



L'ÉLECTROMAGNÉTISME, 150-1
UNE SCIENCE EN PLEINE ACTION !

Mesures de la permittivité relative complexe de matériaux granulaires poreux, dans le cadre de la mission Rosetta.

Permittivity measurements of porous granular matter, in relation with Rosetta mission.

Brouet Y. , Levasseur-Regourd A.C.** , Encrenaz P.*** , Gulkis S.*****

* Observatoire de Paris, LERMA ; yann.brouet@obspm.fr

** UPMC Univ. P. & M. Curie, UMR 8190 (LATMOS-CNRS) ; anny-chantal.levasseur@aerov.jussieu.fr

*** Observatoire de Paris, LERMA ; pierre.encrenaz@obspm.fr

**** Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology ; samuel.gulkis@jpl.nasa.gov

Mots-clés : Mission Rosetta, matière granulaire, noyau cométaire, permittivité.

Keywords: Rosetta mission, granular matter, cometary nuclei, permittivity.

Résumé

Un programme de mesure de la permittivité relative complexe concernant des échantillons granulaires poreux a été mené sur une large gamme de fréquence entre 50 MHz et 190 GHz (instrumentations: cellule coaxiale, cavités résonantes et banc quasi-optique). Ces mesures ont été effectuées dans le but de préparer les futures observations de la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko par la sonde Rosetta en 2014, spécifiquement pour les expériences radiométriques CONSERT et MIRO. En considérant les propriétés des noyaux cométaires, ces mesures ont été réalisées sur trois échantillons granulaires poreux d'origine volcanique riches en silicates, dont la taille varie entre quelques et plusieurs centaines de micromètres. La partie réelle de la permittivité varie entre 2,3 et 3,9. La partie imaginaire varie entre 0,04 et 0,30. En prenant en compte les propriétés in-situ attendues en température, densité, porosité et composition de la surface, de la sous-surface et de la structure interne du noyau cométaire, ces mesures constituent une limite supérieure pour l'interprétation des données de CONSERT et MIRO, respectivement à 90 MHz et 190 GHz.

Introduction

En mai 2014, la sonde européenne Rosetta arrivera en orbite autour de la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko (67P/C-G par la suite) à environ 4,5 UA du Soleil. A son bord deux expériences radiométriques, MIRO [5] et CONSERT [9], sont destinées à l'étude des propriétés physiques du noyau cométaire. MIRO est un radiomètre composé de deux récepteurs, le premier possède un centre de bande de fréquence de réception situé à 190 GHz (dans le domaine millimétrique, i.e. 1,6 mm) et le second à 560 GHz (dans le domaine submillimétrique, i.e. 0,5 mm). Ces récepteurs permettront de mesurer la température de brillance de la sous-surface et de la surface du noyau cométaire, respectivement. Aussi, pour la première fois, la structure interne d'un noyau cométaire sera étudiée par tomographie radar, avec l'expérience CONSERT dont la fréquence de l'onde portée est de 90 MHz. Les noyaux cométaires sont des petits corps irréguliers composés d'un mélange de glaces (principalement H₂O) et de poussières, principalement des minéraux silicatés cristallisés (ou sous forme de verre) comme l'olivine ou l'enstatite. De plus, ils sont aussi riches en molécules organiques [10]. La modélisation des forces non-gravitationnelles exercées sur le noyau cométaire, couplée à des campagnes d'observations ont permis d'estimer sa densité à 370 kg/m³ [11]. Une telle densité pour une structure composée d'un mélange de glaces et de poussières semble indiquer que la porosité globale est importante, probablement proche de 80%. Les températures de surface et de sous-surface devraient varier entre 110 et 300 K en prenant en compte les variations d'énergie solaire, puis de l'ordre de 100 K en ce qui concerne la structure interne du noyau cométaire [13].

