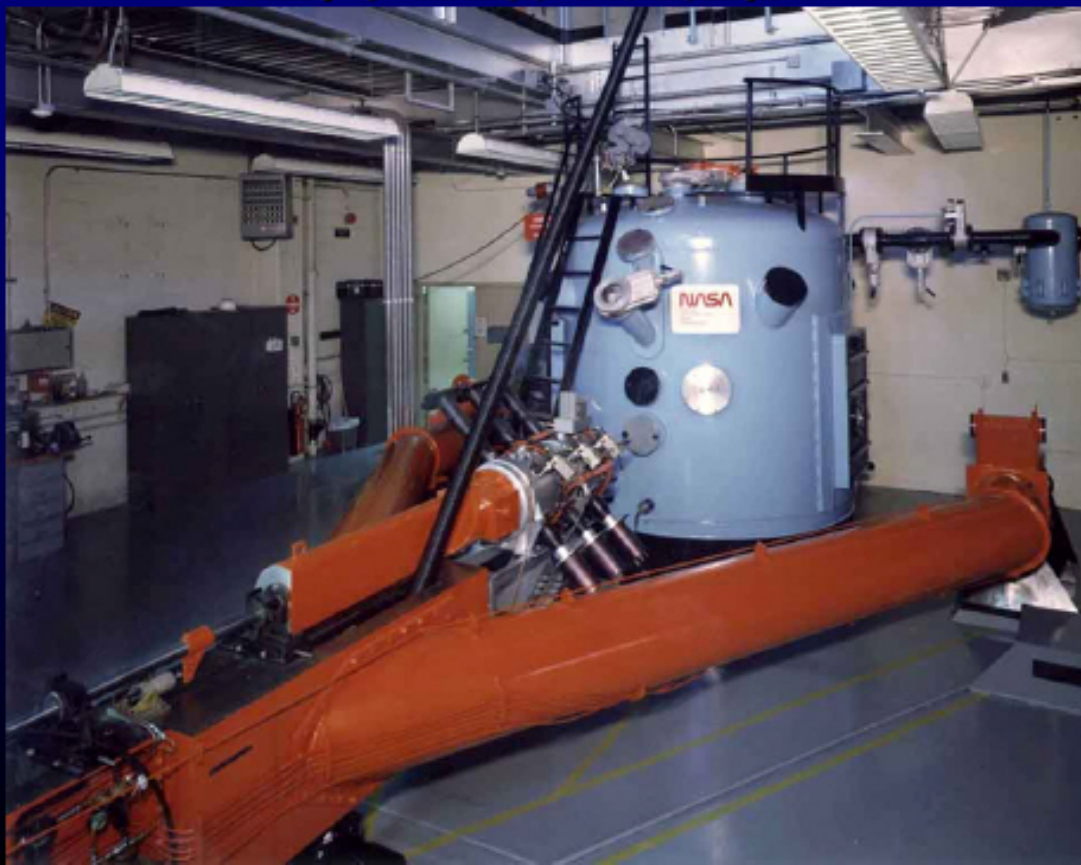


NASA Ames 研究センター

超高速衝突銃施設



衝突実験の雰囲気

QuickTimey Ç®
YUV420 ERÄ(EIEBEN 8LIIEVÉÇÉDE8EA
Ç™Ç¿ÇÆsENE EBÇ%ŹDÇEÇ2Ç%Ç... ÇOIK0vÇ-ÇIAB

直径6.3mm アルミ弾丸
45° , 6km/s



火山灰粉末の標的

30 cm

0 μ s



100 μ s



200 μ s



300 μ s



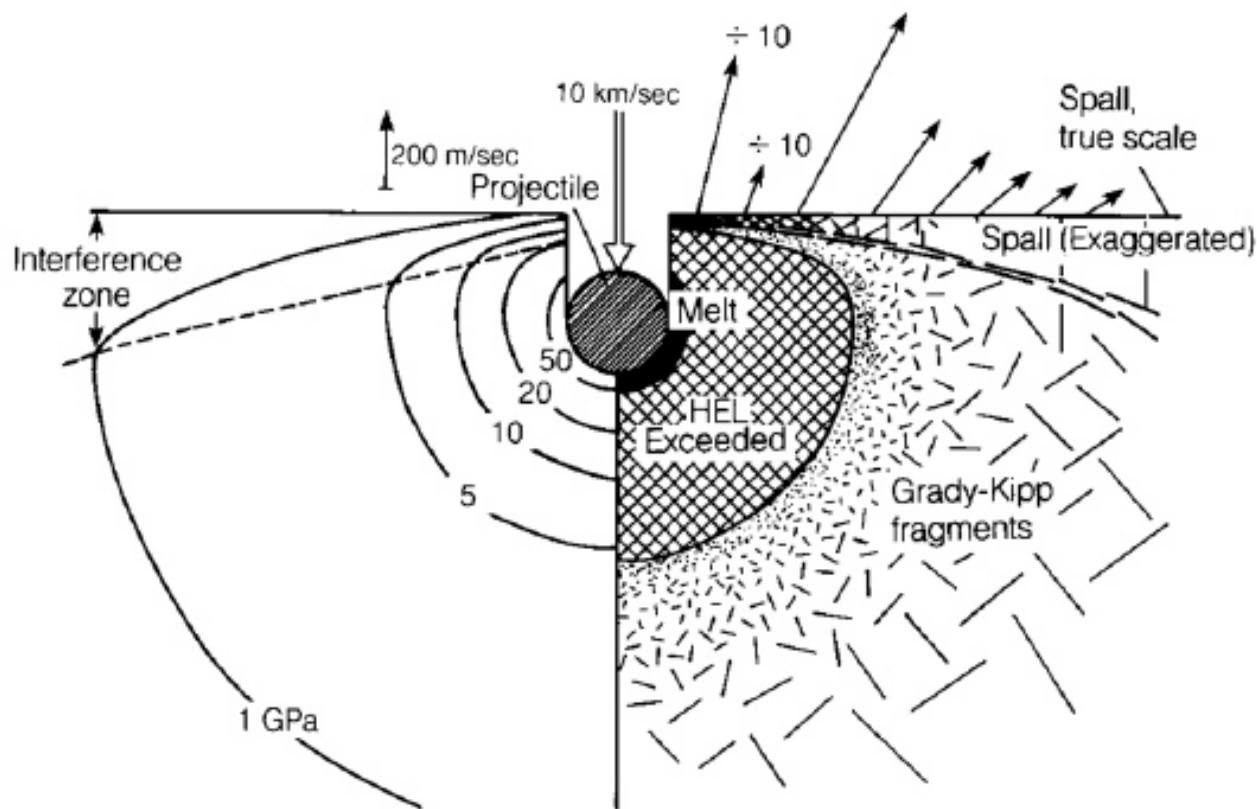
400 μ s



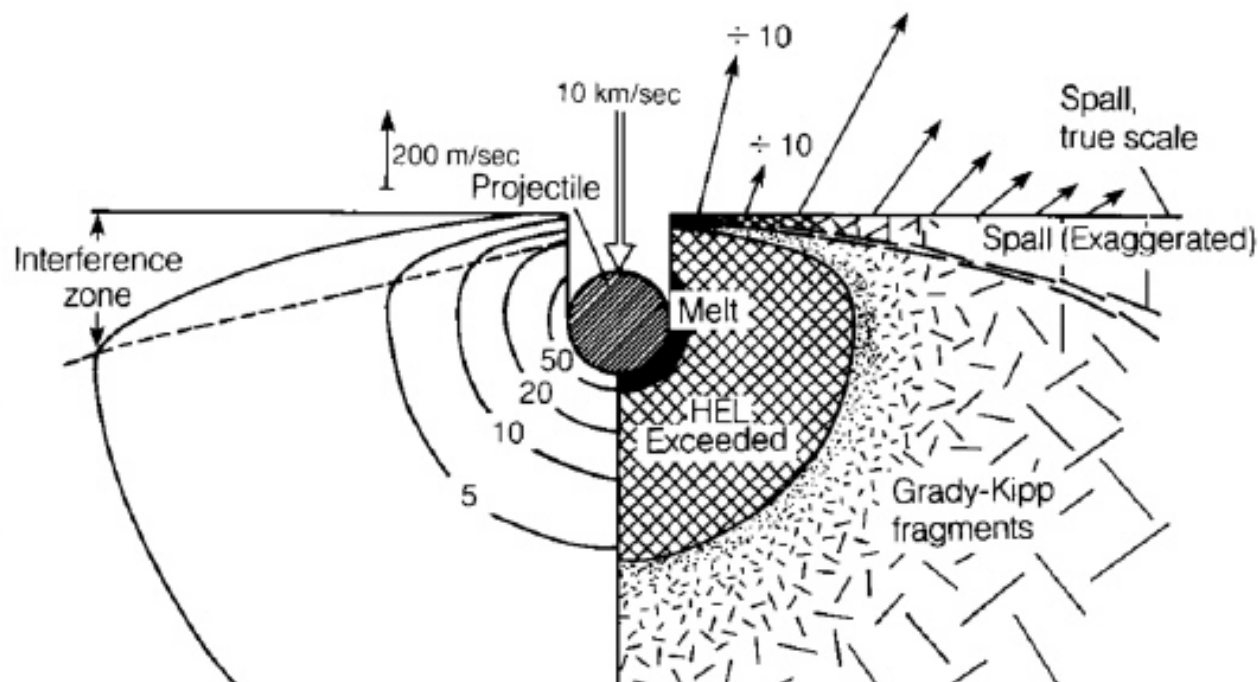
500 μ s



天体衝突に伴う様々な物理過程

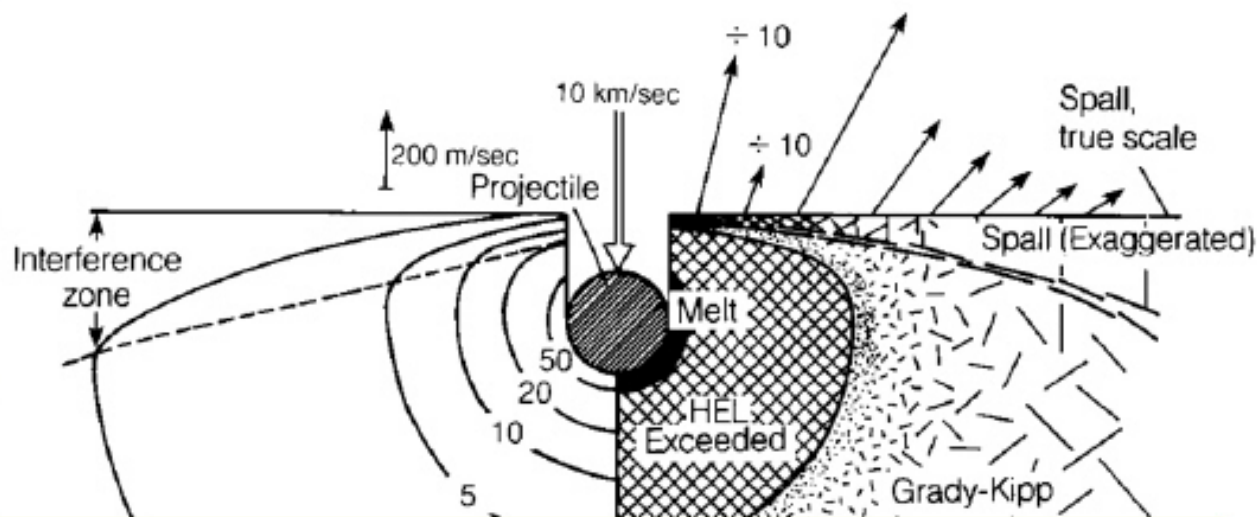


天体衝突に伴う様々な物理過程



高エネルギー密度領域の研究は未発達。

天体衝突に伴う様々な物理過程



低エネルギー密度領域の研究は進んでいる。

高エネルギー密度領域の研究は未発達。

衝突物理過程についての課題

- 高エネルギー現象の理解が課題
 - 熱力学状態の観測が難しい
 - 高エネルギー状態の生成が難しい

高速分光法

- ☞ 衝突蒸発は、時間変化が激しい過程
 - 実験室内で生成する衝突蒸気雲は、 μsec の時間尺度で変化する。
 - CCD は、典型的に 10^{-3} 秒の読み出し速度
- ➔ 増倍型 CCD 検出器 ($\sim 10^{-8}$ sec) を導入

高エネルギー状態の計測法

④ 分光計測法

④ 衝突蒸気雲内の化学変化を測定できるほぼ唯一の手段

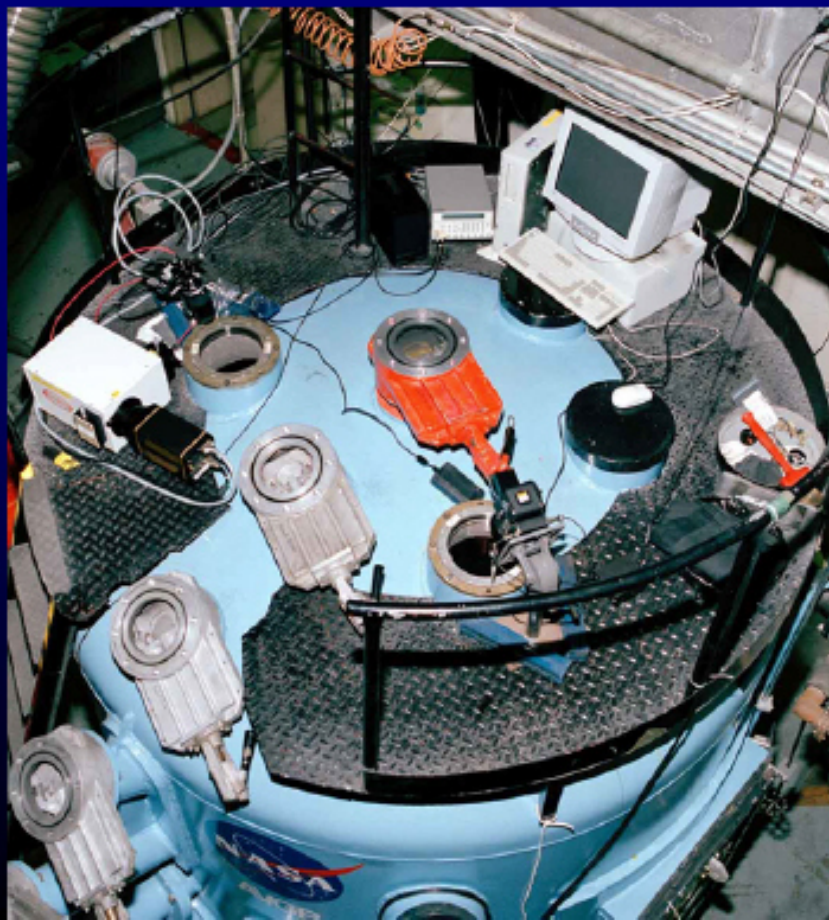
■ メリット

- 遠隔計測が可能：高速衝突の破壊力と無縁
- 高速計測が可能： μsec 単位の化学反応が計測可
- 気相のスペクトル理論は発展している。

■ デメリット

- 解析が複雑
- 計測装置が高価
 - フィルムやCCDでは高速度に対応できない。
 - 光電子増倍管ではチャンネル数が足りない。
 - 増倍管付きCCD (ICCD)が必要。

