

# 天体衝突と光

東大・新領域 杉田精司

[Sugita@k.u-tokyo.ac.jp](mailto:Sugita@k.u-tokyo.ac.jp)

## 本講演の概要

- ◆ 地球史・惑星史における天体衝突の役割
- ◆ 天体衝突現象の概略
- ◆ 高速分光法の基礎
- ◆ 高速分光法が明らかにする高エネルギー現象
- ◆ 最近と近い将来の惑星探査への応用

# 超高速衝突実験の問題点

- ・ 何と言っても実験が大変。2~3時間／発。  
→ 統計的データを取るのが困難。
- ・ 宇宙速度 ( $\sim 10\text{km/s}$ ) での実験は極めて困難  
→ 現実の惑星間衝突における高エネルギー状態の観察は困難。

※ 新しい実験方法の必要性 → レーザー実験

# 衝突蒸気雲とレーザー蒸気雲

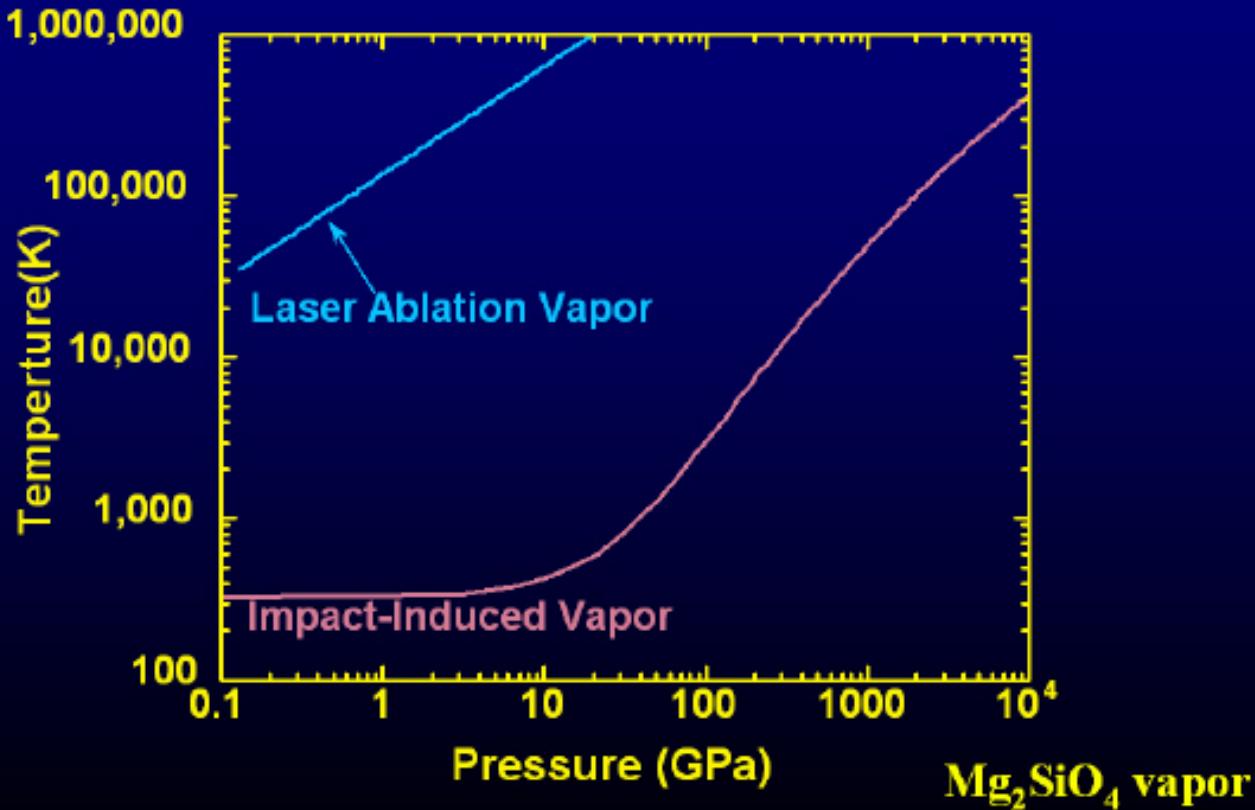
- ☞ 2つの相違点

- ☞ 熱的加熱 v.s. 光子による非熱的加熱; レーザー蒸気雲は、熱的非平衡状態を作る可能性あり。
- ☞ レーザー蒸気雲は、衝突蒸気雲より圧倒的に低い圧力しか作らない。

