

H II 領域の進化

大谷 浩*

1. H II 領域とは

星間ガスは、ほとんど水素からなっていて、その密度は、場所によって異なるが、銀河面内では、 1cm^3 あたり 1~100個の水素原子がある。高温度星の近くでは、これらの水素原子が、星から放射される 912\AA より短波長の光 (以下、 L_C とかく) を吸収して、電離している。こういう水素の電離領域を H II 領域といい、中性水素 (電離していない水素) の領域を H I 領域とよぶ。H I 領域は光らないので可視光ではみえないが、H II 領域でガス密度の高いものは、いわゆる散光星雲としてみる。

さて、中性水素に L_C 光子があたると、ほとんどの場合吸収され、水素は電離する。H II 領域の中で、電離水素 (陽子) が自由電子と再結合して、中性水素にもどっても、たちまちまた L_C を吸収して電離する。したがって H II 領域の中では、ほとんど全部の水素は電離した状態にある。そこで星から放たれる L_C (毎秒 N_{L_C} 個) が、すべて再結合した水素に吸収されるとすれば、

$$N_{L_C} = \frac{4\pi r_0^3}{3} n_e n_p \alpha(T_e) = \frac{4\pi r_0^3}{3} n_e^2 \alpha(T_e) \quad (1)$$

という関係が成立つ。但し、 n_e 、 n_p はそれぞれ電子、陽子の密度 (cm^{-3})、 $\alpha(T_e)$ は温度 T_e のガスでの再結合の割合である。H II 領域では、ほとんどの場合、 $T_e = 10^4\text{K}$ である。(1) 式をかき直して、

$$r_0 = \left(\frac{3 N_{L_C}}{4\pi \alpha(10^4\text{K})} \right)^{1/3} n_e^{-2/3} \equiv U(Sp) n_e^{-2/3} \quad (2)$$

ここで、 $n_e^{-2/3}$ の係数を $U(Sp)$ とかいたのは、 N_{L_C} が星の温度つまりスペクトル型によってきまるからである。 r_0 (Strömrgren の半径という) をこれから求めると第 1 表のようになる。

星からの距離が r_0 に近いところでは、そこに到達する星からの L_C は少なくなって、中性水素が増す。そうす

第 1 表 Strömrgren の半径 (Kaplan 1966 より)

中心星		$r_0(\text{pc})$	
分光型	表面温度($^{\circ}\text{K}$)	$n_e=1\text{cm}^{-3}$	$n_e=10^2\text{cm}^{-3}$
O5	50000	88	4.1
O8	32000	46	2.1
B0	25000	25	1.2

* 北海道大学理学部

H. Ohtani: Evolution of H II Regions

ると L_C はさらに吸収されて一層少くなり、中性水素の数が距離とともに急激に増加し H I 領域となる。つまり H II 領域と H I 領域の境界層の厚さは薄いわけで、それは、 L_C 光子の平均自由行程:

$$\Delta r = \frac{0.1}{n_1} (\text{pc}) \quad (3)$$

ぐらいである。ただし、 n_1 (cm^{-3}) は H I 領域の水素原子の密度である。 Δr と、第 1 表の r_0 とをくらべると、境界層の薄さがよくわかる。

ところで観測では、H II 領域のガスの温度は 10^4K 、H I 領域では 10^2K ぐらいで、密度はあまり両者でかわらない。すなわち、H II 領域内のガス圧は H I 領域のそれよりはるかに高い。そうすると、H II 領域は H I 領域を押しつけて膨張するはずである。また、 L_C 光子の供給の方が、再結合する水素の数より多い場合があるなら、このとき H II 領域は H I 領域を侵蝕してゆくであろう。それを次に調べてみよう。

2. Ionization Front

H I 領域と H II 領域は、薄い境界層をはさんで分けられているが、その両側では、ガスの物理状態が大きく異なっている。だから、この境界層を不連続面と考えてよい。この面は H II 領域の側から H I 領域の方に向かって動いてゆくの、これを、Ionization Front (電離前面; 以下 I. F. と書く) という。

I. F. が H I 領域に侵入し水素を電離してゆく状態は、I. F. からみれば、中性水素ガスが前方から流れ込んできて、電離水素ガスが反対側に流れ出ることになる (第 1 図)。静止している中性水素ガスに対する I. F. の速さを U_1 、電離ガスに対するそれを U_2 としよう。さらに、ガスの密度、温度、圧力をそれぞれ ρ_i 、 p_i 、 T_i (H I 領域で $i=1$ 、H II 領域で $i=2$) とすれば、I. F. の単位面積について、

