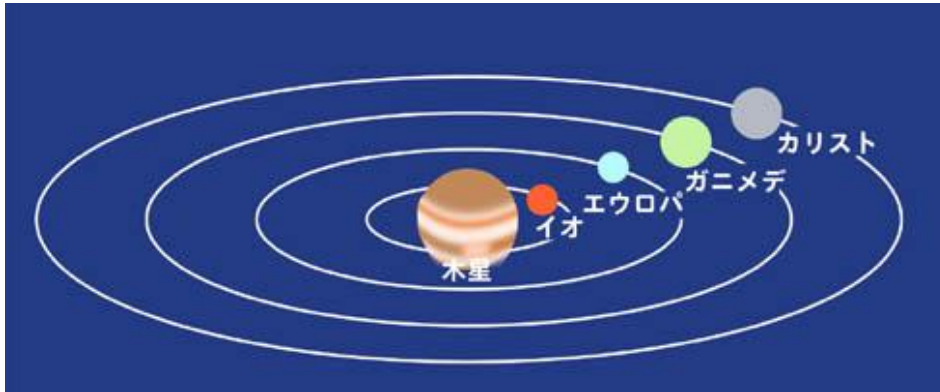


ひさき衛星を用いたイオ周辺の 酸素原子発光解析

古賀亮一, 土屋史紀, 鍵谷将人, 坂野井健(東北大, 惑星プラズマ・大気研究センター); 吉川一朗(東京大); 村上豪, 山崎敦 (ISAS); 木村智樹 (理研); 吉岡和夫 (立教大)

イオ概略と大気生成



イオは木星のガリレオ衛星の内一番内側を回る衛星
平均公転距離421,700km($6R_J$)
公転周期 1.76日

Fig.1 Orbits of Galilean satellites
(Hiratsuka City Museum,
http://www.hirahaku.jp/hakubutsukan_archive/tenmon/)



Fig.2 io volcanic

イオは木星の潮汐力による活発な火山活動によって S , SO , SO_2 を豊富に含んだガスを排出している

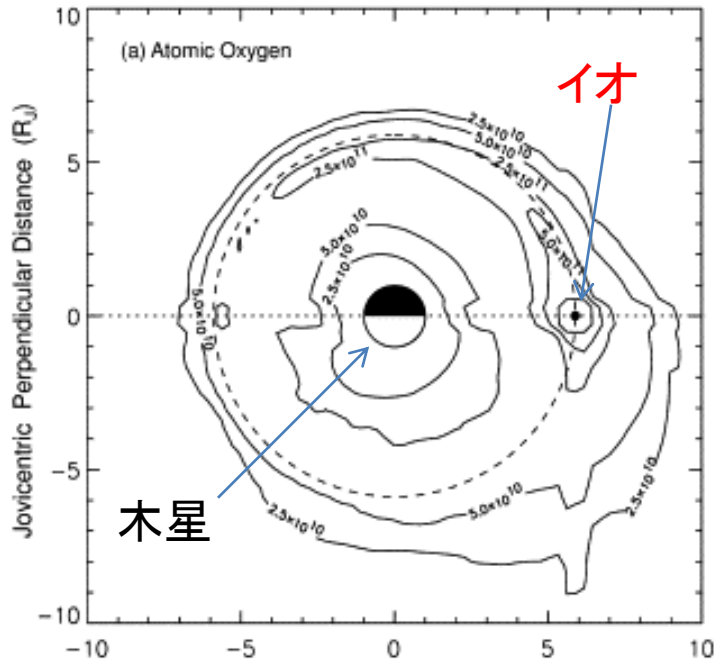
考えられているイオ大気生成メカニズム

- ① SO_2 の昇華
- ② 火山活動
- ③ 固体表面へのイオンスパッタリング



火山噴火はイオの大気生成にどれくらい寄与しているのだろうか？

大気分布モデル



イオの脱出速度; 2.6 km/s

噴火によって酸素原子が排出される速度; 1 km/s

→ 噴火だけではイオの重力圏を振り切ることはできない

しかし、酸素原子はモデルでは左図のようにイオ軌道全体に分布している

酸素原子はどのようにしてイオの重力圏外まで輸送されるのかを次のスライドに示した

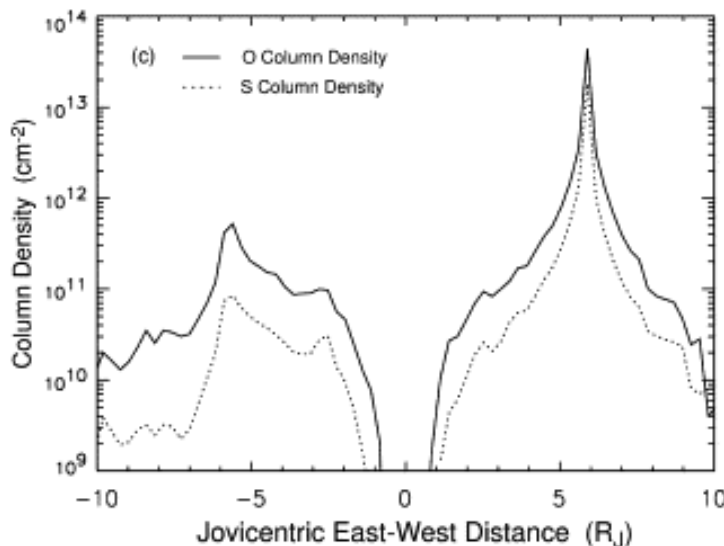
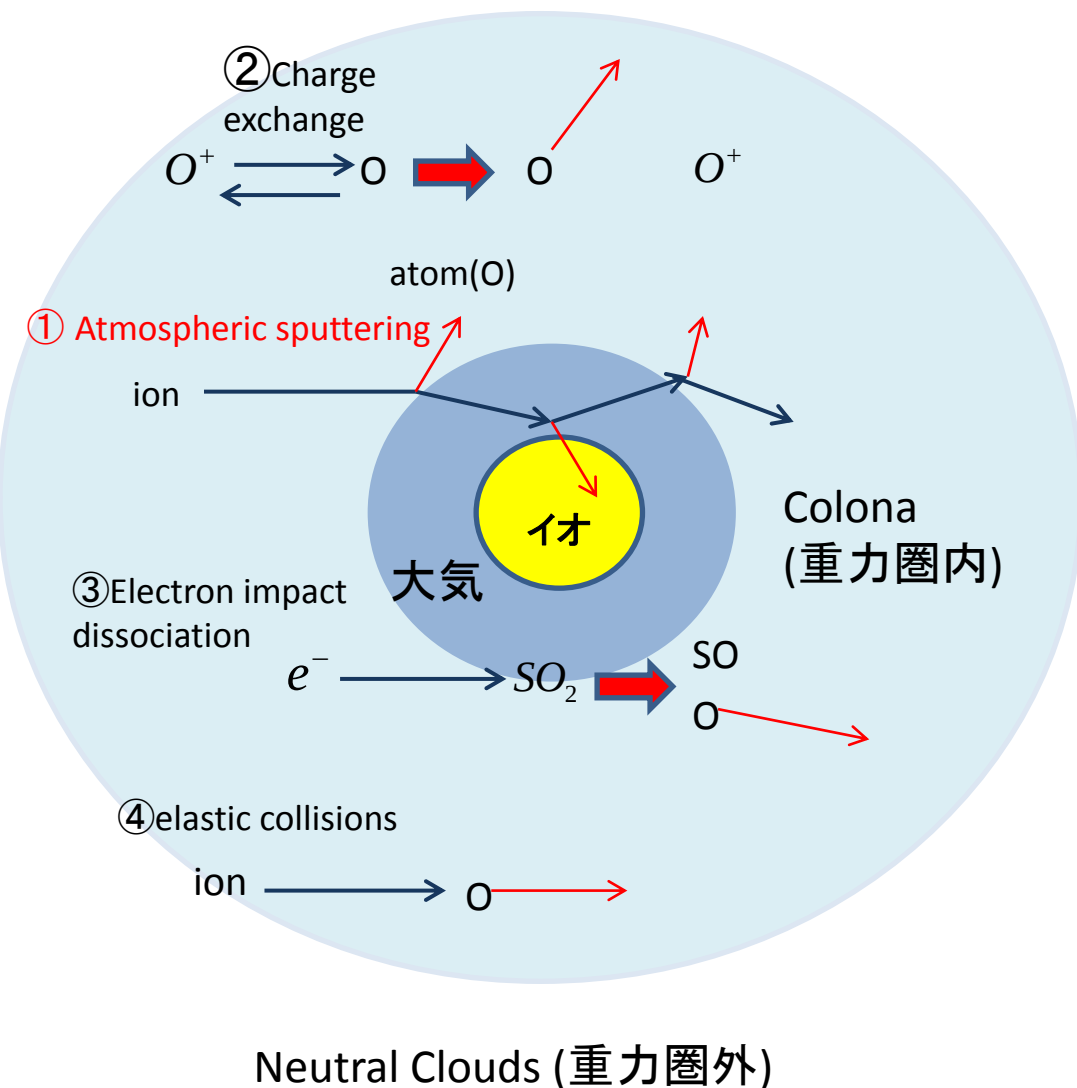


