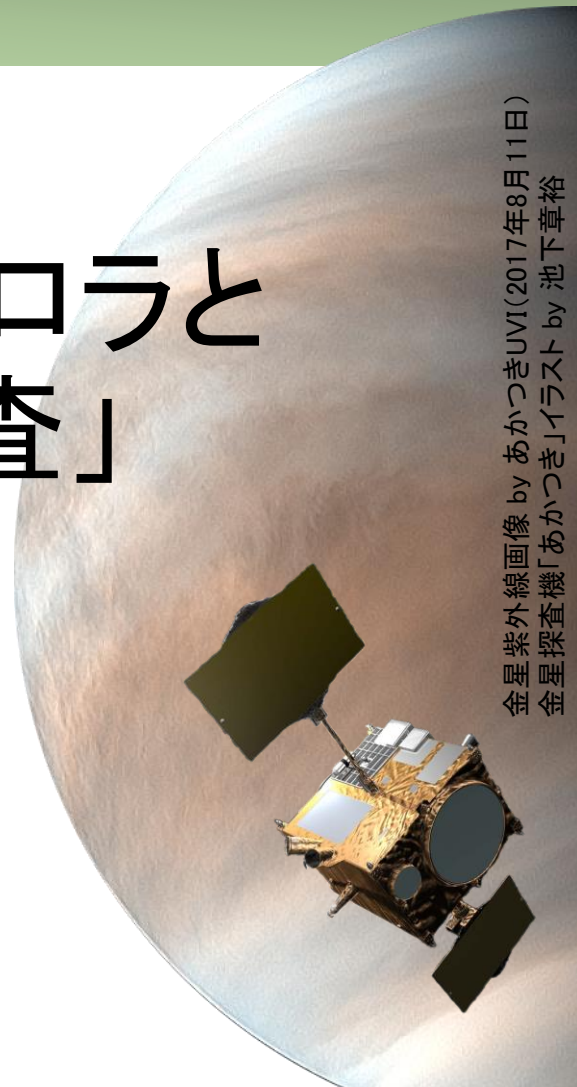




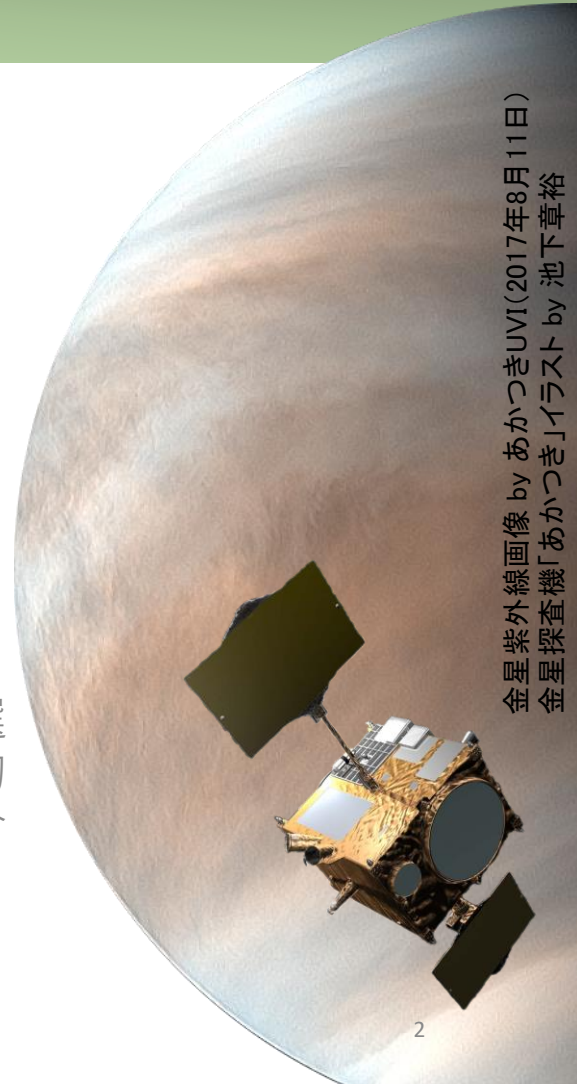
「20世紀の木星オーロラと 21世紀の金星探査」

佐藤 毅彦
(宇宙科学研究所)



ちょっと長めの自己紹介

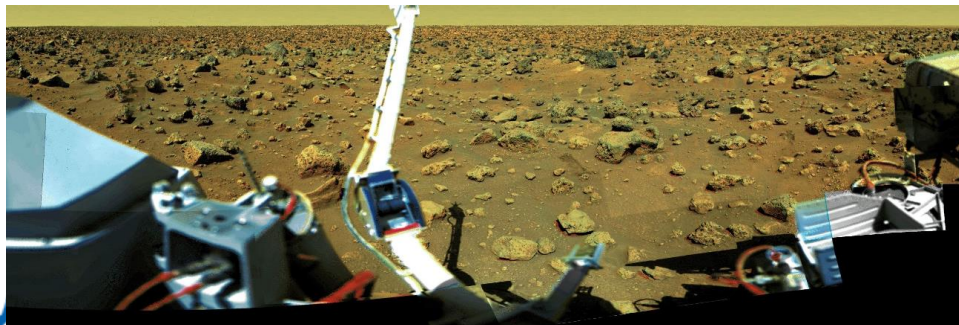
私がいつ何をしてきたか、というのは「本人の積極的選択」に加え「周辺状況がそうだったから」という消極的部分も少なくありません。「ちょっと長め」の自己紹介は、そうした周辺状況の共有も意図しています。





講師(佐藤毅彦)の自己紹介

- 1962年12月に東京生まれ
(同月、マリナー2号金星フライバイ)
- 図工と理科の大好きな小学生時代
 - 1972年ジャコビニ流星雨で空振り
 - 渋谷在住時は五島プラネタリウムに通う
 - パイオニア10号・11号の木星フライバイ
- 武蔵中・高での天文三昧
 - 伝統ある天文部(名称は「太陽観測部」でした)
 - ヴァイキング1号・2号の火星着陸
 - ヴォイジャー1号・2号の木星、土星フライバイ
 - ソ連探査機の金星着陸と地表面写真



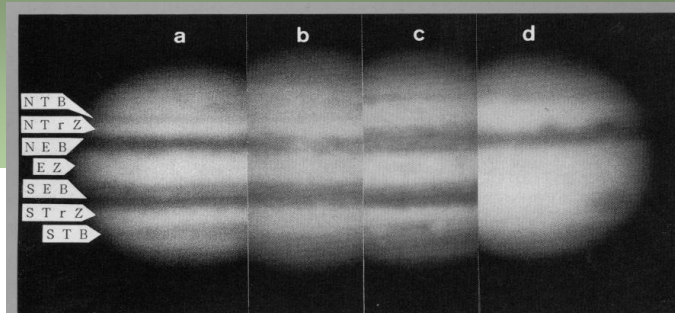
Japan Aerospace Exploration Agency



アセミナー2024
藤津温泉たつぷの湯

講師(佐藤毅彦)の自己紹介

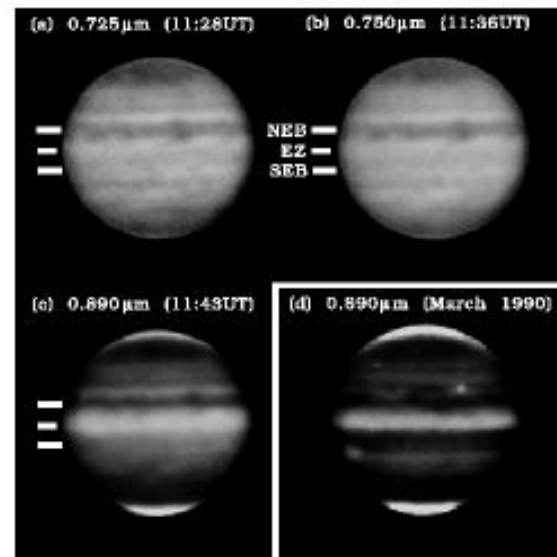
- 一浪を経て、東京理科大学(理・物理)へ
 - ここでも天文研究部の惑星班に所属
 - 入学の年(1982年)に川端潔先生(過去にNASA/GISSで、パイオニア・ヴィーナス探査に参加経験)が理大に着任
 - 1986年度に卒業研究として、木星の写真測光と放射伝達計算による雲層構造の解析(飛騨天文台65cm屈折望遠鏡)



消失した木星の縞 (SEB)

「天文月報」1990年10月号の表紙を飾った「木星SEBの年変化」画像

- 修士・博士課程を通じ「木星大気」を研究
 - 1989年(D1)木星の南赤道縞SEBが淡化(14年ぶり)
 - 岡山188cm反射望遠鏡でメタン吸収帯測光を実施 → D論へ
 - 「天文月報」記事執筆を通じ渡部潤一さん(国立天文台)の知己を得る(1991年のACMでも交流)
 - すばる望遠鏡建設準備でハワイ滞在を開始した渡部さんから「学位取得後にハワイへ来ては？」とのお誘い





金星探査機「あかつき」イラスト by 池下草裕

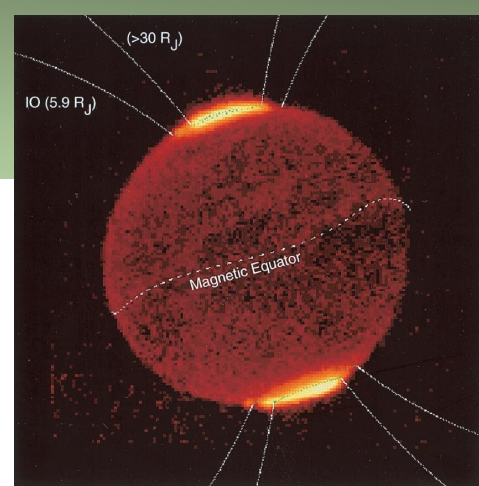
講師(佐藤毅彦)の自己紹介

• ハワイ大学天文学研究所UH/IfAで「木星オーロラ」研究

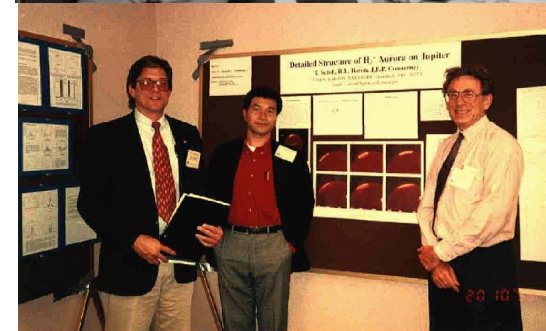
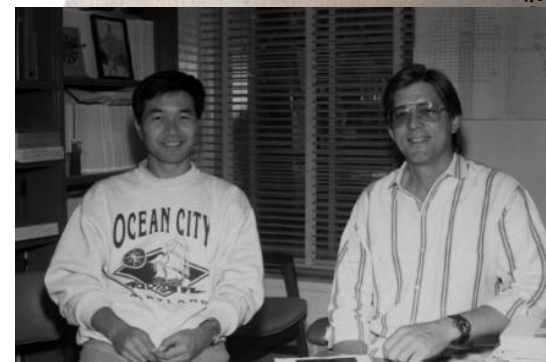
- 1992年3月に学位取得し4月から渡米、Richard Baron, Tobias Owenらと木星赤外オーロラの観測・研究を開始
- 当時の小さな赤外線素子(58 x 62画素InSb)を用いたProtoCAM観測では木星全球をモザイク画像として取得、その画像処理をIRAFで実行
- 1993年3月、オーロラの横に独立し現れる輝点の出現位置と衛星イオ位相との相関を発見！→ Jack Connerney (NASA/GSFC) を主著者としたScience論文(1993年出版)に結実

• NASA/GSFCで木星オーロラ研究を継続

- 256 x 256に画素数の増えた赤外線カメラNSFCAMに木星オーロラ専用狭帯域フィルターを装着し、地上望遠鏡からでは最高クオリティの観測を継続
- 1997年3月までビール自家醸造の傍ら、木星オーロラの研究を行い、ついに1997年4月に帰国
→ 東京理科大学・計算科学フロンティア研究センター(FRCCS)・講師



きUVI(2017年8月11日)
金星探査機「あかつき」イラスト by 池下章裕

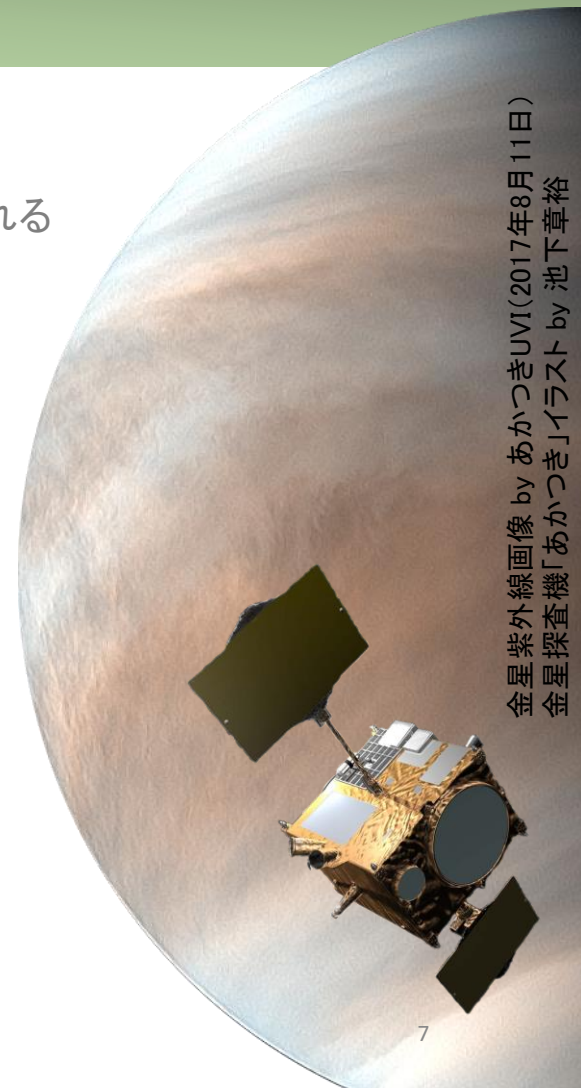


講師(佐藤毅彦)の自己紹介

• 金星大気研究へのシフト

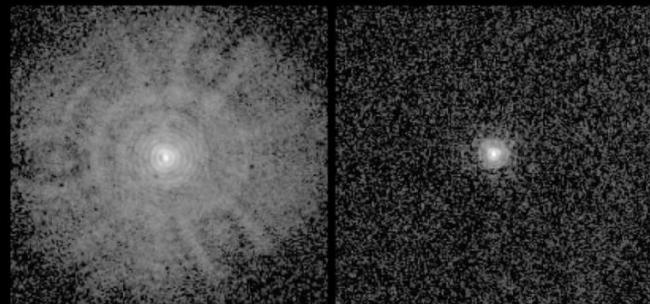


- 理大FRCCSにいた2000年末に突如中村正人さん@東大(当時)からメールが届き、日本の金星探査ミッションへの参加を打診される
- 実は次のポスト(熊本大学教育学部准教授)がほぼ決まっていたタイミングであったが引き受け、熊本と東京を往復する日々へ
- 宇宙モノを手がけたことのない私が、なぜかIR2のPIに…
- 英語が(多少)デキることが買われ、Venus ExpressミッションのInterdisciplinary Scientistに(海外出張が激増)
- 川端潔先生から伝授された放射伝達計算を駆使して、金星全球を覆う雲の研究を継続
- あかつきの歩みについては後述
- 2015年12月、再挑戦であかつきが金星周回軌道入りしたあと、2016年夏からプロジェクトサイエンティストも兼務



金星紫外線画像 by あかつきUVI(2017年8月11日)
金星探査機「あかつき」イラスト by 池下章裕

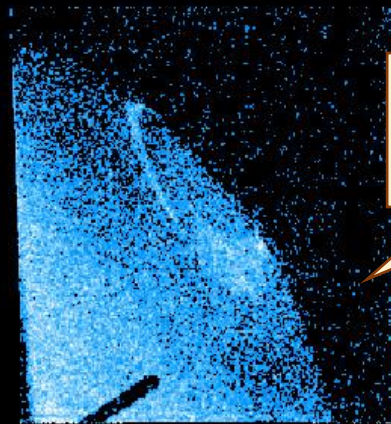
HUBBLE SPACE TELESCOPE FAINT OBJECT CAMERA COMPARATIVE VIEWS OF A STAR



BEFORE COSTAR

AFTER COSTAR

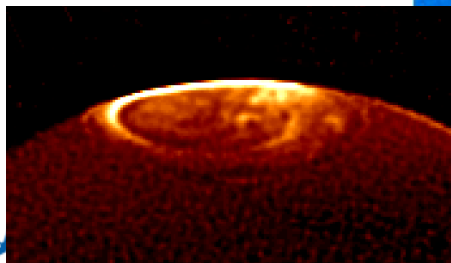
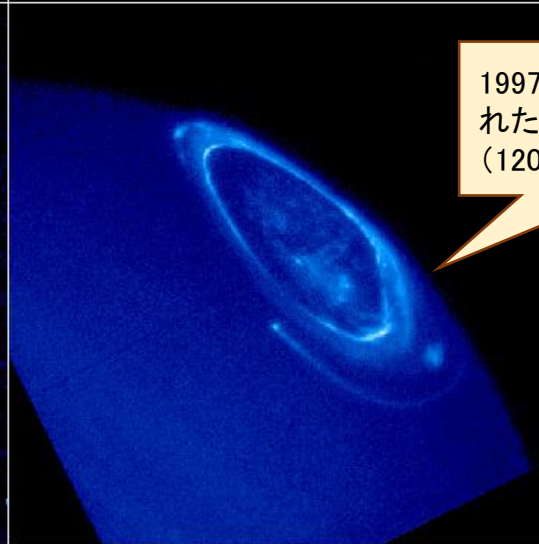
収差補正ミッション(1993
年12月)後のFOCによる
画像(716秒積分)



1993年12月にインスト
ールされたWFPC2による
画像(500秒積分)



1997年にインストールさ
れたSTISによる画像
(120秒積分)



金星外線画像 by あかつきUVI(2017年8月11日)
金星探査機「あかつき」イラスト by 池下章裕

HOPS偏光観測でとらえた金星極ヘイズの年変化(榎本孝之D論)



動き始めたHOPS ～飛騨天文台の新偏光撮像観測装置～

佐藤 毅彦(熊本大学 教育・理科)

tsatoh@educ.kumamoto-u.ac.jp

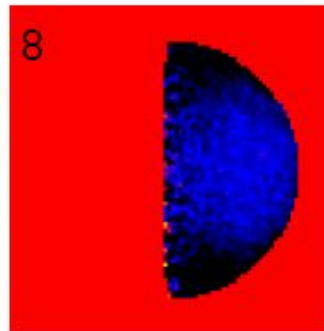
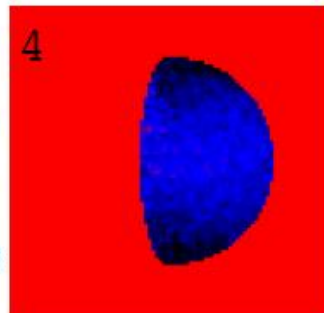
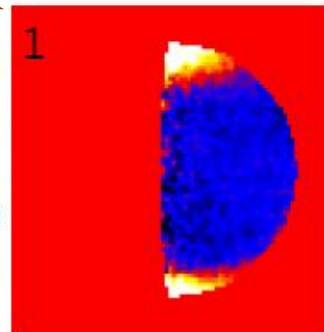
川端 潔、山本 直孝(東京理科大学 理・物理)

天間 崇文(ニューメキシコ州立大学)

赤羽 徳英(京都大学 飛騨天文台)

日本天文学会2001年秋季年会 2001年10月x日(曜) 於:イーグレひめじ

June 2015 Apr. 2014 Aug. 2012



この時期の出版物(書籍)

・シリーズ現代の天文学(日本評論社)第一版

- ・ 日本天文学会創立100周年記念事業として企画された天文学の教科書で、2007年から全17巻が刊行されました。
- ・ 「第9巻 太陽系と惑星」(渡部潤一他編、2008年2月刊行)で「第3章 木星型惑星」を佐藤がまるまる担当しています。
- ・ 渡部潤一さんが編者であり、彼とのつながりが深まった経緯からして、佐藤に「木星型惑星」の章が回ってきたのは(執筆の始まった2005年時点では)自然な流れでした。



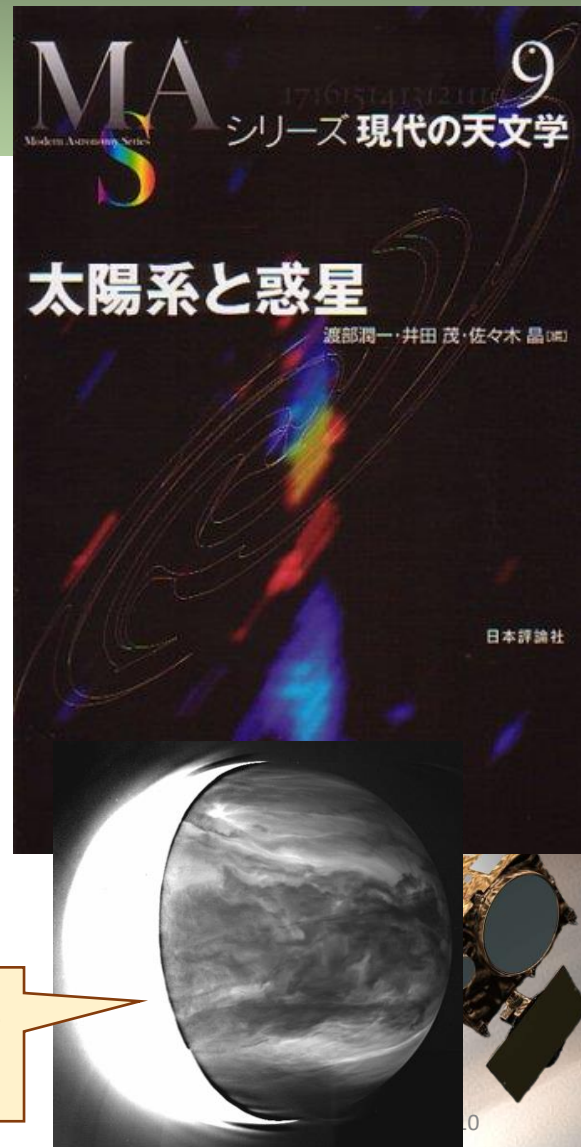
・シリーズ現代の天文学(日本評論社)第二版

- ・ 第9巻の第二版化が2020年から始まりました。第一版刊行後に数多くの太陽系天体探査ミッションによる新たな知見があり、特に改版の必要性が高い巻であったといえます。
- ・ 軸足をすっかり金星に移していた佐藤でしたから、第3章の改版に当たっては、中島健介先生(大気)、木村智樹先生(磁気圏やオーロラ)に教えを乞うて、何とか最新の知見を盛り込むことができた次第です。

第二版の「第2章 地球型惑星」に掲載されたIR2による金星夜面画像

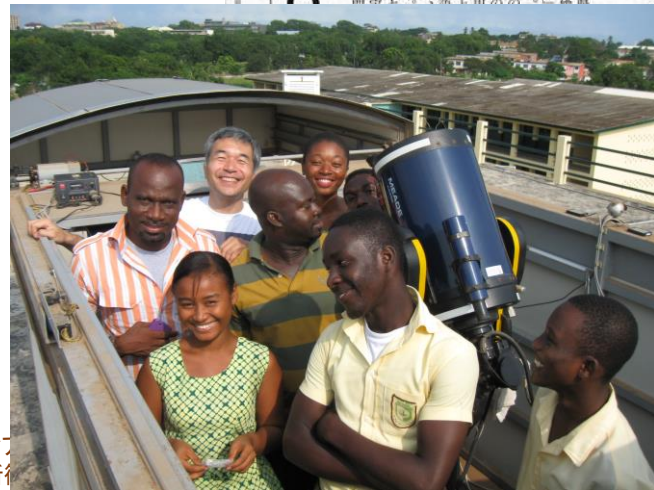
惑星科学フロン

(2024年9月16～19日@新篠津温泉たつぷの湯)



初等中等理科(宇宙・天文分野)教育のワラジ

- 2001年5月から熊本大学教育学部
- 1998年頃から「遠隔操作天文台」開発
 - 慶應義塾高等学校の地学教諭らと共同研究
 - 「インターネット天文台」と命名
 - 初号機を1999年に慶應高校(日吉)校舎屋上に設置
 - 2号機を2000年に東京理科大(野田)校舎屋上に設置
 - 3号機を2002年に熊大教育学部理科棟屋上に設置
 - 初の海外天文台を、2003年にガーナ共和国テマ高等学校屋上に設置(2024年現在も稼働)
- 2005年から大掛かりな天文台ではない
小さく設置の簡単な星座カメラに注力
- 学校現場と連携し、数えきれないほどの教育実践



人気が高い。インターネットを通じて遠隔操作可能な天文台「インターネット天文台」を、今年からガーナに設置する。熊本大学教育学部の佐藤熊大助教授は、今年からガーナに設置する。熊本大学教育学部の佐藤熊大助教授は、今年からガーナに設置する。

インターネットを通じて遠隔操作可能な天文台「インターネット天文台」を、今年からガーナに設置する。熊本大学教育学部の佐藤熊大助教授は、今年からガーナに設置する。熊本大学教育学部の佐藤熊大助教授は、今年からガーナに設置する。

インターネットを通じて遠隔操作可能な天文台「インターネット天文台」を、今年からガーナに設置する。熊本大学教育学部の佐藤熊大助教授は、今年からガーナに設置する。熊本大学教育学部の佐藤熊大助教授は、今年からガーナに設置する。

インターネットを通じて遠隔操作可能な天文台「インターネット天文台」を、今年からガーナに設置する。熊本大学教育学部の佐藤熊大助教授は、今年からガーナに設置する。熊本大学教育学部の佐藤熊大助教授は、今年からガーナに設置する。



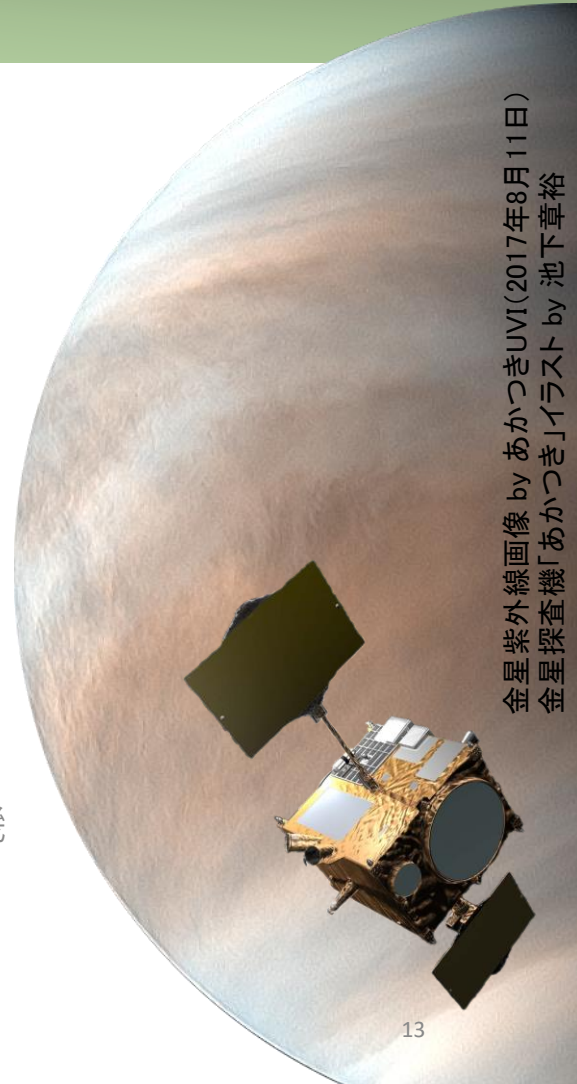
ガーナ・インターネット天文台から見た惑星

- 2018年5月（良シーイングの日が多かった）



木星オーロラ研究史 (木星の独特な磁気圏)

学位取得（1992年3月）までは木星大気の研究をしていた私ですから、この項は「あとで学んだ」ことの紹介となります。木星からやってくる電波の謎解きから探査機による木星磁気圏直接観測へと続いてゆきます。



