

A 型 特 異 星 の 変 光

大 沢 清 輝*

1. はじめに

星のスペクトル型の B5 付近から A5 あたりにかけて、peculiar を意味する p なる添字を付けて呼ばれる“特異星”，略称 Ap 星なるものがおよそ 7 パーセントほど存在する。

こういう Ap 星のスペクトルでは，特別な元素の吸収線が異常に強い。それは星の大気の化学組成のためと考えられるが，その根本的な原因理由は未解決の難問題である。本稿ではそのような問題には触れないで，全く現象論的な範囲内だけで，Ap に関する研究の現状を紹介しようと思う。

すでに天文月報には，Ap に関する記事（文献 8）や国際シンポジウムの記事（文献 3, 9）が掲載されているので，多少の重複は御容赦いただきたいと思う。

2. Ap 星の分類

Ap 星には実にさまざまな種類があるが，非常に大きければ次の種類に分けて論ぜられることが多い。

Hg, Mn 型,

Si 型,

Sr, Cr, Eu 型.

この 3 分類は全くの「一応」であって，このような分類が現象の本質をよく説明しているかどうかは疑問である。ただし，Hg, Mn の型だけは他の型と一線を劃するらしい。そのわけは，Hg, Mn 型は他の Ap とちがって磁場を持たないからである。たとえ観測にかかりにくい形式の磁場があるとしても，その他の Ap との間一つの区別があると考えてよさそうである。

残りの 2 種類の区分については，全くの「一応」の分類であることを重ねて強調しておきたい。この 2 種類の区分については，本当は化学組成は同じで温度がちがうだけだ（Si 型の方が高温）という説があるけれども，それは事実と相違している。例えば，“Si 型”といっても，純粋 Si だけのものと“Si+Fe”と呼ぶべき型のものが約半々であり，さらに“Si+Sr”という，高温型と低温型の混合した型もあるのが実情である。Ap という一種類だけの特別な化学組成があって温度のちがいで諸種の Ap が現われるという考えは全く正しくない。

低分散（数十Å/mm ていど）の所見だけでも，Ap の

分類はこのように複雑なのである。高分散でくわしくしらべると，Ap の多様性はますます顕著になってくる。一例として，HR 465 という星は，低分散ではそう珍らしくない Sr, Cr, Eu 型のスペクトルをしている。ところが高分散でしらべた報告を見ると，異常過多になっている元素は Si, Cr, Eu の 3 種類だけではなく，P, Kr, Ga などの元素も正常値の何千，何万倍という異常過多になっているようである。

こういう情報は低分散ではとてもわからないのである。ウランなどの異常過多も星によっては見られるらしい。

それでは Ap 型には全く系統的な類別がないかというところ，そうではなく，やはり上に掲げた 3 種は最もザラにある典型だといって差支えない。化学組成でいえば，一般に Ap 型の通有性として，Eu などの「稀土類元素」が $10^3 \sim 10^5$ 倍も過多である一方，反対にヘリウム，酸素，カルシウムの量が欠損するのが一般的な通有性である。なお，Si（シリコン）は宇宙の化学組成として本来から H, He, O, N, C について多量に存在する元素であるために，過多といってもむやみな高倍率になるわけではない。せいぜい 2 倍ていどの多さにすぎない。いずれにせよ，星の光球層においてそれらの元素が異常過多であることだけは確かなのである。

3. 磁 場

1946年にはじめて星の磁場が発見されたが，その発見第 1 号は Sr, Cr, Eu 型 Ap として昔から名高い乙女座 78 星 (78 Vir) であった。太陽の黒点には 1910 年代から数キロガウスに及ぶ磁場が知られていたが，遠方から太陽を星として観測すれば，星面全体の平均としては磁場ゼロと観測されるであろう。ところがこの星 78 Vir では全表面が黒点のように 10^3 ガウス桁の磁場を持っているのである。この発見は全くの驚きだったわけである。

ひきつづいて多くの Ap 星に $10^3 \sim 10^4$ ガウスの磁場が検出され，その星の数は 50 を越えた。今までに知られた最大の磁場は Si 型の HD 215441 という星で，34 キロガウスにも及んでいる。これは地球の磁場の数万倍である。前にも言ったように，Hg, Mn 型の Ap には観測にかかるような磁場はないらしく，磁場は Si 型と Sr, Cr, Eu 型との独占現象であるらしい。星の磁場も地球のそれに似て南北両極を持つが，完全な双極子磁場ではなく，いくらか変形したものである。なお，星の磁場と

* 東京天文台 (52 年 4 月以後: 千葉大学) K. Osawa:
Light Variation of Peculiar Stars.

