

小田先生 —Sco X-1— スペース VLBI

井 上 一*

小田先生の宇宙科学研究所御退官に際し先生の御業績の紹介をするように天文月報編集部より依頼を頂いた。私のような若輩者が先生の御業績について書くなどとは不遜なことではあるが、先生にここまで育てて頂いた日本のX線天文学グループの一員として、先生の先駆的な御業績がその後どのように花開いていかれたかを紹介させて頂くのも一つの御恩返しと考え、筆をとらせて頂くことにした。

1. 「すだれ」コリメータと Sco X-1

先生の御業績の中でも特に有名なものは、何と言っても「すだれ」コリメータの発明だろう。1962年、ジャコニ・ロッシンらによるロケット観測によって、銀河の中心近くに強いX線源のあることが発見された。このX線源がひろがりを持ったものであるか、星のようなものであるかを見きわめ、かつ、その天球上の位置をはっきりさせるために、小田先生によって発明されたものが「すだれ」コリメータである。この「すだれ」コリメータはすぐに何回ものロケット実験に用いられ、このX線源が星のように小さいものであることがはっきりとし、同時に天球上の位置が1分角の精度で決められた。これが Sco X-1 である。すぐに、この「すだれ」コリメータの決めた Sco X-1 の誤差領域の中に、岡山天体物理観測所によって青い星が見出され、その特異な性質が詳しく調べられるようになった(図1)。この青い天体の位置には変動する電波源があることもわかり、さらには、この変動する電波源を中心とする一直線上の両側ほぼ等距離(ほぼ1000天文単位ぐらいの距離)に2つの電波源があるというふしぎな事実も明らかになった(図2)。そのような構造は、電波銀河によく見られる銀河中心核とそこからふき出た2方向へのジェットの関係に似ている。Sco X-1 のそれについては、その後何もはっきりした議論はすすんでいないが、宇宙ジェットのなぞを探る一つの手がかりとしてきわめて興味深い。

このようにして、1960年代のX線天文学の黎明期に華々しく登場した Sco X-1 だが、1970年代にはいり、米国のX線天文衛星「ウフル」が、続々とX線パルサーを見出すと、X線天文学の主役の座はX線パルサーにとって変る。Sco X-1 のX線強度が時によって大きく変化しているらしいことはごく初期の頃から気づかれていたが、X線パルサーのようなはっきりとした周期性はな

かった。X線パルサーのはっきりとした周期性は、すぐに回転する磁場の強い中性子星を想起させ、そして多くのX線パルサーに見られた数日周期の食と、パルサー周期に見られるドップラー変化は、その中性子星が相手の星と近接連星をなしていることを明らかにした。連星の相

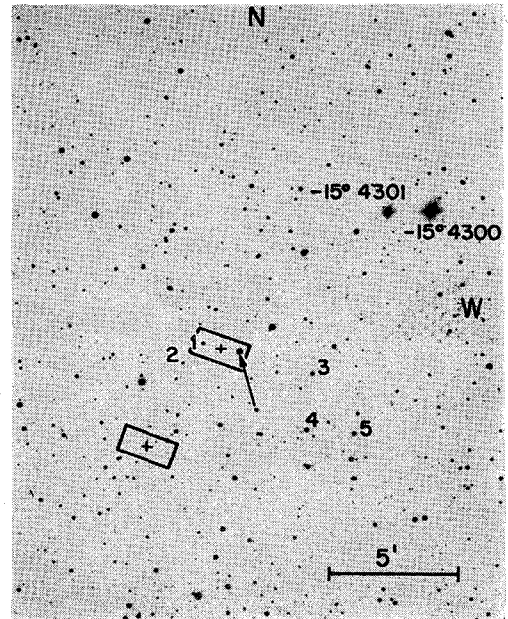


図1 小田先生らによって決められた Sco X-1 の位置。「すだれ」コリメータで決められた X 線源の位置が2つの四角で、その中から見つけられた青い特異な天体が矢印で示されている。(サンデーラ, Ap. J. Letters 1966 による)。