Les signaux électromagnétiques relevés par MIRO et CONSERT, dont la propagation est contrôlée par la permittivité relative complexe ϵ_r (composée d'une partie réelle ϵ' et d'une partie imaginaire ϵ''), dépendront des propriétés physiques et chimiques du noyau cométaire en surface et en profondeur (i.e. composition, porosité, température). Afin de préparer les futures observations de la comète 67P ainsi que l'analyse et l'interprétation des données de CONSERT et MIRO, un programme de mesure de la permittivité relative complexe d'échantillons poreux a été mis en place sur une large gamme de fréquence, entre 50 MHz et 190 GHz.

1 Echantillons et instrumentations

1.1 Echantillons étudiés

Pour approcher au mieux les caractéristiques des poussières cométaires en termes de composition et de porosité, nous avons recherché des échantillons granulaires poreux. Les candidats les plus pertinents semblent être les dépôts volcaniques de composition basaltique. Trois échantillons de cette nature ont été étudiés : des dépôts pyroclastiques collectés en 2010 sur le flanc sud de l'Etna en Sicile (Italie); un échantillon de simulant du sol martien (JSC-Mars1, [1]); un échantillon de simulant du sol lunaire (JSC-1AF, [8]). De par leur composition chimique riche en minéraux silicatés et leur porosité élevée ($\sim 50\%$), ces échantillons naturels représenteraient de bons analogues de poussières cométaires.

Afin d'étudier la dépendance de la permittivité avec la taille des grains et la porosité, qui semble varier avec la taille des grains (cf. Figure 1), chacun des échantillons initiaux a été divisé par tamisage en plusieurs sous-échantillons ayant une distribution en taille différente comprise entre 1 et 600 μm (cf. Table 1). Grâce à des photographies obtenues avec un microscope optique, une analyse granulométrique a été menée sur un nombre N de grains de chaque sous-échantillon (environ une centaine). La forme de chaque grain est approchée par un sphéroïde allongé. Le diamètre D_i de la sphère dont le volume est égale à celui du sphéroïde est défini comme la taille moyenne d'un grain (où i est l'indice courant d'un grain donné dans un paquet de N grains). La distribution en taille de grains pour un sous-échantillon donné est divisé J intervalles, j étant l'indice courant et X_j la moyenne d'un intervalle donné, w_j est le poids attribué à chaque intervalle, défini comme le nombre de grains avec un diamètre D_i appartenant à un intervalle de taille donné. Ainsi une estimation de la taille moyenne des grains ϕ de chaque sous-échantillon est obtenue, ainsi que sa déviation standard σ_ϕ par les équations suivantes :

$$\phi = \frac{\sum_{j=1}^J (w_j X_j)}{\sum_{j=1}^J w_j} \quad (1)$$

$$\sigma_\phi = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (D_i - \phi)^2}{(N - 1)}} \quad (2)$$

Les caractéristiques précédemment définies de tous les sous-échantillons sont résumés dans le tableau ci-dessous.

| | Dépôts de l'Etna | | | | JSC-Mars1 | | | JSC-1AF | | | | | |
|----------------------------|------------------|-----|-----|-----|-----------|-----|-----|---------|----|-----|-----|-----|-----|
| n° | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| $m(\text{g})$ | 3 | 14 | 48 | 64 | 3 | 10 | 8 | 56 | 56 | 10 | 28 | 21 | 9 |
| N | 81 | 80 | 84 | 96 | 100 | 99 | 81 | 91 | 93 | 95 | 86 | 90 | 87 |
| $\phi(\mu\text{m})$ | 36 | 115 | 283 | 506 | 42 | 157 | 272 | 24 | 74 | 164 | 248 | 347 | 544 |
| $\sigma_\phi(\mu\text{m})$ | 15 | 35 | 67 | 60 | 21 | 36 | 46 | 9 | 28 | 21 | 39 | 43 | 59 |

Table 1: Principales caractéristiques des 13 sous-échantillons provenant des dépôts pyroclastiques de l'Etna, du simulant martien JSC-Mars1 et du simulant lunaire JSC-1AF. m est la masse totale disponible.

