Observations of aurorae by SPICAM ultraviolet spectrograph on board Mars Express: Simultaneous ASPERA-3 and MARSIS measurements

***Leblanc et al.* [2008, *J. Geophys. Res.*]**

名古屋大学　太陽地球環境研究所
D1　　原　拓也

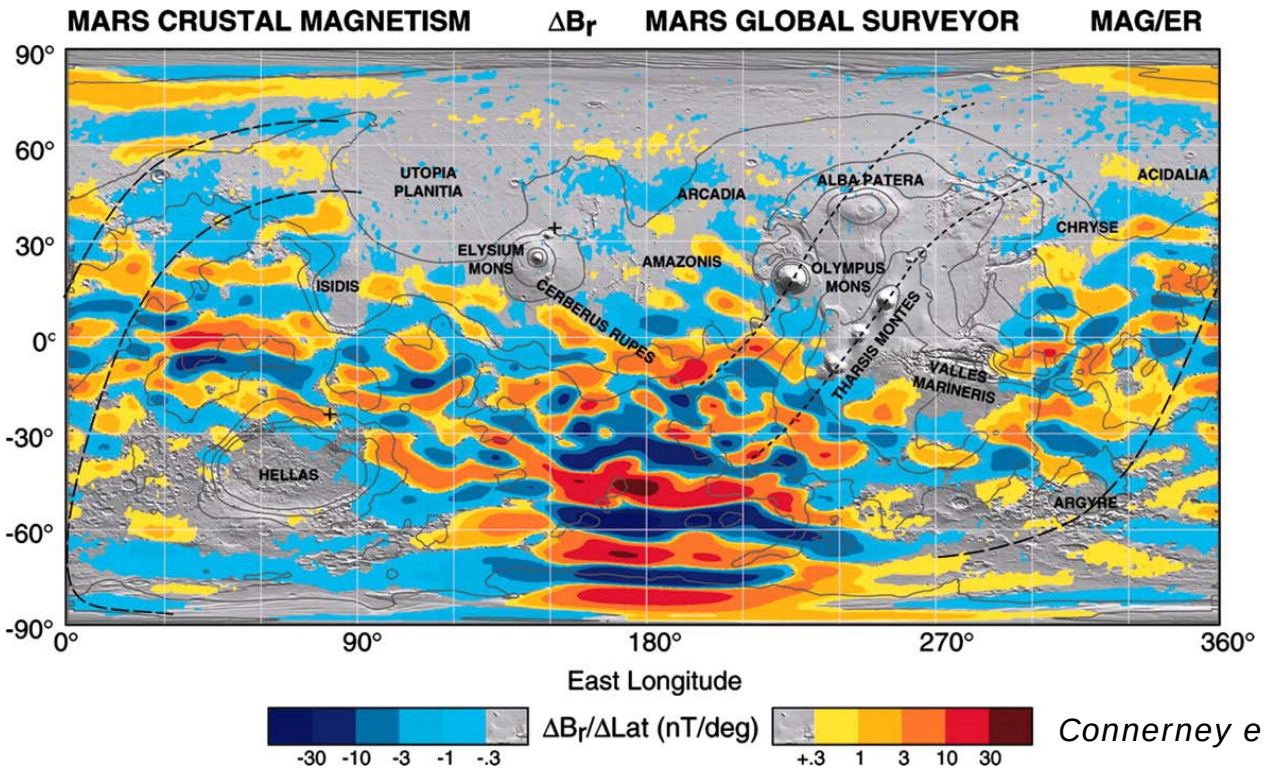
要旨

Mars Express (MEX)衛星に搭載されたSPICAM, ASPERA-3, MARSIS, 及びMars Global Surveyor (MGS)衛星に搭載されたMAG/ERの複数衛星・複数観測器のデータに基づいて火星オーロラに関するイベント解析を行った.

Introduction: 火星の磁気異常帯

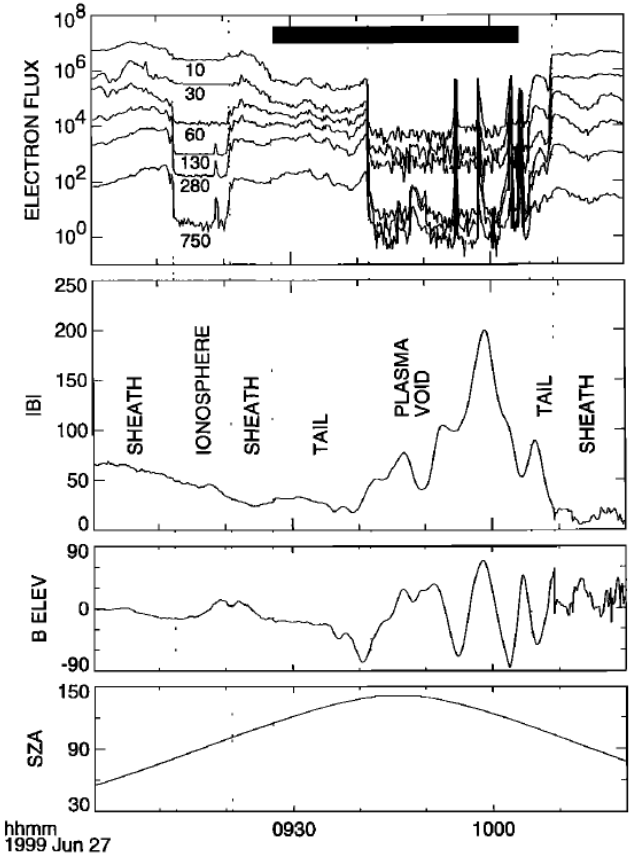
- 南半球の一部の領域に，バンド状をした地殻起源磁場が存在していることがMGS衛星によって発見された [e.g., *Acuna et al.*, 1998].
- 磁場強度は上空400kmで約100nT. 地表では1000nTを超える(c.f. 地球地表: $O(10^4)$，IMF: $O(1)$~$O(10)$ nT).

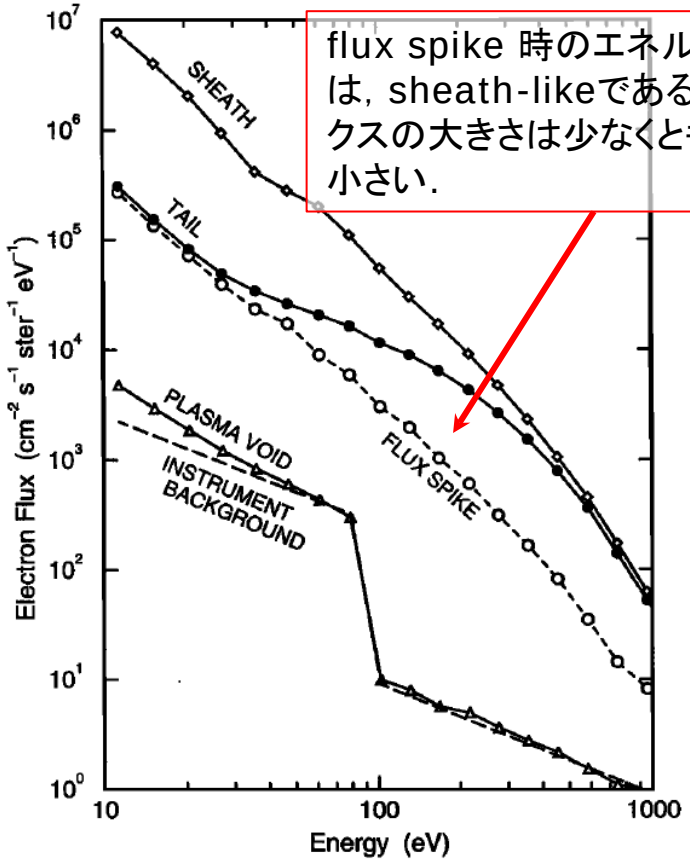
火星プラズマ環境，大気流出にlocal/globalな影響を与える可能性がある.



