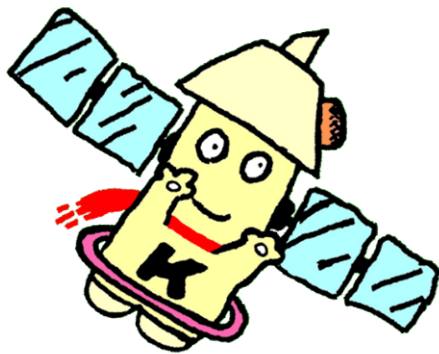


惑星圏研究会
2018/1/27

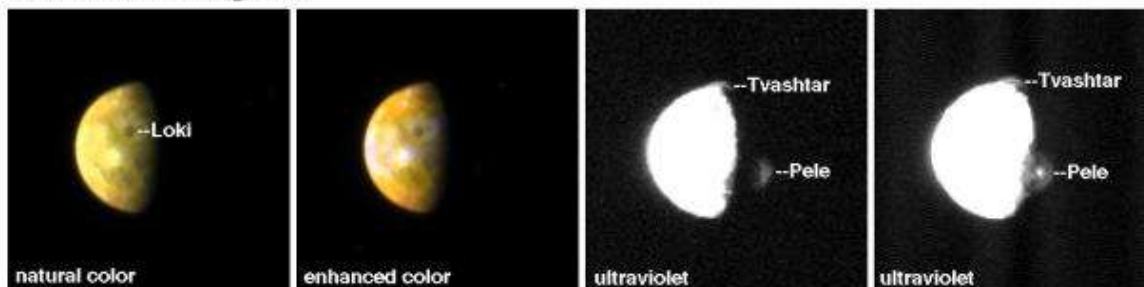
ひさき衛星観測結果に基づくイオの 大気生成・散逸プロセスの研究

古賀亮一,土屋史紀,鍵谷将人,坂野井健(東北大),吉川一郎,吉
岡和夫(東大),村上豪,山崎敦(ISAS),木村智樹(理研)

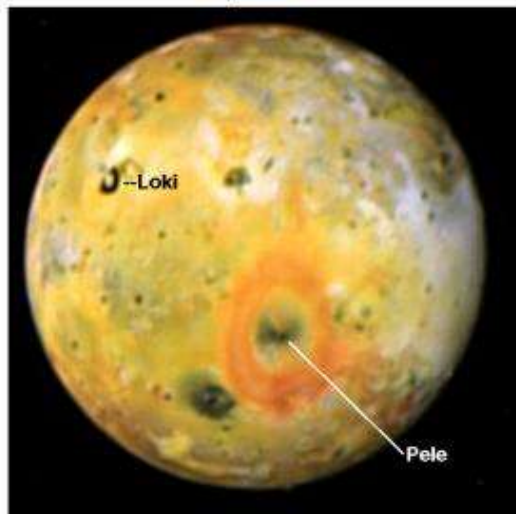


イオとは

Cassini Images:



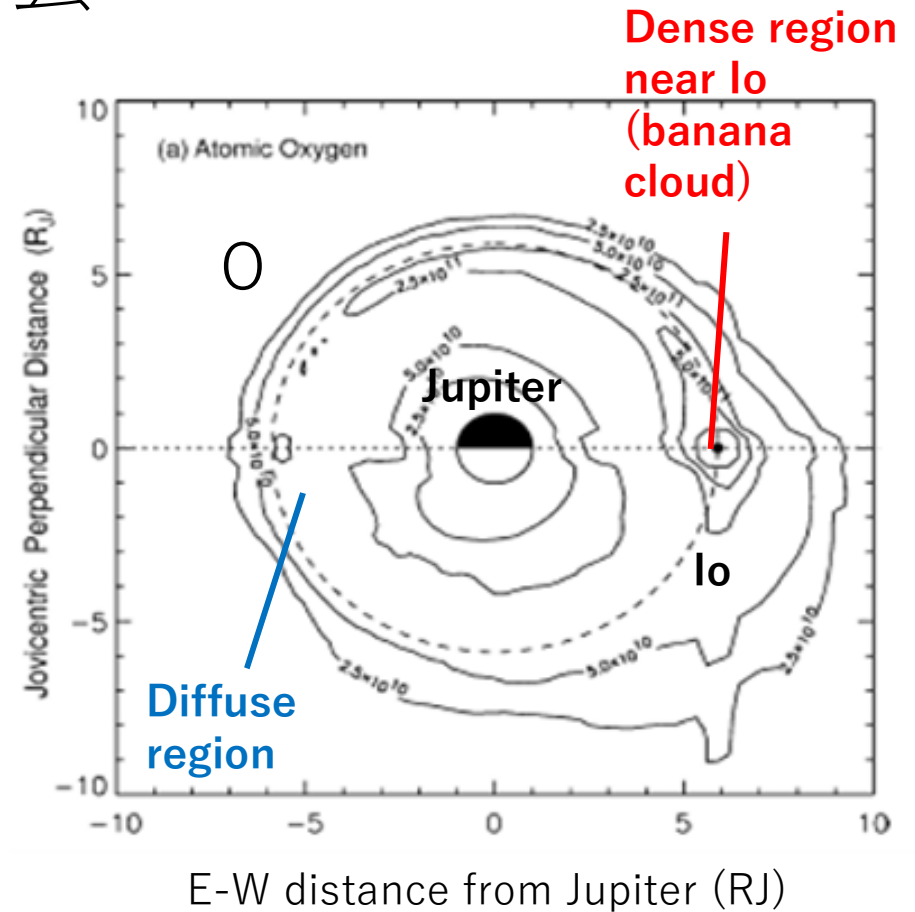
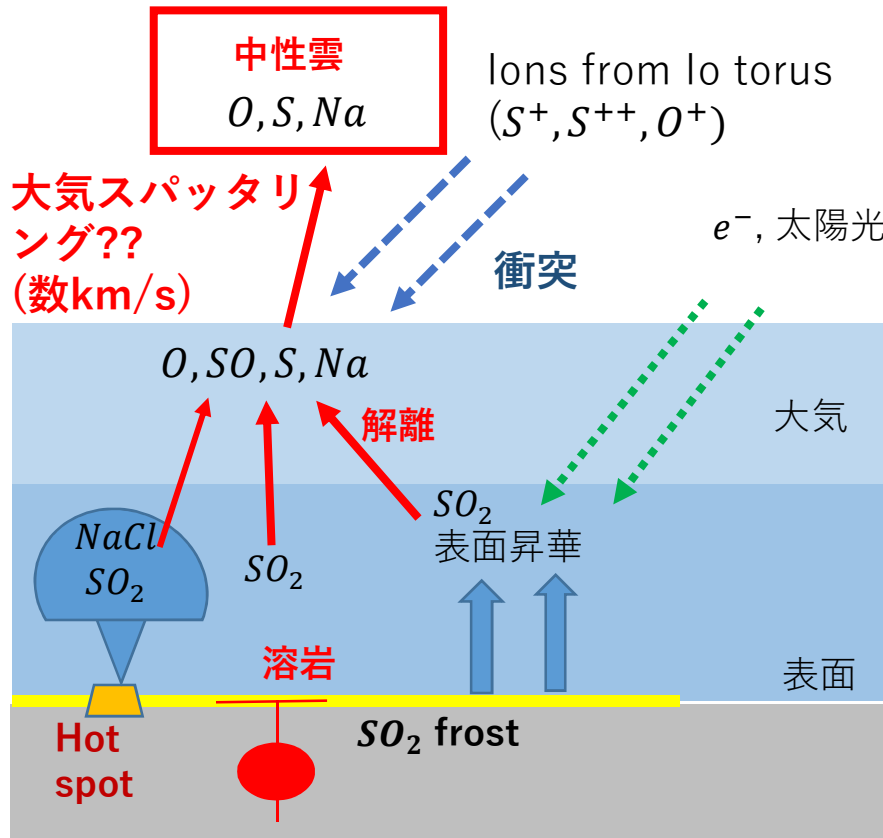
Galileo Images:



- 木星のガリレオ衛星の内一番内側(5.9木星半径の位置で回っている)
- 直径 3642 km (月と同じくらい)
- 視直径(0.9-1.2")
- 太陽系で一番火山活動が活発

図 イオのimage
(NASA/JPL)

イオの大気と中性雲



図；(左) イオ大気生成・散逸プロセス
(右) 酸素原子中性雲のモデルシミュレーション結果[Smyth and Marconi, 2003]

- 大気の主成分; SO_2, SO, S, O
- 微小成分; $NaCl, KCl$

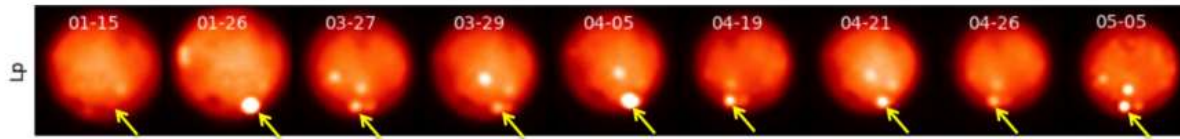
酸素や硫黄原子中性雲の分布は観測されていない

➤ 大気散逸プロセス(特に速度や方向)はよくわかっていない

イオの火山活動に伴うナトリウム量変化

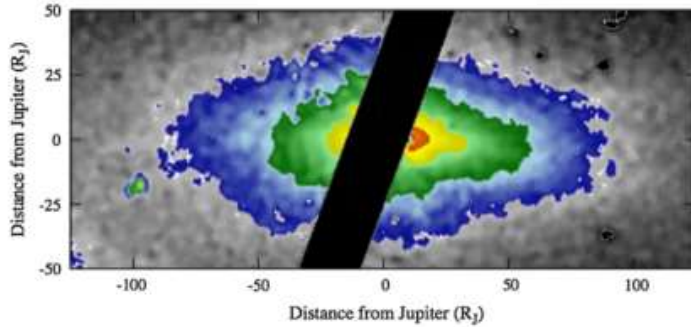
1/26

4/5

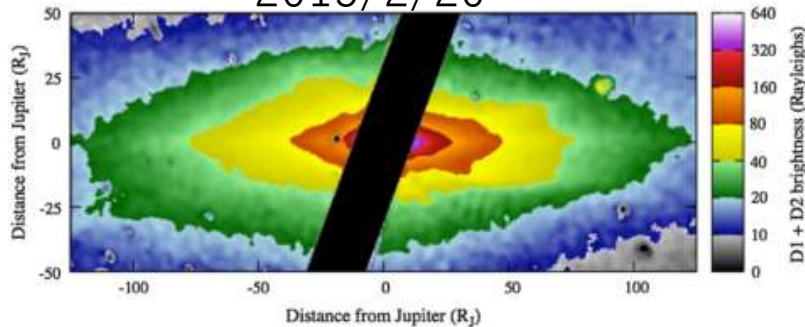


図；2015年前半におけるKurdalagon Patera(→)の赤外発光観測結果[de Kleer and de Peter, 2016]

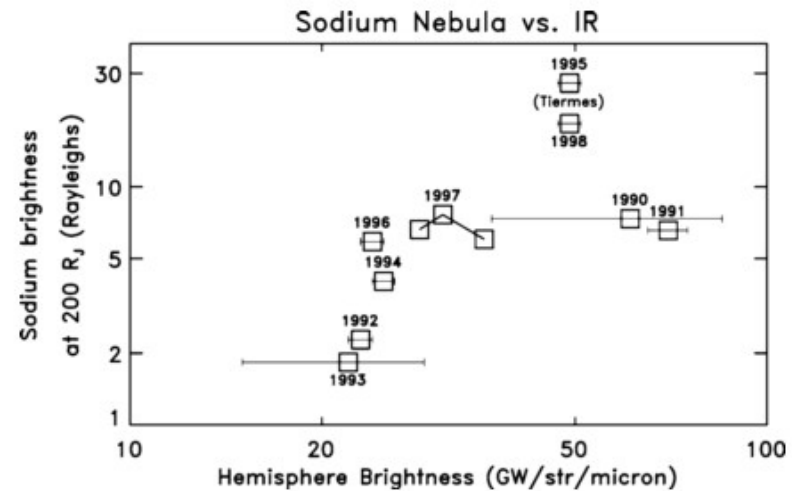
2014/12/22



2015/2/20



図；2014/12/22, 2015/2/20のイオ起源ナトリウム発光量と分布の変動[Yoneda et al., 2015]



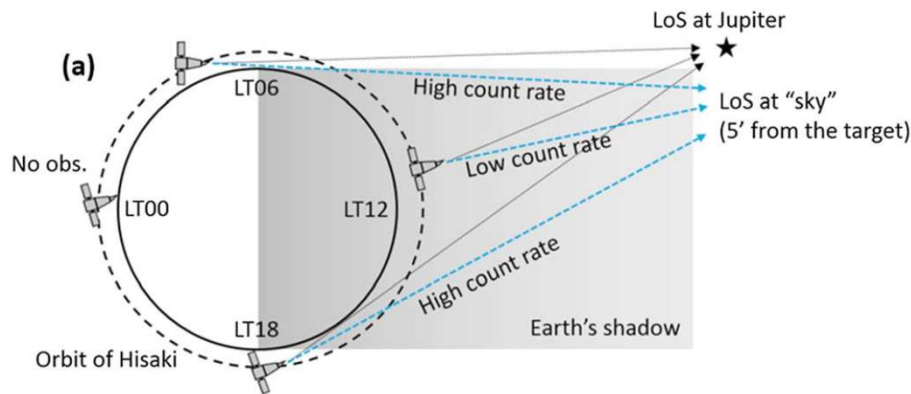
図；ナトリウム発光量(木星中心から200 RJ)とイオ表面の赤外放射量の相関図[Mendillo et al., 2004]

- イオの大気の主成分(硫黄酸化物や酸素、硫黄原子)が火山活動でどう変動するかは観測されていない

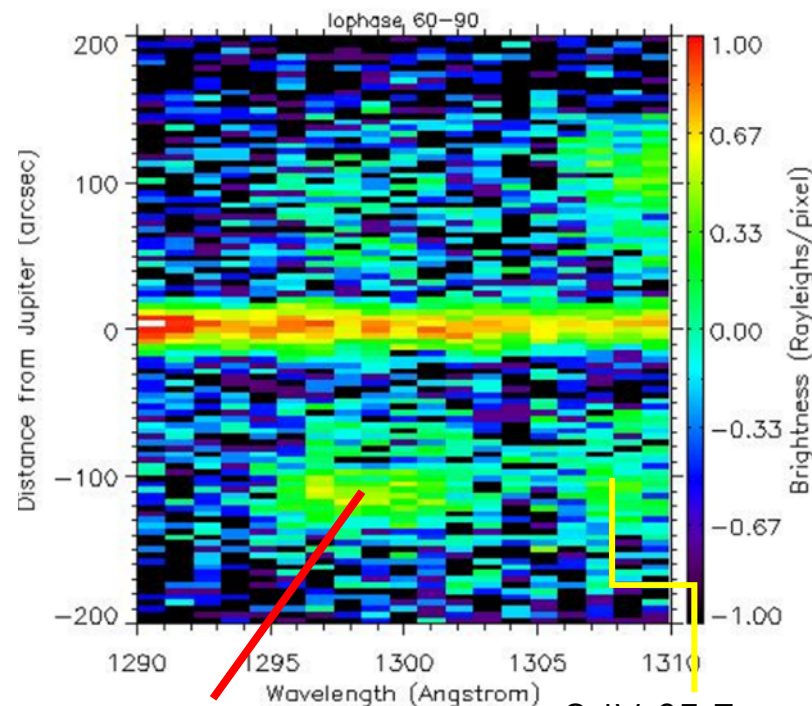
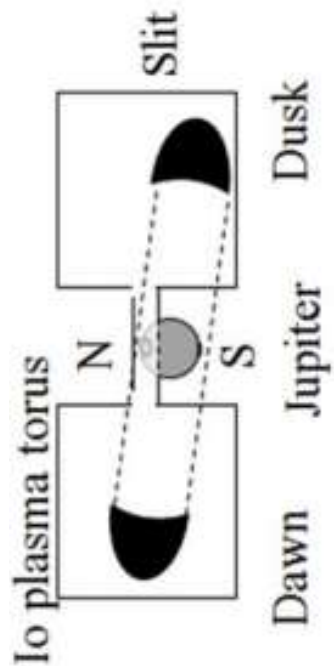
研究の目的

