

# Formation du système solaire : approche cosmochimique dans le contexte astrophysique

## Solar system formation: Cosmochemical approach in the astrophysical context

### Avant-propos

L'étude de la formation et de l'évolution précoce du système solaire connaît une « révolution » comparable à celle connue il y a une trentaine d'année à la suite du retour sur Terre des échantillons lunaires (voir [8] pour une présentation des résultats scientifiques les plus importants, obtenus à partir de l'examen des échantillons lunaires) et des investissements très importants faits à cette occasion dans les laboratoires étudiant les météorites. La « révolution » actuelle tient à la conjonction de trois circonstances particulières.

D'abord, les techniques de caractérisation minéralogique, spectroscopique, chimique et isotopique ont connu des développements très importants (spectroscopies in situ et rayonnement synchrotron, sondes ioniques, spectromètres de masse à source plasma ou à source laser...) qui autorisent maintenant :

- la caractérisation détaillée et complète de grains minéraux de taille allant de la dizaine de nanomètres au micromètre ;
- la mesure de compositions isotopiques, avec des précisions améliorées d'un ou deux ordres de grandeur.

Ces progrès analytiques ont donné lieu à de nombreuses avancées dans l'étude de la matière

### Foreword

The study of the formation and early evolution of the solar system undergoes a “revolution” similar to that which occurred 30 years ago when the first lunar samples were returned to the Earth (see [8] and references therein for a summary of the major scientific results obtained from the examination of lunar samples). The study of lunar rocks promoted the development of new analytical methods and of new concepts, which were applied to the study of extra-terrestrial materials. The present-day “revolution” is due to a combination of three factors.

First, the analytical techniques for mineral characterization, spectroscopy, chemistry, and isotopic analyses have undergone spectacular improvements (in situ spectroscopy and synchrotron radiation, ion microprobes, thermo-ionization, plasma, or laser mass spectrometers). These analytical tools allow us:

- to obtain a complete and detailed characterization of grains ranging in size from a few tenths of nanometres up to a few micrometers;
- to measure isotopic compositions with a precision that has been improved by one to two orders of magnitude over the last ten years.

The possibility to reach such a scale of characterization led to numerous recent advances in meteoritics

extraterrestre [12]. Atteindre cette échelle de caractérisation est une étape fondamentale qui a limité, au cours des dix dernières années, l'étude des échantillons extraterrestres, car les informations pertinentes sur leurs conditions de formation sont enregistrées à l'échelle du nanomètre ou du micromètre et correspondent souvent à des variations de composition isotopique de très faible ampleur.

Ensuite, les techniques d'observation astrophysique du milieu interstellaire ou des étoiles jeunes en formation avec leur disque d'accrétion ont connu des progrès considérables (par exemple, ISO, spectromètre proche infrarouge du VLTI...), qui font qu'aujourd'hui, la minéralogie du milieu interstellaire progresse à grands pas et que des transformations minéralogiques et chimiques affectant le gaz et la poussière dans des disques d'accrétion, autour d'étoiles en formation analogues à notre système solaire jeune, sont observables à une échelle spatiale de l'ordre de l'unité astronomique [13]. Nous rentrons donc dans une période où, pour la première fois, il est réaliste de viser comme objectif que, dans les années à venir, il soit possible de recouper, à des échelles comparables, des observations astrophysiques et des observations faites en laboratoire sur la matière extraterrestre.

Enfin, ces dernières années connaissent une activité toute particulière des agences spatiales pour le retour sur Terre d'échantillons extraterrestres. Ces retours sont les premiers depuis ceux des échantillons lunaires rapportés il y a 30 ans par les missions Apollo et Luna. La mission NASA Genesis a ramené des échantillons de vent solaire en octobre 2004, ce qui a déjà conduit à réviser certaines des idées communément admises quant à la composition isotopique des gaz rares dans le vent solaire [7]. La mission NASA Stardust a ramené des grains cométaires en janvier 2006. Ces échantillons ouvrent de nouvelles perspectives pour l'étude de l'évolution précoce du système solaire (voir [3] et les autres articles de ce numéro spécial de la revue *Science*).

