

やさしい天文学シリーズ (IV)
星 (4)

星は皆太陽*

尾崎 洋二**

「星は皆一つ一つが太陽である」と言っただけに、16世紀の哲学者ジョルダーノ・ブルーノは教会の怒りにふれ、火あぶりの刑に処せられてしまった。しかし、最近の恒星についての研究で、私たちは「星は一つ一つが太陽である」という感を一層深めている。

8. 星の活動現象

8.1. 星からのX線

1978年11月、HEAO-2と呼ばれる宇宙X線観測用衛星が、ハーバード大学のジャコーニのグループによって打上げられた。この人工衛星は、X線で像を結ぶ本格的X線望遠鏡を積んでおり、別名「アインシュタイン天文台」とも呼ばれている。アインシュタイン天文台は打上げ後すぐ、テストのため強いX線源 Cyg X-3 の方向に向けられた、ところが、得られたX線像には驚いたことに、X線星が1個だけでなく6個も写っていたのである。はじめは、新しいX線望遠鏡に何か間違いでもあったのではと心配したが、やがてこれらの6個のX線源は、Cyg X-3を除いていずれも白鳥座のOBアソシエーションに属するO型星からのものであることが判明した。

X線星と言えば、これまでは中性子星などを成分星に持つ特殊な近接連星と相場が決まっていた。それが、普通のO型星もX線を放射しているということで、この観測結果は大変な驚きであった。そして、その後のアインシュタイン天文台による観測でさらに、「HR図上のほとんどすべての領域の恒星がX線を放射している」ことが明らかになった。

普通の星がX線を放射しているということは、星の外層に温度が百万度から千万度に達する高温希薄なガス(プラズマ)が存在することを意味する。1千万度とえば、核融合反応の起っている星の中心の温度に匹敵する高温である。一体どうして、このような高温のガスが星の外層にあるのだろうか？

8.2. 太陽の表面活動現象

普通の恒星の放射エネルギーの波長分布は、基本的には光球の温度に対応する黒体放射であると考えられる。しかし、我々に最も近い恒星である太陽の場合、光球の外側には皆既日食の際、輝線スペクトルとして観測される彩層、さらにその外側には温度百万度の希薄なガスで出来ているコロナが広がっている(第11図参照)。そして、そこから電波やX線また紫外域の輝線といった可視域以外の波長の電磁波が放射されていることは、よく知られている。

また、太陽表面は決して一様ではなく、強い磁場を持った黒点群が現われ消えていく。黒点群とその近傍は、フレア(太陽面爆発)やプロミネンスなど激しい活動現象を伴うので、一般に「活動領域」と呼ばれている。太陽フレアは太陽活動の中では最も激しい爆発的現象である。フレアでは可視光をはじめ電波、X線など広い波長域の電磁波を放射する。また同時に、高エネルギーの宇宙線やプラズマの雲も放出され、地球近傍まで飛来する。