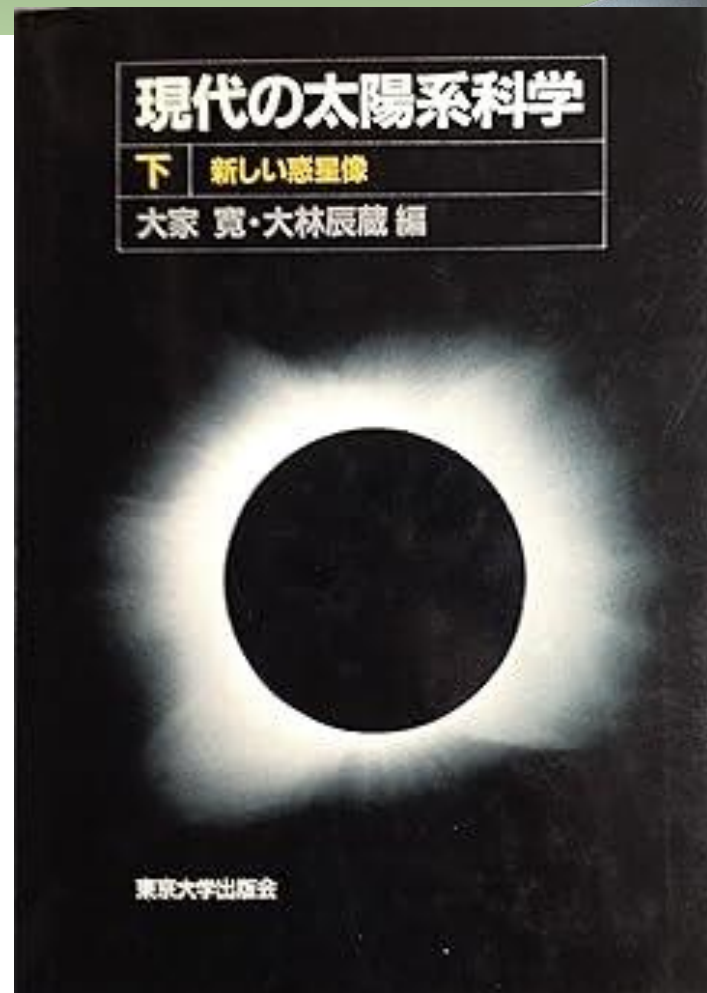
木星からやってくる電波

• 参考書籍

- 現代の太陽系科学、下：新しい惑星像
(大家寛・大林辰蔵 編、東京大学出版会、1984年)
 - 第4章：巨大惑星のオーロラ(大家寛)
 - 第2章：イオの火山
- ここから少し本書にしたがって歴史をレビュー

• 電波天文学と木星電波

- ジャンスキーによる銀河電波の発見(1932年)
- バースト性のデカメータ電波(周波数20 MHz付近)
をバークが木星からの電波と同定(1955年)
- 多様なバーストや偏波状態が観測される(1960年代)
- 体系Ⅲの1周期中に二つ、電波出現頻度の高い
経度が発見される
 - 「主」電波源 … 経度230度～270度
 - 「早期」電波源 … 経度110度～150度



二つの電波源と多様な電波バースト

- 東北大学では1974年10月から木星電波を観測

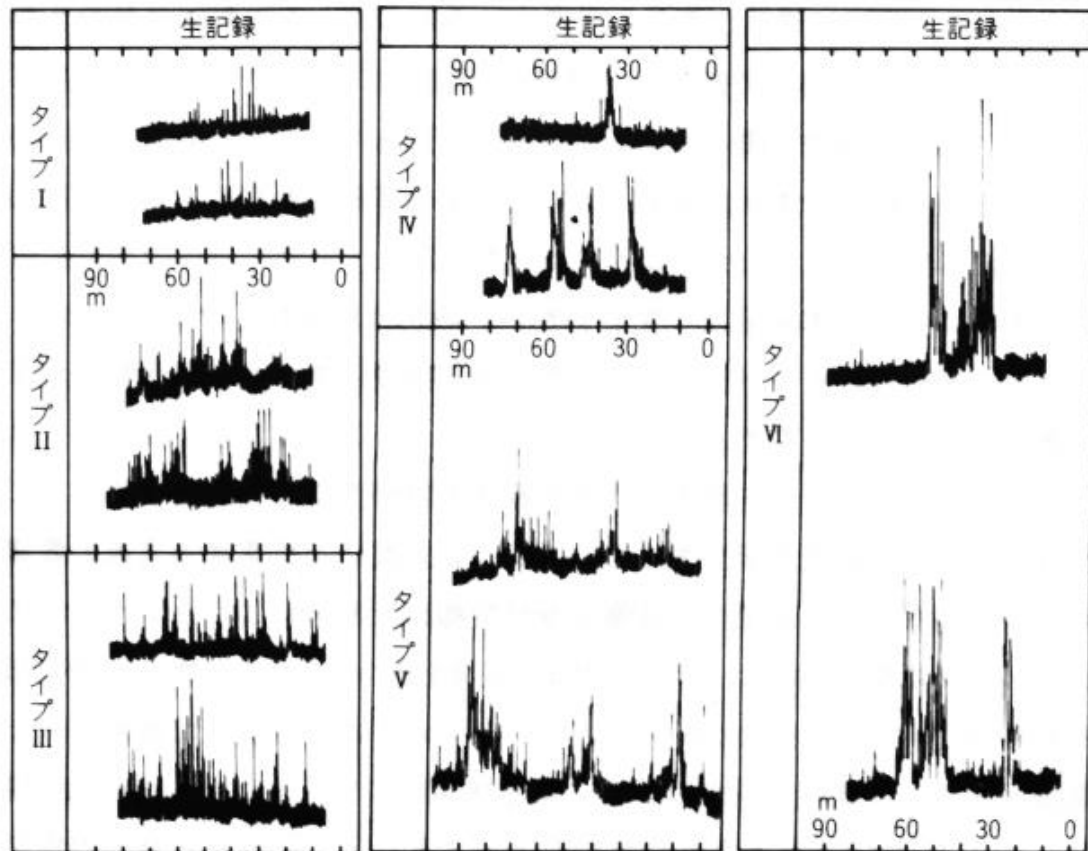
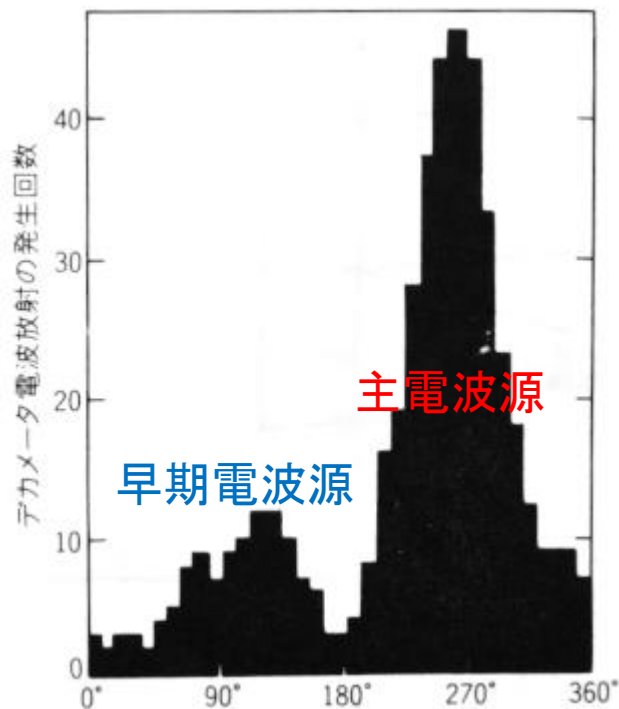


図 4.11 6つに分類される木星電波バーストの様相。タイプ I はきわめて短いパルス状の変化で、タイプ IV は比較的長い持続時間を持っている。その他は中間の形であるが、特にタイプ VI は巨大バーストである。

惑星科学フロンティアセミナー2024
2024年9月16-19日@新篠津温泉たつぷの湯

衛星イオによる変調

• ビッグによる発見(1964年)

- 横軸に体系Ⅲ経度、縦軸に衛星イオの位相角をとったグラフに、木星電波の出現頻度をプロット
- 特定のイオ位相角で電波出現頻度が高くなっていることが明らかに
 - 「主」電波源 … イオA電波源
 - 「早期」電波源 … イオB電波源
 - さらにイオC電波源

• 1970年代には

- 地上からの分光観測によりイオ周辺にナトリウムの雲を発見(1973年、Robert A. Brown)
- 同じ領域に水素からの紫外線を観測(パイオニア10号)
- イオによる電波掩蔽観測(パイオニア10号)により電離層の存在を発見(1973年12月)
- イオ・フラックスチューブ(IFT)を通過
- 木星磁場の全容が明らかに

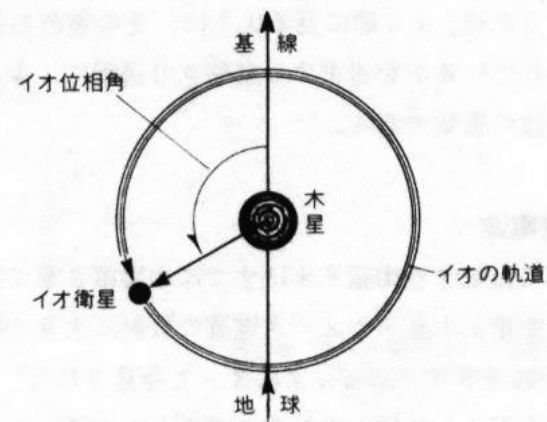
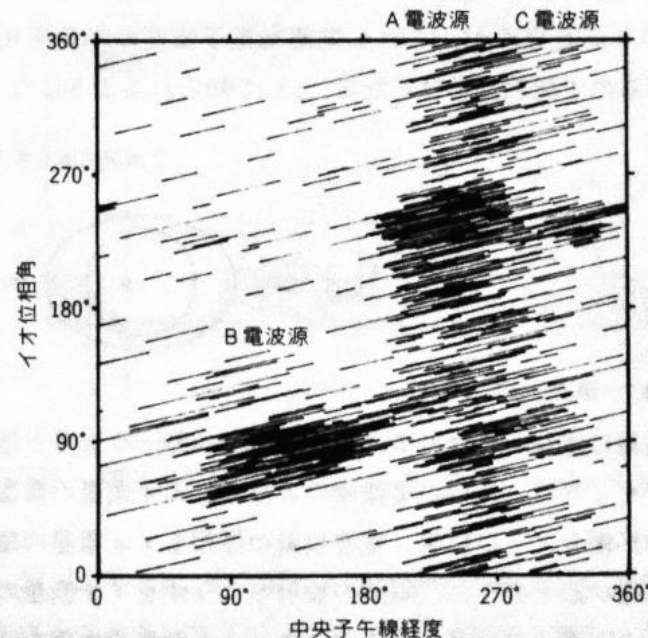


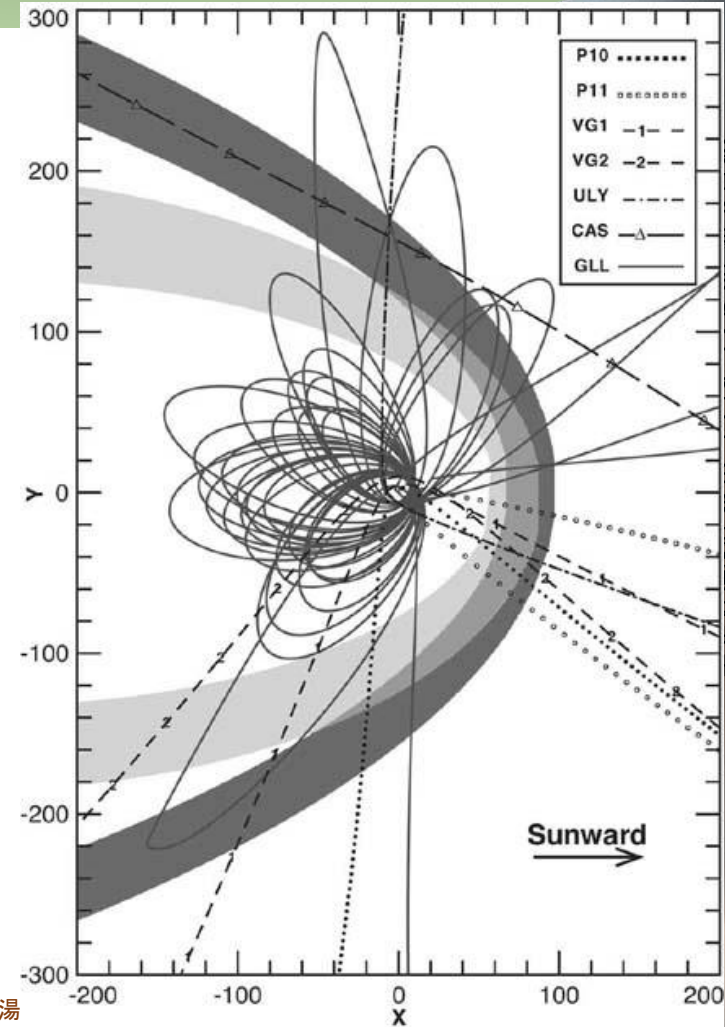
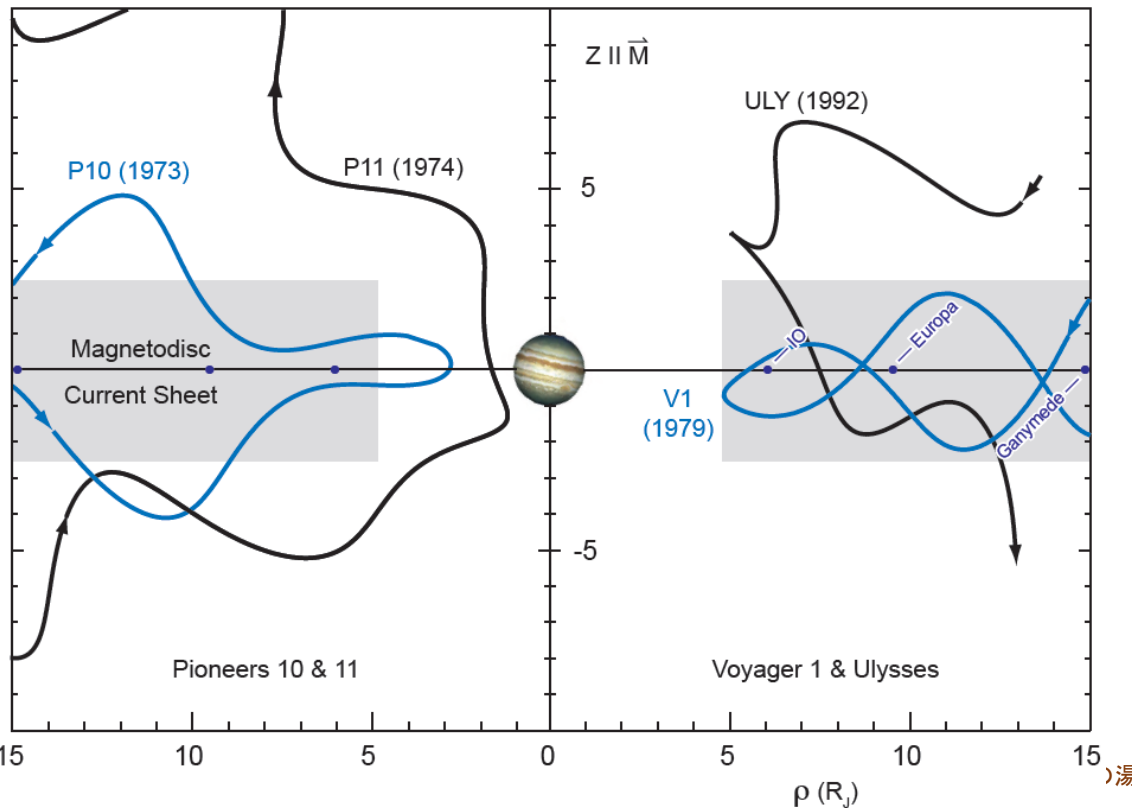
図 4.8 イオの位相角の定義.

早期電波源 主電波源



探査機の木星フライバイと磁場測定

- 木星磁場の全容が明らかに
 - 磁力計を搭載した探査機による磁場の直接計測
 - パイオニア10号・11号、ヴォイジャー1号・2号



惑星磁場の「表現」

- 球面調和関数で表したスカラーポテンシャル

$$V = a \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \underbrace{\left(\frac{r}{a} \right)^n}_{\text{external}} T_n^e + \underbrace{\left(\frac{a}{r} \right)^{n+1}}_{\text{internal}} T_n^i \right\} \quad \text{with} \quad \underbrace{T_n^i}_{\text{internal}} = \sum_{m=0}^n \left\{ P_n^m(\cos \theta) \left[g_n^m \cos(m\phi) + h_n^m \sin(m\phi) \right] \right\}$$

- その勾配としての磁場

$$\mathbf{B} = -\nabla V$$

$$B_r = -\frac{\partial V}{\partial r} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left\{ (n+1) \left(\frac{a}{r} \right)^{n+2} \left[g_n^m \cos(m\phi) + h_n^m \sin(m\phi) \right] P_n^m(\cos \theta) \right\}$$

$$B_\theta = -\frac{\partial V}{r \partial \theta} = -\sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left\{ \left(\frac{a}{r} \right)^{n+2} \left[g_n^m \cos(m\phi) + h_n^m \sin(m\phi) \right] \frac{dP_n^m(\cos \theta)}{d\theta} \right\}$$

$$B_\phi = -\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial V}{\partial \phi} = \frac{1}{\sin \theta} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left\{ m \left(\frac{a}{r} \right)^{n+2} \left[g_n^m \sin(m\phi) - h_n^m \cos(m\phi) \right] P_n^m(\cos \theta) \right\}$$



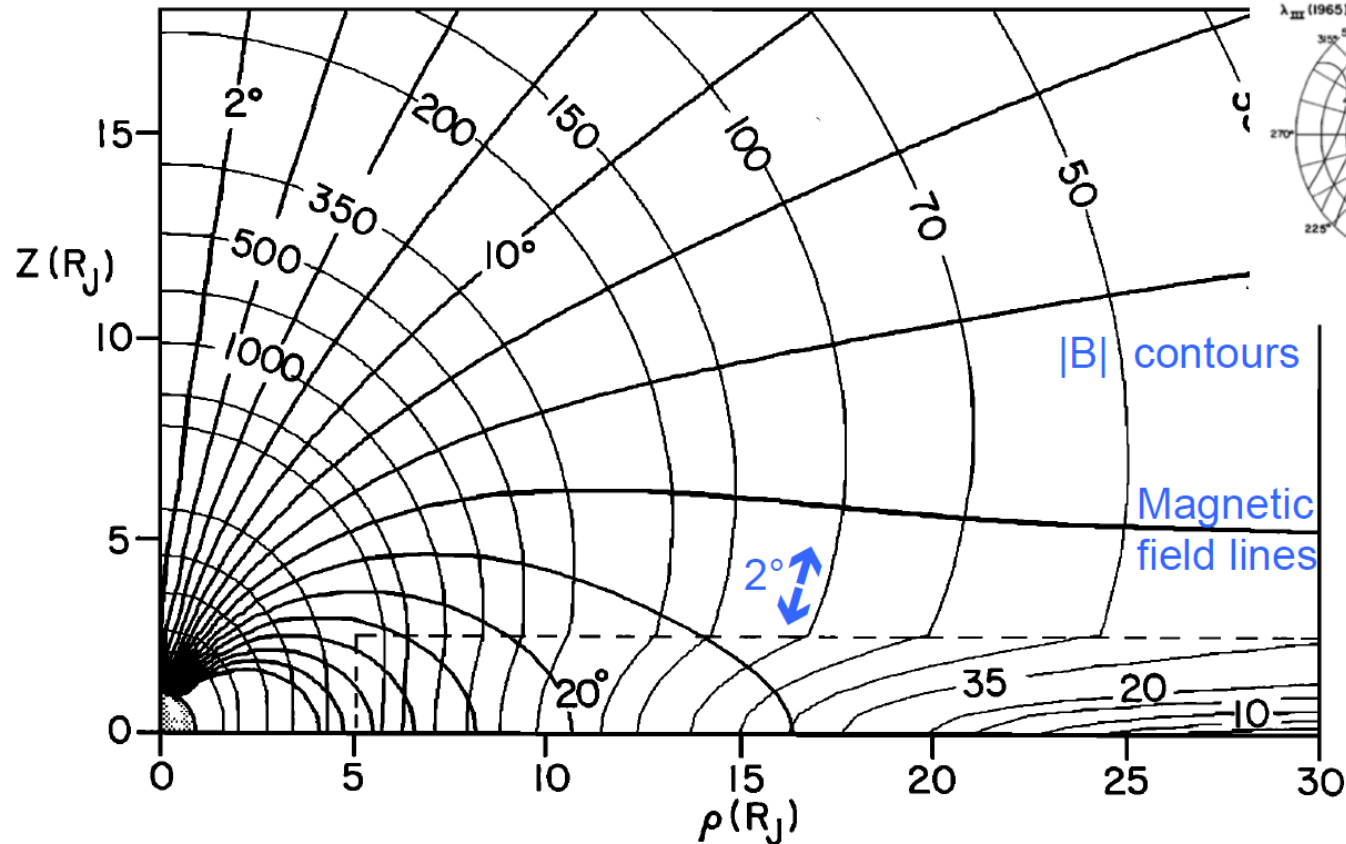
- $$\theta_M = \tan^{-1}(\sqrt{(g_1^1)^2 + (h_1^1)^2}/g_1^0)$$

(2C

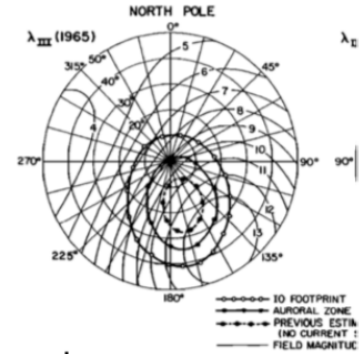
プラズマディスクにより引き延ばされた磁場

- 衛星イオを起源としたプラズマに満たされた木星磁気圏

CONNERNEY ET AL.: JOVIAN CURRENT SHEET AND MAGNETOSPHERE (1981)



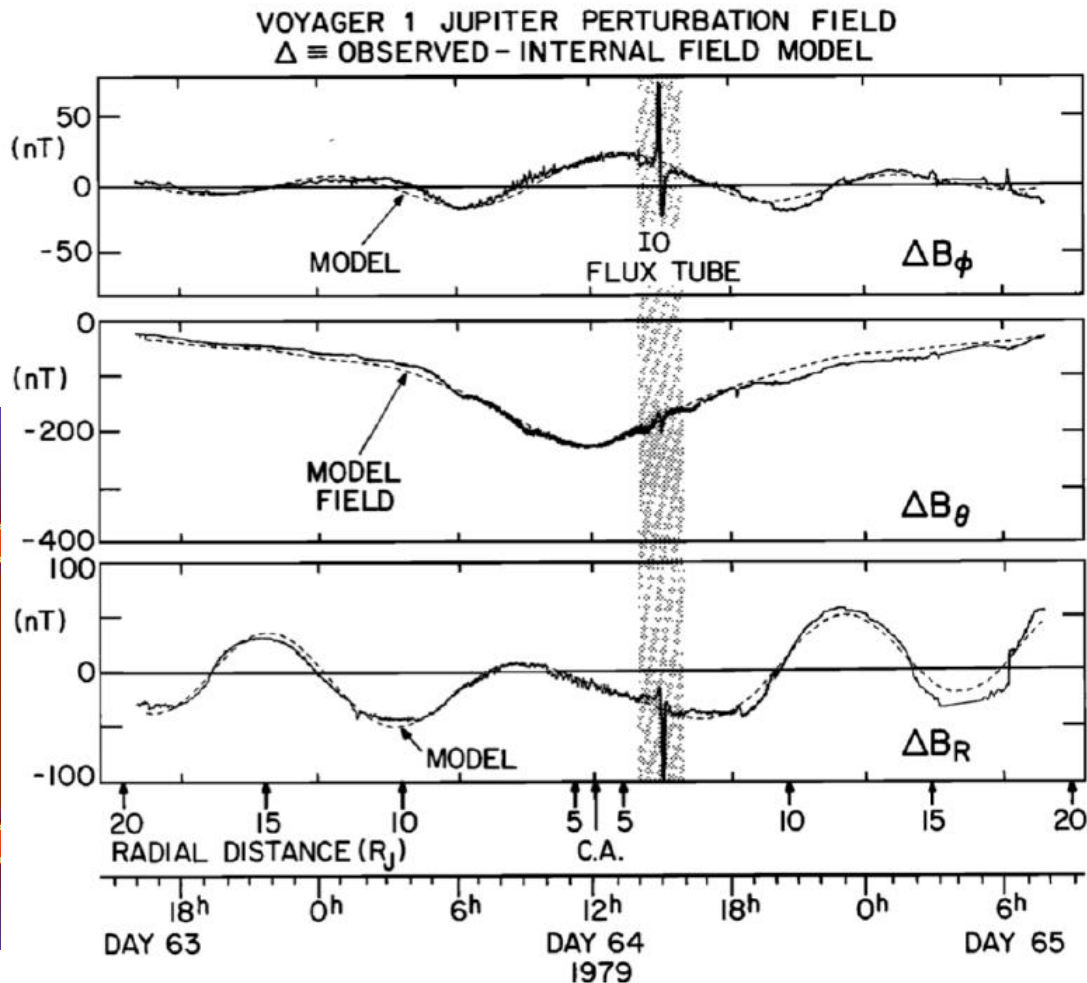
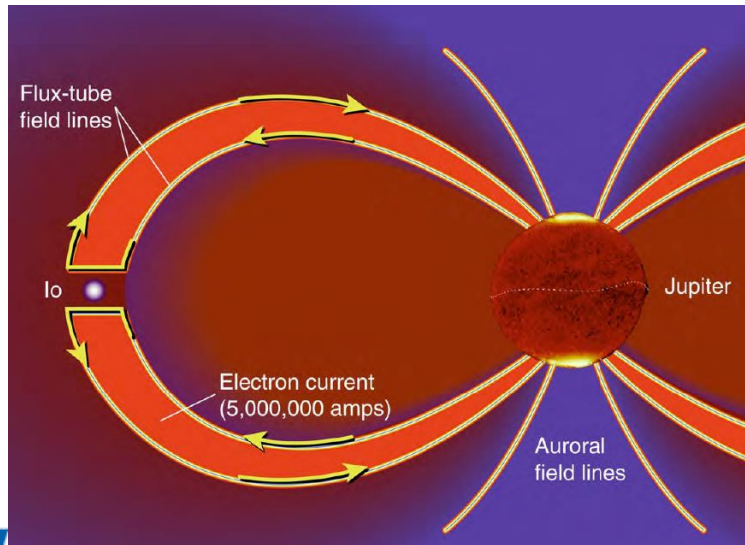
8379



