

JAERI-M

8777

高温プラズマによる遠赤外レーザー散乱
スペクトルの解析

(臨界プラズマ試験装置設計報告・76)

1980年3月

金森 隆裕*・的場 徹・船橋 昭昌・鈴木 康夫

この報告書は、日本原子力研究所がJAERI-Mレポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

高温プラズマによる遠赤外レーザ散乱スペクトルの解析
(臨界プラズマ試験装置設計報告・76)

日本原子力研究所東海研究所大型トカマク開発部
金森 隆裕*・的場 徹・船橋 昭昌*・鈴木 康夫

(1980年2月8日受理)

遠赤外散乱法をJT-60等の高温、高密度プラズマに適用する際に必要な散乱スペクトル解析を実施し、以下の結論を得た。①高温プラズマ($> 1 \text{ keV}$)では、周波数変位の大きな領域で散乱スペクトルが変形する。これは電子の散乱パラメータ α が周波数 ω の関数であることに起因する。このことを考慮することで、電子の側帯ピークを与える周波数から電子温度が精度よく測定できる。②水素プラズマ中に不純物イオンが混入すると、不純物の影響で水素スペクトルのイオン項が変形する。この場合、不純物イオン密度が小さくなれば水素イオンスペクトルに対する影響は少なくなり、かつ不純物の原子番号が大きいほど水素イオンスペクトルと不純物イオンスペクトルは分離する。③不純物の種類が既知で、かつ水素イオンスペクトルと分離できる場合、不純物イオンスペクトルの半値幅あるいはピークを与える周波数から実効電荷数 Z_{eff} 、およびイオン温度 T_i が評価できる。

* 外来研究員 : ㈱日立製作所エネルギー研究所、

+ 核融合研究部

Spectrum Analysis of Far-Infrared Laser Scattering
for a High Temperature Plasma

Takahiro KANAMORI^{*}, Tohru MATOBA, Akimasa FUNAHASHI⁺
and Yasuo SUZUKI

Division of Large Tokamak Development, Tokai Research
Establishment, JAERI

(Received February 8, 1980)

The spectrum of far-infrared (FIR) laser scattering for a high temperature plasma was analyzed in application of the FIR-laser scattering method to measurement of ion temperatures in a large Tokamak plasma. Following are the results.

- (1) A scattering spectrum of the electron term is distorted when the plasma temperature is high such as 1 keV. It is due to the dependence of electron scattering parameter α on frequency ω of the scattered light. Taking this dependency into consideration is thus necessary in analysis of the electron temperature.
- (2) A scattering spectrum of the hydrogen-ion term is distinguished from a one of the impurity-ion term, when the impurity density is small or the impurity atomic number is large.
- (3) When the hydrogen spectrum is distinguished from the impurity spectrum, it is possible to determine the ion temperature and the effective charge of the plasma by measuring a half-width of the hydrogen spectrum and the impurity ion resonance frequency.

Keywords : Far-Infrared Laser Scattering, Form Factor
Electron Temperature, Ion Temperature, JT-60 Tokamak,
Spectrum Analysis

* On leave from Energy Research Laboratory, Hitachi Ltd., Hitachi,
Ibaraki

+ Division of Thermonuclear Fusion Research, Tokai Research
Establishment, JAERI

目 次

1. 序 論	1
2. トムソン散乱の原理	2
2.1 フォームファクタ $S(\omega)$ の表式	2
2.2 散乱パラメータ α の影響	4
2.3 k の周波数 ω による影響	5
3. プラズマパラメータの評価	5
3.1 電子温度の評価	5
3.2 イオン温度, 実効電荷数の評価	7
3.3 数種類の不純物が混入したプラズマのスペクトル形状	10
4. 遠赤外レーザビームの評価	10
5. 結 論	12
謝 辞	12
参考文献	13
記号表	14
付 録	27

Contents

1. Introduction-----	1
2. Theory of Thomson scattering -----	2
2.1 The formula of form factor $S(\omega)$ -----	2
2.2 Influence of scattering parameter α -----	4
2.3 Effect of angular frequency ω for wave vector k -----	5
3. Evaluations of plasma parameters -----	5
3.1 Evaluation of electron temperature -----	5
3.2 Evaluations of ion temperature and effective charge -----	7
3.3 Scattered spectrum for a plasma mixed several impurities-----	10
4. Required characteristics of FIR laser beam -----	10
5. Conclusion -----	12
Acknowledgments -----	12
References -----	13
Symbol list -----	14
Appendix -----	27

1. 序 論

現在、日本原子力研究所では、臨界プラズマ条件達成を目標とした臨界プラズマ試験装置（以下、JT-60 と略す）の開発、設計、製作が進められている。実験を遂行していく上で、プラズマ診断および診断結果をもとにしたプラズマ制御は、プラズマの安定化、高性能上に必要な手段といえる。基本的なプラズマパラメータのうち特に電子密度、電子温度、イオン温度は臨界プラズマ条件達成に重要であり、簡便かつ直接的な測定方式が望まれている。現在までの所、電子密度はマイクロ波干渉法、電子温度は可視レーザのトムソン散乱法^{1), 2)}でかなり良い精度で測定できる。一方、イオン温度の測定には、これまで可電交換による高速中性粒子のエネルギー分析法あるいはドップラ幅の拡がりを測定するドップラ法が用いられてきた^{1), 3), 4)}。しかしJT-60 の様な高温、高密度プラズマでは、高速中性粒子の平均自由行程がプラズマ半径より小さくなるため、プラズマの中心情報を荷電交換法で得るには詳細な解析が必要となる。また、プラズマ中の軽元素不純物もほぼ完全電離となるため、従来のドップラ法で測定できるのは主に周辺部不純物イオンの温度のみである。そこで、目的のプラズマ中心部のイオン温度を得るためには結晶分光器により重金属の高電離イオンのドップラ幅を測定することになる。JT-60 のイオン温度測定には上記の様な受動的な計測法に加えて、中心部イオン温度測定のために遠赤外散乱法、能動粒子線法などの能動的な計測法が検討されている。遠赤外散乱法は、電子温度の局所的測定として確立されている可視域トムソン散乱法を遠赤外域まで拡張したもので、電子とイオンの局所的な情報を同時に測定することが可能な新しい計測法⁵⁾である。ここでは遠赤外散乱法を適用する際に必要となる散乱スペクトルの解析をJT-60等の高温、高密度プラズマを対象に行なった。スペクトル解析を行なうに当たり①相対論効果は考慮しない、②プラズマは熱平衡状態にある、③磁場の影響は無視する、という仮定を設けた。散乱スペクトル解析の経過および得られた結果のうち、本報告では特に、

- (1) 高温プラズマの周波数変位の大きな領域での散乱スペクトルの変形
 - (2) スペクトル変形の効果を考慮に入れた電子温度の評価
 - (3) プラズマ中に不純物元素が混入した場合のイオンスペクトルの変形
 - (4) イオンスペクトルの変形を考慮に入れたイオン温度および実効電荷数の評価
- を中心に述べる。

2. トムソン散乱の原理

プラズマ中に位相のそろったレーザ等の平面単色電磁波を照射すると主に電子との相互作用で電磁波が再放射される。再放射された電磁波は、プラズマ中の情報をもっているため、その強度を解析すればプラズマのパラメータが決定できる。これがプラズマによる電磁波のトムソン散乱であり、散乱強度 $I(\omega)$ は次式で表わされる。

$$I(\omega) d\omega d\Omega = I_0 n_e \ell \sigma_{th} S(\omega) d\omega d\Omega \quad \dots\dots\dots (1)$$

但し、 I_0 : 入射電磁波の強度

$d\omega, d\Omega$: 散乱周波数および散乱立体角の要素

ℓ : 散乱体積の長さ

σ_{th} : トムソン散乱の微分断面積

ここで、 $S(\omega)$ は構造係数（フォームファクタ）と呼ばれているもので、電子密度揺動のフーリエ変換から導びかれているパワースペクトル密度であり、散乱スペクトル形状を決定する。 $S(\omega)$ からプラズマパラメータの間の対応を明らかにしておくことが必要となる。

2.1 フォームファクタの表式⁶⁾

$S(\omega)$ の一般形を算出するために以下の仮定を設ける。

(1) 相対論効果は考慮しない。

(2) プラズマ中の全ての粒子は、電子温度 T_e 、イオン温度 T_i なるマックスウェル分布であるとする。

(3) 磁場の影響は無視する。

(1)の仮定に対して、まずイオンの影響について考察する。プロトンの熱速度を v_p 、光速度を c とすると、イオン温度 $T_i = 10 \text{ keV}$ の場合、 $v_p/c = 4.6 \times 10^{-3}$ で相対論効果は無視することができる。一方、電子については電子の熱速度を v_e とすると $v_e/c = 0.2$ (電子温度 $T_e = 10 \text{ keV}$ の場合) 程度となり精密な解析のためには相対論効果を考慮しなければならない。しかし、コレクティブ散乱の条件では相対論効果の数値的な取扱いがかなり複雑になるために、ここでは考慮しないことにする。(2)の仮定については通常のカマクプラズマでは一般的に成立すると考えてよい。以下の計算では、プラズマ中の粒子の熱運動による密度振動による $S(\omega)$ について記述する。しかしながら他の原因（例えば、種々の不安定性）による非熱的な密度振動のそれについては無視することにする。最後に(3)の仮定の妥当性を検討する。入射波の波数ベクトルを k_i 、散乱波の波数ベクトルを k_s 、散乱ベクトルを k 、磁場ベクトルを B とすると、図1に示す様なベクトル関係となる。ここで、 k_i と k_s のなす角を θ 、 k と B のなす角を $\pi/2 - \phi$ とするとイオンのスペクトルに磁場の効果を見出すためには、磁場パラメータを r とし、

$$r \gg \sin \phi$$

$$\left. \text{但し, } r = \frac{\lambda_i}{4 \pi \sin(\theta/2)} \quad eB \sqrt{\frac{1}{2 \pi T_i M}} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

の関係が成立しなければならない。例えば入射電磁波に $\lambda_i = 496 \mu\text{m}$ の CH_3F レーザを用いて 90° 散乱による計測を行なった場合, $\phi \ll \pi/180$ となる。即ち, k ベクトルを $89^\circ \sim 90^\circ$ の範囲で \mathbf{B} に垂直になる様にして観測しなければならず現実的ではない。したがって磁場の影響はここでは無視することができる。

以上の仮定をもとにした波数ベクトルのベクトル関係を図2に示す。ここで, $k_i = 2\pi/\lambda_i$, $k_s = 2\pi/\lambda_s = \omega_s/c = k_i + \omega/c$ であるから, 散乱ベクトル k の絶対値 k は,

$$k^2 = k_i^2 + k_s^2 + 2k_i k_s \cos \theta$$

$$= 2k_i^2 (1 - \cos \theta) + 2k_i (1 - \cos \theta) \frac{\omega}{c} + \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \dots\dots\dots (3)$$

と表わせる。通常の解析では $\omega \ll \omega_i$ の場合が普通なので k の値は $k_i \approx k_s$, $\omega = 0$ のときの k の値を k_0 として,

$$k_0^2 = 2k_i^2 (1 - \cos \theta) \dots\dots\dots (4)$$

としている。しかし, (3)式より明らかな様に, 実際には k は ω の関数として与えられるため精密なスペクトル解析を行なう際には十分注意しなければならない。 k が ω の関数であることによる効果は次節以降で詳細にのべる。

さて, (3)式の関係を考慮に入れ, かつプラズマ中に何種類かの不純物元素が存在している場合, 電子密度揺動のフーリエ変換で求まるパワースペクトル $S(\omega)$ は次式で求めることができる⁷⁾。

$$S(\omega) = \frac{|1 - \sum_j (Z_j n_j / n_e) G_j(\omega)|^2 F_e(-\omega/k) + |G_e(\omega)|^2 \sum_j b_j F_j(-\omega/k)}{|1 - G_e(\omega) - \sum_j (Z_j n_j / n_e) G_j(\omega)|^2}$$

$$\times \frac{k^2 - k_i (\omega/c) (1 - \cos \theta) - (\omega/c)^2}{k^3} \dots\dots\dots (5)$$

但し, $b_j = Z_j^2 n_j / n_e$ ($n_e = \sum_j Z_j n_j$), 添字の j は j 番目の不純物元素を表わす。 F_e, F_j は各々電子, イオンの速度分布関数で次式で表わされる。

$$F_e(V_e) = \sqrt{\frac{m_e}{2 \pi \kappa T_e}} \exp\left(-\frac{m_e v_e^2}{2 \kappa T_e}\right) \dots\dots\dots (6)$$

$$F_j(V_j) = \sqrt{\frac{M_j}{2 \pi \kappa T_j}} \exp\left(-\frac{M_j v_j^2}{2 \kappa T_j}\right) \dots\dots\dots (7)$$

さらに, $G_e(\omega), G_j(\omega)$ はいわゆる "screening integrals" と呼ばれている関数で, 次式で示される。

$$G_e(\omega) = -\alpha^2 [1 - f(x) + i(\pi)^{1/2} x \exp(-x^2)] \dots\dots\dots (8)$$

$$G_j(\omega) = -\beta_j^2 [1 - f(y) + i(\pi)^{1/2} y \exp(-y^2)] \dots\dots\dots (9)$$

但し, α, β は各々, 電子, イオンの散乱パラメータであり λ_D をデバイ長とすると,

$$\alpha = \frac{1}{k \lambda_D} = \frac{1}{k} \sqrt{\frac{n_e e^2}{\kappa T_e \epsilon_0}}, \quad \beta_j = \sqrt{\frac{Z_j T_e}{T_j}} \alpha \dots\dots\dots (10)$$

と表わせる。さらに

$$x = \omega/\omega_e, \quad \omega_e = k \sqrt{\frac{2 \kappa T_e}{m_e}} \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$y = \omega/\omega_j, \quad \omega_j = k \sqrt{\frac{2 \kappa T_e}{M_j}} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$f(x) = 2x \exp(-x^2) \int_0^x \exp(t^2) dt \quad \dots\dots\dots (13)$$

である。k の ω による影響は(5)式において

$$\frac{d}{d\omega} \left(\frac{\omega}{k} \right) = \frac{k^2 - k_i (\omega/c) (1 - \cos \theta) - (\omega/c)^2}{k^3} \quad \dots\dots\dots (14)$$

の形で含まれている。ここでは便宜上(5)式を

$$S(\omega) = S_e(\omega) + S_i(\omega) \quad \dots\dots\dots (15)$$

と表わす。但し、

$$S_e(\omega) = \frac{|1 - \sum_j (Z_j n_j / n_e) G_j(\omega)|^2 F_e(-\omega/k)}{|1 - G_e(\omega) - \sum_j (Z_j n_j / n_e) G_j(\omega)|^2} \frac{d}{d\omega} \left(\frac{\omega}{k} \right) \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$S_i(\omega) = \frac{|G_e(\omega)|^2 \sum_j b_j F_j(-\omega/k)}{|1 - G_e(\omega) - \sum_j (Z_j n_j / n_e) G_j(\omega)|^2} \frac{d}{d\omega} \left(\frac{\omega}{k} \right) \quad \dots\dots\dots (17)$$

に分けて、第1項目を電子項、第2項目をイオン項と呼ぶ。

2.2 散乱パラメータ α の影響

フォームファクタ S(ω)は散乱パラメータ α の値によって特徴的に変化する。

(i) α ≪ 1 の場合

α ≪ 1 の時、電子は相互作用なく個別に散乱にあずかる。数式的には、α ~ 0 の極限で(8), (9)式より G_e(ω) ~ 0, G_j(ω) ~ 0 となるため(5)式よりフォームファクタ S(ω)は、イオン項 S_i(ω) が無視され、電子項 S_e(ω) が電子の速度関数に対応したドップラプロファイルを示す。図3に α ≪ 1 の場合のフォームファクタ S(f)を示す。(以後、数式上の取扱いでは角周波数 ω を、解析結果については周波数 f を使用する)。図3の横軸は、散乱された電磁波の周波数シフト量 (Hz) を示している。

(ii) α ≧ 1 の場合

α ≧ 1 の条件は、コレクティブ散乱と呼ばれ電子は個別に散乱に寄与せず、イオンとの間で相互作用をして集団的に散乱に寄与する。数式的には(15)式の第1項のみならず、第2項がきいてくる。図4に α ≧ 1 の場合の代表的な S(f)を示す。ここで図中の点線のスペクトルは電子項のスペクトルを示している。図4より、周波数 f の小さな周辺部付近には、ほぼ(15)式の第2項に相当するイオンのドップラプロファイルが現われ、周波数 f の大きな所では(15)式の第1項に相当する電子のドップラプロファイルが現われる。したがって、イオンに対するプラズマパラメータと、電子に対するプラズマパラメータを同定することが可能となる。

JT-60において、代表的なプラズマパラメータ ($n_e = 10^{20} \text{ m}^{-3}$, $T_e = 0.1 \sim 20 \text{ keV}$) を考え、 90° 散乱の入射波長 λ_i と α の関係を図5に示す。 $\alpha \geq 1$ を達成するために必要な電磁波の入射波長 λ_i は、遠赤外域 (サブミリ波帯) にあることが解かる。ここでは、 $\alpha \geq 1$ の条件でイオン項と電子項が分離した状態のトムソン散乱を考え、プラズマパラメータを同定する目的でスペクトル解析を行なう。

2.3 k の周波数 ω による影響

第2.1節で述べた様に波数ベクトル k の絶対値 k は、周波数 ω によって変化する。(10)式からも解かる様に、 k の変化がそのまま α の変化となって現われるためフォームファクタ $S(\omega)$ は、周波数の大きな所で変形をうけることが予想される。 k の ω による影響を見るために、 $\omega = 0$ の場合の k , α を各々 k_0 , α_0 として規格化した値を図6に示す。入射電磁波にサブミリ波 ($10^{-4} \sim 10^{-3} \text{ m}$) を考えると、 90° 散乱の時 α または k が10%以上変化するの、周波数が $6 \times 10^{10} \sim 6 \times 10^{11} \text{ Hz}$ 以上の時である。この効果は、狭角散乱になるにつれて大きくなるので、解析上の注意を要する。1例として温度の異なるプラズマ ($T_e = 40 \text{ eV}, 1 \text{ keV}$) を 90° 散乱で、 $\alpha_0 (\omega = 0) = 5$ とした場合のフォームファクタ $S(f)$ を図7に示す。周波数の小さなイオン項領域 ($f \leq 10^{10} \text{ Hz}$) では両者は一致するが、周波数の大きな電子項領域 ($f > 10^{10} \text{ Hz}$) では、スペクトル形状が変化している。すなわち、高温プラズマの電子項の解析には α の周波数依存性を考慮する必要がある。ちなみに図7の例で、 $f = 10^{11} \text{ Hz}$ 付近での実験的な α は、 $T_e = 40 \text{ eV}$ のプラズマの例で $\alpha = 4.5$ であるのに対し、 $T_e = 1 \text{ keV}$ のプラズマの例では $\alpha = 4.25$ である。

3. プラズマパラメータの評価

$\alpha \geq 1$ の散乱計測では、イオン項と電子項が共に散乱スペクトルに寄与するので、電子項から電子温度 T_e を、イオン項からイオン温度 T_i および実効電荷数 $Z_{\text{eff}} (= \sum_j b_j)$ を原理的に求めることが可能である。本章では、スペクトル解析の結果から上述のプラズマパラメータを評価する方法についてのべる。

3.1 電子温度の評価

3.1.1 $\alpha \ll 1$ の場合

$\alpha \ll 1$ のトムソン散乱での散乱スペクトルの形状は、例えば図3に示す様に、ほぼ電子の熱速度 $F_e (v_e)$ に対応したドップラプロファイルを示す。(6)式より、散乱スペクトルの半値幅 $\Delta\omega_{1/2}$ は、次式で与えられ、簡単に実験結果より電子温度 T_e を求めることができる^{1),2)}。

$$\Delta\omega_{1/2} = k \sqrt{\frac{2 \ln 2 \pi T_e}{m_e}} \dots\dots\dots (18)$$

JT-60において、代表的なプラズマパラメータ ($n_e = 10^{20} \text{ m}^{-3}$, $T_e = 0.1 \sim 20 \text{ keV}$) を考え、 90° 散乱の入射波長 λ_i と α の関係を図5に示す。 $\alpha \geq 1$ を達成するために必要な電磁波の入射波長 λ_i は、遠赤外域 (サブミリ波帯) にあることが解かる。ここでは、 $\alpha \geq 1$ の条件でイオン項と電子項が分離した状態のトムソン散乱を考え、プラズマパラメータを同定する目的でスペクトル解析を行なう。