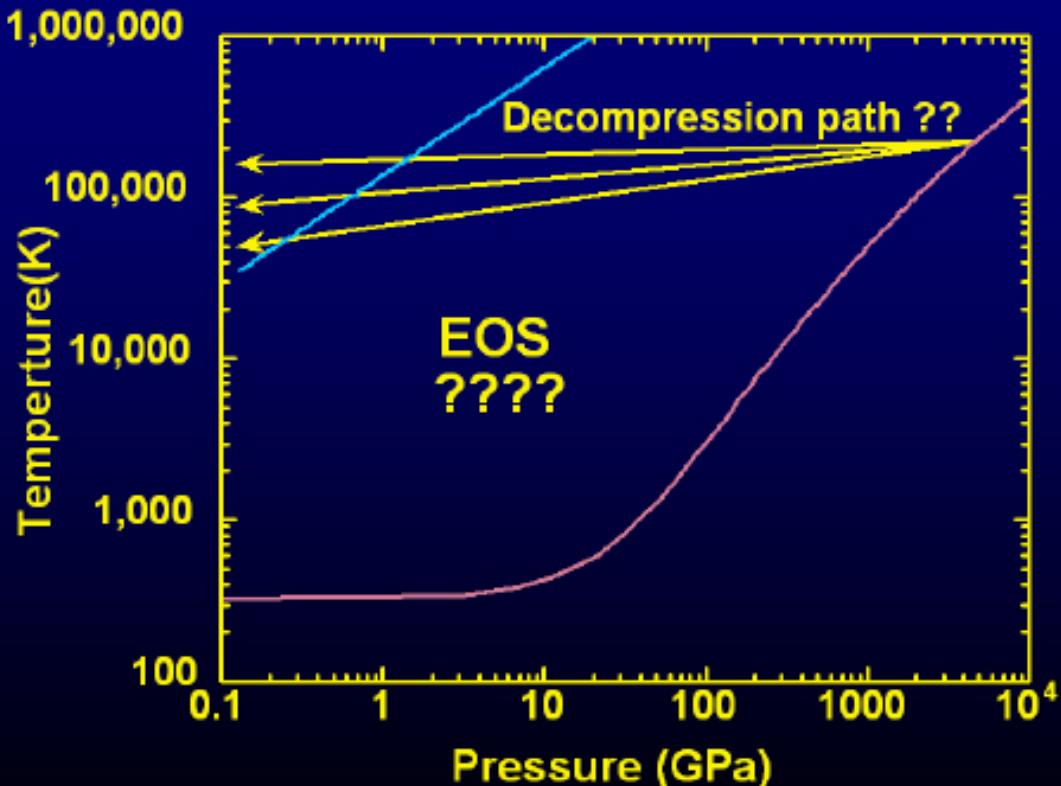
# 衝突蒸気雲とレーザー蒸気雲

- ☞ 2つの相違点
  - ☞ 非平衡状態は迅速に解消され、平衡化
  - 膨張したレーザー蒸気雲は、衝突蒸気雲の状態を良く再現しうる。
  - ☞ レーザー蒸気雲は、衝突蒸気雲より圧倒的に低い圧力しか作らない。

