

## A SNAPSHOT OF RESEARCH AT PLASMA QUÉBEC

## UN APERÇU DE LA RECHERCHE À PLASMA QUÉBEC

Serving the Canadian  
physics community  
since 1945 /  
Au service de la  
communauté canadienne  
de physique depuis 1945



Canadian Association  
of Physicists /  
Association canadienne  
des physiciens et  
physiciennes

[www.cap.ca](http://www.cap.ca)



# CANBERRA Semiconductor Detectors for Challenging Applications

Unique custom design and manufacturing of the highest efficiency Gamma Ray Spectroscopy detectors (Clovers, Well types, stacks...) used in space, medical, imaging, bioscience, nuclear physics applications and more



## Large Efficient HPGe Array of N types

- > CANBERRA Clovers for **nuclear physics experiments** experiments and any application requiring high efficiency
- > More than 200 deliveries.
- > 4 crystals in one cryostat – with or without segmentation.
- > Up to 12kg of HPGe material in one cryostat.
- > LN<sub>2</sub> free cooling available on request.



**SHOCK PROOF!**

## Large Efficient Arrays of capsules

- > CANBERRA array systems for **space telescope** space applications or any application with harsh shock and vibration environment
- > Accurate gamma cartography in galaxies (study of supernovae, black holes, ...)



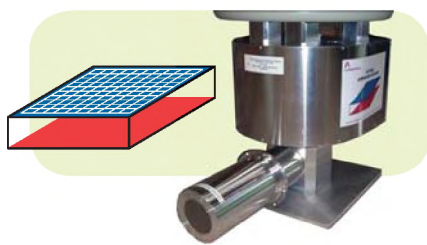
## 4 PI HPGe Array solutions

- > CANBERRA capsules for **nuclear physic experiments**
- > More than 250 deliveries, eg GRETA and AGATA project.
- > Up to 4 segmented crystals in one cryostat with 148 channels.
- > Up to 10kg of HPGe material in one cryostat.
- > LN<sub>2</sub> free cooling available on request.



## Ultra Low Background assemblies

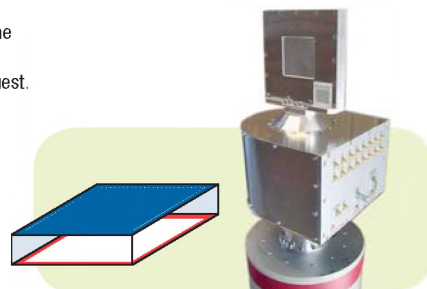
- > CANBERRA demonstrates **unique ULB performance** in underground labs: 0.09 counts per min (15-1500keV) at LSM.
- > Innovative Detector Design to accommodate lowest noise threshold



## Monolithic HPGe pixel detectors

- > **EXAFS applications** on synchrotron beamlines
- > New features available
- > LN<sub>2</sub> free cooling available on request

- ➔ Reliable segmentation on coaxial and planar HPGe detectors
- ➔ Thin contact technology for telescope detectors (proton stack)
- ➔ Encapsulation techniques
- ➔ Rough motion applications (space or remote applications)



## XY strip detectors

- > HPGe & Si(Li) material available
- > Cryostat at choice
- > LN<sub>2</sub> or CP5 cooling
- > Application: **Compton camera, imaging, homeland security...**



To learn more about CANBERRA semiconductor detectors contact us today!

[www.canberra.com](http://www.canberra.com) — CANBERRA Co. - West-50B Caldari Rd. - Concord, ON - Canada - L4K 4N8  
Tel.: (905) 660-5373 - Toll Free: 1-866-660-5373 - Fax: (905) 660-9693  
concord.general@canberra.com

CANBERRA IS PART OF AREVA – WORLDWIDE LEADER IN CO<sub>2</sub>-FREE ENERGY.



Canadian Association  
of Physicists  
Association canadienne des  
physiciens et physiciennes  
www.cap.ca

# PHYSICS IN CANADA LA PHYSIQUE AU CANADA

Volume 68 No. 4 (Oct.-Dec. 2012 / oct. à déc. 2012)

- 183** Préface / Foreword - La physique des plasmas / *Plasma Physics*,  
par / by Joëlle Margot, Honorary Editor / Rédactrice honoraire

## FEATURE ARTICLES ARTICLES DE FOND

- 184** Plasma-Québec, regroupement stratégique en science et applications des plasmas, par Joëlle Margot, My Ali El Khakani, François Gitzhofer et Jean-Luc Meunier
- 189** Plasma Medicine, by Michael R. Wertheimer and Sylvain Coulombe
- 193** Les plasmas générés par des impulsions laser ultra-brèves et intenses, par François Vidal, Jean-Claude Kieffer, François Légaré, Jean-Pierre Matte et Tsuneyuki Ozaki
- 199** La gravure par plasma: défis et perspectives, par Joëlle Margot et Mohamed Chaker
- 204** Quantum Information from the Foundations to a New Technology (Herzberg Memorial Public Lecture 2012), by Anton Zeilinger

## PHYSICS EDUCATION / ENSEIGNEMENT DE LA PHYSIQUE

- 210** A report on my attendance at the 2012 CERN High School Teachers conference,  
by Brian Dentry

## DEPARTMENTS DÉPARTEMENTS

- 212** CAP Departmental, Sustaining, Corporate and Institutional Members / *Membres départementaux, de soutien, corporatifs et institutionnels de l'ACP*
- 213** In Memoriam :  
Ragnar Galt Dworschak (1964–2012)



### Cover / Couverture :

The cover illustration shows an image of a bee produced by x-ray phase contrast imaging using the betatron radiation produced by (a) one laser shot, and (b) 13 laser shots (see Figure 3, p. 196).

