

## 最近の技術から

# レーザー誘起蛍光法によるプラズマ診断

土 田 一 輝

名古屋大学プラズマ研究所 〒464 名古屋市千種区不老町

レーザー研究や核融合研究において、プラズマ中の原子・イオンの振舞を知ることは非常に重要である。従来、プラズマ中の原子・イオンの密度測定は、発光分光法により行なわれてきた。最近、同法に比べレーザー誘起蛍光法 (laser-induced fluorescence method, 以下 LIFM と略す) が、プラズマ中の原子・イオンの特定の準位の占有密度・速度分布を、空間・時間分解能をもって直接測定できるなどのすぐれた長所をもつため、有力なプラズマ診断法の一つとして注目され始めている。本稿では、初めにその測定原理について述べ、次に LIFM を用いたプラズマ診断の例を簡単に示す。

プラズマ中の原子・イオンの特定の2準位間の遷移波長に同調したレーザー光を入射すると、各準位の占有密度 ( $n_1$  および  $n_2$ ) は、図1に示した吸収・誘導放出、自然放出過程により変化する。もし、レーザー光の強度が十分に強く、レーザー光を入射して  $[\rho(B_{12}+B_{21})+A_{21}]^{-1}$  程度の時間が経過すると、二つの準位の占有密度はレーザー光強度によらず、各準位の統計重率  $g_i$  により決まる (吸収の飽和)。このとき、上準位から放出される蛍光強度  $\Delta I_{21}$  と、各準位の占有密度を統計重率で割った reduced population density ( $n_i/g_i$ ) の差  $\Delta N_{12}$  との関係は、

$$\Delta N_{12} \equiv (n_1/g_1 - n_2/g_2) \propto \{(g_1 + g_2)/g_1 g_2\} \Delta I_{21}$$

と表わされ、 $\Delta I_{21}$  を観測することにより  $\Delta N_{12}$  を求めることができる。

LIFM によるプラズマ診断の実験に用いられている装置例を図2に示す。プラズマ中の原子の励起用光源として、フラッシュランプ励起色素レーザーが用いられている。このパルス幅および出力は可視領域で  $\sim 5 \times 10^{-7}$  s,  $\sim 10^6$  W/cm<sup>2</sup>・nm であり、レーザー入射後  $10^{-8}$  程度の時間が経過すると飽和の条件が成立する。放出される蛍光は、分光器を通して光電子増倍管 (PMT) で検出し、デジタルメモリーに記録、S/N 向上のため計算機で統計平均を行なっている。PMT に加えているゲート回路は、プラズマからの背景光による PMT の飽和を避け、

その動作領域を拡大するために用いている。このときの空間分解能は、レーザービーム径で決まり数 mm であった。また時間分解能はレーザーパルス幅、あるいは繰返し周波数で決まり、本実験で用いたレーザーの場合それぞれ  $5 \times 10^{-7}$  s, 0.1 pps であったが、エキシマレーザー励起色素レーザーでは、 $10^{-8}$  s, 200 pps が可能となる。

次に LIFM によるプラズマ診断の例を、①  $\Delta N_{12} > 0$ , ②  $\Delta N_{12} < 0$ , の二つの場合に分けて述べる。

### ① $\Delta N_{12} > 0$ のとき

下準位が、基底あるいは準安定準位の場合、 $n_1/g_1 \gg n_2/g_2$  なる近似が成立する。この結果、プラズマ中の原子・イオンの基底準位や準安定準位の占有密度が、レーザーを入射した際に観測される蛍光の強度  $\Delta I_{21}$  より、求められる。この手法を用いた、プラズマ中のバリウム原子密度<sup>1)</sup> やヘリウム準安定原子密度分布測定<sup>2)</sup> 等の報告がされている。このときの検知限界はプラズマの背景光により決まり、 $\sim 10^7$  cm<sup>-3</sup> であった。また、励起用レーザー光の発振波長幅を狭くし、ドップラー広がり中の特定の速度領域にある原子を励起することで、原子の速度分布を求めることも可能となる。0.01 Å の発振幅で  $10^5$  cm/s 程度の速度分解能が得られる。この手法を用いて、プラズマ壁相互作用の結果放出された各種金属不純物の密度・速度分布を測定し、トカマク等の磁気閉じ込め高温プラズマ発生装置における不純物生成、輸送機構が調べられている<sup>3,4)</sup>。

また、レーザーで励起された原子の一部は、プラズマ中の電子による衝突過程で他の準位に遷移し、衝突誘起蛍光を放出する。この強度とレーザー誘起蛍光の強度の比を観測することにより、プラズマの電子密度分布を求めることもできる<sup>5)</sup>。

