

早期型特異星の磁場の起源

加 藤 正 二*

1. はじめに

星の磁場の起源を考える場合、大別して一般に次の3つの可能性が考えられる。すなわち i) 星が星間雲から作られる時に磁場も一緒に持ちこまれる(化石説), ii) 星の表面または内部でのダイナモで磁場が作られる(ダイナモ機構), および iii) ダイナモ以外の過程で作られる(代表的なものとしてダイヤモンドによる電池機構)などがある。

晩期型星の磁場の起源を考える場合, ii) は非常に重要であることはよく知られているが(たとえば太陽の例), 早期型星の場合, 表面对流層があってもごく薄いことを考えると, 観測されるような数千ガウスという強い磁場をダイナモによって維持することは考えにくい(もっとも中心対流核や主系列前の時代にその原因をもっていけば可能性は皆無とは云えないだろうが), そこでここでは ii) についてはふれないことにして, i) と iii) の可能性について紹介する。

2. 化石説

地球の場合と違って星の場合には大きさが大きいので, もし始めに磁場があったとしても, それが減衰するおおよその時間は星の年齢程度またはそれ以上になることが知られている。最初になされたカウリング(1945年)の計算を改良したリュール(1952年)のそれによると, 減衰のもっとも遅い双極子モードは太陽の場合 5×10^9 年である。このことより, 何も磁場を作ったり維持する機構を考えなくても, 星が作られたときから磁場は存在していたのだと考えてもよいのではないかというのが化石説である。ところで磁場が最初からあったとするのは適当であろうか。これの一つの目安は星間物質が収縮して星となる場合, もともと星間物質中にある磁場が物質に凍結されたまま星の中に持ちこまれるとすると, どの位の強さになるかということである。たとえば磁場 10^{-6} ガウス, 密度 10 mH/cm^3 の HI 雲が磁場を凍りつかせたまま(HI 雲でも十分よい近似で磁場は物質に凍りついていると考えられる), 星の密度まで収縮したとすると磁場の強さは 10^{10} ガウス程度になることがわかる。

この磁場の強さは観測される磁場の強さ(数千ガウス)と比べても, また星がばらばらにならないで星として存在し得るための磁場の上限 (10^{18} ガウス)と比べても大である。このことは磁場は星に始めからあったとする化石説を支持することになるが, 上で計算された磁場の強さが星の持ち得る磁場の上限より大きいことは星程度の質量のものは直接星間雲からは出来ない(もっと質量の大きいものでなければだめ)ことを示しており, この場合問題はむしろ星が作られるにはいかにして磁場が排除されなければならないか, またさらに, 早期型星にはなぜ強い磁場があるのかということではなく, なぜ晩期型星には強い磁場がないのかということなどの方が問題となってくる。

本稿の主題からは多少はなれるが, 磁場が排除されながら星が作られる機構としては非等方的収縮, メステル・スピッツァー(1956年)流の磁場を物質からスリップさせる機構などが考えられている。また逆に磁場の存在が積極的にコンデンセーションを作るのに働くものとしてはパーカー(1966年)の考えたレイラー・テイラー不安定性に類似の機構などがある。晩期型星に磁場が弱いことは星の形成とも関係しているかもしれないが, 星が年をとっているので磁場はかなり減衰していることも考えられる。例えば前に述べた磁場の減衰のタイムスケール 5×10^9 年というのは最も減衰の遅いモードのものであり, 実際の星の磁場はこれよりも一般にかなり速く減衰するであろう。星全体が対流(乱流)状態にある前主系列時代に長く滞在することも重要であろう。若し晩期型星の表面磁場は一般に表面对流層のダイナモで維持される程度の弱いものであるとしたならば, どのような歴史を経てそのような磁場になったかは対流及び乱流(ダイナモの他に磁場の散逸, はき出しにきく), 恒星風(磁場の放出にきく)の働きを考慮に入れて, かつ星の角運動量放出の問題とも関連づけて総合的に考えなければならぬだろう。

ここでまた早期星の話にかえて, 同じ早期星でも磁場が強いのか弱いのかがあるのはなぜであろうか。一つにはもちろん初期条件の違いと考えられる。他の可能性の一つとして, 間接的には初期条件とも関連しているわけであるが星に大循環流があるかないかが大いに関係するのでであろうとメステル(1967年)が指摘している。すなわち大循環流がなければ, 若し磁場が最初内部にだけ閉

