

磁気星間雲の収縮 (II)

中野武宣*・梅林豊治*

前回には、磁気星間雲の収縮を調べる基礎である荷電粒子の運動と密度について述べ、分子雲の磁束が減少する時間を見積もる研究を紹介した。その結果、密度 $n < 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ では、雲の磁束/質量比が大きく減少することは期待できないのが、明らかになった。今回は、具体的に磁気星間雲の収縮を電子計算機によってシミュレーション (数値実験) した結果について、まず紹介する。次いで、 $n \geq 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ の段階で、雲の磁束/質量比が減少する可能性についての最近の研究を紹介しよう。

5. 磁気雲の準静的収縮

主として磁場によって力学平衡状態に保たれている星間雲は、磁場のドリフトによって準静的に収縮していくことが、4 で示された。ここでは、その収縮の様子をくわしく調べることにする。

軸対称の雲を考え、簡単のため、等温の理想気体で、回転していないとする。雲の外は一定の圧力をもつ高温低密度のガスで満たされており、磁場は雲から離れるにつれて一様磁場に近づいていくとする。念頭においているのは、分子雲中の高密度部分であり、この一様磁場は、巨大分子雲中の磁場に対応している。

このような雲のある時刻 t における構造は、自己重力とガス圧 P による力と磁場の力のつりあいの式

$$-\rho \nabla \phi - \nabla P + \frac{1}{c} \mathbf{j} \times \mathbf{B} = 0 \quad (11)$$

と重力ポテンシャル ϕ に対するポアソン方程式

$$\nabla^2 \phi = 4\pi G \rho \quad (12)$$

によって記述される。磁場については、 \mathbf{B} のかわりに、軸対称な磁力管を考え、それを貫く磁束を Φ 、それに含まれる雲の質量を $m(\Phi, t)$ とする。物質分布 $m(\Phi, t)$ は磁場のドリフトによって変化するが、その変化の時間は、4 で示したように、力学的緩和時間よりもはるかに長い。従って、 $m(\Phi, t)$ は近似的に断熱不変量とみなすことができる。その結果、 $m(\Phi, t)$ がわかっているれば、(11)、(12) 式を解くことによって、時刻 t における雲の構造、すなわち密度分布と磁場の構造が求まる。

物質分布 $m(\Phi, t)$ の時間変化率は、磁力管 Φ の表面を単位時間に横切るガスの量に等しく、

$$\frac{\partial}{\partial t} m(\Phi, t) = \int_{\sigma} \rho \mathbf{v}_B \cdot d\mathbf{S} \quad (13)$$

で与えられる。右辺は磁力管 Φ の表面における積分であり、 \mathbf{v}_B は磁場の中性ガスに対する相対速度で、(6) 式で与えられる。雲の構造がわかっているれば、雲の中のすべての点で ρ と \mathbf{v}_B が定まる。

以上のことから、雲の準静的収縮は次のようにして追跡することができる。物質分布 $m(\Phi, t)$ がわかっているれば、(11)、(12) 式を解くことによって、時刻 t における構造が決まる。この構造を用いて (13) 式の右辺を求めると、新しい物質分布 $m(\Phi, t + \delta t)$ が決まる。これを用いて、時刻 $t + \delta t$ における構造を決めることができるわけである。初期の物質分布 $m(\Phi, 0)$ がわかっているれば、この手続きを繰り返すことによって、雲の収縮を追跡することができる。

初期の分布がどうなっているかは、よくわからない。そこで、比較的簡単なものとして、一様密度の球を一様磁場が貫いている場合の分布を採用する。雲の質量 M と遠方での磁場の強さ B_0 の異なるいくつかの場合について、雲の進化を調べた。図 4, 5 は、 $M = 50 M_{\odot}$ 、 $B_0 = 0.4 \text{ mG}$ の場合の計算結果である。

図 4 は 3 つの代表的時刻における雲の構造を表わす。円筒座標 (r, φ, z) を採用しており、実線は雲の表面、点線は磁力線を表わす。磁力線につけた数値は、その磁力線の内側に含まれる雲の質量を M_{\odot} 単位で表わしたものである。初期 $t = 0$ (図の A) において、雲はすでに非常に扁平である。このように扁平になり、磁場方向の圧力勾配を大きくすることによって、この方向の重力とやっつりあうことができるのである。一方、 r 方向には圧力勾配は小さく、重力はほぼ磁場の力とつりあっている。図 5 は赤道面 ($z = 0$) 上における密度分布を、図 4 と同じ時刻について示してある。初期 (A) の密度分布は比較的一様に近いが、それでも中心が一番高い。4 で述べたように、磁場のドリフトによる磁束の減少時間はほぼ電離度に比例する。図 1 に示したように、電離度は密度の減少関数なので、密度の高い中心部分は外の領域よりも速く磁束を失い、 r 方向に収縮する。この収縮は重力の増加を伴うので、雲は z 方向にも収縮し中心部分の密度が増加する。密度の増加はドリフトを更に速める。このようにして、周辺部分はほとんど変化しないが、中心部分はどんどん収縮していく。この様子が図 4, 5 から読みとれる。このように、磁場のドリフトに伴う収縮は極めて非相似的である。中心部分の磁束は次第に減少し、やがて磁束/質量比が力学平衡を保てる限界値