- イオの火山活動度が変化する時期に大気がどのように変化するかを明らかにする
 - ひさき衛星の紫外線データを用いて、火山活動活発イベント中のイオ周辺の酸素原子発光の変動を解析、同時期のイオ起源のナトリウム発光やイオ表面の赤外発光の変動と比較
- イオの大気散逸メカニズムを推定する
 - ひさき衛星の火山活動静穏期のデータを用いて酸素原子発光の経度方向分布を解析

データ解析方法



- ひさき衛星は地球を周回しながら木星オーロラ、イオプラズマトーラスの同時観測を数か月間連続的に行っている
- 波長帯；60-145 nm
- 空間分解能；17" (イオ視直径は約1")
- 今回用いたデータの観測期間；2014年11月-2015年5月 (静穏期=>活発期)



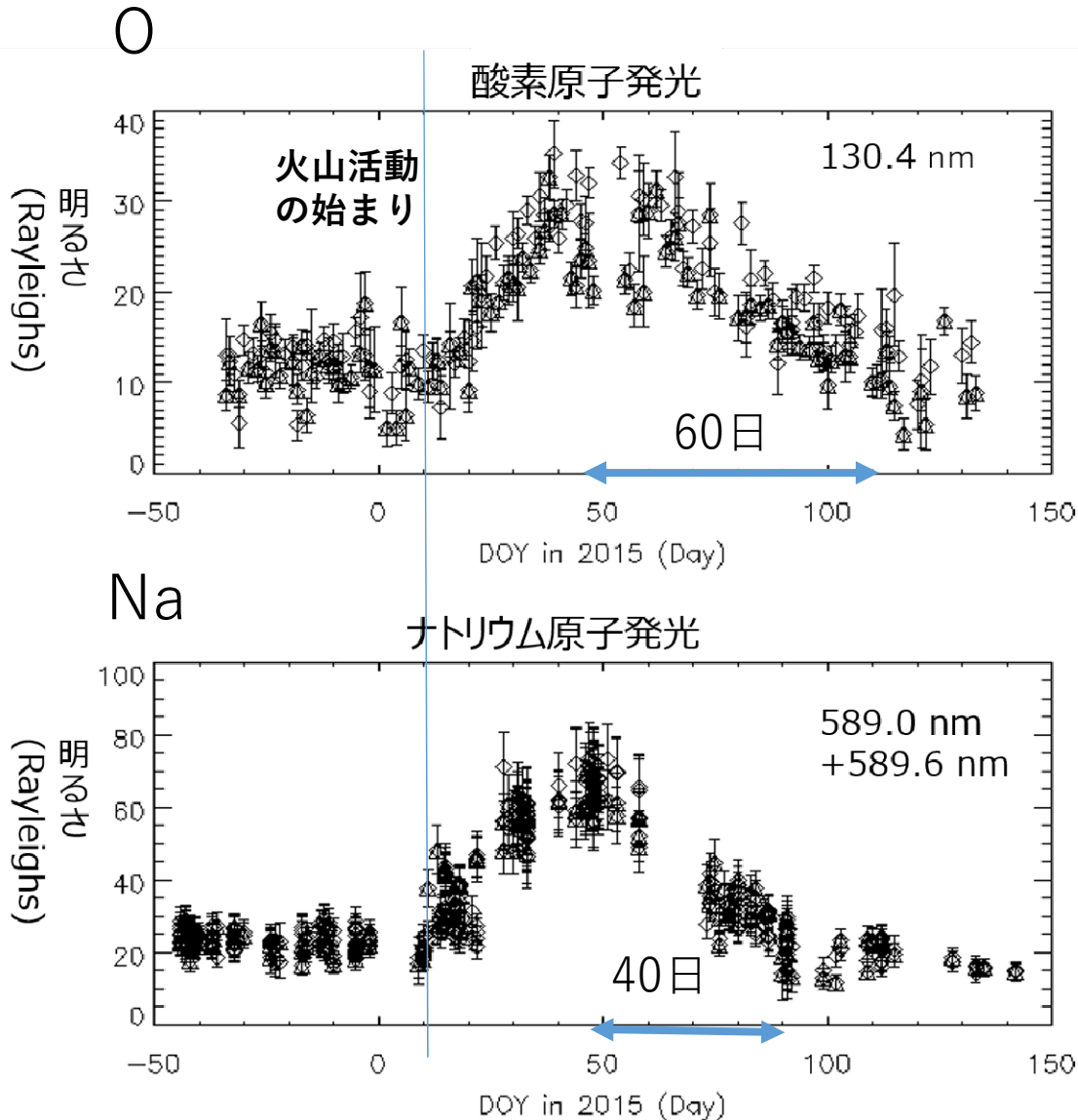
イオ軌道周辺の酸素原子発光

S IV 65.7 nmの二次回折光

ジオコロナの影響を取り除くために衛星が地球の影にいるときのデータのみを選択し、sky観測データの差分を行った

図；(上)ひさきの観測のジオメトリの概略図[Yoshioka et al., 2017]
 (下左)観測に使用したスリットの概略図[Yoshikawa et al., 2014]
 (下右)イオ軌道周辺の酸素原子発光付近のスペクトル。イオはdawn側(位相角60-90°)にいる

火山噴火に伴うイオ起源酸素原子発光の変動



- 火山活動の指標となるナトリウム発光が増加するイベントと同時期に酸素原子発光の増加した
- **この時期に火山活動によって大気量が変化した**
- ナトリウムの発光より酸素原子の発光の方が減光の時間スケールが長い
- **硫黄酸化物と塩化ナトリウムの放出メカニズムの違いを表している**