また、太陽コロナのガスは高温のため太陽の重力場によって閉じ込めておくことができず、宇宙空間に超音速の風となって吹き出して行くことを、パーカーが1958

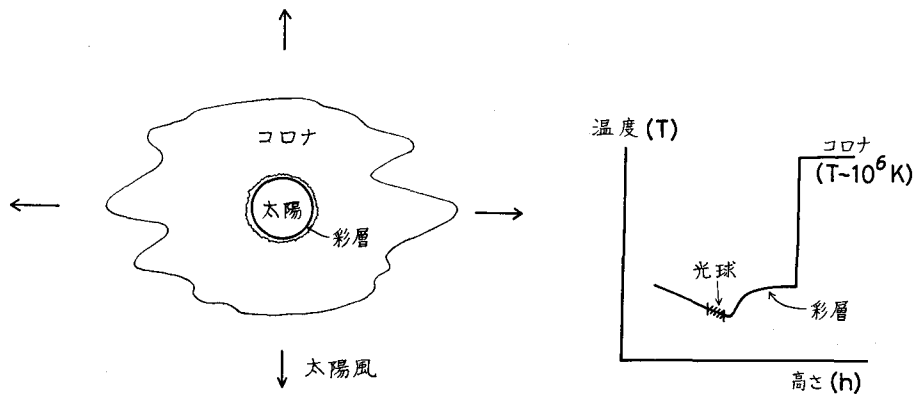


図 11 太陽の彩層、コロナ、太陽風の概念図

* Stars are All Like a Sun

** 東大理 Yoji Osaki

年に理論的に示した。そして、実際太陽からこのような高速(秒速約 500 km)のプラズマ流が惑星間空間に流れ出ていることが、人工衛星による観測で確かめられている。これを太陽風と呼ぶことは周知の事であろう。

さて、このような色々な表面活動現象は、太陽以外の恒星でも起っているのでしょうか? たとえば太陽を全天で6番目に近い恒星シリウスの距離 8.7 光年まで持って行ったとしよう。すると、太陽の明るさは現在の 3×10^{11} 分の1にまで下がり、太陽面現象の大部分は観測不可能になるであろう。それでは、一般の恒星では色々な表面活動現象は観測できないのでしょうか? 実は、恒星の中には、太陽で観測される活動現象が太陽の何百倍、何千倍という大きなスケールで起っている星があり、電波のバーストや線での恒星コロナとして観測されている。

8.3. 激しい表面活動をする星: りょう犬座 RS 型星

りょう犬座 RS 型連星は、公転周期が1日から2週間程度、連星の両星とも晩期型星からなるいわゆる「分離型連星」(両星ともロッシュ限界に達していない連星系)で、一見したところでは何んの変哲もないきわめて平凡な連星系に見える。ところが、これらの星は普通の恒星としては格段に強いX線を放射し、また電波でバーストが観測されるなど、強い表面活動を示す。また、カルシウムの H, K 線が強い輝線になっていて、彩層の活動度も強いことが知られている。

りょう犬座 RS 型連星で特徴的な現象は、連星の光度曲線で食外に“波”と呼ばれる明るさの変動があることである。この“波”という現象では、連星の明るさが公転周期の位相にもなまって sine 曲線型に約 0.1 等級ほど変化する。しかし、その周期は完全には連星の公転周期と一致していない。そのため光度の変動の極大と極小が連星の食の位相に対して少しずつずれていき、10 年ほどで一周する。

ぎょしゃ座の1等星カペラは周期 104 日の G 型と F 型の巨星からなる連星であるが、強いX線を放射していて、色々な点でこのりょう犬座 RS 型星に似ており、広い意味でこのグループに入る星である。

さて、りょう犬座 RS 型星のモデルであるが、これらの連星の一方の成分星の表面に大きな黒点群からなる「活動領域」があり、太陽で観測される種々の活動現象がずっと大きなスケールで起っていると考えられている。このモデルでは、黒点群が星の表面の片半面にかたよって存在していて、黒点群が星の自転によって見えかくれるため、光度曲線の“波”の現象が生ずると説明される。また、このグループの星の彩層やコロナは活動性が高く、温度 1 千万度に達する高温のコロナからは強いX線が放射され、大規模なフレアも頻繁に起っている。

りょう犬座 RS 型星に類似した星で、もう少しスペクトル型が晩期型の星として、りょう座 BY 型星がある。このグループの星もやはり星の表面に黒点群が存在し、星の自転により黒点が見えかくれるため、明るさが変わる星である。

8.4. 恒星の表面活動メカニズム

最もありふれた平凡な星と考えられる太陽で、彩層・コロナが存在し、フレアなどの表面活動現象があることから、他の恒星にも同様に彩層・コロナが存在し表面活動が起っているであろうことは、推察に難くない。実際、太陽よりずっと大規模な活動性を示すりょう犬座 RS 型連星について、上に述べた。また、最近のインシュタイン天文台によるX線観測、“IUE”と呼ばれる紫外天文衛星による UV 観測により、りょう犬座 RS 型星だけでなくその他の恒星の彩層・コロナも直接観測できるようになった。その結果、恒星の活動性メカニズムとか彩層・コロナの加熱機構について、これまでの考えに根本的変更が必要であることが明らかになった。この項では、この問題について考えてみよう。