L'illustration de la couverture montre l'image d'une abeille par contraste de phase de rayons X produits par le rayonnement bêta-tron (a) d'un tir laser, (b) de 13 tirs laser (voir la Figure 3, page 196).

Advertising Rates and Specifications (effective January 2012) can be found on the PiC website ([www.cap.ca](http://www.cap.ca) -> Publications -> Physics in Canada).

Les tarifs publicitaires et dimensions (en vigueur depuis janvier 2012) se trouvent sur le site internet de La Physique au Canada ([www.cap.ca](http://www.cap.ca) -> Publications -> La Physique au Canada).

- 214** 2013 CAP Congress /  
*Congrès de l'ACP 2013*  
- Plenary Speakers / *Conférenciers pléniers*  
- Herzberg Memorial Public Lecture /  
*Conférence commémorative publique Herzberg*  
- Invited Speakers / *Conférenciers invités*
- 221** Berkeley Nucleonics, by Bernadette Jamieson
- 222** Books Received / *Livres reçus*
- 223** Book Reviews / *Critiques de livres*
- 228** Employment Ads / *Postes d'emplois*

**Canadian Association of Physicists (CAP)  
Association canadienne des physiciens et physiciennes (ACP)**

The Canadian Association of Physicists was founded in 1945 as a non-profit association representing the interests of Canadian physicists. The CAP is a broadly-based national network of physicists in working in Canadian educational, industrial, and research settings. We are a strong and effective advocacy group for support of, and excellence in, physics research and education. We represent the voice of Canadian physicists to government, granting agencies, and many international scientific societies. We are an enthusiastic sponsor of events and activities promoting Canadian physics and physicists, including the CAP's annual congress and national physics journal. We are proud to offer and continually enhance our web site as a key resource for individuals pursuing careers in physics and physics education. Details of the many activities of the Association can be found at <http://www.cap.ca>. Membership application forms are also available in the membership section of that website.

L'Association canadienne des physiciens et physiciennes a été fondée en 1946 comme une association à but non-lucratif représentant les intérêts des physicien(ne)s canadien(ne)s. L'ACP est un vaste regroupement de physiciens oeuvrant dans les milieux canadiens de l'éducation, de l'industrie et de la recherche. Nous constituons un groupe de pression solide et efficace, ayant pour objectif le soutien de la recherche et de l'éducation en physique, et leur excellence. Nous sommes le porte-parole des physiciens canadiens face au gouvernement, aux organismes subventionnaires et à plusieurs sociétés scientifiques internationales. Nous nous faisons le promoteur enthousiaste d'événements et d'activités mettant à l'avant-scène la physique et les physiciens canadiens, en particulier le congrès annuel et la revue de l'Association. Nous sommes fiers d'offrir et de développer continuellement notre site Web pour en faire une ressource clé pour ceux qui poursuivent leur carrière en physique et dans l'enseignement de la physique. Vous pouvez trouver les renseignements concernant les nombreuses activités de l'ACP à <http://www.cap.ca>. Les formulaires d'adhésion sont aussi disponibles dans la rubrique «Adhésion» sur ce site.



PHYSICS IN CANADA  
LA PHYSIQUE AU CANADA

The Journal of the Canadian Association  
of Physicists

La revue de l'Association canadienne des physiciens et  
physiciennes

ISSN 0031-9147

**EDITORIAL BOARD / COMITÉ DE RÉDACTION**

*Editor / Rédacteur en chef*

**Béla Joós, PPhys**

Physics Department / Département de physique, Univ. of / d' Ottawa  
150 Louis Pasteur Avenue  
Ottawa, Ontario K1N 6N5  
(613) 562-5800 x6755; Fax: (613) 562-5190  
Email: bjoos@uottawa.ca

**Associate Editor / Rédactrice associée  
Managing / Administration**

**Francine M. Ford**

c/o CAP/ACP; E-mail: cap@uottawa.ca

**Book Review Editor / Rédacteur À la critique de livres**

**Richard Marchand**

c/o CAP / ACP  
Suite Bur. 112, Imm. McDonald Bldg., Univ. of / d' Ottawa,  
150 Louis Pasteur, Ottawa, Ontario K1N 6N5  
Email: Richard.Marchand@ualberta.ca

**Advertising Manager / Directeur de la publicité**

**Greg Schinn**

EXFO Electro-Optical Engineering Inc.  
400 av. Godin  
Quebec (QC) G1M 2K2  
(418) 683-0913 ext. 3230  
Email: greg.schinn@exfo.com

**Board Members / Membres du comité :**

**René Roy, phys**

Département de physique, de génie physique et d'optique  
Université Laval  
Cité Universitaire, Québec G1K 7P4  
(418) 656-2655; Fax: (418) 656-2040  
Email: rene.roy@phy.ulaval.ca