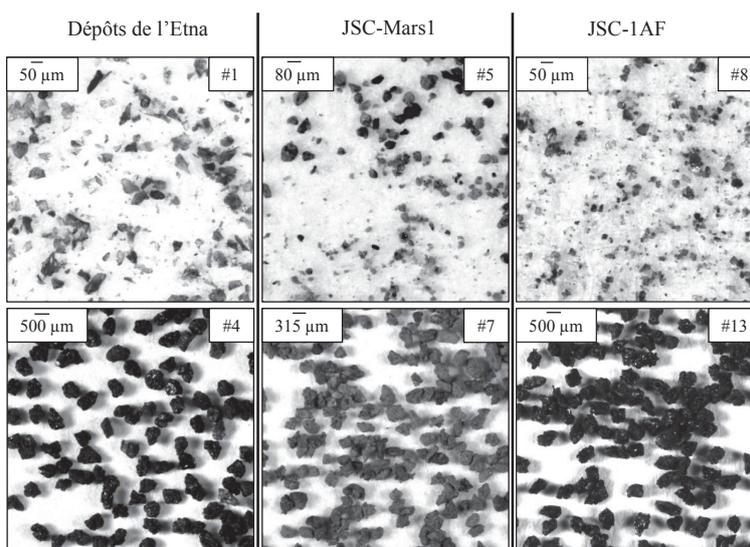


Figure 1: Images au microscope optique de chacun des sous-échantillons avec les grains les plus fins et les plus gros.

La figure 1 montre une différence de texture des grains en fonction de leur taille pour les trois types d'échantillons. Les sous-échantillons n°1, 5 et 8 sont composés essentiellement de grains non-poreux entièrement cristallisés tandis que les sous-échantillons n°4, 7 et 13 se composent majoritairement de grains poreux finement cristallisés. La porosité intrinsèque des grains augmenterait avec la taille des grains pour les trois types d'échantillons, induisant donc l'augmentation de la porosité globale.

1.2 Instrumentations et conditions de mesure

Un banc quasi-optique monté en transmission a été adapté spécialement pour mesurer la permittivité relative complexe d'échantillon granulaire au LERMA (Observatoire de Paris) à 190 GHz. L'onde électromagnétique est à la fois synthétisée, réceptionnée et analysée par un analyseur de réseau vectoriel [4]. Ensuite, des mesures à 2,45, 5,6, 8 et 12 GHz ont été menées au laboratoire IMS (Bordeaux) en employant des cavités résonantes connectées à un analyseur de réseau vectoriel. Et enfin, au sein du même laboratoire, à des fréquences de 50, 100 et 500 MHz, une cellule coaxiale ouverte connectée à un analyseur d'impédance a permis de réaliser les mesures.

Les mesures ont été effectuées dans les conditions du laboratoire. La permittivité est dépendante de la température du milieu et de l'humidité absolue. Celles-ci sont restées respectivement entre 293 et 301 K et entre 6×10^{-3} et 12×10^{-3} kg/m³ pour toutes les mesures. Les mesures de calibration des instruments (effectuées avec des matériaux standard comme le PolyTetraFluoroEthylène) n'ont montré aucun signe de dépendance dans les fenêtres de variation mentionnées précédemment.