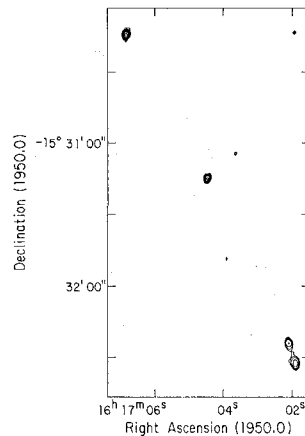


図2 Sco X-1 の電波地図。真中の電波源が光でみた Sco X-1 の位置に対応する。(フォロントラ, Ap. J. 1983 による)

* 宇宙科学研究所 Hajime Inoue: Prof. Oda —Sco X-1— Space VLBI

手の星から放出された物質が中性子星の重力にとらえられ、中性子星の表面に落ちてきたと考えると、解放される重力エネルギーは莫大なものとなってX線で光る理由もその光度も容易に理解できる。

Sco X-1 や、それとよく似た性質を示すいくつかの明るいX線源も、X線パルサーと同じく、近接連星中の相手の星から中性子星へ物質が降着し、そこで解放される重力エネルギーがX線発生のエネルギーと考えられた。しかし、種々の性質はX線パルサーのそれとは全くちがっている。X線パルサーの場合には、相手の星の多くは質量の大きい早期型星で、分布も銀河の円盤部に分散して見られ系が若いことを示している。一方、Sco X-1らの星は銀河の中心近くに集中して見られ、いくつかのものは球状星団中にある。さらに、相手の星ははっきりとは見えず、又、食もほとんどの場合見られない。これらのことから、相手の星は質量の小さい古い星で、中性子星も年をとって、そのため磁場は弱まり、X線パルスも見えないのだと考えられた。事実、その後、これらの系の連星周期が徐々に明らかになり、相手の星の質量は太陽質量程度かそれ以下の小さいものであることがわかっていく。現在は、これらのX線源を低質量連星型X線源と呼んでいる。

2. 「はくちょう」とX線バースト

低質量連星型X線源は 1970 年代後半にはいるとX線バーストという現象を通じて再び話題の中心になる。X線バーストとは、それほど明るくない低質量連星型X線源が、数秒の間に突然ふだんの明るさの数 10 倍にも明るくなり、それが 10 秒から数 10 秒かけてゆっくりもとの明るさに戻る現象である。「ウフル」に続く米国のX線天文衛星 SAS-3 が、X線バースト現象を精力的に調べ、X線バーストが中性子星表面でおこる大核爆発であるらしいことがしだいに明らかになった。そんなおり、1979年2月、我国初めてのX線天文衛星「はくちょう」

が、X線バースト源を広い視野で監視するための広視野回転「すだれ」コリメータを積んで軌道に投入された。

実はこの「はくちょう」の打上げ成功のちょうど3年前、我々日本のX線天文学者の期待を担って上げられた CORSA は、ロケットの軌道が予定から大きくはずれ、衛星になることができなかった。その時のショックは、CORSA の手伝いに加って1年ほどだけだった私でさえ、その後1ヶ月ほど仕事がまったく手につかなかったほどのものであった。まして、この計画を中心になってひっぱってこられた小田先生にとって、そのショックの大きさは我々の想像をはるかにこえたものであられたにちがいない。しかし、小田先生は、すぐに、CORSA 2号機の計画を持ち出された。そして非常に大きな困難をのり越えつつもその計画を実現され、我々を「はくちょう」の大きな成果へと導いて下さった。わずか3年の内に、新しい衛星を無の状態から生み出されたのみならず、当時の最新の情報をとり入れられ、CORSA 2号機をまさにタイムリーなX線天文衛星につくりあげられた。小田先生のなされた数多くの御業績の中でも「はくちょう」の成功は第一に数えられるべきものの一つだろう。

このようにして誕生した「はくちょう」は期待通りに活躍し(新しい現象にたびたび遭遇したという意味では期待以上に)、大きな成果をあげていく。広視野回転「すだれ」コリメータは次々と新しいバースト源を発見し、その数は10個にも達した(図3)。これはこれまで知られている全X線バースト源のおよそ1/3にも達する。又、夏の間、広視野回転「すだれ」コリメータは銀河中心付近の観測に用いられ、実に稔りの多い観測が行われた。打上げ半年後の1979年の夏には、宇宙の珍獣ラビッドバースターの活動がとらえられ、奇妙さを増す数々の新現象が報告された(図4)。1980年の夏には、銀河中心付近の明るい低質量連星型X線源の長期連続観測や、いくつかのバースト源のバースト活動長期モニター