2.3 k の周波数 ω による影響

第2.1節で述べた様に波数ベクトル k の絶対値 k は、周波数 ω によって変化する。(10)式からも解かる様に、 k の変化がそのまま α の変化となって現われるためフォームファクタ $S(\omega)$ は、周波数の大きな所で変形をうけることが予想される。 k の ω による影響を見るために、 $\omega = 0$ の場合の k , α を各々 k_0 , α_0 として規格化した値を図6に示す。入射電磁波にサブミリ波 ($10^{-4} \sim 10^{-3} \text{ m}$) を考えると、 90° 散乱の時 α または k が10%以上変化するのには、周波数が $6 \times 10^{10} \sim 6 \times 10^{11} \text{ Hz}$ 以上の時である。この効果は、狭角散乱になるにつれて大きくなるので、解析上の注意を要する。1例として温度の異なるプラズマ ($T_e = 40 \text{ eV}$, 1 keV) を 90° 散乱で、 $\alpha_0 (\omega = 0) = 5$ とした場合のフォームファクタ $S(f)$ を図7に示す。周波数の小さなイオン項領域 ($f \leq 10^{10} \text{ Hz}$) では両者は一致するが、周波数の大きな電子項領域 ($f > 10^{10} \text{ Hz}$) では、スペクトル形状が変化している。すなわち、高温プラズマの電子項の解析には α の周波数依存性を考慮する必要がある。ちなみに図7の例で、 $f = 10^{11} \text{ Hz}$ 付近での実験的な α は、 $T_e = 40 \text{ eV}$ のプラズマの例で $\alpha = 4.5$ であるのに対し、 $T_e = 1 \text{ keV}$ のプラズマの例では $\alpha = 4.25$ である。

3. プラズマパラメータの評価

$\alpha \geq 1$ の散乱計測では、イオン項と電子項が共に散乱スペクトルに寄与するので、電子項から電子温度 T_e を、イオン項からイオン温度 T_i および実効電荷数 $Z_{\text{eff}} (= \sum_j b_j)$ を原理的に求めることが可能である。本章では、スペクトル解析の結果から上述のプラズマパラメータを評価する方法についてのべる。

3.1 電子温度の評価

3.1.1 $\alpha \ll 1$ の場合

$\alpha \ll 1$ のトムソン散乱での散乱スペクトルの形状は、例えば図3に示す様に、ほぼ電子の熱速度 $F_e (v_e)$ に対応したドップラップロファイルを示す。(6)式より、散乱スペクトルの半値幅 $\Delta \omega_{1/2}$ は、次式で与えられ、簡単に実験結果より電子温度 T_e を求めることができる^{1),2)}。

$$\Delta \omega_{1/2} = k \sqrt{\frac{2 \ln 2 \kappa T_e}{m_e}} \dots\dots\dots (18)$$

3.1.2 $\alpha \geq 1$ の場合

$\alpha \geq 1$ の散乱スペクトルには、例えば図7に示すように、電子項に鋭いピークをもつ。このピークは側帯ピーク⁸⁾と呼ばれ、電子の静電プラズマ振動に対応している。数式上では、フォームファクタの表式、(5)式において分母が零に近づくことを意味する。この周波数領域ではイオンによる挙動は無視 ($G_j(\omega) \sim 0$) できるので側帯ピークは、

$$1 - G_e(\omega) = 1 + [1 - f(x) + i(\pi)^{1/2} \exp(-x^2)] = 0 \quad \dots\dots\dots (19)$$

を満足する角周波数 ω_{ep} で起る。さらに側帯ピークの生ずる角周波数領域では(19)式の虚部は無視することができる、

$$\frac{1}{\alpha^2} = f(x) - 1 \quad \dots\dots\dots (20)$$

となる。f(x) は $\alpha \ll 1$ のとき近似的に、

$$f(x) - 1 \approx \frac{1}{2x^2} \left(1 + \frac{3}{2x^2}\right) \quad \dots\dots\dots (21)$$

と表わせる。図8に(13)式から求めたf(x)の値と、(21)式から求めたf(x)の値を示す。図より α が大きな値をとるときは、良い近似で(21)式から求まるf(x)を使用することができる。(21)式を(20)式に代入してxを求めると、

$$x^2 = \frac{\alpha^2 \pm \sqrt{\alpha^4 + 12\alpha^2}}{4} \approx \frac{\alpha^2 + 3}{2} \quad (\text{Salpeter 近似}) \quad \dots\dots\dots (22)$$

となる。(22)式から求まるf(x)を図8の点線に示す。(13)式から求まるf(x)とは $\alpha \geq 2.2$ でかなり良く一致する。よって(20)式を用いて、 $\omega_{ep} = x \omega_e$ から、

$$\omega_{ep}^2 = \frac{e^2 n_e}{m_e \epsilon_0} + 3k^2 \frac{\pi T_e}{m_e} \quad \dots\dots\dots (23)$$

となる。ここで、

$$\omega_{pe}^2 = \frac{e^2 n_e}{m_e \epsilon_0} \quad \dots\dots\dots (24)$$

は、電子のプラズマ周波数で、電子密度 n_e のみの関数となる。よって(23)式より側帯ピーク ω_{ep} を測定すれば n_e が既知として電子温度 T_e が評価できる。しかし上述の方法では高温プラズマの電子温度 T_e の評価には誤差が生じる。以下高温プラズマでの周波数シフトについてのべる。(9)式を用いて(19)式を書き直すと、

$$\omega_{ep}^2 = \frac{e^2 n_e}{m_e \epsilon_0} \left(1 + \frac{3}{\alpha^2}\right) \quad \dots\dots\dots (25)$$

となる。 $\alpha = \alpha_0$ として(25)式を図9の実線に示す。 $T_e = 40 \text{ eV}, 100 \text{ eV}, 1 \text{ keV}, 10 \text{ keV}$ の場合のスペクトル解析から得られた側帯ピークを示す周波数 f_{ep} を図9に同時に記号で示す。この図より、(i)電子温度の違いにより、同じ α_0 でも f_{ep} はバラつく、(ii) α_0 が大きくなるにつれて、(25)式で与えられる f_{ep} に近づく、ということが解る。(i)の原因としては次の2つが考えられる。すなわち、①(21)式の変数xはkの関数で本来、kの ω による影響を考慮しなければならないのにその影響を無視していること、②(23)式を導びく際に(21)式および(22)式のような近似を用いていることがある。まず①の効果がどの程度 f_{ep} に影響を与えているかを考察する。図10にkの ω による影

響をみるため、(4)式から求まる k_0 での f_{ep_0} に対する(3)式から求まる k での f_{ep} の比 ϵ_{fep} を百分率で示す。図10より、 k の ω による影響は、電子温度 T_e が高い程、および α_0 が小さい程影響が大きいことが解かる。次に②の効果を検討する。側帯ピーク ω_{ep} は、 $\omega_{ep} = x\omega_0$ で与えられるので、 x の値と、(2)式から得られる x の値を、 α_0 について整理し直した図を図11に示す。実線が(1)式からのもの、点線が(2)式からのものである。この結果、 $\alpha_0 \geq 5$ では両者はよく一致する。また $\alpha_0 \geq 2.2$ では、(2)式から求まる f_{ep} は解析解に比べて過少評価、 $\alpha_0 < 2.2$ では過大評価する傾向があることが解かる。以上のことから $\alpha_0 \geq 5$ の範囲では①の効果のみを考慮すれば良いが、 $\alpha_0 < 5$ では①および②の効果と同時に考慮する必要がある。ここで注意しなければならないのは、②の考察において x の補正をする場合で、2.2節でも述べた様に α も ω の影響で変化するということである。1例として 90° 散乱で、 $n_e = 10^{20} \text{m}^{-3}$ のプラズマを入射波長 $\lambda_i = 1.05 \text{mm}$ で散乱計測を行なった場合の解析結果を図12に示す。比較のために k が ω によらないとした場合($k = k_0$)と、 k が ω の影響を受けている場合($k = k(\omega)$)の(2)式から求めた値を同時に示す。さらに参考のために α_0 の値を点線で示す。図12より α_0 が大きい時、 k の ω による影響を考慮すれば厳密なスペクトル解析の結果と良く一致する。しかし、 α_0 が2.2より小さくなればこの影響を考慮しても一致しなくなる。これは前述の②に相当する近似計算の誤差が支配的になっているからである。以上、静電プラズマ振動周波数からの電子温度評価法は、高温プラズマにおいて側帯ピークが単純に(2)式のような解析解で表わせなくなるため、数値計算による厳密なスペクトル解析が必要となる。

3.2 イオン温度、実効電荷数の評価

$\alpha \geq 1$ の散乱計測からは以下に述べる評価方法によりイオン温度 T_i 実効電荷数 Z_{eff} を同時に測定することができる。すなわちスペクトルの中心部は、 $G_e(\omega) \sim -\alpha^2$ ($\alpha = \text{一定}$)となるので(5)式からフォームファクタの形状はほぼイオン項 $S_i(\omega)$ に左右されるとみてよい。(17)式からイオン項の半値幅 $\Delta\omega_{i1/2}$ は、

$$\Delta\omega_{i1/2} \propto k \sqrt{T_i} \tag{26}$$

となり、イオン温度を評価することができる。ここで、(26)式中には k が含まれているが、解析を行なうのはイオン項で対象周波数が $10^8 \sim 10^{10} \text{Hz}$ であるので ω の影響を無視して、解析には $\omega = 0$ とした場合の k の値 k_0 を用いてよい。例えば入射電磁波にサブミリ波($10^{-4} \sim 10^{-3} \text{m}$)を想定すれば、図6より k の ω による影響は2%以下となる。不純物混入による散乱スペクトルの変形⁹⁾をみるために水素プラズマに各種不純物イオンが1種類のみ混入した場合のスペクトル解析を行なった。図13(a),(b),(c)に不純物源として酸素、鉄、モリブデンが水素プラズマ中に、実効電荷数にして $Z_{eff} = 3, 5, 7$ となるように混入した場合のイオンスペクトル形状を示す。いずれの場合でも、プラズマの条件として、 $\alpha = 1, T_e = T_i = 10 \text{keV}, n_e = 10^{20} \text{m}^{-3}$ である。また参考のために不純物を含まない水素プラズマのスペクトルを $Z_{eff} = 1$ で示す。図13(a)~(c)からイオンスペクトルは、おおむね水素によるスペクトルと、不純物によるスペクトルに分離できる。ここで、不純物が鉄(図13(b))やモリブデン(図13(c))のように水素スペクトルとの

質量の比が大きいものについては、水素スペクトルの変形が小さいが、不純物が酸素 (図 13(a)) のような軽元素 (即ち水素との質量の比が小さい元素) のものは、不純物が水素スペクトルに強く影響をおよぼしてくる。また、 Z_{eff} が大きくなる程水素スペクトルの変形が大きく、水素スペクトル幅を大きく狭ばめていることが解かる。図 14 に不純物混入による水素スペクトルの半値幅の減少率を示す。縦軸は不純物を入れた時の水素スペクトルの半値幅を $Z_{\text{eff}} = 1$ の水素スペクトルの半値幅で規格化した値である。さて、不純物の影響のない水素プラズマ ($Z_{\text{eff}} = 1(j = \text{H})$) の場合、イオンスペクトルの半値幅 $\Delta\omega_{i, 1/2 | \text{H}}$ が単に水素イオンのドップラプロファイルで決まるとすると(7), (10)式から、

$$\Delta\omega_{i, 1/2 | \text{H}} = \frac{1}{\beta_{\text{H}}} \sqrt{\frac{n_e e^2}{\epsilon_0} \frac{Z_{\text{H}}}{M_{\text{H}}}} 2 \ln 2 \quad \dots\dots\dots (27)$$

但し、 $\beta_{\text{H}} = \sqrt{\frac{Z_{\text{H}} T_e}{T_i}} \alpha$, (添字のHは水素の意味) $\dots\dots\dots (28)$

とかける。図 15 に β_{H} に対する $\Delta\omega_{i, 1/2 | \text{H}}$ の関係を点線で示した。なお図 15 の実線は、スペクトル解析の結果、得られた水素スペクトルの半値幅を示している。図 15 より、 β の小さな領域 ($\beta < 1$) におけるスペクトル解析の結果は(27)式の $\Delta\omega_{i, 1/2 | \text{H}}$ に漸近する。しかし $\beta > 1$ では、(27)式から得られる結果との間に差違が生ずる。このことは、イオンスペクトルの半値幅 $\Delta\omega_{i, 1/2}$ は単にイオンのドップラプロファイルのみで決まるものではないことを示している。即ち、(17)式のイオン項 $S_i(\omega)$ の分母が $\Delta\omega_{i, 1/2}$ に影響を与えていると考えられる。数式的には $\beta < 1$ の時、 $G_i(\omega) \ll 1$ であり、 ω による効果は小さく、スペクトルはほぼ $F_j(-\omega/r)$ で決まる。一方、 $\beta > 1$ の時 $G_j(\omega)$ はもはや ω による影響を無視することができなくなり、スペクトルに影響を与える。つまり図 15 の実線と点線の差異は、 $S_i(\omega)$ の分母に含まれる $G_j(\omega)$ 項の影響による。

イオン温度 T_i を求めるためには、まず分光計測等の方法により不純物の種類を同定する必要がある。次に後述する方法で Z_{eff} を求めて、図 14 によりイオンスペクトルの半値幅補正係数を求め、図 15 によりイオンの散乱パラメータ β を求める。あらかじめ電子の散乱パラメータ α および電子温度 T_e がわかれば、(28)式によりイオン温度 T_i を求めることができる。実効電荷数 Z_{eff} は従来から Salpeter 達^{6), 10)} がフォームファクタ $S(\omega)$ を ω の全域にわたって解析し、次の近似式で与えられると提案している。

$$\int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega) d\omega \cong \frac{1}{1+\alpha^2} + \frac{Z_{\text{eff}} \alpha^4}{(1+\alpha^2) [1 + (Z_{\text{eff}} + 1) \alpha^2]} \quad \dots\dots\dots (29)$$

α をパラメータとして(29)式の値を図 16 に示す。しかし散乱測定での散乱パワーの絶対測定は誤差が大きいので、1つの散乱角での測定からは Z_{eff} が精密に求まらない。そこで散乱角の異なる 2ヶ所で同時測定を行なって、 Z_{eff} を精度よく求めることが提案されている¹⁰⁾。しかしながらこの方法では、検出部に 2つの測定系を配備しなくてはならず、システムのにも大がかりなものとなる。そこで本報では以下にのべる方法で Z_{eff} を評価できる可能性があることを提案する。(17)式で分子の $F_j(-\omega/k)$ は単にイオンのドップラプロファイルを決めているだけであり、イオン項では $G_e(\omega) \ll G_j(\omega)$ が成立する。そこでイオンの周波数シフトは(17)式の分母の $G_j(\omega)$ の含まれている項で決められると考えてよい。 $G_j(\omega)$ の含まれる項を取りだすと、 $T_j = T_i$ として

$$-\sum_j \frac{Z_j n_j}{n_e} G_j(\omega) = \sum_j \frac{Z_j^2 n_j}{n_e} \frac{T_e}{T_i} \alpha^2 \{ \text{Re}\{Y_j(y_j)\} + \text{Im}\{Y_j(y_j)\} \} \dots\dots (30)$$

但し, $Y_j(y_j) = 1 - f(y_j) + i(\pi)^{1/2} y_j \exp(-y_j^2)$ (31)

Re{ } は実部, Im{ } は虚部

とかける。(31)式より, 虚部を無視すると $Y_j(y_j)$ はほぼ $f(y_j)$ の関数となる。ここで, 図8より $f(x)$ の値は, イオン項の x に対しては, 高々20%の差しかない。これに対して, Z_j の影響は(30)式の値を大きく変化させる。よって, (30)式は, 次式のようになる。

$$-\sum_j \frac{Z_j n_j}{n_e} G_j(\omega) \cong \beta_{Z_{eff}}^2 \sum_j \{ \text{Re}\{Y_j(y_j)\} + \text{Im}\{Y_j(y_j)\} \} \dots\dots\dots (32)$$

但し, $\beta_{Z_{eff}} = \sqrt{\frac{Z_{eff} T_e}{T_i}} \alpha$ (33)

即ち, 不純物の混入したプラズマにおけるスペクトルの拡がり, は, 巨視的な Z_{eff} の値に左右される。 Z_{eff} をスペクトル上から直接的に測定する方法として以下の2方法が考えられる。

① イオンの不純物スペクトルの半値幅から求める方法

図13で示した様に水素スペクトルよりも周波数成分の低い所に表われる不純物スペクトルの半値幅を測定する。図17に3種の不純物について不純物スペクトルの半値幅が Z_{eff} 値により変化する様子を示す。 Z_{eff} で1の差を測定するために鉄, モリブデンでは4%以上の周波数シフト量が, 酸素の場合には2%以上の周波数シフトがあればよい。

② 不純物イオンのイオン音波共鳴周波数に対応したスペクトルのピークを与える周波数から求める方法。

図13より分かる様に Z_{eff} が大きくなるにしたがって不純物スペクトルには, 不純物イオンによるイオン音波共鳴が励起されスペクトルにピークが生ずる。図18に3種の不純物における不純物スペクトルのピークを与える周波数 f_{ip} を示す。図18より, Z_{eff} で1の差を測定するためには, 7%以上の周波数シフトがあればよいことになる。①および②は, それぞれ独立に測定することができ, しかも同一の α (1ヶ所で検出)でよく, システム的に簡単となり, また直接的に Z_{eff} を求めることができる。以上のことをまとめて, イオン温度および実効電荷数の評価は次の様なステップを踏めばよい。

- (i) 質量分析あるいは分光法等によりプラズマ中の不純物の種類を同定する。
- (ii) 不純物のスペクトルに注目し, 半値幅あるいはピークを与える周波数から, 各々図17, 図18を用いて Z_{eff} を求める。
- (iii) Z_{eff} をもとに図14を用いて水素スペクトル半値幅の補正係数を求める。
- (iv) 補正された半値幅を図15に適用して β_H を求める。
- (v) 干渉法等により得られる n_e , およびトムソン散乱からの T_e を用いて(27)式から T_i を評価する。

以上のステップまでの概略の T_i および Z_{eff} は求まるが, より精度の高い値を求めるには, さらに以下の手続きを必要とする。

- (vi) 得られた n_e, T_e, T_i, Z_{eff} を初期値として, 厳密なスペクトルを算出し, 測定値との誤差を最小にするようにカーブフィッティングを行ない T_i, Z_{eff} を修正する。

3.3 数種類の不純物が混入したプラズマのスペクトル形状

現在までのトカマク実験の結果から、プラズマ中には数種類の不純物が同時に存在するケースが多いとされている。ここでは、モデル計算として不純物元素を酸素、鉄、モリブデンに限定してこれらの不純物が同時にプラズマ中に混入した場合の散乱スペクトルへの影響を調べる。(32)式よりスペクトルの周波数のシフトの仕方は、不純物イオンの y_j の値で左右される。 y_j は(12)式より k および T_j が既知であるとする、 $(M_j)^{-1/2}$ に比例するので、重金属イオン程、散乱周波数が低い(即ちスペクトルの中心部にかたよる)。質量の違う不純物が同時にプラズマ中に混入する場合、不純物スペクトルは原理的に分離し、不純物元素の同定ができると予想される。図19(a)は水素プラズマ中に、イオン密度の比率として、 $0:Fe:Mo=1:1:10$ の割合で $Z_{eff}=7$ の量だけ不純物を入れたスペクトルを示す。図19(b)は、同じ条件($\alpha=1$, $T_e=T_i=10\text{keV}$)でモリブデンのみを $Z_{eff}=7$ になる様に入れた場合で、図19(a), 図19(b)を比較してみると、両者のスペクトルはほぼ一致する。即ち、重金属イオンが多数を占める場合には軽元素の影響は無視できて、重金属イオンのみを考えてよい。しかし、不純物が主に軽元素の場合には、スペクトルはかなり変形をうける。一例として図20(a)に $O:Fe:Mo=10:1:1$ で $Z_{eff}=7$ の場合のスペクトルを示す。比較のために、図20(b)には、図20(a)の主不純物源である酸素のみを $Z_{eff}=7$ 混入させたスペクトルを示す。図20(a), (b)より両者の間にはかなり差があることがみとめられる。即ち、不純物の主要元素が軽元素(例えば酸素)の場合には、酸素のスペクトルが分離できないほど他の重金属イオンの影響を強く受けている。

以上のことから、不純物が主に重金属(例えば鉄、モリブデン等)の場合には、第3.2節で述べた手順で Z_{eff} 値および T_j を知ることが可能である。一方、不純物が主に軽元素(例えば酸素)の場合、重金属不純物イオン濃度から0.1%程度以下であれば上述の手段で Z_{eff} 値を評価することができる。重金属不純物が上記の値以上の場合には、この方法では軽元素と分離できない。この場合には図16で示したようなスペクトルの積分値から評価する方法を取らざるを得なくなる。しかし現在のトカマク装置ではDIVAの例にも見られる様にチタンコーティングなどで軽元素を効果的に減少させることができるようになってきたため、JT-60をはじめとする今後の装置では、主要不純物は重金属と考えられ、ますます第2.3節でのべた評価法が有効であると考えられる。また壁材が軽元素の場合でもプラズマ中への重金属の混入は考えられないから、やはりここでの評価法は有効に利用できるであろう。

4. 遠赤外レーザービームの評価

$\alpha \geq 1$ の散乱計測を行なうためには図5でものべた様に、遠赤外域のレーザーを使用する必要がある。そこで本章では遠赤外レーザー線幅に対する要求仕様を検討する。ここで実際の計測に当たっては、①レーザーの選択、②レーザーパワーの評価、③レーザービーム特性、④検出器の評価、⑤その他(光学系のアライメント等)などの検討が必要である。このうち、①~③はレーザーの仕様を決める上で特に重要である。①については現在、散乱計測に使える可能性のあるレーザーは、(i)CH₃

