



核融合反応中性子を用いた フェルミ縮退プラズマ診断法の開発

阪大レーザー研

渡利 威士

発表のアウトライン



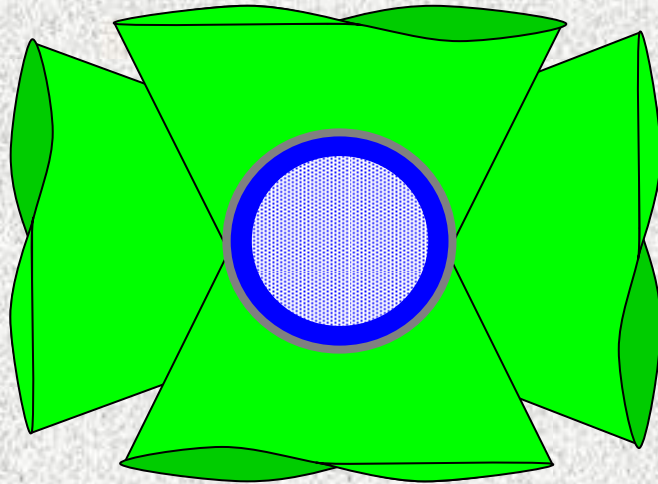
- ・核融合反応中性子を用いたフェルミ縮退プラズマ診断法の原理
- ・実験方法
- ・実験結果
- ・今後の展開

レーザー核融合実験での生成中性子

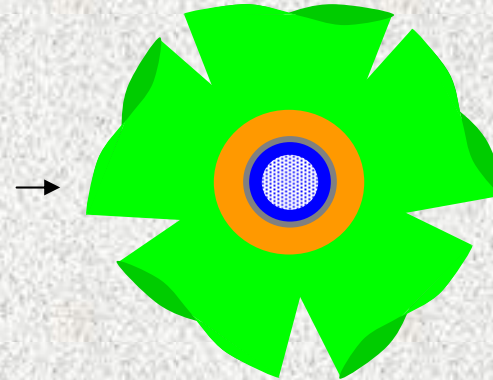


レーザー核融合

レーザー照射



爆縮



中心点火

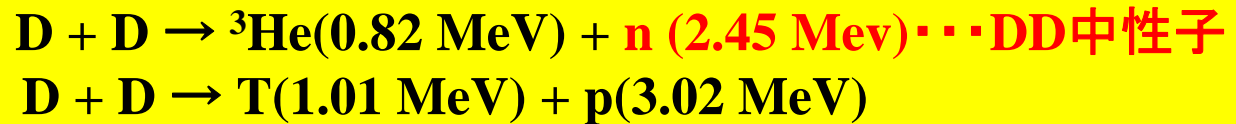
燃焼



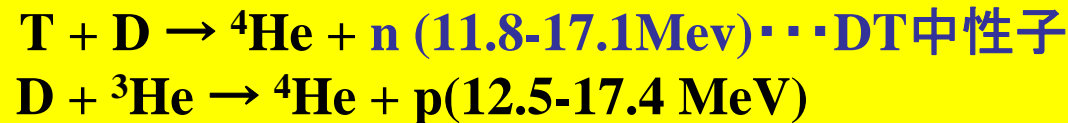
ターゲットに重水素燃料を用いた時、
圧縮されたコアでは以下のような核融合反応が起こっている。



1次反応



2次反応



DT中性子数 / DD中性子数 の中性子イールド比を2次核融合反応率と呼ぶ。

高密度プラズマ中での電子系のフェルミ縮退



E_F は電子のフェルミエネルギーであり次の式で定義される。

$$E_F \equiv \frac{(h/2\pi)^2}{2m_e} (3\pi^2 n_e)^{2/3}$$

n_e ; 電子密度
 m_e ; 電子質量

一方、電子の熱エネルギーは $k_B T_e$ で表される。

k_B ; ボルツマン定数
 T_e ; 電子温度

従って、高密度の電子系では

$$E_F \equiv \frac{(h/2\pi)^2}{2m_e} (3\pi^2 n_e)^{2/3} > k_B T_e$$

となり、フェルミ統計の効果が重要になってくると考えられる。

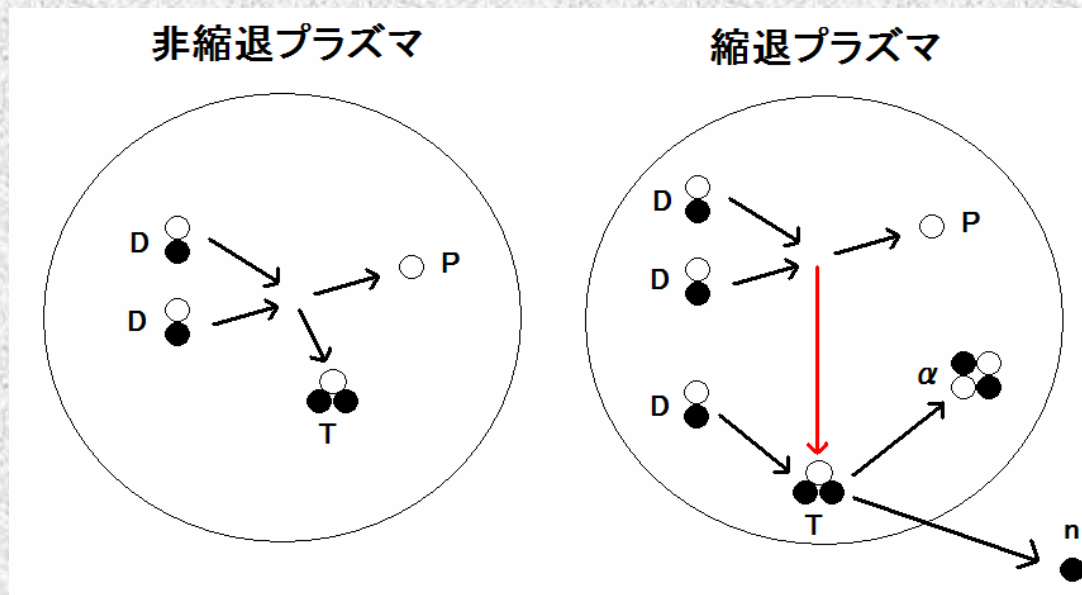
このフェルミ縮退の度合いを表す指標として E_F と $k_B T_e$ の比を縮退度として定義した。

