

天体衝突による相変化

黒澤 耕介

東大 新領域 複雑理工, JSPS fellow (PD)
ISAS/JAXA プロジェクト研究員 (4月~)

Harvard University: S. T. Stewart, R. K. Kraus

千葉工業大学: 千秋博紀, 大野宗祐, 松井孝典

大阪大学: 門野敏彦, 重森啓介, 弘中陽一郎, 尾崎典雅, 城下明之, 境家達弘,
藤岡慎介, 兒玉了祐

東京大学: 杉田精司, 長勇一郎, 橋省吾

LULI: Tommaso Vinci

CPS セミナー 2011 3/2

自己紹介

2005 3月 東京都立大学 理学部物理学科卒業 学士(理学)

卒業研究: 木星の重力摂動下での小惑星の軌道離心率進化

2007 3月 東大院 新領域 複雑理工学専攻 修士課程卒業 修士(科学)

修士論文: Hydrogen cyanide production due to oblique impacts

2010 3月 東大院 新領域 複雑理工学専攻 博士課程卒業 博士(科学)

博士論文: Impact-induced phase changes & chemical reactions

研究経験:

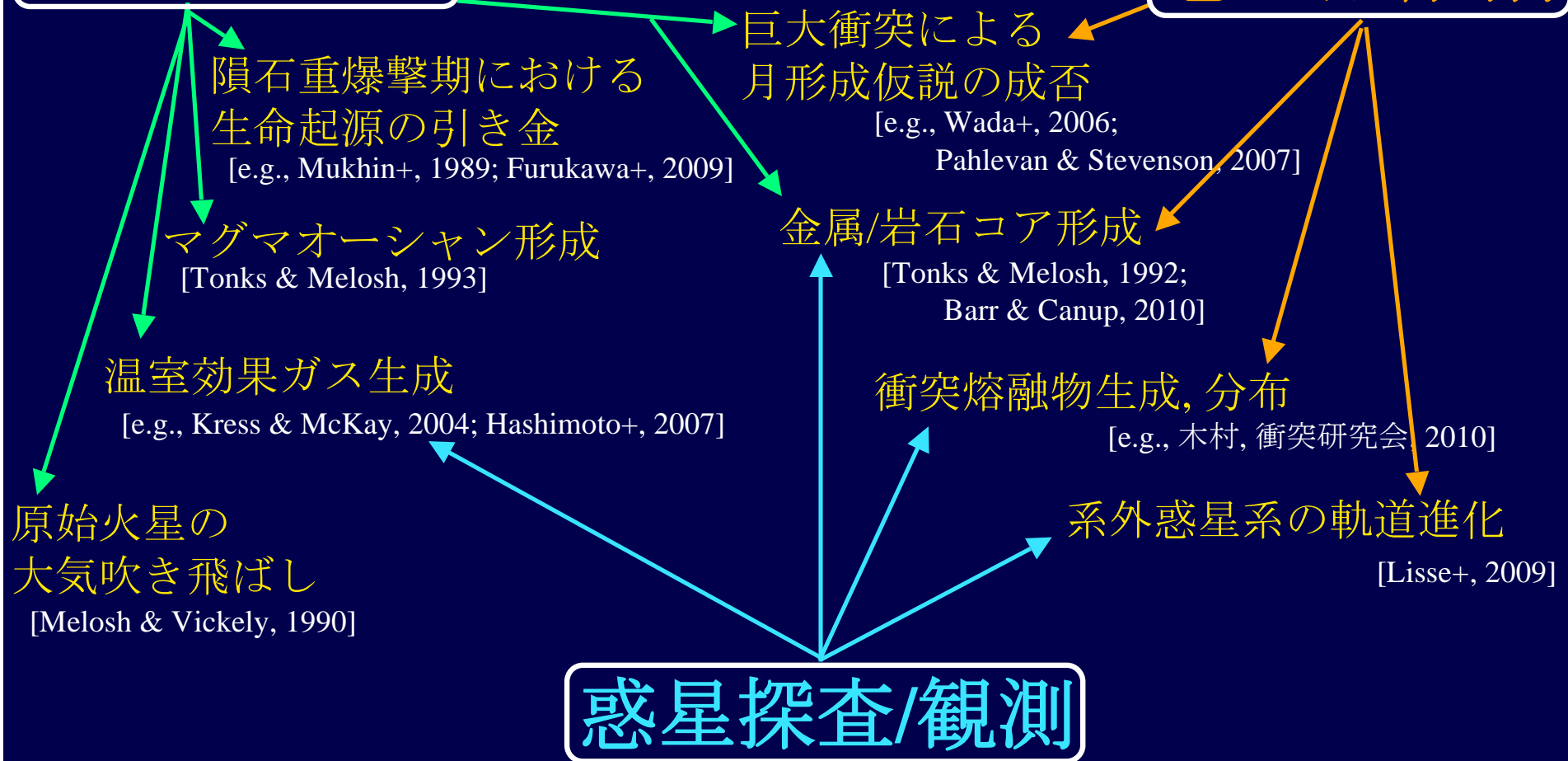
1. 高速発光分光法(原子, 分子)による高温蒸気の熱力学量計測
2. 質量分析計&赤外分光計を用いた化学分析
3. 幅広い速度領域(0.3 - 60 km/s)での衝突実験
4. レーザー(0.4 - 6000 J)による衝撃圧縮(物理) / 蒸発(化学)実験

研究上の興味

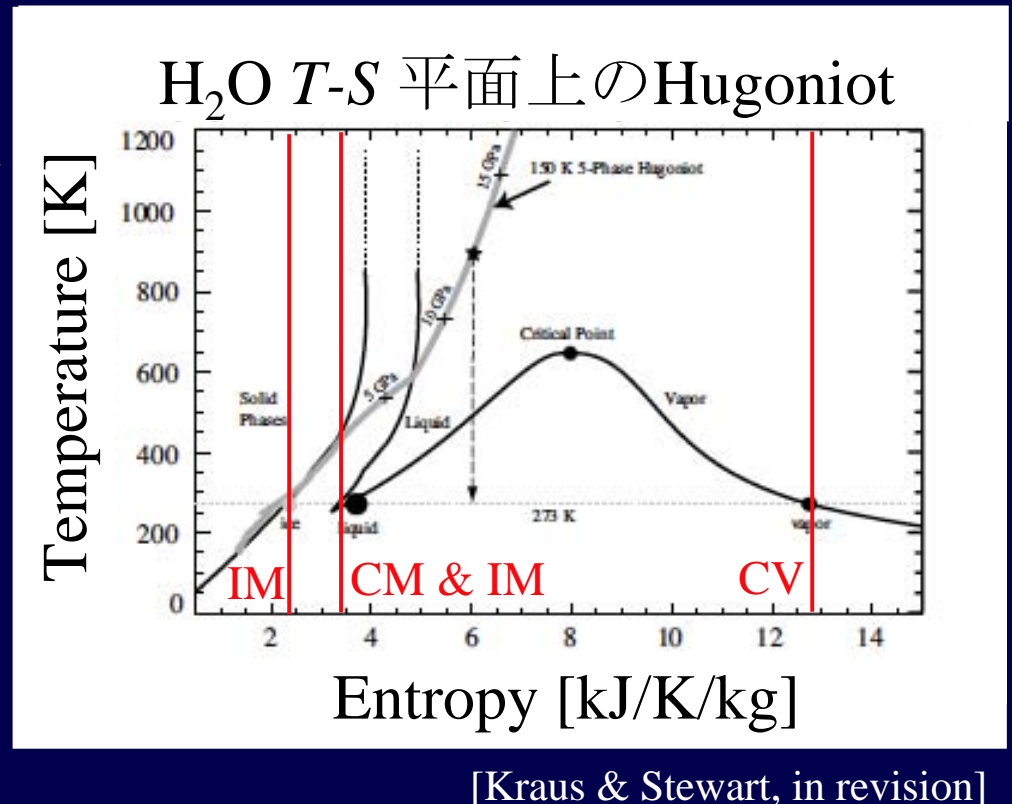
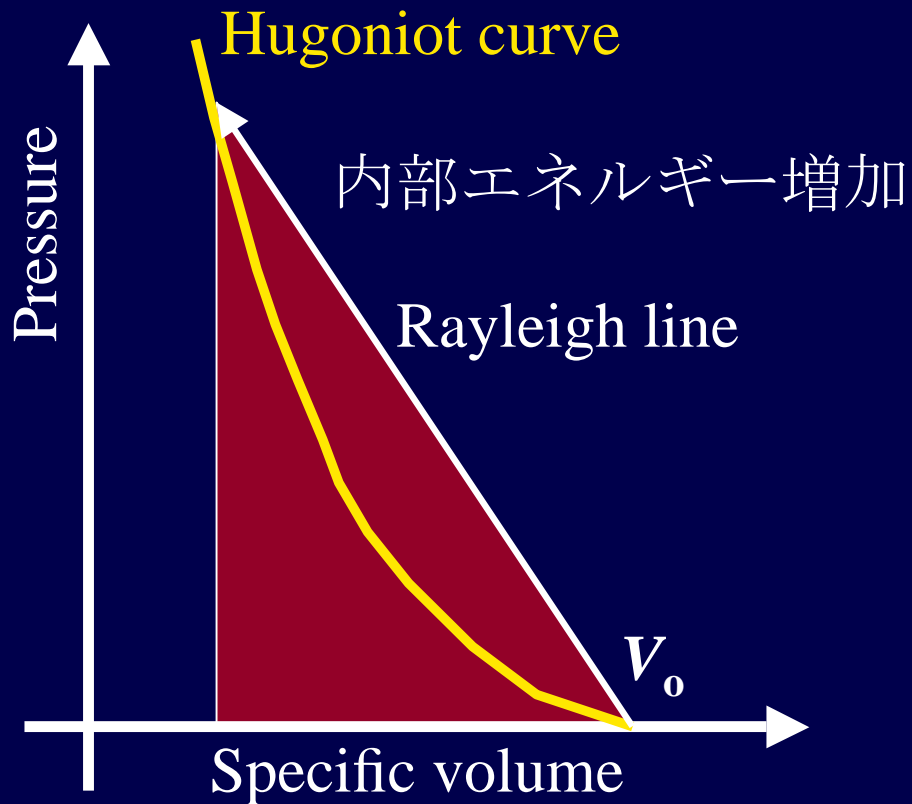
天体衝突が地球の生命進化に果たした役割
天体衝突による相変化の理解が重要

Astrobiology

惑星形成論



天体衝突に伴う相変化



衝突速度(衝撃圧力)がある閾値を超えると相変化が起きる。

1. 高圧相の出現
2. 熔融
3. 蒸発

話の流れ

1. 天体衝突による相変化の重要性
2. 高圧相への相変化(含Harvard University 滞在記)
水氷EOSの見直し
3. EKB領域での衝突熔融による岩石核形成の可能性
4. 高強度レーザーを用いた珪酸塩蒸発実験
Giant impact仮説への応用

話の流れ

1. 天体衝突による相変化の重要性
2. 高圧相への相変化(含Harvard University 滞在記)
水氷EOSの見直し
3. EKB領域での衝突熔融による岩石核形成の可能性
4. 高強度レーザーを用いた珪酸塩蒸発実験
Giant impact仮説への応用

相変化研究の重要性

衝突物理・化学

- ☆ 巨大衝突段階の解明
(系外惑星系含む)
- ☆ 惑星表層環境の
初期条件・初期進化
- ☆ 惑星探査結果の解釈

惑星形成論

- ☆ 軌道の力学進化
(Nice model など)
- ☆ 衝突体の素性
(組成, 存在度)
- ☆ 衝突条件
(衝突速度分布)

衝突熔融/蒸発 (珪酸塩: 5 / 10 km/s; 水氷 1 / 3 km/s)

衝突に伴う相変化は衝突条件に強く依存

-> 惑星系形成論と密接に結びついた問題

高压相: 衝突熔融, 蒸発の閾値の決定 [e.g., Stewart & Ahrens, 2005, 2008]

熔融: Magma ocean, 金属/岩石核形成

[e.g., Tonks & Melosh, 1992, 1993; Barr & Canup, 2010]

蒸発: 化学反応駆動, 月形成巨大衝突の成否

[e.g., Mukhin+, 1989; Ohno+, 2004; Wada+, 2006; Pahlevan & Stevenson, 2007; Pahlevan+, 2010]

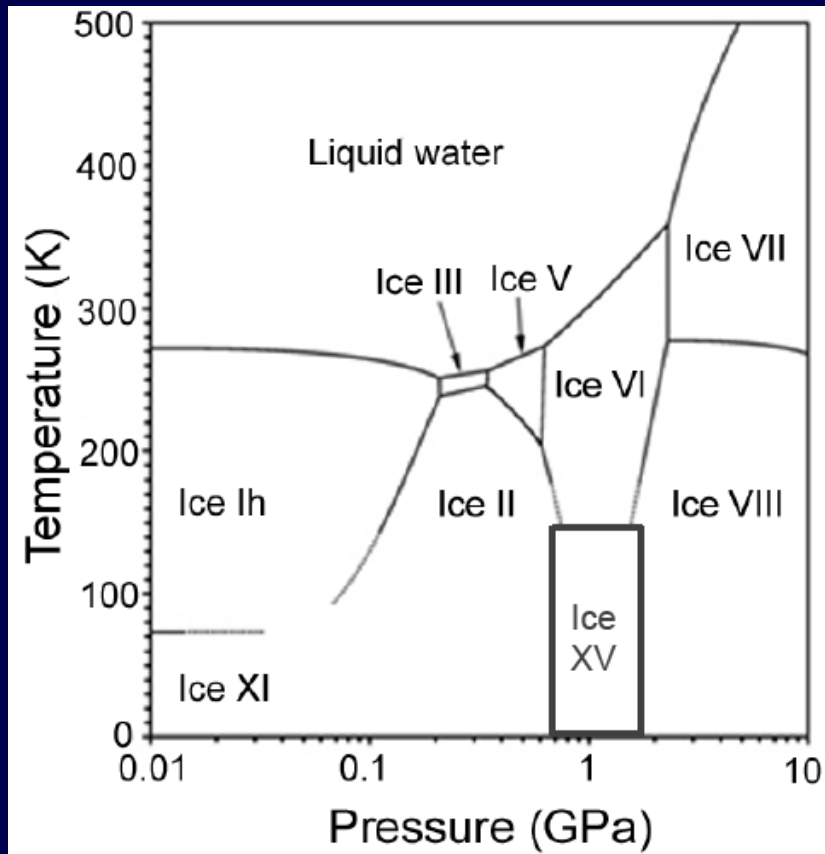
話の流れ

1. 天体衝突による相変化の重要性
2. 高圧相への相変化(含Harvard University 滞在記)
水氷EOSの見直し
3. EKB領域での衝突熔融による岩石核形成の可能性
4. 高強度レーザーを用いた珪酸塩蒸発実験
Giant impact仮説への応用

水氷の衝撃挙動@Shock lab.

水の相図 [modified by S. T. Stewart]

1段式火薬銃@Harvard Univ.

