



4. 強靱な物質：プラズマ

4. The Robust Matter: Plasma

田島 俊樹

TAJIMA Toshiki

カリフォルニア大学アーバイン校ノーマン・ロスターカー主席教授

(原稿受付：2021年2月27日)

プラズマは、よく多体系物質のなかで固体と違い、ブヨブヨで不定形で多くの不安定性を持ち容易に乱流化しカオスに至るとされる。一方、プラズマはこれ以上破壊され得ない物質とも呼ばれる。私はこの性質に立脚して、プラズマは比類なき強靱な物質という側面を持つ可能性のある物質であり、その条件とは何かを研究することを私のライフ・ワークとした。その一端を紹介しよう。

Keywords:

plasma, collective force, wakefield, field reversed configuration, feedback stability, beam-driven fusion

私は1968-9年頃、大学理学部の学部生として何をしたいか考えていたが、当時は湯川秀樹先生のノーベル賞の興奮の醒めやらぬ頃で物質の素を一粒まで遡って研究する「素」粒子物理が流行していたところ、統計物理学の講義で久保亮五先生に出会った。久保先生はこの講義の中で、粒子を多数個（多体系という）集めると、その粒子の個性を超越して、多体系としての固有の物質の特性が出現するのであると説かれた。1957年[1,2]に有名な揺動散逸定理などを証明されたばかりの先生の権威（威光か？）は凄く、先生が黒板で証明を始められると、ノートを見ることもなく30-40mの黒板は数式で埋まり、最後にq.e.d.(証明了)と書かれて終わる。私は、その強い論理、明晰な解析、比類稀な概念的説得力に感服した。私は、多体系の物理が未開拓で激烈な新領域の物理として我々を待っていることを知り、多体系の典型としてのプラズマを研究することを志したのである。

プラズマは、固体や気体と異なり、電子とイオンで構成される原子生成の拘束力を破って生成されるので、それ以上破壊されない物質たるのである。こうしてイオン化されたプラズマは、それ以外にも他の物質がいつもそうするように、プラズマの個々の粒子間で、一粒子・一粒子間の相互作用を有する。衝突力はその典型である。この物理は、固体物理でも変わらない。一方、プラズマは、原子をなしていた電子とイオンの結合を破壊し、原子と原子の量子力学的結合の原理を失ってしまったので、固体形成などの構造形成原理なしに、上記したように、ブヨブヨで（血液プラズマがそうであるように）不定形であり、様々な電磁不安定性を有する。恐らく千を超える不安定性が発見されており、私のテキサス大時代の上司のRosenbluth所長は、そうした業績で「プラズマの教皇」と呼ばれていた。

一方、プラズマの構成員は、原子ほど粘着性のない個性にも欠ける電子とイオンの2種しかないが、ある一定の構造原理でプラズマの構成員に「号令」を掛けると、電子やイオンがある程度固まりをなすことはあり得る。こうしてN個の構成員が固まりをなすと、N個の集団力を発揮するようなことがあり得る。何千年もの昔に現出し、今も我々にその威力を語りかけてくるものとしてエジプトのピラミッドがあるが、それを成す巨大な各岩は、一人の人間では動かせなくてもN人の集団力で行えば可能だということは、エジプト人自身が彼らの文書や図で現代の我々に教えてくれている(図1を参照)。集団力を上手く組織化できると、集団運動が現れることがある。集団運動で N_e の荷電が N_e の荷電と相互作用すれば、その相互作用力は1粒子と他の1粒子の衝突のときの強さの N_e^2 倍になる。ただ、Rosenbluth教授らが何度も証明したように、プラズマはこうした不安定性で、いずれは乱流化したり、熱化(エントロピー増加)してしまうことが多い(大抵といっても良い)。

各論は避けるが、一定の条件を満たせば、こうした集団力を強く励起し、更にそれらが容易に不安定化しないような条件や構造を作ることが可能である(何事にも一定の時間(や空間)のスケールがあることは最初から注意しておきたい)。例えば、良く知られているようにCERNの大型加速器には、エネルギーの極めて高いイオンが詰まっている(特殊な例ではあるがこれもプラズマの一種である)。以下にも出てくるが、加速器はプラズマ内にエネルギー的に安易に且つ安定性を(比較的)高く確保するのに大変適した装置であり、この手法については、前に別の記事でも触れた[3]。加速されたイオンのビームを強くすればするほど、このイオンのリングは安定化していく。これは、自転車の車輪が、その回転を早めれば早めるほど安定化しく

