

## 脈動・対流・自転

尾崎 洋二\*

今回は、脈動・対流・自転といった恒星の内部や表面で起こる運動について論ずる。

## 6. 脈動

人間の生命活動の最も象徴的存在は、いかなる時も休むことを知らない心臓の鼓動であろう。星自身が一定の周期で規則正しく膨張と収縮を繰返す脈動変光星の脈動は、まさにこの意味で「生きている」星を象徴する現象と言えよう。

## 6.1. 脈動とはどんな現象か？

脈動変光星は、星自身が膨張と収縮を繰返すことによって変光する星である。脈動変光星の代表としては、ケフェウス座  $\delta$  星がある。この星は、5日8時間47分の規則正しい周期で、極大光度等3.7から極小光度4.9等まで1等級ほど明るさが変わる。またミラの名で知られるくじら座  $\theta$  星は、1年近い周期で極大光度2等から極小光度10度まで変光する。ミラは極大時にはくじら座で最も明るい2等星であるが、暗くなると3ヶ月間も肉眼ではまったく見えない6等以下の星になってしまう。

脈動変光星では、単に明るさが変わるだけでなく、星の膨張・収縮する様子がスペクトル線の視線速度の変化としても観測されている。それでは、星の脈動とは一体どんな現象なのであるか？

すでに §2 で述べたように、星は内部が高温高压のガス球で、自分自身の作る重力と内部の圧力のつりあい、一定の半径に保たれている。今仮りに、このような星をほんのわずかだけ圧縮して手をはなした場合、どのような事が起るか考えてみよう。この場合、星は収縮したため、星自身の重力は強くなっている。しかし同時に星の内部の圧力も強くなっている。したがって、さらに収縮しようとする重力の働きと、それをはね返そうとする圧力の間の競争になる。この戦いは通常圧力の方が勝ち、星は元の大きさに戻ろうとして膨張をはじめ。ところが、この膨張には勢いがついているので、元の大きさを通り過ぎてしまう。すると、今度は膨張しすぎたため、内部の圧力が下がり過ぎ、逆に重力の方が勝ち星は収縮に向かう。今度の場合も、収縮に勢いがついている、またまた元の位置を通り過ぎて収縮する。このように、星は膨張と収縮をくり返し、元の半径(平衡状態)のまわりを振動する。これが星の固有振動あるいは自由振動と

呼ばれるものである。脈動変光星の脈動は、星の固有振動である。

私たちに身近な事柄で固有振動が登場するものとして、楽器の振動がある。脈動あるいは固有振動という面からみると、星は一つ一つが色々の楽器に対応していると言える。楽器には色々の種類のものがあり、それぞれに音色が違うが、星もその質量や進化の段階によって固有振動の音色は微妙に違うのである。

また、楽器の音の高さ(振動数)はその図体の大きさに関係している。すなわち、大だいはドーンドーンと低い音を出す、小だいはトントンと高い音である。星の脈動周期もこれと同じで、ミラ型変光星のように図体の大きい赤色巨星ではその脈動周期は約一年と長い、主系列星に近い座  $\delta$  型星ではその周期は2~3時間と短い。

この関係は、普通脈動周期が星の平均密度  $\langle \rho \rangle$  の平方根に逆比例するという関係

$$P \propto 1/\sqrt{\langle \rho \rangle} \quad (3)$$

で表わされる。セファイド変光星には有名な周期-光度関係がある。これは、セファイドの脈動周期が長い程、その星の光度が大きいという関係である。周期-光度関係は、(3)式の周期-平均密度関係をセファイド変光星に適用して、星の平均密度のかわりに星の光度を使って表わした関係と考えてよい。周期-光度関係があるので、セファイド変光星は近くの銀河系外星雲までの距離を求めるための“標準光源”として、重要な役割をはたしている。

## 6.2. 脈動変光星はどうして脈動するのか？

脈動は星の固有振動であると、上で述べた。しかし、固有振動という事だけで言えば、どの星もそれぞれ固有振動を持っている。しかし、すべての星が脈動変光星になるのではなく、HR図上のある特別の位置にある星だけが脈動変光星になっている。すなわち、脈動変光星ではなにか特別なメカニズムがあるため、星の固有振動が励起され、脈動変光星として観測されるのである。それでは、一体どんなメカニズムが働いて、脈動変光星は脈動するのであるか？