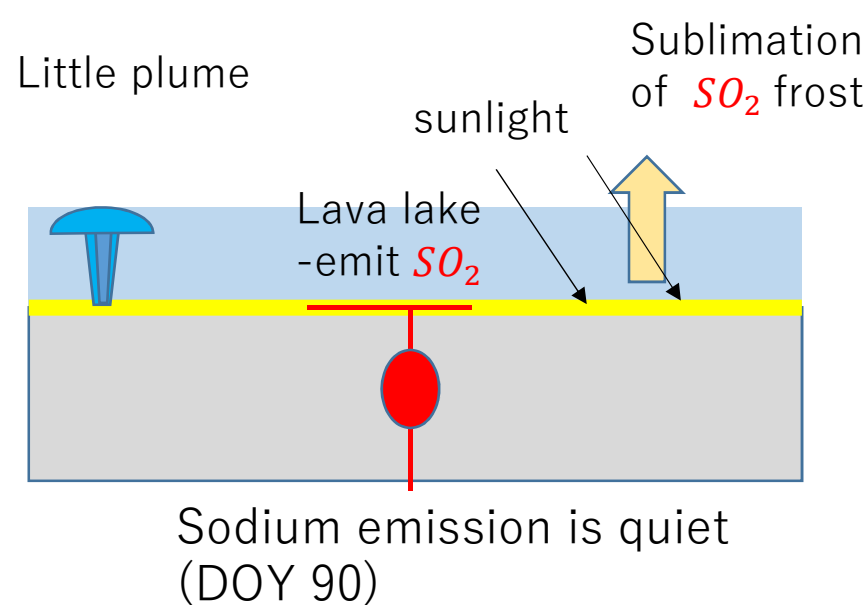
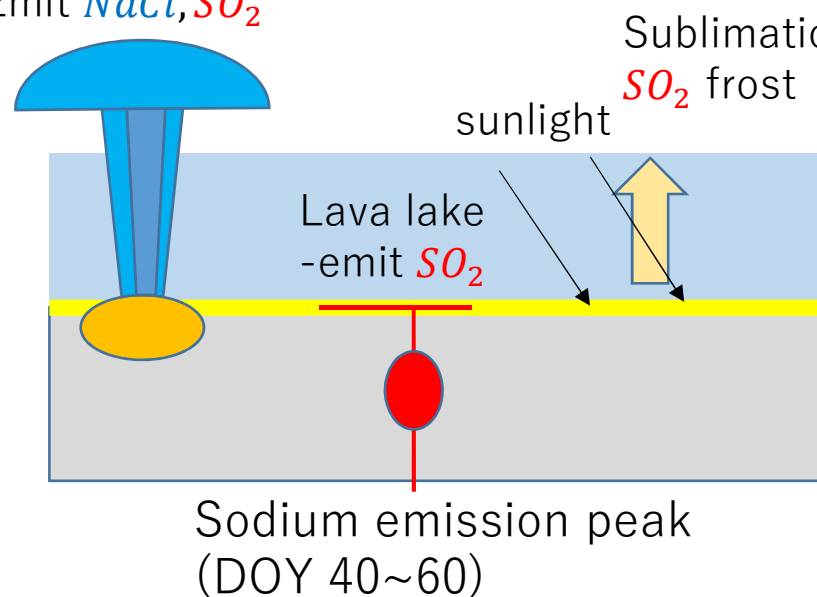
上図；ひさき衛星が観測したイオ周辺1木星半径程度周辺の酸素原子発光の変動[Koga et al., 2017]
下図；地上観測によるイオ起源の木星ナトリウム雲の発光の変動[Yoneda et al., 2015]
Day of year (DOY) 1 = 1 January 2015.

減光時間スケールから推定される放出メカニズムの違い

- 昇華点; NaCl (1658K) \gg SO_2 (263K) (under 1bar)
- 溶岩400-800 K, 火口から直接放出されるガス 最大で1500 K程度
- NaCl は高温の火口からのみからしか噴出されない。=>火山活動が静まると放出もすぐに通常時と同じレベルに戻る
- SO_2 は高温の火口から直接噴出するだけでなく、溶岩が表面を溶かすことでも放出される => 火山活動が止まっても溶岩が冷える場でしばらく放

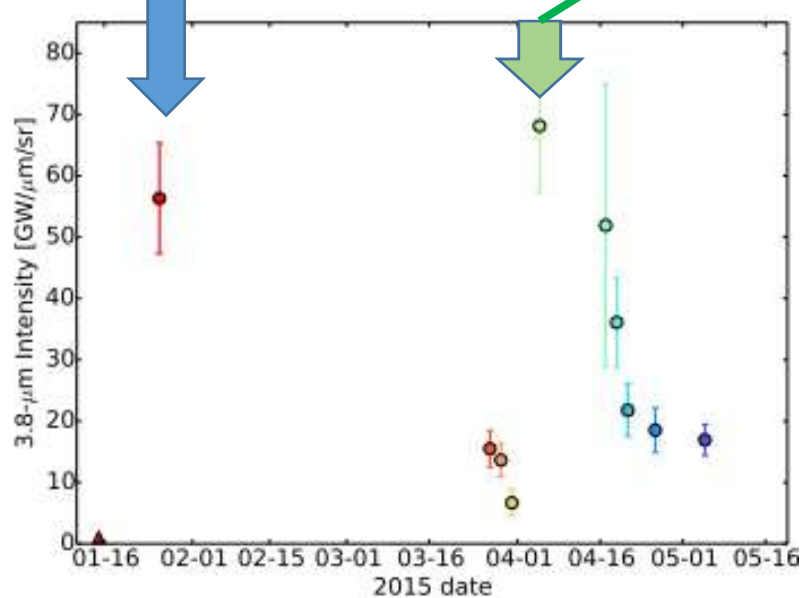
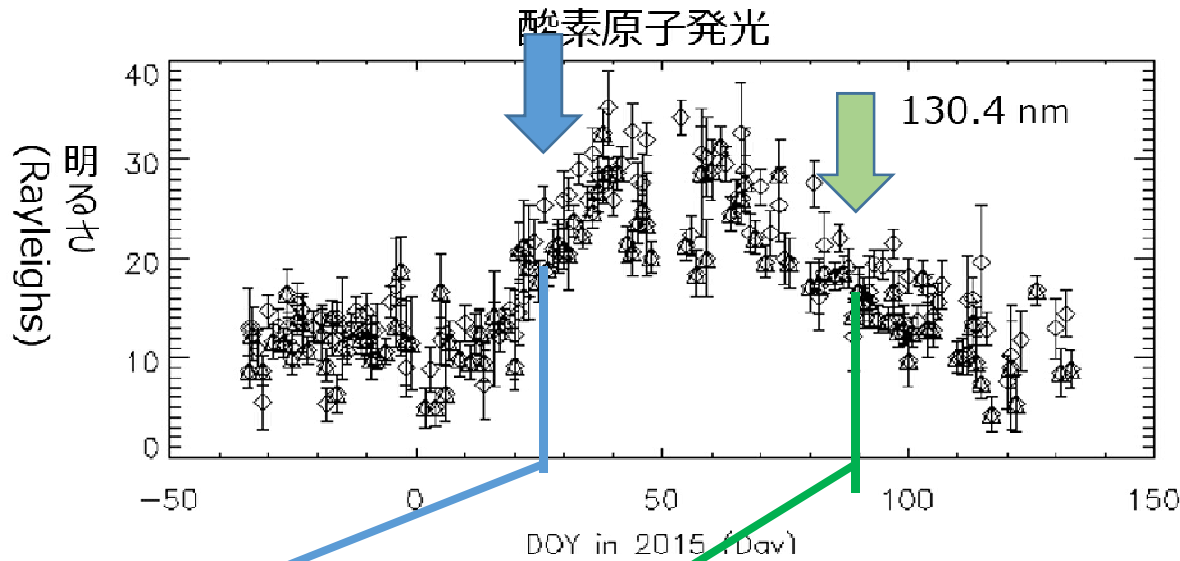
Plume 出が持続する

