

# 星のコロナ

成相 恭二\*

## 1. はじめに

「星にもコロナがあるんですか」

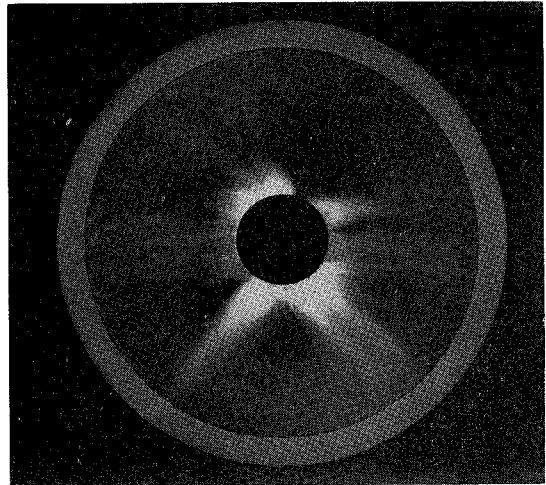
私が星のコロナを研究しているというと、たいいていの方がこうききます。天体物理学を専門としている人だと、「温度は数百万度あるんでしょう」とか、「わかった。対流層が深い低温の星ほど強いコロナがあるんでしょう」とか聞きますし、少し懐疑的な人は、「星にコロナはあるかもしれないが、何も観測することができないでしょう」とおっしゃいます。確かにこういう質問はもっともなのですが、現在では私のほかにも星のコロナの研究している方もいらっしゃいますし、上の質問にも納得の行く答ができると思いますので興味のある方は以下をお読み下さい。

## 2. 太陽：星の研究の出発点

化学組成とか対流層とか星の研究をするときはいつでも太陽の研究がお手本になります。ですから私達も太陽のコロナについて復習してみましょう。現在では、空気がきれいで散乱光の少ない高山でコロナグラフを使って、いつでも太陽のコロナは観測されていますが、コロナを見るのに一番良いのは日食の時です。これはコロナからの光は太陽面からの光の百万分の一くらいしかないので、少しでも太陽からの光が残っているとその光にまけて、コロナからの光は見えなくなってしまうからです。コロナの光の大部分は電子が太陽からの光を散乱させているものです。日食のときにとった写真を解析して電子密度分布が求められます。密度分布は太陽活動の状態によって変わりますが、太陽半径の倍のところでは  $10^8$  コ/cm<sup>3</sup>、3倍のところではその 1/10 くらいです。温度は百万度から数百万度の間です。これは、

1. コロナ線と呼ばれる電離の進んだ金属の輝線が観測されること、
2. その線の幅を熱的ドップラー効果とすると数百万度の温度でなければならないこと、
3. コロナの拡がりはやはり数百万度ないと説明できないこと、などからわかります。

最近ではさらにX線や紫外線の観測からも高温であることがわかっています。コロナの写真を詳しくみるとスト



第1図 太陽コロナ。1970年3月。メキシコにて東京天文台の齋藤国治氏が特殊フィルターを用いて撮影された。

リーマーと呼ばれるすじが放射状にできています。コロナの拡がりや形は黒点の活動状態と関係が深く、11年の周期で変化します。黒点活動の最盛期には円く大きく、活動が静かなときには両極方向へのひろがり方が少なく、赤道方向にひしゃげたようになっています。

コロナの外側には高速の粒子流があり、太陽風と呼ばれています。この存在は月ロケットや金星ロケットにつんだ装置で確かめられました。その結果わかったのは、

1. 流速は、300~800 km/s、
2. 主に水素からなり粒子密度は、 $1\sim 10/\text{cm}^3$ 、
3. 平均温度は10万度、
4.  $1\sim 5 \times 10^{-5}$  ガウスくらいの磁場をもつ、
5. 太陽面活動と密接な関係があり、特に27日の太陽自転周期で変動する地磁気変動と対応して粒子密度や速度が上昇する、

ことなどです。

エネルギーが光の放射、熱伝導、対流などのように温度の高い所から低いところへ流れる形だけで運ばれるのなら、 $6,000^\circ\text{K}$ の太陽表面の外側を百万度のプラズマがとりまくはずはないのですが、実際にそういうものがあるのですから何か他の方法でもエネルギーがコロナに運ばれているわけです。さてその答にいくまえに太陽の表

