

# Extreme Ultraviolet Spectroscopy of Venusian Atmosphere

## Observed by EXCEED

Yusuke Nara<sup>1</sup>, Ichiro Yoshikawa<sup>2</sup>, Naomoto Iwagami<sup>1</sup>, Kazuo Yoshioka<sup>3</sup>,  
Go Murakami<sup>3</sup>, Tomoki Kimura<sup>3</sup>, Atsushi Yamazaki<sup>3</sup>, Fuminori Tsuchiya<sup>4</sup>,  
Kuto Fujiwara<sup>1</sup>, Masaki Kuwabara<sup>2</sup>, Hiroshi Nishihara<sup>5</sup>

(1) Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan

(2) Department of Frontier Science, The University of Tokyo, Kashiwa Chiba 277-8561, Japan

(3) Japan Aerospace Exploration Agency, Institute of Space and Astronautical Science, Sagamihara Kanagawa 252-5210, Japan

(4) Planetary Plasma and Atmospheric Research Center, Tohoku University, Sendai Miyagi 980-8578, Japan

(5) Department of Chemistry, The University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan

### 1. はじめに

ひさき衛星の観測機EXCEEDによって得られた金星の極端紫外線領域スペクトルの発光物質の同定を行った。ひさき衛星は高度約1000km、周期約100分で地球を周回しながら惑星を観測している。観測波長は520-1480Åである。過去に金星の極端紫外線領域の観測を行った衛星には、Mariner-10号(1974年)、Venera-11,12号(1978年)、土星探査機Galileoの遷移軌道中の観測(1990年)、ロケットによる地球大気からの観測(1994年)、ASTRO-2ミッション(1995年)、木星探査機Cassiniの遷移軌道中の観測(1999年)があり、O II (834Å), O I (989Å), N II (1134Å), C I (1277Å), CO A-X帯などの輝線が観測されている (Broadfoot *et al.*, 1974; Bertaux *et al.*, 1981; Hord *et al.*, 1991; Stern *et al.*, 1995; Feldman *et al.*, 1999; Gérard *et al.*, 2011)。EXCEEDでは過去の観測で明らかになった物質のほかにN<sub>2</sub> C-X帯(1053, 1076, 1099 1123, 1328, 1368, 1407Å), A-X帯(1384, 1416, 1450, 1398, 1431, 1446Å)や様々な原子、イオンの発光が観測された。

### 2. 手法と用いたデータ

EXCEEDは1回の観測につき1分間の露光で惑星の発光を観測している。また、EXCEEDは地球の大気中から惑星を観測しているため、データにはジオコロナと呼ばれる地球大気が発光が含まれてしまう。そこで、金星ディスクから金星半径の約10倍離れた、スリットの端を地球大気とみなして金星スペクトルの強度を計算した。また、統計誤差低減のため10日間分のデータを重

ね合わせた。誤差の評価は、誤差が標準正規分布に従うとして $1\sigma$ 区間を用いた。重ね合わせたスペクトルが図1である。データは2014/3/17-2014/3/26の期間のものを用い、このときの金星は太陽離角が約 $45^\circ$ 、見かけの直径が約 $26''$ である。

また、スペクトルの同定の際にはMeier *et al.* (1991)にある地球大気の観測で得られた表と、Herzberg (1950)の巻末の2原子分子に関する振動定数のデータを用いた。