Norman Rostoker Chair Professorship, University of California at Irvine Irvine, CA 92697, USA

author's e-mail: tajima@uci.edu

らつかなくなるのと同じである。また大きな回転半径を持つ系では、不安定性を齎す揺動を平均化するので、安定化に寄与している。また、加速器では一般的に用いられているように、リング・ビームのフィードバック制御による安定化が一般的である。こうした回転リングのフィードバック制御による安定化は、自転車の制御・運転に不可欠である(図2を参照)。我々は、こうした高い回転リングほど安定へ寄与することや、フィードバック制御を入れたAIによる安定性の確保を原理としてより強いプラズマを生成することができる。思えば、人類というのは2足歩行の生物であり、2足歩行はフィードバックによる制御なしでは不安定な歩行方法であるが、人類はそれを選択し、成功した(ただ、人類は2足歩行から逃れ、ソファーに反りくり返って長い時間休むのも好きだ)。我々は、人類の先輩を見習い、プラズマのフィードバック制御による安定化を当然の道として取り入れるべきであろう。

このような考え方で核融合プラズマの構造を考えて見よう[3]。^{ラフト}甲虫が強い甲冑を被り外界への強い防御を獲得した一方、人類は強さを皮膚の表面には求めず、強靱だが屈伸可能な背骨とそれが齎す敏捷性で世界の王となった。FRCというプラズマの配位[3,4]は、外部からの磁場は比較的柔く、これがむしろ高いエネルギーを持つ加速器からのリング・ビームを「骨格」として受け入れ、これがシステム全体を人の体がそうであるように、敏捷で強靱にする。また、リングに支えられたシステムであるので、本源的にフィードバック可能となる。更に、加速器にとり300 keV や MeV といったエネルギーは医療加速器のそれより低い容易いものではあるが、それを温度に比すれば熱核プラズマのそれを簡単に上回りうる[4]。

さて、ここで航跡場の安定性について述べておこう。航跡場は、その出版の時に査読者が不安定化するのではと言ったがそうしたことは起きなかった。それは、光速(ないしはそれに近い速度)で走る航跡場は、背景の電子系の熱速度から位相空間上(実空間ではない)隔離されているからである[5]。更に、強い航跡場の場合、加えて相対論的コヒーレンスが航跡場の安定性を強化する[5,6]。航跡場が安定であるのは未来永劫ではないが、加速に必要な時間に比べ、それが劣化する時間は遥かに長いのである。最近、航跡場が炭素ナノ・チューブなど、ナノ粒子を介してより容易に且つよりコンパクトで強靱なものができることがわかってきた[5]。更に、ナノ粒子はレーザーとの結合を上記した集団運動として強化することがわかっていたが[2,7,8]、こうした効果が取り上げられ、最近では、レーザー駆動でより効果的な EUV 光源(次世代リソグラフィ)へ発展している[9]。

以上にプラズマの類い稀な強靱性の幾つかの例を挙げてみた。実は我々の宇宙の主な可視物質であるプラズマが、ブヨブヨで不定形で不安定で乱流でカオスなのを見せつけ、この世は単に構造も何もないノッペリした物だけの宇宙、という訳ではないことに我々は薄々気が付いているのではない。私は、宇宙にカオスが存在しないと言っているのではない。それしかないという訳ではなく、宇宙には

色々の興味深い構造が形成されているのではないかと問っているのだ。私が1990代に研究した時には、既にプラズマが織りなす宇宙の構造は、実にあたかも曼荼羅の複雑な構造のような気がしたものであった[10]。最近さらに、そうした構造(例えばブラックホールの降着円盤とかジェット)が極めて一般的な構造であるのみならず、こうした構造から、ユニークな天からのメッセージが送られて来ていることがわかってきている。例えば、時空構造のない宇宙線やガンマ線だけでなく、ブラックホールから降着円盤やそのジェットという宇宙の航跡場加速器から紡ぎだされた空間の決まった一点や降着円盤の動力学に同期した宇宙線やガンマ線が観測で同定され始めているのである[5,6]。

