

## チュートリアル: プラズマ観測・計測、新技術

## Introduction to plasma measurements/diagnostics and new technologies in the laboratory physics, astrophysics, and space physics

門 信一郎 [1]; 北本 俊二 [2]; # 平原 聖文 [3]

Shinichiro Kado[1]; Shunji Kitamoto[2]; # Masafumi Hirahara[3]

[1] 東大高温プラズマ研究セ; [2] 立教大・理; [3] 立大・理・物理

[1] High Temperature Plasma Ctr., Univ. Tokyo; [2] none; [3] Department of Physics, Rikkyo University

本チュートリアル講演は、合同プラズマ科学シンポジウムのサブセッションの一つである「プラズマ観測・計測、新技術」において、分野を越えた活発な議論を展開するため、各分野での基礎知識の導入的紹介と、参加者の認識・指向性を共通化するという意図で行われる。

まず、物理学会の地上プラズマ実験が紹介される。ここでいう「プラズマ診断法」とは、プラズマを構成する粒子、あるいはプラズマから発せられる電磁波(光子)を計測することによって、密度・温度・速度・粒子種等のプラズマの物性を調べることを指す。

磁場核融合装置や基礎実験装置内に生成・閉じ込められたプラズマの電子密度は  $1\text{m}^3$  当たり  $10^{15}$  以下から  $10^{20}$  以上に及び、電子温度は  $1\text{eV}$  以下から  $10\text{keV}$  以上まで極めて広範囲に渡っており、磁場核融合装置ではこれらがしばしば共存する。これらの装置におけるプラズマ診断の特徴は、プラズマ中の粒子や光を受動的に観測するにとどまらず、レーザーや粒子ビーム、ペレットと呼ばれる固体燃料等をプラズマ中に入射し応答を見る能動的な測定が可能であることである。特に将来の核融合装置では、これらを遠隔制御する技術だけでなく、核融合反応による中性子負荷に耐えうる計測機器の開発も重要である。

電子衝突による励起に非等方性があると、プラズマからの線スペクトルが偏光することが指摘されており、磁場閉じ込めの電子加熱条件やレーザー生成プラズマの X 線等において偏光分離計測が行われている。偏光分離計測は、近年磁場勾配がある装置のゼーマン分裂のパターンから視線上の発光位置を特定する手法や、高速の水素原子ビームが磁場中を運動するときに感じる  $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$  電場によるモーショナルシュタルク効果を利用した磁場ベクトル方向の計測にも利用されるようになってきたのが特徴といえる。

次に天文学会からは、最新の X 線天文衛星「すざく」の観測機器を例とし、宇宙プラズマの計測原理・手法が紹介される。

高エネルギー天文学の分野では、X 線や  $\gamma$  線による天体観測により、宇宙の高温天体や多種多様な領域に充満する高温ガスの性質や成因、あるいは他の様々な高エネルギー現象の物理を理解するため、計測器の技術が進んできた。特に、「すざく」には3つの特徴的な検出器が搭載されている。マイクロカロリメータは、 $0.5 \sim 10\text{keV}$  のエネルギー領域で  $10\text{eV}$  以下の高いエネルギー分解能を持つ非分散型検出器である。軌道上では残念ながらその威力は発揮されなかったが、これにより輝線の微細構造を観測可能とし、光電離を始めとした色々な電離状態の解明が期待されていた。また、低エネルギーまで高いエネルギー分解能を持つ裏面照射型の CCD や、低バックグラウンドのシリコン PIN 検出器と井戸型シンチレーターにより、 $0.3\text{keV}$  程度から数百  $\text{keV}$  までのエネルギー範囲での X・ $\gamma$  線を高い S/N 比により観測することが可能になった。そして宇宙に豊富に存在する殆どの軽元素からの輝線が観測されており、 $10^{12}\text{G}$  にも及ぶ強磁場でのサイクロトロン共鳴構造も詳しく観測されつつあるという状況である。

最後に地球惑星分野から、(無衝突)宇宙空間プラズマの飛翔体による直接観測が紹介される。

CEM や MCP といった検出器の開発により、宇宙で支配的なエネルギー範囲である数  $\text{eV} \sim$  数  $10\text{keV}$  におけるプラズマ粒子の計数測定が可能となった。これらの検出器単体に静電型エネルギー分析器を組み合わせると、粒子のエネルギーが数%程度の分解能で計測可能になり、入射方向も数  $\sim 10$  度の分解能で同定出来るようになる。エネルギー・入射方向の弁別は宇宙空間プラズマの加速・加熱・輸送・消失の情報をもたらすが、地球惑星近傍の宇宙空間に存在する代表的なイオンの種別を選別することは、そのプラズマの起源に関する議論を可能とする。このため、速度分析器も併用されることが多く、最近では数  $10 \sim 100\text{ps}$  の時間分解能を持つ TOF(Time of Flight) 式のものに主流が移りつつある。

昨今では、核子当たり数  $10\text{keV} \sim$  数  $10\text{MeV}$  以上の粒子に対してエネルギー弁別が可能な半導体検出器(SSD)のストリップ化・ピクセル化や読み出し系の技術の応用が盛んになってきた。また、数  $\text{keV}$  以上の電子に対しても量子効率が低下しない APD も用いられるようになり、CEM や MCP の欠点を補う工夫がなされており、数  $\text{eV} \sim 10$  数  $\text{MeV}$  に渡る連続したエネルギー範囲におけるプラズマ粒子の種別毎の3次元速度分布関数取得が可能になると思われる。一方では、数  $10\text{ms}$  で速度分布関数を取得出来るような高時間分解能を持つ観測機器も開発されている。今後は放射線帯粒子の生成・消失過程、衝撃波・リコネクションでのプラズマ素過程の詳細な観測が可能になると期待されている。