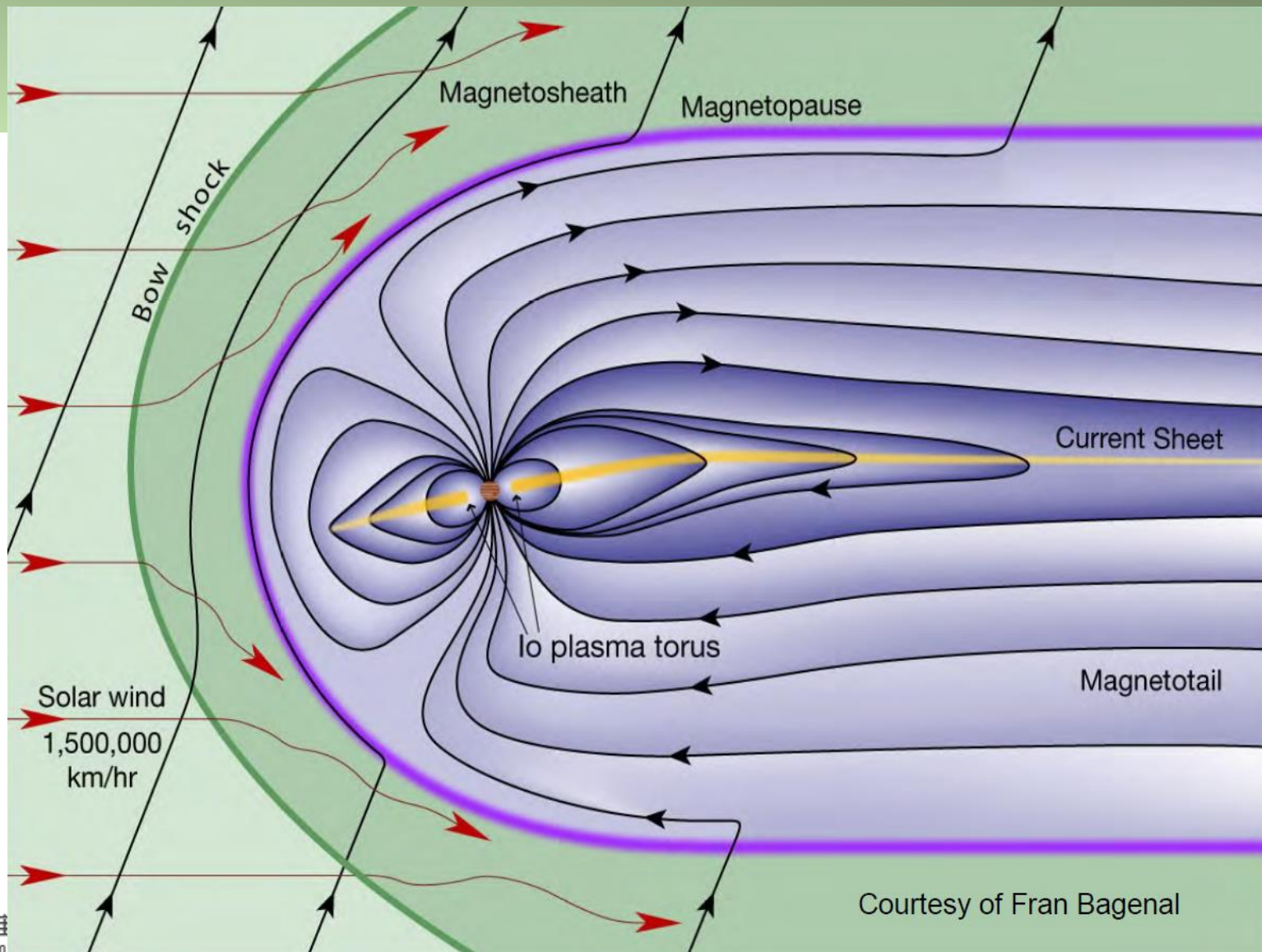
イオ・フラックスチューブの観測的証拠

• 発見はパイオニア10号

- イオを通る磁力線を横切った際に、多量で高エネルギーの電子の存在を観測
- ヴォイジャー1号の磁場観測にも明瞭なシグナルを観測
→ 数百万アンペアの電流系

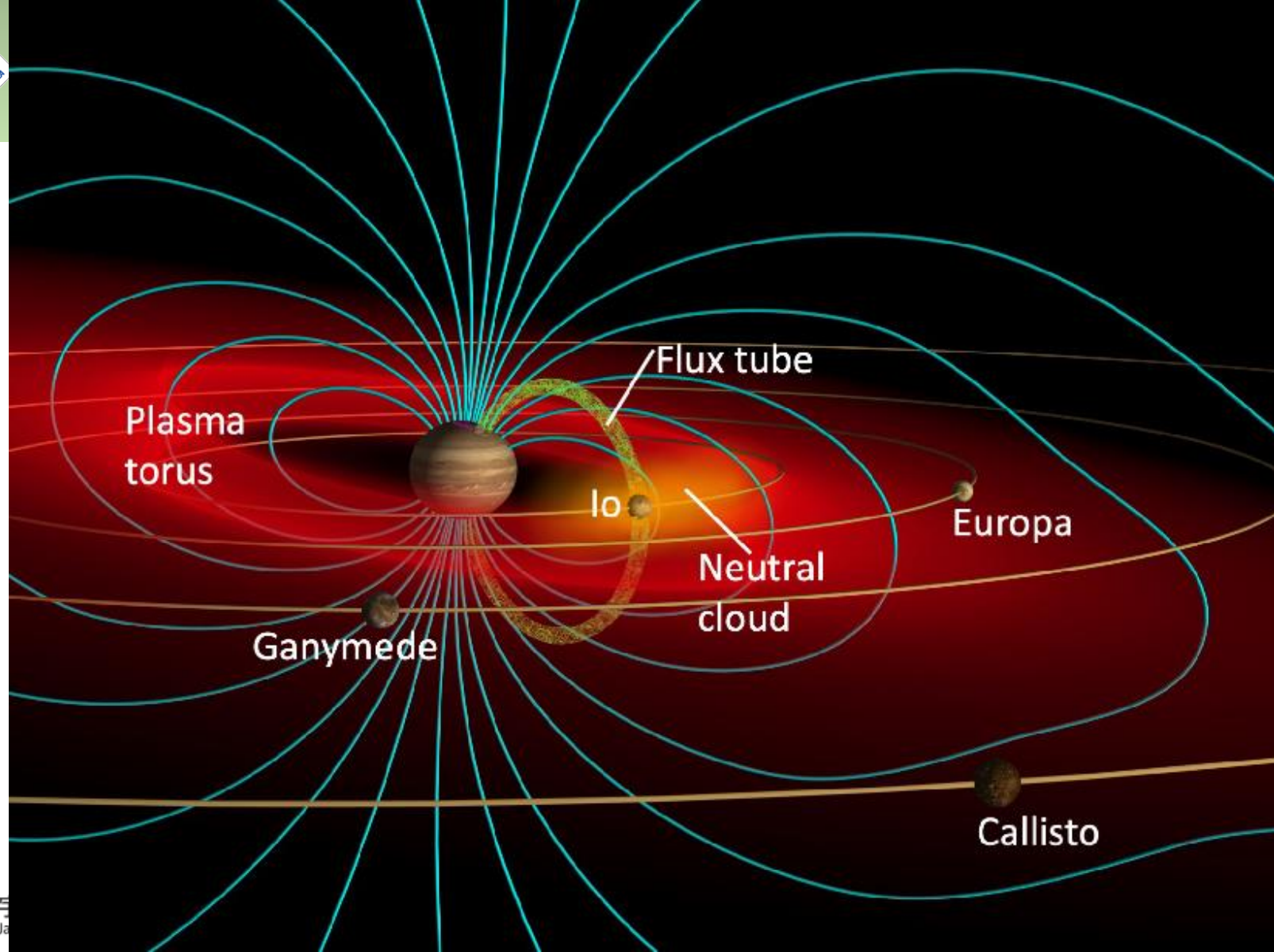


(2024)



Courtesy of Fran Bagenal



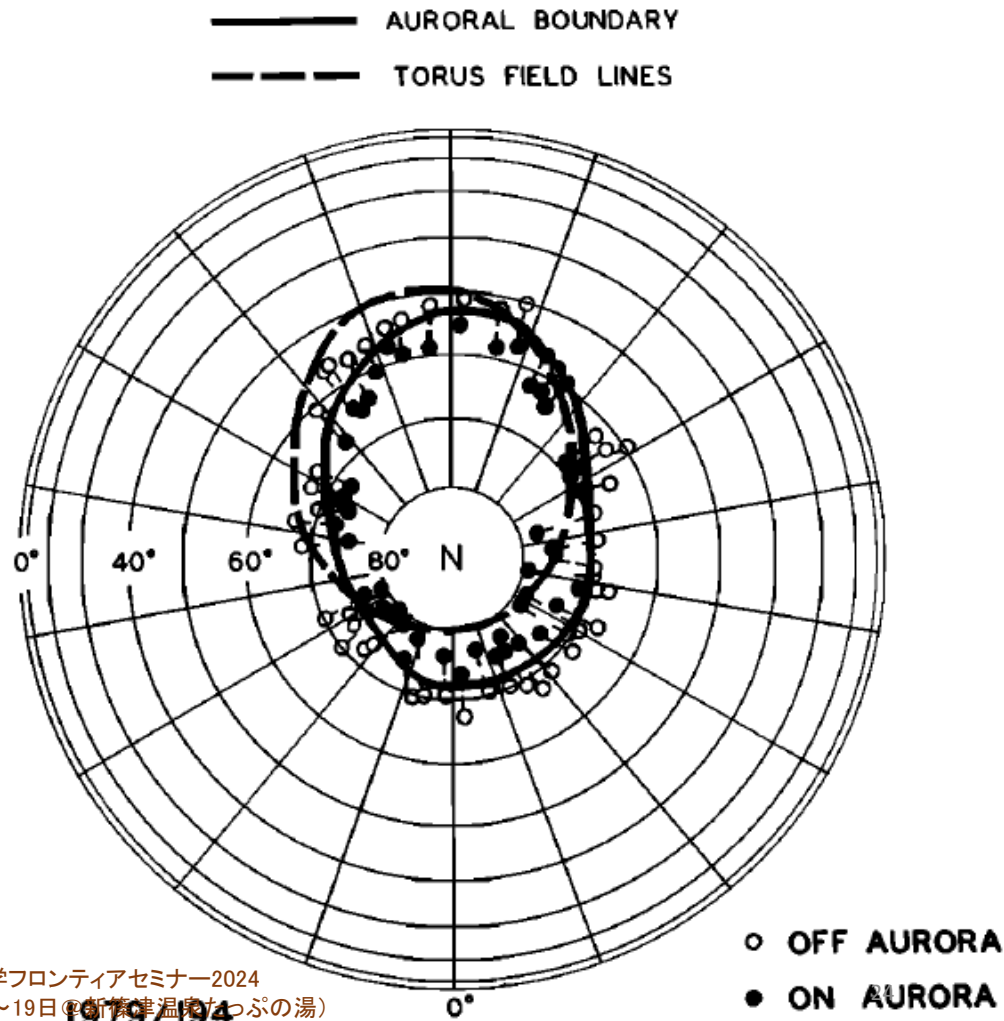


金星紫外線画像 by あかつきUVI(2017年8月11日)
金星探査機「あかつき」イラスト by 池下章裕

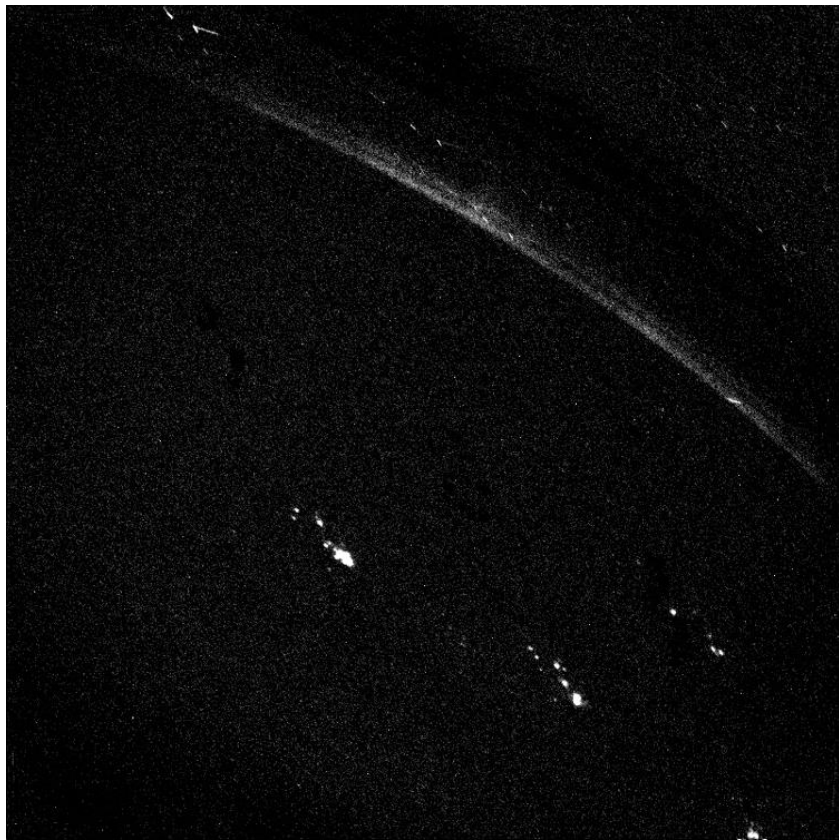


UVSによる極増光のマッピング

- Broadfoot et al. (1981)
 - 水素原子($\text{Ly } \alpha$)・分子発光 (Lyman and Werner bands)
 - 南北スリットスキャンの際にスリット端にオーロラが入るタイミングからその位置を決めている(リムに近いため、誤差はある)
 - イオトーラスのフットプリントに合うとしている
 - 発光強度 100 kR 以上
 - 1.2×10^{13} Wのエネルギー注入
 - ヴォイジャー1号と2号とで、同じ形状を観測
 - ヴォイジャー1号のときは2号のときより倍くらい明るく観測
 - IUE観測の方が大きな明るさ変動を報告 (Clarke et al., 1980)



初めて捉えられたオーロラの姿



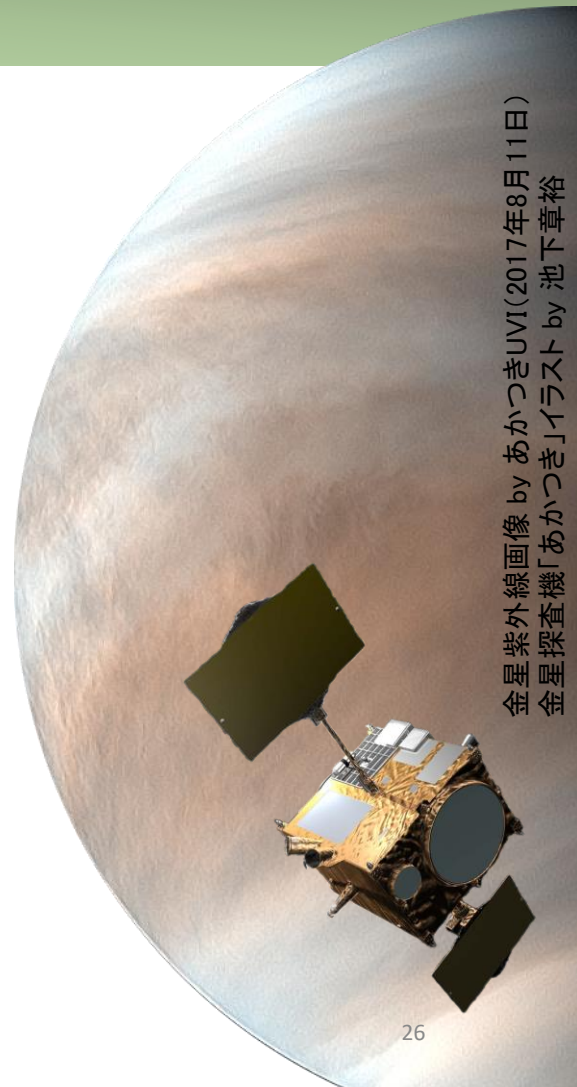
- This image of Jupiter was taken by Voyager 1 about 6 hours after closest approach on 5 March 1979. The camera is looking back into Jupiter's shadow from a distance of 320,000 km. The north pole is on the limb at upper center, and the light along the limb is an aurora. The bright spots near the center and bottom of the frame are thought to be lightning, displaced diagonally due to scan platform stepping during the long (3 minute 12 second) exposure. They may be auroral in nature, but are much brighter than would be expected for such features. Jupiter is 71,492 km in diameter and north is at roughly 1:30 (Voyager 1, P-21283)



金星紫外線画像 by あかつきUVI(2017年8月11日)
金星探査機「あかつき」イラスト by 池下章裕

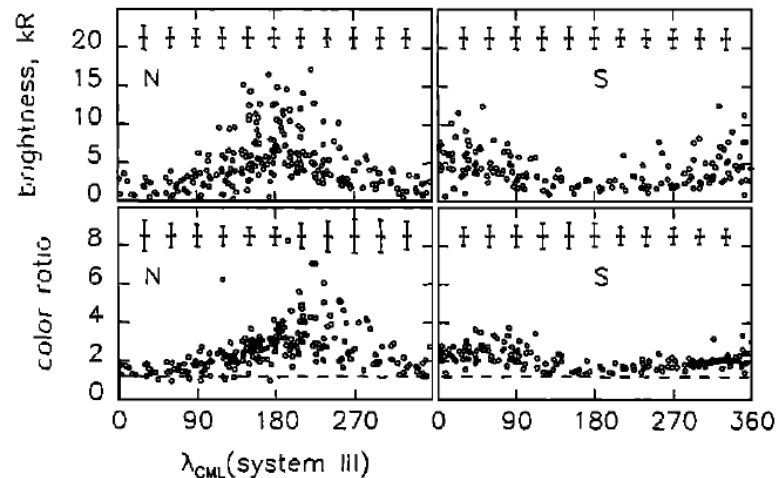
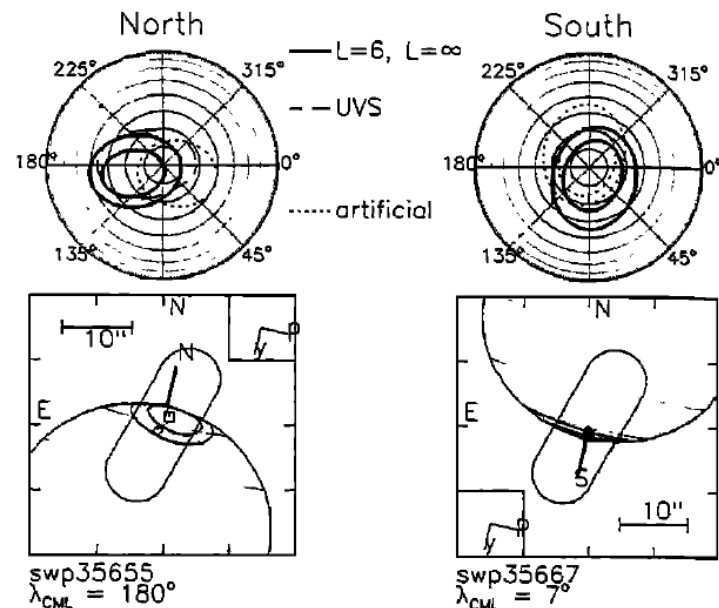
木星オーロラ研究史 (本格的なオーロラ観測)

ヴォイジャー1号がオーロラ（可視光、紫外線）を捉えてから、IUE衛星や地上望遠鏡、そしてハッブル宇宙望遠鏡で木星オーロラの複雑な姿が捉えられるようになります。



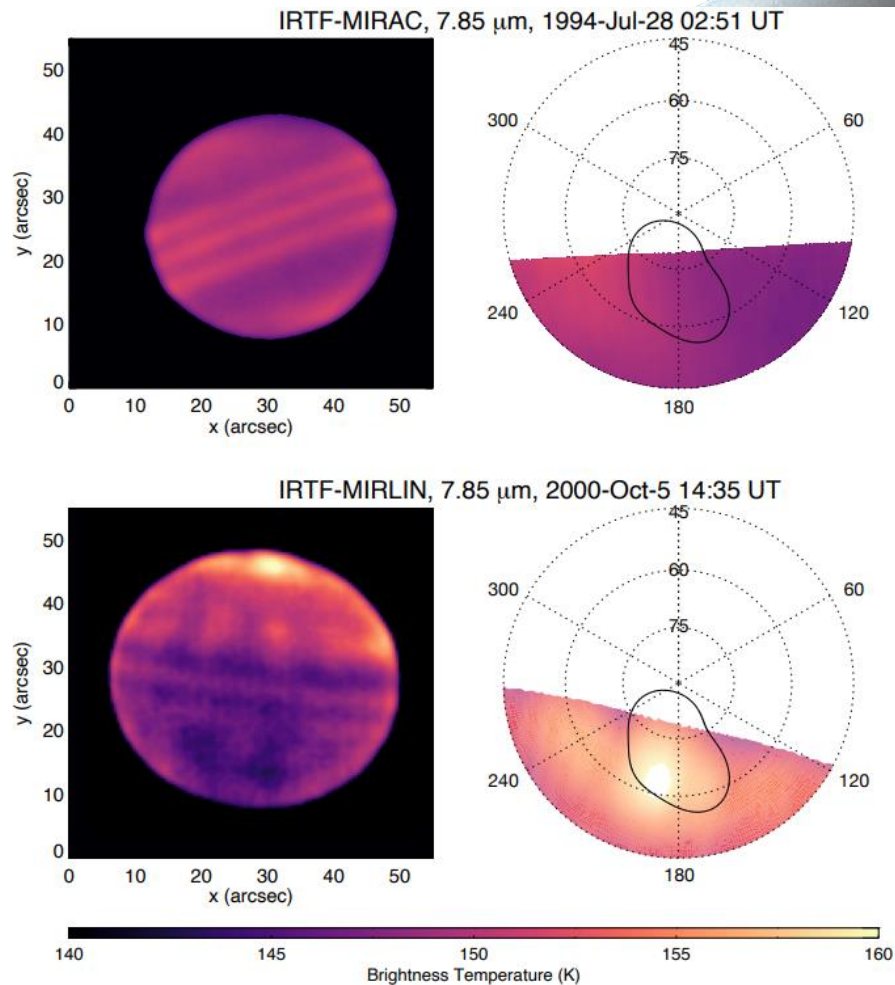
紫外線オーロラ長期観測

- Livengood et al. (1990)
 - International Ultraviolet Explorer (IUE)による観測を実施(1978年～1990年)
 - H_2 発光(1557-1619 Å, 1230-1300 Å)
 - 北極では体系Ⅲ経度200度付近で明るさのピーク
 - 南極では体系Ⅲ経度20度付近で明るさのピーク
 - 炭化水素による吸収深さも体系Ⅲ経度で変化(降下粒子の到達深度の変化なのか、高高度の炭化水素の増減なのかは判別できない)



中間赤外発光の発見

- 8ミクロン中間赤外線観測により、木星の極増光が捉えられた
 - Caldwell et al. (1980)など
 - 1~10 mbar高度でのCH₄やその他の炭化水素による発光
 - ときにホットスポット状、ときに「ボンヤリ広がった」発光
 - その深さまで達するオーロラ降下粒子による加熱起源かと推定された
 - 必要とされるような降下粒子エネルギースペクトルは観測されていない (Junoミツション)
 - 弱い相関が確認されたのは、中間赤外線観測の前7日間で平均した太陽風動圧またはその偏差 → 部分的には太陽風の影響、残りは磁気圏の自励的な何か (Sinclair et al., 2023)

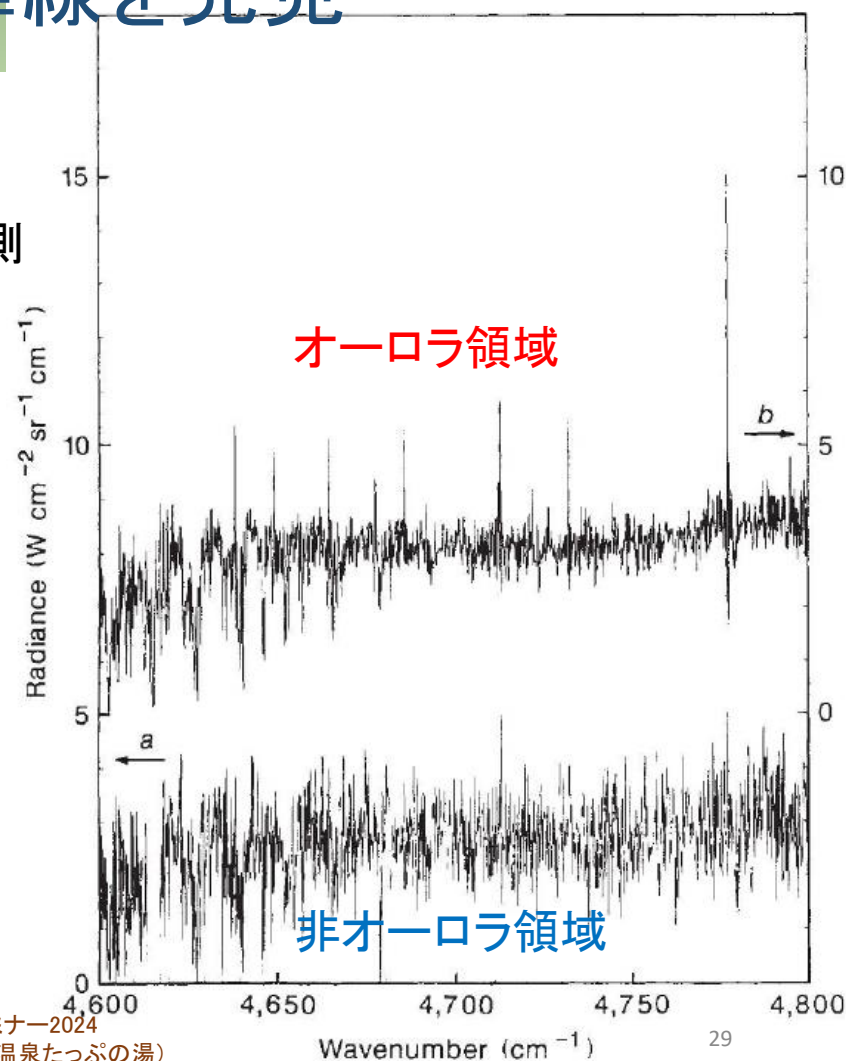


木星大気中に H_3^+ 発光輝線を発見

- Drossart et al. (1989)
 - Canada-France-Hawaii Telescope (CFHT) Fourier Transform Spectrometer (FTS)観測
 - 木星南半球の極域を観測
 - H_3^+ の最初の分光的検出
 - H_3^+ はヴォイジャーが木星磁気圏内で検出している
 - 波長2 μm 付近の輝線は H_3^+ の $2\nu_2$ バンドに同定された
 - オーロラ領域での H_3^+ 生成は、降下粒子等により H_2 がイオン化され、周囲の H_2 と反応

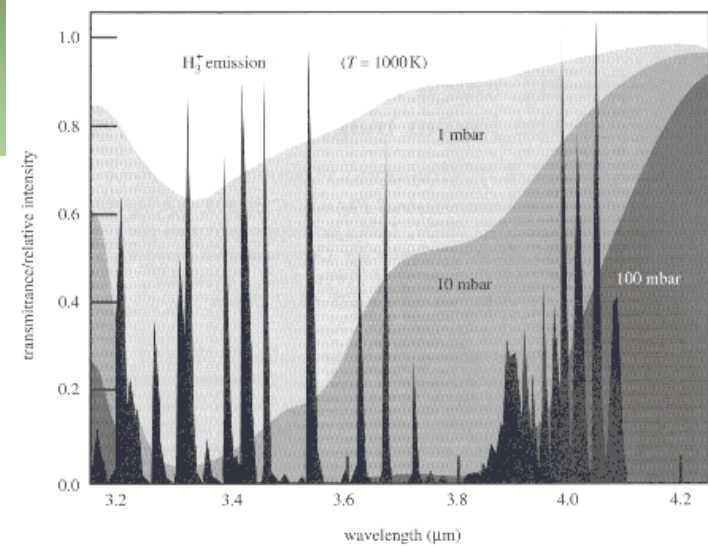
$$\text{H}_2^+ + \text{H}_2 \longrightarrow \text{H}_3^+ + \text{H}$$
 - H_3^+ が失われるメカニズムの一例

$$\text{H}_3^+ + \text{e}^- \longrightarrow \text{H}_2 + \text{H}$$



H₃⁺「オーロラ」の撮像

- 1991年10月、*Nature*にKimら、Baronらの2編のLetters
- IRTF望遠鏡とProtoCAMを使用
 - 3 - 4 μm 帯 (H₃⁺の ν_2 バンド)
 - 強いメタン吸収が木星ディスクを暗くするため、高層大気の放射をハイコントラストで観測可能
 - 波長3.4 μm (Circular Variable Filter) が最適



LETTERS TO NATURE

Images of aurorae on Jupiter from H₃⁺ emission at 4 μm

Sang J. Kim*, Pierre Drossart†, John Caldwell‡, Jean-Pierre Maillard§, Thomas Herbst|| & Mark Shure||

* Astronomy Program, University of Maryland, College Park, Maryland 20742, USA

† CNRS/UA264, Observatoire de Paris, Section d'Astrophysique, 92195 Meudon, France

‡ Department of Physics, York University, 4700 Keele Street, North York, Ontario M3J 1P3, Canada

§ Institut d'Astrophysique, 98 Boulevard Arago, 75104 Paris, France

|| IRTF Institute for Astronomy, University of Hawaii at Manoa, 2680 Woodlawn Drive, Honolulu, Hawaii 96822, USA

LETTERS TO NATURE

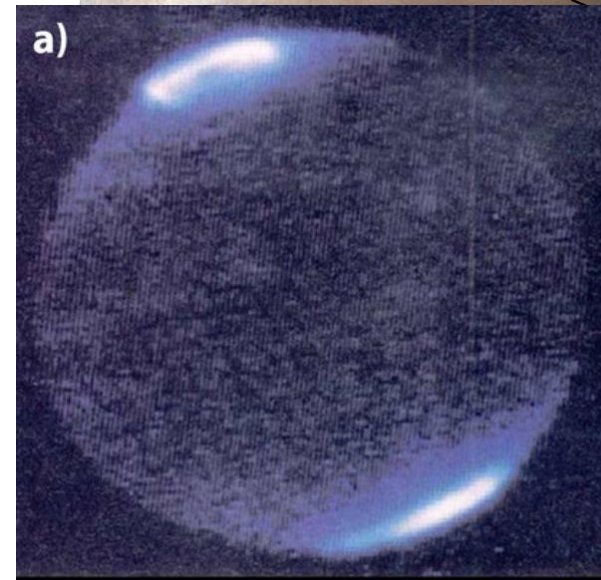
Imaging Jupiter's aurorae from H₃⁺ emissions in the 3-4 μm band

Richard Baron*, Robert D. Joseph*, Tobias Owen*, Jonathan Tennyson†, Steven Millert, & Gilda E. Ballester‡

* Institute for Astronomy, University of Hawaii, 2680 Woodlawn Drive, Honolulu, Hawaii 96822, USA

† Department of Physics and Astronomy, University College London, Gower Street, London WC1E 6BT, UK

‡ Department of Earth Sciences, University of Oxford, Parks Road, Oxford OX1 3PR, UK



そして赤外画像中にIFTの発見

- 佐藤から共同研究者らへのメール
(1993年3月11日付)

From: satoh (Takehiko Satoh)

To: jec@lepijec.gsfc.nasa.gov, jh@mit.edu, owen@hubble, rlb@wirth

Cc: satoh@galileo

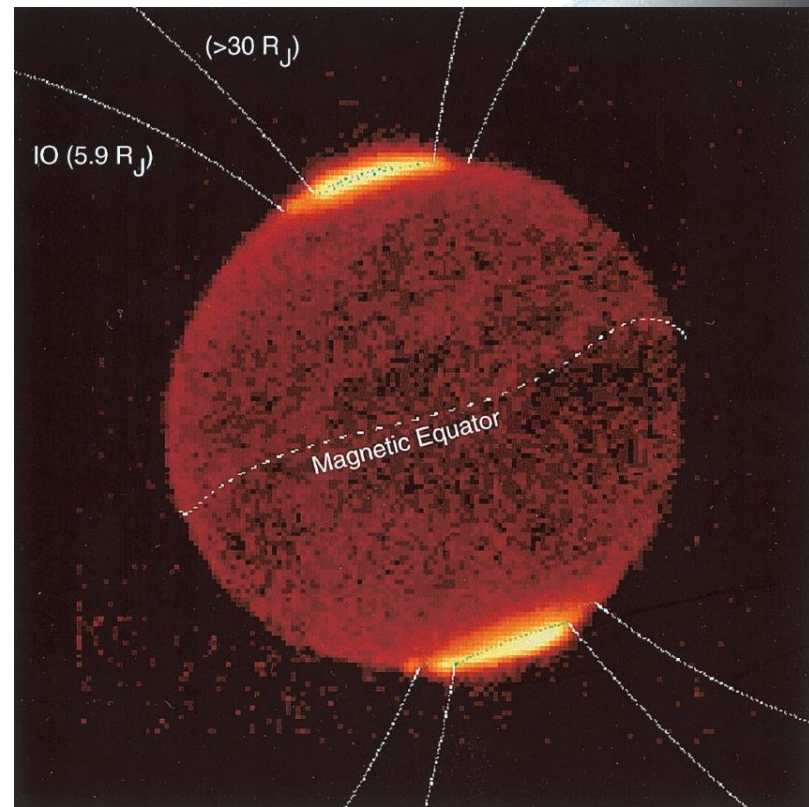
Subject: Io footprint

Date: Thu, 11 Mar 93 11:34:57 HST

Detection of Io footprint on Jupiter
- Bright Spots Isolated from Aurora Oval -

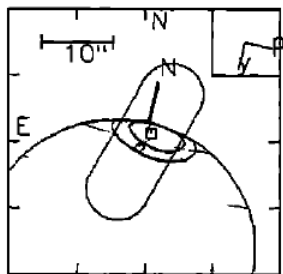
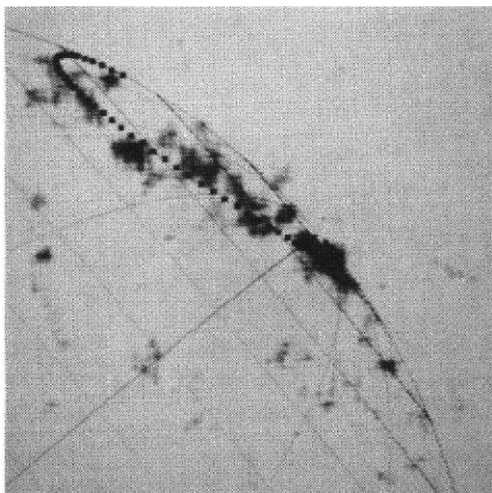
Takehiko Satoh

I have detected the Io footprint on Jupiter! It was observed as a bright spot which was isolated from the main aurora oval at 3.4 micron. Images taken in January, February, and March, 1992 have been already checked and a considerable number of images were found to be showing the Io footprint near or on the planetary limb.