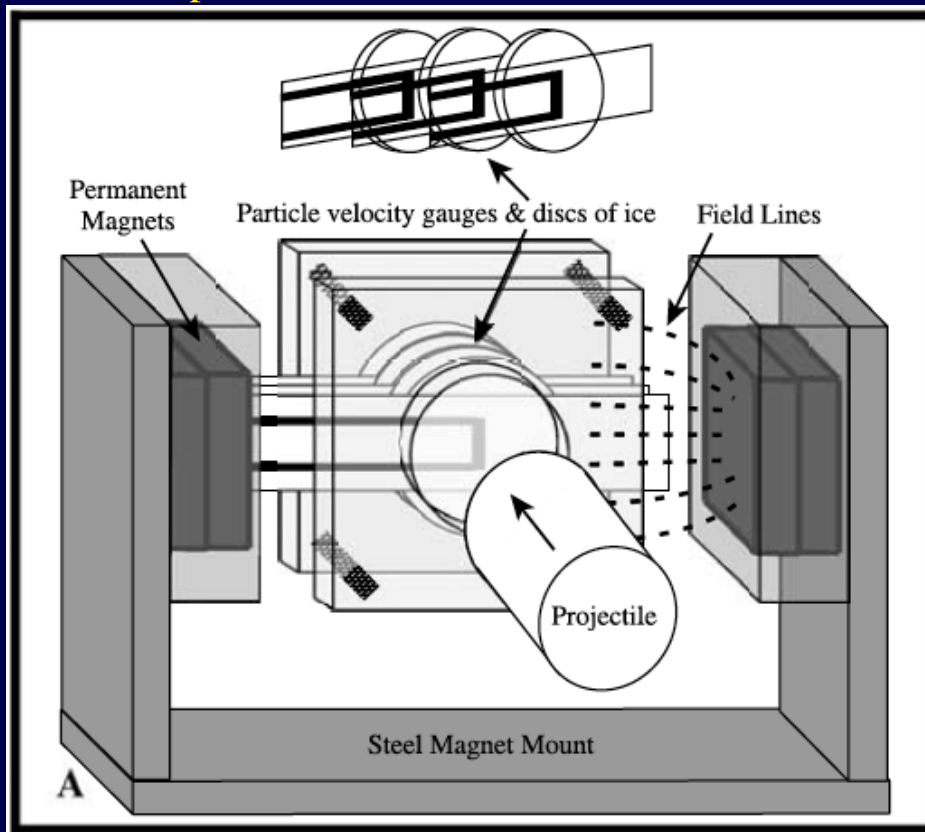


水氷への衝突で重要な相は？

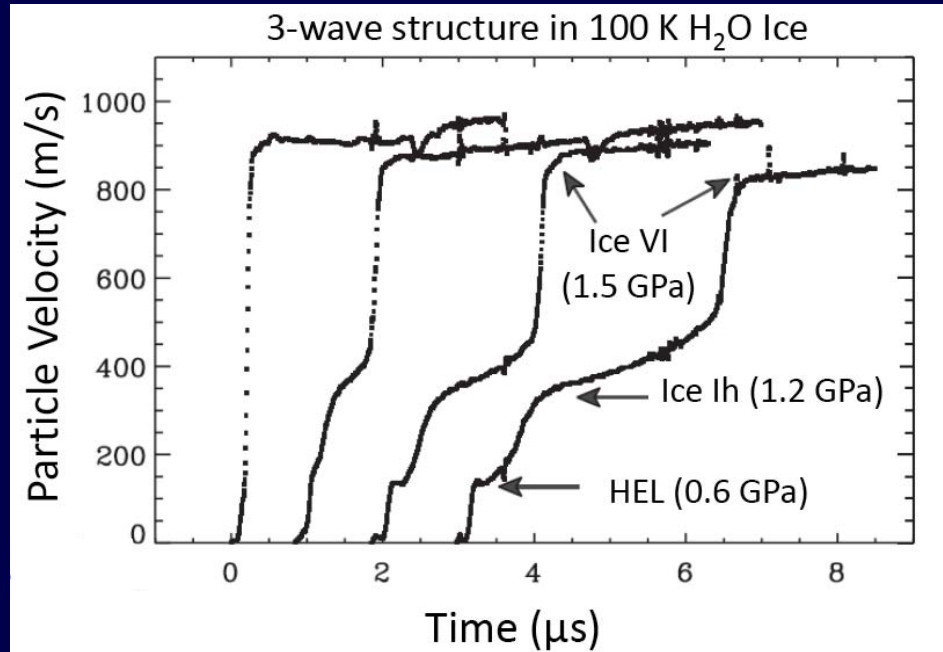
-> 衝突実験で検証, 衝突熔融/蒸発条件の決定

水氷 (<200 K) への衝突実験

u_p & V_s の時間分解計測



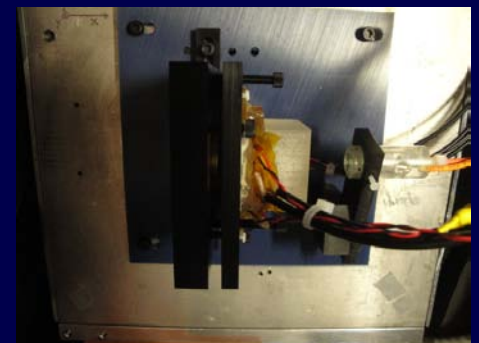
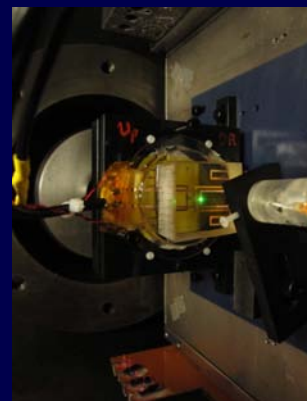
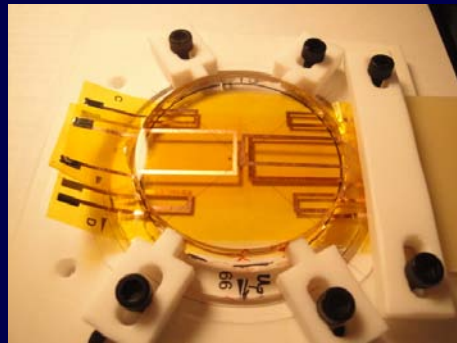
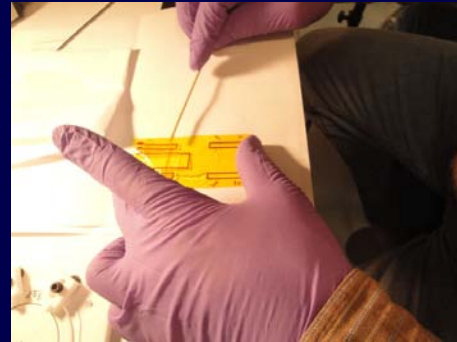
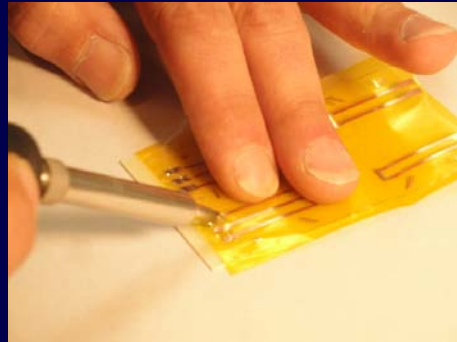
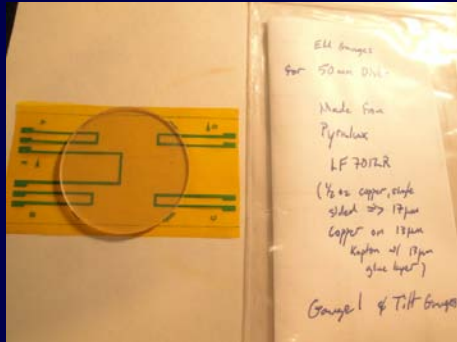
[Stewart & Ahrens, 2003, 2005]



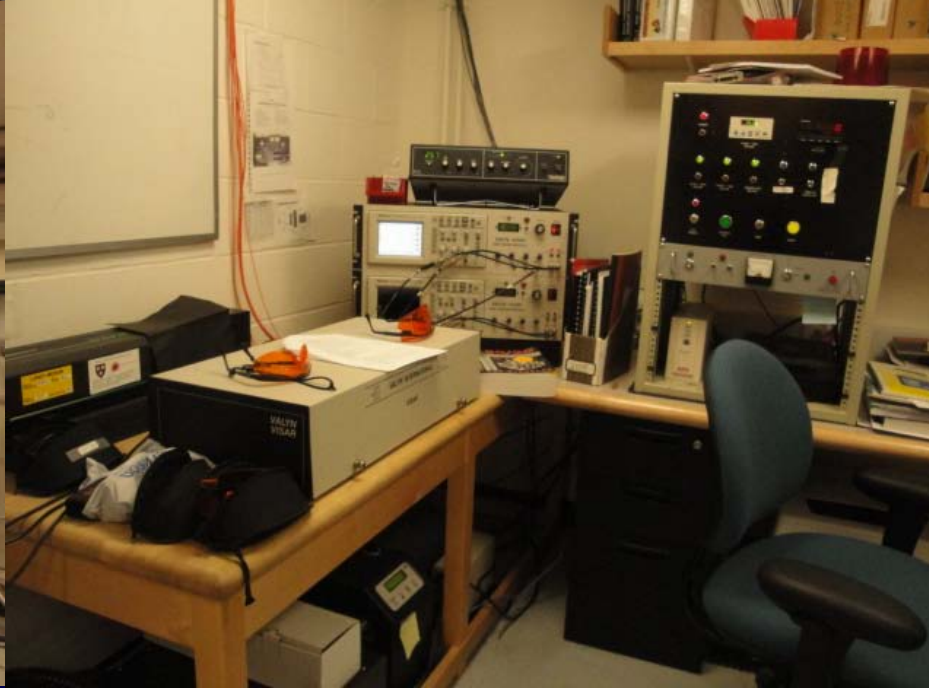
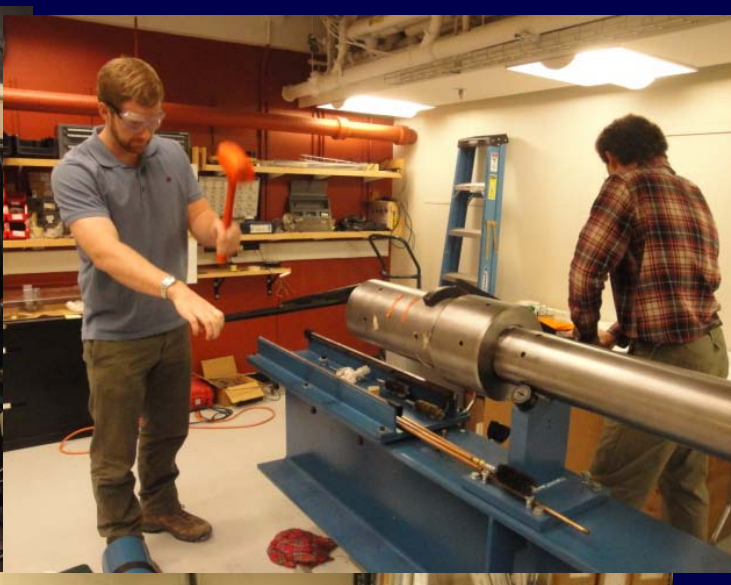
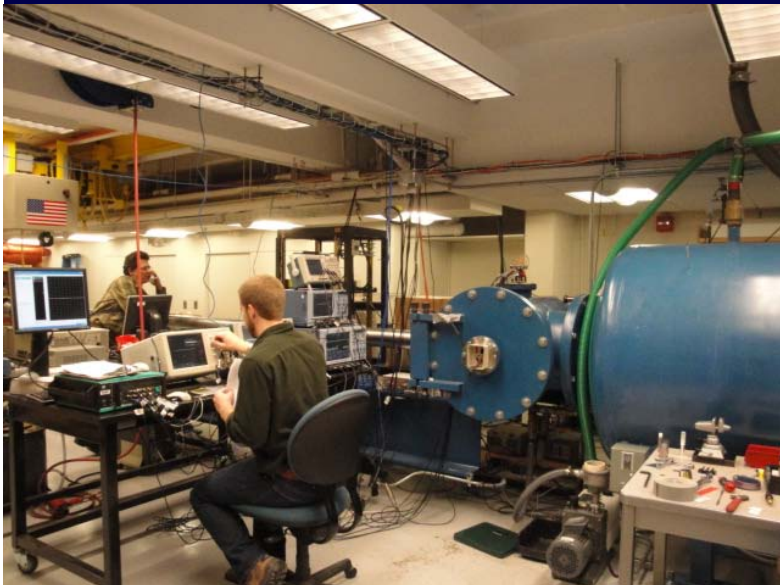
Measured u_p , V_s & R-H eqs.
-> C_o , s , ρ , P , E

衝撃圧縮時に重要な相はElastic Ih, Deformation Ih, VI, VII, Liquid

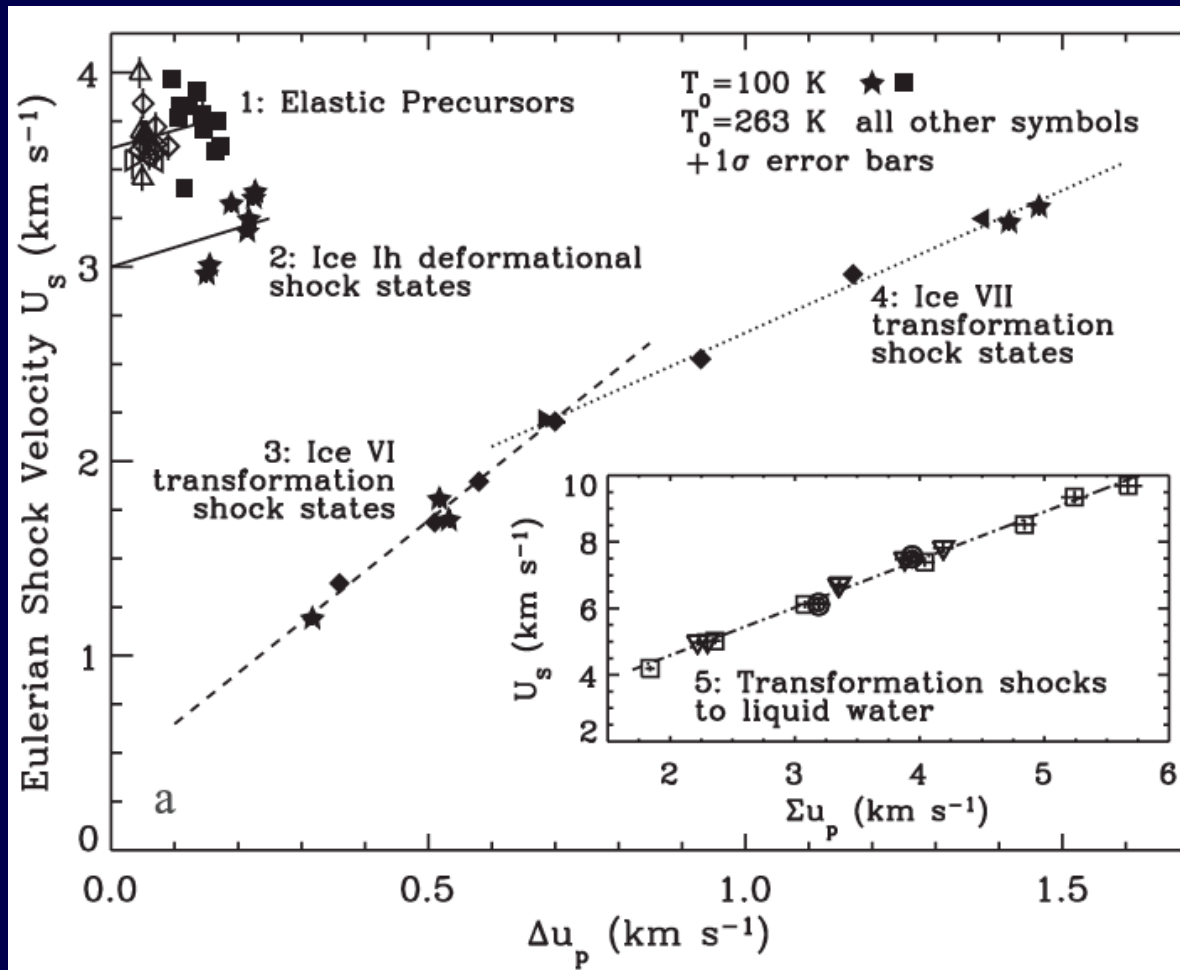
実験体験 標的 & 弾丸準備



実験体験 実験室の様子



水氷 (<200 K) への衝突実験



[Stewart & Ahrens, 2003, 2005]

Bulk sound velocity [m/s]

Elastic: 3610 ± 61

Ice Ih: 3000

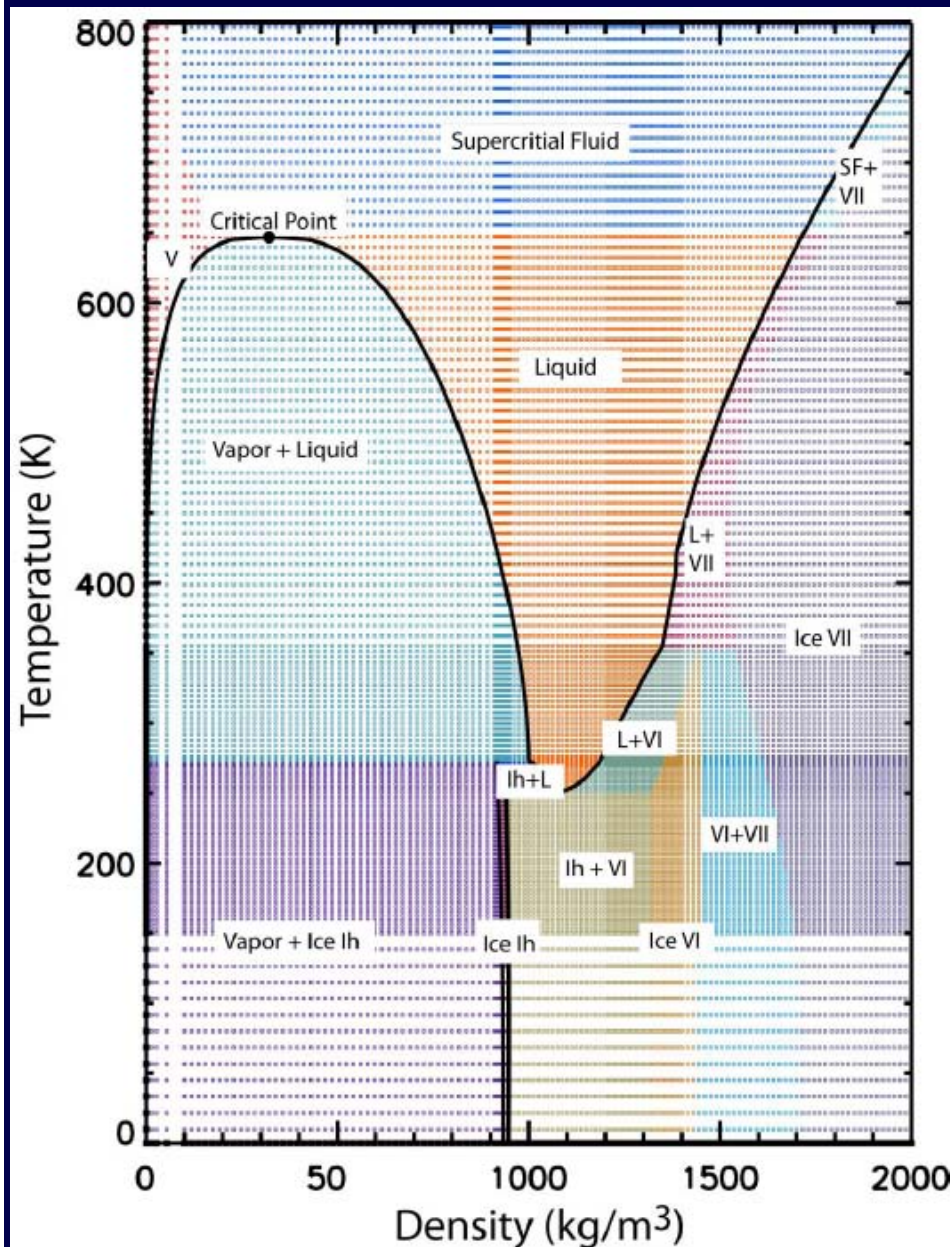
Ice VI: 388 ± 78

Ice VII: 1200 ± 140

Liquid: 1700 ± 130

衝撃圧縮時に重要な相はElastic Ih, Deformation Ih, VI, VII, Liquid

The 5-phase EOS



Ice Ih, VI, VII, Liquid, Vapor
を考慮したTabular EOS

[Senft & Stewart, 2008]