例えば、Ap 以外では白色矮星や中性子星に百万ガウス単位の磁場があるらしいが、本稿ではそれには触れない。

この磁場の原因と正体、ダイナモ作用か、化石磁場か、というようなこともまた未解決の問題になっている。

4. 週期的変化

Ap 型星の一部にスペクトルの変化するものがあることは何十年も前から知られていた。たとえば Eu のスペクトル線と Cr のスペクトル線とが 2~3 日おきに交代で強くなるというような現象である。古来、スペクトル型の符号のあとに v という添字を付けて A2pv などと呼ばれていたのはこの種の星である。

スペクトルが変化するばかりでなく、その週期に同調して星の明るさと色指数も変化しているが、大体は振幅 0.1 等級以下なので、観測は易しくない。不思議なことに、Ap 型としてスペクトルの特異さが甚だしく顕著であっても、それが時間的に変化するとは限らず、いつでも同じ顔をしている Ap 星もある。しかし、変光の振幅の大きいものは必ずスペクトルの変化の幅も大きい。すなわち、

性質 (1): スペクトルの変化の振幅は明るさの変化の振幅に正比例している。

Ap 変光のもう一つの特徴は、波長によって変光の位相が逆転することである。第 1 図は我々のグループが岡山で発見した HD 221568 という Ap 変光星の光度曲線であるが、V (実視) 等級が明るくなるときには B (青) 等級は最も暗くなっている。逆に B が明るいときには V は暗くなる。すなわち V と B とが位相逆転してい

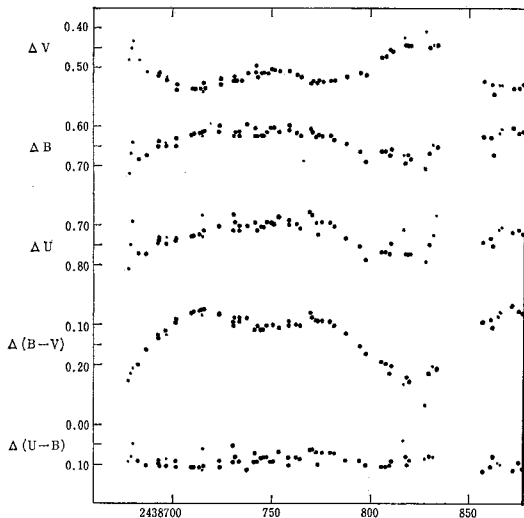


図 1 HD 221568 の光度曲線。発見直後の部分のみを示す。実視 (黄色) 等級 V と青色等級 B とで曲線が逆向きになっており、その結果色指数 (B-V) の振幅は非常に大きい。

る。その結果として色指数 (B-V) は V が明るいときに最も赤くなり、V が暗いときに最も青くなる。この星に限らず、他の Sr Cr Eu 型の変光星はみんな同じ傾向を持っている。

ふつうの常識では、色指数は星の温度を表わすと考えられる。青い星 (B-V が小さい) は赤い星よりも高温度と解釈するのが当たり前である。セファイドのような変光星でもこの常識は大体あてはまっていて、明るい時に色が青く、暗い時に色が赤いのがふつうである。

しかし、今問題にしている Ap 変光星では、星が赤いときに明るいから、星が低温度になりつつ非常に大きく膨張するのだろうか。しかし視線速度はそうではないことを示している。つまり、Ap 変光星に見られる色

