



# レーザー核融合の現状

---

大谷一人

大阪大学レーザーエネルギー学研究中心



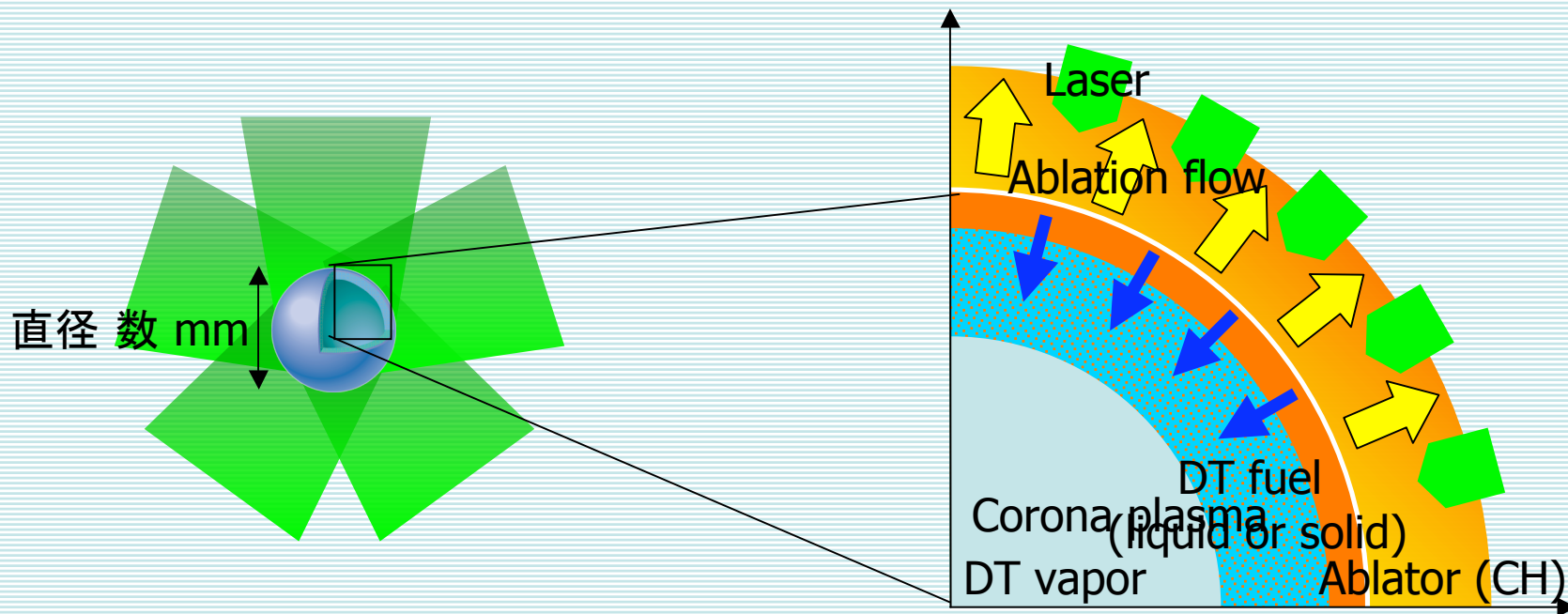
第10回若手科学者によるプラズマ研究会  
2007年03月14日 於日本原子力研究開発機構那珂核融合研究所



# レーザー核融合の基本原理

レーザー核融合の目指す点火条件

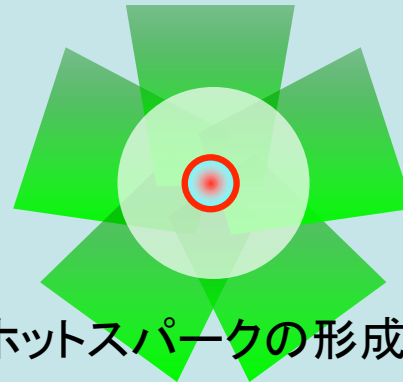
- 密度: **200 g/cc.** (固体密度の1000倍)
- 温度: 5 keV
- 閉じ込め時間: **100 ps**



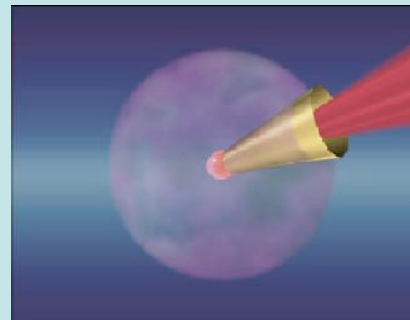
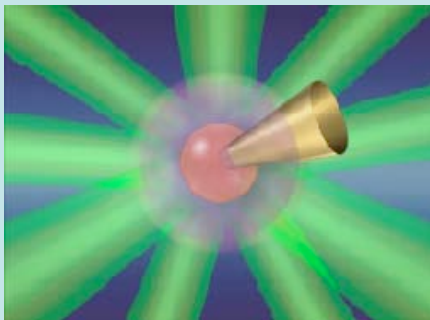


# レーザー核融合の点火方式

中心点火方式



高速点火方式

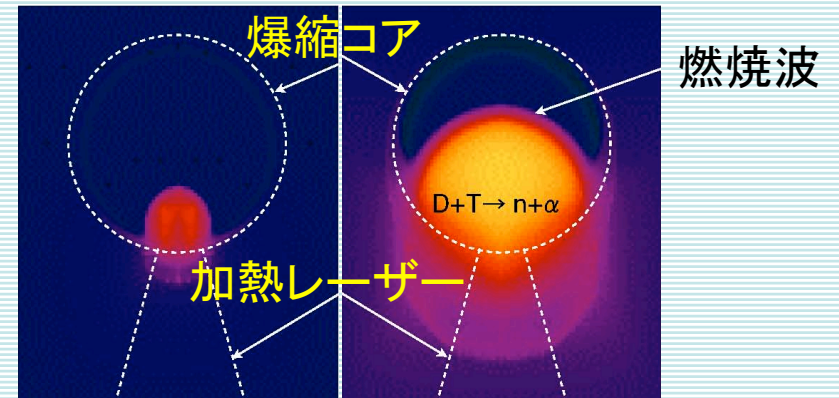
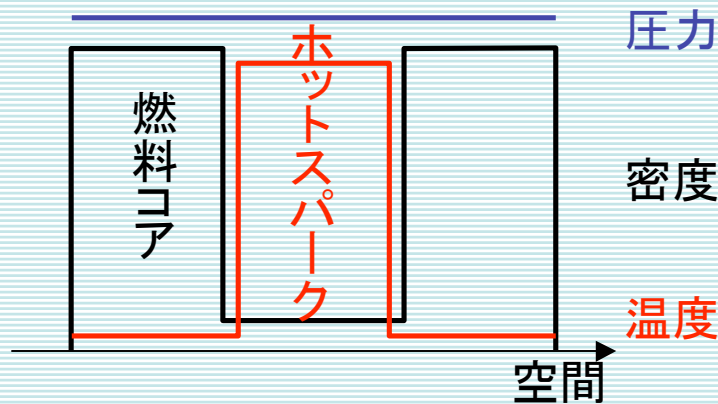


点火、燃焼



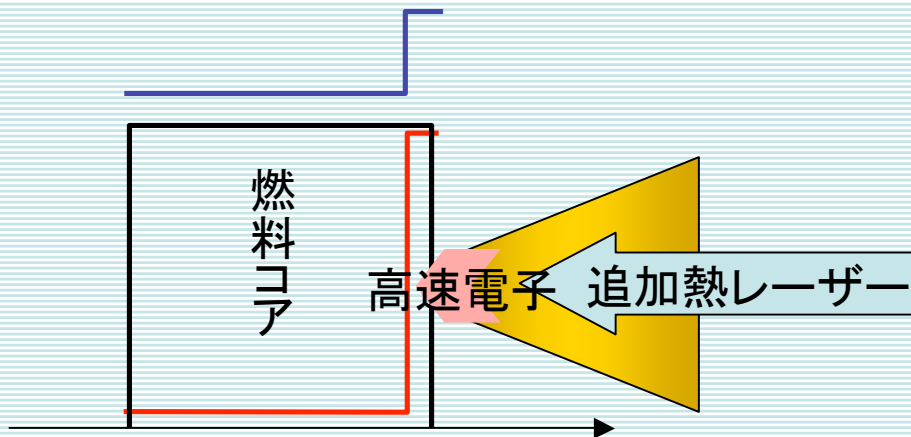
# 高速点火方式の利点

ホットスパークによる自己点火  
(中心点火)



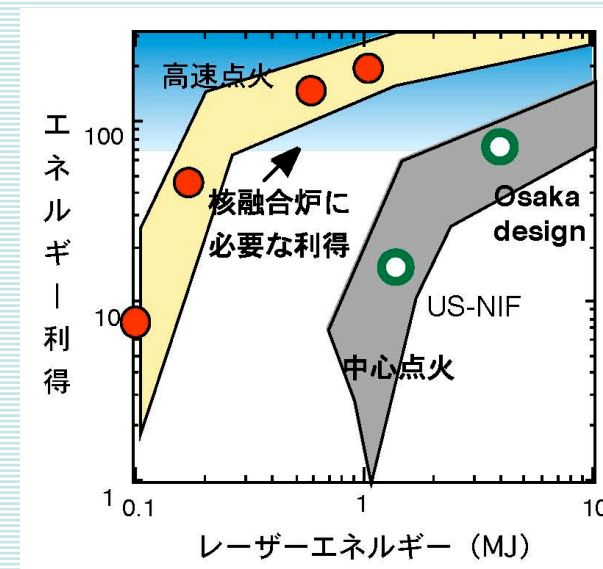
T. Johzaki IFSA 2003

超高強度レーザーによる高速点火



利点

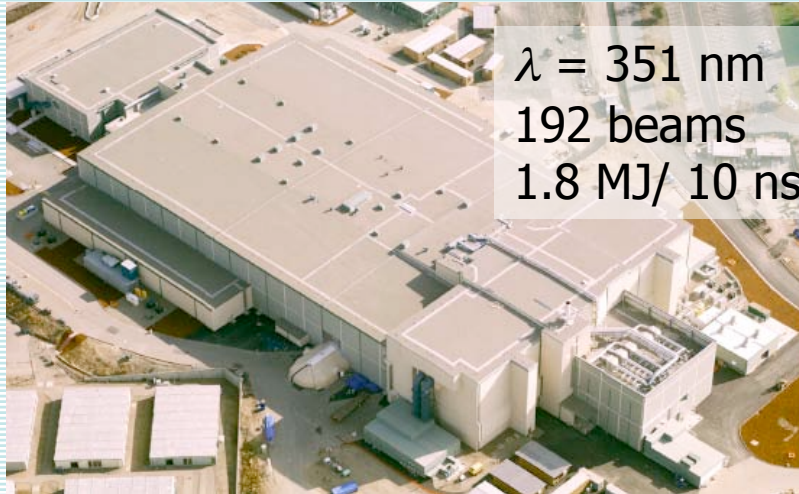
1. コアのサイズが小さくなる(中空→中実)
2. ホットスパークを爆縮プラズマ自身で作る必要がない