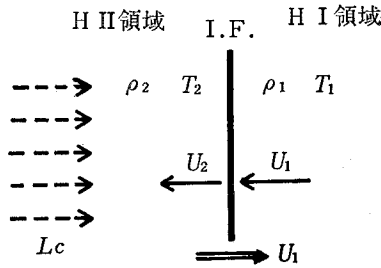
$$\text{質量保存則} \quad \frac{\rho_1 U_1}{m_H} = \frac{\rho_2 U_2}{m_H} = F \quad (4)$$

$$\text{運動量保存則} \quad p_1 + \rho_1 U_1^2 = p_2 + \rho_2 U_2^2 \quad (5)$$

が成立つ。ここで m_H は水素原子の質量である。またそれぞれの領域において、状態方程式は

$$p_i = \frac{\rho_i}{m_H} k T_i \quad \text{および} \quad p_2 = \frac{2\rho_2}{m_H} k T_2 \quad (6)$$

である。(6) のあとの式で係数 2 がついているのは、水素が電離すると陽子と電子の 2 個の粒子にわかれるからである。



(4) 式の第3辺 F は, Lc 光子のフラックスで, 単位時間に電離される水素原子の数は, その間に I.F. に届く Lc 光子数に等しい.

さて, H I および H II 領域の温度として, それぞれ, たとえば 10^2K と 10^4K を与えると, (4)と(5)は(6)を用いて, 未知数 ρ_2 , U_2 に関して, F をパラメーターとして解くことができる. この方程式は2次方程式で, その実根はKahn (1954) によって, 第2表のように分類された.

第2表 I.F. の種類

タイプ	F の大きさ	I.F. の速さ		密度変化
		H I に対して	H II に対して	
強い R	$F > 2C_2 \frac{\rho_1}{m_H}$	$U_1 > C_1$	$U_2 < C_2$	圧縮される
弱い R			$U_2 > C_2$	
R-critical	$\frac{F}{2C_2 \rho_1 / m_H} =$		$U_2 = C_2$	
強い D	$F < \frac{C_1^2}{2C_2} \frac{\rho_1}{m_H}$	$U_1 < C_1$	$U_2 > C_2$	希薄になる
弱い D			$U_2 < C_2$	
D-critical	$\frac{F}{2C_2 \rho_1 / m_H} = \frac{C_1^2}{2C_2}$		$U_2 = C_2$	

この表の中に書かれてある C_i ($i=1, 2$) は, 音波の伝わる速さで $C_i = \sqrt{\gamma \frac{RT_i}{\mu_i}}$ (γ : 比熱比, μ_i : 平均分子量, R : 気体定数) である. その大きさは, 純水素ガスならば, $C_1 = 1.2\text{km/sec}$, $C_2 = 17\text{km/sec}$ である.

第2表に示されたもののうち, 強い R-タイプと強い D-タイプの速さと密度変化をみると, それぞれ衝撃波と, 逆衝撃波の性質を, これらの I.F. はそなえている. こういう I.F. が生じるには, かなり特別の条件を必要とし, 星間空間では, 存在しそうでない. だから, ここではその他のタイプの I.F. について少し述べよう.

弱い R-タイプは, Lc のフラックス F が多量にあるか, あるいは, H I 領域の密度が低い場合に生じる I.F. である. この I.F. は, H II 領域に入ったガスの圧力が上って, その影響が H I 領域に伝わるよりも速い速度で

進む. つまり H II 領域は H I 領域に力をおよぼさない. R-critical タイプでは, この力の伝わるのと I.F. の進むのと同じ速さである. 一方弱い D-タイプは, 条件が弱い R-タイプと全く逆であって, I.F. の進行に H II 領域の圧力がひと役かっているわけである. R-critical の I.F. は, およそ $U_1 = 20\text{km/sec}$ で進みこのフロントのすぐ後側では $\rho_2/\rho_1 \approx 2$ である. また, D-critical では $U_1 \approx 0.3\text{km/sec}$, $\rho_2/\rho_1 \approx 0.02$ ほどである.

