

“はくちょう”衛星とバースター

村上敏夫・白鳥チーム*

1. 前おき

日本のX線天文学グループの長年の夢であったX線天文学衛星“はくちょう”は1979年2月に誕生して以来、順調に活動を続け現在も多量のデータを我々に送り込んでいる。“はくちょう”衛星により我が國も本格的なX線観測の時代を迎えることになった。1962年に始まったX線天文学は米国の衛星 UHURU の打ち上げ以降めざましい進展をみせ、宇宙のイメージを大きく塗り変えて来た。それらは我々の銀河の中には数100に及ぶX線源があること、銀河系外にもクエーサーやセイファート銀河のように強いX線を出している天体があること、おとめ座やかみのけ座の銀河集団がX線で輝いていること等々である。こうした観測事実を通して、それまで理論家の想像の産物であった中性子星やブラックホールのような極限の物理状態が現実の存在として観測されるようになったのである。このようにX線天文衛星の実現以来、X線天文学は飛躍的に従来の光天文学や電波天文学等と肩を並べるまでに成長して来たのである。

“はくちょう”衛星も既にこの1年間の観測を通して、これら各種X線源の観測データを着々と積み重ねつつある。今号では数多くの観測結果の中から、特にX線バースターと呼ばれる現象を取り上げて紹介してみようと思う。“はくちょう”衛星打ち上げの経緯、観測システム、及び幾つかのトピックス的観測結果のまとめが既に天文月報第73巻2月号に小川原、松岡両氏によって紹介が行われている。合せて参照していただきたい。

2. 銀河系内X線源

X線バーストに立ち入る前に我が銀河系内のX線源達について簡単にふれる。先に銀河系内には数百に及ぶX線源が存在することにふれたが、それらは大別すると以下のように分類することが出来るかと思われる。

- a) 超新星の爆発にともなう残骸がその爆発のエネルギーで輝いているもの
- b) 近接連星系の一方が極端に半径の小さな天体であり、主星からのガス落下にともなう重力エネルギーで輝いているもの
- c) もちろん太陽のように高温コロナを持っていたり、フレアを起すことによって輝いているもの

もある。

X線バーストはこれらX線源達の内、b) の近接連星型X線源に起源を持っていると考えられているのもう少し詳しく見てみよう。

星の進化の理論から、星は中心でヘリウムの燃焼が始まるに伴いその半径を大きくなることが知られている。又より重い星ほど進化は早い。今ここに1つの近接連星がある。より重い一方はより早く進化し、その外皮をふくれ上がらせ、その外皮の一部を伴星に向って落下させ始める。この伴星が半径の大きな星ならば落下による重力エネルギーの解放はさして大きくはない。しかもしこの星が中性子星のように半径が 10^6 cmにも満たないものだと、この星に向って落下して行く陽子1個は100 MeVにも達する大きな重力エネルギーを解放することになる。このエネルギーは熱に変換され、高温プラズマがX線で輝き出すことになる(定常成分と呼ぶ)。一方中性子星表面に降り積った水素やヘリウムを主成分としたガスは高温、高圧下で、いずれ熱核反応により重元素に合成されて行く。この熱核反応がバースト成分として観測されると考えられる。核子当たり熱核反応では水素で ~ 10 MeV、ヘリウムで ~ 1 MeVの反応エネルギーの解放が知られている。この値は重力エネルギーの値に比べて小さいがバーストでは短時間で解放が行われるので強い。我々はこのようなプロセスによるバーストを考え、Type-Iと呼んでいる。

3. X線バースター

X線バーストとは典型的な1例を図4に示すようにX線強度の時間変動現象の1つである。X線バースターとはX線バーストを起すX線源の一般的呼び名である。

ではバーストとはどのような観測事実を持って定義され、他の変動現象と区別されているのであろう。現在一般に知られている特徴は次のようである。

- (i) 非常に短時間の間に(数秒以下)X線で明るく輝き始め数十秒から数分に渡って輝き続ける。
- (ii) これらX線での増光が準周期的(数時間から数日に1回)に発生する。

X線での時間変動現象には幾つかのタイプが知られている。例えばNova、Flareとかとはこのバーストとは立ち上がりや継続時間の違いで区別される。(Novaでは数日～数10日輝く)γバーストとは周期性やエネルギーの硬さで区別される。(γバーストはいまだかつて1