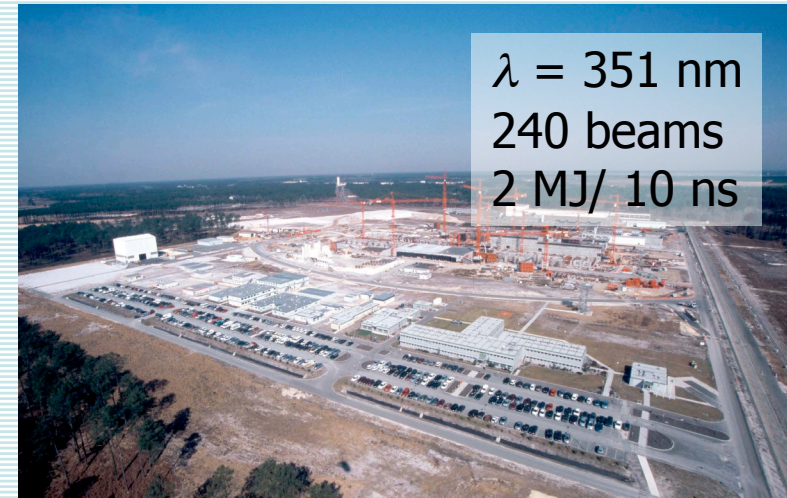




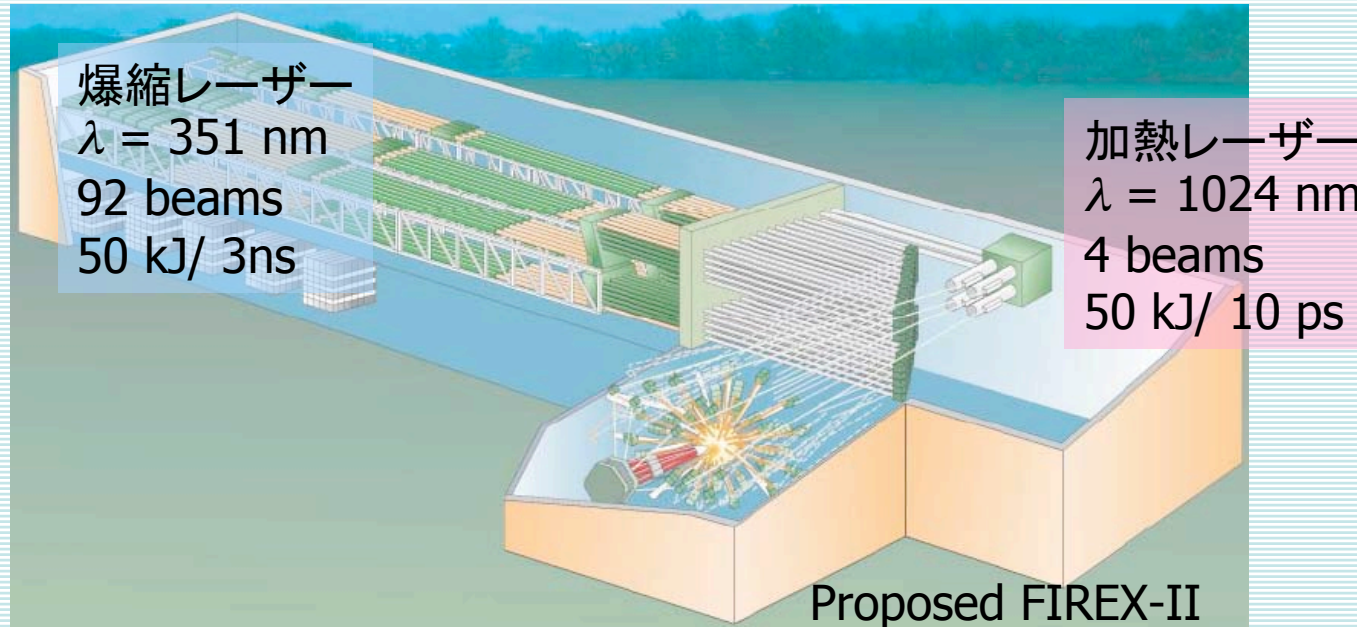
# レーザー核融合の実証炉



米 national ignition facility (NIF)



仏 laser mega joules (LMJ)





# レーザー核融合研究の軌跡

1986年 点火温度 (10 keV) の達成

1991年 超高密度 (固体密度の600倍) の達成

高速点火の研究を開始

2002年 PWレーザー(1 kJ/1 ps)で高速点火の原理実証(加熱温度 1 keV)

2003年 LFEX(10 kJ/10 ps)建設開始

2010年 FIREX-I 5-10 keVの追加熱を実証  
(2010年 NIF(米)完成予定)

2011年～ FIREX-II 点火、燃焼を実証  
(2012年 LMJ(仏)完成予定)



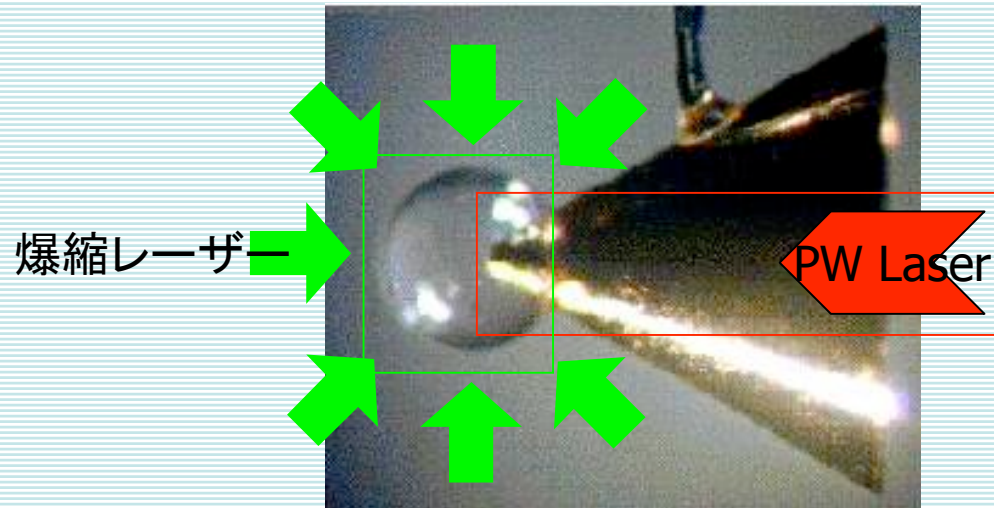
日 PWレーザー (~2006)