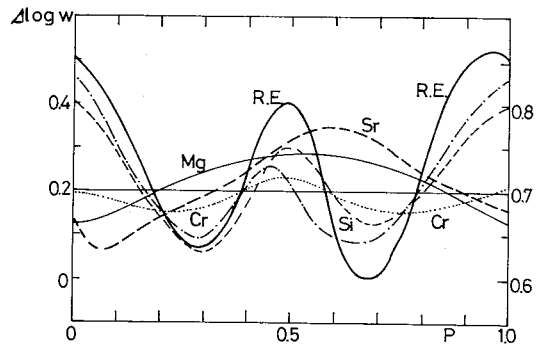


図 2 HD 221568 のスペクトル線の変化。縦軸は吸収線の等積幅の対数の変化分を、横軸は変光の位相を示す。位相は周期 158 日を単位とし、V 等級が最も明るいときを位相 0 とする。(小平氏の観測による) (文献 2)。

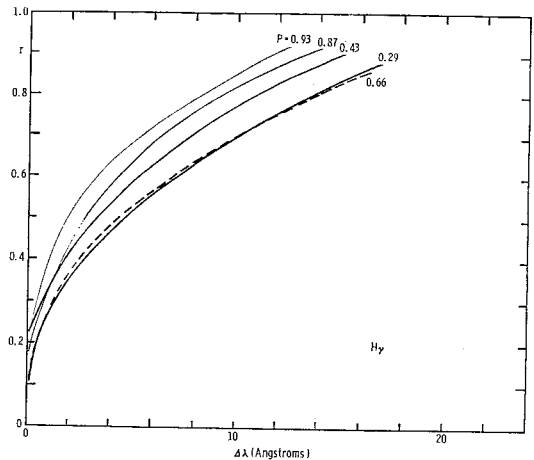


図 3 HD 221568 の水素 H γ 吸収線の形状の変化。この図に示した 5 つの位相のうちで、水素線が最も弱いのは P=0.93、すなわち星の V 等級が最も明るくて色指数が最も赤いときである、P=0.29, 0.66 のときに水素線は最も強い、このとき V 等級は最も暗く、色指数は最も青い。

の変化は温度の変化以外のことと解釈しなければならないのである。これについてはまた後で (§7で) 述べる。

黄色の V 等級と青色の B 等級とで変光の位相が逆になる珍現象は、つい数年前までは Sr Cr Eu 型だけの現象だと思われていた。Ap としては高温度の部類にはいる Si 型のもは、U, B, V では変光位相がみんな同じだからである。ところが最近 OAO-2 号衛星によって 3000 Å 以下の紫外域をしらべたところ、第4図の例 ($\alpha^2 CVn$) に見られるように、紫外域では位相が逆であることが発見された。そして次のような重要な性質がわかってきた。

性質 (2): Ap の変光星のすべては、どこかの波長を境として、長波長側と短波長側とで変光の位相が逆になる。

性質 (3): 位相逆転の境界になる波長は、星の温度が高いほど短波長である。

性質 (4): エネルギーを全波長にわたって合計した値 (積分値) は変光にかかわらず常に一定である。

Ap 変光星の変光とあいまって、その磁場も同じ週期で変化をくり返している。つまり Ap 変光星は“磁変星”でもあるのである。光と磁場の位相関係は星によってまちまちである。光の最大が磁場プラス最大のときに起るものと、磁場マイナス最大のときに起るものとが約半数ずつある。また、磁場またはその変化の振幅と光の振幅との間には明らかな関係はない。結局、磁場の変化と変光との間には何らかの物理的関係があるらしいけれ

ども、その関係は直接的な強い関係ではなくて、磁場が先ず化学組成に効き、その化学組成が変光に寄与する、というような間接的な関係であると考えられる。

5. 脈動説と自転説

以上述べたような現象は、すべて Ap 変光星だけに特有な不思議な現象ばかりである。磁場、スペクトル、光 (及び色指数)、この三者の変化の現象を、現象論的にもよいからどう解釈したらよいのであろうか。

その解釈には大別して脈動説と自転説の2種類がある。歴史的には脈動説がやや早く、磁場の発見された直後の1949年に M. Schwarzschild によって提起された。当時は磁気流体力学 (MHD) の発展期であり、その一つの応用として磁変星を MHD 振動の定常波として解釈したのである。星を非圧縮流体と仮定して、星が扁平になったり扁長になったりの脈動をくり返して磁場も変る、すなわち磁変星なのである。このモデルでは化学組成のことには触れられなかった。