**David J. Lockwood, PPhys**

Institute for Microstructural Sciences  
National Research Council (M-36)  
Montreal Rd., Ottawa, Ontario K1A 0R6  
(613) 993-9614; Fax: (613) 993-6486  
Email: david.lockwood@nrc.ca

**Michael Steinitz, PPhys**

Department of Physics  
St. Francis Xavier University, P.O. Box 5000  
Antigonish, Nova Scotia B2G 2W5  
(902) 867-3909; Fax: (902) 867-2414  
Email: msteinit@stfx.ca

**Robert Thompson, PPhys**

Dept. of Physics and Astronomy  
University of Calgary, 2500 University Dr. NW  
Calgary, Alberta T2N 1N4  
(403) 220-5407; Fax: (403) 289-3331  
Email: thompson@phas.ucalgary.ca

**Adriana Predoi-Cross**

Dept. of Physics and Astronomy  
University of Lethbridge  
Lethbridge, Alberta T1K 3M4  
(403) 329-2697; Fax: (403) 329-2057  
Email: adriana.predoi@uleth.ca

**Richard MacKenzie**

Département de physique  
Université de Montréal, C.P. 6128, Succ. centre-ville  
Montréal, Québec H3C 3J7  
(514) 343-5860; Fax: (514) 343-7357  
Email: richard.mackenzie@umontreal.ca

**ANNUAL SUBSCRIPTION / ABONNEMENT ANNUEL :**

\$43.00 Cdn. + GST or HST (Cdn addresses),  
\$43.00 US (US addresses); \$48.00 US (other/foreign addresses)

**Advertising, Subscriptions, Change of Address/  
Publicité, abonnement, changement d'adresse:**

Canadian Association of Physicists /  
Association canadienne des physiciens et physiciennes,  
Suite/Bureau 112, Imm. McDonald Bldg., Univ. of/d' Ottawa,  
150 Louis Pasteur, Ottawa, Ontario K1N 6N5  
Phone/ Tél: (613) 562-5614; Fax/Télex: (613) 562-5615  
e-mail/courriel: CAP@uottawa.ca; Website/Internet: www.cap.ca  
Canadian Publication Product Sales Agreement No. 0484202/  
Numéro de convention pour les envois de publications canadiennes :  
0484202

© 2012 CAP/ACP  
All rights reserved / Tous droits de reproduction réservés

**WWW.CAP.CA**

(select Publications -> Physics in Canada /  
Option: Publications -> La Physique au Canada)

## LA PHYSIQUE DES PLASMAS

Depuis les années 70, la physique des plasmas a vécu une révolution. De science très fondamentale, elle a investi progressivement de nombreuses sphères socio-économiques de sorte que les plasmas sont à présent utilisés dans un nombre impressionnant de procédés industriels essentiels.

Dans ce contexte, les chercheurs québécois se sont concertés il y a une dizaine d'années pour conjuguer leurs efforts en vue d'une fédération de leurs activités dans le domaine de la science et des applications des plasmas. Ils ont ainsi créé un regroupement de chercheurs, Plasma-Québec. Ce numéro thématique de *Physique au Canada* porte sur l'état d'avancement de plusieurs activités de recherche menées dans le domaine des plasmas au sein de Plasma-Québec.

En premier lieu, un article par Joëlle Margot *et al.* est consacré à la description de Plasma-Québec, ses objectifs, ses actions et ses réalisations. Un second article, par Michael R. Wertheimer et Sylvain Coulombe, décrit un nouveau champ de recherche qui s'est développé au cours des 10 dernières années, à savoir la médecine faisant appel aux plasmas dénommée «*plasma medicine*» par la communauté des plasmiciens. Ce champ, encore à ses balbutiements est vu actuellement comme extrêmement prometteur pour répondre à divers besoins dans le domaine de la santé. Un troisième article, par François Vidal *et al.*, est consacré aux plasmas générés par des impulsions laser ultra-brèves et intenses, un domaine en pleine effervescence depuis l'avènement des lasers femtosecondes de haute puissance il y a environ 25 ans. Un dernier article, par Joëlle Margot et Mohamed Chaker, s'intéresse aux nouveaux défis de la gravure par plasma, une technologie proposée dans les années 70 et dont le succès a fait qu'elle domine maintenant la fabrication des circuits dans l'industrie de la microélectronique. Ces nouveaux défis consistent notamment à maîtriser la gravure de matériaux divers tels que les oxydes complexes dont l'utilisation se répand dans différents secteurs d'application.

Joëlle Margot  
Université de Montréal

*Les commentaires de nos lecteurs (ou lectrices) au sujet de cet éditorial sont appréciés*

*NOTE: Le genre masculin n'a été utilisé que pour alléger le texte.*

## PLASMA PHYSICS

Since the 1970s, plasma physics has undergone a revolution. From its beginnings as a fundamental science, it has progressively found many socio-economic applications, such that today, plasmas are used in an impressive number of essential industrial processes.

It was under these conditions that some ten years ago, Quebec researchers joined forces to collaborate in conducting research into plasma science and its applications. They created a research network named Plasma-Québec, and the current state of their many plasma research activities will be the focus of this issue of *Physics in Canada*.

