

## サブミリ波高分散分光で迫る、ガス惑星大気微量成分の起源

飯野孝浩

名古屋大学 太陽地球環境研究所

January 6, 2014



- 1 ミリ波・サブミリ波でのガス惑星大気観測
- 2 代表的な観測成果
- 3 小天体衝突による大気組成汚染は普遍的？
- 4 新たな成層圏大気組成観測結果



## ミリ波・サブミリ波でのガス惑星大気観測



## ミリ波・サブミリ波でのガス惑星大気観測



**観測可能分子** CO, HCN, CS, H<sub>2</sub>S etc... 基本的には微量分子

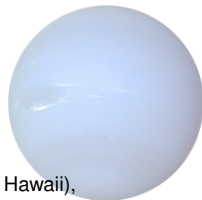
**観測領域** 対流圏～成層圏

**メリット** 高分散分光による高度分布、風速場の導出

**デメリット** 炭素鎖分子の励起がほとんどない

空間分解能が低い (ASTE345GHz で 22")

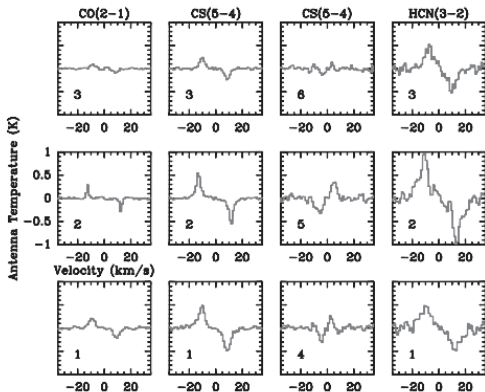
**代表的望遠鏡群** ALMA(Chile), ASTE(10m, Chile), APEX(12m, Chile),  
JCMT(15m, Hawaii), CSO(10.4m, Hawaii), SMA(干渉計, Hawaii),  
SMT(10m, Arizona), IRAM-30m(Spain)



## 代表的な観測成果



## SL9 衝突後のモニタリング (Moreno+ 2003)



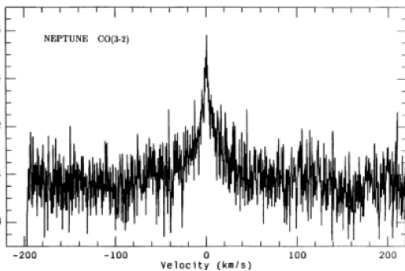
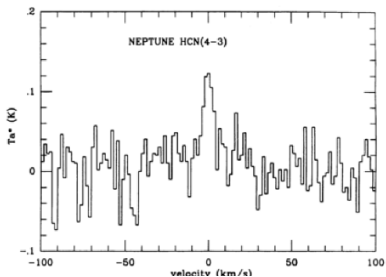
**概要** 1995-1999 まで、衝突由来分子の濃度、高度分布、水平分布をモニタリング

分子の存在高度： $p < 0.2 \text{ mbar}$  の上部成層圏

**観測分子** CO, HCN, CS, OCS,  $\text{H}^{13}\text{CN}$ ,  $\text{HC}^{15}\text{N}$ ,  $\text{C}^{34}\text{S}$

**測器** IRAM-30m, JCMT, CSO

## 海王星 CO, HCN の発見 (Marten+ 1993)



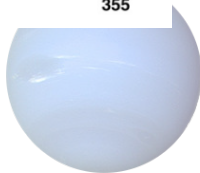
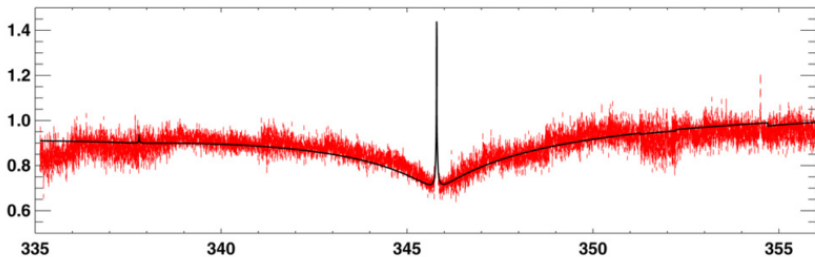
HCN  $p < 3\text{mbar}$  に偏在 Cold trap 上部に輸送されている  
衛星 Triton からの N-atom の流入？

CO 対流圏上部～成層圏にわたって 1ppm 存在  
木星の 100 倍、土星・天王星の 1000 倍  
内部由来とすると、内部の O/H は太陽系の 440 倍必要 (Lodders+, 1994)