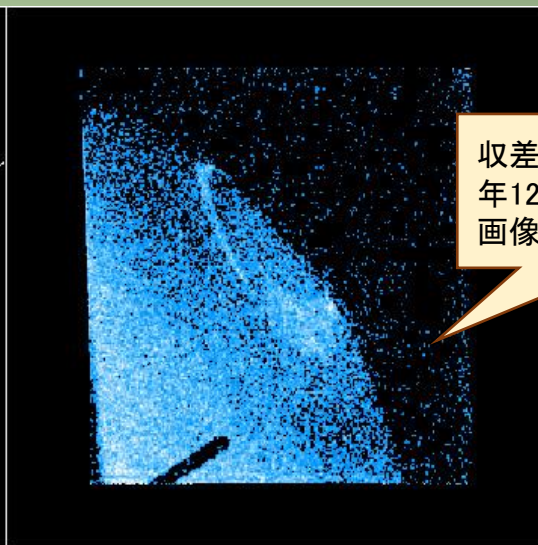
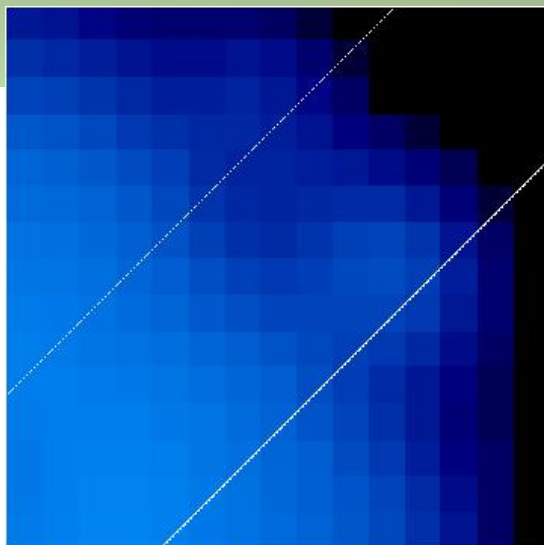


HSTは

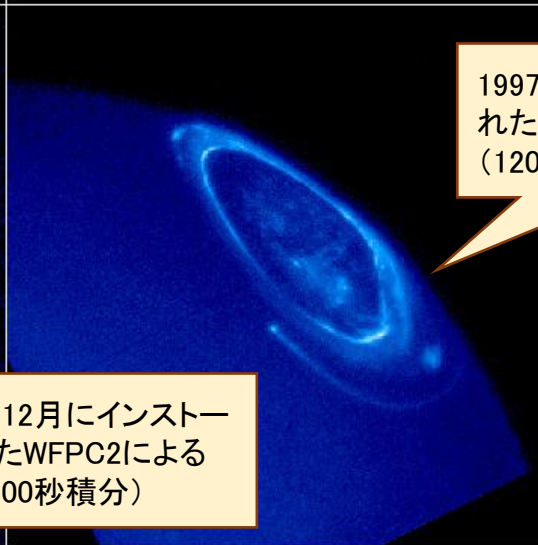
• COSTAR前の FOC画像



swp35655
 $\lambda_{CML} = 180^\circ$

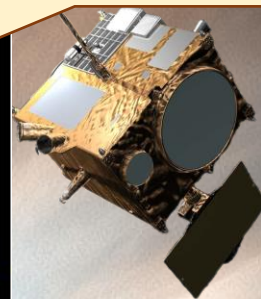


収差補正ミッション(1993
年12月)後のFOCによる
画像(716秒積分)



1993年12月にインスト
ールされたWFPC2による
画像(500秒積分)

1997年にインストール
されたSTISによる画像
(120秒積分)

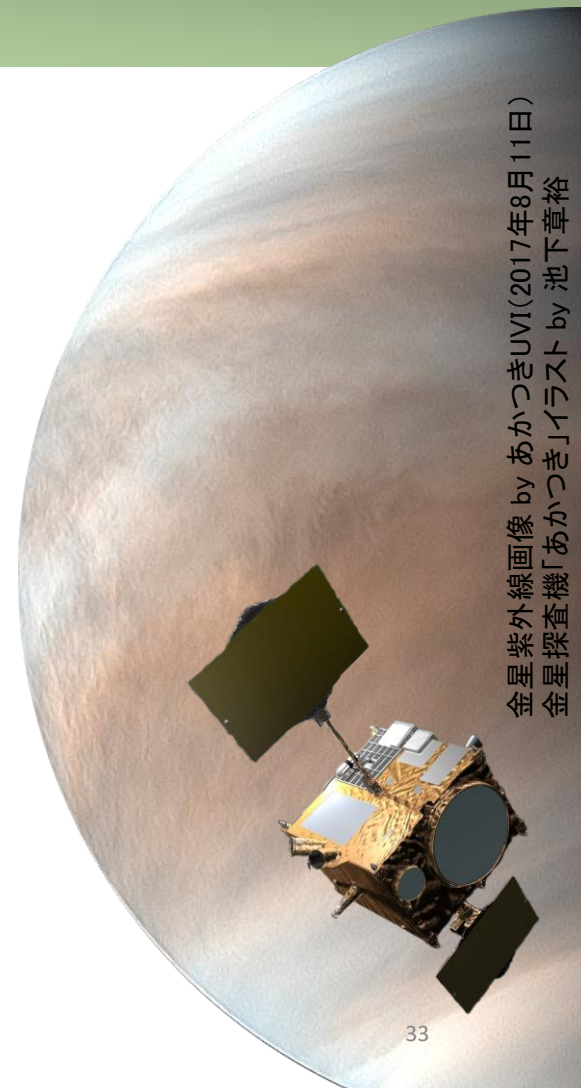


私の木星オーロラ研究 (太陽風との相関)

R.L. Baron, T. Owen, J.E.P. Connerney, T. Satoh, and J. Harrington.

Solar Wind Control of Jupiter's H_3^+ Auroras.

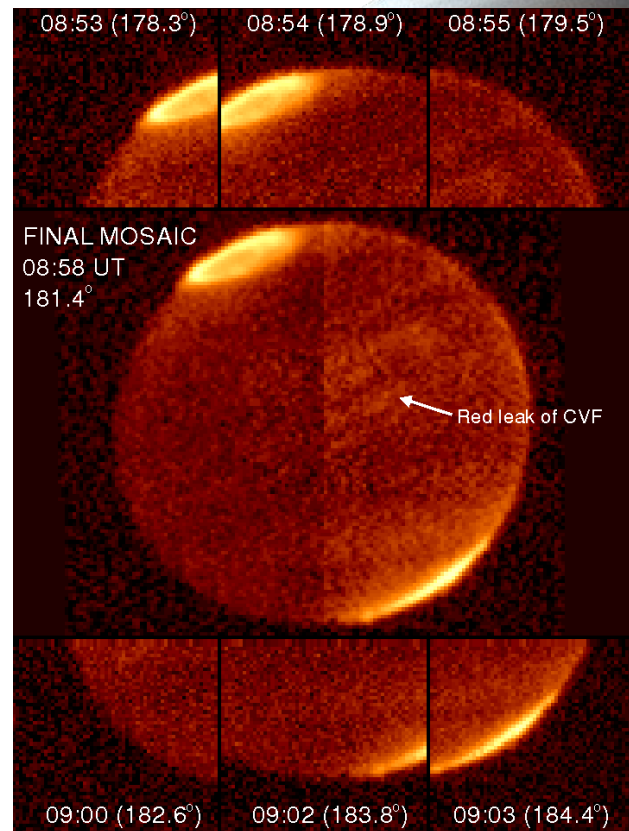
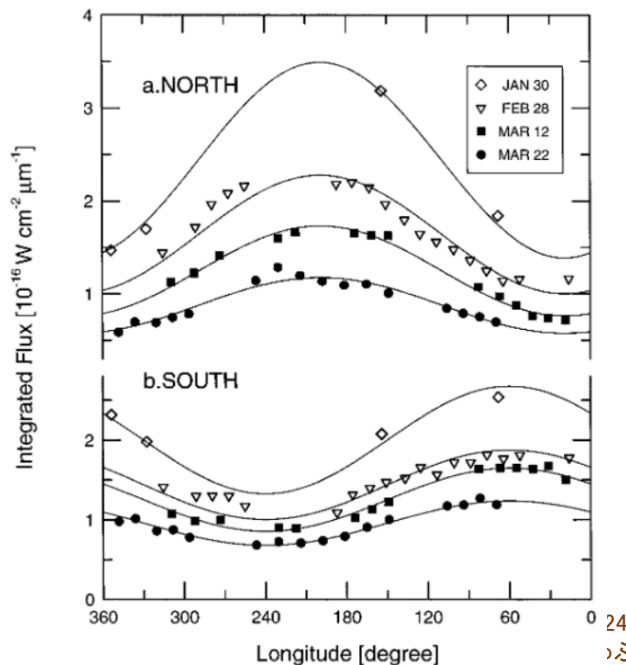
Icarus 120:437-442, 1996.



1992年：赤外オーロラ観測キャンペーン

• ユリシーズ探査機の木星接近機会に

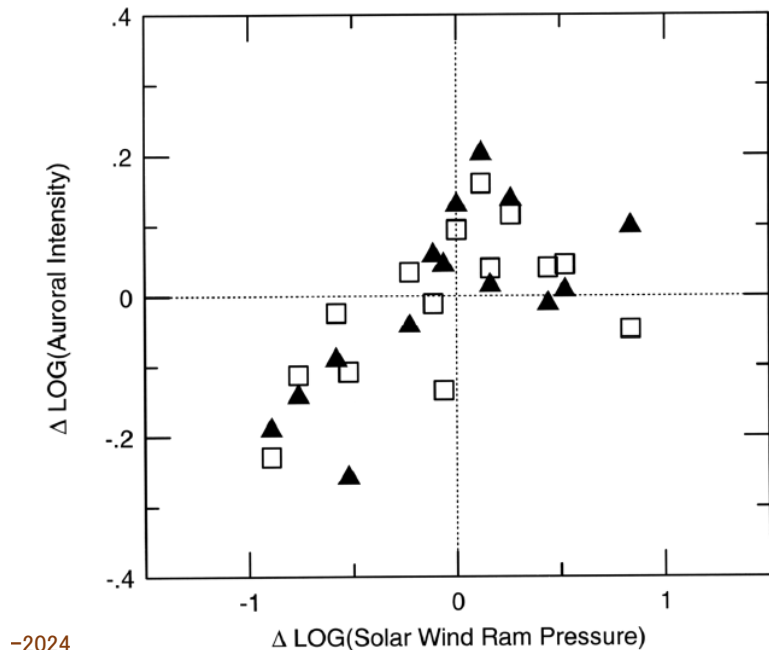
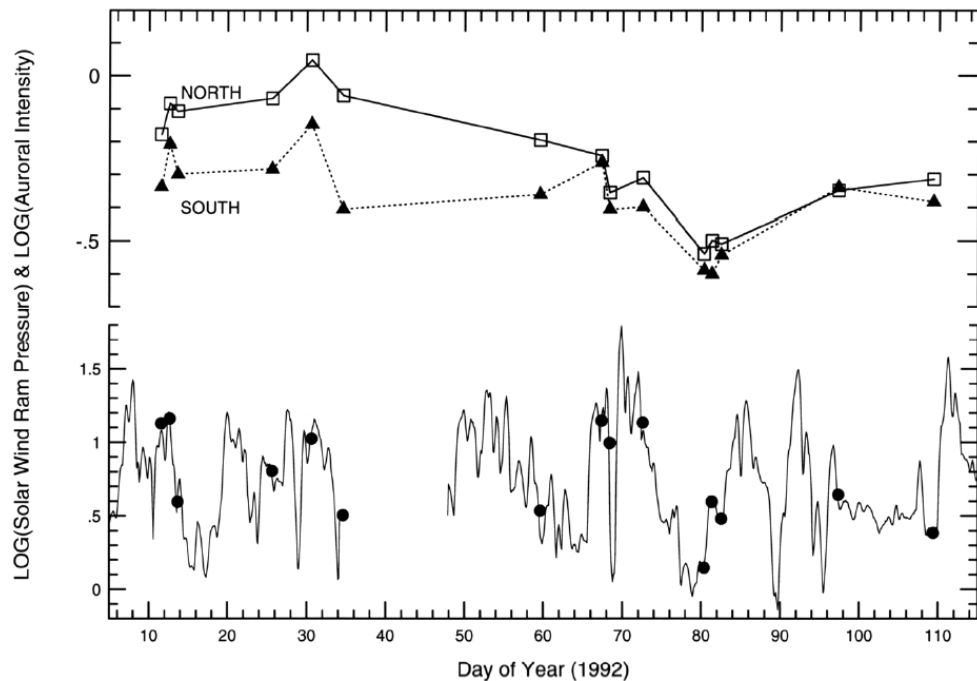
- 木星近傍における太陽風測定が可能となるタイミングで、IRTF/ProtoCAMによる赤外オーロラの集中観測を実施（1992年1月～4月の間に全15回）
- 木星全球画像を復元し、オーロラフラックスの体系Ⅲ経度依存を正弦曲線で近似（下図）。その曲線の平均値を明るさ指標と定義



「オーロラ vs 太陽風」相関の検証

• 相関の有無を定量的に検証

- 北オーロラ、南オーロラについて明るさ指標を求め、その時系列とユリシーズにより測定された太陽風動圧時系列との比較を実施
- 連続した観測機会における「オーロラ輝度増分」と「太陽風増分」とに弱い相関が認められた(太陽風10倍でオーロラ輝度1.6倍程度)

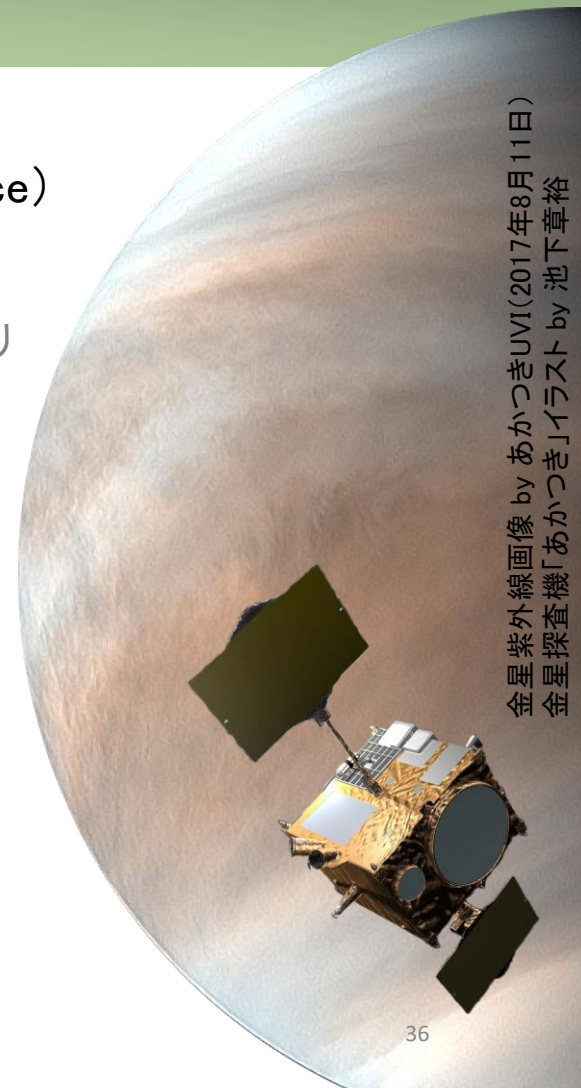
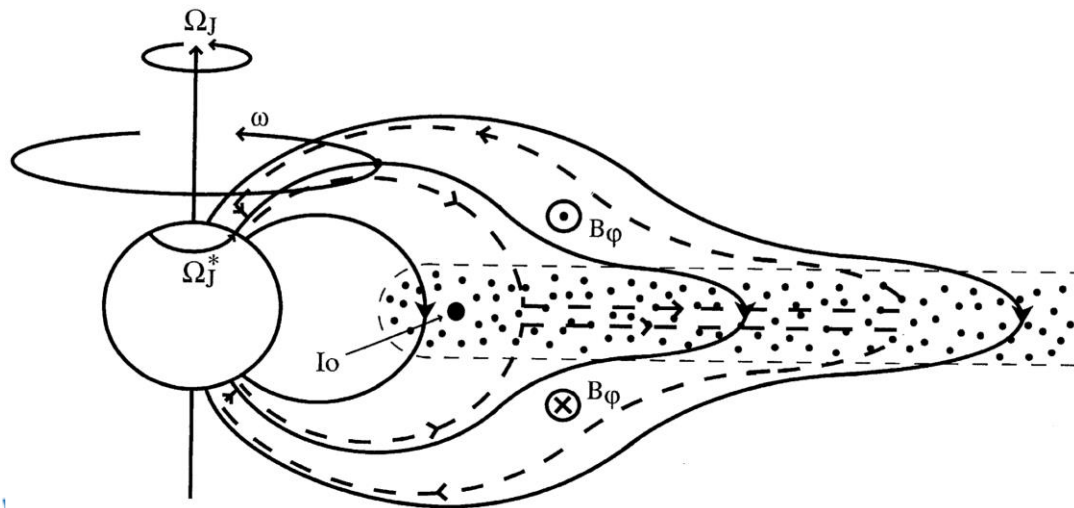


-2024
たつぷの湯

• 理論モデルとの不整合

• オーロラの主オーバル発光の理論モデル (Cowley & Bunce)

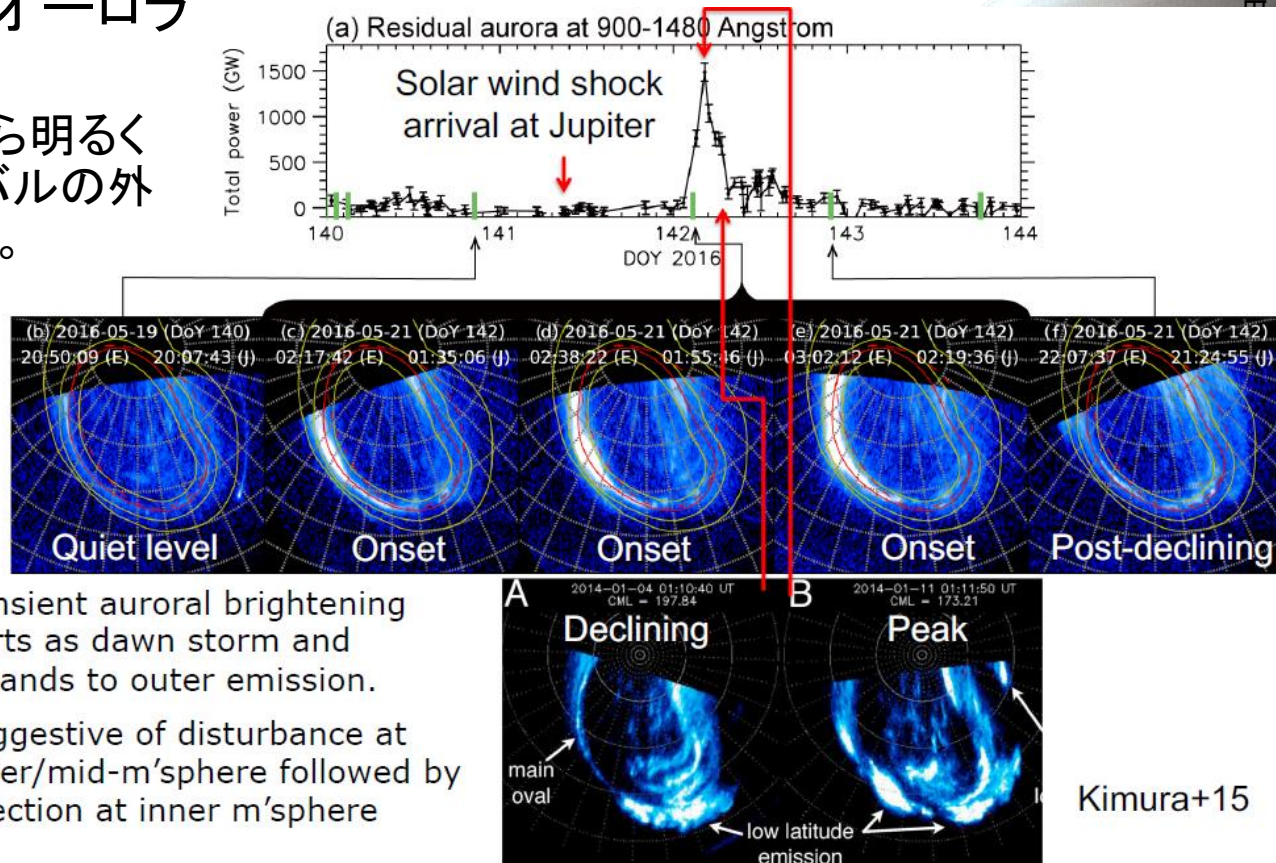
- 磁気圏プラズマが磁場との共回転から遅れることにより発生する電流がオーロラを光らせている。
- 太陽風が強まり磁気圏を圧縮すると、角運動量保存の法則によりプラズマの回転が速まる＝共回転に近づくから、電流は弱まりオーロラは暗くなる。磁気圏膨張時はその逆。
- つまり、オーロラの明るさは太陽風動圧と逆相関になるはず。



後年の展開(木村智樹2020勉強会資料)

• HST紫外観測に見るオーロラ オーバルの変化

- 明け方のオーロラから明るくなりはじめ、主オーバルの外(低緯度)へと広がる。
- 外部磁気圏での変化が内部磁気圏へ注入されることを示唆



後年の展開(木村智樹2020勉強会資料)

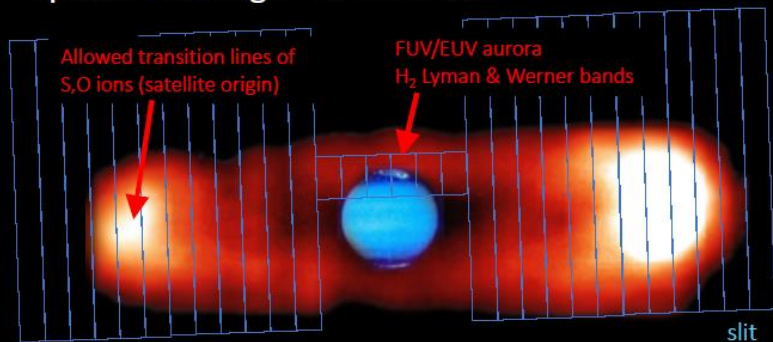
- ひさき衛星の活躍
 - 惑星紫外分光衛星「ひさき」によるオーロラ観測

The Hisaki satellite

EUV spectroscope (EXCEED): Major specifications

- Wavelength range: 55-145nm
- Spectral resolution: 0.4-1.0nm
- Spatial resolution : 17 arc-sec
- Spatial coverage ~370 arc-sec

- Launch : Sep 14, 2013,
- Size : 1m × 1m × 4m
- Orbit : 950km × 1150km (LEO)
- Inclination: 30 deg
- Orbital period : 106 min



Aurora & gas torus

Energy flow from outer to inner part of magnetosphere

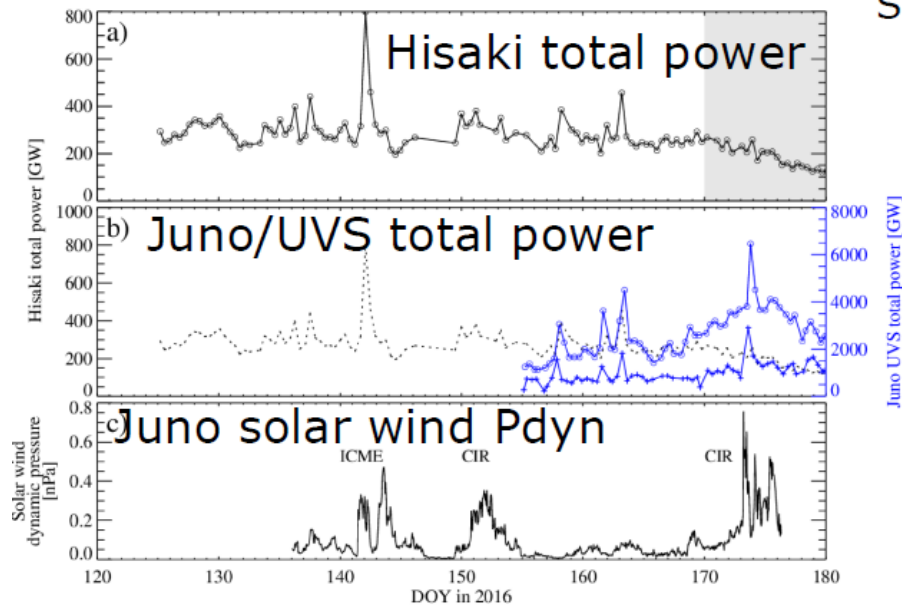
Yoshioka et al. 2013, Yoshikawa et al. 2014, Yamazaki et al. 2014

Mission periods

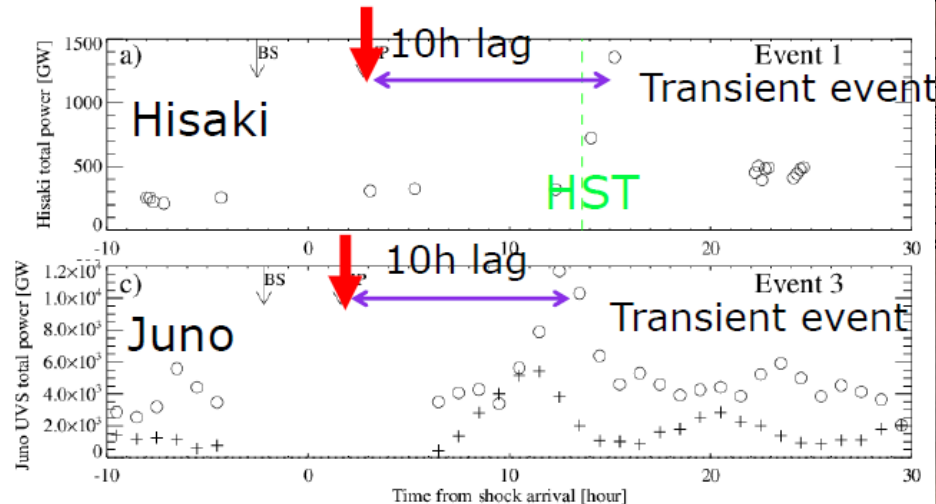
- (Primary) 2013-09 - 2014-11
- (Extended 1) 2014-12 - 2017-03
- (Extended 2) 2017-04 - 2020-03

後年の展開(木村智樹2020勉強会資料)

- Juno探査機の木星周回軌道入り前(磁気圏外で太陽風モニター)
 - 同時にJuno/UVSによるオーロラ観測(トータルパワー)
 - 同時に「ひさき」によるオーロラ観測(トータルパワー)
 - 磁気圏界面へのショック到達から10時間遅れでオーロラの増光



SW arrival time at magnetopause modeled with Nichols+07 model

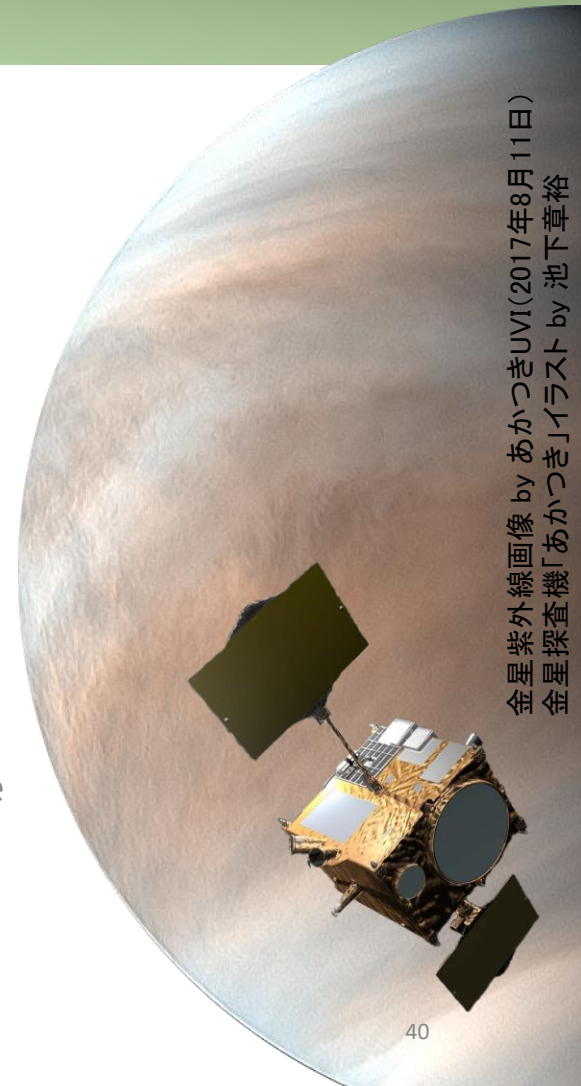


私の木星オーロラ研究 (発光源分布の定量化)

Takehiko Satoh, J.E.P Connerney, and Richard Baron.