Fig.3 Distribution of atomic oxygen about Jupiter. For a line of sight perpendicular to Io's orbital plane, the model calculated circumplanetary distribution of the column density (atoms cm^{-2}) is shown for atomic oxygen (Smyth and Marconi, 2005)

酸素原子の輸送機構



共回転イオンや電子速度; $57 \pm 30 \text{ km/s}$



イオ軌道を回るイオンや電子との衝突作用によって右図のように酸素原子は重力圏外まで輸送される

Fig.4 transport process of oxygen atoms

発光原理と濃度推定

- イオ周辺の酸素原子は次の二つのプロセスで励起して発光する
イオ周辺の柱密度は $N(O)$, 発光強度 $B_{130.4nm} = B_1 + B_2$ (Rayleigh)

1. 酸素原子の共鳴散乱; 太陽光の130.4nmの波長の光を選択的に吸収

$$B_1 = \frac{4\pi I}{10^6} = \int n(z) g dz = N(O) g$$

g; g-factor
C; 電子衝突係数

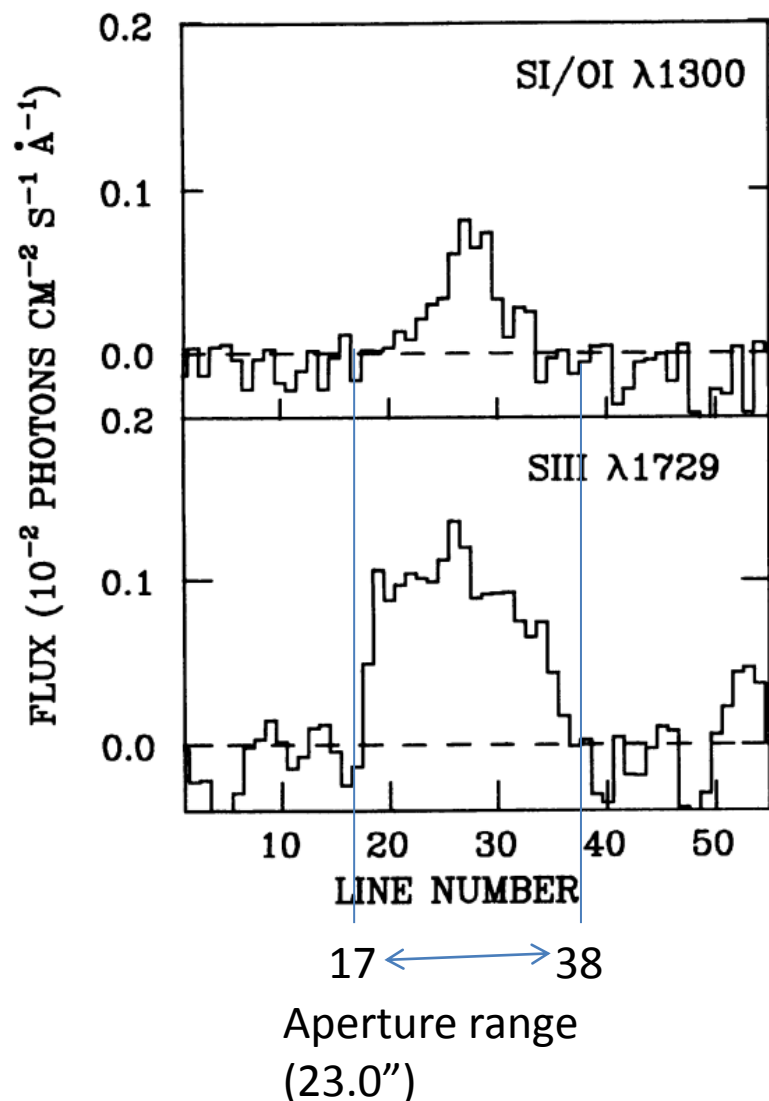
2. 酸素原子と電子の衝突; $O + e^- \rightarrow O^* + e^-$ Ne; 電子密度

$$B_2 = \frac{n_e N(O) C}{10^6} \quad (130.4nm)$$

- 電子衝突による発光が共鳴散乱に比べて無視できないほど大きい場合、
酸素原子の分布を定量的に示すには電子密度と130.4nmの発光強度
を観測で求める必要がある

$$\left(\frac{n_e C}{10^6} + g \right) N(O) = B_{130.4nm}$$

Previous study, $5R_{Io}$ around Io



•イオ中心から $5R_{Io}$ 全体の明るさは次の通り

1986/7/18

位相角 $34^\circ \sim 149^\circ$ (dawn側)

露光時間 13.5時間

→ $95 \pm 12R$

1986/10/12

位相角 210° to 330° (dusk側)