* 東大宇宙研 Toshio Murakami: Bursters observed by Hakuko

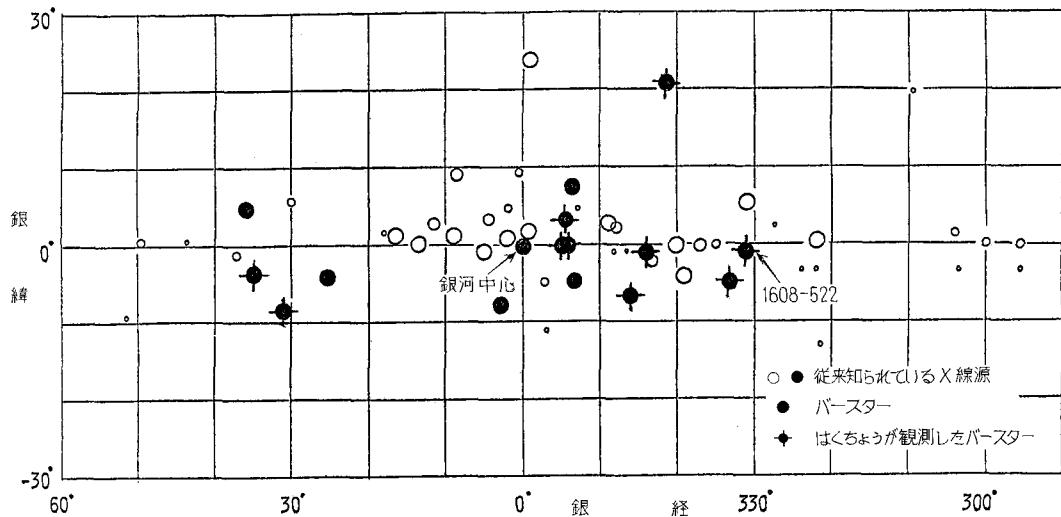


図1 パースターの天球分布

表1 “はくちょう”によって発見、確認されたパースター。◎は新発見を意味する。

名前		個数
1608-522	◎(新)	22
1636-536		44
1702-429	◎(新)	17(+2?)
1728-337		18(+2?)
1735-444		3
1905+000		3
1715-321	◎(新)	3
1916-053		1
Gen X-4	◎(新)	1
ラピッドパースター		をくさん(~500)
未確認		約10

つの天体が準周期的にパーストを起した事実は無い。)

いずれにしろX線パースト現象はきわだつ特徴を持った現象の1グループとしてとらえることが出来る。図4に示されるように早い立ち上がりと、ゆっくりした指

数関数的減少を示し、くり返し観測される。もちろんパーストとパーストの間には全く何も観測されないのでなく、普通先程述べた定常成分と呼ぶ弱いX線が観測される。

2. 3. で見たようにパースト現象は我が銀河系内X線源の大半を占める近接連星型X線源の起源やその構成、構造、中性子星表面での物理状態等々を観測的に知るために、きわめて多くの情報をもつた現象なのである。

4. “はくちょう”衛星によるパースト観測

“はくちょう”衛星によるパースト観測の方法論は2月号を見ていただくとして、今までに観測されたパーストの数と分布をお話しする。現在までに総数で600個を越すパーストが観測された。短時間に多数のパーストを発生し、Type-IIとして区別されるラピッドパースターを除いても130個近い数である。これらパースターの名前と個数を表1に示す。“はくちょう”衛星により新たに4つのパースターが発見、確認された。表中「新」とあるものがそれである。さて“はくちょう”による新発見と從来知られているパースターとを合せて図1に銀河座標系で示す。同様に図2に“はくちょう”によってこれまでに観測が行われた天空領域を示す。

この2つの図から“はくちょう”は銀河面にそって、かなり全面に渡ってくまなく観測を行っているにもかかわらず、パースターはほとんど銀河中心方向に集中して分布している。なぜパースターは銀河中心方向に集中しているのか。中性子星との近接連星系でパースターになり得るものが何か異質の性質を持っているのか解決されていない。UHURU衛星等によって観測されたパースト発生の知られていないX線源の分布は必ずしもこのよ