* 京大理 Takenori Nakano and Toyoharu Umebayashi: Contraction of Magnetic Interstellar Clouds

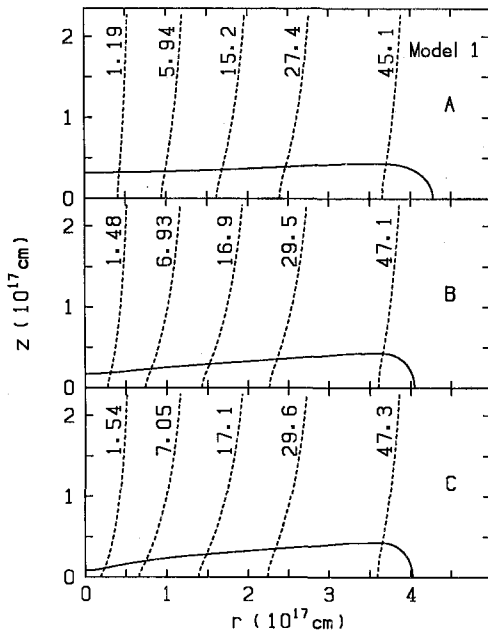


図 4 準静的に収縮する磁気雲の3つの代表的時刻における構造. 雲の質量は $50 M_{\odot}$. (A) $t=0$ (初期); (B) $t=3.2030 \times 10^5$ 年; (C) $t=3.4308 \times 10^5$ 年.

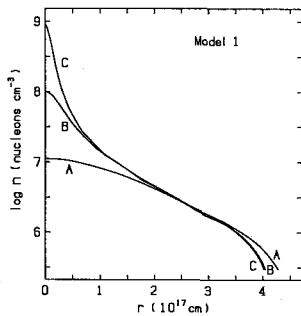


図 5 準静的に収縮する磁気雲の赤道面における密度分布. モデルと時刻は図 4 と同じ.

を下回ると、中心部分は動的に収縮し始める。この部分が最終的には星になると考えられる。今のモデルでは、この部分の質量 M_0 は $3.3 M_{\odot}$ と推定されている。

このような中心部分の質量が、何によって決まるのかを考えてみる。(6)式からわかるように、磁場のドリフト速度は磁場の力に比例する。ガス圧だけで支えられる雲では、磁場の力は非常に弱いので、ドリフトは極めて遅い。磁場のドリフトが顕著なのは、ガス圧で支えることができず、主として磁場によって支えられている雲においてである。従って、ガス圧だけで支えることのできる限界質量が、収縮する中心部分の質量 M_0 の1つの目安になる。初期の円板状の雲の中心領域におけるこの限界質量 M_J (簡単のためジーンズ質量と呼ぶ) は、今のモデルでは $1.2 M_{\odot}$ である。 M_0 は M_J の数倍になって

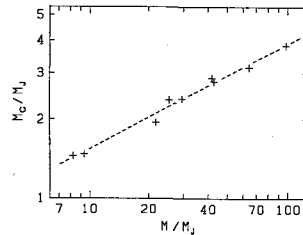


図 6 準静的に収縮する雲の質量 M と、最後に動的に収縮する中心部分の質量 M_0 との関係. M_J は初期状態におけるジーンズ質量.

