



宇宙ジェット

— あるパラダイムの終焉 —

岡本 功

〈国立天文台 OB〉

e-mail: okamoto@nao.ac.jp

1980年代以前の古き良き時代には電磁流体 (MHD) 風は“自然な”方向へ吹いていた。ところが、1980年代に入ると、風向きが変わって来て、回転軸とほぼ平行な“不自然な”方向へ向かい始めた。そして、この10年の間に、星風・デスク風の分野では、それら自身のトロイダル磁場のフープ・ストレスにより回転軸の方向へ漸近的にコリメイトしていくというパラダイム (定説) のようなものが出来上がっている。このようなパラダイムが誕生した背景を紹介して、これが誤りであることを示し、MHDアウトフローの流れを“自然”な方向に戻す試みをする^{1), 2)}。

1. 宇宙のジェット現象

宇宙はジェット現象に満ちみちているといっても過言でない。特に、YSO³⁾、系内コンパクト源⁴⁾、AGN⁵⁾などから噴射している大規模ジェットはよく知られている。これらのジェットは空間・時間・速度の各スケールが桁違いに異なるにも拘わらず、そこに共通しているのは、中心天体 (星、あるいはブラックホール) とその周辺の降着円盤、回転と磁場の存在である、というのが現在の研究者の共通の理解であろう。

地球でも、容易にジェットを見ることができる。例えば、私は富士山頂でジェット現象を体験した。今から38年前 M1 の夏、突然富士山に登ってやろうという野心に目覚めた。前夜東京駅から夜行の富士吉田行に乗った。山頂で飲むことを楽しみに缶ビールを買い込んだ。当時は自動販売機など乱立していない頃である。朝6時頃1合目から登りはじめて、11時頃山頂に着いた。いざ飲まんと栓を開けると、ビールが頭上高く吹き上げた。(釣落とした魚がしだいに大きくなるように、ビールが吹き上げた高さもだんだん高くなってくるような気がす

る。) 口を着ける暇もなく、あっという間に無くなってしまった。落胆この上なかった。平地と山頂の気圧の差など、山頂近くになって息苦しくなってきたなという程度の実感しか持っていなかった。ましてや、学部頃に教わった流体力学や熱力学の知識など念頭にも浮かばなかった。昨夜買った缶ビールは登山中背中で揺すられ続けていた。このような内部温度の上昇と圧力差でビールジェットが発生したと考えられる。もし宇宙人がこの非定常ジェットを観測していたら、そこにアルコール分を検出したに違いない。

昨年3月完成間近かのすばる望遠鏡を訪れる機会に恵まれた。みじめな思い出として記憶の奥深くに封印されていた富士山ビールジェットを思い出し、マウナケア山頂でビールジェットの発生実験をすることを思いついた。10時頃山麓の“7.11”で勇躍缶ビールを買い込んだ。当日は無風快晴、気温8度の絶好の実験日和に恵まれた。ハワイ観測所中桐さん立ち会いの下に、向いのピークで実験を開始した。缶は既に敏感に山麓との気圧差を感じ取って膨れ上がっていた。ところが、予想に反して、すぐ近くのキラウエヤ火山の溶岩よろしくドロドロ



と溢れただけであった。ビールジェット発生実験ははじめの失敗に終わった。今考えてみれば、ビールジェットが富士山頂で発生し、マウナケア山頂で不発であった理由は明らかである。内部温度と缶の材質の違いである。山麓と山頂の気圧差は当然マウナケアの方が大きいはずであるが、ハワイビールは冷えたヤツを買ってすぐクルマで山頂に登り、しかも気温も8度であったため、缶内の内部温度が上昇しなかった。また、スチール缶はアルミ缶より内圧を高く保てる。富士山の場合との比較のためには、もう1本冷えてないスチール缶のビールを用意すべきであった。ところで、マウナケア山頂附近では飲酒は禁じられている。中桐さんとともに、ちょっとビールを舐めただけで、お神酒として恭しく山頂附近にいた。マウナケアはふだん山頂にある各国の観測所群から排出される尿尿を飲まされているそうである。

すばる参観はまさに『百聞は一見にしかず』を地で行くものであった。その偉容の前に立つとますますボキャ貧になる。「すばらしい」という言葉しか浮かばない。その実現に当たっては、日米の文化風土のはざま、本土からの距離に比例して増幅される期待と圧力、距離に逆比例して見え難くなる日本の実情、使命感が野心ととられかねない危うさ、限られた時間と現実の重圧、等々の中で、様々な試行錯誤があったことは想像に難くない。科学と技術の粋を集めたすばる建設もつまるどころ人間の営みである以上、マウナケアがすぐれて人間的なドラマの舞台を提供することになったのも自然の成り行きであったろう。

富士山頂ビールジェットの駆動力は熱圧力で、ジェット化したのは細い開口部によるコリメーションの結果と考えられる。磁場の効果でないことは断言できる。さて、本題に話を戻して、宇宙ジェットの成因について考えてみよう。

2. フープストレス・パラダイム

宇宙ジェットの成因についての理論モデルは、

ここ10数年殆どが電磁流体力学(MHD)に基づいている。解析的な分析では定常・軸対称を仮定し、数値シミュレーションでは非定常流を扱う場合が多い。ここでは、主として定常・軸対称MHDモデルを取り上げる。