太陽コロナが百万度という高温であることが明らかになった 1940 年代、ピアマンあるいはシュワルツシルドといった人達によって、太陽対流層から発生する音波による彩層コロナの加熱という考えが提案された。この考えは、その後「乱流からの音波の発生」についてのライトヒル理論から側面援護を受け、コロナの加熱機構の定説として、長い間広く受け入れられてきた。

太陽では光球直下から半径で言って 20~30% の深さまで対流層になっている。そこでは対流運動による乱流速度場が存在する。ライトヒルの理論によると、このような乱流から音波が発生する。発生した音波は光球を通り抜け、さらに密度の低い外層に伝播する。密度の低い外層に達した音波は、丁度岸に近づいた波のように波頭がくだけ、波の力学エネルギーが散逸し、その温度を上げコロナの高温を保つと考える。音波による力学的エネルギー流量自身は、光球からのエネルギー流量に比べればわずかである。しかし、このような外層では、すでに物質の密度が十分低く放射エネルギー損失も小さいので、わずかの音波のエネルギー流量でも百万度のコロナを維持するのに十分であるというわけだ。

さて、この音波によるコロナの加熱説に対する疑問は、1970 年代中頃のスカイラブによる太陽の X 線像の観測から出されてきた。すなわち、X線で見えた太陽コロナは決して一様ではなく、X線で強く輝いているコロナの部分とコロナルホールと呼ばれるX線で暗い部分からなっていることがわかった。さらにX線で明るい部分が磁場の強い活動領域とよく対応しており、コロナの加熱機構としては、音波によるものではなく、磁場が関係したメ

カニズムである可能性が強くなった。

さらに、アインシュタイン天文台の観測結果によれば、一般に晩期型矮星はコロナを持ち、太陽と同程度かそれ以上のX線を放射している。特に注目すべきことは、M型矮星がX線で大変明るいことである。音波によるコロナの加熱説の場合、M型矮星は音波のエネルギー発生率が低く、とても観測されるX線強度を説明できない。また、晩期型星では星の自転速度とコロナからのX線強度との間により相関があり、自転の速い星ほどX線光度も高い。さらに、晩期型矮星の中で特別強いX線を放射している星は、りょう大座RS型連星である。これは、連星による潮汐作用で軌道公転周期と成分星の自転周期が同期した結果、この型の星は晩期型星としては、格別速い自転速度を持っており、そのため彩層・コロナの活動性が高いと考えられる。

それでは、自転が速い星はなぜ彩層・コロナの活動性が高いのだろうか？ 晩期型星は表面对流層を持っている。このような場合、速い自転と対流運動の相互作用に基づく「ダイナモ」機構により磁場が強められ、強い磁場による活動性も高まると考えられる。従って、星の自転は、星の表面对流層中の対流運動と磁場との相互作用を介して、晩期型星の活動性を決める最も重要なパラメーターということになる。

さらに、晩期型星では自転速度と星の年齢との間に相関関係があり、年齢の若い星ほど自転が速く、従って彩層・コロナの活動性も高い。この事実から、晩期型星の自転速度と彩層・コロナの活動度の進化について次の様なシナリオが考えられる。小質量星 ($M \leq 1.5 M_{\odot}$) が誕生して主系列に到達した最初の内は、まだ星の自転は速かった。しかし、このような晩期型星は表面对流層を持ち、速い自転と対流の相互作用に基づく「ダイナモ」機構で強い磁場ができ、磁場に伴う活動性も高い。そして、このような星ではフレアや恒星風も強く、磁場の関与した質量放出により自転の角運動量を失い、星の自転にブレーキがかかる。従って、これらの星の自転速度は年齢とともに遅くなり、その結果、星の活動度も下がってくる。