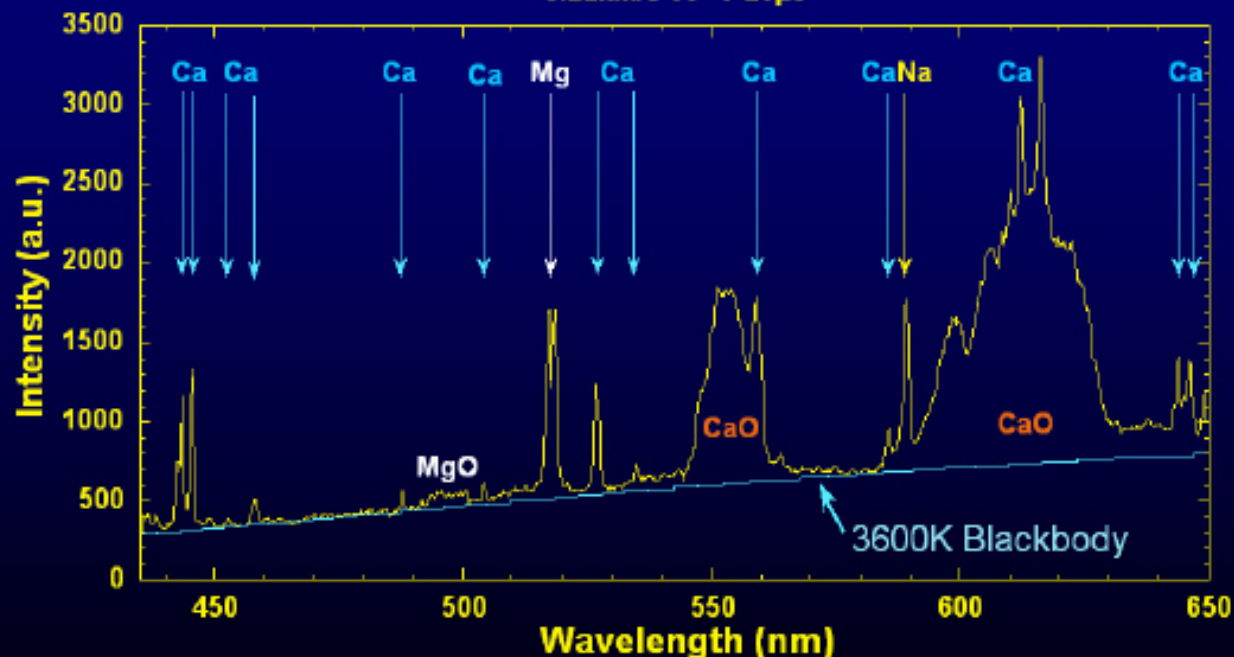
高速分光計@Ames研究センター



Long exposure time

Quartz into Dolomite

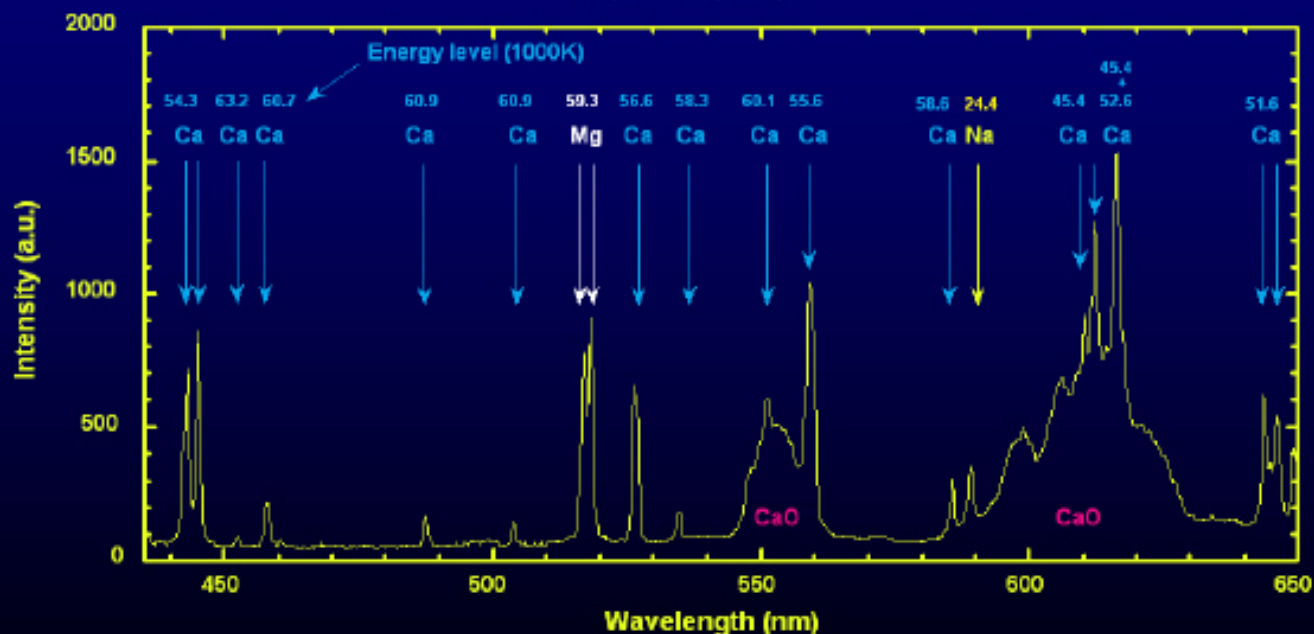
5.22km/s 60° 0-20 μ s



Short exposure time

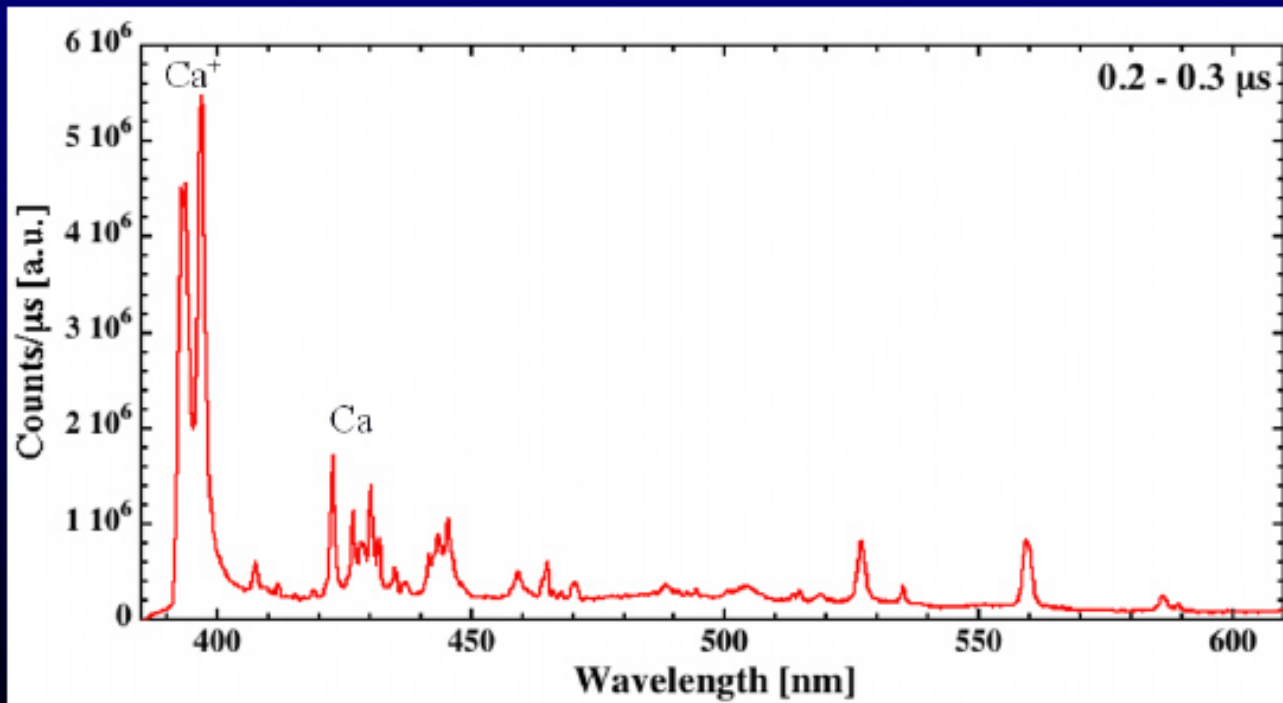
Quartz impact into Dolomite Block

60°, 5.27km/s, 0 - 2 μ s



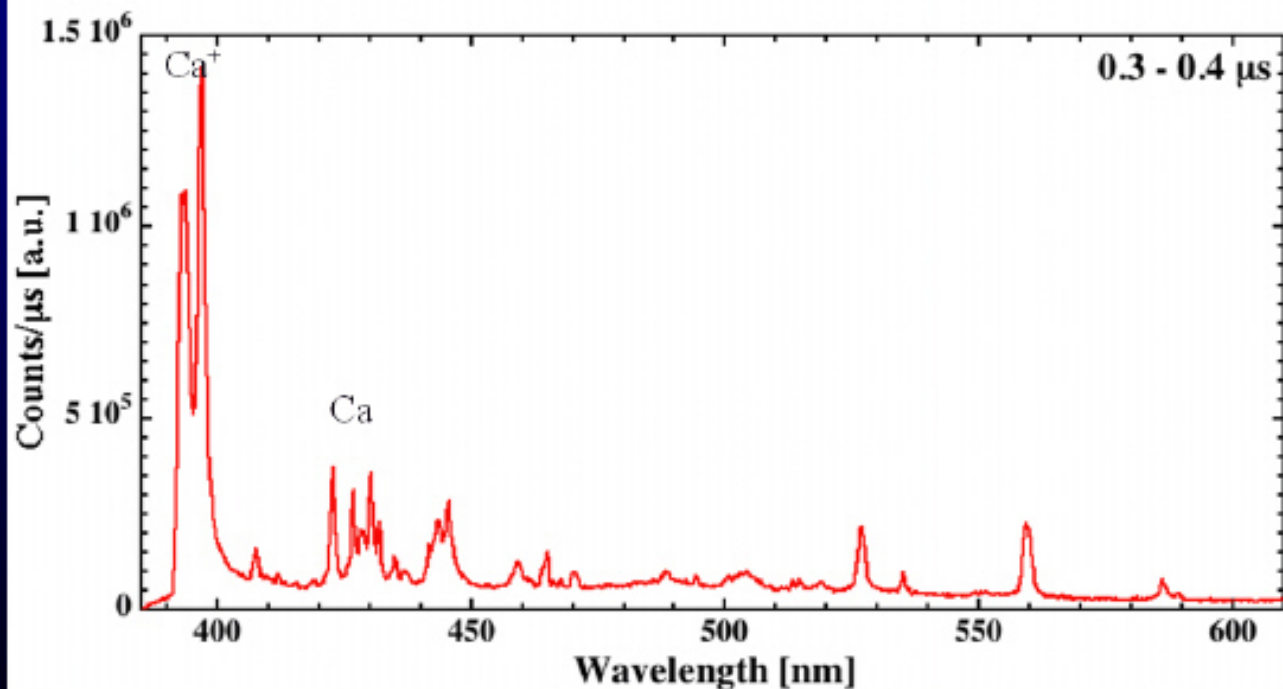
高温気相発光スペクトル

Ca(OH)_2 蒸気



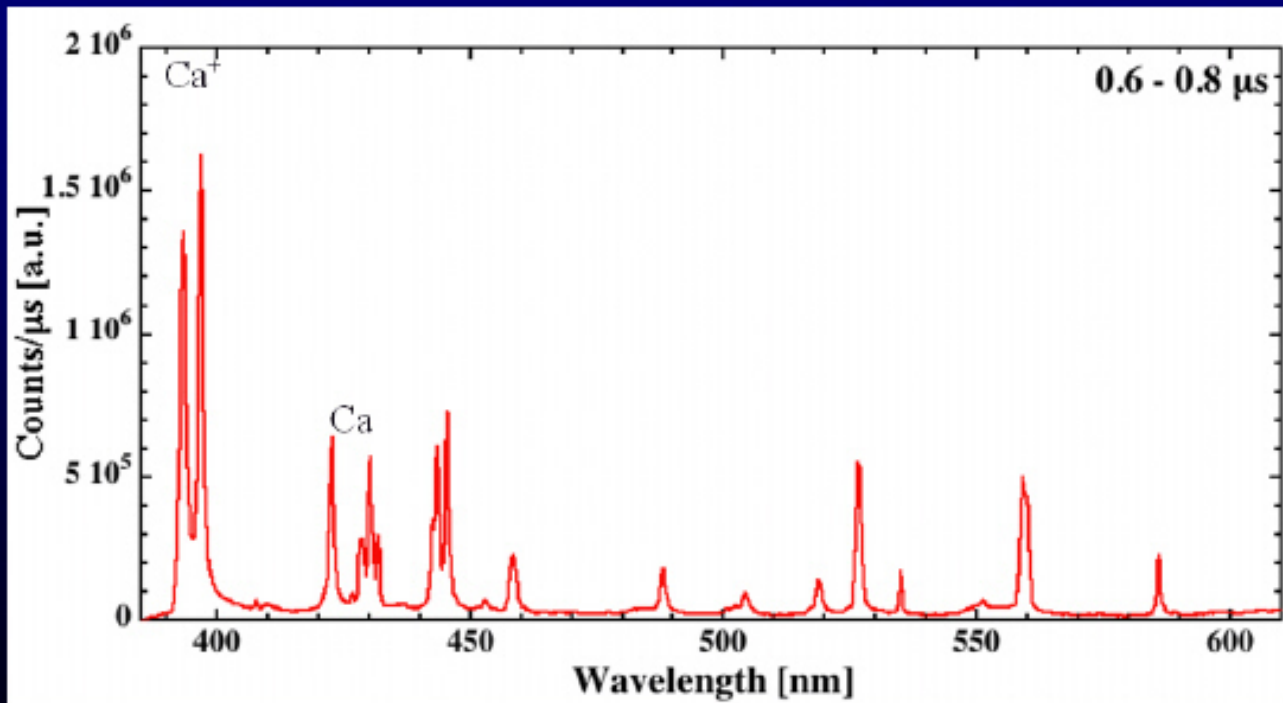
高温気相発光スペクトル

Ca(OH)_2 蒸気



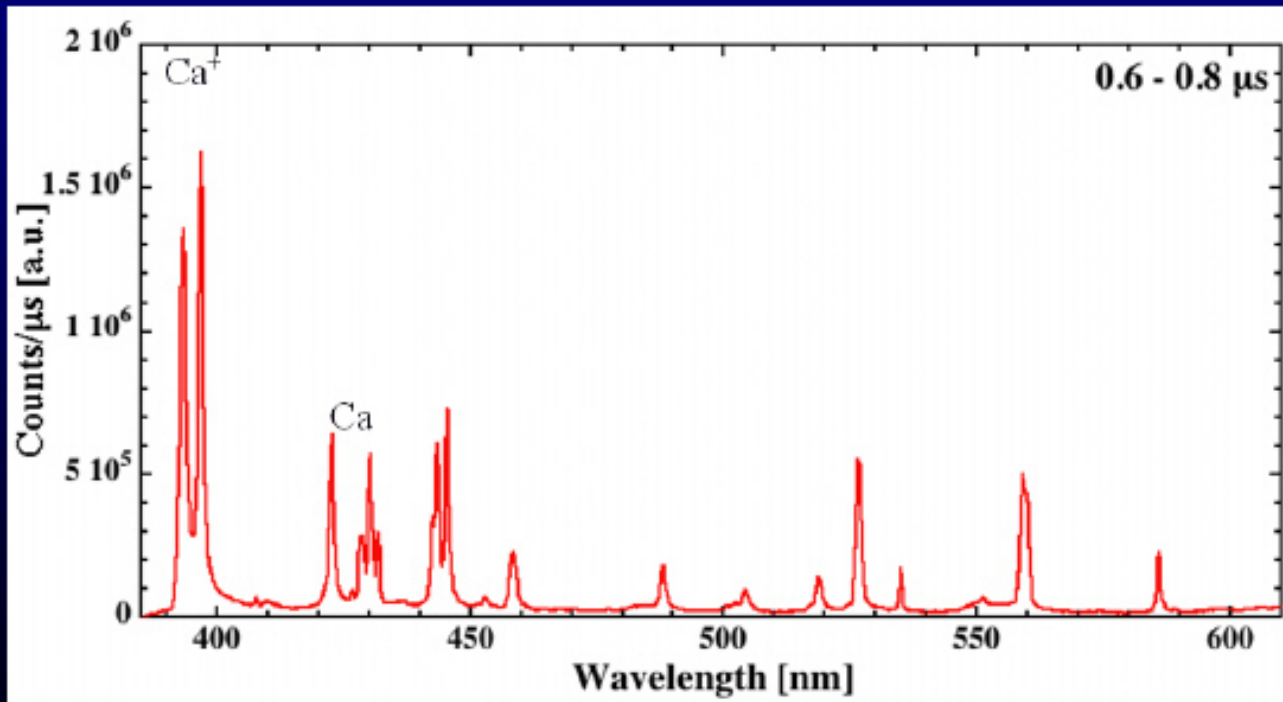
高温気相発光スペクトル

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 蒸気



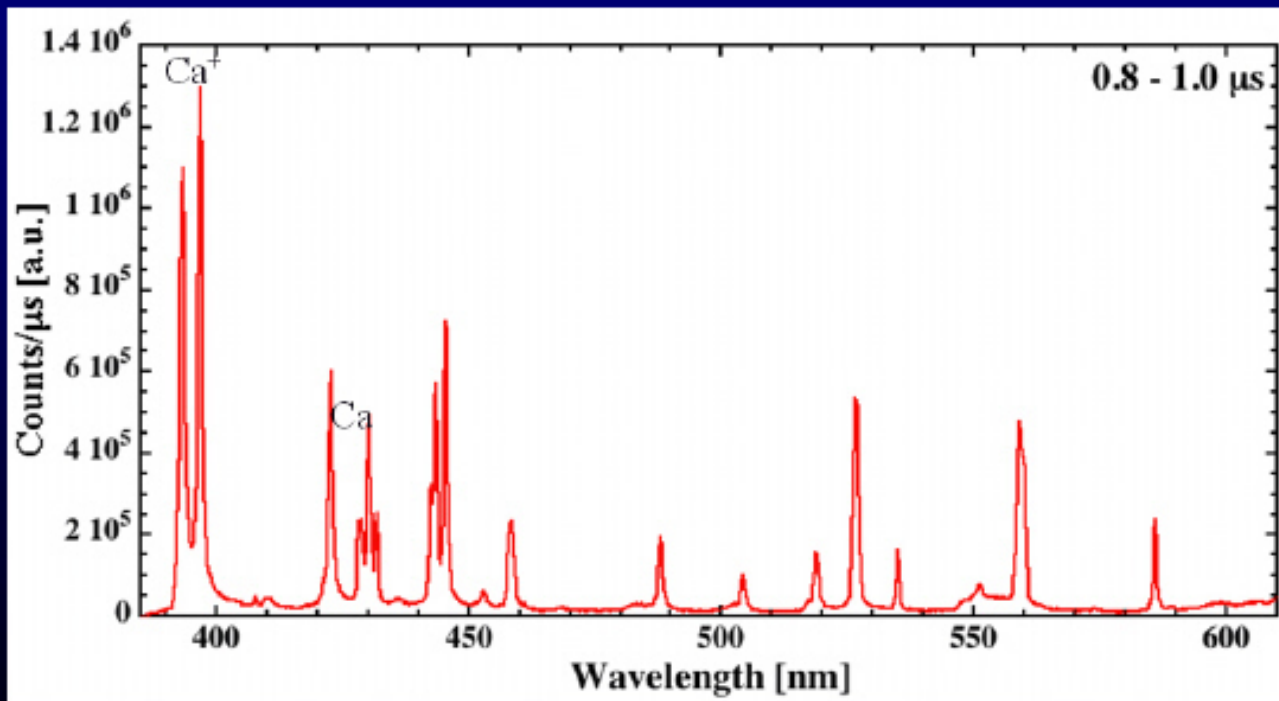
高温気相発光スペクトル

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 蒸気



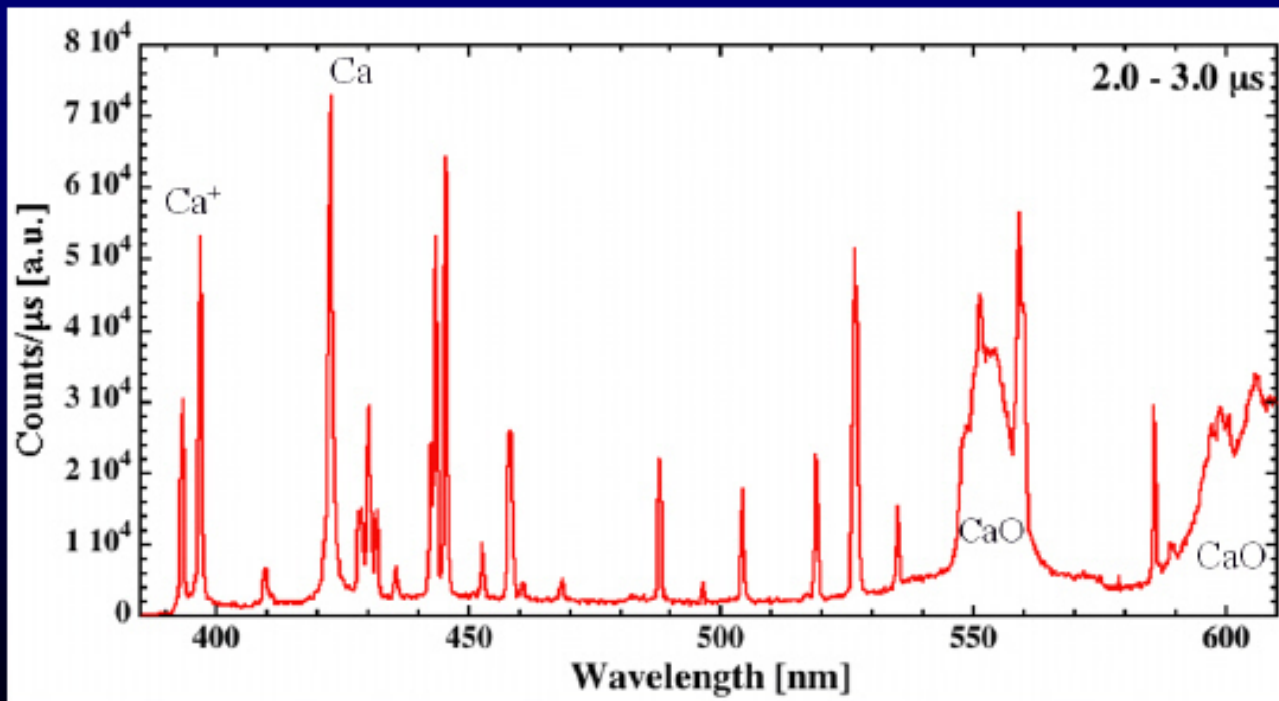
高温気相発光スペクトル

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 蒸気