露光時間 13.83時間

→ $121 \pm 15R$

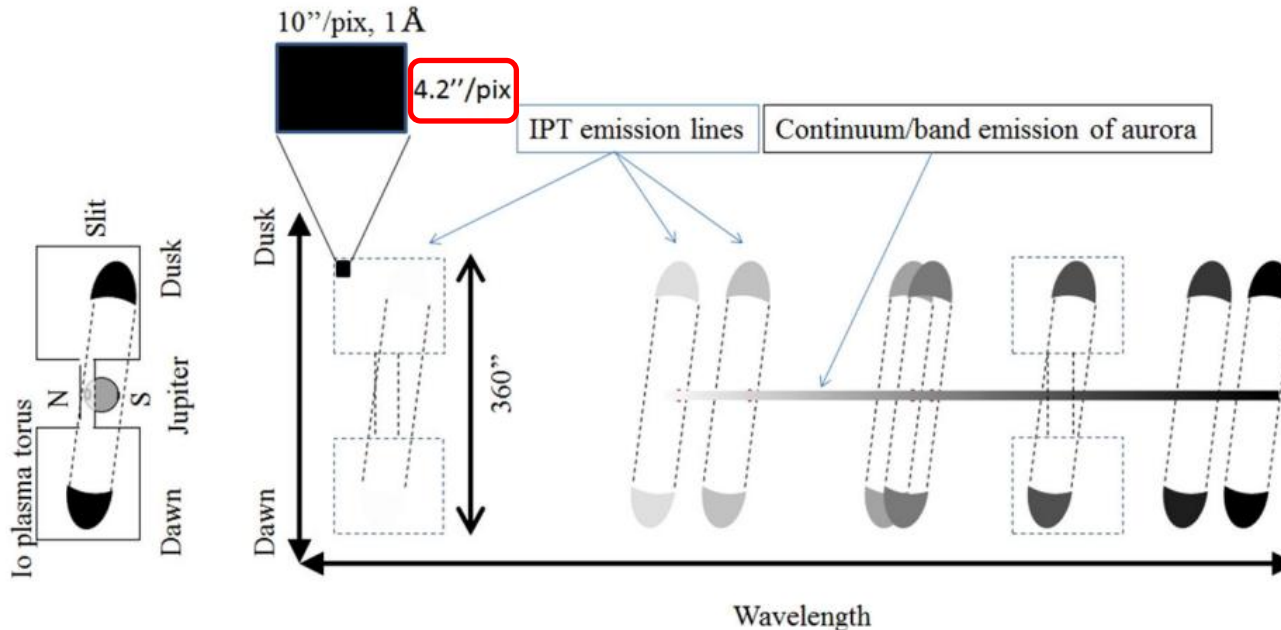
しかし、イオ重力圏外(Neutral Clouds)の酸素原子の紫外線発光の観測はほとんどなされていない

Fig.5 Spatial distribution of the integrated intensity of the 1300 and 1729 Å emission using IUE (G.E.Ballester, et al., 1987)

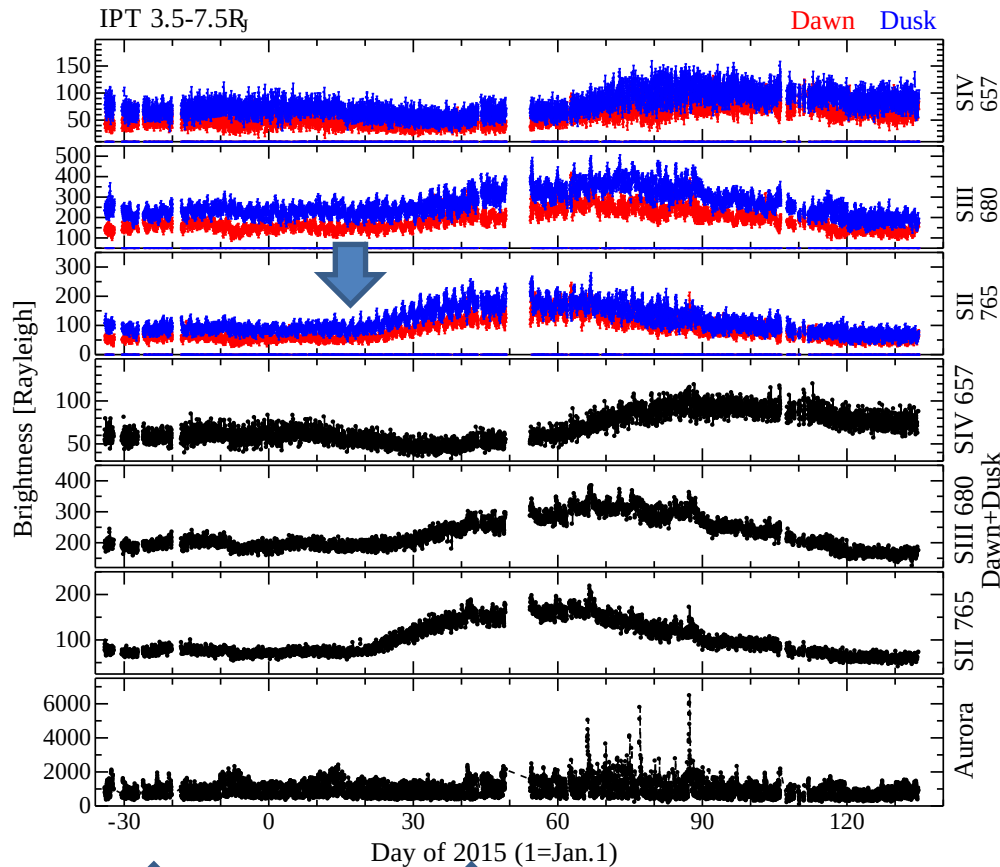
EXCEEDとひさき衛星の説明

- ひさき衛星は極紫外線分光撮像装置(EXCEED)を搭載しており、惑星やその周辺の発光のスペクトルを地球を周回しながら作成している
- 飛行高度 950～1150km
- 周回周期 106minutes(13 orbit per day)
- 波長範囲 60～145nm
- 波長分解能 0.3～1.0nm
- 空間分解能 17''

Fig.6 schematic spectral image with the dumbbell-shape slit (Yoshikawa et al., 2014)



火山活動活発イベント



この二つの期間(10日間)の酸素原子発光を比較した

Fig.7 Variation of Io plasma torus & aurora brightness from 2014-11-28 to 2015-05-14 (Tsuchiya et al., 2015)

