

太陽物理学 (1)

川口 市郎*

§1. 序 論

天文月報の編集者から、太陽物理学のやさしい解説を書けという注文を受けた。実際の所、太陽物理学の現状は複雑多岐に亘り、とても統一した“太陽観”があるとは思えない筆者は大いに戸惑った次第である。だが勇を鼓して筆者の関心のある分野についてだけ、それも詳しい理屈をなるべく省略して書いてみることにする。従ってこの解説はとても太陽物理学全般的なものでなく、筆者の偏見や誤りもいり混ったものであるかもしれないことを予めおことわりしておく。

太陽物理学の目的は何かということを考えてみよう。太陽はもろもろの恒星の中でとびぬけて近くに存在しているG型の星である。太陽以外の恒星では、現在のどんな望遠鏡、どんな技術をもってしてもその表面をみることはできない。従って、例えば、太陽活動やその周期のようなものが恒星にあるのかどうか、また太陽の彩層やコロナのようなものが星にあるのかどうかも直接知ることができない。このような属性は恒星を深く理解するためには本質的に重要なことであり、太陽は絶好の研究対象である。つまり太陽物理学は恒星を理解する重要な一手段であるという視点が成立する。

太陽観測の精度は他の天体観測の精度にくらべると格段に良い。例えば太陽フレアと称せられる爆発現象など非常に詳しく観測することができる。観測される電磁波はガンマ線からラジオ波の長波にまで及び、またフレアにもなって宇宙空間にまき散らされる粒子も大気圏外の科学衛星がキャッチする。地上の太陽観測所の望遠鏡はフレアの発生する太陽面上の活動領域の磁場分布や温度構造にいたるまで、完全ではないにしても、豊富な情報を提供することができる。このような状況はその発生機構を明らかにする必要条件なのであって、もし同じ現象が他の天体に発生したとしてその発生機構のくわしい理論を提示したところで、われわれはその真实性の判断に苦しむだけであろう。太陽フレアの放出するエネルギーは活動銀河の中心核で起っている爆発現象にくらべれば微々たるものにすぎないが、案外機構の本質は同じであるかもしれない。このような意味で、太陽は天体プラズマの実験室であるといえる。これが第2の視点である。

太陽は太陽系の盟主でもある。昔から地球の電離層は太陽紫外線によって形成されたものであることは知られ

ていたが、科学衛星は太陽風と称する微粒子の流れが太陽から木星軌道付近まで存在しており、地球はむしろ太陽の外部コロナの中にあるといっても良いことを明らかにした。太陽に大きなフレアが発生すると地球大気全般の擾乱、いわゆる“地球嵐”が発生することになる。この意味からして、太陽物理学はスペース・サイエンスの中の一分子ともとらえることができよう。これが第3の視点である。しかし昔から天文学者は実生活を軽んじ、霞を食って生きてきたそうであり、筆者もそのはしくれと思うので、第1の視点から太陽をとらえてゆきたい。

§2. 太陽観測

太陽そのものの解説に入る前に、現在われわれの技術水準で、観測からどれ位のことを知ることができるのか、地上観測に限ってのべてみよう。現在世界で最も大きな太陽望遠鏡はアメリカ合衆国のキット・ピーク国立天文台にある。その光学系の配置の大略を図1に示す。約2m口径の平面鏡(架台もふくめてヘリオスタットという)で反射された太陽光は極軸に沿って地下にある口径約1.5m、焦点距離約90mの対物鏡に送られ、観測室に直径約75cmの太陽像を作る。そして任意の部分の光を垂直型分光器をとおして、分光分析することができる。

この対物鏡の分解能は理論的には0.707位であるが実際には地球大気の揺動のため1"程度(勿論露光時間による)の分解能しか期待できないので、この巨大な装置は良い分解能をうるためのものではない。現在では非常に精密な分光観測が要求され、幅0.1~0.2mmぐらいのスリットから入った太陽光は長さ数十メートルの紫から赤までのスペクトルの帯に分散されるので、いかに明るい太陽とはいえ、このような大きな鏡を使って光を集

