

「宇宙ジェット — あるパラダイムの終焉 —」 についてのコメント

内 田 豊

〈東京理科大学・理学部 〒162-8601 東京都新宿区神楽坂1-3〉
e-mail: uchida@astro1.yy.kagu.sut.ac.jp

岡本さんの月報の記事、桜井さんの反論の原稿、拝見して共にそれなりに面白くはありましたが、これらは宇宙ジェットについて言えば「或る特殊な仮定を置いた近似的な取扱い」に対する批判および反論であり、宇宙ジェットについての『(磁場が本質的役割を果たしているという)パラダイム』の正否には関係ないものです。

しかし岡本さんの稿で「パラダイムの終焉」というミスリーディングな語が使われているため、あたかもこのような議論が『(磁場が本質的役割を果たしているという)現在の主流パラダイム』自身の正否を決めるものであるかのような誤解を一般読者に与えてしまう危険性がある事を憂慮しています。

ある『パラダイム』の中の一つの「或る特殊な仮定を置いた近似的な取扱い」を『パラダイム』自身と混同しては話がおかしくなってしまいます。例えばこの宇宙ジェットの問題で言えば、初期にはジェットという語からの連想により単純にガスダイナミックジェットでこれを説明しようとした仕事になされたが、当然問題の本質を解明するに至らず、これに対して、それまで考えられていなかった磁場の力学的効果を持ち込み、「磁場がジェット形成に本質的役割を果たしているという考え方」が導入された訳です。『パラダイム』というのは提唱者 Kuhn によればこういう「革新を伴う考え方全体」を言うのであって、「或る特殊な仮定を置いてそれを近似的に取扱う」事はその中の一つのエピソード、あるいは、一つのテクニックに過ぎず「パラダイム」と呼ぶとかなり大きな語弊があるのです。岡本さんはその「或る特殊な仮定を置いた近似的な取扱いが不完全であった」という、或る人達は前から気が付いていた事に、最近になって気が付いた、という事のようにです。「或る特殊な仮定を置いた近似的な取扱い」を「パラダイム」と呼んだ事は、岡本さんの視界が限られたものであったためであって、他意はなかったのだろうと解釈していましたが、このたび岡本さんの記事についての誌上討論が企画されていると聞き、また、桜井さんが岡本さんに批判された技術的側面について反論をメールで配布されたのを読むと、この、「或る特殊な仮定を置いた近似的な取扱い」だけが専ら議論されていて、あたかも『磁場が役割を果たしているという現在の主流パラダイム』の正否がこのような議論で決まるかの如き誤解を与えるのではないかという恐れは杞憂とも言えないと感じ、この一文をものした次第です。

最近の電波のファラデー回転を用いた活動銀河核 (AGN) からのジェットの中の磁場構造の観測から、磁場がジェットからのシンクロトロン放射にばかりでなく「ジェット形成の力学」にも本質的な役割を果たしているらしい事が分かり始めています。AGN コアから遠く離れたジェット、テールの中で投影された磁場ベクトルの向き、ファラデー回転測度の符号分布が規則性を持ち、さらにジェットやテールのくねり具合がそれらと独特の相関

を持つ事、などが手掛かりとなり、ジェット中の磁場およびジェットの形のヘリカル構造の重要性がクローズアップされて来ているのです。ジェットのずっと先の方のこのような遠方の情報からどうしてAGN コアで起こっている事について分かるのかと思う人がいるかと思いますが、もしヘリカル磁場が重要な役割を果たしている事が確立すると、ジェットはAGN コアで降着円盤と磁場の相互作用で生じた大振幅のアルフベン捻れ波がエネルギーを運び、ジェットの形成に関わっている事がハッキリして来ます。何故なら膨大なエネルギーを放射しているジェットやその先端のホットスポットについては、そのような遠隔部分にはローカルにはそんな荒業が出来るエネルギー源はないし、仮にあってもローカルな原因ならこんな大きな揃った磁場構造を形作る事は難しい筈ですから、これは重力エネルギー解放によって大エネルギーを発生している活動銀河中心核から供給される「伝播する磁場の捻れ=大振幅捻れアルフベン波」、およびそれによって起こるヘリカル不安定によると考えるのが最も自然だからです。これはAGN コア近くのジェット部分にもヘリカル不安定によると考えるより仕方のないくねくね構造が「はるか」やVLBAにより見えて来ている事からも裏打ちされ始めています。このように、ジェットを作り、膨大なエネルギーを運んでいるものが磁場である事が確立しようという時期、即ち『磁場がジェット形成に重要な役割を果たしているというパラダイム』が検証されようとしている時に、「或る特殊な仮定を置いた近似的な取扱い」を『パラダイム』自身と混同した論議がなされて、天文学他分野の研究者および一般読者にこの『パラダイム』が否定されるかの如き印象を与えることは日本天文学会の情報誌「天文月報」としては避けるべき事でしょう。岡本さんが否定されると主張しているものは、「磁場を考えてはいるが、或る特殊な仮定を置いた近似的な取扱い」に過ぎず、磁場が現実果たしている役割の方は、それが成り立つか否かに関らず明らかとなり、『(磁