その後、脈動説としてもっと現実的なモデルが提案された。それは星の最外層だけが横に移動するような“横揺れ脈動”の説である。図5の上下図に示したような2つの状態が数日の週期でくり返される。星の表皮が磁

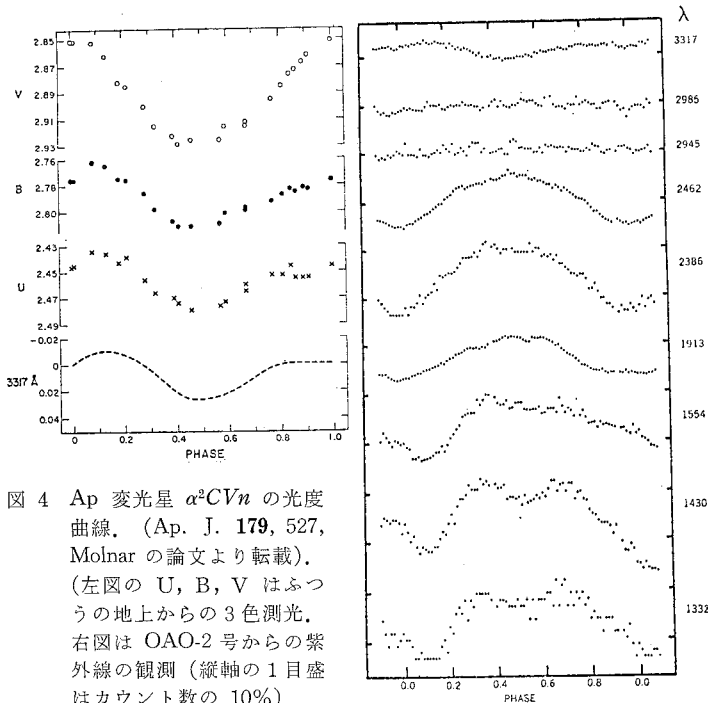


図4 Ap 変光星 $\alpha^2 CVn$ の光度曲線。(Ap. J. 179, 527, Molnar の論文より転載)。(左図の U, B, V はふつうの地上からの3色測光。右図は OAO-2 号からの紫外線の観測 (縦軸の1目盛はカウント数の10%)。

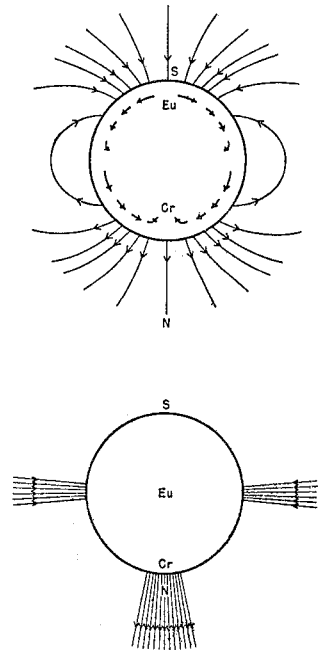


図5 Ap 型変光星の横ゆれ脈動モデル(文献5)。星はこの2つの状態を交互にくり返す。自転はしないが、観測者から見れば磁場もスペクトルの特異さも (たぶん明るさも) 変化してみえる。

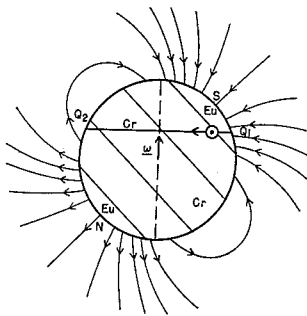


図 6 Ap 型変光星の自転モデル (文献 5)。この図のモデルは最も簡単な場合の一例である。磁場の南極と北極とに Eu など稀土類の多い「大陸」があり、磁場の赤道付近に Cr の多い

