

집속된 광분해 옥소레이저에 의한 플라즈마로부터 방출되는
연속 X-선 스펙트럼 분석과 전자온도 결정

Analysis of Continuum X-Ray Spectrum and Determination of Electron
Temperature from Iodine Photodissociation Laser Produced Plasma

김 동 환, 김 남 성, 이 상 수
한국 과학 기술원 물리학과

ABSTRACT

1-GW Iodine Photodissociation Laser ($\lambda=1.315\mu\text{m}$) is focused to generate the continuum X-ray radiation at titanium ($z=22$) target. A piece of aluminum(360\AA)-mylar($8\mu\text{m}$) film is used to isolate the soft X-ray radiation emitted. Convex-curved mica crystal spectrometer is used to obtain the soft X-ray spectra from the laser titanium target plasma and the slope of continuum X-ray spectra are found to show two different electron effective temperatures, 0.11KeV and 7.1KeV . We compare the two temperature result with the foil absorption method.

1. 서 론

고출력 레이저 광속을 초점으로 집속시킴으로써 초점에 이루어지는 높은 전기장의 세기로 말미암아 고온, 고밀도의 플라즈마가 형성된다. 본 연구에서 사용한 집속된 레이저 출력 $1.2 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ 에 대해 형성되는 전기장의 세기와 광압은 각각 $7.0 \times 10^7 \text{ (V/cm)}$, $4.3 \times 10^3 \text{ atm}$ 이다. 이와 같이 강한 전기장과 광압은 레이저 플라즈마의 여러가지 복잡한 비선형 현상들의 원인이 된다.

레이저 플라즈마의 형성 초기 단계는 금속 원자의 이온화로 말미암아 발생된 자유전자들이 집속된 레이저 빔의 강한 전기장에 의해 가속된 후 주위의 중성 원자나 이온들과 충돌하여 연쇄적인 이온화를 일으킨다. 이때의 플라즈마는 inverse bremsstrahlung 과정에 의해 레이저 에너지를 흡

수한다(1).

이와 같이 높은 온도로 가열된 레이저 플라즈마로부터 방출되는 전자기 복사는 전자의 궤도 변화의 종류에 따라 크게 세가지로 나뉘어진다. 즉 전자의 구속된 에너지 준위사이에서의 속박-속박 전이에 의한 선스펙트럼과 자유전자의 자유-속박 전이에 의한 재결합 복사, 자유-자유 전이에 의한 bremsstrahlung 복사가 있다.

플라즈마 내부상태는 고온, 고밀도이므로 플라즈마로부터 방출되는 스펙트럼은 주로 soft X-선 영역에 분포되기 때문에, 플라즈마 내부 온도는 soft X-선 영역의 연속 스펙트럼의 기울기나 foil-absorption 방법(2) 등으로 측정한다.

본 논문에서는 soft X-선 영역에서 연속 스펙트럼의 기울기 측정에 의한 전자온도 결정과 foil absorption 방법에 의한 전자온도 결정 방법을 논하고 각각의 결과를 비교하였다.

2. X-선 필름을 이용한 레이저 플라즈마의 연속 스펙트럼 기록과 전자 온도 결정

플라즈마로부터 방출되는 연속 스펙트럼의 단위 입체각당 방출되는 X-선의 광원 세기 $W(E)dE$ 와 흡수계수가 $\mu(E)$ 이고 두께가 t 인 X-선 필터를 투과한 뒤의 세기 $S(E)dE$ 는 다음과 같다.

$$S(E)dE = \Omega W(E) e^{-\mu(E)t} dE \quad (2-1)$$

$$W(E)dE = AT_e^{-1/2} e^{-E/T_e} dE \quad [\text{erg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sterad}^{-1}] \quad (2-2)$$

여기서 T_e 는 전자 온도 [eV] 이며 A 는 cgs 단위로 표현할때 다음과 같다.

$$A = 7.58 \times 10^{-15} \times n_e^2 \cdot V \cdot \left\{ \sum_p f_p Z_p^2 + \sum_p f_p (\chi_H/T_e) \cdot \sum (\chi_{p,n}/\chi_H)^2 \times (\xi_n/n) e^{\chi_{p,n}/T_e} \right\} \quad (2-3)$$

따라서, (2-2) 식에서

$$\ln[W(E)] = C_1 - E/T_e, \quad C_1 = \ln[AT_e^{-1/2}] \quad (2-4)$$

이므로, 플라즈마의 X-선 광자 에너지와 광원의 스펙트럼 세기와의 semi-log관계에서 $\ln[W(E)]$ 와 광자 에너지와는 $(-1/T_e)$ 의 기울기를 가지는 직선 관계식이 존재한다.

