

矮新星のアウトバースト

嶺 重 慎*

1. はじめに

近年矮新星 (dwarf novae) のアウトバースト (星が突然明るく輝き出す現象) に関する研究が急速に進んでいる。昨年 (1986 年) 6 月に西ドイツのバンベルクで開かれた IAU コロキウムにおいても、広い波長域における観測をもとに、アウトバーストの二つのモデル (後述) についての議論が熱っぽく戦わされた。この二つのモデルについては十年越しの論争が今も続けられており、筆者を含む何人かの日本人もその当事者となっている。

今回は矮新星のアウトバーストについて、多少身びいきになるかもしれないが筆者が研究を進めている円盤不安定モデルを中心に、観測・理論の両面から紹介してみたい。

2. 矮新星とは? アウトバーストとは?

矮新星ということばは一部の人を除き聞き慣れないことばかもしれない。「矮」とは「小さな」という意味であるから、「矮新星」とは「(規模の) 小さな新星」ということになる。図 1 は矮新星の典型的な光度曲線である。ごらんのように数十日ごとに急に 4~5 等明るくなる現象が見られる。このような突然の増光をアウトバーストとよんでいる [なお矮新星の中にはスーパーアウトバーストとよばれる別種のアウトバースト (みずへび座 VW 星の 4 番目がそれ) を示すものもあるが、本稿では取り扱わない]。

参考として表 1 に「新星」と名のつく爆発的変光星をあげておく。同じ「新星」という名がついているが、変光のメカニズムは必ずしも同じではない。

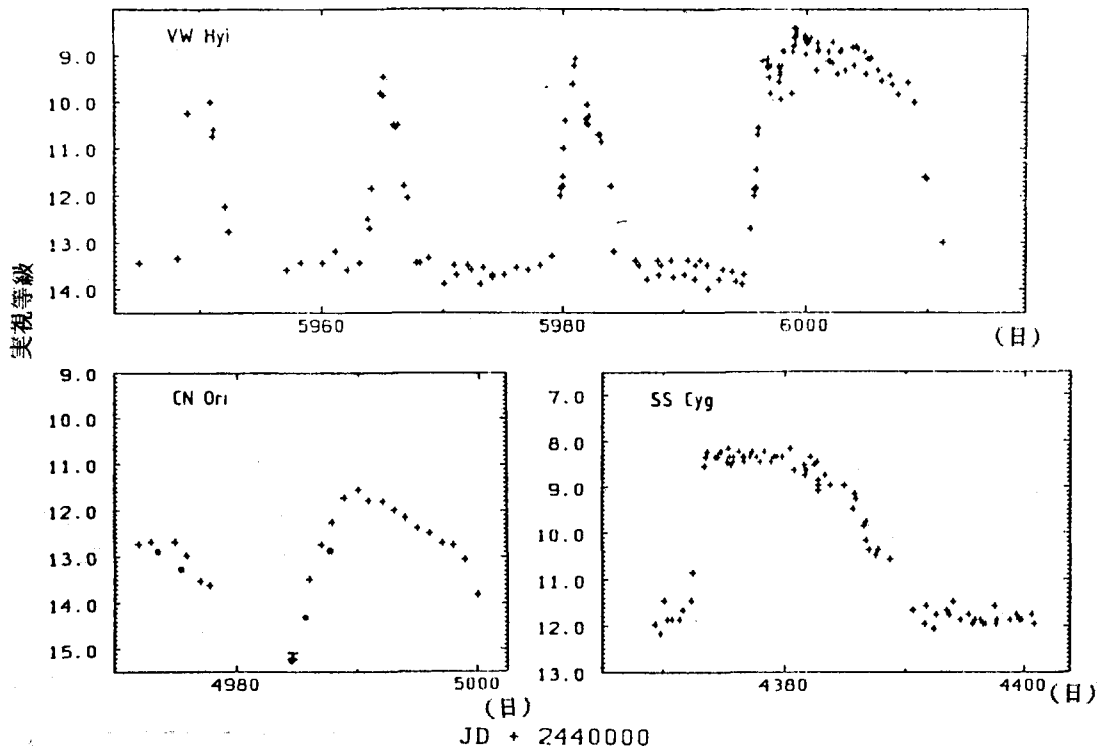


図 1 矮新星の典型的な光度曲線。データは VSS R ASNZ*(上: みずへび座 VW 星) 及び AAVSO*(左下: オリオン座 CN 星, 右下: はくちょう座 SS 星) による (*: それぞれニュージーランド及びアメリカのアマチュアの観測家の集まり)。