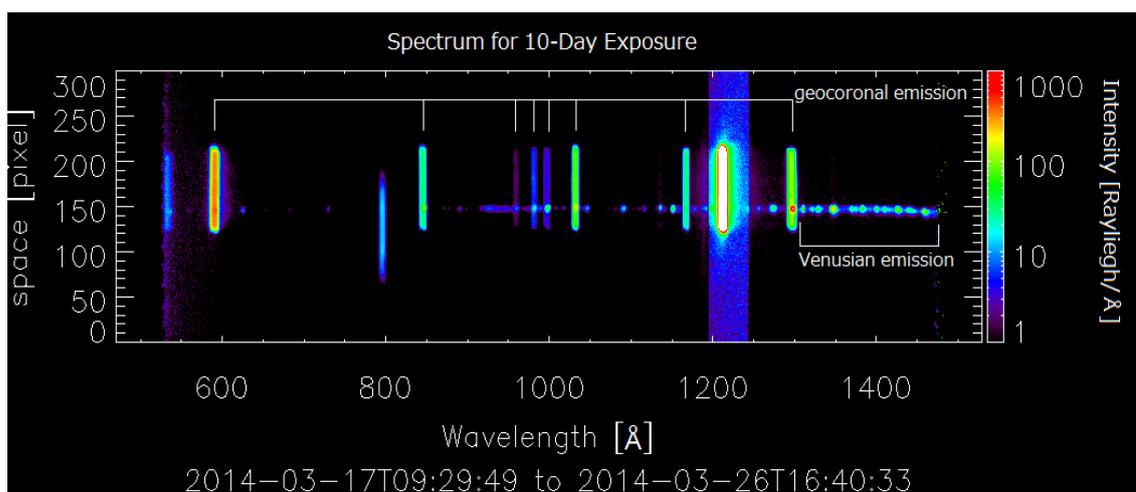


図1 10日間重ね合わせた金星スペクトル

$x$ 軸は波長、 $y$ 軸は空間方向を表し、スペクトルの強度は色で表している。スリット全体が明るいのはジオコロナの発光によるものである。 $y \approx 150$ の円形の発光が金星ディスクのスペクトルである。また、 $780\text{\AA}$ あたりの空間方向にずれた輝線は検出器と回折格子の間で2重に反射したゴーストである。

### 3. 金星スペクトル

図2-4が金星ディスクのスペクトルである。それぞれのグラフ下部に過去の金星極端紫外線領域での観測の観測波長範囲とその観測で同定された発光を示している。図中の物質名が記載されていないものは、発光物質不明の輝線で、更なる調査が必要である。金星の極端紫外領域で $\text{N}_2$ を観測したのはEXCEEDが初めてである。また、 $\text{C II}$ も $520\text{-}1480\text{\AA}$ の波長範囲では、初めて観測された。

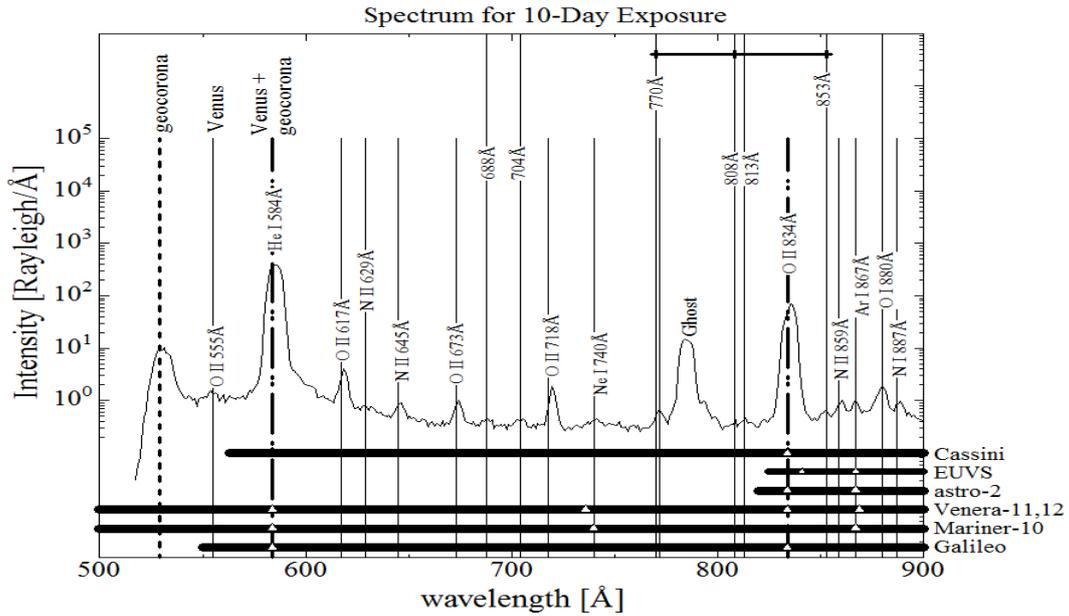


図2 金星ディスクのスペクトル(520-900Å)

y軸に平行な直線は、金星、点線はジオコロナ、一点鎖線は金星とジオコロナが混合したものの輝線である。x軸に平行な太い直線は、過去の観測の観測波長域を示している。直線上の印はその観測で検出されたということを示している。