Connerney et al., [2005]

先行研究: *Mitchell et al.*, [2001] electron's flux spikes



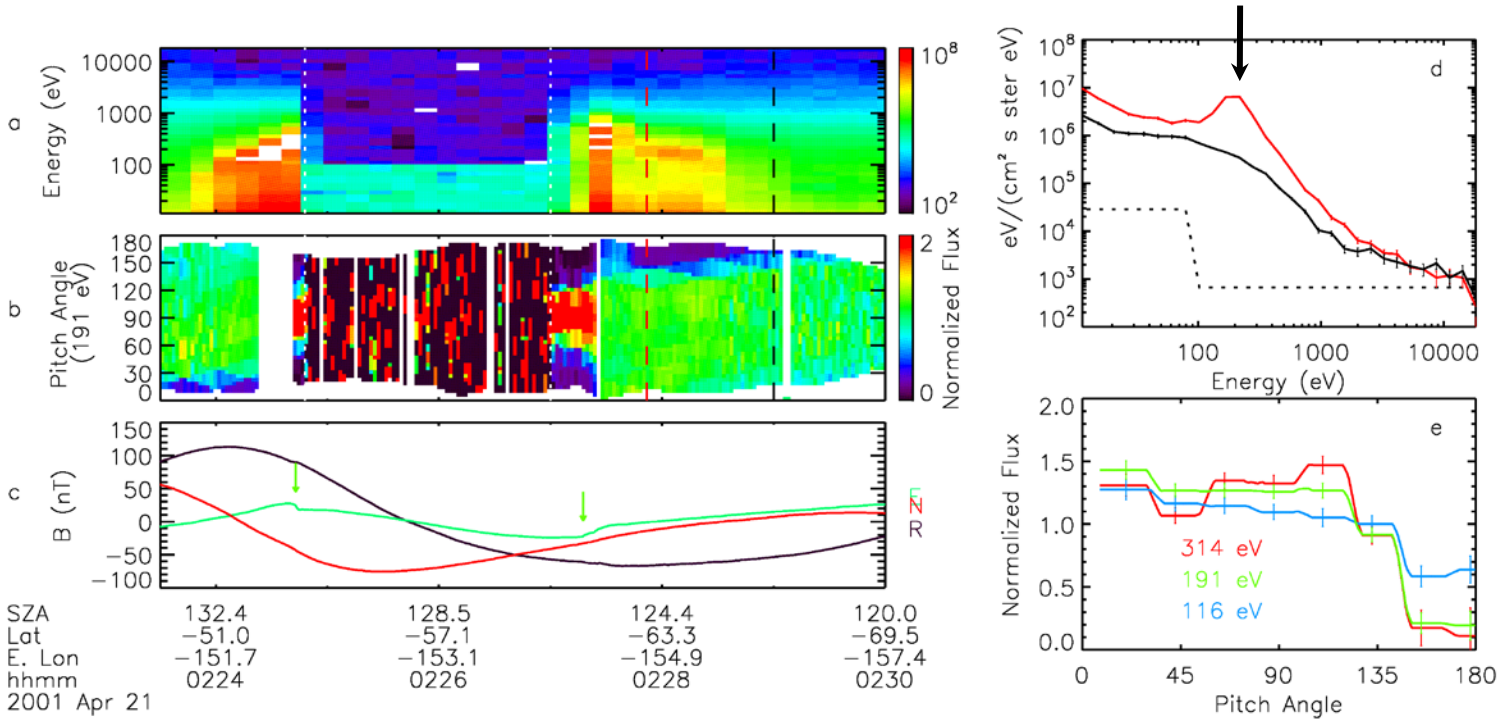


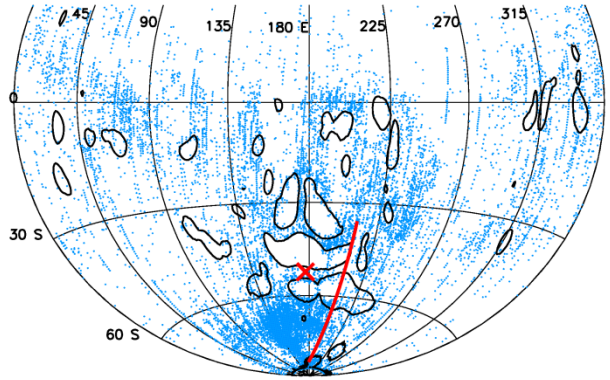
flux spike 時のエネルギー分布は, sheath-likeであるが, フラックスの大きさは少なくとも1桁程度小さい.

火星夜側において, 地殻起源磁場の強い領域の上空で, 電子密度が観測限界まで小さな領域(plasma voidと呼ばれる)の間に, 瞬間的に電子密度が前のレベルまで戻る現象がMGS衛星のMAG/ERによって観測された.

⟶ 地殻起源磁場のtopologyを反映している.

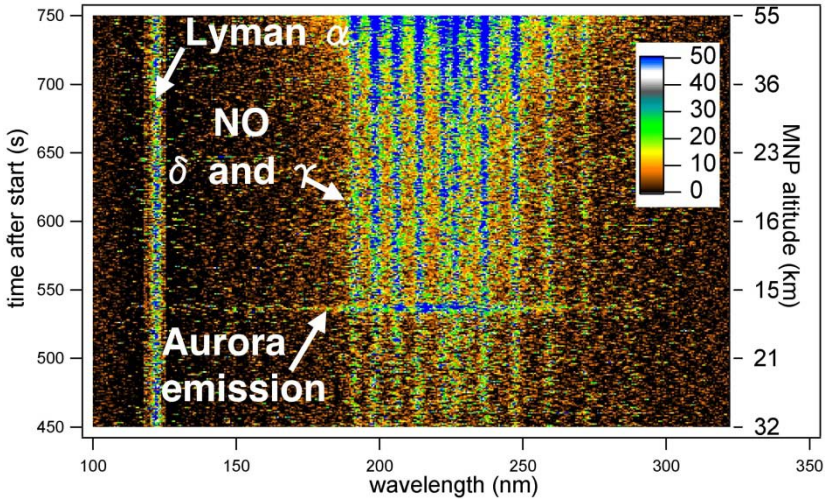
先行研究: *Brain et al.*, [2006] auroral-like electron event

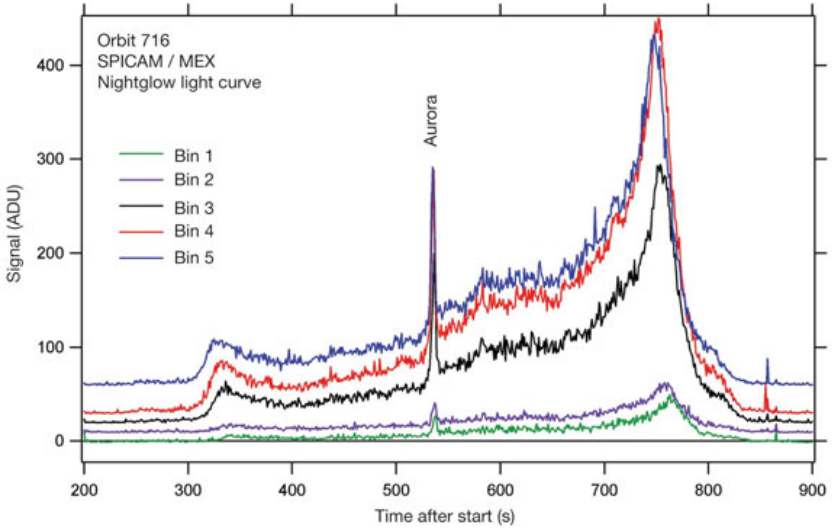


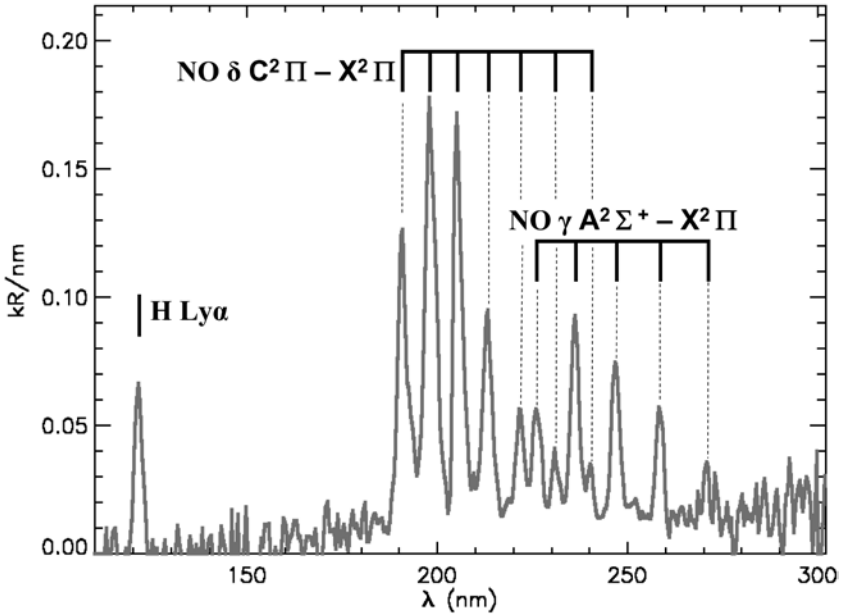


MGS衛星のMAG/ERが観測した auroral-like electron eventにおける電子のエネルギー分布は，100 eV -- 2.5 keVのエネルギー範囲にピークを持った形になる.

