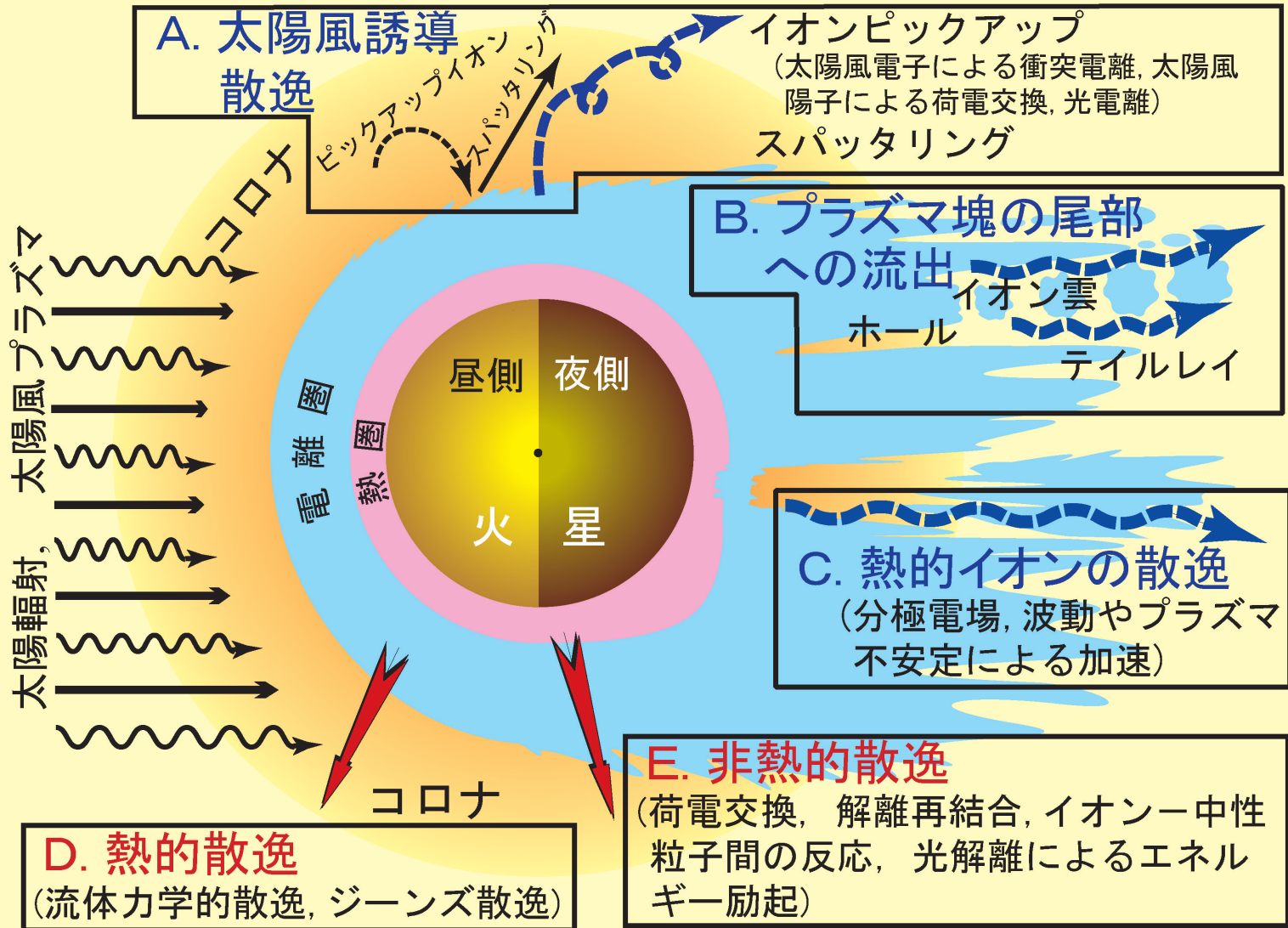


CPS研究会 「火星研究の現状と将来展望」

大気散逸の測定方法の概要と 今後の発展性

阿部琢美 (JAXA宇宙科学研究所)

多様な大気散逸プロセス



荷電粒子散逸に関係した過程と測定項目

大気散逸過程	必要な測定項目	観測の要点
太陽風誘導散逸 (イオンピックアップ)	各イオンの3次元速度分布関数、 太陽風、磁場	速度分布空間での トーラス
低エネルギーイオンの尾部への加速 (cloud, patch, streamer)	各イオンの速度・密度、 磁場、電場	発生確率の把握、 全散逸量の推定
波動-粒子相互作用やプラズマ不安定によるエネルギー励起	各イオンの3次元速度分布関数、 プラズマ密度イレギュラリティ、 プラズマ波動、磁場、電場	イオン加速の因果 関係の解明
磁気再結合による加速	各イオンの3次元速度分布、 磁場、電場	イオン加速の因果 関係の同定
分極電場による加速	熱的・超熱的イオンの速度と密度、 磁場	低速・高密度成分 の高精度観測

