

ETUDE DU SO₂ DANS L'ATMOSPHERE DE IO : PREMIERES OBSERVATIONS INTERFEROMETRIQUES DANS LE MILLIMETRIQUE A. Moullet¹, E. Lellouch², R. Moreno³, M. A. Gurwell⁴, ¹LESIA-Observatoire de Meudon (5 place Jules Janssen, 92195 Meudon, arielle.moullet@obspm.fr), ²LESIA-Observatoire de Meudon (5 place Jules Janssen, 92195 Meudon, emmanuel.lellouch@obspm.fr), ³LESIA-Observatoire de Meudon (5 place Jules Janssen, 92195 Meudon, raphael.moreno@obspm.fr), ⁴CFA-Smithsonian Institute (Cambridge, MA., USA, mgurwell@cfa.harvard.edu)

Introduction:

La présence de raies rotationnelles fortes en émission a permis depuis plus de 15 ans l'étude de l'atmosphère de Io dans le domaine millimétrique. Des composés tels que SO₂, SO et NaCl ont pu être détectés et étudiés, mais la température du gaz et sa dynamique restent mal connues. De plus la faible résolution spatiale des observations millimétriques en antenne unique ne permet pas de résoudre le disque de Io (diamètre apparent 1 arcsec). Or la distribution spatiale du gaz est un élément essentiel pour comprendre si l'atmosphère de Io est d'origine volcanique ou produite par la sublimation de la glace. Nous présentons ici les premières observations millimétriques spatialement résolues de Io, effectuées à l'interféromètre du Plateau de Bure-IRAM. Les spectres et cartes obtenus sont interprétés dans un premier temps avec un modèle d'atmosphère hydrostatique.

Observations :

Deux observations ont été effectuées en janvier et février 2005, intégrant pendant 7 heures sur la face avant « leading » (longitude centrale = 65-120°W) et la face arrière « trailing » (L=225-310°W). L'interféromètre était dans sa configuration la plus étendue (ligne de base max. = 400m), ce qui donne un beam synthétique de 0.5x1.5 arcsec à 1mm. Io peut donc être résolu en deux points dans la direction E-W céleste, qui correspond approximativement à la direction longitudinale sur Io. Le récepteur à 1.3 mm est centré à la fréquence de 216.643 GHz, qui correspond à la fréquence au repos d'une raie rotationnelle forte du SO₂, après correction de l'effet Doppler du au mouvement de révolution du satellite. La résolution spectrale est de 40 kHz sur les backends en mode raie.

Analyse de l'émission continue :

L'émission continue thermique de Io est mesurée dans les backends en mode continu, intégrant sur une largeur de bande de 320 MHz. Cette émission est fittée dans le plan UV selon un modèle thermique prenant en compte le chauffage solaire, l'inertie thermique et les sources de chaleur volcaniques [1], de la forme : $T_{\text{surface}} = A \cos(\text{sza})^{0.75} + B$, où sza est l'angle solaire zénithal. Les meilleurs fits des visibilités sont obtenus pour 0K<A<30K et 65K<B<95K sur le leading et 75K<B<105K sur le trailing, avec une émissivité de

surface constante. La faible variation de la température de surface sur le disque et les températures mesurées, inférieures à celles déduites de mesures dans l'IR, laissent penser que l'on observe l'émission thermique de la sous-surface.

Spectroscopie :

Modèle atmosphérique :

Les raies du SO₂ sont ajustées grâce à un modèle de transfert radiatif, où l'on suppose une atmosphère hydrostatique et à l'ETL.

Le profil vertical de température pourra être isotherme ou non, selon des modèles incluant les effets d'interaction avec le plasma ([2], [3]).

La densité de colonne de SO₂ est fixée selon deux modèles de distribution, présentant des variations en longitude et en latitude :

- une distribution tirée d'observations HST dans l'UV, avec une très bonne résolution spatiale [4]
- une distribution issue d'observations IR intégrées sur le disque, interprétées selon un modèle symétrique en latitude [5]

Les données spectrales sont interprétées en termes de température et de dynamique de l'atmosphère.

Données du Plateau de Bure :

Les données spectrales acquises au Plateau de Bure sont self-calibrées avec le modèle de continu construit précédemment.

La raie du SO₂ à 216.643 GHz est bien détectée sur les deux observations (leading et trailing). Cependant le signal sur bruit sur la face trailing étant assez faible, seule la raie sur le leading est ici analysée.

La raie intégrée sur le disque (cf Fig.1) présente une largeur à mi-hauteur de 800 +/- 30 m/s, qui ne peut être expliquée ni par la largeur naturelle de la raie ni par la rotation solide du satellite (75 m.s⁻¹). Un élargissement Doppler doit être introduit, comme par exemple un vent en superrotation de 380 m.s⁻¹. Le contraste de raie de 55 K en température de brillance est bien reproduit pour une température atmosphérique de 215 K, dans le cas d'un profil vertical isotherme.

De plus la raie présente un red-shift de 38 +/- 28 m/s, qui n'est pas reproduit par les modèles.

Le signal sur bruit est suffisant pour étudier la raie à différents endroits du disque. On constate ainsi un différence de décalage spectral de 400 m/s d'un limbe à l'autre, ce qui est prévu par le modèle avec vent en superrotation (cf. fig.2). En revanche, le fait

que le décalage spectral à la longitude centrale soit de +100m/s n'est pas reproduit.