ところで, Lc のフラックスが $C_1^2 \rho_1 / (2C_2 m_H) < F < 2C_2 \rho_1 / m_H$ であるときには, 方程式(4), (5) は実根をもたない. これは, I.F. と H I 領域が直接に接触できないことを意味する. 実際には, I.F. の前方に衝撃波 (S.F. と以下で書く) が生じて, この S.F. によって H I ガスの密度が, D-critical あるいは弱い D-タイプの条件をみたすように高められ, そこを I.F. が進むことがわかっている. この場合を, M-タイプの I.F. ということがある.

以上のことを総合すると, I.F. のタイプはつきつき変わってゆくことが考えられる. I.F. はつねに星から遠ざかってゆくから, それとともに Lc のフラックスが減少してゆく. はじめかりに弱い R-タイプの I.F. があるとすれば, やがて R-critical になる. そしてすぐにその前方に S.F. が生まれ, D-critical の I.F. となり, やがて, D-タイプになる.

3. H II 領域の進化

それでは, H II 領域がどのようにひろがってゆくのかということに話をすすめよう.

まず, I.F. の誕生を考えなければならない. というのは, 星は突然に多量の Lc 光子を放ちだすのではなく星の誕生してゆく過程とともに, Lc が次第に増えてゆくからである. そこで, 星のまわりに (1) 式であらわされるぐらいの厚さの H II 領域ができあがったときをもって, I.F. が完成したものと決める. 質量が $30M_\odot$ の星について, Vandervoort (1966) が計算した結果を第3表に示した. ここで仮定された星のモデルは, 表面温度が 4000°K になると星は対流の状態から, 輻射収縮にうつり, やがて主系列星になっていくとしてある. 時間のスケールは, 対流期のはじめからとっており, 表に示された時はいずれも輻射収縮の状態である. $t = 2 \times 10^4$ 年かかってこの星は, $T_* \approx 4 \times 10^4\text{K}$ の星になる.

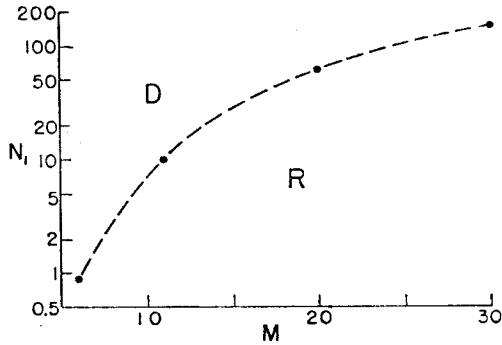
第3表をみると, いずれの n_1 に対しても $U_1 > C_1$ で

第3表 I.F. の誕生 (Vandervoort 1966)

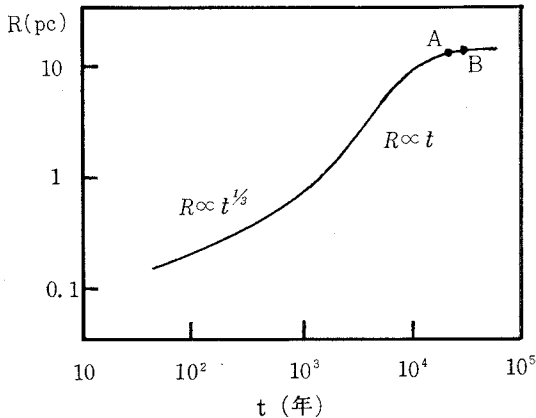
n_1 (cm^{-3})	t (年)	U_1 (km/sec)	r (pc)	T_* ($^\circ\text{K}$)
10	452	31.3	5.15×10^{-3}	5890
100	329	5.03	5.15×10^{-4}	5030

あるから、この場合、I.F.は弱いR-タイプである。しかしもっと n_1 が大きければ弱いD-タイプになるであろう。あるいは、もっと小質量の星ならば、表面温度は高くならないで、したがって L_c も少いから、同じ n_1 でも、D-タイプになるはずである。このことを、第2図でグラフに示してある。