普通、星をなんらかの方法でたたいて振動させてやっても、しばらく放置しておけば、その振動は減衰してしまう。これは、振動のエネルギーが粘性や熱による散逸のため少しずつ漏れてしまうためである。ところが、脈動変光星の場合、星の内部に熱エネルギーを振動エネルギーに転換する。言ってみれば自動車のエンジンの働き

\* 東大理 Yoji Osaki: Stars—Pulsation, Convection, Rotation

をする機構がかくされている。そして、これにより脈動変光星では固有振動が一定の振幅レベルに維持されているのである。別の言い方をすると、脈動変光星は一種の熱機関であると言える。

すでに §4 のところでみたように、セファイドとか、こと座 RR 型などの脈動変光星は HR 図上でセファイド不安定帯と呼ばれる狭い帯状の領域に限られている。これらセファイド不安定帯の脈動星において熱機関の働きをするのは、星の外層にある水素及びヘリウムの電離領域である。

星の脈動において、脈動を減衰させるかあるいは逆に励起させるかを定める上で最も重要な働きをするのが、放射による熱の出入りである。普通ガスのかたまりを振動させた場合、収縮した段階では温度が上がり系から熱が逃げ、逆に膨張した段階では温度が下がりまわりから系へ熱が流れ込む。少し考えればすぐわかるように、この場合収縮した段階で外へ熱が逃げだすので、内部の圧力が思うように上がらないということである。従って、膨張に向うときの反撥力は、この熱の出入りの効果で減殺され、結局、振動は減衰することになる。

さて、星の場合、中心から表面に向けて、つねに放射エネルギーが流れている。星の振動の場合も上述の実験室のガスのかたまりと同じで、普通は収縮した段階で熱放射量が増し、膨張した段階で熱放射量が減ずる。この場合、すでに述べたように熱の出入りの効果は振動の反撥力を徐々に弱めるので、星の振動は減衰する。

ところが、水素やヘリウムの電離領域では収縮した段階で水素やヘリウムの電離が進行し、その結果温度の上昇の割合が比較的小さい。その上、同時にこの層の放射の吸収係数が増加するという性質がある。従って、これら電離領域では収縮した段階で放射熱流がこの層に流れ込み、熱が溜めこまれることになる。すると、次の膨張に向う際、より強い反撥力を持つことになり、振動は増幅される。このように、熱の出入りの効果が通常とは逆に振動を増幅するように働くことを、“負の散逸”と言い、この脈動励起メカニズムをエディントン・パルプ機構と呼んである。

さて、実際の恒星内部には水素やヘリウムの電離領域のように振動を励起する働きを持つ層がある。しかし、それ以外の層は一般には振動を減衰させる働きを持つ。従って、これら2つの相反する働きの間に“つなぎき”が行なわれることになる。そして、脈動を励起する働きが減衰に打勝った場合に限り、星はひとりでに脈動をはじめするのである。脈動変光星は、このように脈動励起の働きが勝った結果脈動の振幅が増大し、ある一定のレベルに落ちついた星である。

この脈動励起と減衰の競争は大変微妙な勝負であり、

セファイドの場合、ヘリウムの2回電離の領域が星の外層中の有利な場所を占めたため、“励起側”が“減衰側”をほんのわずかの差で打破ったものである。HR 図上で、セファイド変光星が狭い帯状の場所に限られているのは、このような事情を反映したものである。

脈動変光星の励起メカニズムをさがすことは、理論家の大切な仕事である。早期型の脈動変光星ケフェウス  $\beta$  型星の脈動励起メカニズムが、多くの研究者の努力にかかわらず、依然として不明であることを、脈動の項の最後に付け加えておこう。

## 7. 対流

### 7.1. 対流現象

シーイングのよい時に撮った太陽の写真を見ると、光球面一面に細かい米粒状の模様が見える。これは粒状斑と呼ばれ、一つ一つが対流の渦に対応している。太陽の場合、光球直下から太陽半径で言って外層約 30% が対流層になっている。粒状斑は、太陽対流層の中の対流の渦が安定な成層をなす光球に突き出してきて観測されたものである。