3.3 数種類の不純物が混入したプラズマのスペクトル形状

現在までのトカマク実験の結果から、プラズマ中には数種類の不純物が同時に存在するケースが多いとされている。ここでは、モデル計算として不純物元素を酸素、鉄、モリブデンに限定してこれらの不純物が同時にプラズマ中に混入した場合の散乱スペクトルへの影響を調べる。(32)式よりスペクトルの周波数のシフトの仕方は、不純物イオンの y_j の値で左右される。 y_j は(12)式より k および T_i が既知であるとする、 $(M_j)^{-1/2}$ に比例するので、重金属イオン程、散乱周波数が低い(即ちスペクトルの中心部にかたよる)。質量の違う不純物が同時にプラズマ中に混入する場合、不純物スペクトルは原理的に分離し、不純物元素の同定ができると予想される。図19(a)は水素プラズマ中に、イオン密度の比率として、 $0:Fe:Mo=1:1:10$ の割合で $Z_{eff}=7$ の量だけ不純物を入れたスペクトルを示す。図19(b)は、同じ条件($\alpha=1$, $T_e=T_i=10\text{keV}$)でモリブデンのみを $Z_{eff}=7$ になる様に入れた場合で、図19(a)、図19(b)を比較してみると、両者のスペクトルはほぼ一致する。即ち、重金属イオンが多数を占める場合には軽元素の影響は無視できて、重金属イオンのみを考えてよい。しかし、不純物が主に軽元素の場合には、スペクトルはかなり変形をうける。一例として図20(a)に $O:Fe:Mo=10:1:1$ で $Z_{eff}=7$ の場合のスペクトルを示す。比較のために、図20(b)には、図20(a)の主不純物源である酸素のみを $Z_{eff}=7$ 混入させたスペクトルを示す。図20(a)、(b)より両者の間にはかなり差があることがみとめられる。即ち、不純物の主要元素が軽元素(例えば酸素)の場合には、酸素のスペクトルが分離できないほど他の重金属イオンの影響を強く受けている。

以上のことから、不純物が主に重金属(例えば鉄、モリブデン等)の場合には、第3.2節で述べた手順で Z_{eff} 値および T_i を知ることが可能である。一方、不純物が主に軽元素(例えば酸素)の場合、重金属不純物イオン濃度から0.1%程度以下であれば上述の手段で Z_{eff} 値を評価することができる。重金属不純物が上記の値以上の場合には、この方法では軽元素と分離できない。この場合には図16で示したようなスペクトルの積分値から評価する方法を取らざるを得なくなる。しかし現在のトカマク装置ではDIVAの例にも見られる様にチタンコーティングなどで軽元素を効果的に減少させることができるようになってきたため、JT-60をはじめとする今後の装置では、主要不純物は重金属と考えられ、ますます第2.3節でのべた評価法が有効であると考えられる。また壁材が軽元素の場合でもプラズマ中への重金属の混入は考えられないから、やはりここでの評価法は有効に利用できるであろう。

4. 遠赤外レーザービームの評価

$\alpha \geq 1$ の散乱計測を行なうためには図5でものべた様に、遠赤外域のレーザーを使用する必要がある。そこで本章では遠赤外レーザー線幅に対する要求仕様を検討する。ここで実際の計測に当たっては、①レーザーの選択、②レーザーパワーの評価、③レーザービーム特性、④検出器の評価、⑤その他(光学系のアライメント等)などの検討が必要である。このうち、①~③はレーザーの仕様を決める上で特に重要である。①については現在、散乱計測に使える可能性のあるレーザーは、(i)CH₃

F レーザ ($\lambda_i = 496 \mu\text{m}$), (ii) D_2O レーザ ($\lambda_i = 385 \mu\text{m}$), (iii) HCN レーザ ($\lambda_i = 337 \mu\text{m}$), (iv) CO_2 レーザ ($10.6 \mu\text{m}$)などが考えられている。②については, shot noise, プラズマ光, 迷光検出器の雑音特性などから少なくとも $S/N = 1$ 以上になる様にレーザパワーを決めなくてはならない。③については, レーザの発振線幅, レーザビーム径およびビーム拡がりなどが主なものとなる。ここでは主に, 散乱スペクトルからプラズマパラメータを評価する方法を述べたので, ①~③のうち, ③の特にレーザの発振線幅がどこまで許容されるかを評価することにする。 $\alpha \geq 1$ の計測では, 特に周波数の小さなイオンスペクトルに注目した計測になるのでレーザの発振線幅は出来るだけ小さな方がよい。図 21 は, $T_e = 1 \text{ keV}$ (JT-60 でのジュールプラズマで最もイオンスペクトルの周波数シフトが少ない場合) で, イオンの散乱パラメータ $\beta = 1 \sim 15$, 散乱角 $\theta = 5^\circ, 15^\circ, 50^\circ, 90^\circ$ の条件で, CH_3F レーザ, HCN レーザ, CO_2 レーザを使用した場合の不純物のない水素スペクトルの半値幅および $\beta_H (= \alpha)$ を示す。図 21 より, $n_e = 10^{19} \sim 10^{20} \text{ m}^{-3}$ の領域で常に $\alpha \geq 1$ の散乱計測をするには, 散乱角は $\theta < 50^\circ$ にしなくてはならない。さらに CO_2 レーザでは, $\theta = 5^\circ$ にしても $\alpha = 1$ を達成することができないことも解る。さて, レーザの発振線幅を決めるにあたり, 周波数シフトの最も少ない条件, 即ち JT-60 では $n_e = 10^{20} \text{ m}^{-3}$ において, 水素スペクトルの半値幅は $10^8 \sim 4 \times 10^9 (\text{Hz})$ のため, レーザの発振線幅はこれ以下でなくてはならない。一方, 不純物がプラズマ中に混入すると, 図 13 のように水素スペクトルよりもさらに低周波帯に不純物スペクトルが存在する。したがってレーザの発振線幅を与える限界は主に不純物スペクトルのピーク値を与える周波数から決定することができる。この場合, 図 21 より散乱角 θ が小さい程, 発振線幅は狭くする必要がある。例えば $\theta = 90^\circ$ で CH_3F レーザを使用する場合, イオンピークを与える周波数は約 130 MHz であるのに対し, $\theta = 15^\circ$ の散乱角では, 約 25 MHz となる。ここで, イオンの速度分布の形状 (ガウス分布) を観察するためには, 少なくとも周波数領域において 4 点程度必要であるので, 前者 ($\theta = 90^\circ$) では約 33 MHz , 後者 ($\theta = 15^\circ$) では約 6 MHz のレーザの発振線幅が許容できる。以上のべてきた様に, $\alpha \geq 1$ のレーザ散乱を行なう場合, レーザの波長は長い程及び散乱角 θ は小さい程散乱計測がやり易い。しかし散乱角 θ が小さい程レーザの発振線幅を狭くする必要があるので, レーザ製作の観点からは散乱角を大きく取る方が良い。ちなみに現在まで開発された遠赤外レーザの線幅¹²⁾は CH_3F レーザで 30 MHz 程度である。したがってこのままの発振線幅でレーザの出力が向上すれば JT-60 で, 散乱角 $\theta = 15^\circ$ 又は $\theta = 50^\circ$ での遠赤外散乱が可能となる。逆にレーザの観測ポートを決定すれば, 上述のスペクトル解析によりレーザに必要な最適波長と発振線幅の上限値を知ることができる。

以上, スペクトルの解析の結果から必要な遠赤外レーザの種類およびレーザの線幅を決めることができた。しかし遠赤外散乱を実際に実施する場合, 次に述べるコヒーレント散乱の散乱スペクトルへの影響を考慮する必要がある。

コヒーレント散乱はプラズマ中における熱平衡状態の密度優乱の他に, 非熱的密度優乱が存在する時に発生する。この時の散乱強度 P_s は,

$$P_s = P_0 \sigma_{\text{th}} \tilde{n}_e^2 \ell^2 \lambda_0^2 \dots \dots \dots (34)$$

但し, \tilde{n}_e ; 電子密度の優乱

で示されるのでトムソン散乱の波数ベクトルに等しい密度優乱の存在には十分注意しなくてはな

らない。逆に、 $\alpha \geq 1$ のトムソン散乱法以外からプラズマパラメータを決定することができれば上述のスペクトル解析の結果と、実測されたスペクトル形状から、非熱的密度擾乱 \tilde{n}_e の値を求めることができる。

以上、述べてきた様に、遠赤外トムソン散乱計測法は、プラズマ中の局所的な多数のプラズマパラメータ同定のための手段として、これからのプラズマ計測に有用になると考えられる。

5. 結 論

JT-60 等の高温、高密度プラズマを対象として、遠赤外レーザトムソン散乱を適用した場合に必要な散乱スペクトルの解析を実施し、以下の結論を得た。

- (1) プラズマ温度が約 1keV 以上になると散乱スペクトルの電子項が影響を受け、散乱スペクトルが変形する。これは、電子の散乱パラメータ α または散乱波数ベクトル k が周波数 ω により影響を受けるため、高温プラズマでの電子項の解析には α の ω による影響を考慮する必要がある。
- (2) $\alpha \geq 1$ の散乱スペクトルの電子項には鋭い側帯ピークが存在し、ピークを与える周波数から電子温度を測定することができる。但し、上記(1)の理由により、従来からの Salpeter による解法は誤差が大きいので、あらかじめ使用する電磁波と観測配置を決めてスペクトル解析を行なう必要がある。
- (3) 水素プラズマ中に不純物イオンが混入すると不純物の影響で水素イオンスペクトルは変形を受ける。この場合、不純物イオン密度が小さい程水素イオンスペクトルに対する影響は少なくなり、かつ不純物の原子番号が大きい程水素イオンスペクトルと不純物イオンスペクトルは分離する。
- (4) 不純物の種類が既知でかつ水素イオンスペクトルと分離できる場合、不純物スペクトルの半値幅あるいは不純物イオンスペクトルのピークを与える周波数から実効電荷数 Z_{eff} を求めることができる。
- (5) 上記(4)項で求めた Z_{eff} をもとにして、不純物の影響を受けた散乱スペクトルからでもイオン温度 T_i を精度良く評価することができる。

謝 辞

本研究を遂行するに当たり、常に暖かい御支援をいただいた磯康彦部長に、また有益な御意見、御指導をいただいた吉川充二大型トカマク開発部次長をはじめとする大型トカマク開発部の各氏に感謝の意を表わします。

らない。逆に、 $\alpha \geq 1$ のトムソン散乱法以外からプラズマパラメータを決定することができれば上述のスペクトル解析の結果と、実測されたスペクトル形状から、非熱的密度擾乱 \tilde{n}_e の値を求めることができる。

以上、述べてきた様に、遠赤外トムソン散乱計測法は、プラズマ中の局所的な多数のプラズマパラメータ同定のための手段として、これからのプラズマ計測に有用になると考えられる。

5. 結 論

JT-60 等の高温、高密度プラズマを対象として、遠赤外レーザトムソン散乱を適用した場合に必要な散乱スペクトルの解析を実施し、以下の結論を得た。

- (1) プラズマ温度が約 1 keV 以上になると散乱スペクトルの電子項が影響を受け、散乱スペクトルが変形する。これは、電子の散乱パラメータ α または散乱波数ベクトル k が周波数 ω により影響を受けるため、高温プラズマでの電子項の解析には α の ω による影響を考慮する必要がある。
- (2) $\alpha \geq 1$ の散乱スペクトルの電子項には鋭い側帯ピークが存在し、ピークを与える周波数から電子温度を測定することができる。但し、上記(1)の理由により、従来からの Sappeter による解法は誤差が大きいため、あらかじめ使用する電磁波と観測配置を決めてスペクトル解析を行なう必要がある。
- (3) 水素プラズマ中に不純物イオンが混入すると不純物の影響で水素イオンスペクトルは変形を受ける。この場合、不純物イオン密度が小さい程水素イオンスペクトルに対する影響は少なくなり、かつ不純物の原子番号が大きい程水素イオンスペクトルと不純物イオンスペクトルは分離する。
- (4) 不純物の種類が既知でかつ水素イオンスペクトルと分離できる場合、不純物スペクトルの半値幅あるいは不純物イオンスペクトルのピークを与える周波数から実効電荷数 Z_{eff} を求めることができる。
- (5) 上記(4)項で求めた Z_{eff} をもとにして、不純物の影響を受けた散乱スペクトルからでもイオン温度 T_i を精度良く評価することができる。

謝 辞

本研究を遂行するに当たり、常に暖かい御支援をいただいた磯康彦部長に、また有益な御意見、御指導をいただいた吉川充二大型トカマク開発部次長をはじめとする大型トカマク開発部の各氏に感謝の意を表わします。

らない。逆に、 $\alpha \geq 1$ のトムソン散乱法以外からプラズマパラメータを決定することができれば上述のスペクトル解析の結果と、実測されたスペクトル形状から、非熱的密度擾乱 \tilde{n}_e の値を求めることができる。

以上、述べてきた様に、遠赤外トムソン散乱計測法は、プラズマ中の局所的な多数のプラズマパラメータ同定のための手段として、これからのプラズマ計測に有用になると考えられる。

5. 結 論

JT-60 等の高温、高密度プラズマを対象として、遠赤外レーザトムソン散乱を適用した場合に必要な散乱スペクトルの解析を実施し、以下の結論を得た。

- (1) プラズマ温度が約 1 keV 以上になると散乱スペクトルの電子項が影響を受け、散乱スペクトルが変形する。これは、電子の散乱パラメータ α または散乱波数ベクトル k が周波数 ω により影響を受けるため、高温プラズマでの電子項の解析には α の ω による影響を考慮する必要がある。
- (2) $\alpha \geq 1$ の散乱スペクトルの電子項には鋭い側帯ピークが存在し、ピークを与える周波数から電子温度を測定することができる。但し、上記(1)の理由により、従来からの Sappiter による解法は誤差が大きいので、あらかじめ使用する電磁波と観測配置を決めてスペクトル解析を行なう必要がある。
- (3) 水素プラズマ中に不純物イオンが混入すると不純物の影響で水素イオンスペクトルは変形を受ける。この場合、不純物イオン密度が小さい程水素イオンスペクトルに対する影響は少なくなり、かつ不純物の原子番号が大きい程水素イオンスペクトルと不純物イオンスペクトルは分離する。
- (4) 不純物の種類が既知でかつ水素イオンスペクトルと分離できる場合、不純物スペクトルの半値幅あるいは不純物イオンスペクトルのピークを与える周波数から実効電荷数 Z_{eff} を求めることができる。
- (5) 上記(4)項で求めた Z_{eff} をもとにして、不純物の影響を受けた散乱スペクトルからでもイオン温度 T_i を精度良く評価することができる。

謝 辞

本研究を遂行するに当たり、常に暖かい御支援をいただいた儀康彦部長に、また有益な御意見、御指導をいただいた吉川充二大型トカマク開発部次長をはじめとする大型トカマク開発部の各氏に感謝の意を表わします。

参 考 文 献

- 1) EQUIPE TFR : Nucl. Fusion , 18 , 647 (1978)
- 2) ◦ 的場, 船橋, 安藤 : "トカマク用トムソン散乱測定装置", JAERI -M 5515 (1974)
◦ T. Matoba, A. Funahashi, T. Itagaki, K. Kumagai, T. Shoji, N. Suzuki,
and T. Yamauchi, : Japan. J. Appl. Phys., 18, 611 (1979)
- 3) H. Takeuchi, T. Shoji, A. Funahashi, and K. Takahashi : J. Phys. Soc.
Japan, 44, 1363 (1979)
- 4) T. Sugie : J. Phys. Soc. Japan, 46, 250 (1979)
- 5) 板垣, 的場, 船橋, 鈴木 : " 臨界プラズマ試験装置の遠赤外散乱測定・I ",
JAERI-M 7295 (1977)
- 6) E. E. Salpeter : Phys. Rev., 120, 1528 (1960)
- 7) D. E. Evans : Plasma Phys., 12, 573 (1970)
- 8) Sheffield : " Plasma Scattering of Electromagnetic Radiation ", Academic
Press, New York, 136 (1974)
- 9) D. E. Evans, M. L. Yeoman : Phys. Rev. Lett., 33, 76 (1974)
- 10) N. L. Bretz : " A Scheme for Evaluating T_e/T_i and \bar{Z} by Light Scattering",
Princeton Plasma Physics Laboratory Report, MATT-1191 (1976)
- 11) DIVA Group : " Study on Very -Low- Q-Discharges in DIVA", JAERI -M
8205 (1979)
- 12) D. L. Jassby, D. R. Cohn, B. Lax, W. Halverson : " Tokamak Diagnostics with
the 496-micron CH_3F Laser ", Princeton Plasma Physics Laboratory
Report, MATT-1020 (1974)

記号表

— 物理定数 —

- m_e ; 電子の質量
 M_j ; j 番目のイオンの質量
 κ ; ボルツマン定数
 e ; 電気素量
 c ; 光速
 ϵ_0 ; 真空透電率

— 略号 —

- $I(\omega)$; 散乱電磁波の強度 , I_0 ; 入射電磁波の強度
 $d\omega$; 散乱周波数の要素 , $d\Omega$; 散乱立体角の要素
 n_e ; 電子密度 , n_j ; j 番目のイオン密度
 ℓ ; 散乱体積の長さ , σ_{th} ; トムソン散乱の微分断面積
 $S(\omega)$; 構造係数 (フォームファクタ)
 v_p ; プロトンの熱速度 , v_e ; 電子の熱速度
 T_e ; 電子温度 , T_i ; イオン温度
 k_i ; 入射電磁波の波数ベクトル , k_s ; 散乱電磁波の波数ベクトル
 λ_i ; 入射波長 , r ; 磁場パラメータ
 B ; トロイダル磁束密度 , ω ; 散乱角周波数
 α ; 電子の散乱パラメータ , β ; イオンの散乱パラメータ
 Z_j ; j 番目のイオンの電荷数 , Z_{eff} ; 実効電荷数
 ω_{pe} ; 電子のプラズマ周波数
 $\Delta\omega_{1/2}$; 電子スペクトルの半値幅
 $\Delta\omega_{i1/2}$; イオンスペクトルの半値幅
 $\Delta\omega_{i1/2} |_{H}$; 水素イオンスペクトルの半値幅
 P_s ; 散乱強度 , P_0 ; 入射強度
 \tilde{n}_e ; 電子密度の優乱レベル

