

# 自然現象としてのパルサー

浜田 哲夫\* 石塚 俊久\* 田中 靖夫\*\*

準星、X線源、OH輝線の発見などにみられるように、最近数年間に天体物理学の分野では新しい現象が次々に発見されている。今また奇妙な、しかし著しい特徴をもつ天体が発見された。すでに天文月報で報告されている(1968年6月号)ように、パルス状電波源、すなわちパルサーがそれである。最初の発見の報告があらわれてから一年たらずの現在までに、すでに10個のパルサーが発見され、その性質について数多くの研究がなされている。ここでは11月末までにえられた資料をもととして、パルサーについての研究の紹介をしよう。

## 1. 最初の発見

ケンブリッジ大学(英国)の電波天文学者ヒュウィッシュ、ピルキングトンとベルによるパルサーの発見と、それにつづくパルスの周期、正確な位置の決定を含む最初の報告が、1968年2月の「ネイチャー」(Nature)誌に発表された。

ヒュウィッシュらは数年前から、惑星間空間中のガスの運動によって、電波源からの信号にシンチレーションが生ずることに注目し、これを用いて電波源の視直径を測定することを計画中であった。1967年6月から、470m×45mの広さに配置されたアンテナと、時間定数の短い装置を用いてくりかえし掃天観測を行ないはじめた。

まもなく、観測の電波の中に奇妙なパルス状の信号が入ってくるのに気がつき、ヒュウィッシュらはその原因を数ヶ月間にわたって調査した。天球上の一定の方向(小狐座)でこの信号がくりかえし観測されることから、地球外からの電波であることが確かめられた。

パルスがほぼ1.337秒の規則正しい( $10^{-7}$ の精度)周期をもつことが判明すると、「地球外の知的存在からの信号」として一時ジャーナリズムの注目をあびた。しかし、視差運動が非常に小さいことから、このパルス状電波源の位置は太陽系外であると推定され、さらに他のパルサーが3個みつかるに及んで、パルサーは自然現象として認められたのである。

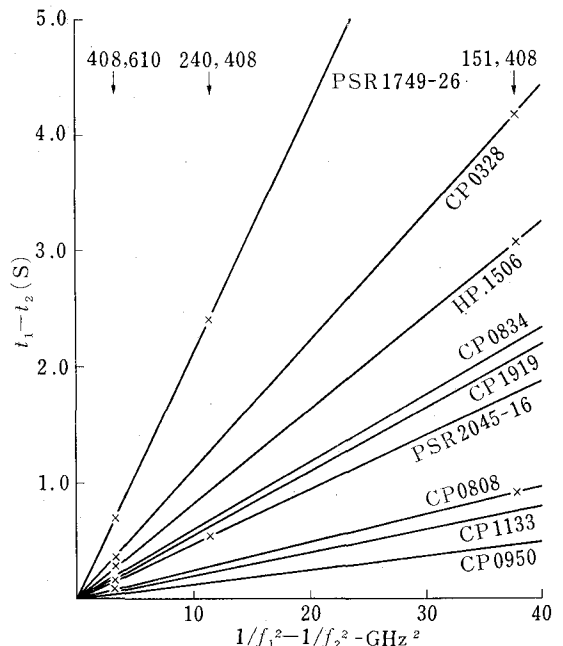
最初に発見されたパルサーは発見した天文台の名前とパルサーの赤経(及び赤緯)を用いて、CP 1919 (Cambridge Pulsar 赤経 19時 19分)と名づけられた。

## 2. どこにあるのか

パルサー発見がつかえられると、これまでヒュウィッシュらと同じようにシンチレーションの観測を準備していた電波天文学のグループは、一斉にCP 1919に注目し、かつ他のパルサーを求めて掃天作業にとりかかった。これまでにケンブリッジ大学のグループが6個、ハーバード大学(HP)で1個、シドニーのグループ(P.S.R)が2個、アレンボのグループ(AP)が1個のパルサーを発見している。これらパルサーとして報告されているものはすべて、① 弱い電波密度(平均  $10^{-26} \text{Wm}^{-2} \text{Hz}^{-1}$ )で、② 非常に正確( $10^{-7}$ の精度)な短かい周期(0.2秒から2秒の間)で、③ パルスを出している。これらの事実以外にもパルサーの性質を示すいくつかの重要な情報がある。