* マックス・プランク物理学・天体物理学研究所 Shin Mine-shige: Outbursts of Dwarf Novae

表 1 ささまざまな「新星」

名称	変光幅 (等級)	エネルギー (エルグ)	変光の時間間隔
矮新星	2~6	$10^{28} \sim 10^{29}$	20~300 日
再帰新星	7~9	$10^{43} \sim 10^{44}$	10~100 年
新星	9~14	$10^{44} \sim 10^{45}$	1 回のみ
超新星	14 以上?	$10^{50} \sim 10^{52}$ 以上	1 回のみ

矮新星はいくつかの観測的特徴から、新星 (nova) や新星状天体 (nova-like variable) と同じく一般に激変星 (cataclysmic variables) とよばれるグループの中に分類されている [超新星 (supernova) と再帰新星 (recurrent nova) は現在激変星に含めないのがふつうである]。激変星は強い磁場を持つ場合を除き、図 2 (=表紙) のような共通した構造をもつ。即ち白色矮星 (主星) と晩期型星 (伴星) とからなる連星系であるが、二つの星はあまりにも接近しているため、晩期型星表面のガスが白色矮星の重力にひかれて星からどんどん剥ぎ取られている。剥ぎ取られたガスは連星回転の角運動量を持っているので、まっすぐ白色矮星に落ち込んでいかずにそのまわりを円運動しながら少しずつ角運動量を失って落ちていく。こうして白色矮星のまわりにはガスの円盤ができあがる。円盤は構成するガスの重力エネルギーの解放により明るく光っている。この円盤を降着円盤 (accretion disk) と呼ぶ。

さて伴星が定常的にガスを放出し、そのガスがやはり定常的に主星にふり積もって定常的に重力エネルギーを解放すれば、何も時間変化を伴った現象は起こらない。では矮新星のアウトバーストをおこすメカニズムは一体何だろうか? 新星との関連から白色矮星表面上での核反応暴走が考えられたこともあったが、その後観測によりアウトバーストは円盤が急に明るくなることにより起こることがはっきりしたため、結局次の二つのモデルが残った。

- (1) 質量輸送モデル: 伴星が何らかの不安定性を受けてガスを放出する割合が変化するというモデルで、1973 年イギリスのバース (Bath) によって提唱された。
- (2) 円盤不安定モデル: 伴星のガス放出率は同じだが、円盤自体が不安定性を受けガスの主星への降着率が変化するというモデルで、1974 年日本の尾崎によって提唱された。

ここから二つのモデル間の論争が始まるのであるが、提唱された当時は両者とも不安定性を起こすメカニズムに不明な点があり、どちらのモデルがより有力であるかということに関して何も言えなかったようである。なんとなくケンブリッジ・グループを中心に前者を支持する人の数の方が多かったようにも思われる。ところが不安

定性の原因探しという隘路を先に抜け出したのは円盤不安定モデルの方であった (その後観測も含めて後者を支持する論文の数が急増した)。

3. 円盤不安定モデル

1979 年日本の蓬茨は、1 万度前後の温度においておこる水素の解離・再結合が原因となって降着円盤は不安定性をおこすことを発見した。ついで 1981 年、西ドイツのマイヤー (Meyer) 夫妻がさらに対流をも考慮して円盤の構造を計算し、円盤は不安定性の結果、円盤にガスをためこむ低温状態と、ためられたガスを中心星へと解放する高温状態との間を振動することを示した。そして 1983 年以降、筆者も含めいくつかのグループが実際に時間進化の計算を行なって観測で得られるような光度曲線を再現するに至り (図 3)、円盤不安定モデルは質量輸送モデルを大きく引き離し、完全な独走状態に入ることになる (と筆者は考える)。