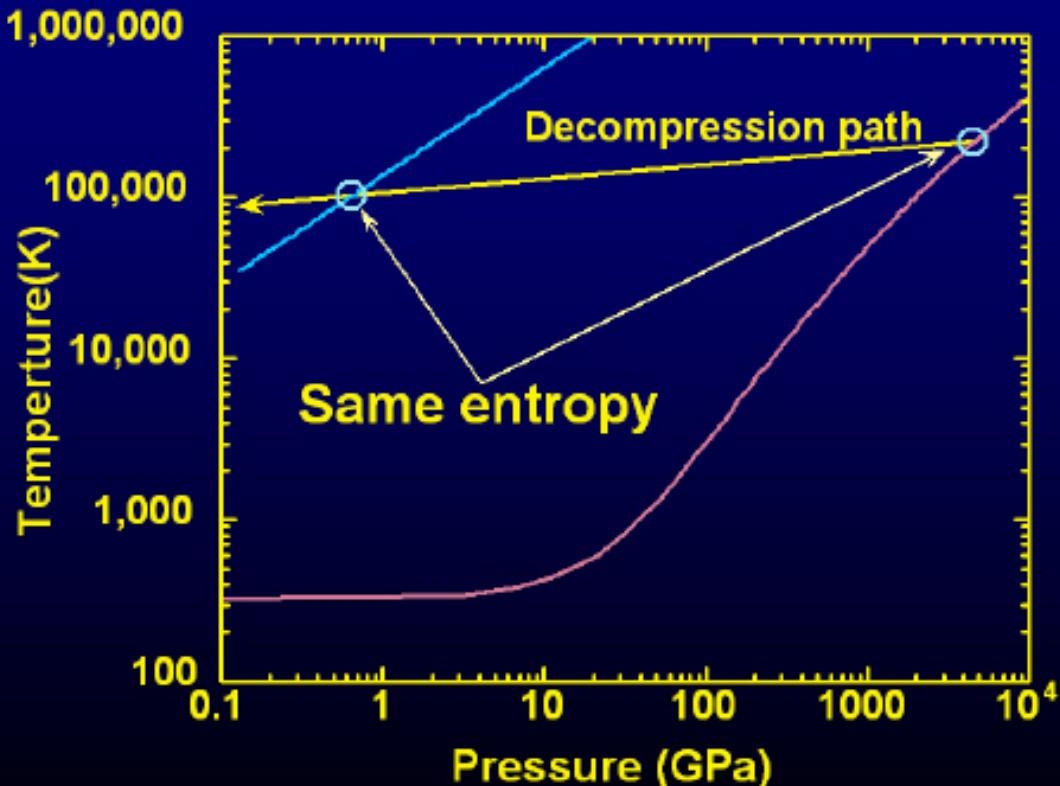
# 衝突蒸気雲とレーザー蒸気雲



# 衝突蒸気雲とレーザー蒸気雲



# 衝突蒸気雲とレーザー蒸気雲



# レーザー蒸気雲のエントロピー

☞ ランキン・ユゴニオの関係

$$\rho V = \rho_o V_o$$

$$P + \rho V^2 = P_o + \rho_o V_o^2$$

$$\frac{1}{2} V_o^2 + H_o = \frac{1}{2} V_o^2 + H_o$$

☞ 衝撃波速度と粒子速度の線形関係

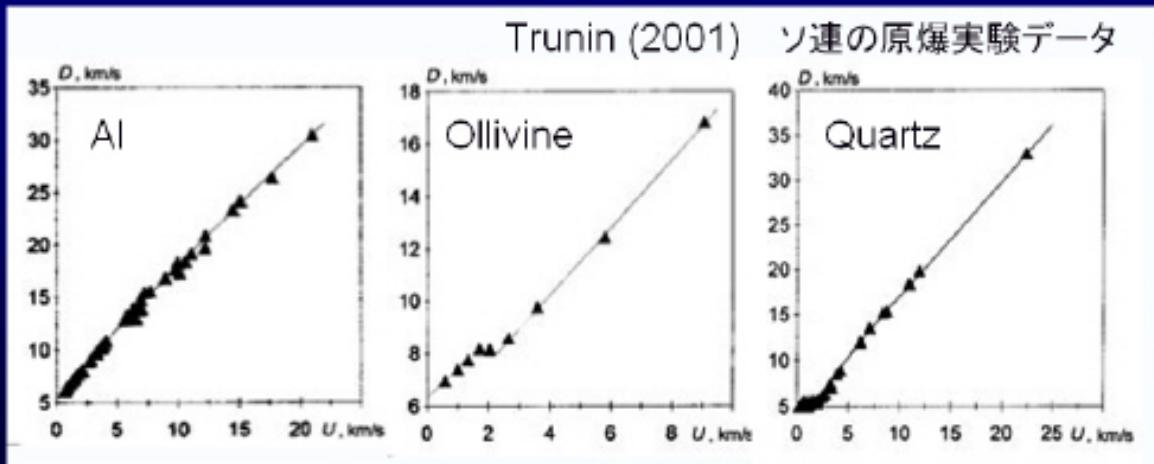
$$V_s = C_o + s U_p$$

☞ グリューナイゼン状態方程式

$$\left. \frac{\partial P}{\partial E} \right|_{\rho} = \Gamma \rho, \quad \Gamma = \Gamma_o (\rho / \rho_o)^{-q}$$