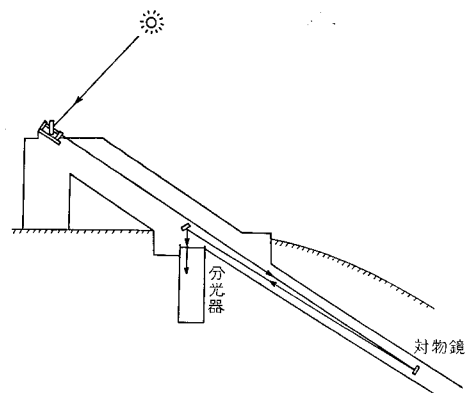


図 1

* 京大理 I. Kawaguchi

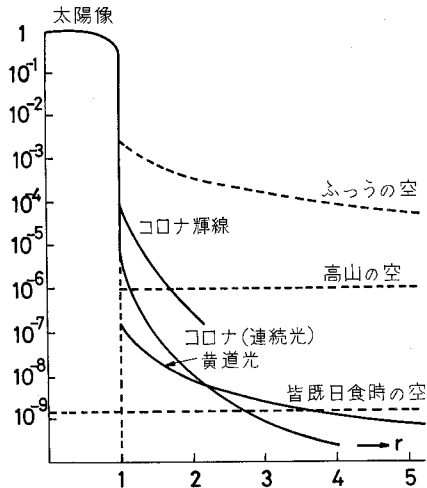


図2 太陽像中心の明るさを単位とした空の明るさ，コロナの明るさの分布． r は太陽半径であり，コロナ輝線の明るさは単色光でみたときの値である．

めることが必要なのである．この天文台では，このスペクトルをいちいち写真にとることなく直接コンピューターに接続して，必要な情報を数値でうるができる．太陽面で視線方向に沿った 0.05 km/sec 位のガスのかすかな流れや，数ガウスの弱い磁場があったとしてもこの分光器は検出することができよう．

太陽面上のこまかい模様を調べることも太陽物理学の大切な研究分野である．このためには静穏な外気と同時に望遠鏡内での空気の乱れを極力おさえることが必要である．アメリカ合衆国のサクラメント・ピーク天文台の塔望遠鏡では光路が真空に保たれており，また間もなく完成する筈の京大飛騨天文台の太陽望遠鏡はドームがなく，望遠鏡の筒先から焦点までの光路は完全に密封されて真空に保たれる筈である．現在達成された最上の分解は直接像で約 0.7 (太陽面上で約 150 km)，分光写真では約 0.7 (太陽面上で約 500 km) であろう．

太陽光球のすぐ外部にある紅炎やコロナは大変弱い光しか放射しないので，これらを観測するためには澄みきった空と望遠鏡内の散乱光を極力おさえることが必要である．このためにはコロナグラフと称せられる特殊の望遠鏡が高山に設置されている．わが国においても北アルプスの乗鞍岳にコロナ観測所があり，コロナや紅炎の常時観測や研究観測が行なわれている．図2に空の明るさが太陽の周縁からの距離と共にどのように変るかを示す．通常の光学望遠鏡では光学系による回折光と共に微小な塵埃や，光学系の微細なキズのために生じる散乱光はつきものである．従って可成よく澄んだ空で太陽を観測しても，太陽像周縁のすぐそばでは太陽像中心の明るさの1%ぐらいの散乱光があるのが普通である．コロナの中の最も強い輝線でも，せまい波長域しか通さない特

殊のフィルターをつけて観測すると，その明るさは太陽像中心の 0.01% ぐらいにすぎないので，通常の光学望遠鏡でコロナを観測できないのは当然であろう．筆者の経験ではコロナグラフでコロナを観測しているとき対物レンズにクモ糸一本張るとたちまち散乱光が増加してコロナは見えなくなった．このようなコロナグラフでも太陽半径の 2~3 割外部までコロナを観測するのがせいぜいであろう．しかし皆既日食を利用したり，コロナグラフを科学衛星にのせると，太陽半径の数十倍外部までコロナを観測することは不可能ではない．

§3. 太陽の内部

現在の太陽および惑星系が具体的にどのような過程を経て形成されてきたかはともかくとして，太陽は数十億年の昔星間ガスが凝縮して形成されたものにちがいない．また過去 10 億年以上太陽放射が大きく変わったという証拠はないのでこの期間太陽の内部は熱的にも力学的にも同じ状態がつづいていたのであろう．