$$\text{プラズマのフェルミ縮退度} : \Theta \equiv \frac{k_B T_e}{E_F}$$

フェルミ縮退プラズマ中での2次核融合反応率



縮退したプラズマ中では電子の許容エネルギー遷移が制限されるため、荷電粒子の阻止能が低下し、飛程が伸張すると考えられる。



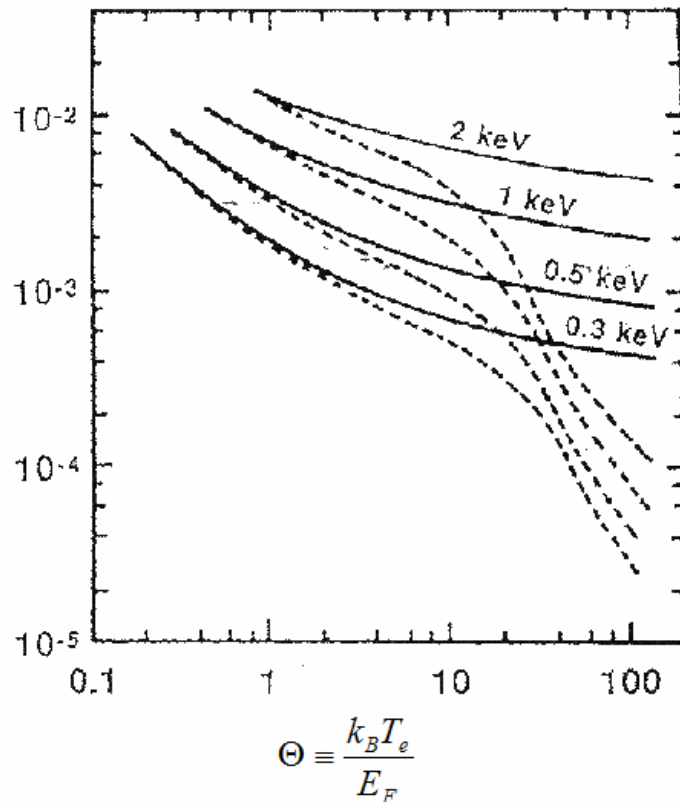
このため2次核融合反応を起こすことなく止まっていたトリチウムも、2次核融合反応を起こしてDT中性子を生成できるようになる。
つまり、

縮退したプラズマ中では2次核融合反応率が上昇する

2次核融合反応率上昇の理論モデル



中性子イールド比



実線は無限大のプラズマを、
点線は残留質量 2.5×10^{-6} g を
仮定したモデルである。

左図は縮退度と2次核融合反応率の関係を異なるいくつかのプラズマ電子温度について示したモデルである。

プラズマが縮退状態に近づくにつれ
2次核融合反応率が上昇していくのが
見て取れる。

逆に、

このモデルを用いて2次核融合反応率と
電子温度がわかれば、プラズマの縮退度
及び密度を求めることができる。

本計測法における開発項目



測定項目

・1次、2次反応中性子発生数の測定

————→ 多チャンネル型中性子スペクトロメーター(MANDALA)とカレントモード検出器による中性子計測。

・温度計測

————→ X線絶対値分光計測による電子温度の測定。

理論モデル

・縮退効果を含んだプラズマ中のトリチウムの阻止能の導出

————→ 石崎らによって行われた理論計算を用いた。
(石崎 龍一 修士論文 1989年)