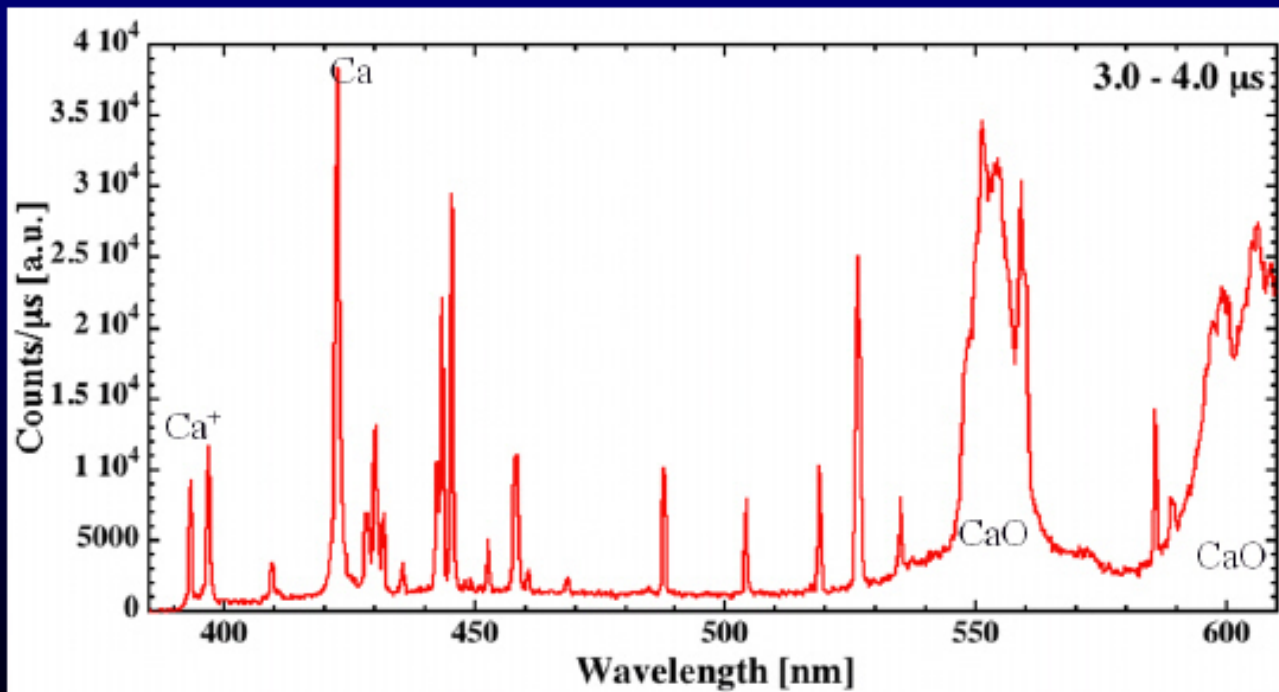
高温気相発光スペクトル

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 蒸気



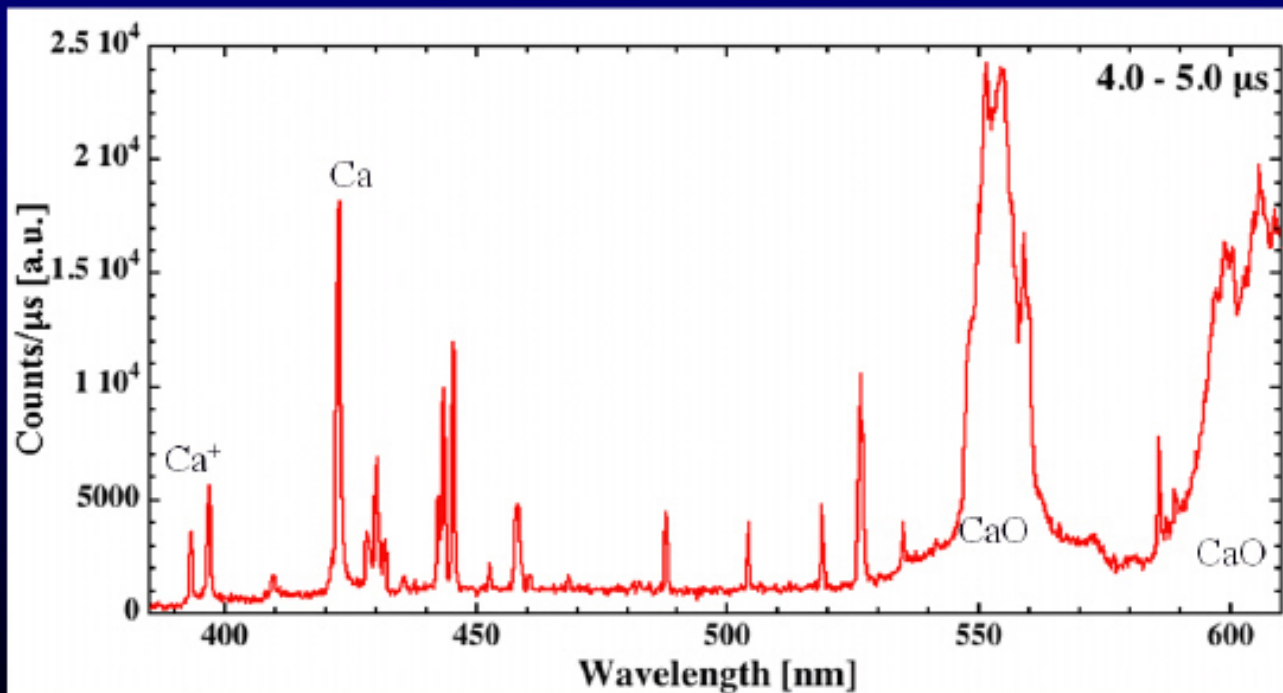
高温気相発光スペクトル

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 蒸気



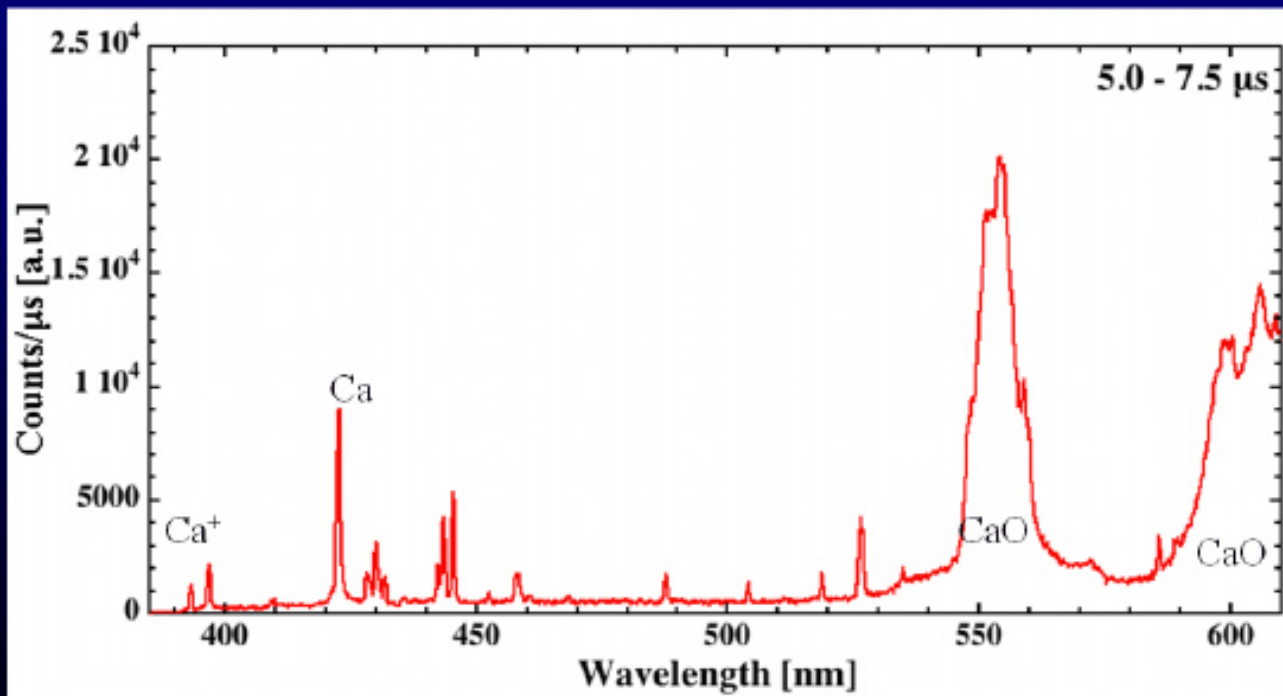
高温気相発光スペクトル

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 蒸気



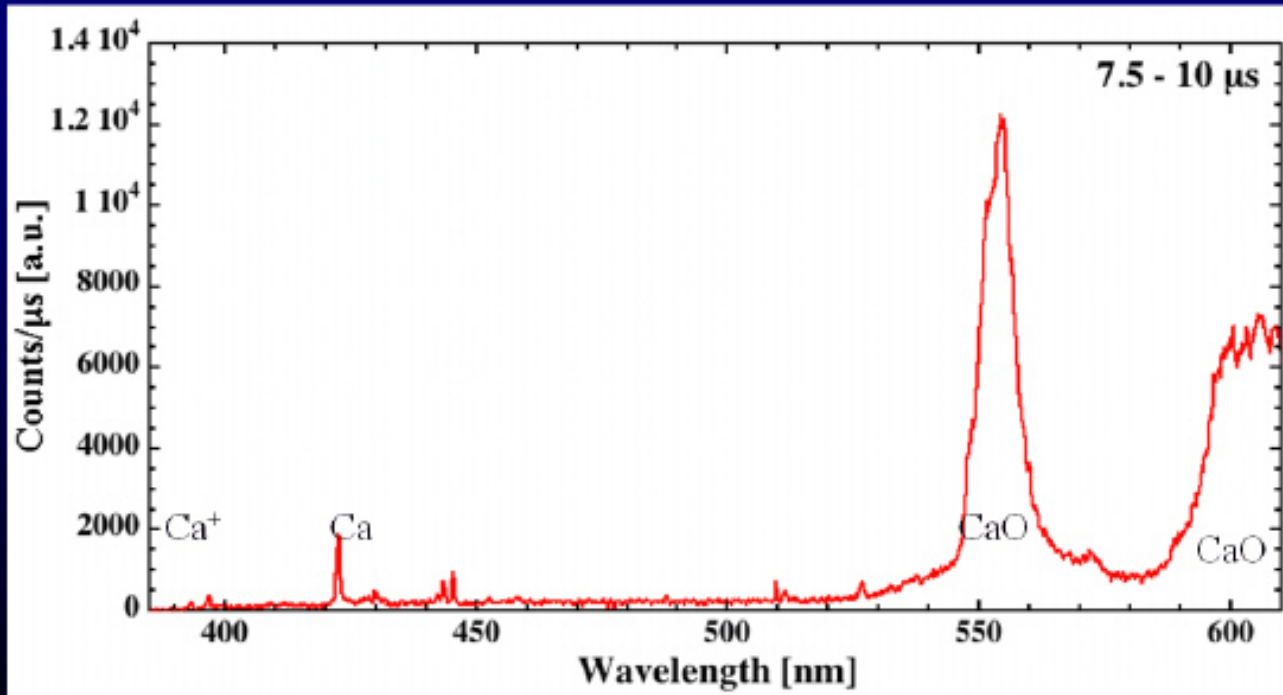
高温気相発光スペクトル

Ca(OH)_2 蒸気



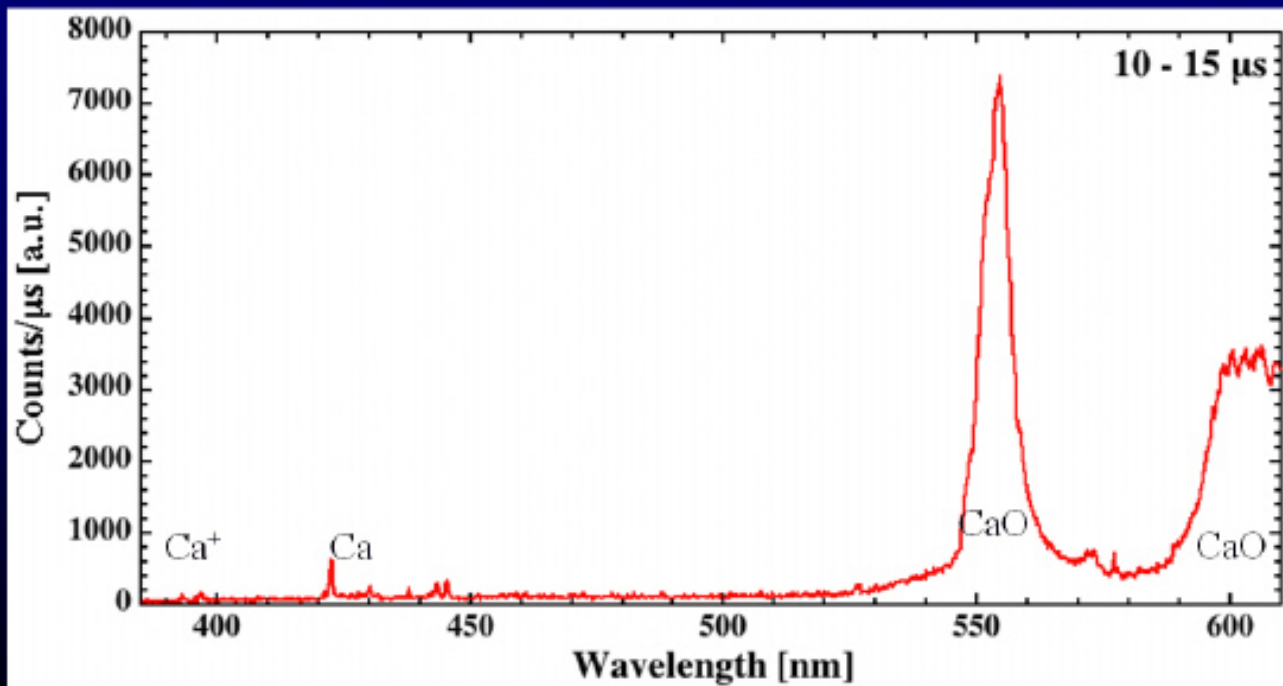
高温気相発光スペクトル

Ca(OH)_2 蒸気



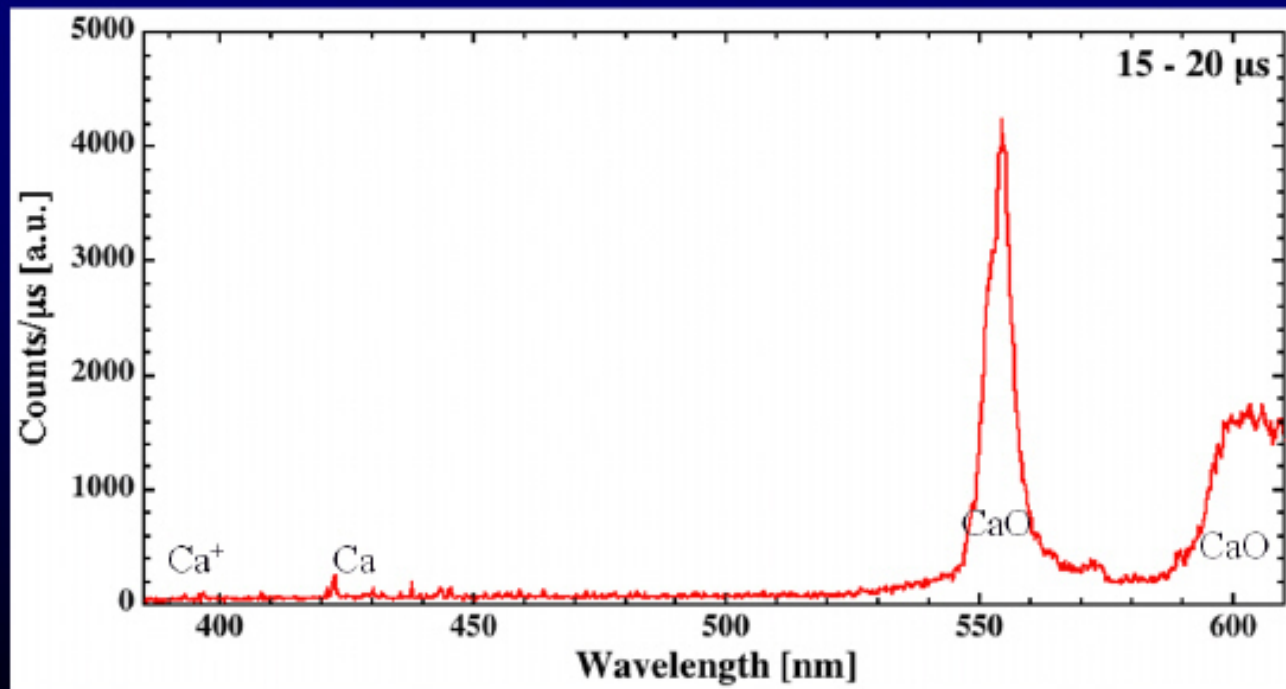
高温気相発光スペクトル

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 蒸気



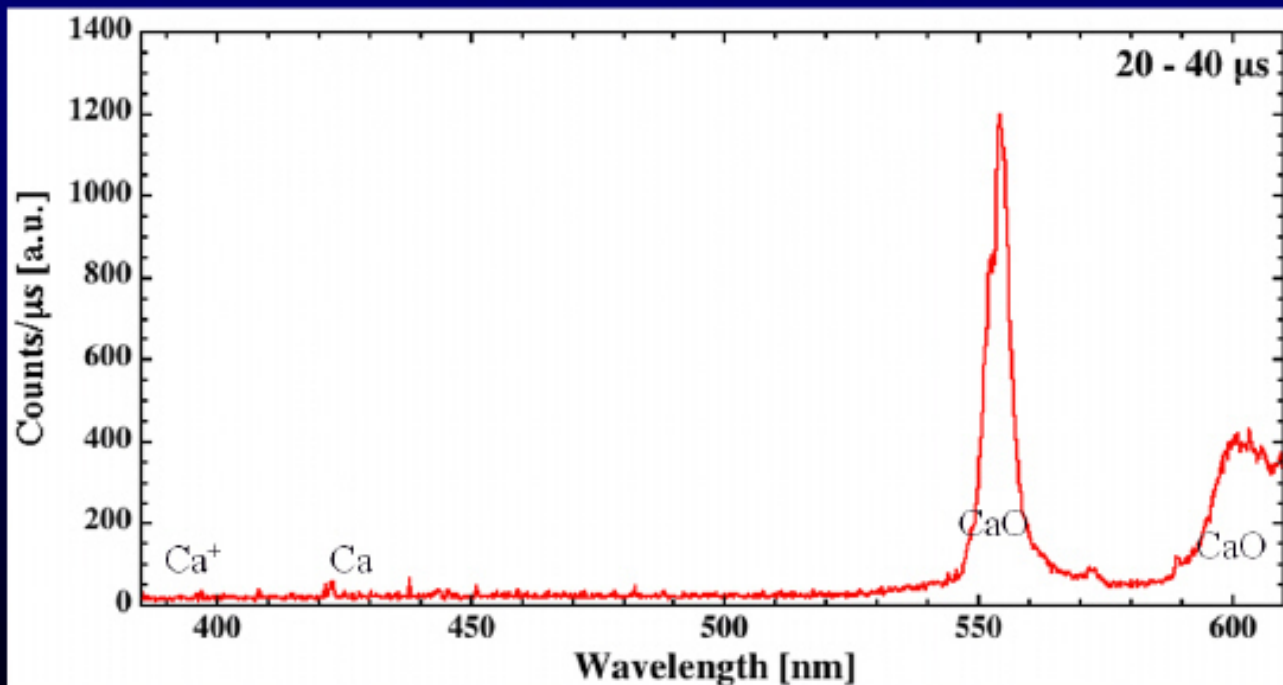
高温気相発光スペクトル

Ca(OH)_2 蒸気



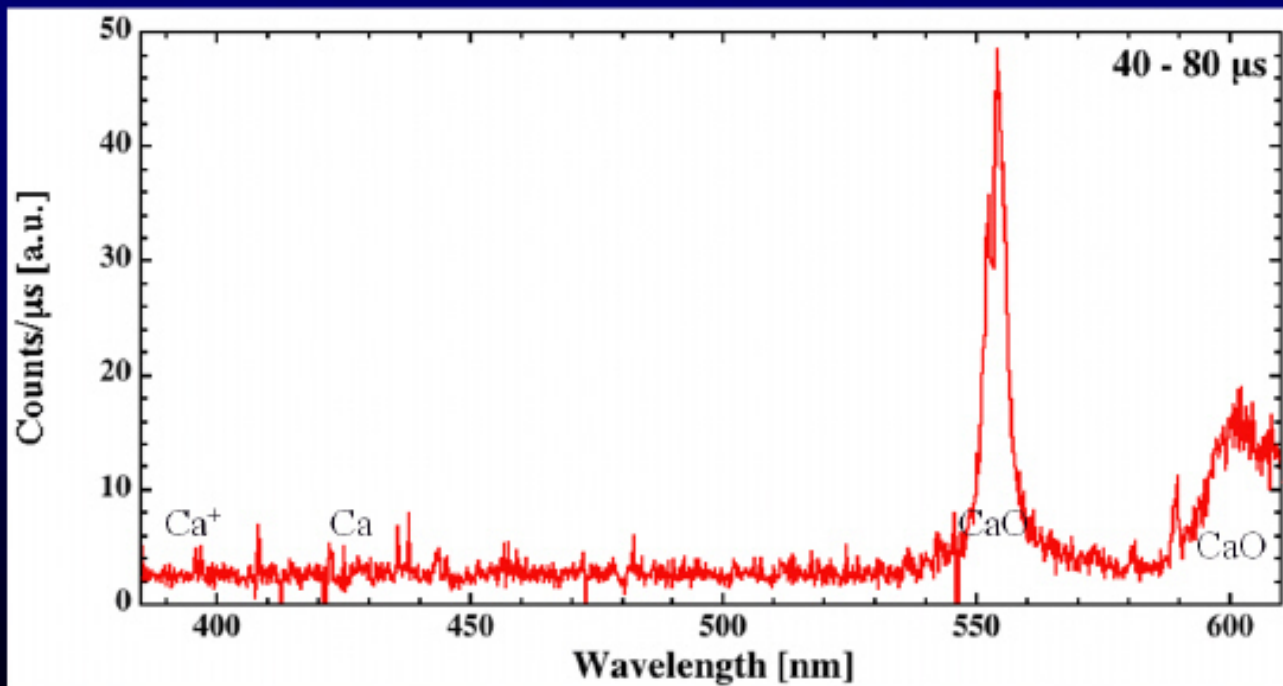
高温気相発光スペクトル

Ca(OH)_2 蒸気

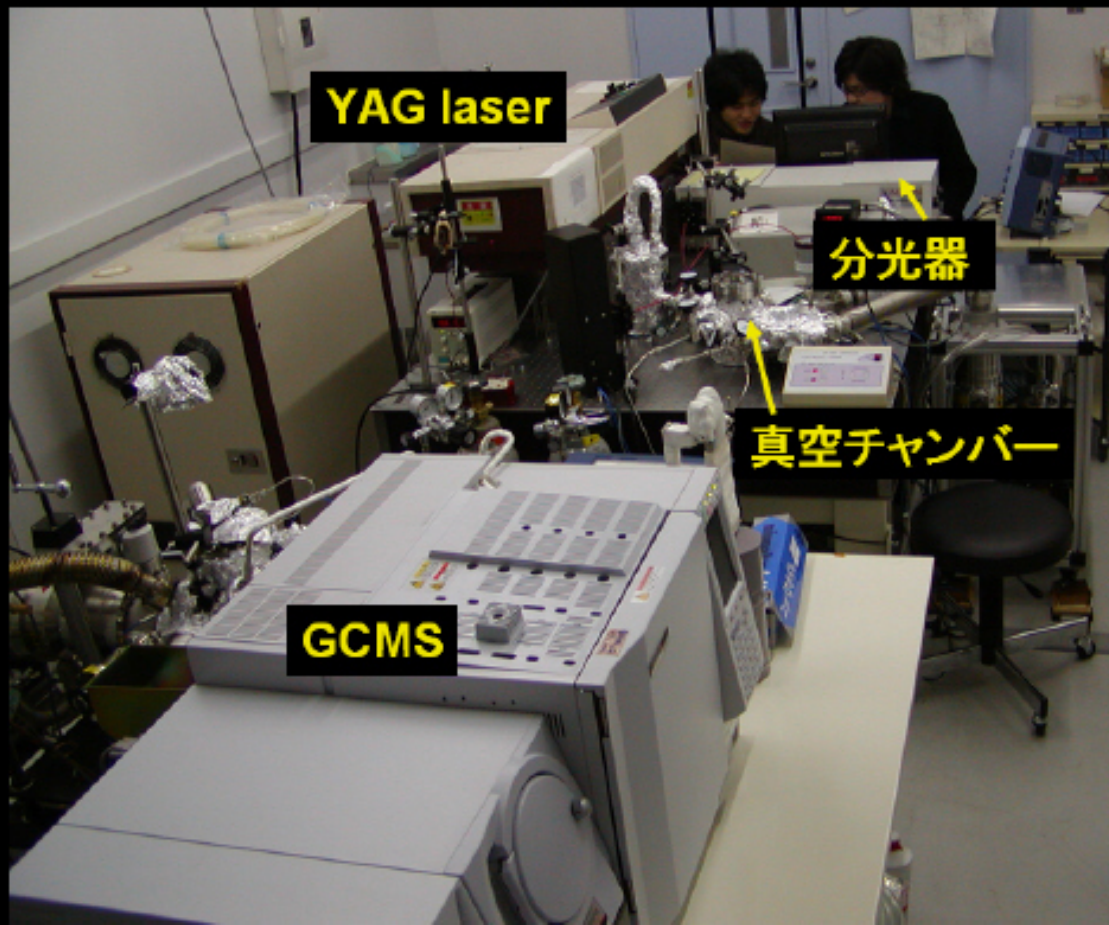