力学的に安定であるというのは次のように考えることができる．太陽中心から距離 r の点と，すこしばかり離れた距離 $r+dr$ の 2 点を考える．この 2 点間の距離を高さとして単位面積を底面と上面にもつような柱体を考えると，膨張しようとする力とは r と $r+dr$ の点における圧力差に当り，この力が柱体の中のガスに働く中心方向への重力，すなわち収縮しようとする力がバランスして，太陽内部は静止しているのである．

太陽が常に一定のエネルギーを放射しているということは，太陽内部の温度分布は常に同じであることを示している．このためには表面から単位時間に放射されているエネルギーに等しいエネルギーが常に太陽中心部から外向に流れていなければならない．若し供給量がへるとたちまち温度分布が変り，表面の温度は下り放射エネルギーは減少するであろう．さらに一定の光量が絶えず外向に流れるためには内部程温度が高いのも当然である．では何 km ぐらい内部に入ると，何度ぐらい温度が高くなるであろうか，この温度勾配をきめているのは，太陽を構成している物質の“不透明度”である．もし太陽が“透明”であれば内部深くの一点で放射された光は，表面まで途中で吸収されることなく到着できるので，観測されているエネルギー流量に合致するためには，この点での温度はあまり高くならず，温度勾配は小さくなる．一方非常に“不透明”であれば内部深くからの光は直接とどかないので，表面からすこし入っただけでも温度が高くならなければ，表面からでるエネルギー流量を説明することはできなくなる．このときには温度勾配は大きくなり，太陽中心部の温度は高いものになるであろう．

太陽の構成元素組成は太陽スペクトルの吸収線のくわしい解析から知られており，主要な元素比は表1に示し

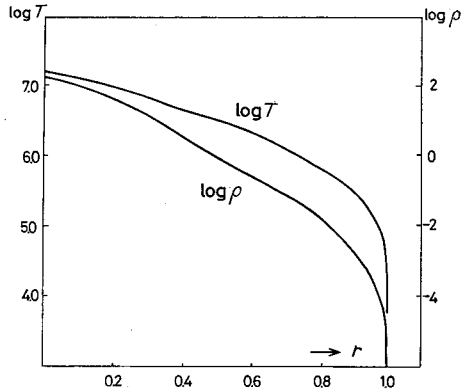


図3 太陽の温度及び密度分布. T 及び ρ は温度・密度であり密度は g/cm^3 で示す. r は太陽半径.

である. これにもつき不透明度の値も温度と密度の関数として求められるので, 太陽が力学的にも安定でかつ観測されたエネルギーをたえず宇宙空間に放出できるように, 太陽内部の温度と圧力分布を数値的に計算することが可能となる. ただすぐあとでのべるように, 太陽の表面近くではエネルギーは単に光だけでなく, 対流によるものはこぼれているという補正をしなくてはならない. 太陽の内部での温度と密度の分布を図3で示すが, 太陽の中心では温度は約1500万度, 密度は単位体積当たり約160グラムであり, 表面から半径の1%だけ入ると温度は約5万度に上昇し, 密度は表面の100倍以上にもなる.

太陽の内部の温度と密度の分布がわかると太陽のもつエネルギーは容易に $3 \cdot 10^{48}$ エルグと計算される. 一方太陽の放射エネルギーは $4 \cdot 10^{33}$ エルグ/秒であるので, 太陽の熱エネルギーだけが太陽の熱源と考えると, 太陽の寿命 T は

$$T = \frac{3 \cdot 10^{48}}{4 \cdot 10^{33}} \text{秒} \approx 8 \cdot 10^{14} \text{秒} \approx 3 \cdot 10^7 \text{年}$$

となり, 今後3000万年たつと太陽は冷たくなってしまふ. この時間は太陽が過去10億年以上も同じ光量で輝いてきたという事実に比べてあまりにも短かすぎる.

太陽のエネルギー源は太陽質量の大部分をしめる水素原子が核融合反応により, ヘリウムに変るときに放出されるエネルギーであることはよく知られている. 温度 T , 密度 ρ の与えられているとき, どれ位のエネルギーが発生するかは十分な精度で計算することができ, 図3の太陽の内部構造の計算にもエネルギー発生量は考慮されている. 4個の水素原子が1個のヘリウム原子に変るとき, その質量の0.8%が熱エネルギーに変るものとする, 太陽の全エネルギーは