- 木星周辺の硫黄イオンの発光量の増加から一連の活発な火山活動は1月20日より前に始まったと思われる

- イオ周辺の中性原子も活発な火山活動に合わせて増加するのではないか？

- このことを明らかにするには12月~3月の間の酸素原子発光強度の変動を解析する必要がある

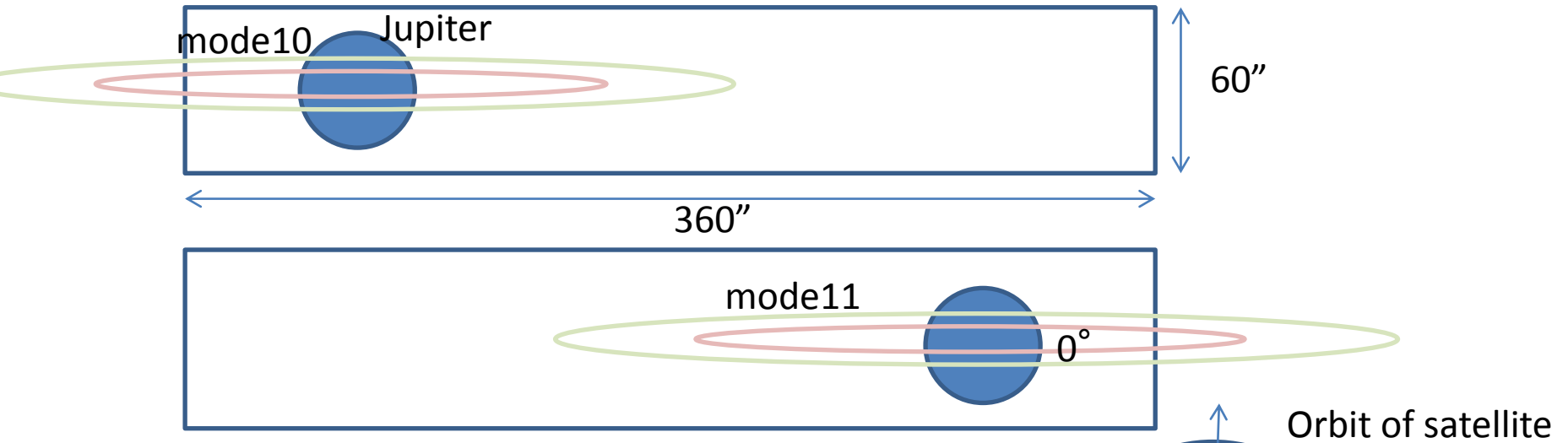
研究の目的

- イオ重力圏外の酸素原子発光は観測例がないため、ひさき衛星でイオ周辺の酸素原子発光を検出されているかを確認したい
 - 解析1;1木星半径周辺の発光の検出
- 火山噴火がどれくらいイオ周辺のNeutral Cloudsに酸素原子を供給しているかを知りたい
- そのための第一段階として火山活動が活発な時と静穏な時で酸素原子の密度に変化が出るかを調べたい
 - 解析2;発光強度の時間変動

解析1;1木星半径周辺の発光の検出

Fig.8 slit of mode10 and mode11

Green oval line is the orbit of Europa, red is Io



観測時間と観測位相角

- Mode10 位相角 $225^{\circ} \sim 315^{\circ}$
time 2014/11/19~22
- Mode11 位相角 $45^{\circ} \sim 135^{\circ}$
time 2014/11/17~19

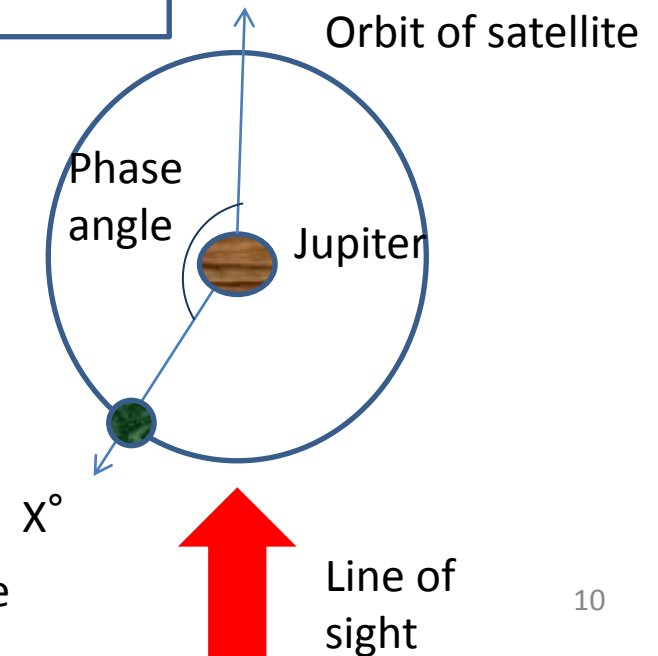


Fig.9 phase angle

データの解析方法

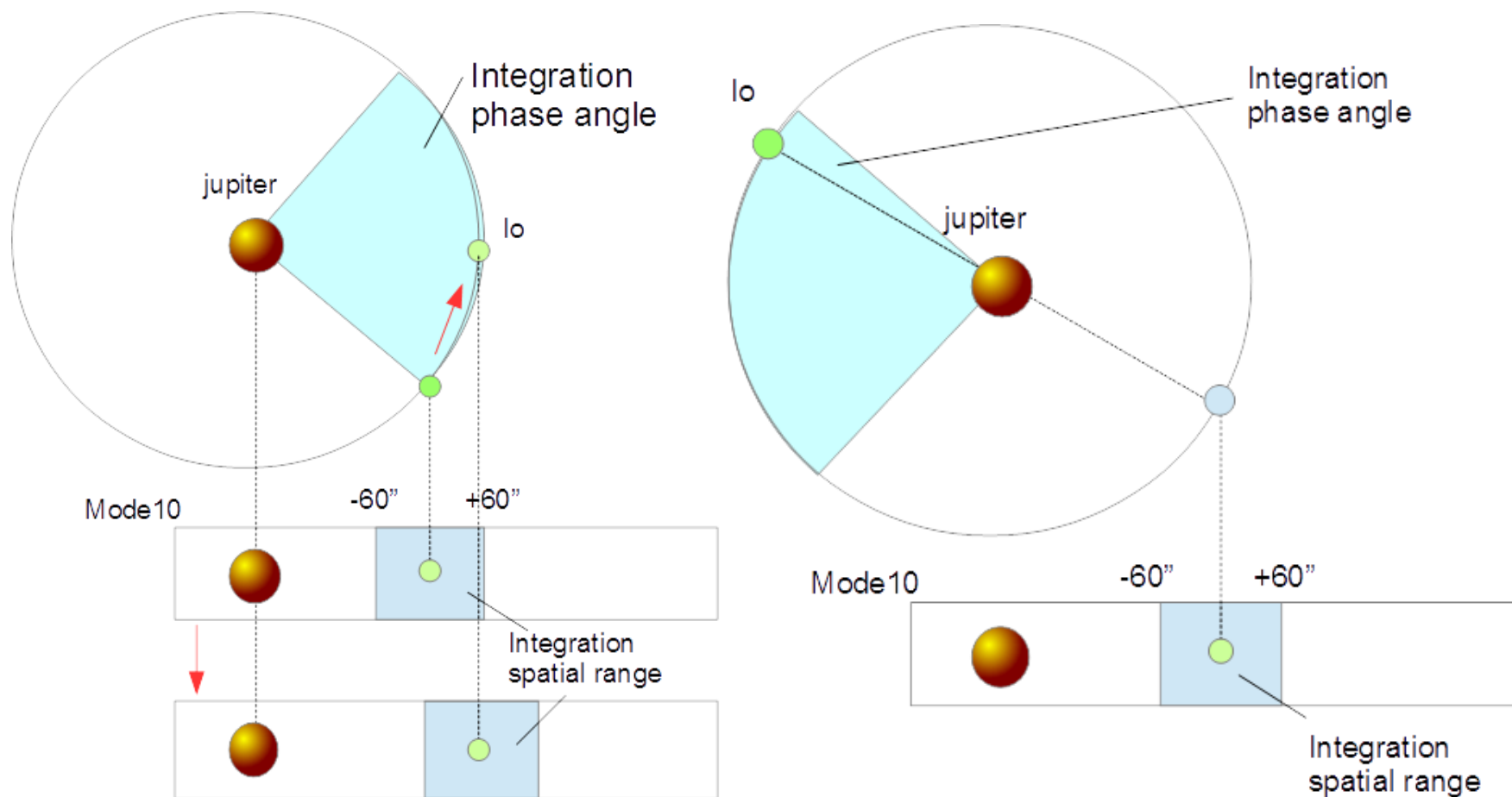


Fig.10 method of superposition of data(left; Io is on slit, right; Io is off slit)
一分ごとにイオを中心に $\pm 60''$ を重ねあわせて画像を積分した
比較のために位相角が180度異なる位置の積分も実施した

解析1の結果

縦軸; 空間分布

+60"

+20"