図3には最近観測された宇宙での航跡場生成するガンマ線などによる活動的宇宙の現場写真を示す[6]。こうした宇宙の構造はプラズマでできているが、そのプラズマは丁度より早い自転車がより堅固であるように、動的で安定で途轍もなく強い電磁構造を有していることがわかってきている。こうした宇宙が途轍もなく強靱なプラズマをいま我々に見せ始めていて、それに気が付いたことを我々はとても幸いに思う。一方、こうした強靱で小型のプラズマ加速器は医療へも貢献するかもしれない。主流哲学「プラズマ×ビーム=不安定」からの孤立を恐れぬ学問態度を恩師ロストカー先生が示された様に[3]、新たな独自の学説を追求する諸君らの将来を期待したい。

宇宙の構造はプラズマでできているが、そのプラズマは極めて堅固で途轍もなく強い電磁構造を有していることがわかってきている。我々はこうした宇宙が途轍もなく堅固な強靱なプラズマをいま我々に見せ始めていて、それに気が付いたことをとても幸いに思う。



図1 集団力 (エジプトのピラミッドでの)。



図2 自転車「操業」：操舵によるフィード・バック制御。自転車の漕ぎが十分でない場合は、図で示す様な安定な自転車操業はできず、自転車は不安定になり倒れる。

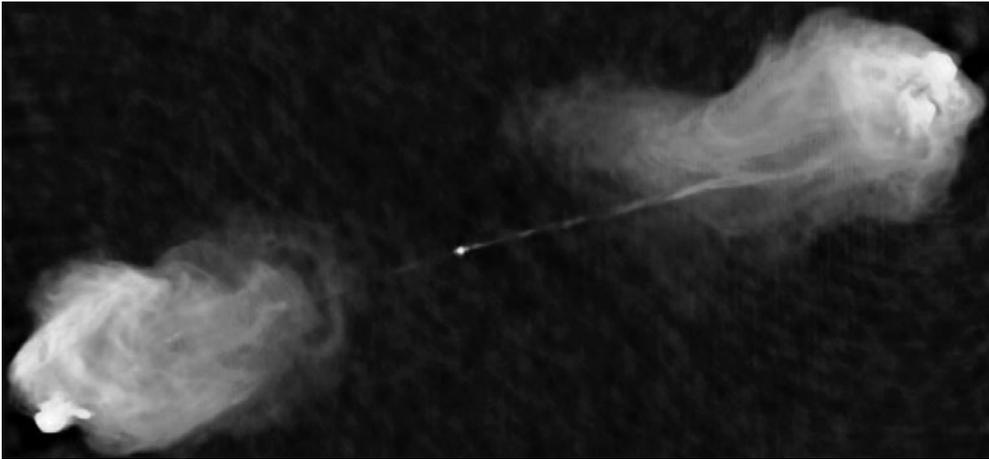


図3 「天空にはレーザーなし?」: 白鳥座 A から発生したジェットとそのなかで形成された航跡場による電子加速で、電波やガンマ線が発生 (Credit: NRAO/AUI).

参考文献

- [1] R. Kubo, JPSJ 12, 570 (1957).
- [2] R. Kubo, JPSJ 17, 975 (1962).
- [3] T. Tajima, JPFR 93, 21 (2017).
- [4] R. Magee *et al.*, Nat. Phys. 15, 281 (2019).
- [5] T. Tajima, X.Q. Yan and T. Ebisuzaki, RMPP 4, 7 (2020).
- [6] CERN Courier, January/February p. 11 (2021).
- [7] M. Mori *et al.*, J.A.P. 90, 3595 (2001).
- [8] Y. Kishimoto, Y. and T. Tajima, *Strong Coupling between Clusters and Radiation, High Field Science*, eds. T. Tajima, K. Mima, and H. Baldis (Kluwer, NY, 2000) pp. 83-96
- [9] A. Endo, JPFR 79, 240 (2003).
- [10] T. Tajima and K. Shibata, *Plasma Astrophysics* (Addison-Wesley, 1997).



た じ ま と し き
田 島 俊 樹

カリフォルニア大学アーバイン校 (UCI), ノーマン・ロストカー主席教授, TAE Technologies社CSO (最高科学責任者). 1975年 UCI 博士課程修了 (Ph.D in physics). レーザー航跡場加速の提唱, ビーム駆動の核融合など, プラズマのプロポヨ性を脱却し, 強い物質として用いる方法を生涯にわたり研究.