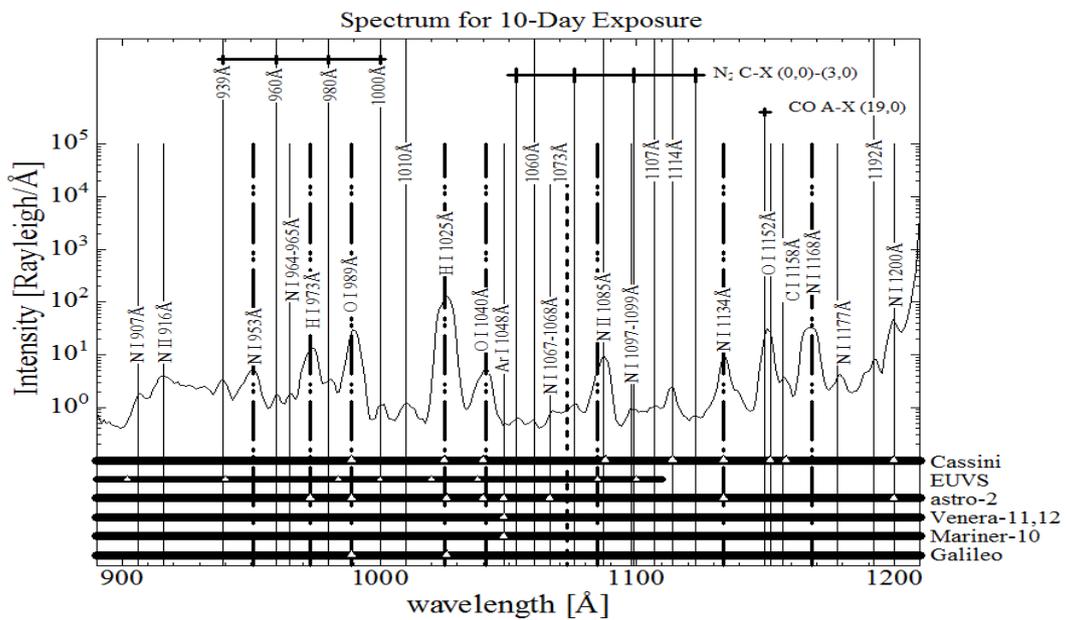


図3 金星ディスクのスペクトル(900-1200Å)

