

宇宙における磁気ループ（バブル）現象

国立天文台 柴田一成 (Kazunari Shibata)

1. 磁気ループ（バブル）現象の観測

近年の観測技術の発展にともなって、宇宙には以下のように様々な磁気ループ（またはバブル）現象が存在することが明らかになってきた。（ただし、ループ、バブルという言葉は、ここでは図 1 のような構造をさすものとする。）

（1）太陽コロナループ（図 2 参照）

日食の時に見えるコロナは 100 万度にも達する高温プラズマである。大気圏外からの X 線観測が可能になるまでコロナはほぼ球対称の形をしていると信じられていたが、1970 年代のスカイラブ衛星からの X 線観測によって、コロナの正体は球対称とは似ても似つかないループ（状に分布した高温プラズマ）の集合体であること、そのループは磁力線の形を表わしていること、などが明らかになった。この発見によって、当時定説とされていたコロナの音波加熱説（コロナが対流層で発生した音波－衝撃波に

よって一様に加熱されるという説)は否定され、「コロナ加熱問題」はふりだしに戻ることになった。現在アルフベン波加熱説など各種の磁氣的加熱機構が提案されているが、まだ決着を見ていない。

昨年(1992年)打ち上げられた日本の太陽観測衛星「ようこう」は、従来の予想とは異なってコロナループが時間的に非常に激しく変動していることを見いだした。これより、コロナ加熱機構は激しい時間変動と密接に関連したメカニズム(例えばリコネクション)ではないか、という考えが有力になりつつある。

(2) CME (Coronal Mass Ejection) (図3)

やはり大気圏外からの人工日食観測によって、太陽コロナから惑星間空間へ向けて巨大(太陽半径程度)なループ(またはバブル)状の質量噴出現象が1日に0.2 - 1回程度起こることがわかってきた。このような現象のことをCMEと呼んでいる。噴出速度は数10 - 1000 km/sである。様々な状況証拠により、ループ(またはバブル)構造は磁場の構造を反映していると考えられている。発生機構はまだ不明であるが、おそらく磁場にともなう力($\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ 力)によって加速されたものであろう。

(3) 浮上磁場領域 (EFR: Emerging Flux Region) (図4)

最近20年間の高分解地上観測によって、太陽表面磁場(黒点磁場)は対流層内部から浮上してきたものであることが確かとなった。浮上の様子

は光球-彩層で直接観測されており、その領域のことを浮上磁場領域 (E F R) と呼んでいる。磁場形状は細部をみるとループ状、マクロにはバブル状である。大きさは1-3万km、浮上速度は1-10km/sである (Zwaan 1987; Shibata et al. 1989)。

(4) 銀河中心電波ローブ (図5)

我々の住んでいる銀河 (銀河系=天の川) の中心に、 Ω 型をした巨大な (サイズ=600光年ほど) 構造が存在することが、野辺山45m電波望遠鏡によって発見された (Sofue and Handa 1984)。これは銀河中心電波ローブと呼ばれている。正体はまだ不明であるが、ジェットのようにも見えるし、ループあるいはバブルのようにも見える。電波ローブの左下足元には強い磁場構造 (10-100マイクロガウス) が見つかったので、電波ローブも磁場にともなう現象である可能性が高い (Shibata 1989)。

(5) 銀河円盤ループ/バブル (図6)

銀河系円盤部の中性水素ガス分布を高分解電波観測で見ると無数のループ/バブル構造が見える。その中には超新星爆発の残骸 (またはその集合体) であることが判明しているものもあるが、超新星などと全く関連していないループ/バブル構造も多い。おそらくいくつかは太陽コロナループまたは浮上磁場ループのような磁気ループ/バブルであろう。ちなみに磁場の方向の観測から磁力線の向きがループ構造に沿っている現象も見つか

り始めている。

2. 磁気ループ（バブル）形成の理論

詳しくは物理学会誌（柴田 1992）に書いたもので、ここでは要点だけまとめしておく。

太陽磁場は対流層内部におけるダイナモ作用で形成されたと考えられている。対流層内部に形成された磁束管には「磁気浮力」（magnetic buoyancy）と呼ばれる浮力が働き、それによって磁束管が浮上し黒点が形成される（Parker 1955）。