Le 20 février 2007 s'est tenue à l'Académie des sciences une réunion présidée par Claude Allègre, au cours de laquelle des astrophysiciens, des géologues, des géochimistes et des cosmochimistes ont présenté les dernières observations et modèles ayant trait à la formation du système solaire. Ce volume regroupe plusieurs de ces contributions. Anne Dutrey [5] passe en revue les observations in situ des disques circumstellaires présents autour des étoiles jeunes, leurs propriétés physiques et chimiques, leur formation, durée de vie et évolution. Marc Chaussidon et Matthieu Gounelle [4] font la liste des observations récentes indiquant

and cosmochemistry [12]. The limiting factor in the study of extraterrestrial materials is, often, that the crucial information about their conditions of formation is present at the nanometre or micrometre scale.

Second, astrophysical observations of the interstellar medium and of young forming stars with their accretion disks have been considerably refined (i.e. ISO, near-infrared instrument on the VLTI...), improving our knowledge of the chemistry and mineralogy of interstellar matter [13]. The mineralogical and chemical transformations affecting the gas and dust of the accretion disks around young forming stars, analogous to our young solar system, are now observed and measured with a spatial resolution in the order of one astronomical unit. This implies that, for the first time, it might soon be possible to match astrophysical observations and data collected in the laboratory on extraterrestrial materials.

Finally, over the last years, space agencies have substantially promoted missions to return extraterrestrial samples to the Earth. These are the first sample return missions, since the Apollo and Luna missions 30 years ago. The NASA Genesis mission brought back solar wind samples in October 2004, which already led to revise some current ideas on the isotopic composition of noble gas in the solar wind [7]. The NASA Stardust mission returned samples of cometary dust in January 2006. These samples open new windows for the study of the early evolution of the solar system (see [3] and the other articles of this special issue of the journal *Science*).

On 20 February 2007, Claude J. Allègre chaired a one-day meeting at the French Academy of Sciences in Paris, where astrophysicists, geologists, geochemists, and cosmochemists were invited to review observational and theoretical constraints on the formation of the solar system. This volume gathers several of these contributions. Anne Dutrey [5] reviews the in situ observations of circumstellar disks around young stars, their physical and chemical properties, their formation, lifetime, and evolution. Marc Chaussidon and Matthieu Gounelle [4] list the recent observations for the incorporation of short-lived radioactive nuclides in primitive meteorites and their implications on the astrophysical setting and chronology for the appearance of the first solids in the solar accretion disk. Matthieu Gounelle, Marc Chaussidon and Thierry Montmerle [6] discuss the observational constraints for a nucleosynthesis of short-lived radioactive nuclides by irradiation of the accretion disk with solar energetic particles emitted by the young active Sun. Laurent Rémusat, François Robert and Sylvie Derenne [11] investigate the

l'incorporation de radioactivités éteintes à courte période dans les météorites primitives et des implications en ce qui concerne la formation et la chronologie de formation des premiers solides dans le disque d'accrétion. Matthieu Gounelle, Marc Chaussidon et Thierry Montmerle [6] présentent les observations qui indiquent une nucléosynthèse d'éléments radioactifs à courte période, lors de l'irradiation du disque d'accrétion par les particules émises par le Soleil jeune. Laurent Rémusat, François Robert et Sylvie Derenne [11] étudient les conditions de la synthèse de la matière organique insoluble présente dans les chondrites carbonées, à partir de sa structure moléculaire et de sa composition isotopique de l'hydrogène. Alessandro Morbidelli [9] passe en revue le rôle des impacts dans la formation des planètes, la formation de la Lune et le bombardement tardif qui s'est produit 800 Ma après la formation du système solaire. Francis Albarède et Janne Blichert-Toft [1] montrent comment deux paramètres (la taille pour une planète tellurique et sa distance au Soleil) imposent la plupart des évolutions chimiques et physiques que subissent son noyau et son atmosphère. Bernard Bourdon et Guillaume Caro [2] décrivent les dernières évidences isotopiques, à partir du système Sm–Nd, pour la formation d'une croûte à la surface de la Terre moins de 100 Ma après son accrétion. Enfin, Manuel Moreira et Aude Raquin [10] expliquent comment la composition isotopique des gaz rares dans le manteau de la Terre aurait pu être établie lors de l'accrétion de la Terre à partir de corps parents riches en gaz rares solaires implantés.