高温気相発光スペクトル

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 蒸気



レーザーを使った実験



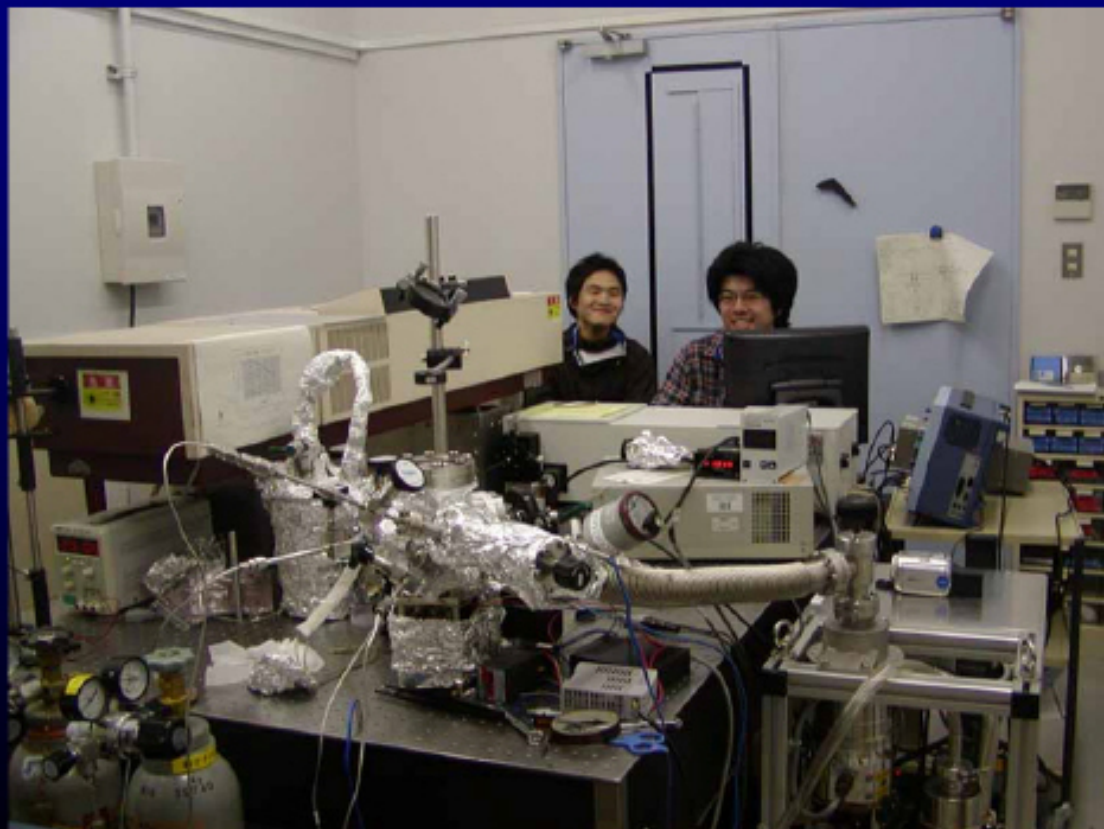
YAG laser

分光器

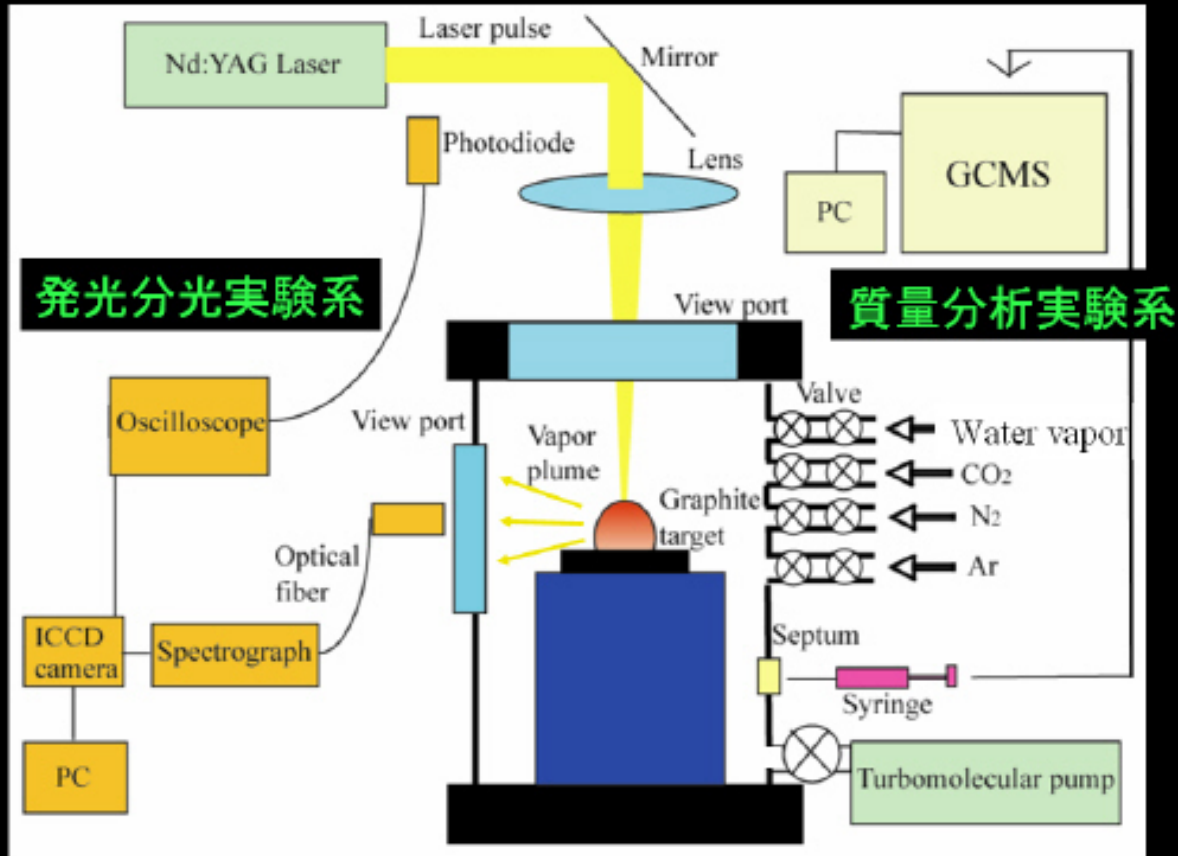
真空チャンバー

GCMS

データ取得を手伝ってくれた学生さん

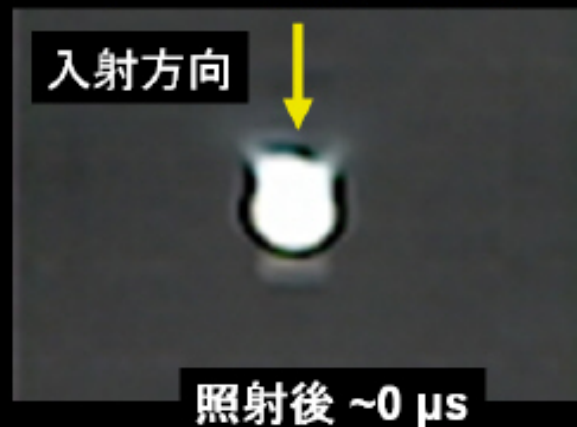


実験装置

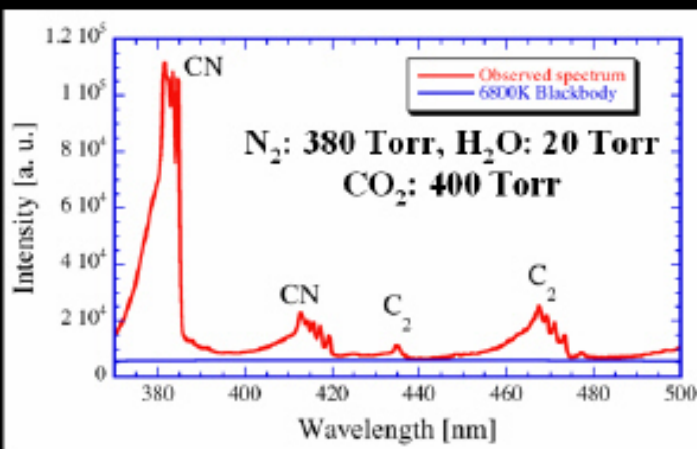


チェンバー壁の温度: 80°C (水の吸着を防ぐため)

レーザー蒸気雲の様子

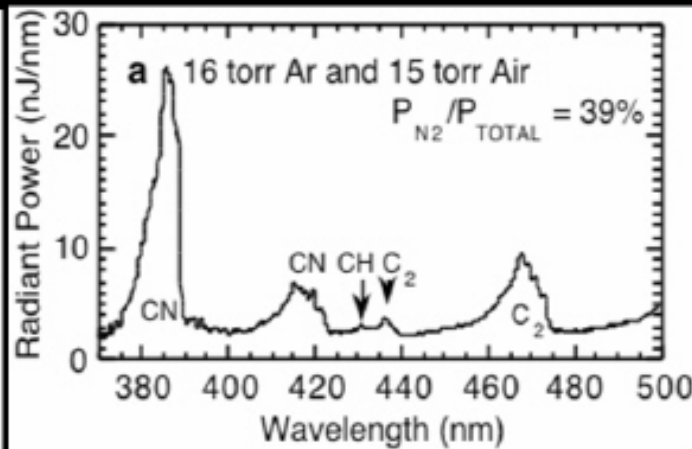


発光スペクトル比較



レーザー照射実験(本研究)

温度: ~ 7000 K



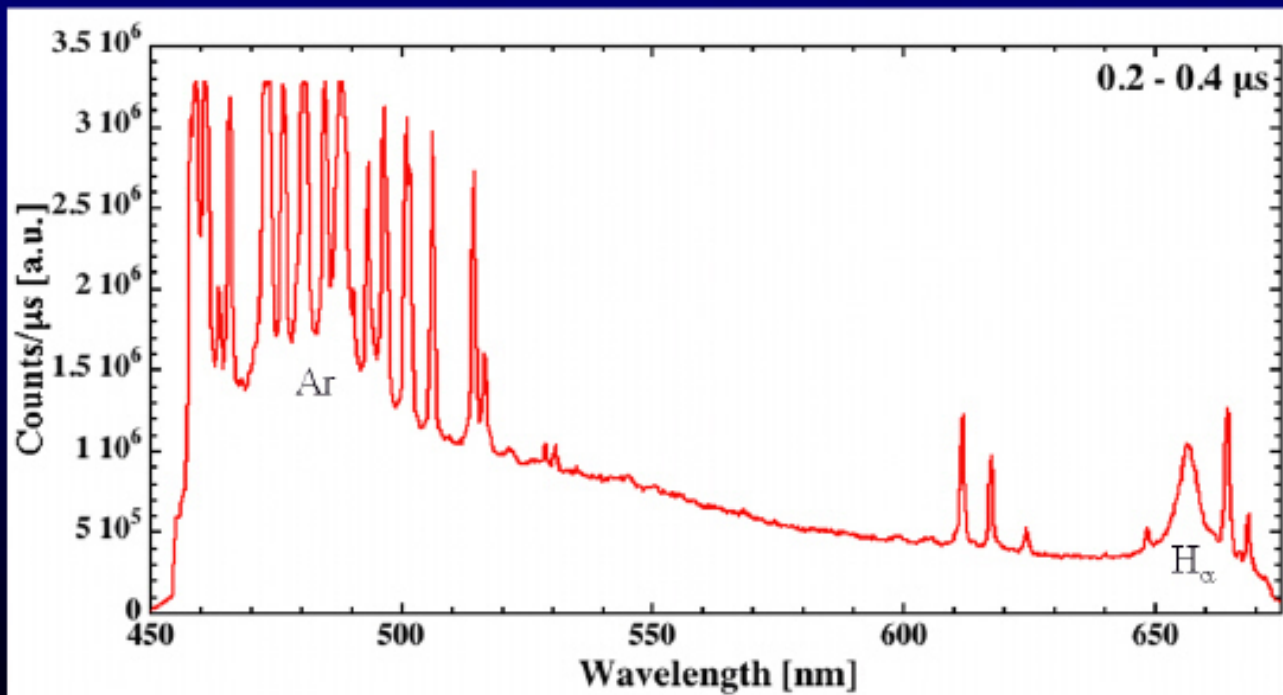
高速度衝突実験(Sugita & Schultz, 2000)

温度: $\sim 4500 - 5500$ K

レーザーで”Ablation vapor”を模擬できている。

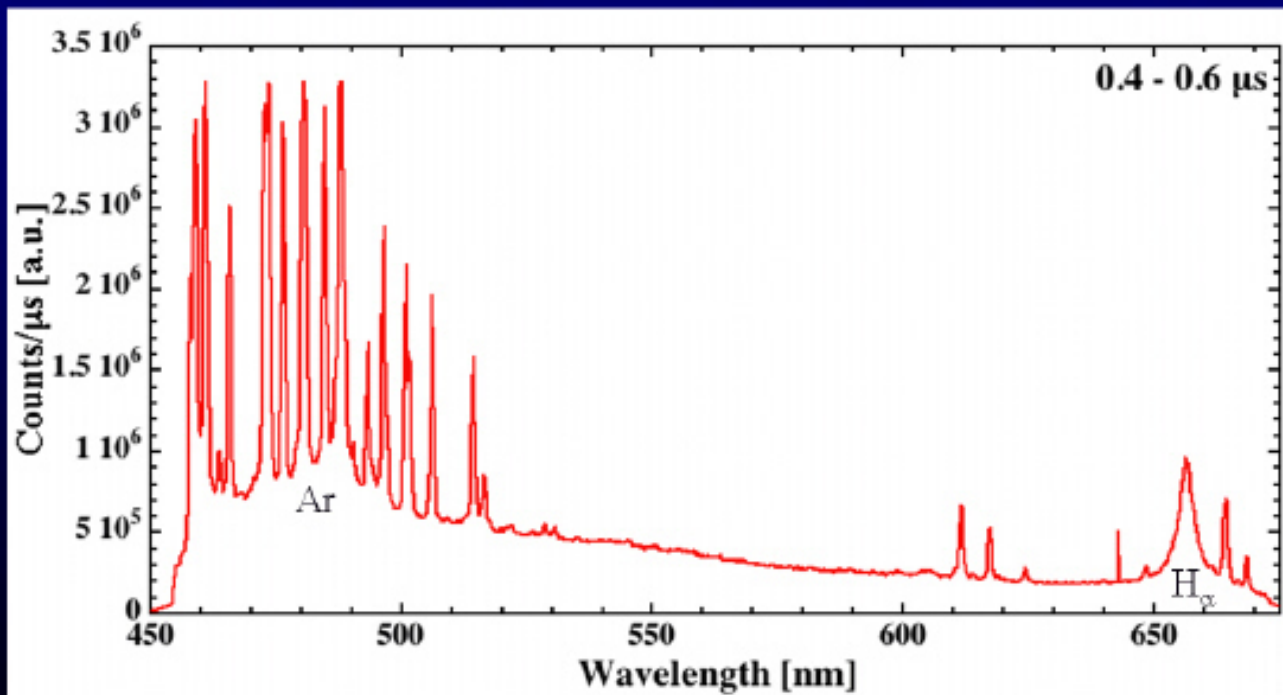
高温気相発光スペクトル

$[\text{CH}]_n$ 蒸気 (Ar 雰囲気気下)



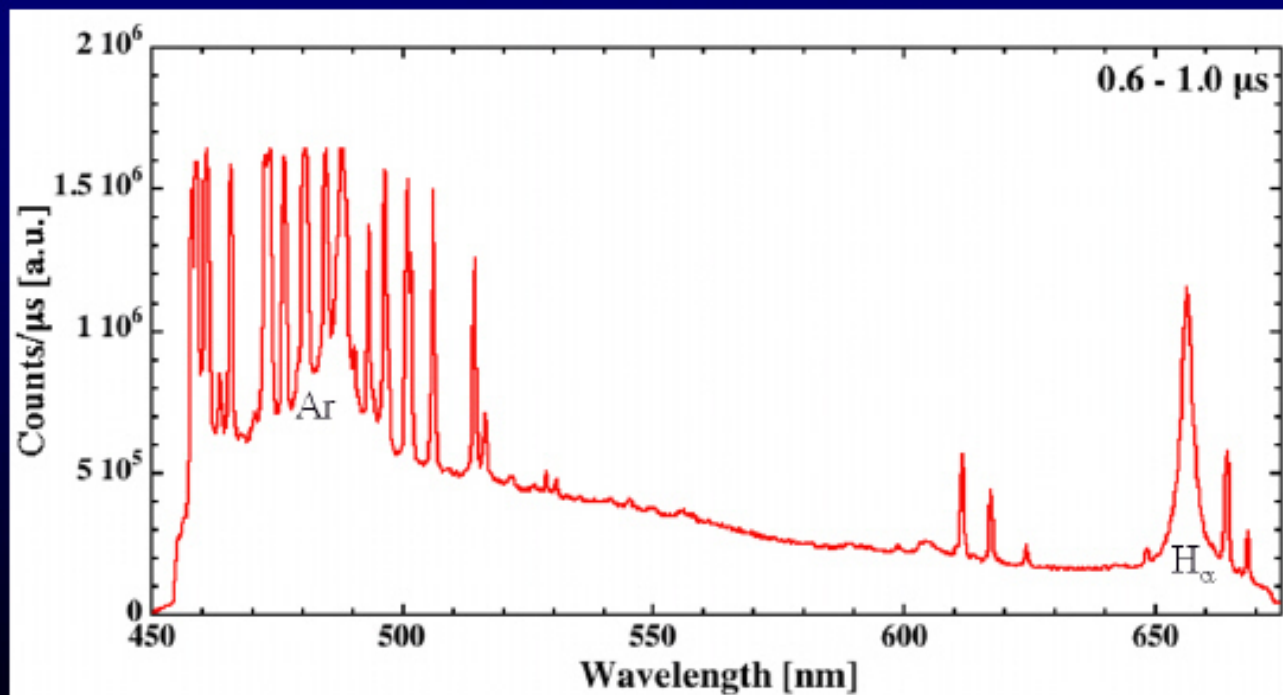
高温気相発光スペクトル

$[\text{CH}]_n$ 蒸気 (Ar 雰囲気気下)