ベルト大陸がある。星は ω なる軸のまわりに自転する。

◎印が太陽系から見た視線が星面を切る点を示し、矢印をつけた小円がその点の軌跡である。

力線や元素の偏在した状態を載せたままで星の半球面 (数百万 km) を往復伸縮するモデルなのである。

この説と同時に同じ著者 (A. J. Deutsch) が、自転説による説明をも提案した。この説 (図 6) では星の表面に磁場と元素の不均一な分布があり、脈動のような変化は一切しないが、星が数日の週期で自転するので、これを横から見れば磁場やスペクトルが変化するように見えるのである。地球のような固体化した天体ならばいざ知らず、ふつうの星は全くのガス体で、しかも 1 万度以上の高温である。その表面で化学元素の不均一な分布があるということは常識では考えにくい。しかし、現象論としてはそう考えれば説明がつく、というわけである。

1965 年頃までは脈動説と自転説とが、およそ五分五分の形勢で競っていた。磁変 Ap 星のいろいろな現象が、どちらの説によっても一応は説明がつくので、片方だけが勝利をおさめるわけにできなかったのである。しかし、1965 年ごろから後は、自転説による説明が細かい部分にまで成功する例がいくつも現われた。横ゆれ脈動というような無理な考えをする必要がなくなってきたのである。現在では、従って、自転説の方が賛同者が多くなっている次第である。

6. 自転モデル

すでに数個の Ap 変光星について化学元素や磁場の分布の解答が出された。その解きかたは、それらの分布 (もちろん元素ごとにかがう) が球面調和関数で展開されると仮定して、その係数を観測 (吸収線の等積幅と視線速度の周期的変化) に合うように決定するのである。

$\alpha^2\text{CVn}$ という星はこの方法が最もうまく成功した例である。結果は第 7 図に示したように、鉄や Cr は星面の 4 カ所に密集し、稀土類は他の 1 カ所だけに密集している。稀土類が濃縮されている「大陸」は磁気のマイナス極に近いところにある。

吸収線の等積幅と視線速度との関係はきわめてコンシステントである。第 8 図に見られるように、速度が負から 0 になるときに等積幅が最大となり、速度が正 (後退) に転じた後は等積幅は減少する。つまり、その元素が濃密に存在する斑紋が星の縁辺から出現し、自転につれて次第に星面の中央に近づく。そして中央子午線を通過するときに速度 0 となって強度最大となり、以後は次第に縁辺に向って消えてゆくようすが忠実に表われているのである。鉄類が濃密になっている 4 つの斑紋は、一度には 2 個ずつが見えている。他の 2 個は裏の半球面にある。吸収線はいつも 2 成分ずつに分離でき、出没遠近の運動と各成分の強弱推移との関係も首尾一貫しているのである。

これは非常にうまく解が得られた例であるが、すべての磁変 Ap がこのようにうまく解けるとは限らない。たとえば自転軸と視線とのなす角は方程式に線形でない形ではいってくる等の理由で、唯一解を求めにくい場合もある。とはいえ、 $\alpha^2\text{CVn}$ 星の観測事実を、自転以外のモデルで説明することは至難のわざである。たとえば、脈動説によって鉄の 4 成分と稀土類の成分との消長推移を説明することが果して可能だろうか。よほど複雑奇妙な横ゆれを考えなければならぬだろう。

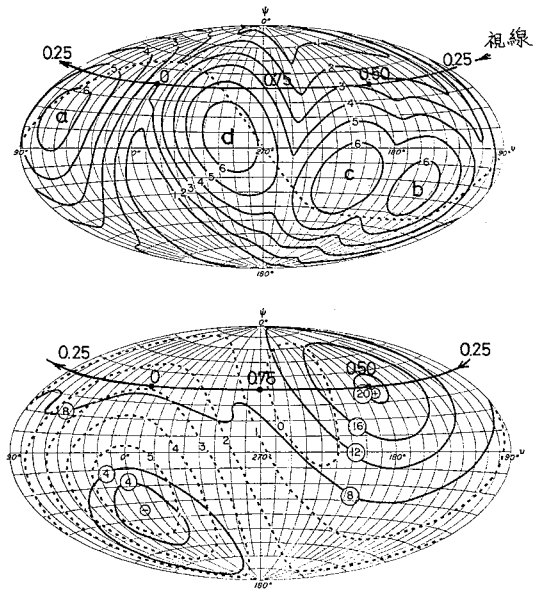


図 7 $\alpha^2\text{CVn}$ 星のモデル (文献 6)。星の全表面をアイトフ式等積投影法によって展開してある。視線が星面と交わる点の軌跡は矢印で示し、数字は 1/4 位相ごとを示す。上図のコントア線は Fe, Ti, Cr, 下図の破線コントアは稀土類の等積幅の分布を示す。下図の実線は磁場の強さ、+、- は双極子成分の南北両極の位置を示す。