First we find an article by Joëlle Margot *et al.* describing Plasma-Québec and its goals, activities and achievements. A second article, by Michael R. Wertheimer and Sylvain Coulombe, is devoted to a new field of research that has evolved over the past decade, namely the medical applications of plasmas, called “plasma medicine” by the plasma research community. This field, which is still in its infancy, is currently viewed as an extremely promising response to various medical needs. A third article, by François Vidal *et al.*, deals with plasmas generated by ultrashort pulse lasers, a field which blossomed with the development of high-powered femtosecond lasers about 25 years ago. A final article, by Joëlle Margot and Mohamed Chaker, is dedicated to the new challenges facing plasma etching, a technology that dates back to the 1970s and that is now so successful that it dominates microelectronic circuit manufacturing. These new challenges involve how to improve etching of new materials, such as complex oxides, that are increasingly being used in a variety of applications.

Joëlle Margot  
University of Montreal

*Comments from readers on this foreword are more than welcome.*

The contents of this journal, including the views expressed above, do not necessarily represent the views or policies of the Canadian Association of Physicists.

*Le contenu de cette revue, ainsi que les opinions exprimées ci-dessus, ne représentent pas nécessairement les opinions et les politiques de l'Association canadienne des physiciens et des physiciennes.*

# PLASMA-QUÉBEC, REGROUPEMENT STRATÉGIQUE EN SCIENCE ET APPLICATIONS DES PLASMAS

PAR JOËLLE MARGOT, MY ALI EL KHAKANI, FRANÇOIS GITZHOFFER, ET JEAN-LUC MEUNIER



On a coutume de dire que le plasma constitue le quatrième état de la matière qui par ailleurs compose 99% de l'univers visible. Pour cette raison, la plupart des physiciens considèrent que le plasma est étroitement associé aux étoiles. Par ailleurs, en laboratoire, on pense immédiatement aux plasmas des Tokamaks, les machines à fusion thermonucléaire contrôlée qui combleront peut-être les besoins énergétiques du futur. Cependant, on sait moins que les plasmas ont de multiples applications bien plus proches des besoins immédiats de la société. Actuellement, un nombre impressionnant de technologies font en effet appel à un plasma dans les procédés de fabrication qu'elles impliquent. L'exemple le plus frappant est celui de la microélectronique où les plasmas grâce à leur caractère multifonctionnel font partie intégrante de la chaîne de fabrication (gravure, dépôt, nettoyage, etc.). Plus récemment, les plasmas ont commencé à envahir des secteurs traditionnels ou d'avant-garde comme ceux où interviennent des dispositifs de faibles dimensions (par exemple photonique, optoélectronique), des nouveaux matériaux avec des fonctionnalités spécifiques (par exemple le biomédical, l'aérospatiale) ou ceux nécessitant des sources de photons (par exemple l'éclairage). En bref, on ne compte plus le nombre d'applications familières ou de pointe faisant intervenir des plasmas de toutes natures, à basse ou haute pression, produit par des radiofréquences, des micro-ondes ou des lasers, dans des gaz ou des solides, voire des liquides, dans des volumes importants ou à des dimensions micrométriques.

Historiquement, le Québec a toujours été un leader canadien dans le domaine des plasmas. C'est grâce à cette expertise que le Québec a été depuis fin des années 80 et pendant plus d'une décennie le site d'accueil du Tokamak de Varennes, l'un des plus ambitieux projets scientifiques canadiens jamais développés. C'est dans le contexte de cette masse critique québécoise dans le domaine des plasmas que le regroupement stratégique en science et applications des plasmas, Plasma-Québec, a vu le jour en 2001. Le Fonds de recherche du Québec Nature et Technologie (FRQNT), un des organismes subventionnaires de recherche publique québécois, a annoncé son financement en 2002. Plasma-Québec a ainsi fêté en 2012 ses 10 ans d'existence officielle. Il fait partie des regroupements stratégiques identifiés et

subventionnés par le gouvernement du Québec afin de «faire émerger ou de renforcer des pôles d'excellence en recherche qui s'insèrent dans les grands réseaux scientifiques internationaux et qui contribuent au développement de domaines de recherche prioritaires ayant des retombées potentielles importantes pour le Québec, tant aux plans scientifique et technologique que social et économique».

Plasma-Québec s'est structuré autour de 4 partenaires fondateurs, à savoir l'Institut National de la Recherche Scientifique (INRS), l'Université McGill, l'Université de Montréal et l'Université de Sherbrooke. Ces 4 institutions universitaires poursuivent de la recherche autour des plasmas depuis plusieurs décennies et les groupes de chercheurs qu'elles hébergent se sont distingués par leur apport à la physique, la chimie et le génie des plasmas. En plus de ces partenaires, Plasma-Québec est fier d'avoir aussi su attirer l'ensemble de la communauté québécoise œuvrant dans le domaine des plasmas et de leurs applications. Ainsi, le regroupement compte des collaborateurs dans 4 autres établissements universitaires québécois, à savoir l'École Polytechnique de Montréal, l'Université Laval, l'Université Concordia, l'Université du Québec à Chicoutimi, ainsi que dans des laboratoires gouvernementaux. Certains de ces membres sont impliqués comme collaborateurs des membres principaux dans des projets où ils apportent une expérience complémentaire spécifique. Plasma-Québec compte également des membres issus d'industries qui soutiennent les activités de Plasma-Québec notamment dans des partenariats université-industrie.