따라서 레이저 플라즈마의 스펙트럼을 얻으면 광자 에너지와의 관계식으로써 플라즈마의 전자 온도를 결정할 수 있다.

(2-1) 식과 (2-2) 식에서;

$$S(E) = \Omega W(E) \cdot T(E) \quad (2-5)$$

의 관계가 있으므로 $W(E)$ 는 X-선 필름에 노출된 연속 스펙트럼의 세기 $S(E)$ 를 X-선 필터의 투과도 $T(E) [= \exp(-E/T_e)]$ 로 나누어 주면 얻어질 수 있다. 여기서 $W(E)$ 는 절대적인 세기는 필요치 않으며 단지 상대적인 세기의 크기만 알면 된다.

일반적으로 X-선 필름에 기록된 스펙트럼의 투과도 T_f 로부터 $S(E)$ 를 알리면 X-선 필름의 파장에 따른 감마(γ) 값을 알아야 하며, 이는 X-선 필터의 두께에 따른 필름의 노출 변화량으로부터 다음과 같이 표현된다.

$$S(E) = A \cdot T_f^{-1/\gamma} \quad (2-6)$$

$$\gamma = |D_n - D_{n-1}| / |\log(E_n) - \log(E_{n-1})| \quad (2-7)$$

여기서 D_n 은 X-선 필터 n 장을 투과한 뒤 현상된 X-선 필름의 photographic density로서 $D_n = \log(1/T_{f,n})$ 이다. 그런데, (2-6)식에서 X-선 광자 에너지에 따른 D_n 은 측정이 실험적으로 매우 어려우며, X-선 필터에 의한 투과 대역폭이 비교적 좁은 영역($0 < \lambda < 20 \text{ \AA}$)이므로 레이저 플라즈마 광원의 광자 에너지에 대해 적분된 세기로 근사하였다. 그림(1)의 실험 결과에서 $(D_n - D_{n-1}) = \log(T_{f,n}/T_{f,n-1})$ 이 0.185로 거의 일정한 값을 가지므로 (2-6)에서 X-선 필름의 감마값은 다음과 같다.

$$\gamma(E) = \frac{0.185}{|\log(E_n/E_{n-1})|} \quad (2-8)$$

그런데 입사 에너지의 시간폭을 τ 라 할때,

$$\log(E_n) = \log[S(E) \cdot \exp(-\alpha_E \cdot n) \cdot \tau] \quad (2-9)$$

이므로, (2-7)식은

$$\gamma(E) = \frac{\log(T_{f,n}/T_{f,n-1})}{0.434 \cdot \alpha_\lambda} \quad (2-10)$$

이다.

따라서, 레이저 플라즈마의 광원 세기와의 X-선 광자와의 관계 (2-4), (2-5), (2-10)식으로부터 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \ln[W(\nu)] &= \ln[A \cdot T_f^{-1/\gamma} \cdot \exp(\alpha_E)] \\ &= C_1 - h\nu/T_e \\ , \gamma(E) &= \log(T_{f,n}/T_{f,n-1}) / (0.434 \cdot \alpha_\lambda) \end{aligned} \quad (2-11)$$

3. Foil Absorption 방법에 의한 플라즈마 온도 측정

JAHODA, et al. (1960)에 의해 처음으로 플라즈마 온도를 결정하는데 사용한 Foil Absorption 방법은 근본적으로 플라즈마의 스펙트럼이 연속스펙트럼만 가짐을 가정한 뒤에 이루어지는 방법이며 X-선 필터로 사용되는 금속 포일(Be, Al, ..)의 두께와 흡수계수의 변화에 의해 필터를 투과한 X-선 세기의 상대적 크기의 비율에서 플라즈마 온도를 결정한다. [2] 일반적으로 금속 포일의 X-선 흡수 계수는 지수법칙에 의해

$$\mu(E) = aE^{-n}, \quad E_u > E > E_L \quad (3-1)$$

로 표현되며 (2-1) 식에서, 측정되는 전체 X-선 세기는 다음과 같다.

