

硬 X 線で見たかに星雲の形状

牧島 一夫・宮本 重徳*・小田 稔・小川原嘉明

R. M. Pelling **, L. E. Peterson **

Hard X-ray Structure of the Crab Nebula

By

Kazuo MAKISHIMA, Shigenori MIYAMOTO*, Minoru ODA,
Yoshiaki OGAWARA, R.M. PELLING** and L.E. PETERSON**

Abstract: The two dimensional spatial structure of the Crab Nebula was studied in the hard X-ray range under the collaboration between Japanese and UCSD groups. The experiment used a high-resolution hard X-ray telescope for a balloon use, with an angular resolution of about 0.2 arcminutes. The Crab Nebula was observed successfully in two balloon flights, and a two dimensional hard X-ray map of the Crab Nebula was obtained. The results agree well with a theoretical model which assumes the presence of a toroidally-compressed magnetic field at a distance of about 5×10^{17} cm away from the Crab pulsar.

1. はじめに

「かに星雲」(Crab Nebula)は、おうし座にある超新星の残骸である[1][2][3].よく知られているように、日本や中国の過去の文献から、親の星は西暦1054年に超新星爆発をおこしたことが確認されており、この天体をいっそうドラマチックなものにしている。

実際、かに星雲ほど詳しく調べられてきた天体は少ない。天文学や宇宙物理学において新しい局面が開かれるたび、つねにかに星雲がそこに登場してきた。例えば電波天文学の発展、パルサーの発見、X線天文学の登場などがそれである。それでもなお、かに星雲は「すっかり調べ尽くされた」という状態とはほど遠い。それはとりもなおさず、そこで展開されている物理現象がたいへん多様で、かつ現代の宇宙物理学にとって本質的であることの証拠と言えよう。とくに、かに星雲には、様々な極限状態の物理が集約されている。たとえばかに星雲の中心には、 10^{15} g/cm³ という超高密度の中性子星が、 10^{12} Gauss に達する超高磁場を伴って1秒に30回転している。これが、全天でもっとも周期の短い「かにパルサー」である。

* 大阪大学理学部

** カリフォルニア大 サンディエゴ校

このような存在は当然、周辺のプラズマに激しい刺激を与え、 $10^{13}\sim 10^{14}$ eV という、地上の最大級の加速器をもってしても実現できない超高エネルギーの電子をつくり出す。かに星雲の放出する電波からガンマ線に至る広帯域の電磁波は、おもにこれら高エネルギー電子のシンクロトロン輻射と考えられている。

我々はかに星雲の激しい活動の姿を解明する努力の一環として、硬X線領域で、かに星雲の2次元的な形状の観測を行ってきた。これは日米協同の気球実験として行われてきたもので、2回の気球観測により、硬X線によるかに星雲の姿が明らかになってきた。今回はこの結果について報告する。

2. 観測の意義と実験計画

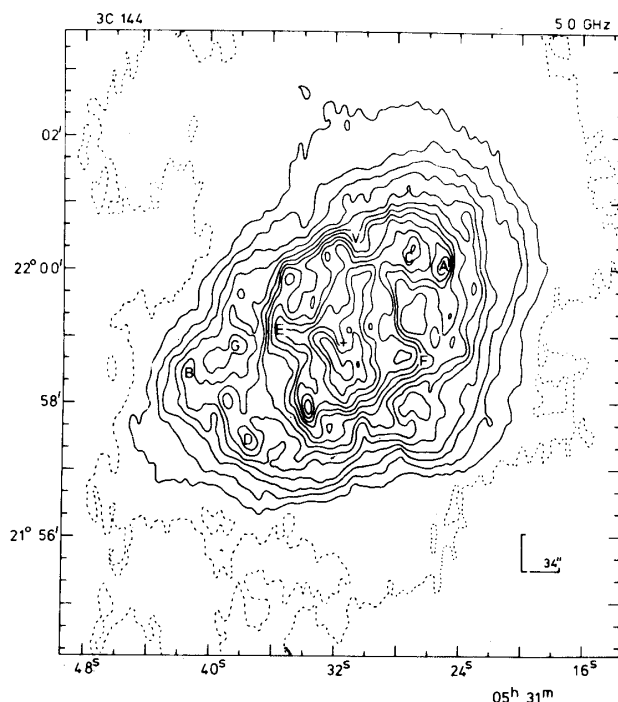
かに星雲からの電磁波はおもにシンクロトロン輻射であると述べたが、そのプロセスの特徴のひとつとして、放射される光子のエネルギーが親の電子のエネルギーの二乗に比例することが挙げられる。即ち、短波長側で観測するほど、高エネルギー現象の核心に迫ることができることになる。

高エネルギー現象のうち、特に興味深い問題として、パルサーによる電子の加速、および加速された電子の輸送の問題が挙げられる。かに星雲の激しい活動のエネルギー源が主としてパルサーの回転エネルギーにあることはほぼ疑いないが、それでは具体的にどのようにして電子の加速が行われるのだろうか。また、X線を出すような高エネルギー ($\sim 10^{14}$ eV) の電子は、数カ月たらずでシンクロトロン過程によりエネルギーを失ってしまうはずなのに、これまでの観測によれば、X線放射領域はざっと1光年ほど広がっている。いったい、高エネルギー電子はどのように輸送されるのだろうか？この疑問に答えるためには、X線、とくに硬X線でのかに星雲の形状を調べることが最も有力な手段になると考えられる。

可視光や電波で見たかに星雲の形状はこれまでに詳しく調べられてきた(例えば[4]、[5])。図1はその一例である。しかし、かに星雲は全天指折りの強いX線源であるにもかかわらず、そのサイズが小さい(1~2分角)ため、X線2次元像の観測はたいへん困難であった。これまでに、主として月によるえんぺいを利用した観測によって、その広がりを目安が得られているにすぎず([6]~[14])、上記の疑問に答えられるに至っていなかった。

我々は、高エネルギー現象の鍵となる硬X線領域 (> 20 keV) でかに星雲の2次元像を精密に求めることを計画し、気球による観測を行ってきた。この実験は、月のえんぺいに頼らず、大型精密すだれコリメータを気球に搭載し、高分解能のデータを得ようとするものである。装置が大型であること、長時間 (~数時間) の観測が必要なことなどから、飛翔体としては気球が採用された。この計画を通じて開発された大型精密硬X線望遠鏡は、将来スペースシャトルを利用する観測装置の原型になるものと考えられる。

この計画とあい前後して米国の大型X線天文衛星 HEAO-B (Einstein Observatory) が打ち上げられ[15]、現在画期的データを出しつつある。かに星雲も高い分解能 (~ 4 秒角) で観測され、プレリミナリな2次元像がえられている[16]が、この衛星は全反射集光鏡を使っているため、測定できるX線エネルギーが ≤ 3 keVに限られている。従って、Einsteinの結果と我々の観測とは、互いに補いあう関係にあると考えられ、その相互比較に興味も



第1図 電波(5GHz)で見たかに星雲(文献〔5〕より). 全体として約5分角に広がっており, これは光で見るとやや大きい.