先行研究: *Bertaux et al.*, [2005] Martian aurorae: SPICAM

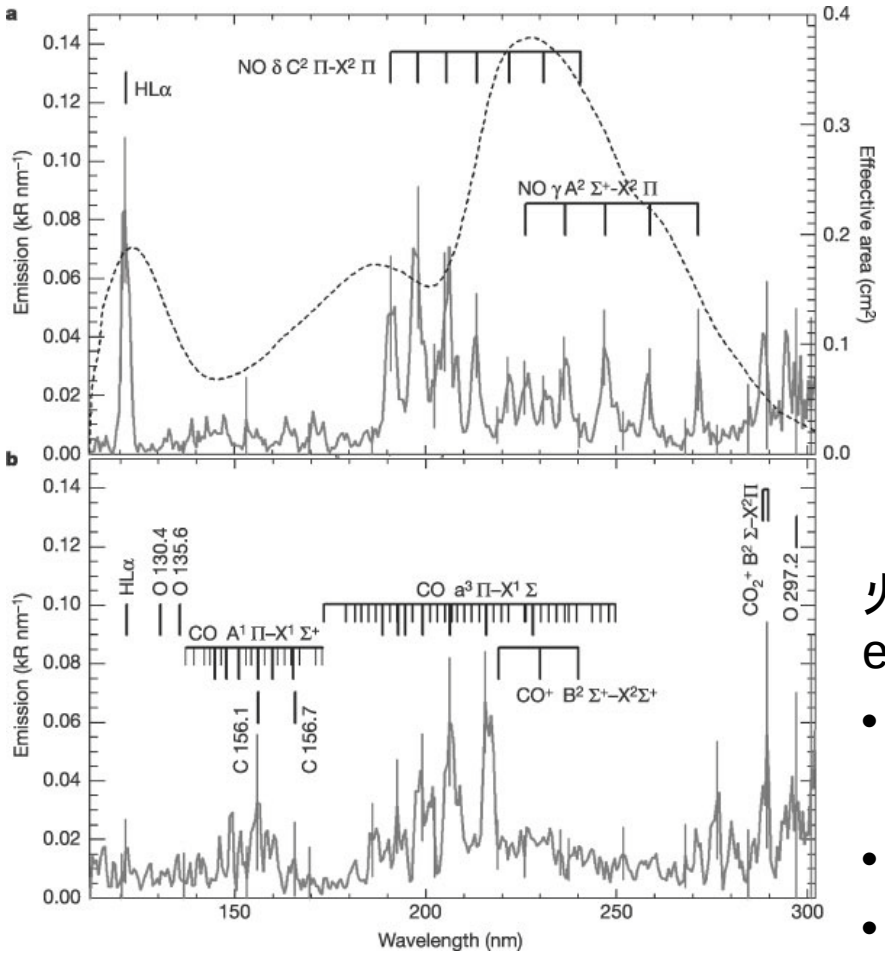


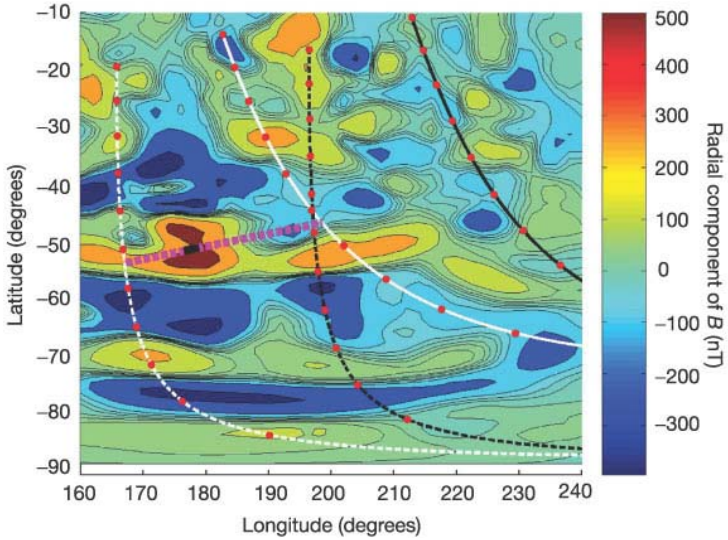




- MEX衛星に搭載された紫外分光器(SPICAM)によるlimb観測.
- 通常の火星のnightglowは, NOのγ or δ band (190--270nm), H Lyα (121.6 nm)の発光がメイン.

先行研究: *Bertaux et al.*, [2005] Martian aurorae: SPICAM





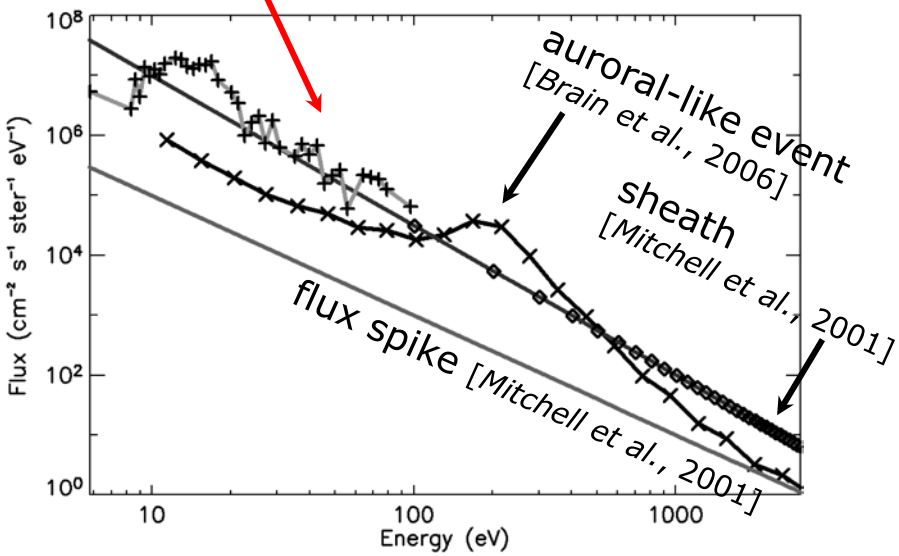
火星の昼側において，主に以下の3種類のemissionを観測；

- CO_2のphoton and e- 衝突解離に伴う CO Cameron band (180--260 nm)
- CO_2^+ ultraviolet doublet (289 nm)
- CO forth positive (135--170 nm)

これらの発光は火星昼側でしばしば観測される．発光位置は地殻起源磁場上空に一致する．

先行研究: *Leblanc et al.*, [2006] Martian aurorae: SPICAM & ASPERA-3

Bertaux et al. [2005]のイベントについて, ASPERA-3の電子観測(ELS)データを基に再検討.



- MEX/ASPERA-3/ELSによって観測されたイベント時の電子のエネルギー分布から, オーロラ発光を引き起こしたのは, 数10eVの電子が担っている可能性がある.

↕

- *Brain et al.* [2006] (or *Lundin et al.* [2006]) によって指摘された, オーロラ発光を引き起こす電子のエネルギー分布とは異なる.
- イベント時の発光量を説明するためには, MGS/ERが観測したsheath領域の電子分布の10倍以上の降り込みフラックスが必要.
- MEXの衛星電位の不確定性 (→ -10V だとOK?).

Data sets

Mars Express (MEX)

- SPICAM UVS: 紫外分光器.
  本研究では下記の観測機器を利用するために,
  主にnadir観測モードのデータを使用.
- ASPERA-3: プラズマ観測器群.
  本研究では主に電子観測(ELS)データを使用.
- MARSIS: サウンダー
  subsurface modeによって, 地表から衛星高度までのTotal Electron Contents (TEC)を推定可能 [*Mouginot et al.*, 2008].

Mars Global Surveyor (MGS)

- MAG: 磁場観測, および ER: 電子観測
- Mapping orbit:
  - 400 km circular orbit.
  - 軌道周期: ~ 2 hrs.
  - Local time 2AM/2PMで固定.

※ 詳細な衛星, 観測機器の特徴は, 過去の勉強会資料を参照の事.

MEXの夜側観測(66パス)から, 全部で6パスのオーロライベントを発見.