CO の起源を明らかにするには 広帯域・高分散分光で対流圏～成層圏にわたる高度分布の取得が必要

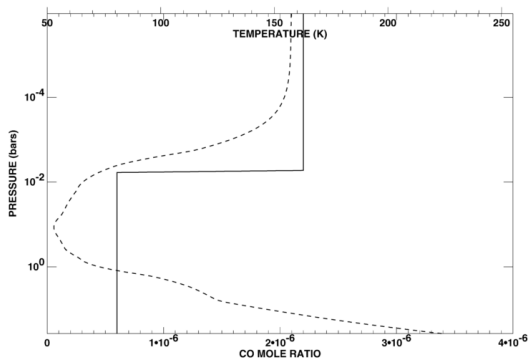


## 海王星 CO の広帯域・高分散分光 (Hesman+ 2007)





## 成層圏微量分子観測



- $p < 6 \text{ mbar}$  が CO-rich
- 100 年前の SL9 級の衝突で説明できる  
(理論予想では 5000 年に 1 回程度の衝突頻度)
- 内部・外部双方からの輸送が示唆

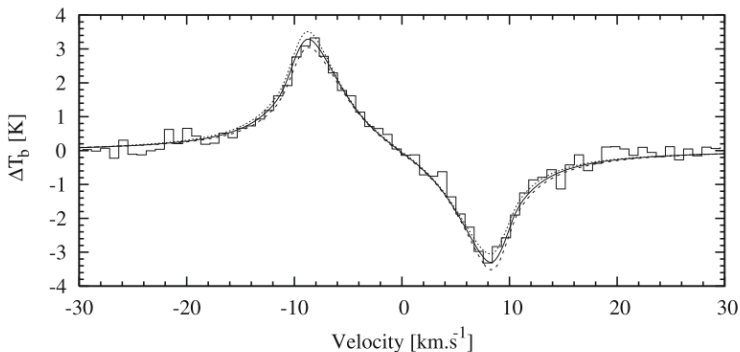


## 小天体衝突による大気組成汚染は普遍的？

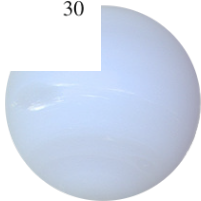
土星と天王星ではどうか？



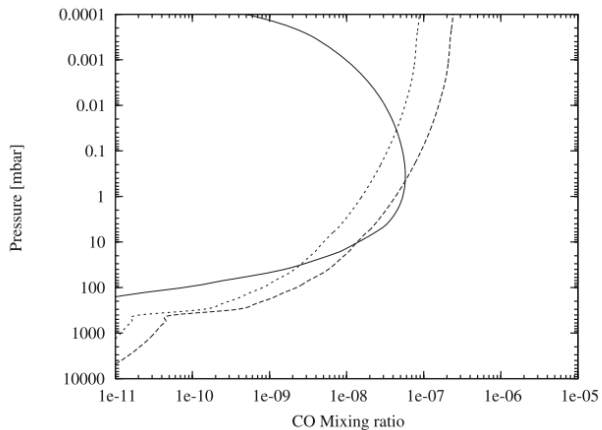
## 土星 CO も外部起源？ (Cavalie+ 2010)



観測 CO(J=6-7), JCMT  
1-10mbar にピークを持つ鉛直分布  
SL9 級の衝突で 100 年前？



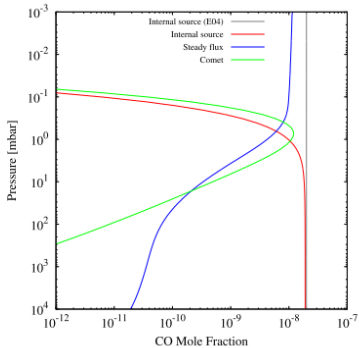
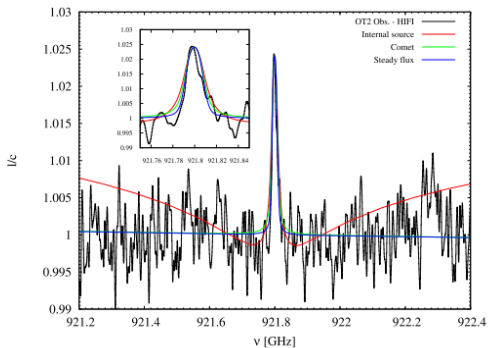
## 土星 CO も外部起源？ (Cavalie+ 2010)



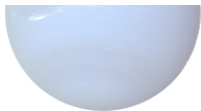
- 観測 CO(J=6-7), JCMT  
1-10mbar にピークを持つ  
SL9 級の衝突で 100 年前？



## 天王星 CO も外部起源？ (Cavalie+ 2013)



観測 CO(J=8-7), Herschel HIFI



## 成層圏大気組成観測のもたらすサイエンスと課題

微量分子観測から … 小天体分布の間接的取得

小天体中同位体比 ( $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ ,  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ) 勾配の取得

系外惑星大気進化の非平衡過程として組み込み可？(妄想)

問題点も CO 鉛直分布は正しいのか？

拡散速度係数の不定性大

衝突頻度が理論値より高すぎる？

スペクトル形状導出に必要な測器の安定性に疑問

というわけで 新たな微量分子観測が、新たな物理量導出としても、

そもそもの小天体衝突起源の検証としても重要!