場が本質的役割を果たしているという)パラダイム』自身は、これから益々この問題についての主流『パラダイム』として確立されたと考えられるからです。

岡本さんの主張が、岡本さんが問題としている「或る特殊な仮定を置いた近似的な取扱い」ではジェットは説明出来ないと言う形で提起されたのであれば、それは同意出来るものだと思います。Blandford-Payne は軸方向に束ねられた磁場を仮定したが、勿論それには論拠が必要で、これを桜井さんはスプリットモノポール磁場を持つ星を回して論じました。これは簡単な模型的状况を使って事柄を示そうとしたもので、それで実際のジェットが説明出来ると思った人はいなかった筈です。何故なら、中心星の影響が、モノポールという最も遠くまで届く場合でも、星半径の数千万倍から数億倍の距離まで支配してジェットを作るとは到底考えられず、実際そのようなものを回しても多分星の半径の千倍も行くと、もう効果は見られないでしょうから。

我々 (Uchida-Shibata 1985, Shibata-Uchida 1986, Uchida-Shibata 1986, Matsumoto et al. 1994, Kudoh et al. 1997, Koide-Shibata 1998, Uchida et al. 1999, Nakamura et al. 2000 等々) は桜井さんがモノポールによる取扱いをする前からやって来ていた別の考えに基づく取扱い (岡本さんには見えていなかったようですが) を発展させて来たわけですが、これは、最初は形成中の星からの双極流の起源を説明するモデルとして、我々が提案したのですが、ガスは重力収縮する時に銀河磁場を束ねて収縮し、磁場を束ねた降着円盤の差動回転で、大局磁場に沿って連続的に送り出される B_{ϕ} が、降着円盤の所でくびれた砂時計型になっている大局磁場を、軸に沿って両方向に伝播しながら細くピンチして行き (我々はこれを sweeping pinch mechanism と呼びました)、ジェットを形成するのだと考えました。我々は磁場の由来としては星に求めるのではなく、銀河腕の大局磁場に求めた訳です。これは後にオ

リオンストリーマーの中の星形成・双極流がストリーマーの捻れ構造に沿っている事が判りサポートされました。何故磁場が降着円盤に垂直になっているのかについては、始めの領域全体のガスの角運動量の成分のうち、大局磁場に垂直なものはアルフヴェン波を作って消散し、磁場に並行な成分のみが生き残って中心部に持ち込まれるため、降着円盤は磁場に垂直な面内を回転すると考えたのです。このプロセスは、磁場の張力による円盤回転のブレーキングにより、中心への物質降着率の増大（中心のエネルギー発生が増大）も説明し、重力ポテンシャルエネルギーの変換によるエネルギー源を持つプロセスです。

次に、無次元化した方程式系に含まれる3つの無次元係数（音速、アルフヴェン速度、ケプラー速度、基準点での円盤回転速度、から作られる3つの無次元比）と代表的距離でノーマライズした系での初期物理量分布が相似であれば、二つの系では相似的な事が起こる事が期待されます。星とAGN とでは物理量、スケール共大きく異なるが、計算してみると3つの無次元係数が概念的に同じ領域に入っており、状況も似ているので、概念的相似性は形成中の星円盤と活動銀河核円盤について成り立ち、モデルは活動銀河ジェットにも拡張適用出来ます。AGN 電波ジェットの場合、上述のような長い「ジェット」が活動銀河核中心核から両側に向かって、中心核のブラックホールのシュヴァルツシルト半径で言えば数十億倍程の距離まで伸びており、ジェットの他、その先端には特に強く輝くホットスポット、それから大きな二つ目玉ローブがあります。これらが、膨大なエネルギーのシンクロトロン放射をしているという事を考えれば、前述のように磁場が中心核とこれらをつなぎ、磁気的エネルギーを捻れアルフヴェン波として送り込み、また、高エネルギー粒子を再加速しつつ送り込んでいると考えるのが最も自然です。我々は星形成とのアナロジーから、磁場は元々その一部で原始銀河が生まれるような大域にあった弱い大ス

ケール磁場（例えば cosmic void の縁に押し込められた磁場：これは銀河形成の近傍でローカルに考えると一様磁場）が、原始銀河形成時のガスの重力収縮によって束ねられて、中心部に取り込まれ、強められて、降着円盤内の部分が円盤の差動回転で捻じ上げられると考えました。円盤（トーラス）表面は回転に対して上下の磁場の張力でブレーキが掛けられ（即ち角運動量を徐々に失い）、徐々に中心に向かって落下して回転速度を上げ、同時に磁場を回転方向に引き回すので、上下に大振幅捻れアルフヴェン波を連続的に送り出し、これが発生した B_{θ} による磁気圧勾配と遠心力加速により円盤表面ガスを吹き上げて、スピンするジェットとして加速すると考える訳です。このような考えを、計算機の発達により次第に可能となって来ていた計算機シミュレーションの手法で、柴田一成さん等とで展開して来ました。