以上要約すると、晩期型矮星の彩層・コロナの加熱機構は音波によるものではなく、磁場が関係したメカニズムであり、その活動度の強さを決める最も重要なパラメーターは星の自転速度であると結論される。そして、活動度の高い自転の速い晩期型星としては、星自身が若いか、または短周期の連星で公転と自転が同期している場合であると言える。

9. 恒星風：星からの質量放出

太陽はコロナから星間空間に物質を放出しており、これを太陽風と呼ぶことは前節で述べた。最近の観測で、HR図上の広い範囲にわたって星からも質量放出があることが明らかになってきた。星からの定常的質量放出は一般に恒星風と呼ばれている。太陽の場合、質量放出の割合は1年に 10^{-14} 太陽質量程度で、星の質量放出としては小さい方である。質量放出の大きい星は、O型星、B型超巨星などの早期型星であり、また晩期型星ではM型超巨星で、一般にHR図上では上方に位置する光度の大きい星である。

9.1. 早期型星からの質量放出

1960年代後半から1970年代にかけて、ロケット、人工衛星を使って恒星の紫外域スペクトルが観測されるようになった。その結果、表面温度が高く、光度の大きいO型星、B型超巨星から強い恒星風が吹き出していることが明らかになった。すなわち、これらの星の紫外域スペクトルで、三回電離した炭素(C IV)、三回電離した硅素(Si IV)の共鳴線がいわゆる「白鳥座P星型プロファイル」を示すことである。白鳥座P星型プロファイルというのは、第12図に示すようにスペクトル線が短波長側で吸収線に長波長側で輝線になっているものを言う。これは星から質量放出のある場合のスペクトル線の輪郭と考えられている。早期型星からの恒星風におけるガスの膨張速度は秒速1000 km~3000 kmで、これは星の表面からの脱出速度(約600 km/秒)を十分越える程大きい。また質量放出の割合は、評価の仕方が難しいが1年に 10^{-8} ないし 10^{-5} 太陽質量程度と大変大きな値になっている。

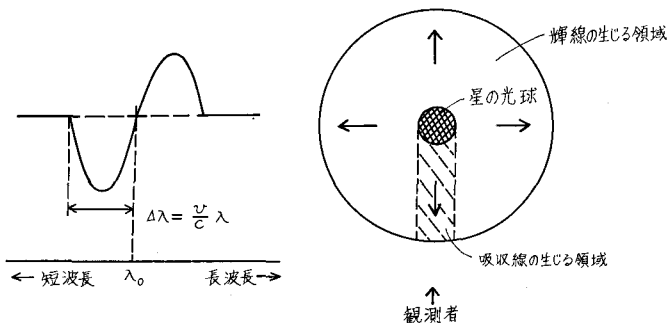


図 12 白鳥座P星型プロファイルと恒星風

さて、これら早期型星で質量放出の起る原因であるが、現在最も有力な説は放射圧による質量放出説である。すなわち、これら高温の星では放射が大変強く、星の光球よりも外側では紫外(UV)領域にある沢山の共鳴線に働く放射圧の総和が星の重力よりも大きくなり、星から質量放出が起るとする考えである。観測される質量放出率は星の全放射光度(L_{bol})と一番相関がよく、全放射光度が高いほど質量放出率も大きい。

この放射圧による恒星風モデルでは、恒星風の流れの中の物質の温度は星の光球の温度($T_{\text{eff}}=40,000\sim 50,000$ K)と同程度と考えられている。このようなモデルは高温コロナから吹き出す恒星風と区別して、“冷たい”恒星風モデルという。1970年代後半に入って、この冷たい恒星風モデルに疑問を投げかけるような観測も出てきた。それは、これらの星で電離ポテンシャルの高い4回電離した窒素(NV)、5回電離した酸素(OVI)の共鳴線が観測されたことである。これらの原子の電離状態を説明するには温度が 10^5 K以上の領域の存在する必要があるようになってくる。

さらに、今回の最初のところで述べたように、アインシュタイン天文台による軟X線観測で、これらO、B型星はX線も放射していることが明らかになった。X線の光度は、 $L_x\sim 10^{32}$ エルグ/秒、X線光度と全放射光度の比は $L_x/L_{bol}\sim 10^{-5}$ 程度である。X線を放射していることから、これらの星の外層には温度百万度の高温のガスが存在することになる。