観測に必要なイオン種: C,N,Oを含むイオン種
必要な観測エネルギー帯は1eV~数keV

実際にはこれらの加速は混合して観測されることが予想される。

中性粒子散逸に関係した過程と測定項目

大気散逸過程	必要な測定項目	観測の要点
熱的散逸	熱的中性粒子の温度と密度	現在は少量？
非熱的散逸 (荷電交換、解離再結合等の光化学反応による励起)	H, O等の非熱的粒子とコロナの空間分布(紫外光・極端紫外光により観測)	過程の決定 観測点とソース領域の関係をどう推定するか
スパッタリング、ノックオン	高速中性粒子 水素・酸素コロナ(極端紫外光により観測)	観測点とソース領域の関係をどう推定するか

観測の必要な粒子種: C,N,Oを含む中性大気種
観測の必要なエネルギー帯は $<1\text{eV} \sim \text{数}10\text{ eV}$

火星の大気進化・変遷を議論するために

1. 個々の中性・電離大気（特にC、O、Nに係わる）粒子種について、フラックスを求めることが必要
⇒ 高い質量分解能をもつイオン質量分析器が必要
2. 火星大気からの全散逸量を求めるために全球的な撮像観測が必要
⇒ 大気の2次元撮像が可能なイメージャが必要
3. 太陽活動に対する応答を理解するため、大気散逸量のその場観測と太陽放射量・太陽風との同時観測が必要
⇒ 太陽活動モニタ衛星とその場観測衛星が必要

高質量分解能のイオン質量分析器の開発

- ◆ 二酸化炭素と水の散逸量を区別出来るよう、また多様な散逸機構を分離・同定出来るようC, N, Oに係わる粒子種を全て分離する高質量分解能観測が必須
(例: CO^+ (質量数は27.995)と N_2^+ (28.006)の分離)

測定器に要求される性能:

C, N, Oを含む全成分を分離し、水と二酸化炭素の各総散逸率(及びその太陽風・太陽放射変動への応答)を明らかに出来る事

優位性:

従来のミッションで弁別できなかった成分まで分離し、気候変動の議論に重要な温室効果ガスと水の散逸量を推定可能とする事

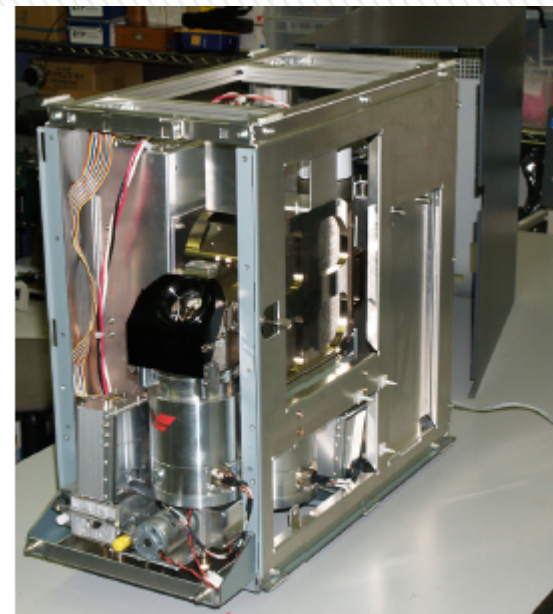
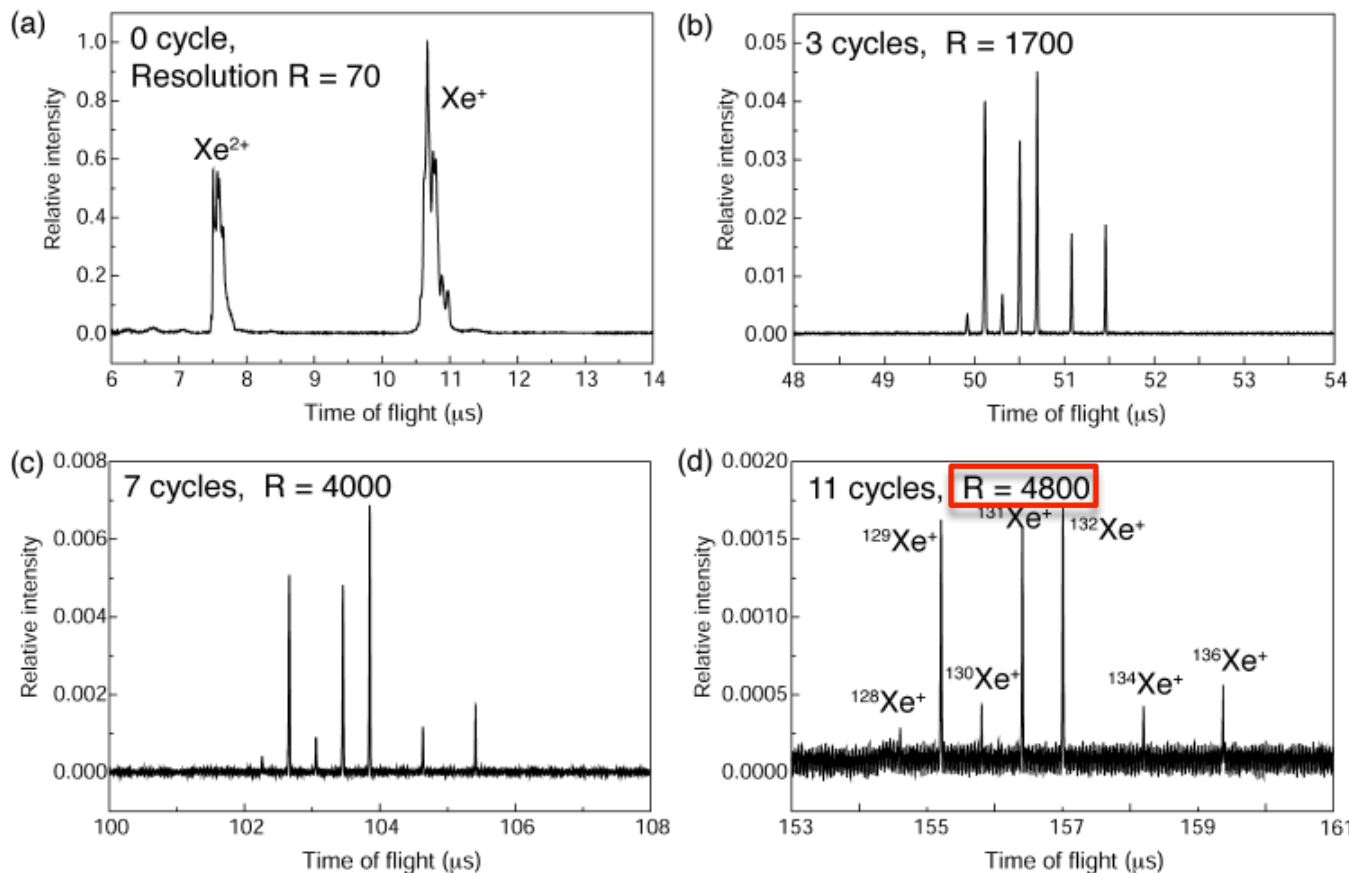


Figure 7. A photograph of the miniature multi-turn ToF mass spectrometer "MULTUM-S II".

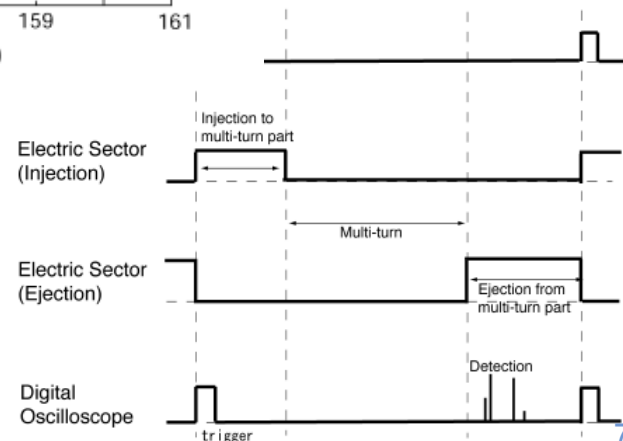
Toyoda, 2010

大阪大学で開発中の質量分析器取得データ



Ichihara et al., 2007

CO⁺とN₂⁺(質量数は共に28)の分別に必要な質量分解能目標3000以上は既に達成されている。



開発予定の熱的イオン質量分析器(IMS)