Emit NaCl , SO_2



図；2-4月の減光期におけるガスの放出の様子

酸素原子発光と赤外発光の比較



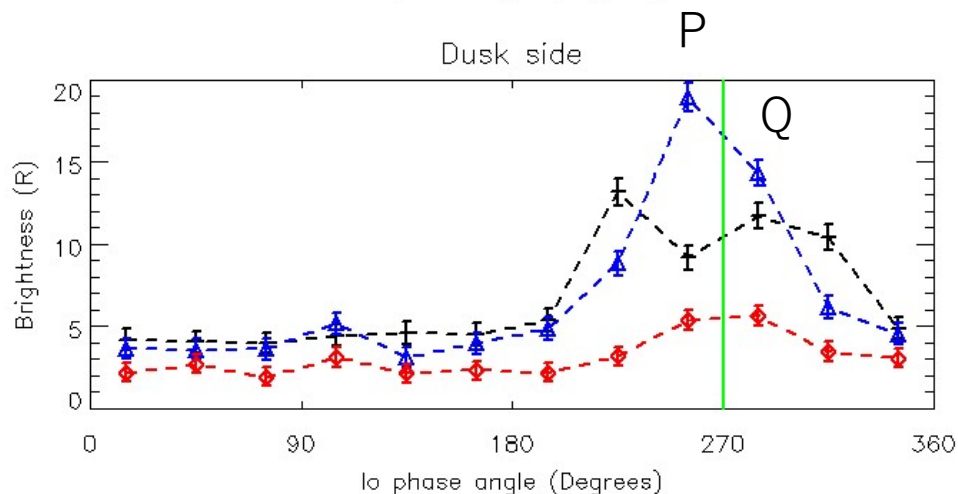
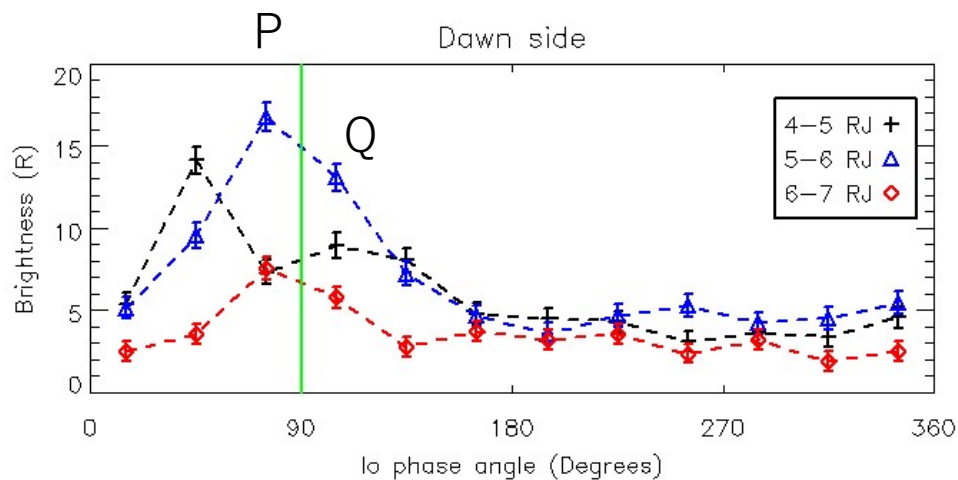
- 一つ目の赤外発光の増加と酸素発光の増加が対応している
- 二つ目の赤外発光が一つ目のものと同程度の増加がみられる一方、酸素原子発光は目立った増加がみられなかった。
- **火山活動度とガスの放出量
は対応するときとしないときがある =>条件は？**

上図；ひさき衛星が観測したイオ周辺1木星半径程度周辺の酸素原子発光の変動 [Koga et al., 2017]

下図；地上観測によるKudalagon Pateraにおける3.8 μm 発光の変動 [De Kleer and De Peter, 2016]

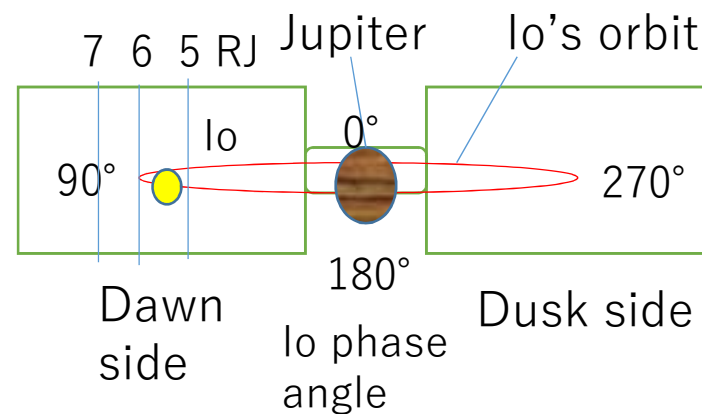
Day of year (DOY) 1 = 1 January 2015.