対流は、星の表面や内部で起きている運動の中で最も重要なものの一つである。対流自身は私達の日常生活でもなじみの深い現象で、沸とうした鍋の中の湯の運動や対流型ストーブによる部屋の中の空気の循環などがそれである。また自然現象としては、地球大気の対流によって出来る積乱雲、地球内部のマントル対流による大陸移動などの現象がよく知られている。

熱の伝わり方には、一般に伝導・対流・放射の三通りがある。対流は、伝導や放射とちがって流体自身が運動することによって、直接熱を運ぶ現象である。星の内部では、中心から表面に向けて熱が流れている。この熱は普通放射と対流によって運ばれている。前回述べたように、表面温度の低い晩期型星では表面近くに対流層があり、一方質量の大きい早期型主系列星では中心に対流核がある。

それでは、どんな場合に対流が起こるのだろうか？ 日常の経験からもわかるように、空気や水などの流体を下から強く熱した場合に対流が起こる。この場合、熱せられた下層の流体は上層の冷たい流体より軽くなって浮き上がり、代りに密度の高い冷たい流体が沈んでくる。すなわち、第6図のように負の温度勾配 ( $dT/dz < 0$ ) ができると、流体層が不安定になり、対流が生ずる。実験室の流体の場合、流体に働く粘性の効果が対流を抑える役割をする。そのため、対流の起こる条件としては、負の温度勾配だけでは不十分で、温度勾配を分子に、粘性係数を分母に含んだ「レーリー数」という量がある一定値よりも大きくなる必要がある。

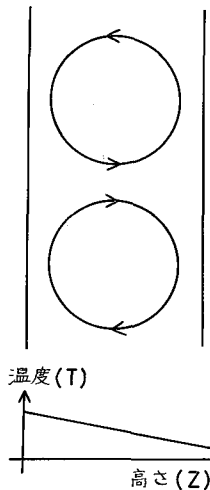


図6 対流の渦と対流の起る条件

恒星内部の対流では、粘性の効果は小さい。一方、実験室の場合とちがって、星の場合には高さとともに圧力が減少する効果が重要で、これを考慮に入れた場合の対流の起こるための条件は、温度勾配が断熱温度勾配よりもきついという条件 ( $|dT/dz| - |dT/dz|_{断熱} > 0$ , ただし  $dT/dz < 0$ ) になる。この条件からわかるように、恒星内部で対流が起こるためには、温度勾配自身がきつい、または断熱温度勾配が小さいかのいずれかが必要である。大質量主系列星が中心に対流核を持っているのは、原子核エネルギーの発生が中心に集中して、中心近傍の温度勾配が急であるためである。また晩期型星に表面対流層ができるのは、水素電離で断熱温度勾配が小さくなるからである。

## 7.2. 対流の役割

対流の役割は、もちろん熱を運ぶことである。しかし、対流はそれ以外にもいくつかの重要な役割を演じている。その一つに、対流層内での物質の混合がある。主系列星の内部では、核融合反応により水素が燃焼し、灰であるヘリウムが中心部分に徐々に溜まっていく。その結果、星の内部の化学組成は不均質になる。しかし、大質量星のように中心に対流核がある場合、対流により物質はよく攪拌されていて、対流核内の物質の化学組成は常に一様に保たれている。すなわち、中心に対流核がある場合には、対流核内の水素燃料全部を中心で燃焼させることができることになる。

また進化の進んだ赤色巨星の中に、炭素星・S型星と呼ばれる化学組成に異常のある星が存在する。これらの星では、炭素やジルコニウムなどの元素が普通の星にくらべて多い。これらの星では、表面対流層が星の内部深くまで侵入し、核反応生成物を星の表面まで汲み上げてきたため、元素の組成異常ができたと考えられている。