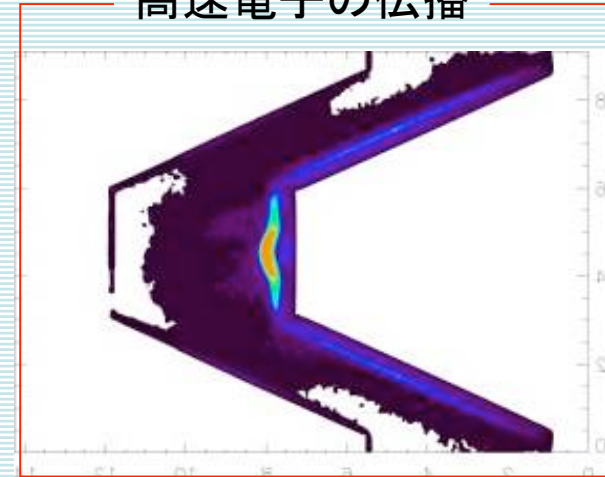




# 高速点火レーザー核融合の課題

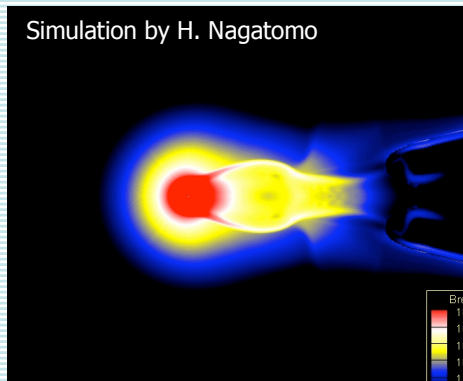


高速電子の伝播

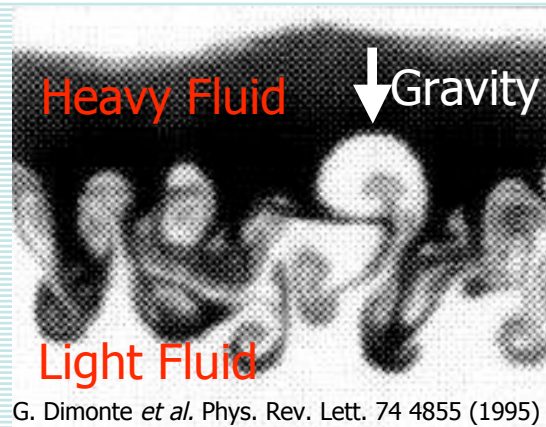


3/16 武田より報告

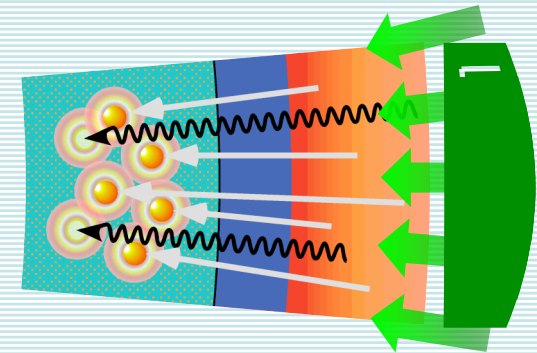
非対称爆縮



流体不安定性



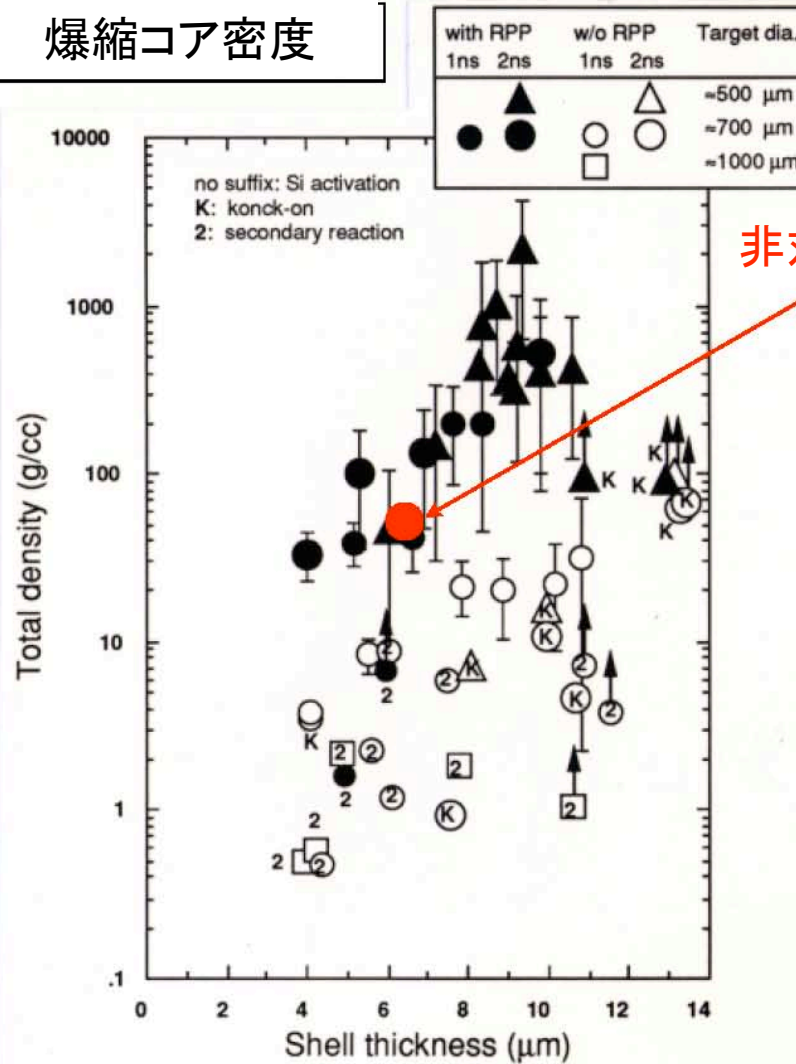
先行加熱





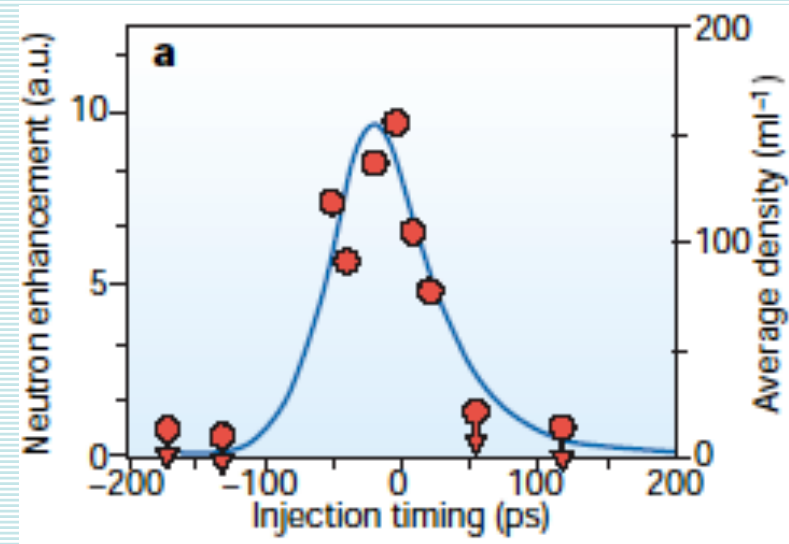
# 非対称爆縮における圧縮と加熱

## 爆縮コア密度



非対称爆縮で達成された密度

## PWレーザー照射タイミングと発生中性子量

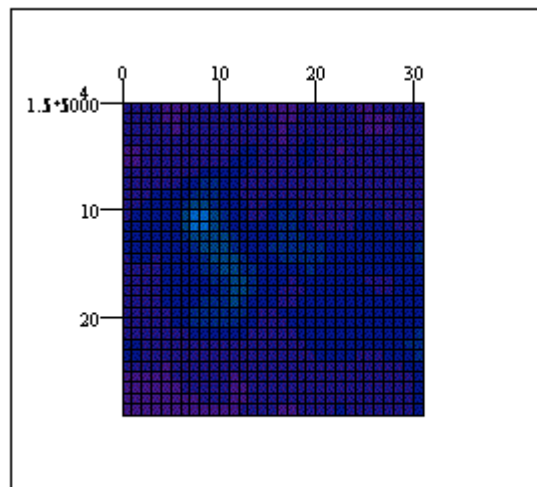
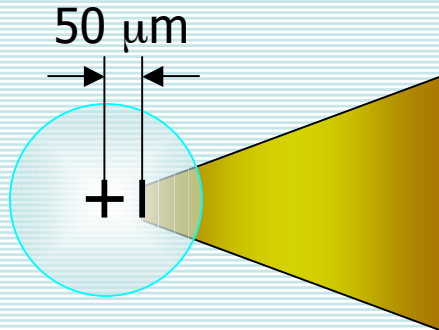