使用したデータ群

Liquid & Vapor [Wagner & Priss, 2002]

Ice Ih [Feistel & Wagner, 2006]

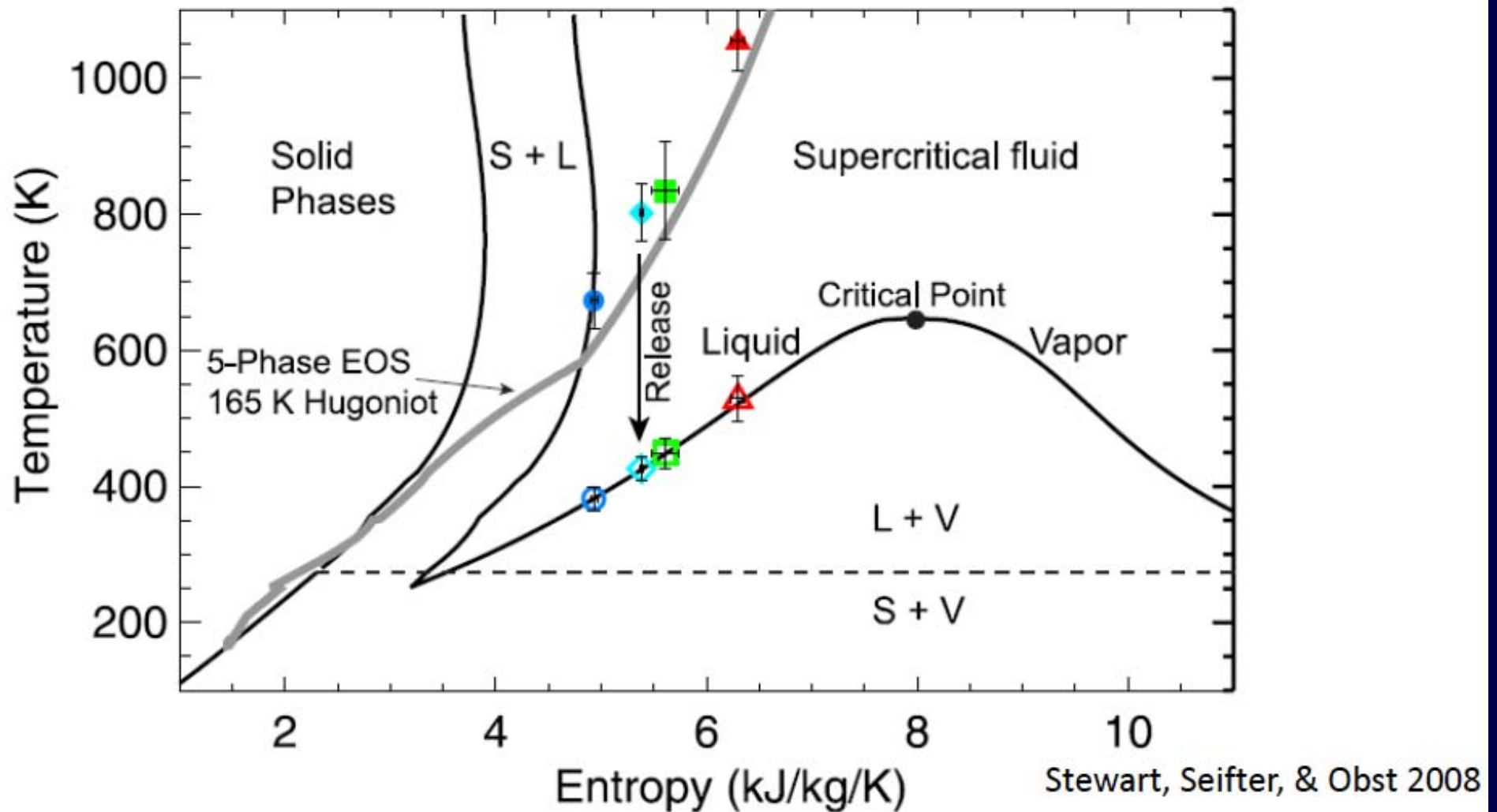
Ice VI & VII [Stewart & Ahrens, 2005]

P-V-T Hugoniotをよく再現する。

[Senft & Stewart, 2008; Stewart+, 2008;

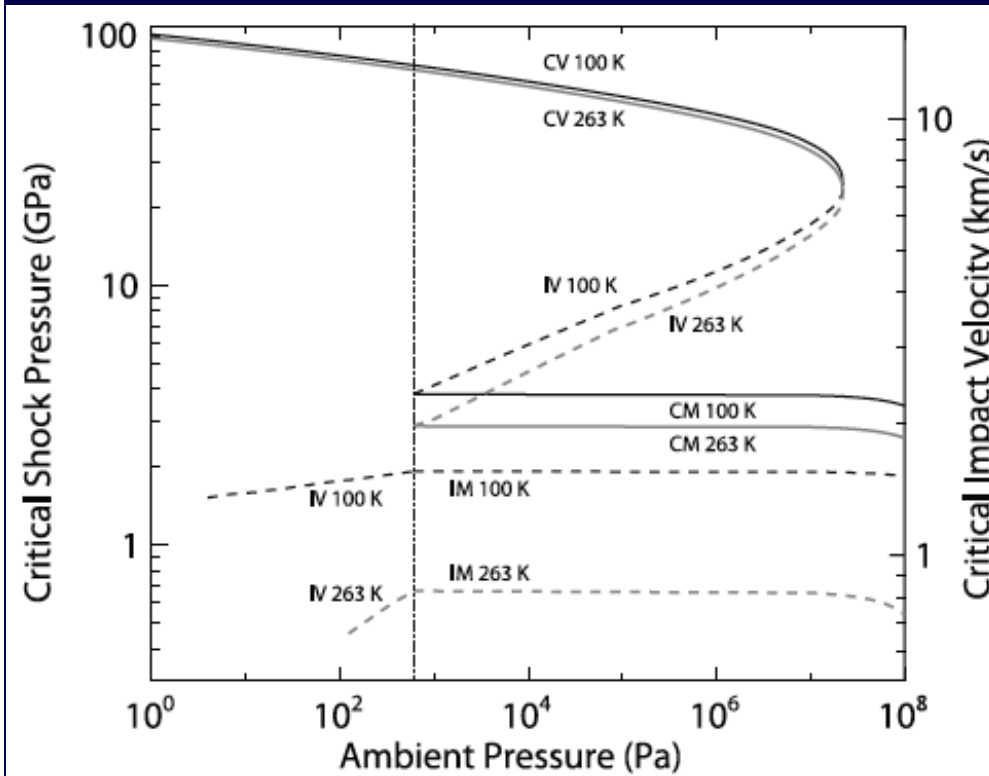
Kraus & Stewart, In revision]

実験との比較



***T-S*平面上でのPeak/Post Shock温度をよく再現**

水氷の熔融/蒸発条件



IM: 熔融開始
CM: 完全熔融
IV: 蒸発開始
CV: 完全蒸発

Ice at 250 K

IM: 0.49 GPa, CM: 2.69 GPa

[Kraus & Stewart, In revision]

[Stewart+, 2008]

熔融条件: 先行研究との比較

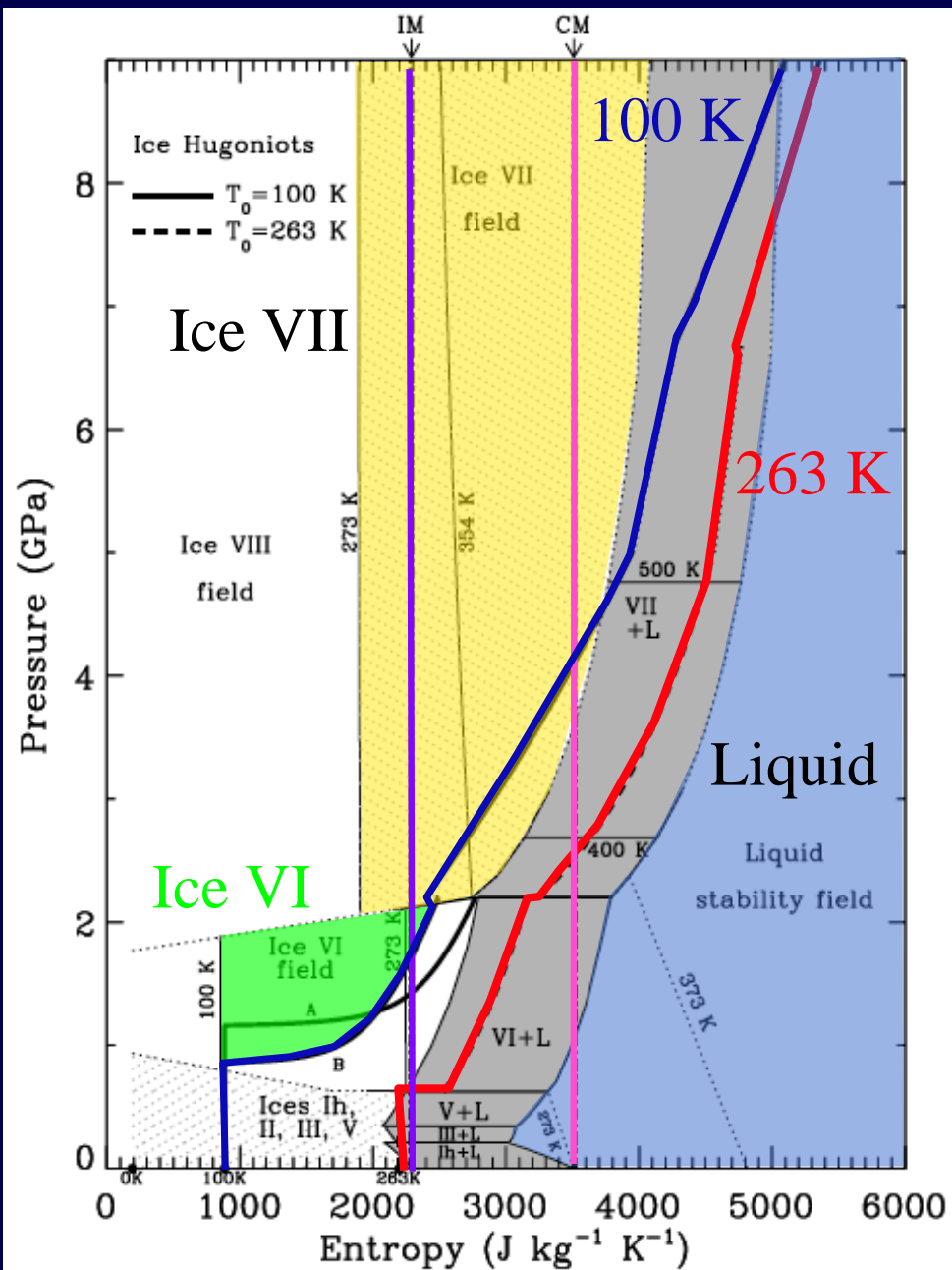
Kieffer & Simond, 1980: IM: 2 km/s (3GPa), CM: 4.5 km/s (10 GPa)

Ahrens & O'keefe 1985: IM: 3.8 km/s (6.2GPa), CM: 4.4 km/s (9.6 GPa)

Pierazzo+, 1997: 調和的 (ただしPeak/Post shock温度は再現しない)

熔融衝突速度が大幅に減少 -> 太陽系全域で水氷の衝突熔融

水氷の熔融/蒸発条件

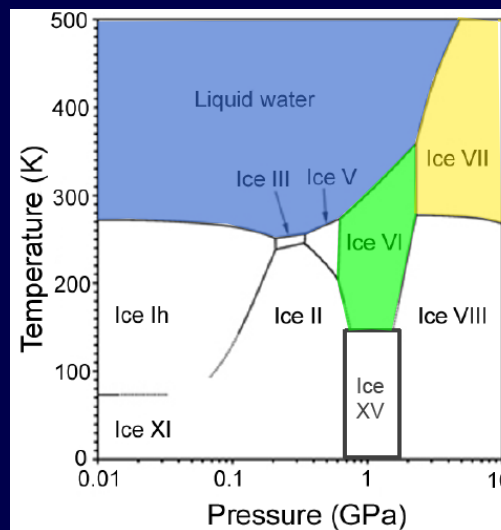


IM: 熔融開始
 CM: 完全熔融
 IV: 蒸発開始
 CV: 完全蒸発

Ice at 250 K

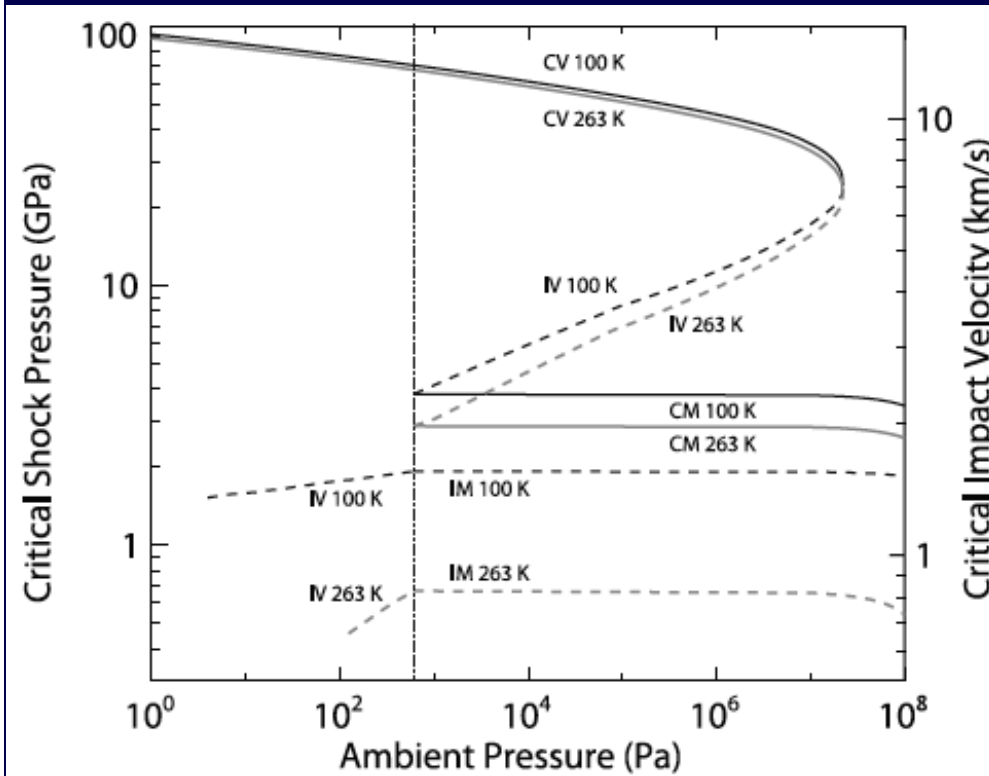
IM: 0.49 GPa, CM: 2.69 GPa

[Kraus & Stewart, In revision]



<-H₂OのP-S平面のHugoniot曲線
 [Stewart & Ahrens, *JGR*, 2005]

水氷の熔融/蒸発条件



IM: 熔融開始
CM: 完全熔融
IV: 蒸発開始
CV: 完全蒸発

Ice at 250 K

IM: 0.49 GPa, CM: 2.69 GPa

[Kraus & Stewart, In revision]

[Stewart+, 2008]

熔融条件: 先行研究との比較

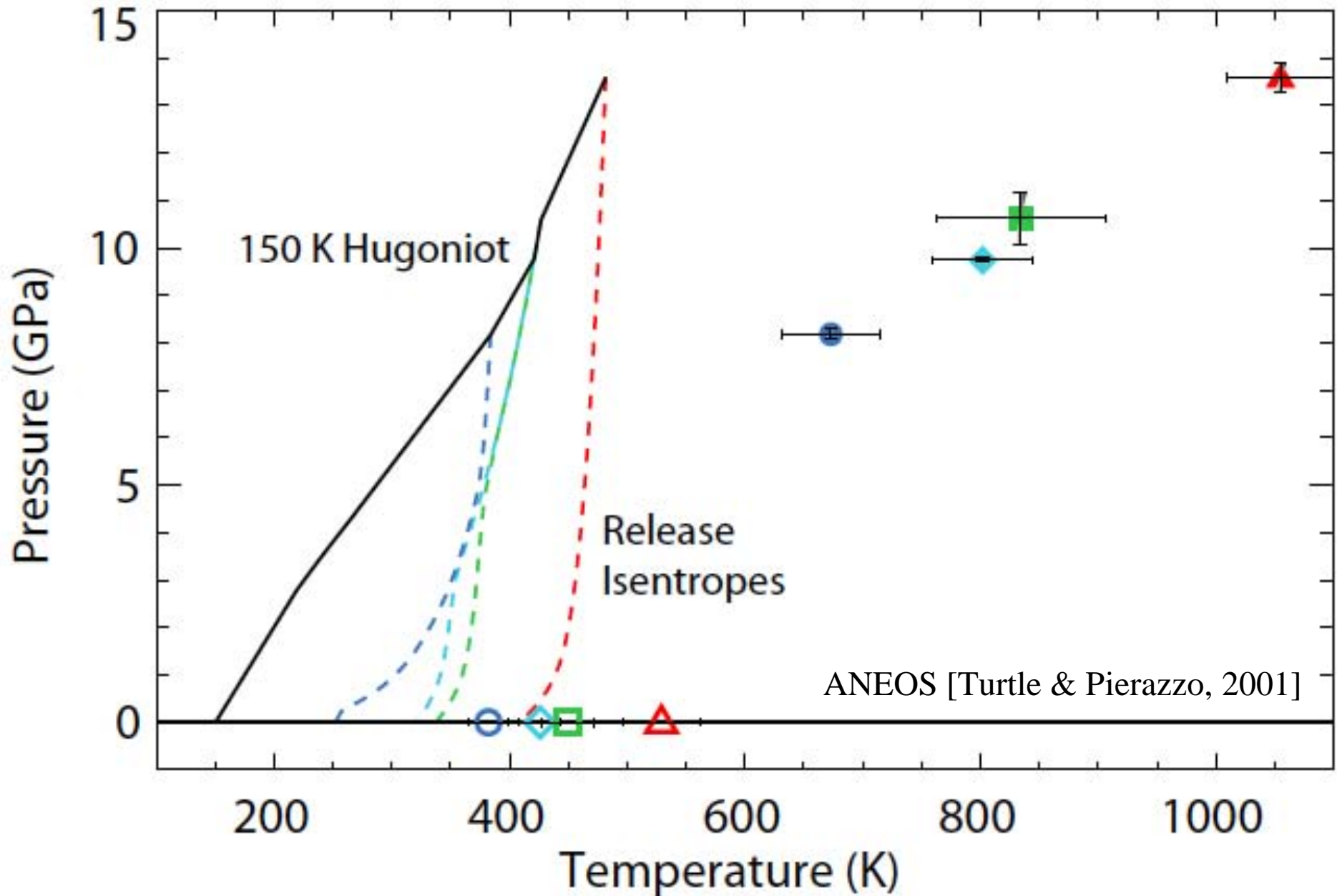
Kieffer & Simond, 1980: IM: 2 km/s (3GPa), CM: 4.5 km/s (10 GPa)