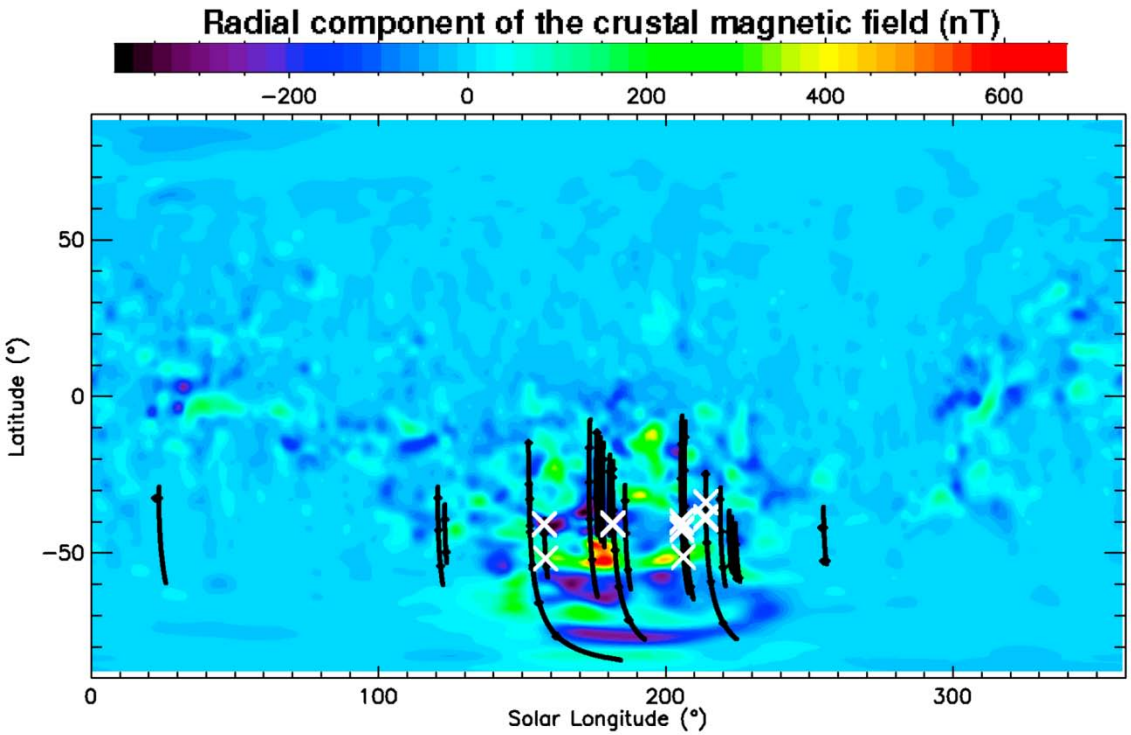
Events

Table 1. Set of Auroral Emission Events[a]

Date MEX Orbit	Ls (°)	F10.7	SW Conditions	SPICAM Viewing	Time Period (UT)	S/C Altitude (km)	Aurora Longitude (°)	Aurora Latitude (°)	Cameron Band Emission (R)	Emission at 289 nm (R)
2004 07 07 591	57.1	54.1	SEP event	nadir	0539:52–0539.55	670	214	34S	241 ± 50	N/A
			high SW						105 ± 10	N/A
			pressure southward		0541:17–0541:36	586	214	39S	218 ± 34	N/A
			IMF						195 ± 10	13 ± 8
2004 08 11 716	72.4	39.4	dawnward -	limb	0601:21–0601:28	266	178	50S	2040 ± 132	126 ± 56
			southward IMF						1546 ± 41	157 ± 26
2005 12 27 2515	347.3	38.3	no SEP event	nadir	2147:31–2147:41	954	158	41S	341 ± 74	146 ± 70
			moderate to high						175 ± 16	50 ± 26
			SW pressure		2151:08–2151:16	700	158	52S	588 ± 90	N/A.
			southward IMF						662 ± 24	120 ± 30
2006 01 26 2621	2.4	32.7	no SEP event	nadir	1404:01–1404:15	564	182	40S	414 ± 61	N/A
			moderate SW						274 ± 14	34 ± 15
			pressure dawnward							
			IMF							
2006 02 19 2705	13.9	30.0	no SEP event	nadir	0237:56–0238:11	387	206	40S	187 ± 36	N/A.
			moderate to high						105 ± 9	27 ± 11
			SW pressure		0238:34–0238:48	365	206	42S	663 ± 51	57 ± 37
			dawnward–southward IMF						547 ± 16	94 ± 15
					0240:52–0241:02	309	206	52S	273 ± 46	31 ± 30
									214 ± 11	12 ± 8
2006 03 17 2800	25.5	29.3	southward	limb	1709:46–1710:16	314	237	31S	597 ± 41	35 ± 16
			IMF						826 ± 17	164 ± 13

[a]Two values of the Cameron band emission and of the 289 nm emission are given for each event. The first value has been derived from the average spectrum of the two spatial bins with the best spectral resolution and the second value using the spatial bins with the worst spectral resolution. Each spatial bin covered 32 pixel rows of the CCD. F10.7 (10^{-22} W/m^2/Hz) values are calculated from daily average National Geophysics Data Center taking into account the relative positions of the Earth and Mars, the Sun rotation, and Mars' heliocentric distance. N/A indicates that the emission intensity cannot be estimated better than one sigma uncertainty. SW conditions: Solar wind conditions as inferred from low altitudes dayside measurement of the magnetic pressure by MGS/MAG-ER [*Crider et al.*, 2003]. SEP is for solar energetic particles [*Brain et al.*, 2006]. IMF direction is accurate at ~90°. S/C is for MEX spacecraft.

Events

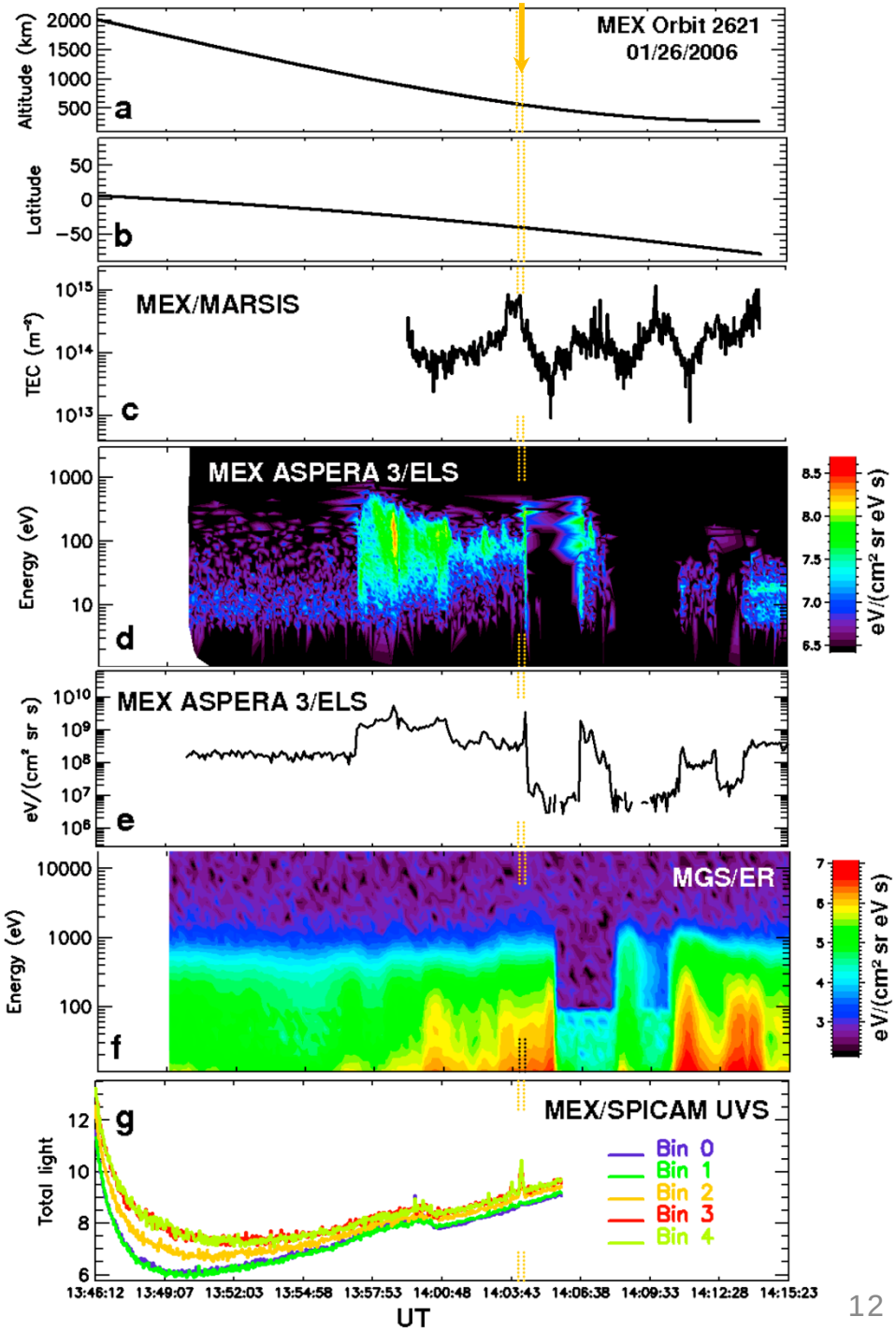


- SPICAMが火星オーロラ発光を観測した位置は，磁気異常帯上空におおむね一致.
- たとえ磁気異常帯上空1000km未満の高度をMEXが通過したときでも，オーロラ発光を観測しないこともある.
- オーロラ発光量とLocal timeの関係性，オーロラ観測とSEP到来の因果関係は(今のイベント数では)認められない.

