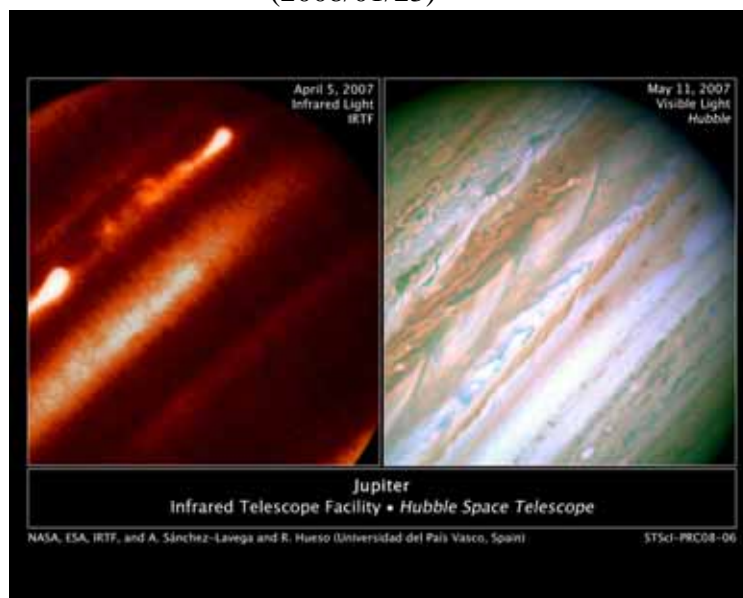


Internal Heat Drives Jupiter's Giant Storm Eruption (2008/01/23)



Internal Heat Drives Jupiter's Giant Storm Eruption (2008/01/23)

木星の巨大な嵐の噴火は内部熱が駆動させている

2007年3月に木星大気に噴出した2つの大陸サイズの嵐の詳細な解析によれば、木星の内部熱が大気の攪乱を生み出すのに重要な役割を果たしている。このoutbreakを理解することが、木星の深い大気に隠されたミステリーを解き明かすキーである、と天文学者は言う。

この現象を理解することは、至る所に嵐が存在し、ジェット気流が大気循環を支配している地球の気象学にとって重要である。大気科学者が猛烈なジェットと過酷な大気現象との性質や相互作用を研究するには、木星は自然な研究室である。

スペインのPais Vasco大学のAgustin Sanchez-Lavegaによって組織された国際チームが、雑誌 Natureの1月24日号でこの事象についての発見を発表している。

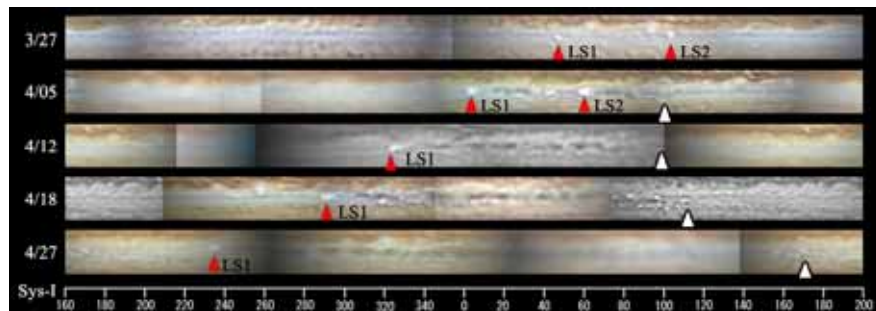
チームは、NASAのHubble Space Telescope、ハワイのNASA Infrared Telescope Facility、Canary Islands (Spain)の望遠鏡を用いて、前例のない解像度で雲の活動の新しい噴火とその発達を観測した。世界中の小望遠鏡のネットワークもこれらの観測をサポートした。

解析によれば、**明るいブルーーム(plume)**は木星の深い水の雲に起因する嵐で、**力強く大気を上昇し、可視光で見えている雲の約20マイル(30m)上空にアンモニアの氷と水の新鮮な混合物を注入していた**。嵐は時速375マイル(600km)で木星大気のジェット気流を進んだ。攪乱のモデルでは、**ジェット気流はほとんどの太陽光が吸収される雲頂の60マイル(ほぼ100km)下である埋もれた大気の深くを拡がる**。