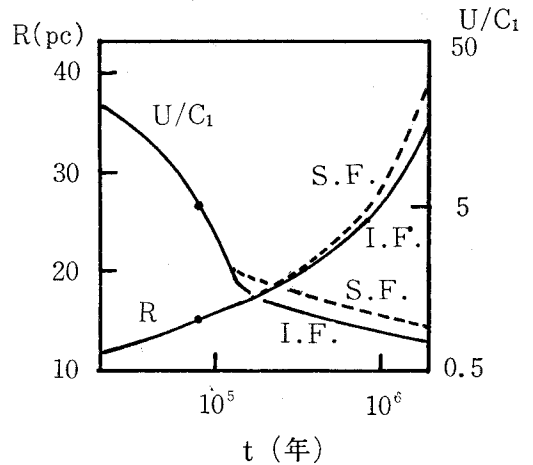
弱いR-タイプとして誕生したI.F.がひろがって、R-criticalになるまでの、H II領域の初期の進化のようすは、Vandervoort (1963 a, b) や Mathews (1965) によって調べられている。第3図は $30M_{\odot}$ の星でH II領域がつくられてゆくようすを示したものである。この計算は、星が 10^4 K のとき(輻射収縮の段階)からはじめられた。最初の 10^8 年ぐらいの間は、 L_c の量がゆっくりしか増えないので、 $r \propto t^{1/3}$ でH II領域は大きくなってゆく。その後主系列に星が向ってゆくに従って、 L_c は急



第2図 I.F.の誕生のときのタイプ (Vandervoort 1966) N_1 は星間ガスの密度 (cm^{-3})、よこ軸 M は太陽質量を単位とした中心星の質量である。D, R で示された領域の条件では、それぞれ弱いD-タイプ、弱いR-タイプのI.F.が生まれる。



第3図 H II領域の初期の進化 (Mathews 1965) 中心星は $30M_{\odot}$, $n_1=10\text{cm}^{-3}$ の場合。点Aで中心星は主系列に達し (2.2×10^4 年), 点BでI.F.はR-criticalになる (3×10^4 年, 13pc)



第4図 古いH II領域の進化 (Lasker 1966) 中心星はO7型で、突然に輝き出し明るさは変わらない場合。 $n_1 = 6.4\text{cm}^{-3}$ である。S.F.が生じるのは $t=9 \times 10^4$ 年, $r=16\text{pc}$ のとき。

速に増加するので $r \propto t$ のように、H II領域は進化する。星は $t=22000$ 年で主系列に到達しておちつき、 $t=3 \times 10^4$ 年でI.F.はR-criticalになる。このときの半径は $r=13\text{pc}$ で、そのあとは、ゆっくりと膨張してゆく。

この膨張の際に、第2節で述べたように、S.F.がI.F.の前方を進んでいる。Lasker (1966 a) によれば、これらのフロントの星からの距離と速さは時間とともに第4図のように変化してゆく。ここでは、S.F.とI.F.の間にある圧縮・加熱されたガスは、電離や輻射をして冷えることによる圧縮はないものとしてある。

以上のような過程をたどって、H II領域は膨張し、最後には、 L_c 光子は全部H II領域の中で消費され、さらに、圧力が、H I領域とH II領域とでつりあって、I.F.は静止して進化が終る。ところが、高温星は、主系列に滞在している時間が比較的短かく、すぐに温度が下って、放出する L_c が減ってくるので、H II領域の進化は途中で停止する場合がある。第4表に示した t_{off} は星が主系列からはなれ出すまでの時間、 t_f は、H II領域が最終段階に達する(星がずっと主系列にあると仮定し

第4表 星の寿命 (t_{off}) とH II領域の進化に要する時間 (t_f) (Mathews 1965)

中心星		t_f (10^6 年)			
$M(M_{\odot})$	T_*	$t_{off}(10^6\text{年})$	$n_1=10$	$n_1=10^2$	$n_1=10^3$
30	42000	4.2	(25)	5.3	1.1
20	35100	6.2	(16)	3.4	0.75
11	27400	12.6	7.7	1.6	0.34
6	20200	35.5	3.2	0.67	0.15

て)までの時間である。ここで () をつけた場合が、進化が途中で止まるわけである。

4. 観測とのつながり

上に述べたような理論を実際の天体にあてはめてみることは、まだあまりなされてないが、2つばかりの例を紹介しよう。

(i) 古い H II 領域

比較的大きな H II 領域のまわりには、中性水素のリングがあり、しかもそれが膨張しているらしいことが 21cm の電波の観測でわかっている。このリングを、I. F. と S.F. の間にある圧縮された HI 領域であると Lasker は考えてみた。第 4 図からわかるように、I. F. の半径と S.F. の速さは、H II 領域の年令 t を通じて関係がある。ところがこの関係は HI 領域のガスの密度 n_1 によって異なる。そこで、 t と n_1 をパラメーターとして I.F. の半径 R と、S.F. の速さ V の関係をかけば第 5 図の曲線群が得られる。この図でギリシャ文字で示されている曲線群は n_1 一定のものであり、ローマ字のついている曲線は年令が一定である。この図表上に、ある H II 領域で観測された中性水素のリングの半径と膨張速度をプロットすれば、その位置から t と n_1 が読みとれる。