酸素原子発光の経度分布



図；2014/11/27-12/31のデータを解析して求めたイオ起源酸素原子発光のイオ位相角依存性

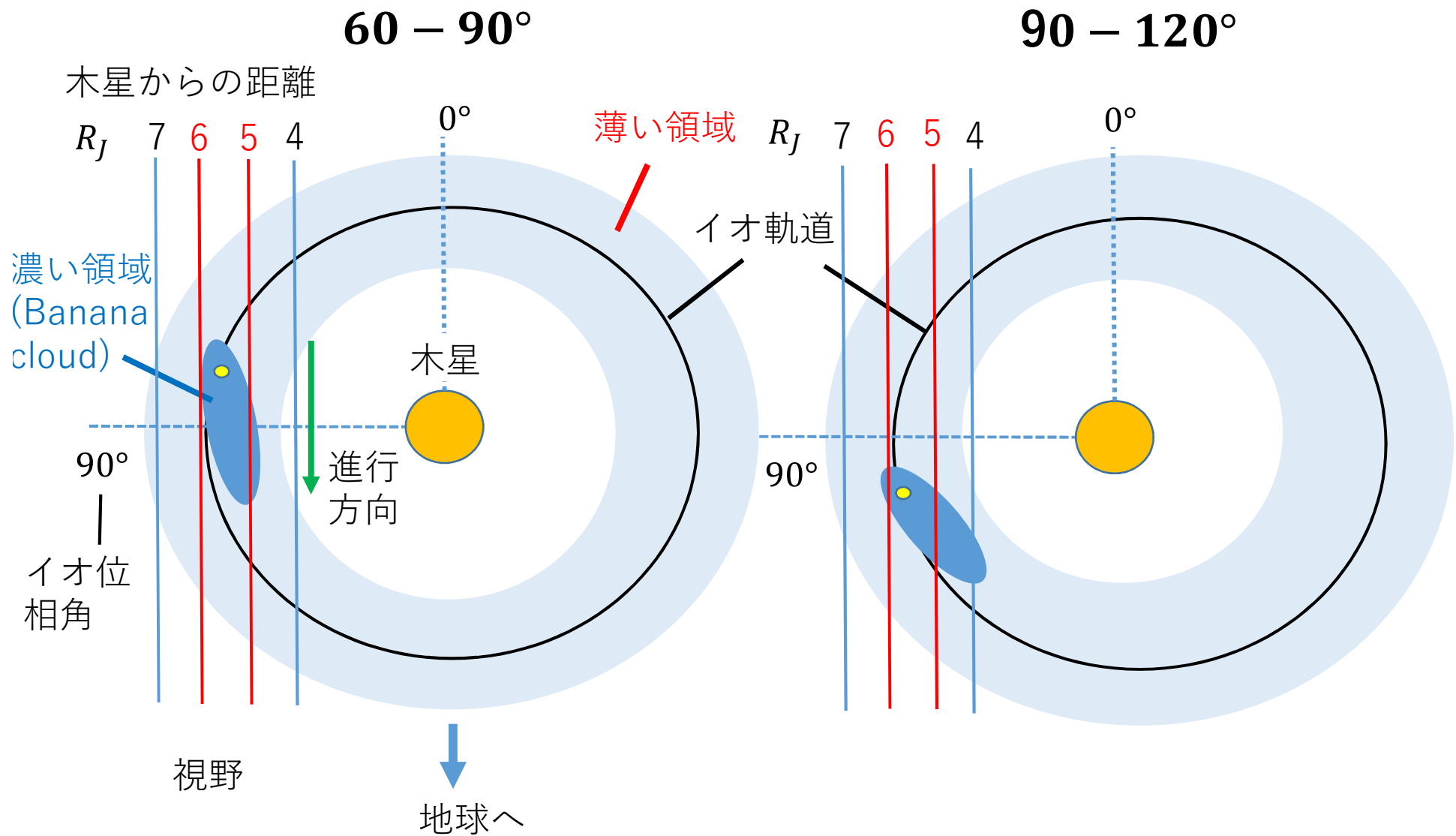
Mode 3



↓ To the earth

図；スリットの概略図とイオ位相角の説明

- ピーク付近の発光
5 - 6 R_J; P > Q
6 - 7 R_J; P ≥ Q
- 弱い発光がイオ位相角によらず一様に分布している

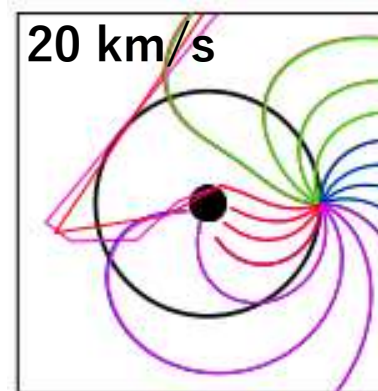
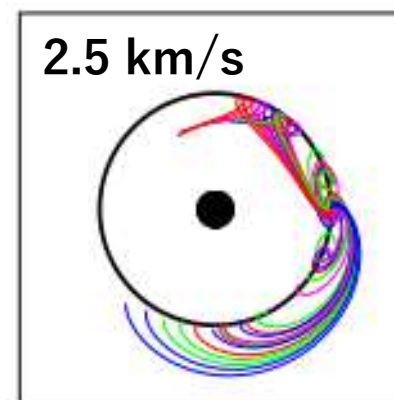
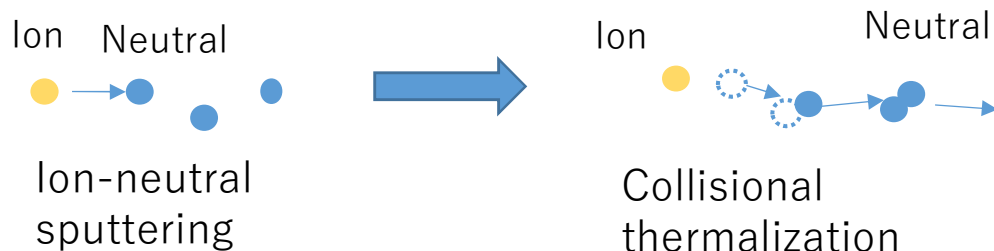


図；ひさき衛星で観測された酸素原子発光の分布から推定されるイオ起源酸素原子中性雲の分布の概略図

イオからの散逸プロセス

- イオの重力圏からの散逸プロセス
 - ① 低速成分(2~数 km/s)
 - イオンと中性の粒子の弾性衝突(スパッタリング)
 - 速度を得た中性と他の中性の衝突
 - ② 高速成分(10's~100 km/s)
 - スパッタリングのtail成分
 - 電荷交換反応 (ex $O + O^+ \rightarrow O^+ + O^*$)
 - イオンの中性化

• 低速成分(大気スパッタリング)のみがイオ軌道周辺の酸素原子中性雲の生成に寄与する



図；初速度2.5km/s, 20 km/sでイオから放出された粒子の50時間の粒子の軌道[Burger 2003]

イオからの散逸プロセス

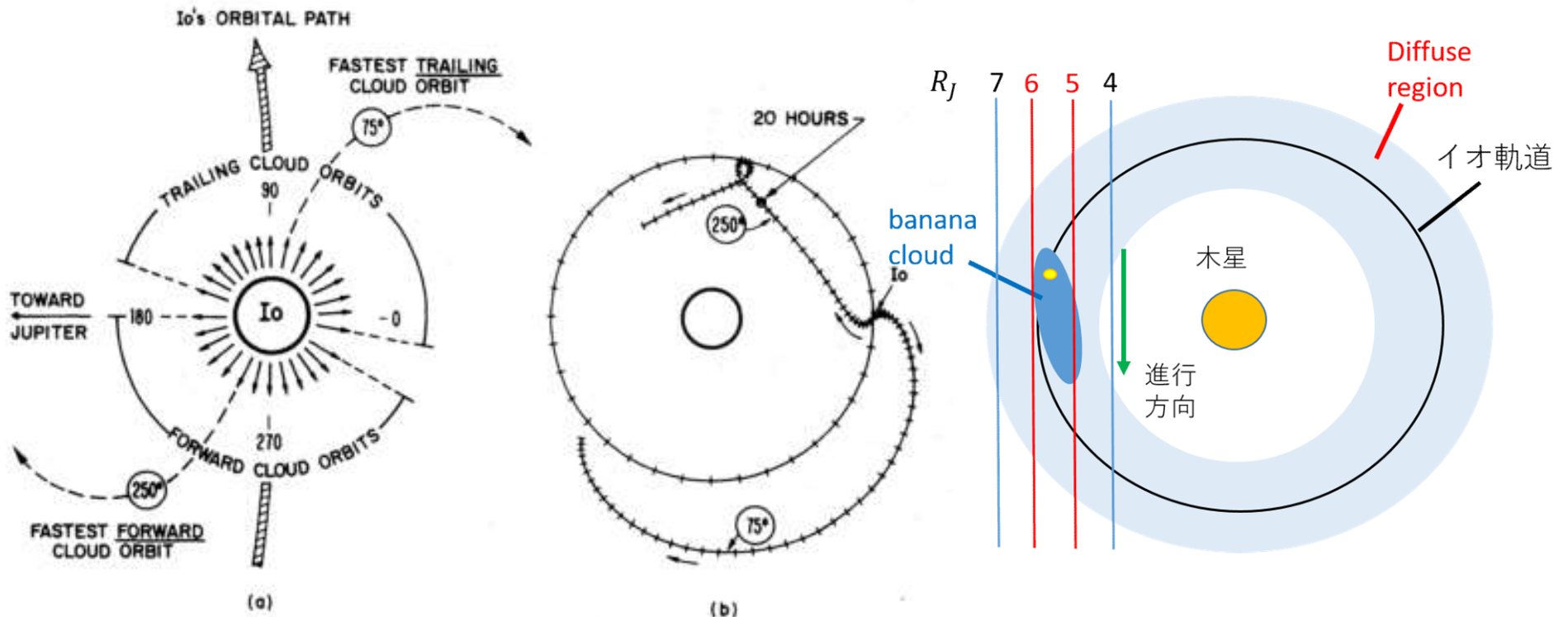


図 ; (a,b; [Smyth and McElroy, 1978])

- (a) 2.6 km/sでイオの外気圏へ放出されたナトリウム原子の軌道
- (b) 50時間のflight timeにおける(a)の軌道
- (c) 観測で推定された酸素原子中性雲の分布

- イオ軌道より内側の分布はtrailing側から出た粒子によって構成されている
- **Banana cloudは脱出速度程度(2.56 km/s)でtrailing側から放出された粒子で生成される**
- **Banana cloudとdiffuse regionの酸素原子量から速度分布の推定が期待できる**

まとめ

大気生成

- イオ周辺の酸素原子発光の変動から、イオの火山活動に伴って大気の変動することが観測で明らかになった
- ナトリウムと酸素原子発光の減光時間スケールの違いから塩化ナトリウムより硫酸化物の方がより低温で広域に放出されることが考えられる

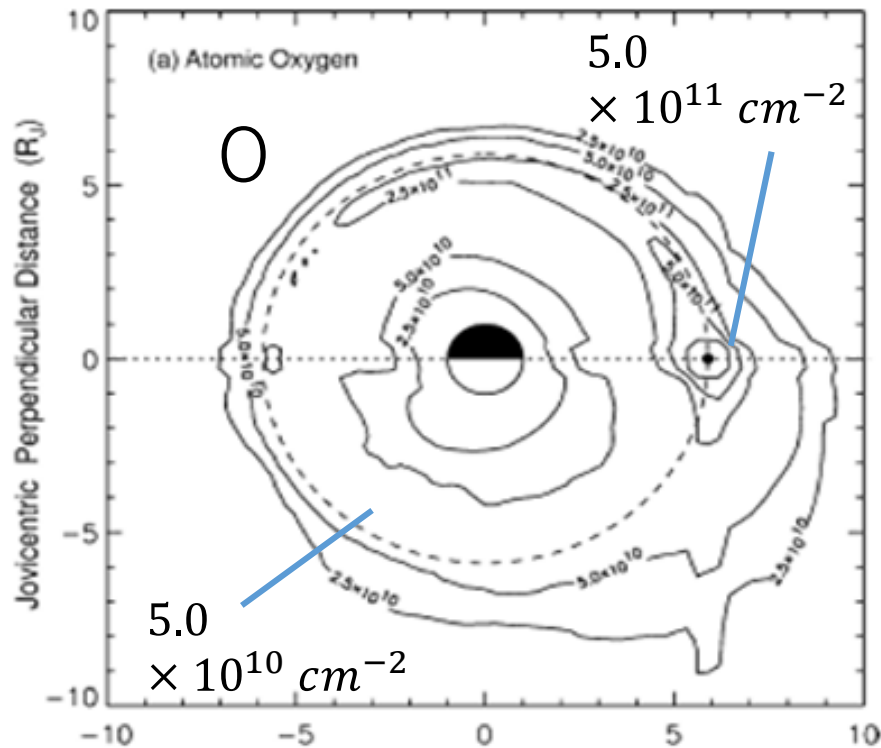
大気散逸

- イオの重力圏から逃げた酸素原子によって、イオ周辺の内側かつ進行方向に濃い領域、軌道全体に経度方向一様の薄い領域を形成していることがわかった
- これらは大気スパッタリング(数 km/s)によってイオ大気から散逸した成分である