Io

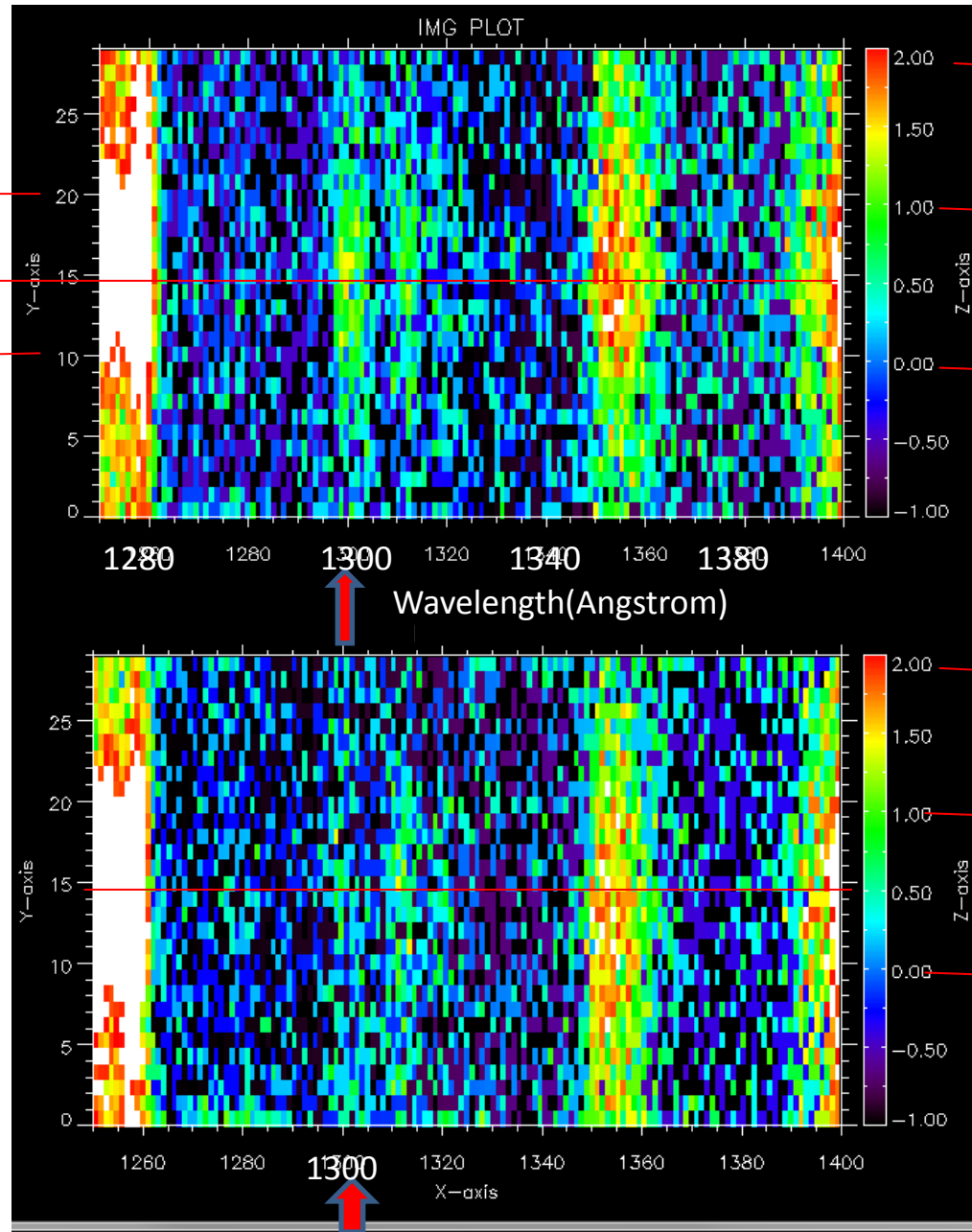
-20"

-60"



イオ中心±1
木星半径平均の明るさ
→次スライド

Fig.11
Brightness along
Io orbits



100R

イオが積分範囲に入っている時
420 分

10R

1R

Color bar

→brightness

R=Rayleigh/pixel

100R

イオが積分範囲から外れているとき
331 分

10R

1R

解析1の結果

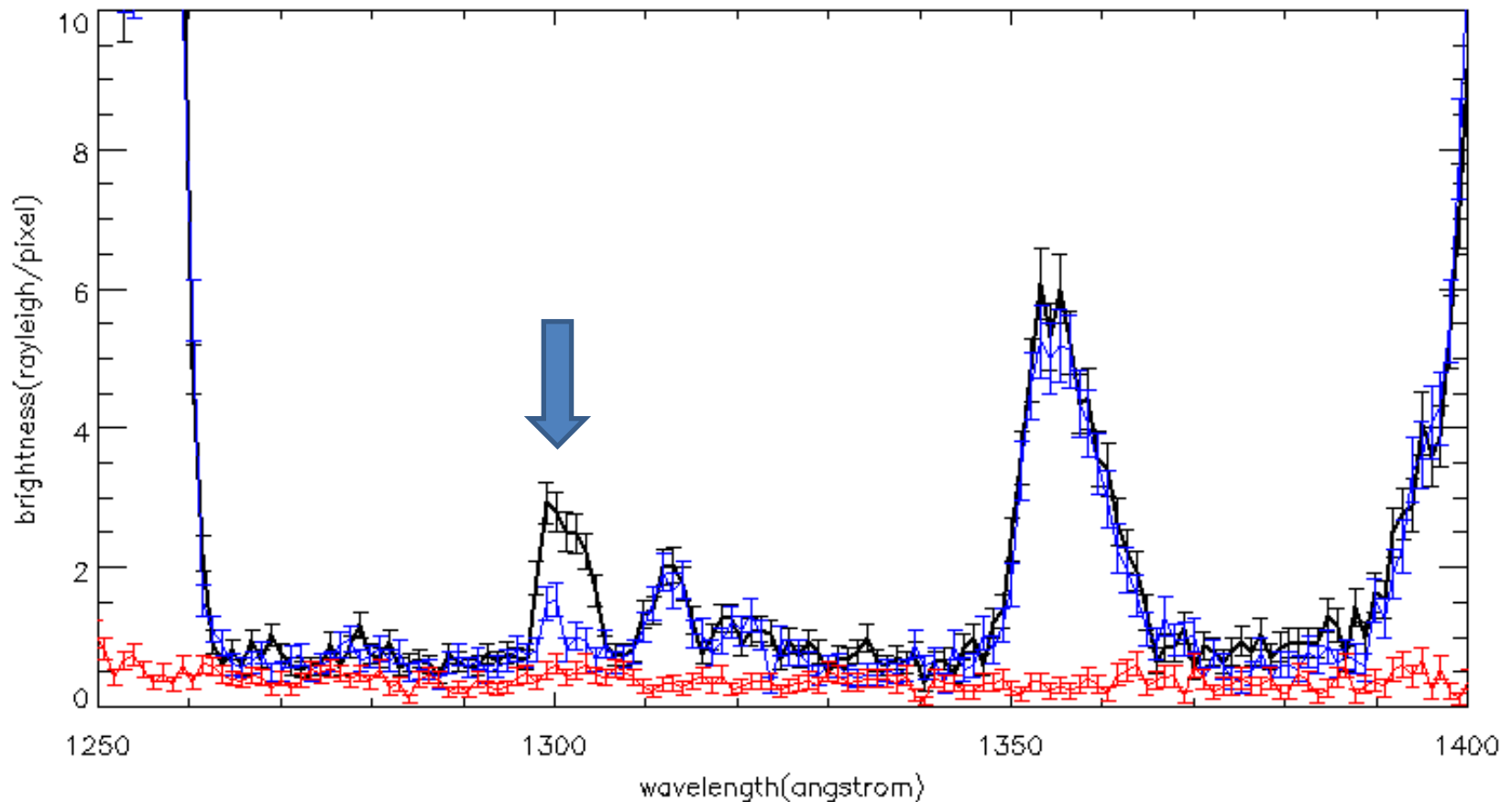


Fig.12 Brightness average pixel10~20 between 1250~1400 angstrom

黒線; イオが積分範囲の中心に居る時(前スライド上)