爆縮実験においてプラズマの縮退度と密度の評価を行った。



実験設定

・6 kJ レーザー爆縮

12 beams, 500 J/beam 集光条件 $d/R = -5$

ターゲット

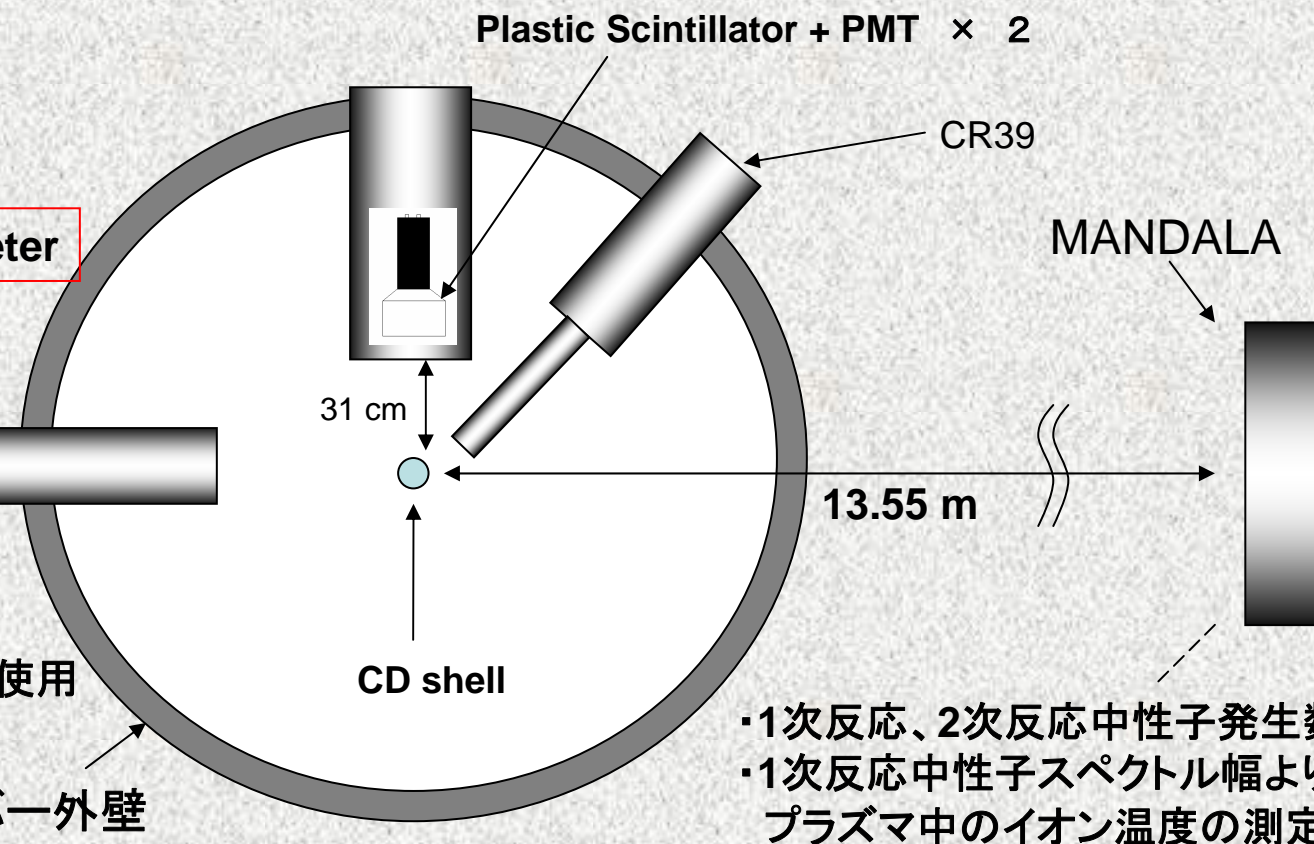
・重水素化プラスチックシェルターゲット (CDシェルターゲット)