測定原理

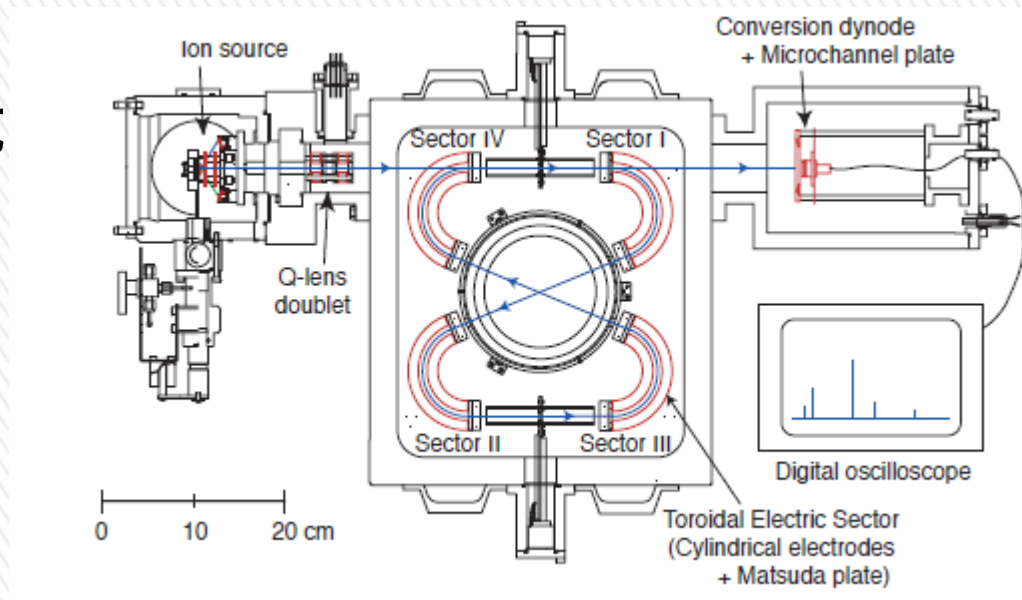
TOF型、マルチターン方式

MULTUM-S II

Optics 20 x 20 cm

50 x 30 x 60 cm

35 kg (真空ポンプを含む)



性能

Energy: $<1\text{eV}$, $M/\Delta M \sim 4,800(11\text{cycles}) \sim 30,000$

Transmission 5%(2cycles), 97%/cycle

大阪大学、豊田研究室と共同開発予定

2011 Opticsの製作及び極低エネルギーイオンビームを使った性能試験

MULTUM-S IIを基に、Opticsの製作を検討

11月頃までに製作、12月から性能試験

2012 スタート用パルス電源を宇宙用に開発

2013 開発したOpticsとパルス電源による性能評価

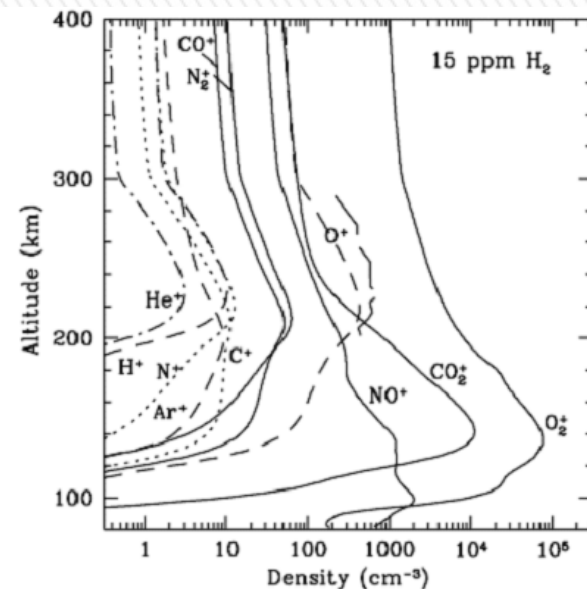
火星の大気進化・変遷を議論するために

1. 個々の中性・電離大気の特(C、O、Nに係る)粒子種について、フラックスを求めることが必要
⇒高い質量分解能をもつイオン質量分析器が必要
2. 火星大気からの全散逸量を求めるために全球的な撮像観測が必要
⇒大気の撮像が可能イメージャが必要
3. 太陽活動に対する応答を理解するため、大気散逸量のその場観測と太陽放射量・太陽風との同時観測が必要
⇒太陽活動モニタ衛星とその場観測衛星が必要