$$S(E_c) = A\Omega T_e^{-1/2} \int_0^{\infty} \exp(-E/T_e - atE^{-n}) dE \quad (3-2)$$

X-선 필터의 cutoff 광자 에너지를 E_c 로 정의하면 $E_c = (at)^{1/n}$ 로 표현된다. 따라서 (3-2) 식은

$$S(E_c) = A\Omega T_e^{-1/2} \int_0^{\infty} \exp\left\{-\left(E/T_e\right) - \left(E_c/E\right)^n\right\} dE \quad (3-3)$$

이며, 위 적분은 $E=0$ 에서 특이점을 가지므로 $f \ll f$ 을 만족하는 ϵ 을 택해 적분한다. ϵ 은 $T_e < E_c$ 이면 $T_e/2$ 로, $T_e > E_c$ 이면 $E_c/2$ 로 택한다. (3) 본 연구에서는 X-선 필터의 두께를 장수를 변화시켜 조절하였으므로 1장을 투과한 X-선 세기를 기준으로 각 장에 대해 상대적인 값을 측정하였다. 따라서 (3-3)식에서 N 장에 대한 X-선 세기의 상대적 크기 $R(N)$ 은 다음과 같다.

$$R(N) = \frac{\int_{\epsilon}^{\infty} \exp\left\{-\left(E/T_e\right) - \left(E_c(N)/E\right)^n\right\} dE}{\int_{\epsilon}^{\infty} \exp\left\{-\left(E/T_e\right) - \left(E_c(1)/E\right)^n\right\} dE} \quad (3-4)$$

측정된 상대적 X-선 세기를 $D(N)$ 이라 두면 플라즈마 온도는 $\sum (R(N) - D(N))^2 = \text{Minimum}$ 이 되는 T_e 를 구하면 된다.

따라서 플라즈마 온도를 구하는 문제는 비선형 least square 방법으로 귀착된다. 즉,

$$\frac{\partial}{\partial T_e} \sum_N \left[R(N, T_e) - D(N) \right]^2 = 0 \quad (3-5)$$

(3-4) 은 T_e 의 비선형 방정식이 되므로 직접 푸는 방법은 없고 T_e 를

반복 계산에 의해 $\sum (R(N, T_e) - D(N))^2$ 이 최소가 되는 T_e 를 찾아야 한다. T_e 를 찾기 위해 반복 계산중 $T_e + \Delta \rightarrow T_e$ 에서 증가분 Δ 는 (3-4) 식에서 다음과 같다.

$$\Delta = \frac{\sum_{j=1}^N [D_j - R_j^0(T_e)] \cdot \left(\frac{\partial R_j}{\partial T_e} \right)_0}{\sum_{j=1}^N \left(\frac{\partial R_j}{\partial T_e} \right)_0^2} \quad (3-6)$$

그림 5 에서 Ti(Z=22)에 대한 X-선 필터의 장수변화에 따른 X-선 세기 비율을 비선형 least square 방법으로 추적하여 $T_e = 3.27$ [KeV] 을 얻었으며 이때 least square error는 $\sum \delta^2 = 8.88 \times 10^{-3}$ 이다.

Foil Absorption 방법은 다중 온도를 갖는 플라즈마 온도 측정에도 응용시킬수 있다. 만일 레이저 플라즈마내의 전자들이 Maxwell 속도 분포를 하지 않는 경우 이때는 단일 플라즈마 온도는 정의될수 없으며 X-선 스펙트럼은 다중 온도에 의한 스펙트럼들의 중첩으로 생각하여 여러개의 변수를 가지는 비선형 least square 방법으로 접근할수 있다.

다중 온도를 가지는 경우 상대적인 X-선 세기는,

$$R_i = \frac{\sum_q A_q T_q^{-1/2} \int_{\epsilon}^{\infty} \exp \left\{ -(E/T_e) - (EC(N)/E)^n \right\} dE}{\sum_q A_q T_q^{-1/2} \int_{\epsilon}^{\infty} \exp \left\{ -(E/T_q) - (EC(1)/E)^n \right\} dE} \quad (3-7)$$

이다.

여기서 A_q 는 T_q 와 마찬가지로 결정하여야 할 독립 변수로 취급하면 (A_q, T_q)는 least square 조건에서

$$\frac{\partial}{\partial \beta_q} \sum_i \left(R_i(\beta_q) - D_i \right)^2 = 0 \quad (3-8)$$

여기서 $\beta_q = A_1, A_2, \dots, T_1, T_2, \dots$ 을 나타낸다.