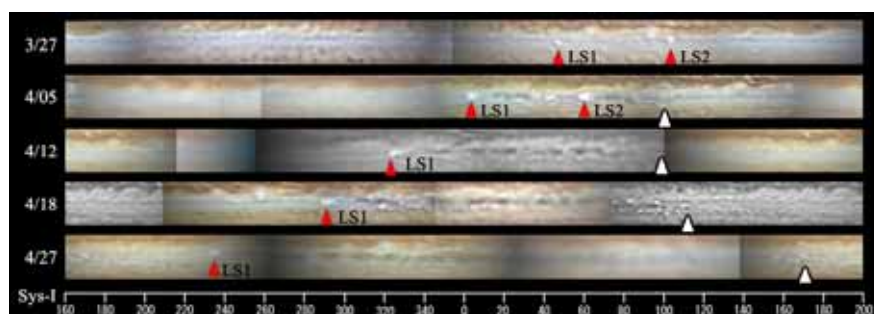
NTBs outbreakからNTB復活

先月号で速報したように、NTBs outbreakの発生は同時に2カ所の白斑(リーディング・スポットLS1、LS2)から始まりました(画像3)。リーディング・スポットがNTBの上層のヘイズを切り裂くように高速に前進し、その通過した後に下層の暗斑が現われてきました(画像4)。その暗斑はほとんど第1系に対して停止しています。後方のリーディング・スポットは、その前方に復活した暗斑に追いついた時点で消失しました。リーディング・スポットからは、白斑が南北に分かれて噴出しているように見えます。

復活したNTBの暗斑の後端では、微細な白斑が複数出現し、そこに暗斑が現れました。さらに後方に向けて、同様に白斑が生じ、暗斑が変わることを繰り返して、NTBの復活が後方にも波及しているようです。間もなくNTBは全周に渡って、濃いベルトとして復活することでしょう。



NTB復活のアニメーション



復活のアニメーション

淡化のアニメーション

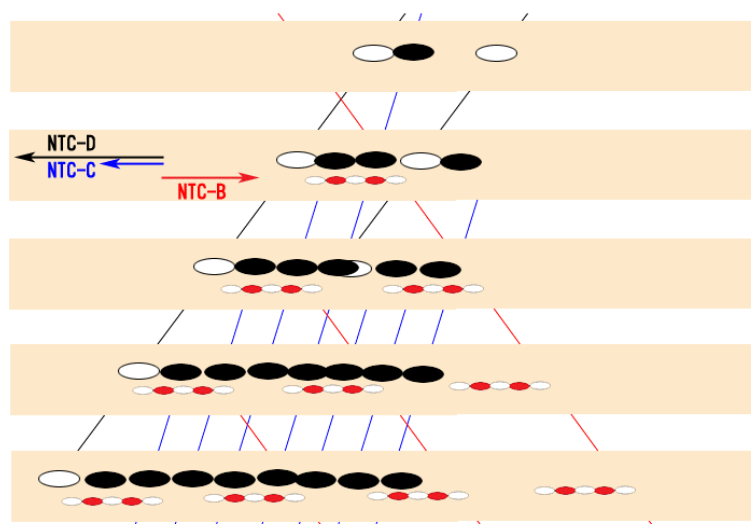
NTBs outbreak : NT Current (北温帯流)

気流	自転周期	ω_1	特徴
NTC-D	9h46m52s	-163.4	木星面で最速の気流でoutbreakで出現する
NTC-C	9h49m17s	-54.2	木星面で最速の気流の1つで、しばしば暗斑が見られる
NTC-B	9h53m08s	+117.2	第I系と第II系の中間速度を持ち、最近では2003年1月NTB淡化後に出現

気流	自転周期	ω_1	特徴
2007	9h46m42s	-170.6	リーディング・スポット

1日当たりのドリフトは第I系に対して-5.7度/日。
 リーディング・スポットはNTC-D (North Temperate Current D) に乗っている。

NTBs outbreak : モデル



LETTERS

Depth of a strong jovian jet from a planetary-scale disturbance driven by storms

A. Sánchez-Lavega¹, G. S. Orton², R. Hueso¹, E. García-Melendo³, S. Pérez-Hoyos⁴, A. Simon-Miller⁵, J. F. Rojas⁶, J. M. Gómez¹, P. Yanamandra-Fisher⁷, L. Fletcher⁸, J. Joels⁹, J. Kemmerer⁸, J. Hora⁹, E. Karkoschka¹⁰, I. de Pater¹¹, M. H. Wong¹¹, P. S. Marcus¹², N. Pinilla-Alonso¹³, F. Carvalho¹⁴, C. Go¹⁵, D. Parker¹⁶, M. Salway¹⁷, M. Valimberti¹⁸, A. Wesley¹⁹ & Z. Pujic²⁰