散逸大気撮像イメージャと主なターゲット

・イオノポーズ(電離圏と太陽風の境界領域)のクローズアップ観測

- O_2^+ , CO_2^+ 発光
- 波状構造(振幅、波長)と移動速度の観測

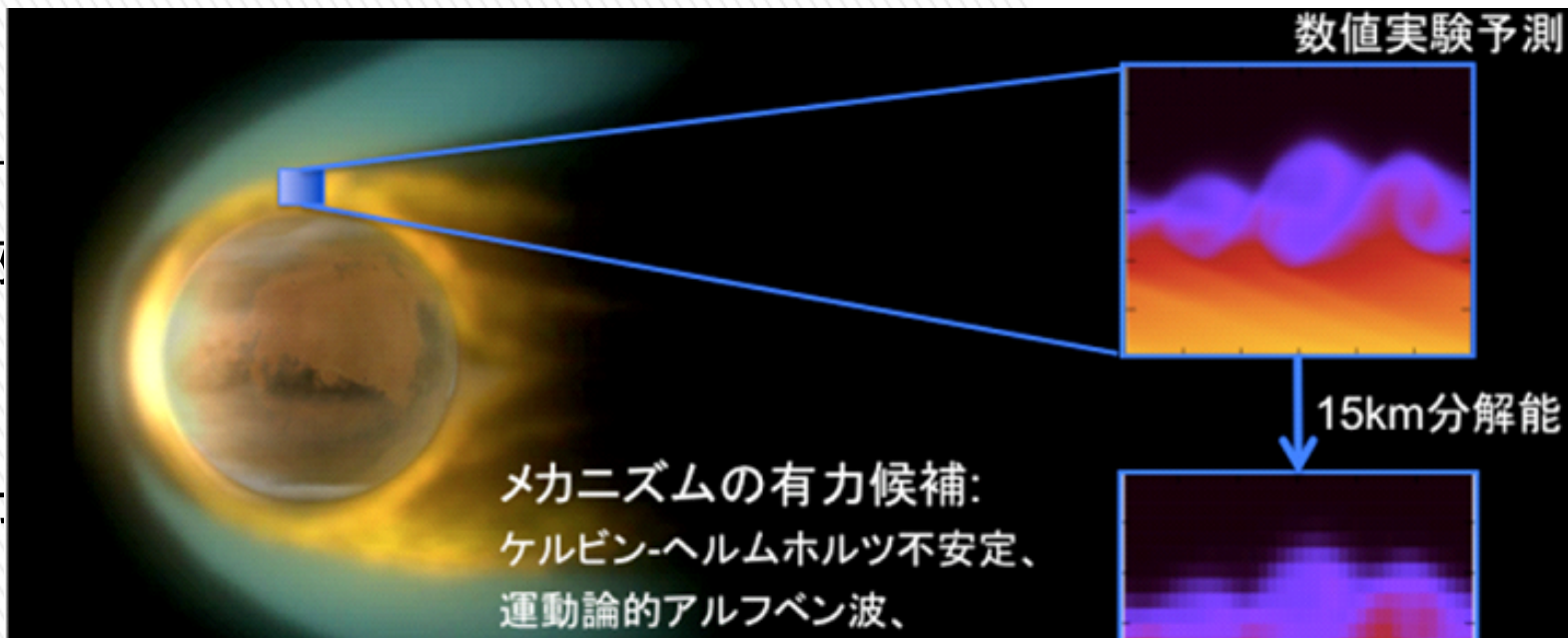


・電離

- O_2^+
- 太陽

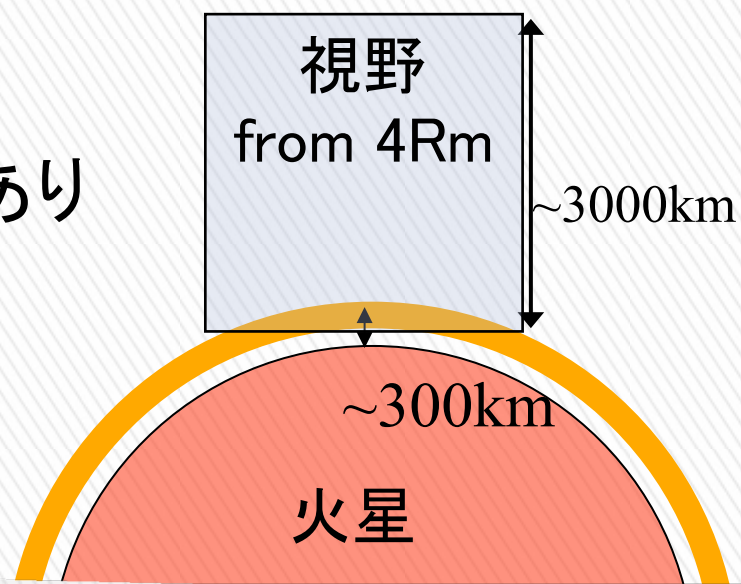
・夜側

- 分

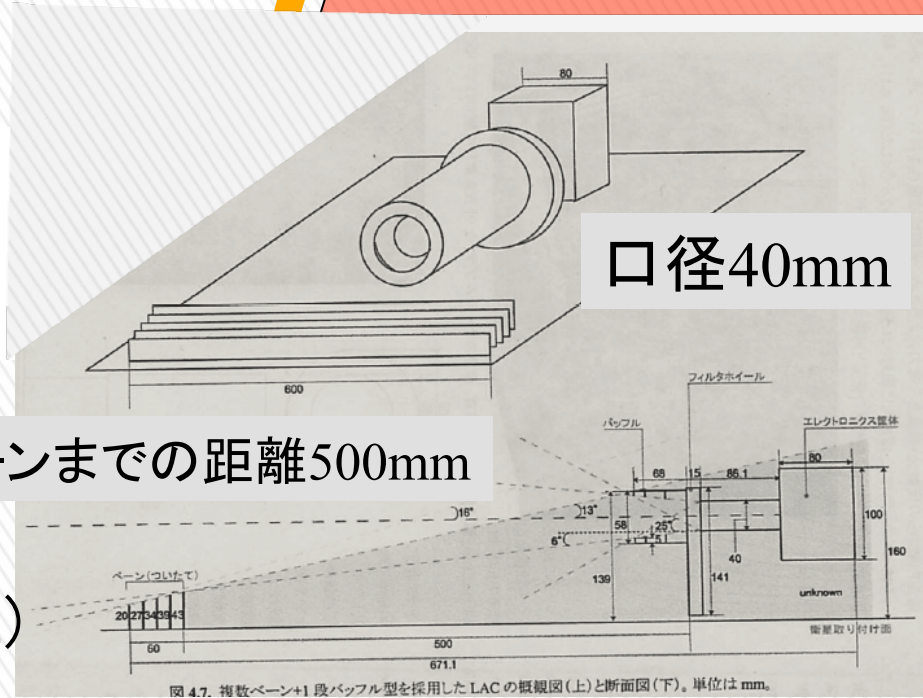


ターゲット-1 イオノポーズのクローズアップ観測

- O_2^+ の発光は微弱
減衰率 3×10^{-7} を達成する必要あり
- ⇒ コロナグラフでは達成不可
ベーン方式迷光対策必須
高い姿勢制御要求($\sim 0.015^\circ$)



ベーンを用いた迷光対策例
観測波長: 約500nm
(O_2^+ の波長は561nm)



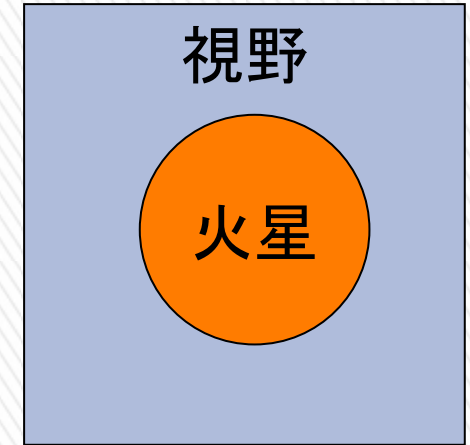
ベーンまでの距離500mm

(吉田, 2002)

図 4.7. 複数ベーン+1 段パプリル型を採用した LAC の概観図(上)と断面図(下)。単位は mm。

ターゲット-2 全体像観測

火星本体を含め電離圏全体像
撮像には O_2^+ の2次元撮像が最適



SELENE/UPIとの比較から設計すると

	地球	火星	
明るさ	0.3R	0.1R	3倍
角度	0.5 deg.	0.3 deg.	2.8倍