ここで円盤不安定モデルについてももう少し詳しくふれておく。矮新星の降着円盤の状態は、有効温度 (円盤の表面温度) 及び表面密度 (円盤内のガスの量) という二つの量で決められる。この中で特に熱平衡 (エネルギーの発生率と放出率とがつり合う) 状態にあるものを求めてみると、図 4 のような熱平衡曲線が得られる。縦軸には有効温度 (または粘性の大きさ: 熱平衡時には両者は比例定数を除き一致する)、横軸には表面密度をとっている。つまり右上はガスが多くなって明るい状態、左下はガスが少なく暗い状態をあらわす。

この S 字型カーブがモデルを理解する鍵である。即ち、同じガスの量に対し最大三つの熱平衡状態が存在することになる。一番温度の高い状態が高温状態、一番低いのが低温状態で両者とも安定、まん中の状態は不安定で現実には存在しない状態である。

では円盤はこの図の上をどのように進化するのだろうか?

今、円盤が低温状態にあったとする。ここは粘性があまり働かない状態なので、ガスはたまる一方になる (静穏時)。円盤は熱平衡曲線上を右へと移動しやがて臨界点 B に到達する。この点はこれより右にはもはや安定な低温状態が存在しないという点である。しかもなおガスはたまっていくので、ついに円盤は熱平衡状態を脱し熱平衡曲線の右側、即ちエネルギー発生率がエネルギー放出率を上回る状態に入る。そこで熱的不安定性が起こって温度が上昇、円盤は高温状態 D へと遷移する。高温状態は、逆に粘性が有効に働いてガスが中心星へとおし流され、重力エネルギーの解放により円盤が明るく輝く状態である (アウトバースト)。ガスの量は減って円盤は熱平衡曲線上を左方へ移動することになる。円盤は