Ahrens & O'keefe 1985: IM: 3.8 km/s (6.2GPa), CM: 4.4 km/s (9.6 GPa)

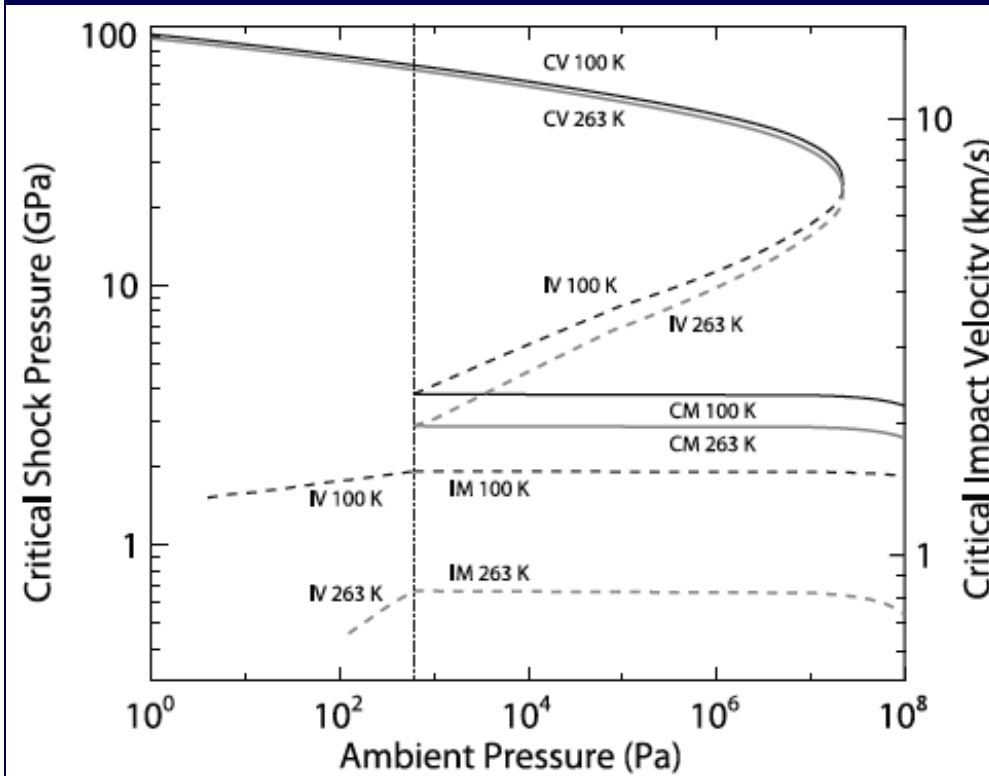
Pierazzo+, 1997: 調和的 (ただしPeak/Post shock温度は再現しない)

熔融衝突速度が大幅に減少 -> 太陽系全域で水氷の衝突熔融

水氷の熔融/蒸発条件



水氷の熔融/蒸発条件



IM: 熔融開始
CM: 完全熔融
IV: 蒸発開始
CV: 完全蒸発

Ice at 250 K

IM: 0.49 GPa, CM: 2.69 GPa

[Kraus & Stewart, In revision]

[Stewart+, 2008]

熔融条件: 先行研究との比較

Kieffer & Simond, 1980: IM: 2 km/s (3GPa), CM: 4.5 km/s(10 GPa)

Ahrens & O'keefe 1985: IM: 3.8 km/s (6.2GPa), CM: 4.4 km/s (9.6 GPa)

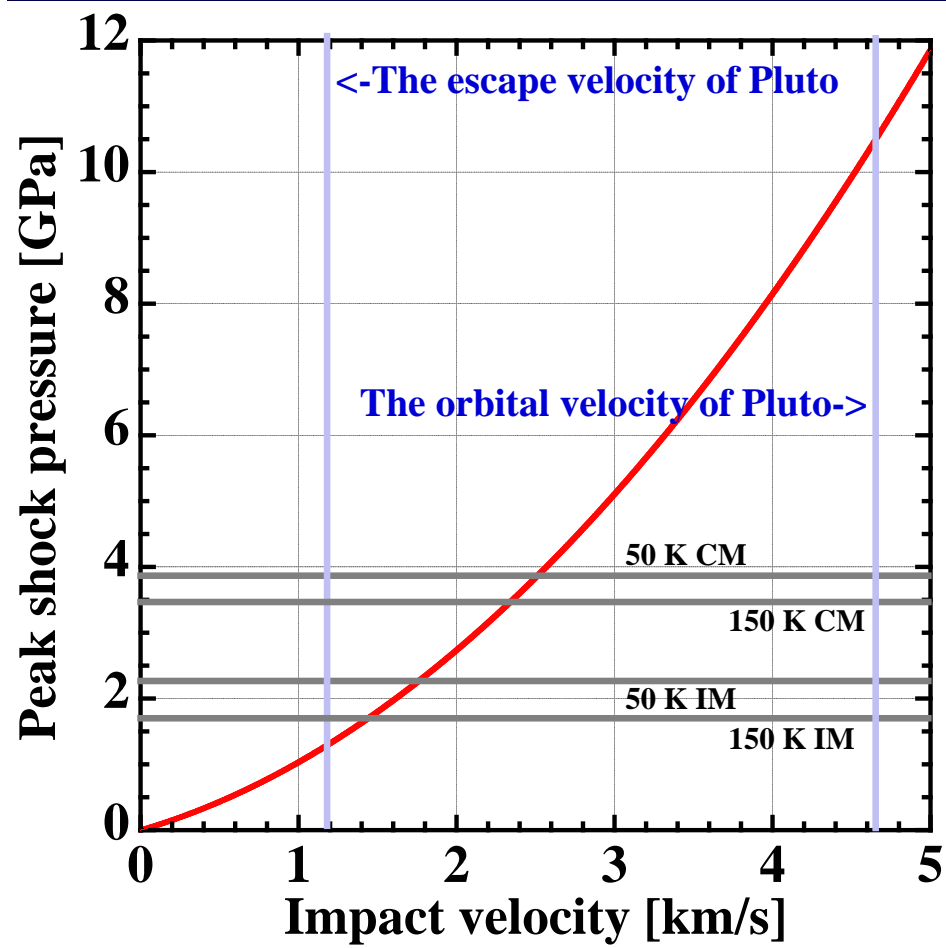
Pierazzo+, 1997: 調和的 (ただしPeak/Post shock温度は再現しない)

熔融衝突速度が大幅に減少 -> 太陽系全域で水氷の衝突熔融

話の流れ

1. 天体衝突による相変化の重要性
2. 高圧相への相変化(含Harvard University 滞在記)
水氷EOSの見直し
3. **EKB領域での衝突熔融による岩石核形成の可能性**
(まだシナリオ提案の段階)
4. 高強度レーザーを用いた珪酸塩蒸発実験
Giant impact仮説への応用

EKB領域での衝突



古典的EKB天体同士の
典型的衝突速度~1 km/s

[Trujillo+, 2001]

散乱円盤天体同士なら~3 km/s

[Brown+, 2007]

散乱天体同士の衝突は大規模熔融を引き起こすはず！
-> 岩石核形成, 太陽系軌道進化への制約の可能性

衝突熔融による核形成

岩石天体/金属核:

- ☆ 巨大衝突 [Tonks & Melosh, 1992]
- ☆ 寡占的成長段階の連続的衝突 [Senshu+, 2002]

氷天体/岩石核:

- ☆ 木星衛星系へのLHBによる連続的衝突 [Barr & Canup, 2010]
(ガニメデ/カリストの作り分け)

本研究の目的

EKB領域でのGiant impactsによる岩石核形成の可能性を調べる

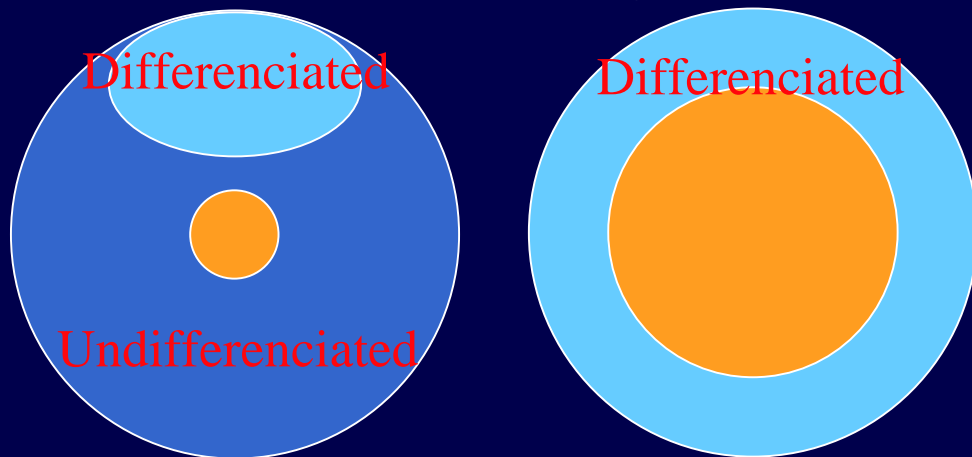
巨大氷惑星への応用, 軌道進化モデルへの制約

氷天体への連続衝突 -> 衝突熔融で生じた岩石塊は核へ積算

[Barr & Canup, 2010]

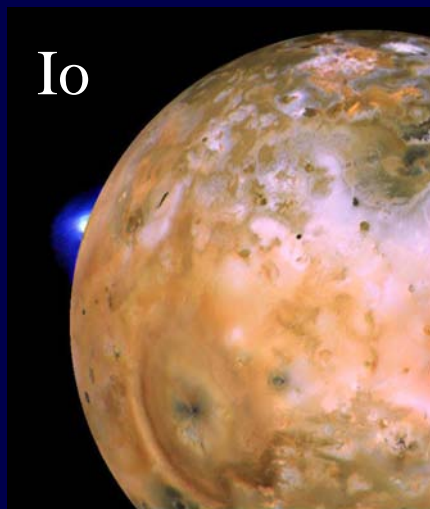
本研究: 単一巨大衝突での岩石核形成

Small impact event Large impact event



核を持つ天体の存在頻度
-> 軌道進化への制約

衝突規模に応じたサイズの
岩石核ができるかも?
->異なる熱進化?



New Horizons,
その後の外縁天体探査

今後の方針

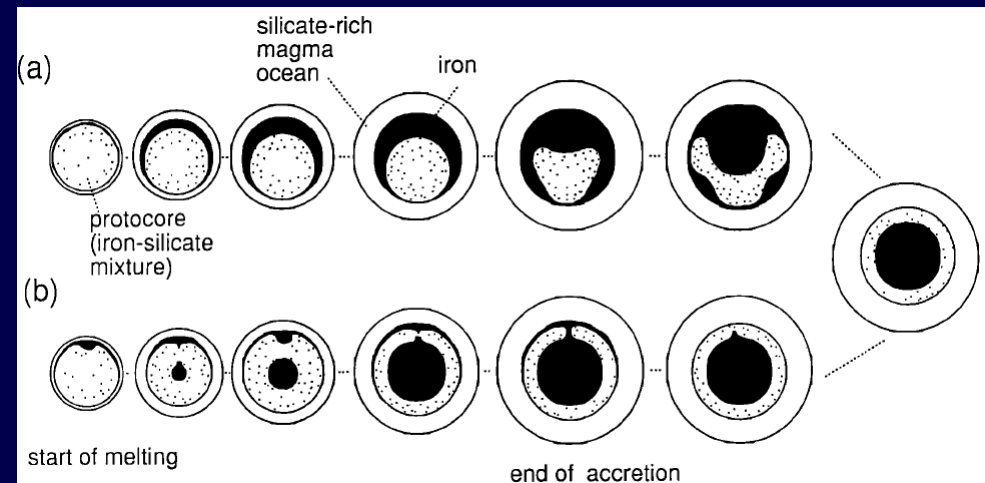
1. 氷天体内部温度構造計算
形成時間, その後の熱進化



2. 自己重力3D衝突流体計算
熔融率, 液体水分布の推定

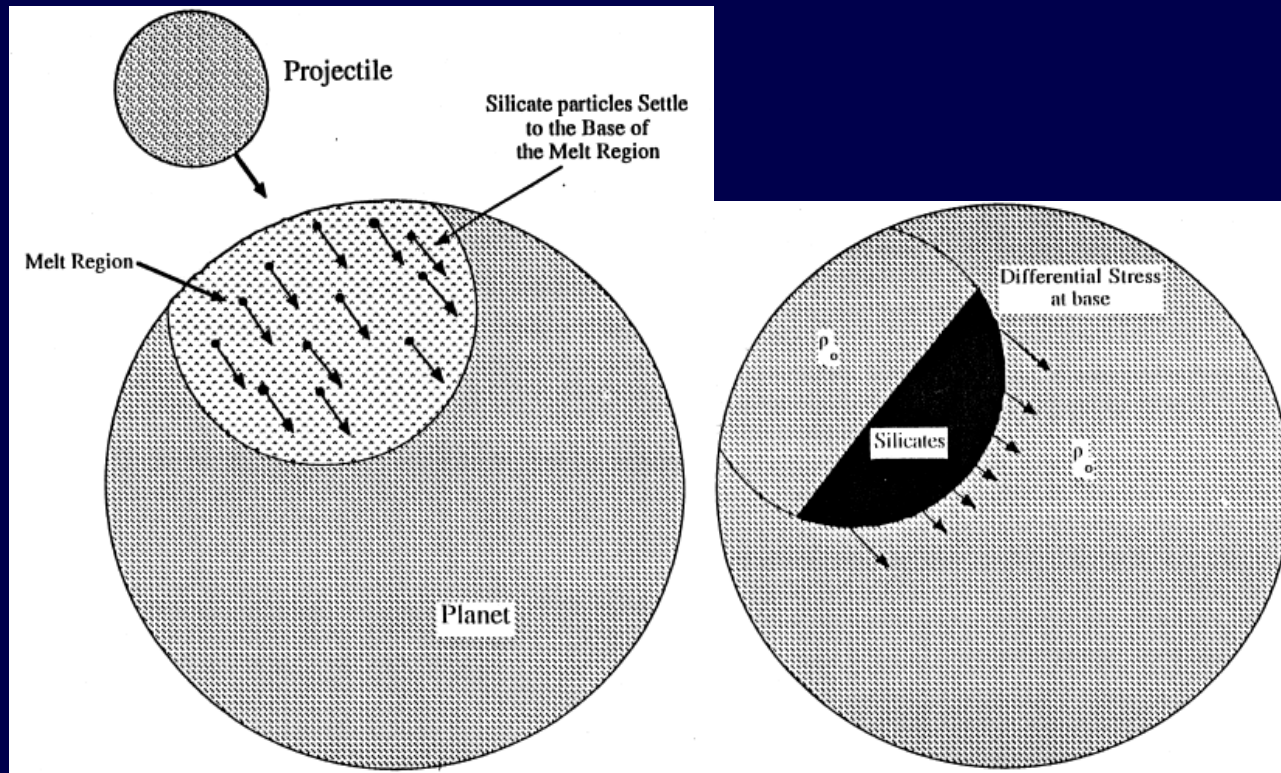


3. 岩石塊沈降計算
岩石核サイズ, 形成時間



[Honda+, 1993]

おまけ 氷-岩石-(有機物?)混合体



岩石微粒子+液体水の分離過程
岩石微粒子+液体水の沈降過程
有機物の役割は？



氷惑星/衛星のクレータ
低温火山, Titan湖
地球科学研究との接点
(海底地滑り, 沼地の分級など?)