De par leur richesse, leur diversité et leur multifonctionnalité, les plasmas fournissent souvent des solutions innovatrices et économiquement viables à de nombreux problèmes sociétaux et technologiques présents et futurs. Dans ce cadre, Plasma-Québec s'est donné les objectifs suivants :

- (i) capitaliser sur la complémentarité des compétences scientifiques et technologiques de ses membres dans le domaine des plasmas et de leurs applications pour aborder de nouvelles thématiques d'avant-garde réunissant des compétences impossibles à rassembler autrement,

J. Margot  
< joelle.margot@umontreal.ca >, Département de Physique, Université de Montréal.

M.A.E. Khakani, Centre EMT de l'Institut National de la Recherche Scientifique.

F. Gitzhofer, Université de Sherbrooke.

J.L. Meunier, Université McGill.

- (ii) utiliser de manière optimale l'exceptionnelle infrastructure unique au Canada dont Plasma-Québec dispose, afin d'accélérer la recherche et le développement dans des créneaux où s'exerce une très forte concurrence internationale,
- (iii) former des étudiants et stagiaires postdoctoraux ayant accès à des compétences multidisciplinaires et à une infrastructure de tout premier plan dans un milieu de recherche structuré, ce qui résulte naturellement en une formation de qualité exceptionnelle,
- (iv) contribuer à l'essor économique du Québec par un soutien constant à la R&D des industries québécoises et par la création de sociétés d'essaimage et
- (v) accroître le leadership et le rayonnement du Québec au niveau international par l'entretien et l'établissement de liens avec des laboratoires et centres de recherche internationaux.

La science des plasmas se situe à la frontière de plusieurs disciplines telles que la physique et le génie physique, la chimie et le génie chimique, et de plus en plus le génie des matériaux. De la richesse et de la diversité des plasmas sont issues des avancées importantes et des applications multiples comme le recul des limites de longueur d'onde, de puissance et de rapidité des lasers, l'utilisation variée et sélective de l'énergie chimique des espèces d'un gaz hors d'équilibre thermodynamique et le couplage des décharges électriques aux milieux de l'aérodynamique. La science et le génie des plasmas ont ainsi largement contribué à améliorer la qualité de nos vies. Les observations des dernières années montrent que l'impact des plasmas dans d'autres domaines ne fait que croître.

Dans cet esprit, Plasma-Québec s'est doté d'un programme de recherche cohérent intégrant 3 axes complémentaires, à savoir (i) la science des plasmas, (ii) les procédés assistés par plasmas et (iii) l'intégration de procédés assistés par plasma dans des secteurs stratégiques, notamment en technologies de l'information et des communications, en génie biomédical, et en développement durable et environnement. Par leur thématique même, les activités de recherche menées au sein de Plasma-Québec sont en lien direct avec les besoins à court, moyen et long termes du Québec dans divers secteurs névralgiques jugés prioritaires dans la stratégie québécoise de la recherche et de l'innovation. En effet, la programmation scientifique de Plasma-Québec montre son impact direct dans des domaines scientifiques et technologiques émergents à fort potentiel. Par exemple, ces dernières années, une partie importante des travaux s'est orientée vers les nanotechnologies, en particulier les nanomatériaux et les nanoparticules, et vers les applications biomédicales. Ces domaines sont parmi ceux dans lesquels les plasmas se sont révélés être des outils génériques indispensables.

Les résultats issus des recherches menées dans Plasma Québec ont donné lieu depuis janvier 2008 à environ 600 articles dans

des revues scientifiques aux facteurs d'impact élevés et au moins autant dans des comptes-rendus de conférence. Mentionnons à titre d'exemples de revues réputées, des articles dans les diverses revues *Nature*, dans *Science*, *Advanced Materials*, *Physical Review Letters*, *Applied Physics Letters*, *Journal of Physical Chemistry C*, *Optics Express* et *Small*. Ce qui caractérise Plasma-Québec est le nombre important de publications impliquant plusieurs membres principaux du regroupement. En effet, 22% des articles et 27% des actes de colloque impliquent au moins deux membres principaux, ce qui témoigne de l'interaction étroite qui existe entre les membres. Ce nombre est encore bien plus élevé si on considère les membres collaborateurs (industriels, universitaires et gouvernementaux). En d'autres termes, Plasma-Québec n'est pas un simple regroupement d'individus, mais une véritable structure rassemblant des chercheurs aux intérêts de recherche complémentaires.

