

Les météorites, mémoire du système solaire

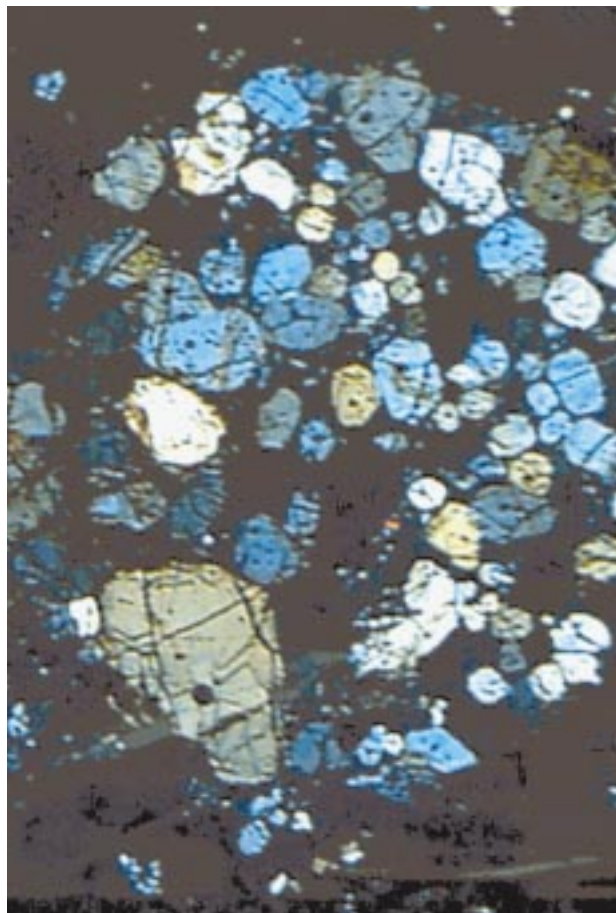
Au Laboratoire Pierre Süe (LPS), géologues et physico-chimistes utilisent la micro-sonde nucléaire pour analyser la composition chimique des inclusions vitreuses, ces microscopiques gouttes de verre emprisonnées au cœur des météorites.

Les observations effectuées dans certaines météorites montrent que ce sont des objets très primitifs formés dès la naissance du système solaire. Elles peuvent nous aider à comprendre les mécanismes d'accrétion à l'origine de la formation de corps planétaires en divers endroits de la nébuleuse solaire.

La plupart des météorites qui tombent sur la Terre sont des Chondrites. Ce nom dérive de structures inconnues dans les roches terrestres : les chondres (Photo 1). Ceux-ci sont constitués de silicates (olivines et pyroxènes), de verre, et de quantités mineures de ferronickel. Les chondrites dites carbonées sont considérées comme les météorites les plus primitives, en particulier parce qu'elles ont une composition élémentaire très proche de celle du Soleil. Dans les cristaux d'olivine présents dans les chondres, on observe des inclusions vitreuses de quelques dizaines de micromètres, emprisonnées dans la matrice du minéral (Photo 2).

Plusieurs hypothèses ont été proposées pour expliquer l'origine de ces inclusions et pour comprendre leur mode d'incorporation dans les météorites.

En se basant sur les observations faites dans des matériaux synthétiques ou dans des minéraux terrestres, deux scénarios de formation ont pu être retenus. Le premier implique que la croissance



*Photo 1 : Cette mosaïque sphérique est un chondre issu de la météorite de Renazzo**

des olivines s'est faite par condensation à partir de la phase vapeur formée dans la nébuleuse solaire : les inclusions seraient alors des condensats liquides de matière silicatée primitive. Dans le second, ces objets seraient des résidus de cristallisation d'une phase fondue, à l'instar des inclusions vitreuses dans les minéraux terrestres.

Les analyses des éléments chimiques présents à

l'état de traces nous ont permis de montrer la validité du premier scénario. Pour la première fois, on a montré que certaines des inclusions présentes dans les minéraux de la météorite de Renazzo* présentaient des rapports d'abondance élémentaire indiquant que leur origine est très primitive, et conduisant à penser qu'elles ont gardé la mémoire des processus divers qui se sont produits dans le système solaire, il y a environ 4,6 milliards d'années.

L'étude de l'azote et du carbone dans les chondrites, plus que celle d'autres éléments, peut contribuer à la compréhension des premiers stades de la formation du système solaire en raison de la sensibilité de ces éléments aux conditions physiques et chimiques qui régnaient au moment de la formation des minéraux des chondrites. C'est dans des inclusions primaires (terme qui indique que les inclusions se sont formées en même temps que l'olivine) des chondrites carbonées Renazzo*, Kaba** et Allende*** qu'ont été entreprises les études de la répartition du carbone et de l'azote, éléments très proches l'un de l'autre du point de vue des abondances cosmiques.