와 마찬가지로, 각 성분의 증가분 Δ 는 다음과 같다.

$$\sum_{i=1}^N \Delta_i \left\{ \sum_{j=1}^N \left[\left(\frac{\partial R_j}{\partial \beta_i} \right)_0 \cdot \left(\frac{\partial R_j}{\partial \beta_k} \right) \right] \right\} = \sum_{j=1}^N [D_j - R_j^0] \cdot \left(\frac{\partial R_j}{\partial \beta_k} \right) \quad (3-9)$$

따라서 (3-8)은 N 차 행렬 방정식과 같다. 즉, $A \cdot X = B$ 의 해 X 로부터 $A_1 = A_1 + \Delta_1$, $A_2 = A_2 + \Delta_2$, ..., $T_1 = T_1 + \Delta_1$, ... 로 반복 계산하여 다중 플라즈마 온도 T_i ($i=1,2,\dots$) 를 구할 수 있다. 그림 6 에서 두 전자 온도 (T_1, T_2) 를 가정하고 상대적인 X-선 세기 비율에 적용하였다.

두 전자 온도 가정에 의한 least square fitting 결과에서 $T_1 = 0.11$ [KeV], $T_2 = 7.0$ [KeV]이며, 단일 전자 온도에 비해 보다 더 적은 least square error 를 주므로 제2장에서 논의한 X-선 스펙트럼의 두 기울기 (두 전자 온도) 결과를 지지해 준다.

4. 결 론

Ti($Z=22$) 레이저 플라즈마 온도를 X-선 연속 스펙트럼에 의한 측정 방법과 Foil Absorption 방법에 의한 측정을 비교하고, 레이저 플라즈마의 전자 온도가 두개가 존재함을 두 결과 분석에서 보았다.

이는 플라즈마 내에서 레이저 에너지 흡수에 비선형 효과가 있음을 나타내 주며, 두 가지 성분의 전자 집단이 존재함을 시사한다.

일반적으로 플라즈마는 온도와 밀도 조건에 따라 충돌 현상 (collision dominative) 과 집단 현상 (collective behavior) 을 동시에 가지므로 [4] 입사 레이저 에너지 세기의 변화에 따른 온도 변화를 측정하면 플라즈마의 레이저 에너지 흡수 기구에 대해 많은 정보를 얻을 것으로 기대된다.

REFERENCES

- [1] H.Motz, 'The Physics of Laser Fusion', (Academic Press, London, 1979) pp.120-144.
- [2] F.C.Jahoda, et al., Phys.Rev., Vol.119,843(1960).
- [3] Tt.P.Donaldson, Plasma Physics, Vol.20,1279(1978).
- [4] C.Yamanaka, et al., Phys.Rev.A6, 2335(1972).

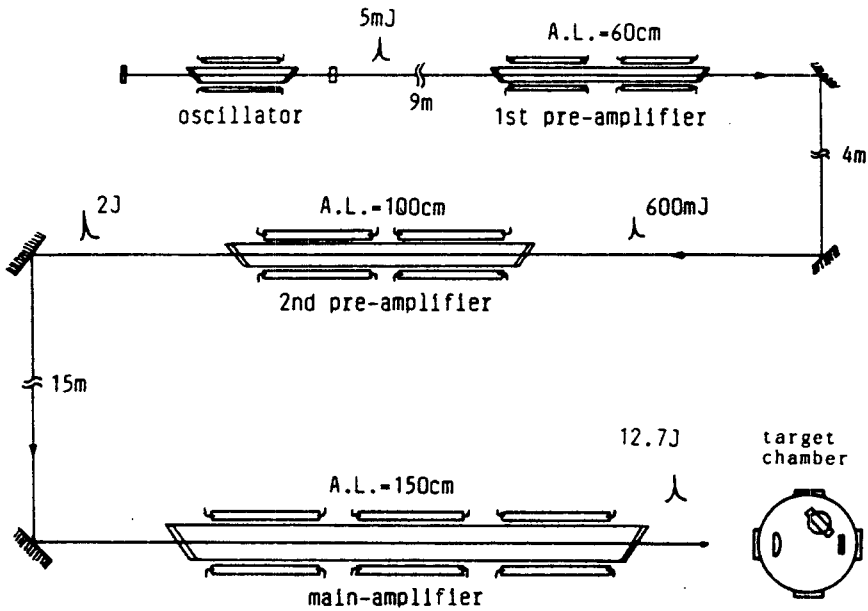


Fig.1 Schematic diagram of iodine photodissociation laser and target chamber. The target chamber includes focusing lens (F/2), titanium target and mica crystal spectrometer for X-ray diagnostics.

