

Des ions atomiques aux nanoparticules de haute énergie pour sonder la surface et obtenir une image ionique.

S. Della-Negra

Institut de Physique Nucléaire d'Orsay

F-91406 Orsay Cedex

E-Mail : dellaneg@ipno.in2p3.fr

Depuis les premières expériences réalisées par R.D. Macfarlane et T.D. Torgerson avec les produits de fission du Californium ^{252}Cf , une grande quantité de données ont été obtenues grâce à la disponibilité de faisceaux d'ions atomiques de haute énergie fournis par les accélérateurs. Leurs utilisations ont permis de varier la densité d'énergie déposée près de la surface solide en ajustant la vitesse et l'état de charge de ces particules. Je vais commencer mon exposé en présentant les résultats d'émission ionique secondaire obtenus avec des ions atomiques de haute énergie. Ces études montrent que la densité d'énergie déposée dans les premières couches du solide est le paramètre principal. Une question qui se pose est le développement d'un instrument MeV-SIMS complémentaire à d'autres méthodes déjà disponibles que les techniques d'IBA en utilisant un Van de Graaff à un seul étage ou accélérateur Tandem. La possibilité de délivrer des ions lourds (cuivre d'oxygène) permet d'obtenir des micro-faisceaux pour développer la spectrométrie de masse (MS) d'imagerie ionique en corrélation avec les techniques μ -PIXE et / ou μ -RBS. Un deuxième développement concerne l'analyse SIMS à la pression ambiante. L'obtention d'une image d'un échantillon à des pressions proches de la pression ambiante est très prometteuse.

Maintenant, l'amélioration du rendement d'émission ionique secondaire conduit à une augmentation du dépôt de la densité d'énergie, donc l'utilisation d'agrégats comme projectiles. Il y a plus de vingt ans, l'intérêt fondamental des agrégats comme sonde de la surface a été établi et aussi en quelques années nous avons eu une série d'équipements, de la source d'ions aux accélérateurs permettant de couvrir une gamme étendue en énergie et en masse, du keV aux MeV et d'agrégats de quelques atomes de carbone ou d'or aux molécules comme les fullerènes. L'objet de la seconde partie de mon exposé sera de synthétiser l'information qui peut être extraite à partir de ce large domaine d'énergie et de projectiles. Ces résultats permettent de comparer les deux modes de dépôt d'énergie : les collisions élastiques et l'excitation électronique. Je préciserai certains résultats obtenus de cette interaction agrégats-solide en présentant des résultats concernant la modification de matériau induite par l'impact d'agrégats et les caractéristiques de l'émission ionique.

La troisième partie de mon exposé se concentrera sur les agrégats massifs de quelques centaines à milliers atomes avec une comparaison des avantages de ces ions par rapport aux projectiles « traditionnelles », que sont les faisceaux d'agrégats de bismuth ou d'or et les fullerènes. Pendant quelques années la collaboration entre l'équipe d'Orsay et l'équipe du Schweikert de TAMU a exploré les avantages des nanoparticules pour l'analyse de surface du keV au MeV grâce à une amélioration d'Orion¹ développé à l'IPNO. A la suite de ces études nous avons proposé le projet de Pégase² qui a été accepté par la NSF (Grant CHE-0750377), il a été construit à l'IPNO et installées au TAMU. Ce projet permet l'accélération de nanoparticules et d'agrégats produits par une source de LMIS (Liquid Metal Ion Source) avec une plateforme de 130 kV. L'instrument Pégase fonctionne avec succès depuis cinq ans et demi. Les résultats présentés pendant cet exposé démontrent l'intérêt de cette nouvelle sonde pour l'analyse biologique et également de surface nano-structurée. Le projet Pégase a permis de valider la conception d'un nouveau projet plus ambitieux Andromède qui a été lauréat à l'appel national pour des propositions d'EQUIPEX (Équipement d'Excellence EQUIPEX, ANR-10-EQPX-23.) qui vient d'être mis en service à l'IPNO.

Le but d'Andromède est de créer un nouvel instrument pour l'analyse par la spectrométrie de masse de nano-domaines et de micro-objets déposés sur une surface avec une résolution spatiale micrométrique³, ce dispositif est développé dans un cadre pluridisciplinaire de l'Université Paris Sud en collaboration avec l'entreprise OrsayPhysics et le groupe du TAMU. Cet instrument permettra aussi l'analyse de surface à la pression ambiante et donc l'analyse de spectrométrie de masse des surfaces biologiques hydratées natives. L'information moléculaire (la masse et structure) sera obtenue à partir de l'impact d'une nanoparticule accélérée dans le domaine de 1-4 MeV par un accélérateur électrostatique de type Van de Graaff. La mise en service de l'accélérateur de type Van de Graaff

construit par NEC (National Electrostatique Corporation, Middleton, Wisconsin USA) a été réalisée. Une tension maximale de 4,150 MV a été atteinte avec une pression de 5,5 bars de SF₆. L'accélérateur est équipé de deux sources d'ions interchangeables. Il y a une source ECR Microgan™ fournie par Pantechnik dont l'avantage réside dans le réglage du puits magnétique, qui permet de produire des ions atomiques multichargés A⁸⁺ par exemple (avec une configuration avec puits magnétique) ou des ions moléculaires intacts, comme le fullerène C₆₀³⁺ (sans minimum B). OrsayPhysics Tescan Holding, partenaire du projet Andromède, a développé la colonne ionique NAPIS (NanoParticle Ion Source) basée sur une source LMIS (Liquid Metal Ion Source) qui fournit des faisceaux d'ions atomiques, des agrégats et des nanoparticules constituées de plusieurs centaines d'atomes. Le projet sera décrit avec les objectifs scientifiques envisagés et les résultats de la R&D source d'ions seront présentés⁴.

Il faut noter que cet accélérateur dédié à l'analyse de surface sera aussi utilisé pour les études de nucléosynthèses à basse énergie : le projet Stella qui s'installera cette année et dont je présenterai les grandes lignes.

¹ Massive Clusters: Secondary emission from qkeV to qMeV. New emission processes? New SIMS Probe? S. Della-Negra, J. Depauw, C. Guillermier and E.A. Schweikert, *Surf. Interface Anal.*, 2011, **43**, 62-65.

² The Pegase project, a new solid surface probe: focussed massive cluster ion beams, S. Della-Negra, J. Arianer, J. Depauw, S.V. Verkhoturov and E.A. Schweikert, *Surf.Interface Anal.*, 2011, **43**, 66-69.

³ Single Impacts of C₆₀ on Solids: Emission of Electrons, Ions and Prospects for Surface Mapping. S. Verkhoturov, M. Eller, R. Rickman, S. Della-Negra, E.A. Schweikert. *J. Phys. Chem. C*, 2010, 114 (12), pp 5637–5644

SIMS instrumentation and methodology for mapping of co-localized molecules M. J. Eller, S. V. Verkhoturov, S. Della-Negra, and E. A. Schweikert, *Rev. Sci. Instrum.* 84, 103706 (2013)

⁴ Andromède Project: Surface Analysis and Modification with Probes from Hydrogen to Nano-Particles in the MeV Energy Range, M.J. Eller, E. Cottureau, B. Rasser, E. Verzeroli, B. Agnus, G. Gaubert, X. Donzel, A. Delobbe, S. Della-Negra, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, (2015) Volume 365, Part A, Pages 367-370

<http://ipnwww.in2p3.fr/-ANDROMEDE,384-> This work has benefited from an "Equipement d'Excellence" grant managed by the Agence Nationale de la Recherche (ANR-10-EQPX-23)