Observation (1)

- オーロラ発光が観測された時に(g)，電子のエネルギーフラックスが1桁増加したのがELSによって観測された(e)．
- 同時にMARSISが観測したTECも増加した(c)．ただしTECが増加していた時間がELSよりも長い．
- MGSは夜側で経度240deg.，緯度がMEXと同程度の位置を飛行．
- MGSが観測した電子はtail-like.
- オーロラ発光があったときのMGS/ERが観測した電子のピッチ角分布は等方的．

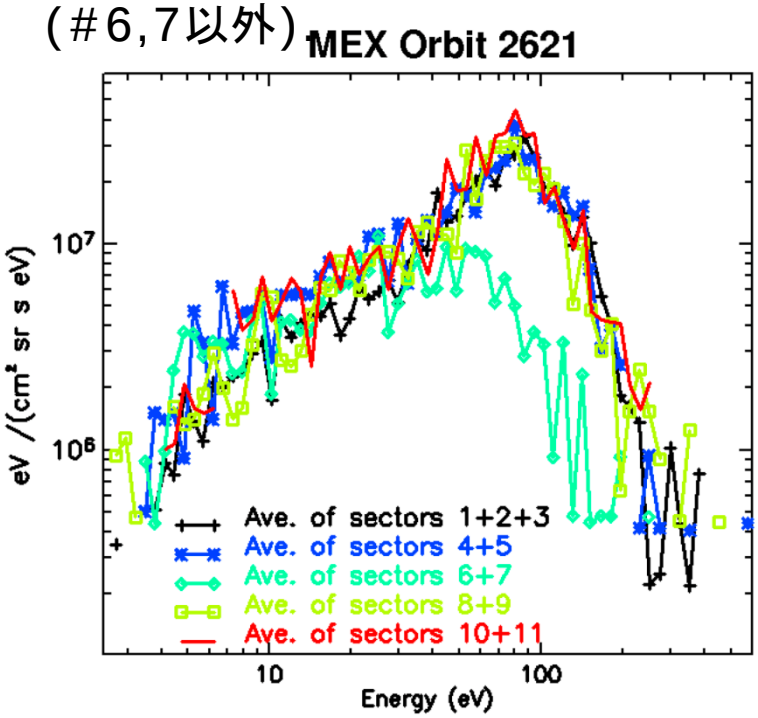
  (Brain et al., [2007]によると，closed field lineにMGSはいただろう.)

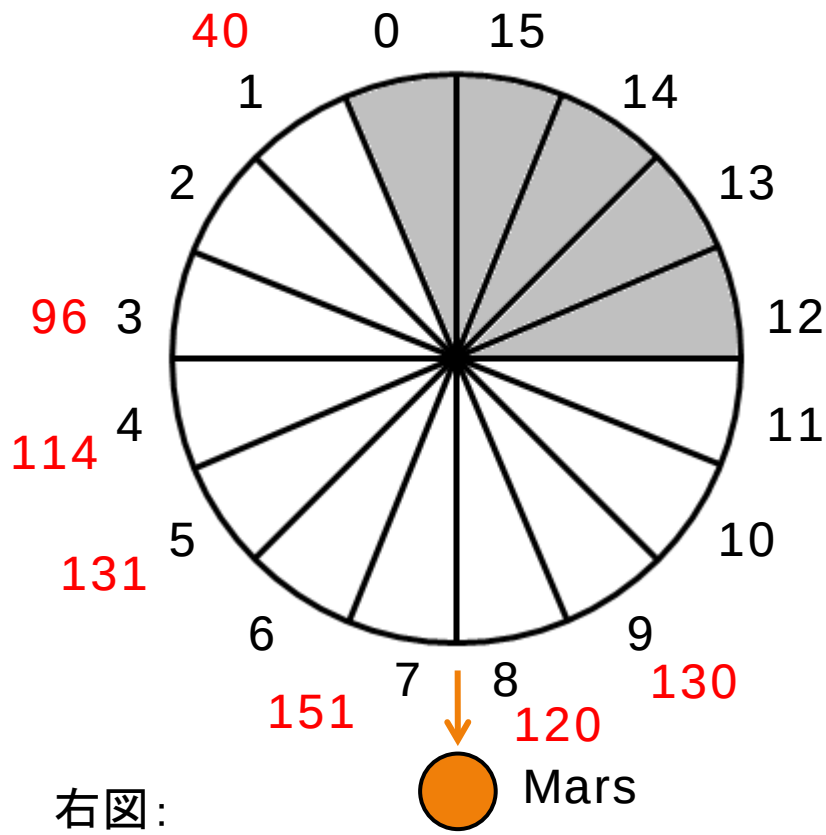


Observation (1)

(左図: Figure 5)

- イベント時におけるELSが観測した, sectorごとの電子のエネルギー分布.
- sector #0, 12—15は視野干渉のため, 解析に使用できない.
- 分布は等方的, かつ80eV程度にピークを持ったloss cone (#6,7以外)



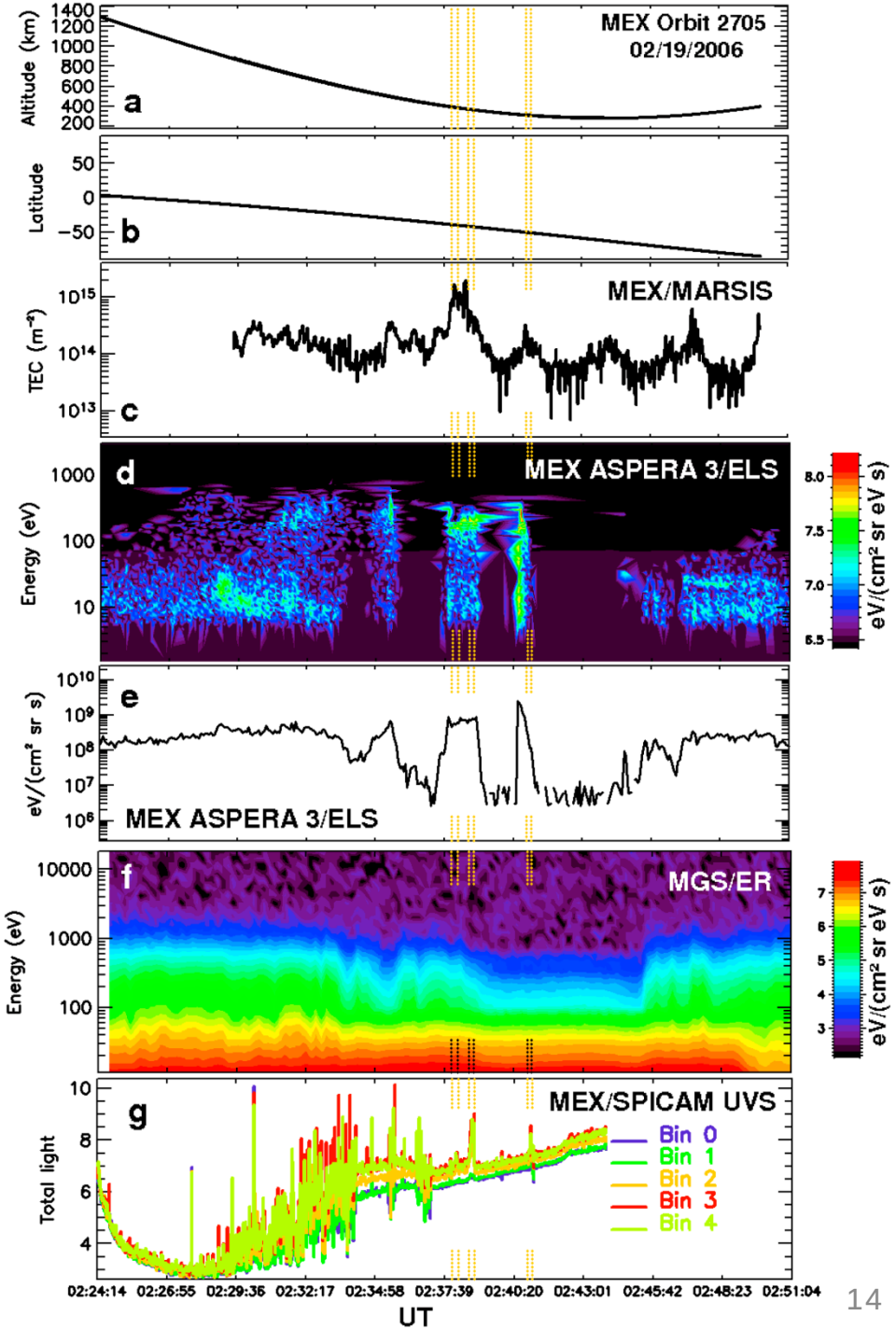


右図:
イベント時の観測configuration.
(黒字) ELS sector number.
(赤字) *Cain et al.*, [2003]に基づく pitch angle.