磁気浮力とは何だろうか。簡単な例として、等温プラズマに埋まっている孤立磁束管を考えよう。（太陽内部／大気プラズマの扱いはMHD（磁気流体力学）が適用できる範囲なので、以下の議論はすべてMHD方程式に基づく。）管の内外の圧力平衡は、

$$B^2/8\pi + p_i = p_e$$

という式で決まる。ただし、 p_i 、 p_e は管の内外のガスの圧力である。これに状態方程式 $p = \rho RT/\mu$ を代入すると、磁気浮力

$$\Delta \rho g = B^2/(8\pi H)$$

が得られる。ただし、 H は圧力スケールハイト（ $= RT/\mu g$ ）である。磁場が原因となって浮力が発生するので、磁気浮力と呼ばれる。

上述の磁束管（1次元）は非平衡な状態にあり、浮上せざるを得ない運

命にあったが、2次元（水平）磁束シートであれば一応平衡状態にすることはできる。しかし、この場合でも多くの場合、結局は不安定となって磁束の一部は浮上することになる。このような不安定のことを一般に「磁気浮力不安定」という（図7）。このとき、磁力線が曲がるモードのことを「うねりモード」または「パーカー不安定」と呼び、曲がらないモードを「交換モード」と呼ぶ。磁力線を曲げると磁力線に沿ってプラズマが落下してループの頂点の磁気浮力は増大するので、「パーカー不安定」の方が「交換モード」より起こり安い。対流層内部の磁束管がループ状に浮上してくるのはこのせいである。

パーカー不安定は磁力線を曲げるので、曲げる波長が短いと磁気張力が大きくなって不安定は安定化される。不安定が起こるためには、

$$\text{磁気浮力 } \Delta \rho g = B^2 / (8\pi H) > \text{磁気張力 } B^2 / (4\pi \lambda)$$

とならないといけない。これより不安定の大ざっぱな条件として、

$$\text{波長 } \lambda > 2H$$

を得る。磁場が連続的に分布している場合のより正確な計算によれば、磁場中で磁気圧～ガス圧のとき不安定が起こるには

$$\lambda > 10 H$$

とならなければならない（Parker 1966）。最も不安定となるのは波長が20H程度のときで、そのときの成長時間はスケールハイトHをアルフベン波が伝わる時間程度となる。

0次的には、この波長が形成されるループのサイズを決める。ちなみに

銀河円盤では $H \sim 100 \text{ pc}$ なので形成されるループは $1 - 2 \text{ kpc}$ のオーダーとなる。図6で見えているループのあるものはこの程度のサイズをしている。太陽の場合、議論はそれほど簡単でない。というのはスケールハイトが場所（深さ、高さ）によって大きく変化しているからである。ちなみにスケールハイトが最小となるのは光球であり、およそ 200 km 程度である。これに対し対流層の底とコロナでは $H \sim \text{数万 km}$ である。

3. パーカー不安定の非線形発展

パーカー不安定によって形成された磁気ループが、その後どのように浮上、膨張していくかについては、非線形発展を調べてみないと確かな事はわからない (Matsumoto et al. 1988)。

図8は筆者らが行なったパーカー不安定の非線形シミュレーションの1例（太陽の場合）である。初期に孤立磁束シートが光球直下の対流層に埋め込まれており、微小摂動を真ん中付近に与えたのちの不安定の非線形発展を追跡したものである。光球直下の対流層のスケールハイトは光球のそれとあまり変わらないので、形成された磁気ループのサイズは初期には $\lambda \sim 20H \sim 4000 \text{ km}$ 程度である。これは観測されている浮上磁場領域のサイズより少し小さい。しかし興味深いことに、磁気ループのサイズは時間がたつにつれ自己相似的に膨張していく。この例では最終段階(c)でおよそ $80H \sim 16000 \text{ km}$ くらいまでに達する。これは浮上磁場領域のサイズ

と同程度である。膨張の原動力はもちろん磁気浮力であるが、非線形段階では磁気圧と言った方が良い。膨張時間は短く、およそ10数分である。もしコロナが真空ならばループはこの後もどんどん加速度的に膨張していくのであるが、実際のコロナは真空ではなく、小さいが有限のガス圧と磁気圧がある。結局、磁気ループの磁気圧がコロナの圧力と同程度になった頃に自己相似的膨張が止まる。(c)はその停止の直前の段階に対応する。