計測器の配置

x-ray spectrometer

電子温度計測に使用

真空チャンバー外壁

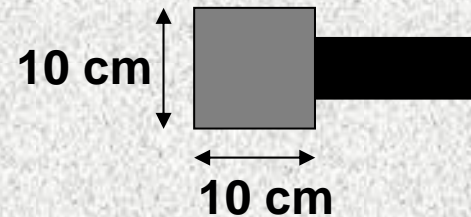


- ・1次反応、2次反応中性子発生数の測定
- ・1次反応中性子スペクトル幅よりプラズマ中のイオン温度の測定

MANDALAとは



Multi channel neutron spectrometer MANDALA



Plastic Scintillator + PMT × 842 個

前面には γ 線シールド用に4 cm の鉛板を設置

チャンバー中心からの距離 13.55 m

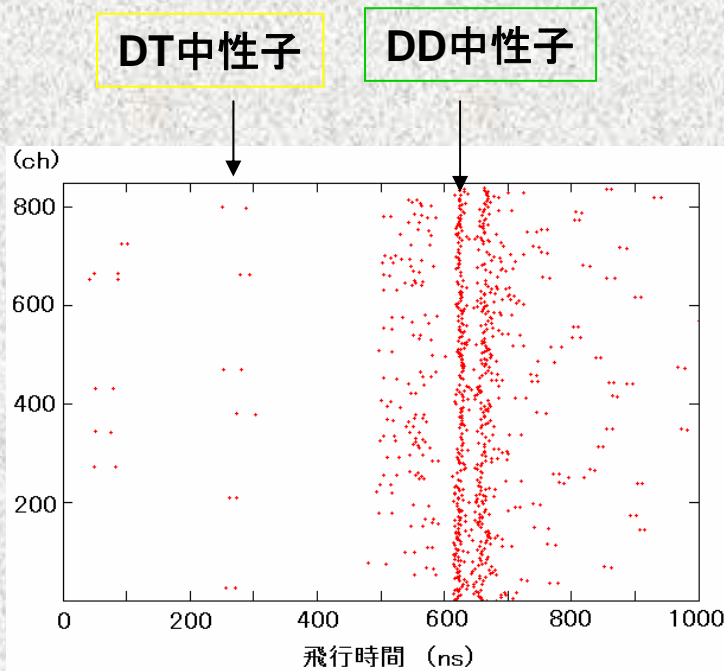
MANDALAで得られた中性子信号



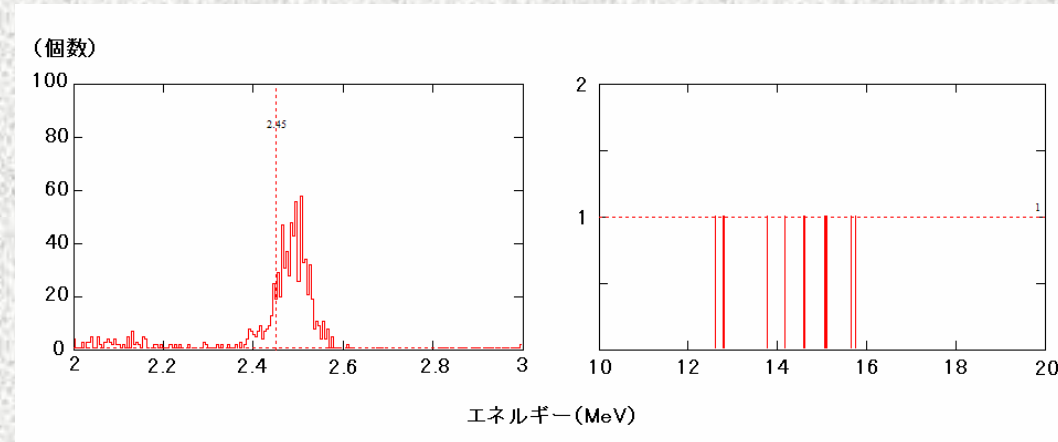
MANDALA本体はターゲットから13.55 m離れており、またレーザー核融合における核反応の時間スケールは数10 ps と非常にパルスのため、DD、DT中性子の速度差より飛行時間で弁別することが可能である。

DD中性子の飛行時間 625 ns

DT中性子の飛行時間 263 ns



生データよりDD、DT中性子それぞれのエネルギースペクトルを得ることができる。



MANDALAの生データ

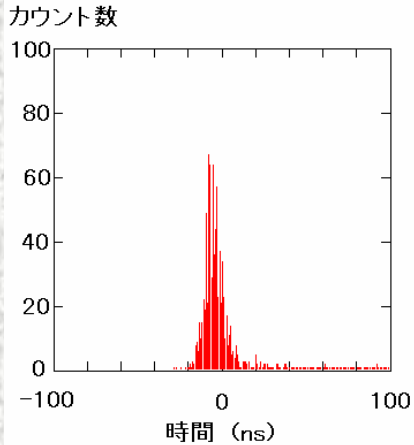
$$Y_{DD} = 3.0 \times 10^6$$

$$Y_{DT} = 9.5 \times 10^3$$

MANDALAで得た中性子スペクトルの解析法



DD中性子スペクトル



MANDALAは1度中性子を検出すると20 ns 程度の不感時間がある。したがって、同じエネルギー領域の中性子は原則的に1つしか検出できない。このため、中性子検出数が増加すると検出可能なチャンネル数が減って検出効率の低下を引き起こす。このため左図のスペクトルの幅をそのまま利用することはできない。

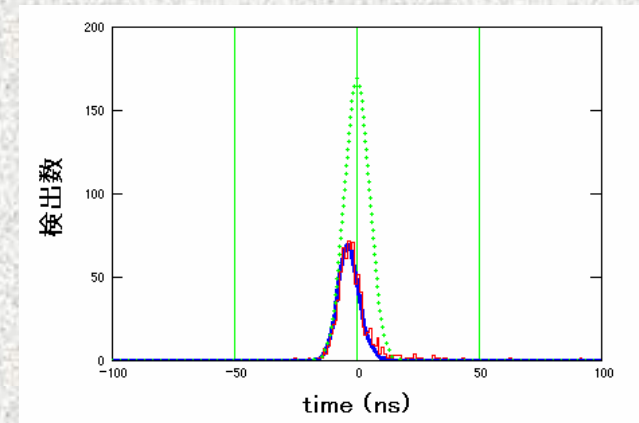
本実験では上の中性子スペクトルを、検出効率の低下も考慮した first-hit 関数でフィッティングすることで、真のスペクトル幅を求め中性子イールドを求めた。

First-hit 関数は次のようなものである

$$F(t) = \frac{A \cdot \alpha}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot \exp \left[-\alpha \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{t}{\sqrt{2} \cdot \sigma} \right) \right) \right\} \right] \cdot \exp \left(-\frac{t^2}{2 \cdot \sigma^2} \right)$$

α ; 検出器1個が検出する中性子数の期待値
 σ ; 検出効率の低下が無いとした時の本来の中性子スペクトル時間広がり標準偏差
 t ; 2.45MeVの中性子が検出器に入射する時の時刻を0とした時の中性子検出時刻

