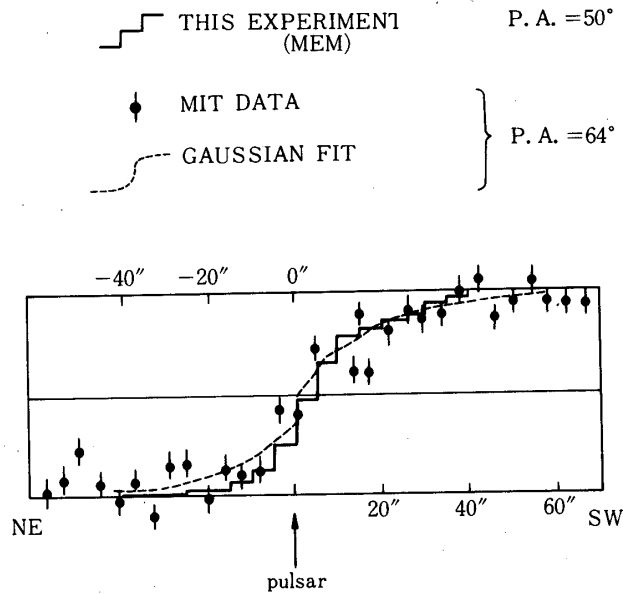
い銀河系外の様々なX線源の像形成が行えるようになるう。

なお, かに星雲のX線2次元像については, 第2回フライトのデータ解析の終了を持って別な機会に報告したい。

1978年5月27日 新設部(科学)

参考文献

- [1] 石田, 大谷, 森本, 浜田, 早川, 小田「かに星雲の話」自然選書, 中央公論社
- [2] R. Giacconi and H. Gursky (ed.), X-ray Astronomy, D. Reidel Publ. Co. (1974).



第12図 第11図の1次元像を積分し、月のえんぺいによるMITのデータと比べたもの。黒丸はMITの生データ、点線はそれに対するGaussian + 点源のベストフィット、実線の階段は第11図を積分したもの。

- [3] A. Hewish, *Ann. Rev. Astr. Astrophys.*, **8**, p. 265 (1970).
- [4] S. Bowyer, E. T. Byram, T. A. Chubb, and H. Friedman, *Science* **146** 912 (1964).
- [5] M. Oda, H. Bradt, G. Garmire, G. Spada, B. V. Sreekantan, H. Gursky, R. Giacconi, P. Gorenstein and J. R. Waters, *Ap. J. (Lett.)* **148** L 5, (1967).
- [6] F. Hawkins, K. Mason, P. Sanford and J. Culhane, *Mon. Not. R. Astr. Soc.*, **169** 41P (1974).
- [7] T. M. Palmieri, F. D. Seward, A. Toor, and T. C. Van Flandern, *Ap. J.* **202** 494 (1975).
- [8] R. S. Wolff, H. L. Kestenbaum, W. Ku, and R. Novick, *Ap. J. (Lett.)* **202**, L 15 (1975).
- [9] H. L. Kestenbaum, W. Ku, R. Novick and R. S. Wolff, *Ap. J. (Lett.)* **202**, L 21 (1975).
- [10] Y. Fukada, I. Kasahara, S. Hayakawa, F. Makino, Y. Tanaka, H. Akiyama, J. Nishimura, M. Matsuoka, M. Oda, M. Nakagawa, H. Sakurai, V. S. Iyenger, R. K. Manchanda, P. K. Kunte and B. V. Sreekantan, *Nature* **255**, 465 (1975).
- [11] G. R. Ricker, A. Scheepmaker, S. G. Ryckman, J. E. Ballantine, J. P. Doty, P. M. Downey and W. H. G. Lewin, *Ap. J. (Lett.)* **197**, L 83 (1975).

- [12] R. Staubert, E. Kendziorra, J. Trümper, C. Reppin, J. A. Hoffman, K. A. Pound and A. B. Giles, *Ap. J. (Lett.)* **201**, L15 (1975).
- [13] 牧島, 土井, 宮本, 村上, 小田, 小川原, 常深, 科学衛星シンポジウム p. 170 (1976).
- [14] 牧島, 土井, 小川原, 宮本, 村上, 田原, 宇宙観測シンポジウム p. 433 (1976).
- [15] R. H. Dicke, *Ap. J. (Lett.)* **153**, L101 (1968).
- [16] 宮本重徳, 宇宙圏・宇宙放射線合同シンポジウム, p. 40, 1978年3月.
- [17] M. Oda, *Applied Optics* **4**, 143 (1965).
- [18] H. Bradt, G. Garmire, M. Oda, G. Spada and B. V. Sreekantan, *Space Sci. Rev.* **8**, 471 (1968).
- [19] M. Oda, N. Muranaka, M. Matsuoka, S. Miyamoto and Y. Ogawara, *Space Sci. Instrum. Instrumentation* **2**, 141 (1976).
- [20] K. Makishima, S. Miyamoto, T. Murakami, J. Nishimura, M. Oda, Y. Ogawara and Y. Tawara, *Proceedings of 20th COSPAR Symposium* (Pergamon Press, 1978).
- [21] 小田 稔, 「X線天文学」自然選書, 中央公論社
- [22] H. Gursky, R. Giacconi, P. Gorenstein, J. R. Waters, M. Oda, H. Bradt, G. Garmire, and B. V. Sreekantan, *Ap. J. (Lett.)* **146**, L310 (1966).
- [23] B. A. Cooke, M. J. Ricketts, T. Maccaro, J. R. Pye, M. Elvis, M. G. Watson, R. E. Griffiths, K. A. Pounds, I. McHardy, D. Maccagni, F. D. Seward, C. G. Page and M. J. L. Turner, *Mon. Not. Roy. Astr. Soc.* **182**, 489 (1978). (Ariel-5 Catalog)
- [24] H. V. Bradt, presented at Austin AAS meeting, 1978.
- [25] J. C. Stevens and G. P. Garmire, *Ap. J. (Lett.)* **180**, L19 (1973).
- [26] K. Makishima, Y. Ogawara, S. Miyamoto, N. Muranaka and M. Oda, *ISAS Research Note* # 29 (1977).
- [27] L. E. Peterson, *Ann. Rev. Astr. Astrophys.*, **13**, p.490 (1975).
- [28] 宮本, 小川原, 牧島, 松岡, 小田, 境, L. Peterson, R. M. Pelling, W. S. Paciesas, 宇宙観測シンポジウム p. 283, 1977.
- [29] B. R. Frieden, *J. Opt. Soc. Am.* **62**, 511 (1972)