La concentration en carbone et en azote dissous dans les différentes inclusions vitreuses et dans les minéraux hôtes a été mesurée grâce aux réactions nucléaires induites par les faisceaux de particules de la microsonde nucléaire (cf. Phases N°16).

Les mesures de concentration en azote indiquent des teneurs très importantes dans les inclusions vitreuses et dans les olivines. Une étude minutieuse de l'azote montre que cet élément n'est pas présent sous forme de nitrure, ce qui indiquerait des conditions très réductrices, mais qu'il est très faiblement lié chimiquement et vraisemblablement présent sous la forme d'espèces hautement volatiles, comme N₂.

Le carbone a un comportement très différent. Il ne peut rentrer dans la structure de l'olivine mais il peut être présent dans les inclusions vitreuses. Les teneurs en carbone varient d'un facteur 10 d'une inclusion vitreuse à l'autre dans les différentes olivines hôtes ou même au sein d'une unique olivine. Ces variations sont encore mal comprises mais, quelle qu'en soit la raison, il est vraisemblable que le carbone était présent au moment de la formation des inclusions vitreuses sous forme de SiC et de grains riches en carbone dont on sait

qu'ils constituent l'essentiel de la poussière inter-stellaire.

Mieux comprendre l'ensemble de ces phénomènes en précisant en particulier la spéciation chimique du carbone et de l'azote dans les inclusions vitreuses devrait permettre de lever un coin du voile qui couvre encore les étapes initiales de l'accrétion de matière dans la nébuleuse solaire primitive, accrétion qui a conduit à la formation de planétoïdes et ensuite de corps planétaires massifs.

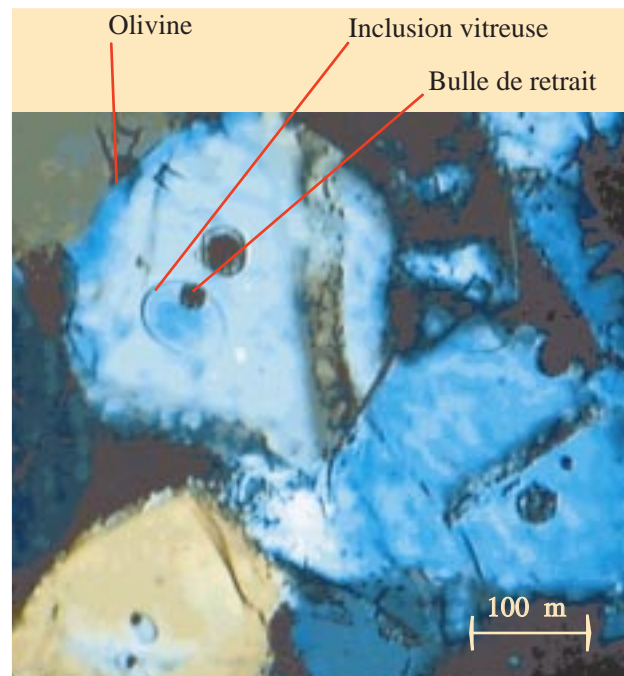


Photo 2 : Cristal d'olivine et inclusions vitreuses

Pour en savoir plus :

- "Solar System Evolution", Stuart Ross TAYLOR, C.U.P. Lunar Planetary Institution 1992.
- "The Allende meteorite-cosmochemistry's Rosetta stone ?", Accounts of Chemical Research **8**, (1975), 217-224.
- "The ubiquitous presence of silica-rich glass inclusions in mafic minerals: examples from Earth, Mars, Moon and the aubrite parent body", M.E. Varela, G. Kurat, R. Clocchiatti and P. Shiano, Meteoritics and Planetary Science, **33-5** (1998).

Contacts :

M.E. Varela
 evarela@criba.edu.ar
 N. Métrich, 01 69 08 85 11,
 nmetrich@cea.fr
 M. Bonnin-Mosbah, 01 69 08 57 87,
 mmosbah@cea.fr

*Renazzo est tombée le 15/01/1824, en Italie

**Kaba est tombée le 15/04/1857, en Hongrie, près de la ville de Debreczen

***Allende est tombée le 8/02/1969, au Mexique, près de la ville de Paral, dans l'état de Chihuahau.

SPIN UP, SPIN DOWN

Une équipe du Service de Physique de l'Etat Condensé (SPEC) explore les possibilités d'utilisation du moment magnétique de l'électron pour une électronique du futur.