前述のとおり、誤差の範囲をこえる視差運動はみだされていない。視差運動を2分以下とすれば、パルサーまでの距離は1000天文単位以上ということになる。

パルサーからの電波と、種々の周波数帯で観測した結果、低い周波数でみられるパルスは高い方のパルスに比べて、おくれて到着することがわかった(第1図は各パ



第1図 9個のパルサーの到着時間の分散 (Lyne & Rickett, Nature)

\* 茨城大学理学部

\*\* 茨城大学教育学部

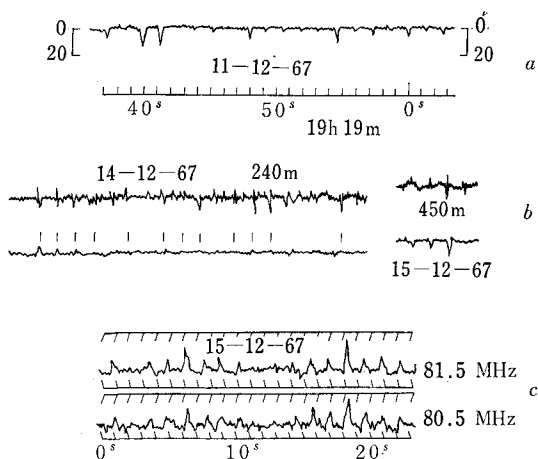
T. Hamada, T. Ishizuka and Y. Tanaka: The Pulsars

第 1 表

名 称	赤 経 (1950.0)	赤 緯 (1950.0)	周 期 (秒)	距離 (光年)	パルス幅 (使用周波数)	平均パルス強度 $\times 10^{-26} \text{W}/\text{Hzm}^2$
CP 0328	03 <sup>h</sup> 28 <sup>m</sup> 52 <sup>s</sup> ±15 <sup>s</sup>	55°±1°	$0.71446 \pm 10 \times 10^{-5}$	744	1つ山 (408 MHz)	0.8 (151 MHz)
CP 0808	08 08 50±30	75 10±30'	$1.29223 \pm 3 \times 10^{-5}$	180	1つ山 (408 MHz)	0.4 (151 MHz)
CP 0834	08 34 22±10	06 07 00±180"	$1.2737642 \pm 3 \times 10^{-7}$	397	1つ山 (408 MHz)	0.3 (408 MHz)
CP 0950	09 50 28.95±0.7	08 11 06±42	$0.25306504 \pm 3 \times 10^{-7}$	90	1つ山 (408 MHz)	0.8 (408 MHz)
CP 1133	11 33 36±0.2	16 07 36±18	$1.18791106 \pm 15 \times 10^{-8}$	152	2つ山 (408 MHz)	0.3 (408 MHz)
HP 1506	15 06±2 <sup>m</sup>	55 30±40	$0.73968 \pm 2 \times 10^{-5}$	608	1つ山 (408 MHz)	0.2 (151 MHz)
PSR 1749-26	17 49 48.8±0.3	-28 05 57±8	0.5621	1578	1つ山 (408 MHz)	
CP 1919	19 19 37.0±0.2	21 47 02±10	$1.33730109 \pm 1 \times 10^{-8}$	391	2つ山? (408 MHz)	0.4 (408 MHz)
AP 2015+28	20 15 45±20	28 31±5	$0.557968 \pm 3 \times 10^{-6}$	440	1つ山 (428 MHz)	
PSR 2045-16	20 45 47.6±0.4	-16 27 50±12	1.961	353	3つ山 (408 MHz)	

ルサーについてのおくれと周波数の関係を二つの論文からまとめたものである)。このおくれを、電波が媒質中を進むときの速さが周波数によって異なるために生じたものと解釈することは、それほど無理なことではない。電子と電波の相互作用を考えれば、そのおくれは周波数の二乗に逆比例し、電波が通過してきた部分の電子の数に比例する。

星間空間中の電子の数密度を一定とすれば、パルスの



第 2 図 ヒュウィッシュラによる最初のパルスの記録。a: 強信号の記録。b: 上の線はそれぞれ 240 m と 450 m だけの記録、下の線は通常の干渉計での記録。c: 80.5 MHz と 81.5 MHz での同時観測、前者は約 0.2 秒遅れている。(Hewish, Bell, Pilkington, Scott & Collins, Nature)

おくれからパルサーまでの距離を求めることができる。このようにして出した距離を第 1 表にのせてある。これらの値は、もちろん、距離の上限を与えるものであり、また星間空間中の電子の数密度の推定のしかたにも依存している。