なお磁気ループの自己相似的膨張に対しては、解析的な近似解が見つかっている (Shibata et al. 1990)。それによれば、ループの自己相似的発展はラグランジュ座標で指数関数的時間発展を示すという面白い特徴をもっている。

銀河の場合のパーカー不安定の非線形時間発展については、物理学会誌の解説 (柴田 1992) を見られたい。

4. おわりに

講演では、昨年打ち上げられた太陽観測衛星「ようこう」の撮影したコロナのビデオムービーをお見せしたが、ここでそれをお見せできないのが残念である。ムービーから上でも述べた激しい時間変化、とりわけ、(1) transient loop brightening、(2) global restructuring、(3) expanding coronal loops (or CME)、(4) jets、(5) helical or sheared coronal loops、などが発見された。このうち(1)、(2)、(4)

にはリコネクションが関与している可能性が高い。

今後は太陽の磁気ループ現象のみならず他の天体における磁気ループ現象でも、ループ／バブルのヘリカル構造、それにともなうリコネクション、などの研究が次第に中心課題になってゆくと考えられる (e.g., Shibata and Matsumoto 1992; 図9 参照)。

参考文献

- Heiles, C. 1984, Ap. J. Suppl. 55, 585.
- Matsumoto, R. et al. 1988, Publ. Astr. Soc. Japan 40, 171.
- Parker, E. N. 1955, Ap. J. 122, 293.
- Parker, E. N. 1966, Ap. J. 145, 811.
- Shibata, K. 1989, in Proc. "The Center of the Galaxy", IAU Symp. No. 136, p. 313.
- 柴田一成 1992, 日本物理学会誌、47巻、188.
- Shibata, K. et al. 1989, Ap. J. 345, 584.
- Shibata, K. et al. 1990, Ap. J. Lett. 351, L25.
- Shibata, K. et al. 1990, Phys. Fluid B, 2, 1989.
- Shibata, K. and Matsumoto, R. 1992 Nature, 353, 633.
- Sofue, Y. and Handa, T. 1984, Nature, 310, 568.
- Zwaan, C. 1987, Ann. Rev. Astr. Ap., 25, 83.