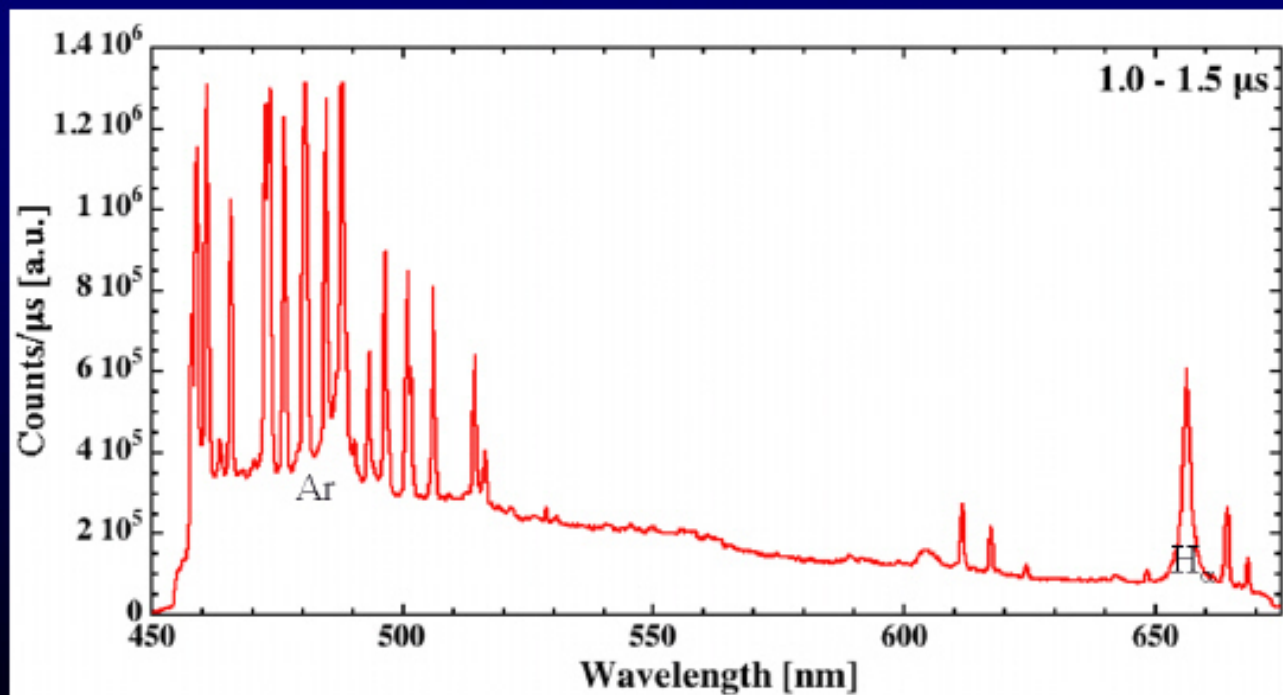
高温気相発光スペクトル

$[\text{CH}]_n$ 蒸気 (Ar 雰囲気気下)



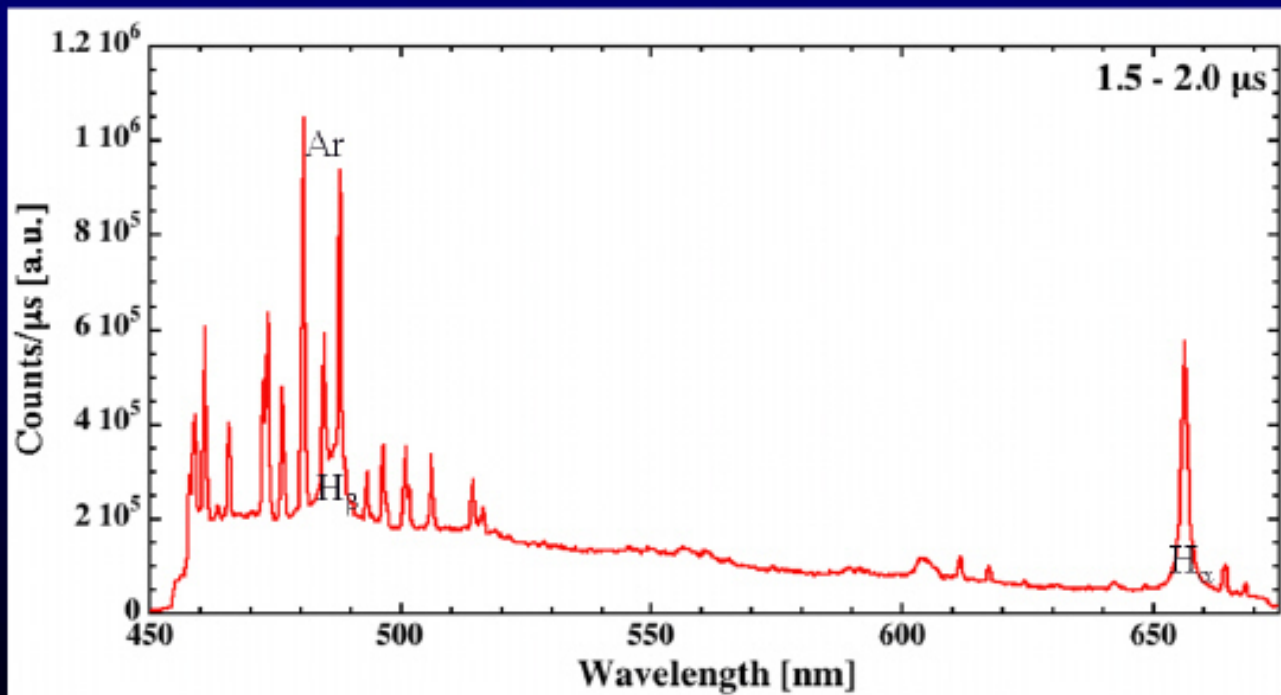
高温気相発光スペクトル

$[\text{CH}]_n$ 蒸気 (Ar 雰囲気気下)



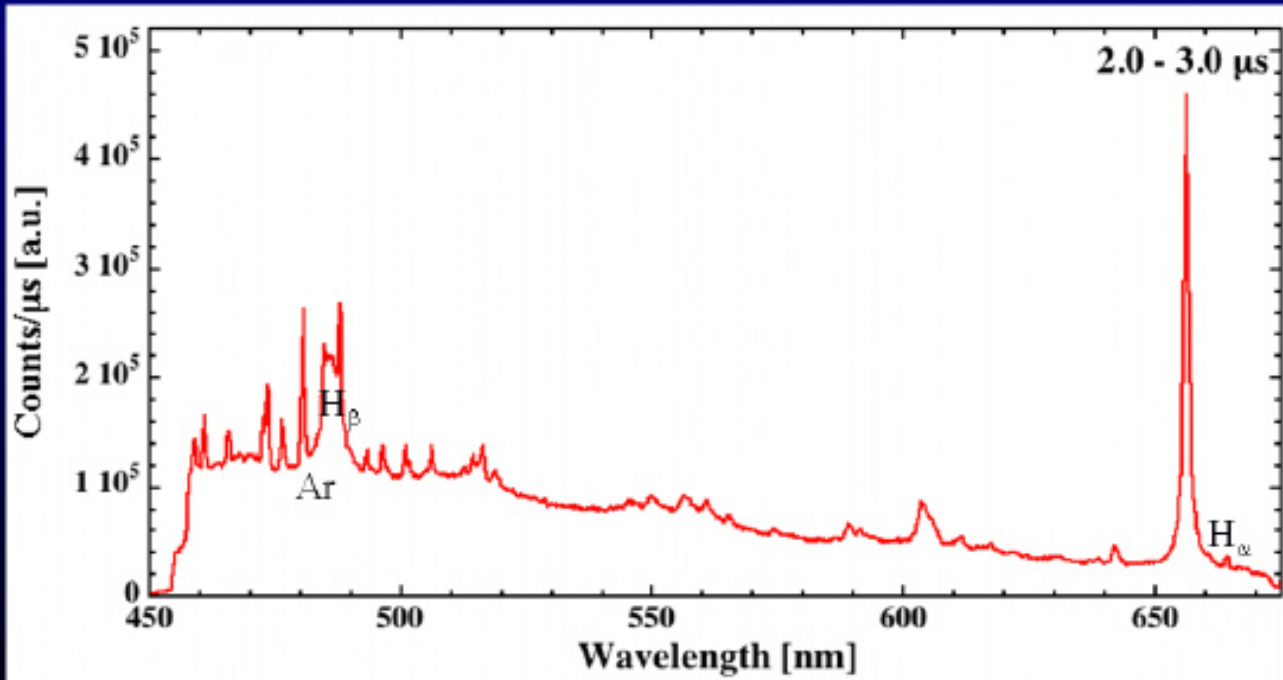
高温気相発光スペクトル

$[\text{CH}]_n$ 蒸気 (Ar 雰囲気気下)



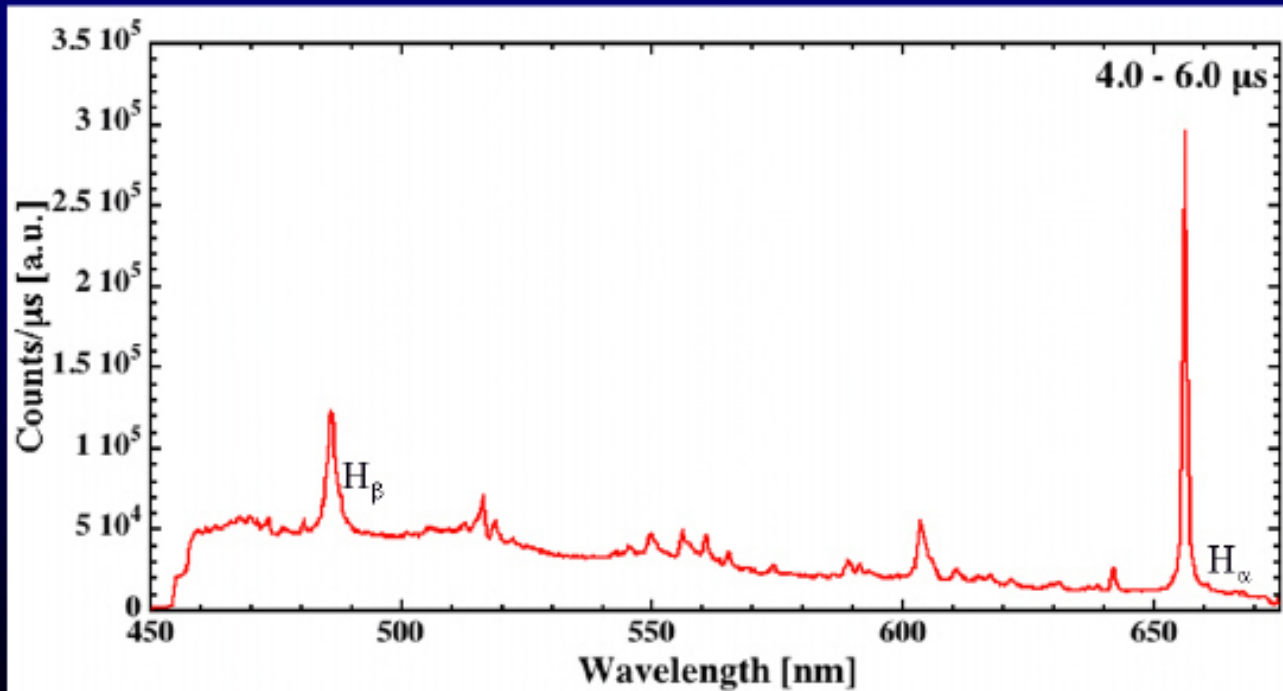
高温気相発光スペクトル

$[\text{CH}]_n$ 蒸気 (Ar 雰囲気気下)



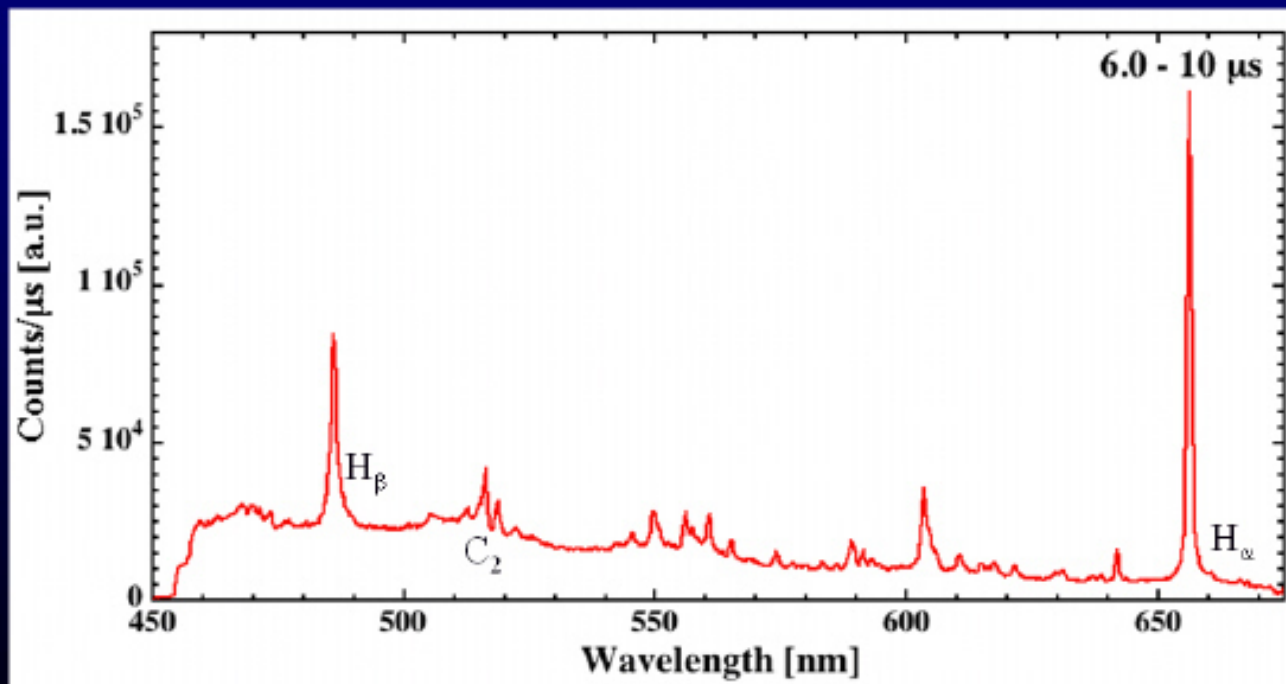
高温気相発光スペクトル

$[\text{CH}]_n$ 蒸気 (Ar 雰囲気気下)



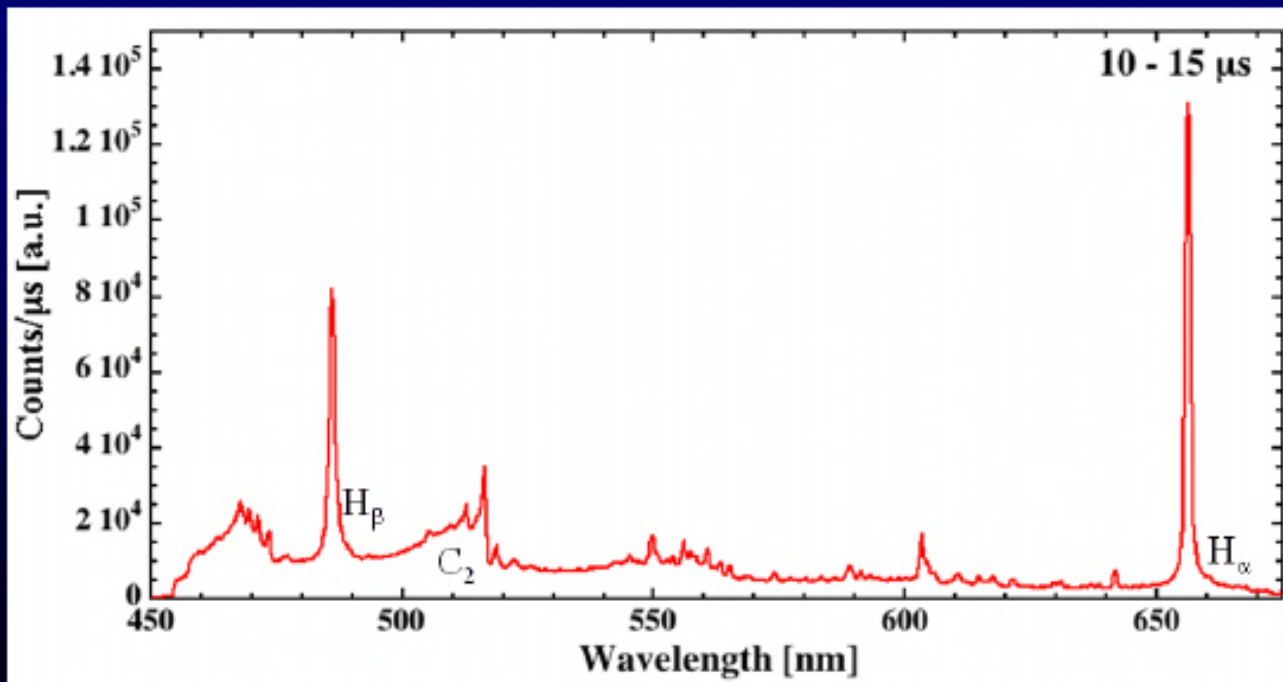
高温気相発光スペクトル

$[\text{CH}]_n$ 蒸気 (Ar 雰囲気気下)



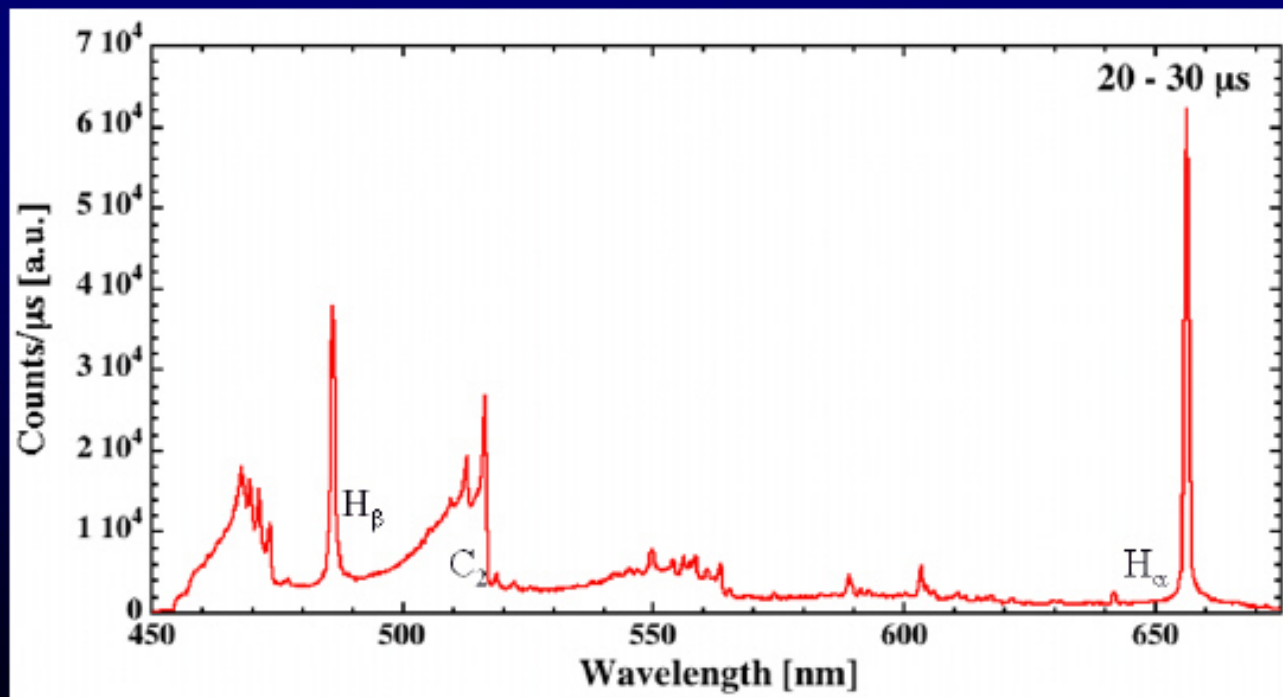
高温気相発光スペクトル

$[\text{CH}]_n$ 蒸気 (Ar 雰囲気気下)