これまで、周辺の降着円盤を含む中心天体の対称軸つまり回転軸の方向とジェットの方向は一致し、ジェットは磁力線・流線*とそれに沿って流れるプラズマで構成されていると解釈されている。従って、ジェットのMHDモデルでは、中心天体の重力を振り切って、どのように初速度を得て、更に磁化プラズマを加速し、かつ回転軸方向へコリメイトさせるかが重要な課題になる。

最初の加速は熱膨張と回転による遠心力で起こるであろう。グローバルな加速については、MHD加速、つまりプラズマとともに中心天体から引きずり出された電磁場のエネルギーがプラズマの運動エネルギーに転換される。コリメーションに関しては、トロイダル磁場のフープストレス(環状締め付け)によると見なされていた。本稿の目的は、コリメーションがこのフープストレスによって起こるという『定説』(これを『フープストレス・パラダイム』と呼ぶ)がどのようにして誕生したかを総括し、それが誤りであることを示すことである。

このパラダイムはBlandford and Payne (1982)⁶⁾(BPと略記)、Sakurai (1985, 1987)⁷⁾、Heyvaerts and Norman (1989)⁸⁾(HN)らによって、形成されたといえよう。BPは回転磁化した円盤からのアウトフローの条件を調べ、磁力線・流線が円盤面と60°以下であるとき、円盤回転の遠心力により

* 磁力線は、ポロイダル磁場

$$B_p = -\frac{\mathbf{t} \times \nabla P}{\omega}$$

を定義する“フラックス函数” P 一定で表わされる。流線は磁力線と一致する。 \mathbf{t} は単位トロイダルベクトル、 ω は水平軸距離である。磁力線に沿って測った距離を s で表わす



ガスの流失が可能であることを示した。彼等は自己相似解を用いて MHD 解の振舞いを調べる手法をこの業界に導入した。しかし、Blandford はこの手法の限界を一応わきまえていたが⁹⁾、BP の論文そのものは大変ミスリーディングであったといわざるを得ない。というのは、以後多くの追従者を生んだが、この手法だけでは MHD アウトフローのグローバルなコリメーションを証明することはできないからである。更に、BP は磁力線のコリメーションが普遍的であるかのような印象を業界に広め、これを数值的・解析的に厳密に立証するよう人々を促す効果があったからである。

Sakurai は BP の主張を確かめるため、定常・軸対称の条件の下でアウトフローに関する MHD 方程式の数値計算を行った。星の場合とデスクの場合について、ともに源の磁場としてモノポール磁場を仮定した。彼の結果は、磁場・流れ構造はほぼ動径型という従来の“ナイーブ”な考えと異なり、すべての磁力線・流線は回転軸方向へコリメイトするというものであった(図1参照)。Sakurai の数値計算結果は、その後の HN の解析的な結果とともに、パラダイムの確立に大きな貢献をし、その後のジェットモデルに大きな影響を与えた。Sakurai の問題点は、グローバル・コリメーションに最も都合のよい場合を計算し、それがすべての場合に敷衍できるという風にとられたことである。

すべての磁力線・流線がコリメイトすることは、電流のそれらに平行な成分がすべて内向きであることを意味する。中心天体へ全ウィンド領域から電荷が流れ込めば、定常状態を仮定する限り、ウィンド領域でないところで電荷を排出しなければならない。つまり、アウトフローの源である中心天体のチャージアップを避けるためには、赤道面上で外向きの面電流を流す必要がある。ウィンド領域での内向き電流がすべての磁力線をコリメイトさせる作用を及ぼすとすれば、赤道面上の外向きの面電流はそのダイナミクスに大きな影響を及ぼすであろう。ウィンド領域ではコリメーションの精密な

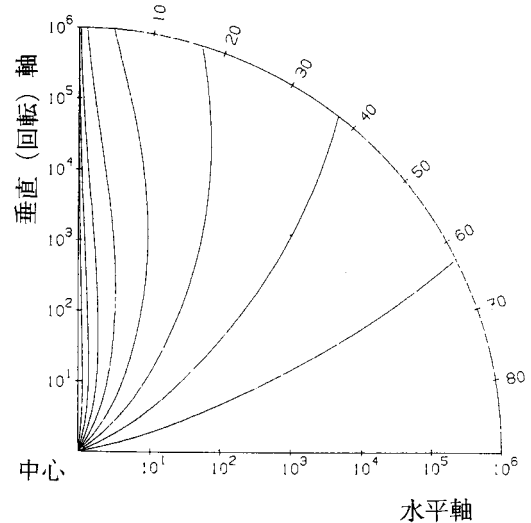


図1：Sakurai (1985) の計算例。中心天体から派生した磁力線はすべて回転軸方向へコリメイトしている。

モデルを作るが、赤道面上では単に面電流が流れればよいというのでは、片手落ちといわざるを得ない。

HN はすべての磁力線がコリメイトするという Sakurai の数値計算結果を解析的に再現しようとしたといえる。彼等は定常・軸対称 MHD 運動方程式の磁力線・流線に平行な成分の積分である、ベルヌーイ積分だけを用いても一般的に漸近領域で回転軸方向へコリメイトする傾向があることが示せると主張し、それをまとめて“定理”を創作した。次に、このような傾向を確認しようとして、漸近領域で磁場形状のモデルを仮定しそれを MHD 運動方程式のもう一つの成分である、磁場に垂直な成分 (Transfield Eq. 以下 TF Eq と略記) の漸近形にフィットさせた。当然漸近領域といっても、有限な距離のところでは彼等の磁場形状モデルは垂直成分を満たさない。事実上無限遠で放物型になるという条件を課して、磁場形状は無限遠で放物型になると主張した。