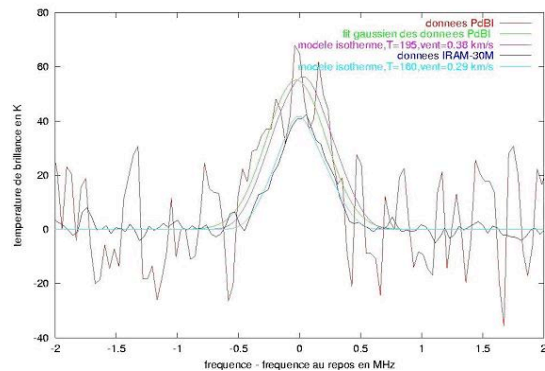


Fig.1 : Raie intégrée sur le disque, données Pd et IRAM-30M

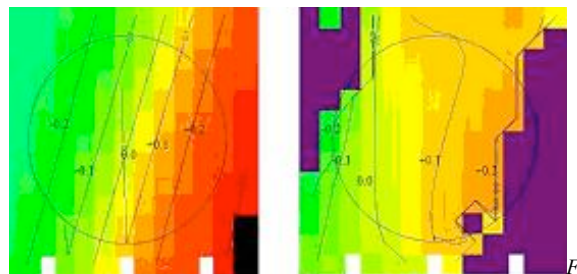


Fig. 2 : décalages spectraux des raies en km/s . A gauche : modèle avec un vent de 0.38 km/s, à droite : données Pd

Comparaison avec données IRAM-30M :

La même raie du SO₂ a été observée à l'automne 1999 à l'antenne de 30 M de l'IRAM. Les données obtenues, intégrées sur le disque, ne sont pas compatibles avec les données du Plateau de Bure, laissant supposer une variation temporelle de l'atmosphère. La largeur à mi-hauteur de 660 +/- 20 m/s est ajustée pour un vent en superrotation de 300 m/s, le contraste pour une température de 160 K. De plus les raies présentent un décalage spectral vers le bleu, bien reproduit par les modèles.

Cartes interférométriques :

Les cartes de l'émission de SO₂ sont obtenues en intégrant le signal sur une portion de fréquences correspondant à la largeur de la raie (520 kHz), au centre de la raie (120 kHz) ou à l'aile de la raie dans le bleu et le rouge.

Les cartes sur les deux hémisphères ont une forme bien plus étroite que les cartes de l'émission continue, ce qui indique une distribution hétérogène du gaz sur le disque. La forme de la carte sur la face leading correspondrait ainsi à une zone d'émission d'une taille apparente de 0.5 +/- 0.05 arcsec dans la direction E-W céleste, plus étroite encore que ce que prévoient les modèles de distribution du gaz.

De plus cette émission semble décentrée par rapport au centre du satellite.

La carte sur le trailing intégrée sur la largeur de raie montre ainsi un décalage significatif vers le Nord (0.39 arcsec +/- 0.2) qui ne peut être reproduit par

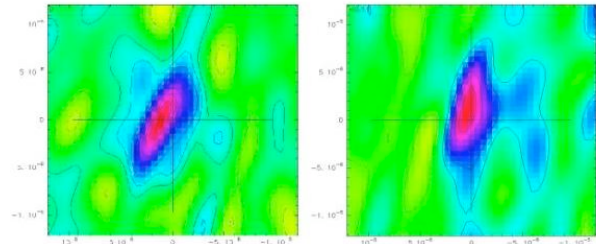


Fig. 3 : cartes de l'émission de SO₂ intégrée sur la raie. A gauche : leading, à droite : trailing

nos modèles de distribution du gaz, et pourrait être la signature de la présence de volcans.

La carte du leading intégrée dans l'aile bleue de la raie montre elle un décalage vers l'E (0.43 arcsec +/- 0.17) et le S (0.63 arcsec +/- 0.32). Les modèles hydrostatiques montrent aussi un décalage vers l'E, mais pas aussi important (0.29 arcsec avec la distribution UV, 0.2 arcsec avec la distribution IR et un vent de 380 m/s). La distribution IR reproduit bien une émission centrée dans les autres bandes de fréquences, alors que la distribution UV produit un décalage vers l'E important partout.

Tout ceci tend à montrer soit que les distributions de gaz utilisées ne sont pas valables, soit que le profil vertical de température atmosphérique n'est pas spatialement uniforme. En effet la raie de SO₂ n'est émise que pour une température atmosphérique supérieure à la température du sol.

Conclusions provisoires :

Les modèles hydrostatiques utilisés dans cette étude ne sont pas suffisants sur tous les points. La largeur de la raie et le décalage spectral limbe à limbe sur la face leading semblent bien modélisés par un vent en superrotation d'une vitesse de 380 m/s environ. Le contraste observé correspond à des températures atmosphériques de l'ordre de 160-210 K.

Cependant la forme des cartes et le décalage du maximum d'émission par rapport au centre du disque ne sont pas bien reproduits, ce qui remet en question les modèles de distribution de gaz utilisés .

Prospectives :

La prochaine étape dans l'analyse des données consistera à introduire des modèles de plumes volcaniques [6].

Les observations du Plateau de Bure pourront bientôt être comparées à d'autres observations interférométriques millimétriques effectuées en mai 2006 par M.A. Gurwell au SMA .

Citations: [1] G.Veeder et al. (1994), *JGR* 99, p 17095-17162 [2] M.Wong ,W.Smyth (2000) *Icarus* 146, p 60-74 [3] D.Strobel et al. (1994), *Icarus* 111, p 18-30 [4] L.Feaga (2006), communication privée [5] J.Spencer et al. (2005), *Icarus* 176, p 283-304 [6] Zhang et al. (2003), *Icarus* 163, p 182-197