R. Kodama, et al. Nature 418, 933-934 (2002)

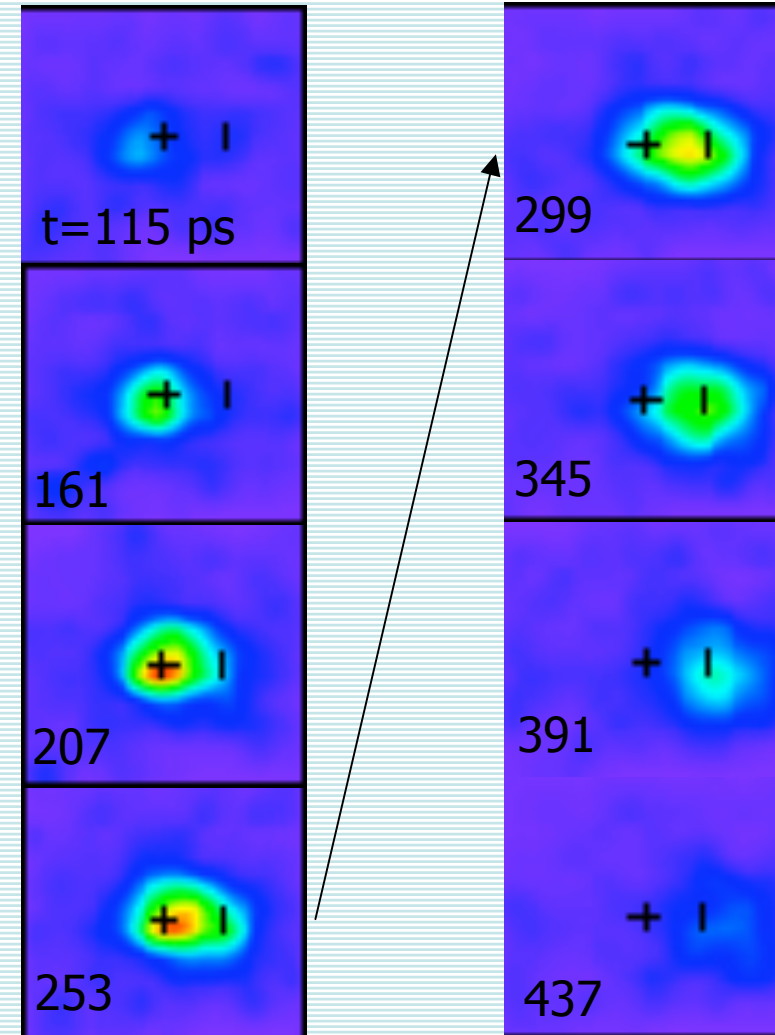


# コーン付きターゲットにおけるコアの流動

コアプラズマからのX線発光分布の時間変化

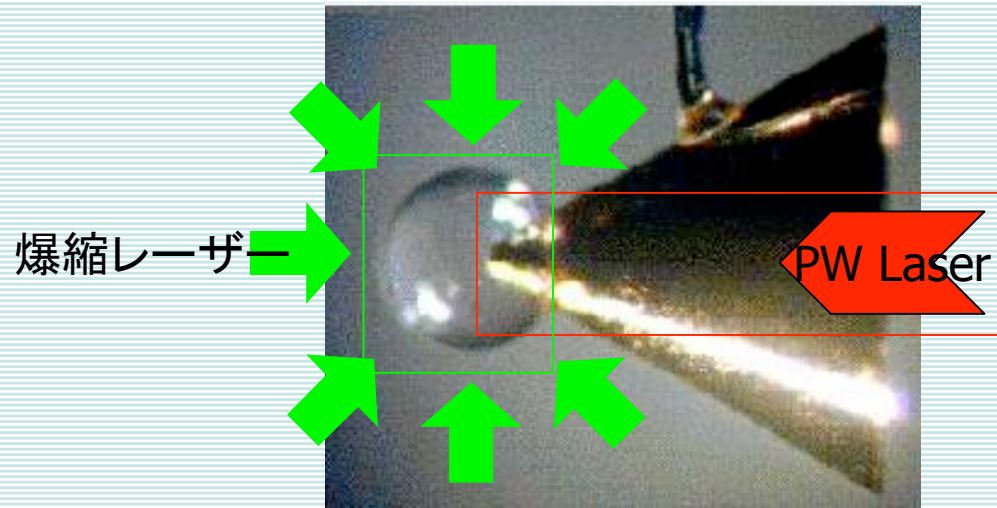


douga

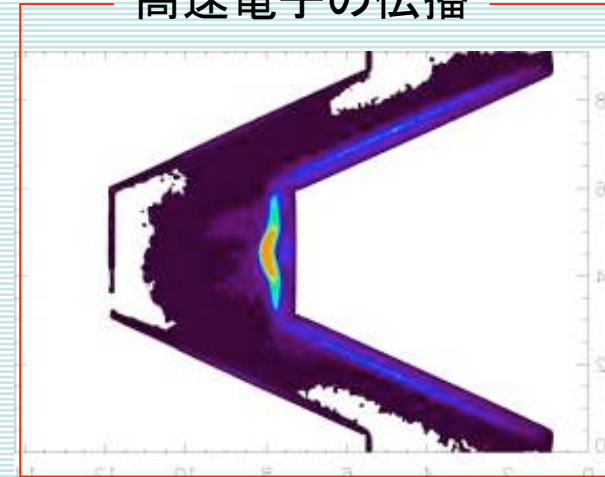




# 高速点火レーザー核融合のプラズマ物理

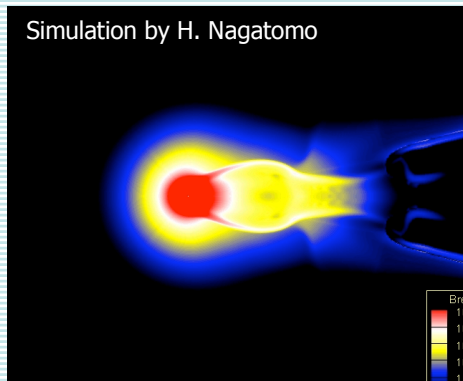


高速電子の伝播

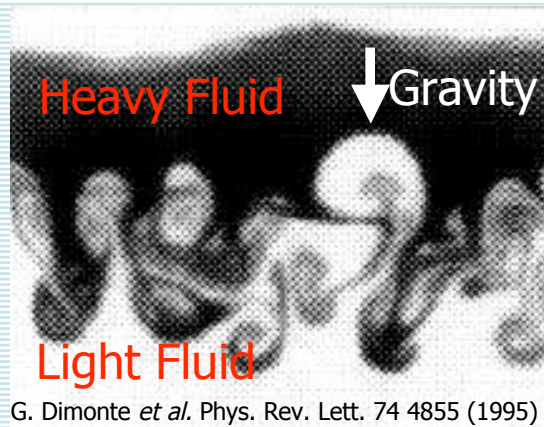


3/16 武田より報告

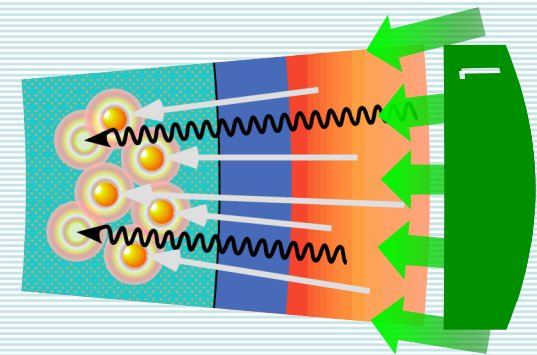
非対称爆縮



流体不安定性



先行加熱







# レイリー・テイラー不安定性

アブレーションを伴うレイリー・テイラー不安定性の線形成長率

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

密度プロファイルの制御がキーポイント

$\gamma$ : 成長率 ( $A = A_0 \exp(\gamma t)$ )

$k$ : 擾乱の波数

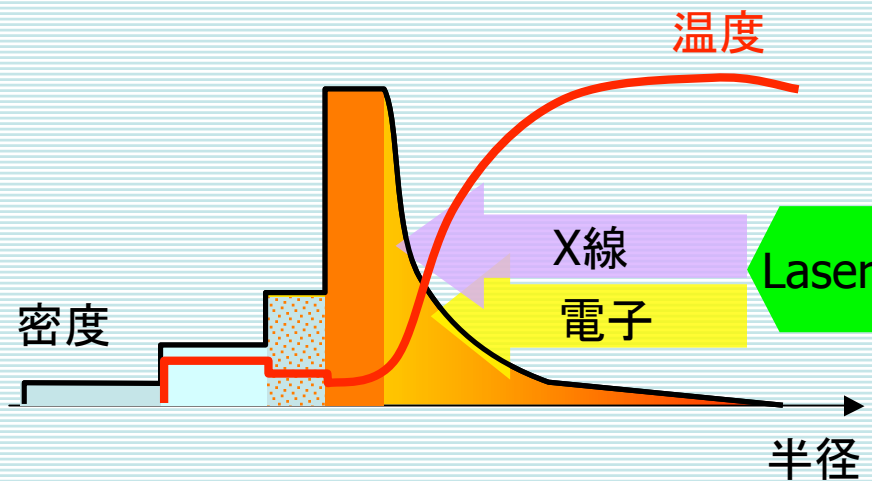
$g$ : 加速度

$L_\rho$ : 密度スケール長

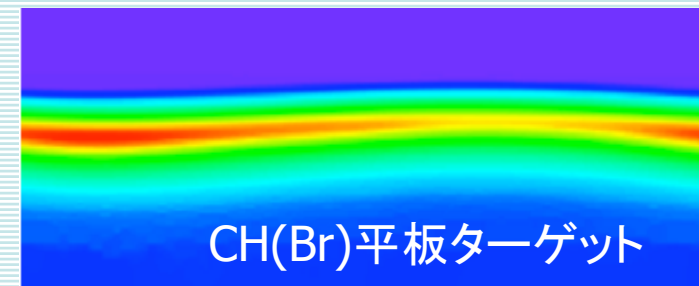
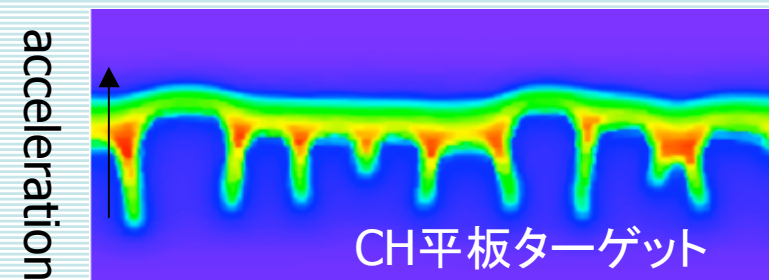
$\beta$ : 定数 (= 1.7 for CH)