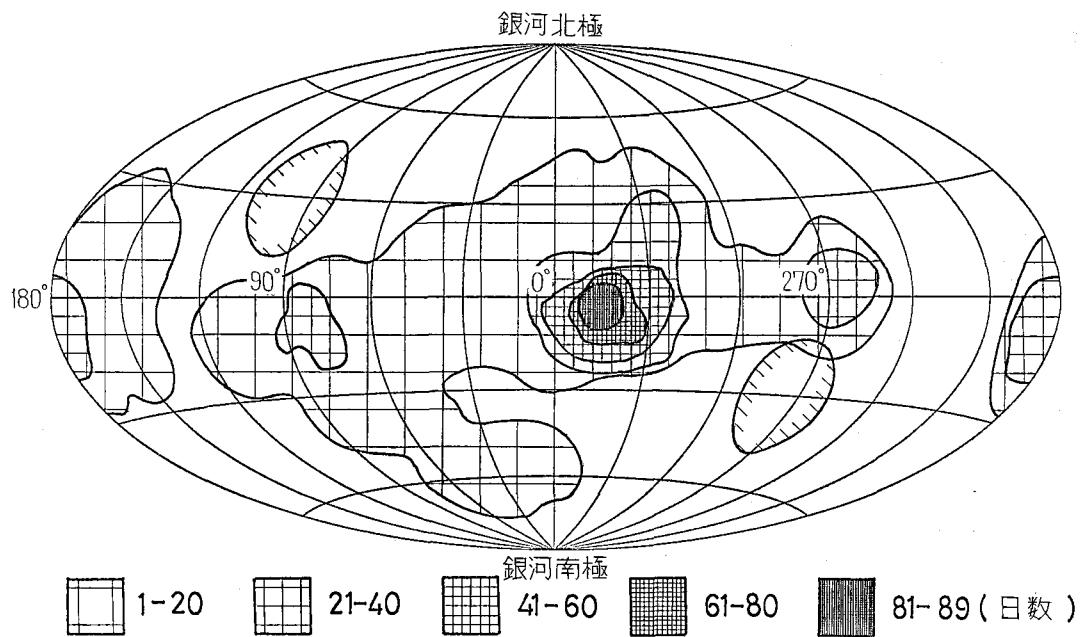


図 2 バーストモニターシステムで探査が行われた天空域と日数

うに銀河中心方向に集中してはいないのである。

5. バースター 1608-522

観測された 10 個のバースターはそれぞれ大へん面白い性質を持っているが、ここでは 1608-522 と呼ばれる 1 つのバースターを取り上げ、何がわかり、何が面白いのかお話ししようと思う。

バースター 1608-522 とは赤経 16 時 8 分、南緯 52.2

度の方向に存在するバースターである。

この X 線源は 1 月 28 日に定常成分が突然明るく輝き出したことが英国の衛星により報告されていた。“はくちょう”は 4 月 9 日よりこの X 線源の観測を開始し 7 月末までに 22 個のバーストを受けた。図 3 に 4 月 - 7 月にかけてこの X 線源の定常成分の強度とバーストのピーク強度を示す。図から明白なように 4-5 月期と 6-7 月期とでは定常成分の強弱にともないバーストのピーク強度に

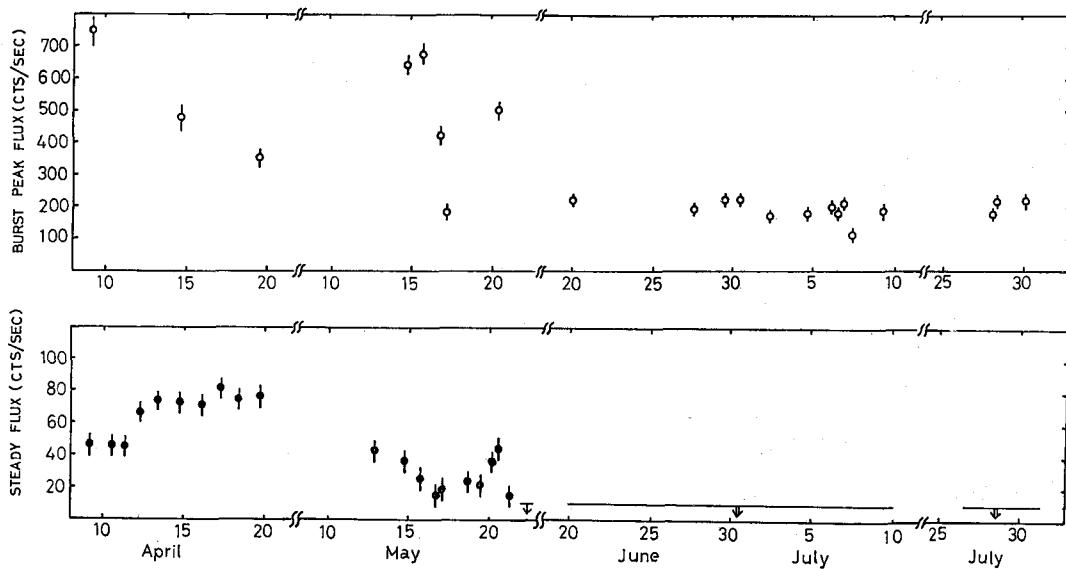


図 3 バースター 1608-522 の定常成分 (STEADY) 強度 (下) とバーストピーク強度 (上)