Emission source model of Jupiter's H_3^+ aurorae: A generalized inverse analysis of images.

Icarus, 122:1–23, 1996.



赤外オーロラ発光源分布モデル

・時系列「画像」データの解析

- ・オーロラ主オーバルは、 O_6 木星磁場モデルにより投影した30木星半径からのフットプリントを初期値
 - ・大きさは係数 f により拡大・縮小を許す
 - ・Homopauseからの高さ h を与える
 - ・水平幅 w と垂直拡がり t を与える
- ・主オーバルの低緯度側および高緯度側発光を追加
 - ・体系Ⅲ経度に固定した輝度変化
 - ・地方時に固定した輝度変化
- ・以上のようなモデルを用い、観測時ジオメトリに対応した画像をシミュレート
 - ・大気シーイングによる像にじみ
 - ・観測画像のナビゲーション誤差も考慮
- ・観測画像とシミュレーション画像をピクセル毎に比較し、時系列を通じて偏差が最小となるようパラメータを最適化
 - ・特異値分解法Singular Value Decompositionによる反転
 - ・パラメータ同士の依存関係も評価可能

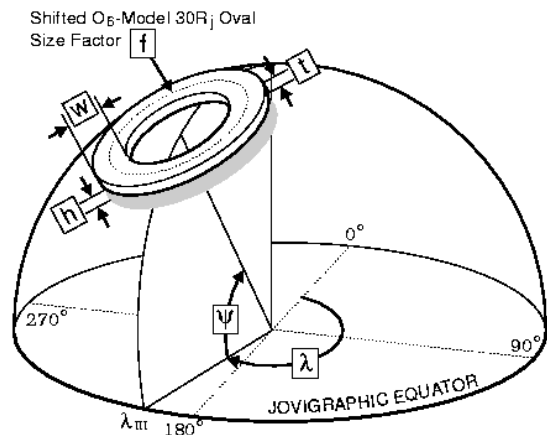


TABLE II
List of Variables and Fixed Parameters

Model	3-PRM	7-PRM	9-PRM	S3	LT	S3+LT
Source distribution parameters						
Auroral oval						
b_{oval}	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
ψ	✓	✓	✓	✓	✓	✓
λ	✓	✓	✓	✓	✓	✓
f	✓	✓	✓	✓	✓	✓
t	0.01 R_j	✓	✓	✓	✓	✓
h	0.01 R_j	✓	✓	✓	✓	✓
w_{oval}	0.01 R_j	✓	✓	✓	✓	✓
Infrared Polar Cap & Infrared Polar Collar						
b_{in}	—	✓	✓	✓	✓	✓
b_{out}	—	—	✓	✓	✓	✓
w_{out}	—	—	✓	✓	✓	✓
Local-time anomaly (poleward)						
w_{LT}	—	—	—	—	✓	✓
λ_{LT}	—	—	—	—	✓	✓
$\Delta\lambda_{LT}$	—	—	—	—	✓	✓
b_{LT}	—	—	—	—	✓	✓
System-III anomaly (equatorward)						
w_{S3}	—	—	—	✓	—	✓
λ_{S3}	—	—	—	✓	—	✓
$\Delta\lambda_{S3}$	—	—	—	✓	—	✓
b_{S3}	—	—	—	✓	—	✓

A Generalized Inverse Method

- 各パラメータの微小変化が各画素の値をどう変化させるかを表すヤコビアン行列を構成し、それを反転させる

- Singular Value Decomposition

$$\mathbf{y} = \mathbf{U}\mathbf{\Lambda}\mathbf{V}^T\mathbf{x}$$

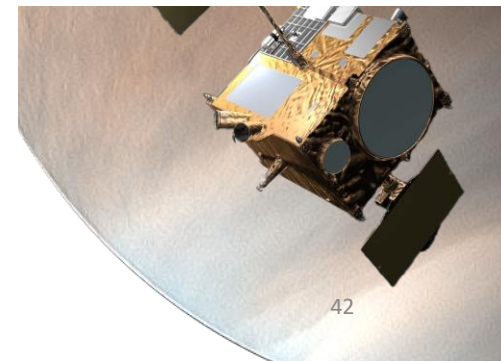
$$(\mathbf{U}^T\mathbf{y}) = \boldsymbol{\beta} = \mathbf{\Lambda}(\mathbf{V}^T\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} = \sum_{i=1}^k \left(\frac{\beta_i}{\lambda_i} \right) \mathbf{v}_i$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial s_1} & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial h_1} & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial b_1} & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial d_1} & \dots \\ \frac{\partial F_2}{\partial x_1} & & \text{SHIFT} & & \text{PSF} & & \text{BRIGHT} & & \text{DISK} & \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & \\ \frac{\partial F_N}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial F_N}{\partial s_1} & \dots & \frac{\partial F_N}{\partial h_1} & \dots & \frac{\partial F_N}{\partial b_1} & \dots & \frac{\partial F_N}{\partial d_1} & \dots \end{bmatrix}.$$

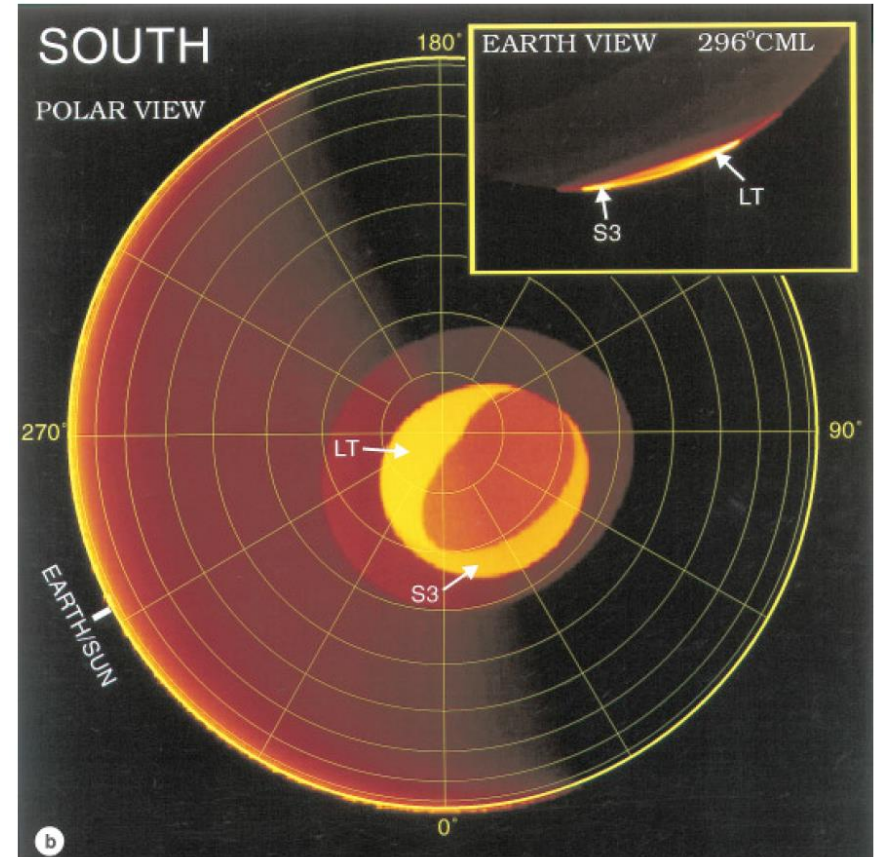
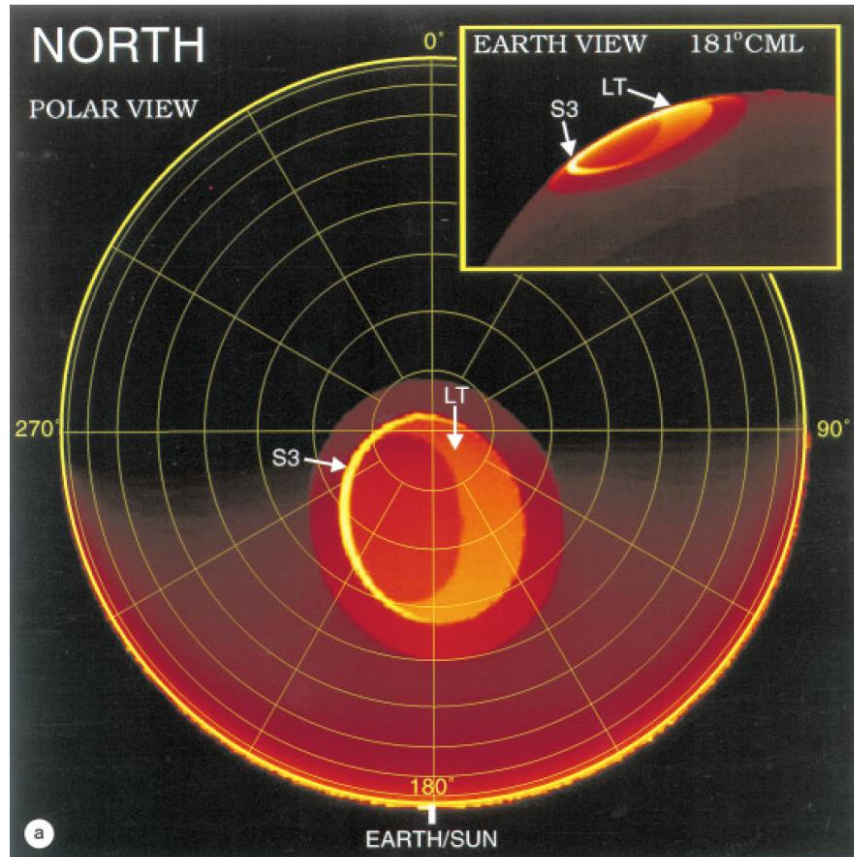
$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{x} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta y_1 \\ \Delta y_2 \\ \vdots \\ \Delta y_i \\ \vdots \\ \Delta y_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x_1} & \frac{\partial F_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial x_M} \\ \frac{\partial F_2}{\partial x_1} & \frac{\partial F_2}{\partial x_2} & & \vdots \\ \vdots & & \frac{\partial F_i}{\partial x_j} & \vdots \\ \frac{\partial F_N}{\partial x_1} & \dots & \dots & \frac{\partial F_N}{\partial x_M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_j \\ \vdots \\ \Delta x_M \end{bmatrix}. \quad (2)$$

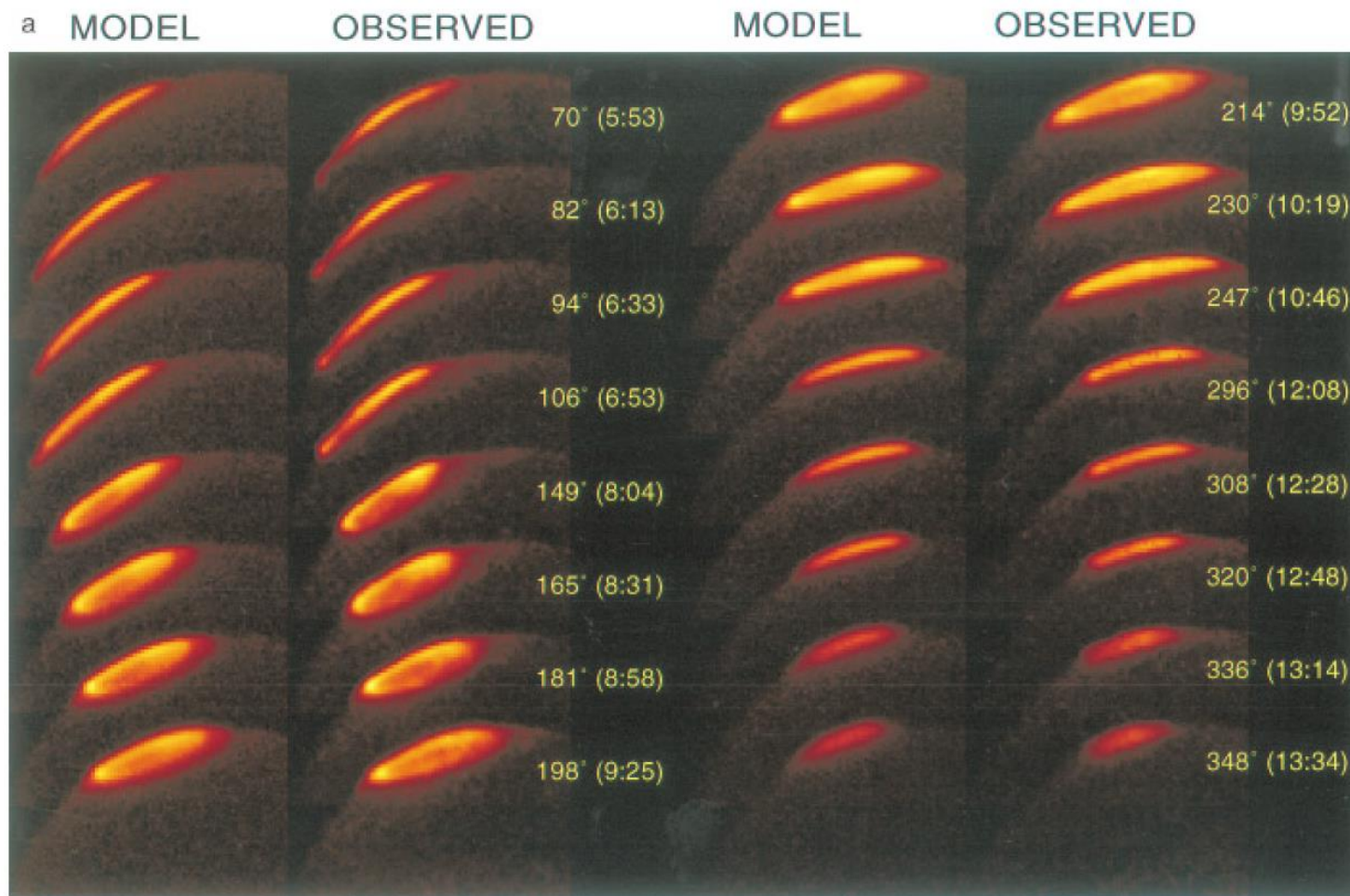
(3)



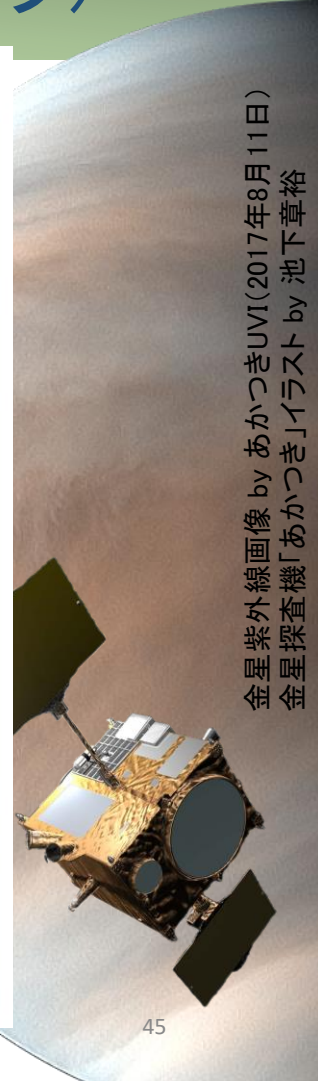
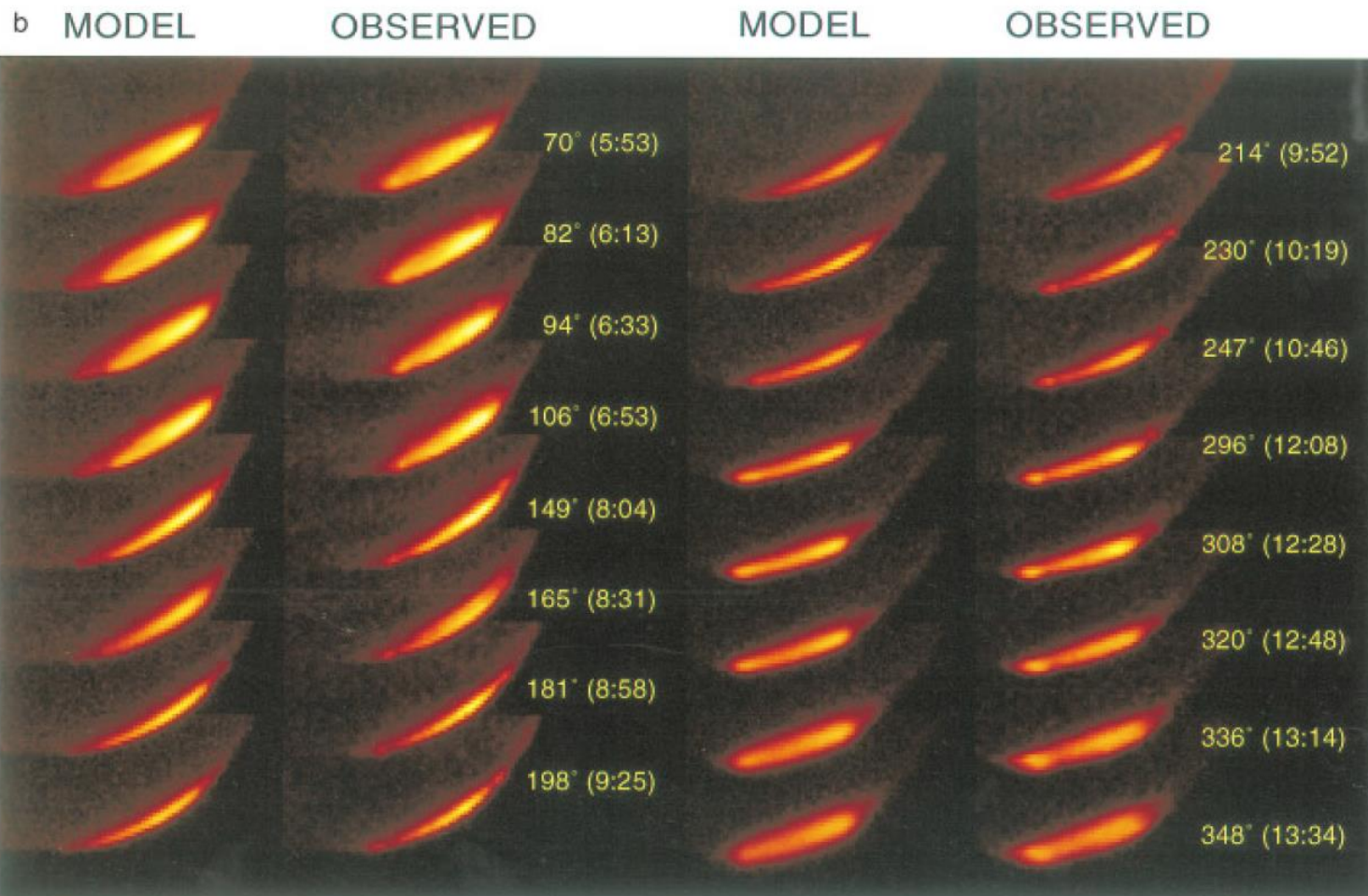
決定されたオーロラ発光源分布



観測とシミュレーションの比較(北オーロラ)



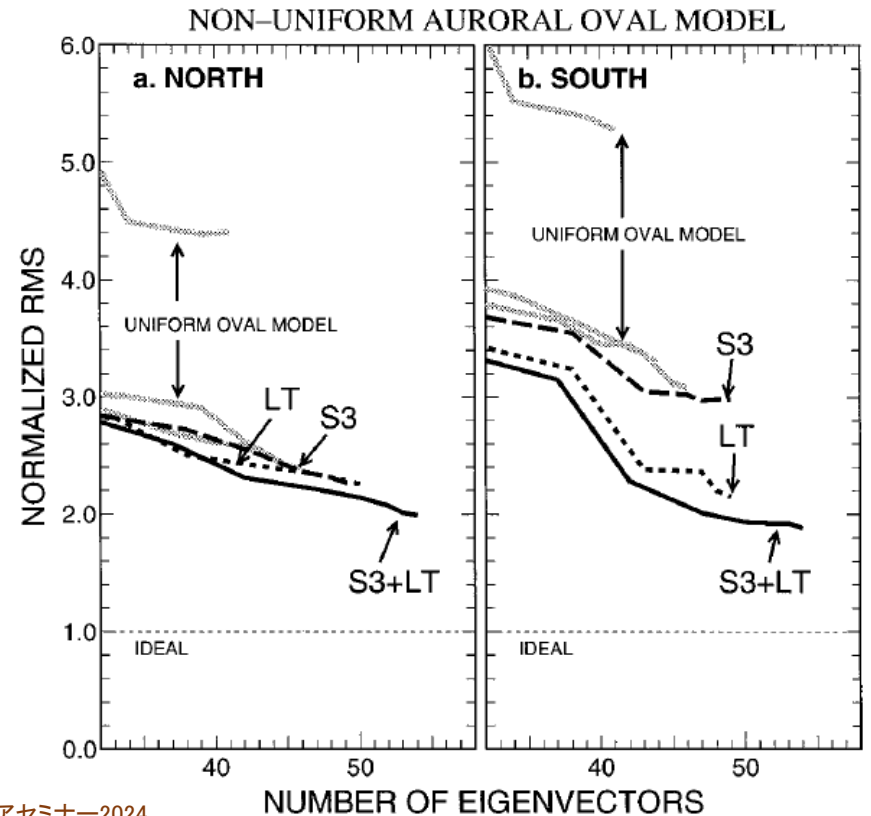
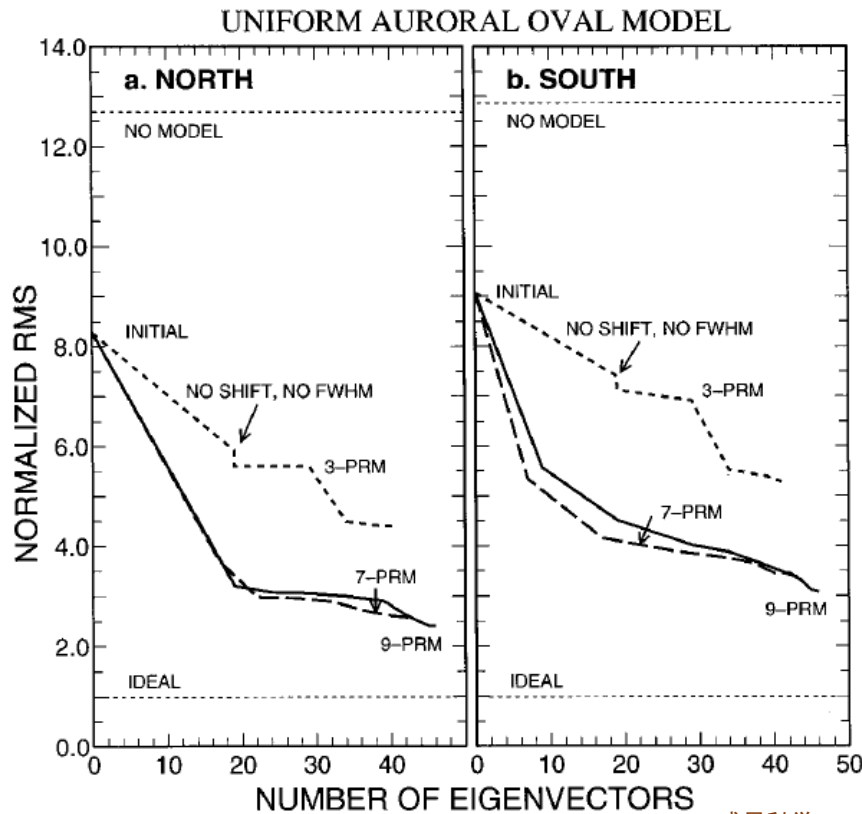
観測とシミュレーションの比較(南オーロラ)



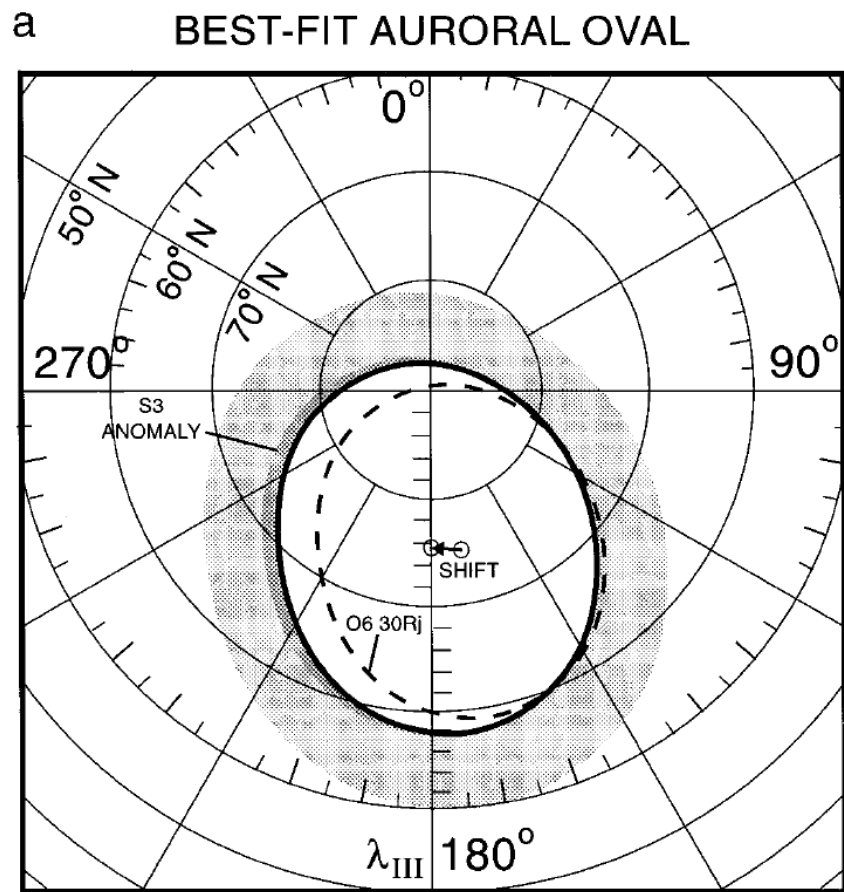
金星紫外線画像 by あかつきUVI(2017年8月11日)
金星探査機「あかつき」イラスト by 池下章裕