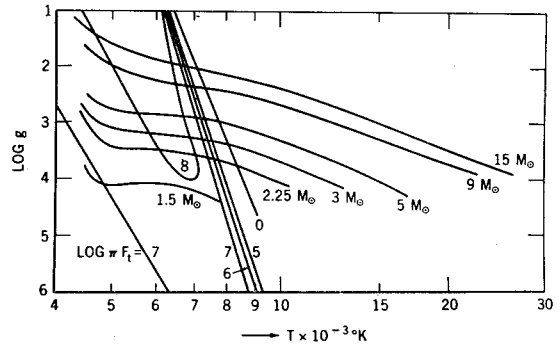
\* 東京天文台  
Kyoji Nariai: Stellar Corona

面、クロモスフェア、コロナ、太陽風にかけてどのような方法でエネルギーが運ばれているか復習してみましょう。光の拡散は太陽の中心から表面までエネルギーの大部分をはこびますが、表面近くの半径の  $1/10$  くらいの領域では水素が電離しかけているために対流の方が放射より効率よくはこびます。これは、電離しかけのガスは電離エネルギーの分だけ余分に熱を加えないと温度があげられないために比熱が大きく、断熱勾配が小さいという、対流につごうの良い条件を満たすからです。ところがコロナは密度がうすいので光の放射は通りぬけてしまい対流もおきません。完全電離しているガスの熱伝導係数は、 $K = T^{5/2}$  で、コロナのような高温だとごく小さな温度勾配があっても熱をはこんでしまうので、コロナの中は等温に近い状態になっています。実際はあるところから先は外に行くに従って極くゆるやかに下がっていて熱伝導で熱が外に流れだしていると考えられます。クロモスフェアからコロナにかけては温度が急上昇しているので、コロナの熱はここでは内向きに流れています。クロモスフェアやコロナのガスは輝線スペクトルやX線の放射でもエネルギーを失います。さて、こうして熱伝導や輝線、X線で失われるエネルギーは光球下の対流層でつくられる波が上方に行くにつれてショック波となり、まわりのガスを暖めるためと考えられています。波は音波、アルフベン波(磁場がある場合)、重力波などが考えられ、それぞれについて詳しい計算がなされていますが、まだすべてを説明しつくしたわけではなく、問題点は残っているようです。さてこういうエネルギーの出入はオスターブロックの推定ではクロモスフェアで  $10^7$  erg/cm<sup>2</sup> sec, コロナで  $10^6$  erg/cm<sup>2</sup> sec で、エネルギーに関してはクロモスフェアのお余力でコロナができていといえます。そしてライトヒルによる乱流からの音波の発生をオスターブロックが太陽大気に応用したところでは、クロモスフェア、コロナからのエネルギー消費量に見合うくらいの音波エネルギーが対流層でつくられているそうです。

太陽風の研究はパーカーによってはじめられましたが、太陽風による角運動量放出はプラントが彗星の尾の観測を整理してだしたのが最初で、その後ロケットによるデータが使われています。プラントによると角運動量が  $1/e$  になる時間は  $3 \times 10^9$  年です。その後、ウェイバーとデイビス、モディセティ、メステルなどが理論に従って計算をしています。

### 3. 星のコロナ

今まで復習した太陽のコロナについての知識をもとにして、どのような星にどういふコロナやクロモスフェアがあるのか検討してみましょう。まず必要条件として対



第2図 等高線は音波エネルギー流量。横軸は表面温度。縦軸は重力の対数。斜めの線は原始星が重力収縮のあと主系列星になるまでの径路。

流層が存在することがあげられます。対流層がないと星の中心で発生したエネルギーは表面まで光ではこぼれるだけで、波が発生する場所がないからです。対流層は水素の電離が中途のところにあります。ですから表面温度で  $8,000$  から  $10^4$  K を境にしてそれより高温の星は対流層がないが、それより低温の星には対流層があり、したがってクロモスフェア、コロナがあるということになります。コロナは直接観測するわけにはいきませんが、クロモスフェアはカルシウムのK線を観測することによってその存在を確かめることができます。K線はひろい吸収線です、が中心に輝線があり、クロモスフェアでできていると思われています。ヘール天文台のウィルソンはF・G・K星のK線の強度や微細構造を研究し、年令の若い星ほど輝線が強いことや、巨星や矮星の判別をする有名なウィルソン・バップ効果などを見つけています。