参考文献

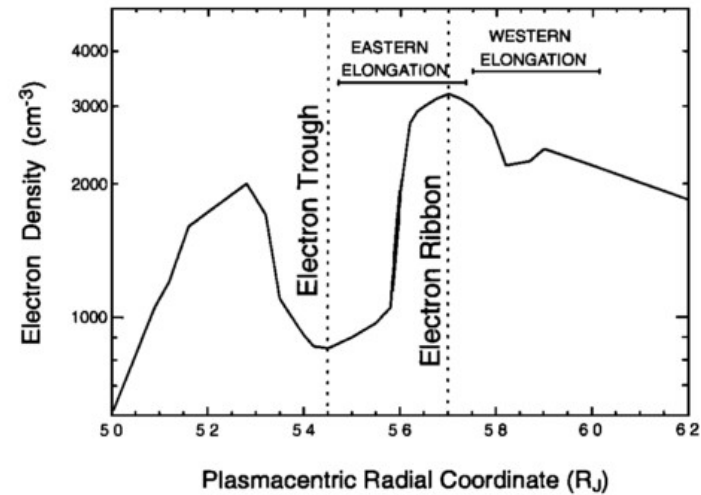
- M. H. Burger (2006), PhD thesis, University of Colorado
- K. De Kleer, K. and I. De Pater (2016), *Icarus*, **280**, 378–404, doi:10.1016/j.icarus.2016.06.019.
- R. Koga et al. (2017), *Icarus*, 299, 300–307. doi:10.1016/j.icarus.2017.07.024
- M. Mendillo et al. (2004). *Icarus*, 170(2), 430–442, doi:10.1016/j.icarus.2004.03.009
- W. H. Smyth, & M. L. Marconi (2003), *Icarus*, 166(1), 85–106. doi:10.1016/S0019-1035(03)00176-3
- W. H. Smyth, & M. B. McElroy (1978), *The Astrophysical Journal*, 226, 336–346.
- M. Yoneda et al. (2015), *Icarus*, **261**, 31–33, [doi:10.1016/j.icarus.2015.07.037](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.07.037).
- I. Yoshikawa et al. (2014), *Space Science Reviews*, 184(1–4), 237–258. [doi:10.1007/s11214-014-0077-z](https://doi.org/10.1007/s11214-014-0077-z).
- K. Yoshioka et al. (2017), *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 122(3), 2999–3012. [doi:10.1002/2016JA023691](https://doi.org/10.1002/2016JA023691)

Appendix- oxygen neutral cloud



E-W distance from Jupiter (R_J)

Fig. (left) Distribution of oxygen neutral cloud around Io's orbit obtained with a modeling [*Smyth and Marconi 2003*]. (right) Radial distribution of electron from Jupiter [*Oliversen et al., 2001*]



Source process

- Sputtering (several km/s)- Elastic collision between atomic oxygen and ions (54 km/s)

Loss process (Charge exchange and Electron impact)

- Atomic oxygen lifetime (18 h) is shorter than characteristic orbital dynamic time (250 h).
- Electron density and temperature inner from Io's orbit < outer 16