定常・軸対称 MHD 運動方程式は3つの成分から成る。磁場に平行な成分はプラズマの加速の度合いを決め、磁場に垂直な成分はその方向の力のバランスの具合から磁力線がどちらの方向へどの



くらい曲がるかを記述する。トロイダル成分はプラズマの角運動量がMHDトルクによりどう変わるかを表す。しかし、磁場に垂直な成分がプラズマの加速を記述しないのと同様に、磁場に平行な成分は磁場形状を記述しない。HNの最初の誤りは、方程式をこねくり回した結果、本来含まれていないはずの情報を引き出したことである。ベルヌーイ積分だけを使って、磁力線が回転軸方向へコリメイトすると、彼等が最初に主張したとき、業界に新鮮な意外感を振りまいた。次いで、彼等は無限遠方で放物型になると主張したが、それはそのような境界条件を課したからそうなるのであって、無限遠方でのそのような境界条件は因果律に反する。

このようにして形成されたこの誤ったパラダイムは、以後10年間この業界を支配し、多くの“被害者”を生むことになる。では、何故誤ったパラダイムが形成され、この変化の激しい時代にかくも長きにわたって存続し得たのか。その原因は込み入っているが、強いて分類すれば、以下のような項目が挙げられる：

- (i) HNはBP, Sakuraiの結果を再現しようとして、MHD方程式を操作した結果、ベルヌーイ積分から、TF Eqにしか含まれてない情報を引き出した。その導出過程は一見もっともらしく、BlandfordやMestelを含めて誰もそのトリックを見破れなかった。Mestelは最近その著書¹⁰⁾を表すに当たって、彼等の論文を検証しようとしたが、結局断念してHNの結果をそのまま引用した。
- (ii) 理想MHDでは電流 j は磁場 B のカールによって与えられる。従って、ローレンツ力は電流を代入して磁気圧および磁気テンションで表現できるが、そこではもう電流としての性質が見失われてしまう。つまり、どのくらいの電流がどの方向へ流れるのか、あるいは流れるべきかといった情報である。定常状態では、中心天体は電氣的に中性であるべきであるが、電流の流れる方向に注意を払ってないと、チャージアップといった事態が起こる。筆者はウィンド領域内でCurrent-Closure (閉じた

電流回路)の条件が満たされるべきと考える。

- (iii) 定常・軸対称MHDアウトフローでは、3コの臨界点が現れ、それらの点で特異になることなくスムーズに流れが通過するという条件で解が求められる。ファースト磁気音速点は最も遠くに位置し、それより下流の影響は上流に伝わらない。従って、数学的に漸近領域で放物型である解を見つけることができても、それを物理的に上流に伝えることができない。正しい解に到達するためには、因果律の観点が必要である。
- (iv) MHDはアルフベン以来50年以上の歴史を持ち、MHDウィンドの研究も40年の長きに渡るが、磁力線・流線の形状を論じるのに最も適切かつ必要な物理量、その振舞を決める正しい方程式が導かれていなかった。それが導かれたのはつい最近のことである^{11, 12)}。

3. 定常・軸対称MHDアウトフローはセルフコリメイトしない

パラダイムが出来上がった以降、人々は“漸近的コリメーションの必然性”⁹⁾を暗黙の内に前提にしてジェットモデルを創った。Spruitは、磁力線がグローバルにコリメイトするのは軸対称性の自然の結果であると見当違いのことをいっている¹⁴⁾。グローバルにコリメイトするのは、特殊な場合、つまりウィンド領域のすべての磁力線に沿って電流が中心天体に向けて流れ込む場合だけであるにもかかわらず、人々は一般的にコリメーションの必然性が成り立つと錯覚し、しかも電流を消去しているために、その向きを考慮することもなかった。

人々はこの錯覚に合わせなんとかコリメイトさせようと無理をした。Pelletier and Pudritz¹⁵⁾はBPモデルの軸特異性を避けるためウィンド領域全体で ωB_{\parallel} 一定としている。この場合、ポロイダル電流は流れず、従って磁場とプラズマの相互作用を一切禁じることになって、磁場は加速にもコリメーションにも無関係になる。にもかかわらず、もっともら



