プラズマによるルビー・レーザー光の散乱^{*}

横山昌弘, 井沢靖和, 山中千代衛 (阪大工)^{**}

(1965年8月12日受理)

§1 序 論

プラズマ中の自由電子にもとづく光の散乱は所謂トムソン散乱として知られているが, 最近のレーザーの発展によって非常に強い単色光が容易に得られる様になりプラズマ診断への応用が大いに注目されている。

レーザーをプラズマの診断に用いるには大別して散乱を利用する方法と干渉を用いる方法と2つあるがこのうち主として筆者らの研究室で現在までに得られた散乱の実験結果について述べることにする。^{1~4)}

§2 散乱によるプラズマ諸量の決定

プラズマ中の電子密度を n_e とすると, 波数ベクトル $\vec{K}_1$, 周波数 ω_1 , 入射強度 I_0 の光が立体角 $d\omega$ の方向に散乱される時の強度 I_s は

$$dI_s(\vec{K}_2, \omega_2) = \sigma_e I_0(\vec{K}_1, \omega_1) < |n_e(\vec{k}, \omega)|^2 > d\omega$$

で与えられる。ここで σ_e は1個の電子あたりの散乱断面積, $\vec{K}_2$, ω_2 は散乱光の波数ベクトル及びその周波数であって

$$\vec{K}_2 = \vec{K}_1 \pm \vec{k}$$

* Scattering of Ruby Laser Light by Plasma

** Masahiro Yokoyama, Yasukazu Izawa & Chiyoie Yamanaka
(Faculty of Engineering, Osaka University)

$$\Omega_2 = \Omega_1 \pm \omega$$

の関係がある。 $n_e(\vec{k}, \omega)$ は電子密度のフーリエ変換をあらわし、入射光が完全な単色光ならば散乱光のスペクトル分布は密度のゆらぎのスペクトル分布を示し、これよりプラズマの温度、密度が決定できる。

トムソン散乱の場合、散乱強度は

$$\alpha = \frac{1}{|\vec{k}| D} \quad \text{但し} \quad D = \sqrt{\frac{\kappa T}{4 \pi n_e e^2}}$$

なるパラメーターに依存していて、 $\alpha < 10^{-1}$ の所では散乱光のスペクトル分布は単に電子のドップラー幅で与えられる。それ故その半値幅から電子温度が得られ、更に絶対測定がなされるならば電子密度が求められる。 $10^{-1} \leq \alpha \leq 1$ の領域のプラズマでは電子とイオン両方にもとずくドップラー幅をもつスペクトルが得られる。この場合も電子温度と電子密度を求めることができ、中心ピークが測定され分解されるならばイオン温度が求められる。 $1 \leq \alpha$ の場合には散乱光のスペクトル分布には中心ピーク他に、入射したレーザー光の周波数とほぼプラズマ周波数だけ異なる所にサテライト・ピークがあらわれる。そしてこのピークの位置と、中心ピークに対してこのピークに含まれている全エネルギーの比から電子密度と電子温度を求めることが原理的に可能である。^{5, 6)}

§ 3 実験結果

本実験では H 型電磁衝撃波管によるアルゴンの衝撃波プラズマを散乱の実験に用いた。第 1 図にその装置の概要を示す。衝撃波管は内径 5 cm、長さ 1 m、電極間隔 8.5 cm のもので、このバック・ストラップを有する電磁衝撃波管を夫々 2.4 μ F のコンデンサーを 18 KV ~ 25 KV に充電してエヤー・ギャップを通じて同時放電を行ない放電管の中央にある複探針で電子温度及び密度の測定をし、流しカメラにより衝撃波速度の測定を 3 cm マイクロ波でカットオフの時間の測定を行なった。

ピックアップコイルによる電流波形より求めた最大電流値は約 39000 amp、 $L = 0.58 \mu$ H、 $R = 5.2 \times 10^{-2} \Omega$ であった。流しカメラの実験結果によると Ar 圧力 0.6 ~ 2 mmHg、放電電圧 18 KV ~ 25 KV の範囲で放電管中央でほぼ 7 M ~ 15 M の衝撃波速度が観測されている。第 2 図は A_r 0.6 mmHg、充電電圧 22 KV の時に H 型の衝撃波管の両端で同時に放電を行ない衝撃波プラズマを管の中央で衝突させた時の流しカメラ写真である。毎回の放電を通じて衝撃波プラズマがほぼ中央で衝突していることが観測されている。

プラズマによるルビー・レーザー光の散乱

第1図 実験装置

第2図 衝撃波プラズマ衝突の流しカメラ写真

Ar 0.6 mmHg, 放電電圧 22 KV

複探針及び3cmマイクロ波による測定から放電管中央で少なくとも $10^{12}/\text{cm}^3$ 以上の電子密度のプラズマが200 μSEC 以上の時間にわたって存在することが確かめられている。一方衝撃波管の A_r ガスの初期圧を0.5 mmHg, 衝撃波速度を15 Mとすると圧縮比は7.5, 電離度は0.128となる。これより電子密度を求めると $n_e \approx 10^{16}/\text{cm}^3$ となっていることが分かる。