時間	30min	60min	1/1.4倍

有効面積 48.6cm^2 (φ12cm鏡) \rightarrow $\sim 292\text{cm}^2$ 必要 (φ30cm級鏡)

注意点:
他波長(H Ly-β)
のコンタミは避け
られない

火星の大気進化・変遷を議論するために

1. 個々の中性・電離大気の特(C、O、Nに係る)粒子種について、フラックスを求めることが必要
⇒高い質量分解能をもつイオン質量分析器が必要
2. 火星大気からの全散逸量を求めるために全球的な撮像観測が必要
⇒大気の撮像が可能イメージャが必要
3. 太陽活動に対する応答を理解するため、大気散逸量のその場観測と太陽放射量・太陽風との同時観測が必要
⇒太陽活動モニタ衛星とその場観測衛星が必要

太陽活動度と大気散逸の同時観測に必要なミッション構成

衛星A
(大気散逸をその場で観測)

- 全体像を撮像しながら、その場観測で散逸機構を解明する軌道設計
- 太陽風・太陽放射と大気散逸機構を2機で同時に観測し応答を把握

2衛星の軌道面を互いに直交化

衛星B
(大気散逸撮像と太陽風・太陽放射量を観測)

長期の大気散逸量を議論するために — 太陽活動度変化に対する散逸量応答の理解 —

現在の太陽活動度変動

- EUV放射強度: 太陽活動周期により平均的には3倍程度変化。太陽フレア時にはさらに大きく変動。
- 太陽風流束: CME(コロナ質量放出)やCIR(共回転相互作用領域)到来時に1桁以上変化。