嵐によって引き起こされた惑星スケールの攪乱から判明した木星の強力なジェット気流の深さ

巨大ガス惑星(木星・土星)の大気は、可視光のレベルで循環を支配しているジェット気流を包み込んでいる。ジェット気流の発生源(太陽放射、内部熱、あるいは両方)や高層雲の下の鉛直構造は、巨大惑星の大気循環や気象学における開かれた大きな疑問である。いくつかの観測や本来の場所での(in situ)計測によって24barの深さで強い風が見つかっており、内部熱源をサポートしていると解釈されている。この論文では、局所的な気象学からの影響の部分で議論を残している。ここでは、木星大気中の最も強いジェット気流(北緯23度)と同じ緯度に噴出した2つのブルームについての観測とモデルを報告する。ブルームは周りの雲の上空30kmの高さに到達し、いかなる他の模様よりも速く移動し(169m/s)、赤いエアゾールを含む惑星スケールの激しい攪乱をその航跡に残した。動的モデリングに基づいて、データは、太陽放射が蓄積しているレベルの下で風がよく拡散していることと矛盾していないと結論づけられる。

2個のブルームの発生と北赤道緯攪乱

New Horizons探査機の通過の間、勢ぞろいした地上の望遠鏡やハッブル宇宙望遠鏡(HST)を用いて、木星は2007年2月以来集中的に調査されてきた。

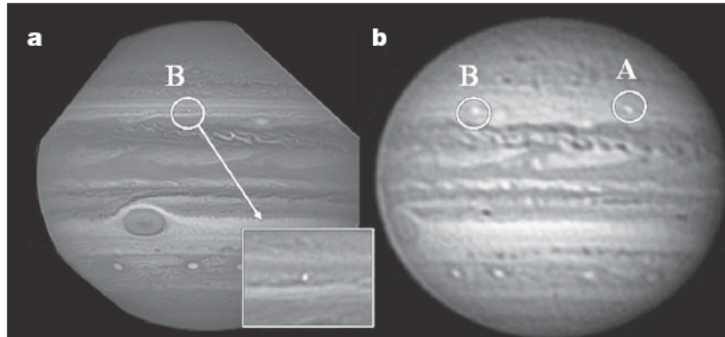
思いがけず、2007年3月25日のハッブルの画像には、通常ではない惑星スケールの攪乱の始まりがとらえられ、その攪乱は北緯23度の木星面上で最速のジェット気流のピークにあり、その東向け速度は体系IIIの電波自転周期に対して典型的な140m/sから180m/sの間であった(図1)。

ジェット気流のピークで、500kmのサイズの小さくて丸い輝く雲(ブルームB)が急速に成長し、そのことから質量流動保存から約-1m/sの平均的な鉛直方向速度を暗示している(参照12)。

2番目のブルーム(ブルームA)が、ブルームBの東63,000km(経度で55度)の距離に、9.26時間以内のうちに噴出した。もしブルームBがブルームAを引き起こしたのであれば、引き金メカニズムの伝播速度は1.9km/s、あるいは6barにおける音速の約1.5倍と言える。ブルームAとブルームBは、それぞれ169m/sと164m/sの速度で移動した。

100m/sから150m/sの範囲(図2)の速度を持つ、ゆっくりと移動する暗斑と白斑のパターンが、両方のブルームの航跡の西方に順次残されて、北温帯緯攪乱を形成していった。引き続いた雲とエアゾールの混合によって、均質で赤みの強い北温帯緯が形成された(図1)。

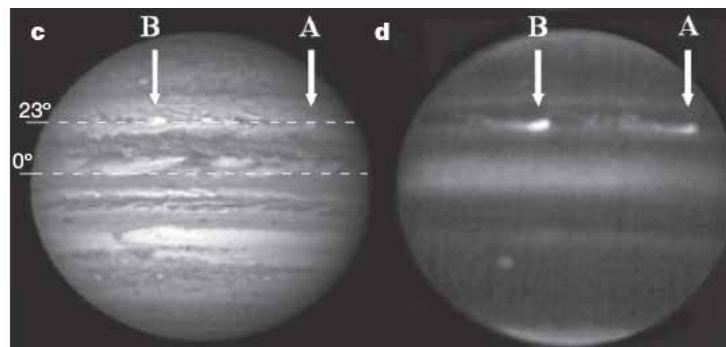
図1 プルームの始まりと成長、および攪乱の発達(2007年3月～5月)



a: プルームBの始まり、3月25日(HST,410nm)。

b: プルームAとBの成長、3月27日(IOPW,可視光)。両方のプルームが約1.3日で2000kmの大きさまで成長した。プルームAは北緯 23.4 ± 0.5 度で、 164.3 ± 1.7 m/sの速度で移動した(補足資料参照)。