また、低温度星の表面対流層は、恒星内部構造モデル

の外部境界条件としても重要な働きをする。すなわち、主系列前の星の進化の道筋が「ハヤシ・トラック」になるのも、進化の進んだ星が質量に無関係に皆HR図上の赤色巨星の所に集まってくるのも、表面対流層のためである。

太陽の場合、対流運動は粒状斑として直接目に見えるが、星の場合には大気中のガスの運動はスペクトル線の輪郭に反映して、観測にかかる。すなわち、恒星大気では対流運動は色々の大きさのガスの塊が無秩序に動きまわる乱流状態にある。このガスの塊の運動によるドップラー効果の重ね合わせの結果、スペクトル線の幅がひろくなる。これを観測することにより乱流速度の大きさを知ることができる。このような方法により、色々の星について乱流速度が観測で求められている。晩期型星で観測される乱流速度場は、対流により引き起こされたものとして理解できる。しかし、表面対流層を持たないO, B, A型の早期型巨星、超巨星で大きな乱流速度が観測されており、これらの星でどうして乱流が発生するのか、その原因はまだわかっていない。

また、晩期型星の光球の外側に、太陽と同じような彩層やコロナが存在することが、最近の人工衛星による紫外域(UV域)、X線領域の観測で明らかになった。このような星の活動の原因として、星の自転、磁場とともに表面対流層が重要な働きをしているものと考えられている。

## 7.3. 恒星における対流理論

以上、恒星において対流が大きな役割を果たしていることを見てきた。しかし、対流理論ということになると、不幸にして現在でも恒星内部の対流を厳密に取扱う理論は存在しないのである。この問題の困難である理由としては、次のような点がある。

対流の問題を考える上で重要な量としてレイリー数というものがあることを、前に述べた。恒星の対流層中のレイリー数の値は  $10^{10}$  程度と大変大きな数になっている。このような場合、対流はなめらかな流れの層流ではなく、激しく乱れた乱流状態にある。言いかえると、大きな渦から小さな渦まで色々の大きさの渦が入り乱れて存在し、しかも相互に影響をおよぼし合っているのである。従って、このような事情のため、どんな大きな計算機を使っても、対流のすべてのスケールの運動を数値計算で解くことは不可能なのである。

それ以外に問題を難かしくしている事情としては、恒星の対流層の底と表面では密度が何桁もちがう事、対流の速度が音速近くになり、圧縮性流体としての取扱いが必要になる事などがあげられる。

このようなわけで、現在でも恒星における対流を、より良く取扱う方法についての研究が続けられている。

一方、恒星の内部構造を計算しようとするれば、当然対流層についても解くことが必要になってくる。この目的のためには、比較的簡単に計算ができて、しかも対流による熱輸送について本質をつかんだ理論が必要になってくる。現在一般に使われているのは、「混合距離理論」と呼ばれる現象論的理論である。この理論では、対流の代表的大きさの渦が混合距離と呼ばれる代表的距離だけ進んではこわれると考えて、対流による熱輸送などを計算するものである。この混合距離理論を使って、星の内部構造や進化の計算が行なわれ、ある程度の成功をおさめている。

しかし、当然の事ながら、混合距離理論は対流の本質の問題には答えてくれない。

### 8. 自 転

天体は、ほとんどすべて自転している。地球に 24 時間周期の昼夜の別があるのは、もちろん地球が自転しているからである。太陽もその他の星も皆自転している。規則正しい周期で電波のパルスを出すパルサーは、中性子星の自転によるものである。

#### 8.1. 星の自転速度はどのようにして測るか？

私達が一番近い恒星である太陽の自転周期は、黒点の太陽面上の移動から知ることができる。太陽の赤道自転周期は 25 日、赤道自転速度は 2 km/秒である。太陽表面の自転角速度は一律ではなく、赤道部分が極近傍にくらべて 20% ほど速く回転している。

太陽以外の星の自転速度を測るには、スペクトル線の幅を使う。図 7 に示すように、自転している星の表面を見ると、片半面は観測者に近づくように他の半面は遠ざかるように運動している。従って、自転している星のスペクトル線は、ドップラー効果により幅がつく。このスペクトル線の広がりから星の自転速度を推定することができる。しかし、ドップラー効果には、速度の視線方向の成分しか効かない。そのため、この方法では星の赤道自転速度 ( $V_e$ ) そのものではなく、観測者の視線と星の自転軸の傾斜角 ( $i$ ) を含んだ量  $V_e \sin i$  の値が求められることになる。