この波長範囲で新たに発見された物質は N I, N<sub>2</sub>が多く、N II も 916Åに発見されている。

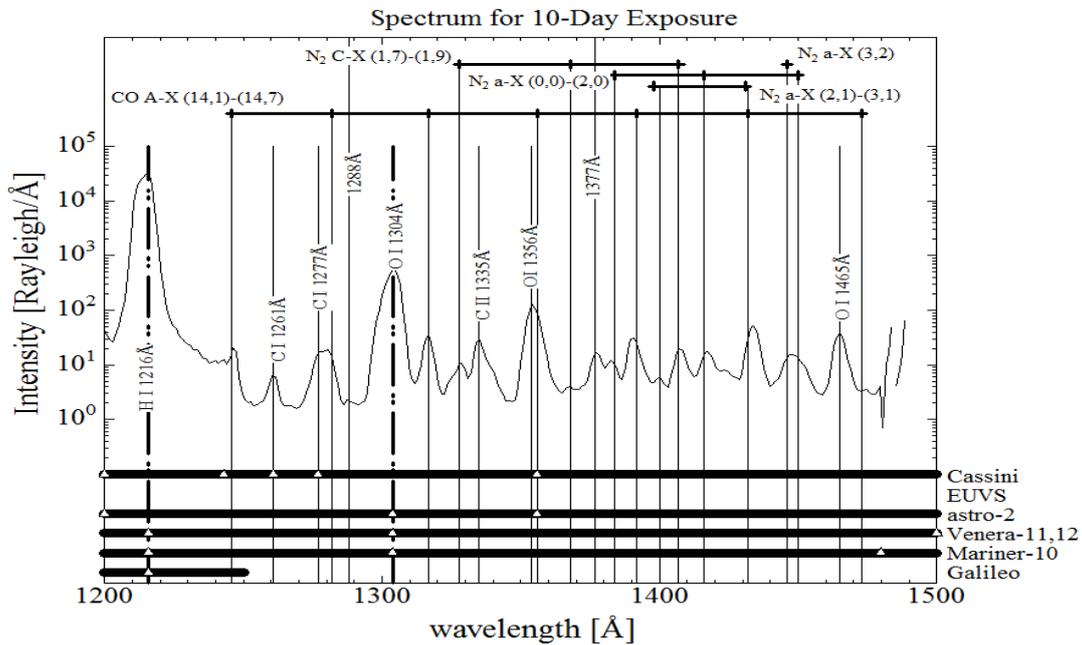


図4 金星ディスクのスペクトル(1200-1480Å)

この波長範囲での新発見はN<sub>2</sub> C-X, a-X帯やCII 1335Å などがある。

#### 4. まとめ

表1はEXCEEDで観測された金星の発光を発光物質、波長、強度についての表である。

ひさき衛星の観測機EXCEEDによって金星の極端紫外線領域において新たな発光物質の存在が多く明らかになった。これはEXCEEDの高時間分解能によって統計誤差の影響が過去の観測に比べて小さいためである。今回は10日間分の観測を用いたが、この期間を増やすことによって統計誤差はさらに小さくなるだろう。また、発光物質不明線が金星スペクトルにはまだ多くあるので、この発光物質の特定が課題として残っている。

表1 EXCEEDで観測された金星の発光

Emission	Transition	Wavelength [Å]	Wavelength (observed)[Å]	Intensity [Rayleigh/Å]
H I	1s <sup>2</sup> S – 4p <sup>2</sup> P <sup>o</sup>	973	974	8.1±0.5
	1s <sup>2</sup> S – 3p <sup>2</sup> P <sup>o</sup>	1026	1026	59±2
	1s <sup>2</sup> S – 2p <sup>2</sup> P <sup>o</sup>	1216	1215	8900±200
He I	1s <sup>2</sup> <sup>1</sup> S – 1s2p <sup>1</sup> P <sup>o</sup>	584	586	70±7