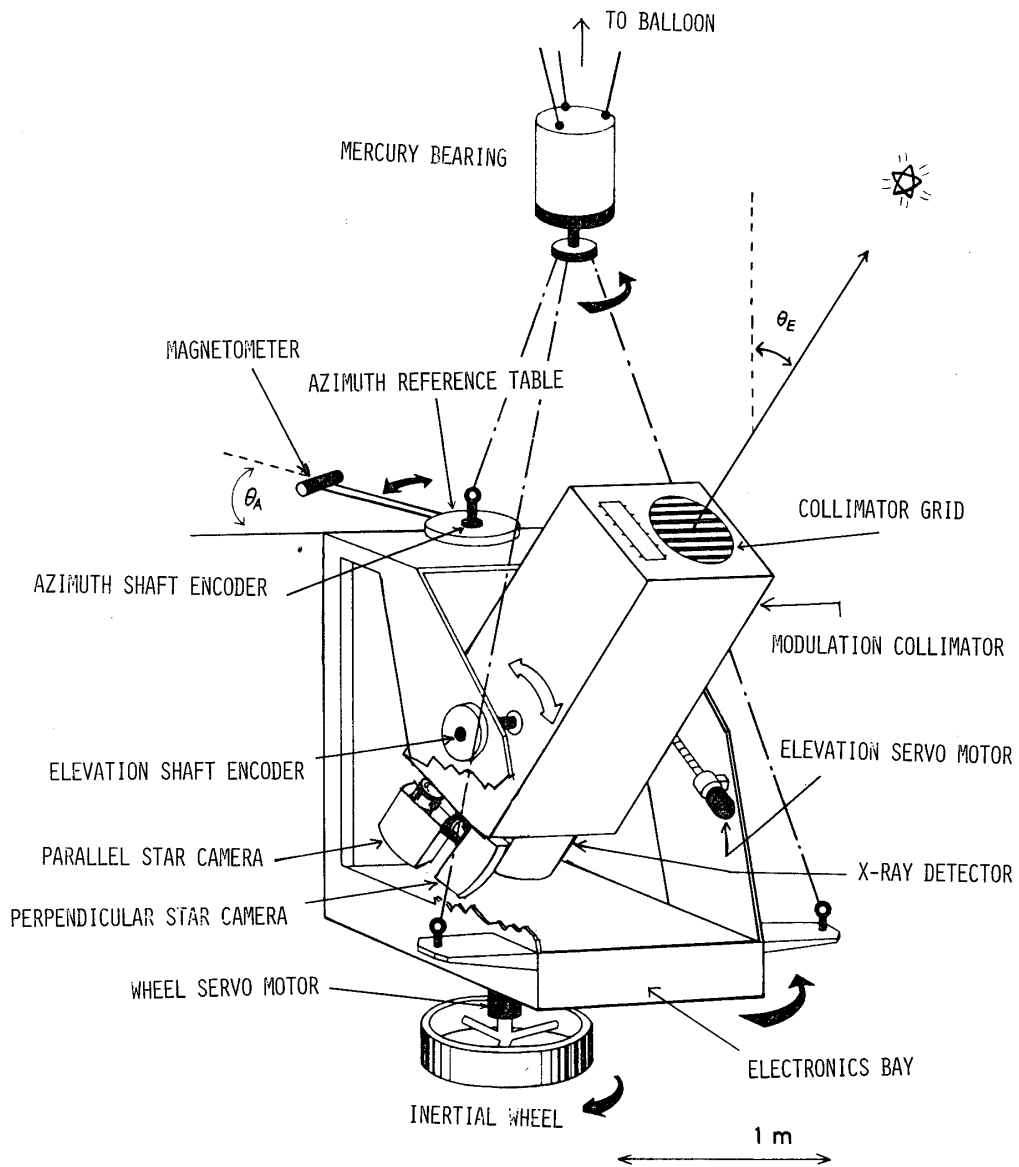
たれている.

3. 観測装置と観測の方法

観測装置についてはすでに詳しい報告〔17〕〔18〕〔19〕〔20〕があるので, ここでは概要を述べるにとどめる.

図2は, 気球搭載装置を模式的に示したものである. 装置は全体としてX線望遠鏡部分と, これを載せる Gondra 部分に大別される. 望遠鏡部分は, (i) 4層の精密すだれコリメータ(くり返しピッチ 2.75分角, ビームの FWHM は 21秒角), (ii) すだれコリメータの姿勢を 0.1分角の精度で刻々に決定するための2台の 16mm 星カメラ, (iii) フォスウィッチ型低雑音X線検出器, から成る. 望遠鏡は水平な軸を介して Gondra にとりつけられ, サーボモータによってその仰角が精密に制御される. また, Gondra 底部には慣性ホイールがあり, その反動を利用して Gondra 全体の方位角を変えることができる. その際, 気球に対して Gondra が自由に回転できるようにするため, マサツのきわめて小さい水銀ベアリングが使われている. 方位角制御の規準には, 地磁気が使われる. このようにして, X線望遠鏡は $\sim 0.5^\circ$ の精度でかに星雲の追尾をつづけることができる. 装置全体は, 重量約 900kg に達する大きなものである.

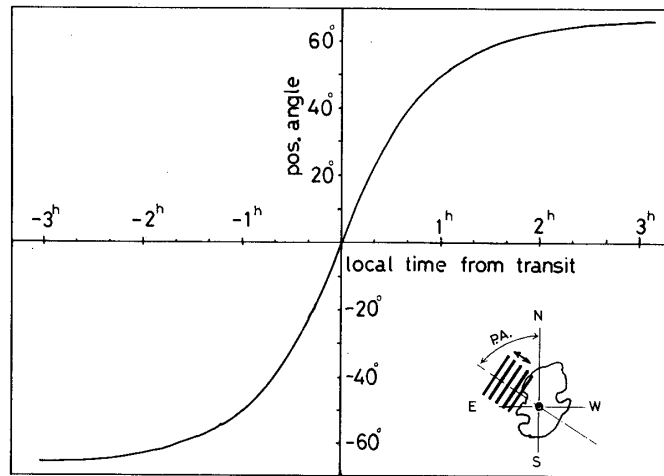
この装置は, 日本と米国 UCSD (カリフォルニア大サンディエゴ校)との協力で開発された. すだれコリメータおよび星カメラの技術は日本側が, また低雑音X線検出器と Gondra の技術は米国側が提供した. いわば双方のグループがそのお家芸を出しあって, この困難な観測