* 東京大学 理学部 天文学教室
Shoji Kato: Origin of the Magnetic Fields in Early-Type Peculiar Stars

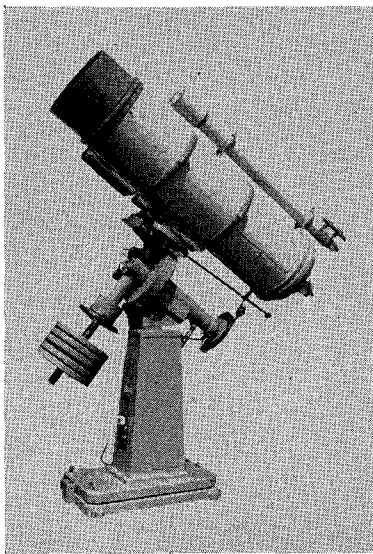
じこめられていたとしても拡散によって表面に出て来る。一方大循環流がある場合には、磁場の変形及び散逸によって外部磁場と内部磁場とが分かれる。ここで恒星風が存在する時期を星が通過したとすると外部磁場は吹きとばされる。また内部磁場が外に出ようとしても大循環流で内へ押しかえされる。従って強い内部磁場をもっているにもかかわらず外見上は磁場のない星ということになる。ところでさらにメステルは、磁場のエネルギーの方が回転のエネルギーより大きい場合には大循環流は起らないだろうが、逆の場合には起るだろうと結論している。

化石説の強みは理論的なうらづけに無理がなく、そのうえ斜回転模型と自然に結びつくという点であろう。

3. 電池機構

電池機構の特長の一つはダイナモのようにタネになる磁場を増幅するのと違って全く磁場のないところに磁場を作る点である。最初に述べたように電池機構にはいくつかの種類が考えられているが、代表的なものはピアマン(1950年)によるものである。この考えの要点はイオンと電子からなっている回転ガス体においては特殊な回転をしている場合をのぞいて、非常に弱いものではあるがポロイダルな電流(子午面内を流れる)が流れざるを

得ず、その結果長年の間にかなり強いトロイダルな磁場(経度方向の磁場)が生じるというものである。もう少し具体的に述べると、イオンの質量は電子のそれに比べて圧倒的に大きいので、重力のため電子に比べて相対的に中心の方にずれようとする。一方電子は軽いために浮き上ろうとする。すなわち重力による起電力があるわけである。ところで完全に球対称なガス球ではこの起電力はイオンと電子がある程度分離したところで打ち消されて、別に電流は流れない。ところがもしガス球が回転していると事情が少し違って来る。すなわちイオンには重力の他に遠心力が働く。単位質量に働く遠心力の場は一般にカールフリーではなく、従ってそれによる起電力もカールフリーではない。一方イオンと電子との分離によって出来る電場は相互作用が中心力であることより当然カールフリーである。従ってイオンと電子の単なる静的分離だけでは、上に述べた遠心力による起電力を一般に打ち消すことが出来ない。すなわちこの差をおぎなうために電流が流れることになり(子午面内を流れる)、トロイダルな磁場が生じる。この機構によってA型星のように早く回転している星では 10^6 ガウス程度の磁場が作られる(ピアマンはこの機構によって太陽黒点磁場を説明しようとした程である)。ところで生じる磁場はトロイダル成分だけであり、軸対称であるのでこのままでは斜



天体望遠鏡
ドーム、製作

西村製の天体望遠鏡

40 cm 反射望遠鏡の納入先

- | | |
|--------|---------------------|
| No. 1 | 富山市立天文台 |
| No. 2 | 仙台市立天文台 |
| No. 3 | 東京大学 |
| No. 4 | ハーバート大学 (USA) |
| No. 5 | ハーバート大学 (USA) |
| No. 6 | 台北天文台 (TAIWAN) |
| No. 7 | 北イリノイズ大学 (USA) |
| No. 8 | サン・ジェゴ大学 (USA) |
| No. 9 | 聖アンドリウス大学 (ENGLAND) |
| No. 10 | 新潟大学高田分校 |
| No. 11 | ソウル大学 (KOREA) |
| No. 12 | 愛知教育大学(刈谷) |

606 京都市左京区吉田二本松町 27

株式会社 西村製作所

TEL. (075) 771-1570
691-9580

回転模型とは合わないが、強いトロイダル磁場があれば不安定となって一部が浮き上がって来る可能性はあるので、この点での斜回転模型との違いをあまり気にすることはないであろう。