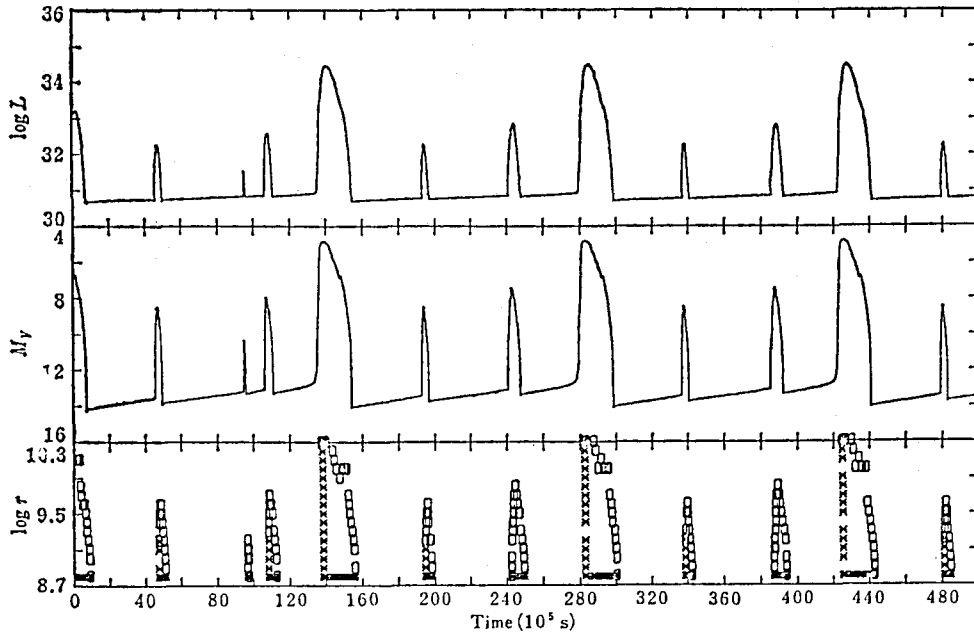


図 3 矮新星の理論的光度曲線。上図は光度，中図は実視等級，下図は円盤の空間的・時間的状態変化をあらわす [Minoshige (1986a) による]。

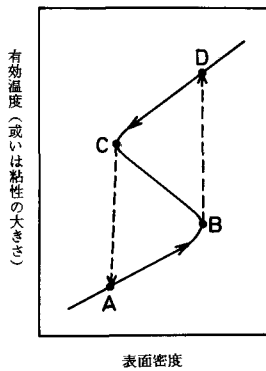


図 4 矮新星の降着円盤の熱平衡曲線及び円盤の進化 (模式図)。

C 点で今度は曲線の左側のエネルギー放出率がまさった状態に入り，再び不安定性が発生して低温状態 A に遷移する。こうして矮新星のアウトバーストの一周期が完結する。

4. 二つのモデルと観測の比較

さて依然質量輸送モデル側の抵抗は続く。そこで近年さかんに行なわれている X 線，紫外線，可視光等さまざまな波長域での観測に話を進めることにしよう。問題は二つのモデルのうちどちらがよりうまく観測を説明するかである。論点は五つある (表 2 参照)。

(1) ホット・スポットの明るさ

ホット・スポットは，円盤外縁をまわっているガスと

表 2 二つのモデルと観測

観 測	質量輸送モデル	円盤不安定モデル
(1) ホット・スポット	●	○
(2) 円盤の外縁温度	●	○
(3) アウトバーストの二つの型	△	○
(4) 静穏時の X 線・紫外線	○	● → ○
(5) スペクトル変化	○ → △	● → ○

○: 説明可 ●: 説明難 △: 人によって見解が分かれる

伴星から流れこんできたガスとが衝突してできると考えられている。つまり伴星からのガスの輸送率が変化するとホット・スポットの明るさも変化するはずである。しかし多くの観測が，ホット・スポットの明るさはアウトバーストの前で高々 2~3 倍しか変化しないことを示している (円盤の明るさは 100 倍程度変化する)。これは円盤不安定モデルの仮定と一致し，質量輸送モデルとは矛盾する。

(2) 円盤の外縁の温度の見積もり

ポーランドのスマック (Smak) は，いくつかの激変星について観測量をもとに独自のやり方で円盤の大きさと流れこむガスの量を求め，図にまとめた (図 5)。円盤不安定性の理論によると，円盤の外縁が水素の再結合をおこすほどの低温 (1 万度以下) になると円盤は不安定になる。図の三本線は外縁の温度が 1 万度になる線で，アウトバーストを示さない新星状天体 (横線入り) は左上の安定領域に，矮新星 (白ぬき) は右下の不安定領域

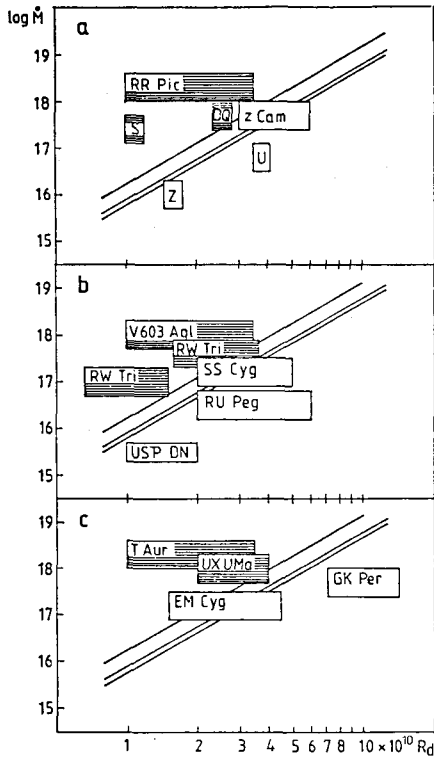


図 5 新星状天体(横線入り)及び矮新星(白ぬき)の各星の降着円盤の大きさとガスの降着率との関係 [Smak (1982) による]。図は見やすくするため、a, b, c, 三つに分けて描かれている。