### ② $\Delta N_{12} < 0$ のとき

この条件は、レーザー発振に必要な占有密度の反転分布に対応する。反転分布が生じている2準位間にレーザーを入射すると、上準位より放出される自然放出光の強

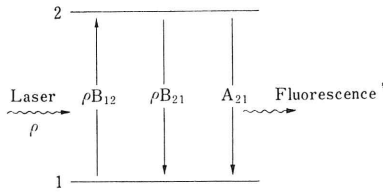


図 1 レーザー誘起蛍光法に関係した遷移  
 $\rho$ : レーザーのエネルギー密度,  $A$ ,  $B$ : アインシュタインの  $A$ ,  $B$  係数

度の減少(負の蛍光)が観測でき、その強度より利得係数を直接的に空間、時間分解能をもって求めることができる<sup>6)</sup>。この手法により、短波長レーザー研究で注目されている高密度再結合プラズマ中の水素励起準位間の反転分布が検証された。また、その利得は、プラズマ中心で通常の He-Ne レーザー程度であったが、プラズマ周辺では吸収媒質となるため、レーザー発振のためにはプラズマ体積を増やし、反転分布を強くする必要のある等の発光分光法では観測できなかった現象が明らかにされている。

プラズマ診断法としての LIFM の適用限界は、励起用レーザーが存在するか否かで決まる。金属原子や励起状態原子の密度測定に必要なレーザー光の波長は、主として可視~紫外領域にあるため、色素レーザーを用いることにより LIFM の実験が可能となる。しかしながら、現在、トカマク等の不純物として問題となっている炭素や酸素原子、および各種のイオンの検知のためには真空紫外レーザーの開発が必要となる。最近、炭素・酸素・水素原子密度測定のために、高出力真空紫外アルゴンエキシマレーザーが開発され、すでに、126 nm の炭素の共鳴線を用いて炭素原子密度計測が行なわれているが<sup>7)</sup>、今後、より短波長のレーザーが開発されれば、プラズマ診断法としての LIFM の適用領域は、いっそう拡がると思われる。

以上、簡単にレーザー誘起蛍光法を用いたプラズマ診断について述べたが、これ以外にも LIFM によるプラズマ中の電場測定や、ビームプローブ法への LIFM の

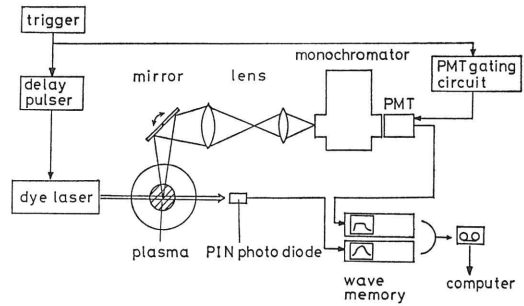


図 2 実験装置の一例

応用等の研究が行なわれており、LIFM による新しいプラズマ診断法の可能性は、ますます広がっていくものと予想できる。これを機会に、レーザー誘起蛍光法に興味をもっていただければ幸いである。

文 献

- 1) D. Dimock, E. Hinnov and J. C. Johnson: Plasma diagnostics with ionized barium and tunable dye lasers. *Phys. Fluid*, **12** (1969) 1730.
- 2) K. Tsuchida: Density measurement of helium metastable atoms in a plasma by the laser-induced fluorescence method. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **23** (1984) 338.
- 3) E. Hintz: Laser diagnostics for plasma surface interaction. *J. Nucl. Mater.*, **93/94** (1980) 86.
- 4) E. Dullni, P. Bogen, E. Hintz, D. Rusbüldt, B. Schweer, S. Goto and K. H. Steuer: Measurement of the titanium flux emitted from the divertor plates of the ASDEX TOKAMAK using laser induced fluorescence. *Phys. Lett.*, **88A** (1982) 40.
- 5) K. Tsuchida, S. Miyake, K. Kadota and J. Fujita: Plasma electron density measurements by laser- and collision-induced fluorescence method. *Plasma Phys.*, **25** (1983) 991.
- 6) S. Miyake, K. Tsuchida, Y. Uehara, W. Sasaki, Y. Watanabe and J. Fujita: Direct measurement of population inversion in recombining hydrogen plasma by the laser-induced fluorescence method. *Phys. Rev. Lett.*, **50** (1983) 41.
- 7) Y. Uehara, E. Fujiwara, K. Tsuchida, W. Sasaki, Y. Kato, M. Yamanaka, S. Miyake, S. Saito and J. Fujita: High power argon excimer laser at 126 nm pumped by electron beam. *Rev. Laser Eng. (レーザー研究)*, **11** (1983) 682.

(1984年2月8日受理)