第2図 気球搭載用の硬X線望遠鏡の模式図

に挑んだわけである。

気球飛行中、X線望遠鏡はつねにかに星雲の方向に向くよう制御され、X線はすだれコリメータを通して検出器に達する。すだれコリメータは水平方向にのびた1次元の透過パターンをもっているの、ゴンドラの振子運動や天球上でかに星空が動いてゆくことによって、1次元的にスキャンを行うことになる。このスキャンの方向は気球から見るとつねに鉛直方向であるが、かに星雲に対する方向（いわゆる position angle）は、地球の自転によって刻々に変わってゆく。図3は、この様子をプロットしたものである。こうしていくつかの方向についてX線の1次元像が得られれば、それを数学的に合成して2次元像をつくることができ



第3図 すだれコリメータのスキンの position angle は、時間とともに変化する。横軸は、かに星雲の南中を原点にして計った時間である。南中付近では position angle の変化が速いので、良質の1次元像がえられにくい。

る [21] [22]。図3によれば、約4～5時間観測によって、position angle についてはほぼ130°をカバーすることができる（厳密な2次元像再生は、180°のカバレッジがあればよい）ことがわかる。

4. 実験の経過

気球の放球基地としては、米国テキサス州パレストイン市にある NCAR 気球基地が用いられ、何回かの試験飛翔ののち、1977年2月28日夜、第1回めの観測が行われた [18]。このときはサイズ58万 m^3 の気球が使用され、約2.8 mb のレベルフライトに達したが、上空の風が強く、約3時間で観測は終了となった。後半のデータは風下の受信局で収録された。この飛翔では、季節的にやや遅すぎたこと、風下受信局のアンテナにトラブルが生じたことなどから、正味に使えるデータは約40分ぶん程度にとどまったが、装置全体の正常な動作を確認することができた。

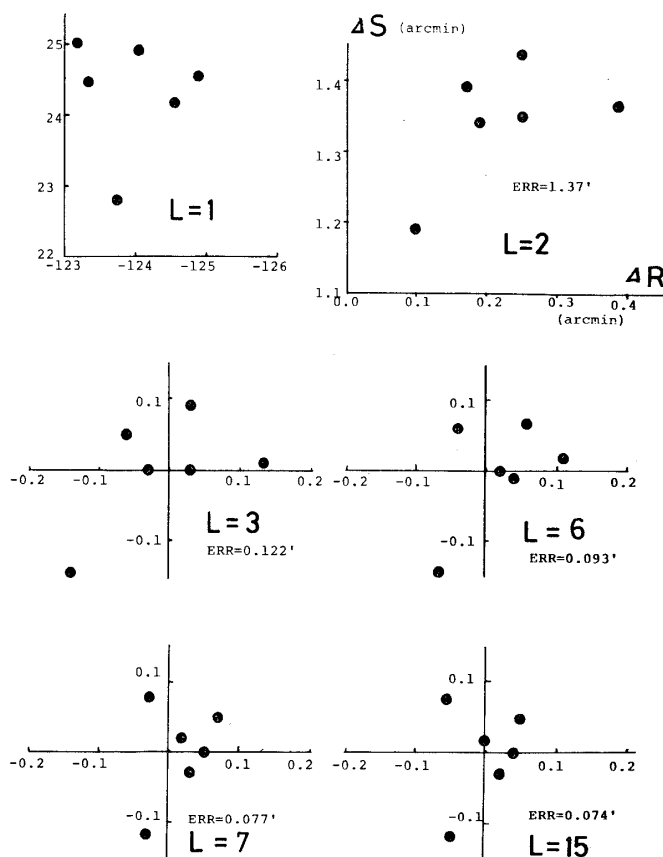
ついで翌1978年1月26日、第2回目の観測が行われた。第1回目とほぼ同様な気球を使い、3.3 mb のレベルで約4時間半の観測を行い、十分な量のデータを取得した。飛翔の詳細については、[17] [19] [20] を参照されたい。

2回の飛翔をつうじて装置は順調に作動した。また幸いに2回とも装置はパラシュートで殆ど損傷なく着地し、姿勢決定に不可欠な星カメラの16 mmフィルムも無事回収された。

5. データ解析

データ解析は、姿勢データ解析とX線データ処理に大別される。まず前者は、日本において行われた。これは回収された16 mmフィルムの1コマずつについて、映っている星の像を2～3ミクロンの精度で読み取るという面倒な作業から始まる。フィルムは1.3秒ごとの

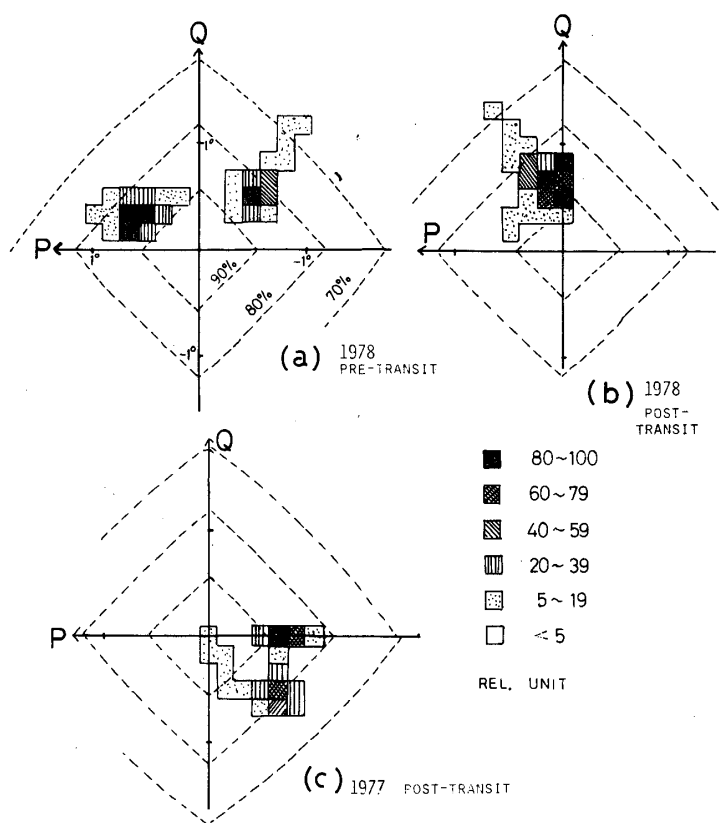
コマ送りなので、第1回飛翔では約3000コマ、第2回飛翔では10,000コマ以上をスキャンしなければならなかった。こうして得られた星のデータをカタログ上の対応する星の位置とフィットすることによって、1.3秒ごとのすだれコリメータの天球上での姿勢が決まるわけである[20]。図4は、すだれコリメータの姿勢を逐次近似で補正することにより、観測されたフィルム上の星の位置とカタログから予想される星の位置とをフィットさせてゆく様子を示している。最終的に約0.1分角の精度がえられていることがわかる。16mmカメラを用いる方法はデータ解析に手間がかかる欠点があるが、比較的手軽に0.1分角という高い精度をえる方法として、ほとんど唯一のものである。こうして得られた姿勢データは滑らかに補間され、最終的なアスペクト解となる。なお、第2回飛翔ではゴンドラに速い(周期 ≈ 2 秒)振動が現れた時期があり、補間を行う際に地磁気センサの出力が有効に利用された[20]。