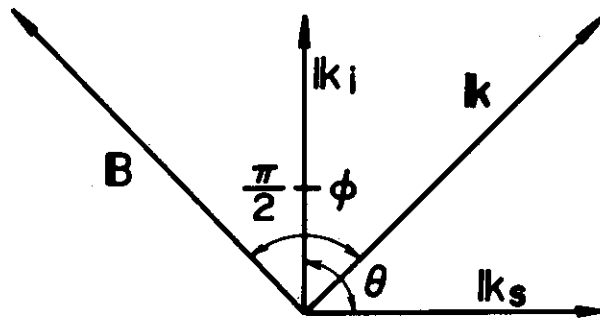


図 1 磁場を考慮した波数ベクトルのベクトル関係

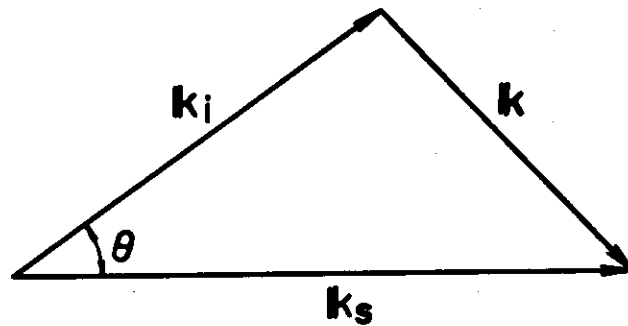


図 2 波数ベクトルのベクトル関係

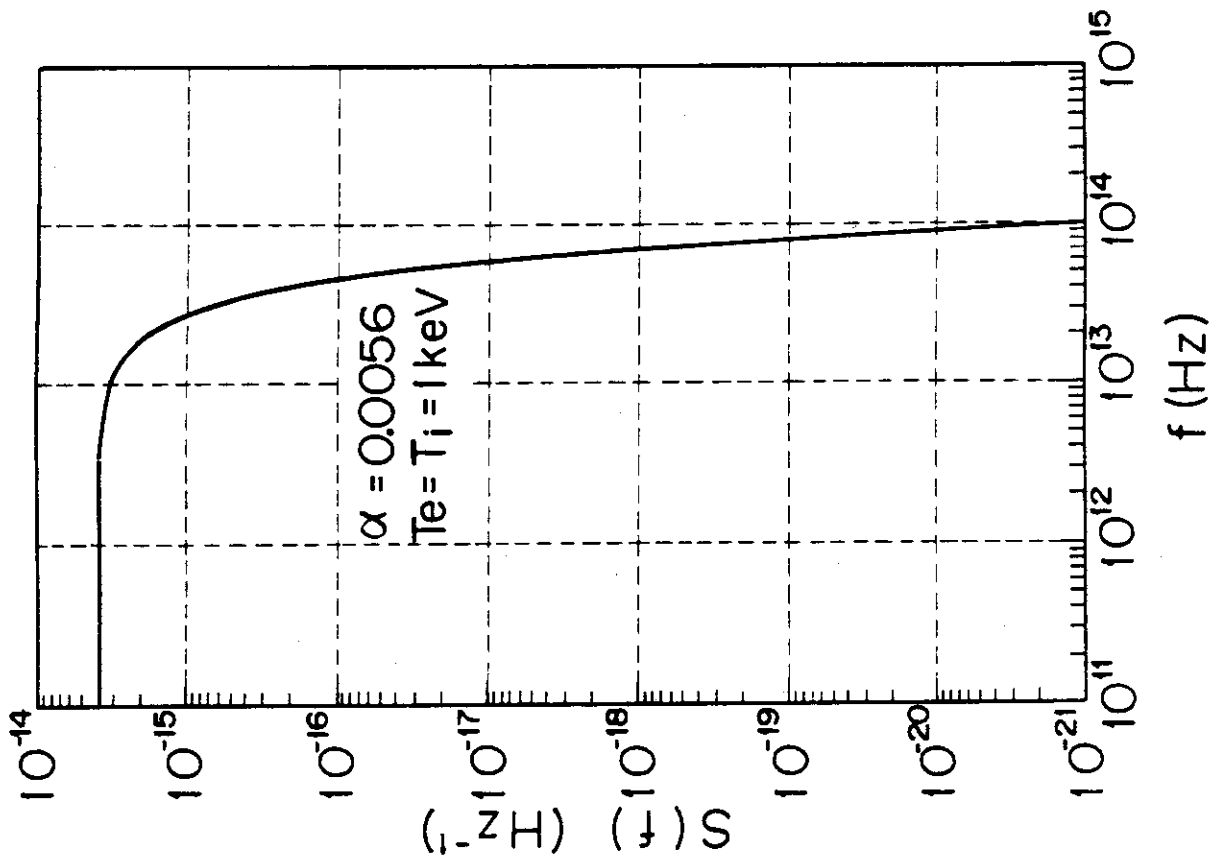


図 3 $\alpha \ll 1$ のフーラムファクタ

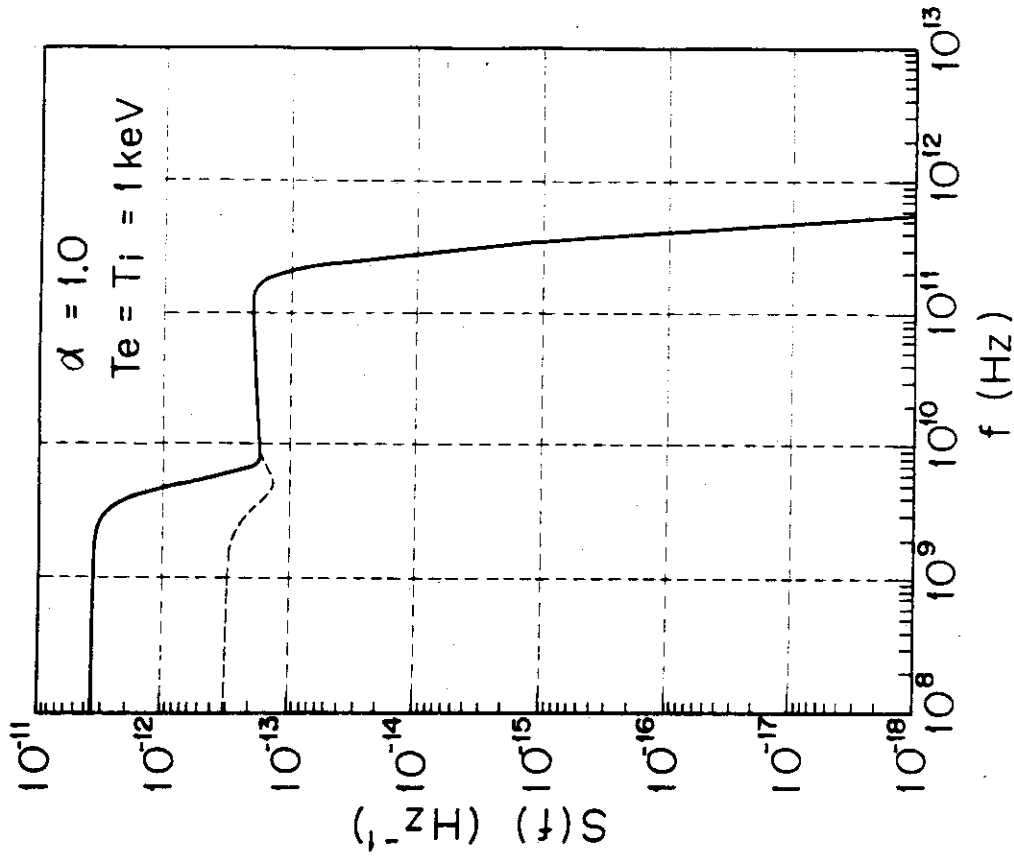


図 4 $\alpha \gtrsim 1$ のフーラムファクタ

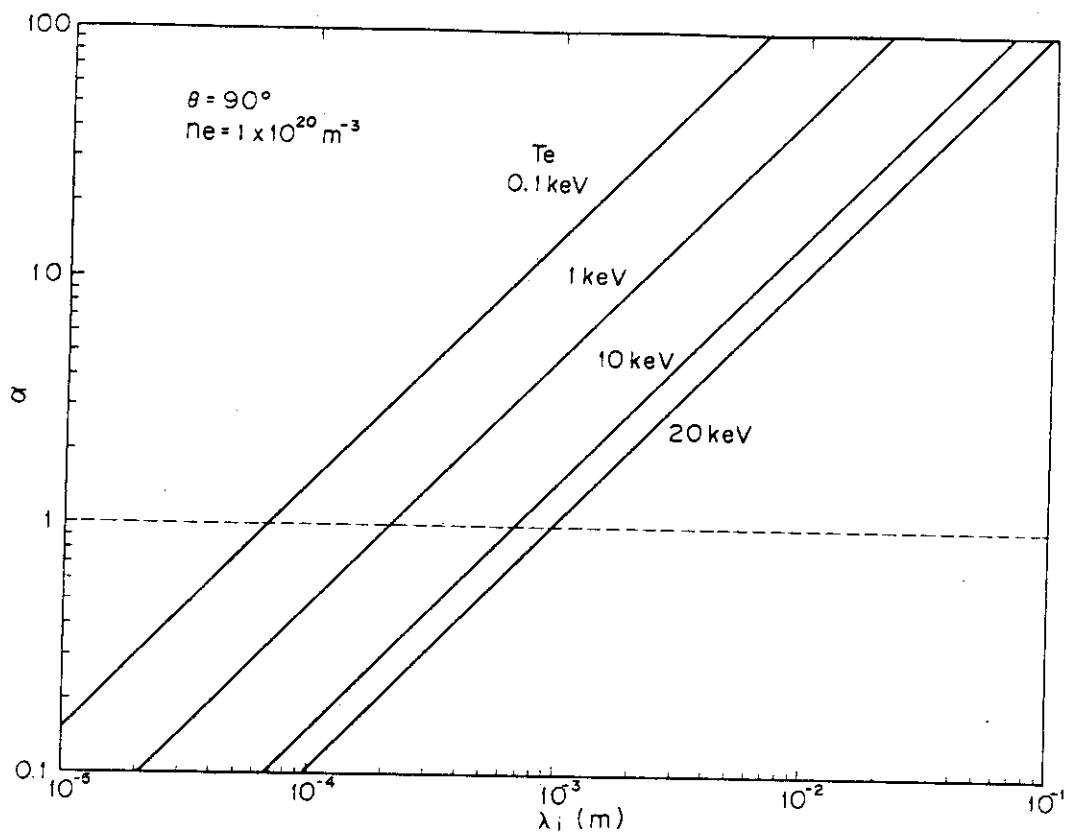


図 5 90° 散乱での入射波長 λ_i と散乱パラメータ α との関係

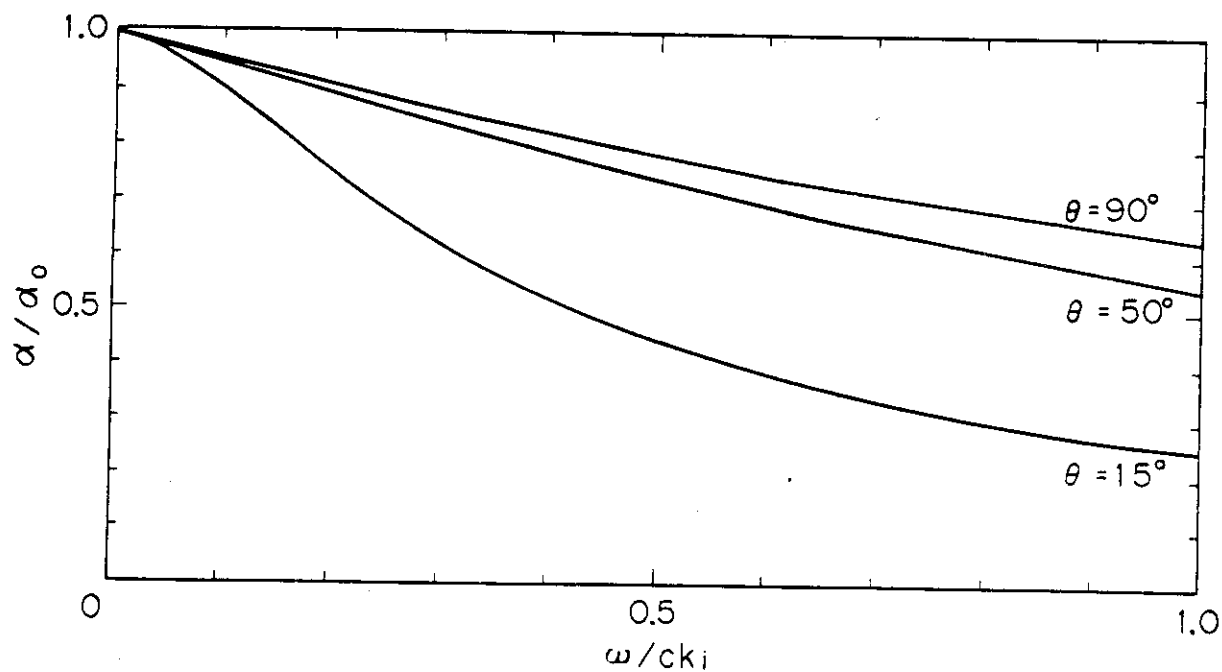


図 6 α の ω による影響