いる。

雲の質量が $50 \sim 600 M_{\odot}$ 、初期の中心密度が $10^4 \sim 10^7 \text{ cm}^{-3}$ にわたる、いくつかの雲の準静的収縮を調べた。これらのモデルに対する、雲の質量 M と動的収縮をする中心部分の質量 M_0 の関係が、図 6 に +印で示されている。点線は、

$$M_0/M_J = 0.62(M/M_J)^{0.4} \quad (14)$$

の関係を表わす。数値計算の結果は、この直線によく乗っている。ガスの温度は 30 K に固定しているため、 M_J は初期の中心密度だけで決まる。 M_J が同じで、 M の大きい雲では、中心密度は同じだが、半径が大きい。従って、赤道面上での密度分布がより平坦である。これは磁場のドリフトの速く進行する領域が広いことを意味し、そのために M_0 は大きくなる。図 6 はこのような因果関係を表わしていると考えられる。

これらのモデルは軸対称であり、密度の極大点は対称軸上の1点だけである。平板状の雲の中に密度ゆらぎがあるとどうなるだろうか。磁場のドリフトに伴う準静的収縮は極めて非相似的である。そのため、各々の高密度部分がまわりよりも速く収縮して、雲はやがて分裂し、多数の星が生まれると考えられる。このように、磁場のドリフトは雲の分裂機構としても働くことが推定される。

6. 磁気雲の動的収縮

前節で述べたように、主として磁場によって力学平衡に保たれている雲の中心部分は、最後には動的に収縮し始める。磁場の力が重力よりも弱い雲は、初めから動的に収縮するであろう。しかし、4で述べたように、 $n \leq 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ の状態では、動的に収縮する雲の磁束を減少させることはほとんど不可能である。ブラックとスコット (1982) は、磁場のドリフトを考慮に入れて、軸対称雲の動的収縮を計算機でシミュレートした。仮想的な電離度を使うと、磁束がかなり減少する場合もあるが、図 1 に示したような現実に近い電離度を使うと、磁束はほとんど減少せず、4の結論を支持している。

磁束/質量比が大幅に減少するのは、もっと高密度の

状態に限られる。高密度になると、イオンの割合 n_i/n は密度 n に反比例して減少し、 $n \geq 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ では、固体微粒子が荷電粒子の主成分になる。非常に厚い雲の中では、宇宙線の強度が物質との相互作用によって減少する。その結果、宇宙線によるガスの電離率 ζ は、雲の表面からの深さ $\chi (\text{g cm}^{-2})$ とともに、 $\zeta \propto \exp(-\chi/\lambda)$ で減少する。ここで、 $\lambda \approx 96 \text{ g cm}^{-2}$ である。そのため、荷電粒子の密度は更に小さくなる。また、(7) 式から推定されるように、 $n \approx 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ では、 $\tau_i \omega_i \approx 10$ であり、密度が上昇すると、この値は更に減少する。その結果、このような高密度雲の中では、イオンも磁場に十分凍結できなくなる。荷電粒子の主成分になりつつある微粒子と磁場との結合は、イオンよりもはるかに弱い。図 2 に示されているように、電子密度はイオン密度より 2 桁ほど小さいが、更に高密度になると、この電子でさえ磁場に十分凍結できなくなる。これらのことから、非常に高密度の雲では磁束が大幅に減少する可能性がある。

収縮する雲がどの段階で磁場との結合を断ち切るかを、簡単なモデルで調べてみる。雲の質量を M 、磁場に垂直な方向の半径を R とする。磁場の平均的強さを、磁場の力が重力の半分程度になるようにとる。すなわち、雲の平均的柱密度を $\sigma = M/\pi R^2$ として、

$$B \approx \pi G^{1/2} \sigma \quad (15)$$

とする。まず、極端な場合として、雲がほぼ球形をしている場合を考える。磁場のドリフト速度 v_B は、(6) 式によって与えられるが、その際必要な、磁場の力 $\mathbf{j} \times \mathbf{B}/c = (\mathbf{j} \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B}/4\pi$ の大きさを、 $B^2/4\pi R$ で近似する。 $M = 1M_\odot$ の雲について、このようにして得られた v_B が、 n 又は σ の関数として図 7 に示してある。比較のため、自由落下速度 $u_f = (2GM/R)^{1/2}$ が点線で示されている。又、鎖線は (15) 式で与えられる磁場の強さである。

密度が 10^{11} cm^{-3} を越えると、 v_B は密度の上昇と共に急速に増大し、 $n \approx 5.2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ で u_f を越える。 $v_B \geq u_f$ の状態では、磁場はガスとほとんど結合できず、雲の磁場は (15) 式よりもかなり弱くなっている。磁場が弱くなると、 v_B は小さくなり、磁束の減少時間 t_B は長くなる。このような状況では、雲は t_B が収縮時間とほぼ等しくなるような磁場、すなわち、 $v_B \approx u_f$ が成り立つような磁場しか保持することができない。そこで、 $|\mathbf{j} \times \mathbf{B}| \approx B^2/4\pi R$ としたとき、 $v_B \approx u_f$ が成り立つような磁場 B_f が図 7 に示してある。 B_f は $n \approx 5.2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ で急速に減少して 0 になってしまう。すなわち、雲はこの密度付近で磁場から解放されるのである。初期の磁場を (15) からずらせても、結果はほとんど変わらない。