Les capteurs de champ magnétique sont de plus en plus utilisés dans les appareils qui nous entourent : voitures, ordinateurs, radios-cassettes ou robots ménagers par exemple. Il existe donc une concurrence mondiale pour développer des capteurs de plus en plus sensibles, robustes et économiques. Les capteurs les plus répandus sont inductifs : une petite bobine mesure la variation du champ magnétique. Ils ont l'avantage d'être sensibles et peu chers mais ils ne mesurent que la variation du champ magnétique et non sa valeur.

Les capteurs dits "à magnétorésistance géante" commencent à être utilisés dans les têtes de lecture de disques durs d'ordinateurs et dans des systèmes actifs de freinage automobile (ABS). Ces capteurs sont formés de multicouches de métaux ferromagnétiques séparés par un métal non magnétique. La résistance électrique de ces assemblages varie fortement (jusqu'à 80 %) en fonction d'un champ magnétique appliqué.

Principe de la magnétorésistance géante

Dans les métaux, la circulation du courant électrique est assurée par les électrons ayant une énergie particulière, l'énergie de Fermi. La densité d'électrons au niveau de Fermi est fixée et dépend essentiellement de la nature du métal. De plus, l'électron possède un moment magnétique intrinsèque appelé spin. En présence d'un champ magnétique, le spin de l'électron peut prendre deux états possibles : parallèle au champ, (électron up), ou opposé au champ magnétique, (électron down).

Dans le cas d'un matériau ferromagnétique, il existe un champ magnétique interne très élevé : 1,7 Tesla pour le cobalt par exemple. Il en résulte que tous les niveaux d'énergie des électrons deviennent dépendant du spin de celui-ci. Ainsi, la densité d'électrons au niveau de Fermi n'est plus la même pour un électron up ou down. Pour le cobalt, le rapport entre les densités est de 2,5 (figure 1). Dans ce cas, on dit que les électrons de conduction sont polarisés en spin.

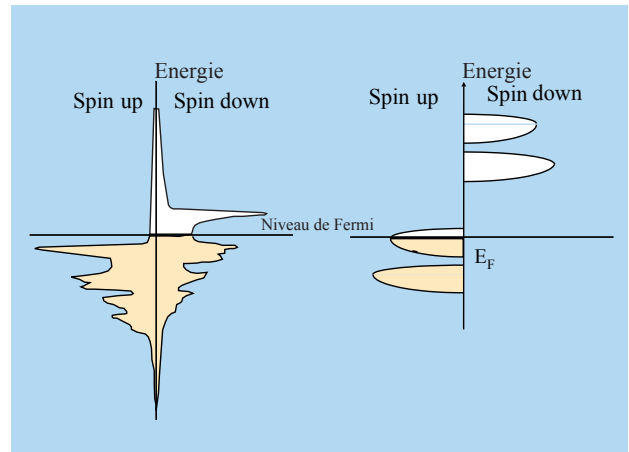


Figure 1 : densité d'électrons en fonction de l'énergie et du spin pour le cobalt (à gauche) et un manganite (à droite).

Imaginons alors deux couches de cobalt séparées par un métal non magnétique. Ces deux couches peuvent avoir des aimantations opposées. Dans ce cas, les électrons (principalement up) sortant de la première ne peuvent pas trouver de place dans la deuxième car ils sont down pour celle-ci et sont donc repoussés. Cette répulsion crée une

Les vannes de spin

Une vanne de spin est composée d'une couche très faiblement coercitive (elle suit toujours le champ magnétique extérieur) et d'une couche fortement coercitive (elle ne se retourne que dans un champ H_c fort) séparée par une barrière non magnétique. Si les couches ont des aimantations opposées, la résistance est nettement plus forte que lorsque les aimantations sont parallèles. On obtient donc une sorte d'interrupteur qui signale champ positif-champ négatif.

Ce type de capteur est donc particulièrement bien adapté à la lecture de données binaires d'un disque dur, par exemple. La barrière idéale est une couche très fine qui ne dépolarise pas les électrons et qui supprime tout couplage entre couches magnétiques. C'est pour cela que les gens cherchent maintenant à fabriquer des vannes de spins, initialement entièrement métalliques, avec une barrière intermédiaire isolante. Les électrons peuvent tout de même passer par effet tunnel mais cette barrière détruit efficacement les couplages entre couches magnétiques.

résistance électrique importante. A l'opposé, si l'aimantation des deux couches sont parallèles, les électrons passent facilement.

Les oxydes de manganèse à valence mixte (manganites), comme $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$, sont des candidats idéaux pour engendrer des effets magnétorésistifs géants car les électrons de conduction sont totalement polarisés (seuls les électrons up peuvent circuler). En collaboration avec l'UMR Thomson/CNRS nous avons réalisé des vannes de spin à effet tunnel (voir encadré) formées entièrement d'oxydes avec des couches en manganites et des barrières isolantes en SrTiO_3 ou CeO_2 .