青線; イオが積分範囲から外れている時(前スライド下)

赤線; 地球周辺のみが発光(ジオコロナ)

→イオ周辺1木星半径の範囲で2Rayleigh程度の130.4nm発光が検出された

解析2:発光強度の時間変動

- 10日ごとにイオの $\pm 60''$ 範囲で追跡積分
- 火山活動が活発になったことによるイオン増大時と通常時のイオ周辺の酸素原子量の違いを解析する
- イオ位相角 dawn側 $45^\circ \sim 135^\circ$
dusk側 $225^\circ \sim 315^\circ$
- 放射線ノイズ $0.01[\text{count}/\text{pix}/\text{min}]$ 以上は取り除く
- ジオコロナの酸素原子発光をなるべく排除するため、Local time 20時から4時のデータのみを積分
- 今回はまず11月27日~12月06日と2月6日~2月15日を比較

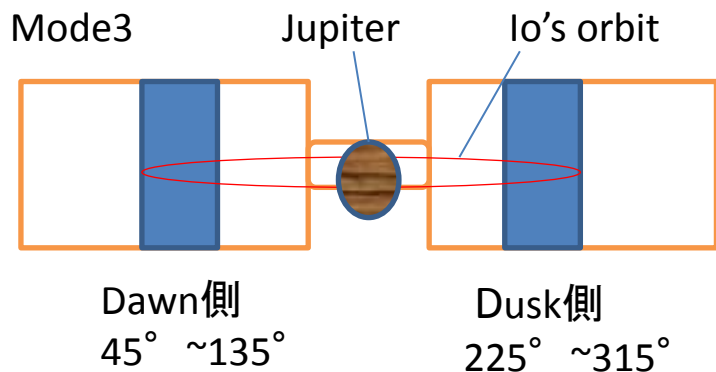
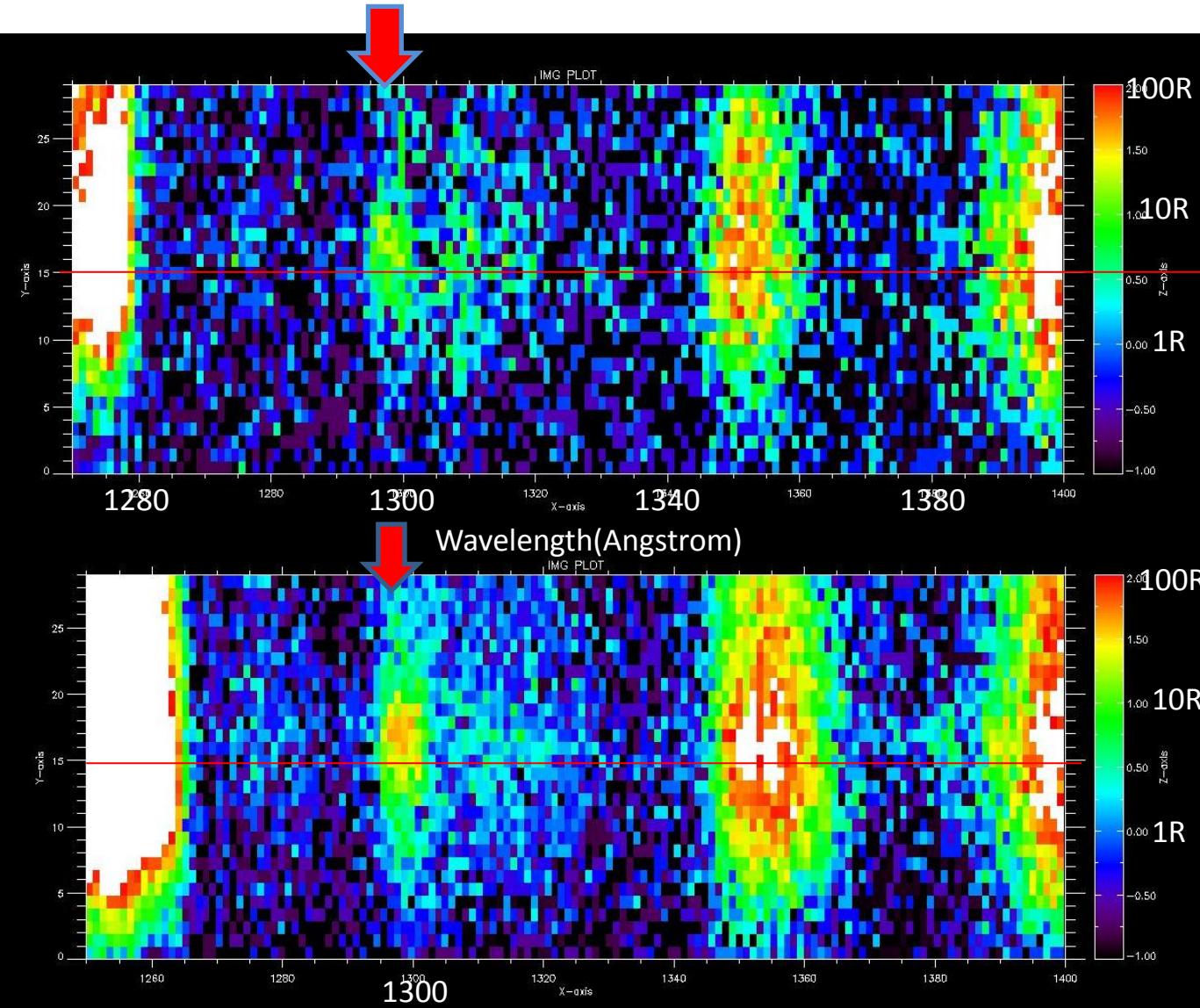