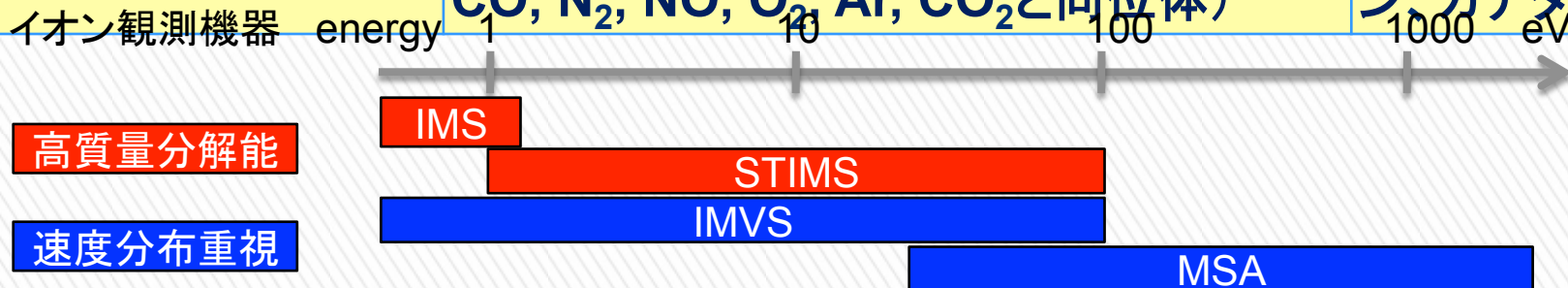
過去の太陽活動度に関する推測

- EUV放射強度: 35億年前に現在の約6倍、40億年前に約10倍強かったと推測されている [Ribas et al., 2005]。
- 太陽風流束: 40億年前に約20-50倍強かったと推測されている [Lammer et al., 2003]。

⇒ 太陽フレア、CME、CIR等の太陽活動現象毎の散逸に対する影響を明らかにする事で、火星が劇的な気候変動を経験した時代(35-40億年前)まで遡って、大気散逸および大気進化の歴史を推定可能。

衛星Aへの搭載科学観測機器候補(1/2)

機器名称	観測対象	実績等
熱的イオン質量分析器(IMS)	電離圏イオンC,N,Oの分離(C,N,O,N ₂ , CO,NO,O ₂ ,CO ₂ , Energy: 0.3eV-数eV)	MULTUM-S II (阪大)をベース
超熱的イオン質量分析器(STIMS)	流出イオンC,N,Oの分離(C,N,O,N ₂ &CO, NO,O ₂ ,CO ₂)、Energy: 1eV-100eV)	
熱的イオン質量・速度分布測定器(IMVS)	電離圏イオン速度分布(0.01eV-100eV)	E-POP
低エネルギーイオン観測器(MSA)	流出イオンC,N,Oの分離(C,N,O,N ₂ &CO,NO,O ₂ ,CO ₂ 、~40keV)	MMO MPPE-MSA
中性ガス質量分析器	超高層の中性大気の高質量分解観測(測定検討項目:H, H ₂ , He, C, N, O, Ne, CO, N ₂ , NO, O ₂ , Ar, CO ₂ と同位体)	海外と協力(フランス、ベルン、カナダ)



衛星Aへの搭載科学観測機器候補(2/2)

機器名称	観測対象／目的	実績等
Langmuir Probe	電子温度、電子密度測定	EXOS-D/TED
低エネルギー電子計測器	加速電子等	MMO、MMS、SCOPE
磁場計測器	電磁圏境界層観測、地殻起源磁場の詳細観測	MMO/MGF他
電場、プラズマ波動計測器	波動による粒子加速、上部電離圏加熱、静電加速、静電加速	MMO/PWI他 「のぞみ」「かぐや」 (サウンダー)
ポテンシャルコントロール	低エネルギーイオンの観測を可能にする	ヨーロッパ製 field emission (Geotail、Cluster)

衛星Bへの搭載科学観測機器候補

機器名称	観測対象	実績等
流出大気撮像カメラ	流出する大気・プラズマの全体像の撮像 (EUV: O ⁺ , N ⁺ , C ⁺ , H, O; UV: C, CO, CO ⁺ , CO ₂ ⁺ ; VIS: O ₂ ⁺)	「のぞみ」XUV 「かぐや」UPI/TEX
水素/重水素吸収セルイメジャー	流出する大気の大/H比測定	「のぞみ」UVS
太陽風モニター	太陽風フラックス(速度、密度) 惑星間空間磁場	従来型と同程度
太陽放射モニター	EUV/UV領域での太陽放射	

火星電離圏・外気圏からの大気散逸 粒子の観測

鍵となる観測

- 低エネルギーイオン(<10eV程度)をどうやって正確に測るか
⇒探査機のポテンシャルコントロールを予定
- 大気撮像観測
- 火星表面から離れた遠方では、複数の過程により加速されたイオンが観測される事が予想される。これらを個々の加速過程にどのように結びつけるか

まとめ

1. 火星からの大気散逸観測のため、熱的エネルギーから太陽風エネルギーまでをカバーし、高質量分解能を有する測定器群を用いることが必要。
2. 同時に全球的な散逸量分布を観測するため、電離圏から流出するイオンを観測する2次元イメージャが必要
3. 長期的な大気散逸量の議論に必要な太陽活動変動に対する応答を理解するために、その場観測オービターと太陽活動モニター衛星の2機構成で観測することが望ましい。