ところが残念なことに星にほんのわずかでもポロイダルな磁場（例へば0.1 Gauss以下）があると、この電池機構はほとんど完全といってもよいくらい働かなくなることがメステル・ロックスパーク（1962年）によって示された。原因は次の二つの作用の結果である。ここで簡単にするために大循環流がない場合を考えてみよう。まず第一はポロイダル磁場があると電流はそれに平行に流れなければならないということである。なぜならばもしそうでないとローレンス力（電流×磁場）にトロイダルな成分が存在し、軸対称な星ではこれと釣り合うべき力がない（粘性力では小さすぎる）。従って星自身の自己調整の結果、最終的には電流がポロイダル磁場と平行になったところでおちつくであろう。このタイムスケールはアルペン波が星のまわりを伝播するのに要する程度であり数値的には $10^8\sim 10^9$ 年でかなり短いと考えてよい。第二にポロイダル磁場にそっては回転の角速度は一定でなければならないということである。これは磁場が物質に凍りついていることの結果でフェラー（1932年）の法則として知られている。以上二つのことが原因となって電流は流れないことが示せるのである。この結論は大循環流があっても変わらないことも示されている。

メステル・ロックスパークの結果によって、ピアマン流の電池機構は早期星の磁場の起源としては、始め考えられたほど有効なものではないことになったが、完全にだめだと結論するのはまだ早計であろう。なぜならばピアマンの考えた理想的な場合には、観測される磁場よりかなり強い磁場を作れるのであるから、メステル・ロックスパークが採用した条件や仮定が、多少でもゆるめ

られたり変えられたりすることがあれば、観測される程度の磁場は作れる可能性がまだ残っているからである。例えば加藤・中川（1969年）は輻射圧の影響を考慮した場合、パラメーターの値を都合よくとれば、早期型星に数千ガウスの磁場を作れることを示した。なぜ輻射圧が起電力としてきくかという点、例えば理想化して一荷の電荷をもったイオンと電子およびこれらの結合した原子からなっているガス体に光子が入射した場合を考えてみよう。光子がガス体に吸収される場合、もしその運動量がイオンと電子とに半々の割合で伝えられれば、輻射には起電力の働きはないことになるが、一般にはそうではない。例へばパウンドフリー・トランジションの場合には大体のところ電子は前方に飛び出し、のこったイオンは後方に押されることが知られている（ゾンマーフェルト 1944年など）。

以上はトロイダルな磁場を発生させるピアマンの電池機構の紹介であったが、この他に回転の働きでトロイダルな電流が流れポロイダルな磁場が出来るとする電池機構もいくつか知られている。しかし一般に作られる磁場は非常に弱いようである。最近のものとしては微分回転と粘性の働きで出来るトロイダル電流（ポロイダル磁場）を調べたものがあるが（ブラウン 1968年）、やはり非常に弱い磁場しか出来ない。またごく最近のものとして、動径方向に物質の流れがあるとかかなりのトロイダル電流が流れ早期型星の磁場の説明にも使えるという話（ドウロヴィチュフスキー 1968年）もあるが、筆者はまだ論文をみてないのでこの話についてはわからない。

全体の結論として云えることは、早期型星の磁場の起源としては化石説で本質的に困難な点はなさそうである。しかし電池機構そのものは理論的にも興味のあるものであり、今後まだ発展する可能性があるかもしれない。

A型特異星における元素の拡散

尾 崎 洋 二*

1. はじめに

A型特異星およびA型金属線星（以下ではそれぞれAp型星、Am型星と略記する）の起源についての理論の最近の問題は、これらの星で観測される化学組成の異常をどのようにして説明するかということである。これまで

主に考えられてきた仮説は、強い磁場による星の表面での核反応説、あるいは連星系の物質交換で進化した星からすでに核反応を経た物質をかぶったとする説などであったが、最近これらとは全く異なった星の大気および外層で元素の物理的分離を考える説が提案され大変注目されている。これはミッショー（1970）によって最初に提案された星の大気中での元素の拡散仮説で、この理論ではA型特異星の元素の異常は輻射圧を考慮した場合の星の

* 東京大学 理学部 天文学教室

Yoji Osaki: Diffusion of Elements in Ap and Am Stars