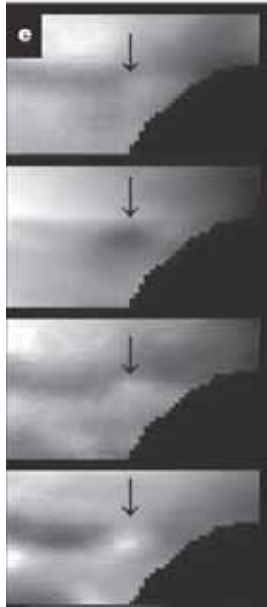
図1 プルームの始まりと成長、および攪乱の発達(2007年3月～5月)



c: 航跡の中のプルームと攪乱、4月5日(IOPW,可視光)。両方のプルームは可視光で明るく(緯度方向の大きさは2500km、経度方向の大きさは4000km)、高高度レベルのみで特に波長感受性が大きかった。

d: プルームとその尾が高高度に見られる(NASA-IRTF, $2.3 \mu\text{m}$ メタンフィルター)。

図1 プルームの始まりと成長、および攪乱の発達(2007年3月～5月)



e: 4月5日の熱赤外線観測されたプルームAのマッピング(IRTf)。展開図からのこれらの引用は、プルームの頭部の表示パラメータの帯状平均からの偏差を示している。

(上から下へ、

123.4mbarにおける温度、

393mbarにおける温度、

600mbarより上のエアゾール容積、

300mbar近傍のアンモニア量)。

プルームが392.9mbar近傍の低温を作り出しているが、123mbarではわずかに高い温度を作り出している。同様に、アンモニア雲レベルのエアゾールと300mbarのアンモニア気体量が増加している。矢印がプルーム頭部を示す。

図1 プルームの始まりと成長、および攪乱の発達(2007年3月、～5月)



f: プルームAの航跡中の乱気流と波状パターンから、新しい北温帯縞の形成が引き続いて起こった。

これらは、HST(左、410nm、拡大)とIOPW観測者(右、水平線が北温帯縞の領域を示す)によって5月1日に観測された。

HST画像から、乱気流のパターンは北緯20-28度で形成されていて、その大きさは7000～12000kmの主波長を持っている。

プルームAによって落とされた暗斑が約14日でプルームBに到達した頃に、プルームBは消失した。攪乱は西方に進行し、5月11日にその東端でプルームAと出会い、消失した(寿命は45日であった)。

ブルームの高さ

広い波長範囲(230nmの紫外線から20.8 μ mの熱赤外線まで)によって、攪乱の前・中間・後でのブルームと取り囲む雲の物理的性質を検索することができる。

2つの放射遷移コードがブルームの反射能と発光に一致するように用いられた。

その1つは雲の性質と雲頂高度を調べるために可視光と近赤外線(230nm-3 μ m)であり、もう1つは温度・エアゾールの不透明度・気体量を調べるために熱赤外線(8.7-20.8 μ m)である(図1e)。

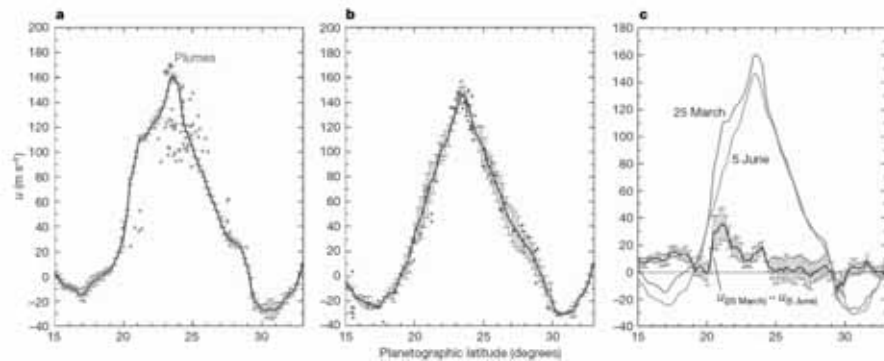
ブルームの頭頂の粒子は 60 ± 20 mbarレベルに、すなわち対流圏(100-150mbarの間に位置する)の約15km上空と、200-400mbarレイヤー(可視光で見えている雲模様を含む対流圏ヘイズが最も高い)の30km上空に到達した。

雲の上には 40 ± 10 mbarを基本とする薄い成層圏ヘイズが上空に広がっているが、明らかにブルームはこのヘイズに到達していなかった。ブルームは高い光学的厚さ(約50)を持っていて、最適モデルによれば典型的な半径が 7 ± 1 μ mの明るい粒子を導き出している(補足情報)。