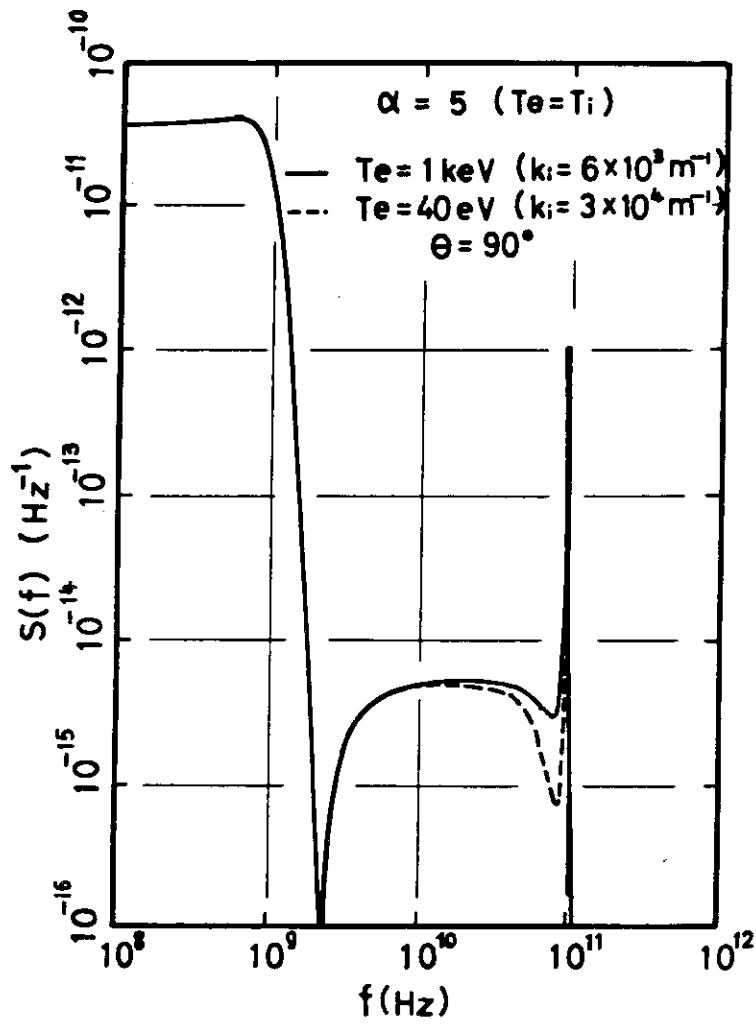


図 7 高温プラズマでの散乱スペクトルの変形

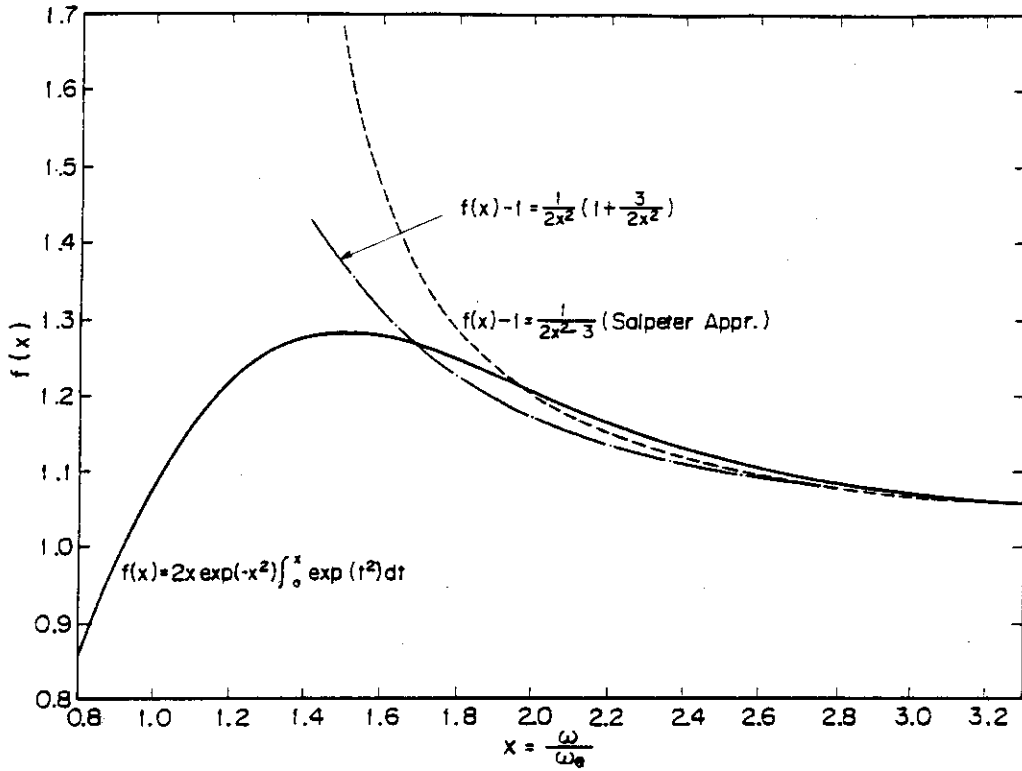


図 8 関数 $f(x)$ の形状

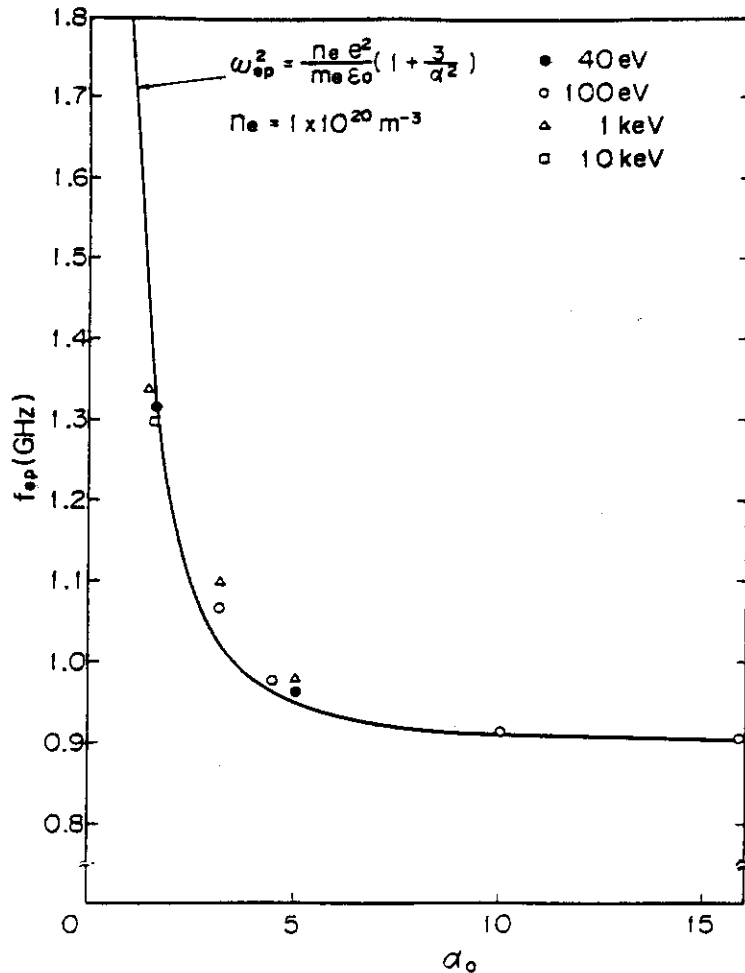


図 9 側帯ピークを示す周波数 f_{ep} の温度による影響

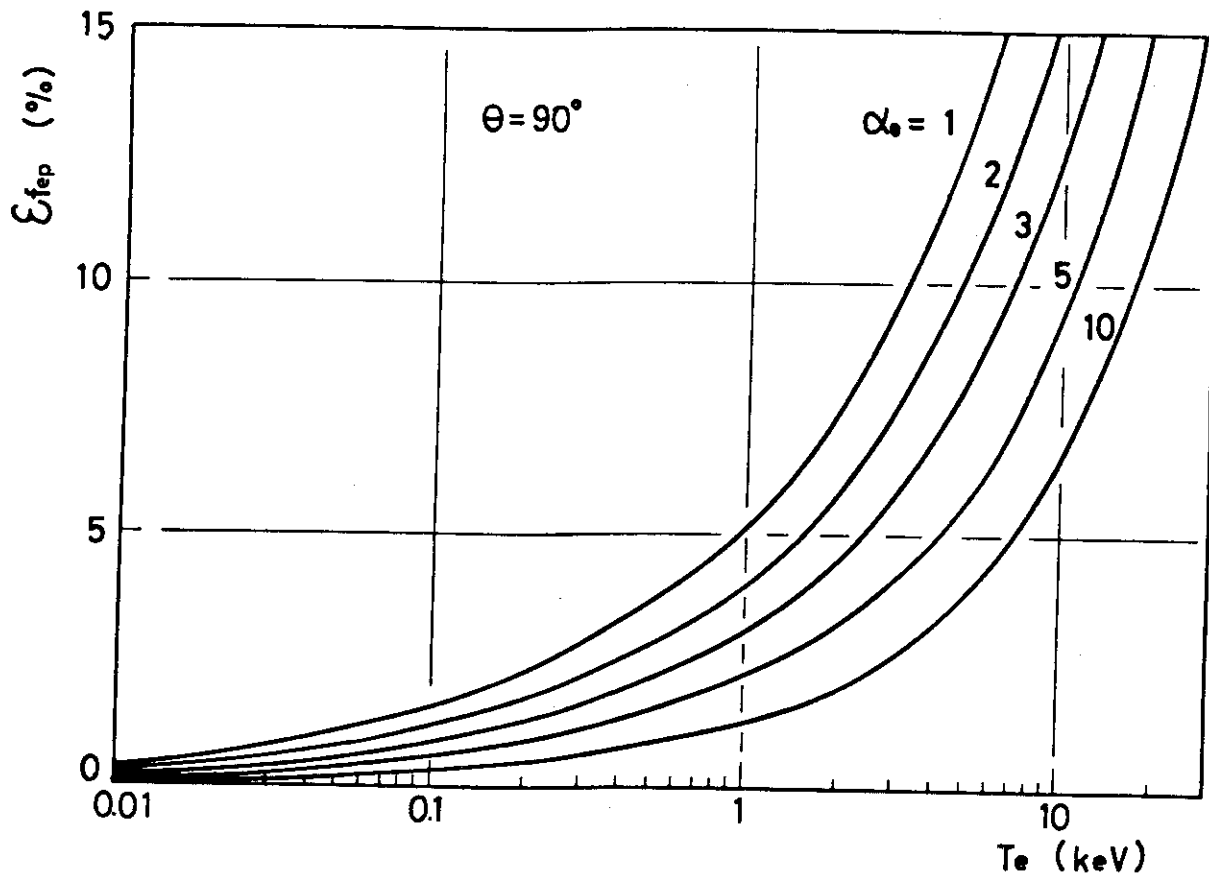


図10 k の ω による影響を考慮した f_{ep} の変位

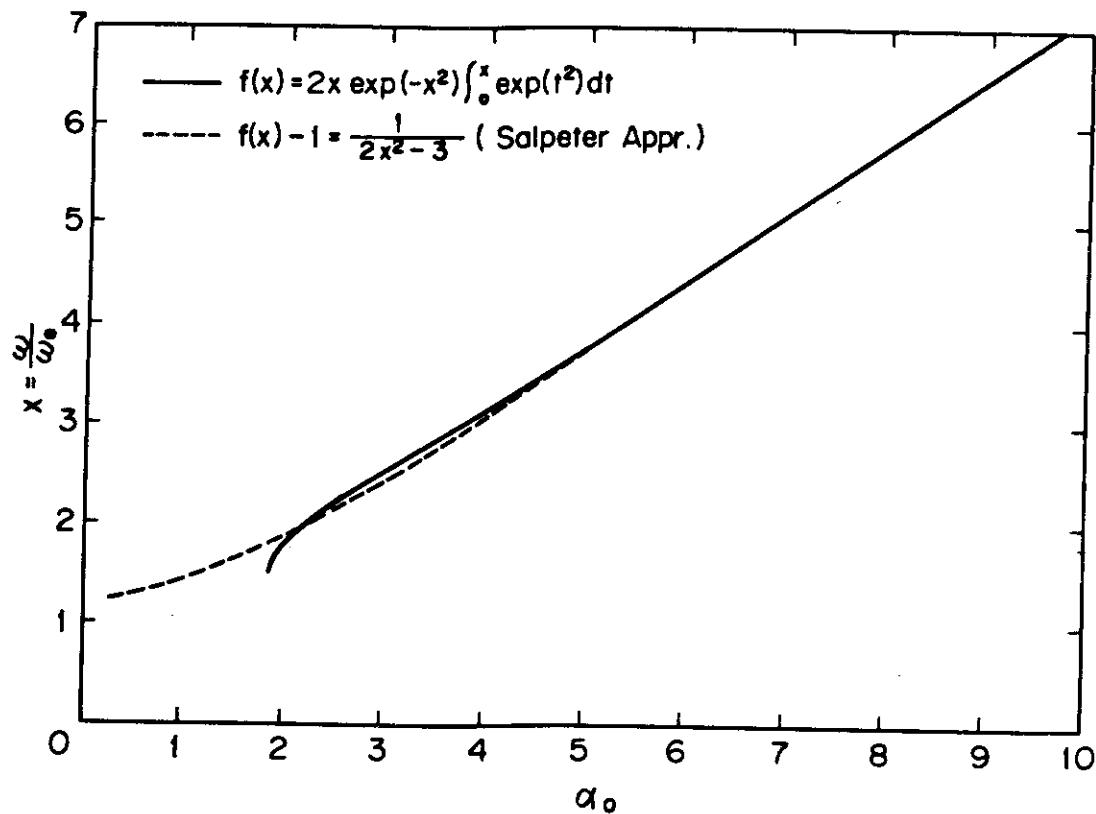


図11 Salpeter 近似が x に与える影響

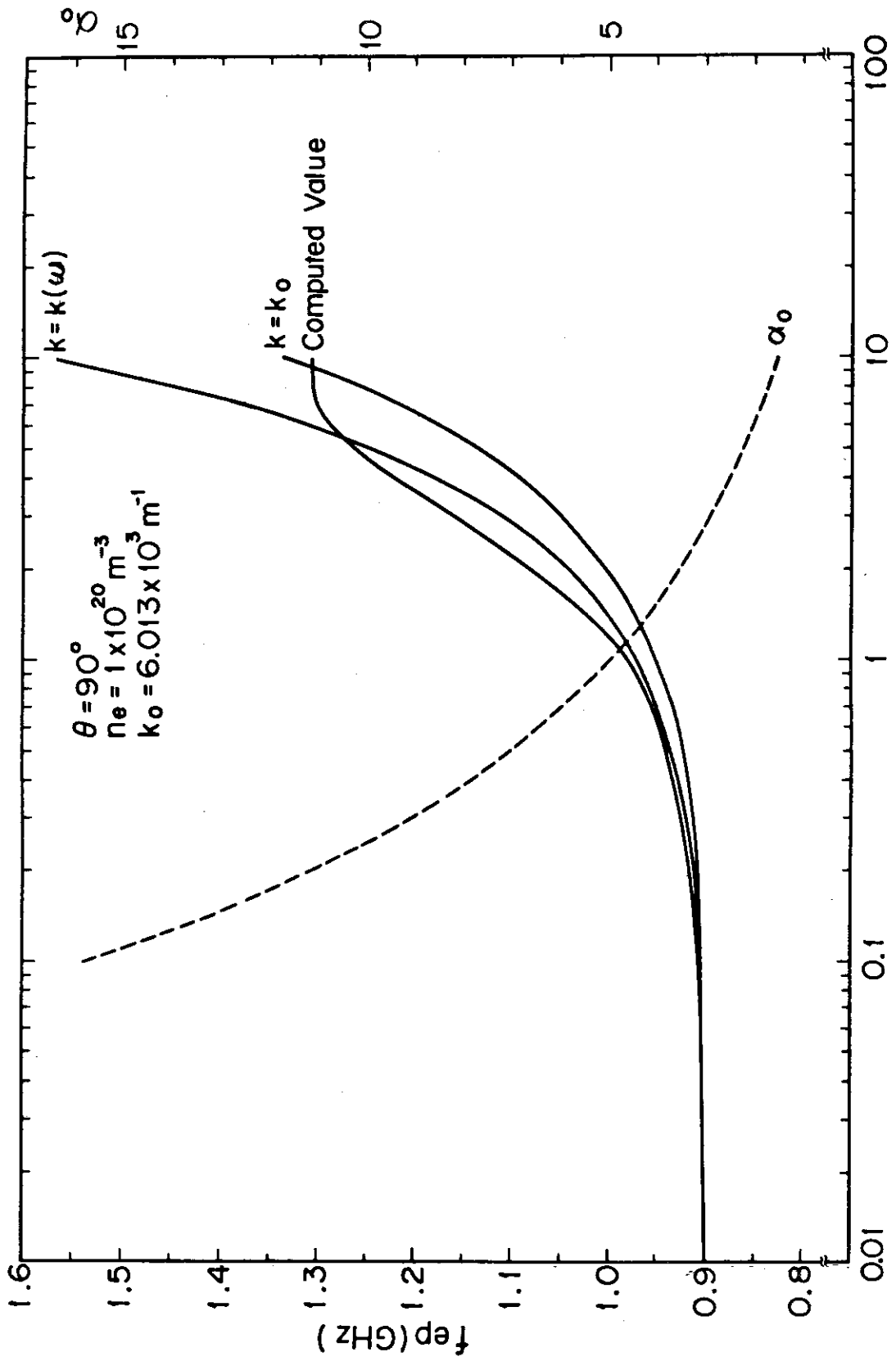
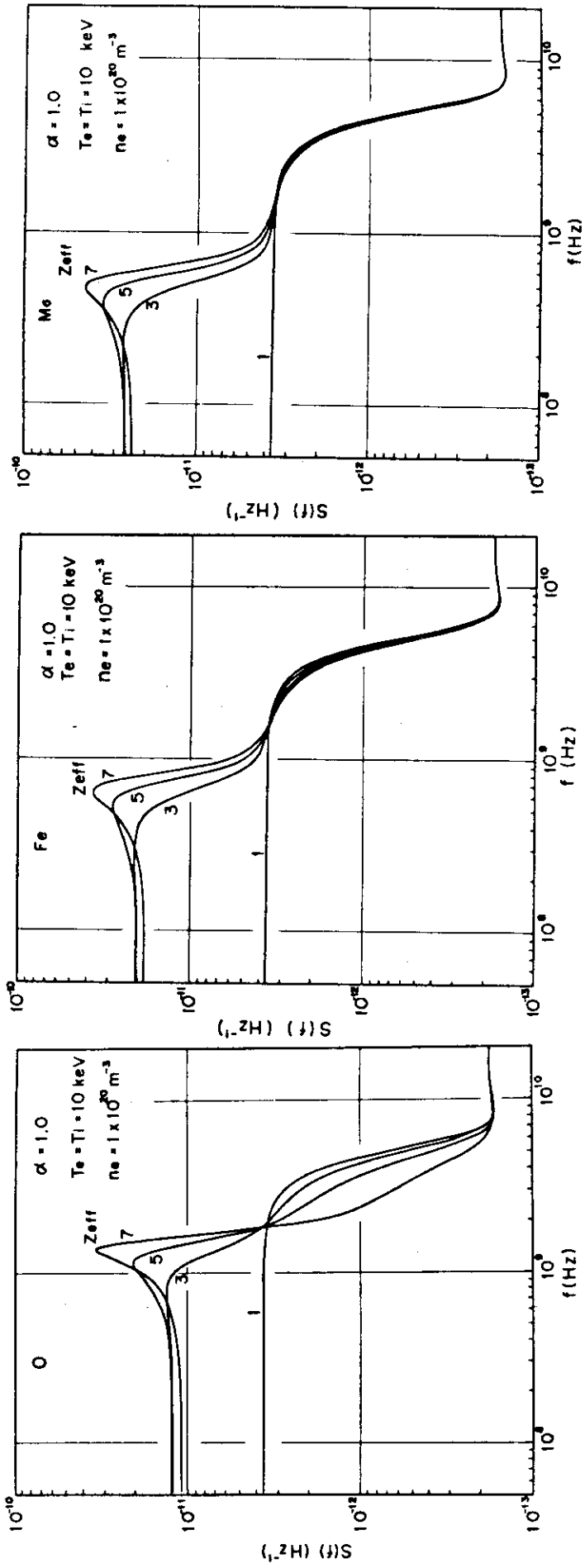