にきちんと分かれて分布していることがわかる。これは円盤不安定モデルの直接的検証になる。

(3) アウトバーストの二つの型

円盤不安定モデルは異なる二つの型のアウトバーストの存在を予言する。まず最初に円盤の外縁が明るく光り出す型 (A型) と、内側から光り出す型 (B型) とである。図 6 に筆者らによる計算を示す。左が A型, 右が B型である。スマックは次にあげる観測をもとに、理論で予想される A, B, 二つの型が観測的にも存在することを示した。

- ① 食を使って、アウトバーストのたちあがり時に円盤のどの部分が光っているかを調べる。外縁が光っているのが A型, 内側が光っているのが B型。
- ② 食を使ってアウトバースト時の円盤の大きさの変化を調べる。A型は半径が大きくなるが、B型は殆ど変化しない。
- ③ 色・等級図を書いてみると、たちあがり時において比較的温度の低い外側が光り出す A型は B型に比して赤い方にずれる。
- ④ (③ と関連するが) A型は、紫外線のたちあがり可視光に比べ 1 日程度遅れるが、B型は両方ともほぼ同時にたちあがる [(5) 節参照]。

この結果、例えばふたご座 U 星, みずへび座 VW 星は A型に、はくちょう座 SS 星, オリオン座 CN 星は B型に同定された。この二つの型は質量輸送モデルでも

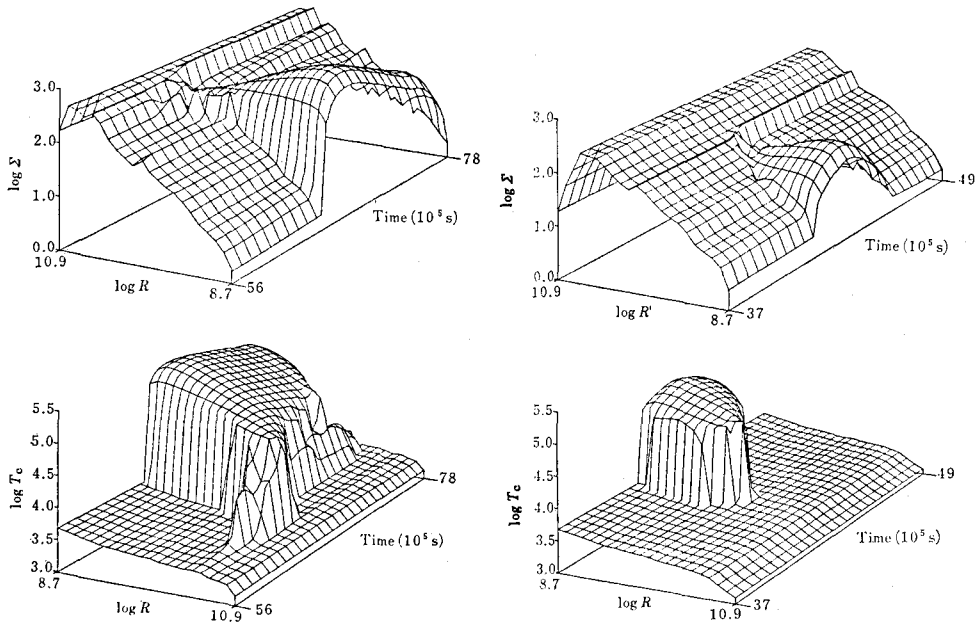


図 6 アウトバーストの二つの型。左図が A型, 右図が B型。それぞれ円盤の表面密度 (ガスの量: 上図) 及び中心温度 (下図) を円盤半径と時間との関数として描いてある [Mineshige and Osaki (1985) による]。

説明できないことはないが、粘性の大きさを通常考えられているより極めて大きく（例えば粘性パラメーター： $\alpha=5$ ）とする必要があるので、現実的かどうか筆者は疑問に思っている。

(4) 静穏時の紫外・軟X線量

観測は、矮新星の静穏時において紫外線・軟X線の量が少しずつ減少していることを示している。これは質量輸送モデルでは簡単に説明がつく。静穏時は伴星から円盤へのガスの輸送率が小さい時、即ち円盤の質量が減少する時期にあたるからである。一方これは円盤不安定モデルでは説明困難と考えられていた。静穏時は逆に円盤の質量が増加する時だからである（図4参照）。