第4図 望遠鏡の姿勢は、星カメラのフィルム上の星の位置から決定される。この図は、姿勢を逐次近似で求める過程を示しており、 L はiterationの回数を示す。個々の黒丸は星をあらわし、座標はフィルム面上での星の予想位置と実際に測定された位置の差(単位は分角)である。最終的に ~ 0.1 分角の精度がえられることがわかる。この図は、フィルムのある特定の1コマに対応するものである。

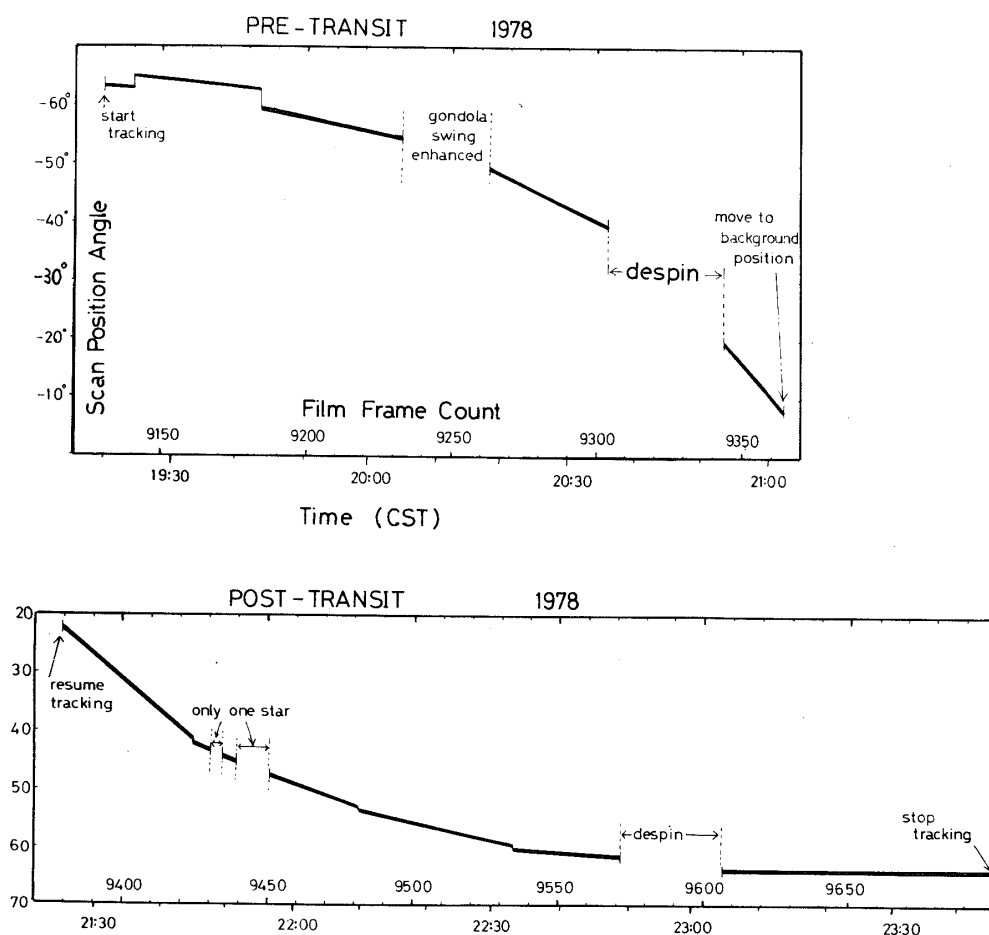
図5は、こうして決められた姿勢にもとづいて、かに星雲がX線望遠鏡の視野内にどのように捉えられていたかを示すものである。この図から、2回の飛翔を通じ、かに星雲の追尾はほぼ 1° の精度で順調に行われていたことがわかる。この図に見られる多少のオフセットは、気球の位置の誤差、地磁気パラメータの誤差など、主として外的な条件に起因すると考えられる。また図6は、第2回飛翔において、実際にスキャンの position angle がどのように変わって行ったか、またどの付近のデータがとれているかを示したものである。

他方、X線データの処理はUCSDが中心になって行われた。飛翔中に検出された個々のイベントには時刻(精度 $20\mu\text{s}\sim 1\text{ms}$)、パルスハイト(256チャンネル)およびライズタイム



第5図 気球飛翔中に、X線望遠鏡の視野内にかに星雲がどのように捕捉されていたかを示す図。かに星雲のそれぞれの場所での滞在時間(相対値)が、色の濃さで区別されている。点線は、X線検出器につけられた粗いコリメータ($6^\circ \times 6^\circ$ FWHM)の等透過率線である。かに星雲はほぼ 1° の精度で追尾されていたことがわかる。この図は、アスペクト解にもとづいて計算された。

(64チャンネル)の情報がつけられている。これらの情報にもとずいて、真のX線イベントと荷電粒子やガンマ線によると思われる偽のイベントをあとから区別し、データのS/N比を上げることが中心課題である。この処理の結果、検出器の有効面積 $\sim 450\text{ cm}^2$ に対し、25 \sim 70 keVでのバックグラウンドは約10 c/sec と良好な結果がえられた。これに対し、高度3 mbでは、かに星雲から検出器に入射するX線フラックスは、すだれコリメータの位相で平均すると約1.2 c/sとなる。実際にはこれに検出器効率、粗いコリメータの効果、フォスウィッチ効率、検出器のデッドタイム、すだれコリメータの半透明さなどの因子がかかるので、1次元像をつくるのに利用できるシグナルは25 \sim 70 keVで0.3 \sim 0.4 c/s と見積られる。詳細は