Fig.13 slit of mode3

解析2では左図のようなスリットで観測されたデータを解析した

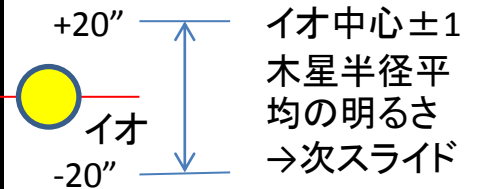
解析2の結果

dawn側 位相角 $45^{\circ} \sim 135^{\circ}$



木星方向

2014年11月27日
~12月6日のイオ周
辺の明るさ



Color bar

→brightness

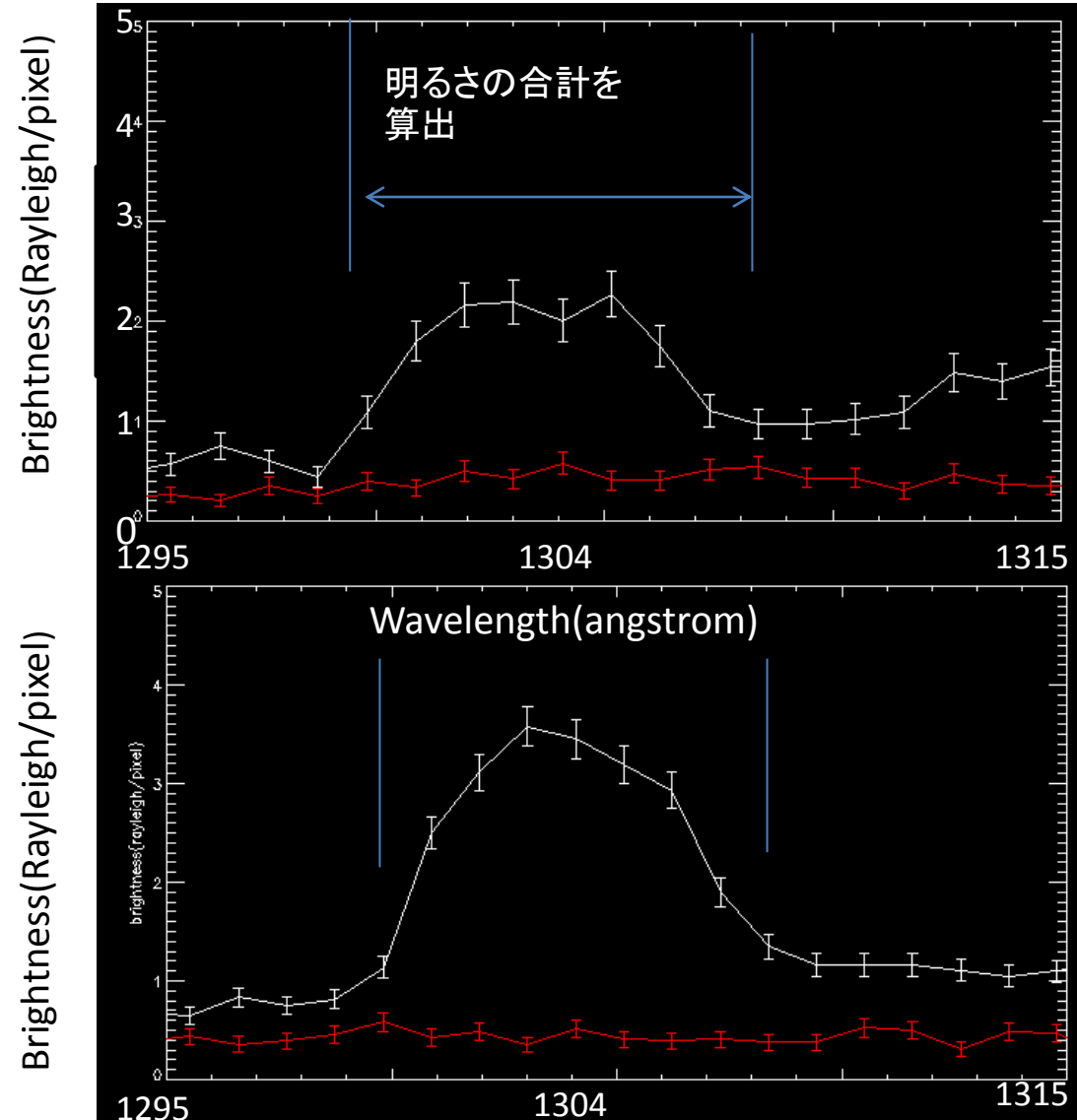
R=Rayleigh/pixel

2015年2月6~15
日のイオ周辺の
明るさ

Fig.14
Brightness along
Io orbits

解析2の結果

dawn側 位相角 45° ~ 135°



2014年11月27日~12月6日のイオ周辺の明るさ

(白線) イオが積分範囲の中心に居る時
(赤線)地球周辺のための発光(ジオコロナ)

酸素原子発光の明るさ(青線の範囲)

11.2 ± 0.66 Rayleigh

2015年2月6~15日のイオ周辺の明るさ

酸素原子発光の明るさ(青線)