対流層はF型では表面にうすくあるだけでですが、M型になると対流層の深さは中心のごく近くまでとどいています。さてそこで対流層の厚い低温の星ほどコロナ活動が強いだろうというこの文の最初の質問にかえりましょう。答を先にいえば対流層のうすいF型星の方が波にエネルギーを多く与えるのです。対流で熱をはこぶときは比熱、密度、速度ともに大きい方が沢山はこびます。ところでこのうち比熱はあまりかわりませんが、密度は深くなるとどんどん大きくなります。一方エネルギー流量は星の中心で起る核反応によってきまる与えられた量ですから速度は深くなる程小さくなります。ライトヒルによると音波エネルギーの発生量は速度の8乗に比例する量なので表面近くにピークがあり、深いところの影響は少ないのです。温度の低い星では表面で水素はほとんど中性で、対流層はすこし奥の温度があがり水素が電離しかけたところから始まります。すこし奥ということは密度が高いということで、したがって音波発生量が小さく

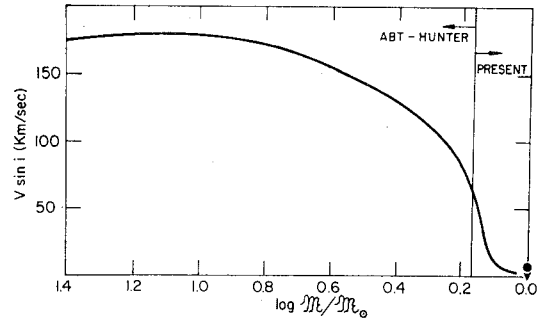
なるというわけですが、もっとくわしいことまでいうと磁場がどうなっているか、速度分布をしらべるのにヴィテンゼの混合距離理論では大まかすぎないか、発生するのは何の波かなどと問題はありますが、上の説明で要点だけは述べていると思います。

次にコロナの温度の問題を考えてみましょう。この問題については1967年12月の「天体の紫外放射と赤外放射」シンポジウム集録に内田豊さんの解説がありますので、そこにでている穴あきバケツの例で説明しましょう。コロナは底に注入のついた穴あきバケツのようなもので、下からの注入がエネルギー入力、まわりの小穴が放射損失、バケツの深さは重力ポテンシャルの深さ、中の水の高さが温度をあらわしています。注入の量が少なくて水の高さは水もれと注入量のバランスできまり、注入量が多くなると水の高さはバケツのふちまできて、それから星風が増加します。実際に入っているのが気体であるために注入量が少なくても星風はありますし、三次元の重力ポテンシャル中にあるために、でて行く星風は超音速になるのですが、温度は  $RT/\mu$  と  $GM/R$  がほぼつり合うという結論はわかりません。太陽のコロナの温度を  $10^6$  K とすれば白色矮星のコロナは  $10^8$  K、巨星のは  $10^9$  K、超巨星になるとコロナと呼べるかどうか疑わしく、彩層から星風の領域へすぐうつってしまうのではないかと思います。

#### 4. 星の自転のデータ： コロナ星風の存在する証拠？

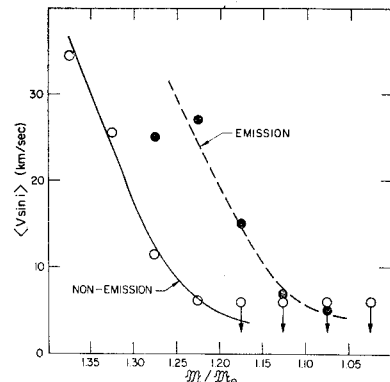
クロモスフェアの存在はカルシウムのK線の観測で知ることができますが、コロナや星風については「上の説明でわかった。しかし、理論的な興味はあるが観測とは結びつかないではないか」とおっしゃる方もいらっしゃるでしょう。そういう方のために間接的ではあるが観測的な証明となる自転の問題を説明しましょう。途中のコロナも星風も観測できないのでいささか「風が吹けば桶屋がもうかる」式の感じがするのですが。