少しずつ複雑なモデルへ

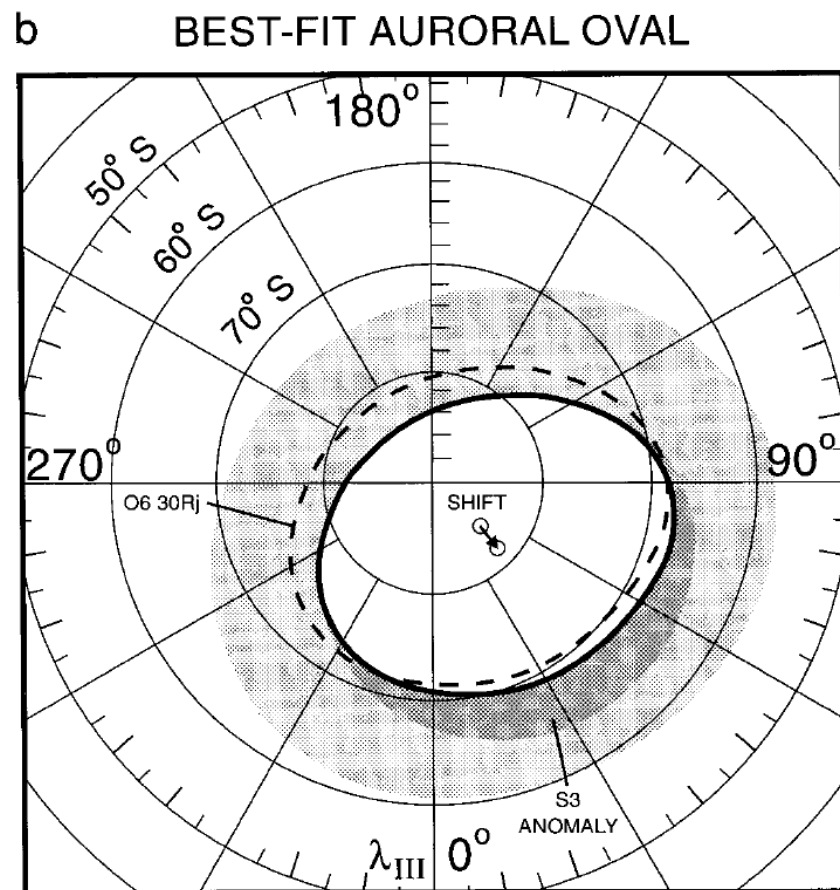
- 固有ベクトルを多く含め、より多くのパラメータを解像



O₆主オーバルからの違い



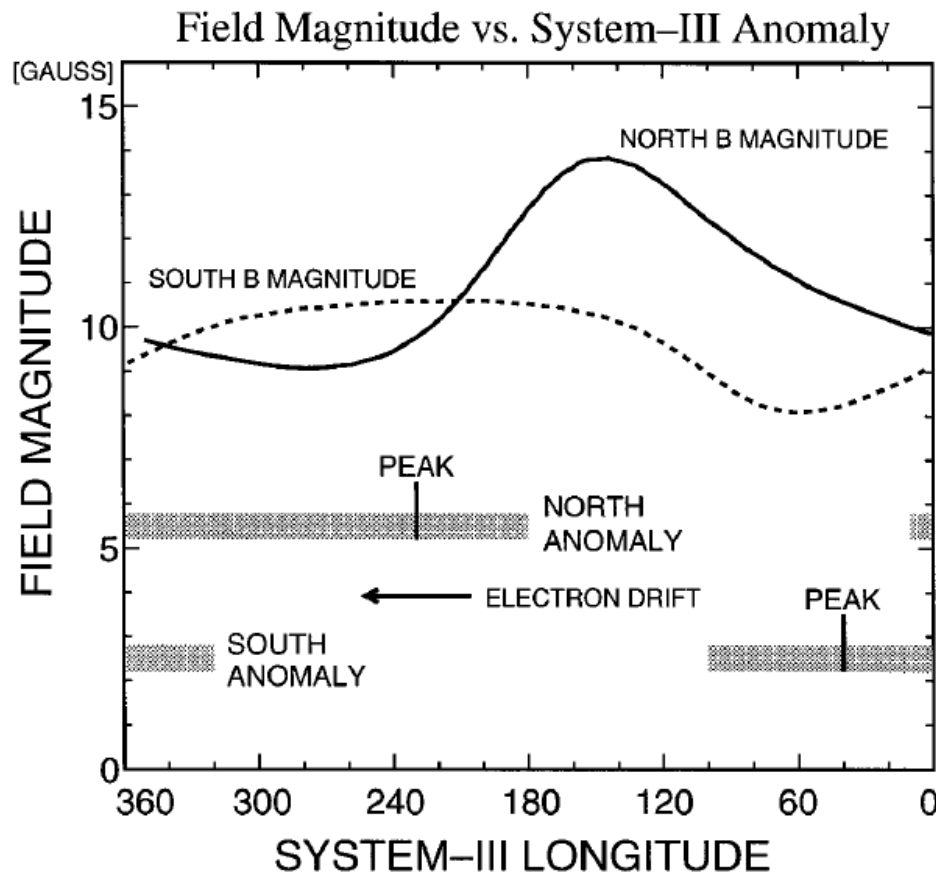
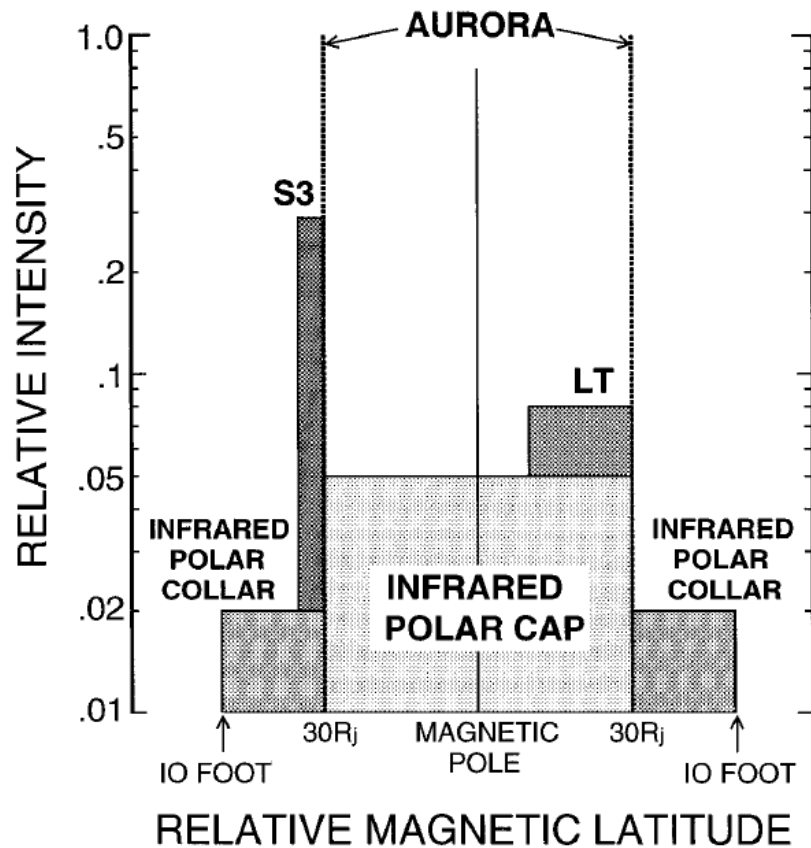
North Polar View



South Polar View

Non-Uniform Auroral Oval

・各アノマリー(S3, LT)の輝度分布

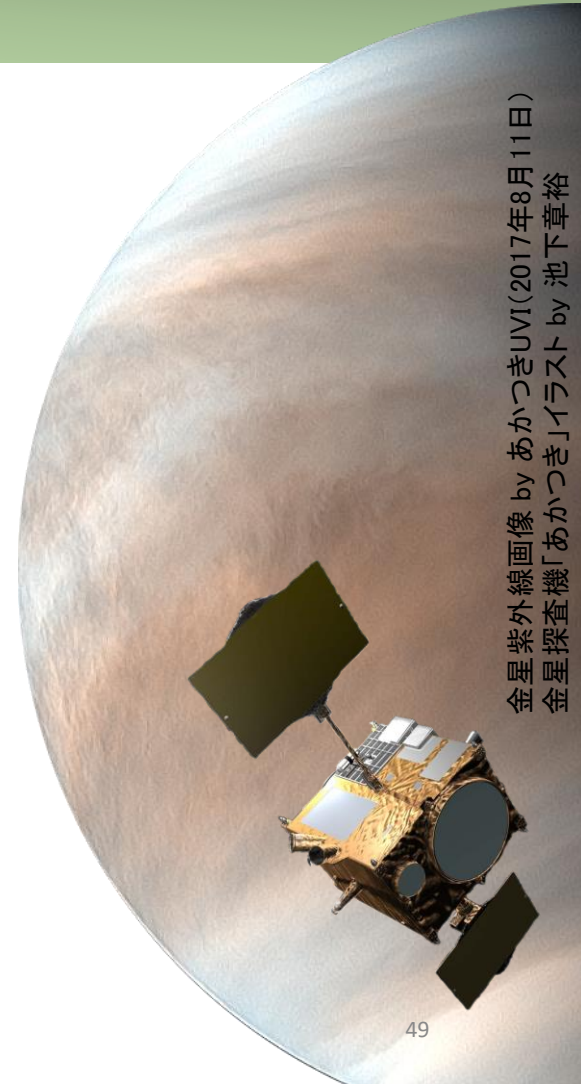


木星磁場モデルVIP4

J.E.P. Connerney, M. Acuna, N. Ness, and T. Satoh.

New models of Jupiter's magnetic field constrained by the Io flux tube footprint.

JGR Space Physics, 103:11929–11939, 1998.

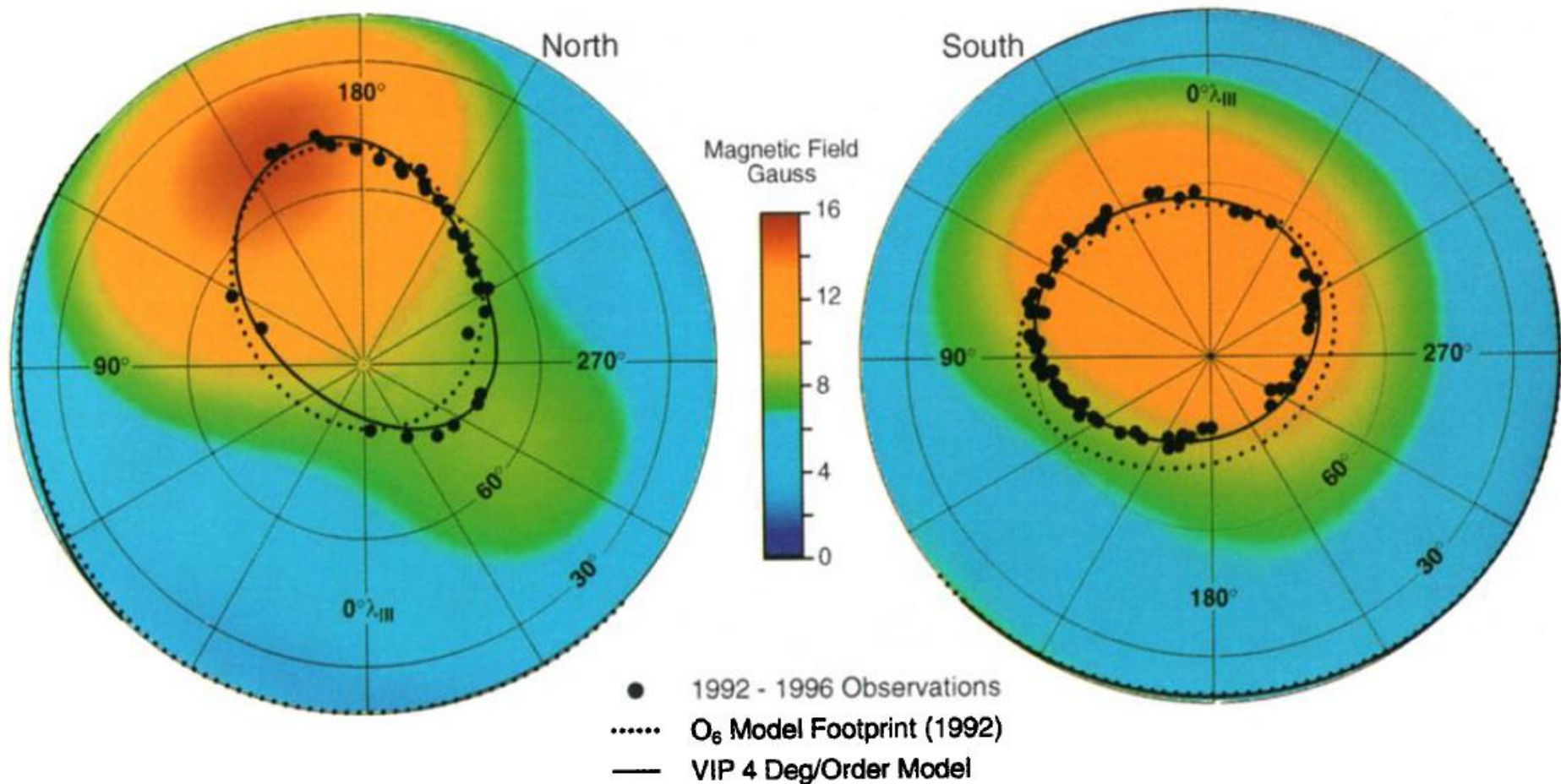


初めてIFTを磁場係数の制約に使用

- Voyager – IFT – Pioneer
Order 4の略としてVIP4
 - 112点のIFT位置(木星面上の経度・緯度)測定値
 - IRTFおよびHST
 - パイオニア11号Vector Helium magnetometer
 - 1分平均値
 - スカラー(< 2.4 R_J)
 - ベクトル(2.4 – 8.0 R_J)
 - ヴォイジャー1号 Fluxgate
 - 48秒平均ベクトル場
 - < 10 R_J

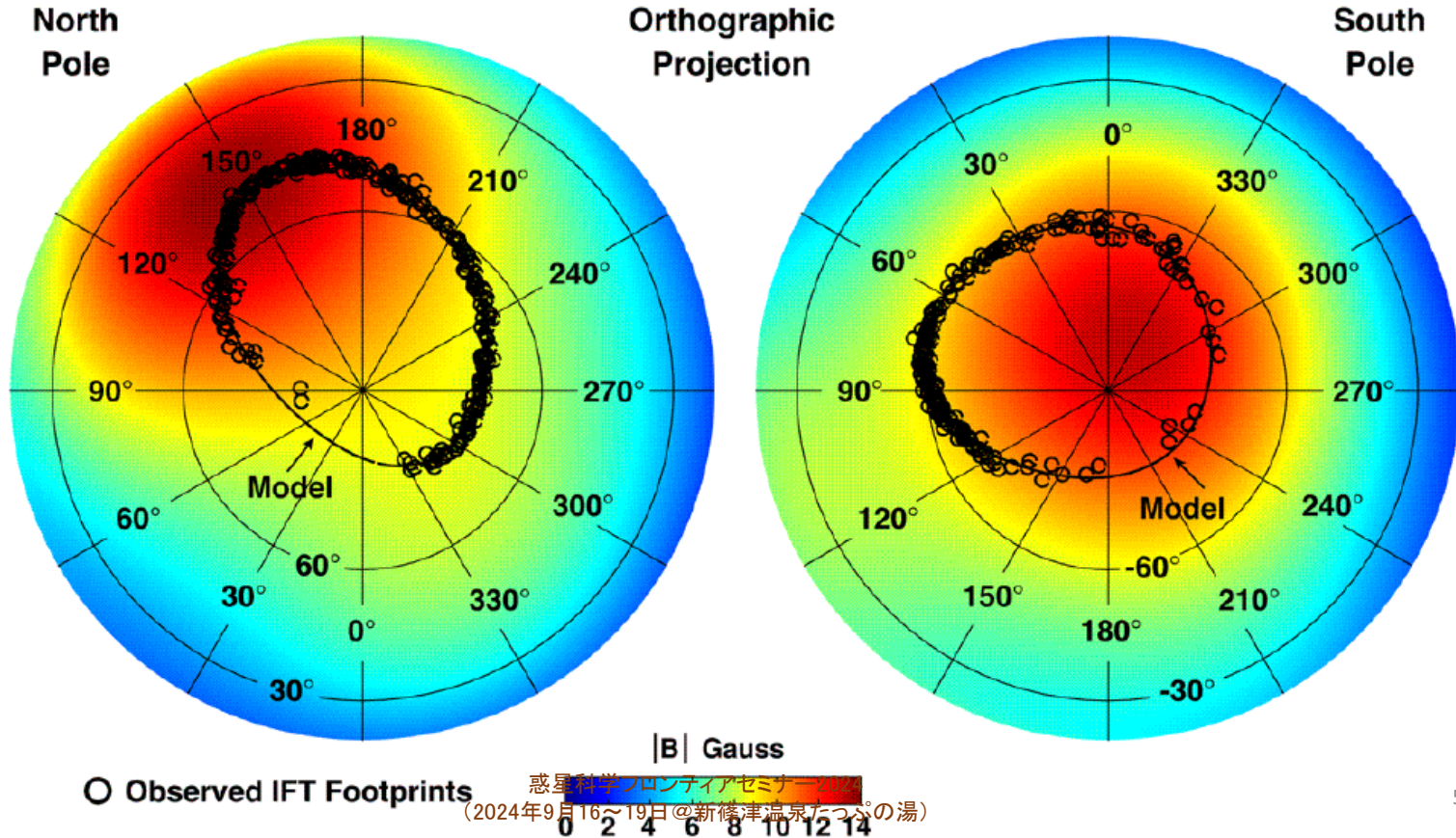
PARAM.	COEFF.	VIT4_16ev	VIP4	O6	V1 17ev
1	g_1^0	428077.	420543.	424202.	420825.
2	g_1^1	-75306.	-65920.	-65929.	-65980.
3	h_1^1	24616.	24992.	24116.	26122.
4	g_2^0	-4283. (.83)	-5118.	-2181.	-3411.
5	g_2^1	-59426.	-61904.	-71106.	-75856.
6	g_2^2	44386. (.85)	49690.	48714.	48321.
7	h_2^1	-50154.	-36052.	-40304.	-29424.
8	h_2^2	38452. (.85)	5250.	7179.	10704.
9	g_3^0	8906. (.79)	-1576.	7565.	2153. (UR)
10	g_3^1	-21447. (UR)	-52036.	-15493.	-3295. (UR)
11	g_3^2	21130.	24386.	19775.	26315.
12	g_3^3	-1190.	-17597.	-17958.	-6905.
13	h_3^1	-17187. (UR)	-8804.	-38824.	8883. (UR)
14	h_3^2	40667.	40829.	34243.	69538.
15	h_3^3	-35263. (.88)	-31586.	-22439.	-24718.
16	g_4^0	-22925. (UR)	-16758. (.83)		
17	g_4^1	18940. (UR)	22210. (.47)		
18	g_4^2	-3851. (UR)	-6074. (.96)		
19	g_4^3	9926. (.75)	-20243. (.83)		
20	g_4^4	1271. (UR)	6643. (UR)		
21	h_4^1	16088. (UR)	7557. (UR)		
22	h_4^2	11807. (UR)	40411. (.94)		
23	h_4^3	6195. (.65)	-16597. (.91)		
24	h_4^4	12641. (UR)	3866. (UR)		

IFTにより制約された木星磁場モデル



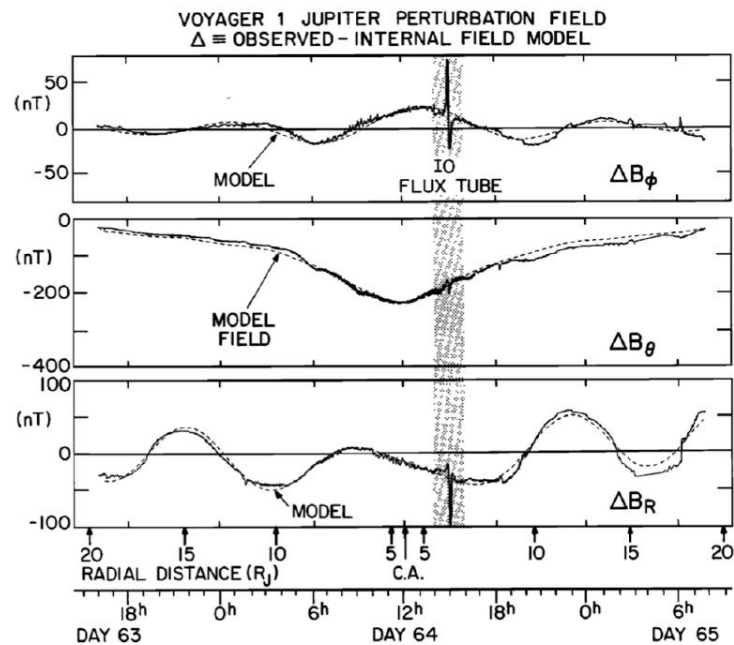
- より強くIFTにより制約したモデル

IFT Footprints and Model



IFTを磁場係数制約の主体に

- VIT4 (Connerney 2007)
 - IFT(500点以上)とヴォイジャー(θ 成分)を使用

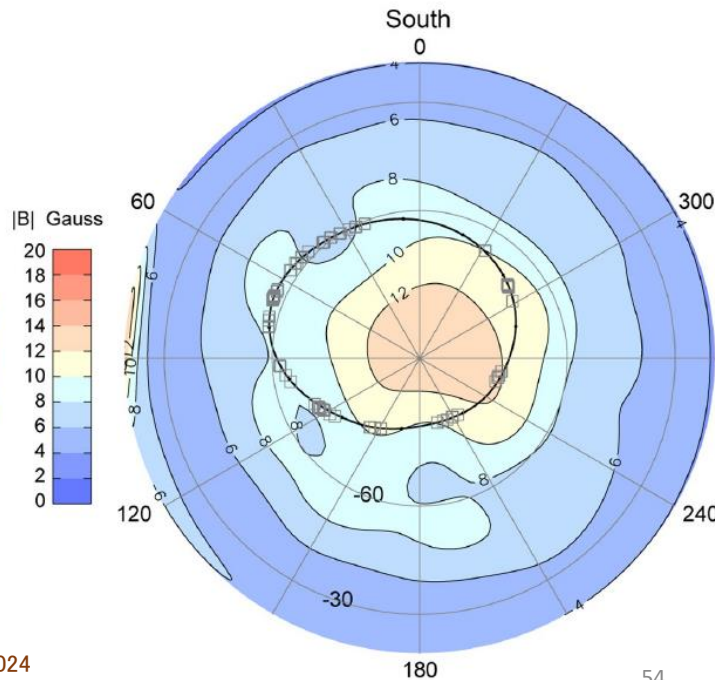
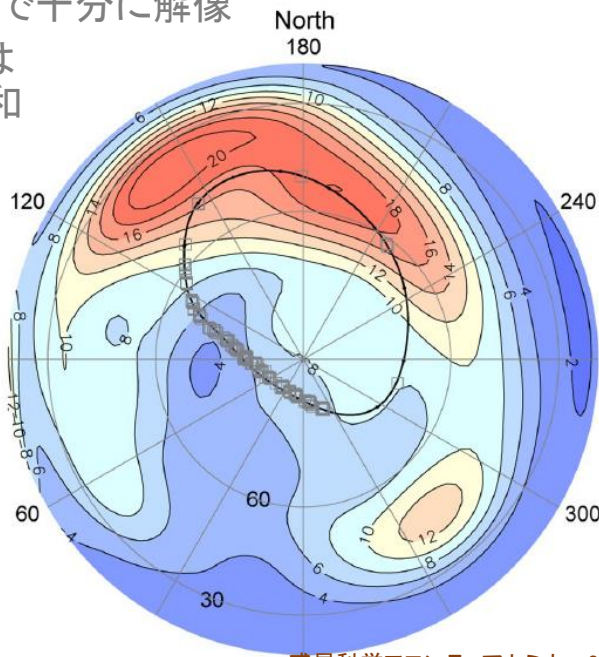
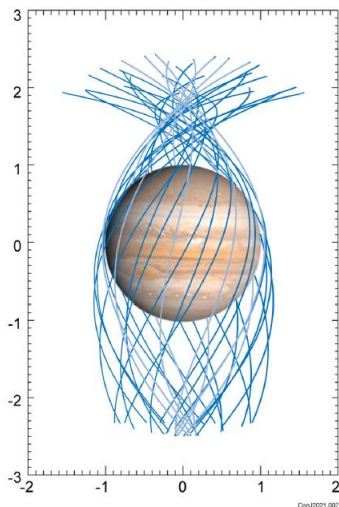


PARAM.	COEFF.	VIT4_16ev	VIP4	O6	V1 17ev
1	g_1^0	428077.	420543.	424202.	420825.
2	g_1^1	-75306.	-65920.	-65929.	-65980.
3	h_1^1	24616.	24992.	24116.	26122.
4	g_2^0	-4283. (.83)	-5118.	-2181.	-3411.
5	g_2^1	-59426.	-61904.	-71106.	-75856.
6	g_2^2	44386. (.85)	49690.	48714.	48321.
7	h_2^1	-50154.	-36052.	-40304.	-29424.
8	h_2^2	38452. (.85)	5250.	7179.	10704.
9	g_3^0	8906. (.79)	-1576.	7565.	2153. (UR)
10	g_3^1	-21447. (UR)	-52036.	-15493.	-3295. (UR)
11	g_3^2	21130.	24386.	19775.	26315.
12	g_3^3	-1190.	-17597.	-17958.	-6905.
13	h_3^1	-17187. (UR)	-8804.	-38824.	8883. (UR)
14	h_3^2	40667.	40829.	34243.	69538.
15	h_3^3	-35263. (.88)	-31586.	-22439.	-24718.
16	g_4^0	-22925. (UR)	-16758. (.83)		
17	g_4^1	18940. (UR)	22210. (.47)		
18	g_4^2	-3851. (UR)	-6074. (.96)		
19	g_4^3	9926. (.75)	-20243. (.83)		
20	g_4^4	1271. (UR)	6643. (UR)		
21	h_4^1	16088. (UR)	7557. (UR)		
22	h_4^2	11807. (UR)	40411. (.94)		
23	h_4^3	6195. (.65)	-16597. (.91)		
24	h_4^4	12641. (UR)	3866. (UR)		

後年の展開

• Juno木星周回ミッションによる発展

- JRM09 (Jupiter Reference Model after 9 orbits, Connerney et al., 2018)
 - 10次の球面調和関数
- JRM33 (Jupiter Reference Model after 33 orbits, Connerney et al., 2022)
 - 13次の係数まで十分に解像
 - ディスク磁場は1次の球面調和関数近似

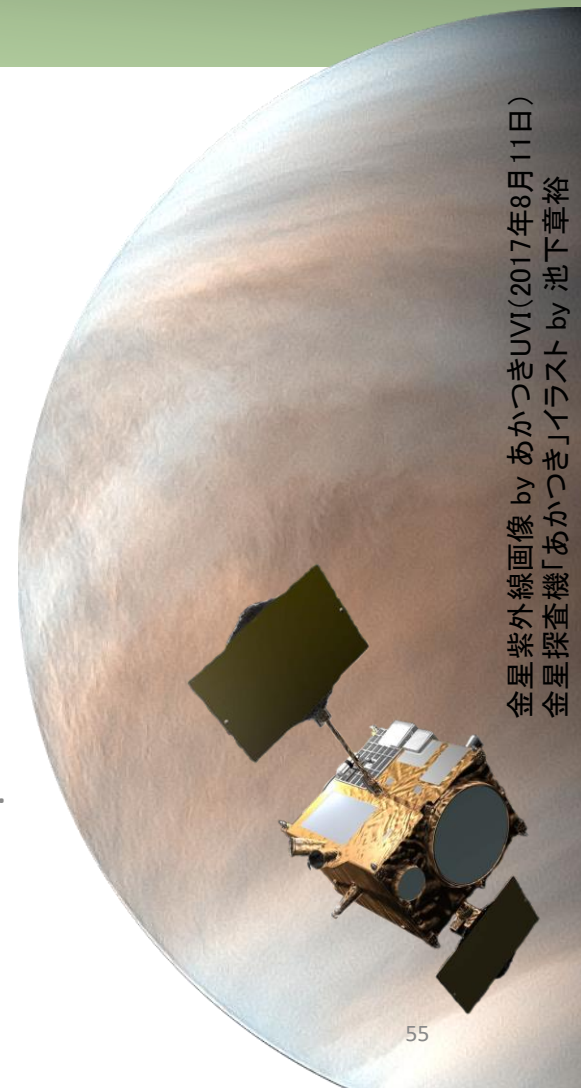


私の木星オーロラ研究 (発光源モデルの更新)

Takehiko Satoh, and J.E.P Connerney.