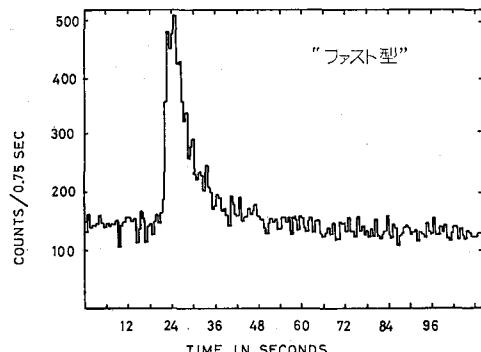


図 4a ファスト型バーストの例

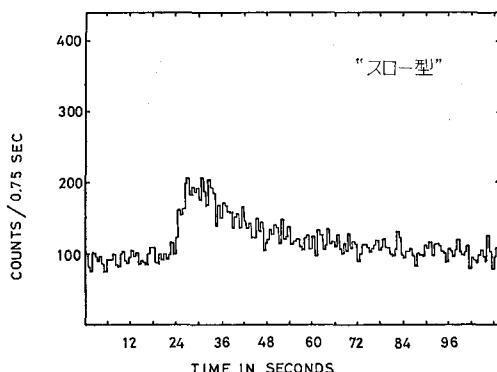


図 4b スロー型バーストの例

明白な変化が見られる。4-5月期バーストのピーク強度は大きく、かつ変動も大きい。しかし6-7月期ではバーストのピーク強度はほとんど一定の値を示す。その変化はピーク強度だけでは無く図4に見られるように、バーストの形にも反映されている。4-5月期バーストは早い立ち上がりと早い減少を示し(ファスト型と呼ぶ)、6-7月期にはどちらも遅い(スロー型)。更にきみょうなことに全バーストのフラックスをそのピーク強度で割ったもの、いわゆる幅は4-5月期では一定値を示し、6-7月期では大きく変動している。図5に全バーストフラックスとピーク強度の関係を示す。この図から又そのモードの変化が連続では無く、あるレベルで突然起きているとも認められる。

表2 ファスト型3例のピーク強度、温度
(409-0829は4月9日8時29分U.T.を意味する)

Day-Time (U.T.)	Peak flux counts s ⁻¹	Integrated flux counts	Hardness ratio (12-30)/(1-12)	Temperature KeV
409-0829	750±55	5470±210	0.14±0.014	2.58±0.08
414-1809	461±47	3200±240	0.16±0.02	2.71±0.14
419-1423	358±32	2436±184	0.13±0.02	2.50±0.14

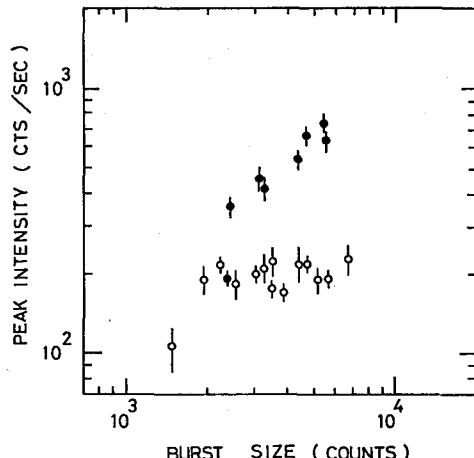


図5 ピーク強度と全バーストフラックス(SIZE)
黒丸は4-5月期

6. ファスト型バースト

4-5月期 1608-522からのバーストは我々がファスト型と名をつけたものであった。ファスト型バーストからは次のような結論が導かれる。表2にファスト型バーストの3つの例を示す。この3例はそのピーク強度、全フラックスに2倍程の変化が認められる。しかしへクトルから導かれる温度は黒体輻射の型を示し、かつ、この3つのバーストについてほとんど違いを見せない。もしバースト源が黒体輻射で正しいなら、我々はバースト発生域の大きさを求めることができる。黒体輻射による放射ではその強度が温度の4乗に比例し、その面積の1乗に比例することを知っているからである。よって表2の結果はバースト毎にそのバーストを発生している面積が2倍も異っていることを示している。面積が異なることは中性子星表面が必ずしも一様に全面で熱核反応を起しているのではないことになる。