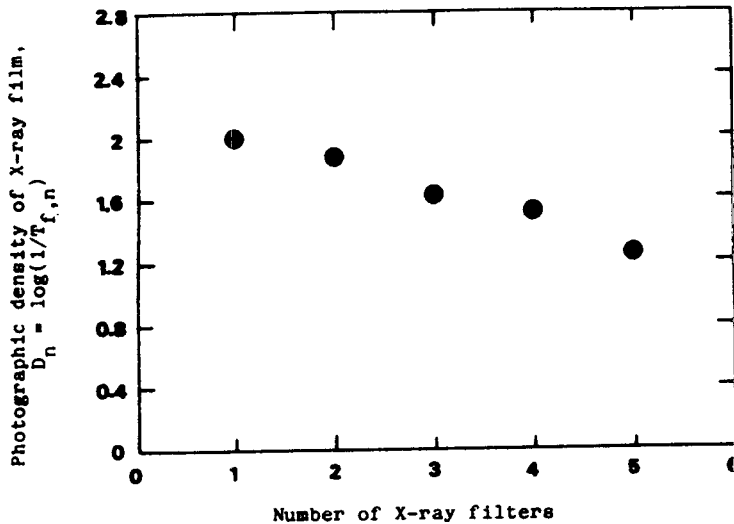


Fig.2 The measured Photographic density of X-ray film vs. number of X-ray filters [mylar(8um)+Al(360A)] for radiation from laser Ti (Z=22) target plasma.

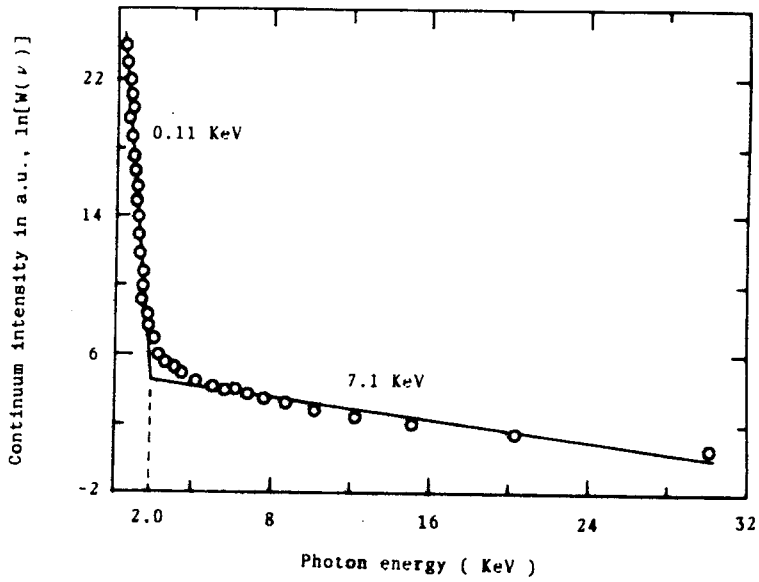


Fig.3 Two slopes give electron temperatures, 0.11 KeV and 7.1 KeV for laser T1 (Z=22) target plasma.