$$E = 0.008Mc^2$$

となる. ただし M は太陽質量 $2 \cdot 10^{33}$ グラム. c は光速である. この数値を代入し, 太陽の寿命を求めると

表1 太陽大気の主要元素構成比

元素	原子番号	相対数
H	1	1.000
He	2	$8.5 \cdot 10^{-2}$
C	6	$3.3 \cdot 10^{-4}$
N	7	$9.1 \cdot 10^{-5}$
O	8	$6.6 \cdot 10^{-4}$
Ne	10	$8.3 \cdot 10^{-5}$
Mg	12	$2.6 \cdot 10^{-5}$
Si	14	$3.3 \cdot 10^{-5}$
S	16	$1.6 \cdot 10^{-5}$
Fe	26	$4.0 \cdot 10^{-5}$

$$T = \frac{1.4 \cdot 10^{52}}{4 \cdot 10^{33}} \text{秒} \approx 3.5 \cdot 10^{18} \text{秒} \approx 10^{11} \text{年}$$

となり1000億年という値をうる. 勿論この数値は上限であり, 実際には中心部で水素の含有量がへると内部構造も変化し, 放射エネルギーも増加するので実際の寿命はずっと短くなるに違いない. それにしてもこの寿命時間は充分長いので過去10億年以上太陽がほぼ同じように輝いてきたという事実とは矛盾しない.

§4. 太陽対流層

すこしでも太陽観測をしたことのある人ならば投影された太陽像が決して一様な明るさでなく, なんとなくザラザラとしていることに気付かれたことであろう. またシーイングの良い時には粒状斑が一面に浮きでているのをみた人もあるにちがいない. プロもアマもふくめて今迄何人の人が粒状斑の良い写真をとろうと努力したことだろうか. 1850年頃天体写真が使われだしてから現在にいたるまでこの努力は決して中断されなかったといつて良い. この中で一番有名なものはアメリカ合衆国でシュワルトシルドが30cm望遠鏡を気球にのせて高度2万メートルから撮影したもので, この様な望遠鏡をストラススコープと称している. そしてその写真は口径30cmの分解能の限界に達している. しかし最近ではこの写真を凌駕する写真が地上の望遠鏡でも撮影可能となった. 図4はフランス, ビック・デュ・ミディ天文台において昨年8月筆者が撮影したもので, 最小の模様は直径は0.2以下である. 使用した望遠鏡は特に粒状斑撮影のために設計された口径50cmの屈折で, その構造については筆者が本誌月3号に簡単にふれておいた.

図4で明るい部分は粒状斑, 暗い線条は粒状斑間隙とよばれるものである. 粒状斑の平均直径は1"~1.5"であり粒状斑間隙の幅は0.3"またはそれ以下で, 相当質の良い写真でも分解能の限界以下である. 写真の明るい部分はそのまわりの暗い部分にくらべて温度は高いので, 太陽の内部から熱いガスが上昇してきて表面にうかび上り, 水平に流れて冷たくなって粒状斑間隙に沈みこんでゆくものと考えられている. 個々の粒状斑はそれ自体膨

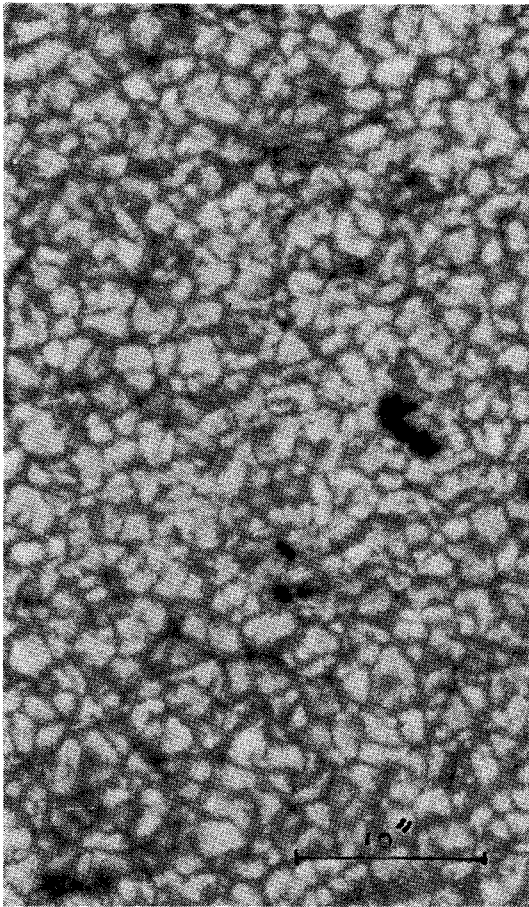


図 4 太陽粒状斑. 1977 年 8 月 1 日世界時 6^h46^m フランス, ビック・デュ・ミディ天文台にて撮影. ほぼ太陽像中心.