このような高密度になると、電離度が非常に低くなり、磁場は極めてドリフトしやすい。磁場が弱くなると、

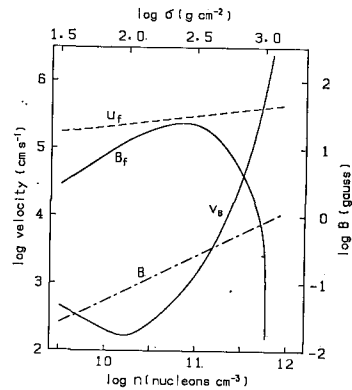


図 7 動的に収縮する磁気雲での様々な物理量。B は仮定した磁場の強さ、 v_B は磁場のドリフト速度、 u_f は磁場に垂直な方向の自由落下速度、 B_f は $v_B = u_f$ となるような磁場の強さを、それぞれ表す。

$\tau_i \omega_i$ が減少し、ガスと磁場の結合が更に弱くなる。 $|\tau_i \omega_i| \leq 1$ になると、ジュール散逸が効き出し、磁場の散逸はさらに速くなる。そのため、 B_f が突如として 0 になったのである。

もう 1 つの極端な場合、すなわち磁場の方向にはガス圧と重力がつりあいながら、磁場に垂直な方向に収縮する扁平な雲の場合を考えても、同様の結果が得られる。種々の場合について調べた結果、雲が磁場から解放されるのは、雲の柱密度 σ が数 100 g cm^{-2} のときであることがわかった。

B_f がある密度で突如として 0 になることは、必ずしも雲の中の磁場が消えてしまうことを意味しない。 $|\mathbf{j} \times \mathbf{B}|$ が $B^2/4\pi R$ よりもはるかに小さい、force-free に近い磁場なら存在してもよいのである。

この結果を使って、生まれたばかりの星に取り込まれる磁束の大きさを推定してみる。雲の動的収縮は極めて非相対的であり、中心部分は速く収縮して、力学平衡状態の芯を作る。まわりのガスはこの芯に降り積もり、芯は次第に太っていく。柱密度 σ が 10^8 g cm^{-2} 程度よりも小さい外の領域は、磁場をほぼ凍結して収縮してくる。(15) 式によると、 $\sigma = 10^8 \text{ g cm}^{-2}$ の領域は、約 0.8G の磁場をもっている。内部の $\sigma > 10^8 \text{ g cm}^{-2}$ の領域は、磁場との結合が弱く、ほとんど force-free の磁場しかもっていない。この領域は、約 0.8G の磁場をもつ周辺領域に囲まれているから、0.8G 程度のほぼ一様な磁場に貫かれていると考えられる。

収縮してきたガスは、力学平衡の芯に衝突したとき運動エネルギーを熱に転換したり、芯からの輻射を受けたりして、再び電離され、磁場を凍結する。このようにして、ガスと磁場が芯に持ち込まれていくのである。ガスが再凍結した磁場の強さは、芯の収縮によってそのまわ

りの磁場が強くなっていなければ、0.8G程度と考えてよい。



ここまでは雲の回転の効果を無視してきた。雲の回転は磁場をねじり、増大させる。回転の効果は収縮が進むほど大きくなる。1M_☉の雲では、 $\sigma \approx 10^3 \text{ g cm}^{-2}$ の領域は10⁴R_☉程度の半径をもっている。これは生まれたばかりの星の半径の約100倍もあるので、この状態では回転の効果は小さいかもしれない。回転の大きい内側の部分では、磁場はガスに凍結していないので、回転による巻き込みは起らない。従って、この場合も芯に取り込まれる磁場は0.8G程度であろう。

まわりのガスが10³年程度の比較的短い時間で芯に降り積もるならば、その間に芯が輻射によって失うエネルギーは、芯の重力エネルギーに比べて小さい。このような場合、生まれたばかりの星の半径は、この星が主系列に達した時の半径の約100倍である。0.8G程度の磁場をもった星が、仮に磁束を保存したまま主系列星になると、その磁場は8kG程度となる。これは磁気星の磁束と同程度であり、生まれたばかりの星の磁束は磁気星の