恒星の表面に自転軸に対して非対称な模様がある場合、その模様が自転によって見えかくれる周期から星

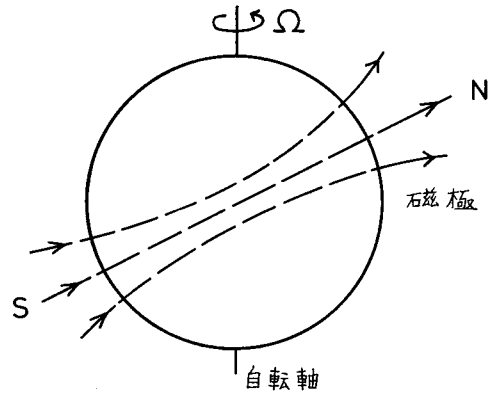


図 8 パルサー及び磁変星の斜回転モデル

の自転周期を求めることができる。A型特異星の中に、周期的に強度の変化する磁場を持つ星があり、磁変星と呼んでいる。磁変星では磁極軸と自転軸が傾いていて、自転に伴って磁極が見えかくれるため磁場の強さが変わるものと考えられている。このようなモデルを斜回転モデルと言う(図8参照)。パルサー及び磁変星の自転周期はこの方法によって求められる。

次に図9を見ていただきたい。これは恒星の自転速度の観測結果をまとめたものである。恒星の自転速度が星のスペクトル型と強い相関を持つことは、よく知られている。まず主系列星であるが、一般にA型よりも早期型の星は自転が速く、 $V_e \sin i$  の平均値が 100 km/秒以上である。しかし、スペクトル型が A5-F0 あたりで星の自転速度は急激に減少しはじめ、G型より晩期型の星の自転速度は観測限界の 20 km/秒以下に下がり、これらの星は自転が非常に遅いことがわかる。HR 図上でスペクトル型が A5-F0 というのは、表面対流層があらわれる位置とよく一致し、晩期型星の遅い自転は表面対流層に伴う星の活動性により自転にブレーキがかかった結果と考えられている。

一般に巨星及び超巨星は主系列星にくらべて自転は遅い。しかしその遅さの程度であるが、大雑把に言って主系列星が角運動量を保存して、現在の巨星、超巨星の半径まで膨張したとして予想される値と大きくは矛盾していない。

また、スペクトルに異常のある特異星は、正常の星とちがった自転速度を示す。Ap 星、Am 星と呼ばれる元素組成に異常のあるA型星が存在する。これらの星は正常のA型星にくらべて自転が遅い事が知られており、スペクトルの異常性と自転速度の間になんらかの因果関係のあることを示唆している。B型星の中で水素のバルマー線などが輝線スペクトルになっている星があり、Be 星と呼んでいる。Be 星は高速自転する星で、自転による遠心力で赤道附近から放り出されたガスが星を取りま

