

■「高質」のエネルギーを求めて

荷電粒子多体系研究グループ

■田 島 俊 樹 ■

In Search of “High Quality” Energy

Toshiki TAJIMA

Research Group for Charged Particle Systems

Theoretical understanding of quality of energy is important for the future of energy science. We define quality of energy through the internal structure of charged particle systems such as beams and plasmas and investigate methods to measure and improve the quality. The laser cooling method we developed can rapidly cool the beam and reduce its emittance through what we call the “laser computation”, an appropriate application of lasers with appropriate structures. The plasma properties undergo bifurcation under the influence of shear flows, which can be utilized to control and improve the plasma quality.

人口に膚浅（かいしゃ）している言葉として「エネルギーの高度利用」というのがあるが、漠然とした社会学的意味が多分にある言葉である。「高質」のエネルギーとは何かとか、「高質度」をどうして作るかという問題を物理学の概念として、理論としては十分展開されていないようだ。我々は、ビームの冷却とプラズマの制御という二例題を通じて「高質」のエネルギーとは何か、それをどう獲得できるのかを理論物理の課題として追求する事にした。このためには、ビームやプラズマの「質」を定義し、その物性を研究することが大切であるが、それと同時に「質」あるいは内部構造をいかに診断するかも研究せねばならない。前者についての我々の研究を以下に紹介するが、後者の議題については、我々はニューラルネット（脳回路）算法を使う事により、ビームやプラズマといった荷電粒子系の様相の予測診断を手がけている。ビーム系では、ビームに当たレーザーの散乱光の様相から、逆にビームの内部構造を推測する逆計算を始める一方、プラズマ崩壊の現象を磁場の揺動の時系列から予測する

診断の開発を行っている。

シャノンは、（エネルギーの）質を表す量としてギップズのエントロピー（あるいはそれにマイナスをかけたもの）を「情報量」と定義した。しかし、よく知られるように、この量はノイズといっぱい詰まった情報を区別できない。物質の内部構造を表現するのに多体（高次）相関関数があるが、この内部構造に伴う多体相関を使って情報量を表現するために、我々は「高次のエントロピー」なる量を導入した。この量を用いる事により、ノイズといっぱい詰まった情報との区別や、より緻密な情報といった概念を数量的に定義できる。この量は、従来の「熱統計力学」から脱皮して新しい「構造統計力学」を構築するのに不可欠の布石である。我々は、二進法系のモデルとしてイジング系を取り、その高次の比エントロピーの単位当たりエネルギーによる変化量は、高次の構造にかかるほど大きくなる事を証明した。この定理を「高次比エントロピー激動の法則」と呼んでいるが、これは、一定のエネルギーを使うにしても、高次の構造を変化させるの

に使えば、そのエントロピー（あるいは情報量）は大きく増減させうると言う事になる。荷電粒子ビームの質は普通エミタンスで定義される。このエミタンスの減少が質の向上で、これをビーム冷却と言う。我々はビーム冷却のためにレーザー照射による新しい方法を開発した。ビーム冷却をより効率的に行う為に、我々はビームの内部構造を診断し、診断に従って適切なレーザー光の振幅と位相の特定を行う。この特定操作を我々は一般に「計算」と呼ぶことにする。レーザー光は、「計算」前は、コヒーレンスの高いエントロピーの低い状態なので思い通りの「計算」を乗せる事が可能である。エントロピーが高い普通の光では「計算」がノイズに埋もれてしまう。この「計算」されたレーザー光を周回してくるビームに繰り返し照射する事により、従来の van der Meer によるストカスティックの冷却よりはるかに早く冷却できる事が、我々のシミュレーションの結果わかった。ビームにレーザーを照射すれば、その散乱光の中にビームの情報が含まれているから、その散乱光の「計算」により、フィードバックすべき照射光が決定されうる。図1にこの冷却法の模式図を掲げる。この方法を使えば、レーザーという高価な源を使うにせよ、照射に要するエネルギー量は、従来の方法に比してはるかに少なくてすむ。図2に、我々の冷却法についてのシミュレーションの結果、ビームの位相空間の広がり（エミタンス）が、ビームが周回数 N を経るに連れて減っている様子が示されている。レーザーによって適切なキックをビームに与える為には、レーザーの横波を縦波に変えねばならない。これを我々はウィグラー磁場とレーザーのかけ合わせのビート波によって達成する。これに必要なレーザーのビート波のパターン及びそのパワーも図2に示されている。このレーザー波の集団がビームとの相互作用の結果変形を受け、そのスペクトル分布が変わると同時にビームのエネルギーの空間的分布も影響を受け、おおむねそのゆらぎが減っている様がわかる。一方、ビーム内部構造に見合っていない照射光を当てても、ビーム冷却は進まず、レーザーとビームは「共鳴」しない。双方の内部構造が、鍵と鍵穴のように合うと「共鳴」し、ビームのエントロピーは急激にレーザーへ流れ移ることになる。実際図2にはビーム冷却に伴うレーザー光のエントロピーの増大を示している。