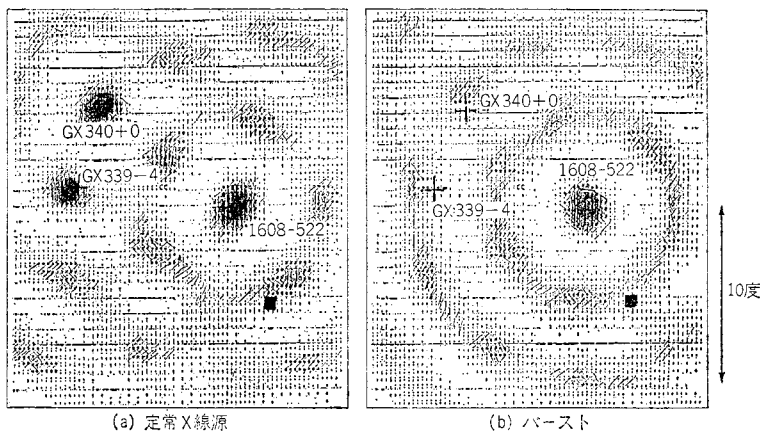


図 3 「はくちょう」の広視野回転「すだれ」コリメータがX線バーストをとらえた例。(a) 三つの定常X線源が同時にとらえられている。(b) この三つの定常X線源のうちの一つがバーストした。この図では、バーストが強いので他の二つの定常源は相対的に見えなくなっている。黒い四角形は衛星の回転軸の方向(村上・牧島らによる)。

(a) 定常X線源

(b) バースト

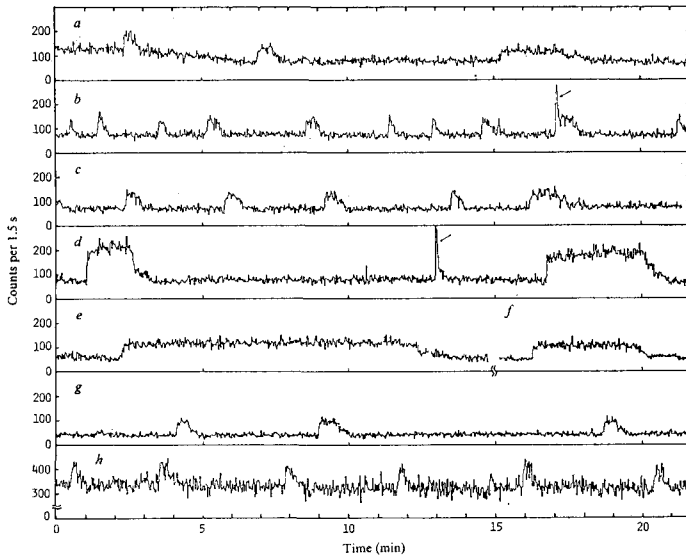


図4 「はくちょう」が1979年8月にとらえたラビッドバースターの活動の様子。矢印のあるのは、同じ視野内にあった別のX線バースト源からのもの。ラビッドバースターからのX線バーストのほとんどは、ほかのX線バースト源からのふつうのX線バーストとは、明らかに違う性質を示す。ふつうのX線バーストは、中性子星表面でおこる核爆発と考えられているのに対し、ラビッドバースターからのほとんどのものは、中性子星へ降る物質の流れが間歇的になってバーストがおこると考えられている。(ラビッドバースターでは核爆発によると思われるふつうのバーストもたまに起こる。) この間歇的降着流によると思われるバーストは、大きいバーストがおこると、その大きさに比例して次のバーストが起こるまでの待ち時間が長くなるというおもしろい関係がある。(図は井, 上ら, Nature, 1980 による.)