Ces composés présentent l'avantage d'avoir des paramètres de maille semblables, ce qui permet une croissance épitaxiale de multicouches. Le dispositif (figure 2) est fabriqué par photolithographie optique et gravure par faisceau d'ions argon. En jouant sur les épaisseurs des couches, on peut changer leur coercivité : plus la couche est fine, plus elle est difficile à retourner.

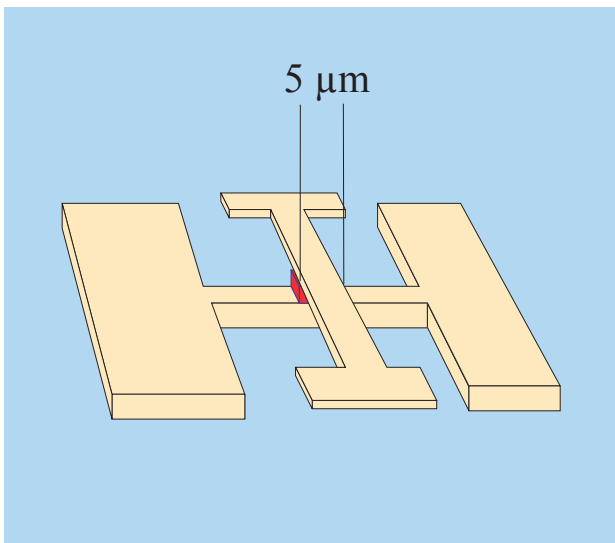


Figure 2 : schéma du dispositif. La vanne de spin (en rouge) est connectée par deux électrodes métalliques (en beige).

Avec une barrière de 3 nm de SrTiO_3 , nous avons obtenu à basse température une magnétorésistance géante de 450 % à 0,01 Tesla. Ce résultat constitue un record dans le domaine de la magnétorésistance (figure 3). Les couches de manganite utilisées, à base de $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ sont bien magnétiques jusqu'à 350 K. Malheureusement, l'effet magnétorésistif s'écroule au delà de 200 K. La raison en est la qualité des interfaces qui, à cause de défauts, ne sont plus magnétiques à température ambiante et dépolarisent les électrons lors de leur passage.

Au delà des capteurs magnétiques, de nombreux groupes dans le monde travaillent maintenant sur une électronique utilisant ces propriétés de

spin de l'électron. En effet, de même que l'électronique classique, à semi-conducteurs est basée sur le couple électron-trou, on peut imaginer une électronique fondée sur la différence de spin. Un premier avantage de tels systèmes serait la très faible dissipation de chaleur et la vitesse grâce à des transistors entièrement métalliques. D'autre part, comme cette électronique serait basée sur des composés magnétiques, elle pourrait être reconfigurable in situ. Il reste néanmoins de formidables barrières technologiques à passer avant de voir apparaître un microprocesseur à base de transistors magnétiques.

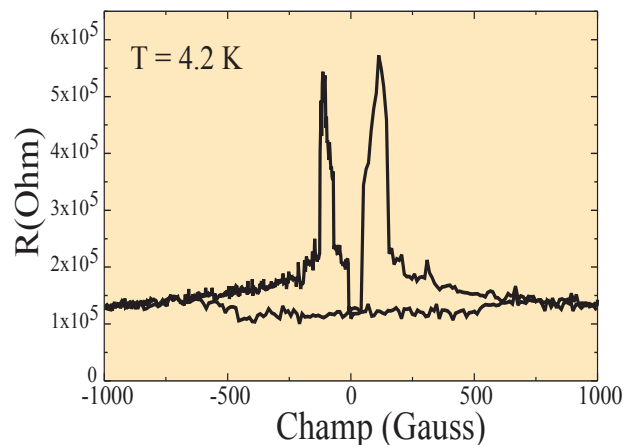


Figure 3 : résistance en fonction du champ appliqué mesurée sur le dispositif de la figure 2.

Pour en savoir plus :

M. Viret et al., Europhys. Lett. 39, p. 545 (1997).

Contact :

M. Viret, 01 69 08 74 43

Viret@spec.saclay.cea.fr

Phases magazine

La lettre du DRECAM et du SPhT

Directeur de la Publication : I. Nenner

Comité de Rédaction :

S. Ayrault (LPS) ; L. Barbier (SRSIM) ;
S. Bouffard (CIRIL) ; L. Boyer (DIR) ;
C. Fermon (SPEC) ; M. Gingold (SPhT) ;
A. Menelle (LLB) ; M. Mons (SPAM) ;
H. Pascard (LSI) ; E. Soulié (SCM) ;

Réalisation : L. Boyer, C. Fermon

Impression : Impact Graphic

ISSN N°1276-8650 Dépôt légal 4ème trimestre 1997