それでは、早期型星の場合も、放射圧による“冷たい”恒星風モデルは全面的に否定され、それに替わって高温コロナからの恒星風モデルということになるのであろうか？ それに対する答えは、多分“否”である。というのは、高温コロナモデルでは紫外領域の白鳥座P星型プロフィールを示すCIV、SiIVなどのスペクトル線を説明できないからである。従って、早期型星の恒星風は基本的には“放射圧によって加速された”ものであろう。

それに対して、X線放射に必要な高温ガスの説明としては二つの可能性が考えられる。一つは恒星風の流れ自身が不安定になり、乱流が発生し恒星風の運動エネルギーが熱化されて高温領域が出来るとする考えである。もう一つは、恒星の外層が不均一になっていて、晩期型星の場合と同様に磁場のループが存在して、そこからX線が放射され、それ以外のところは、放射圧による冷たい恒星風が吹いていると考えるものである。

9.2. 赤色巨星からの質量放出

HR図上で、恒星風の強い星としてはもう一つ赤色巨星がある。ベテルギウス(α Ori)、アンターレス(α Sco)といったM型超巨星のスペクトルで、強い金属吸収線プロフィールの中心部分に短波長側に少しずれた深い吸収

が見られることが、以前から知られていた。これは、星から放出された物質が星自身を取り巻いていて、そこから短波長側にずれた吸収線が生ずると考えられている。さらに最近では、赤色巨星を取り巻く球殻中のダスト(塵)からの赤外熱放射や電波分子線なども観測され、赤色巨星から多量の質量放出のあることが明らかになった。また、ミラ型長周期変光星は、OH、 H_2O 、SiOなどの電波分子線の強い電波源になっており、これらの星も質量放出が大きいことを示している。

赤色巨星からの質量放出の特徴として、一般に温度の低い($T\leq 10^4$ K)冷たい恒星風であること、また膨張速度が秒速 $10\sim 20$ kmと小さいことなどがあげられる。一般に赤色巨星、赤色超巨星は半径が大きく、従って重力ポテンシャルの井戸の浅い星である。しかし、上に述べた膨張速度は、これらの星の光球からの脱出速度よりもさらに小さい。次に質量放出の割合であるが、M型巨星で1年に $10^{-8}\sim 10^{-6}$ 太陽質量程度、M型超巨星で $10^{-7}\sim 10^{-4}$ 太陽質量程度と評価されている。また、星がHR図で赤色巨星列を右上へ昇りつめる程、一般に質量放出の割合が大きくなると、観測からも言える。従って、太陽質量2~3倍の星が、進化の進んだ段階で赤色巨星列を昇って行くと、質量放出がだんだん増大する。そして、最終的には星の外層全部が失われ、惑星状星雲を経て、星の中心部が白色矮星になるとする星の進化のシナリオと、この観測はよく一致する。

さて、赤色巨星からの質量放出メカニズムであるが、現在までのところ決定打となる理論は存在しない。確かに、赤色巨星で重力ポテンシャルの井戸の浅いという事が、質量放出に関連して重要な役割を演じていることは疑いない。しかし、これらの星の質量放出の具体的なメカニズムは、まだよくわかっていないと言ってよいであろう。これまで提案されているメカニズムとしては、コロナからの恒星風説、ダストに働く放射圧加速説、脈動に伴う衝撃波説などがある。

まずコロナからの恒星風説であるが、これは太陽風についてのパーカー理論を赤色巨星にも使おうとする考えである。赤色巨星の場合、コロナがあるとすればその温度は太陽コロナよりも低いと考えてよいであろう。しかし、赤色巨星の質量放出について、冷たい恒星風であるということ及び膨張速度が脱出速度よりも小さいという二つの観測事実に、このモデルが矛盾しないかどうか明らかでない。