# 状態方程式

- 線形関係は、非常に広い領域で成り立つ。



- グリューナイゼン パラメータ  $\Gamma_o$  と “ $s$ ” の関係  
$$\Gamma_o = 2s - 1$$

# ランキン・ユゴニオ方程式の微分形

## ☞ エントロピー

$$\frac{dS}{dU_p} = \frac{sU_p^2}{T(C_o + sU_p)}$$

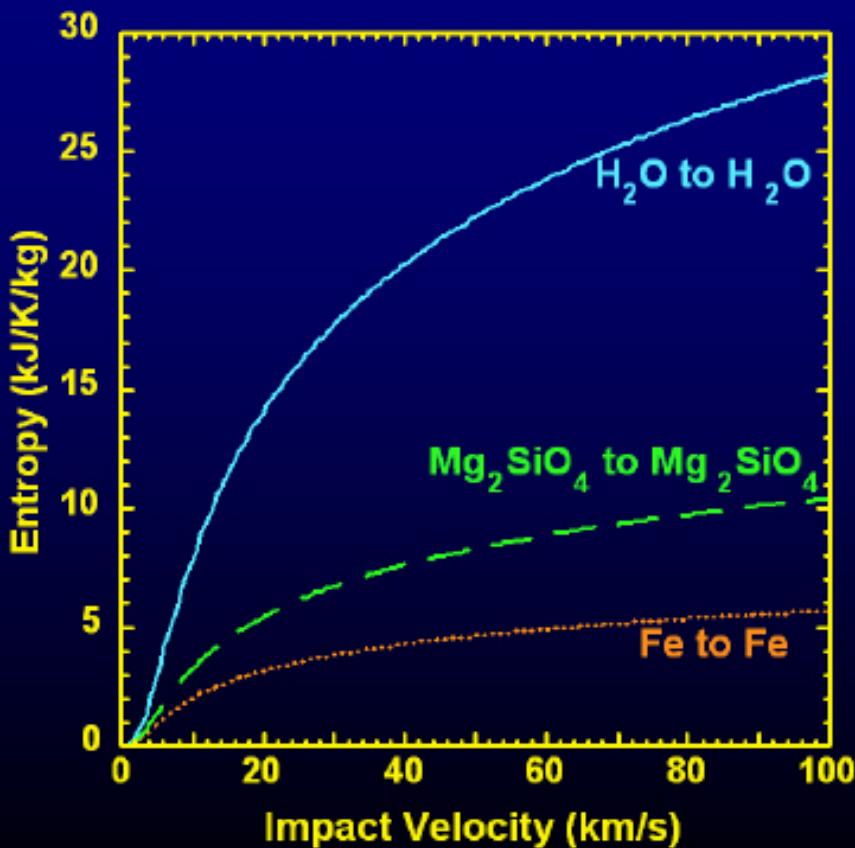
## ☞ 温度

$$\frac{dT}{dU_p} = C_o \Gamma_o T \frac{(C_o + (s-1)U_p)^{q-1}}{(C_o + sU_p)^{q+1}} + \frac{1}{C_v} \frac{sU_p^2}{C_o + sU_p}$$