磁束と同程度であることを意味している。

まわりのガスが10³年よりもはるかに長い時間をかけて芯に降り積もる場合、生まれたばかりの星の半径は、主系列星の半径の100倍よりもかなり小さい。この場合、降り積ってくるガスは、芯に衝突する以前に、芯からの輻射によって電離され、磁場との結合を回復すると考えられる。この電離領域の半径は100R_☉程度と推定されている(ステイラー他1980)、従って、生まれたばかりの星がもつ磁束は、上述の場合と大差ないと考えてよさそうである。

雲の収縮の最終段階における磁場の振舞いについて、かなり大胆な考察を行った。数値シミュレーションなどによる詳しい研究が必要なことは言うまでもない。また、星の回転やハヤシ・フェイズにおける激しい対流によって、星の磁場が大きな影響を受ける可能性もある。しかし、星間雲の磁束/質量比と磁気星のその比との間にある4~5桁の落差を、星の形成論によって説明できるめどはついた、と言えるのではないだろうか。

 <p>D. Reidel Publishing Company 新刊</p> <p>ASTRONOMY WITH SCHMIDT-TYPE TELESCOPES</p> <p>Proceedings of the 78th Colloquium of the International Astronomical Union, Asiago, Italy, August 30 - September 2, 1983</p> <p>edited by MASSIMO CAPACCIOLI <i>Institute of Astronomy, University of Padova, Italy</i></p> <p>ASTROPHYSICS AND SPACE SCIENCE LIBRARY 110</p> <p>644 pp. Cloth ¥24,200 ISBN 90-277-1756-7 May 1984, D. Reidel Publishing Company</p> <p>Through 70 contributed papers, dealing mainly with new results, and 24 review lectures by outstanding scientists, the following topics are amply discussed: photographic and objective-prism surveys; photographic and data acquisition techniques and reduction methods (hardware and software); astrometry from ground and space; Solar System astronomy with emphasis on comets; Galactic astronomy (galactic structure, spectral classification, variable stars, nebulae, interstellar matter, supernovae); extragalactic astronomy (normal and active galaxies, peculiar morphologies, QS's and clusters/superclusters) star and galaxy counts (techniques and results); observational cosmology, ground- and space-based future developments of Schmidt astronomy (new surveys, all reflective wide-field telescopes, detectors and interaction with the Space Telescope).</p>	<p>NEW TITLES:.....JAN.-MAY., 1984</p> <ul style="list-style-type: none"> * STELLAR NUCLEOSYNTHESIS Proceedings of the 3rd Workshop of the Advanced School of Astronomy of the Ettore Majorance Centre for Scientific Culuture, Erice, Italy, May 11-21, 1983 ed. by Chiosi, C./ASSL 109/¥17,400/ISBN 90-277-1729-X * GALACTIC & EXTRAGALACTIC INFRARED SPECTROSCOPY Proceedings of the XVith ESLAB Symposium held in Toled, Spain, December 6-8, 1982 ed. by Kessler, M.F./ASSL 108/¥18,600/ISBN 90-277-1704-7 * PLANETARY NEBULAE A Study of Late Stages of Stellar Evolution ed. by Pottasch, S.R./ASSL 107/¥13,800/ISBN 90-277-1672-2 * STRUCTURE & EVOLUTION OF THE MAGELLANIC CLOUDS Symposium No. 108 held in Tübingen, West Germany, 5-8 September 1983 ed. by van den Beghi, S./IAUS 108/¥12,600/ISBN 90-277-1722-2 * DOUBLE STARS, PHYSICAL PROPERTIES & GENERIC RELATIONS Proceedings of IAU Colloquim No.80 held at Lembang Java, 3-7 June 1983 ed. by Hidayat, B./¥27,600/ISBN 90-277-1748-6 * QUANTITATIVE ASPECTS OF MAGNETOSPHERIC PHYSICS ed. by Lyons, L.R./GAM Ser./¥15,600/ISBN 90-277-1663-3 * FORMATION & EVOLUTION OF GALAXIES & LARGE STRUCTURES IN THE UNIVERSE Proceedings of the NATO Advanced study Institute on Formation and Evolution of Galaxies and Large Structures in the Universe-La Plagne, France, March 1983 ed. by Audouze, J./NATO ASI C 117/¥18,600/ISBN 90-277-1685-4 * GALACTIC ASTROPHYSICS & GAMMA-RAY ASTRONOMY Proceedings of a Meeting Organised in the Context of the XVIII General Assembly of the IAU, held in Patras, Greece, August 19, 1982 ed. by Morfill, G.E./¥18,000/ISBN 90-277-1645-5
<p>D. Reidel Pub 日本総代理店</p> <p> 株式会社 ニュートリノ</p> <p>東京都港区赤坂 8-4-7 カムビル 107 TEL.(03)406-6137</p>	