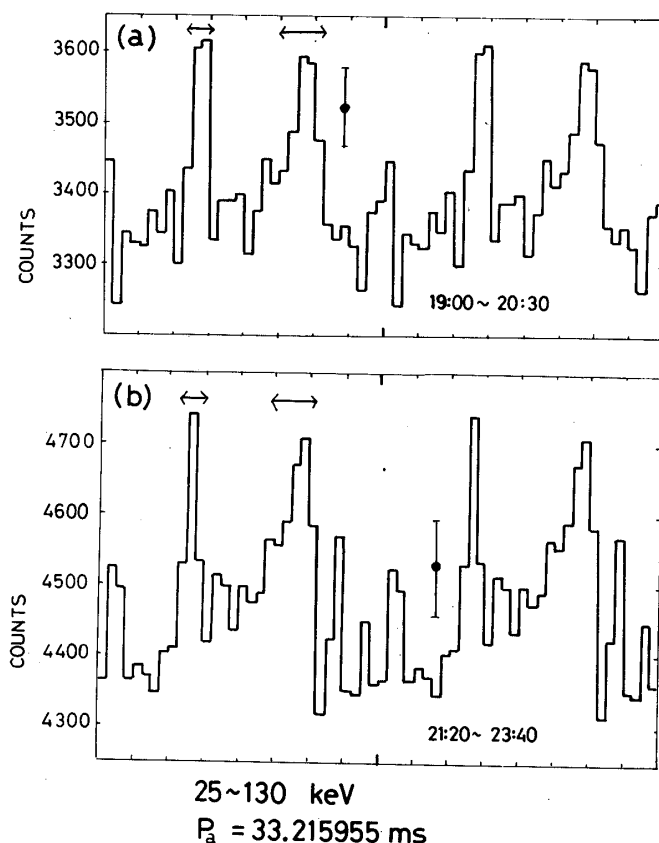
第6図 第2回飛翔において実際に実現されたスキャンの position angle を、時間（アメリカ中部標準時）に対してプロットしたもの。同時に、姿勢データの質についての情報も示されている。太い黒線のとぎれているところは、姿勢データが欠けていることを示す。図3と対比されたい。

文献[19]を参照されたい。

X線データ単独で行える重要なアナリシスとして、かにパルサーの検出が挙げられよう。図7は、第2回飛翔のデータを folding することで得られたパルサーのパルス波形であり、ふた山のパルスがきれいに現れている。なお、1978年1月27日 UT 1 H00M、位置西径 93° 、北緯 32° での見かけのパルサー周期は 33.215955 msec であった。これに地球の自転、公転によるドップラー効果および気球の受信局に対する運動の効果の補正を行うと、太陽系で見たパルサー周期として、1月27日 UT 1 H00M において

$$33.21373 \pm 0.00001 \text{ msec}$$

が得られた。



第7図 第2回飛翔でえられたかにパルサーのパルス波形。(a)は南中前のデータで、このときはX線データの時間分解能は 1 ms 、(b)は南中後のデータで時間分解能は $20 \mu\text{s}$ であった。いずれも2サイクルぶん示してある。Foldingに用いた周期は19:00において 33.215955 ms (カイ2乗分布の極大)であり、 dp/dt の頂まで考慮している。矢印のついたビン(32ビン中8ビン)は、パルサーの像を求めるのに使われた。

6. 観測結果 [23]

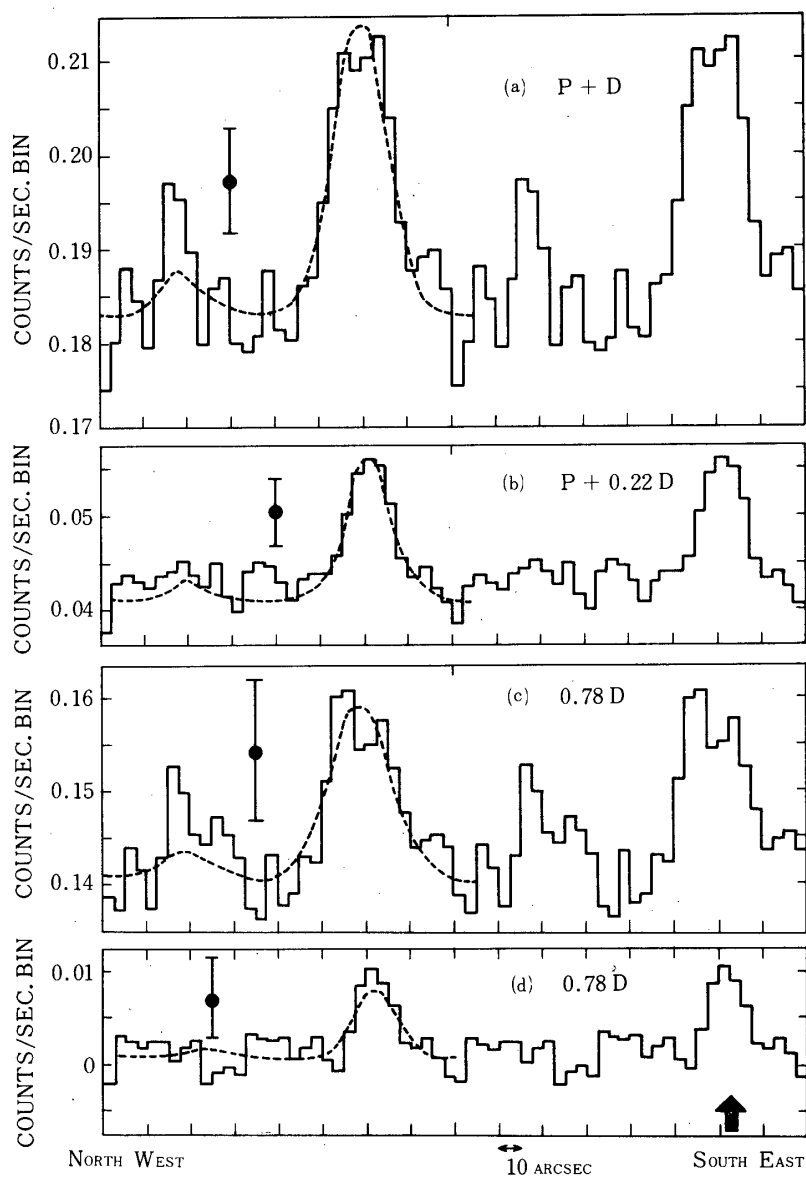
X線と姿勢とのデータ処理が終了すると、いよいよ両者を結合してX線の1次元像を求める段階になる。これを行うには、アスペクト解にもとづいて時々刻々のかに星雲のモジュレーションフェーズを求め、フェーズごとにその時刻でのX線カウント数を集積してゆけばよい。こうして得られた1次元像の例が図8に示されている。ここで図8(a)はある時間にえられたすべてのX線を用いて作成したもの、また(b)は、かにパルサーのパルスしている時刻(図7のふたつの横矢印)に到着したX線のみを用いて作ったものである。明らかに、(b)は(a)よりも広がり小さく、点源(パルサー)の寄与が大なることを示している。

図8(a)、(b)はそれぞれ異なる割合でパルス成分と非パルス成分を含んでいるので、それらを分離してみると、図8の(c)と(d)になる。これでわかるように、パルス成分の像(図8(d))は点源に対する像(半値幅4 binの三角形)と考えて矛盾がない。パルサーに伴う30 Hzの電磁波パルスの波長は約 10^8 cm、即ち角度にすれば 10^{-10} 秒角以下である。このスケールよりずっと長い範囲にわたって30 Hzの振動がちょうど地球から見てin phaseになっているという状況はきわめて不自然であるから、パルス成分が点状であることはいってみれば当然である。このことを逆に使って、アスペクト解がまちがっていないこと、飛翔中にコリメータのアラインメントが崩れていなかったこと、などが確認できる。