星の自転速度はスペクトル写真をとってスペクトル線の幅を測ると自転運動によるドップラー効果がいくらかということからわかります。自転速度は第3図にみられるように質量の大きな星では100 km/s をこえていますが、太陽質量の2倍から1.5倍のところでは急激に少なくなり、10 km/s 以下になります。この小さい自転速度の領域は対流層がある領域とよく一致するので長いこと何か関連があるのだらうといわれていました。シャツマンはフレアの時に飛びだした粒子が磁場に沿って動く間に角運動量を得、その反作用として星の自転にブレーキがかかるという、いわゆるシャツマン機構を提案しました。星から離れる物質が磁場に沿って動くのではなく、ただ自由に離れるものとする、表面にいたときの



第3図 星の自転と質量の関係。クラフトによる。

角運動量だけをもっていくわけですから星の自転に影響しません。この制動機構は例でいうとクルクルまわっているフィギュアスケートの選手が両手をばっとひろげるとまると似ています。シャツマンは対流層と関係が深くて粒子をだす機構としてフレアを考えたのでしようが、太陽風が存在を知っている私達としては星風によるブレーキを考えた方が良いでしょう。星のコロナの中の磁場などは測定できませんが、幸い太陽については詳しい観測があり、自転速度が  $1/e$  になる時間が  $3 \times 10^9$  年というプラントの推定がありますので一応の目安をつけることができます。  $3 \times 10^9$  年というのは太陽の年齢にくらべてあまり短くないのですが、ウィルソンの主張する「若い星ほどカルシウムK線のクロモスフェアで輝線が強い」ということがコロナや星風にまであてはまるとすれば、主系列星になりたてのときは磁場も星風も太陽より強く、したがってブレーキのかかり方も強いはずで、現在の自転速度の分布は星風によるブレーキで充分説明できそうです。若いK線の輝線がみえる星は輝線をもたない古い星にくらべて自転速度が大きいというクラフトの観測もあり、  $1/e$  になる時間は  $10^9$  年位ではないかと思われま。



第4図 古い星と若い星の自転の違い。黒丸はクロモスフェアからの輝線をしめす若い星。白丸は輝線を示さない古い星。

## 5. 種々の星のコロナ

今まで太陽に似た主系列星のコロナについて考えてきましたが、このあとはその応用としてさまざまな星にどういふコロナが存在するか考えてみましょう。

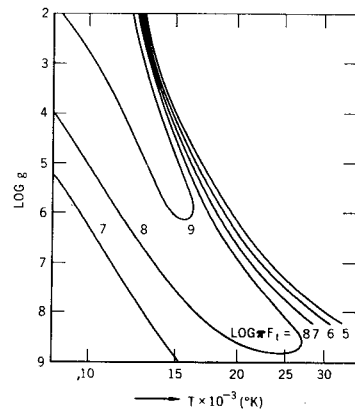
### ヘリウム星のコロナ

私が星のコロナに関心を持ったのは射手座座ウプシロン星という、周期が140日の分光連星を調べていたときです。その理由は後に連星のコロナの項でくわしく述べます。この星は1890年頃からその奇妙なスペクトルのために天文学者の注意をひいていましたが、1940年代になってグリーンシュタインがスペクトルを解析してヘリウム星であることをつきとめました。表面温度は $1.2 \times 10^4$ °Kぐらゐと推定されます。さて星のコロナのところで説明したように対流層はそんな温度では存在しないはずでした。それなのにどうしてコロナが存在するのでしょうか。実は対流層は存在するのです。対流層ができるのは水素の電離エネルギーのためと書きましたが、精確に言えばそれは水素が主成分の場合で、この星のようにヘリウムが主成分の場合は当然ヘリウムの電離エネルギーによって対流層ができるはずで、計算の結果もそうなります。水素星の対流層がなくなる温度とヘリウム星の対流層がなくなる温度との比は大ざっぱに言えば水素のイオン化電位13.6Vとヘリウムのイオン化電位24.6Vの比になるといえます。第5図に示したのはヘリウム星における音波エネルギー発生量で、射手座座ウプシロン星のように1万度以上の星にコロナがあっても不思議ではないことがわかります。その後HD 30353という周期363日のヘリウム星にも射手座座ウプシロン星と同じような現象があることがわかり、やはりコロナがあるとおもわれます。