$\rho_a$ : アブレーション密度

$\dot{m}$ : 質量噴出率



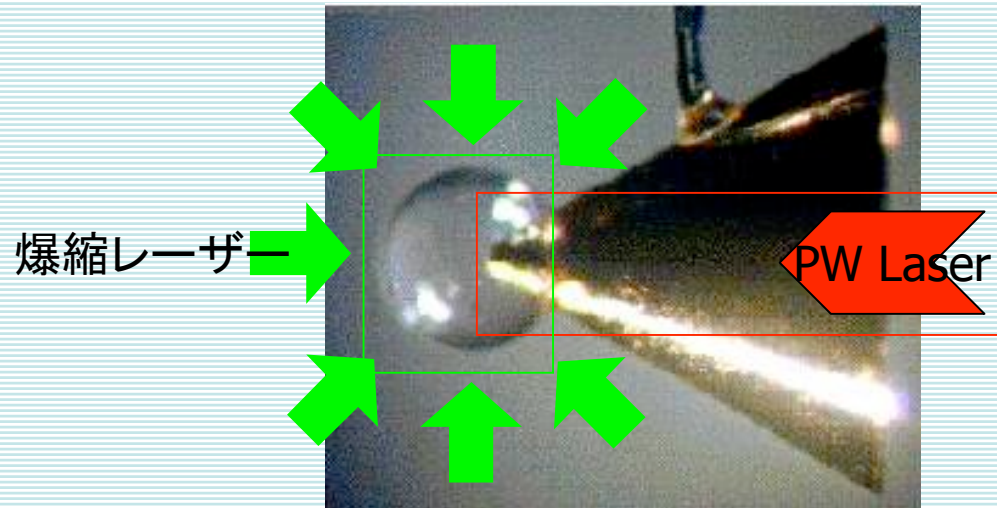
爆縮中の密度・温度プロファイル



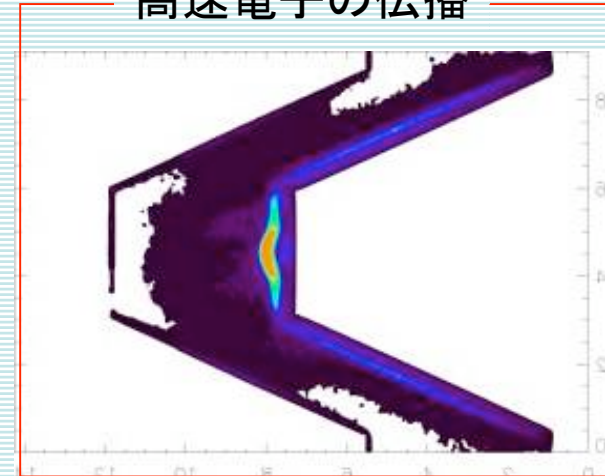
Simulation by J. H. Gardner



# 高速点火レーザー核融合のプラズマ物理

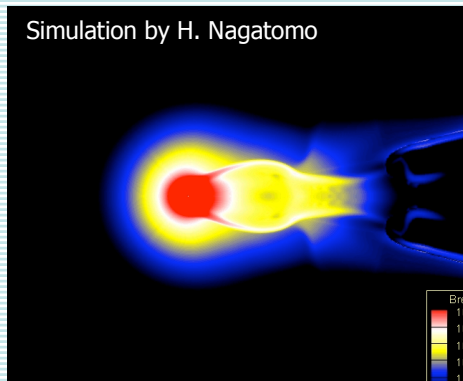


高速電子の伝播

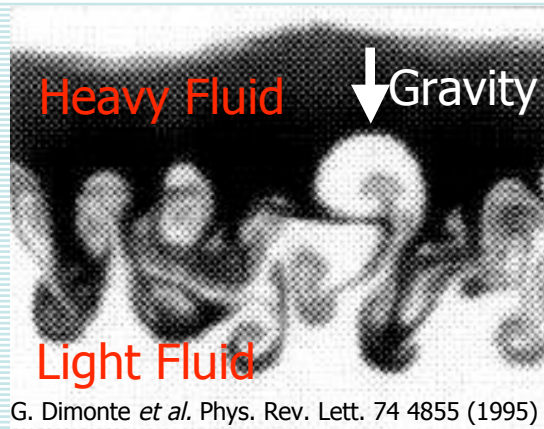


3/16 武田より報告

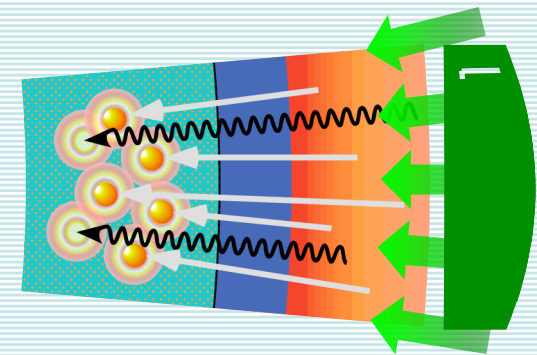
非対称爆縮



流体不安定性

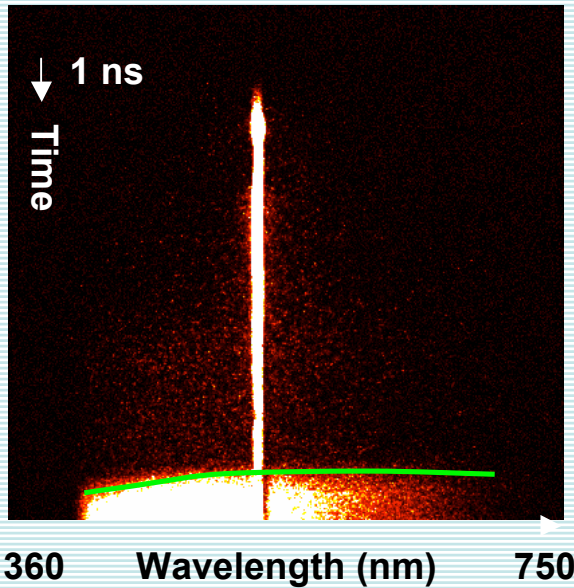


先行加熱



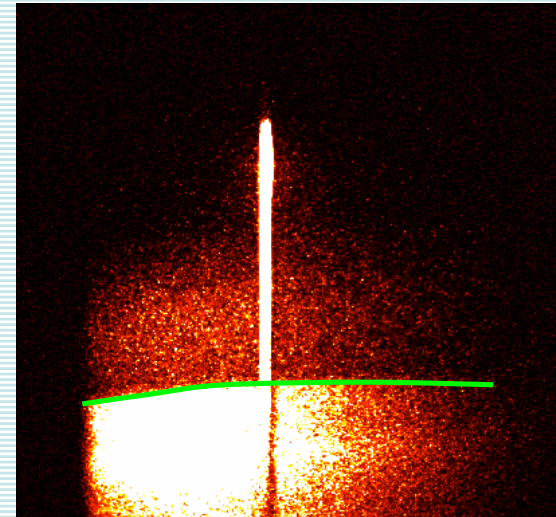


## ターゲットからの輻射による先行加熱の計測



レーザー条件  
波長: 527 nm  
照射強度:  $\sim 150 \text{ TW/cm}^2$

ターゲット条件(照射面側から)  
ポリイミド 12  $\mu\text{m}$   
液体重水素  $\sim 200 \mu\text{m}$   
ポリイミド 12  $\mu\text{m}$  (w/ Alコート 500  $\text{\AA}$ )



レーザー条件  
波長: 351 nm  
照射強度:  $\sim 120 \text{ TW/cm}^2$

ターゲット条件(照射面側から)  
ポリイミド 12  $\mu\text{m}$   
液体重水素  $\sim 200 \mu\text{m}$   
ポリイミド 12  $\mu\text{m}$  (w/ Alコート 500  $\text{\AA}$ )



## まとめ

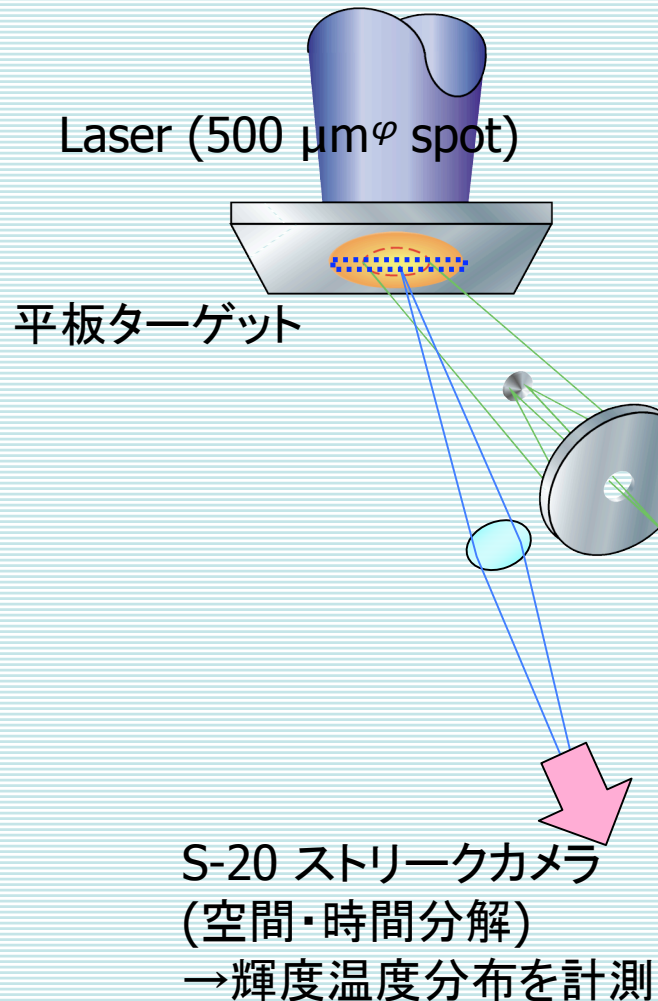
---

- ・ レーザー核融合の点火温度、密度は独立に実証された
- ・ PWレーザーで高速点火レーザー核融合の原理を実証した
- ・ 点火温度までの追加熱を実証するため、LFEXレーザーを建設中である
- ・ 非対称圧縮でも高密度は達成できる
- ・ 追加熱のタイミングを決定できるようになった
- ・ 高密度圧縮を阻害する流体不安定性を抑制出来るようになった
- ・ 高密度圧縮を阻害する先行加熱の計測を開始した



# 平板ターゲット裏面の温度計測手法

## 計測器セットアップ



- 色温度計測  
観測波長域: 420-650 nm  
波長分解能: <20 nm  
観測領域: 200  $\mu\text{m}\phi$   
観測時間: 11.6 ns  
時間分解能: <200 ps

- 輝度温度分布計測  
観測波長域: 600-700 nm  
観測領域: 800  $\mu\text{m}$   
空間分解能: <15  $\mu\text{m}$   
観測時間: 5.2 ns  
時間分解能: <200 ps