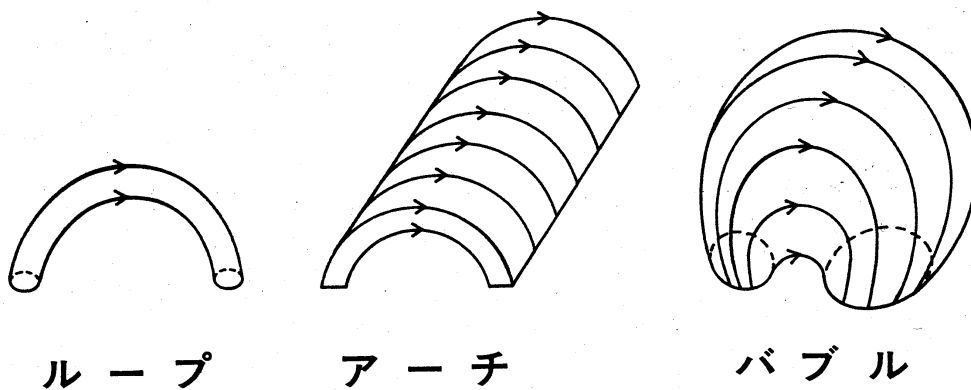


図1 ループ、アーチ、バブル

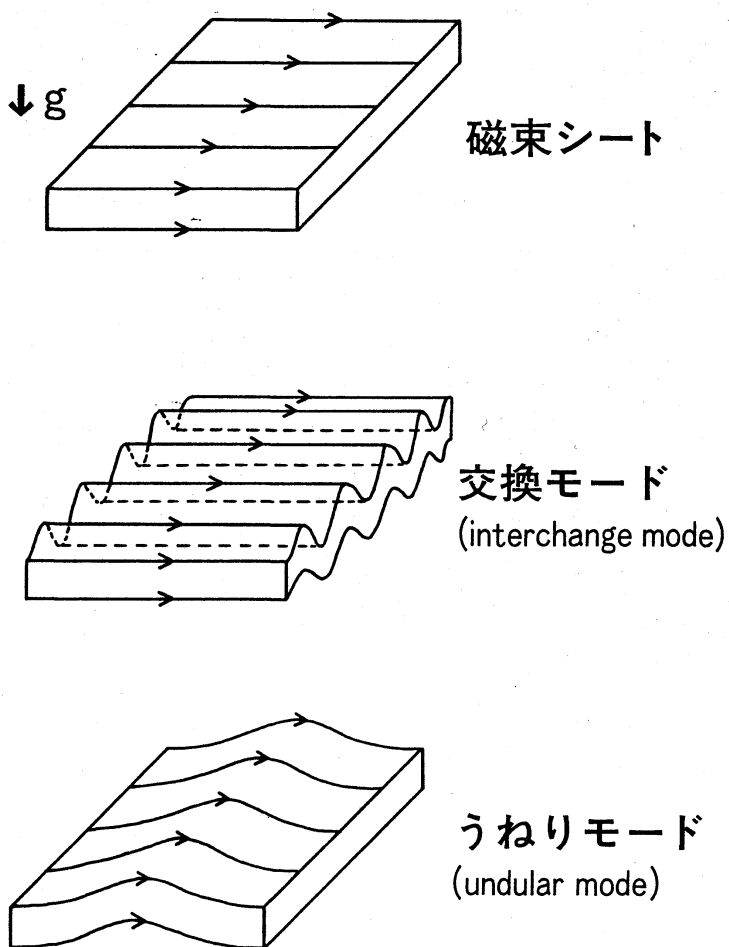


図7 磁気浮力不安定の分類

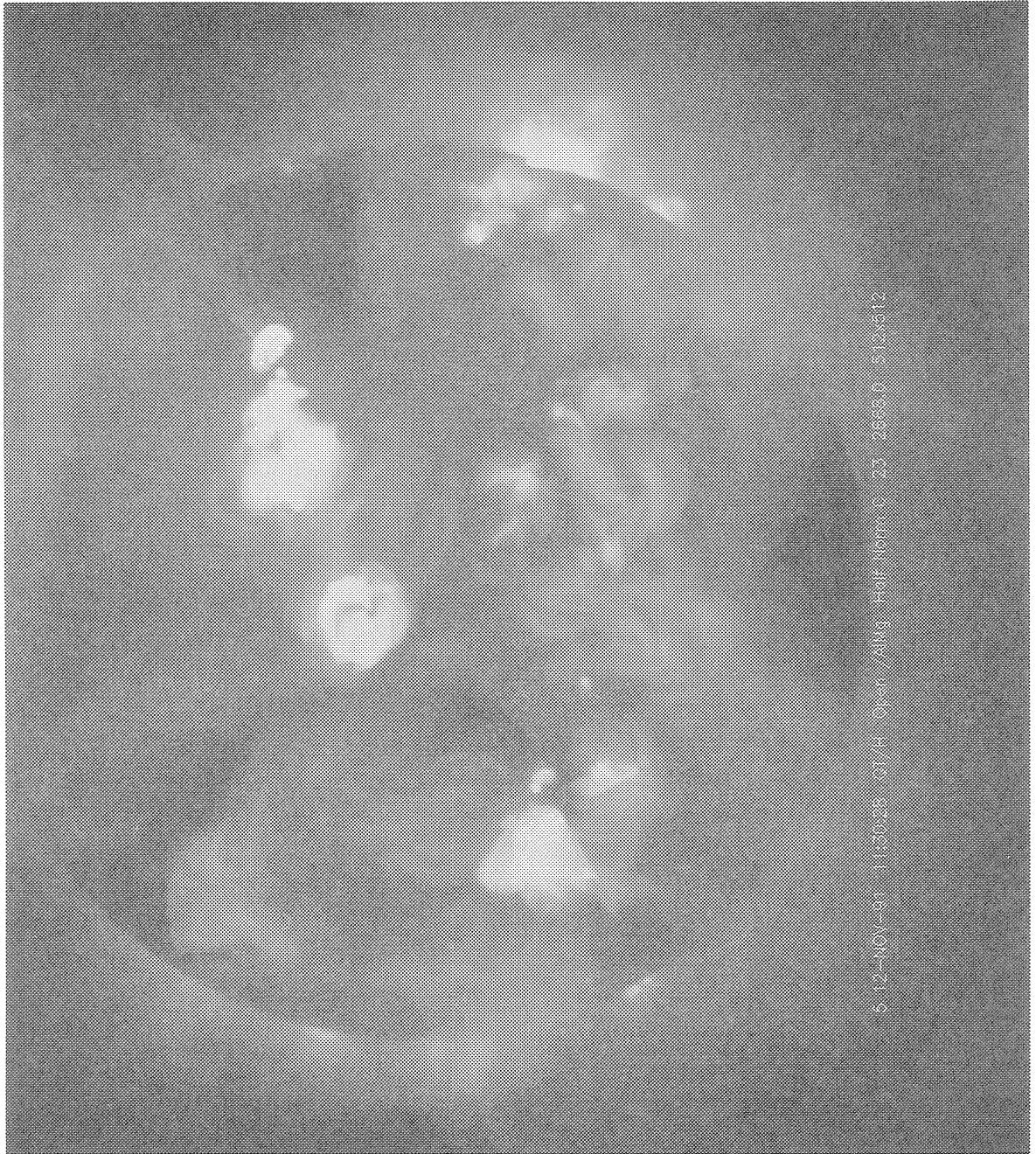


図2 太陽コロナループ（太陽観測衛星「ようこう」による軟X線像）