しい形状の磁力線が描かれている。彼等は ωB_{\perp} 一定といいながら、実のところ全く別のことをやっている。Shu et al.¹⁶⁾ は “realistic physical argument” なるものを導入した。確かに、当時のパラダイムに従うという意味においては realistic であったかもしれないが、実際にやったことは unphysical なことであった。Sauty and Tsinganos¹⁷⁾ は Sakurai の結果を自己相似解で再現するために、内向き電流の領域だけを扱った。更に、彼等はコリメーションに関する “エネルギー判定基準” なるものを提唱している。それが明らかに間違いであるのは、HN 同様彼等がそれをベルヌーイ積分から導出していることから分かる。そして、それを導き出す際、極めて初歩的なトリックに陥っている。Tsiganos はその後も多くの論文¹⁸⁾ を書いているが、極論すればそれらは殆どすべて物理的に無意味なものである。パラダイムの最大の被害者は彼であるといっても過言ではない。

このように、グローバル・コリメーションを主張するモデルは必ずどこかに無理があり、本人達が気付かぬうちに不合理なことをやっている。

フープストレス・パラダイムの影響は自己相似解を用いる人々にも強く現れている^{17), 19), 20), 21)}。自己相似解の限界については、この業界にそれを持ち込んだ Blandford 自身が述べている。人々は BP のモデルにあった軸特異点の除去やその他の問題点の改善に留まっている。Blandford の追隨者はウィンド領域全体で磁力線がコリメイトするのは自明と思い込んでしまった。コリメーション問題への適用する場合の自己相似解の最大の問題点は、前述のように、全磁力線・流線がコリメイトするかどうかはそれ自体では証明できないという点である。実際、定常・軸対称 MHD アウトフローは、フロー領域だけで Current-Closure を満たそうとすると、全磁力線・流線がコリメイトすることはできない。この事実は正しい TF Eq が導かれて始めて明らかにできたことである。

次節で、MHD アウトフローを論じるのに必要な適切な物理量、方程式及びそれから得られる

“正しい” 結果を紹介する。

4. MHD アウトフローの形状

中心天体からの定常・軸対称 MHD アウトフローを論じるのに必要な物理量は当然プラズマの密度 ρ 、圧力 p 、速度 v 、磁場 B 、電流 j 、等である。これらの量の振舞いは MHD 運動方程式、連続の式、マックスウェルの方程式などで記述される。プラズマに作用する力は慣性力、圧力勾配、重力、ローレンツ力などであるが、コリメーション問題で主役を演じるのはローレンツ力である。MHD 運動方程式 3 成分のうち磁力線に平行な成分の積分はベルヌーイ積分を与え、トロイダル (回転方向) 成分の積分は角運動量積分を与えることはよく知られている。理想電磁流体 IMHD では電流は磁場のカールで与えられ、ローレンツ力は電流と磁場のベクトル積で表わされる。電流 3 成分のうちこの二つの積分に関連した成分はポロイダル磁場を垂直に横切って流れる成分 j_{\perp} で、ベルヌーイ積分や角運動量積分が得られるのは、 j_{\perp} の消去の結果である。MHD 加速が効いて、電磁場からプラズマへエネルギー・角運動量が移されるためには、 $j_{\perp} > 0$ 、すなわち電流は赤道側から軸側へ流れる必要がある。よって、磁力線に沿って測った距離 s とともに ωB_{\perp} は増加、あるいは、 $|\omega B_{\parallel}|$ は減少しなければならない**。

中心天体から引きずり出された磁力線がどう曲がるかを判定できるのはその曲率半径 R を通してである。 R を決める式は MHD 運動方程式 3 成分のうち残り 1 成分、すなわち磁場を横切る成分 TF Eq から導ける。この TF Eq は筆者によって 1975 年に導かれ¹²⁾、その性質については 1978 年に Heinemann and Olbert によって明らかにされた¹³⁾。TF Eq は P に関する 2 階の偏微分方程式で、必要かつ十分な条件の下で正しく解かれたならば、そ

** $(c\omega B_{\perp}/4\pi)$ 一定はポロイダル電流が流れる “電流線” を定義する。 j_{\perp} は $(c\omega B_{\perp}/4\pi)$ の s 勾配に、 j_{\parallel} は P 勾配に比例する

これは当然磁力線の正しい形状，従ってアウトフローがコリメイトするかどうかの正確な情報を与えるはずである。しかし，必ずしもそうはならなかった理由の一つが，TF Eq から磁力線形状を正しく記述する式，すなわち曲率半径 R に関する式が最近まで知られていなかったことにあるといっても過言ではない。次に，HN の主張が誤っていることを示すために，彼等と同様アルフベン点より十分遠くの漸近領域でアウトフローの特性を調べる。

ここで漸近領域で決定的な役割を演じる物理量を導入しよう：

$$\zeta \equiv \frac{\alpha \rho \varpi^2}{\eta} = \frac{\alpha \Phi}{v_p}, \quad \Phi \equiv B_p \varpi^2 \quad (1)$$