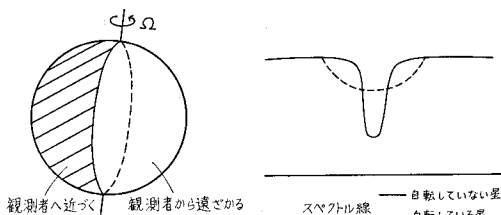


図 7 自転している星とスペクトル線の見え方

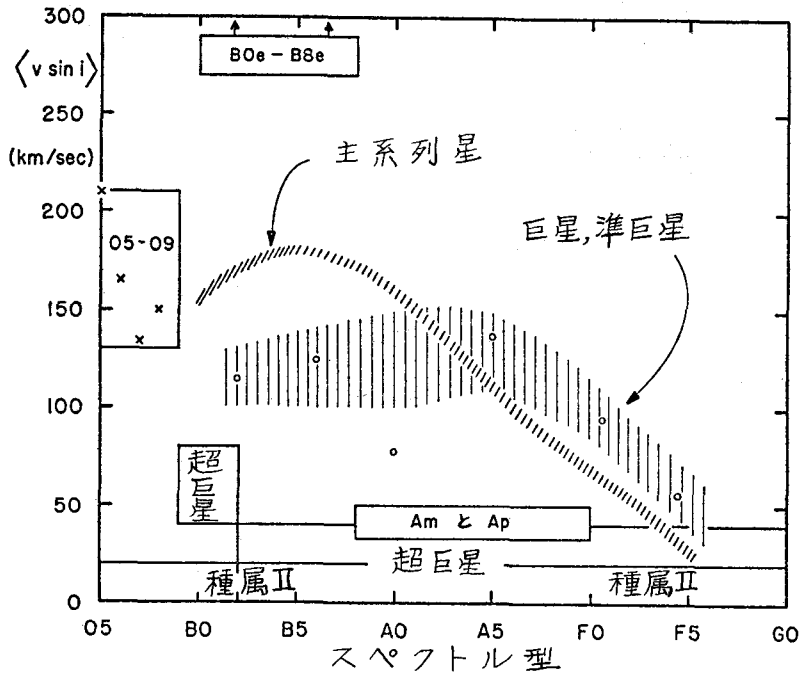


図9 星のスペクトル型と自転速度

ていて、そこから輝線スペクトルが生ずると考えられている。

### 8.2. 自転速度の進化

まず星の内部の自転法則について考えよう。自転法則として一番簡単なものは星全体が一定の角速度で一樣に回転している場合で、これを一樣回転あるいは剛体回転と言う。地球などの惑星は固体でできているので、剛体回転をしている。しかし星はガスでできているので、一般に星の内部の粘性の効果は小さいので、星の自転は必ずしも剛体回転でなくてもよい。実際、太陽の場合、自転角速度は極近くよりも赤道部分の方が速い。このように自転角速度が星の内部の場所によって異なる場合を、微分回転という。また、初期条件として剛体回転を仮定しても、星の進化に伴って自転法則も変わり、微分回転になってしまう。

それでは、星の自転法則はどのようにして決まり、星の進化とともにどのように変わっていくのだろうか？これを考える上で一番重要なのは、角運動量保存の原理である。この原理は次のようなものである。いま、質量  $m$  の物体が回転軸からの距離  $r$  のところを、回転角速度  $\Omega$  で回転しているとする。その時、角運動量  $L$  は

$$L = mr^2\Omega \quad (4)$$

で定義される。角運動量保存の原理というのは、この系が外部から孤立した状態で、回転軸からの距離  $r$  が変化した場合、(4) 式で定義される角運動量  $L$  は一定に保たれるというものである。

この原理を説明するのによく使われる例として、フィギュアスケートの選手のスピンのある。スケートの選手が腕を伸ばして回転していて、最後に腕を縮めると猛烈な速さでスピンするようになる。これは角運動量保存の結果である。星間ガスから収縮してできる星の場合も同様で、星間雲の非常にゆっくりした回転でも、角運動量保存により星の段階に至れば十分急速な自転になるのである。実際には、角運動量保存のままでは自転が速くなり過ぎる心配があり、途中である程度角運動量を捨てる必要がある。

また、主系列段階を終え巨星へ向けて進化する星の場合、中心核は収縮し外層は膨張する。この場合、中心核は急速に、外層はゆっくりと自転する微分回転になる。星の内部での自転法則の時間進化を考える場合、さらに星の内部での角運動量の再分配の問題が重要である。星の内部での角運動量の輸送メカニズムとしては、磁場によるカップリングとか、次に述べる子午面環流による輸送などがある。

### 8.3. 星の内部の流れ：子午面環流

自転している星は遠心力により赤道部分がふくれ、扁平な形をしている。このように星の形が球形からずれている場合、星の内部の放射領域では熱平衡の条件が一般には満たされない。この場合、熱平衡からのずれにより星の内部にゆっくりとした流れができる。この流れを子午面環流という(図10参照)。子午面環流自身の速度は