観測のモチベーション



## 新たな成層圏大気組成観測結果



## 新たな海王星 & 木星微量分子観測

**海王星 15N/14N 取得** 15N/14N:形成時の温度を反映か (Jerome+ 2004)

太陽系 15N/14N : 天体間で大きな勾配を持つ

サンプルを増やしたい

海王星 HCN の起源 : 衛星 Triton or 彗星？

太陽系外縁部の貴重な 15N/14N サンプルになりうる

**海王星硫化物分子サーベイ** 大規模衝突で彗星核の大半はガス化

ガス中の元素組成比は小天体のそれを反映

たとえば : SL9 イベント時の [CS]/[CO] 比は太陽系の値と consistent

硫化物の検出は、CO 外部起源説を強力にサポートする！

(できれば同位体比も …)

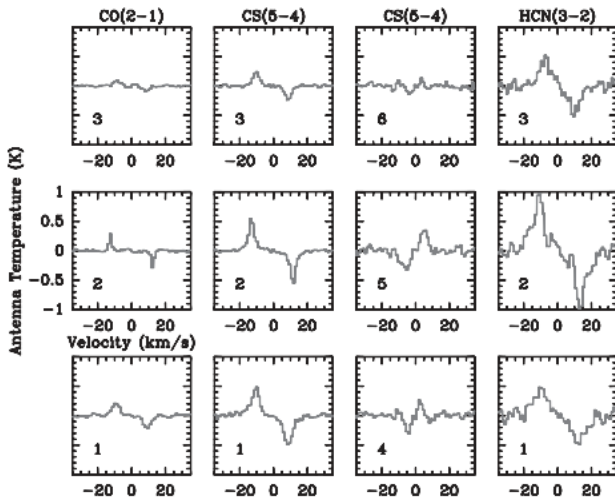
**木星硫化物も重要** 生成時期がわかっている

モニタリング観測で、ガス惑星大気中の硫化物の化学反応素過程を明らかにできる！

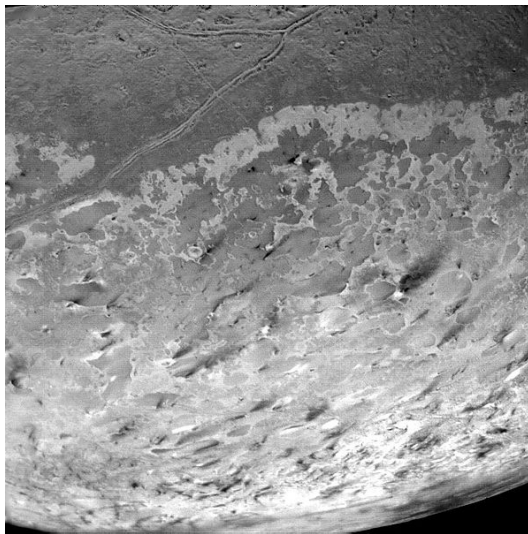




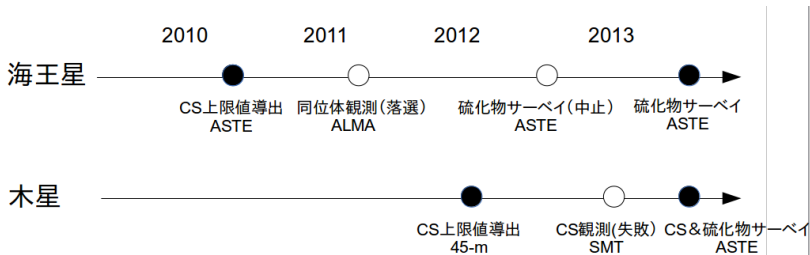
## SL9 イベント後の硫化物分子



## Triton の氷火山



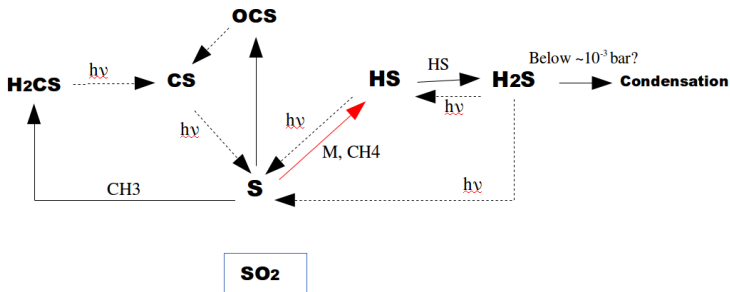
## これまでの観測



ここでは海王星硫化物サーベイの結果を紹介



## 海王星硫化物観測



**目的** 硫化物の検出/非検出から、海王星への小天体衝突の有無や時期を制約

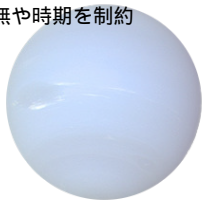
**対象分子** CS:SL9 後に dominant

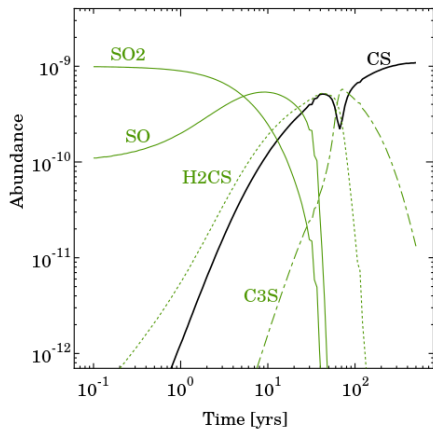
SO<sub>2</sub>:O-rich な彗星組成で産生?(Zahnle, 1996)