## ☞ 壓力

$$P = U_p (C_o + s U_p) \rho_o$$

# 衝突によるエントロピーの増加



- ・衝撃によるエントロピー増加は衝突速度の上昇と共に鈍くなる。
- ・比熱が一定だと、漸近的に一定値に向かう。

# レーザー蒸気雲

- ☞ 低強度レーザー ( $10^9\text{-}10^{11}\text{ W/m}^2$ )
  - ☞ 凝縮相のみが加熱される。
  - ☞ 標的物質の蒸気圧によって、レーザー蒸気のP-T状態は決まる。
- ☞ 高強度レーザー ( $10^{12}\text{-}10^{14}\text{ W/m}^2$ )
  - ☞ 凝縮相と気相の両方が加熱される。

# 低強度レーザーによる蒸気雲

- ☞ 定常状態アブレーションモデル  
*(Penner and Olfe, 1967)*

$$I = \alpha P_o e^{-\frac{\Delta H_{vap}}{RT}} / \sqrt{2\pi RT} \cdot (\Delta H_{vap} + C_p T_w)$$

- ☞ レーザー蒸気のエントロピー

$$\Delta S = C_p \ln \frac{T_b}{T_o} + \frac{H_{vap}}{T_b} + \frac{R}{\mu} \left( \frac{\gamma}{\gamma-1} \ln \frac{T}{T_b} - \ln \frac{P}{P_o} \right)$$

# 高強度レーザーによる蒸気雲

☞ 壓力と温度 (Phipps et al., 1988)

$$P = 2 \times 10^{-4} A^{1/8} \Psi^{9/16} I^{3/4} (\lambda \sqrt{\tau})^{-1/4}$$

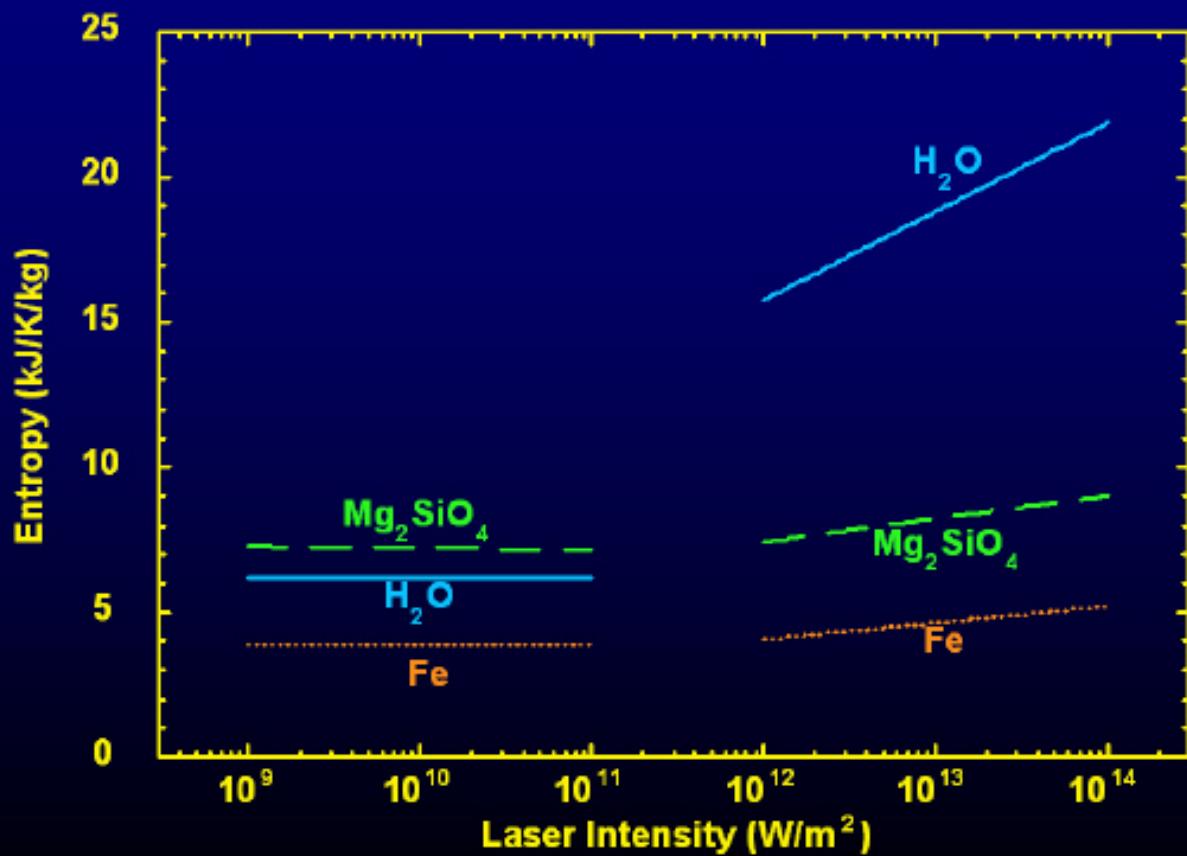
$$T = 3 \times 10^3 A^{1/8} (Z+1)^{-5/8} Z^{3/4} (I \lambda \sqrt{\tau})^{1/2}$$