トムソン散乱の断面積は $\sigma_e \approx 10^{-25} \text{ cm}^2$ であり, $n_e \approx 10^{16}/\text{cm}^3$ のプラズマでは光電子増倍管の立体角を 10^{-3} ステラジアンとすると $I_s/I_0 \approx 10^{-12}$ となる。一方レーリー散乱の断面積は $\sigma \approx 10^{-28} \text{ cm}^2$ で1気圧の気体の場合, 原子密度 $N \approx 10^{19} \frac{\text{atoms}}{\text{cm}^3}$ であるからこの場合も $I_s/I_0 \approx 10^{-12}$ となる。それ故トムソン散乱を観測するためには必ず中性気体分子によるレーリー散乱が観測可能なことが必要条件となる。そこで第1図に示したような散乱光測定装置⁷⁾でルビー・レーザー光の散乱実験を行ない, レーリー散乱の散乱強度の角度分布を測定した。使用気体は窒素及び空気で, 散乱光の測定にはRCA 7102光電子増倍管を用いた。第3図はその散乱強度の角度分布を示す。この場合は窒素1気圧でレーザー入力400ジュールであった。

第 3 図 N_2 による散乱の角度分布

プラズマによるルビー・レーザー光の散乱

空気1気圧の場合にもほぼ同様な結果が得られている。図中、実線は実験値、破線は理論値を示す。

プラズマによるレーザー光のトムソン散乱を観測するにあたっての問題点は第一に器壁レンズ等の装置自体によるレーザー光の乱散乱強度を予想されるプラズマのトムソン散乱強度よりもひくいレベルに押さえることであるが、これは上述のレーリ-散乱測定装置によって充分可能となった。

問題点の第二はプラズマ自身より出る制動輻射にもとづく光が予想される散乱光の強度よりはるかに強いことである。この点は我々の実験では次の様にして解決された。即ちレーザー光の偏光面を垂直にえらんでおき、二個の光電子増倍管を第1図のように散乱角 $\theta = 90^\circ$ の位置に对称において、夫々偏光板により偏光面が垂直及び水平になる様にしておく。プラズマより出る光は偏光ではないので、あらかじめ二つの光電子増倍管の出力を等しくしておいて差動増幅器に入れプラズマの光のバランスをとることが出来る。この様にしてプラズマより出る光を互いにキャンセルすることが可能⁹⁾である。

第4図は A_r 1 mm Hg, 放電電圧 18 K Vの時のプラズマのみの時の光のバランス波形である。

第4図 プラズマ光のみの時の波形

時間軸 50 μ SEC/cm

横山・井沢・山中

この時の時間軸は $50 \mu\text{sec}/\text{cm}$ である。写真ではバランスされているため見えないが、衝撃波プラズマはシンクロスコープの掃引がスタートして後約 $150 \mu\text{sec}$ の所から $200 \mu\text{sec}$ の間にわたって存在している。更にプラズマにルビー・レーザーの光を入射した時の波形を第5図に示す。レーザー入力は 506 ジュールである。衝撃波プラズマが存在している時間を通じてプラズマによる散乱と思われる波形の変化が観測されている。

第5図 レーザー光をプラズマに入射した時の波形

時間軸 $50 \mu\text{sec}/\text{cm}$

§4 結 論

この実験装置の特徴は入射レーザー光の波長においても散乱の観測が可能であるということである。この点はレーリー散乱の観測を通じて充分確かめられた。一般には1次ビームの波長よりやや短くはなれた所で測定されるのが普通である。⁸⁾ 又制動輻射にもとづくプラズマ光は偏光を利用した差動法で充分除去できることがわかった。現在更に実験を続行中である。

参 考 文 献

- 1) 横山, 井沢, 山中他 昭和39年 電気関西支部連大 2-7
 - 2) 横山, 井沢, 山中他 昭和40年 電気四学会連大 114
 - 3) 横山, 井沢, 山中他 1965年 放電, プラズマ核融合分科会 12p C3
 - 4) 横山, 井沢, 山中 1965年 日本物理学会年会 13a K10
 - 5) E.E. Salpeter. Phys. Rev. 120, 1528 (1960)
 - 6) W.H. Kegel, IPP/619 Oktober (1963)
 - 7) George, Goldstein, Slama and Yokoyama. Phys. Rev. 137, A369 (1965)
 - 8) H.J. Kunze, IPP 1/30 Oktober (1964)
 - 9) 中井, 山中: 物理学会年会 8p -C-4 (1964)
- 10) 中井, 山中: 応用物理 34, No. 8 印刷中 (1965)