7. スロー型バースト

6-7月期バーストはスロー型であった。既にこの期間バーストのピーク強度はきわめてそろってしまったことをお話しした。図6に見られるように個々のバーストは

明白なバースト強度の頭打ち現象が見られる。4-5月期バーストのピーク強度は自由にその強さを変化させているにもかかわらず6-7月期は4-5月期よりより低い値で頭打ちを示す。又同図下に見られるように温度の指標である硬さも頭打ちの部分で一定値を示す。フラックスを頭打ちさせる現象として我々は良くエディントン限界光度を考える。しかし今回の場合4-5月期には6-7月期より、より高い値で変動が行われていることから、6-7月期をエディントン限界と考えることにも困難がある。

すでに図5で見たようにファスト型ではその全フラックスはピーク強度に比例していた。しかしそローラー型では頭打ちの結果ピーク強度と全フラックスに比例関係は無く、頭打ちの平らな部分の長さが全フラックスの変化を説明しているようである。

8. 10分間隔バースト、他の結果

1608-522 で今までに述べなかった結果をまとめておこう。7月6日に10分間隔を置いて2発のバーストがたて続けにこのX線源から観測された。もし中性子星表面に降り積った水素あるいはヘリウムがすべて燃焼されたとすると、このような短い時間の間に再び新しい燃料を用意することは出来ないと思われる。近接連星から期待されるマスフローレート $\sim 10^{17} \text{ g/sec}$ とバーストが起くるための最小質量 $\sim 10^{21} \text{ g}$ を考えると、バーストは普通数時間から数日に1回観測されると思われる。

このことはやはりファスト型でも認められた部分燃焼があるのでと思われられる。しかし部分燃焼ではソローラー型のあのピーク強度の良くそろうことに対して困難がありそうである。

過去5年間程のこの1608-522バースターの定常成分の強度をプロットすると図7のようになる。約600日周期で増光をくり返している。バースターとこのような再帰新星タイプX線源との関係は面白い。ここではこれ以上立ち入らないが同様に再帰新星 Cen X-4 からもバーストをはくちょうが受けたことを報告しておく。

9. 理論的側面と観測結果

さて、このような“はくちょう”的新しい結果がどのように解釈されるのか理論的側面をお話しする。“はくちょう”的結果を見て立てられた東大杉本研グループの藤本、宮地、花輪氏達のモデルについて言及してみる。彼等によって降り積ったガスの熱核反応に対する安定、不安定(バースト)的燃焼領域が温度と降り積った質量との関数として計算された。既に P. C. Joss や R. E. Taam 達によってヘリウム単体や水素単体で行われていた計算を水素、ヘリウムの合成ガスに理論を進めたものである。その結果は定常成分の強い時は温度が高く、水

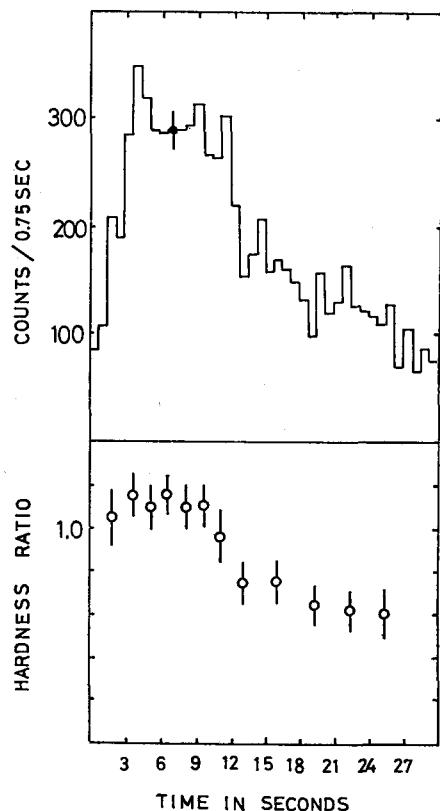


図6 ソローラー型バーストと硬さ(温度)