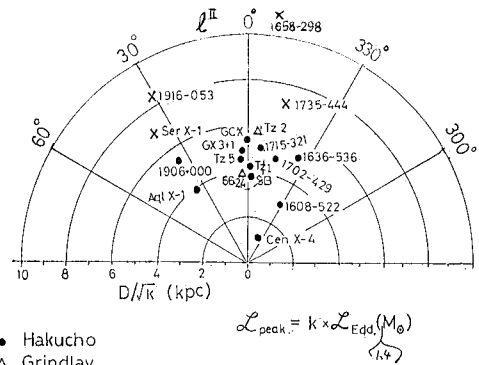
など、その後の議論の出発点を与えるような先駆的観測がいくつも行われている。

中でも銀河中心付近のいくつかのX線源からのバーストを1年半にもわたって監視し、バーストの明るさを系統的に調べた研究は、「はくちょう」の大きな成果の一つだった。この観測を通じて、もしX線バーストのピークのX線強度がエディントン限界光度(それを越えると、輻射圧で物が飛んでしまい星として成り立たなくなる限界の明るさ)を越えてはならないとするなら、銀河中心付近のX線バースト源の分布の中心は、当時考えられていた銀河の中心の距離10キロパーセクよりずっと手前になってしまう点が指摘された(図5)。この指摘は、X線バーストのスーパーエディントン問題として、その後の議論のきっかけの一つとなる。

この問題は、「はくちょう」に次ぐ我国2番目のX線天文衛星「てんま」による詳しいスペクトル観測と、日本の杉本グループをはじめとする多くの理論家たちの精力的研究により、X線バーストのX線強度は、エディントン限界をこえることはないことでほぼ決着がついた。あるX線バースト源が起すX線バースト中で最大のピーク強度を示すものはほとんど皆、そのピークで表面がふくらむ現象が見られ、ちょうどエディントン限界光度に達した時に予想されるふるまいとよく合うことがわかった。その結果として、あるバースト源の最大X線強度がちょうどエディントン限界光度だと考え、その距離を求めて、銀河中心付近のバースト源の分布の中心を求めると、銀河の中心への距離はおよそ7キロパーセクとするのが都合がよいことになった。

3. Cyg X-1 と短時間変動

さて、1960年代から1970年代はじめのX線天文学の



- Hakucho
- △ Grindlay
- × van Paradijs

図5 小田先生の書かれた、銀河中心方向のX線バースト源の分布図。その後、全体におよそ1.3倍外側に分布する方がよりよいということになっている。(1980年箱根でひらかれた「はくちょう」成果研究会の集録による.)

初期、Sco X-1の他にもいくつかの明るいX線源が精力的に調べられた。その一つがCyg X-1である。白鳥座に見られるこの明るいX線源の精密な位置決定は、米国の「ウフル」やロケット観測と競い合って、小田先生率いる宇宙研の気球観測でも行われ、Ap. J. Lettersの同じ号にそれらの結果が同時に発表される大団円となった(図6)。この精密に決められた場所にすぐに青い星が発見され、その詳細な観測から、Cyg X-1が、おそらくブラックホールであろうという重要な結論が導かれた。

このCyg X-1からのX線は変動が非常に激しい。「ウフル」が打上った直後、そのデータ解析で時間変動を調べることの重要性を指摘されたのは小田先生だったとうかがっている。この指摘に従ってCyg X-1の激しい時間変動が見出され、又、Cen X-3などX線パルサーの

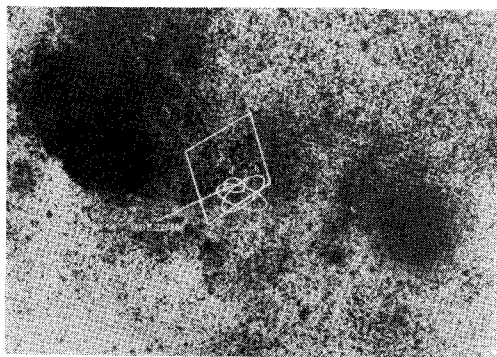


図 6 いくつかの気球・ロケット・人工衛星観測で決められた Cyg X-1 の X 線位置と、対応する光の天体 HDE 226868 の位置 (矢印). (小田 Space Science Review 1977 による)

周期変動の様子も次々と解明された。この頃、小田先生らは、Cyg X-1 の変動の中からも速い周期性を見出す試みを精力的に行われ、擬似的な周期性が短い時間あらわれるなども示されたが、はっきりした結果が得られるまでにはいたらなかった。この試みは、「はくちょう」「てんま」に次ぐ我国第 3 番目の X 線天文衛星「ぎんが」の大面积 X 線検出器を用いても行われ、周期性こそいまだに見つけられてはいないが、宮本らによって非常に面白い時間変動の特徴が見出されている。