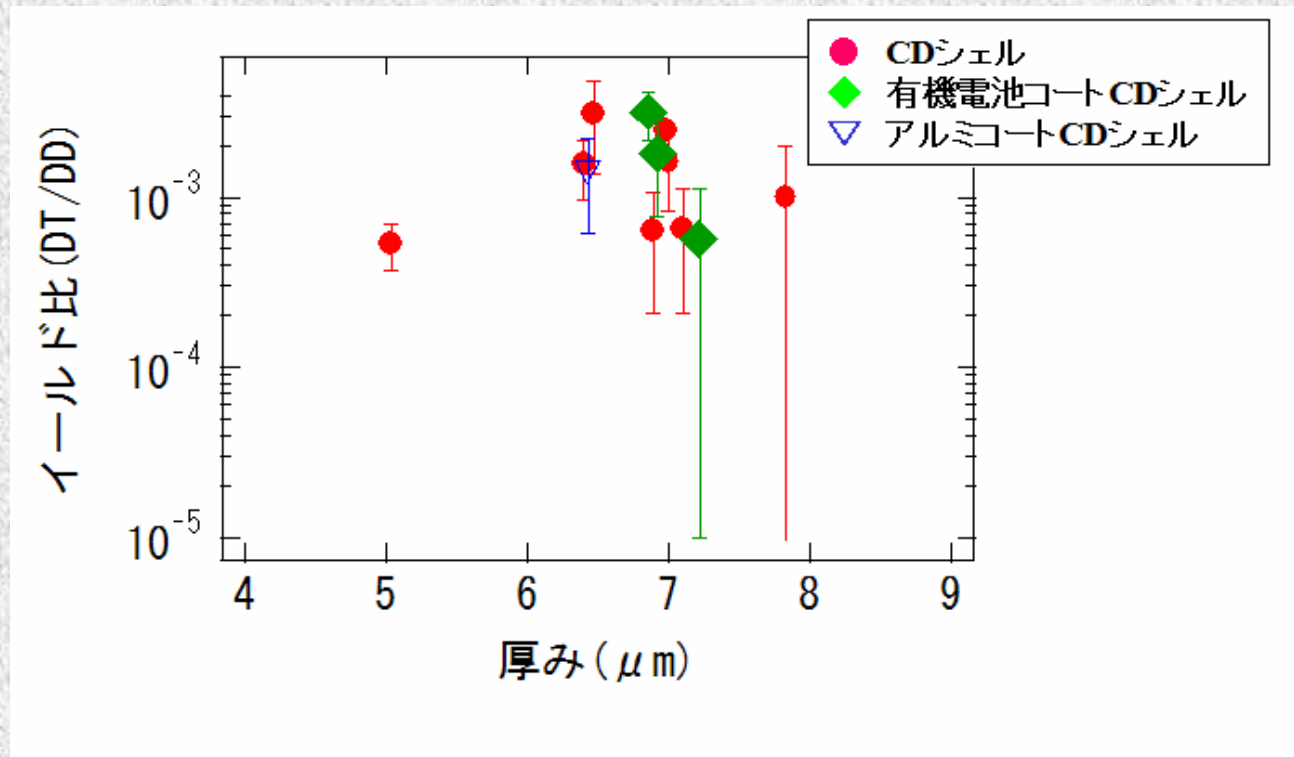
フィッティングの一例





2次反応中性子比の測定結果

計測した1次反応中性子発生数と2次反応中性子発生数の比をとることで2次核融合反応率を求めた。ターゲットの厚みを変化させ、もっとも2次反応中性子比が大きくなるシェル厚を探した。本実験ではシェル厚7 μm 付近で最も大きな中性子比が得られた。



この2次反応中性子比と、X線分光計測によって得たコア領域のプラズマ電子温度から爆縮プラズマの縮退度及び密度を評価した。

X線スペクトル絶対分光を用いたプラズマ温度計測



X線スペクトル絶対分光を用いた爆縮プラズマ計測ではプラズマの最大圧縮時の電子温度及び密度を測定することができる。

本実験では、プラズマの縮退度を評価する際の温度としてX線スペクトル絶対分光を用いた爆縮プラズマ計測によって得られた電子温度を縮退度を評価する際に用い、爆縮プラズマ中で制動放射によって発生する連続X線のスペクトル式は次のようになる、

$$J_{\nu} d\nu = \frac{32\pi}{3} \left(\frac{2\pi}{3mkT} \right)^{1/2} \frac{Z^2 e^6}{mc^3} N_+ N_e \exp\left(\frac{-h\nu}{kT} \right) d\nu$$