C I	$2s^2 2p^2 \ ^3P - 2s^2 2p 5d \ ^3P^0$	1158	1157	$3.3 \pm 0.3$
	$2s^2 2p^2 \ ^3P - 2s^2 2p 3d \ ^3P^0$	1261	1260	$5.4 \pm 0.4$
	$2s^2 2p^2 \ ^3P - 2s^2 2p 3d \ ^3D^0$	1277	1278	$17.2 \pm 0.6$
C II	<b><math>2s^2 2p^2 \ ^2P^0 - 2s 2p^2 \ ^2D</math></b>	<b>1335</b>	<b>1335</b>	<b><math>29.0 \pm 0.8</math></b>
N I	<b><math>2p^3 \ ^4S - 2p^2(^3P) 6s \ ^4P^2P</math></b>	<b>887</b>	<b>889</b>	<b><math>0.6 \pm 0.2</math></b>
	<b><math>2p^3 \ ^4S - 2p^2(^3P) 4d \ ^2P^4PF</math></b>	<b>907</b>	<b>907</b>	<b><math>1.5 \pm 0.2</math></b>
	<b><math>2p^3 \ ^4S^0 - 2p^2(^3P) 3d \ ^4P</math></b>	<b>953</b>	<b>952</b>	<b><math>3.8 \pm 0.3</math></b>
	<b><math>2p^3 \ ^4S^0 - 2p^2(^3P) 3d \ ^4P</math></b>	<b>965</b>	<b>965</b>	<b><math>1.5 \pm 0.2</math></b>
	<b><math>2p^3 \ ^2D^0 - 2p^2(^3P) 5d \ ^2,4D</math></b>	<b>1068</b>	<b>1067</b>	<b><math>0.6 \pm 0.2</math></b>
	<b><math>2p^3 \ ^2D^0 - 2p^2(^3P) 4d \ ^2D</math></b>	<b>1097-1099</b>	<b>1098</b>	<b><math>0.6 \pm 0.2</math></b>
	$2s^2 2p^3 \ ^4S - 2s 2p^4 \ ^4P$	1134	1135	$7.9 \pm 0.4$
	<b><math>2p^3 \ ^2D^0 - 2p^2 3d \ ^4P</math></b>	<b>1168</b>	<b>1168</b>	<b><math>4.0 \pm 0.9</math></b>
	<b><math>2s^2 2p^3 \ ^4S - 2s 2p^4 \ ^4P</math></b>	<b>1177</b>	<b>1179</b>	<b><math>3.3 \pm 0.3</math></b>
	$2s^2 2p^3 \ ^4S - 2p^2(^3P) 4s \ ^2P$	1200	1200	$31 \pm 3$
N II	<b><math>2p^3 \ ^2D^0 - 3s' \ ^2D</math></b>	<b>629</b>	<b>632</b>	<b><math>0.3 \pm 0.2</math></b>
	<b><math>2s^2 2p^2 \ ^3P^0 - 2s 2p^4 \ ^3S^0</math></b>	<b>645</b>	<b>645</b>	<b><math>0.6 \pm 0.2</math></b>
	<b><math>2p^3 \ ^4S - 2p^2(^3P) 11d^4 \ ^4P^4D</math></b>	<b>859</b>	<b>859</b>	<b><math>0.6 \pm 0.2</math></b>
	<b><math>2s^2 2p^2 \ ^3P - 2s 2p^3 \ ^3P^0</math></b>	<b>916</b>	<b>916</b>	<b><math>3.5 \pm 0.3</math></b>
	$2s^2 2p^2 \ ^3p - 2s 2p^3 \ ^3D^0$	1085	1088	$9.0 \pm 0.4$
O I	<b><math>2s^2 2p^4 \ ^3P - 2s^2 2p^3(^2P^0) 3s \ ^3P^0</math></b>	<b>880</b>	<b>880</b>	<b><math>1.3 \pm 0.2</math></b>
	$2p^4 \ ^3P - 2p^3(^2D^0) 3s' \ ^3D^0$	989	990	$27.8 \pm 0.8$
	$2p^4 \ ^3P - 2p^3 4s \ ^3S^0$	1040	1041	$5.0 \pm 0.3$
	$2p^4 \ ^1D - 3s' \ ^1D^0$	1152	1151	$32.9 \pm 0.7$
	$2p^4 \ ^3P - 2p^3 3s \ ^3S^0$	1304	1304	$516 \pm 7$
	$2p^4 \ ^3P - 2p^3 3s \ ^5S^0$	1356	1354	$134 \pm 3$
O II	<b><math>2p^3 \ ^2D^0 - 3s' \ ^2D</math></b>	<b>555</b>	<b>554</b>	<b><math>0.8 \pm 0.4</math></b>
	<b><math>2p^3 \ ^2D^0 - 2p^2(^3P) 3s \ ^2P</math></b>	<b>617</b>	<b>619</b>	<b><math>3.6 \pm 0.4</math></b>
	<b><math>2p^3 \ ^2P^0 - 2p^2(^3P) 3s \ ^2P</math></b>	<b>673</b>	<b>674</b>	<b><math>0.7 \pm 0.2</math></b>
	<b><math>2s^2 2p^3 \ ^2D^0 - 2s 2p^4 \ ^2D</math></b>	<b>718</b>	<b>720</b>	<b><math>1.7 \pm 0.2</math></b>
	$2s^2 2p^3 \ ^4S^0 - 2s 2p^4 \ ^4P$	834	835	$42 \pm 2$
Ne I	$2s^2 2p^6 \ ^1S - 2s^2 2p^5(^2P_{3/2}^0) 3s \ ^2 3/2^0$	740	741	$0.2 \pm 0.1$
Ar I	$3s^2 2p^6 \ ^1S - 3s^2 3p^5(^2P_{1/2}^0) 3d \ ^2 3/2^0$	867	867	$0.8 \pm 0.2$
	$3s^2 2p^6 \ ^1S - 3s^2 3p^5(^2P_{1/2}^0) 4s \ ^2 1/2^0$	1048	1049	$0.17 \pm 0.09$