将来の実験的研究テーマにもなるかも？

Special thanks: 名大 城野さん

本研究の最終目的

天体衝突が月, 大気, 生命起源に
果たした役割を定量的に評価

-> 珪酸塩のEOSを理解すること
(衝撃圧縮時のエネルギー分配過程を解明する)

本研究の結果

☆珪酸塩の*P-S*平面でのHugoniot曲線は不定性大

☆宇宙速度で衝撃圧縮された珪酸塩は電離しやすい状況

☆電離/電子再結合によって電子がエネルギー貯蔵庫となり,
衝撃圧縮珪酸塩の進化に重要な役割を果たす。

珪酸塩の衝突蒸発

>10 km/s 衝突: 衝撃加熱で珪酸塩(内惑星主要構成要素)が蒸発
(>100 GPa) [Theoretical: Ahrens & O'keefe, 1972; Experimental: Kurosawa+, *GRL*, 2010]

珪酸塩蒸気的重要性

- 月形成巨大衝突 [e.g., Wada+, 2006; Pahlevan & Stevenson, 2007; Pahlevan+, 2010]
- 衝突蒸気雲中での生命前駆物質合成 [e.g., Muhkin+, 1989]
- 原始火星の大気吹き飛ばし [e.g., Melosh & Vickery, 1989]
- Spherule bedsの起源 [e.g., Lowe+, 1989]
- 系外惑星系の軌道進化(SiOガスの解釈) [e.g., Lisse+, 2009]

エネルギー分配過程を支配するEOSの理解が不可欠

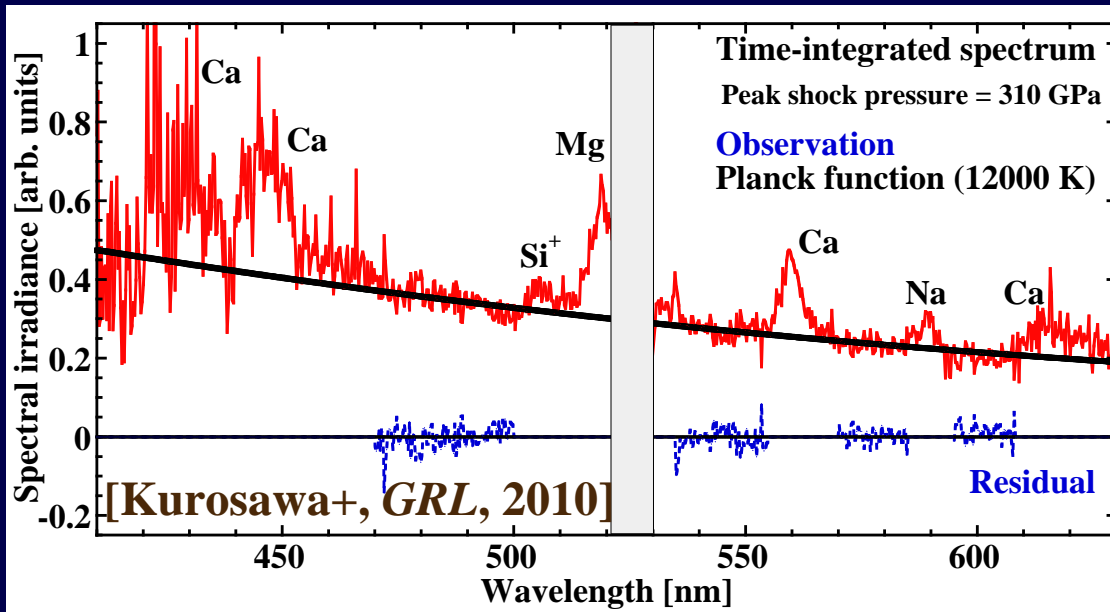
珪酸塩の衝突蒸発の先行研究

U_p - V_s measurements: 多くの先行研究(核爆発, レーザー, Zマシン)
[e.g., Trunin+, 2001; Hicks+, 2005; Knudsen & Desjarlais, 2009]

Temperature measurements: 3例のみ

Quartz: Hicks+, 2006; Kurosawa+, *GRL*, 2010; Kraus+, *LPSC*, 2011

Diopside (Actual silicate): Kurosawa+, *GRL*, 2010



Laser-driven Ta (9.5 km/s)
-> Diopside ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$)

黒体放射 + 輝線発光

※ 輝線発光を放つのは
気相のみ

☆ 宇宙速度衝突(~14 km/s)で珪酸塩が蒸発したことを確認

珪酸塩の衝突蒸発の先行研究

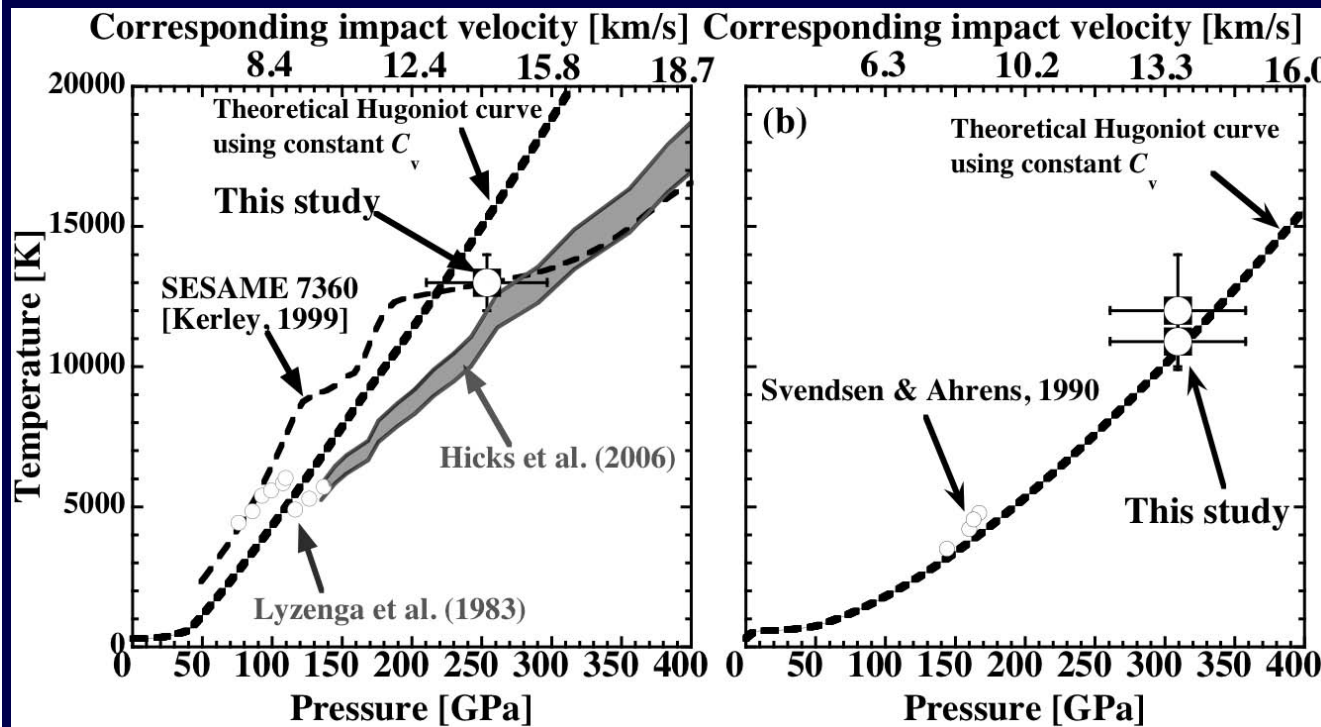
U_p - V_s measurements: 多くの先行研究(核爆発, レーザー, Zマシン)

[e.g., Trunin+, 2001; Hicks+, 2005; Knudsen & Desjarlais, 2009]

Temperature measurements: 3例のみ

Quartz: Hicks+, 2006; Kurosawa+, *GRL*, 2010; Kraus+, *LPSC*, 2011

Diopside (Actual silicate): Kurosawa+, *GRL*, 2010



[Kurosawa+, *GRL*, 2010]

C_v for Qtz. > 3

C_v for Dio. ~ 3

[k_b /atom]

※ C_v はEntropy gain
を決定するための
重要パラメータ

☆ 高温高压条件下での C_v の上昇率は物質依存性を持つ。

岩石プラズマ挙動の重要性 -月-

状態方程式: 非可逆的に蓄えられた内部エネルギーの分配を支配
->衝突後の蒸発率, 流体運動, 化学反応場の決定に不可欠

<-巨大衝突による月形成
数値計算例

☆珪酸塩の蒸発率

上限: 月材料の維持

微衛星の成長阻害

[Genda & Abe, 2003; Machida & Abe, 2004;
Wada et al., 2006]

下限: 酸素同位体平衡

[Pahlevan & Stevenson, 2007; Melosh, 2009]

☆衝突後の流体運動

一つの大きな月が形成

Hydrocode: CTH ; EOS: M-ANEOS

[Crawford, Private communication]

岩石プラズマ挙動の重要性 - 大気, 生命 -

状態方程式: 非可逆的に蓄えられた内部エネルギーの分配を支配
->衝突後の蒸発率, 流体運動, 化学反応場の決定に不可欠

原始地球想像図
[Don Dixon]

☆珪酸塩の蒸発率
衝突蒸気雲の酸化還元状態
(大気組成, 生命前駆物質)

☆衝突後の流体運動
化学反応場(P, T, x)

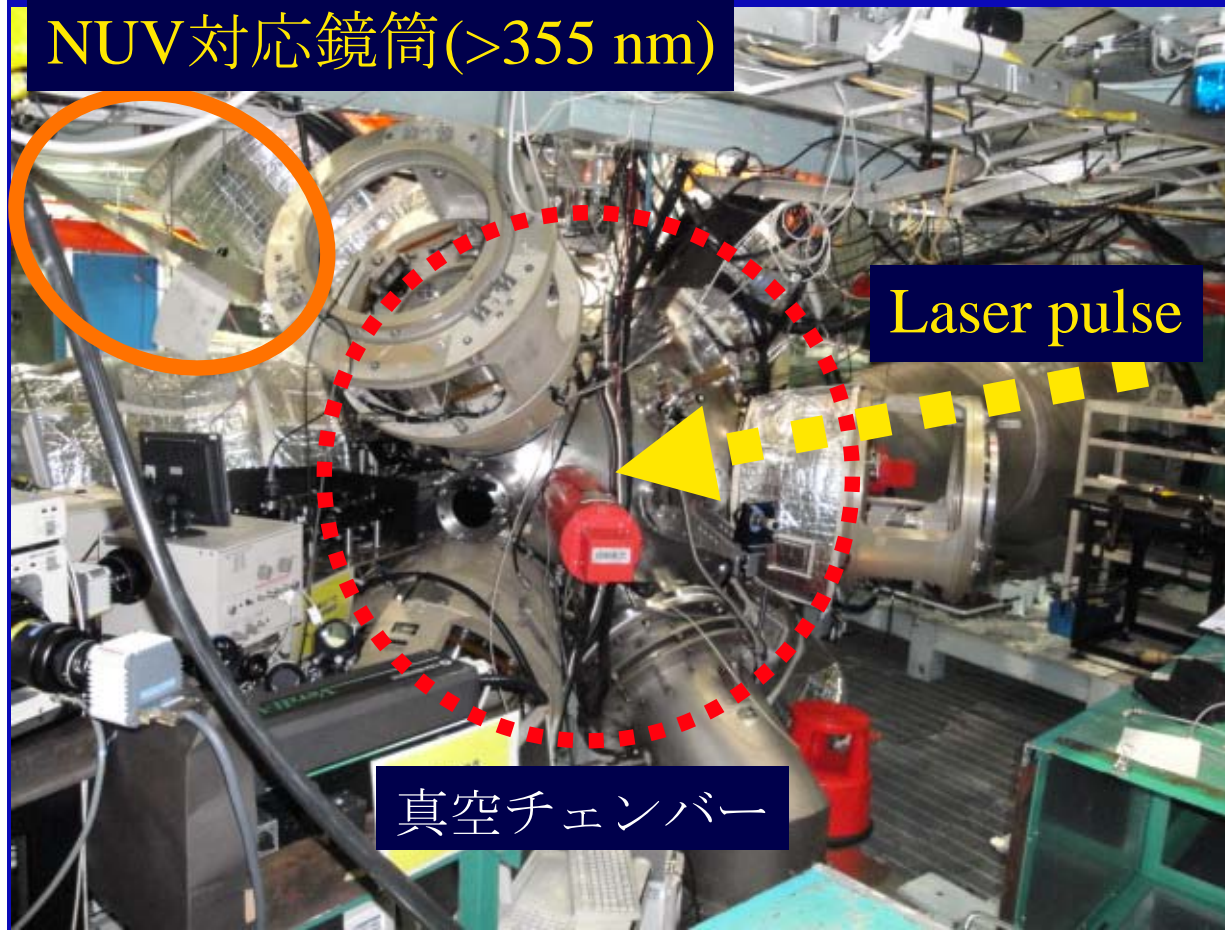
Don Dixon

http://www.cosmographica.com/gallery/portfolio2007/content/340_CometFlood_large.html

本研究の目的

宇宙速度衝撃圧縮時の珪酸塩の
エネルギー分配過程をその場観測

※珪酸塩に対する計測例なし



観測量

1. Hugoniot上温度
2. 蒸気の温度進化
3. 蒸気の電子密度進化

珪酸塩の電離状態に
注目

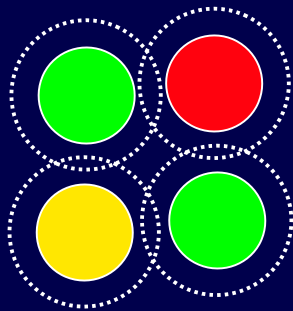
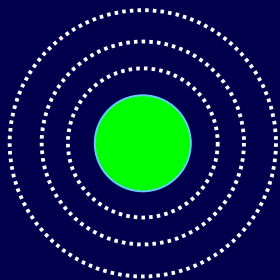
Warm dense条件下での電離

Ionization	Lattice vibration	Binding	Structural change	Internal energy of gas
Ca: 589.8	$C_v T = 3RT = 498$	Si - O: 466	SiO ₂ : 790	$0.5RT = 83$
Mg: 737.7	at 20000 K	N \equiv N: 945	[Hicks et al., 2006]	at 20000 K
Si: 786.5	(per 1 atom)			(per 1 degree of freedom)
O: 1313				

電子が保持しうるエネルギーは他のエネルギーに比べて大きい
 -> 電離状態はエネルギー分配過程を調べる上で最重要

Isolated atom

Warm dense condition



量子効果が無視できない!
 (理論予測困難)

Warm dense条件での電離状態
 は実験で調べるしかない。

Warm dense条件下では
 電子雲同士が干渉

チェンバー内

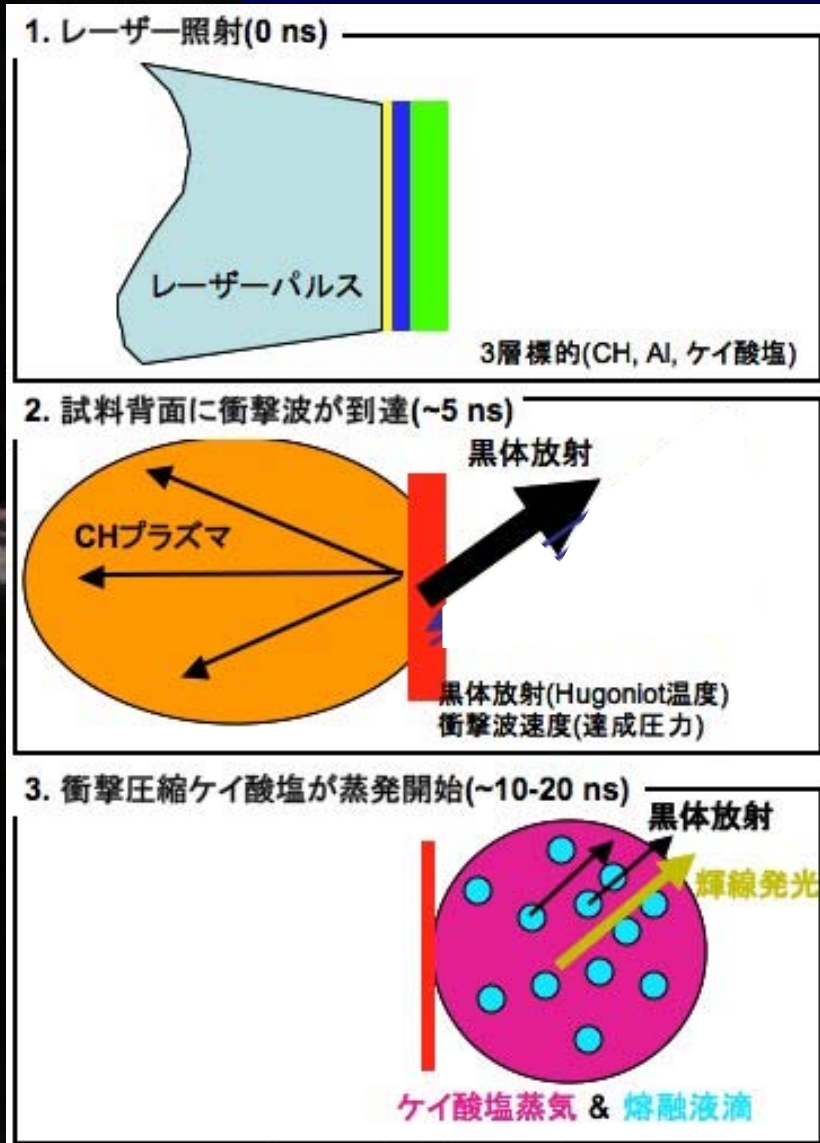
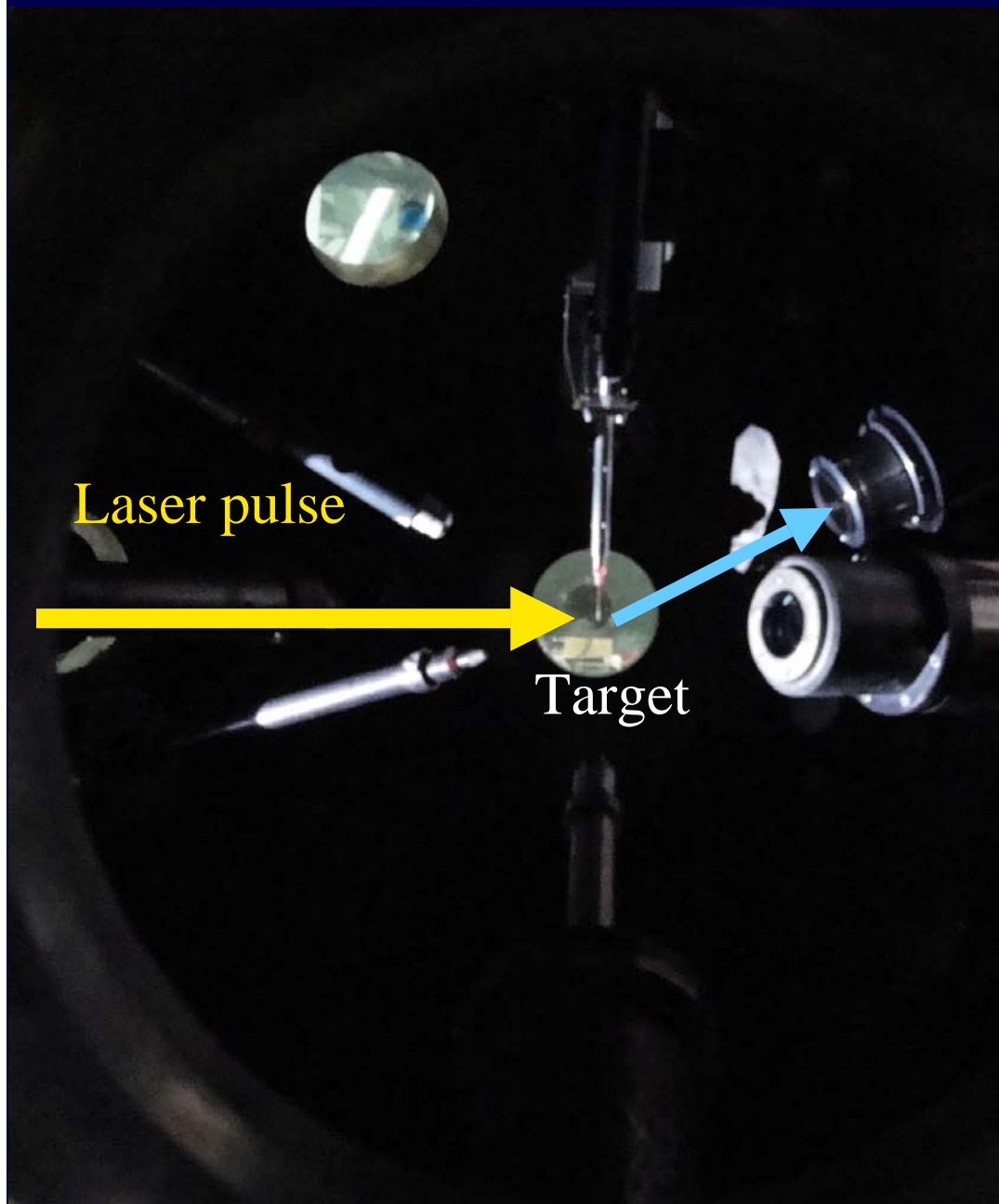