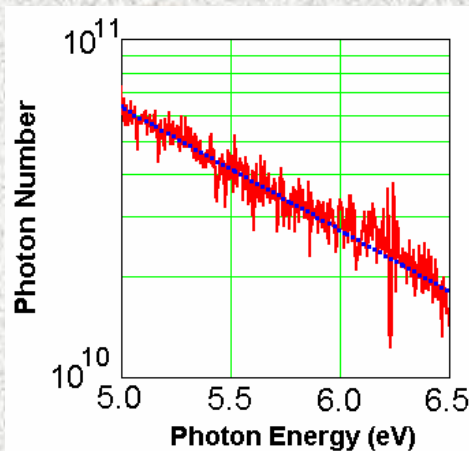
Z: 原子番号
m: 電子質量

$N_+ = ZN_e$ として、未知の物理量は2つである。

空間分解した分光計測を行い、**スペクトルの傾き**からコア領域の**温度**がでる。

また**検出器の絶対値校正**を行うことでコア領域の**プラズマ密度**を得ることができる。

X線分光器によって得られたスペクトル

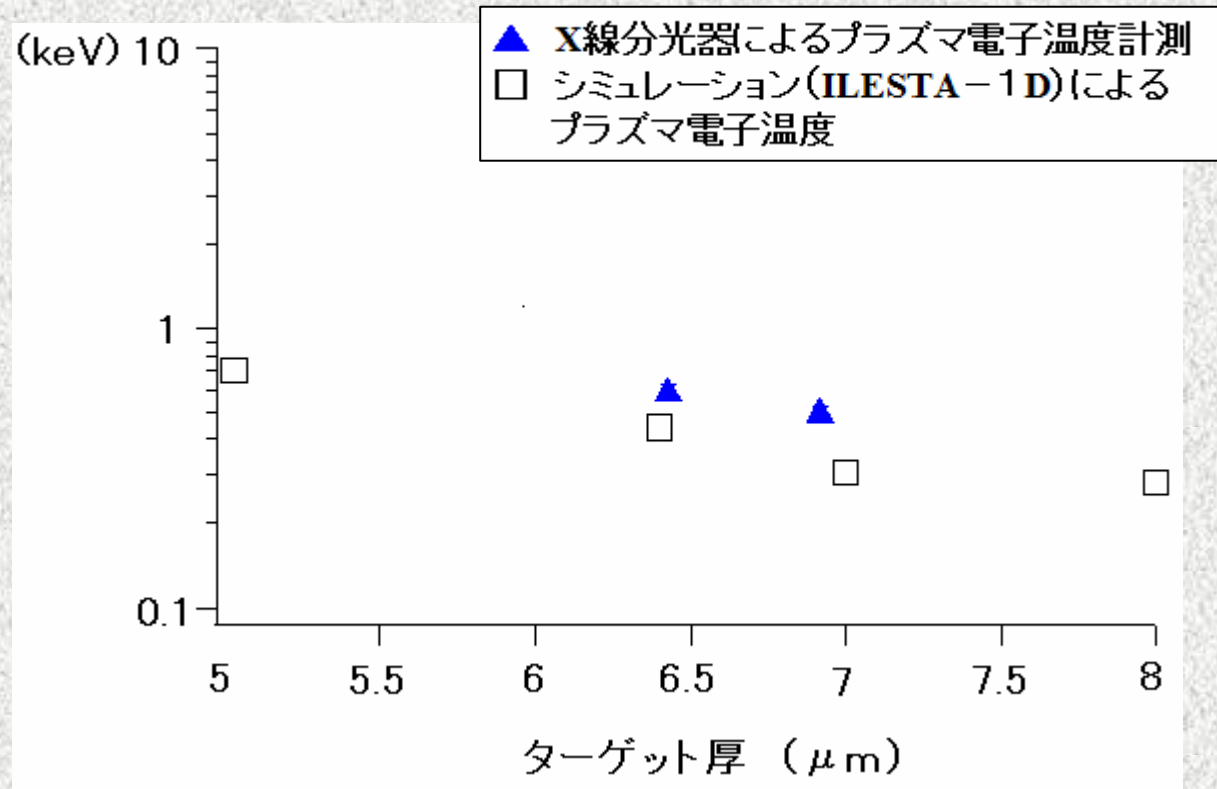


傾きからプラズマのコア領域の平均電子温度を求めることができる。



絶対値校正を行い、CCDカメラのカウント数を入射光子数にかえることができればプラズマ密度が求まる。

X線スペクトル全体分光計測から得た電子温度



X線スペクトル絶対分光を用いたプラズマ温度計測より得られたプラズマ電子温度はシミュレーションで得た値に近い値であり、

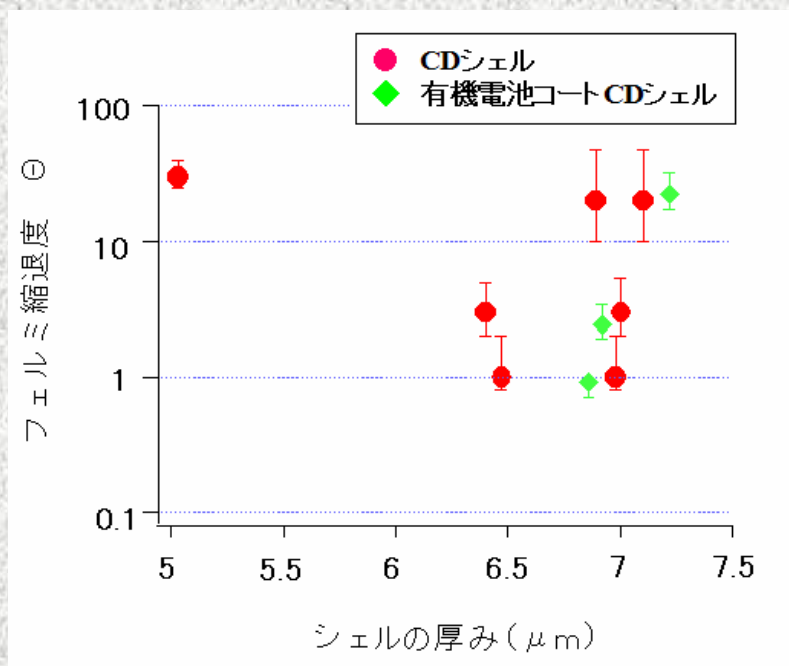