A: Ion mass, Z: Ion valence

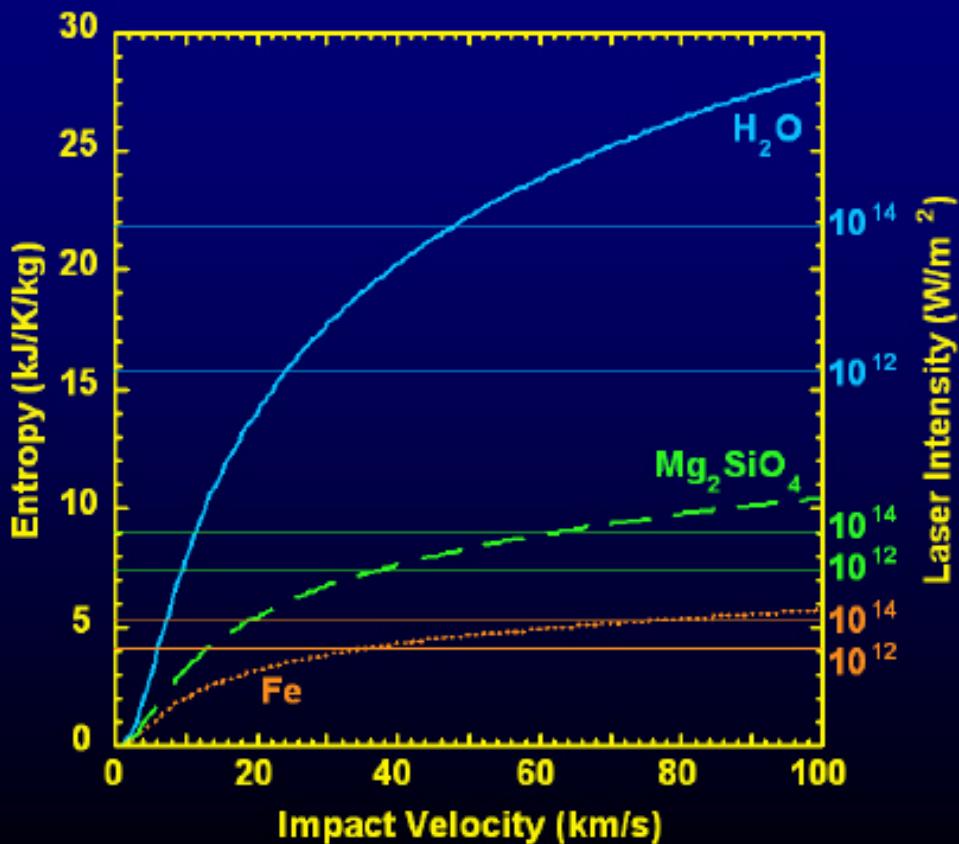
☞ Entropy

$$\Delta S = C_p \ln \frac{T_b}{T_o} + \frac{H_{vap}}{T_b} + \frac{R}{\mu} \left( \frac{\gamma}{\gamma-1} \ln \frac{T}{T_b} - \ln \frac{P}{P_o} \right)$$