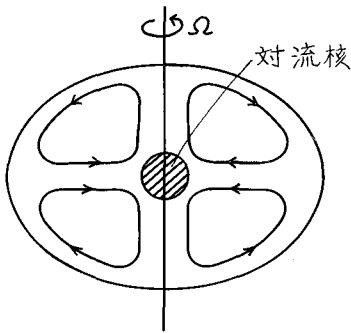


図 10 自転している星の子午面環流

非常にゆっくりしたものであるから、星の静水圧平衡からのずれはわずかで、星の平衡を解く場合は無視してよい。

しかし、子午面環流は物質及び角運動量を輸送するので、星の内部の放射領域における物質の混合の問題や自転角速度分布の時間発展の問題を通じて、星の進化にも影響を与える。

星の自転法則と子午面環流の関係は次のようである。星の自転法則が与えられると、子午面環流の速度場が決まる。一方子午面環流は角運動量を運ぶので、星の内部の自転法則を時々刻々変化させる。従って、自転法則と子午面環流の両者の時間発展を同時に計算していく必要がある。さらに問題を複雑にする事情として、自転法則の不安定性の問題がある。ある種の自転角速度分布は不安定で、不安定性により不規則な運動が起こる。このような場合、不規則な運動による角運動量の再分配も考慮しなければならない。これらすべてを考慮した自転角速度分布、子午面環流の進化の計算は、現在までのところなされていない。

8.4. 自転と特異星

A 型星の中に、元素の組成に異常のある A 型特異星 (Ap 星)、A 型金属線星 (Am 星) と呼ばれる星がある。Ap 星、Am 星は正常な A 型星にくらべて一般に自転が遅い。また、Ap 星の中には強い磁場を持つ磁変星もある。

これら特異星の化学組成の異常の原因として、これまで色々の説があった。しかし、現在最も有力視されている考え方は星の大気中での元素拡散仮説である。この理論では、A 型特異星の元素組成異常は星の大気及び外層における放射圧による元素の選択的拡散によって説明される。すなわち、適当な吸収を持たないヘリウム、酸素などの元素は放射圧が効かず重力によって星の大気の底に沈んで見えなくなり、一方電子配置が複雑で吸収線の多い希土類のような重元素は逆に放射圧により大気の上層に押し上げられて、化学組成の異常過多として観測されるというものである。

しかし、元素の拡散速度は非常に小さいので、星の大気や外層で元素の拡散分離が実際に起こるためには星の大気が十分静かではなくてはならない。自転の速い星では、自転に伴う子午面環流により物質がよく攪拌されていて、元素の拡散分離が起こらない。このような星が正常な A 型星である。それに対して、自転の遅い星、強い磁場を持つ星の場合、子午面環流が弱かったり、あるいは磁場によって流れを抑えられたりするため、物質の攪拌が弱い。その結果、元素の拡散分離が起こり、表面の元素組成に異常のある特異星として観測されるというわけである。このようにして、星の自転と元素の組成異常とが関係づけられるのである。

訂 正

本年 3 月号に以下の誤りがあったので訂正します。

	誤	正
表紙説明中	1175	1675
目次	1883	1983
岩崎恭輔氏記事「火星の極冠」中		
p. 65 左, 下から 14 行目	1798	1909
"    "    13 行目	1888	1924
細川良正氏記事「アルゴール」中		
p. 73 表 2, 下から 3 行目	$\beta_1$ (1.) 1.	$\beta_1$ (0.25) 0.25
	$\beta_2$ 0.08±0.03 1.	$\beta_2$ 0.08±0.03 0.25
p. 74 左, 下から 18 行目	$\beta_1 = \beta_2 = 1$	$\beta_1 = \beta_2 = 0.25$
森国夫氏記事「1983 年 6 月 11 日の皆既日食帯に含まれる地点, Surabaya, Makasar, Port Moresby の 6 月の気象」中		
p. 82 左, 下から 5 行目～3 行目	June.....in	除く
p. 83 左, 下から 4 行目	Meterological	Meteorological
p. 84 図 2 説明	六月: 下	七月: 下
p. 85 右 18 行目	$I_0/I_0'$	$I_0'/I_0'$
p. 86 左, 下から 3 行目	調査に	調査は