$$T_e = 500 \sim 600 \text{ eV}$$

程度の値であった。

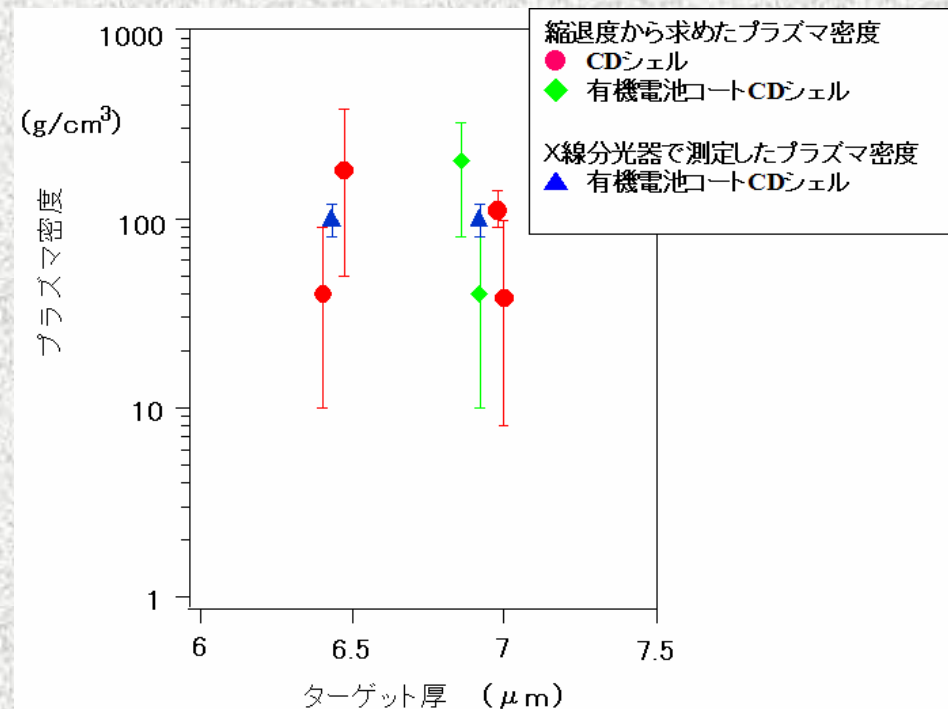
実験により得られたプラズマの縮退度及び密度



実験により得られたプラズマの縮退度



縮退状態にあるプラズマの密度



部分的に縮退状態にあると考えられるプラズマ (Θ が10以下) の密度を求めた。

最大で $200 \sim 300 \text{ g}/\text{cm}^3$ の密度が得られた。

まとめ



- ・実験で実際にプラズマ密度の測定を行い、縮退度が1程度のプラズマを生成することができた。その時のプラズマ密度は200～300 g/cc 程度であった。

今後の展開

- ・本計測法ではプラズマ電子温度の導出が重要となって来る。
特に2次核融合反応の起こる時刻と空間での温度測定の精度を上げなくてはならない。
プロトン計測を用いた温度測定を開発中である。
- ・また、解析に用いた理論モデルの再検証も行っている。