# 爆縮コアプラズマを観測する、超高速撮影法

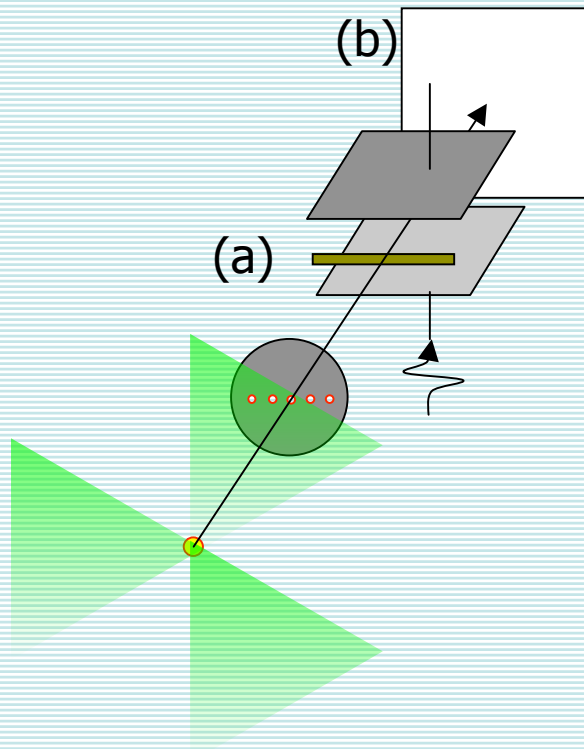
爆縮コアプラズマの計測に要求される分解能

空間分解能: 10  $\mu\text{m}$

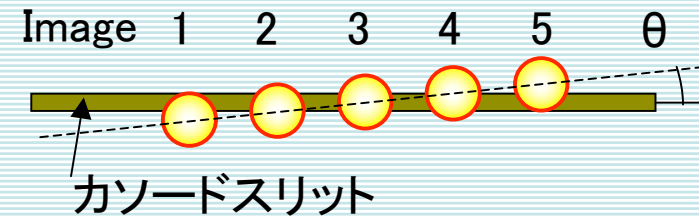
時間分解能: 10 ps

ストリークカメラを使った2次元画像計測

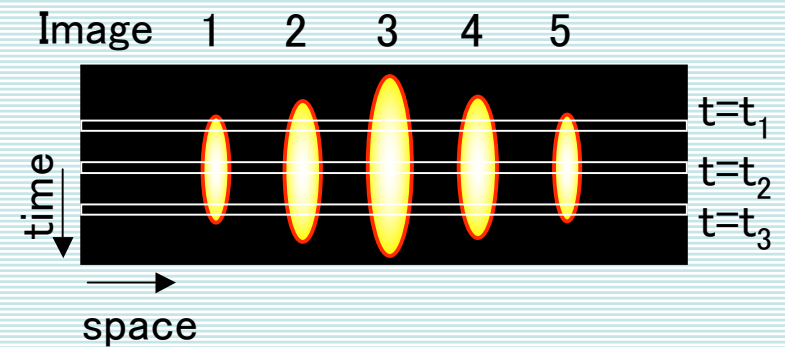
Multi Imaging X-ray Streak Camera (MIXS)



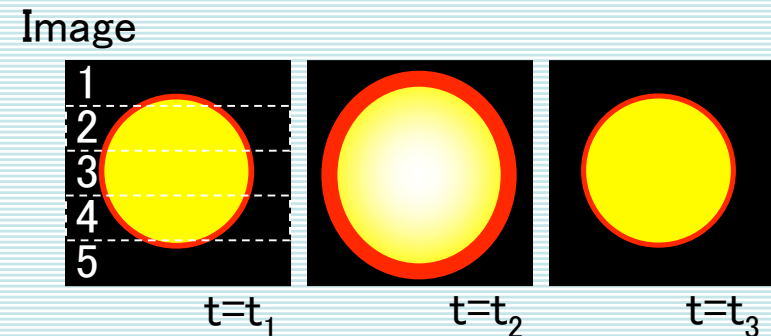
(a) カソードスリット上に結像された光源像の画像列

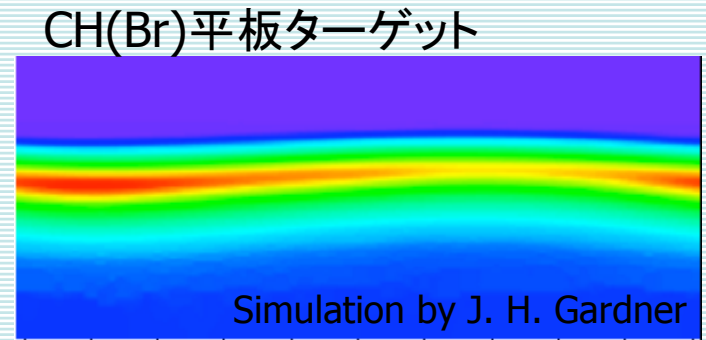
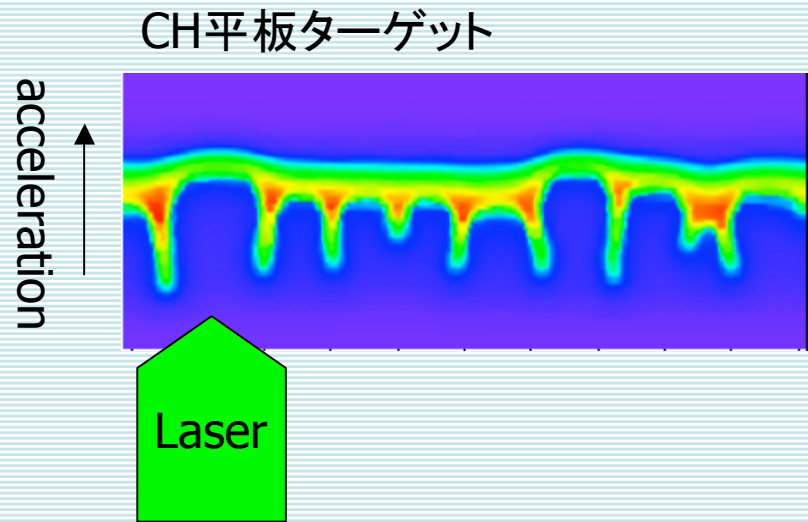


(b) ストリークカメラで掃引された分割画像



(c)  $t=t_1, t_2, t_3$  の再構成された2次元像







## レイリー・テイラー不安定性の抑制手法

アブレーションを伴うレイリー・テイラー不安定性の線形成長率

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

密度プロファイルの制御がキーポイント

$\gamma$ : 成長率 ( $A = A_0 \exp(\gamma t)$ )

$k$ : 擾乱の波数

$g$ : 加速度

$L_\rho$ : 密度スケール長

$\beta$ : 定数 (= 1.7 for CH)

$\rho_a$ : アブレーション密度

$\dot{m}$ : 質量噴出率

### レイリー・テイラー不安定性の抑制手法

#### • 輻射熱輸送を利用

• S. P. Obenschain et al. Phys. Plasmas **9**, 2234 (2002)

• S. Fujioka et al. Phys. Plasmas **11**, 2814 (2004)

#### • 非局所電子熱輸送を利用

• K. Otani et al. submitted in Phys. Plasmas

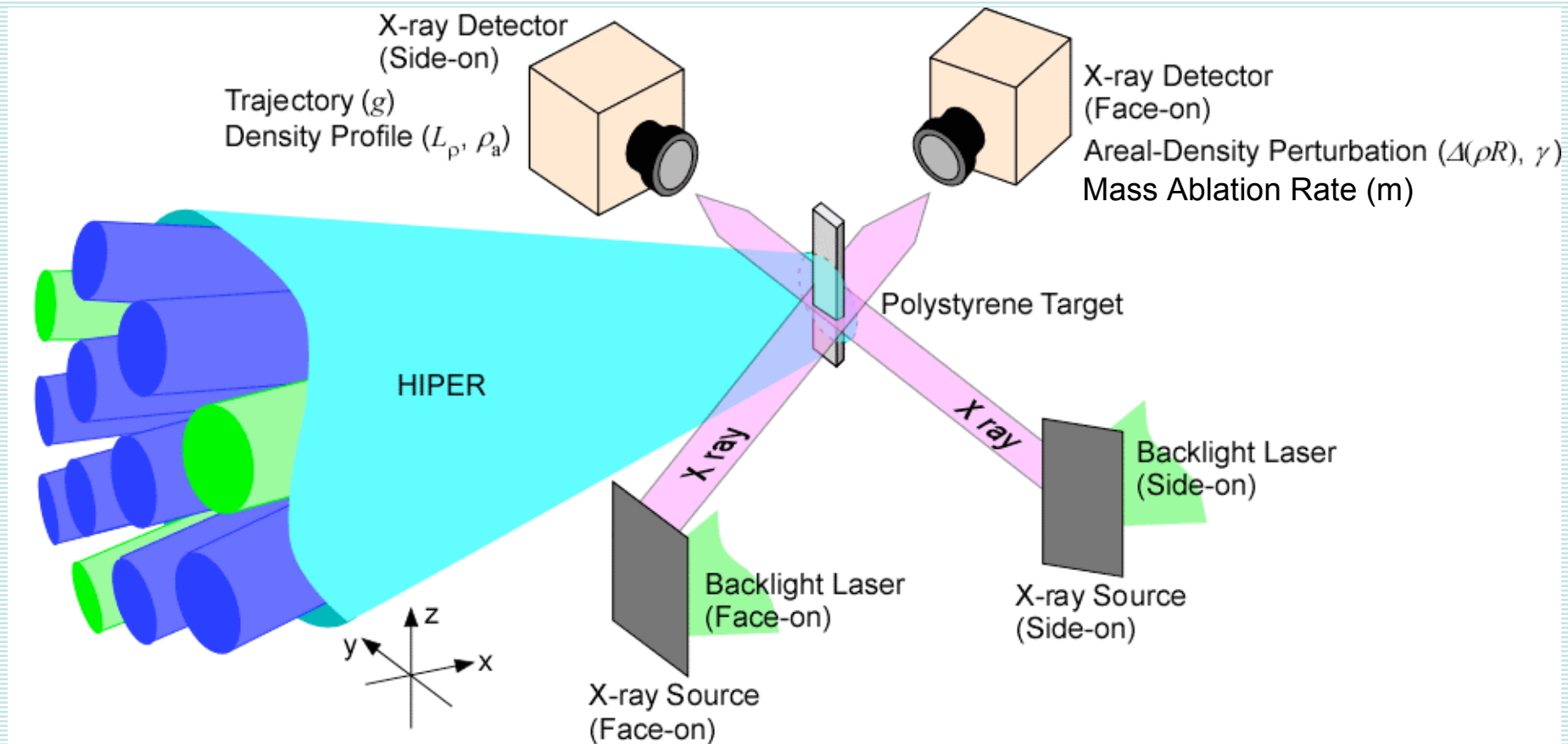
#### • レーザーパルスの制御

• T. J. B. Collins, et al. Phys. Plasmas **11**, 1569 (2004)