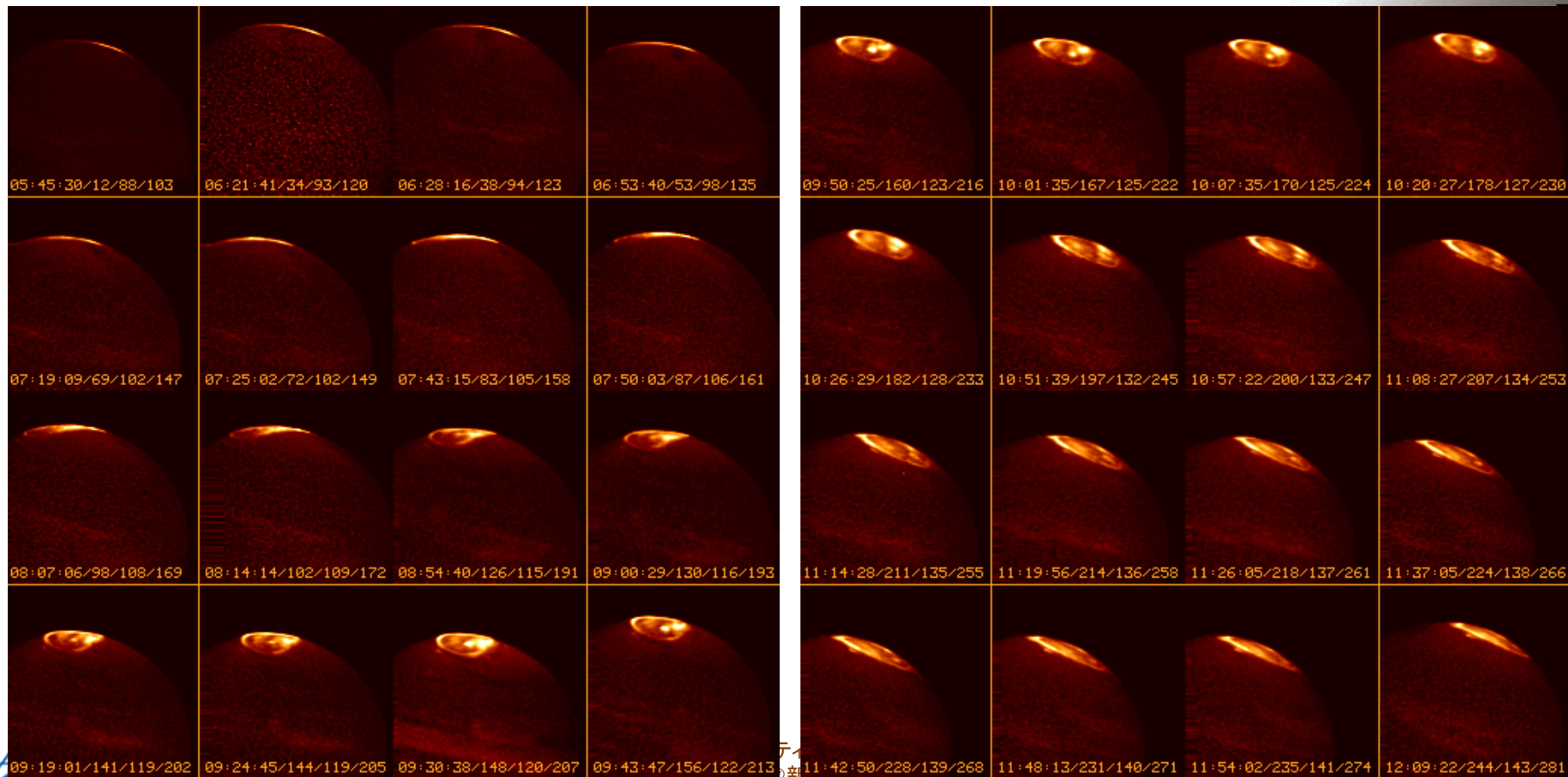
Jupiter's H_3^+ emissions viewed in corrected jovimagnetic coordinates.

Icarus, 141:236–252, 1999.



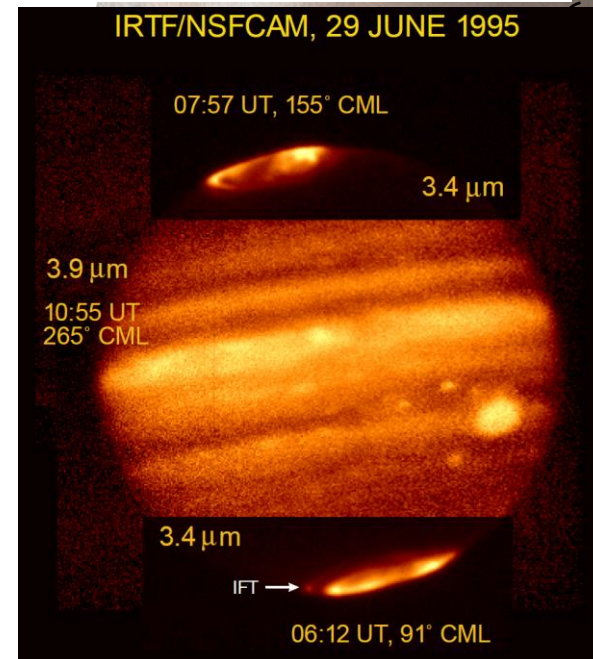
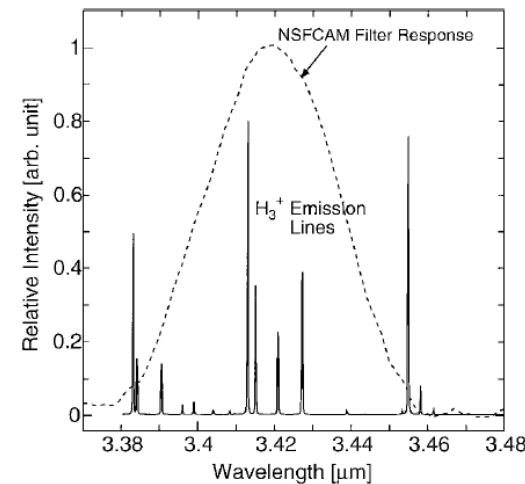
オーロラのより詳細が観測されるように

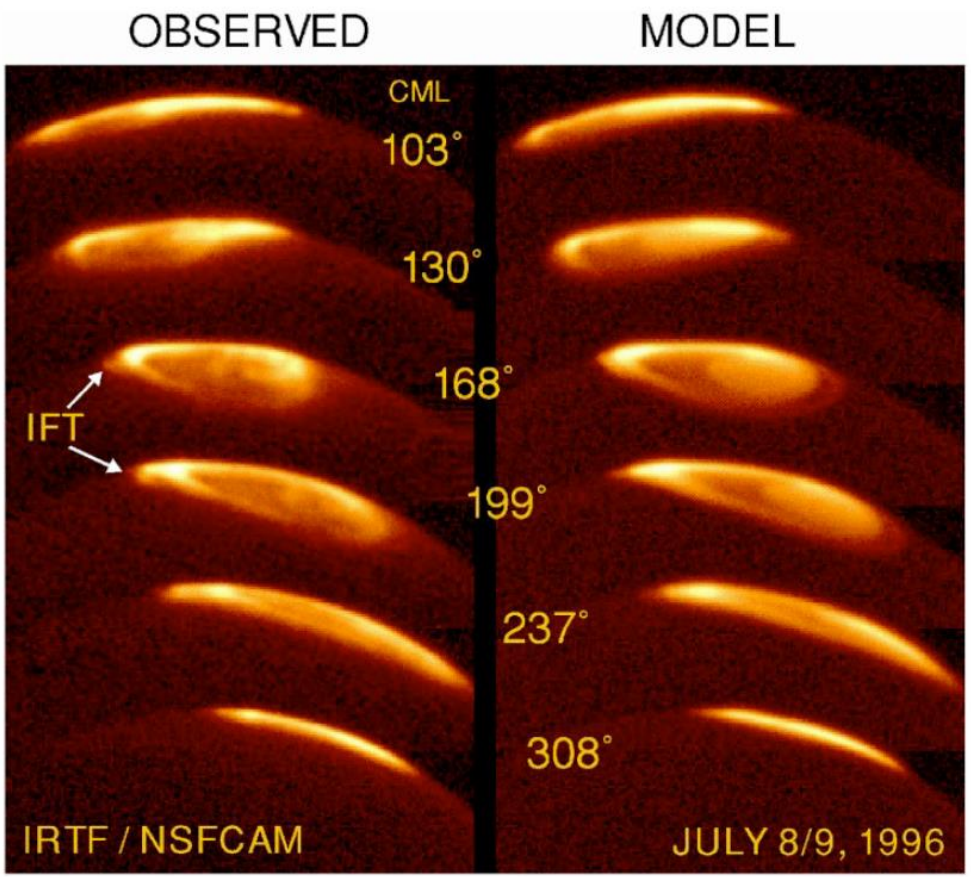
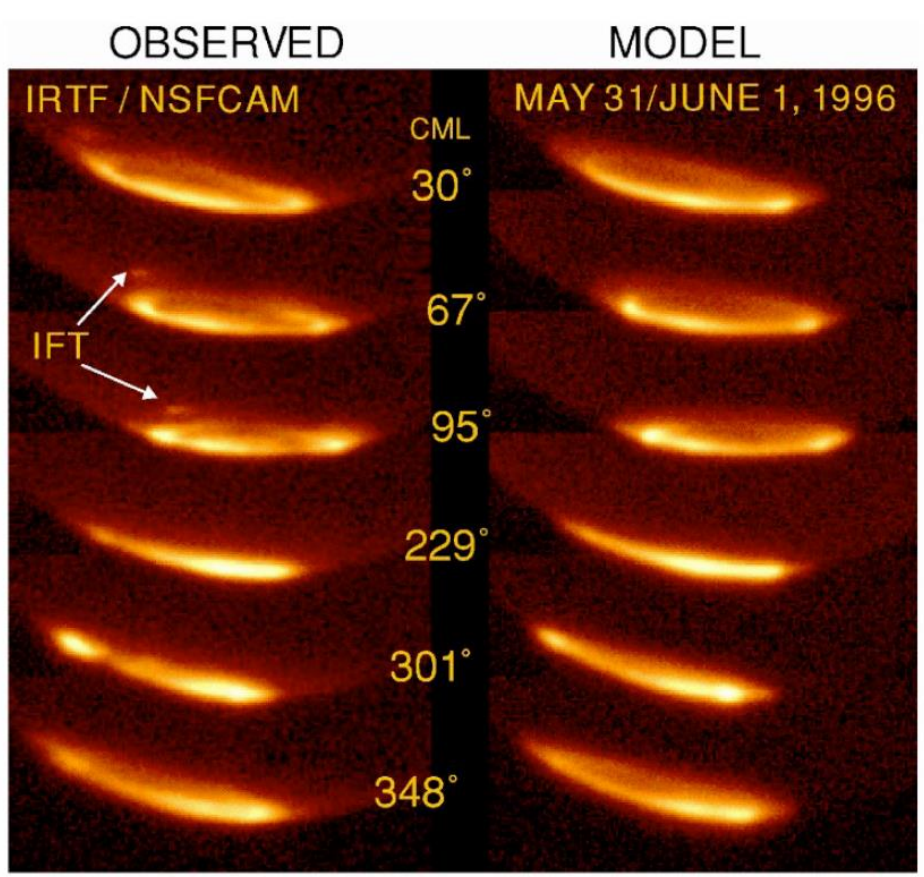
- IRTF/NSFCAMによる北オーロラ時系列画像（論文のデータではない）



二つの大きな進歩を得て

- 木星磁場に関する知見の進歩
 - VIP4モデルの構築 (Connerney et al., 1998)
- IRTF/NSFCAMによる観測の改善
 - ProtoCAMより大きな画素フォーマット (256 x 256画素InSb)
 - より精細な画素分解能 (0.35" → 0.15" / 画素)
 - ただしこの画素分解能を用いると、相変わらず木星全球を画面内に捉えることはできない
 - 木星オーロラ専用フィルター3枚の実装 (Connerney 3.4265, 3.490, 3.542 μm)
 - 観測後の画像処理効率まで見通したデータ取得のためのマクロを作成 (カメラおよび望遠鏡ポインティング制御)
 - IRTF望遠鏡における熱雑音の改善

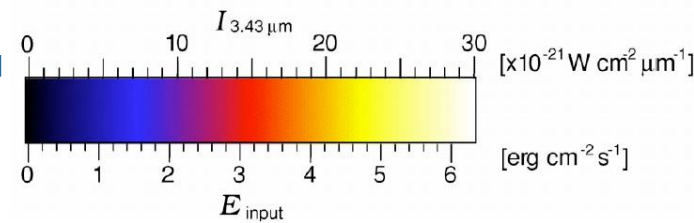
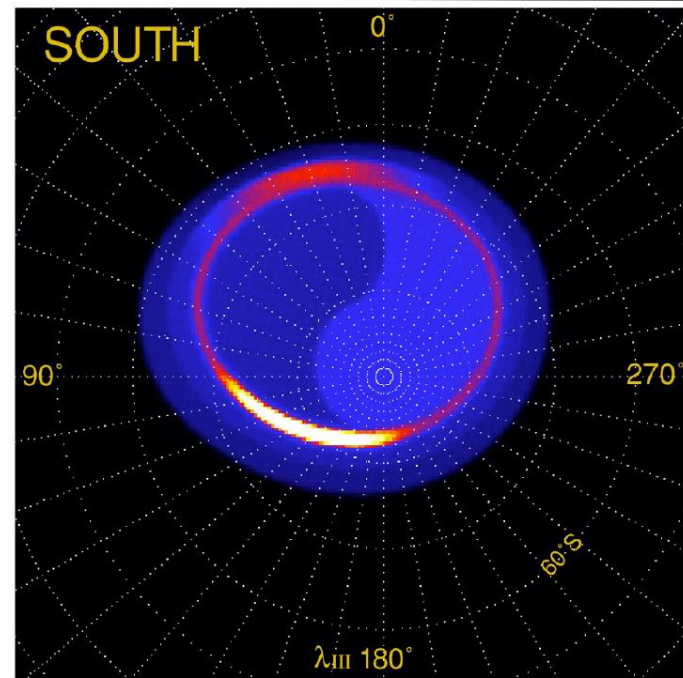
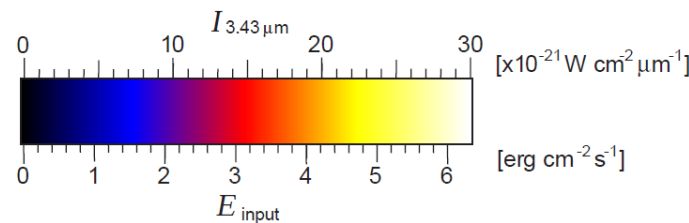
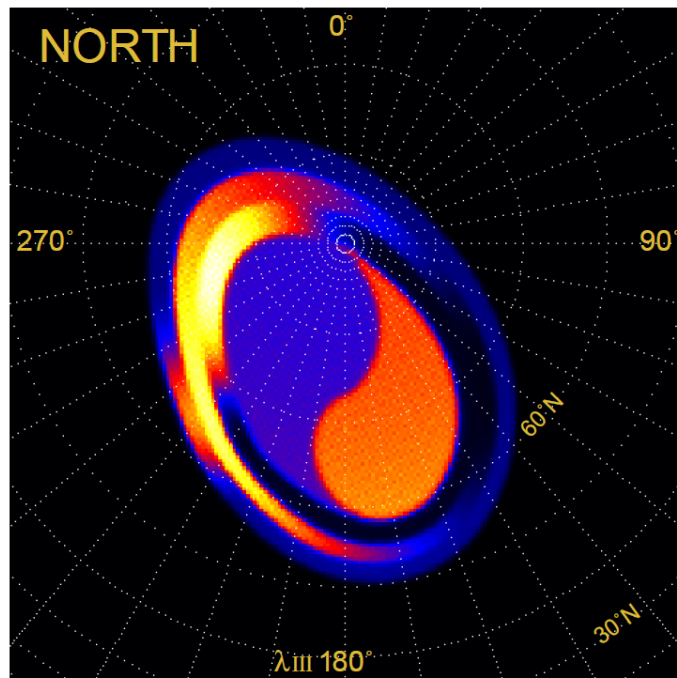




発光パワー(全域、領域ごと)

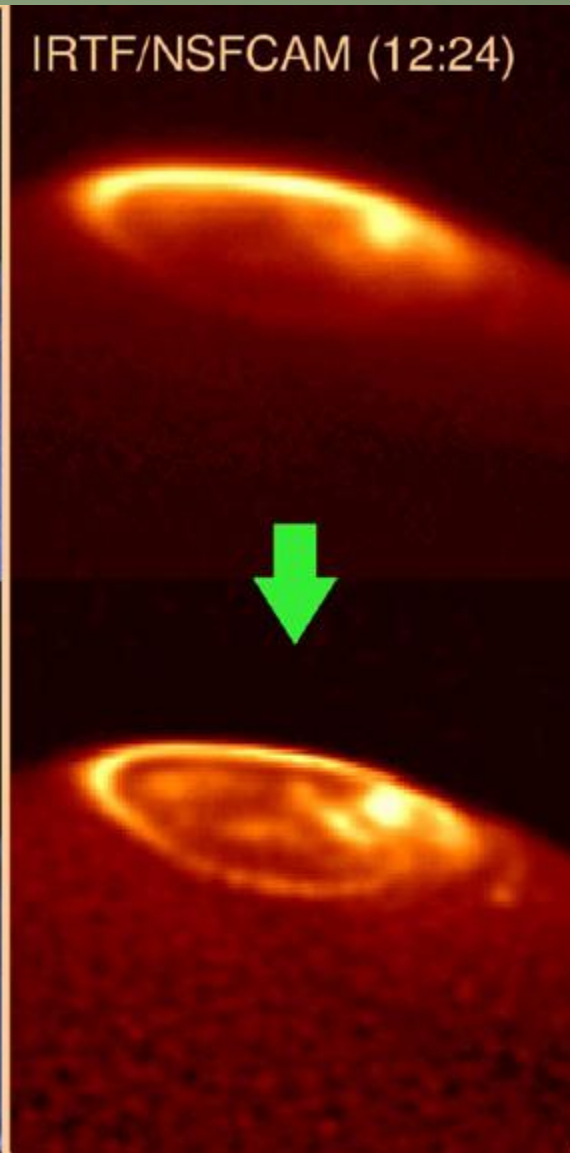
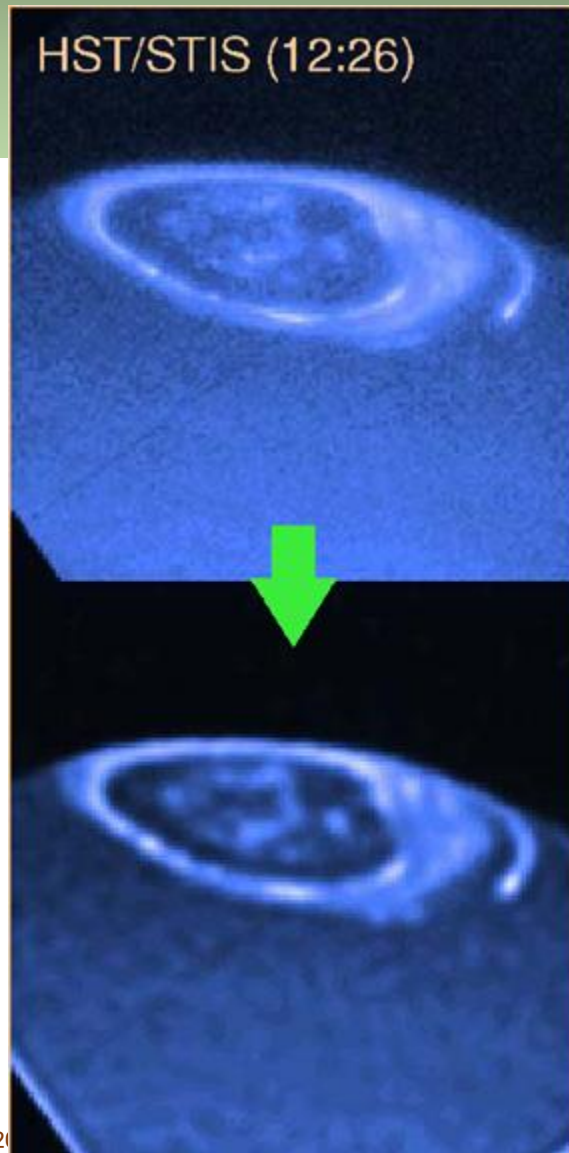
• H_3^+ 発光のトータルパワーを見積り

- 北極域
 $2.1 \times 10^{12} \text{ W}$
- 南極域
 $1.2 \times 10^{12} \text{ W}$
- 6–8 R_j
約10%
- 8–12 R_j
約20%
- 12–30 R_j
約25%
- より高緯度
約45%



UV vs IR

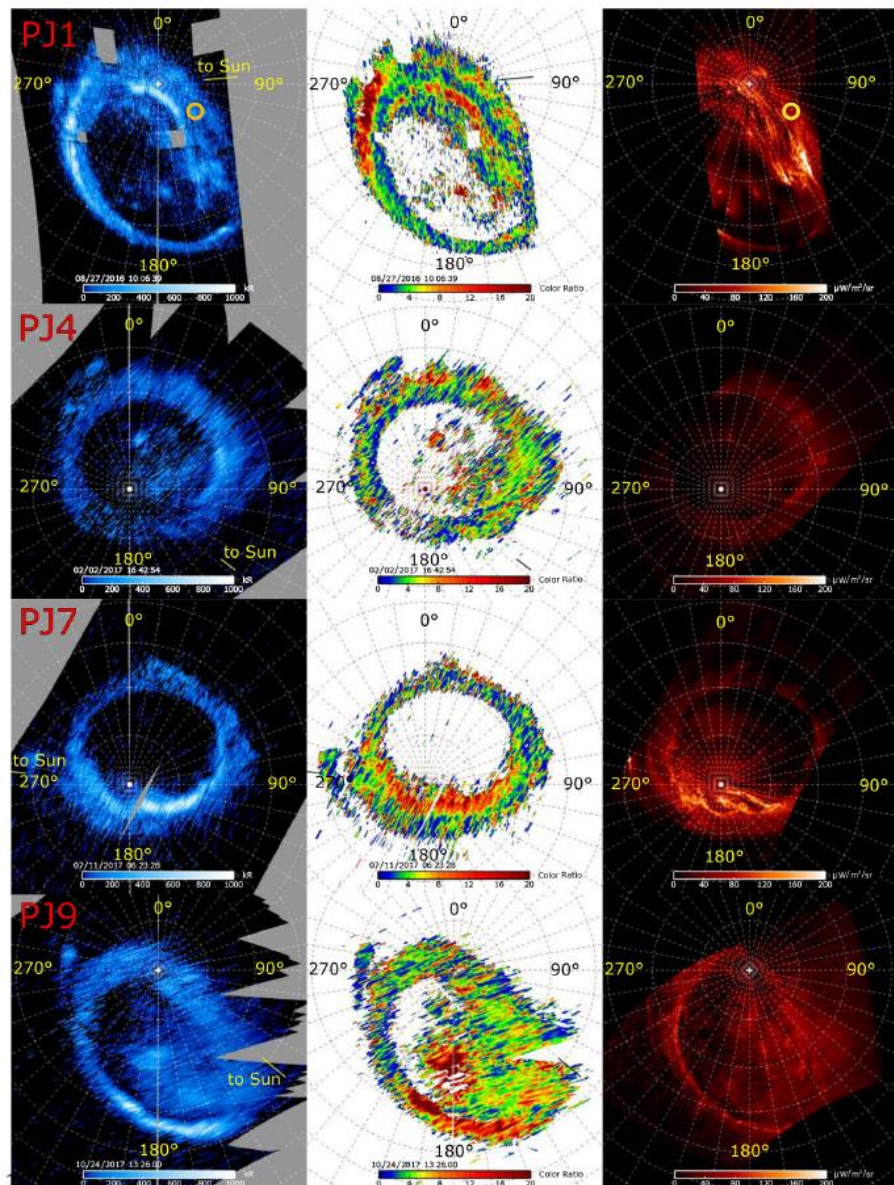
- HST紫外画像との比較
 - ほぼ同時刻の撮影データ
 - HST画像
いったんIRTF画像と同じ解像度に劣化させた上で、deconvolution
 - IRTF画像
Limb brighteningを補正し、deconvolution
 - 同様の構造は見えるが、完全に同じわけでもない。
 - UV発光は本当にその瞬間のエネルギー注入に反応したスナップショット
 - IR画像から数分の違いであっても、異なる状態になっていた可能性がある。



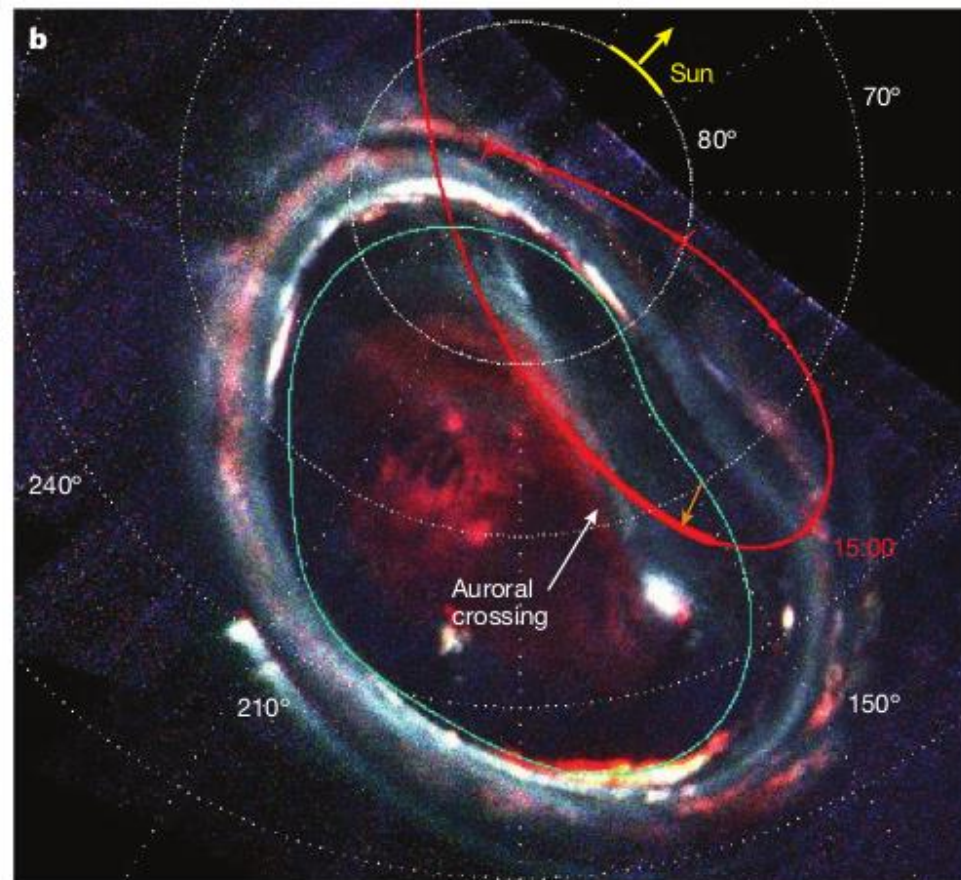
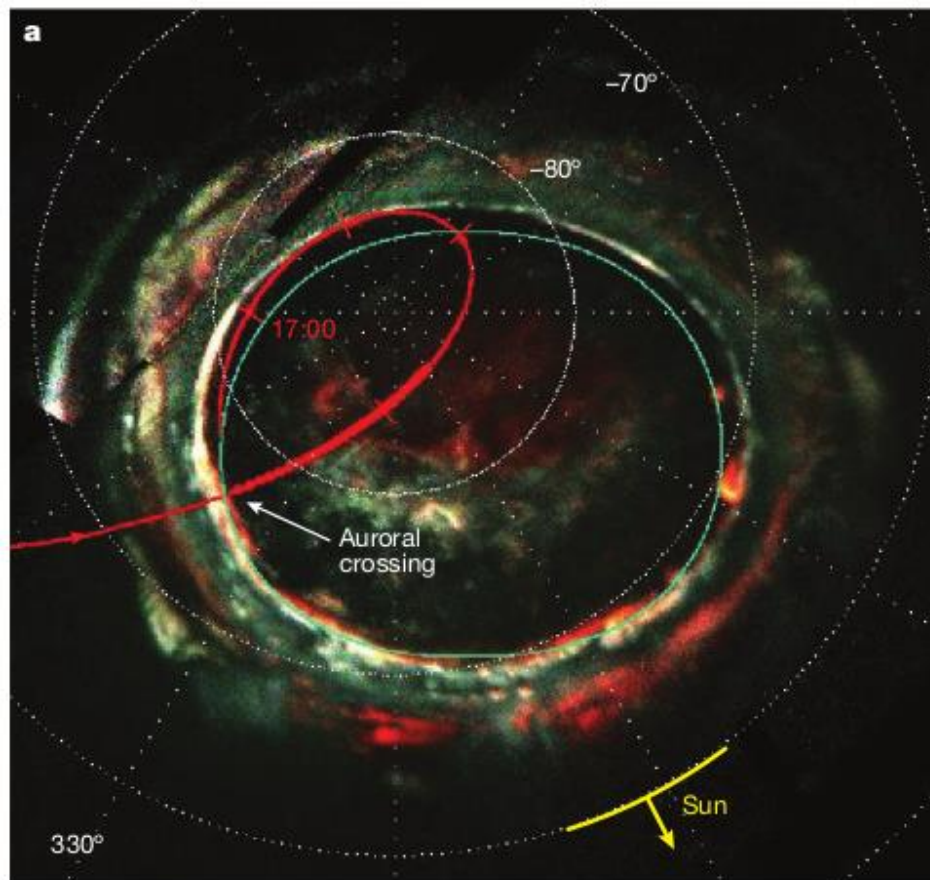
後年の展開

• Juno周回機搭載JIRAM

- H_3^+ オーロラを観測することができる。
- 測定された H_3^+ 発光パワー
(Gerard et al., 2023)
 - PJ1-North: 3.2 [TW]
 - PJ4-South: 1.8 [TW]
 - PJ7-South: 3.0 [TW]
 - PJ9-North: 4.3 [TW]
- 降下電子による大気加熱の45~67%
に相当する冷却が H_3^+ 赤外放射により
生じている。
→ 炭化水素の赤外放射や熱の輸送
(熱圏風)が必要



Juno/UVSが捉えた木星紫外オーロラ

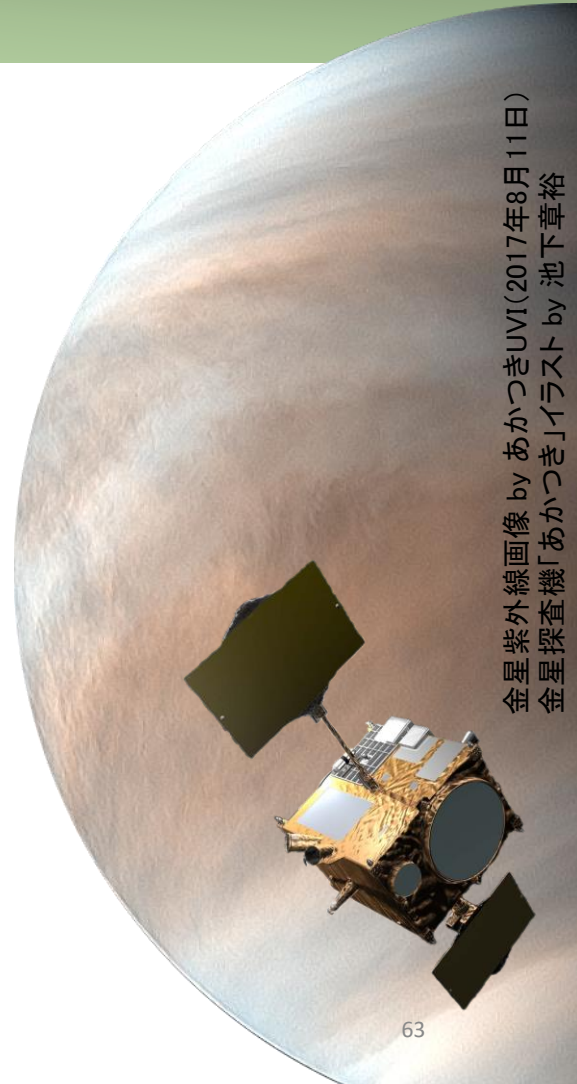


私の木星オーロラ研究 (低緯度発光の解析)

Takehiko Satoh, and J.E.P. Connerney.