Depuis 2008, Plasma-Québec a accueilli plus de 220 étudiants à la maîtrise et au doctorat ainsi que près de 100 stagiaires postdoctoraux. Le regroupement a contribué à la diplômation d'environ 70 étudiants au doctorat et à la maîtrise et à la finalisation d'une cinquantaine de stages postdoctoraux. Nos étudiants et stagiaires postdoctoraux reçoivent une formation de tout premier plan qui leur ouvre de nombreuses portes aussi bien au niveau industriel qu'universitaire et gouvernemental. Nous croyons que la qualité de cette formation repose en grande partie sur la qualité de nos infrastructures et leur diversité permettant de répondre à la quasi-totalité des besoins. En 2001, cette infrastructure représentait un investissement de l'ordre de 15 M\$. Compte tenu de l'importance des ressources matérielles nécessaires pour continuer à innover dans le domaine des plasmas et de leurs applications, les membres de Plasma-Québec se sont concertés pour renforcer l'infrastructure existante. Ils ont ainsi réussi à attirer au cours des 3 années suivantes (2002–2005) des investissements totalisant environ 61 M\$. Parmi ceux-ci, notons deux subventions de la Fondation Canadienne pour l'Innovation, à savoir en 2002 le LMN (Laboratoire de Micro- et Nanofabrication, 14.7 M\$) et en 2004 le LSAP (Laboratoire en Science et Applications des Plasmas, 10.9 M\$), une FCI-Innovation en 2002 (Chimie inorganique combinatoire par plasma appliquée à la découverte de nouveaux matériaux nanométriques, 4.9 M\$) et également en 2002 une FCI-projets internationaux, le Laboratoire des Sources Femtoseconde (aussi connu comme ALLS -Advanced Laser Light Sources- 20.9 M\$). A ces investissements majeurs se sont ajoutées d'autres subventions d'infrastructure totalisant environ 10 M\$. Par la suite, les nouveaux chercheurs intégrant le centre ont réussi à attirer des subventions de la FCI et du Gouvernement du Québec pour bonifier cette infrastructure. Plasma-Québec dispose ainsi actuellement d'une infrastructure unique au Canada dont le coût total dépasse les 80 M\$. Le fonctionnement de cette infrastructure nécessite bien évidemment des investissements importants en matière de personnel technique et professionnel.

Plasma-Québec attache beaucoup d'importance à ses relations privilégiées avec des industries et à ses activités de transfert. Le regroupement a déposé de nombreuses demandes de brevets depuis sa création. Parmi les réalisations récentes illustrant la valorisation de la recherche effectuée au sein du regroupement, mentionnons que suite à ses travaux de thèse, une des doctorantes de Plasma-Québec a fondé en 2008 une compagnie basée à Montréal pour développer et commercialiser le crayon à plasma – une technologie innovante consistant en une micro torche à décharge lumineuse fonctionnant à la pression atmosphérique pour le traitement des plaies et affections chroniques de la peau.

Enfin, un des grands succès de Plasma-Québec est d'avoir réussi à établir des liens avec le réseau français Plasmas Froids depuis 2009. Il fut alors décidé d'un commun accord de mener des actions communes entre les deux regroupements. Ces actions ont débuté par un déroulement simultané de nos colloques annuels, ce qui a permis de tenir deux demi-journées en vidéoconférence entre la France et le Québec en 2010. Cette

initiative saluée des deux côtés de l'Atlantique a été réitérée en 2011 par une autre demi-journée à laquelle ont également participé des chercheurs belges et luxembourgeois. Du côté français, on a attribué à des étudiants deux prix qui leur ont permis d'assister à la version 2012 du colloque de Plasma-Québec avec le soutien financier des deux regroupements. Des discussions sont également en cours pour démarrer de nouvelles initiatives.

Plasma-Québec est donc une organisation avec des réalisations dont elle peut s'enorgueillir et dont le Québec peut être fier. L'organisation a soufflé en 2012 ses dix bougies. Cependant, malgré la distance parcourue, des efforts sont encore à mener pour rencontrer la totalité des objectifs collectifs. Grâce au dynamisme de ses chercheurs, nombre d'actions continueront à être menées dans les prochaines années en vue de renforcer la qualité de la formation, de démarrer de nouveaux projets et d'améliorer la visibilité du regroupement notamment au niveau international.

### Biographies des auteurs

**Joëlle Margot** est une physicienne des plasmas possédant une expertise à la fois sur les aspects théoriques et expérimentaux des plasmas de faible température dont, en particulier, ceux produits par des champs électromagnétiques de haute fréquence. Ses activités incluent, entre autres, la caractérisation de plasmas de basse pression, le développement de diagnostics appropriés, particulièrement les méthodes faisant appel aux lasers et à la spectroscopie, la modélisation des plasmas froids et l'application des plasmas à la gravure de couches minces et à la synthèse de nanomatériaux. Elle est l'auteur de plus de 110 articles dans des revues avec comité de lecture et de plus d'une centaine de comptes-rendus de conférences. Fellow de l'Institute of Physics, elle a siégé sur de nombreux comités de pairs nationaux et internationaux et depuis 2005, elle est la directrice du regroupement stratégique Plasma-Québec.

**My Ali El Khakani** est professeur titulaire au Centre-EMT de l'Institut National de la Recherche Scientifique où il dirige le groupe "NanoMat" depuis 1998. Le Prof. El Khakani est reconnu internationalement pour ses travaux de R&D dans le domaine de la synthèse des matériaux nanostructurés par les procédés plasma/laser pour diverses applications allant de la micro/nanoélectronique au photovoltaïque et aux nanocomposites. Il a publié plus de 150 articles scientifiques dans différentes revues prestigieuses, est codétenteur de 5 brevets et a présenté ses travaux de recherches dans 200 conférences nationales et internationales dont plusieurs à titre de conférencier invité. Le Prof. El Khakani agit régulièrement comme expert auprès de divers agences privées et publiques de financement de la R&D. Ses travaux actuels portent sur le développement de nouvelles structures nanohybrides pour l'optoélectronique et le photovoltaïque de 3<sup>ème</sup> génération.