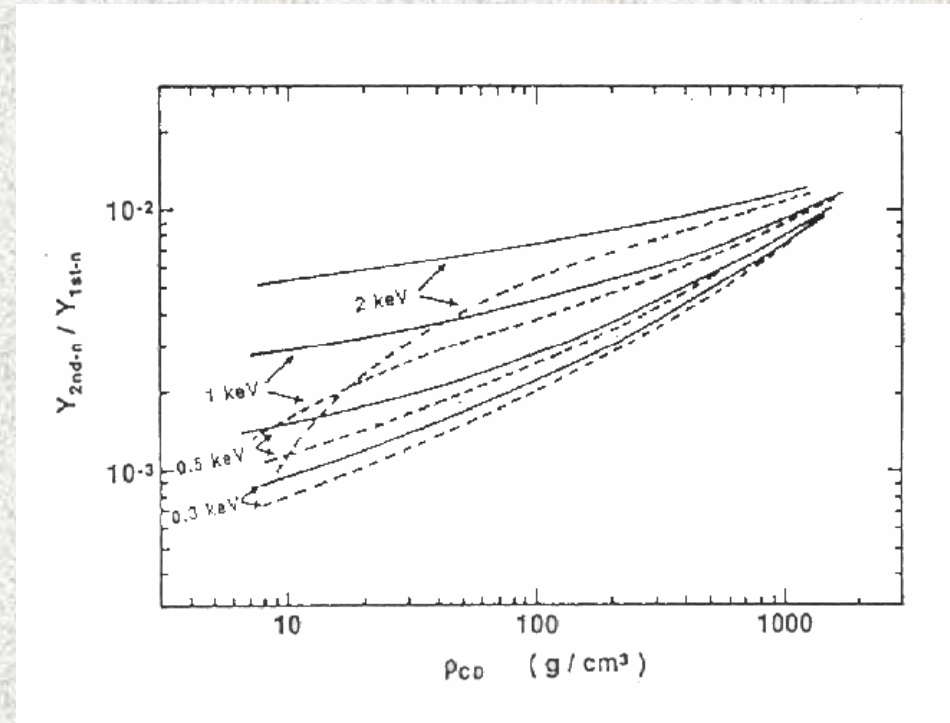
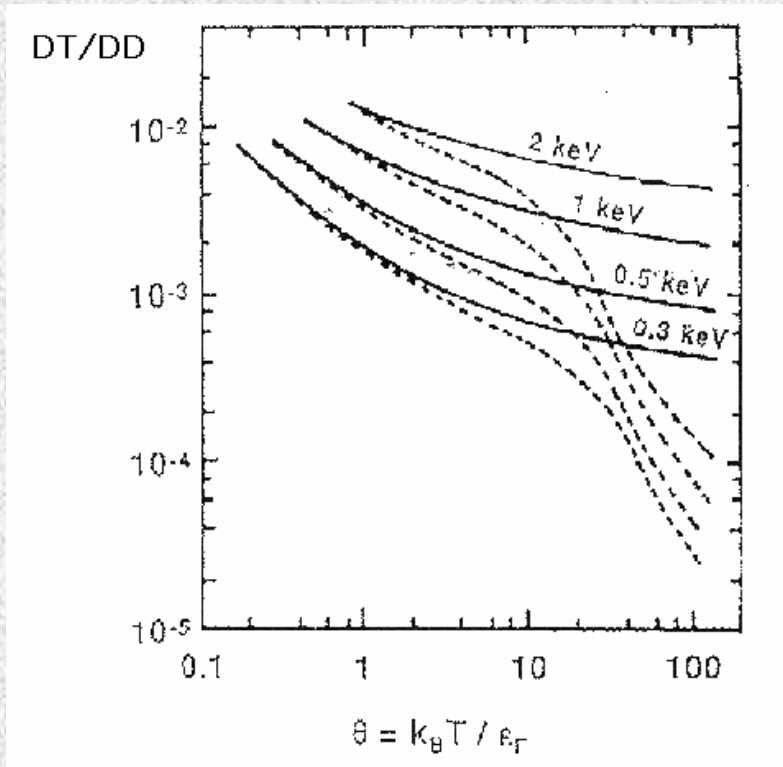


レーラー・テラー不安定性の成長率 γ は
次の高部-Bodnar式で与えられる。

$$\gamma = \alpha \sqrt{\frac{kg}{1+kL}} - \beta k \frac{\dot{m}}{\rho_a}$$

k ; 擾乱の波数
 L ; アブレーション面での密度スケール長
 g ; ターゲットの加速度
 \dot{m} ; 単位面積あたりの質量噴出率
 ρ_a ; アブレーション面での密度
 β, α ; レーザーとターゲットによって決まる定数

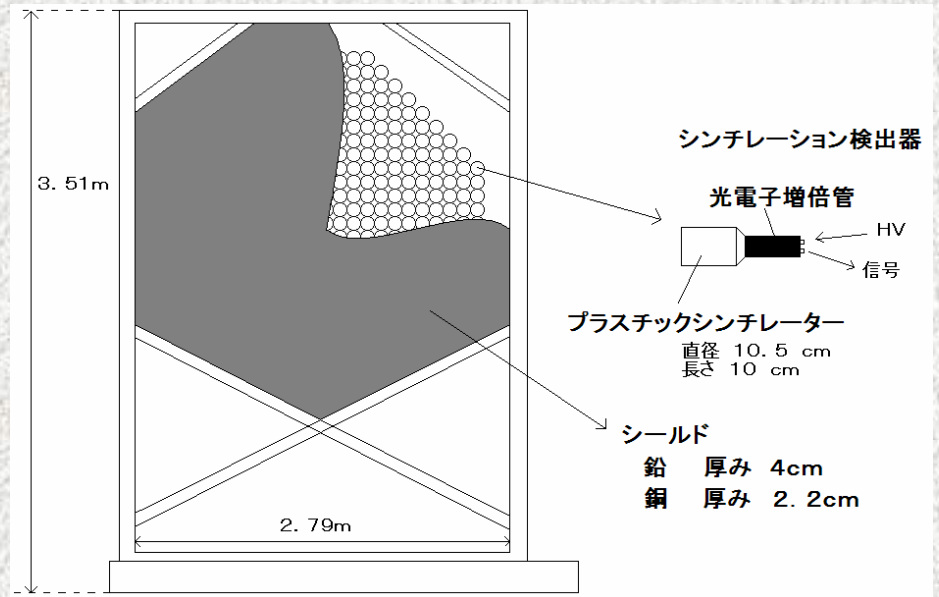
検出器1個あたりのDD、DT中性子に
対する検出効率はそれぞれ、
 $h_{DD} = 9.38 \times 10^{-7}$ $h_{DT} = 1.12 \times 10^{-6}$
である。



多チャンネル型中性子スペクトロメーター・MANDALAの仕様



MANDALAは842個のシンチレーション検出器から構成されている。



検出器からの信号は、同軸ケーブルでディスクリミネーターに導かれる。ディスクリミネーターでデジタル化された信号はTime-to-Digital-Converter(TDC)で記録される。TDCでは爆縮レーザーのタイミングに同期したトリガー信号をスタート信号、検出器からの信号をストップ信号としこれらの時間差を計測する。