電子分布の結果から, 地殻起源磁場の磁力線は火星大気とつながっていることが示唆される.

Observation (2)

- Observation(1)と同様のふるまいをMEX/ASP-3/ELS(d, e)とMEX/MARSIS(c)において示す.
- 40sec(距離換算で200km)離れた場所でオーロラ発光がSPICAMによって観測されたが, この期間は継続的に電子の降り込みは観測され続けた.
- MGSは昼側を飛行.
- MGSから推定される太陽風条件は, SEPなし, IMF dawnward, 通常の太陽風動圧.
- Cain modelから推定されるELS sector #1のpitch angleは最初の2イベントが60度で最後が150度. MEX衛星は地殻起源磁場の向きが反転する領域を通過.



Results

Table 2. Nadir Viewing Measured Aurora Events by SPICAM UVS/MEX[a]

Date MEX Orbit	Label	S/C Altitude (km)	Cameron Band Emission (R)	Emission at 289 nm (R)	Cameron Band/289 nm emissions	Electron Energy Flux 10^9 eV/(cm^2 sr s)	Peak in Energy (eV)	TEC Value (10^{15} m^{-2})
2004 07 07 591	591a	670	105 ± 10	N/A.	N/A.	4.2	~350	N/A
	591b	586	195 ± 10	13 ± 8	15 ± 10	1.3	~50	N/A
2005 12 27 2515	2515a	954	175 ± 16	50 ± 26	3.5 ± 2	4.1	~190	N/A
	2515b	700	662 ± 24	120 ± 30	5.5 ± 1.6	7.8	~150	0.27
2006 01 26 2621	2621a	564	274 ± 14	34 ± 15	8 ± 4	1.4	~80	4.5
2006 02 19 2705	2705a	387	105 ± 9	27 ± 11	4 ± 2	2.2	~160	11.6
	2705b	365	547 ± 16	94 ± 15	5.8 ± 1	2.3	~200	3.8
	2705c	309	214 ± 11	12 ± 8	18 ± 13	0.4	~40	0.9

[a]The Cameron band and 289 nm emissions are the values given in Table 1 for the lowest spectral resolution that is for the highest sensitivity of SPICAM UVS. The electron energy flux values are the integrated energy flux measured in sector 1 of ASPERA-3/ELS during the period of the aurora event. The peak of energy is the energy at which the electron flux distribution reached its maximum in sector 1. The TEC is the integrated total electron content during the period of the aurora event as measured by MARSIS. N/A indicates either that the emission was not estimated at better than one sigma uncertainty or that the TEC was not available because MARSIS was not deployed at that time or because MEX was too high in altitude.

- ELS, MARSISによる電子観測とSPICAMの発光強度との間には**明確な依存性は認められない**.
- 原因としては, 衛星電位の不確定性, 2次電子の寄与, ELSの電子分布の信憑性(視野干渉;降下電子を完全に観測できていないこと)の問題が考えられる.
- ELSによる降下電子フラックスとMARSISによるTECに対しても関係性も認められず.
- 原因としては, ELSの視野干渉, そもそも降下電子による火星超高層大気のイオン化率と大気中の電子数に相関がないため, MARSISから推定したTECの妥当性.

Results

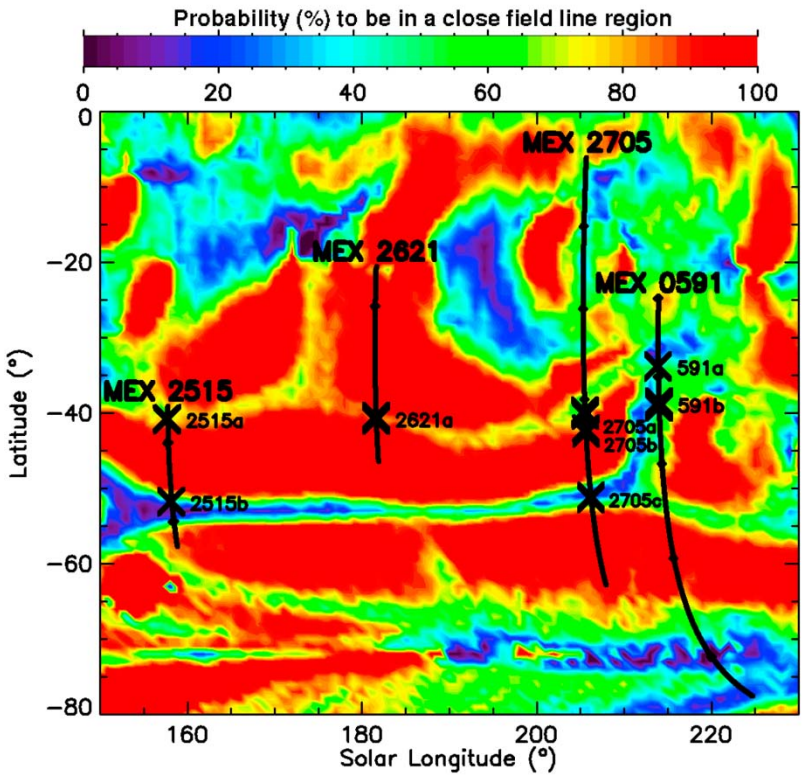
Table 2. Nadir Viewing Measured Aurora Events by SPICAM UVS/MEX[a]

Date MEX Orbit	Label	S/C Altitude (km)	Cameron Band Emission (R)	Emission at 289 nm (R)	Cameron Band/289 nm emissions	Electron Energy Flux 10^9 eV/(cm^2 sr s)	Peak in Energy (eV)	TEC Value (10^{15} m^{-2})
2004 07 07 591	591a	670	105 ± 10	N/A.	N/A.	4.2	~350	N/A
	591b	586	195 ± 10	13 ± 8	15 ± 10	1.3	~50	N/A
2005 12 27 2515	2515a	954	175 ± 16	50 ± 26	3.5 ± 2	4.1	~190	N/A
	2515b	700	662 ± 24	120 ± 30	5.5 ± 1.6	7.8	~150	0.27
2006 01 26 2621	2621a	564	274 ± 14	34 ± 15	8 ± 4	1.4	~80	4.5
2006 02 19 2705	2705a	387	105 ± 9	27 ± 11	4 ± 2	2.2	~160	11.6
	2705b	365	547 ± 16	94 ± 15	5.8 ± 1	2.3	~200	3.8
	2705c	309	214 ± 11	12 ± 8	18 ± 13	0.4	~40	0.9

[a]The Cameron band and 289 nm emissions are the values given in Table 1 for the lowest spectral resolution that is for the highest sensitivity of SPICAM UVS. The electron energy flux values are the integrated energy flux measured in sector 1 of ASPERA-3/ELS during the period of the aurora event. The peak of energy is the energy at which the electron flux distribution reached its maximum in sector 1. The TEC is the integrated total electron content during the period of the aurora event as measured by MARSIS. N/A indicates either that the emission was not estimated at better than one sigma uncertainty or that the TEC was not available because MARSIS was not deployed at that time or because MEX was too high in altitude.

- ELSが観測した降下電子のピークエネルギーとCameron band emissionと289nm emissionの比には相関があるかもしれない(*Leblanc et al.*, [2006]でも指摘されていた).
- Cameron band emissionを効率的に引き起こす電子のエネルギーはおよそ80 eV [*Avakyan et al.*, 1998], 一方で289nm emissionは150eV [*LeClair and McConkey*, 1994].
- 観測された発光を引き起こす電子のエネルギー分布は, 発光が起きてる高度よりも高いところでのエネルギー分布に近い?

Results



Mapについて:
Brain et al., [2007]によるMAG/ERのpitch angle分布の統計解析結果に基づくtwo-side loss coneとplasma voidが観測される確率(⇔磁場のtopologyがclosed line fieldである確率)を表す.

- オーロラ発光が観測された位置は,磁場形状がopenな領域で観測されている(←地球極域との類似性).
- 他にも磁場形状がopenな領域を衛星は通過しているが, オーロラ発光が観測されていない原因:
- Current systemが異なる.
- MGSの軌道はLT2/14で固定されているため, 統計解析で得た分布が異なるLTでも成立するか.

  [*Dubinin et al.*, 2008]
- 火星に到来する太陽風条件との依存性(対流電場が南を向いていると,南半球に電子は降下しやすくなる,例:orbit #2621, 2705).

  [*Brain et al.*, 2006]

Summary

- MEXに搭載されたSPICAM, ASPERA-3, MARSIS, 及びMGSに搭載されたMAG/ERの複数衛星・複数観測器のデータに基づいて火星オーロラに関するイベント解析を行った.
- 磁気異常帯の上空で, 火星オーロラの発光がSPICAMによって観測されたとき, 降下電子の増加がASPERA-3/ELSによって観測された.
- *Brain et al.*, [2007] によるMAG/ERの統計解析がMAG/ERの観測とは異なるLTでも成り立つとすれば, 磁場形状がopenな領域で, 火星オーロラ発光は観測される.
- 地球極域で引き起こされる粒子加速現象が, 火星地殻起源磁場のcusp状の領域でも発生しているかもしれない.