200-400mbarの対流圏ヘイズはより小さな粒子(約0.5 μ m)によって形成される。攪乱の間、対流圏ヘイズは、その高度に著しい変化をすることなく、光学的厚さが 5 ± 1 から 10 ± 2 に増加したが、赤味がかかったエアゾールを作り出した。

それで、ブルームの頂(図1d)は、激しい上昇気流によって高く持ち上げられた新鮮な氷の粒子(たぶん水・アンモニア・ NH_4SH の凝縮された成分の混合物)で形成されていて、攪乱がエアゾール濃度を増加させ、赤い色素を作り出した、あるいはすでに存在している色素に混合した、と結論づけた。

図2 北温帯流のプロファイルの時間依存性



a: 雲を追跡することによって測定された2007年3月25日から5月31日までの攪乱()とブルーム()の帯状速度で、HST画像の1次元帯状輝度相関によって得られた噴出日のプロファイル(実線、2007年3月25日に前攪乱状態と比較している(エラーバーは測定の標準偏差を示す))。

b: 攪乱が終了した2007年6月5日のジェット気流プロファイル。実線は帯状相関によって得られたプロファイルで、点線は雲の追跡によって得られたもので、両方ともHST画像による(エラーバーは測定の標準偏差を示す)。

c: 噴出前(2007年3月25日)と攪乱終了後(2007年6月5日)のジェット気流プロファイルの比較。緯度の関数として、両方のプロファイルの間の差が、測定の標準偏差を示すエラーバーと関連した暗線として示される。

ジェット気流速度プロファイルの変化

我々の高い時間サンプリングのおかげで、雲のレベルで攪乱と関係するジェット気流速度プロファイルの変化を(これまでにない分解能で)追跡することができた。

我々は攪乱が噴出した日(3月25日)、発達している間(3月-5月)、停止した後(6月5日)に測定を行った。(分解能はハッブルのフレームでピクセル当り170kmから135kmの範囲であった。図2)。

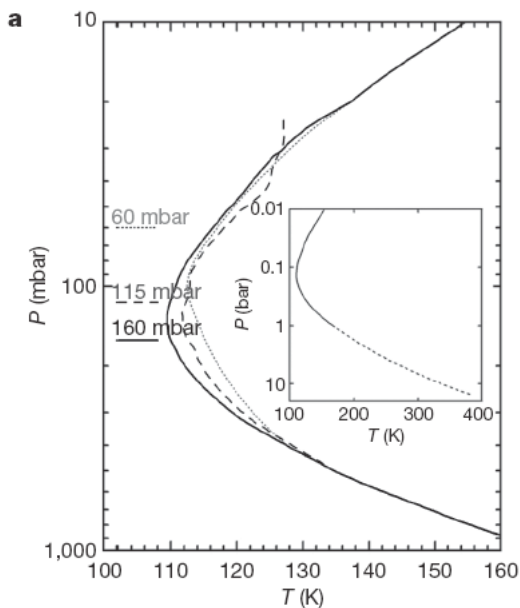
北緯22度から26度の攪乱の様子は、攪乱前のジェット気流よりも低い帯状速度を示していたが(図2a)、ブルームはジェット気流のピークよりも速く移動した。

我々はパターンを、明るい高速移動ブルームによって引き起こされた強い子午線方向のシアージェット気流の不安定性の結果であると解釈した。

ジェット気流は攪乱の停止の後ではより対称的になり、ピーク速度は約15m/sだけ減少し(図2b,c)、1979年と2000年の間に観測されたほぼ40m/sの変化よりは小さかった。

結論として、攪乱の発達によって生まれた混乱に対してジェット気流は強固さを保ったということであり、動きが測定できる上層雲の下の深くをジェット気流は広がったことを示している。

図3 プルームの始まりと攪乱の発達のモデル



a,b: プルームの湿った対流の3次元モデル。

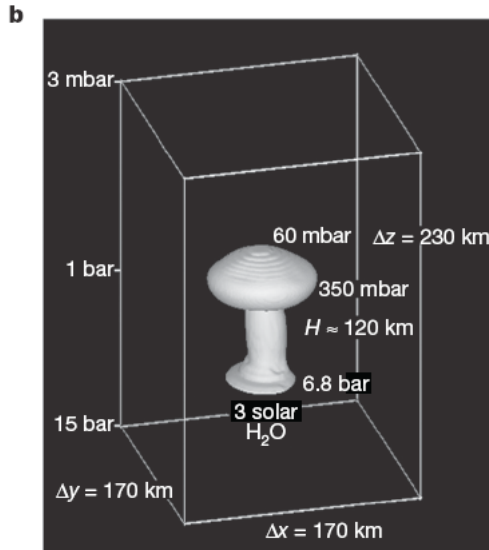
a: シミュレーションを実行するときに使用した熱プロファイル、および太陽の存在量の3倍の深い水と凝縮レベルの上空の95%の相対湿度を仮定した対流セルによって到達した雲頂レベル。