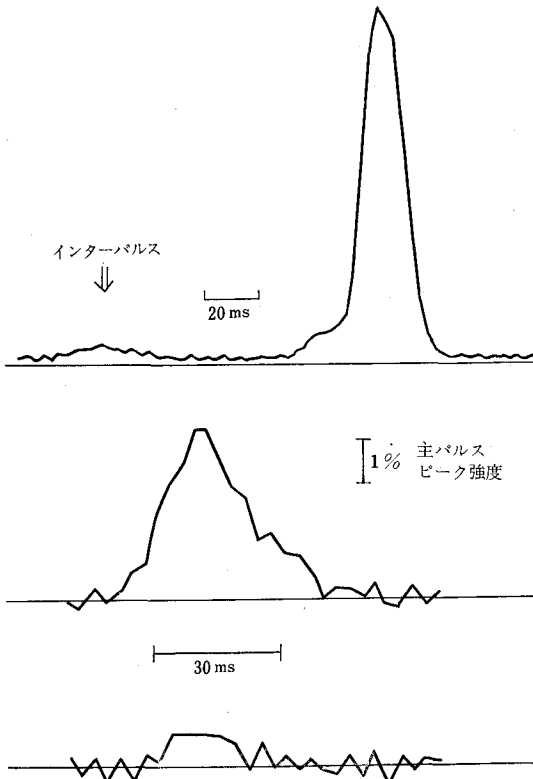
いずれにしても、CP 1919 で 126 パーセク、数百光年という距離であり、我々の銀河系の中での現象であることは間違いなさそうである。

### 3. どのくらいの大きさか

パルサーまでの距離がきまると、観測されているパルスの強度から、パルス状電波源が放出している輻射エネルギーを求めることができる。

CP 1919 の平均の強さは周波数 81.5 メガヘルツ (バンド幅 1 メガヘルツ) で  $10^{-26} \text{Wm}^{-2} \text{Hz}^{-1}$  であり、個々のパルスではこれの 10 倍以上になる。上で示した値 126 パーセクを用いると、1 パルス当り  $10^{28}$  エルグとなり、太陽の 1 秒間当りの全輻射の 10 万分の 1 という値である。非常に小さいエネルギーのようであるが、次にのべるような推定されるパルサーの大きさを考えれば「小粒ながらピリッと辛い」と言える。

受信機の周波数帯と時間定数を適当にとると、なだらかなパルスを記録することができる。第 2 図はヒュウィッシュラが最初の論文で発表した CP 1919 のパルスの様子である。又、CP 0950 からの代表的パルスを第 3 図に示した。このようなパルスの幅 (持続時間) を沢山のパルスについて平均した値は、ほぼ数 10 ミリ秒であり、



第3図 CP 0950 の主パルスとインターパルス。  
中段と下段は偏光を示す。  
(Ricket & Lyne, Nature)

パルスとパルスの間隔（周期）と大体比例関係にある。

一つのパルスはパルサーの異った領域から出てくる鋭いパルスからつくられていると考え、その幅は異った場所から出たパルスが地球にとどく時間のちがいで解釈することができる。従って、パルサーの大きさの上限は、(パルスの幅)×(光速)から計算することができる。おおよそ数 1000 km であり、太陽の半径にくらべて大体 100 分の 1 である。また、球状の形を仮定するならば、その表面積は太陽の 1 万分の 1 となる。パルサーが単位面積当たり出しているエネルギーは、太陽のほぼ 10 分の 1、ないし殆んど同じ程度の範囲の量となるわけである。

#### 4. パルスの構造とかたち

ところで、パルサーが発見されて非常な注目をあつめたのは、そのパルスのくりかえしの周期の正確さであることはすでに述べたとおりである。第 1 表にあるように周期は 0.2 秒から 2 秒の範囲であるため、短い時間の観測で十分な統計の資料がえられる。数個のパルスからなる資料を何 10 個となく沢山とり、その平均から周期を出すと、小数点以下 8 桁目までの精度で周期を求めることができる。

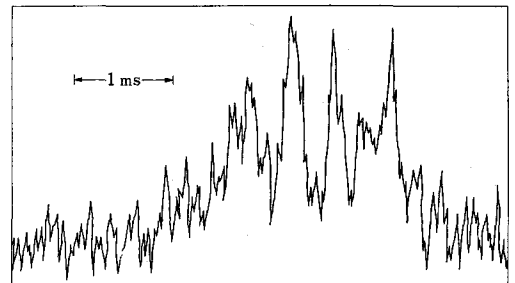
周期の上限と下限がどこまでひろがるかは興味深い問題である。上で述べたように、周期とパルス幅には大体比例関係がみられることと、規則正しい周期のパルスを出す原因とを考えながら、周期の範囲が与えられなければならないわけである。