α は磁力線の回転角速度， $\eta = \rho v_p / B_p$ は単位磁気フラックス当たりの質量フラックスで，いずれも P だけの関数である。電流分布は ϖB_i で規定されるが，漸近領域では $\varpi B_i \approx -\zeta$ となるので，電流，従って，ローレンツ力は ζ で表現できる。それ故，関数 ζ は漸近領域での電流分布を規定し，従ってローレンツ力にもろに現れて，プラズマの流れの加速・コリメーションを決定的に支配する。HN はこの ζ で表現される物理量の組み合わせが TF Eq の漸近形に現れることを知っていたが，これがポロイダル電流と結びついていることに気付かず，従ってこれを一つの記号で表わすことはなかった。このことは彼等がコリメーションに関して正しい結論に至らなかったことと無関係ではない。ともかく，HN は，見通しのよくない形であったが，この TF Eq の正しい漸近形を導いていた。 ζ を用いてそれを書くと

$$\frac{\varpi}{R} \approx \frac{\zeta}{4\pi\eta \sqrt{2\varepsilon - \frac{\alpha\zeta}{2\pi\eta} \theta P}} \quad (2)$$

ε はベルヌーイ積分で， P のみの関数である。この式は HN の (25) 式と同等である。

ここから更に先に進むには，若干の簡単な幾何

学的関係式が必要である。 ψ を B_p と ϖ 軸の成す角度とすれば，磁力線に沿って $1/R = (\partial \psi / \partial s)_p$ ， $(\partial \varpi / \partial s)_p = \cos \psi$ の関係がある。従って， $1/R = (\partial \psi / \partial \varpi) (\partial \varpi / \partial s) = (\partial \sin \psi / \partial \varpi)_p$ のように書けるので， $R = R(P, s)$ が分かれば磁力線に沿って積分して

$$\sin \psi = \sin \psi + \int \frac{\varpi}{\alpha R} \frac{d\varpi}{R} \Big|_P \quad (3)$$

ここで， $\varpi = \varpi_s$ で $\psi = \psi_s$ 。 $\int d\varpi|_p$ は P を一定に保った積分を表わす。また，以下において $\rightarrow \infty|_p$ は磁力線に沿って無限遠に行くことを示す。次に，磁力線曲率の式 (2) と幾何学的な基本式 (3) とから磁力線構造についてどんな情報が引き出せるかを考える。

(i) 磁力線は無限遠に届くべきなので $(\varpi \rightarrow \infty|_p)$ ，(3) から， R は ϖ より早く増加しなければならない。例えば $R \propto \varpi$ ならば，(3) 式右辺の積分は対数発散して， $|\sin \psi_\infty| \leq 1$ を満たさない，すなわち磁力線は $\varpi \rightarrow \infty|_p$ とはならないからである。このような事情から，(2) において ζ の振る舞いに制約が付く。HN は一つの可能性として， $\partial \zeta / \partial P = 0$ ，すなわち ζ 一定 (ζ_∞) を “solvability condition at infinity” と呼んだ。このとき， $1/R = 0$ で，従って (3) から $\psi = \psi_s$ 。磁力線は直線となり当然無限遠まで届く。考えられる磁場構造としては円筒形 ($\psi = \pi/2$) か動径形がある。しかし，筆者の理解するところでは，全漸近領域で ζ の一定値 ζ_∞ を因果律に反することなく，中心天体の物理量で決定することはできない。従って，複数の磁力線にわたって， $\partial \zeta / \partial P = 0$ であってはならない。HN は正しい TF Eq の漸近形を導き， $|\sin \psi_\infty| \leq 1$ の条件まで到達している。しかし，彼等は，特に Heyvaerts はその後数多くの論文を書いているが， $\zeta = \zeta_\infty$ を越えて更に先に進むことはなかった。

以上のような事情から，(2) 式において $\zeta \rightarrow 0$ でなければならない。これはポインテング・フラックスが $\rightarrow 0$ を意味し，従って無限遠方まで MHD 加速が続行する ($j_\perp > 0$)。つまり，磁力線が



無限遠まで届くには、電磁場が持っていた全エネルギー・角運動量を流体に移さなければならない。これまで、人々は安易に磁力線はそれらの人々がイメージするがままに無限遠まで届くと考えていたが、少なくとも中心天体からエネルギー・角運動量を抜き取るためには、ポインティング・フラックスが $\rightarrow 0$ でない限り、磁力線は無限遠方まで到達できないのである。

(ii) 中心天体は定常状態で電的に中性であることを要求する。すると、ウインド領域で流れ込んだ電荷はどこかで流れ出なければならない。ここで重大な分岐点にさしかかる。 $j_{\parallel} \leq 0$ の領域では $1/R \geq 0$ である***。従って、全ウインド領域で $j_{\parallel} < 0$ ならば、全磁力線・流線は軸方向へコリメイトすることが可能である。その代わり赤道面上に電流シートを置き、そこを外向きに面電流を流さなければならない。筆者は前者の立場を取る。つまり、ウインド領域内で Current Closure が満たされるべきであると考え。すると、ある磁力線 P_n が存在して、ウインド領域は

$$D_I : 0 < P < P_n \tag{4}$$

$$D_{II} : P_n < P < \bar{P} \tag{5}$$

の二つに分けられる (図2 参照)。 \bar{P} は十分外側の漸近領域では赤道面上にくるであろう。極側の D_I では、 $j_{\parallel} < 0$, $1/R > 0$ で、磁力線は軸方向へコリメイトする。これに対し、赤道側の D_{II} では、 $j_{\parallel} > 0$, $1/R < 0$ で、磁力線は極方向とは逆に反り返る。このような定常・軸対称 MHD アウトフロー 2成分構造は YSO アウトフローの観測結果¹¹⁾とも一致するように見える。このように、磁力線・流線のコリメーション問題は P_n をどこに置くか、ウインド領域内か赤道面上かで決定的に異なる。