各機器の課題と解決の計画

機器名	課題	計画
流出大気撮像カメラ	迷光除去	2011年度に試作
紫外光吸光セル	「のぞみ」技術の継承と発展	2010年度WG予算でセル試作。2011年度以降も試作および試験
STIMS	ゲート電極用高速高圧電源開発・レンズ系開発	2010年度WG予算で検討開始。2011年度以降も試作および試験
IMVS	イオン分析器としての検討と試作	試作および試験
IMS	性能の検証と開発要素の洗い出し	既存モデルによる性能評価
中性質量分析器	低密度観測の実現性検討	外国との協力の検討 国内開発の可能性の検討

観測機器への要求

成分	波長 (nm)	強度 (kR/1.5nm)	収差考慮した 角度分解能	開発必要品
O+	83.4nm	0.1m	0.1	球面検出器
N+	(53.3nm)			
C+	(90.3nm)			
H	121.6nm	2.5	0.05	MgF2の光学系
O	130.3nm	0.6	0.05	MgF2の光学系
	135.6nm	0.6	0.05	MgF2の光学系
	297.2nm	2.0	0.02	フード / コロナグラフ
C	156.1nm	0.5?	0.02	MgF2の光学系
CO	190-270nm	2.5~5.8	0.02	フード / コロナグラフ
	128-180nm	~0.3	0.02	MgF2の光学系
CO+	210-270nm?	?	0.02	フード / コロナグラフ
CO2+	289nm	0.8	0.02	フード / コロナグラフ
O2+	561nm	0.06	0.01	フード / コロナグラフ

観測項目と要求精度

例： 成功基準II-1
電離圏イオン流出

観測項目と要求精度

低エネルギー流出イオン

- 組成: 6の質量グループに分離 (H^+ , H_2^+ - He^{++} , He^+ , C^+ , N^+ - O^+ , CO^+ - O_2^+ , CO_2^+)
- 密度域: 10^0 - 10^5 /cc
- エネルギー帯域: 0.3-100eV-数keV (速度分布関数あり)
- 角度分解能: 22.5度以下
- 時間分解能: 4-20秒以下
- ポテンシャルコントロール要
- 観測領域: イオノポーズ付近、電離圏、近尾部

イオノポーズ付近での電離大気の空間構造

- 空間分解能: 20km以下
- 時間分解能: 40秒以下

磁場

- 絶対値の精度: 1nT以下
- 角度決定精度: 3度以下
- 時間分解能: 1秒以下

シース(太陽風プラズマ):

- 密度 10^0 - 10^1 /cc (主に H^+)
- 速度 数10-数100km/s
- 温度 ~ 100 eV-数keV

混合層:

- 密度 10^1 - 10^3 /cc
- 速度 数-数10km/s
- 温度 ~ 0.3 -100eV
- 空間スケール 20-1000km

上部電離圏:

- 密度 10^3 - 10^4 /cc (主に O_2^+ , O^+)
- 速度 数-10km/s
- 温度 ~ 0.3 eV



観測項目と要求精度

例： 成功基準II-1
電離圏イオン流出

観測項目と要求精度

低エネルギー流出イオン

- 組成: 6の質量グループに分離 (H^+ , H_2^+ - He^{++} , He^+ , C^+ , N^+ - O^+ , CO^+ - O_2^+ , CO_2^+)
- 密度域: 10^0 - $10^5/cc$
- エネルギー帯域: 0.3-100eV-数keV(速度分布関数あり)
- 角度分解能: 22.5度以下
- 時間分解能: 4-20秒以下
- ポテンシャルコントロール要
- 観測領域: イオノポーズ付近、電離圏、近尾部

イオノポーズ付近での電離大気の空間構造

- 空間分解能: 20km以下
- 時間分解能: 40秒以下

磁場

- 絶対値の精度: 1nT以下
- 角度決定精度: 3度以下
- 時間分解能: 1秒以下

観測器

IMVS

- 質量分解能: TBD(低)
- 時間分解能: 16秒
- 密度域: 10^2 - $10^4/cc$
- エネルギー帯域: 0.01-数eV

STIMS

- 質量分解能: TBD(高)
- 時間分解能: 16秒
- 密度域: 10^1 - $10^3/cc$
- エネルギー帯域: 1-100eV

MSA

- 質量分解能: 40
- 時間分解能: 4秒
- エネルギー帯域: 1eV-40keV

ポテンシャルコントロール

LP(or インピーダンスプローブ)

- 電子密度と温度
- 密度域: $>10^3/cc$

EUV/UV撮像器

サウンダ・プラズマ波動計測器

磁場(DC)計測器