しかし、この場合、理論計算は、 n_1 が空間的に一定である、S.F. はエネルギー損失を伴わないなどのあらい仮定があるし、また、それぞれの H II 領域で中心星は異

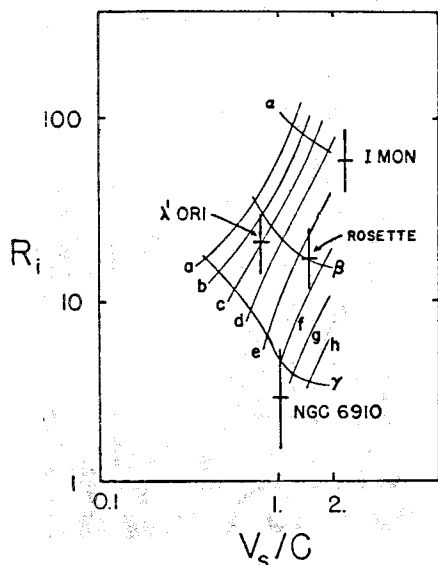
ているはずである。さらに、D-タイプの I.F. では、星間磁場の影響も無視できない (Abe 他 1963, Lasker 1966 b) し、星間塵のことも考慮しなければならないかも知れない。したがって、第 5 図からの結果は正しいというわけではなく、H II 領域の年令を推定する一つの方法の可能性を示しているのである。

(ii) オリオン星雲

H II 領域の代表例の 1 つは、オリオン星雲である。この星雲の中の密度分布や、内部運動は、かなりよく観測されているので、それらを、H II 領域の進化の面からながめる試みが Kahn と Dyson (1965) や Vandervoort (1964) たちによってなされている。ここでは後者の結果を簡単に紹介しよう。

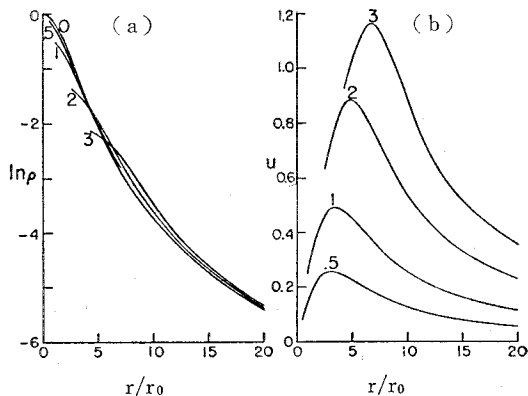
オリオン星雲では、星間ガスの最初の分布が一様であったと考えることは不合理である。なぜなら、H II 領域の中のガスは中心星から外側の方向にむかって運動し、中心付近では、最初の密度より低くなるからである。ところがオリオン星雲ではあきらかに逆である。したがってこの星雲は H II 領域になる前から中心部ほど密度の高い星間雲であったと考えられる。そこでその密度分布は、雲全体が等温で力学的に平衡なものであったとする。そして、ある時、この雲の中央で星が突然に輝き出し、弱い R-タイプの I.F. が進み出したとする。

以上の仮定のもとに、H II 領域の中のガス分布と速度分布をいくつかの時間ごとに計算すると第 6 図のようになる。これらと、観測データとを比較することによって



第 5 図 I.F. の半径と S.F. の速さの関係

たて軸は I. F. の半径 (pc)、よこ軸は、S.F. の速さを HI 領域での音速を単位としたもの。曲線 α, β, γ はそれぞれ $n_1=0.64, 6.4, 64(\text{cm}^{-3})$ 、曲線 a, b, c, \dots, h は、それぞれ $t=2.0, 1.5, 1.0, 0.5, 0.1, 0.05, 0.025, 0.01 (10^6 \text{ 年})$ である。