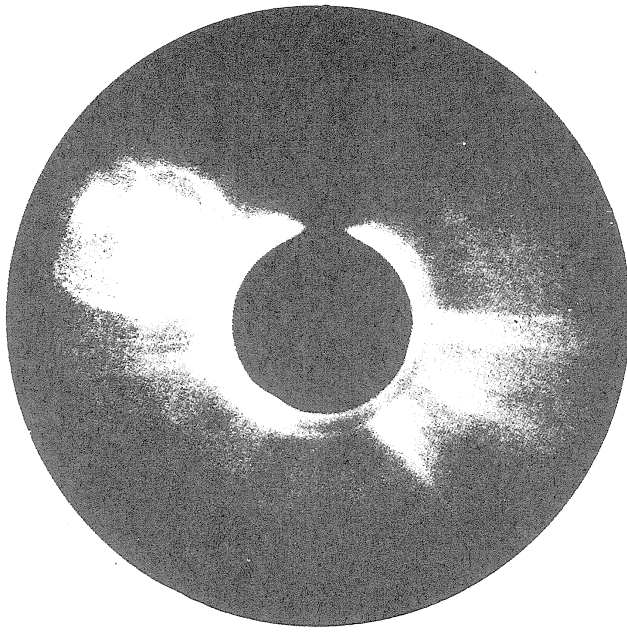


図3 CME (Coronal Mass Ejection)。スカイラブによる白色光像。

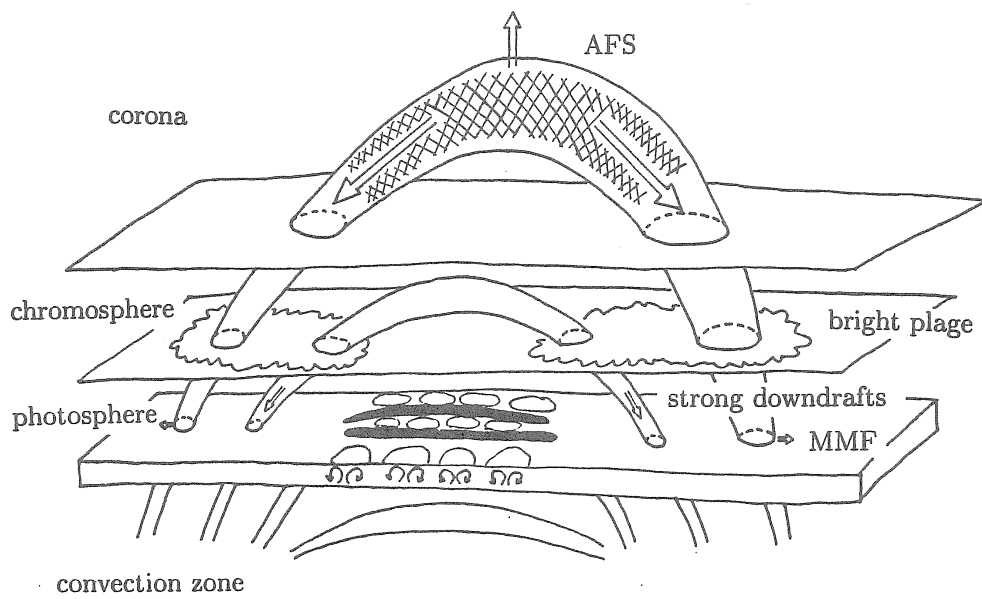


図4 浮上磁場領域の想像図 (Shibata et al. 1989)