*** TF Eq の漸近形は、 $\rho v_e^2 / R \approx j_{\parallel} B_{\parallel} / c$ のように書いて、上半球では $B_{\parallel} < 0$ だから。これから、上の (2) が導ける。

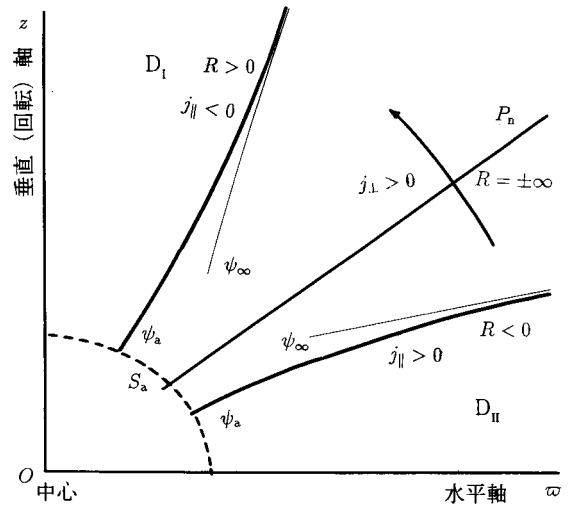


図2. 漸近領域の磁場構造. 分離磁力線 P_n を境にして極側では、電流が流れ込み ($j_{\parallel} < 0$), 従って $1/R > 0$ で磁力線は軸方向へ曲がる. 赤道側では電流は流れ出て ($j_{\parallel} > 0$), $1/R < 0$ で磁力線は赤道方向へ反れる. MHD 加速が持続するためには、赤道側から軸側へ磁力線を横切って電流が流れなければならない ($j_{\perp} > 0$). この図では、ウインド領域内で Current closure が成り立つと仮定している. 分離磁力線 P_n が赤道と一致するならば (図1 参照), 赤道面上に外向きのシート電流の存在を想定しなければならない。

上記のような結果は、降着円盤や外部物質に取り囲まれてない、例えば単一の高速回転星からの定常・軸対称 MHD アウトフローはグローバルにコリメイトすることはないであろうことを示している。実際、大規模ジェットが観測されているのは、周辺に降着円盤や降着物質が濃厚に存在している天体からである^{9), 23)}。富士山ビールジェットのコリメーション同様、これらの周辺物質のコリメーション作用は無視できないであろう。トロイダル磁場のフープストレスだけでは大規模ジェットは説明できないというのが現在の筆者の立場である。

5. 楽屋裏の話

その1. 以上の主張のように、フープストレス・パラダイムが誤りであることを示せたとすれば、筆者は“自責の念”を禁じ得ない状況に陥ることになる。というのは、10年前誤ったパラダ

イム確立の原動力となったHNの論文のレフリーを勤め、彼等の論文の受理をApJに勧告したからである。当時彼等の論文を阻止、あるいは拙著論文¹⁾を彼等のすぐ後に出せていれば、このようなパラダイムは誕生しなかったであろうから。そして10年経った今、その誤ったパラダイムの多くの“被害者”が出ている。

当時彼等の論文を一読して漠然と感じた疑問は、主として遠心力風を考えると、何故流線がすべて駆動力の遠心力の方向と90°違う回転軸の方向へコリメイトするのか、という点であった。しかし、当時特定の問題点が指摘できず、受理を勧告してしまった。その後の10年間彼等の論文を世界で筆者よりも徹底的にチェックした人はいないであろう（最初の3ヵ月と最後の3年間の“キセル”であったが）。彼等の論文はこれまで世界中でよく引用されているが、かなりの引用は孫引きであろう。世界中の人が彼等の式及び論理の展開に誤摩化されたといえる。疑わしきは通すべきでない？

磁場は“曲者”である。磁場が“直者”（直線あるいは一様）であればプラズマとの相互作用はなく、エネルギー・角運動量の授受は起こらない。例えば、漸近領域でコニカルあるいは円筒形の場合、磁力線は直者である。磁場がねじ曲がっていて始めてプラズマとの相互作用が生じる。ウインドの加速・コリメーションには磁場が曲者である必要があるのである。MHDジェット論においては、磁場は文字通りの曲者でなければならないのであるが、通常の間人社会における転じた意味においても磁場は“曲者”なのである。この10年間この誤ったパラダイムの下でこの曲者にダマされ、人々は無理やり磁力線をコリメイトさせている。

その2. MestelとBlandfordには最初の論文¹⁾については草稿の段階から送った。MestelはLynden-Bell²³⁾、Spruit¹⁴⁾についてコメントするよう勧めてくれた。Lynden-Bellはパラダイムに反対で、円筒