2 Résultats et discussions

2.1 Dépendance de la permittivité en fréquence, granulométrie et porosité

Les figures 2, 3 et 4 représentent respectivement la permittivité (la partie réelle et la partie imaginaire) de tous les sous-échantillons des dépôts pyroclastiques de l'Etna, du simulant JSC-Mars1 et du simulant lunaire JSC-1AF en fonction de la fréquence en échelle logarithmique. Les résultats montrent une bonne cohérence le long de la gamme de fréquence explorée, bien que trois instrumentations différentes aient été nécessaires pour la couvrir entièrement. ϵ' décroît lentement quand la fréquence augmente pour tous les sous-échantillons des dépôts de l'Etna, excepté le n°4, et pour tous ceux du simulant martien. Quant au simulant lunaire, ϵ' reste plutôt stable le long de la gamme de fréquence. ϵ' varie entre 2,3 et 3,6 pour les dépôts pyroclastiques de l'Etna, entre 2,3 et 3,9 pour les sous-échantillons du simulant martien (JSC-Mars1) et entre 2,9 et 3,6 pour ceux du simulant lunaire (JSC-1AF). ϵ'' reste relativement stable pour tous les sous-échantillons quand la fréquence augmente. Cependant, ϵ'' varie entre 0,04 et 0,26, entre 0,14 et 0,30 et entre 0,04 et 0,15, respectivement.

Systématiquement pour les trois types d'échantillons, à basse fréquence (50, 100 et 500 MHz), ϵ' décroît quand la taille des grains augmente. Cette tendance peut s'expliquer par le fait que la porosité globale des sous-échantillons s'accroît lorsque la taille des grains augmente (cf. Section 1.2 et Figure 1). En considérant un sous-échantillon comme un mélange d'air et de grains, si la proportion d'air augmente alors la partie réelle de l'indice de réfraction complexe du milieu diminue, impliquant aussi une diminution de ϵ' qui varie comme le carré de la partie réelle de l'indice de réfraction complexe [3]. Nos mesures sont cohérentes avec des mesures obtenues à 2 MHz en utilisant une cellule coaxiale, sur un basalte réduit en poudre [6]. Lesquelles montrent que ϵ' chute de 8 à 3 pour une porosité passant de 30 à environ 50%. Il est à noter qu'aucune variation significative n'est mise en évidence pour ϵ'' . De même, d'après nos mesures, aucune variation significative n'est observée pour la partie imaginaire de la permittivité quand la taille des grains augmente pour toutes les fréquences de mesure, excepté à 190 GHz, où, pour les dépôts de l'Etna et le simulant lunaire, ϵ'' semble augmenter avec la taille des grains. Tandis que pour le simulant JSC-Mars1 aucune variation n'est mesurée. A 190 GHz, la longueur d'onde serait suffisamment proche de la taille moyenne des grains des sous-échantillons n°4 et 13 (seulement trois fois plus grande) pour que la diffusion de l'onde électromagnétique par les grains engendre des pertes du signal au niveau du récepteur du banc quasi-optique et une augmentation de ϵ'' .

2.2 Comparaisons avec d'autres mesures

De précédentes mesures de permittivité de l'échantillon JSC-Mars1 non-tamisé ont été menées entre 0,20 et 1,30 GHz en utilisant trois radars émetteur/récepteur monté en transmission [14]. Celles-ci tombent en assez bon accord avec les mesures présentées ($\epsilon' \sim 3,18$ à 0,50 GHz, $\epsilon' \sim 3,09$ à 1,24 GHz et $\epsilon'' \sim 0,20$ sur toute la gamme de fréquence). Aussi, nos mesures à basse fréquence sur les dépôts de l'Etna ou l'échantillon JSC-1AF sont comparables aux mesures déjà mentionnées précédemment concernant des poudres de basalte [6], dont la porosité est proche ($\sim 50\%$) : $\epsilon' \sim 3,2$; $\epsilon'' \sim 0,18$. La légère différence dans les résultats pourrait être due à la préparation de l'échantillon, les travaux mentionnés utilisent un basalte réduit en poudre avec une taille de grain contrôlée de 50 μm .