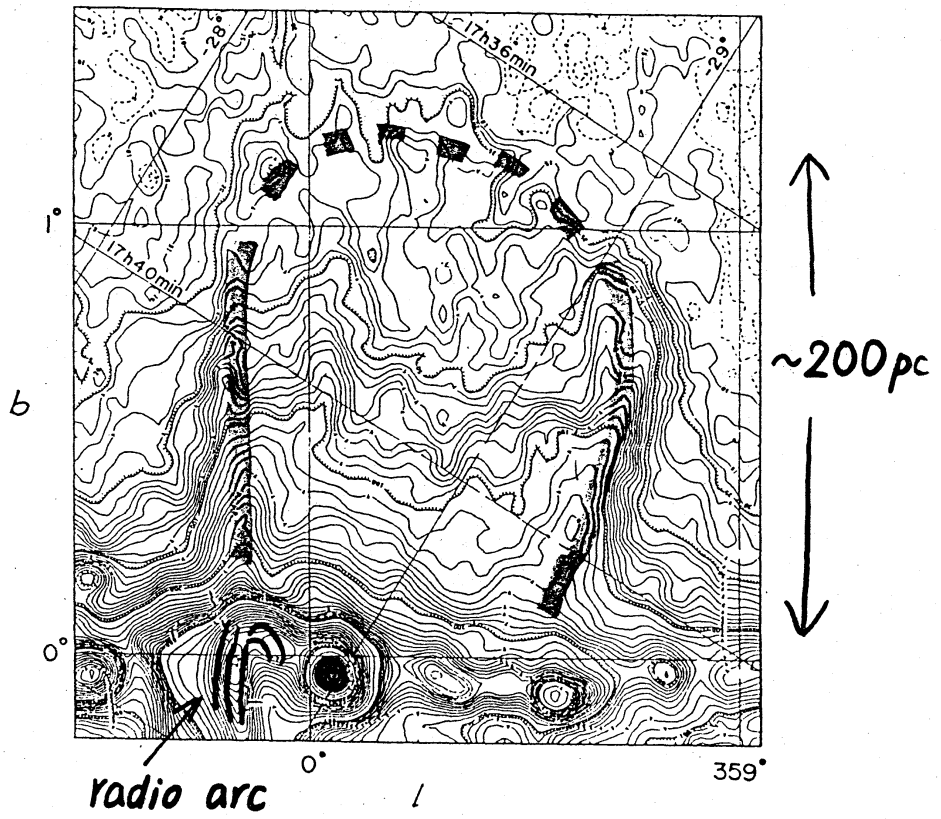


図5 銀河中心電波ロープの電波強度図 (Sofue and Handa 1984)

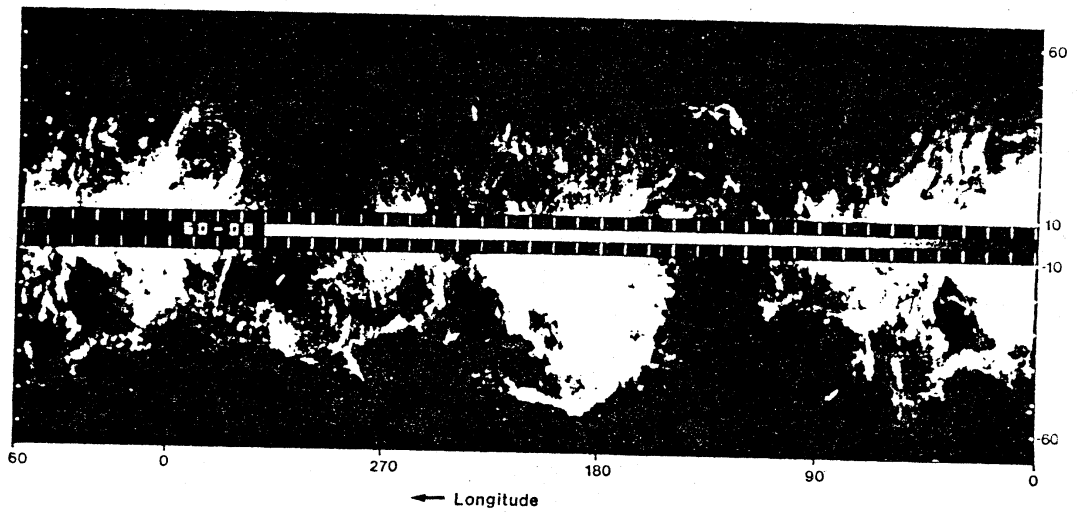


図6 中性水素線 (21 cm) で見た銀河系円盤部 (Heiles 1984)