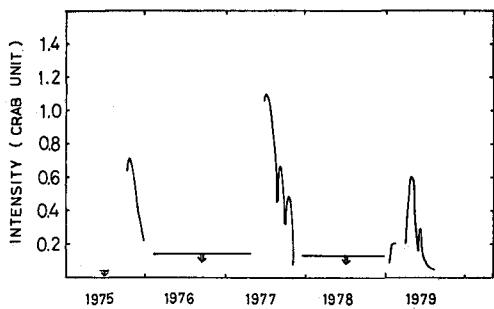


図7 過去5年間の定常成分の強度変化

素はバースト的には燃えずヘリウムがバースト的に燃える。ヘリウムは反応過程がきわめて早くファスト型を作る。一方定常成分の弱い時、温度は低く水素もバースト的に燃えることが出来る。水素は反応プロセス中に長いタイムスケールがありソローラー型となる。定常成分とバーストの型を説明するものとしてきわめて明快である。更に温度が上がると水素もヘリウムも安定に燃える。これは銀河パルジ方向の強いX線源達がバーストを起こさないことを対応できる。

だが、“はくちょう”が観測したファスト型ではピーク強度がばらつき、ソローラー型ではそろって頭打ちを示す

こと。ファストでもスローでもバースト頻度に変化が見られないこと、表面がもし熱核反応だと仮定して一様に全表面が燃えていないらしいこと等々は未解釈として残されている。

又 2. でバースターは中性子量を伴った近接連星系らしいと述べた。実験的には黒体輻射から求められる半径が数 km であることや高いエネルギー発生率から中性子星であると考えている。しかし二重星であるなら普通期待される食が 25 個程のバースターのどれ 1つからも見つけられていない。バースターの分布がバーストを起さない普通の X 線源に比べ銀河中心方向に集中すること等を含めて、このような近接連星系の特異性についても星の形成、進化の中でどのような所に位置するのか説明される必要があろう。

10. まとめ

“はくちょう”の結果から、従来のバーストのイメージを大幅に変更したり、深める結果が導かれつつある。今号では 1608-522 のみに限ったが、追って他のバース

ターも紹介されるであろう。バースターの天球分布しかり、ファスト型、スロー型の存在しかり、ピーク強度の分布、変動しかり、どの問題をとり上げても新しい理論の必要が認められる。銀河中心方向のとてつもない距離にある、たかだか地球半径程度の中性子星の表面で行われている極限の物理状態を“はくちょう”は手にとるよう見ていると言える。今年再び 3 月 - 8 月にかけて、銀河中心方向のバースターを見ることになる。

今年は日本、アメリカ、インド、イギリス等々のグループと協同で赤外、光、X線での同時観測が計画されている。更に詳しい結果が得られると期待される。

参考 天文月報第 73 卷 2 月号 東大宇宙研 小川原、
松岡 X 線天文衛星 “はくちょう”



わが国唯一の天体観測雑誌
天文ガイド

定価 320 円(税込) '80-5 月号・4 月 5 日発売!

●5月号のおもな内容

★4月の天文現象——金星が最大光輝に近づき、昼間肉眼でも見えます。よい空では、しし座にいる木星と火星が近づきます。また天王星も衝になります。解説は藤井旭さん。

★SS433というなんとも奇妙な星が最近話題になっています。なにがどうおかしいのか、その原因は? 寿岳潤先生が研究成果をまとめて解説。

★初めて夜空を見る人のために!というシリーズを始めます。第1回は春から夏の星座。解説は秋田薰さん。

★ほかに、双眼鏡の架台②、2月16日のインド日食報告、プラッドフィールド彗星の写真による紹介などです。

新刊案内

太陽 — その謎と神秘
ガリレオによって太陽に黒点が発見されてから、太陽の謎を解明しようとした天文学者たちの努力のあとをたどり、現在の最先端の研究を、アマチュアにもわかりやすく、やさしく解説した太陽研究書の決定版! 3月末発売
■守山史生著 / B6 判・192 ページ・予価 1600 円

写真で見る彗星

今世紀の代表的な大彗星と、1965年以後わが国のコメットハンターが発見した彗星を中心に編集した“彗星の写真集”。また使用した彗星望遠鏡のいくつかを紹介。写真にはすべて詳細なデータを付記! 4月上旬発売

■長谷川一郎編 / B6 判・146 ページ・予価 800 円

私の新彗星発見記

日本のコメットハンター19人の感動の手記 ●1300 円発売中

誠文堂新光社

東京都千代田区神田錦町1-5
振替東京6294 電話03(292)1211