References

- Bertaux, J.-L., et al. (2005), Discovery of an aurora on Mars, *Nature, 435,* 790--794, doi:10.1038/nature03603.
- Bertaux, J.-L., et al. (2006), Observing modes and overview of UV spectrometer data and scientific results, *J. Geophys. Res.*, *111*, E10S90, doi:10.1029/2006JE002690.]
- Brain, D. A., et al. (2005), On the origin of aurorae on Mars, *Geophys. Res. Lett.*, *33*, L01201, doi:10.1029/2005GL024782.
- Brain, D. A., et al. (2007), Electron pitch angle distributions as indicators of magnetic field topology near Mars, *J. Geophys. Res.*, *112*, A09201, doi:10.1029/2007JA012435.
- Mitchell, D. L., et al. (2001), Probing Mars' crustal magnetic field and ionosphere with the MGS Electron Reflectometer, *J. Geophys. Res., 106,* 23,419--23,427, doi:10.1029/2000JE001435.
- Leblanc, F., et al. (2006), Origins of the Martian aurora observed by Spectroscopy for Investigation of Characteristics of the Atmosphere of Mars (SPICAM) on board Mars Express, *J. Geophys. Res.*, *111*, A09313, doi:10.1029/2006JA011763.
- Leblanc, F., et al. (2008), Observations of aurorae by SPICAM ultraviolet spectrograph on board Mars Express: Simultaneous ASPERA-3 and MARSIS measurements, *J. Geophys. Res.*, *113*, A08311, doi:10.1029/2008JA013033.
- Lundin, R., et al. (2006), Plasma Acceleration Above Martian Magnetic Anomalies, Science, 311, 5763, 980--983, doi:10.1126/science.1122071.

Back up & Appendix

磁気異常帯に関連した流出現象

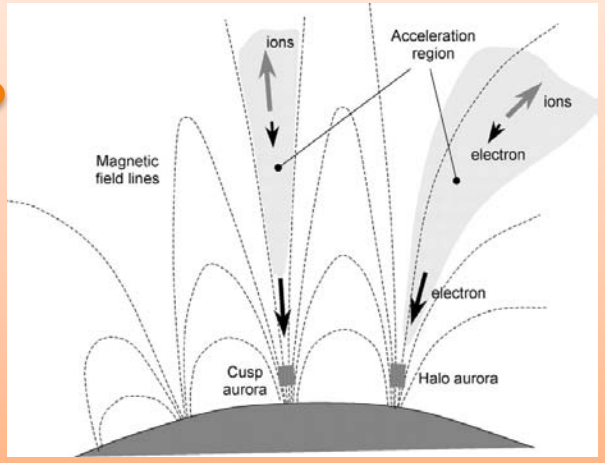
大気流出に果たす役割

- 大気を流出させる;
  - オーロラ加速

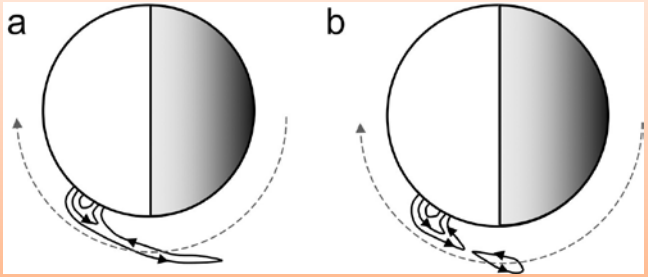
  [e.g., *Lundin et al.*, 2006; *Nillson et al.*, 2006]
  - フラックスロープ
    (クラウド, 磁気再結合)

  [e.g., *Brain et al.*, 2010; *Morgan et al.*, 2011]
- 大気を流出させない;
  - “ミニ磁気圏”の形成

  [e.g., *Mitchell et al.*, 2001; *Lundin et al.*, 2011]



Lundin et al., 2006

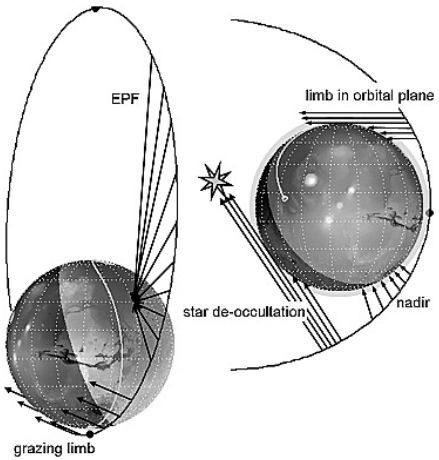


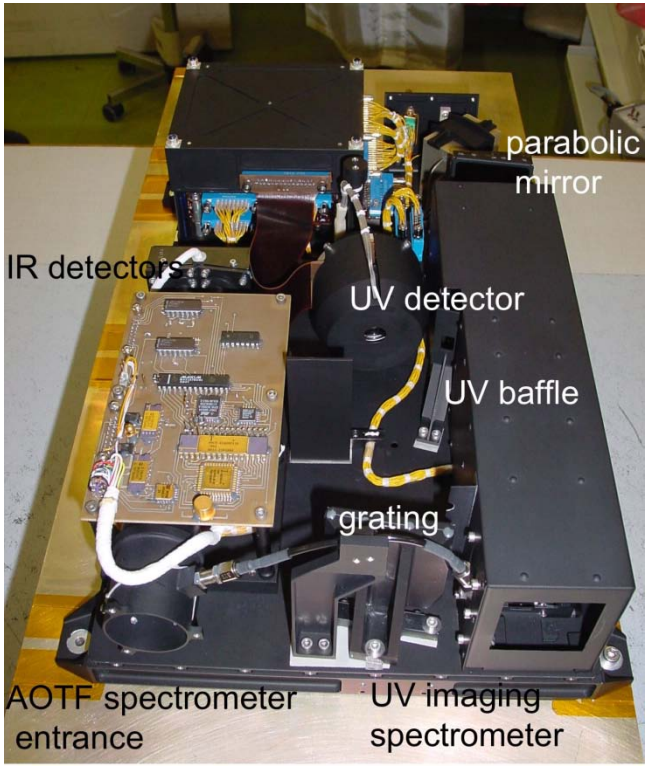
Brain et al., 2010

火星大気流出に果たす役割と太陽風変動への応答については,
ほとんどわかっていない.

Instrumentation: SPICAM UVS

- Spectroscopy for Investigation of Characteristics of the Atmosphere of Mars
- 118 -- 305 nmの紫外波長帯と1.1 -- 1.7 μmの赤外波長帯を持つ分光器.
- “spatial bin”という5つのpartがある.
  - 0,1･･･1.5nmの高分解能.
  - 3,4･･･6nmの低分解能だが, 感度が8倍良い.
  - 2･･･正しく校正できていない.
- 観測モード: nadir, limb, solar/stellar occultation.