N <sub>2</sub>	<b>a <sup>1</sup>Π<sub>g</sub> – X <sup>1</sup>Σ<sub>g</sub><sup>+</sup></b>	<b>(0,0)</b>	<b>1450</b>	<b>1447</b>	<b>16.0±0.8</b>
		<b>(1,0)</b>	<b>1416</b>	<b>1418</b>	<b>17.6±0.8</b>
		<b>(2,0)</b>	<b>1384</b>	<b>1383</b>	<b>11.9±0.6</b>
		<b>(2,1)</b>	<b>1430</b>	<b>1434</b>	<b>53±2</b>
		<b>(3,1)</b>	<b>1398</b>	<b>1399</b>	<b>5.6±0.5</b>
		<b>(3,2)</b>	<b>1444</b>	<b>1447</b>	<b>16.0±0.8</b>
	<b>C <sup>3</sup>Π<sub>u</sub> – X <sup>1</sup>Σ<sub>g</sub><sup>+</sup></b>	<b>(0,0)</b>	<b>1124</b>	<b>1121</b>	<b>0.3±0.1</b>
		<b>(1,0)</b>	<b>1099</b>	<b>1198</b>	<b>0.6±0.2</b>
		<b>(2,0)</b>	<b>1076</b>	<b>1177</b>	<b>0.7±0.2</b>
		<b>(3,0)</b>	<b>1054</b>	<b>1053</b>	<b>0.4±0.1</b>
		<b>(1,7)</b>	<b>1328</b>	<b>1329</b>	<b>10.5±0.5</b>
		<b>(1,8)</b>	<b>1367</b>	<b>1368</b>	<b>3.5±0.4</b>
		<b>(1,9)</b>	<b>1407</b>	<b>1407</b>	<b>20.7±0.8</b>
CO	A <sup>1</sup> Σ <sup>+</sup> – X <sup>1</sup> Σ <sup>+</sup>	(14,1)	1246	1246	12±3
		(14,2)	1282	1280	18.5±0.6
		(14,3)	1317	1316	35.0±0.9
		(14,4)	1354	1354	134±3
		(14,5)	1392	1391	32±1
		(14,6)	1431	1434	53±2

注) 太字の表記は金星では初めて観測された発光であることを示す。

## 5. 参考文献

- Bertaux, J. L., J. E. Blamont, V. M. Lepine, V. G. Kurt, N. N. Romanova and A. S. Smirnov, 1980, Venera 11 and Venera 12 Observations of E.U.V. Emissions From The Upper Atmosphere of Venus, *Planet. Space sci.* 29,149-166.
- Broadfoot, A. L., S. Kumar, M. J. S. Belton and M. B. McElroy, 1974, Ultraviolet Observations of Venus from Mariner 10: preliminary result, *Science*, 183, 1315-1318.
- Feldman, P.D., E. B. Burgh, S. T. Durrance and A. F. Davidsen, 1999, Far-ultraviolet Spectroscopy of Venus and Mars at 4Å Resolution with The Hopkins Ultraviolet Telescope on ASTRO-2, *Astrophys. J.* 538, 395-400.
- Gérard, J. C., B. Hubert, J. Gustin, V. I. Shematovich, D. Bisikalo, G. R. Gladstone and L. W. Esposito, 2011, EUV spectroscopy of The Venus Dayglow with UVIS on Cassini, *Icarus*, 211, 70-80.
- Herzberg, G., 1950, Spectra of Diatomic Molecules, D. Van Nostrand Company Inc., Princeton, N. J.

- Hord, C. W., C. A. Barth, L. W. Esposito, W. E. McClintock, W. R. Pryor, K. E. Simmons, A. I. F. Stewart, G. E. Thomas, J. M. Ajello, A. L. Lane, R. W. West, B. R. West, B. R. Sandel, A. L. Broadfoot, D. M. Hunten and D. E. Shemansky, 1991 Galileo Ultraviolet Spectrometer Experiment: Initial Venus and Interplanetary Cruise Results, *Science*, 253, 1548-1550.
- Meier, R. R., 1991, Ultraviolet Spectroscopy and Remote Sensing of The Upper Atmosphere, *Space Sci. Rev.* 58, 1-185.
- Stern, S. A., D. C. Slater, G. R. Gladstone, E. Wilkenson, W. C. Cash, J. C. Green, D. M. Hunten, T. C. Owen and L. Paxton, 1996, Note The 825-1110Å EUV Spectrum of Venus, *Icarus*, 122, 200-204.