

トーラスを舞い乱れる500万個のプラズマ粒子達

荷電粒子多体系研究グループ 田島 俊樹

トカマクというのは、金太郎飴をドーナツ状にしたような磁力線で超高温ガス（プラズマ）を囲い込んだ熱核融合のための装置である。プラズマの粒子達はこの円環らせん状の磁場の回りをワルツをおどるように、あるいはゴーゴードダンスで乱れるように激しく動く。おまけに、プラズマの粒子達はクーロン電磁力で遠距離テレコムするために、すべての粒子がすべての他の粒子と相互作用し合う途方もない乱交パーティである。粒子が、流体として全て個性を失うのではなく、粒子としての性質も出現しつつ相互作用を行うような場合は、(流体的)乱流に対比して運動論的乱流と称する事もある。このプラズマの演ずる舞踏会を私達は大型計算機で数値実験するために、算法やコード開発を過去15年程にわたり続けてきた。最近米国では、大統領令もあり、各省内で高性能計算通信イニシャティヴ(HPC)が始まり、「大挑戦」(Grand Challenges)と呼ばれる、従来から解けないとされてきた困難な問題を、飛躍的な計算機の開発と革命的算法を導入することにより、挑戦しようという方策が推進されている。米エネルギー省でも六つの「大挑戦」を定め、その一つに「数値トカマク」が選ばれ、私の属しているテキサス大学核融合研究所もその中心的役割を演じている。我々のグループでも、「数値トカマク」に取り組んでいる。

我々の「数値トカマク」では約500万個のプラズマ粒子を相互作用させ(自由度は1粒子当たり、実空間と速度空間で張られる位相空間が6次元(後述のジャイロ法では平均化のため5次元)なので、全体で2500万から3000万自由度)、約10万時間ステップ走らせたりしている。これらの粒子達は、ひねられた磁力線の円環の中を動くために、粒子ダンサーを外から眺めると、激しくくるくる回るのが見える一方、粒子ダン

サーは自らは回るといふよりぐるぐると引っぱられる力を感じるので、舞っていると眼が回って来て挙句のはては(床屋のサインポールが進んでいるのかただ回っているのかわからなくなるように)精神分裂症になるかのように感じる。この分裂症は、物の見方がひねられたダンスホール(空間)では、(一般相対論の時空記述でもよく出てくるように)二つの分裂したダンスホール(ベクトル空間を反変と共変という)を粒子ダンサー達が泳ぎはじめるからである¹⁾。この計算をするには、今ある原研のスーパーコンピューターで約500時間に亘ることがある。いわゆる超並列スーパーコンピューターを使えばこれもその数十分の一以下になる。一方プラズマ粒子ダンサーの腰振り(ジャイロ)運動をいちいち追跡するのも骨が折れるので、腰振りを積分して平均化したスローチークダンス運動を追えるような算法(ジャイロ算法)や、“目立つ粒子”により計算を集中させる算法(δf 算法)²⁾なども開発して、算法の方面からもより現実的な計算をする努力もしている。

こうした計算の結果、従来はよくわからないので、一括異常輸送と呼ばれていたトカマク中の粒子や熱の輸送現象も、ようやく実験と比較してみても比較しがいのある所まで来るようになった。この中には、いままでトーラスというトポロジー(形状)がむずかしいので、大抵は板状や円筒プラズマで計算し、仲々実験と合わない結果が得られていたが、トーラス状の計算をしてみると色々な点で、少なくとも定性的に合うという事も見つかってきている³⁾。グローバルな形状が、輸送というミクロの現象に直接影響を与えるというのは驚くべき事である。これも、プラズマの粒子達がクーロン相互作用というすべての粒子はすべての他の粒子と乱交パーティをくりひろげるという性質のために、

粒子達がグローバルな構造に敏感だと言うことができる。図1にはそうしたグローバルな乱流の構造の一例を示す。

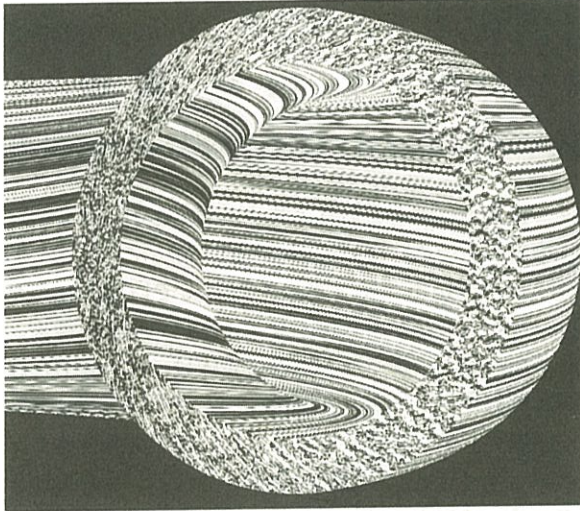


図1 「数値トカマク」による、電気ポテンシャルの乱流形状。円環を輪切りにしてその内と外を見てみる。粒子達が乱舞した結果、円環状に連なった立体的乱れを作り出し、それが熱の輸送の異常をもたらす。この図は、Dr. G. Kerbel, Dr. R. WaltzとDr. W. Dorlandの好意による。

参考文献

- 1) Tajima, T., "Computational Plasma Physics" (Addison-Wesley, Reading, MA, 1989).
- 2) 例えば, Hu, G. and Krommes, J. A., Phys. Plasmas 1, 863 (1994).
- 3) Tajima, T., Kishimoto, Y. et al., in "US-Japan Workshop on Ion Temperature Gradient-Driven Turbulent Transport", eds. Horton, W. et al. (American Institute of Physics, New York, 1994) p. 255.