図 12 f_{ep} に関する解析結果



(a) 酸素

(b) 鉄

(c) モリブデン

図 13 1 種類の不純物が混入したプラズマのフォームファクタ

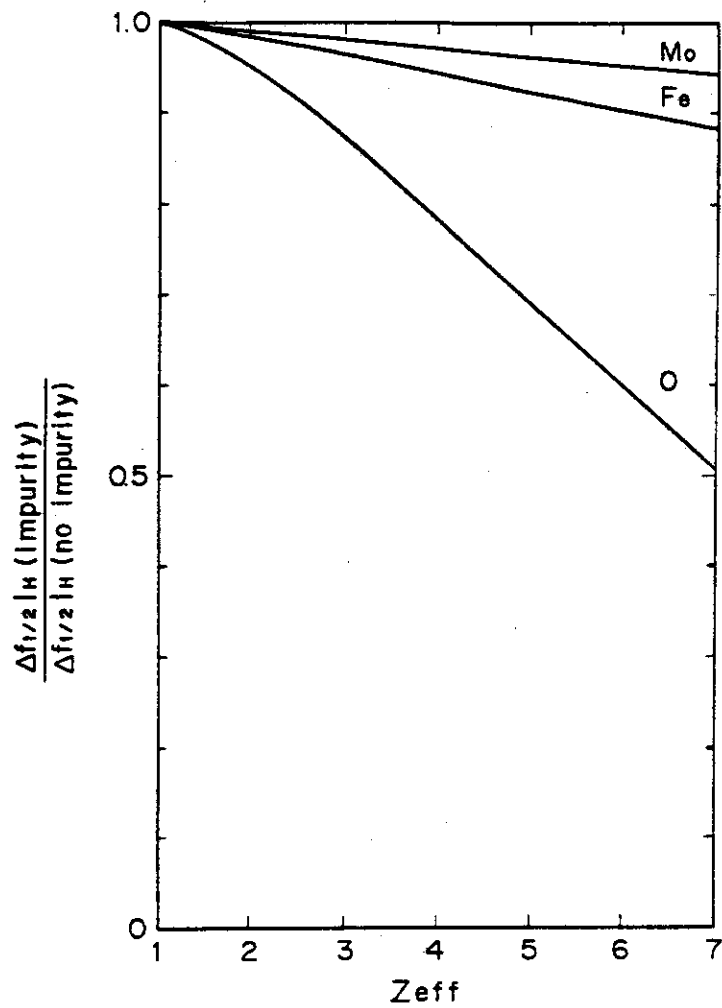


図14 不純物混入による水素スペクトル半値幅の減少

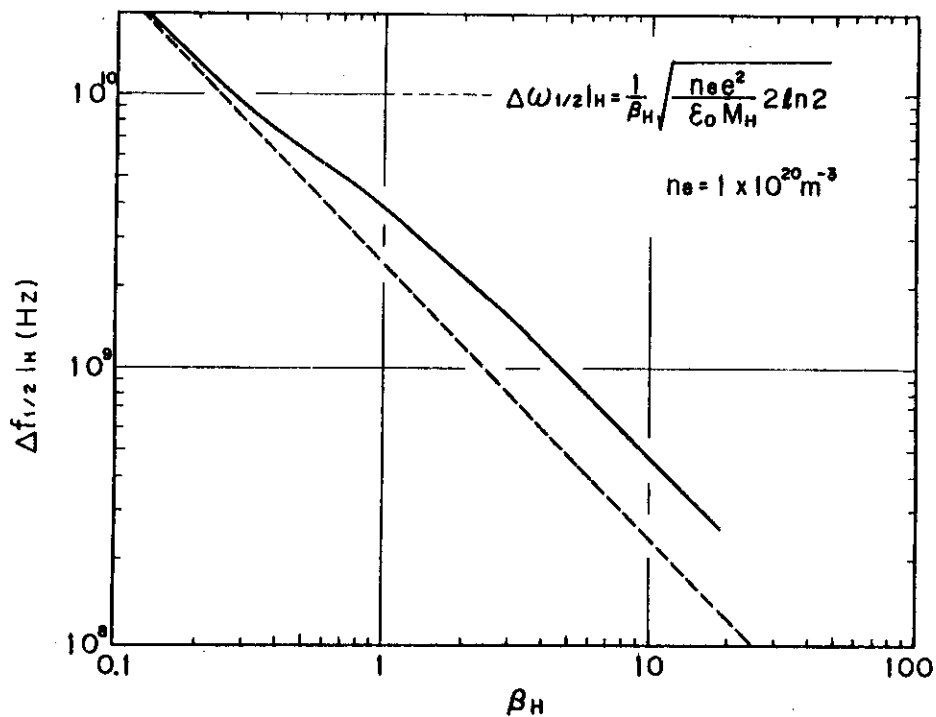


図15 イオンの散乱パラメータ β_H と水素スペクトル半値幅 $\Delta f_{1/2 H}$ の関係

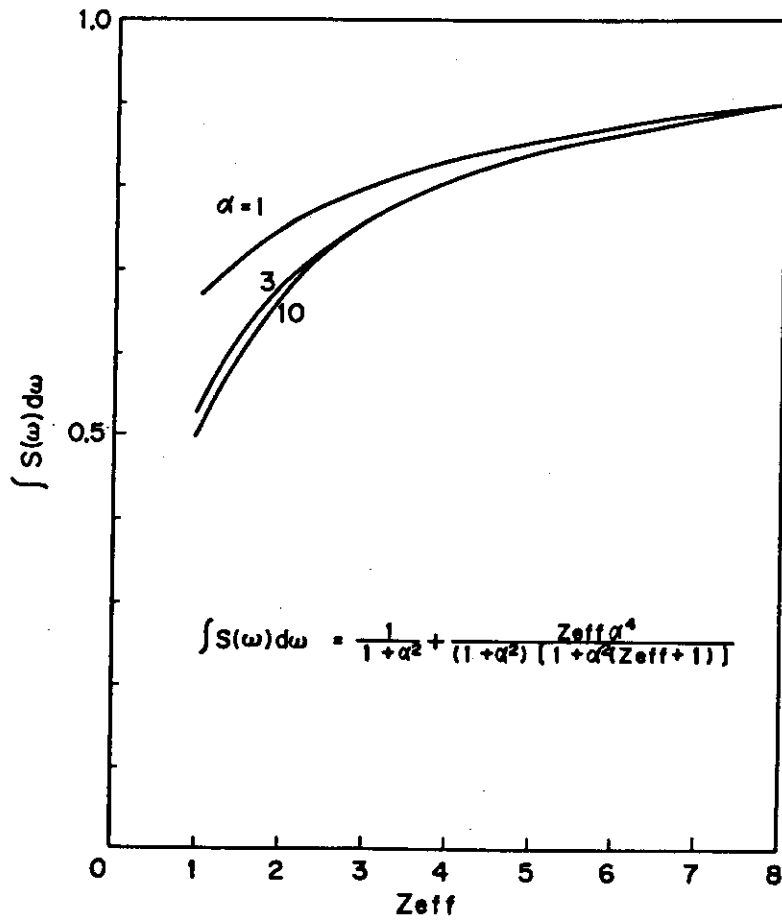


図16 散乱パワーからの Z_{eff} の評価

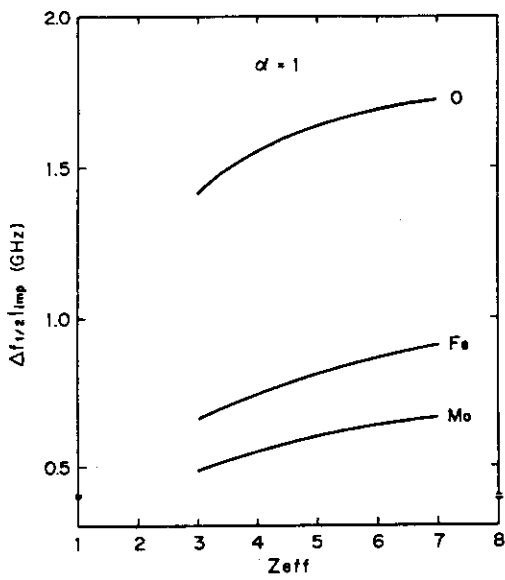


図17 不純物スペクトルの半値幅

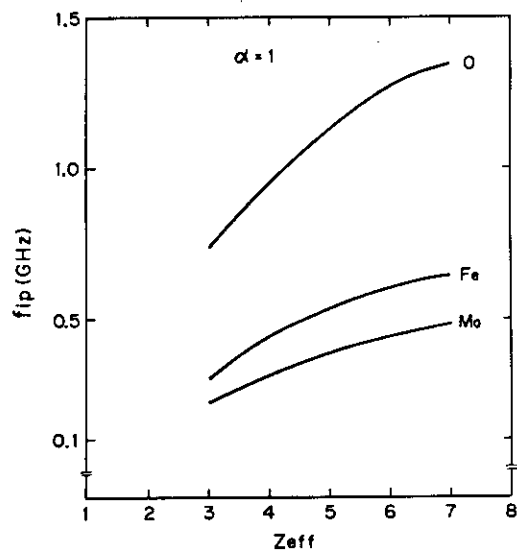


図18 不純物スペクトルのピークを与える周波数 f_{ip}

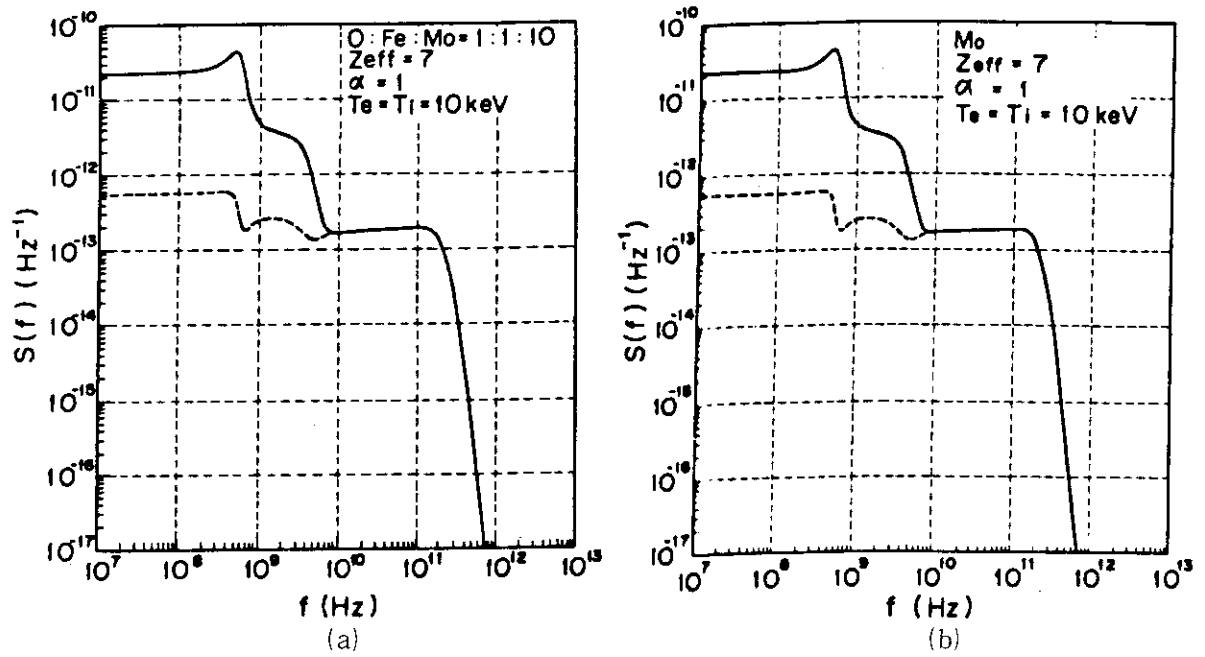


図19 主不純物が重金属の場合のフォームファクタ

(a) O:Fe:Mo = 1:1:10 の時

(b) モリブデンのみの時

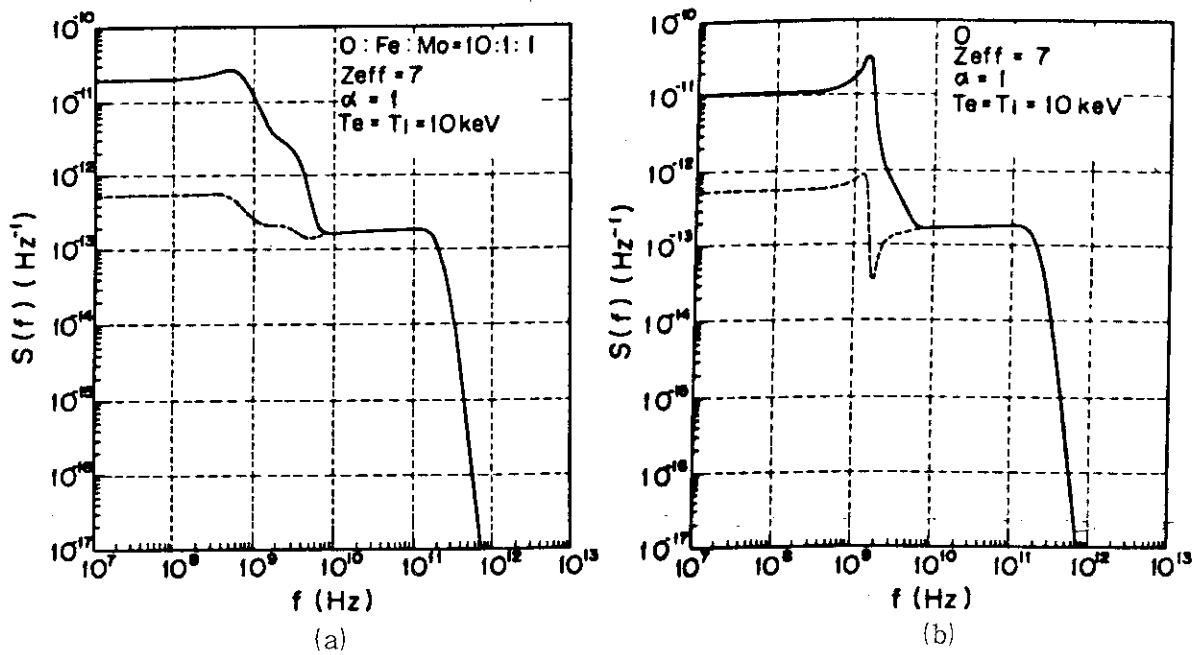


図20 主不純物が軽元素の場合のフォームファクタ

(a) O:Fe:Mo = 10:1:1 の時

(b) 酸素のみの時

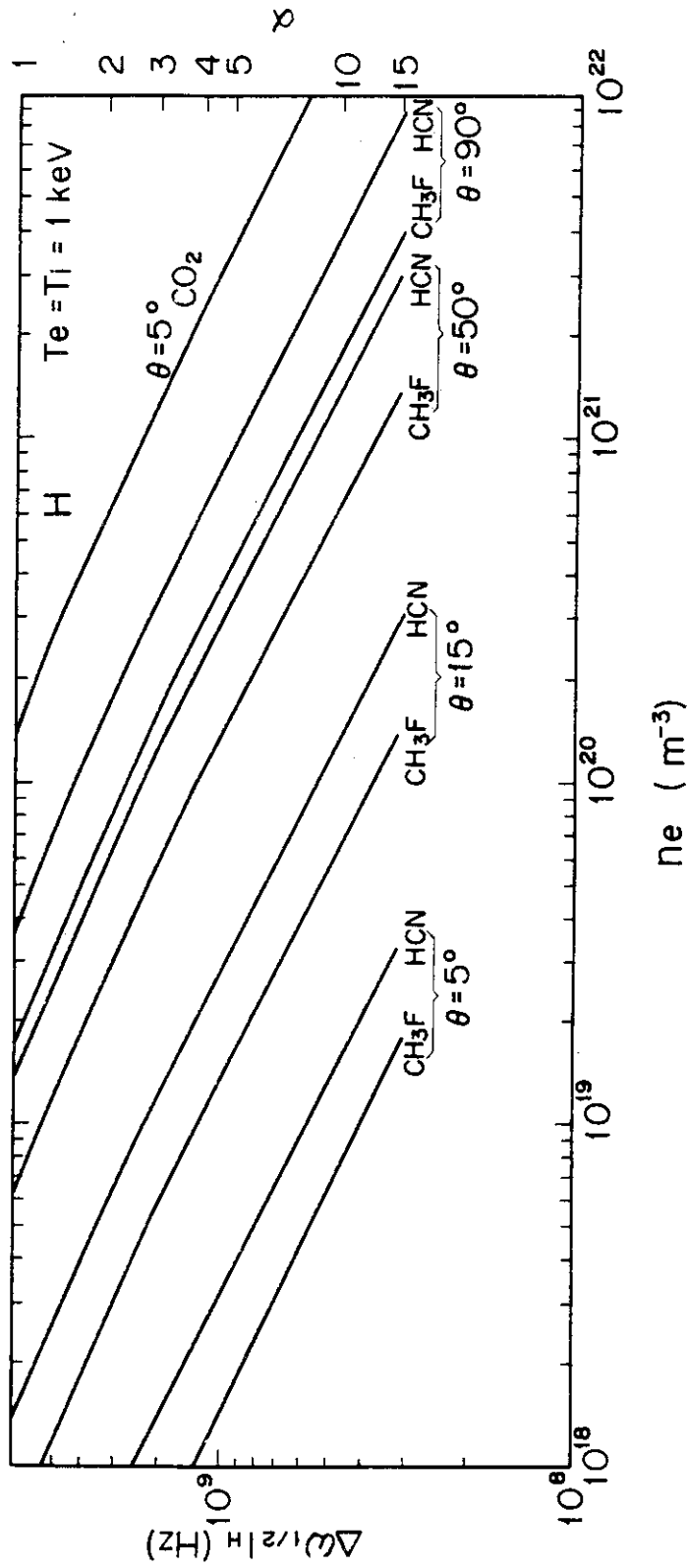


図 21 水素イオンスペクトルの半値幅

付録 (トムソン散乱スペクトル解析コード)

FACOM 230-75 M7 FORTRAN-IV H COMPILER (OPT2,CP) SOURCE PROGRAM LIST -790420-(V02,L14) DATE 79.10.30/14:13 PAGE 1

ISN	ST-NO	SOURCE PROGRAM	SEQUENCE
1		SUBROUTINE DATA	DAT00010
C			DAT00020
C	*PURPOSE	SUBROUTINE DATA READS INPUT DATA AND CALCULATES SOME	DAT00030
C		PHYSICAL QUANTITIES.	DAT00040
C	*PHYSICAL	CONSTANTS	DAT00050
C		ELECTRON MASS 9.109534E-31 (KG)	DAT00060
C		BOLTZMAN CONSTANT 1.380662E-23 (J/K)	DAT00070
C		SPEED OF LIGHT IN VACUUM 2.99792458E8 (M/SEC)	DAT00080
C		TEMPERATURE ASSOCIATED WITH 1 EV .. 1.16055E4 DEG(K)	DAT00090
C		ELEMENTARY CHARGE 1.6021892E-19 (COULOMB)	DAT00100
C			DAT00110
2		IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)	DAT00120
3		COMMON /ION / NION,BJ(100),MJ(100),NJ(100),ZJ(100),IJ(100),TI	DAT00130
4		COMMON /ELECTR/ ME,ME*TE	DAT00140
5		COMMON /FACTOR/ ALPHA0,BETA0(100)	DAT00150
6		COMMON /MISCLL/ RAMDAI,THETA,BOLTZ,SPEED,KI,WI,ZEFF,PAI,EPSIO	DAT00160
7		REAL*8 NJ,MJ,NE,ME*KI	DAT00170
C			DAT00180
C			DAT00190
8		PAI = 3.14159 26535 8979300	DAT00200
C			DAT00210
9	SET	PHYSICAL CONSTANTS	DAT00220
10		SPEED = 2.99792458D9	DAT00230
11		BOLTZ = 1.380662D-23	DAT00240
12		ME = 9.109534D-31	DAT00250
13		TCONST = 1.1605504	DAT00260
14		E = 1.6021892D-19	DAT00270
		EPSIO = 8.854321D-12	DAT00280
C			DAT00290
C		HEAD INPUT DATA	DAT00300
C		NE.....ELECTRON DENSITY (1/M**3)	DAT00310
C		NJ(I)...THE NUMBER OF THE I-TH KIND OF ION PER UNIT VOLUME(1/M**3)	DAT00320
C		ZJ(I)...THE CHARGE OF THE I-TH KIND OF ION (1/M**3)	DAT00330
C		DEGREE...SCATTERING ANGLE(DEGREE)	DAT00340
C		TEMPE...ELECTRON TEMPERATURE (EV)	DAT00350
C		TEMPI...ION TEMPERATURE (EV)	DAT00360
15		READ(5,*,END=9000) RAMDAI,TEMPI,TEMPE,DEGREE,NION	DAT00370
16		IF(NION.LE.D .AND. NION.GE.101)	DAT00372
		*STOP 'INPUT DATA ERROR FOR NION(MAXIMUM=100)'	DAT00373
17		DO 10 I=1,NION	DAT00380
18		READ(5,*,END=9100) NJ(I),ZJ(I),IJ(I)	DAT00390
19		10 CONTINUE	DAT00400
C			DAT00410
C		INITIAL CALCULATION	DAT00420
20		THETA=PAI*DEGREE/180.000	DAT00430
21		TE=TCONST*TEMPE	DAT00440
22		TI=TCONST*TEMPI	DAT00450
23		NE=0.000	DAT00460
24		DO 20 I=1,NION	DAT00470
25		NE=NE+ZJ(I)*NJ(I)	DAT00480
26		20 CONTINUE	DAT00490
27		DO 30 I=1,NION	DAT00500
28		BJ(I)=ZJ(I)*ZJ(I)*NJ(I)/NE	DAT00510
29		MJ(I)=1.67227D-27*IJ(I)	DAT00520
30		30 CONTINUE	DAT00530
C		ZEFF.....THE EFFECTIVE CHARGE OF THE IMPURITY ION	DAT00540
31		ZEFF=0.000	DAT00550

FACOM 230-75 M7 FORTRAN-IV H COMPILER (OPT2,CP) SOURCE PROGRAM LIST -790420-(V02,L14) DATE 79.10.30/14:13 PAGE 2

ISN	ST-NO	SOURCE PROGRAM (DATA)	SEQUENCE
32		DO 40 I=1,NION	DAT00560
33		ZEFF=ZEFF+BJ(I)	DAT00570
34		40 CONTINUE	DAT00580
C		*AVE NUMBER	DAT00590
35		KI=2.000*PAI/RAMDAI	DAT00600
C		*AVELENGTH	DAT00610
36		WI=KI*SPEED	DAT00620
C			DAT00630
C		ALPHA,BETA	DAT00640
37		ALPHA0=DSQRT(NE*E*E/(BOLTZ*TE*EPSIO))/	DAT00650
		* DSQRT(2.000*KI*KI*(1.000-DCOS(THETA)))	DAT00660
38		DO 50 I=1,NION	DAT00680
39		BETA0(I)=ALPHA0*DSQRT(ZJ(I)*TE/TI)	DAT00690
40		50 CONTINUE	DAT00700
C		PRINT INPUT QUANTITIES	DAT00720
41		CALL LP0000	DAT00730
		* (DEGREE,ZEFF,TEMPE,TEMPI,NE,RAMDAI,KI,WI,MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)	DAT00740
42		RETURN	DAT00750
C			DAT00760
C		PROGRAM NORMAL END	DAT00770
43		9000 CONTINUE	DAT00780
44		STOP	DAT00790
C			DAT00800
C		ERROR FOR INPUT DATA	DAT00810
45		9100 CONTINUE	DAT00820
46		STOP 'INPUT ERROR'	DAT00830
47		END	DAT00840

ISN	ST-NO	SOURCE PROGRAM	SEQUENCE
1		SUBROUTINE DTLIST	DTL00010
	C		DTL00020
	C	ABSTRACT	DTL00030
	C	***** SUBROUTINE DTLIST PRINTS THE INPUT DATA ON THE LINE	DTL00040
	C	PRINTER SHEET.	DTL00050
	C		DTL00060
2		INTEGER MEM(20)	DTL00070
	C		DTL00080
3		NC=0	DTL00090
4	10	CONTINUE	DTL00100
5		READ (5,5000,END=20) MEM	DTL00110
6	5000	FORMAT(20A4)	DTL00120
7		NC=NC+1	DTL00130
8		IF(NC.NE.1 .AND. NC.EQ.(NC/50*50+1)) WRITE(6,2000)	DTL00140
9		IF(NC.EQ.(NC/50*50+1)) WRITE(6,6000)	DTL00150
10		WRITE(6,6100) NC, MEM	DTL00160
11		GO TO 10	DTL00170
12	20	CONTINUE	DTL00180
13		IF(NC.EQ.0) GO TO 30	DTL00190
14		WRITE(6,2000)	DTL00200
15		REWIND 5	DTL00210
16		RETURN	DTL00220
17	30	CONTINUE	DTL00230
18		WRITE(6,3000)	DTL00240
19		STOP	DTL00250
20	6000	FORMAT('1'/// 21X,'-----+ ' /	DTL00260
	*	21X,'I ' /	DTL00270
	*	21X,'I INPUT DATA ' /	DTL00280
	*	21X,'I ' /	DTL00290
	*	21X,'-----+ ' /	DTL00300
	*	21X, 6(' '=), 3X, 80(' '=) /	DTL00310
	*	21X, ' NO. ', 3X,'.....1.....2.....3.....4' /	DTL00320
	*	'.....5.....6.....7.....8' /	DTL00330
	*	21X, 6(' '=), 3X, 80(' '=))	DTL00340
21	6100	FORMAT(21X, 16, 3X, 20A4)	DTL00350
22	2000	FORMAT(30X,'.....1.....2.....3.....4' /	DTL00360
	*	'.....5.....6.....7.....8')	DTL00370
23	3000	FORMAT(///10X,'***** INPUT DATA ARE MISSING *****' /	DTL00380
24		END	DTL00390

ISN	ST-NO	SOURCE PROGRAM	SEQUENCE
1		SUBROUTINE DUMPO(INTEGR,NWORD,LETTER,NL,NSKIP)	DUM00010
	C		DUM00020
	C	*PURPOSE SUBROUTINE DUMPO,DUMPI AND DUMP2 PRINT THE CONTENTS	DUM00030
	C	OF DIMENSIONAL ARRAY ON THE LINE-PRINTER-SHEET WITH	DUM00040
	C	THE FOLLOWING FORMAT :	DUM00050
	C	AXXXXX(IS).....XXXXXX(IE)= VALUES	DUM00060
	C		DUM00070
2		REAL*8 DOUBLE(1)	DUM00080
3		REAL*4 SINGLE(1)	DUM00090
4		INTEGER INTEGR(1)	DUM00100
5		DIMENSION LETTER(1),KK(6)	DUM00110
6		IPASS=0	DUM00120
7		MOD=10	DUM00130
8		GO TO 10	DUM00140
9		ENTRY DUMPI(SINGLE,NWORD,LETTER,NL,NSKIP)	DUM00150
10		IPASS=1	DUM00160
11		MOD=7	DUM00170
12		GO TO 10	DUM00180
13		ENTRY DUMP2(DOUBLE,NWORD,LETTER,NL,NSKIP)	DUM00190
14		IPASS=2	DUM00200
15		MOD=7	DUM00210
16	10	CONTINUE	DUM00220
17		DO 20 J=1,6	DUM00230
18		KK(J)=' '	DUM00240
19	20	CONTINUE	DUM00250
20		DECODE(NL,6000,LETTER(1)) (KK(J),J=1,NL)	DUM00260
21		WRITE(6,5000) KK,KK,NWORD	DUM00270
22		N=NWORD/MOD	DUM00280
23		NR=NWORD-N*MOD	DUM00290
24		KS=1	DUM00300
25		KE=MOD	DUM00310
26		IS=1	DUM00320
27		IE=MOD*NSKIP	DUM00330
28		IF(NR.EQ.0) GO TO 40	DUM00340
29		DO 30 I=1,NR	DUM00350
30		IF(IPASS.EQ.0) WRITE(6,2000)KK,KS,KK,KE,(INTEGR(J),J=IS,IE,NSKIP)	DUM00360
31		IF(IPASS.EQ.1) WRITE(6,4000)KK,KS,KK,KE,(SINGLE(J),J=IS,IE,NSKIP)	DUM00370
32		IF(IPASS.EQ.2) WRITE(6,3000)KK,KS,KK,KE,(DOUBLE(J),J=IS,IE,NSKIP)	DUM00380
33		KS=KS+MOD	DUM00390
34		KE=KE+MOD	DUM00400
35		IS=IS+MOD*NSKIP	DUM00410
36		IE=IE+MOD*NSKIP	DUM00420
37	30	CONTINUE	DUM00430
38	40	CONTINUE	DUM00440
39		IF(NR.EQ.0) GO TO 50	DUM00450
40		KE=NWORD	DUM00460
41		IE=NWORD*NSKIP	DUM00470
42		IF(IPASS.EQ.0) WRITE(6,2000)KK,KS,KK,KE,(INTEGR(J),J=IS,IE,NSKIP)	DUM00480
43		IF(IPASS.EQ.1) WRITE(6,4000)KK,KS,KK,KE,(SINGLE(J),J=IS,IE,NSKIP)	DUM00490
44		IF(IPASS.EQ.2) WRITE(6,3000)KK,KS,KK,KE,(DOUBLE(J),J=IS,IE,NSKIP)	DUM00500
45	50	CONTINUE	DUM00510
46		RETURN	DUM00520
47	2000	FORMAT(1X,6A1,'('',15,'').....'6A1'('',15,'')=' 10('10))	DUM00530
48	3000	FORMAT(1X,6A1,'('',15,'').....'6A1'('',15,'')=' 7(1X,1PE13,6))	DUM00540
49	4000	FORMAT(1X,6A1,'('',15,'').....'6A1'('',15,'')=' 7(1X,1PE13,6))	DUM00550
50	5000	FORMAT(//1X,'* DUMP-LIST ====='6A1'(' 1).....'6A1'('',15,''))	DUM00560
51	6000	FORMAT(6A1)	DUM00570

FACOM 230-75 M7 FORTRAN-IV H COMPILER (OPT2,CP) SOURCE PROGRAM LIST -790420-(V02,L14) DATE 79.10.30/14:13 PAGE 5

ISN	ST-NO	SOURCE PROGRAM (DUMPO)	SEQUENCE
52	END		DUM00580

FACOM 230-75 M7 FORTRAN-IV H COMPILER (OPT2,CP) SOURCE PROGRAM LIST -790420-(V02,L14) DATE 79.10.30/14:13 PAGE 6

ISN	ST-NO	SOURCE PROGRAM	SEQUENCE
1		SUBROUTINE FORMFA (K,SE,SJ,SUM)	FOR00010
C		*PURPOSE SUBROUTINE FORMFA CALCULATES THE FORM FACTOR	FOR00020
C		FOR SCATTERING. THIS FORM FACTOR CONTAINS MORE THAN	FOR00030
C		ONE IONIC SPECIES.	FOR00040
C			FOR00050
C			FOR00060
2		IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)	FOR00070
3		COMMON /ION / NION,BJ(100),MJ(100),NJ(100),ZJ(100),IJ(100),TI	FOR00080
4		COMMON /ELECTR/ ME,NE,TE,E	FOR00090
5		COMMON /MISCLL/ RAMDAI,THETA,BOLTZ,SPEED,KI,WI,ZEFF,PAI,EPS10	FOR00100
6		REAL*8 NJ,MJ,NE,ME,KI	FOR00110
7		COMPLEX*16 GJW,GEW	FOR00120
8		COMMON /SCREEN/ K*AVE,ALPHA,GEW,GJW,WE	FOR00130
9		REAL*8 K*AVE	FOR00140
10		COMMON /FORMOD/ NFORM,MAXFOR,SE(2000),SI(2000),SX(2000),SUM(2000)	FOR00150
11		REAL*4 SE,SI,SX,SUM,SE*,SJ*,SUM*	FOR00160
C			FOR00170
C			FOR00180
12		DELTAE=DCABS((1.0D0-GJW)/(1.0D0-GJW-GEW))	FOR00190
13		DELTAI=DCABS(GEW/(1.0D0-GJW-GEW))	FOR00200
C			FOR00210
14		ARG=-ME/(2.0D0*BOLTZ*TE)*(W**2)/(K*AVE*K*AVE)	FOR00220
15		W1=DSQRT(ME/2.0D0/PAI/BOLTZ*TE)*DEXP(ARG)	FOR00230
16		W2=0.0D0	FOR00240
17		DO 10 I=1,NION	FOR00250
18		W2=WJ(I)/(2.0D0*BOLTZ*TE)	FOR00260
19		W2=W2*DSQRT(A22/PAI**2)*DEXP(-W2**2*(K*AVE/K*AVE)*BJ(I))	FOR00270
20		CONTINUE	FOR00280
C			FOR00290
C		CALCULATE FORM FACTOR	FOR00300
C		SE=...FORM FACTOR FOR ELECTRONS	FOR00310
C		SJ=...FORM FACTOR FOR IONS	FOR00320
21		UNITC=(K*AVE**2/SPEED*(K*AVE**2*(-1.0D0)*(W/SPEED+K	FOR00330
		KI(1.0D0-DCOS(THETA))))/(K*AVE*K*AVE)	FOR00340
22		UNITC=DABS(UNITC)	FOR00350
23		SE=DELTAI*DELTAE*W1*UNITC	FOR00360
24		SJ=DELTAI*DELTAI**2*UNITC	FOR00370
25		SUM=SE+SJ	FOR00380
26		RETURN	FOR00390
27		END	FOR00400