この周期性を捜す試みは、その後、Sco X-1 を含む明るい低質量連星型 X 線源に対して精力的に行われ、擬似周期性 (QPO) の発見につながる。低質量連星型 X 線源からの QPO の検出は、「はくちょう」のラビッドバスターのデータから田原らがはじめて行った。その後、ヨーロッパ天文連合の X 線天文衛星エクソサットが多くの明るい低質量連星型 X 線源から続々と QPO を見つけ、Sco X-1 からも QPO が検出された (図 7)。今や Sco X-1 に再びスポットライトがあてられている。

4. 明るい低質量連星型 X 線源のふるまい

明るい低質量連星型 X 線源のふるまいの先駆的研究は「はくちょう」の広視野回転「すだれ」コリメータによるいくつかの X 線源の長期観測から得られた。この研究から、その強度変化とスペクトル変化の間に相関が見られ、その相関の仕方にいくつかの場合があることが指摘された。このいくつかの場合のあらわれ方は、X 線源ごとに少しずつ様子がちがうが、エクソサットの詳しい QPO 観測の結果 QPO の周期で分類しなおしてみると、明るい低質量連星型 X 線源の変動の様子は、大別して 3 つの場合に分類される (ハーゼンガーらの指摘)。

一方、「てんま」は、明るい低質量連星型 X 線源の強度変動に伴うスペクトル変化を詳しく調べ、そのスペクトルが、中性子星のごく近くまで侵入してきている降着

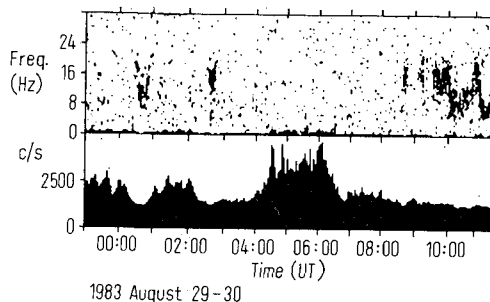


図 7 Sco X-1 の X 線強度変動の様子 (下図) と、時々見られる擬似周期性 (上図). 上図のたて軸は、周期変動の周期 (Hz) で、黒いところが、時々見える擬似周期性を示している。(ファン・デア・クリスラ, Ap. J. 1987 による)

円盤からの成分と、その降着円盤が中性子星表面にぶつかる境界からやってきている成分の 2 成分からなることを示した (満田らによる)。どうやら、この 2 成分の変動の様子がそれぞれ独立に変ることで、ちがう変動モードを示すものらしい。更におもしろいことには、その変動のモードが変わるあたりの X 線強度は、エディントン限界光度に非常に近い。先に X 線バーストのところでも述べたように、エディントン限界光度に近い放射があるとその放射圧によって大気はふくらみはじめる。そのような放射圧の影響で、中性子星近くの物質の流れは大きく変ることがあるのだろう。

一方、エディントン限界光度を越えるような強い放射があって激しい変動を示す例がコンパス座にある Cir X-1 に見つかった。Cir X-1 は、16.6 日で大きな X 線強度の変化を示す特異な X 線源で、短時間変動の様子や、スペクトル変化の様子に Cyg X-1 に似た点もあることからブラックホールの候補にあげられたこともあった。しかし、最近この Cir X-1 から X 線バーストが受かり、磁場の弱い中性子星が活動の中心にあることがほぼ確実となった。しかも、この X 線バーストの中の一歩大きいピーク強度を示すものでは、X 線強度がピークに達した時にはっきりした表面のふくらみが見えている。表面のふくらみを見せる X 線バーストのピーク強度がちょうどエディントン限界光度に相当することはほぼ確実なことになりつつある。我々は、Cir X-1 において、中性子星近傍で流れの様子が変るのを、まさにエディントン限界光度と比較しながら見るができる。

Cir X-1 には、16.6 日ごとに X 線のフレアがあり、そのフレアのピーク付近では激しい強度変動を示すことが多い。この時の X 線強度をエディントン限界光度とくらべてみると、エディントン限界光度を数倍こえていることがわかった。エディントン限界光度を数倍こえるような状況では、放射の圧力はほぼ重力に打ち勝ってし