2.3 Implications pour la mission Rosetta

Il semble raisonnable de considérer les échantillons étudiés comme appropriés pour des analogues de poussières cométaires. Par conséquent, les résultats des mesures présentées ci-dessous peuvent fournir des informations intéressantes pour les expériences radiométriques CONSERT et MIRO, une fois la porosité, la composition et la température du noyau cométaire 67P/C-G prises en compte. Il apparaît que le noyau cométaire possède une porosité importante d'environ 80%. Ceci impliquerait une décroissance de ϵ' de quelques dizaines de pourcents tandis que ϵ'' ne devrait pas varier significativement. En prenant en compte la composition au niveau de la surface et de la sous-surface du noyau cométaire, par exemple un mélange poussière/glace avec un rapport massique de 1 (cf. [7]), ϵ' devrait décroître aussi de quelques pourcents à quelques dizaines de pourcents. Enfin la température in-situ estimée en surface, en sous-surface et en profondeur implique de revoir également à la baisse les valeurs de ϵ' jusqu'à environ 20%, en première approximation, pour une température variant de 300 à 90 K [6].

A partir des variations de la permittivité mentionnées ci-dessus en fonction des propriétés in-situ estimées pour le noyau cométaire 67P/C-G, nous sommes en mesure de suggérer que nos résultats représentent une limite supérieure pour la permittivité des composants du noyau cométaire. Avec cette première approche, on peut s'attendre à ce que ϵ' soit compris entre 1,4 et 3,1 à 90 MHz et entre 1,1 et 2,5 à 190 GHz, respectivement aux fréquences de mesure de CONSERT et MIRO. Cependant, aucune variation significative n'est attendue pour ϵ'' .

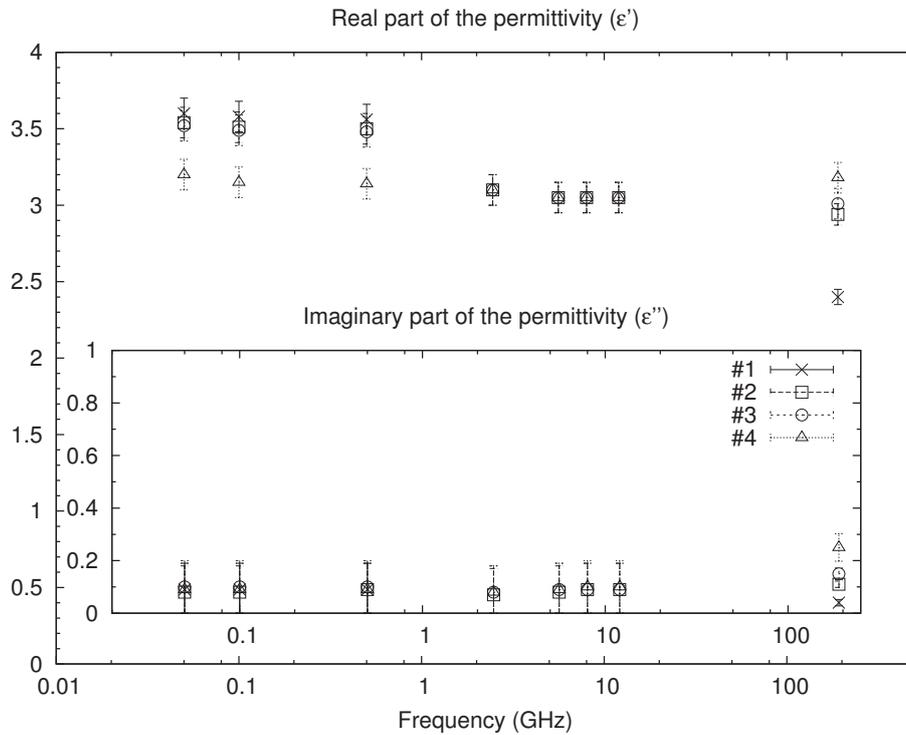


Figure 2: Partie réelle (ϵ') et partie imaginaire (ϵ'') de la permittivité en fonction de la fréquence pour les 4 sous-échantillons des dépôts pyroclastiques de l'Etna [2].