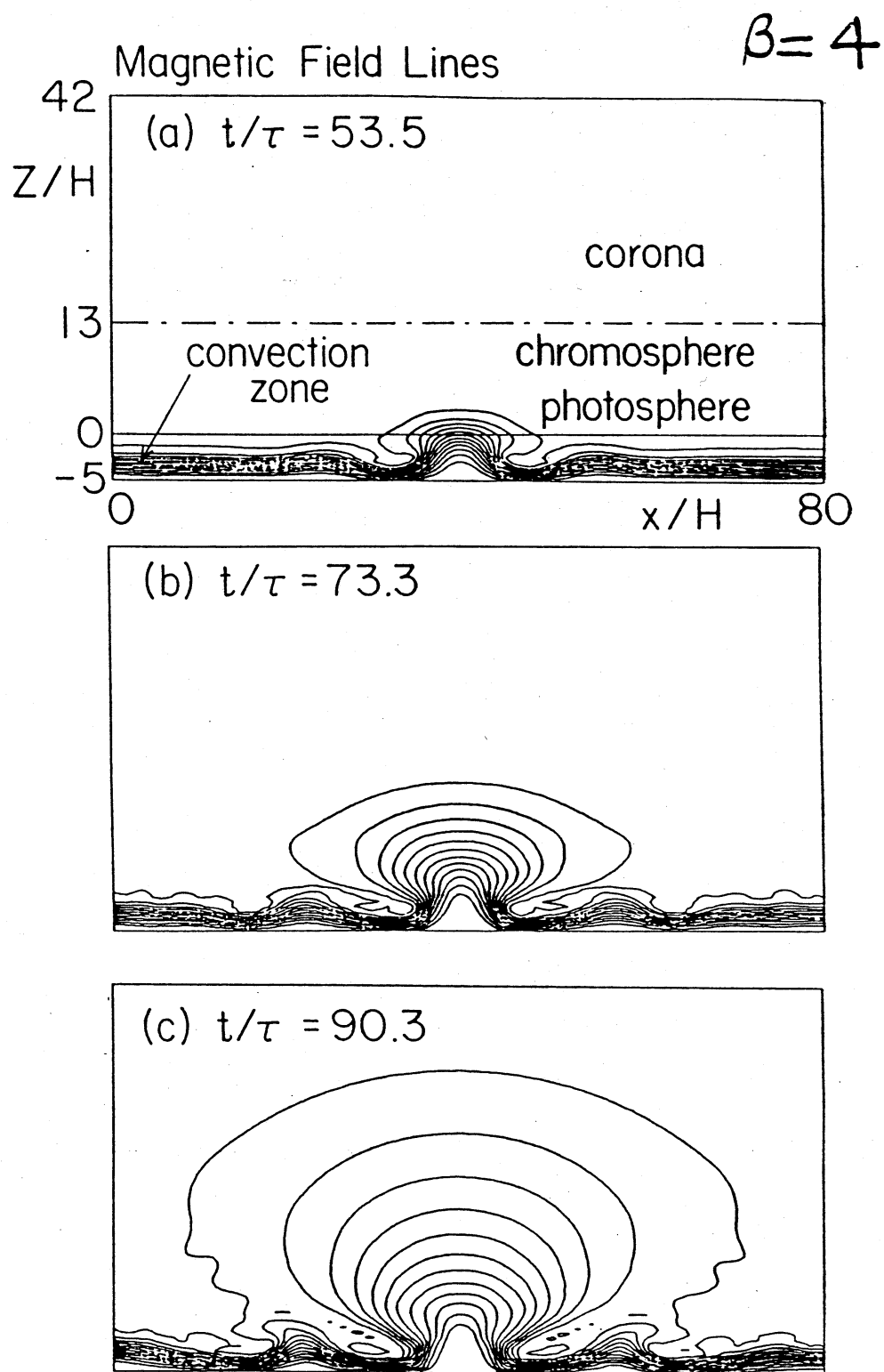


図8 パーカー不安定の非線形発展。太陽浮上磁場の場合。自己相似的膨張に注意 (Shibata et al. 1990, Ap. J. Lett. より)