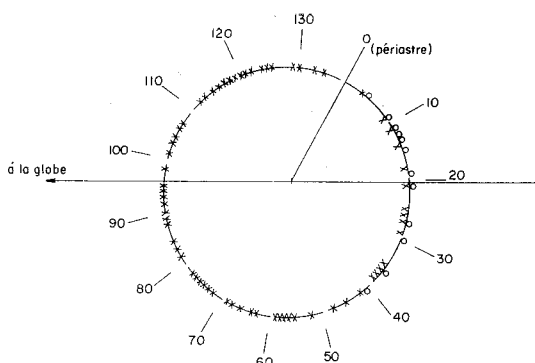
### 連星におけるコロナ

コロナの温度は容れもの、つまりその星の重力ポテンシャルで定まることは前に説明しましたが、これはいかえればコロナの構造は高温のガスの圧力で外にひろがる力と重力で中心の方向にひきもどそうとする力のつり合いできまっています。コロナの一番外側でそのつり合いがやぶれて、外向きに流れだしているのが星風です。さて、連星のうち片方の星がコロナをもっていたらどうなるでしょう。連星の両方の星からの重力と、その系と同じ角速度でまわるとした時の遠心力を考慮すると零速度曲面というものができます。これは遠心力まで考えに入れた等ポテンシャル面といえますが、このうち制限三体問題の中心解を通る面の断面は8

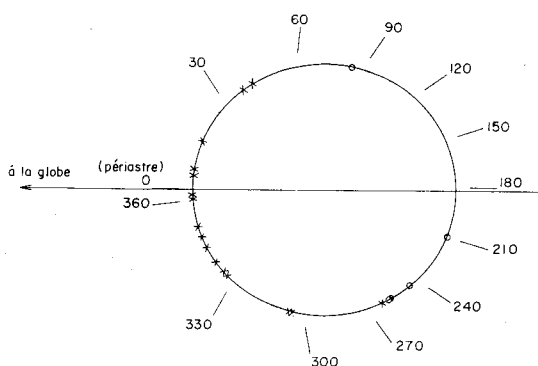
の字の形をしています。この8の字の片方にコロナのガスがつかまっているというわけです。8の字の丸みを帯びたところではポテンシャル面は単独星のものとはあまりかわりませんからコロナの圧力と星の重力はつりあいがとれているでしょう。ところがラグランジュ点、つまり8の字の真中の交叉しているところではどうなっているでしょう。ここは両方の星からの重力がつりあっているところですから、コロナの圧力があるだけでひきもどす力はありません。ですからコロナのガスはラグランジュ点を通って流れだします。この様子は湖の端にある滝を落ちて行く水の流れにたとえることもできるでしょう。流れだしたガスはまたひろがっていくと思われませんが、この様子はラヴァル管を通して噴出するガス流と似ていて、超音速のガス流をつくることができます。ラグランジュ点で流れは音速になりますから、その音速がそこでの脱出速度を超えていればガス流は系の外に逃げだしてしまいます。そのあとは断熱膨張の式にしたがって温度は下がっていきます。「ラグランジュ点附近の等ポテンシャル面でラヴァル流を作り出すというのは一応納得できるが、ラヴァル管の場合は管の壁はちゃんとした固体なのにこの例では目に見えない重力という徐々に働く力が壁をつくっているわけだから、あなたのおっしゃるようによく加速できるかどうかかわからない」と議論をして下さった方もいます。これはもっともなことで、これに答えるには今のような定性的な説明ではなく、流体力学の式を解いて定量的に示さなければなりません。こういう問題は解析的には解けませんから、計算機を使って数値的に解かなければなりません。しかし、二つの星の重力場で三次元空間の流体を扱うのはかなり面倒で私の能力以上のことのようなので、私自身が計算する気にはなっていません。どなたか読者の方で計算して下さいの方がいらっしやれば是非おねがいをしたいと思います。