次にダストに働く放射圧による質量放出説であるが、赤色巨星、超巨星でダストに働く放射圧は大きく、星の重力よりも大きいということは考えられる。しかし、ダストによる放射圧説の欠点は、ダストがガスから凝縮して出来る場所が星の光球近くでなく星の半径の数倍のと

ころと考えられることである。従って、一たん質量放出によって放り出された物質をさらに加速するには、ダストの放射圧は役に立つが、星からの質量放出の原因としては難しいということになる。

最後に、脈動に伴う衝撃波による質量放出説であるが、ミラ型変光星では、他の赤色巨星よりも質量放出の割合が大きい。従って、脈動が質量放出に何らかの役割を果たしていることは十分考えられる。しかし、脈動変光星でない赤色巨星からも質量放出が観測されているので、別の質量放出メカニズムも考えなくてはならないだろう。

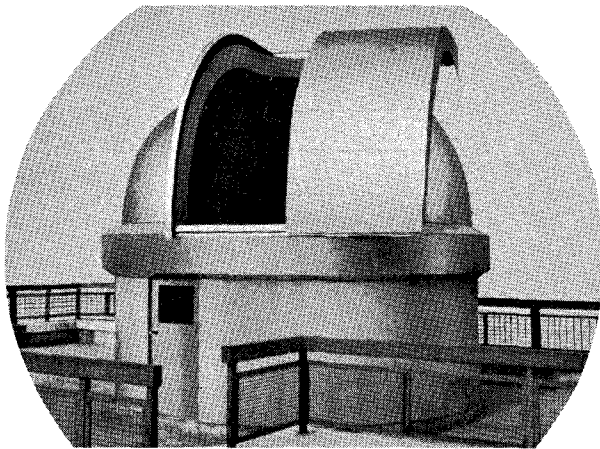
10. おわりに

やさしい天文学シリーズ“星”も今回が最終回である。これまで4回にわたって、星についてのいくつかの話題を紹介してきた。しかし、まだほとんどふれてない問題で重要な話題がいくつか残っている。このような問題として、例えば星の大気構造と化学組成の問題、近接連星系での質量交換の問題、X線星、パルサーなどの高密度星(中性子星、ブラックホール)の問題などをあげることができる。これらについてふれることができなかつたのは、紙数の制限もあるが、大部分は私自身解説するだけ

の十分な知識を持ち合わせなかつたからである。

このシリーズを書くにあたって、できるだけやさしく書くように努力した。それと同時に、プロの天文学者にも読んでもらえるよう、星についての最新的话题を紹介するようにした。この一見相反する所期の目的が達せられたかどうか心配である。

恒星物理は、かつては天体物理の中心であり、また花形でもあった。しかし、現在では天体物理の研究対象もずっと広くなり、恒星物理はその内の一つにすぎなくなった。そして、その研究は現在ではすでに成熟期に入ったと言ってよいであろう。それゆえ、クエーサー、ブラックホール、……といった今日の花形である天体の研究ほど、はなばなしさはない。しかしながら、私達の恒星についての知見は今も日一日新たになっている。そして、このシリーズで何度も述べてきたように、最近の星についての研究で、星は一つ一つが太陽であり、そこには活動性に満ちた世界が繰り広げられていることが明らかになりつつある。そして、太陽は平凡な星の一つであり、従って我々の住む太陽系の起源とその将来像を正しく理解するには、今後も恒星の研究は不可欠であると言えよう。(完)



★営業 ASIBO 品 目★

天体望遠鏡と双眼鏡
各種部品と撮影用品
ドームの設計と施工

ASTRO光学工業株式会社

〒170 東京都豊島区池袋本町2-38-15

☎03(985)1321 振替口座東京5-52499番

LN-100S型 (精鏡を短焦点
スーパーブルー)

(D=103mm)
(F=5.8)

カイドインダスコープ
ガイド用マウント(別売)



極軸望遠鏡内蔵

写真はS型アルミ三脚

★新総合カタログご希望の方は切手300円を同封下さい

★全国有名デパート・光学品取扱店でも買い求め下さい