第 6 図 等温ガス球の H II 領域 (Vandervoort 1964) (a) 密度分布, (b) 速度分布

(a) たて軸 ρ は最初の中心密度を単位として測った密度、よこ軸 (r/r_0) はガス球の中心からの距離で、 r_0 はもとのガス球の大きさを示すパラメーターである。曲線につけてある数字は $C_2 t (\text{cm})$ ではかった年令である。但し C_2 は、H II 領域での音速。
(b) たて軸は C_2 を単位としたガスの速さ、他は (a) に同じ。

オリオン星雲の年齢として、14000年～23000年が推定された。この年齢は、オリオン星団の年齢 ($10^5 \sim 10^6$) とくらべるとかなり小さい。

5. まとめ

現在のところでは、H II 領域の進化については、以上に述べた程度のことしか調べられていない。オリオン星雲の場合は、少し詳しい議論がなされているが、他の H II 領域に、これらの理論をあてはめるにはもっと詳しい観測と、それに応じた理論が必要である。それについての問題点の主なものは、4. の第 (i) 項の終りに述べた。またその他に、3. の最初に述べた I.F. の誕生の問題が重要であろう、というのは、最初のタイプによって、進化の仕方はかなり変わることが想像されるからである。

なおここでは触れなかったが、I.F. の構造や安定性と

いうことも、進化に深く関係した重要な問題であることをつけ加えておく。

参考文献

- Abe, Y., Sakashita, S. and Ono, Y. 1963, *Prog. Theor. Phys.*, **30**, 816.
 Kahn, F.D., 1954, *B.A.N.*, **12**, 187.
 —and Dyson, J.E., 1965, *Ann. Rev. of Astr. and Ap.*, **3**, 47.
 Kaplan, S.A., 1966, *Interstellar Gasdynamics (Perseus Press, London)*.
 Lasker, B.M., 1966 *a*, *Ap. J.*, **143**, 700.
 —*b*, *ibid.*, **146**, 471.
 Mathews, W.G., 1965, *ibid.*, **142**, 1120.
 Vandervoort, P.O., 1963 *a*, *ibid.*, **137**, 381.
 —*b*, *ibid.*, **138**, 426.
 1964, *ibid.*, **139**, 869.
 1966, *ibid.*, **146**, 104.

学会だより

昭和42年度秋季年会 秋季年会は水沢緯度観測所において、10月24日(火)、25日(水)の両日行います。

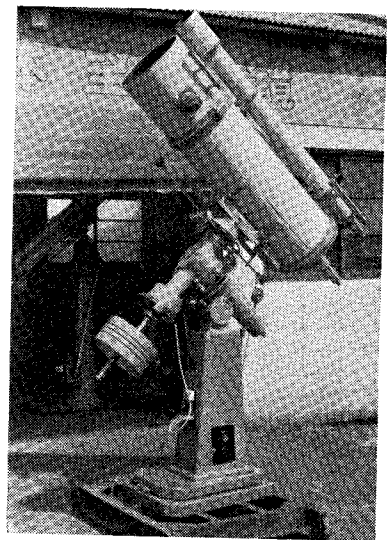
なお引続いて26日(木)には水沢緯度観測所の新庁舎落成披露式が行われる予定です。

宿舍の件については水沢で斡旋することになりました。右記の旅館に一括申込みます。

翠明荘旅館 水沢市表小路15、電(水沢)2936, 5021
 class A 1泊 1,300円, B 1,000円(1泊2食)
 個室は割高になります。希望者は宿泊期間、class 別、個室希望の有無、御夕食の予定、その他希望事項を水沢市緯度観測所若生康二郎宛 9月末日迄に御申込み下さい。出来るだけ御希望にそうように致します。

西村製の反射望遠鏡

- | | |
|----------|------------------------------------|
| 30cm “A” | カセグレン・ニュートン兼用
10cm 屈折望遠鏡 (f/15) |
| “B” | カセグレン焦点
15cm 屈折望遠鏡 (f/12) |
| 40cm “A” | カセグレン・ニュートン兼用
15cm 屈折望遠鏡 (f/15) |
| “B” | カセグレン焦点
20cm 屈折望遠鏡 (f/12) |



株式会社 西村製作所

京都市左京区吉田二本松町27

電話 (77) 1570, (69) 9589

カタログ実費90円郵券同封

30 cm 反射望遠鏡

ニュートン・カセグレン兼用