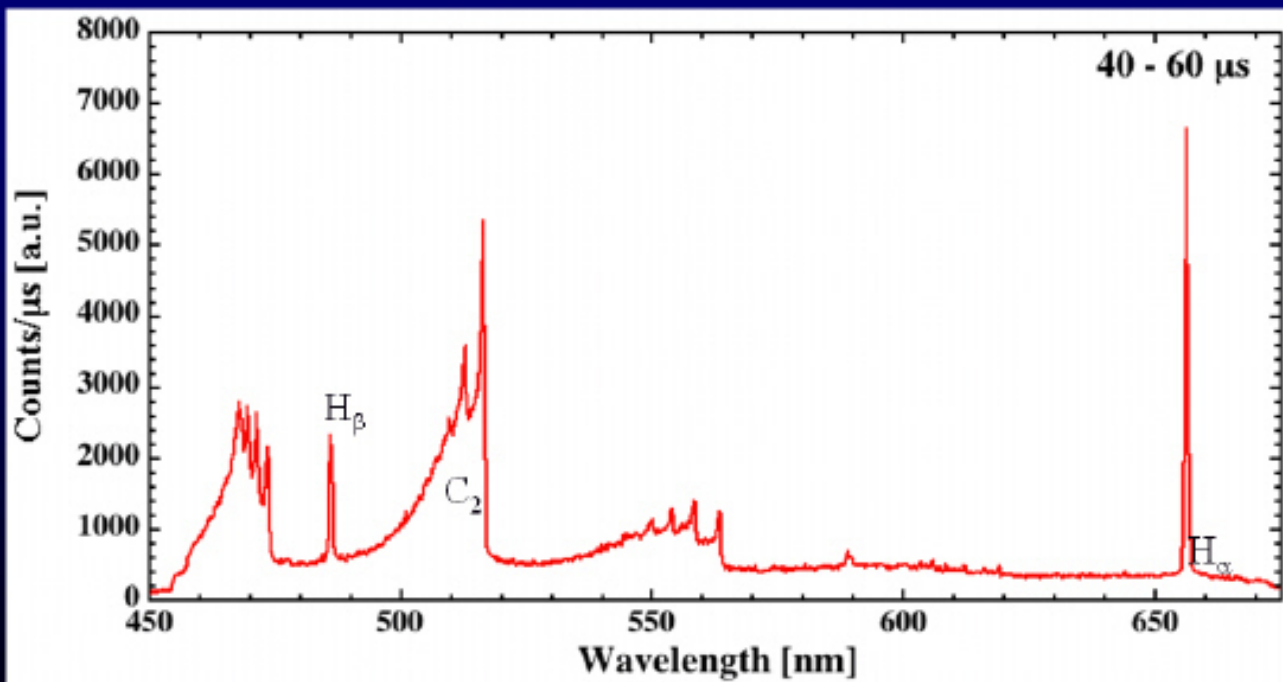
高温気相発光スペクトル

$[\text{CH}]_n$ 蒸気 (Ar 雰囲気気下)



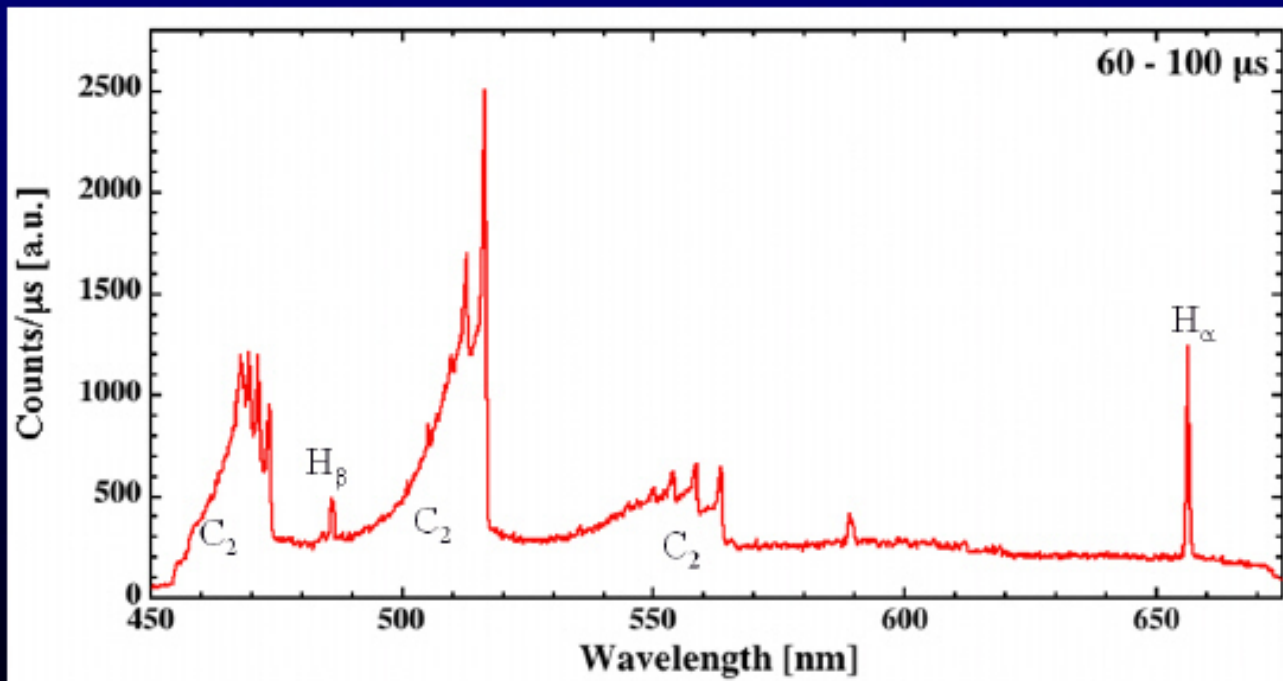
高温気相発光スペクトル

$[\text{CH}]_n$ 蒸気 (Ar 雰囲気気下)



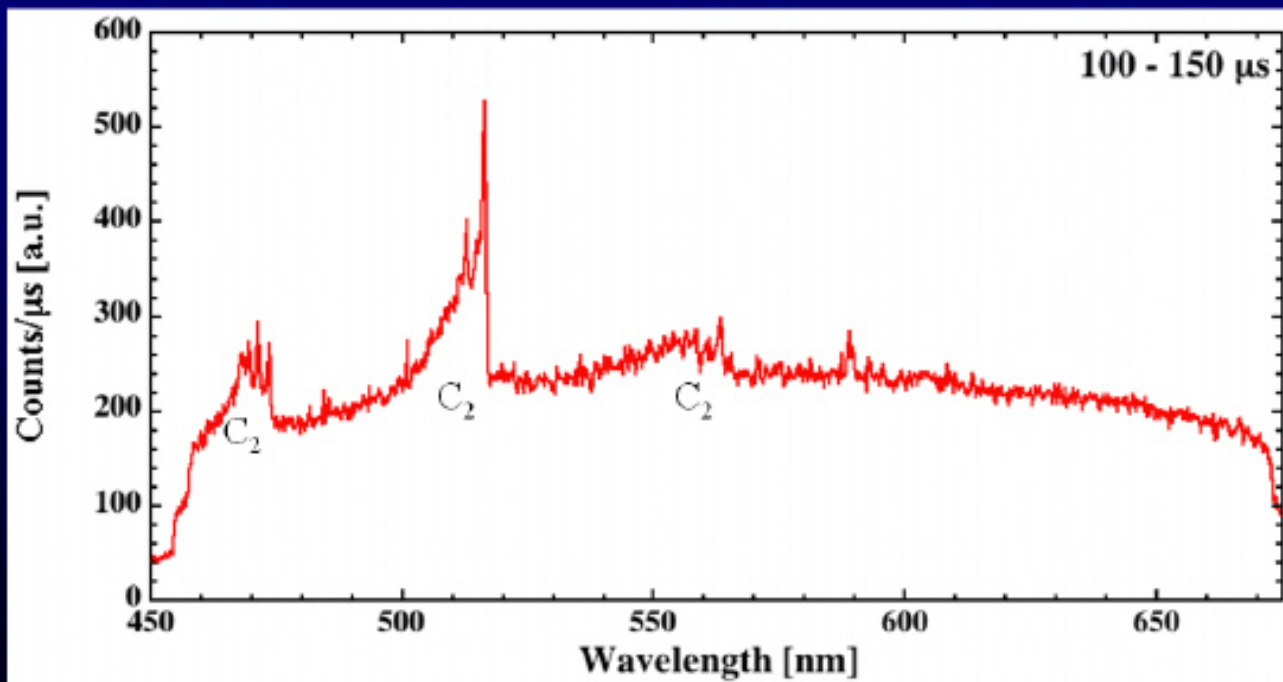
高温気相発光スペクトル

$[\text{CH}]_n$ 蒸気 (Ar 雰囲気気下)



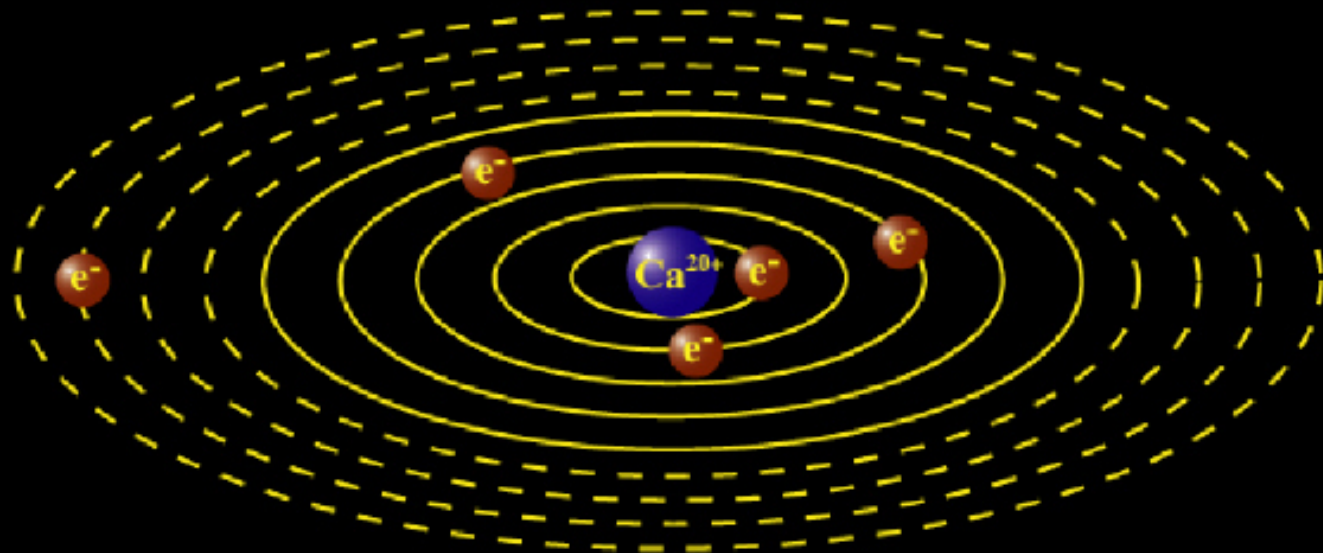
高温気相発光スペクトル

$[\text{CH}]_n$ 蒸気 (Ar 雰囲気気下)



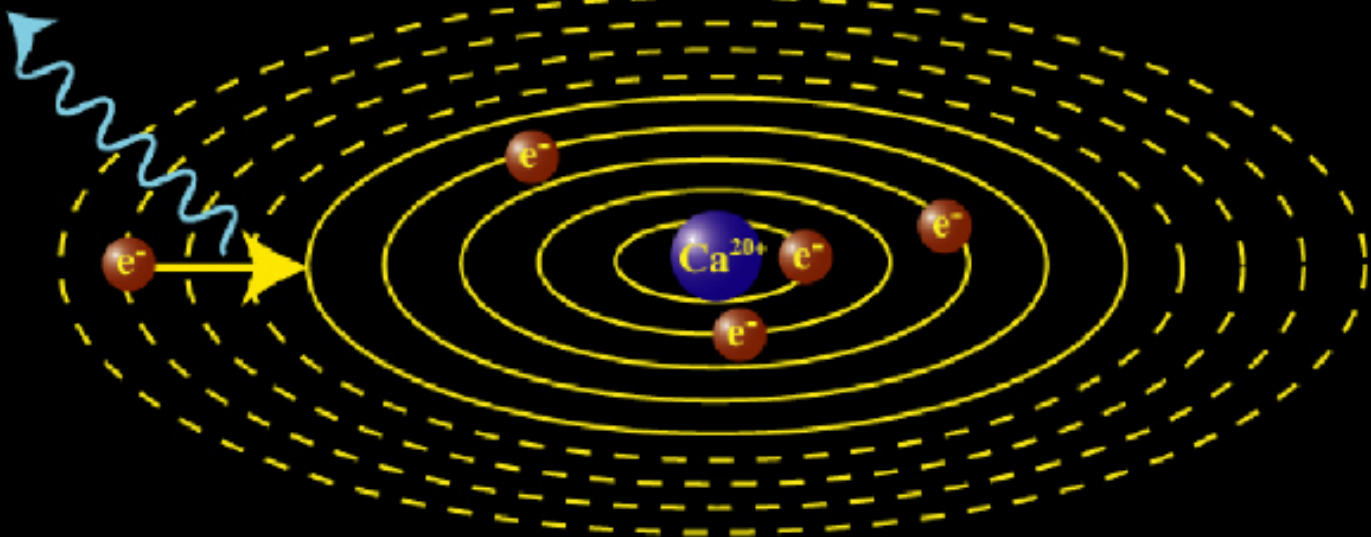
分光解析の原理と応用

Ca atom in an excited state

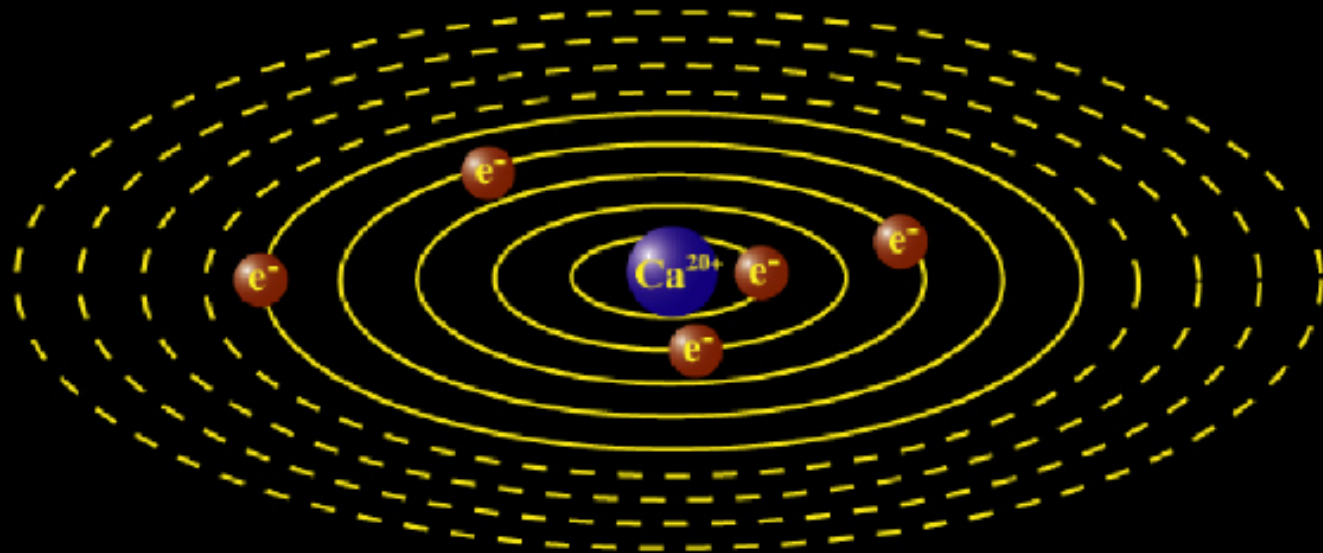


Ca atom in transition

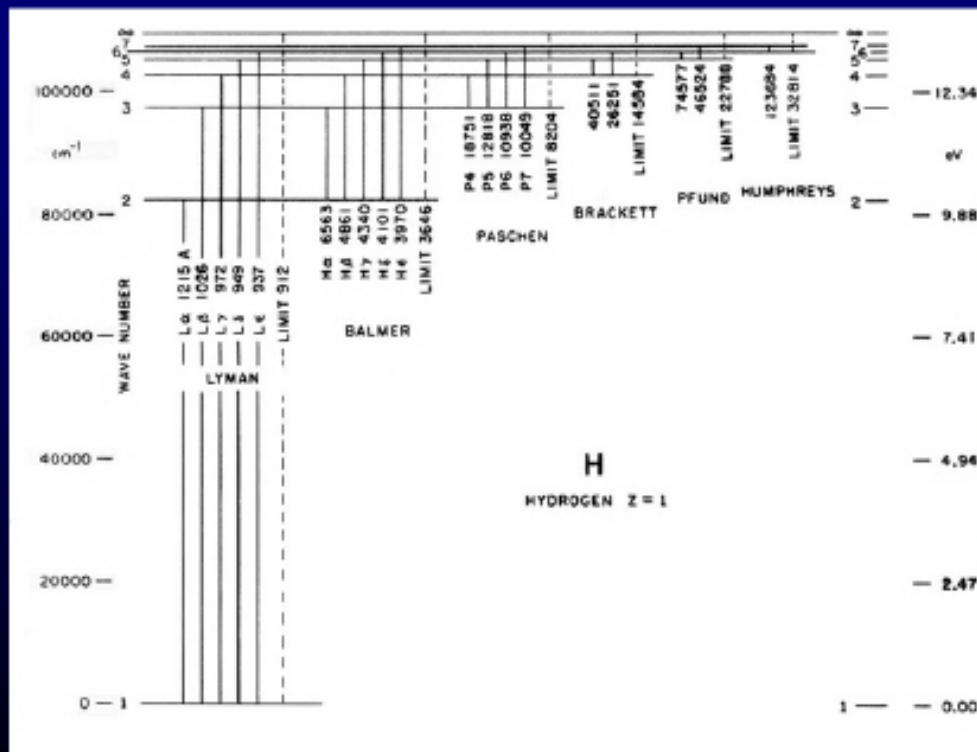
Photon



Ca atom in the ground state



水素原子のエネルギー準位図 (Grotrian Diagram)



原子の発光強度

☞ 原子の発光強度は、

$$I^{l,m} = \frac{h\nu_{lm}}{4\pi} A^{l,m} g_m N_{tot} \exp\left(-\frac{E_m}{kT}\right) / Z(T)$$

ただし h, ν, A, g は定数; $Z(T) \sim 1$.