計算機シミュレーションは、これを始めた1982-3年頃はまだ計算機のスピードもメモリーも十分とは言えず、そちらの方の制約がありましたが、それまで非線形問題を解くためにつけざるを得なかった人為的制約を課す事なく、よりリアリステックな状況を扱うことが出来ます。例えば、我々のモデルは、ある角度で固く円盤に植えられた磁場の剛体的回転を考えた Blandford-Payne のモデルとは違って、これらが自然に物理過程で決まり、回転平衡と仮定したら動き出さない筈の円盤ガスも、トロイダル磁場の磁気圧勾配で流出し、それが遠心力加速されて行き、トロイダル磁場の発生、ポロイダル磁場のピンチング、角運動量輸送、その他が電磁流体方程式に従って決まって行きます。桜井さんは Blandford-Payne が想定した軸方向に束ねられた磁場や、我々が既にその頃言っていたこの状況をもモノポール磁場を用いて模型的に示そうとしたのではないかと思います。実際には上述のように、桜井モデルで実際のジェットを説明するのは無理と思いますが、物理より数学的扱いに目の行く人でこの桜井さんの扱いに乗っ

でジェットまで説明出来ると思ってしまった人達もおり、Heyvaerts はそういう人達の例でしょう。

岡本さんも、否定的にはあるが、これに乗った人と言えるかも知れません。それが実際のジェットを表わす事はないという事には私も同意見ですが、このような実際的狀況を別とした模型的議論と、自然界で起っている事柄自身とを直接結びつけて、肯定したり否定したりしてはいけない事は明らかです。

また、岡本さんが懐古している、それ以前の Mestel に始まる星風の扱いを天体ジェットに適用するのが適当でない事も、岡本さんの言う通りです。中心天体に固く固定された足を持つ磁場を振り回して、遠心力風を考える事が出来るのは星の場合くらいですが、実はこの考えをジェットに持ち込んで、降着円盤にある角度で固定された足を持って回転する、固い磁力線に沿った遠心力加速を考えたのが Blandford-Payne です。しかし実際には磁場が円盤ガスの差動回転で持ち回られ引き伸ばされ、逆にガスが磁気制動を受けて降着が促進される（このプロセスで初めて重力エネルギー解放がありエネルギー供給を得て事柄が続く！）という事を考えれば、降着円盤ではこれは不自然でしょう。「定常流」という考えも、現に影響が伝播しつつあるフロントが見えており、エネルギー、角運動量の持ち出しがあるわけですから、近似的にしか成り立たない筈です。（我々は、ジェットは、同じ状況に入ってくる磁場とガスが次々と同じ事を起すため、それらの補給が続いている限りにおいて続くという事であって、定常流ではないと考えています。）これらの近似を単純に受け取りすぎるとおかしな事になります。例えば Parker の太陽風定常流理論では、クリティカルポイントを通る定常解では、初速度はある無限精度で決まる値を持たないといけませんが、

実際にはコロナガスを重力がつなぎ止めきれずに起こる流出はこのような速度で起こる訳ではなく、無限遠の条件との調整は、有限の所を進みつつあるショックなどで荒々しく行なわれるわけです。定常流として近似する事は、現実にはこのショックなどで簡単に手荒くなされている無限遠との接続が起きるのではなく、衝撃波などが全くない状態で無限遠につながるという事に不当な程の重要さを与えて、状況に制約を与えている事に相当しています。

このように考えると、殊に基礎方程式が非線形である天体流体（プラズマ、電磁流体等）の場合、かつて正面からは扱えなかった数学的困難を回避するために導入された近似（例えば定常流近似）が、現実を取り逃がす原因になっていた事が見えて来るように思われます。物理的な解を考えなければいけない自然科学の場合、行なわれている数学的近似が果たして自然界で起っている事を実際に表わしているのかどうかという事は、いつも注意深く考えなければならない事だと思います。非線形電磁流体プラズマを扱う天体活動現象などの場合、特に使える数学的手段は乏しく、それに当てはめるために物理的状況を切り捨てて数学的近似が行なわれて、取り扱いがなされて来ました。これには歴史的意義は勿論あるが、これでは本当の事は云えない事は、上述のように Parker 理論ほど広く受け入れられて来たものについてさえあるのですから。

物理的状況を出来るだけ主役に据えて扱うため、我々は計算機シミュレーションというアプローチを取って来ました。勿論これはこれでまだいろいろ問題がありますが、最近では3次元時間依存の電磁流体シミュレーションでかなり実際に近い状況を扱えるようになって来ており、このアプローチは、計算機の発展で21世紀にはいろいろな問題に答えを与えてくれるようになって行くでしょう。