Pは圧力、Tは温度。

実線はカッシーニのNTB位置でのCIRS熱プロファイル、破線はボイジャーのIRIS熱プロファイル、点線は60mbarレベルに到達するために嵐に必要なとする500mbarから200mbarまでのそれほど静的でない安定性を持つ合成プロファイルに相当する。

挿入図は大気中のwet adiabatic extension deepを表している。

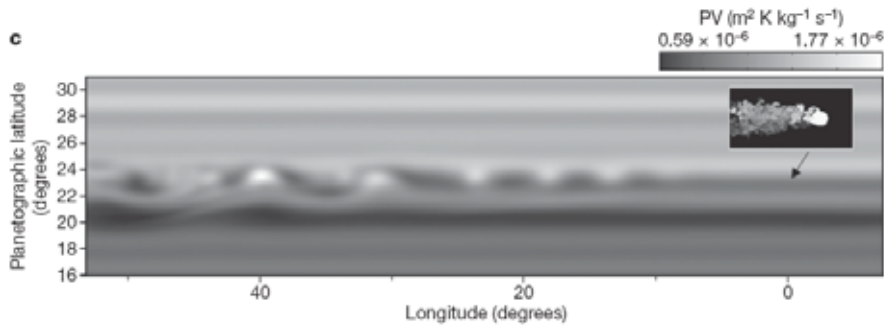
図3 プルームの始まりと攪乱の発達モデル



a,b: プルームの湿った対流の3次元モデル。

b: プルームの観測された雲頂とシミュレーションのドメインを合わせることができるモデルから得られた対流セル。

図3 プルームの始まりと攪乱の発達モデル



c: ジェット気流のピークに置かれた丸い雲の2次元モデルから得られたプルームの輝度分布(挿入図)と、10000 × 5000kmの範囲を空間分解能5kmで計算された带状風の子午線方向のシアと相互作用する発達。

マップ(メインパネル)は、シミュレーションの30日後の650mbarにおけるErtel's potential vorticity (PV; グレースケール)の分布を表していて、ジェット気流が高度約0.6barの上層雲レイヤーから少なくとも5-7barまで(水の雲とプルーム発生源位置)、一定の値で鉛直方向の下方に広がっている場所を示す。

挿入図とマップは同じスケールである。

ブルームのモデル

この仮説をテストするために、2つの異なったタイプの動的モデルを実行した。

最初は3次元の湿った対流コード(図3a,b)を用いてブルーム形成をシミュレートし、観測された高い高度にブルームを持ち上げることができる大気条件を調べた。

以前の広範囲のシミュレーションによれば、高くはなく、湿ったadiabaticではない環境で発達する場合に限り、太陽系の水の豊富さ(solar water abundance)と高湿度が嵐を対流圏に運ぶことができることを示している。

60mbarレベルに達するために、標準的な鉛直温度-圧力プロファイル、およびアンモニアと水の豊富さの中で変数をテストした。

湿った水対流(5-7barでの雲のベースレベル)によって力を与えられた1つの上昇気流セルは、2-3倍の太陽系の水の豊富さを必要とし、それはほとんど100%の相対湿度になり、また上空の対流圏(200mbar、図3b)の参照温度よりも3-5K冷たい熱プロファイルとなる。

ブルームはこれらのセルのクラスターによって形成されるかもしれない。したがって、ブルームは深く根付いていて、鉛直方向に120km以上(60mbarから5-7barまで)広がっている。

これらの高速の帯状の動き(169m/sと165m/s)は、5-7barでのベースにおける風の動きを反映している。0.3-0.4barと5-7barでの速度を比較すると、上層雲の下の鉛直方向の風のシアは低いことが分かり(20kmのスケール高さについて約4m/s増加している)、ブルームの寿命と一致している。強力な鉛直方向のシアの流れのもとでは、我々のモデルではupwellingが中断され、ブルームは発達しない。