張したり収縮したり, 時にはバラバラに分裂したりするので, その寿命時間を正確に推定することはむづかしいが, 約 20 分であり, 寿命がつきると新しい粒状斑が新たに現れてきて, 太陽表面全体はたえず下から熱いガスが運ばれてきては沈みこんでゆく. 丁度沸騰しているミソ汁のような状態と考えてよい. (対流運動)

粒状斑の様子は黒点の中を除いて太陽表面どこでも同じようにみえる. しかしながら太陽光球には活動領域のように特に磁場の強い所がある. 磁場のある所とない所では対流運動は同じであろうか, 解答をうるには活動領域と静穏領域で粒状斑が同じかどうかを調べればよい. 従来の定説は, 黒点のすぐ近傍では粒状斑の直径が小さくなるということを除いて, 他に特に顕著な相違はないというものであった. ところが 1974 年以降, 合衆国サクラメン・トビーク天文台の真空塔望遠鏡が動き始めてから, 磁場と対流の相互作用の結果と思われる現象がみつきり始めた. 1 つは異常粒状斑とよばれるものであり, 他はフィリグリーとよばれるものである. 異常粒状斑と

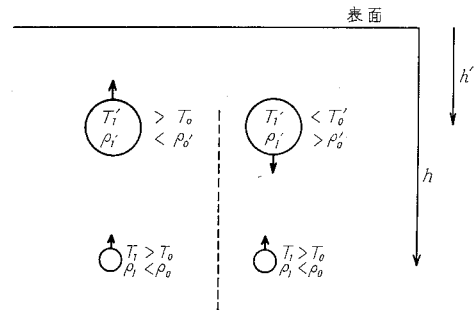


図 5 対流の模式図. T 及び ρ は温度・密度である.

いうのは, 粒状斑間隙が殆んどなくなって粒状斑どうしがくっついたように見え, フィリグリーというのは粒状斑間隙の中にみえる直径 0.3 以下の明るい斑点で, 詳しい成因や性質については全く不明である. 図 4 にあたるオリジナルフィルムをくわしく調べると, いくつかのフィリグリーらしいものや, また小規模ではあるが異常粒状斑もみえている.

太陽の内部構造をのべた時, 中心部で発生した熱エネルギーは光として表面にまで運ばれてきて宇宙空間に放出されていると考えた. しかし太陽表面層近くではエネルギーの運搬は一部対流運動にもとづいている. 何故太陽表面近くになると対流運動が発生するのであろうか.

図 5 は対流の発生の原理を模式的に示したものである. 太陽表面からある深さ h の所で何等かの原因でガス塊の温度 T_1 がそのまわりの温度 T_0 よりすこし高くなったとしよう. ガス塊のガス圧がまわりのガス圧力と平衡を保ちつつガス塊は膨張する. ガス圧は物質密度 ρ と温度 T の積に比例するので, 温度の高いガス塊の密度はまわりのガス密度よりも低くなる. この軽くなったガス塊は浮力をうけて h' まで上昇したとしよう. この高さではガス塊の温度 T_1' がまわりの温度 T_0' よりも高いときにはさらに浮力が働いて上昇をつづけるが, T_1' が T_0' よりも小さくなると, ガス塊の密度 ρ_1' はまわりのガス密度 ρ_0' より大きくなりガス塊は上昇をやめて沈み始めるであろう. すなわち図 5 の左側では対流が生じる場合であり, 右側では対流は生じない. あるいは別のいい方をすれば, ガス塊が上昇膨張したときガス塊の温度勾配がまわりのガスの温度勾配よりも小さいときには対流が生じる. 太陽光球のようにガス密度が充分大きいときにはあ膨張にさいしてそのまわりとのエネルギーの交換はないので膨張は断熱的であるという.