第5図 ヘリウム星における音波エネルギー流量



第6図 射手座ウブシロン星のジェット流を示すH $\alpha$ 吸収線の有無。○印はあり，×印はなし。



第7図 HD 30353星。第6図と同じ。

## 6. 射手座ウブシロン星と HD 30353 星

私が連星のコロナの問題にとりくんだきっかけは先にヘリウム星の項ででてきた射手座ウブシロン星のH $\alpha$ 線のことでした。この星は強いH $\alpha$ の輝線を持ち、またときどき短波長側にずれたH $\alpha$ の強い吸収線を示します。この吸収線が見られるのは主星が向うで伴星が手前にくる日の前後20日間ぐらいにかぎられることはバイデルマンが指摘していました。1890年頃からの文献にある記録を全部あつめると第6図のようになります。このジェット流の性質は、

1. 速度は300 km/s ぐらい、
2. ジェット流のひろがりには伴星が一番手前にくるときを中心として90° ぐらいもある、
3. ジェット流が存在しないときもある、

という3つに要約されます。まずラグランジュ面を星の大気が満たして、ラグランジュ点を通して流れだしたガスが相手の星の重力に引かれて落ちこんでゆくに付て大きな落下速度を得るといふ機構が考えられます。しかしこの機構だとどんなに工夫をこらしてもジェット流のひろがりには30° ぐらいより小さく、2.の性質を説明できません。そこでコロナの登場となったわけで

す。コロナだと1. 2. 3.ともうまく解決できます。3.については説明が遅れましたが、○と×が重複している部分だけをとりだして年代順に並べてみると活動期と静穏期があってその周期は40~60年で、11年の太陽周期に似たこの星の星周期だと考えられます。コロナそのものの温度では水素は電離しきってH $\alpha$ 線はみえないはずですが、ラグランジュ点を出たガスは断熱膨張をして温度が下がり、星の軌道半径の数倍から十数倍いく間に再結合してH $\alpha$ の吸収線を形成できるようになります。再結合の速度は密度の二乗に比例しますから、星周期にしたがって星の活動が変化し、コロナの密度が変わり、それによって星風の密度もかわるとH $\alpha$ 吸収線が見えたり消えたりしても不思議ではありません。でも問題はすべて解決したわけではなく、連星のコロナの項でのべたような理論的な問題と、この星はスペクトル解析からは巨星とおもわれるのにジェット流の速度からは温度が数百万度になるという矛盾もっています。

HD 30353 星と射手座ウブシロン星は、

1. ヘリウム星である、
2. 他の高温のヘリウム星と異なり炭素が少なく窒素が多い、
3. 長周期の分光連星で相手の星は観測されないが、質量関係は大きく見えない伴星の方が質量が大きいことが予想される、
4. 赤外線での放射が強く周囲にガスか塵もっている、

など数々の共通点もっていますが、ジェット流についても全く同じような現象を示します。HD 30353 星のジェット流は第7図に示した通りです。私はこの二つのよく似た星を研究することになったおかげで、いつでも一本の柳の下で二匹ずつどじょうをつかまえられる、つまり片方の星で新しいことを発見すると必ずもう一方の星について同じような論文が書ける、という運の良い男になりました。

## 7. 高温星の星風

高温の星には輝線を示すB型星、Be 星や、ジェット流を示す白鳥座P星、ウォルフ・ライエ星等クロモスフェア、コロナ、星風のいずれかと関係があると思われる現象を示すものがあります。このうち Be 星は自転が速いために赤道附近のガスが拡がってしまったものと思われれますが、ウォルフ・ライエ星等の数百から数千 km/s のジェット流についてはまだ満足な説明はないようです。エネルギーのことを考えると光のエネルギーのかなりの部分が途中で星風にかわらなければならず、太陽のアナロジーをつかうことはできません。これらの星についてはどなたか別の方が良い解説をしてくださることと