図4. 計測概念図

実験条件

標的: Diopside($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$, パキスタン産, タンザニア産)
厚さ $\sim 100 \mu\text{m}$

レーザー照射条件:

ビーム径 = $600 \mu\text{m}$, エネルギー = 200 - 1000 J, 持続時間 = 2.5 ns

ビーム強度 = 25-150 TW/cm²

分光観測条件

斜め 30° 上
ストリーク分光器

観測視野 $\sim 400 \mu\text{m}$

Target例

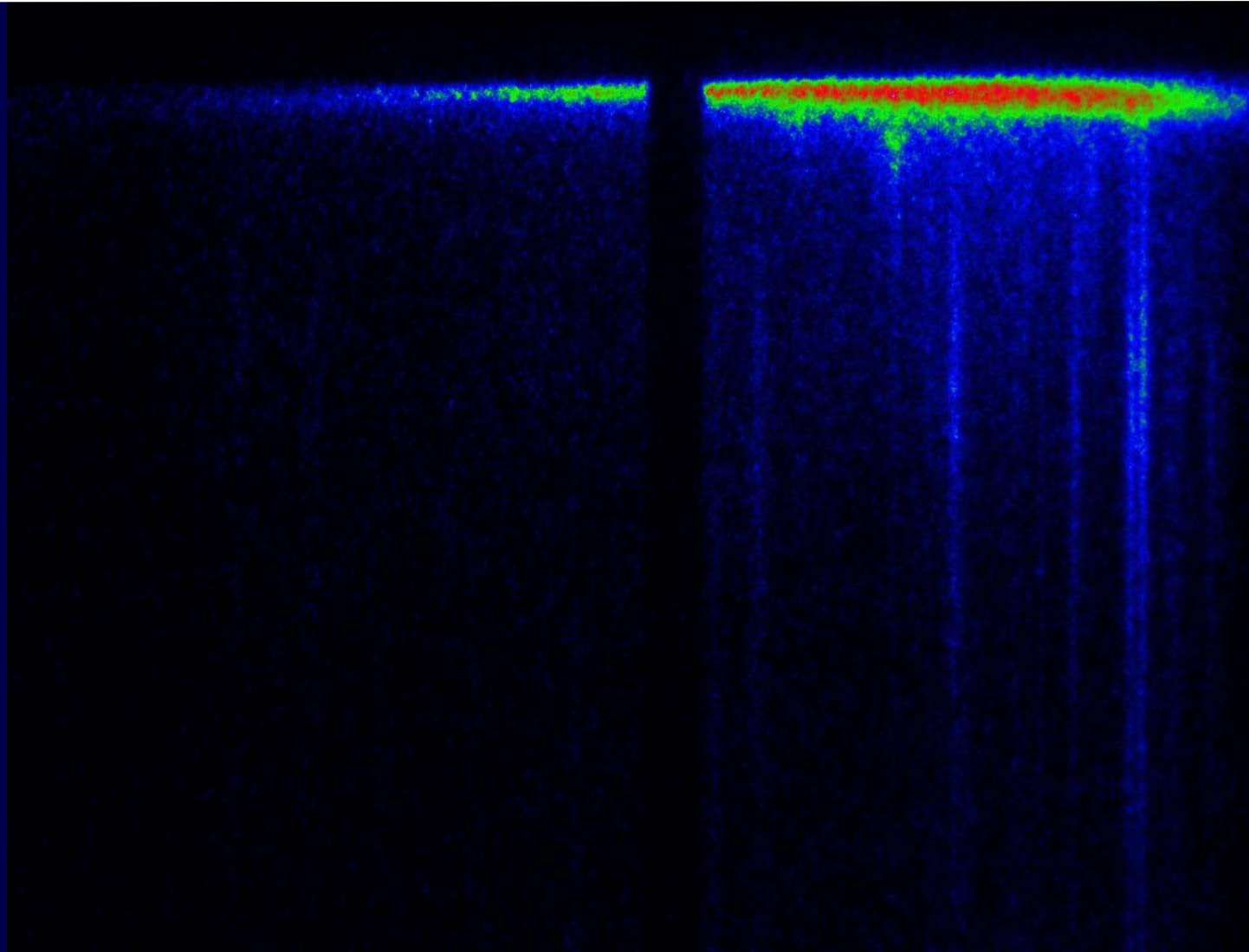
試料作成協力:
東大 理 宇野 正起氏

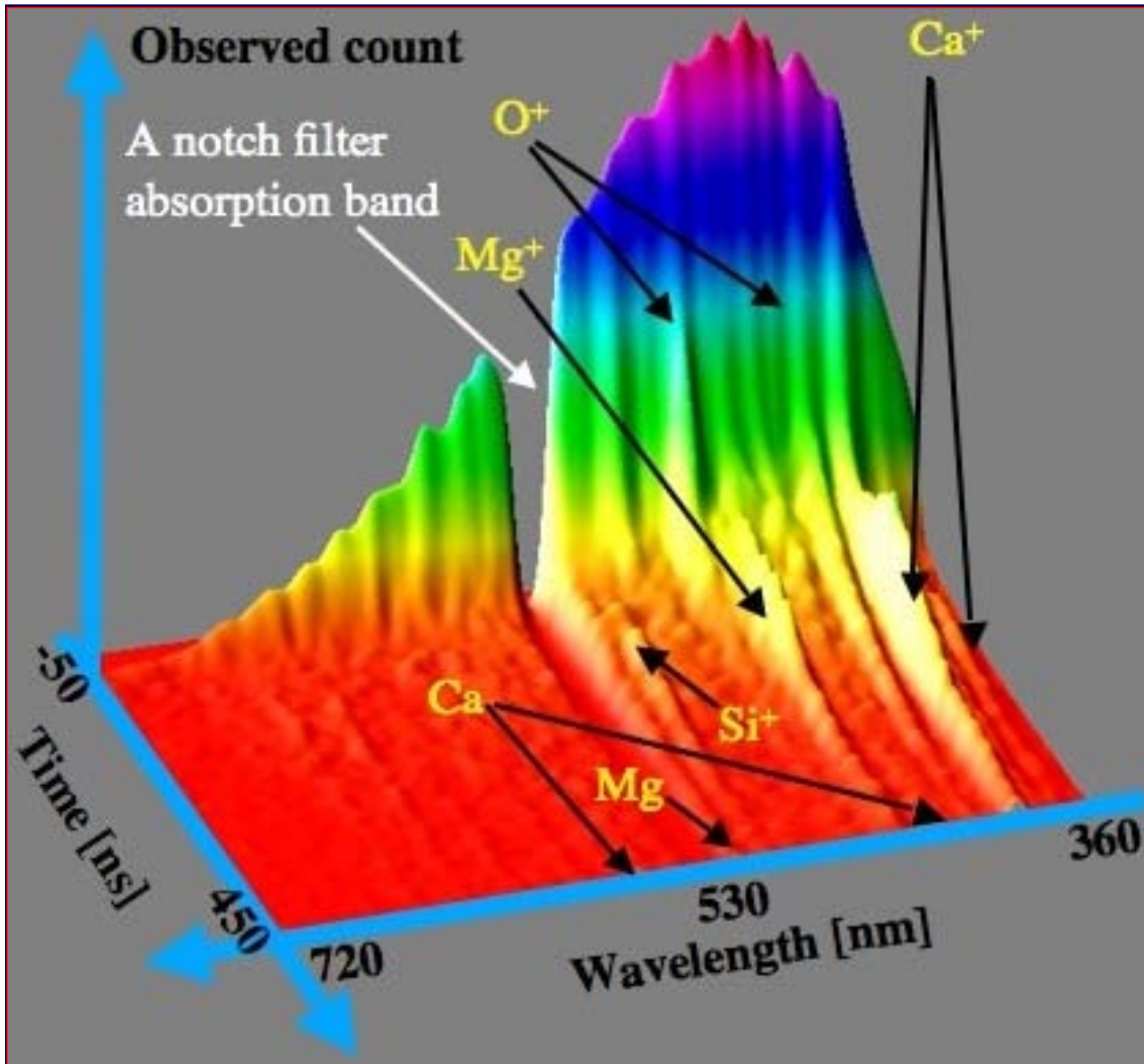


時間分解型発光スペクトル

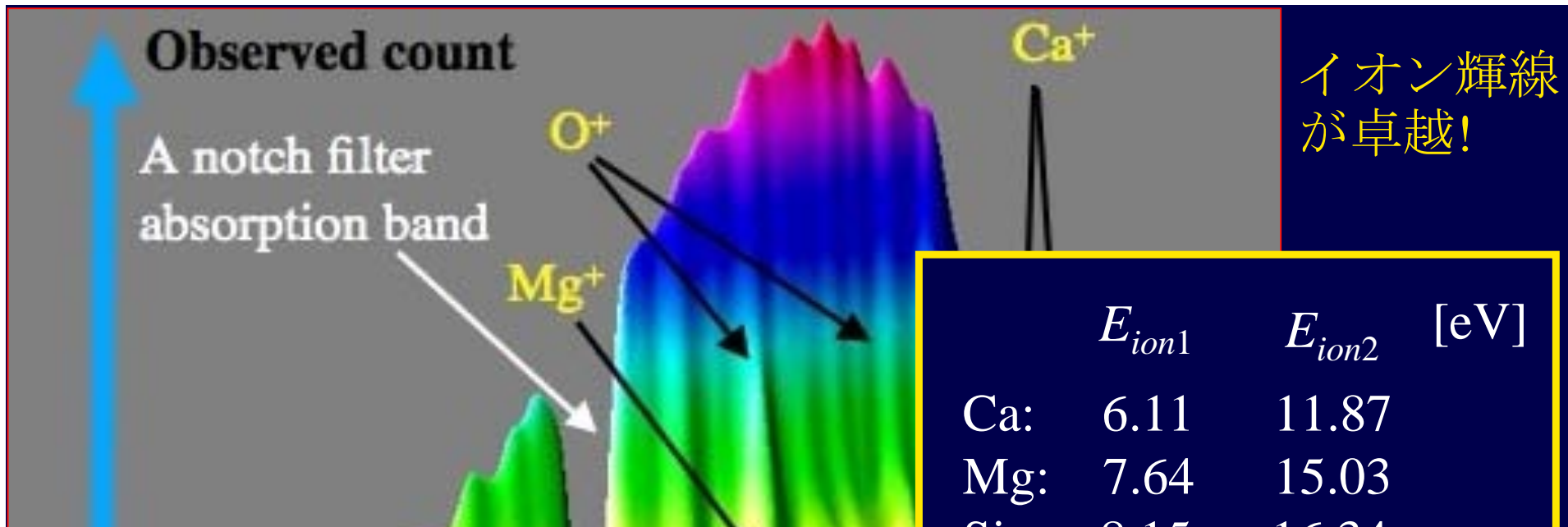
波長 360 - 720 nm

時間
500 ns





イオン輝線
が卓越!



	E_{ion1}	E_{ion2}	[eV]
Ca:	6.11	11.87	
Mg:	7.64	15.03	
Si:	8.15	16.34	
O:	13.62	35.12	

0 ns ~ : 強い黒体放射

10 ns ~ : O⁺輝線の発光(太い), Ca⁺共鳴線

50 ns ~ : O⁺輝線の減衰, Si⁺, Mg⁺, Ca⁺の輝線の出現

150 ns ~ : Ca, Mg輝線の出現

構成原子全てが電離 -> 衝撃圧縮珪酸塩は電離しやすい

Observed count

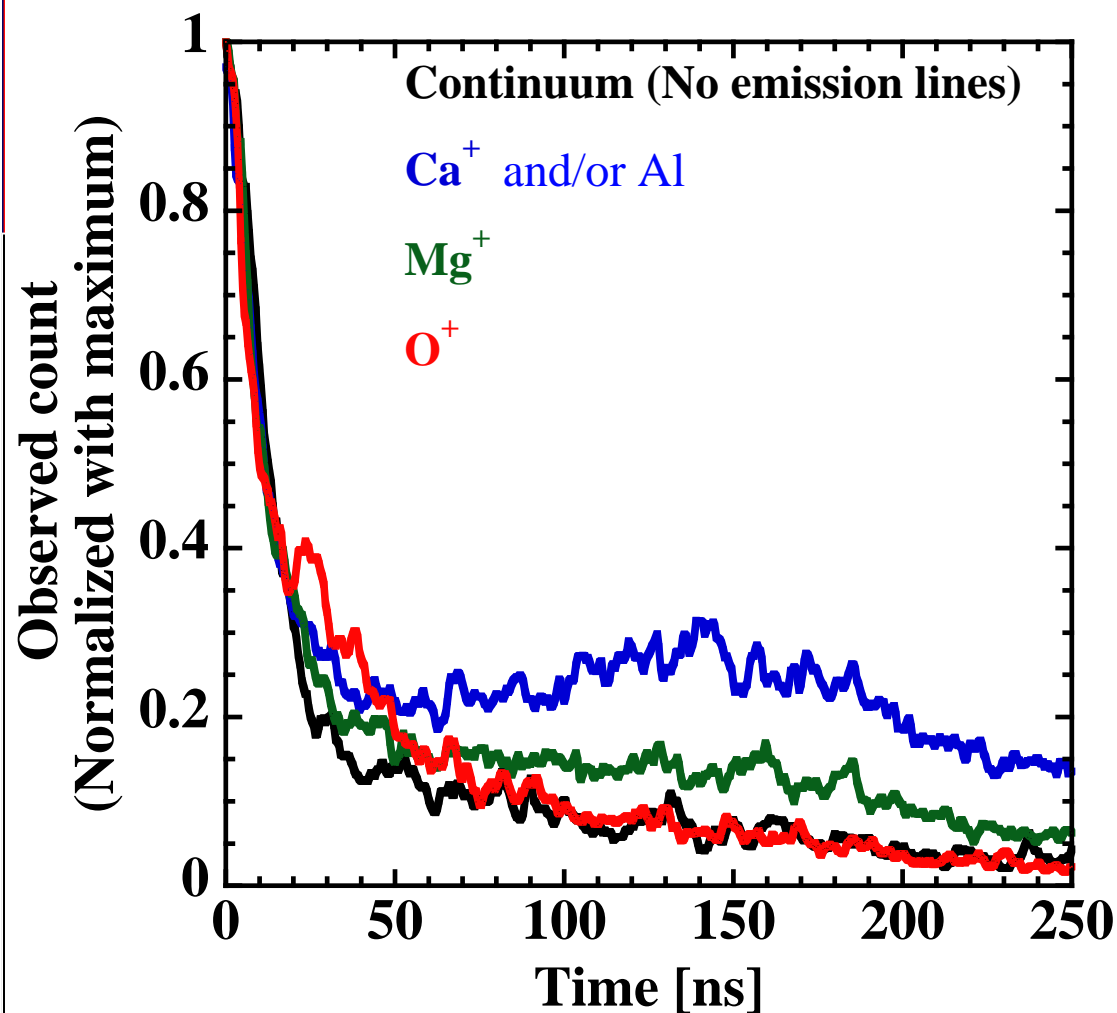
A notch filter
absorption band

O⁺

Mg⁺

Ca⁺

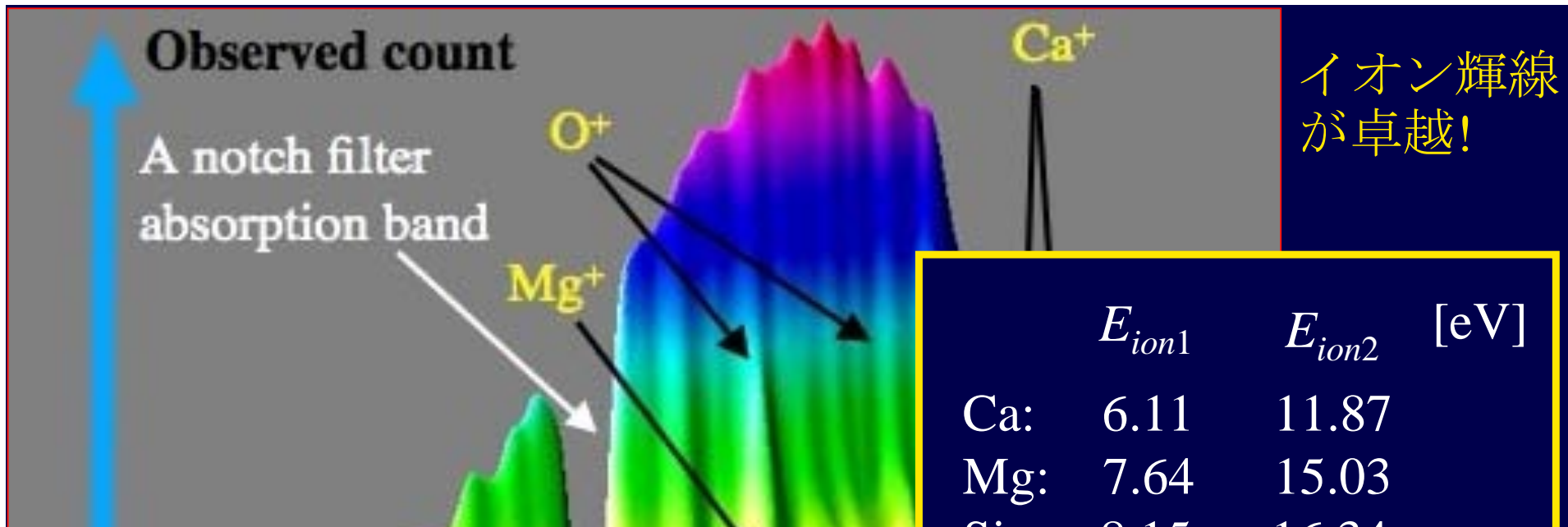
イオン輝線
が卓越!