短い周期のパルスの原因を考えることは比較的簡単かもしれない。けれども「人工的」とも思える高い精度ということも自然現象として理解することはなかなかむずかしい。ところが規則正しさということと全く対照的に、パルサーの現象の中には無秩序な現象が含まれていることがわかっている。第 2 図をみればわかるようにパルスの高さ（振幅）は同じパルサーに対して時間と共に変化していく。その変化は、例えば CP 1133 では、ある規則性があるという報告もあるが、必ずしも他の報告とは一致していない。

振幅の変化と観測した周波数帯との関係も明らかでない。例えば CP 0950 では、個々のパルスの強さは周波数には無関係に変化する。だから、151 メガヘルツで大きい振幅のパルスは、408、922 メガヘルツでも前のパルスより大きい振幅のパルスとして観測される。しかし、2 分間の平均の振幅は、周波数によって非常に異っている。例えば 151 メガヘルツでは、前の 2 分間に比べて減少しているのに、408 メガヘルツでは増加しているというように。このような事情は CP 0950 以外のパルサーにも共通している。平均の振幅の変化の時間的な割合も周波数によって、大変ちがっている。

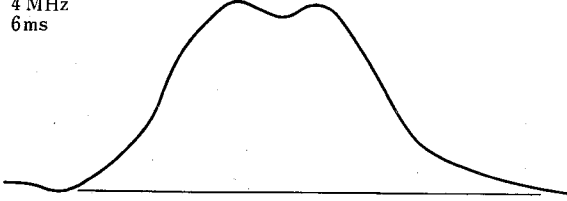
第 4 図は CP 1133 (周期 1.188 秒) のパルスの微細構造を示している。各々の鋭いパルスの幅は 0.3 から 0.4 ミリ秒であり、前述のようにして個々の鋭いパルスを出している領域の大きさを求めてみると数 10 km になる。これらの微細構造をパルサーの近くにある密度の高い気体の塊りによるシンチレーションの結果とする考え方もある。

受信器の時間定数を大きくして微細構造がかからない状態でパルスの形を問題にすることができる。そのために、数分又は数 10 分間にわたってパルスの形を平均す

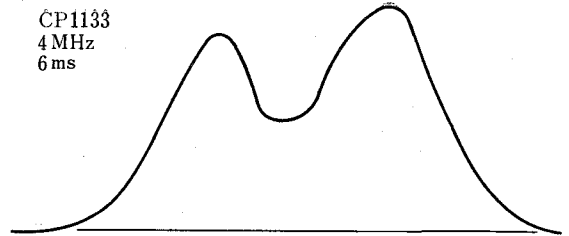


第4図 CP 1133 の主パルスの微細構造  
(Moffet & Ekers, New York Conference)

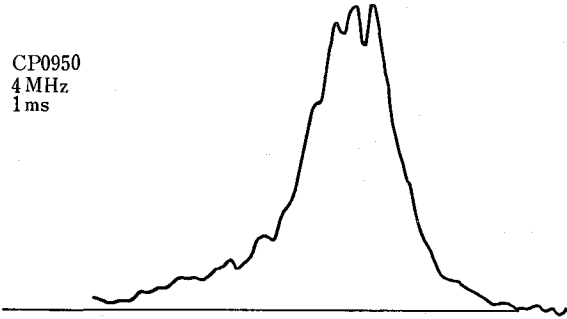
CP0834  
4 MHz  
6 ms



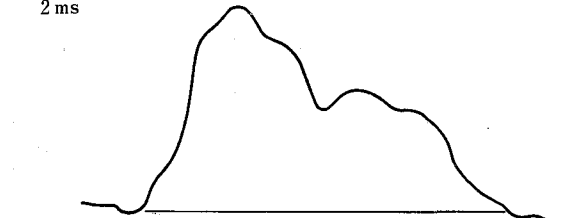
CP1133  
4 MHz  
6 ms



CP0950  
4 MHz  
1 ms



CP1919  
1 MHz  
2 ms



50ms

50ms

第5図 始めの4個のパルサーの8分間にわたって平均したパルス波形。408 MHzで観測。パルサーによってパルスの形が異なることがわかる。パルサーの名前の下に書いた数字は周波数、時間の分解能をあらわす。(Lyne & Rickett, Nature)