思います。

## 8. あるクリティカルな例

かなり速くまわっている星では赤道に近いところでは遠心力のために見かけ上重力が小さくなったようになり、星の形も扁平になります。エネルギーの流れはほぼ重力に比例するので、表面温度もかわります。ですからこのような星は第2図の重力と温度の図の上では一点ではなく、ある線分であらわされ、一端が極、他端は赤道となります。さて、この線分の傾きは第2図の等エネルギー流量の線の傾きとは一般には一致しません。あるクリティカルな例として、一端はエネルギー流量の大きな

ところ、他端は極端に小さい所にあるような星が表面温度が7~8,000°Kのところと考えられます。このような星では、例えば極の近くでは対流層があってクロモスフェアとコロナを暖めているのに赤道近くでは対流層がないのでコロナのガスはほとんど星に落ち込んでくるというようなことが考えられます。コロナのガスのスケールハイトは星の大きさとくらべられるぐらいですから部分的に暖められるだけで十分に星全部をとりまけるわけです。コロナの温度は高いのでこのような循環流ができるとすごい速度で動くはずです。磁場の生成や、自転や、ひょっとするとA型特異星における元素の異常が説明できるかもしれません。どなたか考えて見られませんか。

## “OJ 287” てんやわんや

菊池

仙\*

「電波源 OJ 287 が可視領域で増光した」という天文電報が東京天文台に入ったのは、10月21日の昼過ぎのことであった。普段は約15等である天体が10月4日の観測では12.4等に増光していたというのである。

この電報が東京天文台のロビーにある掲示板に出てから2~3時間は何の動きもなかった。増光したという時刻からすでに2週間以上経過していることも一因だったのである。また、どうせ今は落着いているだろうと想像した人もいたようである。

午後4時を過ぎて、“ところで、この電報のことは電波をやっている連中は知ってるのでしょね”“知ってるはずだ”がという会話が某所で交わされた。“OJ 287とはどういうものか聞いてみようではないか”ということになって、電波天文学の偉い先生にお伺いを立てると“オラシラネ！知ってる奴は今鹿島に行ってるよ”とのこと。“じゃあ、電波源のマスター・リストで調べて下さいよ”とこの素人は強硬である。そこで玄人氏と素人氏は協力してマスター・リスト探しにとりかかったが、整理の悪いことで有名な人達の居住する場所とあってなかなかの難航であった。とにかく、見つけ出して眺めて玄人氏、“OはOhioのOか、知らなかったね”というわけで鹿島へ連絡することになった。午後5時はとくに過ぎていた。

鹿島の方では、ちょうど食事の時間に当たっていたらしく、三鷹からの情報が転送される間に種々の変形を受けることになった。“Miss A. は非常に美しい”→“Miss A.

は特に美しいということだ”→“Miss A. は特に美しいということはない”という変形と似た変形があわてふためく人達の間で行なわれたふしがある。

一方、岡山では、74インチ望遠鏡がカセグレン I.I. 分光器を装着しているというような好条件にはなかった。しかし、74インチ望遠鏡での直接写真観測とともに36インチ望遠鏡で3色測光を行ない、UVが強いことを確かめた。だが悪天候のため、3色測光のデータが得られたのは3日後の10月24日であった。

さて、午後4時過ぎに会話を交わした2人は堂平で何をやらうかと相談した。OJ 287がどういふものであるかほとんどわからないまま2人は堂平に行くことになった。堂平観測所へ連絡をとると、道路工事中で普段通る道路は通れないとのこと。いかなる方法で堂平観測所まで行きつくかという非天文学的問題が論議の中心テーマになったのであった。結局、山のふもとで堂平観測所の山口達二郎氏に道案内として乗り込んでもらい、午後10時半頃堂平観測所に到着した。

可視域では、岡山で分光観測を行なうことがちょっと無理だろうと思われたので、堂平の50cmシュミット鏡で対物スペクトルを撮ることが重要だと判断した。電波源で電波、光の両方が変動しているものはかなり知られているが、増光している時期のスペクトルや電波と光の同時観測というのはあまり知られていない。この点でもOJ 287の増光したこの機会は重要だと思われた。

さて、最初に50cmシュミット鏡で直接写真を撮り、これまでの星野写真（パロマー写真星図、リック写真

\* 東京天文台