19.1 ± 0.57 Rayleigh

Fig.15 Brightness average pixel10~20 between 1290~1310 angstrom

解析2の結果

dusk側 位相角 $225^{\circ} \sim 315^{\circ}$

2014年11月27日
~12月6日のイオ周
辺の明るさ

+20" $\updownarrow$ イオ中心 ± 1
イオ 木星半径平
-20" 均の明るさ
→次スライド

Color bar
→brightness(Rayleigh)
 $R = \text{Rayleigh/pixel}$

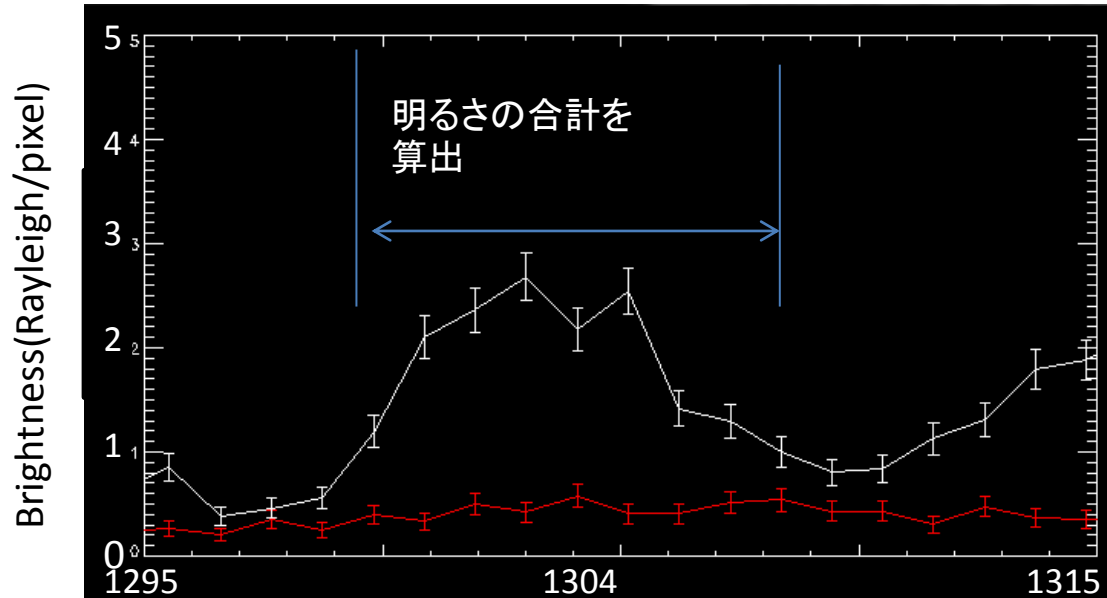
木星方向

2015年2月6~15日
のイオ周辺の明るさ

Fig.16
Brightness along
Io orbits

解析2の結果

dusk側 位相角 $225^{\circ} \sim 315^{\circ}$

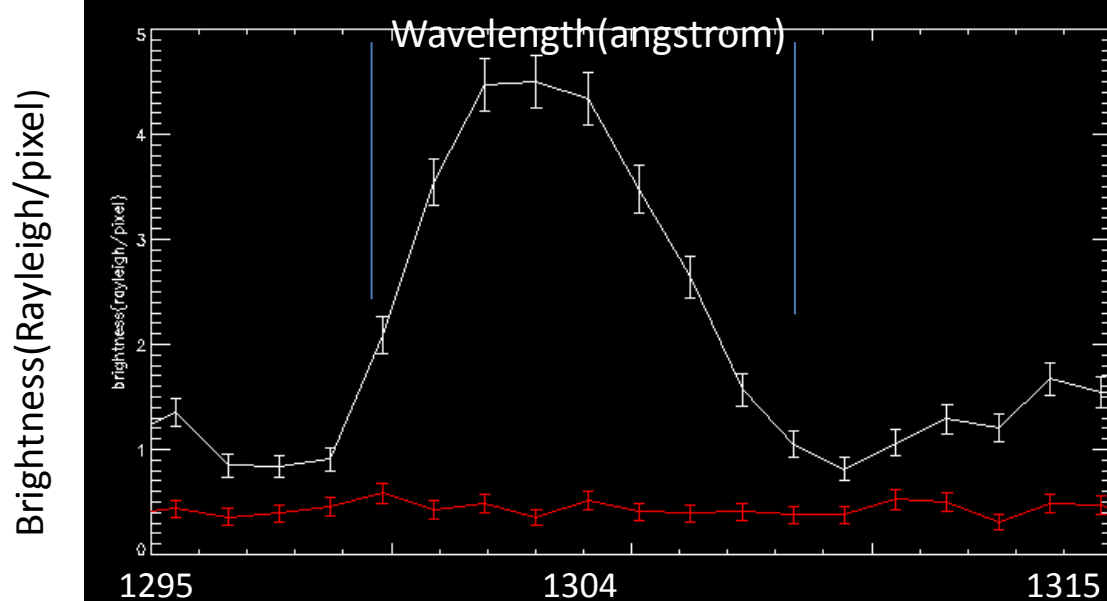


2014年11月27日~12月6日のイオ周辺の明るさ

(白線) イオが積分範囲の中心に居る時
(赤線) 地球周辺のみの発光(ジオコロナ)

酸素原子発光の明るさ(青線)

12.7 ± 0.65 Rayleigh



2015年2月6~15日のイオ周辺の明るさ

酸素原子発光の明るさ(青線)

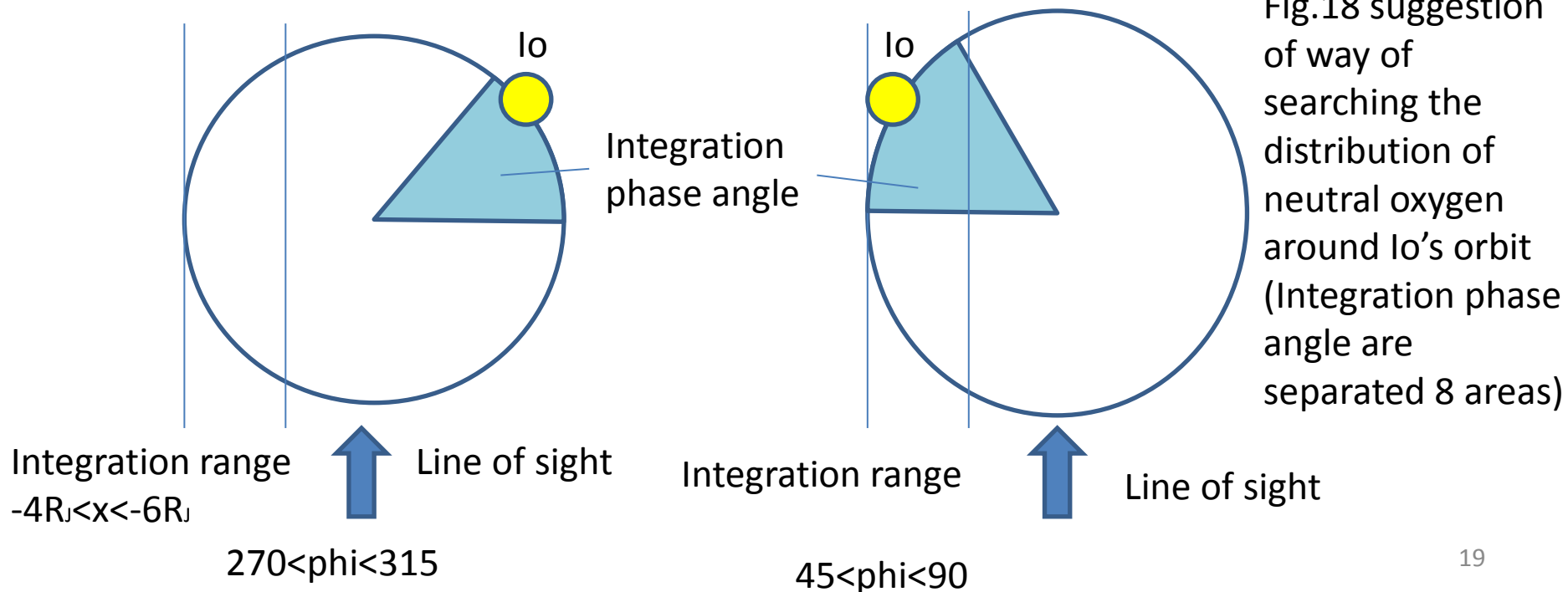
23.7 ± 0.68 Rayleigh

Fig.17 Brightness average pixel10~20
between 1290~1310 angstrom 18

まとめ

- 解析1ではイオの位置木星半径周辺で酸素原子発光の波長領域(130.4nm)で確かに発光が検出された

→しかし、この解析だけではスライド3のモデルと観測結果が一致しているかどうかを議論できない。1木星半径周辺で酸素原子が分布していることを決定づけるにはイオ軌道の空間分布を調べるさらなる解析が必要



まとめ

- 解析2では次のことが分かった
 1. 同時期で比較して、dawn側のイオ周辺の方がdusk側よりも酸素原子発光が明るい
 - これは重力圏内周辺の観測(スライド6)の観測結果にもみられる
 - この現象は共鳴散乱では説明できないので、酸素原子発光には電子衝突が十分に絡んでいる
 - イオのNeutral Cloudsの酸素原子密度を定量的にもとめるには電子密度の観測も必要
 2. 火山活動が活発な時期の方が静穏時よりもイオ周辺の酸素原子発光が明るい
 - 今後は火山活動が活発になった時期を含む2015年1~3月で10日ごとに酸素原子発光強度の変動をみたい

参考文献

- Nicholas. M. Schneider, Fran Bagenal, 2007, Io After Galileo: Io's neutral clouds, plasma torus, and magnetospheric interaction, Praxis Publishing, UK
- G. E. Ballester, et al., 1987, Detection of neutral oxygen and sulfur emissions near Io using IUE, The Astrophysical Journal, Vol.319, L33~L38
- Ichiro Yoshikawa et al., 2014, Extreme Ultraviolet Radiation Measurement for Planetary Atmospheres/Magnetospheres from the Earth-Orbiting Spacecraft (Extreme Ultraviolet Spectroscope for Exospheric Dynamics: EXCEED) ,Volume 184, [Issue 1-4](#), pp 237-258
- William H. Smyth, M.L.Marconi, 2003, Nature of the iogenic plasma source in Jupiter's magnetosphere; 1. Circumplanetary distribution, ICARUS, Vol.166,pp85-106