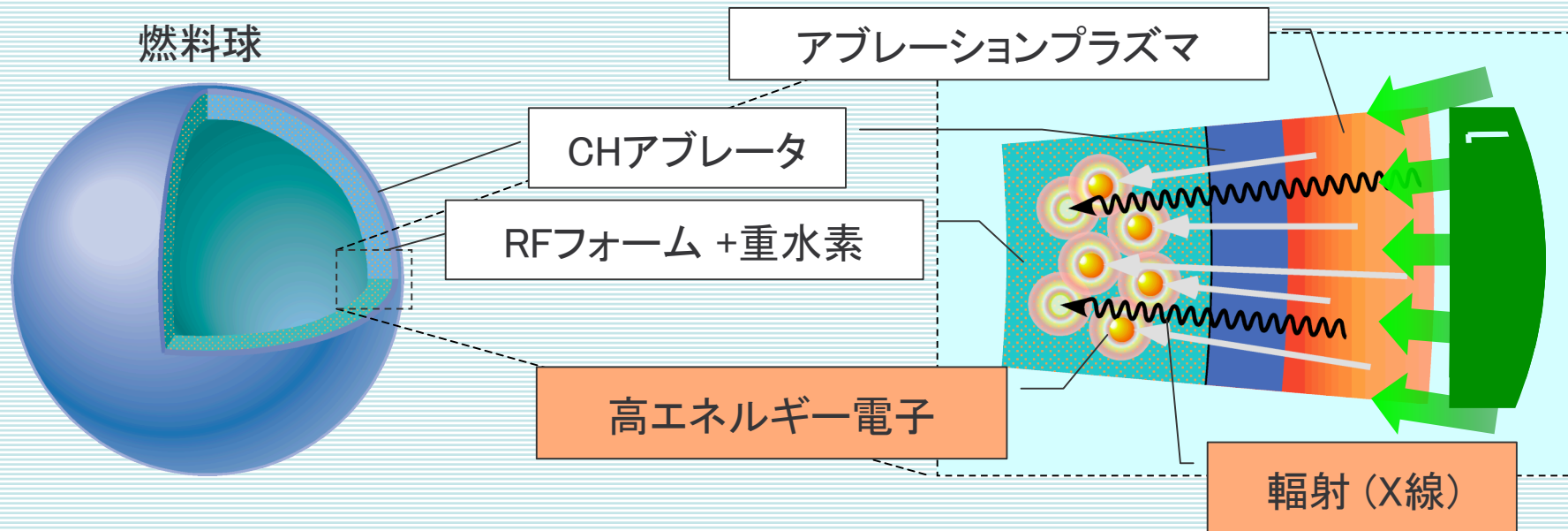
# レイリー・テイラー不安定性に関する パラメータの計測を行った

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





# 先行加熱



アイゼントロップ指数  $\alpha$  を2以下に抑える為に許容される先行加熱温度

$$\alpha = p(\rho, T) / p_F(\rho)$$

固体密度DT燃料のFermi 温度は5 eV

$p(\rho, T) = p_F + p_{th}$  を仮定すると、

先行加熱を2 eV以下に抑える必要がある

$$\varepsilon_F = k_B T_F = \frac{\hbar^2}{2m_e} (3\pi^2 n_e)^{2/3}$$

$$p_F = \frac{2}{5} n_e \varepsilon_F$$



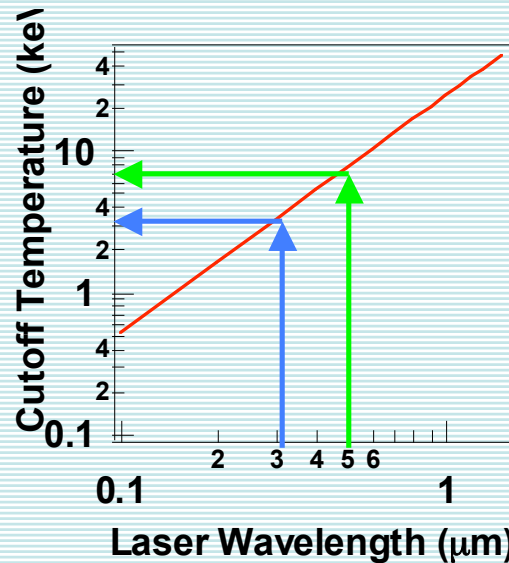


# 輻射・電子熱輸送の先行加熱効果

先行加熱はアブレーションプラズマの温度による影響が大きい

レーザー波長と臨界密度の温度  
( $P_a = 100$  Mbar)

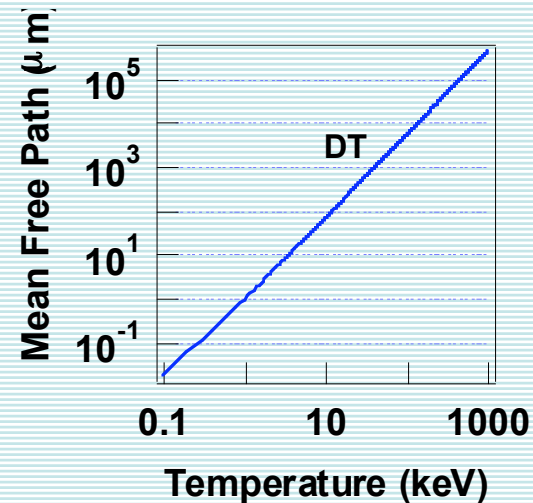
非局所電子熱輸送→長波長レーザー照射で顕著  
輻射熱輸送→短波長レーザー照射で顕著(?)



$$p_a = 57(I_L / \lambda_L)^{2/3} \text{ Mbar}$$

$$T_c = 13.7(I_L \lambda_L)^{2/3} \text{ keV}$$

ex. 固体密度DT中における  
電子の平均自由行程

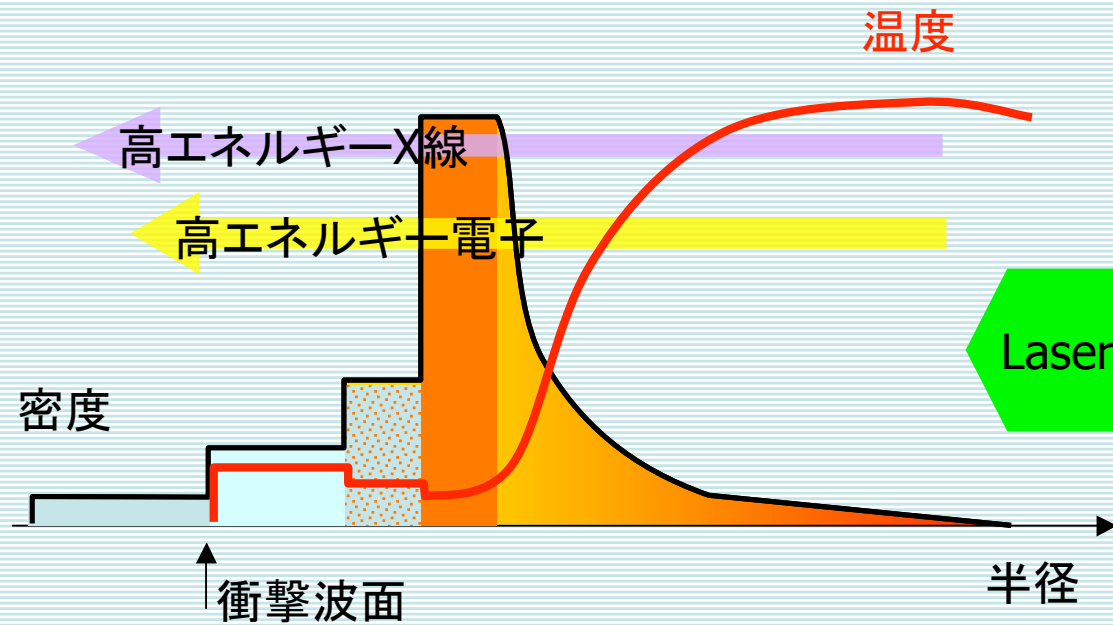


Manheimer *et al.* Phys. Fluids **25**, 1644 (1982)