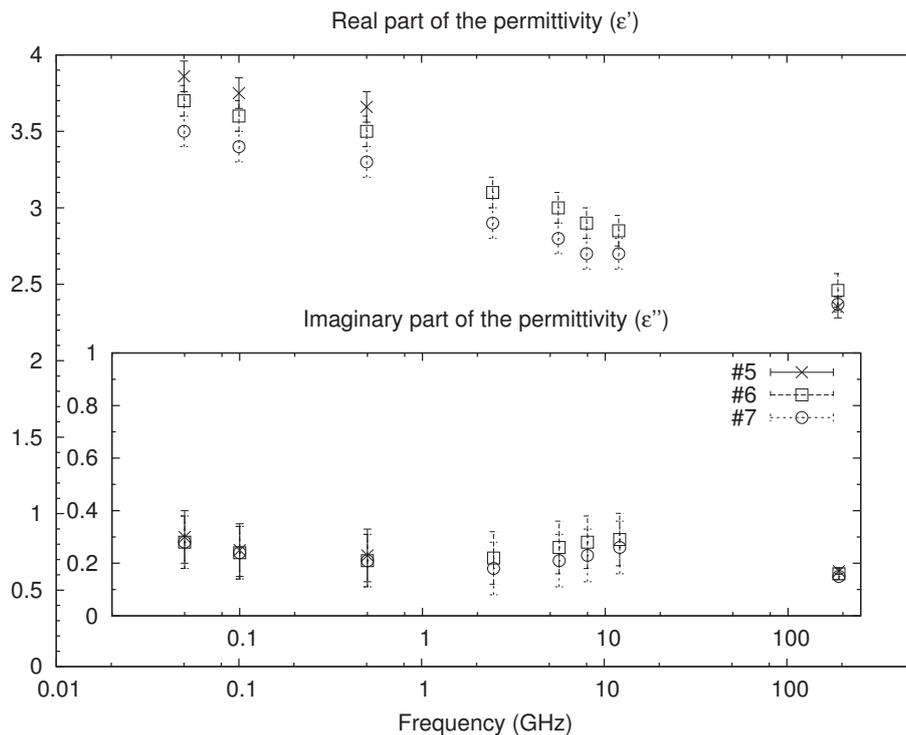


Figure 3: Partie réelle (ϵ') et partie imaginaire (ϵ'') de la permittivité en fonction de la fréquence pour les 3 sous-échantillons du simulant martien JSC-Mars1 [2].

Conclusion

Les mesures cohérentes obtenues sur la grande gamme de fréquences (de 50 MHz à 190 GHz) devraient renforcer la préparation et l'analyse des observations de la comète 67P/C-G par les expériences MIRO et CONSERT à bord de Rosetta. Pour cela, il est nécessaire de prendre en compte la composition chimique, le rapport massique poussière/glace, la porosité et la température du noyau cométaire pour estimer correctement la permittivité relative complexe de la surface, de la sous-surface et de la structure interne du noyau cométaire. Considérant les propriétés in-situ, nos mesures à 50 et 100 MHz, ainsi qu'à 190 GHz représentent, respectivement, une limite supérieure pour l'interprétation future des données de CONSERT et de MIRO.