3次元モデルの結果を2次元モデルに取り込んで、可視光で見える雲レベルで観測された尾を再現した(図3c、挿入図)。

攪乱の乱れたパターンの構造と動き

鉛直方向の風シアの2番目のテストでは、攪乱の乱れたパターンの構造と動きをシミュレートするために、EPIC一般循環を用いた(図3c)。我々は攪乱噴出前に計測したジェット気流プロファイルを入力として用いた(図2a)。鉛直方向の風シアが変化する屈曲点とこの鉛直方向の風シアの値である、2個の自由パラメータを用いて、ジェット気流ピークの中心に置かれた大気チャンネル上のジェット気流ピークに、1個の点熱源を導入することによって、乱れたパターンの形成をテストした。

雲の上(0.6から0.01bar)では、カッシーニ・フライバイの時に観測されたように、ジェット気流速度は減速していると関係した。乱れたパターンの形成は雲のレベルではジェット気流の形に非常に敏感である。異なった時代に測定された風プロファイルを用いる数値シミュレーションを行なうことで、この感度をテストした。

これらの間で、カッシーニ風プロファイルと6月5日のハッブル・プロファイルは、熱源の摂動に対して安定であった。反対に、我々が噴出した日に測定したジェット気流プロファイル(図3a)は、摂動を導入すると速やかに不安定になる。さらに、攪乱のパターンは屈曲点が600mbarの圧力の時に(予想されたアンモニアの雲レベル)観測されたものと似ていて、この高さから5-7barの水の雲ベースまで降下している鉛直方向の風シアが0であるか、わずかに深さが増加している。この結果によって、少なくとも5-7barの圧力レベルまで“天気レイヤー”全体に沿って降下した鉛直方向の風シアをジェット気流が広がっているという結論を確実なものにしている。

以前に行った1990年の攪乱の長期の振る舞いをEPICシミュレーションで得られた風速240m/sと同様に、北緯23度における5-7barの帯状風速169-165m/sは、北緯7度におけるガリレオ探査機によってその深さに決定された速度180m/sと一致している。これらの研究は、風は上層アンモニア雲の下で減衰しなくて、1-2barの太陽放射浸透レベルよりも深いところで拡散する(補足資料参照)ことを示していて、木星のジェット気流構造の深さと安定性に関する以前の考えと同じである。

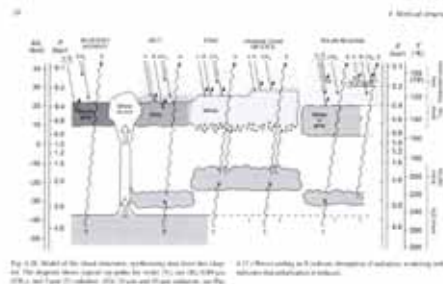
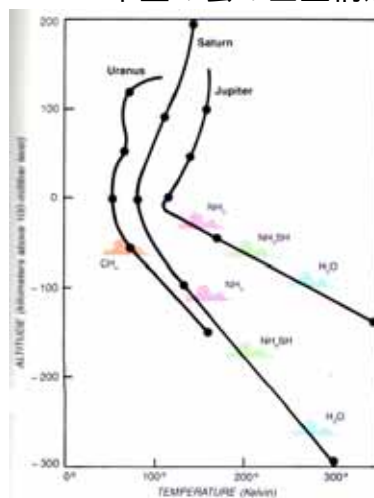
結論

1975年と1990年の2つの過去の事象と今回の攪乱(2007年)と比較すると、新たな注意と驚くべき類似性が見られる。

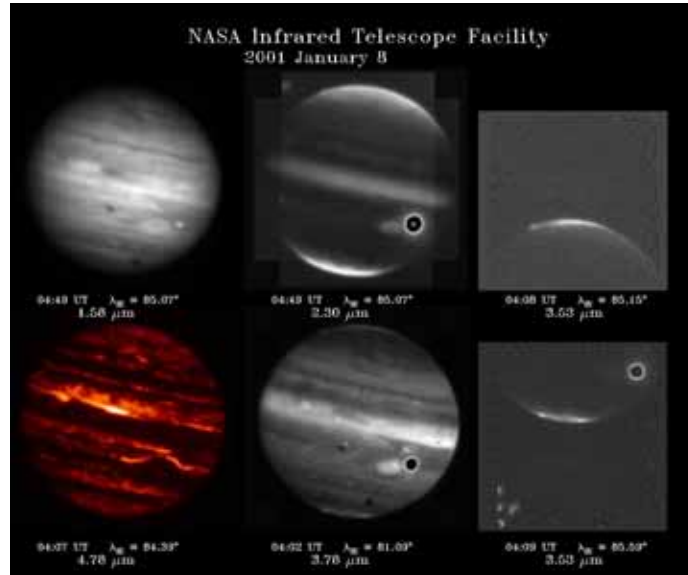
- (1)outbreakはだいたい15-17年ごとに発生する。
- (2)ブルームはジェット気流のピークの ± 0.5 度以内にいつも出現する。
- (3)攪乱は2つのブルームで噴出する(1つでも2つ以上でもない)。
- (4)経度が東側に位置しているブルームがいつも最速である(両方の間の距離が最短であることを参照として扱う)。
- (5)ブルームは3つの事象の全てで速度がだいたい165-170m/sの範囲で移動している。