いっぽう、パルスしていないX線の像は、図8(c)に見るように有意に広がっている。試みにもとのX線強度分布をGaussianと仮定し、これをコリメータの三角山でたたみこんで観測データと比較してみると、最適のFWHMは 25 ± 5 秒角程度になる(図中の点線)。これはまさにかに星雲X線源が広がっていることの証しに他ならないわけだが、この非パルス成分は、必ずしもすべてパルサー以外から来ているとは限らない。パルサーのごく近傍(たとえば $\sim 10^8$ cm)において、パルスしないX線が出ていてもふしぎではないからである。しかも後に見るように、パルサー近傍での非パルスX線の強度は、粒子の加速・輸送のモデルにとってたいへん重要な鍵となる。

そこでより詳しい情報を引き出すために、MEM(最大エントロピー法[24])と呼ばれる画像処理を試みた。これは、統計の許す範囲ですだれコリメータの三角山の効果を除去しようとする(deconvolution)ものであり、処理された画像は雑音に対し十分安定である。図8(a)~(d)それぞれに対する結果を図9(a)~(d)に示す。まず、図9(d)のパルサー像はコリメータの三角山より鋭くなっており、確かにdeconvolutionが行われていることがわかる。次に、非パルス成分の像(図9(c))を見ると、これまで知られていたように、そのピークはパルサーに対し北西方向に5~10秒角ずれている。さらに分布が左右非対称であること、形が滑らかなこと、パルサーの位置に何も目立ったピークが無いこと、などがわかる。これらの情報は、この実験で初めて明らかになったことからである。

第2回飛翔のデータから、このようなX線1次元像が少なくとも3方向について得られた。このうち南中に近い1方向についてはやや望遠鏡の姿勢の安定度が悪く、アスペクト解に改良の余地があるが、残りの2方向についてはほぼ最終的な結果がえられた。図10は、この2方向について最大エントロピー法で処理された非パルス成分の像を、光で見える星雲のスケッチに書き込んだものである。さらにこの両者を数学的に組みあわせ[21][22], 等高線



第8図 X線1次元像の例. 第2回気球観測で得られたもので, スキャンの position angle は $-65^{\circ} \sim -55^{\circ}$, データ集積時間は45分, X線エネルギーは28~65 keV である. (a)はX線データ全体を使い, (b)はパルサー波形の山の時刻 (図7の矢印)に到達したX線だけを使用した. (b)にも非パルスX線成分が混じっていることに注意. (a)と(b)を組み合わせると, 非パルス成分の像(c)とパルス成分の像(d)がえられる. いずれもすだれコリメータのピッチ(2.75分角)の2サイクルぶん示してある. コリメータの透過パターンは半値幅4ビンの三角形. 図中の点線は Gaussian fit を示す.