- h : プランク定数
- ν : 波数
- A : 遷移確率
- m, l : 上側、下側状態
- N_{tot} : 全原子数
- Z : 分配関数
- T : 温度
- g : 統計的重率
- E : エネルギー
- k : ボルツマン定数

熱力学データの抽出：温度と原子数

☞ m と l が決まれば、 h, ν, g, E, A, k は定数であり、

$Z(T) \sim 1$ であるので、

$$\Rightarrow \ln I_{nm} = -\frac{E_n}{kT} + \ln N_{tot} \quad \left. \vphantom{\ln I_{nm}} \right\} \text{ただし}$$
$$I_{nm} = \frac{I_{nm}}{\frac{h\nu_{nm}}{4\pi} A_{nm} g_n}$$

$\therefore \ln I_{nm}$ と E_n/k のグラフ(ボルツマン図)を作れば
その傾き分の1が T となる。

遷移確率 (Einstein A 係数)

Q: A_{lm} は、どう求めるのか？

A1: NISTの表を見る。

A2: 原子ガスの吸収効率を測定する。

$$A_{nm} = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} B_{nm}$$

B_{nm} : 光吸収係数

→ 発光しやすい原子・光は吸収効率も高い

衝突蒸気雲の分光解析

- ・まずは、衝突直後の高輝度発光の分析を。
- ・実験条件： $\phi 6.4\text{mm}$ の銅 or 水晶 $\rightarrow$ 炭酸塩岩
 $\theta = 15^\circ \sim 90^\circ$, $V = 4 - 5.5 \text{ km/s}$
 $p = 0.5 \text{ torr}$
- ・測定条件：衝突から $0.5 - 2.5 \mu\text{s}$
直径4cmの視野

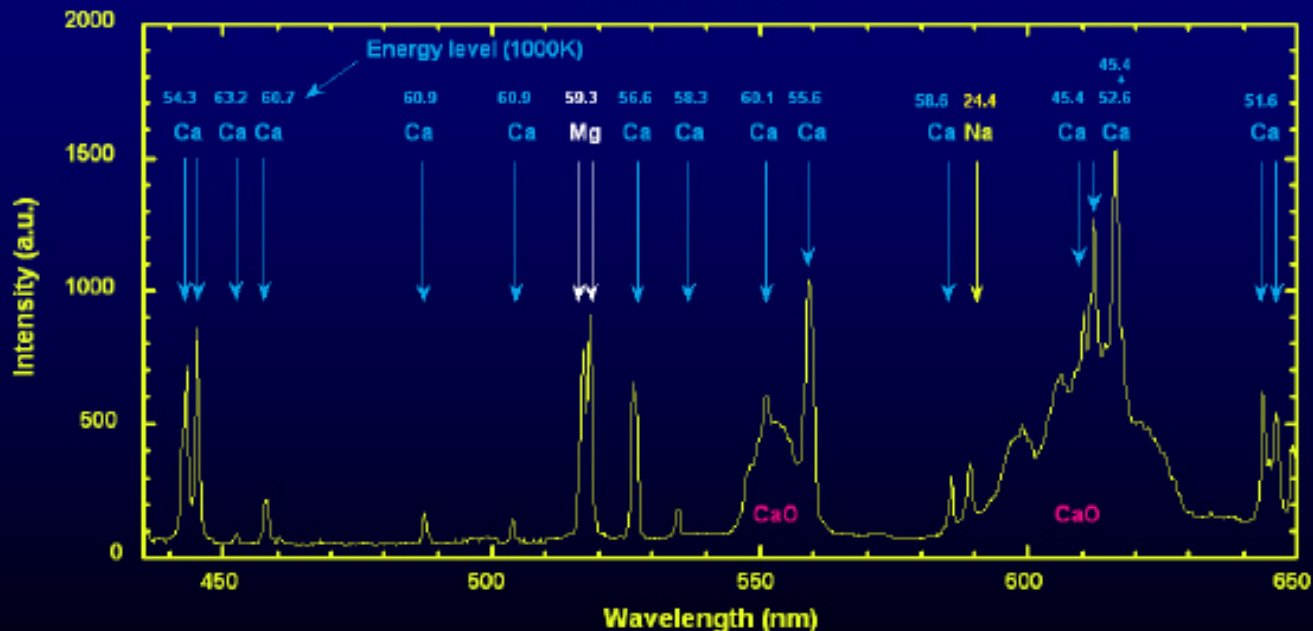
100 μ s



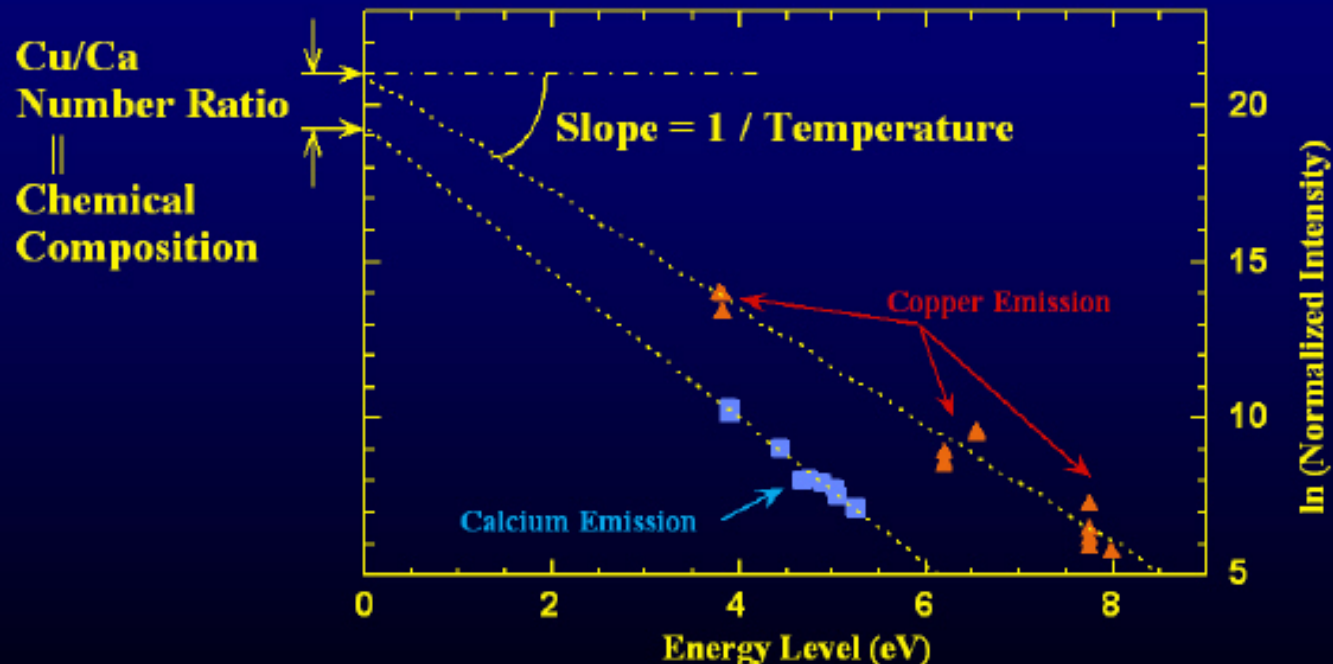
Short exposure time

Quartz impact into Dolomite Block

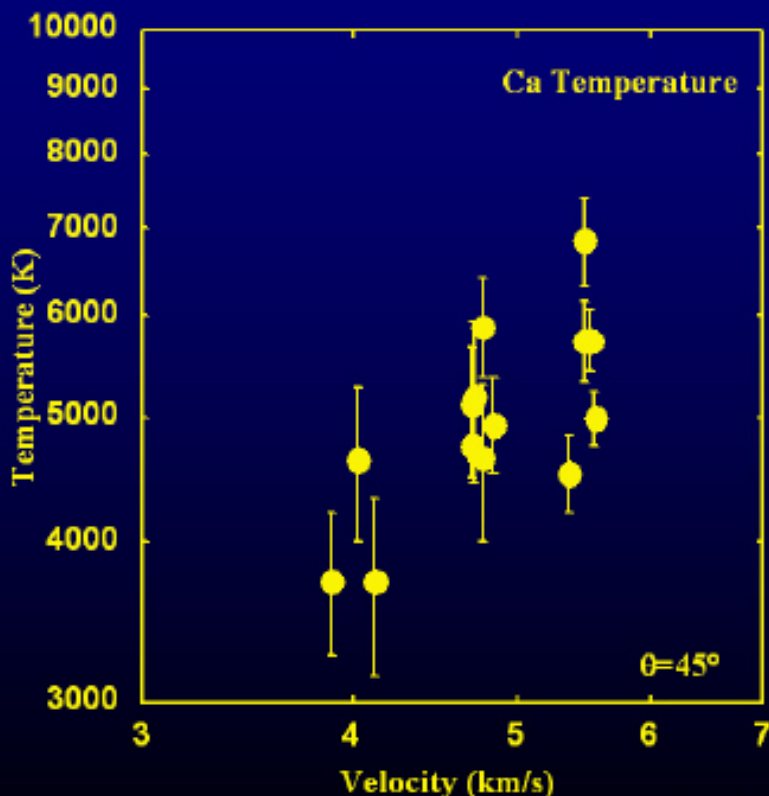
60°, 5.27km/s, 0 - 2 μ s



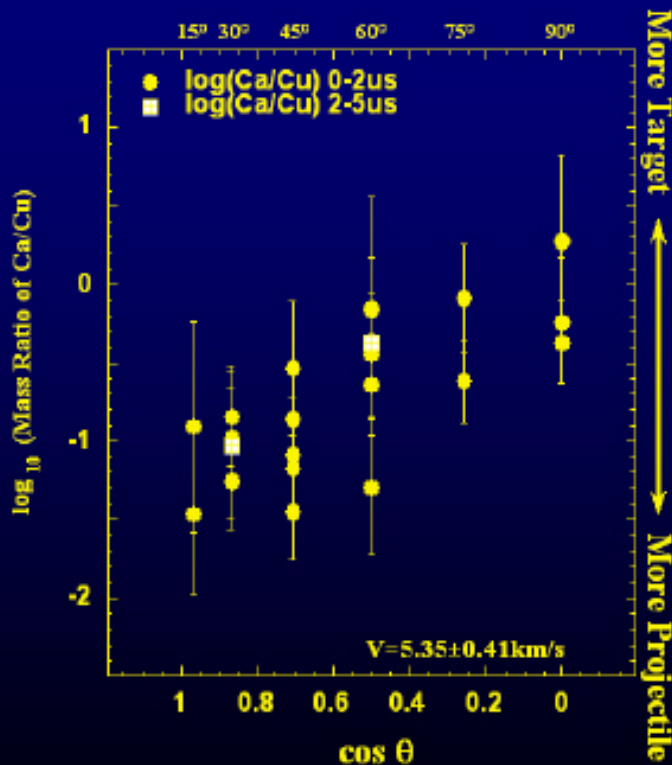
観測されたボルツマン図



衝突速度と発光温度



Ca/Cu比と衝突角の関係



柱状密度の推定(自己吸収)

- 放射輝度を $I_\nu(x)$ とすると、原子密度 n_o 、吸収係数 k_ν 、黒体放射 B_ν との間に

$$\frac{\partial I_\nu}{\partial x} = -k_\nu n_o (I_\nu(x) - B_\nu)$$

の関係がある。ただし、 k_ν と B_ν は

$$k_\nu = \frac{c^2}{8\pi\nu^2} A_{lu} \left[\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1 \right] \frac{g_u}{g_o} \exp\left(-\frac{E_u}{kT}\right) \psi(\nu - \nu_a)$$

$$B_\nu = \frac{\frac{2h\nu^3}{c^2}}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}$$

となる。これを積分すると、

$$I_\nu(x) = B_\nu \left(1 - e^{-\tau_\nu(x)} \right) \quad \text{ここで、} \tau_\nu(x) = k_\nu n_o x$$

柱状密度の推定(自己吸収)

$$I_\nu(x) = B_\nu (1 - e^{-\tau_\nu(x)})$$

- τ が小さいとき(光学的に薄いとき)には、

$$\begin{aligned} I_\nu(x) &= B_\nu \tau_\nu(x) = B_\nu k_\nu n x \\ &= \frac{h\nu}{4\pi} A_{lu} \frac{g_u}{g_o} \exp\left(-\frac{E_u}{kT}\right) \psi(\nu - \nu_o) \end{aligned}$$

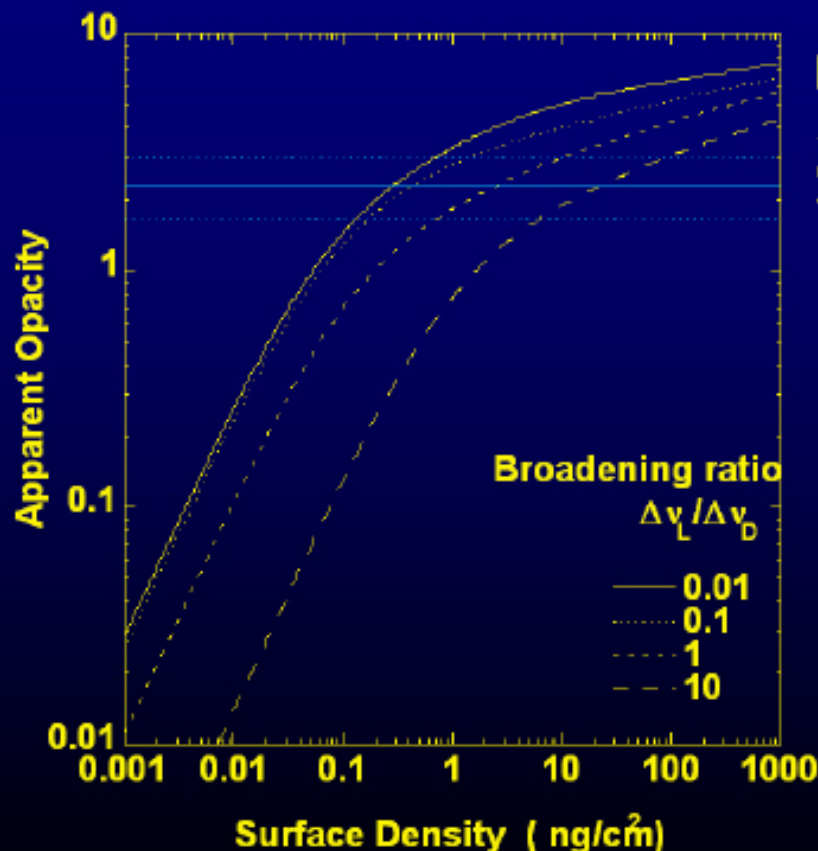
となる。この極限近似を I_{thin} とすると、

$$\tau_{app} = -\ln(I / I_{thin})$$

という見かけの光学厚さを定義できる。

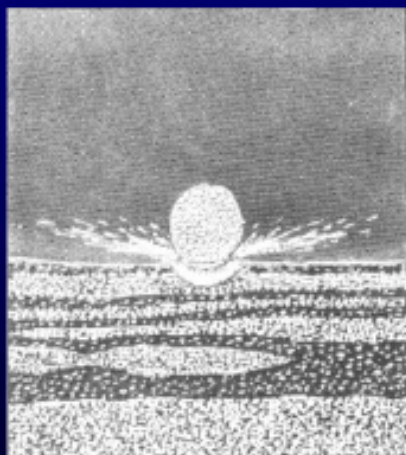
これが発光分光で計測される。

自己吸収度と柱状密度



曲線が複数あるのは
、輝線の線幅が不確
定だから

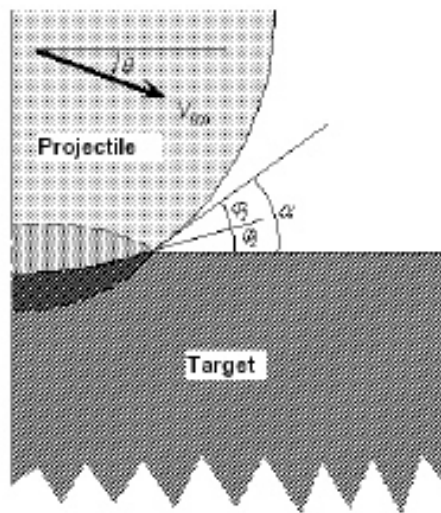
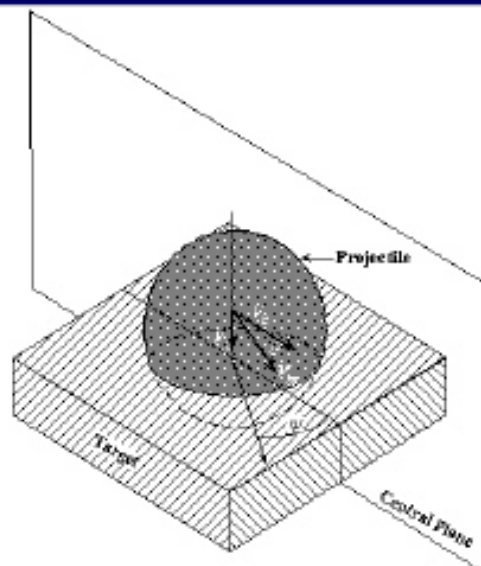
What is jetting?



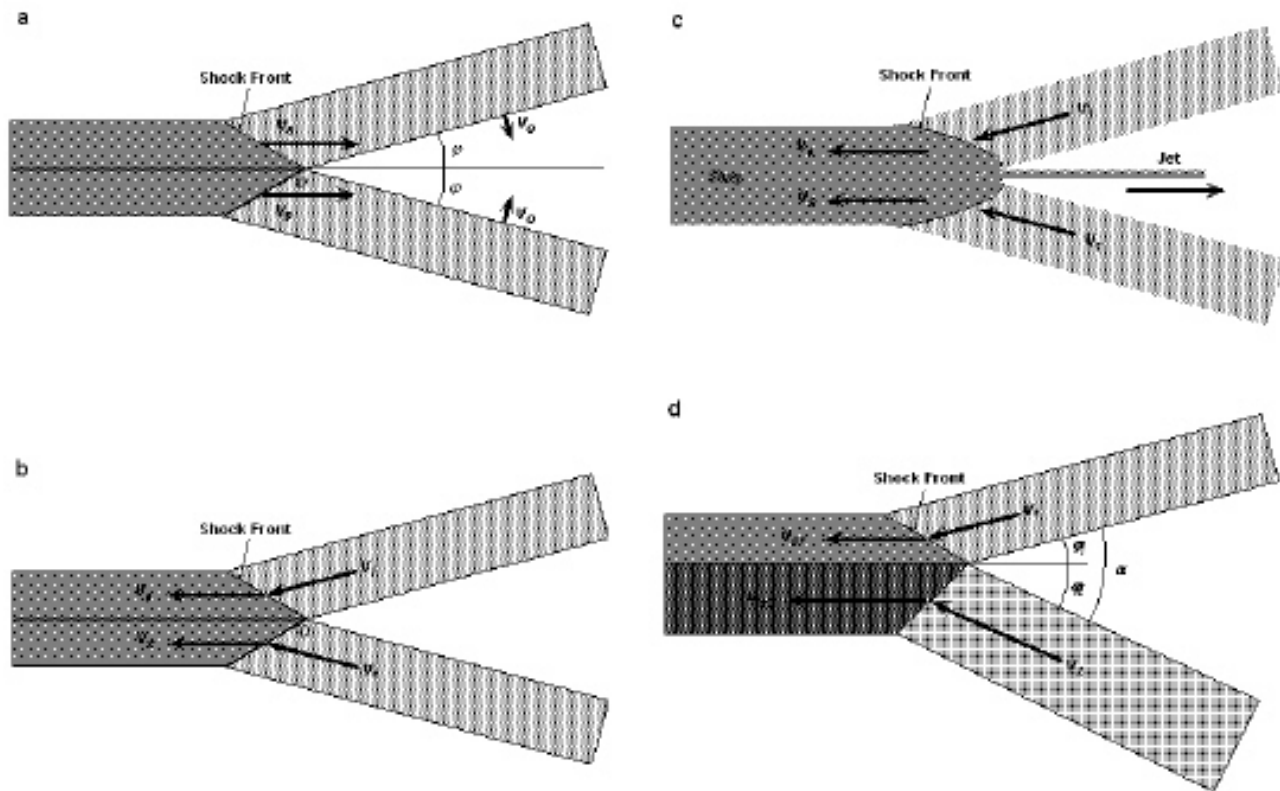
- ◆ Earliest stage process in a hypervelocity impact.
- ◆ Caused by interference of shock wave at a corner of impacting bodies.
- ◆ Extremely highly shocked by geometric leveraging.