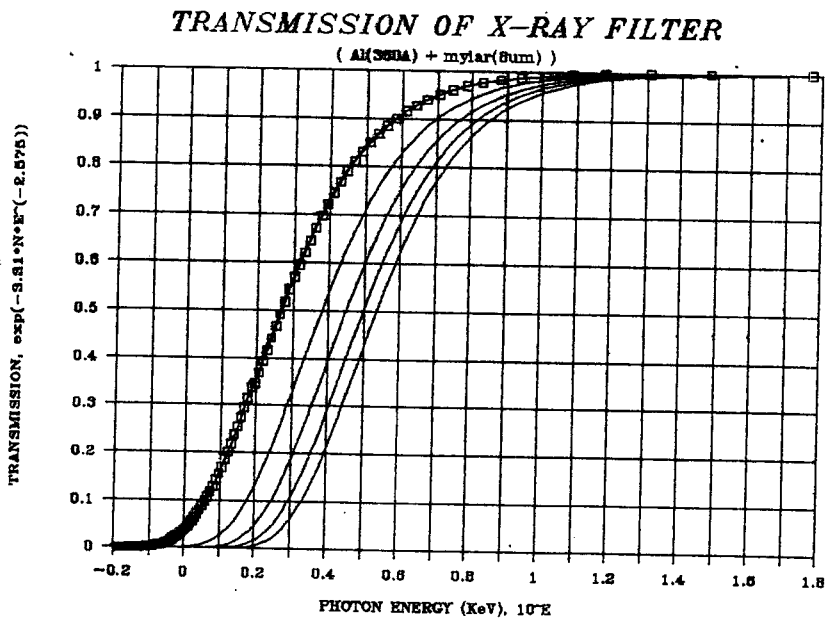


Fig.4 Transmission of X-ray according to the number of filters vs. X-ray energy.

ESTIMATION OF PLASMA TEMPERATURE (TI(Z=22) TARGET)

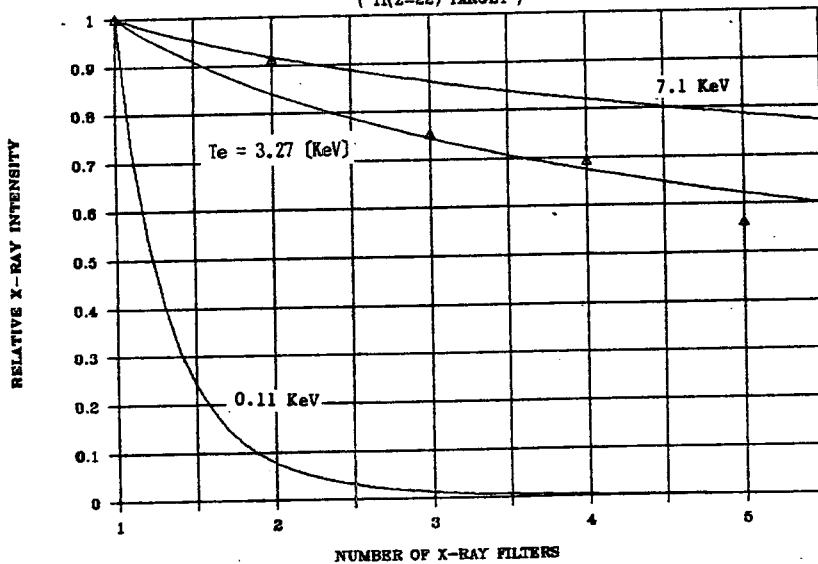


Fig.5 Relative X-ray intensity transmitted through different foil thickness (number of X-ray filters) assumed single plasma temperature.

ESTIMATION OF TWO TEMPERATURES (TI(Z=22) TARGET)

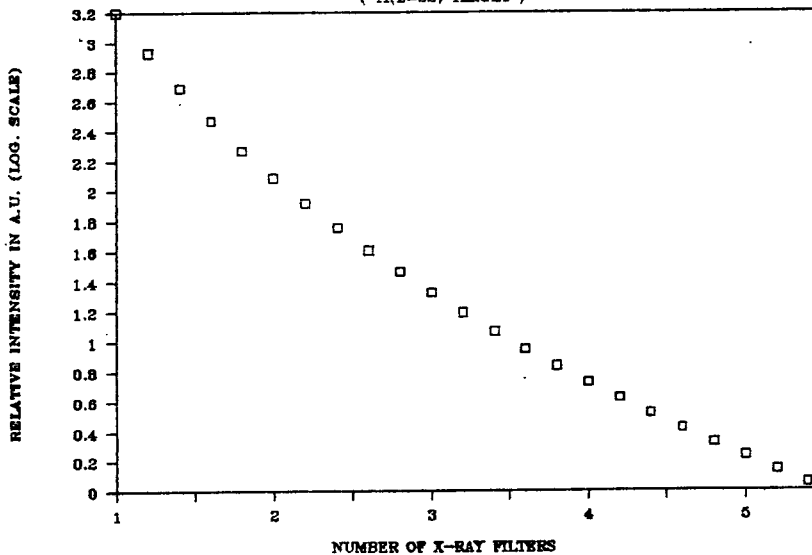


Fig.6 Theoretical relative X-ray intensity transmitted through different foil thickness assumed two temperatures (T 1 =0.11 KeV, T 2 =7.0 KeV).