FACOM 230-75 M7 FORTRAN-IV H COMPILER (OPT2,CP) SOURCE PROGRAM LIST -790420-(V02,L14) DATE 79.10.30/14:13 PAGE 7

ISN	ST-NO	SOURCE PROGRAM	SEQUENCE
1		IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)	FTM00010
C		COMMON SECTION	FTM00020
2		COMMON /ION / NION,BJ(100),MJ(100),NJ(100),ZJ(100),IJ(100),TI	FTM00030
3		COMMON /ELECTR/ ME,NE,TE,E	FTM00040
4		COMMON /MISCLL/ RAMDAI,THETA,BOLTZ,SPEED,KI,WI,ZEFF,PAI,EPS10	FTM00050
5		REAL*8 NJ,MJ,NE,ME,KI	FTM00060
6		COMMON /SCREEN/ K*AVE,ALPHA,GEW,GJW,WE	FTM00070
7		REAL*8 K*AVE	FTM00080
8		COMPLEX*16 GJW,GJA	FTM00090
9		COMMON /FREQUE/ WMIN,MAX(2),WPE,WPEAK,WINC(2),MNS,RNE	FTM00100
10		COMMON /FACTOR/ ALPHA,BETA(100)	FTM00110
11		COMMON /FORMOD/ NFORM,MAXFOR,SE(2000),SI(2000),SX(2000),SUM(2000)	FTM00120
12		REAL*4 SE,SI,SX,SUM	FTM00130
13		COMMON /TABLES/ NTABLE,MAXTAB,NSCAN,XYTABL(7000),SCAN(300),	FTM00140
		INDEX(300)	FTM00150
14		DIMENSION ISIGN(2)	FTM00160
15		DATA ISIGN/1,-1/	FTM00170
C			FTM00180
C		PRINT INPUT CARD	FTM00190
16		CALL UTLIST	FTM00200
C		CALCULATE EXPONENTIAL INTEGRAL	FTM00210
17		CALL TABLE	FTM00220
18		CONTINUE	FTM00230
C		CALCULATE THE PHYSICAL PARAMETERS.	FTM00240
19		CALL DATA	FTM00250
C		CALCULATE FREQUENCY MINIMUM AND MAXIMUM VALUES	FTM00260
20		CALL OMEGA	FTM00270
21		DO 40 I=1,2	FTM00280
22		NSTEP=0	FTM00290
23		CONTINUE	FTM00300
24		NSTEP=NSTEP+1	FTM00310
25		W=SX(NSTEP)*ISIGN(I)	FTM00320
26		IF(DABS(W),GE,WMAX(I)) GOTO 30	FTM00330
C		CALCULATE THE SCREENING INTEGRAL FOR ELECTRON	FTM00340
27		CALL GE (*)	FTM00350
C		CALCULATE THE SCREENING INTEGRAL FOR IONS	FTM00360
28		CALL GJ (*)	FTM00370
C		CALCULATE THE FORM FACTOR	FTM00380
29		CALL FORMFA(K,SE(NSTEP),SI(NSTEP),SUM(NSTEP))	FTM00390
30		GO TO 20	FTM00400
31		CONTINUE	FTM00410
32		CALL LP2222(I,(NSTEP-1))	FTM00420
33		CALL SIGMA (I,(NSTEP-1))	FTM00430
34		CONTINUE	FTM00440
35		CALL LP4444	FTM00450
36		GO TO 10	FTM00460
37		STOP	FTM00470
38		END	FTM00480

ISN	ST-NO	SOURCE PROGRAM	SEQUENCE
1		FUNCTION FUNC(XX,YY)	FUN00010
	C		FUN00020
	C	THE DERIVATIVE ESTIMATE FOR DY/DX=-2*X*Y+1	FUN00030
	C		FUN00040
2		REAL*8 XX,YY,FUNC	FUN00050
3		FUNC=-2.0D0*XX*YY+1.0D0	FUN00060
4		RETURN	FUN00070
5		END	FUN00080

ISN	ST-NO	SOURCE PROGRAM	SEQUENCE
1		SUBROUTINE GE (*)	GE000010
	C		GE000020
	C	*PURPOSE SUBROUTINE GE CALCULATES THE SCREENING INTEGRAL	GE000030
	C	FOR ELECTRONS.	GE000040
	C		GE000050
	C	*DESCRIPTION OF VARIABLES	GE000060
	C	THETA.....SCATTERING ANGLE	GE000070
	C	BOLTZ.....BOLTZMAN CONSTANT	GE000080
	C	TE.....ELECTRON TEMPERATURE	GE000090
	C	TI.....ION TEMPERATURE	GE000100
	C	ME.....ELECTRON MASS	GE000110
	C	PAI.....3.14159	GE000120
	C	SORPAI.....DSQRT(PAI)	GE000130
	C	SPEED.....SPEED OF LIGHT IN VACUUM	GE000140
	C	GEW.....SCREENING INTEGRAL	GE000150
	C	KS.....WAVE NUMBER FOR SCATTERED BEAMS	GE000160
	C	KAVE.....PROPAGATIVE WAVE NUMBER	GE000170
	C	ALPHA.....SCATTERING PARAMETER	GE000180
	C	KI.....WAVE NUMBER FOR INCIDENT BEAMS	GE000190
	C		GE000200
	C		GE000210
	C		GE000220
	C	FX.....=2.0**EXP(-X**2)*I EXP(T**2)DT	GE000230
	C		GE000240
	C		GE000250
	C		GE000260
	C		GE000270
	C		GE000280
2		IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)	GE000290
3		COMMON /ELECTN/ ME,NE,TE,E	GE000300
4		COMMON /MISCL1/ RAMPDAI,THETA,BOLTZ,SPEED,KI*PI,ZEFF,PAI,EPSID	GE000310
5		COMMON /SCREEN/ KAVE,ALPHA,GEW,GJW*E	GE000320
6		REAL*8 NU,MJ,ME,KE,KI	GE000330
7		REAL*8 KAVE,REAL,IMAG,KS	GE000340
8		COMPLEX*16 GE,GJW	GE000350
9		DATA SORPAI /1.77245 38509 0551600/	GE000360
	C		GE000370
10		KS=KI**/SPEED	GE000380
11		KAVE=DSQRT ((1+KI*KS*KS-2.0D0*KI*KS*DCOS(THETA))	GE000390
12		ALPHA=DSQRT((NE*E*E/(BOLTZ*TE*EPSID))/KAVE	GE000400
13		W=KAVE*DSQRT(2.0D0*BOLTZ*TE/ME)	GE000410
14		X=W/AE	GE000420
15		FX=SEARCH(X)	GE000430
16		REAL=ALPHA*ALPHA*(1.0D0-FX)	GE000440
17		IMAG=ALPHA*ALPHA*SORPAI**EXP(-X*X)	GE000450
18		GEW=DCMLX(REAL,IMAG)	GE000460
19		RETURN	GE000470
20		END	GE000470

ISN	ST-NO	SOURCE PROGRAM	SEQUENCE
1		SUBROUTINE GJ (*)	GJ000010
	C		GJ000020
	C	*PURPOSE SUBROUTINE GJ CALCULATES THE SCREENING INTEGRALS	GJ000030
	C	FOR IMPURITY IONS.	GJ000040
	C		GJ000050
2		IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)	GJ000060
3		COMMON /ION / NI(NI(100)),NJ(100),NO(100),ZJ(100),IJ(100),TI	GJ000070
4		COMMON /ELECTN/ ME,NE,TE,E	GJ000080
5		COMMON /MISCL1/ RAMPDAI,THETA,BOLTZ,SPEED,KI*PI,ZEFF,PAI,EPSID	GJ000090
6		COMMON /SCREEN/ KAVE,ALPHA,GEW,GJW*E	GJ000100
7		REAL*8 NU,MJ,ME,KE,KI	GJ000110
8		COMPLEX*16 GE,GJW	GJ000120
9		REAL*8 KAVE,REAL,IMAG	GJ000130
10		DATA SORPAI /1.77245 38509 0551600/	GJ000140
	C		GJ000150
11		REAL=0.0D0	GJ000160
12		IMAG=0.0D0	GJ000170
13		DO 10 I=1,NI(I)	GJ000180
14		BETA=DSQRT (ZJ(I)*TE/TI)*ALPHA	GJ000190
15		NJ=KAVE*DSQRT (2.0D0*BOLTZ*TI/(NJ(I)))	GJ000200
16		Y=N/AJ	GJ000210
17		FY=SEARCH(Y)	GJ000220
18		REAL=REAL+BETA*BETA*(1.0D0-FY)*(ZJ(I)*NJ(I)/NE)	GJ000230
19		IMAG=IMAG+BETA*BETA*SORPAI*Y*(ZJ(I)*NJ(I)/NE)*DFAP(-Y*Y)	GJ000240
20		10 CONTINUE	GJ000250
21		GJW=DCMLX(REAL,IMAG)	GJ000260
22		RETURN	GJ000270
23		END	GJ000280


```

ISN  ST-NO          SOURCE PROGRAM                      SEQUENCE
 1      SUBROUTINE LP0000 (DEGREE,ZEFF,TEMPE,TEMPI,NE,RAMDAI,KI,WI,
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000010
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000020
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000030
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000040
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000050
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000060
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000070
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000080
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000090
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000100
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000110
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000120
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000130
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000140
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000150
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000160
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000170
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000180
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000190
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000200
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000210
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000220
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000230
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000240
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000250
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000260
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000270
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000280
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000290
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000300
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000310
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000320
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000330
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000340
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000350
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000360
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000370
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000380
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000390
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000400
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000410
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000420
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000430
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000440
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000450
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000460
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000470
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000480
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000482
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000483
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000484
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000485
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000486
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000487
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000490
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000500
 2      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
 3      INTEGER*4 IJ(NION)
 4      REAL*8 MJ(NION),NJ(NION),ZJ(NION),BJ(NION)
 5      REAL*8 NE,KI
 6      COMMON /FACTOR/ ALPHA,BETA(100)
 7      *I=I/(2.000*3.14159 26535 8979300)
 8      *NITE(6,6000) DEGREE,ZEFF,TEMPE,TEMPI,NE,RAMDAI,KI,WI
 9      5000 FORMAT('1' // 16X,97('=')) /
      *21X'T H E S P E C T R U M A N A L Y S I S C O D E F O R T H
      * M S O N S C A T T E R I N G ' /
      *16X, 97('=')) /
      *21X'SCATTERING ANGLE.....'F13.2 ' (DEGREE)' /
      *21X'EFFECTIVE CHARGE OF THE IMPURITY IONS...'1P13.6 ' /
      *21X'ELECTRON TEMPERATURE.....'1P13.6' (EV)' /
      *21X'ION TEMPERATURE.....'1P13.6' (EV)' /
      *21X'ELECTRON DENSITY.....'1P13.6' (1/M**3)' /
      *21X'WAVE LENGTH FOR INCIDENT BEAMS.....'1P13.6' (M)' /
      *21X'WAVE NUMBER FOR INCIDENT BEAMS.....'1P13.6' (1/M)' /
      *21X'FREQUENCY FOR INCIDENT BEAMS.....'1P13.6' )
 10     DO 10 I=1,NION
 11     *RITE(6,2000) I,NJ(I),I,ZJ(I),I,MJ(I)
 12     10 CONTINUE
 13     2000 FORMAT(21X'ION PARAMETERS' /
      *21X 'THE NUMBER OF THE 'I3'-TH KIND OF ION PER UNIT VOLUME....'
      *....' 1P13.6 /
      *21X 'THE CHARGE OF THE 'I3'-TH KIND OF ION.....'
      *....' 1P13.6 /
      *21X 'THE DENSITY OF THE 'I3'-TH KIND OF ION PER UNIT VOLUME....'
      *....' 1P13.6 )
 14     *RITE(6,3000)
 15     3000 FORMAT(16X, 97('='))
 16     *NITE(6,4000) ALPHA
 17     4000 FORMAT(21X'ALPHA =',F15.6)
 18     DO 30 I=1,NION
 19     *RITE(6,4100) I,BETA(I)
 20     30 CONTINUE
 21     4100 FORMAT(21X'BETA('I3')=',F15.6)
 22     RETURN
  
```

```

ISN  ST-NO          SOURCE PROGRAM                      SEQUENCE
 23      END
      * MJ,NJ,ZJ,BJ,IJ,NION)                      LP000500
  
```

```

ISN  ST-NO          SOURCE PROGRAM                      SEQUENCE
 1      SUBROUTINE LP2222(I1,NO)                      LP200010
 2      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)                      LP200020
 3      DIMENSION ISIGN(2)                            LP200030
 4      INTEGER ISIGN/1=-1/                          LP200040
 5      LOGICAL TRUE                                  LP200050
 6      REAL*4 SXJ,SXK                               LP200060
 7      DIMENSION MSG0(15),MSG1(15)                  LP200070
 8      INTEGER MSG0                                  LP200080
 9      *I= FREQUENCY FORM FACTOR(E) FORM FACTOR(I) FORM FACTOR ' /
      *I= F SE(F) SI(F) S(F) ' /
      *I= F SE(F) SI(F) S(F) ' /
 10     COMMON /FORM00/ NFORM,MAXFOR,SE(2000),SI(2000),SX(2000),SUM(2000)
 11     COMMON /MISCLL/ RAMDAI,THETA,BOLTZ,SPEED,KI,WI,ZEFF,PAI,EPS10
 12     REAL*4 SE,SI,SX,SUM                            LP200130
      * CALL DUMPI(SX(1),NFORM,' * ' ,6,1)
      * CALL DUMPI(SE(1),NFORM,' SE ' ,5,1)
      * CALL DUMPI(SI(1),NFORM,' SI ' ,5,1)
 13     MOD=120
 14     LOOP=(NO-1)/MOD+1
 15     DO 20 I=1,LOOP
 16     J=(I-1)*120+1
 17     K=J+60
 18     *WRITE(6,1000) MSG0,MSG0,MSG1,MSG1
 19     DO 10 L=1,60
 20     IF(J.GT.NO) GO TO 30
 21     TRUE=.TRUE.EG.LOOP .AND. K.GT.NO
 22     IF(TRUE) SXJ=ISIGN(I)*SX(J)/(2.000*PAI)
 23     IF(TRUE) *WRITE(6,6000) SXJ,SE(J),SI(J),SUM(J)
 24     IF(.NOT.TRUE) SXJ=ISIGN(I)*SX(J)/(2.000*PAI)
 25     IF(.NOT.TRUE) SXK=ISIGN(I)*SX(K)/(2.000*PAI)
 26     IF(.NOT.TRUE) *WRITE(6,6000)SXJ,SE(J),SI(J),SUM(J),SXK,SE(K),SI(K),
      * SUM(K)
 27     J=J+1
 28     K=K+1
 29     10 CONTINUE
 30     20 CONTINUE
 31     30 CONTINUE
 32     6000 FORMAT(1X,2(1X,1PD10.3,3X,1PD10.3,7X,1PD10.3,4X))
 33     1000 FORMAT('1'//1X,60('='),3X,60('=')) /
      * 1X,15A4,3X,15A4 /
      * 1X,15A4,3X,15A4 /
      * 1X,60('='),3X,60('=')) )
 34     RETURN
 35     END
  
```

```

ISN  ST-NO      SOURCE PROGRAM      SEQUENCE
1      SUBROUTINE LP4444      LP400010
2      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)      LP400020
3      C....COMMON SECTION      LP400030
4      COMMON /MISCLL/ RAMDAI,THETA,BOLTZ,SPEED,KI,WI,ZEFF,PAI,EPSIO      LP400040
5      REAL*8 KI      LP400050
6      COMMON /SIGMA0/ SIGMAE,SIGMAI,SIGMAS      LP400060
7      COMMON /FREQUE/ WMIN,WMAX(2),WPE,WPEAK,W[NC(2),RNS,RNE      LP400070
8      COMMON /FACTOR/ ALPHAO,BETA0(100)      LP400080
9      COMMON /FORM00/ NFORM,MAXFOR,SE(2000),SI(2000),SX(2000),SUM(2000)      LP400090
10     REAL*4 SE,SI,SX,SUM,SEW,SJW,SUMW      LP400100
11     C CALCULATE THE FORM FACTOR FOR THE PEAKING FREQUENCY      LP400110
12     CALL GE (WPEAK)      LP400120
13     CALL GJ (WPEAK)      LP400130
14     CALL FORMFA(WPEAK,SEW,SJW,SUMW)      LP400140
15     C      LP400150
16     WPE=WPE/(2.000*PAI)
17     WPEAK=WPEAK/(2.000*PAI)
18     WRITE(6,0000) WPE,WPEAK,SEW,SJW,ZEFF,SIGMAE,SIGMAI,SIGMAS      LP400160
19     6000 FORMAT(//// 25X,50(' ') /      LP400170
20     *27X'ELECTRON PLASMA FREQUENCY... '1PD12.5/      LP400180
21     *27X'PEAK FREQUENCY..... '1PD12.5/      LP400190
22     *27X' SE..... '1PD12.5/      LP400200
23     *27X' SI..... '1PD12.5/      LP400210
24     *27X'ZEFF..... '1PD12.5/      LP400220
25     *27X'SIGMA (ELECTRON)..... '1PD12.5/      LP400230
26     *27X'SIGMA (ION)..... '1PD12.5/      LP400240
27     *27X'SIGMA (ELECTRON+ION)..... '1PD12.5/      LP400250
28     * 25X,50(' ') )      LP400260
29     RETURN      LP400270
30     END      LP400280

```

```

ISN  ST-NO      SOURCE PROGRAM      SEQUENCE
1      SUBROUTINE OMEGA      OME00010
2      C      OME00020
3      C *PURPOSE SUBROUTINE OMEGA CALCULATES THE FREQUENCY MAXIMUM      OME00030
4      C AND MINIMUM VALUES.      OME00040
5      C      OME00050
6      C      OME00060
7      C      OME00070
8      C      OME00080
9      C      OME00090
10     IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)      OME00100
11     COMMON /FORM00/ NFORM,MAXFOR,SE(2000),SI(2000),SX(2000),SUM(2000)      OME00110
12     REAL*4 SE,SI,SX,SUM      OME00120
13     COMMON /FREQUE/ WMIN,WMAX(2),WPE,WPEAK,W[NC(2),RNS,RNE      OME00130
14     COMMON /ION / NION,BJ(100),MJ(100),NJ(100),ZJ(100),IJ(100),TI      OME00140
15     COMMON /ELECTR/ ME,NE,TE,E      OME00150
16     COMMON /MISCLL/ RAMDAI,THETA,BOLTZ,SPEED,KI,WI,ZEFF,PAI,EPSIO      OME00160
17     REAL*8 NJ,MJ,NE,ME,KI      OME00170
18     C      OME00180
19     C CALCULATE THE FREQUENCY LOWER LIMIT      OME00190
20     WAVEZ=2.000*KI*SI*(1.000-DCOS(THETA))      OME00200
21     WAVE=DSQRT(WAVEZ)      OME00210
22     VMAX=MJ(1)      OME00220
23     DO 10 I=1,NION      OME00230
24     IF(MJ(I).GT.VMAX) VMAX=MJ(I)      OME00240
25     10 CONTINUE      OME00250
26     WMIN=WAVE*DSQRT(2.000*BOLTZ*TI/VMAX)/10.000      OME00260
27     C      OME00270
28     C CALCULATE THE FREQUENCY UPPER LIMIT      OME00280
29     WPE2=WPE*NE/ME/EPSIO      OME00290
30     WPE=DSQRT(WPE2)      OME00300
31     W=3.000*BOLTZ*TE/ME      OME00310
32     A=1.000*G/SPEED/SPEED      OME00320
33     B=-2.000*KI*W*(1.000-DCOS(THETA))/SPEED      OME00330
34     C=-2.000*KI*W*SI*(1.000-DCOS(THETA))*W-WPE2      OME00340
35     X1 =(-B+DSQRT(B*B+4.000*A*C))/(2.000*A)      OME00350
36     WPEAK=X1      OME00360
37     X2=C/(A*X1)      OME00370
38     WMAX(1)=X1      OME00380
39     WMAX(2)=X1      OME00390
40     IF(X1.GT.W(1)) WMAX(2)=W(1)      OME00400
41     C      OME00410
42     C CALCULATE THE FREQUENCY INCREMENTS      OME00420
43     DO 20 I=1,30      OME00430
44     IF(10.000**I .GE. WMIN) GO TO 30      OME00440
45     20 CONTINUE      OME00450
46     STOP 'INDEX ERROR ....OMEGA'      OME00460
47     30 CONTINUE      OME00470
48     LS=I+1      OME00480
49     RNS=LS      OME00490
50     DO 60 J=1,2      OME00500
51     DO 60 I=1,30      OME00510
52     IF(10.000**I .GE. WMAX(I)) GO TO 50      OME00520
53     40 CONTINUE      OME00530
54     STOP 'INDEX ERROR ....OMEGA'      OME00540
55     50 CONTINUE      OME00550
56     LE=I+1      OME00560
57     RNE=LE      OME00570
58     WMAX(I)=DEXP10(RNE)      OME00580
59     60 CONTINUE      OME00590
60     NFORM=0      OME00600