る。その結果をいくつかのパルサーについて示したのが第5図である。パルサーからのパルスは二重構造をもつものと、全体として一つのパルス状をなすものとのわけることができる。いまのところ大抵はパルスの形は周波数によらず一定のようであるが、最近の報告によれば、AP 2015のように周波数がちがうと平均のパルスの形が異なっているものもある。大体1秒より大きい周期をもつパルサーでは二重構造を示し、1秒以下のものでは一つのパルスのように思う。

更に、パルサーからのパルスには偏光がみられる。あるパルサーでは、各パルスの中の鋭いパルスはほとんど色々な方向に直線偏光しているが、他のパルサーでは円偏光しているという具合である。

最後に、第3図は CP 0950 のパルスに先行する、主パルスと主パルスの間にあるインターパルスを示している。主パルスの前、約100ミリ秒にあらわれる弱い、ほとんど直線偏光しているパルスであり、今のところ CP 0950 だけでみつまっている。

## 5. 何が見えるか

パルサーは、もともとごく小さい視直径の電波源の観測で見つけられたのであるから、パルサーの位置は比較的精密に定めることができる。赤経で大体0.2秒から1秒の誤差で定められているものがふえてきた。赤緯では誤差が数秒から十数秒というところまできている。こうしてきめた位置とその誤差の矩形を光学的星野写真上に

描くと、電波源と光学的天体との同定ができる。

CP 1919 では、誤差の範囲ぎりぎりの所に暗い(17.5等級)青い星がみられる。これは上に述べてきたパルサーの大きさの推定と結びついて、パルサーの本質についての手がかりを与えている。一方例えば CP 0950 のように、位置の精度が高く、その近傍にはほとんど光学的天体がみつからない場合もある。その光度は望遠鏡の限界以下であるから、もし同定されるべき天体があっても、太陽の場合の百万分の1以下であろう。CP 1919 に比較して CP 0950 は周期がみじかく、距離が近いということは注目しておく必要がある。さらに、CP 1133 のように、同定される可能性のある天体が赤い星であるというような報告もある。

CP 1919 の近傍のある青い星については、各地の大望遠鏡によって光度変化がしらべられているがまだ一致した結論はえられていない。例えば、光度変化の周期が電波のパルス周期の2倍程度である、また例えばその時の光度変化の上限は0.2パーセント以下である等々。この青い暗い星のスペクトル中にはカルシウムのH線とK線の吸収線が含まれていることが報告されている。さらに幅の広い(15オングストローム程度)水素の吸収線がみられる。

いずれにしても、今後もっと沢山の正確な同定が行われて、より豊富なパルサーについての材料がパルサーの本質についての理解を深めるのに役立つであろう。

## 6. どのように理解するか

これまでいろいろ述べて来た観測資料から、パルサーとは一体何ものかということについて、多くの理論家がいろいろな考えを発表している。理論家が何を考えようとも、その根底には我々が地球上で実証した物理法則は宇宙のはるかかなたでも成立しているにちがいないという確信があることは言うまでもない。

規則正しい周期的なパルスについては、最初のヒュウイッシュらの指摘につづいて、白色わい星又は中性子星の脈動に関連させて理解しようとする研究が大勢をしめている。光学的な脈動をしめす変光星の研究は、天体物理学の重要な分野として確立されつつある。その理論によれば、星の半径方向の脈動の周期は、星の半径と音速の比で大体きまる。これと力学的な平衡の関係式とを組み合わせると、脈動の基本振動の周期は、星の平均密度の平方根に逆比例していることがわかる。このことから、パルサーの短い周期は、密度の高い“固い星”の脈動に起因するという考えが出て来る。

よく知られているように、白色わい星の密度は  $1\text{cm}^3$  あたり  $10^8$  から  $10^{10}$  グラムであり、中性子から出来ている星では  $10^{13}$  グラムくらいである。このような高密