先行加熱を抑えるには照射レーザーの波長を短くすることが有効?  
→先行加熱温度を定量的に評価する必要がある



## 先行加熱による圧縮率の低下を防ぐ



アイゼントロップ指数  $\alpha$  を2以下に抑える為に許容される先行加熱温度

$$\alpha = p(\rho, T) / p_F(\rho)$$

固体密度DT燃料のFermi 温度は5 eV

$p(\rho, T) = p_F + p_{th}$  を仮定すると、

先行加熱を2 eV以下に抑える必要がある

$$\varepsilon_F = k_B T_F = \frac{\hbar^2}{2m_e} (3\pi^2 n_e)^{2/3}$$

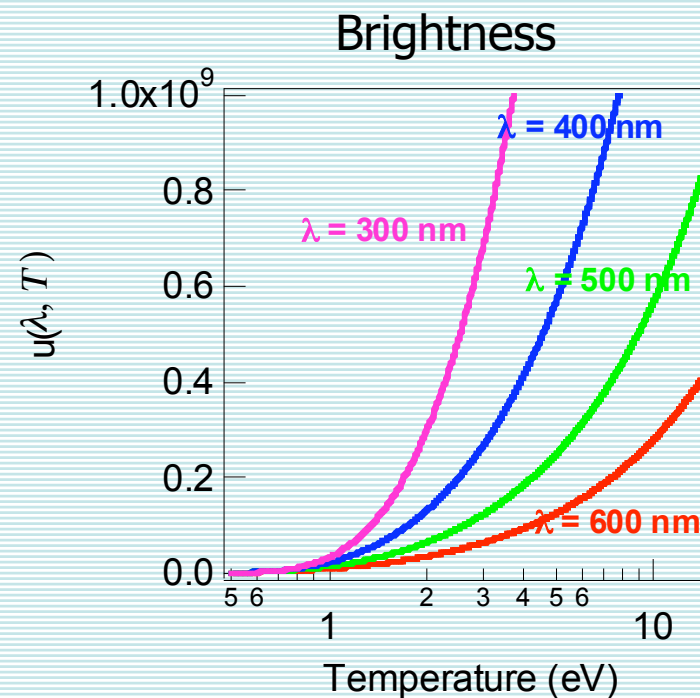
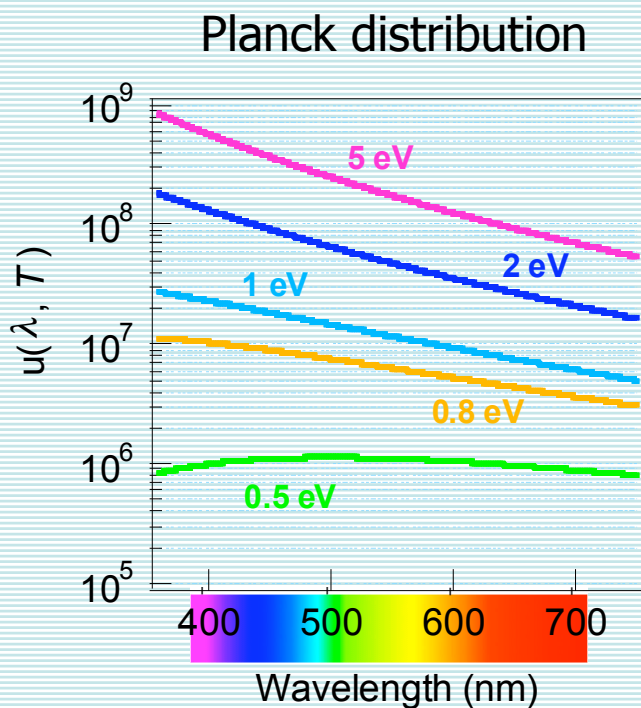
$$p_F = \frac{2}{5} n_e \varepsilon_F$$



# 温度計測の原理

観測対象が黒体であると仮定すると、自発光から温度を計測できる

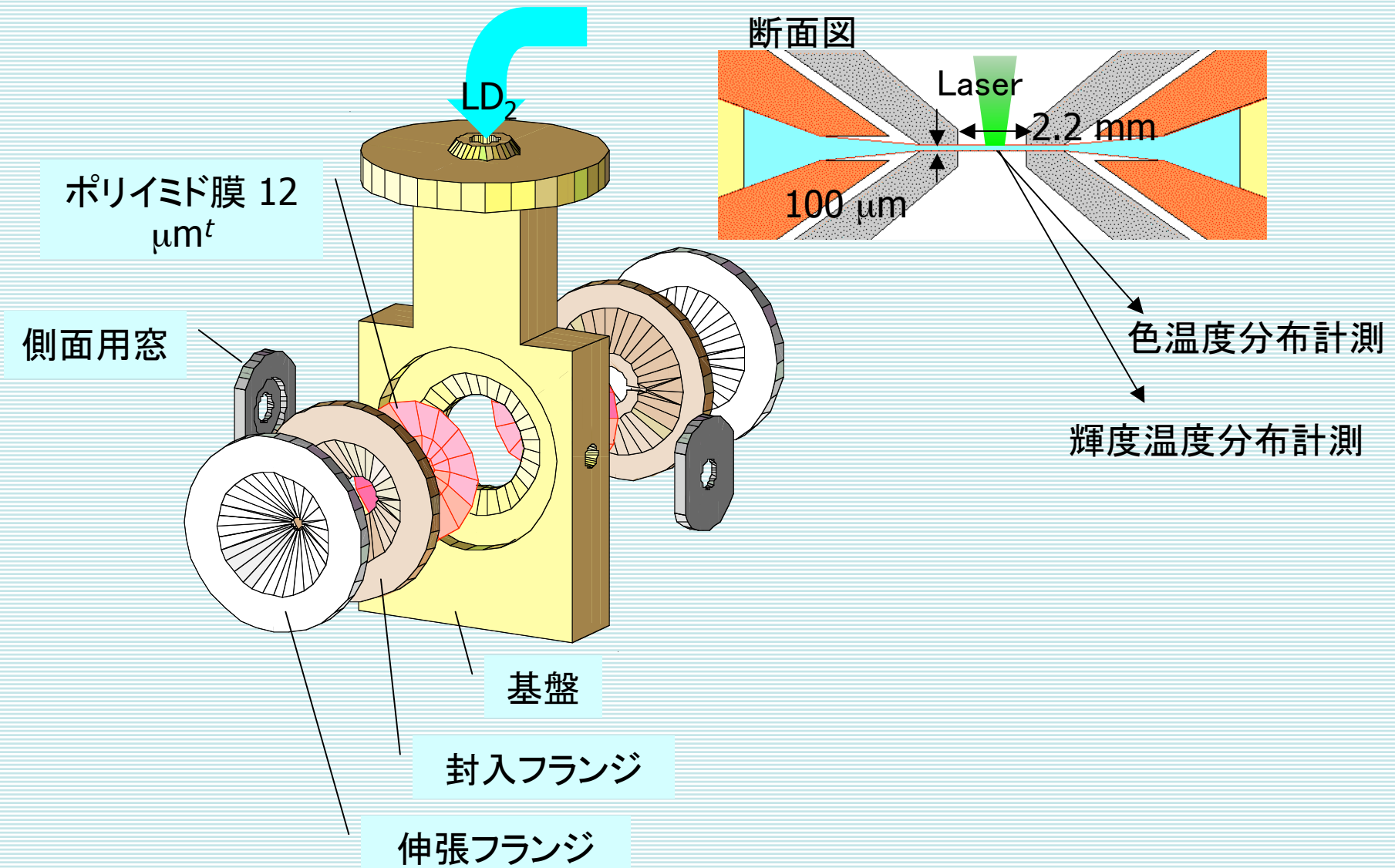
黒体輻射 
$$u(\lambda, T) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{d\lambda}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - 1}$$



可視～紫外領域の自発光計測によって数eVの温度を計測する



# 平板ターゲット用クライオジェニックセル

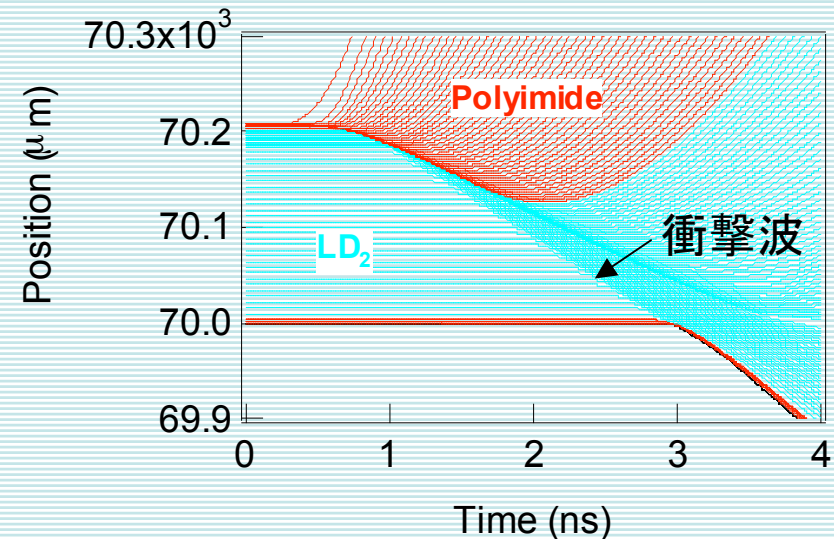




# 短波長のレーザー照射で先行加熱が顕著になる

ターゲット裏面温度の時間変化

1Dシミュレーションによる流線図

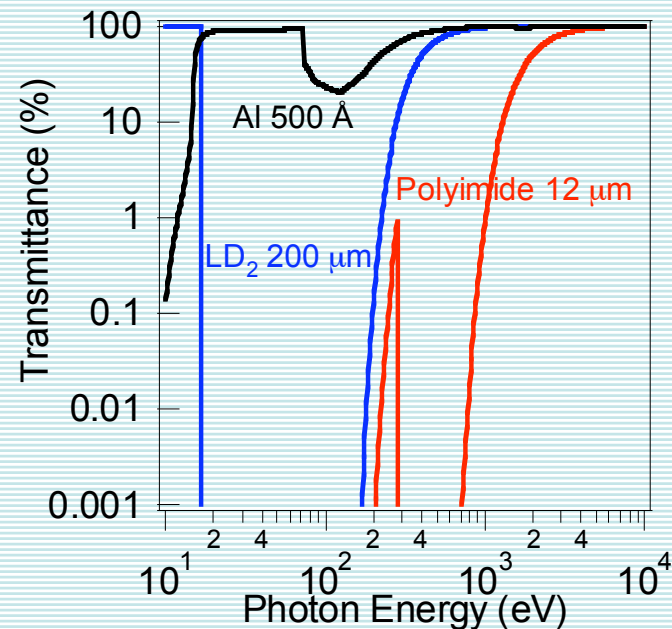


レーザー照射開始後 1.5 nsで照射面のポリイミド膜が剥がれている

- 波長の短いレーザーを照射した場合の方が先行加熱が顕著に現れる  
→輻射熱輸送が先行加熱の主要因となる(非局所電子熱輸送は長波長で顕著)
- アブレータのポリイミド膜が先行加熱のシールドとしての役割を果たす



## 実験結果を説明するX線のエネルギー領域



ポリイミドで止まり、重水素を素通りするX線のエネルギーは  
<15 eV、および40~150 eV

透過してきたX線で裏面のポリイミドが先行加熱されている  
→内部の重水素における先行加熱は実験で得られた値よりも小さい可能性