**François Gitzhofer** est professeur titulaire au département de Génie chimique et génie biotechnologique de la faculté de génie de l'université de Sherbrooke où il dirige le laboratoire de génie des Plasmas depuis 2003. Il est reconnu internationalement pour ses travaux dans le domaine de la synthèse des matériaux par plasma thermique en utilisant la technologie d'injection de suspensions dans des plasmas inductifs. Au cours de sa carrière, le professeur Gitzhofer a cosigné plus de 70 publications et déposé près de 10 brevets. Le professeur Gitzhofer est invité à donner des cours régulièrement dans des universités européennes. Il agit comme arbitre pour de nombreuses agences de recherche européennes. Ses travaux actuels concernent la synthèse combinatoire de nouvelles classes de matériaux appliqués au domaine aéronautique et aérospatial, de la catalyse et des piles à combustible et aux revêtements protecteurs.

**Jean-Luc Meunier (D.Ing.(1981), EPF-Lausanne; MSc(1982), PhD(1986), INRS-EMT)** est professeur associé au Département de génie chimique (Laboratoire des Procédés Plasmas, PPL) de l'Université McGill depuis 1986. Ses travaux de recherche portent sur l'émission électronique des surfaces dans le mode thermo-champ, sur les plasmas thermiques et le design de réacteurs à plasmas pour la nucléation, la synthèse et la fonctionnalisation de nanoparticules, sur les applications de ces structures aux piles à combustibles, à l'énergie solaire et à l'environnement et sur les revêtements 3-D nanostructurés. Actuellement, il s'intéresse à la nucléation homogène de nano-flocons de graphène fonctionnalisés pouvant remplacer le platine dans les piles à combustibles PEM. Différentes structures de nanotubes de carbone sont également étudiées pour la création de nanofluides stables, de nouvelles géométries de cellules photovoltaïques ou de structures 3D pour l'émission électronique.



**Biographie des auteurs des autres articles de Plasma Québec:****Plasma Medicine**

**Michael R. Wertheimer** détient un baccalauréat en physique et une maîtrise en physique de l'Université de Toronto et un PhD de l'Université de Grenoble en supraconductivité. Professeur émérite depuis 2005, il a détenu une chaire industrielle du CRSNG pour le traitement par plasma des matériaux au département de génie physique de l'école Polytechnique de Montréal depuis 1996. Il a intégré l'École Polytechnique de Montréal en 1973 après avoir passé plus de 6 ans comme chercheur senior dans l'industrie. Le professeur Wertheimer est fellow de l'IEEE et de l'académie canadienne de génie; il a détenu une bourse de recherche Killam de 1990 à 1992. Il est coéditeur en chef du journal "*Plasma Processes and Polymers*". Il est l'auteur ou co-auteur de plus de 400 articles de recherche dans des journaux, livres et comptes-rendus de conférence, de 2 douzaines de brevets et a édité ou coédité 5 livres.

**Sylvain Coulombe** est actuellement professeur agrégé et directeur du département de génie chimique de l'Université McGill. Ingénieur physicien de formation, il poursuit des recherches dans le domaine des sources de plasmas et du développement de procédés depuis 1990. En tant que chercheur senior et directeur de projet pour General Electric Global Research de 1997 à 2001, il a contribué au développement de plusieurs lampes à décharges électriques. Il détient 6 brevets notamment sur la conception de lampes à décharge et sur une nouvelle source de plasma à la pression atmosphérique pour la production localisée d'espèces réactives. Il est l'auteur de plus de 150 articles arbitrés et présentations à des conférences. Il est le récipiendaire du prix Carrie M. Derick 2010 de l'Université McGill pour son excellence en enseignement et en supervision aux études supérieures. Il est également consultant pour plusieurs compagnies canadiennes.

**Les plasmas générés par des impulsions laser ultra-brèves et intenses**

**François Vidal** a fait ses études de cycles supérieurs en physique subatomique théorique (Ph.D. Université de Montréal) avant de rejoindre l'INRS-EMT en 1991 pour travailler en physique des plasmas, d'abord comme chercheur postdoctoral, puis en 1995 comme associé de recherche, après un séjour d'un an au CEA (France). Il est ensuite devenu professeur adjoint à l'INRS-EMT en 2003, et professeur associé en 2007. Il a apporté des contributions sur différents sujets de la physique des plasmas, dont la cinétique des ondes de choc, la filamentation de la lumière, les décharges électriques à grande échelle, les plasmas de décharge, et surtout les plasmas produits par laser appliqués à l'analyse spectroscopique des matériaux, à la dissection de tissus biologiques, au guidage des micro-ondes, et à la génération d'harmoniques élevés sur les cibles solides.

**Jean-Claude Kieffer** est professeur à l'INRS-EMT depuis 1990. Il détient une Chaire de Recherche du Canada sur la Photonique Ultrarapide Appliquée aux Matériaux et aux Systèmes. Il a été directeur de l'INRS-EMT de 2006 à 2011. Il est aussi à l'origine du laboratoire ALLS de l'INRS. Au cours de sa carrière il s'est intéressé à de nombreux sujets reliés à l'interaction entre les lasers intenses et la matière, dont l'étude résolue en temps de mécanismes transitoires ultra brefs par sources X produites par laser, et plus récemment la production de rayonnement X Bêta-tron.