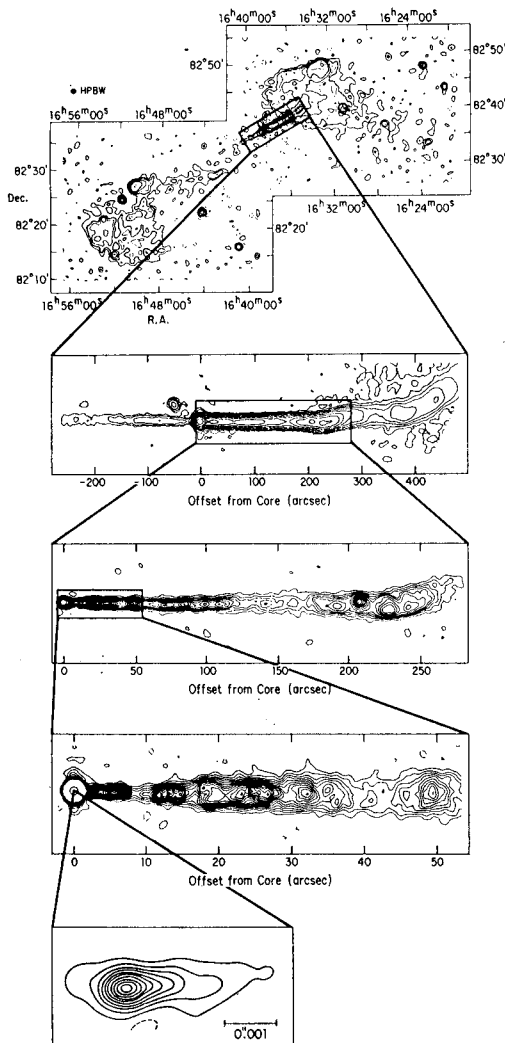
まっけて物は吹き飛ばされるような状況になる。事実、このようなX線フレアのあとには必ず電波のフレアがおこり、その電波フレアの示すいろいろな様子は、物が放出されてふくらんでいっていると考えて話が合う。Cir X-1 では、16.6日ごとに中性子星が相手の星の非常に近くを通りすぎるような軌道になっていて、両者の最接近時に非常に多くの物質が相手の星から中性子星に一度に流れ込み、解放される莫大な重力エネルギーがまわりの物質を吹き飛ばすようなことになっているのだろう。さらに興味深いことには、フレアで強くなったX線強度は、その後徐々に弱まっていくが、その途中でQPOがあらわれ、そのQPOの周期が、まさにエディントン限界光度あたりをさかいにして変化を示す。(チナント1987)

このようにして、低質量連星型X線源で見られるさまざまな変動の様子は、QPOを橋わたしに、Cir X-1と

結びつけられ、エディントン限界光度をこえるような放射が重要な役割を担っているらしいことがはっきりしてきた。そして、Sco X-1で、しばしば見られるフレア中のQPOの変化の様子は、Cir X-1のフレアの減衰中に受かったQPOの様子とよく似ており、Sco X-1にも、エディントン限界光度を越えるX線放射がおこることがあって、それにともなって物質が放出されている可能性は大きい。それは、宇宙ジェットの出機構とも関連して、電波の二つ目構造を解く手がかりなのだろう。

5. そしてスペース VLBI へ

そして今、小田先生の宇宙への執念はスペース VLBI に向けられている。VLBI とは、二つ以上の遠くはなれた電波望遠鏡を結んで巨大な干渉計をつくり、角分解能を飛躍的によくしようとするものである。実際、地上のいくつかの電波望遠鏡を結んだ VLBI はすでに 1000 分の 1 秒角にも達する精度でいろいろな電波源を分解し着