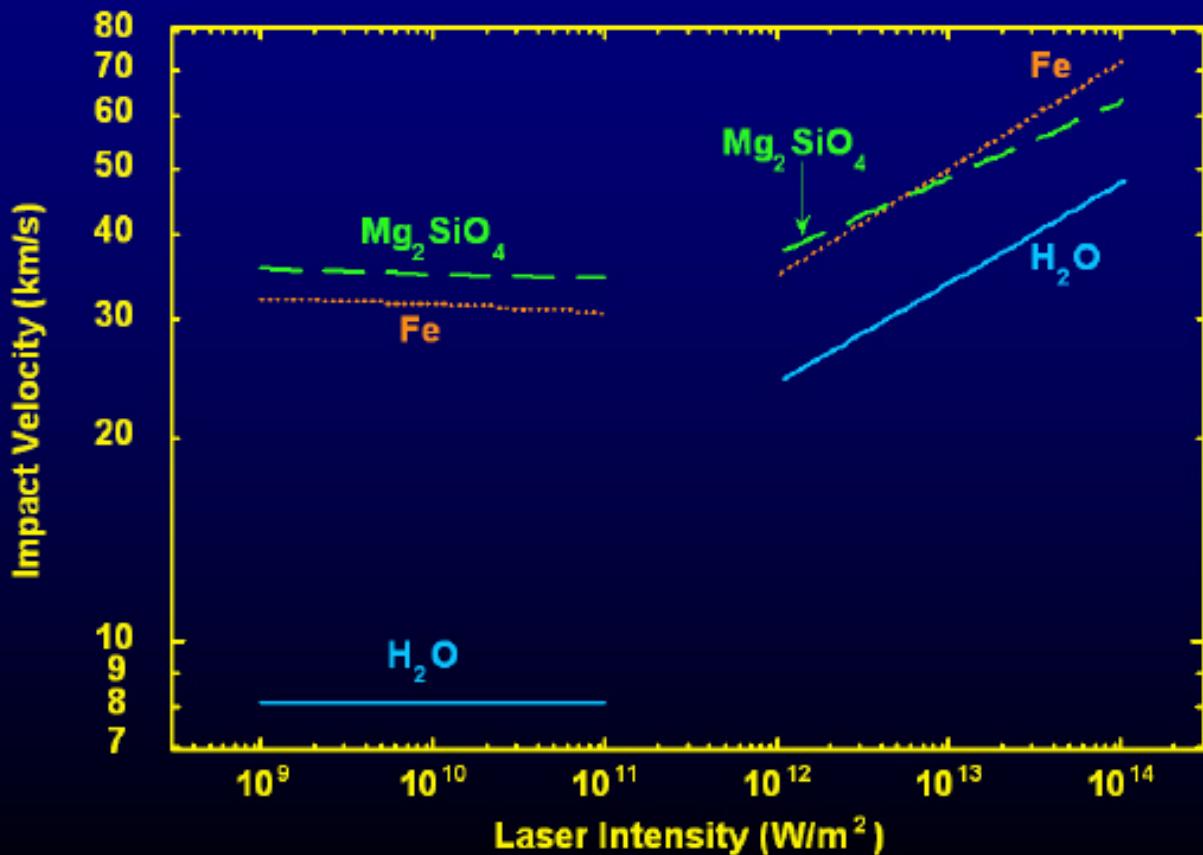
# レーザー蒸気のエントロピー



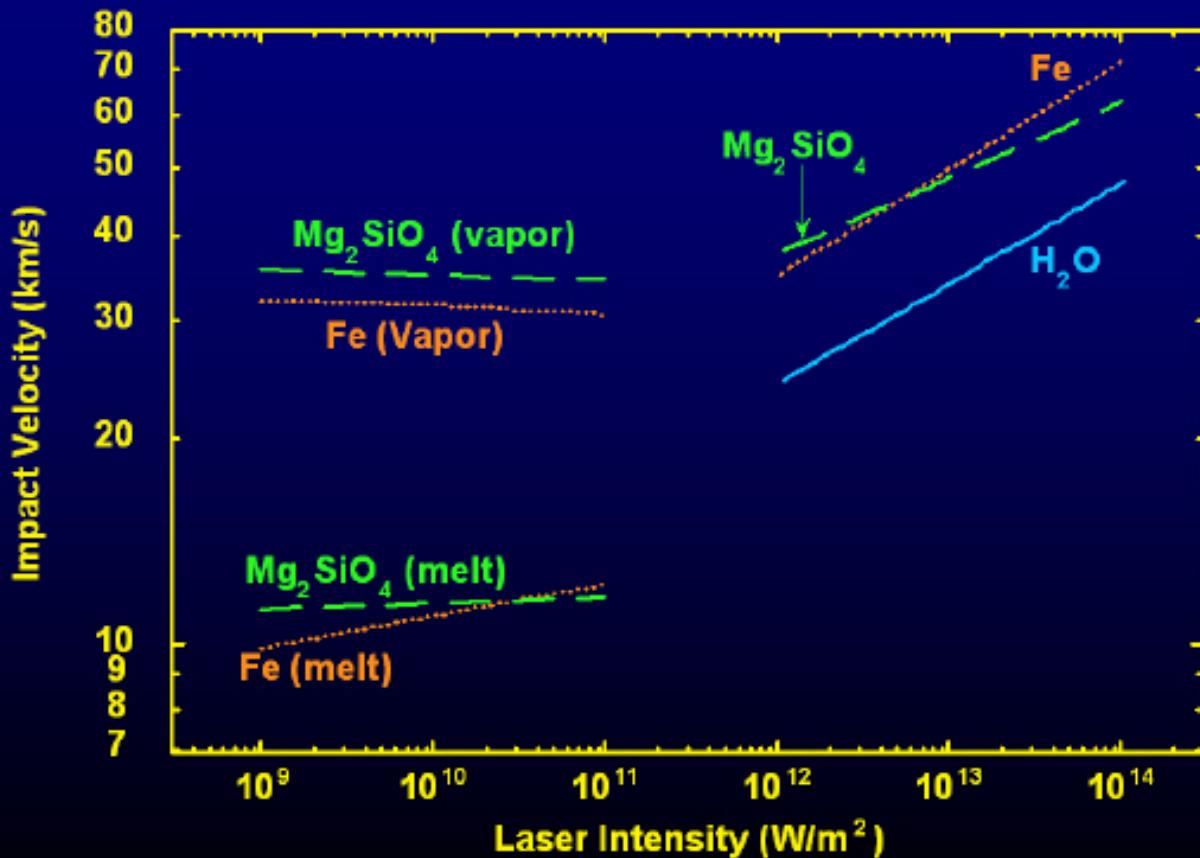
# レーザー蒸気雲と衝突蒸気雲



# レーザー蒸気雲と衝突蒸気雲



# レーザー蒸気雲と衝突蒸気雲



# 結果

- ☞ 高輝度レーザーは、高速の小惑星衝突(30~70 km/s)や彗星衝突(20~50 km/s)による蒸気雲の状態を再現する。
  - ☞ 低輝度レーザーは、10~35 km/sの小惑星衝突による衝突蒸気雲の状態を再現する。メルトが蒸気雲に混じっていることが必要
- ∴ 低輝度レーザーによる蒸気雲では、気相と液相の比率が、蒸気雲全体の平均エントロピーを決める。

# 注意点

- ☞ 空隙率の問題
  - ☞ シアバンドによる局所加熱の問題
  - ☞ 粘性加熱の問題
  - ☞ 電子比熱の問題
- ◆ 実際の衝突実験を重ねる必要がある。

# レーザー照射実験を使った応用例

- ・衝突蒸気雲内の化学反応の解析例