度の星の脈動の周期がどのくらいになるかについては、理論家によって必ずしも一致しないいろいろな計算結果が発表されている。若干の危険を覚悟して、これぐらいのところはまずまちがいのところと思われる点をあげてみよう。白色わい星の脈動周期は、中心密度が高くなるにつれて確かに短くなる。この傾向は、中心密度が  $10^{10}$  グラム/cm<sup>3</sup> をちょっとすぎるところまで続くが、それをこえると周期は逆に長くなる。このような事情は、直観的にはわかりにくいけれども、超高密度の状態では重要になる一般相対論の効果と、もうひとつ脈動に対する不安定性の問題がからんでいる。このようにして得られる極小周期は、星をつくっている物質の種類によって若干ちがうが、大体1.5秒から2秒くらいである。したがって、現在発見されているパルサーがすべて高密度星の脈動であるとは言いきれないと思われる。

もっとも、今のべた1.5秒とか5秒とかの値は、脈動の基本振動の周期である。もし、何らかの理由で、基本振動なしでそれより振動数の高い、したがって周期の短かいいわゆる陪振動が起るとすれば、1秒以下の周期を得ることが出来る。この点についても、すでにいくつかの研究が発表されている。さらに、脈動と自転とを組み合わせることによって、観測されている短い周期を説明



B 6判 122ページ  
定価250円 円55円

(お近くの書店でお求め下さい)

## ことしも天体観測は 「天文年鑑」で…… 1969年版 発売中!

- 観測の年次計画、季節計画、月別計画に――
- 毎日の目標決定に、ぜひご利用ください

毎日の天文現象が、1年を通してひと目でわかる観測ガイドブックです。惑星・月の出没図と時刻、木星の衛星の位置図と時刻、日食・月食・星食の予報、日面経緯度・視半径・均時差、太陽の月面余経度と月面緯度、惑星のこよみ、小惑星・彗星・流星・変光星の予報、日本の日出没時と月出没時、春分点の正中時、人工天体一覧、1年間の天文界のおもな動き、おもな天文書などを掲載すると共に、ユリウス日や天文常数など必要な資料はすべて収めてあります。特に1969年版では、天体写真撮影のための感光材料や露出のくわしいデータをさらに充実させました。星図と共になくてはならない本です。ぜひそなえて、広く活用してください。

圓洲 **天文ガイド** の 誠文堂新光社 東京都千代田区神田錦町1-5 振替東京6294番

しようとするところみもある。

変光星の理論の進歩にもなって、最近になって、脈動をきりめ方程式の中に入ってくる非線型性の効果が計算出来るようになった。その結果、脈動による半径方向の変位や密度の変化は、純粋な正弦波にならなくて、中間に小さな山が出来ることがわかった。そうすると、全体としては脈動の周期は2秒程度でも、その際出てくるパルスの間隔は1秒くらいになる可能性がある。

今まで考えて来た脈動とはちがった振動を考えている人もある。白色わい星とか中性子星とかが、結晶構造をもった固体であると考えて、そのねじれの弾性振動の周期を計算してみると0.1秒程度になるとの報告がある。さらにふたつの高密度星があって、その一方のまわりを他方がぐるぐるまわる際、軌道からわずかに外側へずれたり内側へずれたりする振動が起るが、その周期が1秒程度になり得ると考えている人たちもある。

以上ごく大ざっぱに、1秒乃至それ以下の周期を持つ力学的周期現象の可能性をみて来たわけだが、このような力学的現象と電波パルスの発生をどうむすびつけるかという問題が残っている。白色わい星の脈動がパルサーの本質だと考えている人達は、脈動で生じた音波が表面へ向って伝播して行きながら衝撃波に成長するとしてい

る。この衝撃波が星間ガスと相互作用をする結果パルス状の電波が発生する。その際必要となる磁場の問題とか、波のモード変換とかこの問題にはまだまだ未解決のことがたくさん残っている。

その他、高速度で公転する中性子星の連星系を考え、一方の中性子星からの光や電波が他方の重力場によって曲げられ強いパルスとなるというアイディアも出されている。しかし、1秒程度の公転周期で運動する高密度星からは重力波が放出されるはずで、その結果生ずる公転周期の変化はパルスの周期の変化として観測されねばならない。重力波の放出を禁止するためには、更に仮説が必要になるなどこのアイディアには難点が多い。

以上、現在までのパルサーについての観測資料、その理論的な解釈について、ごく大ざっぱにまとめてみた。何しろ1968年2月から9月までの間に、50篇以上の論文の発表があり、その上、ニューヨークとロンドンで、パルサーについての討論の会議が開かれている。こういう時点におけるまとめだから、せいぜいパルサーについてのノイズのひとつだと思っていた方が、筆者にとっては気が楽である。(1968年11月)

## 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 (771) 1570, (691) 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