## Références

- [1] F. Albarède, J. Blichert-Toft, The split fate of the early Earth, Mars, and Moon, *C. R. Geoscience* 339 (2007).
- [2] B. Bourdon, G. Caro, The early terrestrial crust, *C. R. Geoscience* 339 (2007).
- [3] D. Brownlee, et al., Comet 81P/Wild 2 under the microscope, *Science* 314 (2006) 1711–1716.
- [4] M. Chaussidon, M. Gounelle, Short-lived radioactive nuclides in meteorites and early solar system processes, *C. R. Geoscience* 339 (2007).
- [5] A. Dutrey, Circumstellar disks around young low-mass stars: observed properties and lifetime, *C. R. Geoscience* 339 (2007).
- [6] M. Gounelle, M. Chaussidon, T. Montmerle, Irradiation in the early solar system and the origin of short-lived radionuclides, *C. R. Geoscience* 339 (2007).
- [7] A. Grimberg, H. Baur, P. Bochler, F. Buhler, D.S. Burnett, C.C. Hays, V.S. Heber, A.J.G. Jurewicz, R. Wieler, Solar wind neon from genesis: implications for the lunar noble gas record, *Science* 314 (2006) 1133–1135.
- [8] G.H. Heiken, D.T. Vaniman, B.M. French, *Lunar Sourcebook, a User's Guide to the Moon*, Cambridge University Press, Cambridge, USA, 1991.

conditions of organosynthesis for insoluble organic matter found in carbonaceous meteorites from its molecular structure and hydrogen isotopic composition. Alessandro Morbidelli [9] reviews the role of impacts in planetary formation, in the formation of the Moon and in the late heavy bombardment that occurred 800 Ma after the formation of the solar system. Francis Albarède and Janne Blichert-Toft [1] argue that two parameters (the size of a telluric planet and its distance to the Sun) dictate most of the chemical and physical evolution of its mantle and atmosphere. Bernard Bourdon and Guillaume Caro [2] show recent isotopic evidence from the Sm–Nd system, demonstrating that a crust has been formed at the surface of the Earth less than 100 Myr after its accretion. Finally, Manuel Moreira and Aude Raquin [10] argue that the isotopic composition of the rare gases in the mantle of the Earth was settled during the accretion of the Earth from parent bodies, carrying implanted solar noble gases.

- [9] A. Morbidelli, Impacts in the primordial history of terrestrial planets, *C. R. Geoscience* 339 (2007).
- [10] M. Moreira, A. Raquin, The origin of rare gases on Earth: the noble gas “subduction barrier” revisited, *C. R. Geoscience* 339 (2007).
- [11] L. Remusat, F. Robert, S. Derenne, The insoluble organic matter in carbonaceous chondrites: Chemical structure, isotopic composition, and origin, *C. R. Geoscience* 339 (2007).
- [12] H.Y. McSween Jr., D.S. Laurretta, L.A. Leshin, Recent advances in meteoritics and cosmochemistry, in : D. Laurretta, L. Leshin (Eds.), *Meteorites and Early Solar System II*, Arizona University Press, Tucson, AZ, USA, 2006, pp. 53–66.
- [13] A.G.G.M. Tielens, L.B.F.M. Waters, T. J. Bernatowicz, Origin and evolution of dust in circumstellar and interstellar environments, in: A.N. Krot, E.R.D. Scott, B. Reipurth (Eds), *Chondrites and the Protoplanetary disk*, ASP Conf. Ser. 341 (2005) 605–631.

**Marc Chaussidon**

*Centre de recherches pétrographiques et géochimiques, CRPG CNRS, B.P. 20, 54501 Vandœuvre-lès-Nancy cedex, France*  
**Adresse e-mail : chocho@crpg.cnrs-nancy.fr**

**François Robert**

*Laboratoire d'étude de la matière extraterrestre, UMS CNRS 2679 NanoAnalyses, Muséum national d'histoire naturelle, 61, rue Buffon, 75005 Paris, France*  
**Adresse e-mail : robert@mnhn.fr**