ジェッティングの理論モデル

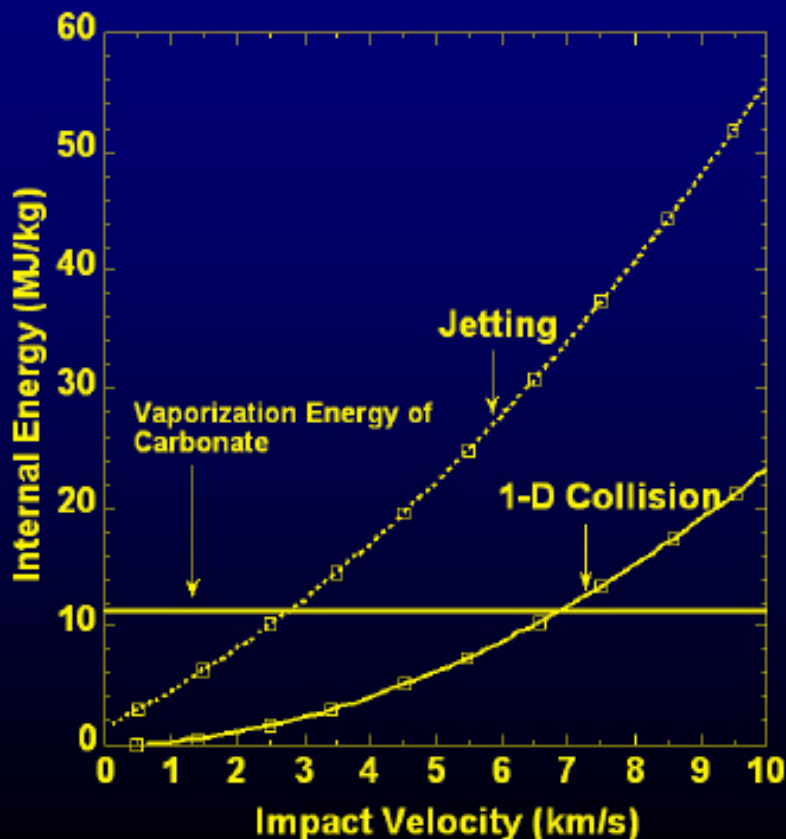
- ◆ 平板近似 (Walsh, 1955)
- ◆ 淀み点近似 (Kieffer, 1977)



ジェッティングの理論モデル

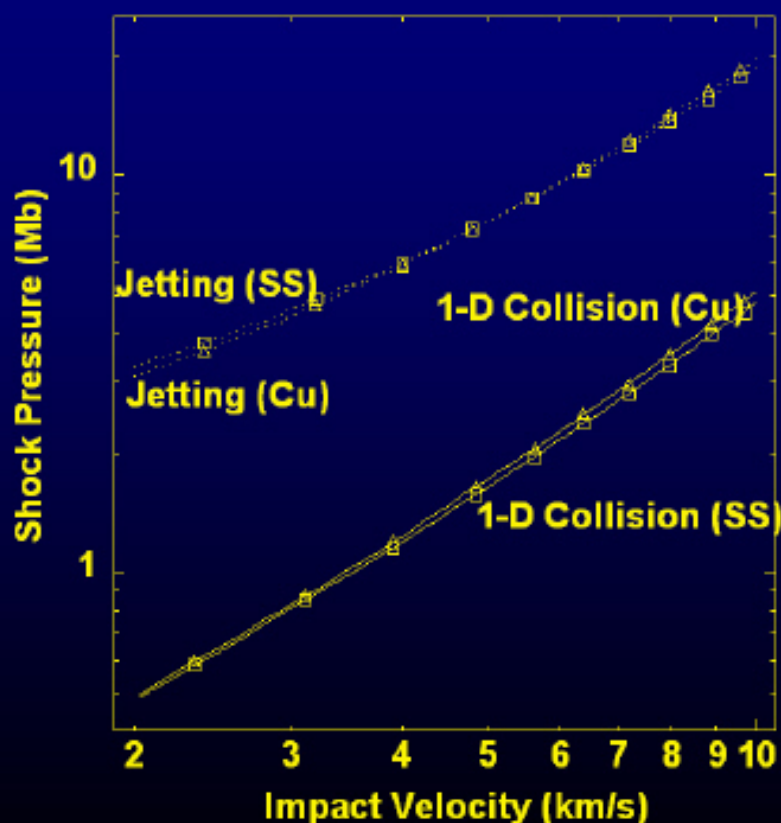


銅と石灰石の衝突：衝撃加熱



銅とステンレスの衝撃圧力

1次元衝突とジェッティングの比較



応用先

- ・実験室で発生するImpact flash(気相発光)の大半はジェッティングから。
- ・直接関与する質量はprojectile massの 10^{-3} 以下。
- ・実験室の中で起きるImpactでは弾丸の大半を気相発光させるところまでは衝撃加熱できない。
- ・惑星スケールのImpactではその可能性が高い。
 - ⇒宇宙研新式銃・阪大レーザー銃への期待。
 - ⇒レーザーを用いた模擬実験

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

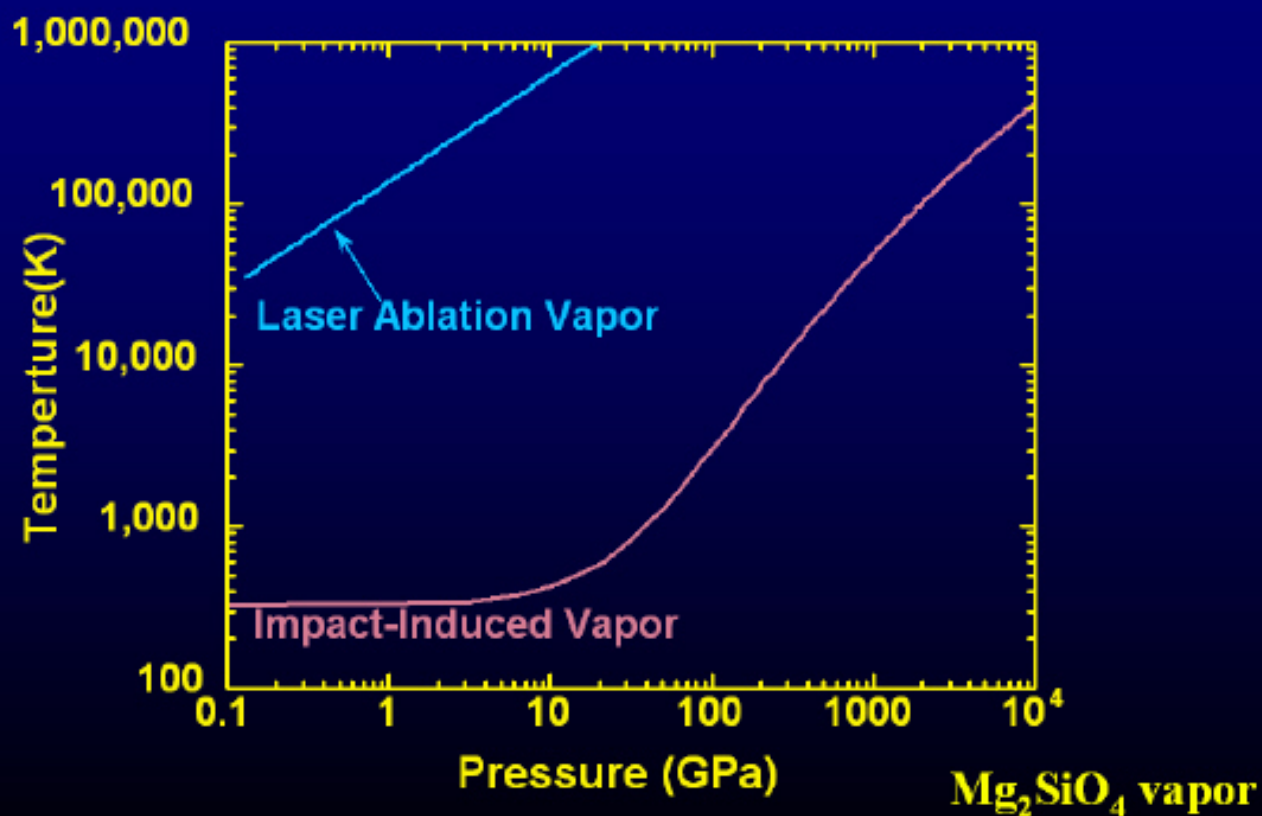
☞ 2つの相違点

☞ 非平衡状態は迅速に解消され、平衡化

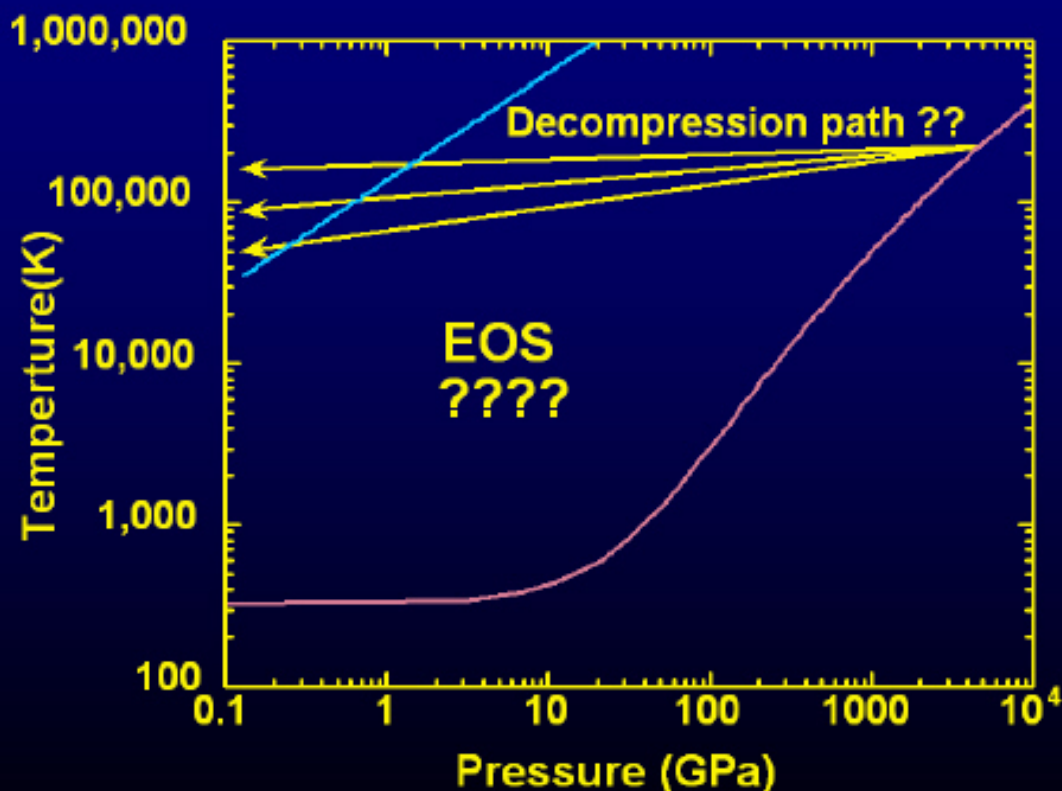
→ 膨張したレーザー蒸気雲は、衝突蒸気雲の状態を良く再現しうる。

☞ 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。

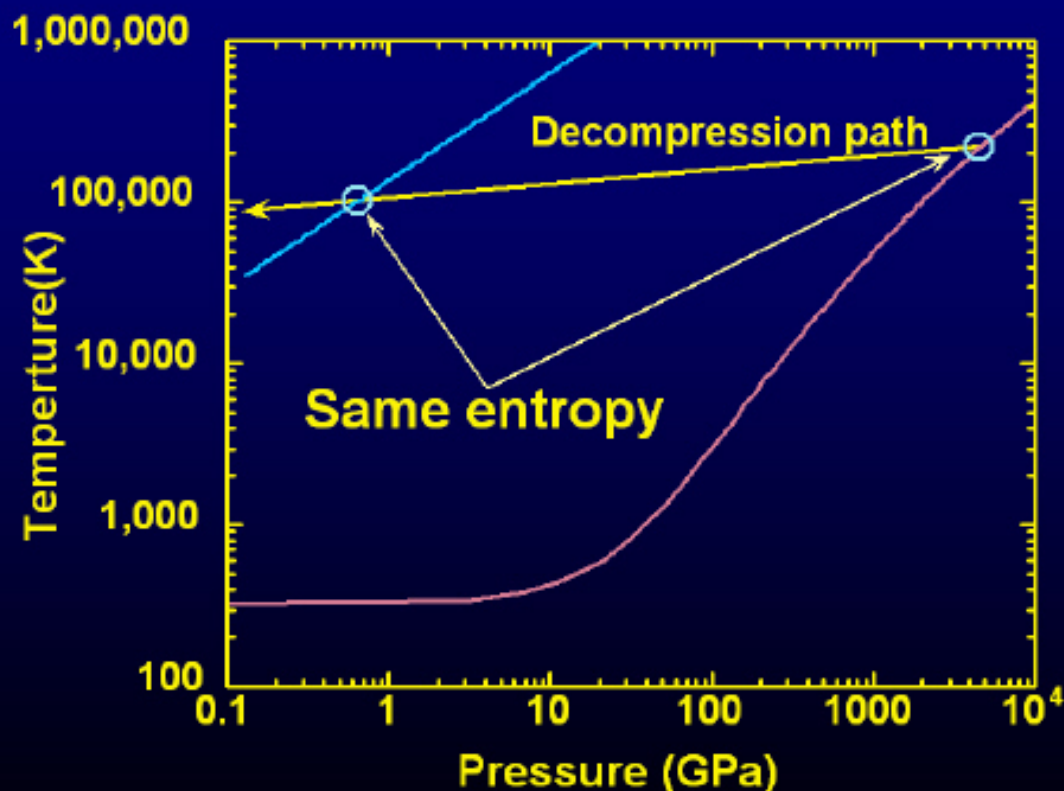
衝突蒸気雲とレーザー蒸気雲



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

$$\rho V = \rho_o V_o$$

$$P + \rho v^2 = P_o + \rho_o v_o^2$$

$$\frac{1}{2} v_o^2 + H_o = \frac{1}{2} v^2 + H$$

☞ 衝撃波速度と粒子速度の線形関係

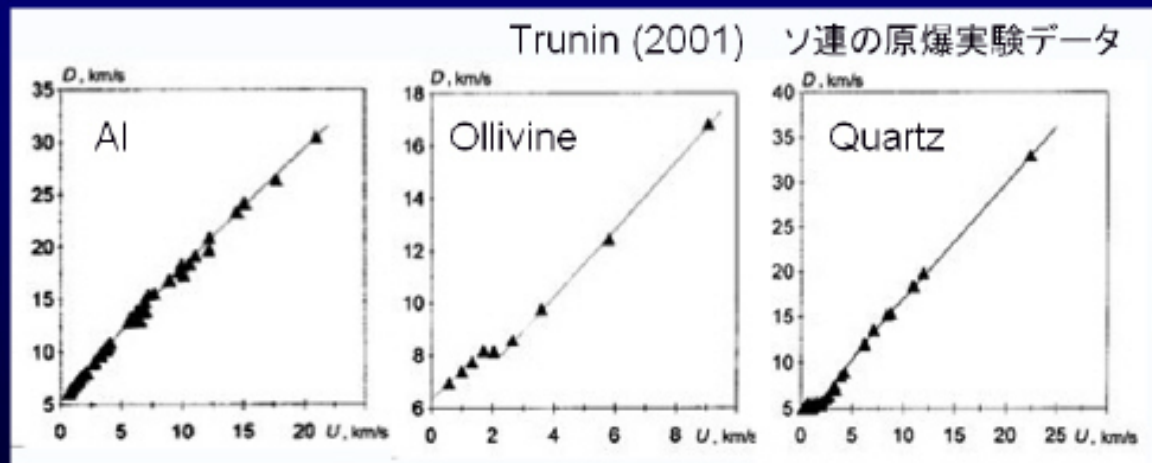
$$V_s = C_o + s U_p$$

☞ 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 Γ_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

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

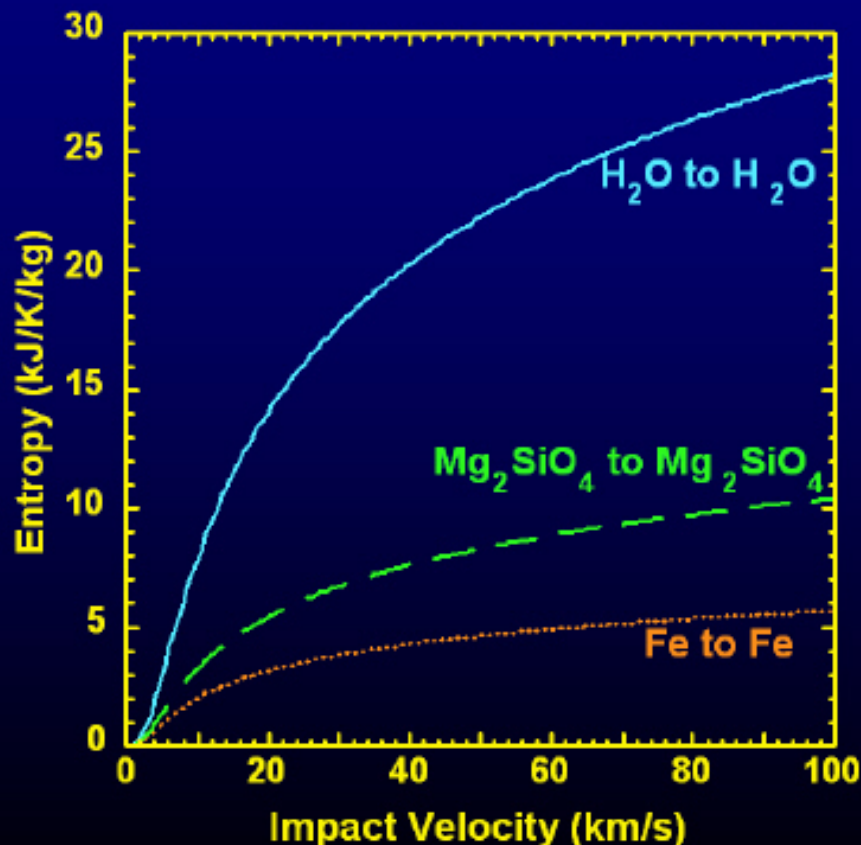
☞ 温度

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

☞ 圧力

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

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 - 10^{11} W/m²)

☞ 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} - 10^{14} W/m²)

☞ 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

☞ 圧力と温度 *(Phipps et al., 1988)*

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

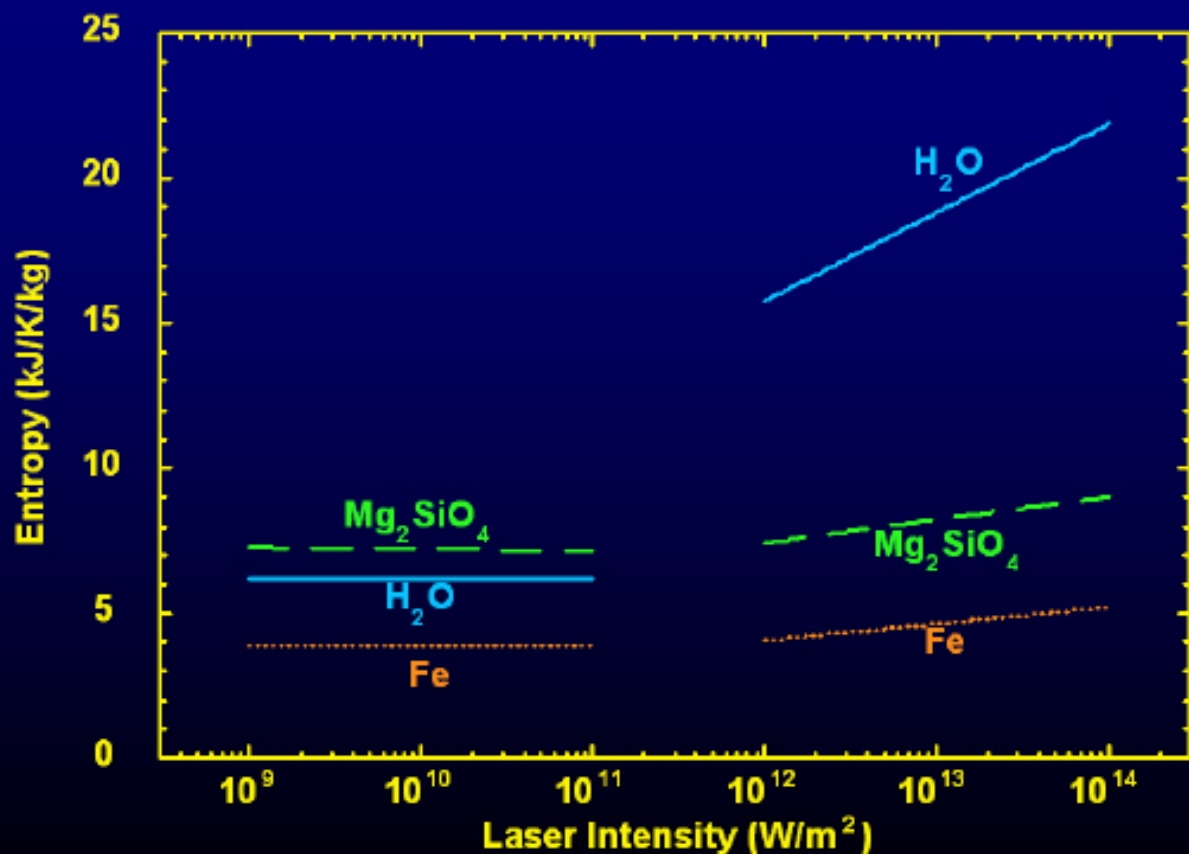
$$T = 3 \times 10^3 A^{1/8} (Z+1)^{-5/8} Z^{3/4} (I \lambda \sqrt{\tau})^{1/2}$$

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