形の“magnetic tower”を建設しようとしていた。

Blandfordは一切コメントを寄越さなかったが、その代わりイタリアのさる大物のPRLの論文をレフリーに回して寄越した。その他、C. Norman, Heyvaerts, Sakurai, Begelman, Spruit, Lynden-Bellに草稿を送った。Normanは入院する直前なので、退院後必ず返事をするといっていたが、結局返事はなかった。昨年7月に来日したとき、あの仕事は主にHeyvaertsがやったといったので、Heyvaertsからは反論は来なかったといったら、一瞬黙り込んだ。Begelmanはすぐにメールを寄越し、お前に全面的に賛成する。実は自分もコリメーションには外圧が必要と思うといって、ある会議の集録記事²⁴⁾を送ってきた。HNの論文が出た後真先に、彼等の結果を相対論的なウインドに拡張したのがBegelmanのグループであった²⁵⁾。彼の“magnetic tower”は構造的欠陥があると“極めて率直に”指摘したのに対し、Lynden-Bellはさすがに大物で、一切弁解をしなかった。Metselは彼との“good talk”の結果を送ってくれた。Spruitからの反論はなかった。Sakuraiさんからは適切なコメントをいただいた。

その3. 論文をMNに投稿した。レフェリーはこちらの言い分は認めた（誤りを指摘できなかった）が、“しかし、磁力線・流線がちゃんとコリメイトしているモデルが沢山あるではないか。沢山の中から少し例を挙げると”といって、Shu et al.¹⁶⁾、Contopoulos and Lovelace²⁰⁾、E. Ostriker²¹⁾、Ferreira²²⁾など挙げた。

論文を書いている段階で世界中の同業者とやりあうことになろうことを覚悟した。自己相似解を利用している人々^{20), 21), 22)}の批判は容易であった。というのは、Blandford自身⁹⁾がその問題点を指摘していたからである。それらの人々はBPは引用しているものの、彼のレビュー論文⁹⁾は引用していない。

ShuとOstrikerには改訂版を送り、レフェリーからお前達の論文についてコメントを求められた



と告げた。ところが、彼等からは脅しとすかしの入り交じったコメントのメールが洪水のように来た。お前の批判は“敵意に満ちている”(virulent)という。非母国語で批判をするのに、無礼にならぬよう微妙な言い回しなどできっこない。改訂版の Acknowledgement でそのような主旨のことを書いたら、MN Editor はそのような“public apology”は必要ない、表現についての要求は拒否してよいという。そこで開き直って、“批判をするのはレフェリーの要求である”、“非母国語でやるのだから物理的に正確に表現するより仕方がない”と思うことにした。Shu と Ostriker からは様々な質問の他に、文言の削除・訂正などの要求が際限なく続きそうであった。こちらも最初は鄭重に応答していたが、遂にうんざりして返事をやめた。

その4. 次の論文²⁾のレフェリーは Tsinganos である。どうしてそれが分かったかという、レフェリーレポートと相前後して彼等の最近の論文のプレプリ・リプリント¹⁸⁾を沢山送りつけてきたからである。論文では、パラダイムは物理的な根拠はないと書いたら、レポートでは、自分はまだお前の論文¹⁾にアクセスするチャンスがないが、“HN は物理的にも数学的にも正しい”、また“パラダイムを証明する論文は沢山ある”とあって、その中に自分たちのもの¹⁷⁾を挙げていた。そして、“パラダイムが間違っているというのなら、これらの論文のどこが間違っているのか指摘しろ”という。

こちらを軽く見ているのは明らかであった。すべての磁力線をコリメイトさせている以上どこかで変なことをしており、前述のような間違いを見つけるのは困難ではない。

その結果、誤ったパラダイムが業界を支配した影響は Mestel にも及ぶことになる。彼が直接そのような論文を書いたからではなく、彼の最近の著書¹⁰⁾で ST を肯定的に大幅に引用しているからである。そして、Tsiganos は引用されたことを誇りにしていた。いずれにせよ、これまでレビュ

ーする限り、定常・軸対称理論でコリメーションを主張する論文には首尾一貫したものはない。その理由は単純明解である。要するに、これまでコリメーションに関する正しい方程式が知られておらず、従って取扱が正しい式に基づいていないからである。

その5. 誤ったパラダイムの確立への最初の道筋を付けたのは BP であった。Blandford 自身は自分達が用いた手法の限界をわきまえていたが、その後の人々はそうではなかった。Blandford はよく知られているように、現代天体物理学におけるスーパースターの一人である。Mestel は彼の学位論文審査員 (Examiner) であったが、彼に一目も二目も置いている。Mestel は筆者に何度か彼のことを“able man”といった。10年前40才そこそこで Blandford を FRS に推挙したのは Mestel と Rees であった。その彼が磁気封込めの先鞭を付けたということの影響は恐ろしい。磁気封込めは MHD の基本的な特性であるかのような錯覚を振りまいたのだから。Spruit にはそれが軸対称性の現れといわせしめた。彼は HN の結論に至るプロセスに一応疑念を呈していたものの⁹⁾、一貫してジェット磁気封込めの立場を取り続けていた。