しかし問題は、紫外線・X線がどこから出ているかである。これを調べるには食をおこす系を観測して、伴星が円盤及び白色矮星のどこを隠すときに紫外・X線量が大きく減少するかを調べればよい。結果は白色矮星であった。つまり紫外線・X線は円盤からではなく白色矮星から出ているわけで、円盤の明るさとは関係ないことになる。こうして円盤不安定モデルとの矛盾は無くなった（この観測が出たあとケンブリッジ出身の某氏は親分に寝返りをうって円盤不安定モデル派に転向したと言われる）。

(5) 紫外線-可視光のたちあがりの差

イギリスのプリングル (Pringle) たちのグループは、アウトバースト時におけるスペクトルのふるまいを二つのモデルに基づいて計算し、みずへび座 VW 星、オリオン座 CN 星の観測結果と比較した。そしてみずへび座 VW 星に見られる (A型アウトバーストに特徴的な) 紫外-可視光のたちあがりの差は、質量輸送モデルでは説明できるが円盤不安定モデルでは説明困難であると結論した。なぜなら後者では、円盤はわずか数時間のうちに可視光と共に紫外線も放射するに十分高温の高温状態 (温度 1 万度以上) に遷移するから、たちあがりに差が

出ないというのである。

果たして彼らの結論は正しいのか？ 筆者は円盤不安定モデルについて彼らと同種の計算を行ない、図7を得た。左がみずへび座 VW 星の観測、右が理論計算である。理論計算では星の大気モデルを代用しているため観測には見られないバルマー・ジャンプが顕著であるとか、円盤のみ考慮しているため主に白色矮星からの寄与による観測の静穏時のスペクトルが再現しきれないこととかを除けば、二つの大まかな傾向は一致しているといえる。

どうもプリングルたちの円盤不安定モデルの計算は、仮定したパラメーター α の値や極端に単純化した計算法に問題がありそうで今検討している。もしこれが本当なら円盤不安定モデルに不利な観測的証拠はすべて消えることになる。一方質量輸送モデルの計算についても、極端に大きな α をとらないと観測を説明できないことを彼らも認めており、こちらの結論もまた怪しいものと筆者は考える。質量輸送モデル派にとってはこれが最後の砦であるだけに、かなり苦しい戦いを強いられているというのが現状のようだ。

5. ま と め

以上概観してきたように、今や矮新星のアウトバーストは円盤不安定モデルではほぼ完全に説明することができる。といってもまだスペクトルの細かなふるまいや粘性パラメーター α の値などに問題点もいくつか残っていることは確かで、今後の研究に待つところも多い。

ところで矮新星のアウトバーストの研究は、また別の重要な側面も持っている。今、降着円盤の研究が世界で一種の流行となっている。降着円盤は激変星のみならず X線連星、銀河中心核など広く宇宙空間にさまざまな規模で存在していると考えられている。その中でも矮新星は円盤の時間的ふるまいが直接観測できる数少ない天体

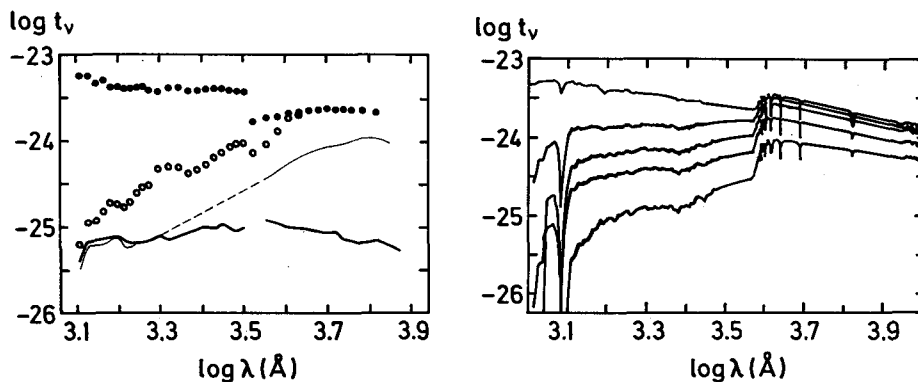


図7 みずへび座 VW 星のアウトバーストたちあがり時におけるスペクトル変化。左は紫外線観測衛星 IUE による観測 [Verbunt (1986) より転載], 右は Mineshige (1986b) による理論計算。