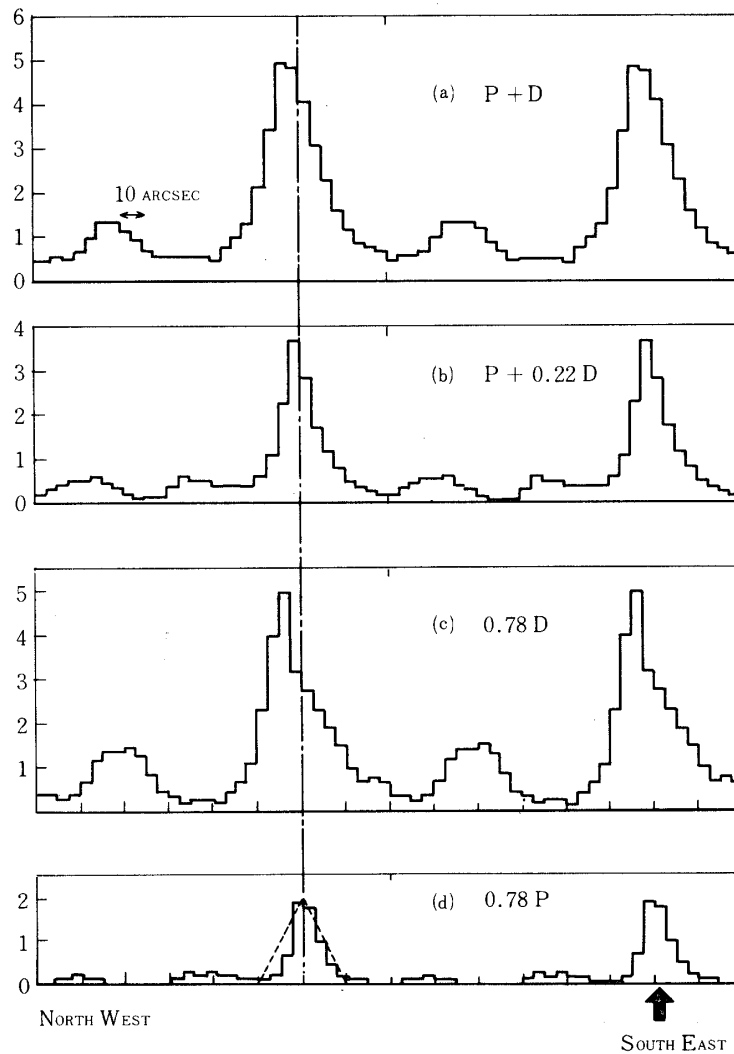
で示されているような2次元像がえられた。

7. 結果の解釈と考察

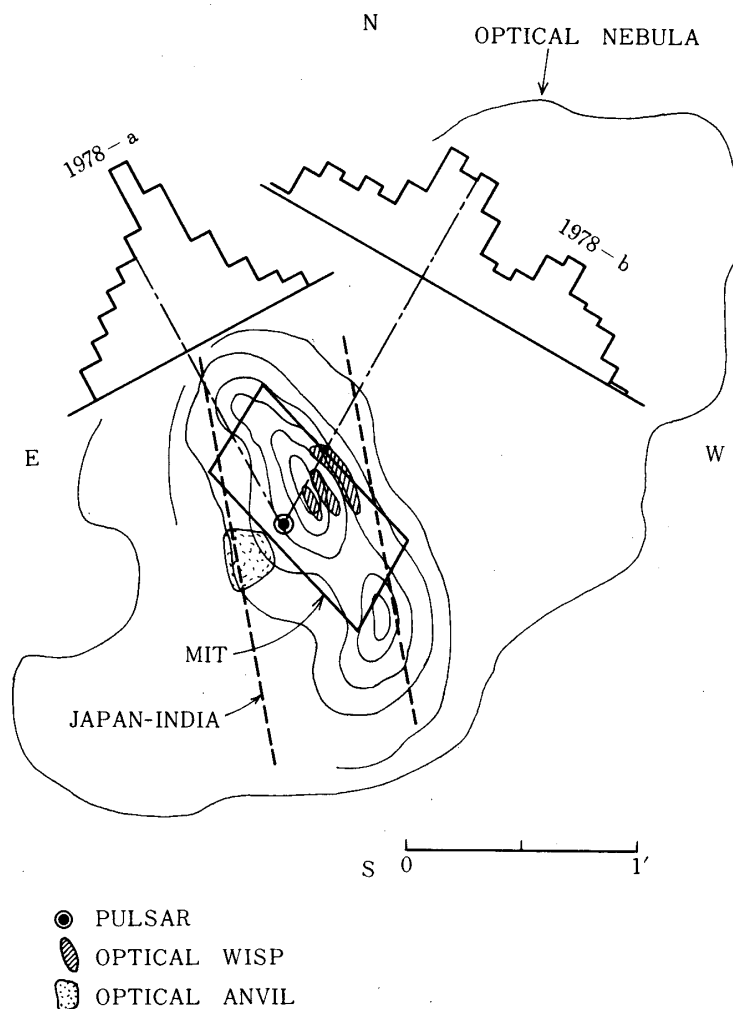
図10は、硬X線領域において初めて得られたかに星雲の姿である。これからいくつかのことが読みとれる。

(1) 硬X線の強度分布は、北東-南西方向に長く伸びており、この方向は光で見た星雲の長軸とほぼ直交している。この傾向は、月のえんぺいによる観測結果とよく一致している。他方、3 keV 以下での Einstein 衛星の結果は全体としてより円形に近い。

(2) 硬X線の強度の中心は、パルサーに対し5~10秒角北西にずれている。このずれは、



第9図 図8の像を最大エントロピー法で画像処理した結果。図(d)の点線は、すだれコリメータの透過パターンである。



第10図 第2回飛翔で得られた2方向の1次元像と、それらから合成された2次元像。1次元像は非パルス成分のもので、最大エントロピー法で画像処理されている。2次元等高線は、ART合成法で求めた。図中にはまたウィスパ、アンヴィル等の光の特徴や、月のえんぺいによる測定結果（Gaussian fitのFWHM）も記入されている。

軟X線領域に比べてやや小さい。しかしパルサーの位置には、特にX線強度のもり上りは見られない。

(3) 硬X線の強い部分は、ウィスパと呼ばれる光の構造とよく一致しており、この一致はEinstein衛星のエネルギー領域より良い。

(4) 分布の南西端にもり上りが見られるが、全体として比較的なめらかである。

次に、これらの特徴を理論的解釈に結びつけてみよう。まず、非パルス硬X線の強度がパ

ルサー付近で特に増加していないことから、パルサー周辺でシンクロトロン放射が弱いことが結論できる。じっさい、電子がパルサーのすぐ近傍で加速され、ほぼ一様な強度の乱れた磁場中をシンクロトロン過程でエネルギーを失いながら拡散してゆくというモデル[5]に立ってしまうと、必ずパルサーの位置でX線強度がカスプ状の強い集中を示すはずであり、また高エネルギーになるに従って、実測されているよりもっと急速に星雲のサイズが小さくなってゆかねばならないからである。従って我々の結果によれば、粒子加速が十分広がった領域でおこっているか、あるいは加速はパルサーの近傍で行われるが、そこからある広がった範囲の中では磁場が弱かったり、整列したりしているため電子の電磁軸射が低くおさえられているか、どちらか（または両方）であろう。

パルサーによる加速のモデルは多彩であるが、大別するとふたつの考え方がある。ひとつは、パルサーの自転軸と磁軸が傾いているとし、その結果放出される30 Hzの大振幅磁気双極子輻射によって比較的パルサーの近傍で加速されるとする説[25]、他方はパルサーの磁気圏から外へ向かって単極誘導で静電的に、しかも広がった領域で加速しようとするもの[26]である。実際のかにパルサーではおそらく両方の効果が効いているのであろうが、先の議論を考えると、パルサーから外側へ向かっての磁場構造を無視しては進めないようである。

硬X線像が球対称でなく細長い、というのも重要な鍵である。AschenbachとBrinkmannはここに着目し、パルサーから外への磁場構造を考慮して次のようなモデルをたてた[27]。即ち、パルサーの強い磁場は磁気圏を形成するがそれはライトシリンダー(半径 1.6×10^8 cm)で破れ、磁場はパルサーの自転赤道方向に引き出されてゆく。この磁場に沿って粒子は加速されつつ外向きに流れ出し、乱れた星雲磁場を押し分け、空洞をつくる。この内部では、シンクロトロン放射は弱い。しかし、パルサーから流れ出す粒子や磁場のもつ動圧は距離 $\sim 5 \times 10^{17}$ cm付近で星雲内の磁場およびプラズマ圧とつり合い、それまで主に動径方向に引き出されていた磁場は急速にトロイダル状に巻き込み、強い磁場の壁を形成する。粒子はこの壁にぶつかって強いシンクロトロン輻射を出す。硬X線での姿は、まさにこのトロイダル状の磁場を斜めから見ているものだ、というものである。このモデルに従えば、十分高いエネルギーの電磁波で見ると、かに星雲はトーラス状に見えることになる。

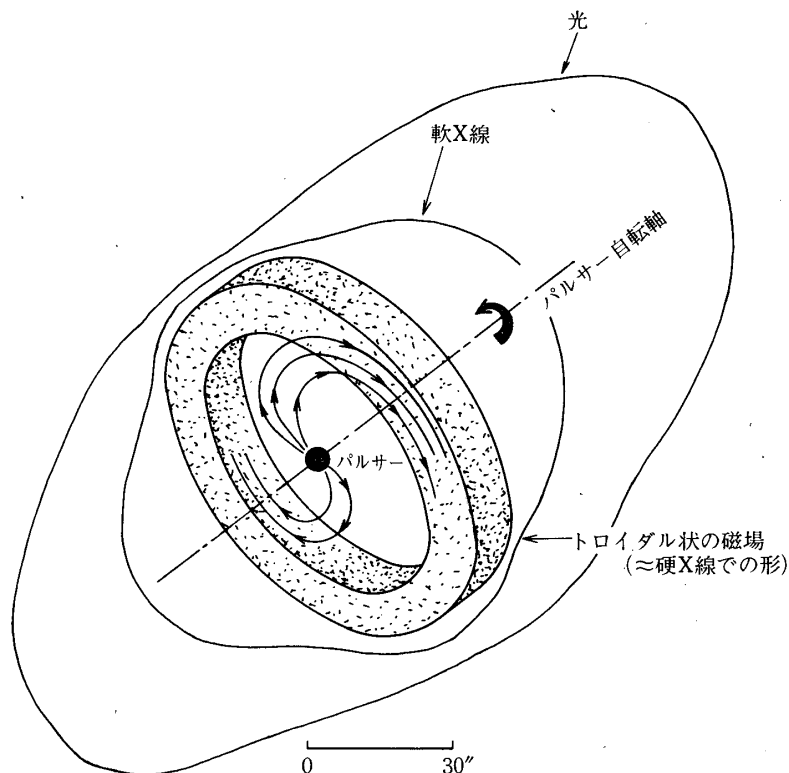
我々の結果は、多くの点でこのモデルとよく合致する。まず、トーラスの直径は角度にして40~60秒と計算されるが、これは図10の長軸方向サイズに良く合う。また、硬X線の形がウィスプ(そこで光は強く偏光しており、強いそろった磁場の存在を示す)とよく一致しており、これがトーラスの地球側の縁と考えればよい。パルサーの自転の方向がX線像の対称軸方向を決めているとみなすわけだが、これもパルサーが星雲のエネルギー源であることを考えれば不自然ではないであろう。また、軟X線領域になると形が丸くなり、光になると長軸方向が逆転することも自然に説明される。即ち、パルサーの赤道面に沿って走る粒子は強く加速されるがトーラスにぶつかって硬X線を出し、急速にエネルギーを失うため、それより先でのシンクロトロン輻射はとぎれてしまう。他方、赤道面から離れた方向に進む電子は比較的弱い加速を受けるにとどまるが、トーラス状の磁気壁にぶつからないため、低エネルギー側のシンクロトロン輻射を出しながら比較的大きく広がってゆけるのだろう。この描