Sakurai は数値的に、HN は解析的に磁気封込めを証明しようとしたといえる。HN はベルヌーイ積分から数式をひねくり回して“定理”を創り上げた。ST は間違いなく HN の影響を受けている。彼等はガスの加熱・冷却の可能性も入れて、ベルヌーイ積分からコリメーションの“エネルギー判定基準”なるものを創作した。そこで用いられたのは物理学以前の数式のトリックである。自分のことを棚上げすれば、なぜレフェリーはこんなことを見落したのかといえるような単純なものである。これも誤ったパラダイムのなせる業といわざるを得ない。そして、筆者もパラダイムの誕生に責任があり、従って guilty と見なされてもやむ得ない。前述のように、磁場は曲者である。磁場を毛嫌いする人も多いが、それは

どこかに胡散臭さを嗅ぎつけるからであろうか。

その6. 上記のように、筆者は“自責の念”を禁じ得ない状況に陥っている。しかし、年齢60才を過ぎればそれに蓋をしてしまうくらいの術も身に付けている。考えるまでもなく、これは自分だけのせいではあるまい。既に正しい方程式を導き、そこから間違いなく正しい結果を得ているはずである。完全なコリメーションを主張する論文のどこが間違っているかを指摘するのはさほど困難ではない。Mestel, Blandford, Begelman, Normanも賛成している。今年3月RASエディントンメダルの授与式の後、Blandfordは夫妻でMestelを訪ねたさい、Isaoに賛成すると伝えたそうである。Normanはナイスガイといわれるだけあって、極めて率直であった。とすれば、私は状況を楽しむべきであろう。しかし、自分もまた“独善”という危険な道を歩み始めているのかもしれない。心しなければならぬ。

恩師海野先生には、宗教・哲学、地球環境・エネルギー、教育など、現代の日本が直面する諸問題の他に、このジェットMHD論についても議論していただいた。これらの議論は筆者に、生きることの意味について深く考察する機会を与えると同時に、大きな癒しの効果をもたらした。

参考文献

- 1) Okamoto I., 1999a, MNRAS 307, 253
- 2) Okamoto I., 1999b, MNRAS, submitted
- 3) Lada C.J., 1985, ARA&A 23, 267 Livio M., 1997, in Accretion Phenomena and Related Outflows, eds. Wickramasinghe D.T., et al. (ASP Conf. Series, 121, 845)
- 4) Mirabel I.F., Rodriguez L.F., 1999, ARA&A 37, in press
- 5) Begelman M.C., Blandford R.D., Rees M.J., 1984, Rev. Mod. Phys. 56, 255; Blandford R.D., 1992, in Active Galactic Nuclei, eds. Blandford R., Netzer H., and Woltjer L. (Springer, Berlin) p. 161
- 6) Blandford R.D., Payne, D.G., 1982, MNRAS 199, 883 (BP)
- 7) Sakurai T., 1985, AA 152, 121; Sakurai T., 1987, PASJ 39, 821

- 8) Heyvaerts J., Norman C., 1989, ApJ 347, 1055 (HN)
- 9) Blandford R.D., 1993, in Astrophysical Jets, eds. Burgarella D., et al. (Cambridge University Press) p.15
- 10) Mestel L., 1999, Stellar Magnetism, Oxford University Press, Oxford
- 11) Greenhill L.J., Gwinn C.R., Schwartz C., Moran J.M., Diamond P.I., 1998, Nature 396, 650
- 12) Okamoto I., 1975, MNRAS 173, 357
- 13) Heinemann M., Olbert S., 1978, JGR 83, 2457
- 14) Spruit H. C., 1994, in Cosmical Magnetism, ed. Lynden-Bell D. (Kluwer, Dordrecht) p. 33 Spruit H. C., 1996, in Evolutionary Processes in Binary Stars, eds. Wijers R.A.J., et al. (Kluwer, Dordrecht) p. 249
- 15) Pelletier G., Pudritz R.E., 1992, ApJ 394, 117
- 16) Shu F.H., Najita J.N., Ostriker E., Shang H., 1995, ApJ 455, L155
- 17) Sauty C., Tsinganos K., 1994, AA 287, 893
- 18) Vlahakis N., Tsinganos K., 1997, MNRAS 292, 591; Vlahakis N., Tsinganos K., 1998, MNRAS 298, 777; Vlahakis N., Tsinganos K., 1999, MNRAS 307, 279; Sauty C., Tsinganos K., Trussoni E., 1999, AA 348, 327
- 19) Li Z.-Y., Chiueh T., Begelman M. C., 1992, ApJ 394, 459
- 20) Contopoulos J., Lovelace R.V.E., 1994, ApJ 429, 139
- 21) Ostriker E., 1997, ApJ 486, 291
- 22) Ferreira J., 1997, AA 319, 340
- 23) Lynden-Bell D., 1996, MNRAS 279, 389
- 24) Begelman M. C., 1995, Proc. Natl. Acad. Sci. USA 92, pp. 11442-11446
- 25) Chiueh T., Li Z.-Y., Begelman M. C., 1991, ApJ 377, 462

Ending of one paradigm for astrophysical jets

Isao OKAMOTO

National Astronomical Observatory, OB

Abstract: It is pointed out that the field of MHD outflows has been governed for this decade by one paradigm, i.e. the “hoop-stress paradigm” that MHD outflows from rotating magnetized objects collimate toward the direction parallel to the rotation axis owing to the hoop stress of their own toroidal fields. This article aims to show that the paradigm has no physical basis and to review how it has been born and could survive for as long as more than a decade.