OCS:SL9 イベントで一時的に検出 (Lellouch+ 1996)

H<sub>2</sub>CS:CH<sub>3</sub> + S で産生

H<sub>2</sub>S:H-rich な環境では自然な帰結？

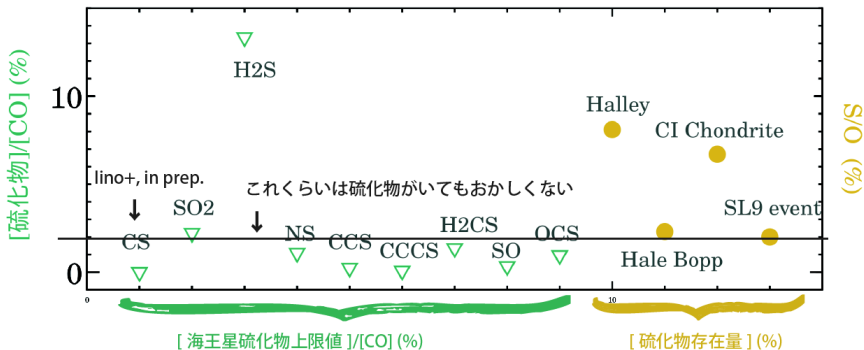




## ASTE 望遠鏡



## 海王星硫化物サーベイまとめ (Preliminary)



結果 H<sub>2</sub>S 以外の対 CO 存在比は 1% 以下

## Discussion

### 硫化物の不検出は何を意味するのか？

解釈 CO 小天体起源説の棄却？

Deposition の可能性 (後述)

他のリザーバー？  $\text{H}_2\text{S}$ ?  $\text{S}_2$ ?  $\text{S}_8$ ?

詳細な化学計算が必要

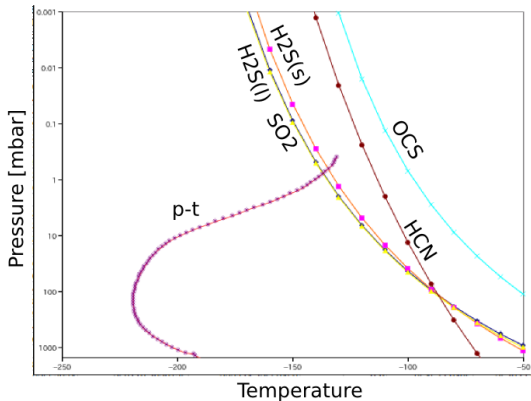
S/O 比が低い天体が選択的に流入？

少なくとも… CO 小天体起源説に新たな課題を投げかけた？





## 硫化物は気相で存在できるのか？



- 液相-気相の Antoine 式定数は NIST にだいたい揃う
- 成層圏ではだいたい気相で存在できそう
- ただし、固相-気相は H<sub>2</sub>S 以外分らない…



## 木星 CS モニタリング

- CS 存在量の低下がとらえられた
- 存在量の見積りに難あり（リムの輻射輸送）
- ただし、SO<sub>2</sub> や OCS は不検出



## 今後の課題・まとめ

**海王星** 硫化物の不在をいかに説明するか。。

ALMA, Subaru 等による追観測

化学シミュレーション

**木星** CS, HCN, CO の時間変化の導出

とくに CS を中心とした化学反応過程をおさえる



ありがとうございました。