Spatial and temporal variations of Jupiter's H_3^+ emissions deduced from image analysis.

Geophysical Research Letters, 26:1789–1792, 1999.



IRTF/ProtoCAM画像中の「非オーロラ」発光

- 「非オーロラ」領域にもうっすらとディスク発光が存在
 - リムで明るさが増していることから、Homopauseより上空の比較的薄い層からの発光を示唆
 - そして「東西非対称」が見られる(1992年1月と3月)
 - 木星の衝の頃(1992年2月28日)は東西対称性が高い
 - これらの観測事実にもとづき、発光層がどのような垂直構造を有しているのかを検討

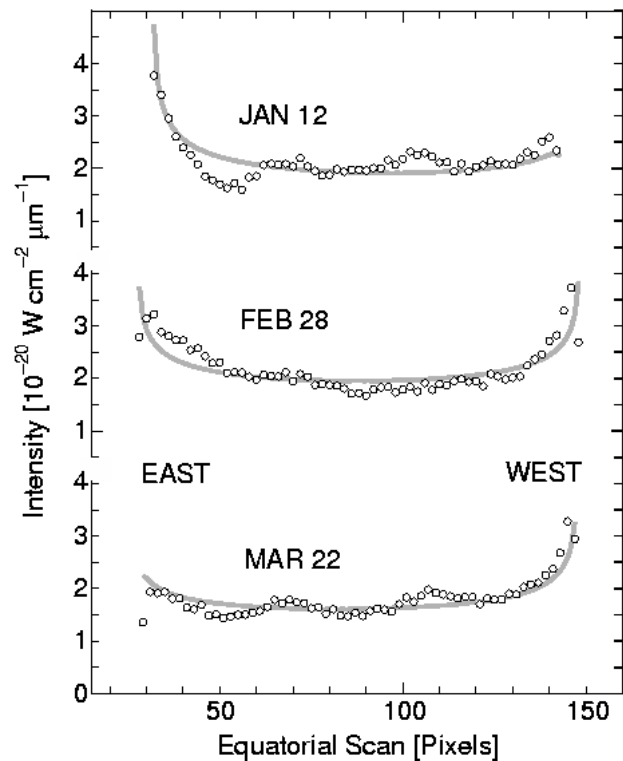
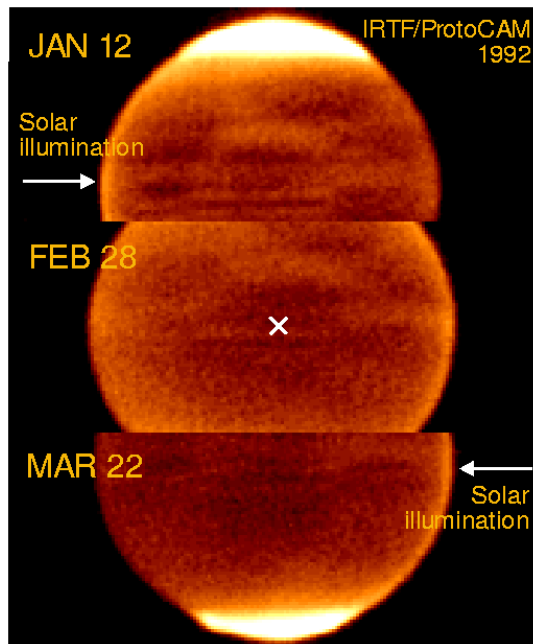
- 太陽光入射角、出射角への依存性

$$D(\mu, \mu_0, \theta) = D_0 \mu^{-1.0} \mu_0^{0.65} \times f(\theta)$$

- 緯度方向への変化

$$f(\theta) = (1 + c \sin^d \theta)$$

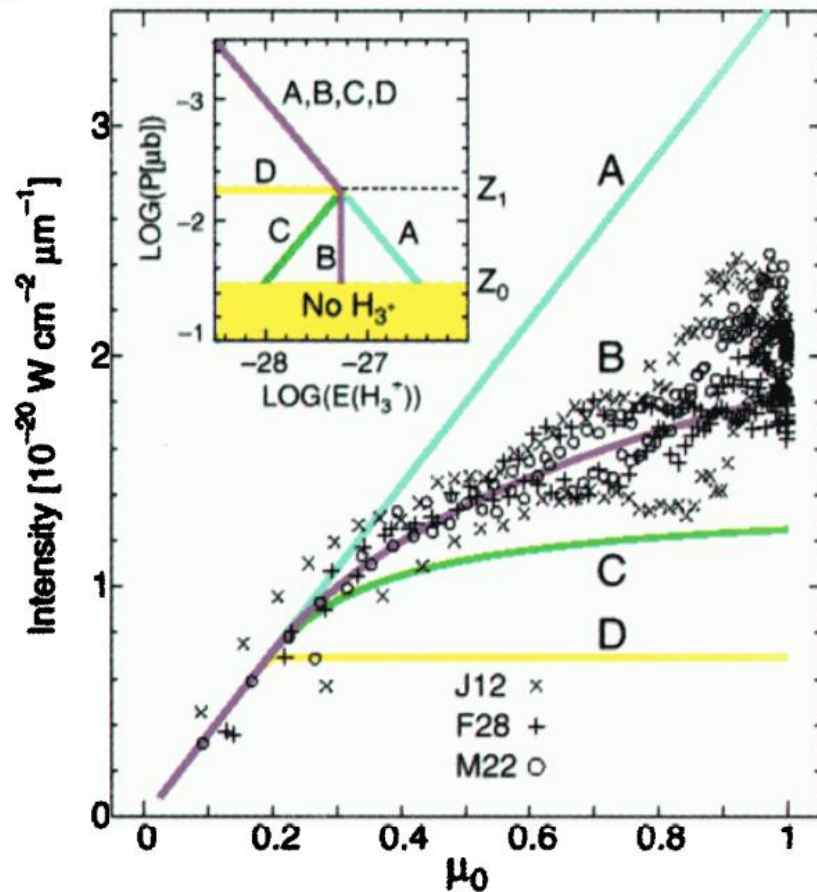
$$c = 6.0 \text{ and } d = 6$$



H₃⁺生成の太陽光入射角依存

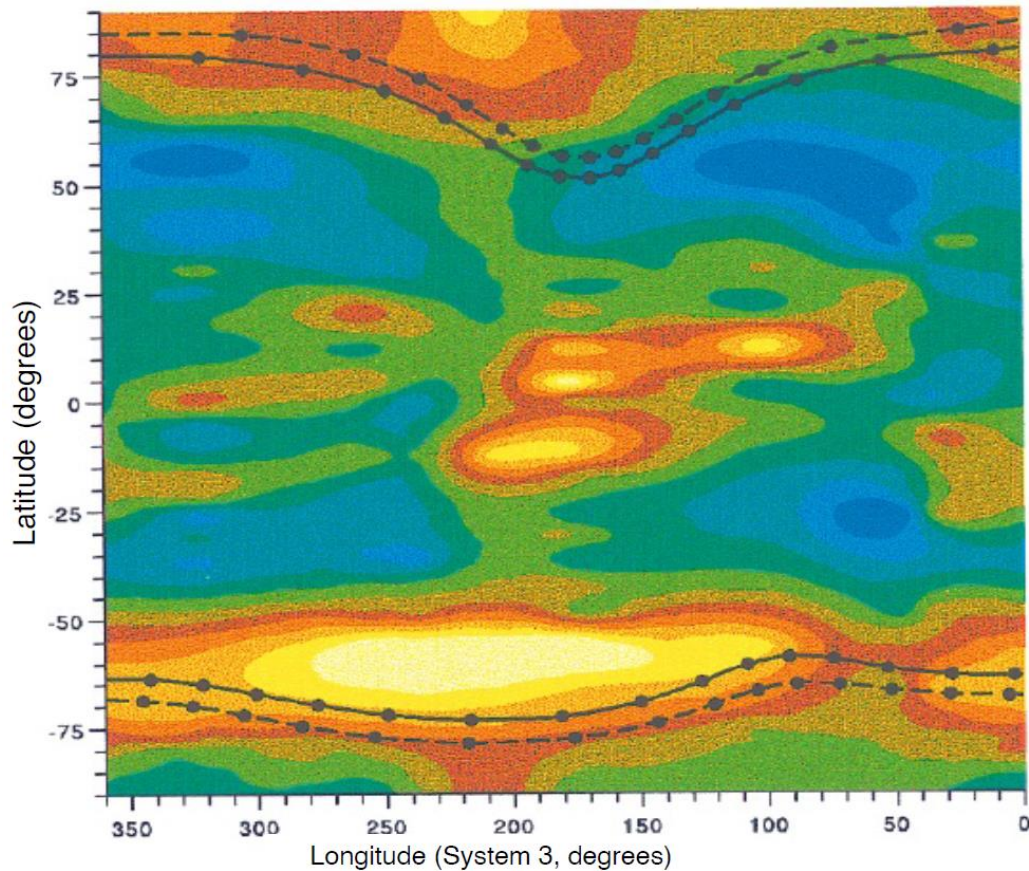
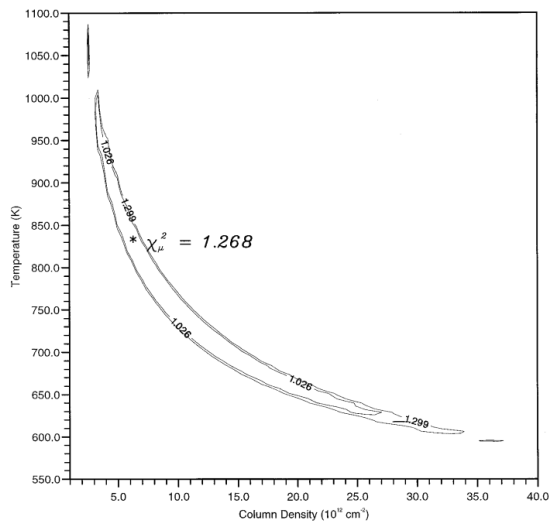
異なる大気モデルの発光見積りと比較

- 高度Z₁より上(全モデルに共通)
 - 気圧(つまり大気主成分であるH₂)の減少に伴い、H₃⁺の生成量が減少
- モデルA
 - Z₁より下方でも同じ傾き、すなわちH₂に対するH₃⁺の比が一定
- モデルB
 - Z₁より下方ではH₃⁺量は一定、すなわち大気主成分H₂との比は下方へゆくほど減少
- モデルC
 - モデルBより速くH₃⁺比が減少
- モデルD
 - Z₁以下にはH₃⁺は存在しない
- 最適なのはモデルB(Z₁ = 725 km)と結論



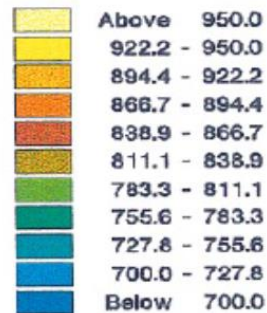
当時のライバル(?)研究

- Lam et al. (1997)
 - UKIRT望遠鏡(口径3.8m)とCGS4分光器を使用しスリット分光
 - Co-variabilityは避けがたい



Lam et al., 1997

H_3^+ Temperature
Kelvin



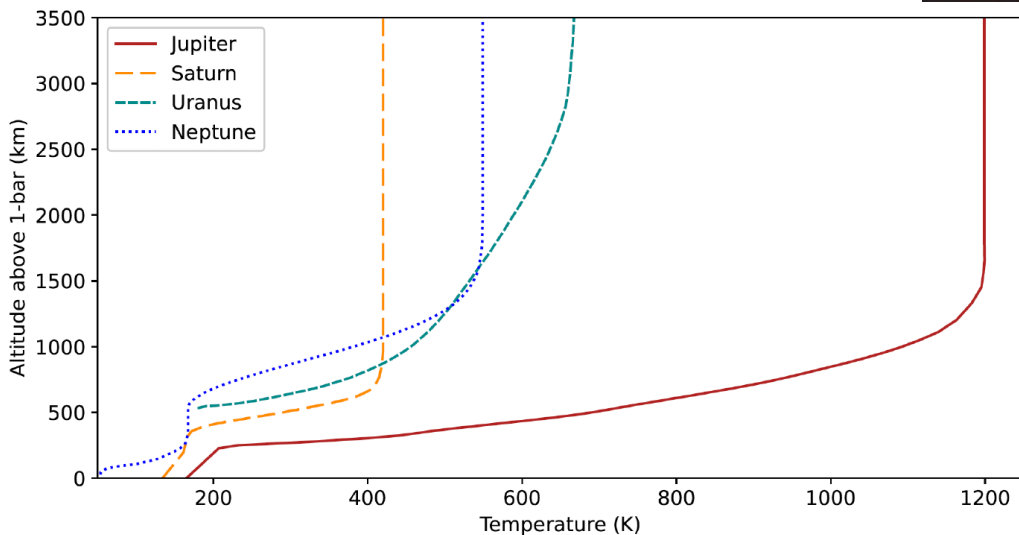
4

後年の展開 (Dr. James O' Donoghue 研究)

木星低緯度の超高層大気が「高温過ぎる」問題

- International Top Young Fellow (ITYF)
Dr. James O' Donoghueの研究
(May 2019 – Oct 2023)

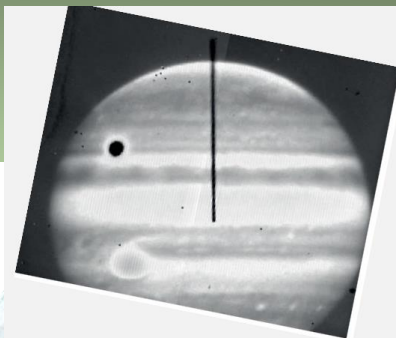
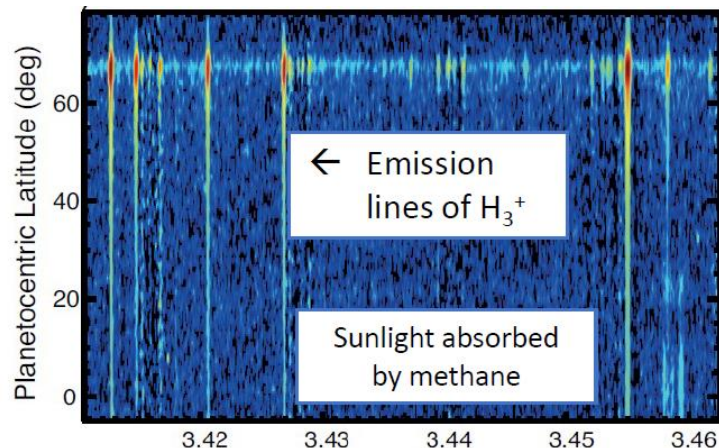
- Keck II望遠鏡を用いたスリット分光観測
(UKIRTの7倍の集光力)



Planet	Observed	Modelled Yelle & Miller, 2004
Earth	700 K	700 K
Jupiter	700 K	200 K
Saturn	420 K	170 K
Uranus	700 K	140 K
Neptune	600 K	120 K

H₃⁺観測から求めた温度をマップ

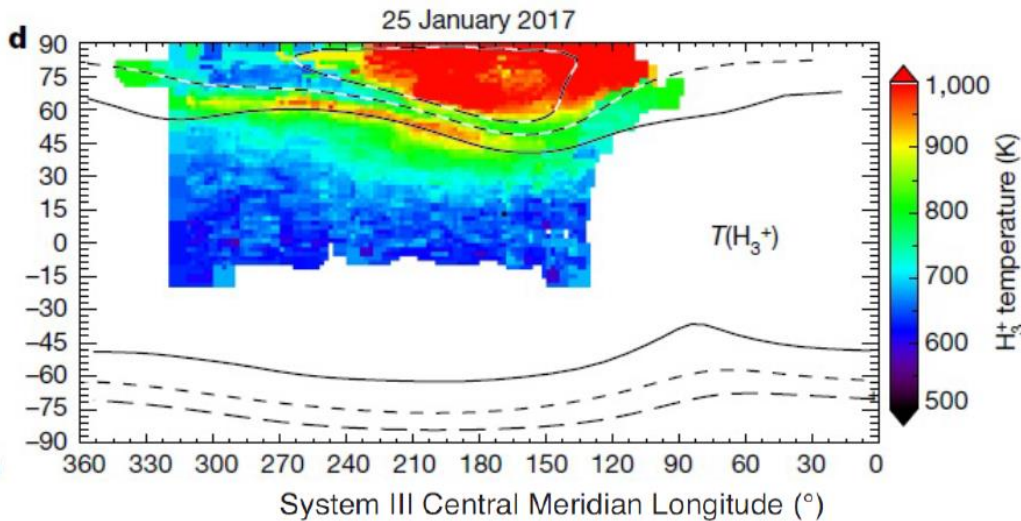
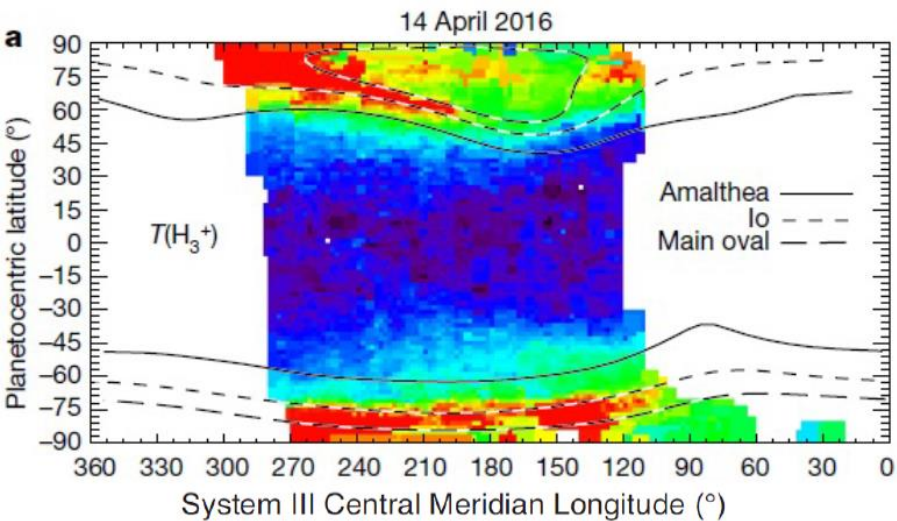
- 観測された輝線スペクトルから温度とcolumn densityを求め、温度を経緯度にマップ
- 2016年は両半球、2017年は北半球のデータ取得



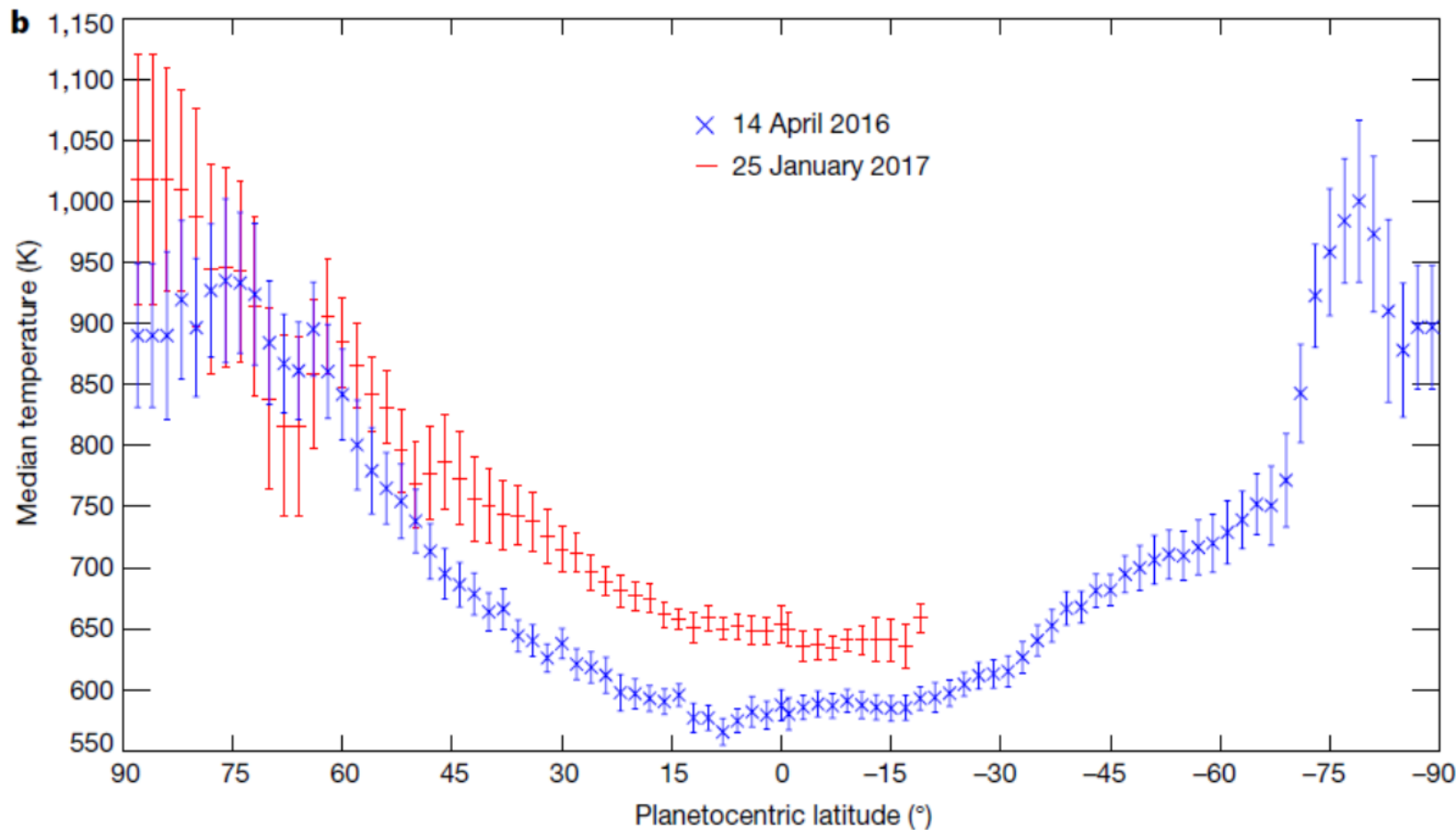
Slit covers half of Jupiter

2016: north and south gives global coverage

2017: only the north gives dense coverage



極から赤道へエネルギーの流れを示唆

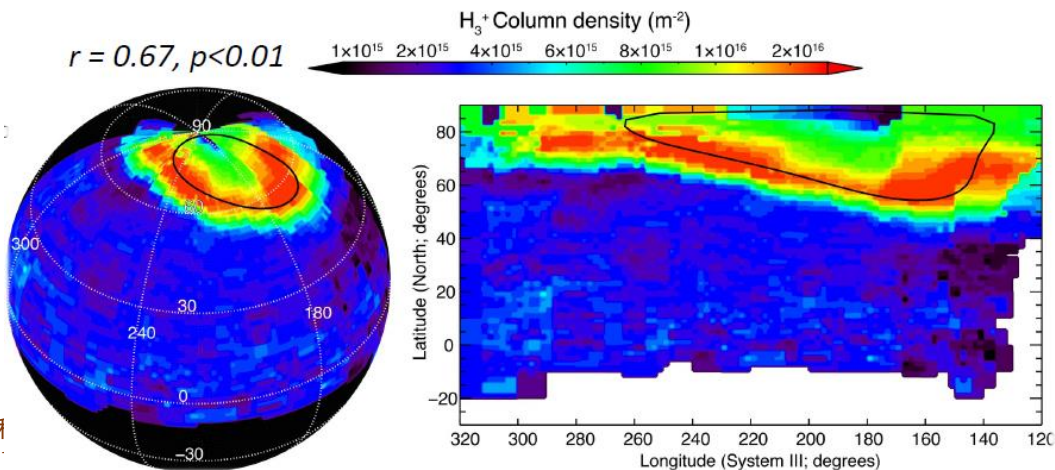
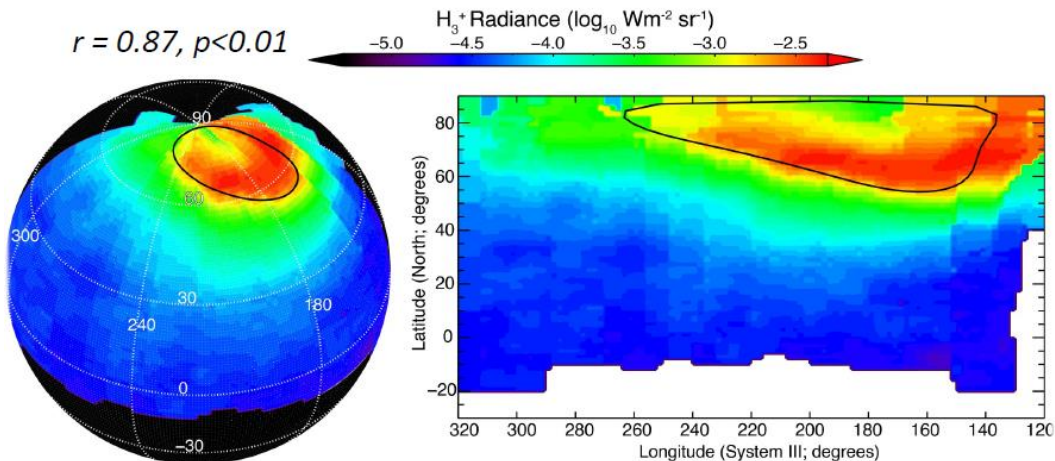


観測量は放射輝度(分光)なので

• Co-variability問題

- Lam et al. (1997)がそうであったように、温度とabundanceは完全には切り分けられないはずである。

- Amarantheaフットプリントの位置に温度の極大が生じているのは、佐藤としては完全には信じてはいません。
- しかし、赤道付近の H_3^+ Column density が約 $4 \times 10^{15} [m^{-2}]$ であるのは、
- Satoh and Connerney (1999)が述べている $3.3 \times 10^{11} [cm^{-2}]$ と良い一致を示している(温度 800 K を仮定し求めた値)。



磁気赤道のシグナルを検出

- Stallard et al. (2018)
 - 1995年から2000年までのIRTF/NSFCAMデータを再処理して、ディスク発光マップを平均
 - 主オーロラ明るさ(MAB)の10%以下の発光マップ中に「暗いリボン」を検出。JRM09のディップ赤道とよい一致を見せている。