フィルター観測で分かること

木星の雲の垂直構造を知ることができる。

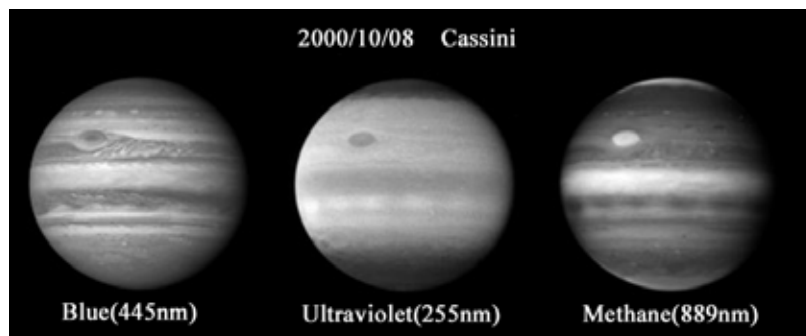


赤外域での観測



カッシーニ

紫外域の観測

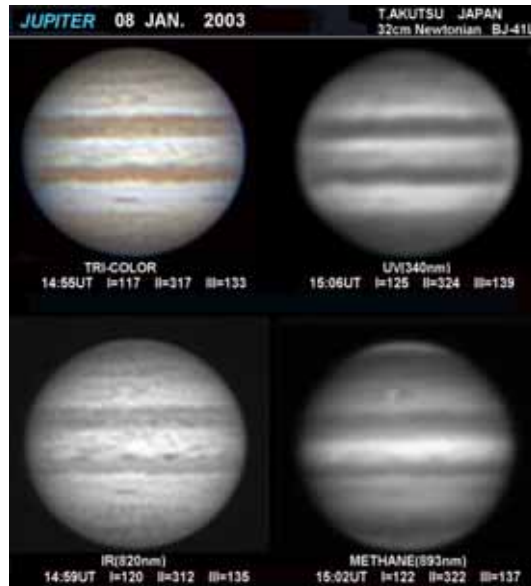


全てのガスは太陽光を短波長ほど強く散乱する(地球で空が青見える理由)。
紫外域ほど散乱は強くなり、雲の上のガスでは差がない。そのため、暗いバンドが消えてしまう。高層のヘイズだけが、明るい背景に対して暗く見える。

メタンバンドでは逆で、メタンガスは太陽光を強く吸収するので、暗く見える。暗いバンドは見えなくなるが、高層のヘイズは暗い背景に対して相対的に明るく見える(極と赤道)。

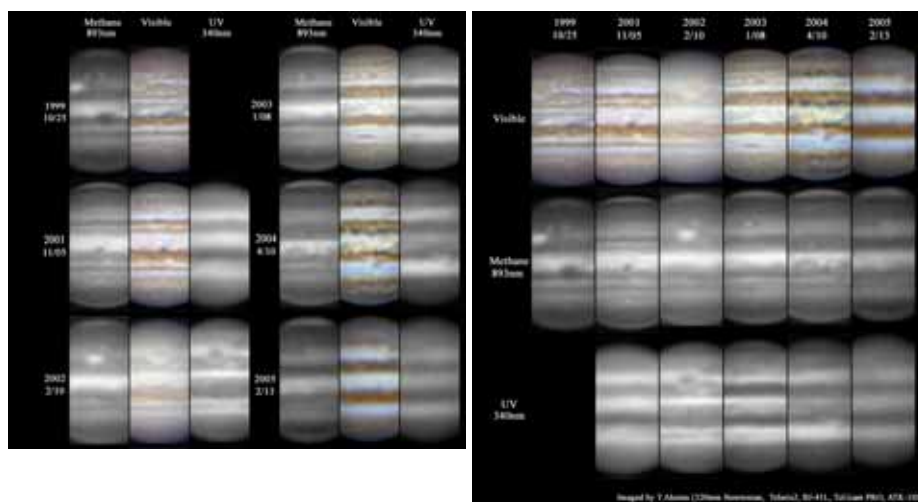
阿久津富夫

メタン + UVでの観測



阿久津富夫

メタン + UVでの観測



カッシーニの動画(メタンバンド)