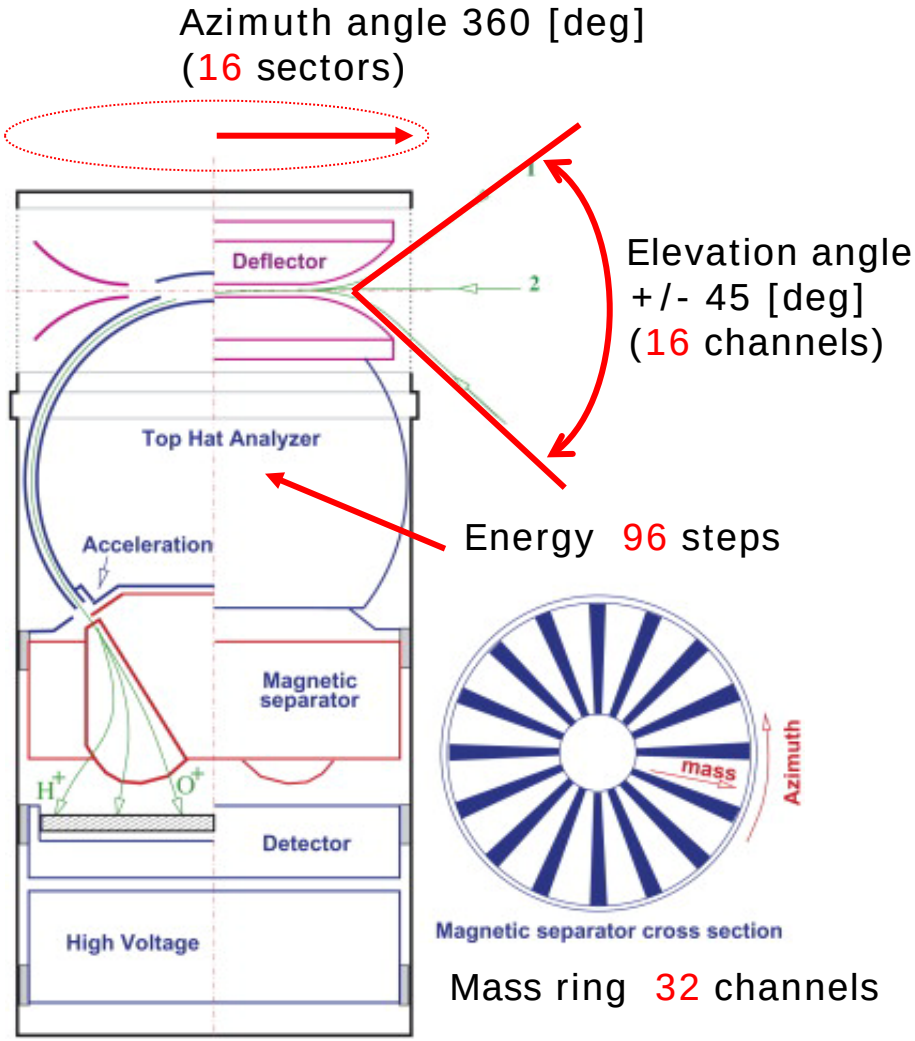




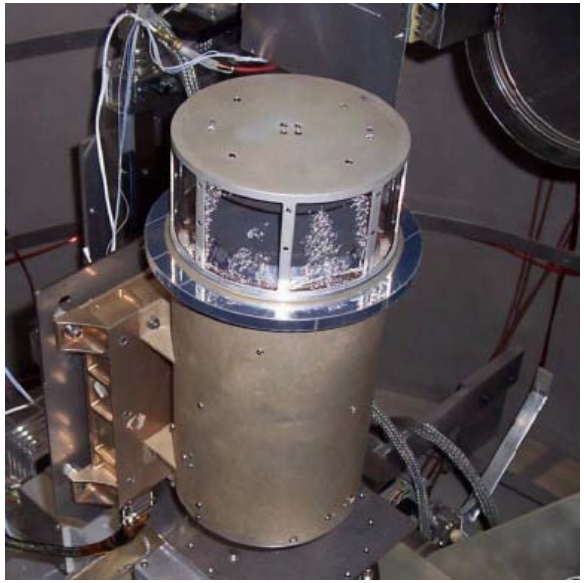
Bertaux et al. [2006]

[back]

Instrumentation: MEX/ASPERA-3/IMA



IMA Cross Section ; *Barabash et al.* [2007]



- 10 eV ~ 30 keV.
- 1, 2, 4, 16, 32, 44, …, 80 [a.m.u.].
- FOV : 90 × 360 [deg].
- resolution : 5.6 × 22.5 [deg].
- 192 [sec] in full 3D scan.
- 32 x 16 x 96 x 16 data.

Instrumentation: MEX/ASPERA-3/ELS

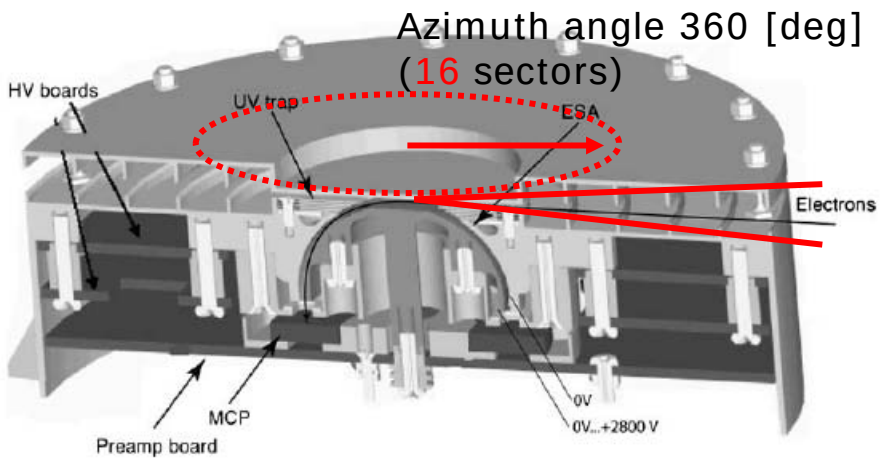


Figure 22. Cut-sectional view of the ELS sensor. The electrostatic analyzer voltages are also indicated.

Figure 23. ELS spare (*left*) and flight models (*right*).

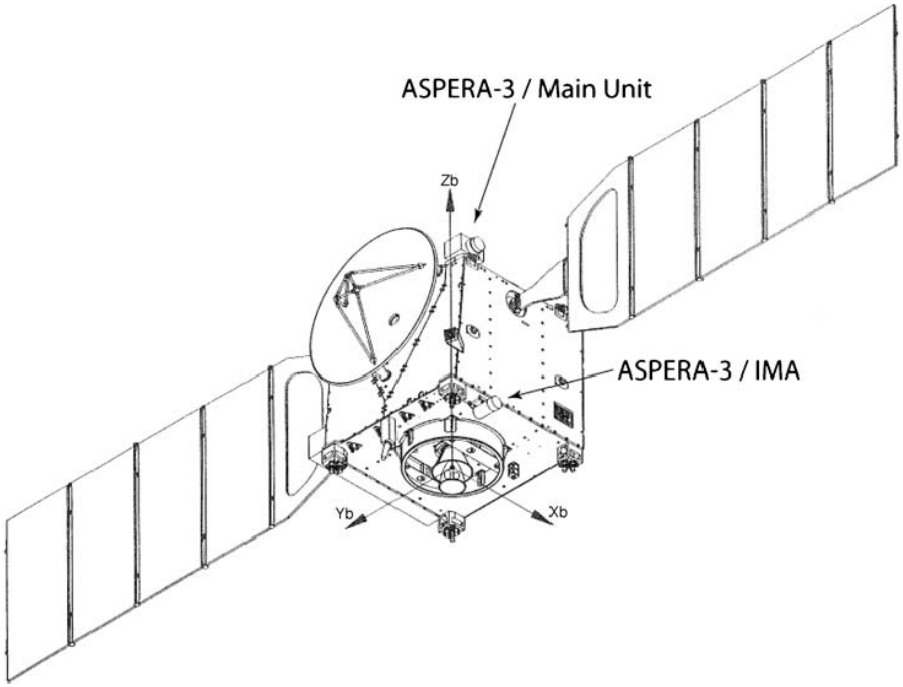
Barabash et al. [2006]

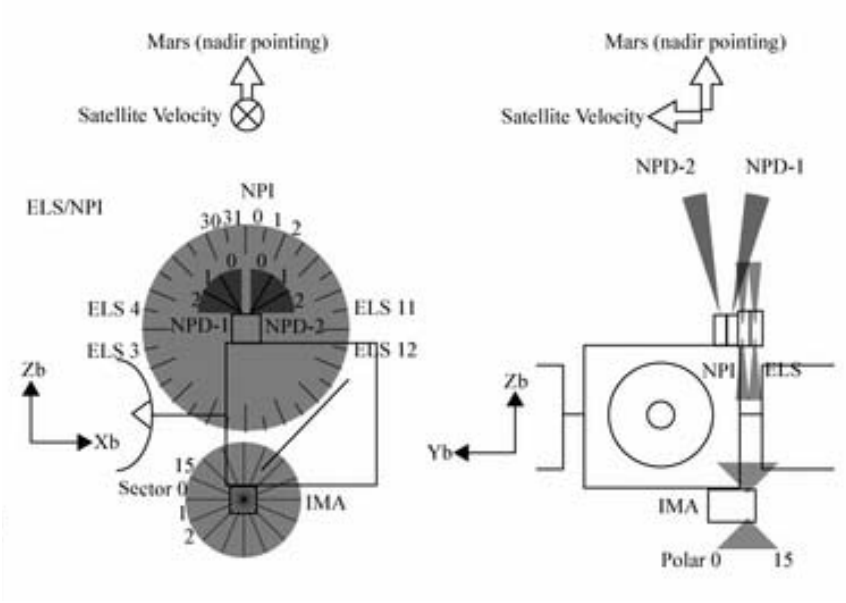
- 1 eV ~ 20 keV (128 step).
- 4 × 360 deg の2次元分布.
- 16 azimuthal sectors.
- 時間分解能：4 sec.
- $\Delta E/E$ = 0.08.
- 10 eV 以下は衛星電位の影響を受ける.

MEX/ASPERA-3の視野干渉

Barabash et al. [2006]

二穴さん作成





MEXが近火点を通過した時，ELSでは火星に降り込んでくる方向，IMAでは火星に流出している方向の観測視野が，衛星航体やsolar panelによってブロックされている．