NGC 6251

WSRT
610 MHz

VLA
1664 MHz

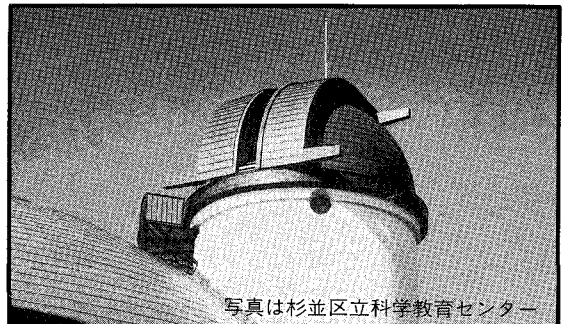
VLA
1410 MHz

VLA
1662 MHz

VLBI
10651 MHz

図 8 電波干渉計の角度分解能の向上によって分解されてきた活動銀河 NGC 6251 の中心核。しかし、いくら皮をむいても、まだ中心核を分解することはできず、そして、又、中心核から吹き出すジェットが見えている。スペース VLBI を用いれば、さらに 1 ケタから 2 ケタ、角度分解能をあげることができる。(フリドルとパーレイ, Ann. Rev. Astron. Astrophys. 1984 による。)

々と成果をあげている。この地上電波望遠鏡のネットワークに、宇宙へ持ち出された電波望遠鏡を加えてさらに基線を長くしようとするのがスペース VLBI の計画である。これが実現できれば、これまでの地上 VLBI の1ケタも2ケタも良い角分解能で、各種の電波源を探ることができる。そのような高分解能で、一番に見てみたいものは、銀河の中心核であろう。銀河の中心には、巨大なブラックホールがあると言われ、莫大なエネルギーが放出され、そして何と言ってもふしぎな物質流、宇宙ジェットが見られる(図8)。スペース VLBI がもし10万分の1秒角もの角分解能を実現できたとする、我々の銀河系の中心核は、10分の1天文単位まで分解できるはずであるし、もっと遠方の活動銀河でも、太陽系の大きさぐらいまで分解できる可能性がある。そしてそれら活動銀河中心核からの宇宙ジェットのひな形として、Sco X-1 からの物質放出をスペース VLBI で眺めるなら、実に太陽の大きさ程度のものまでが像分解できるようになる。スペース VLBI によって低質量連星型 X線源の中心で何がおこっているかが解明され、宇宙ジェットのなぞもほぐされていくことだろう。小田先生の御業績に新しいページが加わるうとしている。



写真は杉並区立科学教育センター

◆営業 ASIBO 品目◆
**天体望遠鏡と双眼鏡
 ドームの設計と施工**

◆主な天体ドーム納入先◆

東京大学宇宙科学研究所/東京大学教養学部/東京学芸大学/埼玉大学/福島大学/川崎市青少年科学館/杉並区立科学教育センター/駿台学園一心荘(北軽井沢) 駿台学園高校/熊本東海大学/栃木県こども総合科学館/土佐市公民館/刈谷市中央児童館/日原文台/大分総合コミュニティセンター/宇美青少年育成センター(福岡)等の他、日本全国に100余基の実績。

ASIBO 光学工業株式会社
 東京都豊島区池袋本町2-38-15 ☎03(985)1321

天体観測専門誌

月刊 **天文ガイド**

12月号 定価450円 90 11月5日発売!

ニューフェイス・テストレポート

星の家製プロミネンスアダプター…日食の時に見られるプロミネンスが見える機構や性能まで解説!

1989年の天文現象

2月には皆既月食、続々と楽しい天文現象があります。来年の目ぼしい天文現象を余さず、詳しく紹介!

カラー・グラフィック

大接近の火星の姿と天文ガイドサイパンツアーの様子と、カナリー諸島の天文台ラ・パルマのすべて。

- 12月のスター・ウォッチング●12月の観測資料
- 観測ガイド●情報ボックス…など、情報満載!!

新刊案内

チロの天文シリーズ
藤井 旭の星座ガイド秋

秋の星座を見つける方法、各星座の特徴や観察のポイント、2時間ごとの星空の変化、星座神話まで、だれにもわかるように、やさしく、くわしく、図を多く入れながら解説しました。

- 藤井 旭著
- 定価950円 250



チロの天文シリーズ
藤井 旭の星座ガイド冬

初めて星座を見ようという方にもわかるようにわかりやすく図解した、同シリーズの冬編。

- 好評発売中! ●藤井 旭著/定価950円 250

誠文堂新光社

東京都千代田区神田錦町1-5-5
 ☎03(292)1221・振替東京7-128