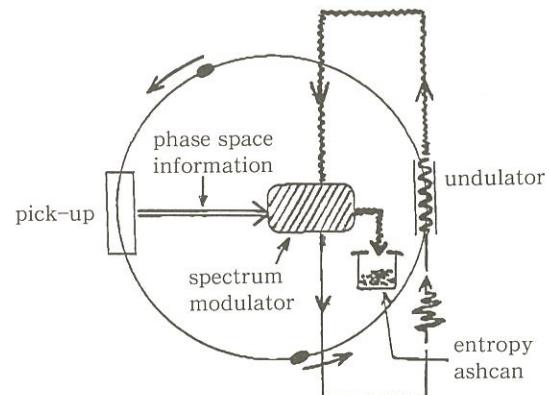


図1 レーザー冷却法の模式図。荷電粒子ビームは蓄積リングを周回している。リングの一端のpickup部でビームの内部構造を診断し、その情報を「計算機」（斜線部）に入れる。この情報により、レーザーに「計算」をかけ、プログラムしたレーザー光をアンジュレーター（あるいはウィグラー）部に照射する。プログラムされたレーザー光とアンジュレーターのビート波が、周回して来た当のビームと相互作用し、エントロピーをビームからレーザーへと授受する。その結果、ビームは以前より「冷却」し、レーザーは「加熱」する。これを繰り返す。

プラズマの質の制御の為には、我々はプラズマ中のシア流（せん断流）によるプラズマの不安定性の分岐現象に注目している。天体磁気円盤や近来の核融合トカマクのプラズマには、強いシア流が存在する。このシア流の存在は、一定の条件の下では本来不安定であったモードが安定化したり、逆に本来安定であったモードが不安定化したりする。この分岐現象に伴って、誘起されたプラズマの揺動が、プラズマの物性にはね返り、輸送係数を定性的に変化させることが示された。この現象によって天体円盤の間欠的明度変化が説明された。天体円盤は、静かな相では円盤のプラズマの温度が低く暗く見え、激しい相ではプラズマの温度の桁が上がり明るく見えるという相転移を繰り返している。後者の明るい相は特にエネルギーを多量に放出しているので、円盤中のプラズマのシア流中の粘性が桁違いに大きくなり、シア流のエネルギーの散逸が異常に大きくならなければならない。円盤の異常粘性を通常の流体力学で説明しようという試みがなされて来たが、十分に大きな粘性が得られない。我々は磁場の揺らぎを含めた計算によれば、十分大きな粘性が得られる事に注目した。このシア流による磁場の乱れの例を図3に示す。乱れた磁場は輸送係数を粒子衝突で生ずるよりはるかに巨大にするので、これがプラズマ中の輸送の分岐現象の源になっていることを示した。この例のような輸送の分岐現象はトカマクプラズマのシア