太陽中心部と表面層でガス塊が断熱膨張をするとき本質的な相違が 1 つある. 太陽の内部では温度は充分高いので水素原子はプロトンと電子にわかれた電離状態にあり, 断熱膨張をして多少温度が下っても電離状態に殆んど変化はない. しかしながら太陽表面層近くになると温度はそれ程高くないので断熱膨張をして温度が下ると電離

状態が変わり、プロトンと電子は再結合して水素原子にもどる。このとき紫外線を放射し、この紫外線がガス塊の中で吸収され熱エネルギーに変る。従ってガス塊は膨張をしてもそれ程温度は下らず、尚浮力を保有して上昇運動をつづける。すなわち換言すると太陽表面層近くでは、水素の電離エネルギーが対流運動の原動力となっている。このように考えると、星の表面温度が2万度以上のB型やO型の星では、どこでも水素原子は完全に電離し

ているので表面層近くでも対流はおこらず、もし望遠鏡でこれらの星の表面をみる事ができるならば、表面は粒状斑のない様なものであろう。あとでのべるように、太陽の対流は太陽活動と密接に関係しているらしいが、対流層のないB型やO型の高温星では太陽活動に相当する活動はないのだろうか。観測によるとある種の活動のあるO型やB型の恒星もあるらしいので、この活動は太陽活動とどうちがうのだろうか。興味はつきない。

雑報

ある発見——岡林メダルのこと——

その電話が鳴ったのは、2月末日だった。先方は大阪府下吹田の市立豊津中学校(濱本純郎校長)。何でも学区改編のあおりで近く廃校となる為、校内の整理をしていた所、校長室ロッカーの片隅からそれが発見されたとか、今はその来歴すら定かでないで、出来ればその貴重品を散逸させることなく、本来の所有者またはその身内の方にお返ししたいとお申し出であった。それは、日本天文学会の「天体発見賞」2箇、太平洋天文学会の「ドノホー・メダル」1箇である。刻まれた名は「岡林滋樹」。五味一明氏の「とかげ座新星」発見(1936年6月)に刺激されて発奮し、銀河附近の星々の位置を5等星位まで

暗んじ、同年10月4日、いて座に6等星の新星を発見したのをはじめ、1939年4月、同11月、40年10月にも新彗星を独立発見した我が国天体捜索史上、忘れ得ぬ先達の1人である。これら新彗星の中、前2者はそれぞれJurlof-Achmarof-Hassel 彗星(1939d)、Friend 彗星(1939n)で、惜しくも第1発見者として名を連ねるには遅過ぎたが、第3のものは、もう1人の独立発見者、本田実氏と共にその名を冠する「岡林・本田彗星(1940e)」である。メダルは、これら新星及び彗星の発見に対して贈られたものであった。

同校の意により、早速、岡林氏の情報を探したが、氏はその後、軍属としてスマトラへ地質調査に赴かれ、その帰途、よく知られた「阿波丸」の客として台湾沖に不帰の人となられていることが判った。昭和20年4月1日、享年31才の若さであった。しかし、同氏ゆかりの

わが国唯一の天体観測雑誌

天文ガイド

特価320円(千45円) 78-7月号・6月5日発売!

●7月号のおもな内容

- ★去る3月24日夜の皆既月食は各地で晴天に恵まれ、応募写真の封筒は千通をはるかにオーバーしています。そこでカラーページを6ページ増加して月食写真の発表号としました。9月にはまた皆既月食があります。
- ★7月30日夜明け、おうし座のアルデバランが月にかかります。久しぶりの1等星の星食です。
- ★火星は西に傾いて、すっかり遠くなりました。今シーズンの火星は?火星観測のベテラン佐伯恒夫さんです。
- ★最近アメリカでアマチュアの観測対象として関心が高まってきたのが、小惑星による恒星の掩蔽の観測です。
- ★今年の星空への招待についての座談会ほか。

小型天体望遠鏡教室

選び方と使い方

天文の好きな少年が、学校の先生や父親、天文台の先生との会話を通して、望遠鏡の選び方や正しい使い方を学んでいくという、初心者低学年向けの望遠鏡の本です。天体望遠鏡を買う前の予備知識、店頭で実物を前にしての選び方、具体的な使い方までやさしく書いてあります。レンズ工場の見学や、夏休みでの合宿観測への参加体験記、それに天文台の見学記なども加えて、楽しくおもしろく読める本です。

●富田弘一郎著/B6判・222ページ・900円・発売中

誠文堂新光社

東京都千代田区神田錦町1-5
 振替東京7-6294 電話03(292)1211