像を図11に示した。

8. 結 論

このように、硬X線での形状を知ることにかに星雲の高エネルギー過程について新しい知見が得られつつある。そこに現れてきたものは、小さなパルサーが、半径にして $10^{11} \sim 10^{12}$ 倍にも及ぶ広大な空間をまさに文字通り支配している姿と言えよう。かに星雲は、他の超新星残骸（多くシェル状の形をしている）に比べてさまざまな面で特異であるが、この特異さは大半がパルサーに起因するようである。実際、超新星の爆発に際して放出された 10^{50} ergにも及ぶエネルギーの約半分は膨張する物質の運動エネルギーになり、残りはほとんどパルサーの自転のエネルギーになっているのである。

硬X線領域での観測はフォトン数の不足から、明確な物理に到達しえない場合も多い。しかしこの実験が示すように、やはりそこには天体における高エネルギー現象への窓口が開かれているようである。これは将来、特異銀河のような激しく活動する天体の観測においても



第11図 トロイダルモデル〔27〕にもとずいて解釈したこの実験の結果。矢印つきの曲線は、代表的な磁力線を示す。硬X線は、トロイダル状に圧縮された磁場のあたりで集中的に発生する。

考慮されるべき問題である。しかし、それらの天体はかに星雲に比してケタ違いに暗い。そこに到達するには、技術の質的な進歩が必要であろう。

1980年5月10日

参 考 文 献

- [1] K.M.V. Apparao; *Astrophysics and Space Science* **25**, 3 (1973) (a review paper).
- [2] 石田ほか・「かに星雲の話」自然選書, 中央公論社 (1973).
- [3] S. Mitton; "The Crab Nebula", Faber and Faber, London, 1979.
- [4] J.D. Scargle; *Astrophysical Journal* **156**, 401 (1969).
- [5] A.S. Wilson; *Monthly Notices of Royal Astronomical Society* **157**, 229 (1972); *ibid.* **160**, 335 (1972); *ibid.* **160**, 337 (1972).
- [6] S. Bowyer, E.T. Byram, T.A. Chubb, and H. Friedman; *Science* **146**, 912 (1964).
- [7] 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**, L5 (1967).
- [8] F. Hawkins, K. Mason; P. Sanford and J. Culhane, *Mon. Not. R. Astr. Soc.*, **169**, 41P (1974).
- [9] T.M. Palmieri, F.D. Seward, A. Toor, and T.C. Van Flandern; *Ap. J.* **202**, 494 (1975).
- [10] R.S. Wolff, H.L. Kestenbaum, W. Ku, and R. Novick; *Ap. J. (Lett.)* **202**, L15 (1975).
- [11] H.L. Kestenbaum, W. Ku, R. Novick and R.S. Wolff; *Ap. J. (Lett.)* **202**, L21 (1975).
- [12] 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).
- [13] G.R. Ricker, A. Scheepmaker, S.G. Ryckman, J.E. Ballintine, J.P. Doty, P.M. Downy and W.H.G. Lewin; *Ap. J. (Lett.)* **197**, L83 (1975).
- [14] R. Staubert, E. Kendziorra, J. Trümper, C. Reppin, J.A. Hoffman, K.A. Pound and A.B. Giles; *Ap. J. (Lett.)* **201**, L15 (1975).
- [15] たとえば *Ap. J. Vol 234, No. 1, Part 2 (Letter)* (1979) は Einstein Observatory の特集号である。
- [16] F. Seward; in "Symposium on the Results and Future Prospects of X-ray Astronomy", ISAS, August 1979, p. 260.
- [17] 小田, 宮本, 小川原, 牧島, L. E. Peterson, R. M. Pelling, W. S. Paciosos: 宇宙研究報告 第14巻 第3号 (B) p. 1059 (1978).
- [18] 宮本, 小川原, 牧島, 松岡, 小田, 境, 宇宙観測シンポジウム, 東大宇宙航空研, 1977年6月, P. 283.
- [19] 小田, 宮本, 小川原, 牧島, 宇宙観測シンポジウム, 東大宇宙航空研, 1978年7月, P. 416.
- [20] 小田, 宮本, 小川原, 牧島, 大気球シンポジウム, 東大宇宙航空研, 1978年12月, P. 206.

- [21] M. Oda, N. Muranaka, M. Matsuoka, S. Miyamoto and Y. Ogawara; *Space Science Instrumentation* **2**, 141 (1976).
- [22] K. Makishima, S. Miyamoto, T. Murakami, J. Nishimura, M. Oda, Y. Ogawara and Y. Tawara; *Proceedings of 20th COSPAR Symposium* (Pergamon Press, 1978).
- [23] K. Makishima, S. Miyamoto, M. Oda, Y. Ogawara, R.M. Pelling, and L.E. Peterson; *Symposium on the 16th International Cosmic Ray Conference, OG-1, Vol. 1*, p. 37 (August 1979, Kyoto).
- [24] S.F. Gull and G.J. Daniell; *Nature* **272**, 686 (1978).
- [25] J.P. Ostriker and J.E. Gunn; *Ap.J.* **157**, 1395 (1969).
- [26] P. Goldreich and W.H. Julian; *Ap.J.* **157**, 869 (1969).
- [27] B. Aschenbach and W. Brinkmann; *Astronomy and Astrophysics* **41**, 147 (1975).