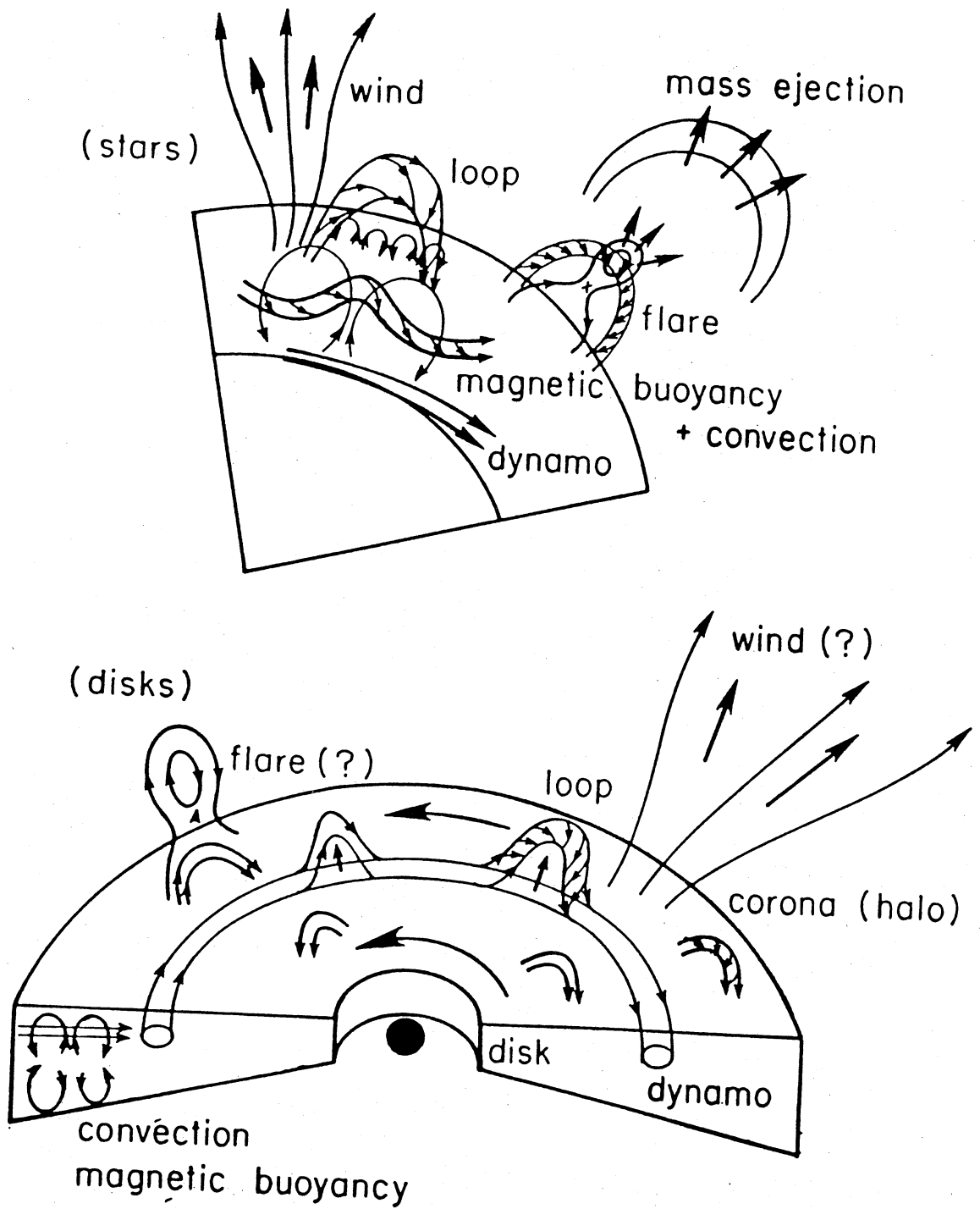


図9 星（太陽、恒星）、ガス円盤（銀河円盤、降着円盤）における
種々のMHD過程