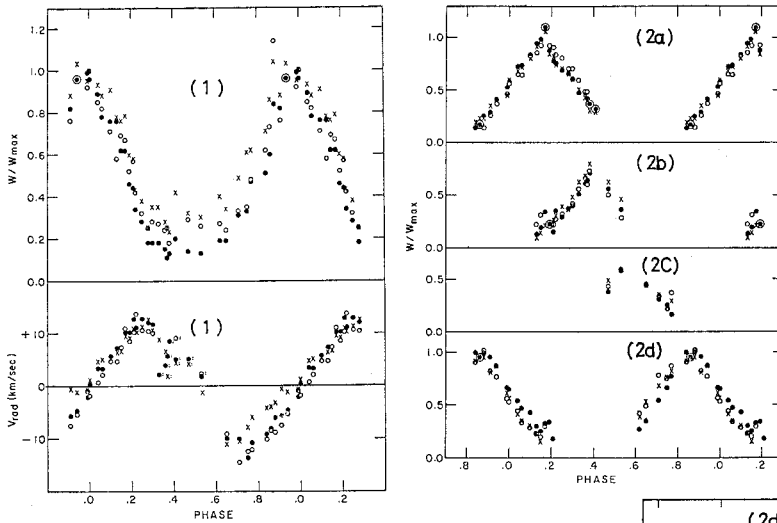


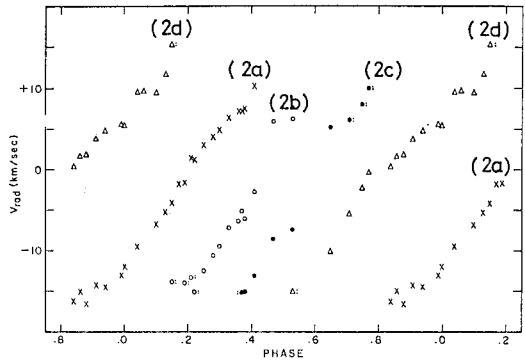
図 8 α^2CVn の等積幅と視線速度. (Pyper, ibid より転載)

(1) は稀土類 (Eu, Gd その他)
 (2) は Fe, Ti, Cr で a, b, c, d の 4 群がある.

←等積幅

↓視線速度

この一事を以てしても、自転説の有利であることは否定できない。我々の HD 221568 は、週期が長すぎて視線速度の変化 (たぶん $\pm 2\text{km/s}$ 以下) が小さいので、 α^2CVn のようにエレガントなモデルを作ることができない。(文献 10)。また自転モデルでも、星が完全な球とは限らない、という考えもあり、この星の視線速度は将来の研究課題である。



'78 アストロ・カレンダー

10月末刊

'78 星日記

10月末刊

星座への招待

藤村山定 旭男 著
 ¥980

新版 天文学への招待

藤村山定 旭男 著
 ¥980

藤井旭
 星の旅

望遠鏡とカメラを肩に、星空を見上げて歩いた世界の旅。異国の空に出会った星と人との語らい。980円

野尻抱影
 星アラハスク

星を愛し、星の魅力を語りつづけた著者が、とっておきのエピソードとともに綴る星空の歳時記。950円

7. 変光の解釈

変光の曲線をうまく解析して星の輝度分布を知りたいけれども、それは原理的には難しい。輝度分布には吸収線とちがって視線速度がないので、調和解析をするためには方程式の数が不足なのである。

とは言え、実際問題としてはすでに述べた変光の性質(1), (2) (3), (4) から、その本質にせまる推理をすることができる。ここでは小平桂一氏(文献 7, 8)の考えに従って HD 221568 の変光(第1~3図)の現象論的解釈をしてみよう。