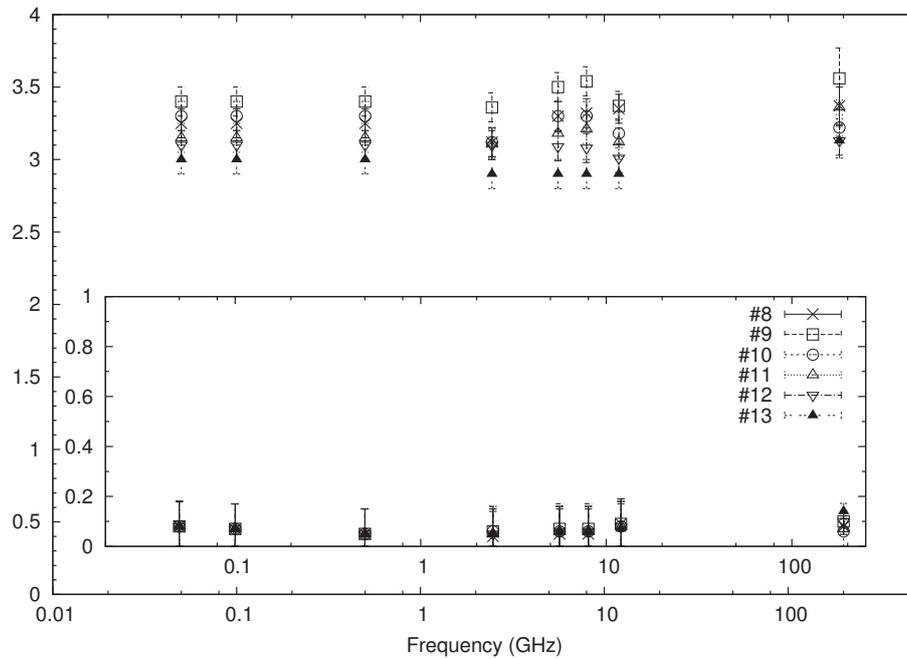


Figure 4: Partie réelle (ϵ') et partie imaginaire (ϵ'') de la permittivité en fonction de la fréquence pour les 6 sous-échantillons du simulant lunaire JSC-1AF.

References

- [1] Allen, C.C., et al., 1998. Martian soil simulant available for scientific, educational study. EOS Transactions, American Geophysical Union 79, 405-409.
- [2] Brouet, Y., et al., 2013. Permittivity of porous granular matter, in relation with Rosetta mission. Submitted to Planetary and Space Science.
- [3] Fox, M., 2010. Optical properties of solids. Oxford University Press Inc., New York.
- [4] Goy, P., et al., 2006. Quasi-Optical Characterization of Dielectric and Ferrite Materials. 17th international symposium on space THz technology, Paris, hal-00376918.
- [5] Gulkis, S., et al., 2007. MIRO, microwave instrument for the Rosetta orbiter. Space Science Review 128, 561-597.
- [6] Heggy, E., et al., 2001. On water detection in the martian subsurface using sounding radar. Icarus 154, 244-257.
- [7] Heggy, E., et al., 2012. Radar properties of comets: parametric modeling of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. Icarus 221, 925-939.
- [8] Hill, E., et al., 2007. Apollo sample 70051 and high- and low-Ti lunar soil simulants MLS-1A and JSC-1A: Implications for future lunar exploration. Journal of Geophysical Research 112, E02006.
- [9] Kofman, W., et al., 2007. The Comet Nucleus Sounding Experiment by Radiowave Transmission (CONSERT). Space Sci. Rev. 128, 413-432.
- [10] Kolokova, L., et al., 2004. Physical Properties of Cometary Dust from Light Scattering and Thermal Emission, in: Festou, M.C., Keller, H.U., Weaver, H.A (Eds.), Comets II. University of Arizona Press, Tucson, 577-604.
- [11] Lamy, P.L., et al., 2007. A portrait of the nucleus of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. Space Science Reviews 128, 23-66.
- [12] Olhoeft, G.R., Strangway, D.V., 1975. Dielectric properties of the first 100 meters of the Moon. Earth and Planetary Science letters 24, 394-404.
- [13] Prialnik, D., et al., 2004. Modeling the structure and activity of comet nuclei, in: Festou, M.C., Keller, H.U., Weaver, H.A. (Eds.), Comets II. University of Arizona Press, Tucson, 359-387.
- [14] Williams, K.K., Greeley, R., 2004. Measurements of dielectric loss factors due to Martian dust analog. Journal of Geophysics Research 109, E10006.