```

```

ISN  ST-NO      SOURCE PROGRAM      SEQUENCE
47     DO 70 I=LS,(LE-1)      OME00580
48     RLOOP=I      OME00590
49     WORK=DEXP10(RLOOP)      OME00600
50     DO 68 J=1,180      OME00610
51     NFORM=NFORM+1      OME00620
52     SX(NFORM)=WORK*(1.000+(J-1)*0.0500)      OME00630
53     68 CONTINUE      OME00640
54     70 CONTINUE      OME00650
55     NFORM=NFORM+1      OME00660
56     SX(NFORM)=DEXP10(RNE+1.000)      OME00670
57     C      OME00680
58     CALL DUMP2(WMAX,2,' WMAX',5,1)      OME00690
59     CALL DUMP1(SX,NFORM,'W',1,1)      OME00700
60     RETURN      OME00710
61     END      OME00720

```

ISN	ST-NO	SOURCE PROGRAM	SEQUENCE
1		FUNCTION POLATE (XY,XX,NN,KK,ILL)	POL00010
2		IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)	POL00020
3		DIMENSION XY(2)	POL00030
C			POL00040
C		*PURPOSE SUBROUTINE POLATE INTERPOLATES THE GIVEN FUNCTION	POL00050
C		WITH LINEAR INTERPOLATION.	POL00060
C		THE FORMULA FOR LINEAR INTERPOLATION IS GIVEN BY	POL00070
C		$FP = (1-P)*F0 + P*F1$	POL00080
C		WHERE F0,F1 ARE CONSECUTIVE TABULAR VALUES OF FUNCTION,	POL00090
C		CORRESPONDING TO ARGUMENTS X0,X1, RESPECTIVELY.	POL00100
C		P IS THE GIVEN FRACTION OF THE ARGUMENT INTERVAL.	POL00110
C		$P = (X-X0)/(X1-X0)$	POL00120
C		FP IS THE REQUIRED INTERPOLATE.	POL00130
C			POL00140
C		*INPUT PARAMETERS	POL00150
C		XY IS A TABLE OF Y(1), X(1), Y(2), X(2),.....Y(NN), X(NN)	POL00160
C		XX IS THE GIVEN VALUE FOR X	POL00170
C		NN IS THE NUMBER OF PAIRS OF ENTRIES IN XY	POL00180
C		KK IS THE POSITION GUESS	POL00190
C		*OUTPUT PARAMETERS	POL00200
C		KK IS THE FINAL POSITION.	POL00210
C		POLATE IS THE REQUIRED INTERPOLATE	POL00220
C			POL00230
4		ILL=0	POL00240
5		A=XX	POL00250
6		N=NN	POL00260
7		M=IABS(N)	POL00270
8		K=KK	POL00280
9		IF(K .LT. 1) K=1	POL00290
10		IF(K .GE. M) K=M-1	POL00300
C			POL00310
C		IS CONSTANT WANTED	POL00320
11		IF(M-1) 5,6,10	POL00330
12	5	CONTINUE	POL00340
13		POLATE=0.000	POL00350
14		RETURN	POL00360
15	6	CONTINUE	POL00370
16		POLATE=XY(1)	POL00380
17		RETURN	POL00390
C			POL00400
C		LOOP TO DECREASE INDEX	POL00410
18	10	CONTINUE	POL00420
19		IF(XY(2*K)-X) 20,20,11	POL00430
20	11	CONTINUE	POL00440
21		K=K-1	POL00450
22		IF(K) 30,30,10	POL00460
C			POL00470
C		LOOP TO INCREASE INDEX	POL00480
23	20	CONTINUE	POL00490
24		IF(X-XY(2*K+2)) 100,100,21	POL00500
25	21	CONTINUE	POL00510
26		K=K+1	POL00520
27		IF(K=M) 20,40,40	POL00530
C			POL00540
C		TEST FOR EXTRAPOLATION	POL00550
28	30	CONTINUE	POL00560
29		IF(N) 31,5,180	POL00570

ISN	ST-NO	SOURCE PROGRAM (POLATE)	SEQUENCE
30	31	CONTINUE	POL00580
31		K=1	POL00590
32		GO TO 100	POL00600
33	40	CONTINUE	POL00610
34		IF(N) 41,5,190	POL00620
35	41	CONTINUE	POL00630
36		K=M-1	POL00640
C			POL00650
C		EVERYTHING OK, GET ANSWER	POL00660
37	100	CONTINUE	POL00670
38		KK=K	POL00680
39		$POLATE = XY(2*K-1) + (X-XY(2*K)) * (XY(2*K+1) - XY(2*K-1)) / (XY(2*K+2) - XY(2*K))$	POL00690
40		* RETURN	POL00700
C			POL00710
C		POLATE FAILURE, SEARCH OUT OF BOUNDS	POL00720
41	180	CONTINUE	POL00730
42		POLATE=XY(1)	POL00740
43		ILL=1	POL00750
44		GO TO 200	POL00760
45	190	CONTINUE	POL00770
46		POLATE=XY(2*M-1)	POL00780
47		ILL=2	POL00790
48	200	CONTINUE	POL00800
49		RETURN	POL00810
50		END	POL00820

```

ISN  ST-NO          SOURCE PROGRAM          SEQUENCE
1      SUBROUTINE RKGILL (X,Y,H,F)          RKG00010
C                                          RKG00020
C      +-----+                          RKG00030
C      |                                     | RKG00040
C      |   RUNGE - KUTTA - GILL - METHOD   | RKG00050
C      |                                     | RKG00060
C      |                                     | RKG00070
C      |                                     | RKG00080
C      |                                     | RKG00090
C      | ABSTRACT                          | RKG00100
C      | +-----+                        | RKG00110
C      | | SUBROUTINE RKGILL INTEGRATES A FIRST ORDER ORDINARY | RKG00120
C      | | DIFFERENTIAL EQUATION OF THE FORM :                | RKG00130
C      | |   DY/DX=F(X,Y)                                     | RKG00140
C      | |   WHERE THE VALUE OF Y IS GIVEN AT X.              | RKG00150
C      | |   TYPICALLY THE SUBROUTINE IS USED TO INTEGRATE FROM | RKG00160
C      | |   X TO (X+H), BUT IT CAN BE USED AS A ONE-STEP     | RKG00170
C      | |   INTEGRATOR TO ADVANCE THE SOLUTION A SINGLE STEP IN | RKG00180
C      | |   THE DIRECTION OF (X+H).                          | RKG00190
C      | | INPUT..... X,Y,H,F                                | RKG00200
C      | | OUTPUT..... X,Y                                   | RKG00210
C      | | COMMENT                                          | RKG00220
C      | | +-----+                                        | RKG00230
C      | | X..... STARTING POINT OF INTEGRATION.            | RKG00240
C      | | Y..... SOLUTION VALUE.                          | RKG00250
C      | | H..... STEP SIZE FOR INTEGRATION.                | RKG00260
C      | | F..... THE DERIVATIVE OF Y (DY/DX).             | RKG00270
C      | | 0.29289 32188 13492 DO = 1.000*DSQRT(0.500)     | RKG00280
C      | | 1.70710 67811 86548 DO = 1.000*DSQRT(0.500)     | RKG00290
C      | | THE DERIVATIVE OF Y MUST BE COMPUTED FOUR TIMES PER | RKG00300
C      | | INTEGRATION STEP IN THIS PROGRAM.                | RKG00310
C      | |                                          | RKG00320
C      | | REAL*8 H,K,H*S,Q,X,Y,F                            | RKG00330
C      | | DATA G /0.000/                                    | RKG00340
C      | | K=H*F(X,Y)                                          | RKG00350
C      | | R=0.500*K-Q                                         | RKG00360
C      | | S=Y                                                 | RKG00370
C      | | Y=S+H                                               | RKG00380
C      | | H=Y-S                                               | RKG00390
C      | | Q=Q+3.000*R-0.500*K                                | RKG00400
C      | | X=X+0.500*H                                         | RKG00410
C      | | K=H*F(X,Y)                                          | RKG00420
C      | | R=C.29289321881345200*(K-Q)                       | RKG00430
C      | | S=Y                                                 | RKG00440
C      | | Y=S+H                                               | RKG00450
C      | | H=Y-S                                               | RKG00460
C      | | Q=Q+3.000*R-0.29289321881345200*K                | RKG00470
C      | | K=H*F(X,Y)                                          | RKG00480
C      | | R=1.70710678118654800*(K-Q)                       | RKG00490
C      | | S=Y                                                 | RKG00500
C      | | Y=S+H                                               | RKG00510
C      | | H=Y-S                                               | RKG00520
C      | | Q=Q+3.000*R-1.70710678118654800*K                | RKG00530
C      | | X=X+0.500*H                                         | RKG00540
C      | | K=H*F(X,Y)                                          | RKG00550
C      | | R=(K-2.000*Q)/6.000                                | RKG00560
C      | | S=Y                                                 | RKG00570
C      | | Y=S+H                                               | RKG00570
2      REAL*8 H,K,H*S,Q,X,Y,F
3      DATA G /0.000/
4      K=H*F(X,Y)
5      R=0.500*K-Q
6      S=Y
7      Y=S+H
8      H=Y-S
9      Q=Q+3.000*R-0.500*K
10     X=X+0.500*H
11     K=H*F(X,Y)
12     R=C.29289321881345200*(K-Q)
13     S=Y
14     Y=S+H
15     H=Y-S
16     Q=Q+3.000*R-0.29289321881345200*K
17     K=H*F(X,Y)
18     R=1.70710678118654800*(K-Q)
19     S=Y
20     Y=S+H
21     H=Y-S
22     Q=Q+3.000*R-1.70710678118654800*K
23     X=X+0.500*H
24     K=H*F(X,Y)
25     R=(K-2.000*Q)/6.000
26     S=Y
27     Y=S+H

```

```

ISN  ST-NO          SOURCE PROGRAM          SEQUENCE
28     H=Y-S                                                  RKG00580
29     Q=Q+3.000*R-0.500*K                                    RKG00590
30     RETURN                                                 RKG00600
31     END                                                     RKG00610

```

```

ISN  ST-NO          SOURCE PROGRAM          SEQUENCE
1      FUNCTION SEARCH (*WHAT)                    SEAU0010
C                                          SEAU0020
C      *PURPOSE  FUNCTION SEARCH FINDS THE APPROXIMATION VALUE  SEAU0030
C      |         FOR POSITION GUESS(=KK) AND THEN OBTAINS THE    SEAU0040
C      |         FUNCTION INTERPOLATE.                          SEAU0050
C      |         SEAU0060
2      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)                    SEAU0070
3      COMMON /TABLE/ NTABLE,MAXTAB,NSCAN,XYTABL(7000),SCAN(300), SEAU0080
C      * INDEX(300)                                           SEAU0090
C      |         SEAU0100
4      XGIVEN=DABS(*WHAT)                            SEAU0110
5      DO 10 I=2,NSCAN                                SEAU0120
6      IF (SCAN(I-1).LE.XGIVEN .AND. XGIVEN.LE.SCAN(I)) GO TO 20 SEAU0130
7      10 CONTINUE                                    SEAU0140
C      |         SEAU0150
C      | SEARCH FAILURE. OUT OF TABLE                      SEAU0160
C      | THE VALUE OF *XGIVEN EXCEEDS THE TABLE MAXIMUM.    SEAU0170
8      Y2=XGIVEN*XGIVEN                                SEAU0180
9      Y4=Y2*Y2                                        SEAU0190
10     Y6=Y4*Y2                                        SEAU0200
11     SEARCH=1.000*(1.000+3.000/(2.000*Y2))+15.000/(4.000*Y4)+ SEAU0210
C      * 105.000/(8.000*Y6))/(2.000*Y2)                   SEAU0220
12     GO TO 30                                       SEAU0230
C      |         SEAU0240
C      | SEARCH OK. GET INTERPOLATE                          SEAU0250
13     20 CONTINUE                                    SEAU0260
14     KS=INDEX(I)                                     SEAU0270
15     KK=INDEX(I)                                     SEAU0280
16     SEARCH=POLATE(XYTABL,XGIVEN,NTABLE,KS,KK,ILL) SEAU0290
17     30 CONTINUE                                    SEAU0300
C      |         SEAU0310
18     6000 FORMAT(10X,'XGIVEN=',F15.6,' POSITION GUESS=',I4,' FINAL POSITION=', SEAU0320
C      * I4,' SEARCH=',I4)                                SEAU0330
19     RETURN                                           SEAU0340
20     END                                             SEAU0350

```

ISN	ST-NO	SOURCE PROGRAM	SEQUENCE
1		SUBROUTINE SIGMA(I,NO)	SIG00010
2		IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)	SIG00020
3		COMMON /FORMOD/ NFORM,MAXFOR,SE(2000),SI(2000),SX(2000),SUM(2000)	SIG00030
4		COMMON /SIGMAD/ SIGMAE,SIGMAI,SIGMAS	SIG00040
5		REAL** SE,SI,SX,SUM	SIG00050
6		IF(II.EQ.1)SIGMAS=0.0D0	SIG00080
7		IF(II.EQ.1)SIGMAE=SX(1)*SE(1)	SIG00090
8		IF(II.EQ.1)SIGMAI=SX(1)*SI(1)	SIG00100
9		IF(II.EQ.2)SIGMAE=SIGMAE+SX(1)*SE(1)	SIG00110
10		IF(II.EQ.2)SIGMAI=SIGMAI+SX(1)*SI(1)	SIG00120
11		DO 10 I=2,NO	SIG00130
12		SIGMAE=SIGMAE+SE(I)*(SX(I)-SX(I-1))	SIG00140
13		SIGMAI=SIGMAI+SI(I)*(SX(I)-SX(I-1))	SIG00150
14	10	CONTINUE	SIG00160
15		IF(II.EQ.2) SIGMAS=SIGMAE+SIGMAI	SIG00170
16		RETURN	SIG00180
17		END	SIG00190

ISN	ST-NO	SOURCE PROGRAM	SEQUENCE
1		SUBROUTINE TABLE	TAB00010
		ABSTRACT	TAB00020
		-----	TAB00030
		SUBROUTINE TABLE GENERATES TABLES WHICH PROVIDE	TAB00040
		EXPONENTIAL INTEGRAL.	TAB00050
		-----	TAB00060
			TAB00070
			TAB00080
			TAB00090
			TAB00100
			TAB00110
			TAB00120
			TAB00130
			TAB00140
			TAB00150
			TAB00160
			TAB00170
			TAB00180
			TAB00190
			TAB00200
			TAB00210
			TAB00220
			TAB00230
			TAB00240
			TAB00250
			TAB00260
			TAB00270
			TAB00280
			TAB00290
			TAB00300
			TAB00310
			TAB00320
			TAB00330
			TAB00340
			TAB00350
			TAB00360
			TAB00370
			TAB00380
			TAB00390
			TAB00400
			TAB00410
			TAB00420
			TAB00430
			TAB00440
			TAB00450
			TAB00460
			TAB00470
			TAB00480
			TAB00490
			TAB00500
			TAB00510
			TAB00520
			TAB00530
			TAB00540
			TAB00550
			TAB00560
			TAB00570
			TAB00580
			TAB00590
			TAB00600
			TAB00610
			TAB00620
			TAB00630
			TAB00640
			TAB00650
			TAB00660
			TAB00670
			TAB00680
			TAB00690
			TAB00700
			TAB00710
			TAB00720
			TAB00730
			TAB00740
			TAB00750
			TAB00760
			TAB00770
			TAB00780
			TAB00790
			TAB00800
			TAB00810
			TAB00820
			TAB00830
			TAB00840
			TAB00850
			TAB00860
			TAB00870
			TAB00880
			TAB00890
			TAB00900
			TAB00910
			TAB00920
			TAB00930
			TAB00940
			TAB00950
			TAB00960
			TAB00970
			TAB00980
			TAB00990
			TAB01000
			TAB01010
			TAB01020
			TAB01030
			TAB01040
			TAB01050
			TAB01060
			TAB01070
			TAB01080
			TAB01090
			TAB01100
			TAB01110
			TAB01120
			TAB01130
			TAB01140
			TAB01150
			TAB01160
			TAB01170
			TAB01180
			TAB01190
			TAB01200
			TAB01210
			TAB01220
			TAB01230
			TAB01240
			TAB01250
			TAB01260
			TAB01270
			TAB01280
			TAB01290
			TAB01300
			TAB01310
			TAB01320
			TAB01330
			TAB01340
			TAB01350
			TAB01360
			TAB01370
			TAB01380
			TAB01390
			TAB01400
			TAB01410
			TAB01420
			TAB01430
			TAB01440
			TAB01450
			TAB01460
			TAB01470
			TAB01480
			TAB01490
			TAB01500
			TAB01510
			TAB01520
			TAB01530
			TAB01540
			TAB01550
			TAB01560
			TAB01570
			TAB01580
			TAB01590
			TAB01600
			TAB01610
			TAB01620
			TAB01630
			TAB01640
			TAB01650
			TAB01660
			TAB01670
			TAB01680
			TAB01690
			TAB01700
			TAB01710
			TAB01720
			TAB01730
			TAB01740
			TAB01750
			TAB01760
			TAB01770
			TAB01780
			TAB01790
			TAB01800
			TAB01810
			TAB01820
			TAB01830
			TAB01840
			TAB01850
			TAB01860
			TAB01870
			TAB01880
			TAB01890
			TAB01900
			TAB01910
			TAB01920
			TAB01930
			TAB01940
			TAB01950
			TAB01960
			TAB01970
			TAB01980
			TAB01990
			TAB02000
			TAB02010
			TAB02020
			TAB02030
			TAB02040
			TAB02050
			TAB02060
			TAB02070
			TAB02080
			TAB02090
			TAB02100
			TAB02110
			TAB02120
			TAB02130
			TAB02140
			TAB02150
			TAB02160
			TAB02170
			TAB02180
			TAB02190
			TAB02200
			TAB02210
			TAB02220
			TAB02230
			TAB02240
			TAB02250
			TAB02260
			TAB02270
			TAB02280
			TAB02290
			TAB02300
			TAB02310
			TAB02320
			TAB02330
			TAB02340
			TAB02350
			TAB02360
			TAB02370
			TAB02380
			TAB02390
			TAB02400
			TAB02410
			TAB02420
			TAB02430
			TAB02440
			TAB02450
			TAB02460
			TAB02470
			TAB02480
			TAB02490
			TAB02500
			TAB02510
			TAB02520
			TAB02530
			TAB02540
			TAB02550
			TAB02560
			TAB02570
			TAB02580
			TAB02590
			TAB02600
			TAB02610
			TAB02620
			TAB02630
			TAB02640
			TAB02650
			TAB02660
			TAB02670
			TAB02680
			TAB02690
			TAB02700
			TAB02710
			TAB02720
			TAB02730
			TAB02740
			TAB02750
			TAB02760
			TAB02770
			TAB02780
			TAB02790
			TAB02800
			TAB02810
			TAB02820
			TAB02830
			TAB02840
			TAB02850
			TAB02860
			TAB02870
			TAB02880
			TAB02890
			TAB02900
			TAB02910
			TAB02920
			TAB02930
			TAB02940
			TAB02950
			TAB02960
			TAB02970
			TAB02980
			TAB02990
			TAB03000
			TAB03010
			TAB03020
			TAB03030
			TAB03040
			TAB03050
			TAB03060
			TAB03070
			TAB03080
			TAB03090
			TAB03100
			TAB03110
			TAB03120
			TAB03130
			TAB03140
			TAB03150
			TAB03160
			TAB03170
			TAB03180
			TAB03190
			TAB03200
			TAB03210
			TAB03220
			TAB03230
			TAB03240
			TAB03250
			TAB03260
			TAB03270
			TAB03280
			TAB03290
			TAB03300
			TAB03310
			TAB03320
			TAB03330
			TAB03340
			TAB03350
			TAB03360
			TAB03370
			TAB03380
			TAB03390
			TAB03400
			TAB03410
			TAB03420
			TAB03430
			TAB03440
			TAB03450
			TAB03460
			TAB03470
			TAB03480
			TAB03490
			TAB03500
			TAB03510
			TAB03520
			TAB03530
			TAB03540
			TAB03550
			TAB03560
			TAB03570
			TAB03580
			TAB03590
			TAB03600
			TAB03610
			TAB03620
			TAB03630
			TAB03640
			TAB03650
			TAB03660
			TAB03670
			TAB03680
			TAB03690
			TAB03700
			TAB03710
			TAB03720
			TAB03730
			TAB03740
			TAB03750
			TAB03760
			TAB03770
			TAB03780
			TAB03790
			TAB03800
			TAB03810
			TAB03820
			TAB03830
			TAB03840