まず、稀土類の吸収線の強いときに V 等級が明るくなる。つまり稀土類こそは変光現象の責任者なのである。稀土類のイオンは紫外域に多数の吸収線を持つ。可視域のスペクトルで稀土類の線が強いときには、そのイオンが紫外域の多量の輻射エネルギーを吸収し、そのエネルギーは可視域で放出される。そのため、可視域の連続スペクトルは、温度が上昇したように見える。可視域では大気の高温部が透けて見えるようになるからである。かくして稀土類の密集部が星面の中央に見えている時には星の V 等級が明るくなるばかりでなく、水素のバルマー線も高温化して A5 から B5 になったように変化して弱くなる。(第3図)。

しかし、B 等級の波長域ではローカルな稀土類吸収線の増強のために、結果的には逆に減光になってしまう。即ち色指数(B-V)が赤くなる。色指数の赤変を、常識に反して実は高温になったのだと解釈するところに小平氏の説のポイントがある。

HD 221568 という星は変光振幅が特に大きく、水素の吸収線も顕著な変化を示す場合であるが、他の Sr Cr Eu 型の Ap 変光星の変光星はすべてこの星と同様に解釈をすることができると思われる。

Si 型の星の変光についてはその変光の責任者を適確に指定することはできないが、稀土類か、クロームか、または Si か、いずれにせよ原理的には同様の解釈が成り立つと考えてよからう。

このように、現象論の範囲では Ap の解釈は最近数年間に大きな発展をとげた。磁場と化学組成の関係の理論的解釈の進展とあいまって、その謎の解かれるときも案外に近いのではないと思われる。

参 考 文 献

- (1) 大沢清輝: 東京天文台年報 Ser. II, 9, 123 (1965).
- (2) 大沢清輝: Cameron 編 The Magnetic and Related Stars (Mono Book Corp., 1967).
- (3) 大沢清輝: 天文月報 59, 2月号 (1966).
- (4) 西村史朗他: 東京天文台年報 Ser. II, 11, 123 (1967).

- (5) A. J. Deutsch: Publ. Astr. Soc. Pacific, 68, 92 (1956).
- (6) D. M. Pyper: Ap. J. Suppl., 18, 347 (1969).
- (7) 小平桂一: Astr. & Astrophys., 25, 93; 26, 385 (1973).
- (8) 小平桂一: 天文月報 63, 2月号 (1970).
- (9) 小平桂一: 天文月報 69, 1月号 (1976).
- (10) 小平桂一: I.A.U. Colloq. No. 26 603, (1975).

掲 板 示 Ⅱ

東京大学宇宙航空研究所助教授公募

下記より助教授1名公募します。

東京大学宇宙航空研究所長 森 大吉郎

1. 専攻分野……X線天文学, 高エネルギー天文学, 飛翔体による観測を主とする。現在小田稔教授在任
2. 提出書類……研究歴及び将来に対する抱負, 履歴書, 論文リスト及び主な論文の別刷, 推薦書2通または意見をもとめることの出来る人2名以上の名前
3. 締 切……1977年10月31日
4. 連絡先……(〒153) 東京都目黒区駒場町 4-6-1 東京大学宇宙航空研究所 小田 稔

地学・天文の随筆

素顔の北極星

— 内 容 — 早川 和夫

☆素顔の北極星

●太陽ライター●やまと隕石●火星とローエル天文台●土星のリング●高松塚の星など地学、天文にわたる興味ある話題百編(写真、図付き)。

☆天文測量による国境線の劃定

(北緯50度、旧樺太国境線)

天文観測による国境線設定を見事に成功させ、後世の模範と賞賛された日露両国天文学者たちの協力と業績。

☆W.S. クラーク先生と隕石研究

“Boys Be Ambitious.” の名文句を残して北海道を去ったクラーク先生は、若き頃隕石の研究で学位を取得した——。先駆者としての博士の知られざる一面。

■四六判 248ページ (写真、図 110枚)

■定 価 980円 (送料 160円)

7月下旬発売

札幌市中央区大通西3丁目
〒060-91 ☎ 221-2111
振替 小樽 28398

北海道新聞社