の一つとして注目されている。

降着円盤の研究は、1973年にソヴィエトのシャクラ (Shakura) とスニヤエフ (Sunyaev) によって標準モデルが作られて以来飛躍的な進歩を見たが、依然としてまだよくわからないのは粘性効率 α の値である。円盤のエネルギー源であり、またガスを中心星におし流す働きも

する粘性の大きさがよくわかっていないことは、研究をすすめる上においても大きな障害となっている。

矮新星のアウトバーストの研究は、理論計算と観測と比較することにより α の値についての情報も得ることができ、またX線連星や銀河中心核への応用も考えられることから、その重要性がますます増大してきている。

学会だより

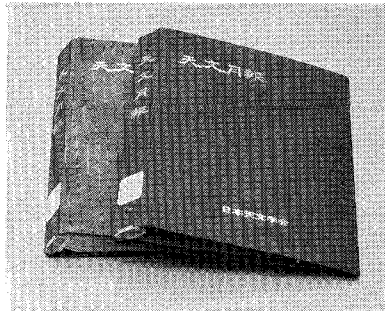
月報用ファイルができました。

日本天文学会では、会員からの要望もあって、写真のような『天文月報ファイル』を作りました。ご希望の方は下記の仕様をご覧の上、冊数、色、送付先住所、氏名を明記の上、『月報ファイル申込み』として、はがきでお申し込み下さい。

申込み先: 〒181 三鷹市大沢 2-21-1 東京天文台内
日本天文学会

月報ファイル仕様

- 1. 価格: 1冊当り 400円 (送料別)
- 重さ: 175g
- 厚さ: 3.5cm (12冊綴り込み)
- 色: 黒みがかった赤と黒みがかった緑の2種類
- 大きさ: B5版
- 2. 送料の目安: 1冊……240円 } 定形外郵便
- 2冊……350円 }



- 3冊 } 小包 { 関東・中部及び下記以外……500円
- 1冊 } { の東北地方
- 1冊 } { 関西・四国・中国地方、……650円
- 10冊 } { 青森・秋田・岩手
- 1冊 } { 九州 (山口県を含む) ……800円
- 1冊 } { 北海道地方……800円

なお、代金のお支払は請求書を品物に同封しますので、折り返しお支払い下さい。

天体観測専門誌

天文ガイド

11月号 定価450円+税 10月5日発売!

8月21日~23日、2000人が集まった
胎内の星まつり詳報

実際に白河天文台のドームが壊れた藤井さんの
天文台の地震対策

ニューフェイス・テストレポート
話題の各種大型カメラ

アメリカ製シュミカセ
ミードの20cm反射望遠鏡

天体写真テクニック
カラー写真のプリント

- 11月のスター・ウォッチング ● 11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

新版 星座めぐり 春夏秋冬

星座案内を格調ある文学にまで高めた、今は亡き野尻抱影先生の「新星座めぐり」全4冊を1冊にまとめて復刻。戦中・戦後の荒廃した社会背景の中で、澄み切った星空へと人々の心を導き、安らぎを与えてくれた名著。野尻抱影著 定価1800円

スターウォッチング

はじめて見る星雲・星団/超新星1987A/50cm反射望遠鏡を作る/島に渡れば星見がプラス1…利島・粟島・沖縄/はじめて写す彗星/天地パノラマ北海道……天文界の最新の話題がいっぱい!!

「天文ガイド」8月号臨時増刊 定価580円

誠文堂新光社

東京都千代田区神田錦町1-5
電03(292)1221 振替東京7-128