	E_{ion1}	E_{ion2}	[eV]
Ca:	6.11	11.87	
Mg:	7.64	15.03	
Si:	8.15	16.34	
O:	13.62	35.12	

イオン化エネルギー大
<-> 減衰速い

電子再結合による
イオン数密度の変動



	E_{ion1}	E_{ion2}	[eV]
Ca:	6.11	11.87	
Mg:	7.64	15.03	
Si:	8.15	16.34	
O:	13.62	35.12	

0 ns ~ : 強い黒体放射

10 ns ~ : O⁺輝線の発光(太い), Ca⁺共鳴線

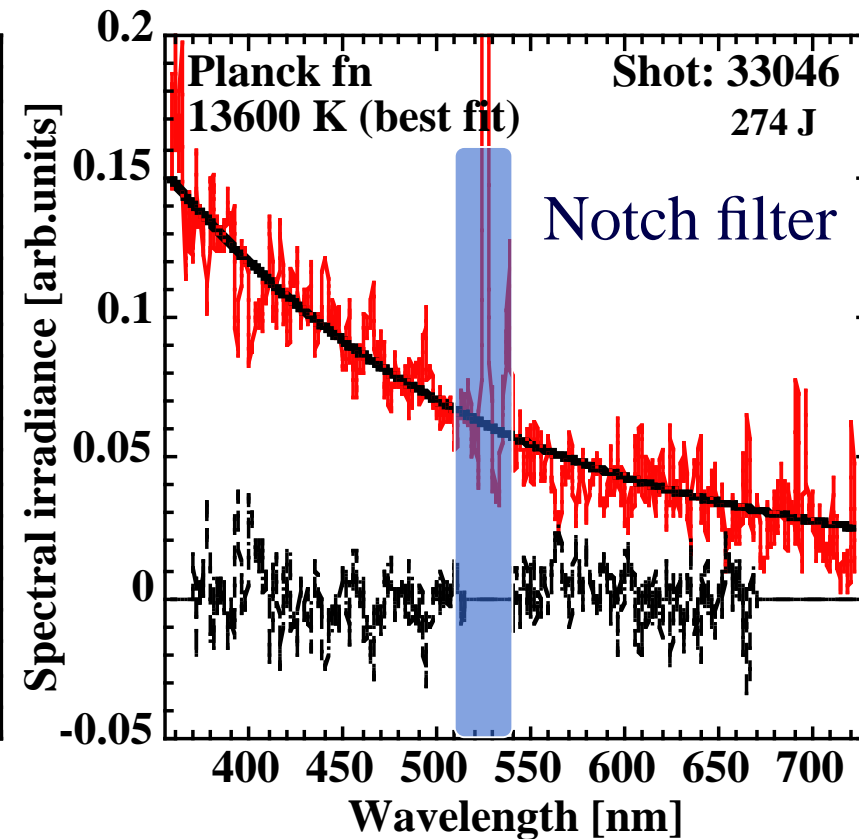
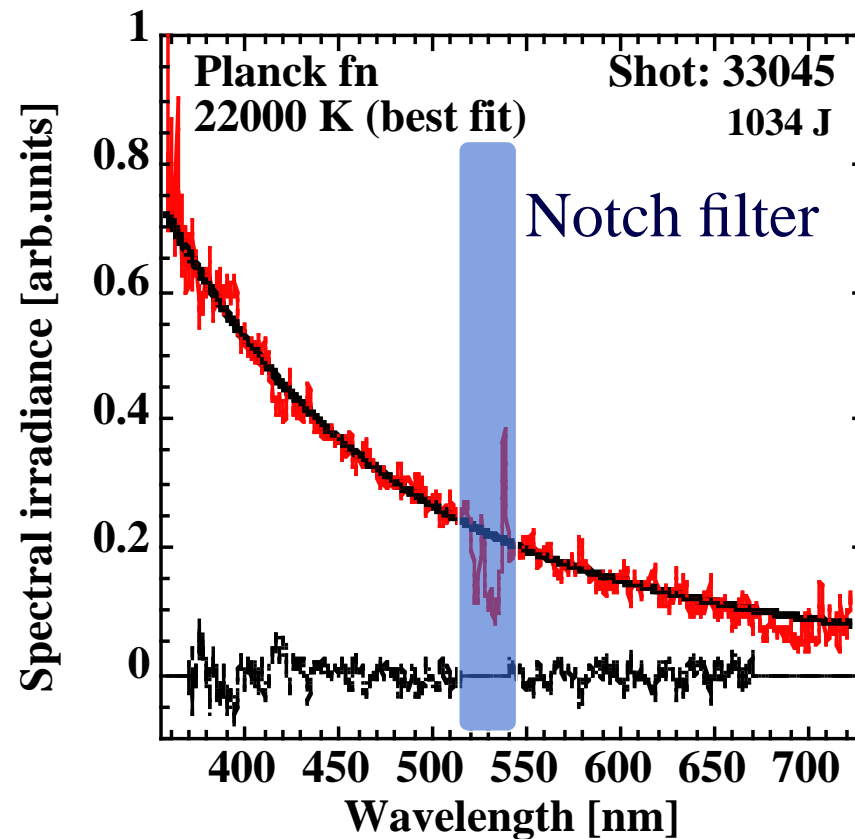
50 ns ~ : O⁺輝線の減衰, Si⁺, Mg⁺, Ca⁺の輝線の出現

150 ns ~ : Ca, Mg輝線の出現

構成原子全てが電離 -> 衝撃圧縮珪酸塩は電離しやすい

Hugoniot上温度測定

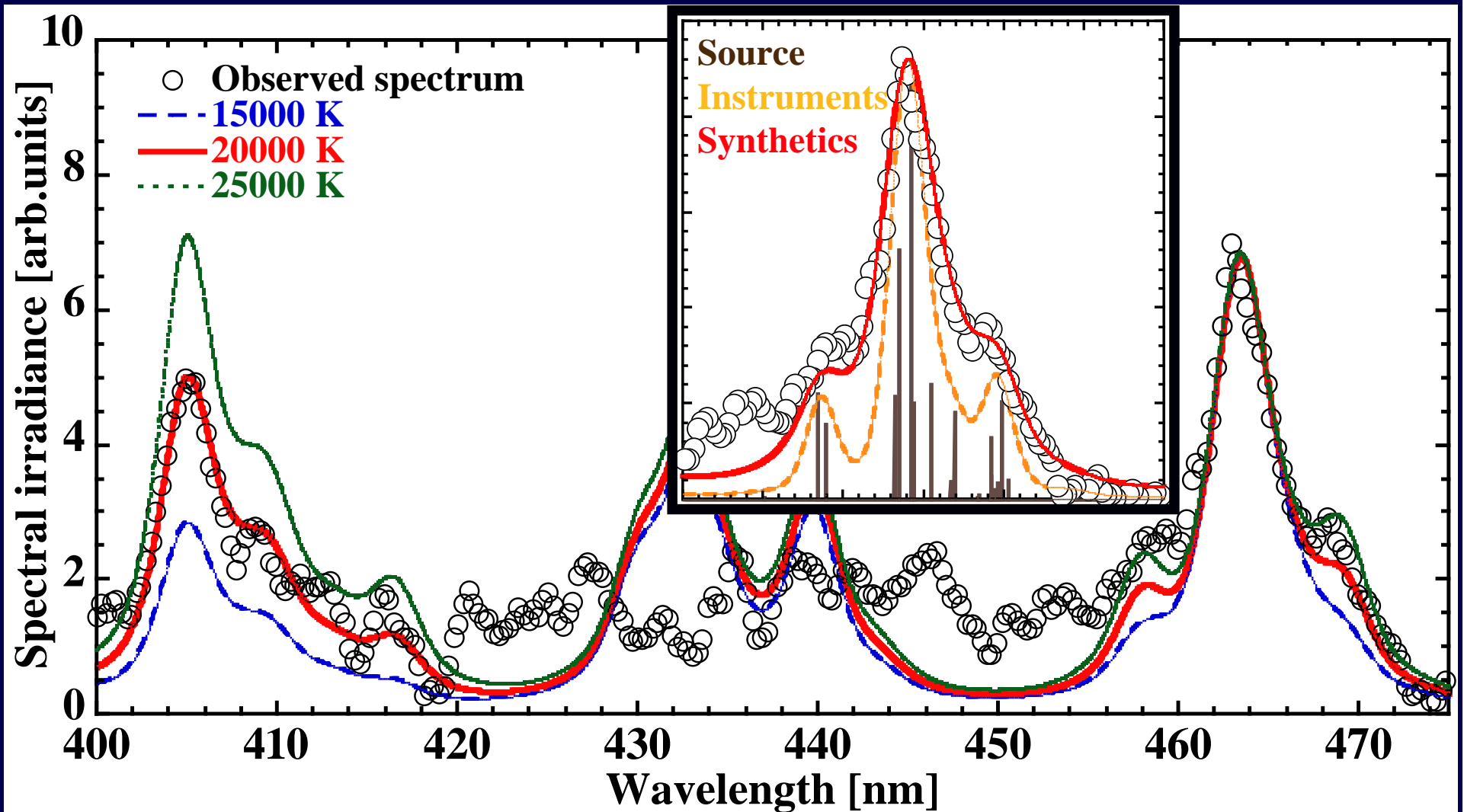
Planck関数fittingによる色温度計測



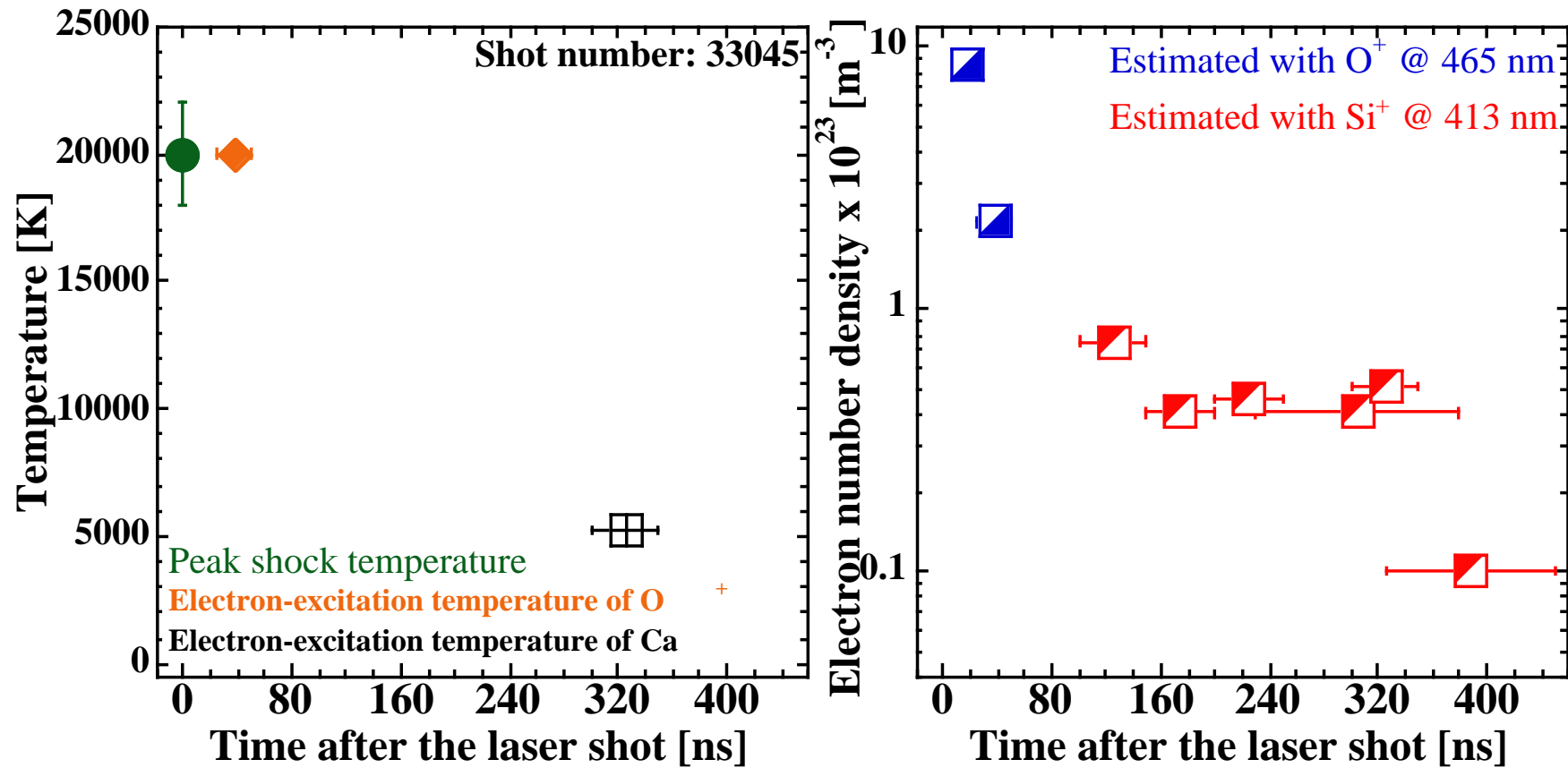
光量最大領域のスペクトルはPlanck関数とよく合う

珪酸塩蒸気温度, 電子数密度 (25-50 ns)

O⁺輝線のSpectral fitting (輝線強度比: 温度, 幅: 電子数密度)