Appendix – banana cloud

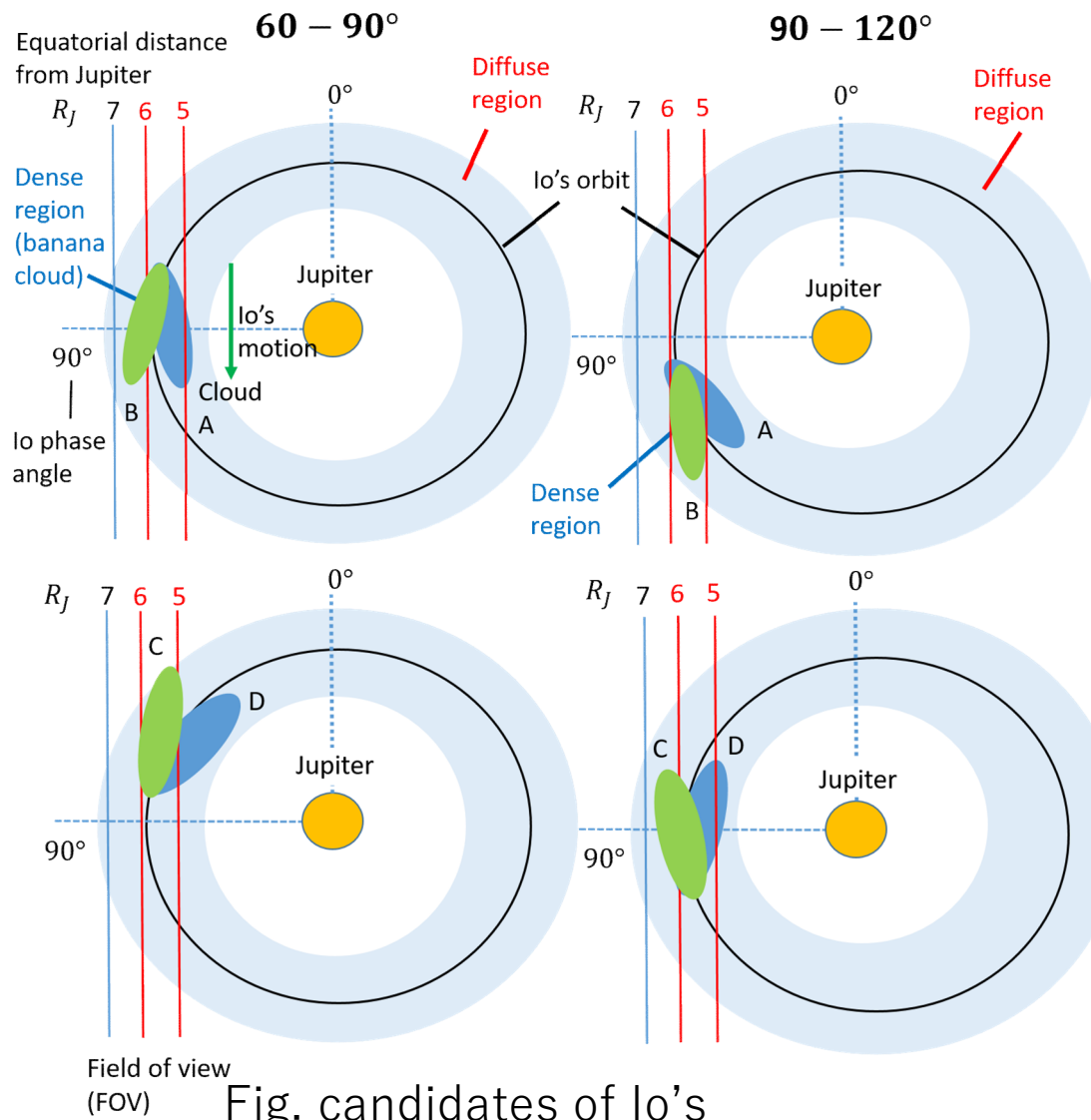


Fig. candidates of Io's oxygen banana cloud

P; the brightness in the IPA range of 60 – 90° or 240 – 270°

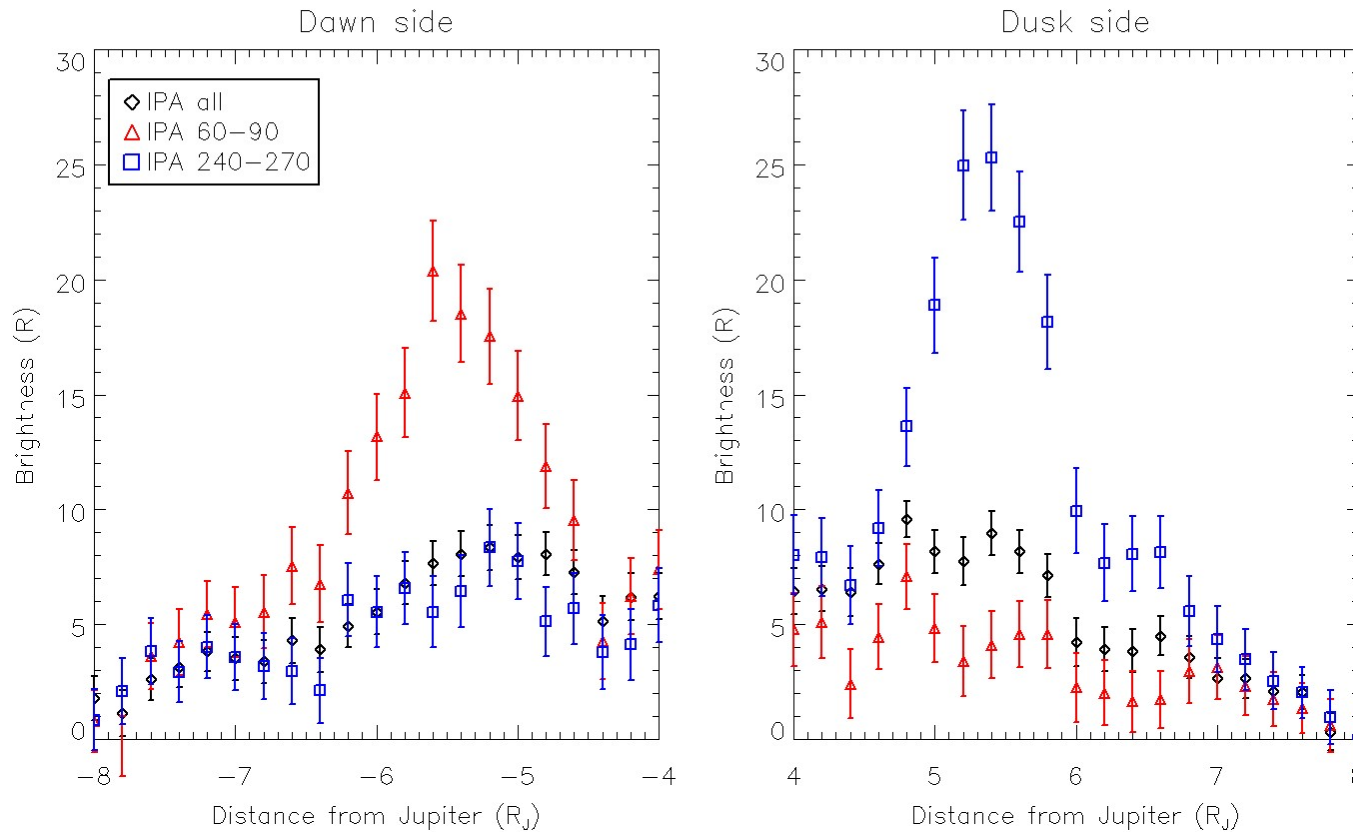
Q; the brightness in that of 90 – 120° or 270 – 300°

Brightness condition

Cloud	$5 - 6 R_J$ $P > Q$	$6 - 7 R_J$ $P \geq Q$
A	○	○
B	×	○
C	○	×
D	×	○

Cloud A (the leading cloud spreading inside of Io's orbit) is most plausible banana cloud

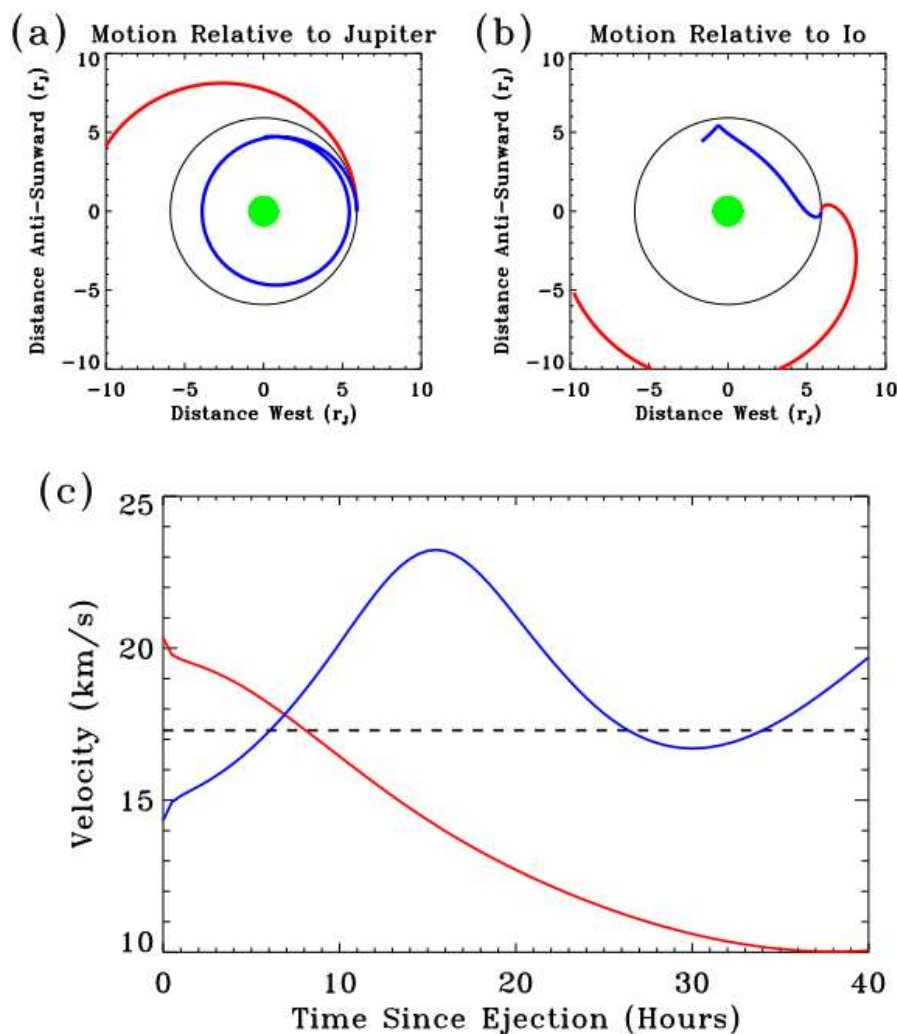
Appendix- Radial distribution



Dawn-dusk
asymmetry from
 $5 - 6 R_J$
=> Dawn dusk
asymmetry of
electron temp.

Fig. Radial distribution of atomic oxygen emission
Red line; lo phase angle 60 – 90°, Black line; lo phase angle 240 – 270°
Both emission around Io and far from Io are extended up to 7.6 RJ

Appendix – Escape process



- イオの進行方向と逆に放出された中性原子はイオの前方に雲を形成する(青の軌道)
 - イオの進行方向に放出された中性原子はイオの後方に雲を作る(赤)
- Banana cloud**
- イオの後方に放出された2.56 km/s前後の速度の粒子で主に形成されると考えられる

Fig. Trajectory of atoms ejected from Io.

The red path shows a sodium atom ejected in the leading direction
the blue path shows an atom ejected in the trailing direction [Burger 2003]