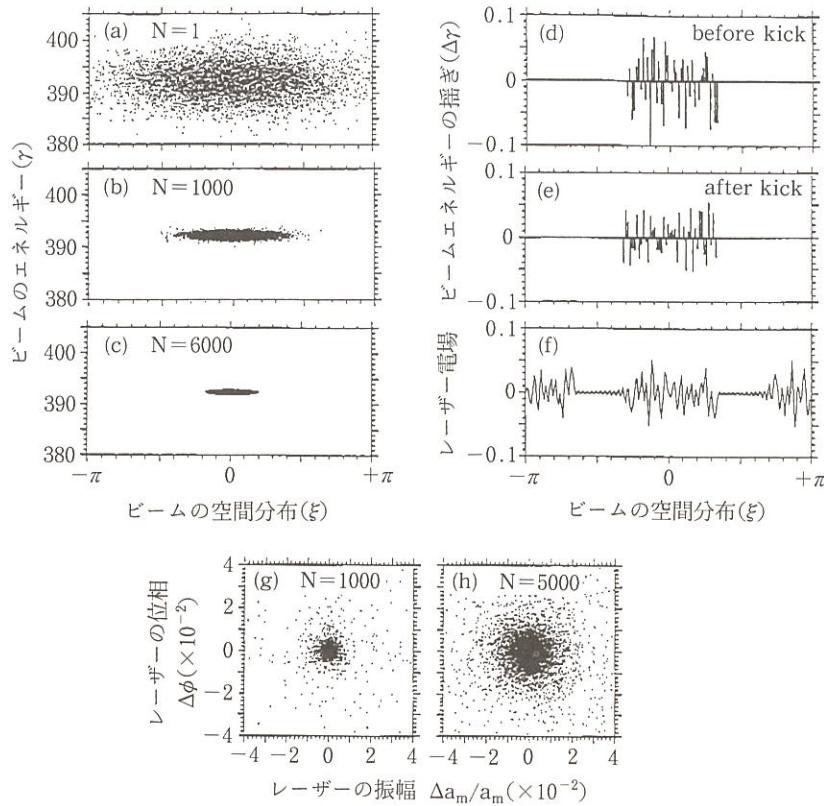


図2 ビームの位相空間における「冷却」の様子 (a-c), ビームのエネルギーゆらぎとそれに合致するよう「計算」されたレーザー光の内部構造 (d-f), そしてビームと相互作用した結果「加熱」されたレーザー光 (g, h) を示す。ビームの位相空間は周回数 N とともに縮小（「冷却」）し、エントロピーが減少する。同時に、光のエントロピーは増大する。（岸本ら、投稿中）

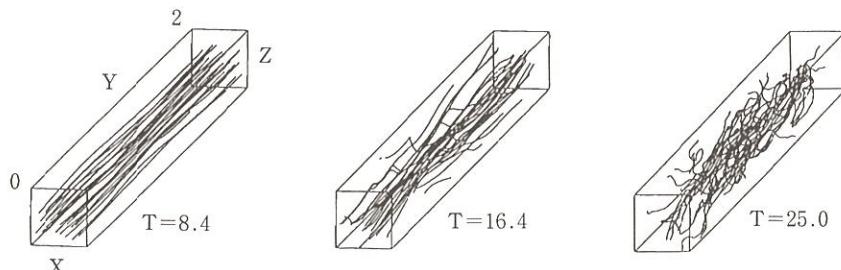


図3 シア流による磁力線の不安定性による乱れの発展。プラズマ中の y 方向の流れがあり、その流れに x 方向のシアがある場合を示す。一定の条件の下ではプラズマの不安定性により、磁力線に乱れが発達し、輸送係数が異常に大きくなる。（松元ら、投稿中）

流によっても起こる事が示される。ただ、トカマクプラズマの熱異常輸送は逆に元来異常に大きかったものが、シア流によってかえって抑制されるという逆の傾向を呈する所が驚きである。この現象を使う事により、外部的に入射した中性ビームにより、トカマク閉込めを改善するような輸送係数変化につながることが

示された。トカマクプラズマの一つの質に関する量としてプラズマ β 値があるが、普通バルーニング不安定性がこの上限を決定するのに重要である。シア流中のモードの性質を調べるために好都合な安定性原理の数学的方式を導いた。これらの方針はいわゆる「高性能トカマク」研究に不可欠である。