珪酸塩蒸気中の温度, 電子密度進化



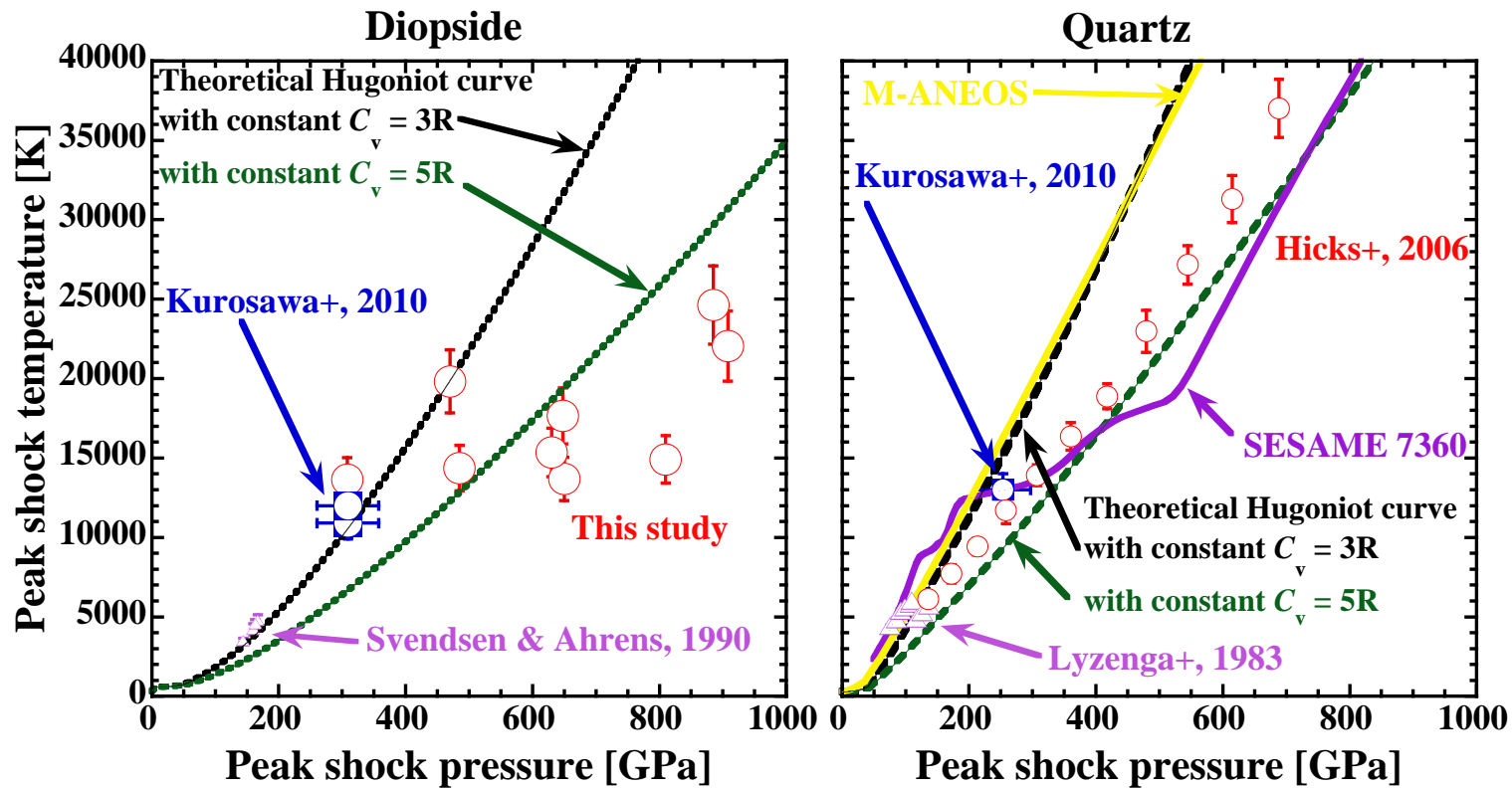
Stark parameters

O⁺: Griem, 1974; Si⁺: Lesage, 2009

珪酸塩の温度、電子数密度の時間進化が計測可能になった！

理論Hugoniot曲線との比較

Hugoniot data, Ahrens and Johnson, 1994を外挿



Entropy gain
が大幅増加

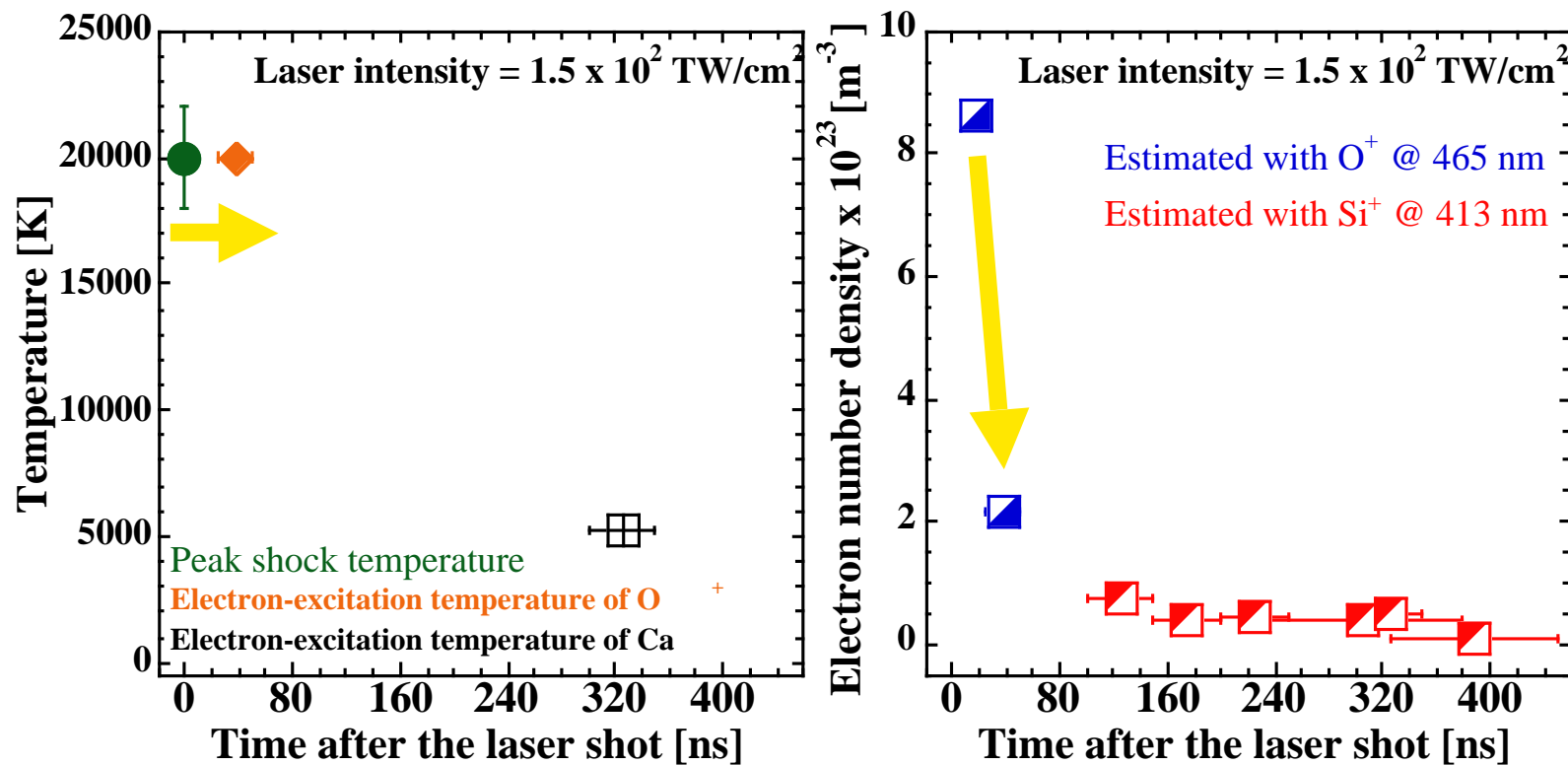
イオン輝線
No 分子

分光観測と
調和的

>500 GPaの C_v 上昇量が -> 構造破壊 [Hicks et al., 2006]
Qzよりも大きい可能性大 + イオン化に伴う吸熱?

月形成条件を変化, 衝突蒸気雲は酸化的(有機物合成は難しくなる)

珪酸塩蒸気中の温度, 電子密度進化



25-50 nsの温度
Hugoniot上温度と同程度

25-50 nsの電子密度
10-25 nsの電子密度の1/4

電子再結合に伴う発熱が衝撃圧縮珪酸塩の温度進化に影響
-> 衝突後の流体運動, 化学反応場に影響

実験からの月形成巨大衝突への示唆

電子が電離/電子再結合を介してエネルギー分配過程に重要な寄与

電離(吸熱): Entropy gain増大(蒸発率大)

月を作る最適衝突条件が変わる?

電子再結合(発熱): 珪酸塩蒸気の後期加速

放出物(凝縮相)の軌道要素を変える?

蒸発率の最適値

上限: ~0.7 [Genda & Abe, 2003;
Machida & Abe, 2004; Wada+, 2006]

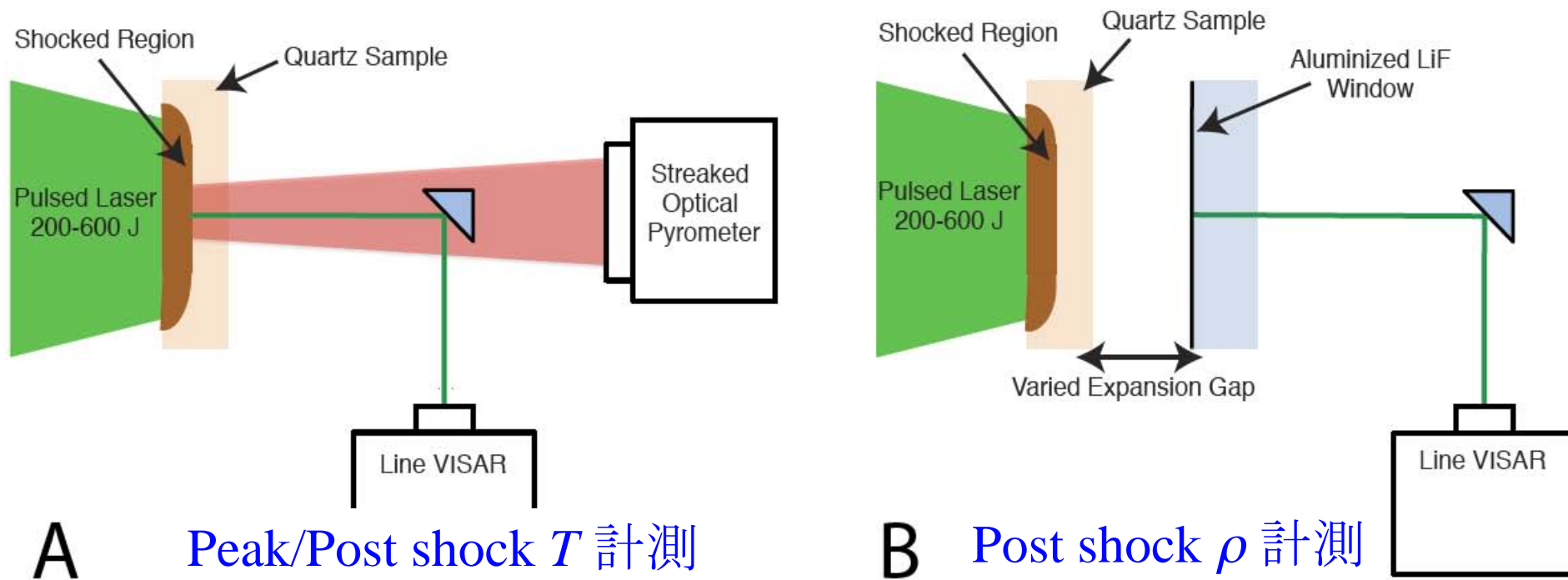
月材料の維持, 月成長の補助

下限: ?? [Pahlevan & Stevenson, 2007; Pahlevan+, 2010]

地球-月系の化学的特徴

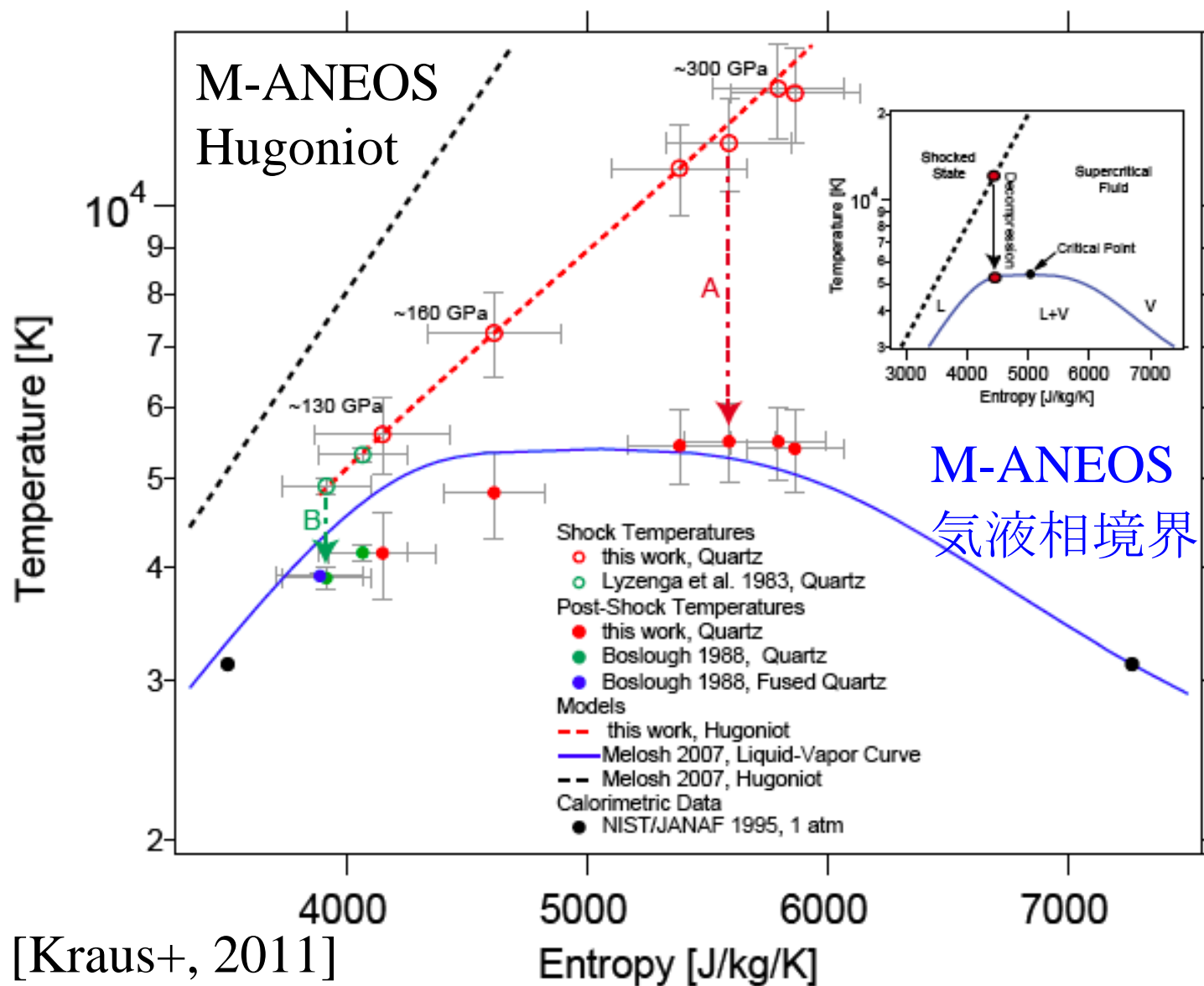
(酸素同位体一致, Mg#の違い)

Harvard groupのQz蒸発実験@LLNL



QuartzのPost shock状態の T & ρ 計測 [Kraus+, 2011]

T-S平面状の気液相境界



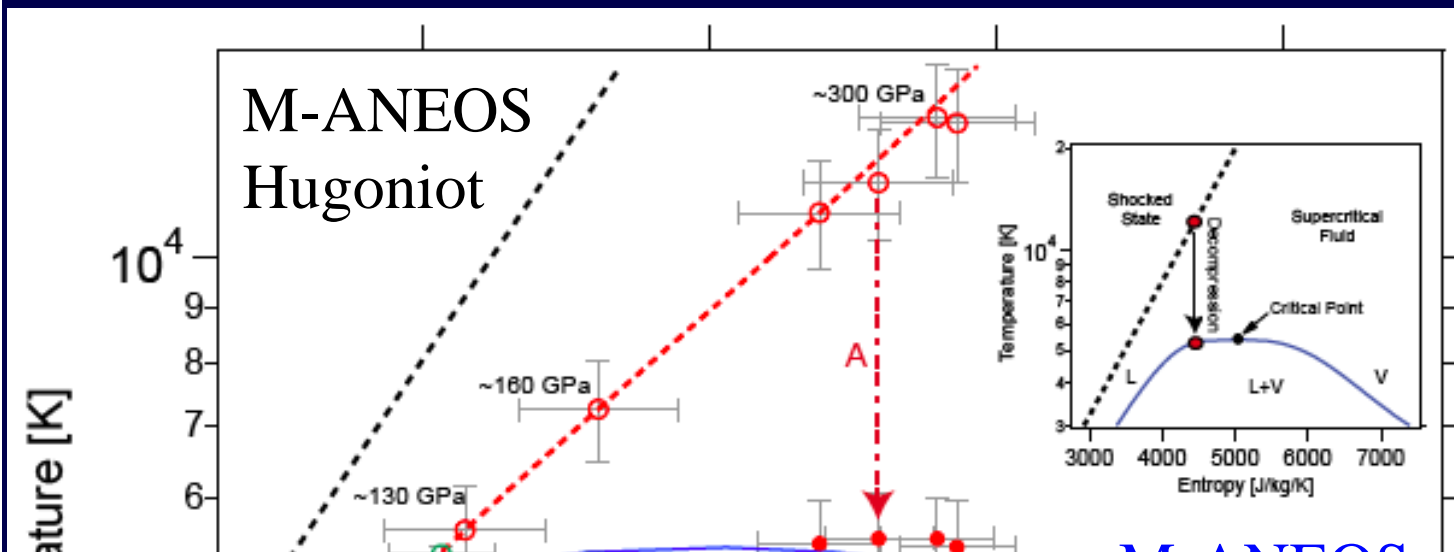
Qzの完全蒸発
1650 GPa
-> 665 GPa!

衝突後の蒸気量
~2倍(従来比)

M-ANEOSは
気液相境界は
よく再現

[Kraus+, 2011]

T-S平面状の気液相境界



Qzの完全蒸発
1650 GPa
-> 665 GPa!

衝突後の蒸気量
~2倍(従来比)

臨界点を超える気液相境界上の実験データを取得する手法を確立

今後の目標:

Fe, MgOの臨界点, 気液相境界の決定 with Sandia Z-machine
(Super Earthの内部構造の理解など...)

まとめ

衝突に伴う相変化:

幅広い分野(Astrobiology, 惑星形成論, 惑星探査/観測)に関わる問題

- ☆ 水氷EOSの見直し: 太陽系全域での衝突熔融
-> 氷天体衝突はより面白い! (新規研究テーマの発掘の好機)
- ☆ EKB領域での衝突による岩石核形成に関する共同研究を開始
- ☆ 高強度レーザーを用いた珪酸塩の衝突蒸発実験
従来用いられてきたEOS(M-ANEOSなど)は不十分
宇宙速度衝突時にはより多くの蒸気が発生し, 緩やかに膨張