**François Légaré** s'est joint à l'INRS-EMT en juin 2006 et est professeur agrégé depuis juin 2010. Il dirige une équipe de recherche qui élabore de nouvelles méthodes d'imagerie basées sur l'interaction laser-matière, soit pour l'imagerie moléculaire ultrarapide ou pour des applications biomédicales. Son équipe de recherche a développé une technologie permettant la génération d'impulsions lasers IR dont la durée approche le cycle optique et qui ont permis de montrer que le spectre d'harmoniques élevés permet de sonder des corrélations multi-électroniques par la mise en évidence de la résonance géante du xénon (Nat. Phys. 7, 464, 2011). De plus, toujours en 2011, il a montré comment la localisation de la charge dans les molécules triatomiques permet une augmentation significative du taux d'ionisation (PRL 107, 063201, 2011). En 2012, il a été nommé Fellow of the Institute of Physics et est vice-chair de DAMOP Canada (Association Canadienne des Physiciens).

**Jean-Pierre Matte** (Ph.D. École Polytechnique, Palaiseau, 1987) a d'abord été agent de recherche, et est maintenant professeur à l'Institut National de la Recherche Scientifique, centre Énergie, Matériaux et Télécommunications à Varennes, Qc. Ses recherches portent sur l'étude des processus cinétiques et la déformation des fonctions de distribution des vitesses électroniques et ioniques dans les plasmas, au moyen de codes à particules (PIC), Vlasov ou Vlasov-Fokker-Planck. Ces simulations ont porté principalement sur les plasmas créés par l'interaction laser-matière pour la fusion par confinement inertielle, l'émission de rayonnement X, diverses études fondamentales *etc.* Il y a aussi eu des travaux numériques sur les fonctions de distribution électroniques dans plasmas de déflecteurs dans les Tokamaks et sur les plasmas de décharges.

**Tsuneyuki Ozaki** a reçu sa maîtrise et son doctorat de l'Université de Tokyo. De 1990 à 2000, il a été associé de recherche à « Institute for Solid-State Physics » de l'Université de Tokyo. De 2000 à 2003, il a été spécialiste de recherche au « Nippon Telegraph and Telephone (NTT) Basic Research Laboratories » (Atsugi, Japon). En 2003, il a rejoint l'Institut national de la recherche scientifique (INRS), comme professeur adjoint. Il est actuellement professeur titulaire et Directeur du Laboratoire des sources femtosecondes (plus couramment connu comme « Advanced Laser Light Source »). Depuis 2006, il est aussi chercheur invité au Centre de Recherche de l'Hôpital Maisonneuve-Rosemont, Université de Montréal. Ses principaux intérêts de recherches comprennent le rayonnement térahertz intense et ses applications, la génération des harmoniques d'ordre élevé intense et l'application des lasers au domaine de la santé.

### **La gravure par plasma: défis et perspectives**

**Joëlle Margot** est une physicienne des plasmas possédant une expertise à la fois sur les aspects théoriques et expérimentaux des plasmas de faible température dont, en particulier, ceux produits par des champs électromagnétiques de haute fréquence. Ses activités incluent, entre autres, la caractérisation de plasmas de basse pression, le développement de diagnostics appropriés, particulièrement les méthodes faisant appel aux lasers et à la spectroscopie, la modélisation des plasmas froids et l'application des plasmas à la gravure de couches minces et à la synthèse de nanomatériaux. Elle est l'auteur de plus de 110 articles dans des revues avec comité de lecture et de plus d'une centaine de comptes-rendus de conférences. Fellow de l'Institute of Physics, elle a siégé sur de nombreux comités de pairs nationaux et internationaux et depuis 2005, elle est la directrice du regroupement stratégique Plasma-Québec.

**Mohamed Chaker** est un expérimentateur reconnu pour sa vaste expertise en applications des plasmas au traitement des matériaux. Il a publié environ 220 articles dans des revues scientifiques avec comité de lecture et plus de 130 comptes-rendus de conférences dans divers domaines incluant la lithographie X et EUV, la gravure de couches minces et le dépôt de couches minces par ablation laser de plusieurs matériaux dont DLC, SiC, GaN, AlN, STO et CBN. Il détient une Chaire de Recherche du Canada en « plasmas appliqués aux technologies de micro- et de nanofabrication ». Président du comité des affaires scientifiques de NanoQuébec, il a une compétence notoire dans le domaine des nanomatériaux, notamment en synthèse de nanoparticules. Il codirige avec Jean-Pierre Boeuf du LAPLACE de Toulouse le Laboratoire International en Technologie et Applications des Plasmas et est impliqué personnellement dans plusieurs projets de ce laboratoire.

# PLASMA MEDICINE

BY MICHAEL R. WERTHEIMER AND SYLVAIN COULOMBE

Plasma Medicine (PM) is a relative newcomer among traditional areas of plasma processing science, but it has been expanding very rapidly in recent years; it now implicates researchers and users not only from plasma-related sciences and technology, but also increasingly from biology, microbiology, medical and dental research, and even clinical practice of medicine and dentistry. Among tangible proofs that PM has now become quite well established are the following:

- (i) In June of 2012 the 4<sup>th</sup> *International Conference on Plasma Medicine* (ICPM-4) was held in Orléans, France; it attracted 280 attendees, 100 more than its predecessor, ICPM-3, held 2 years prior, and three times more than ICPM-2.
- (ii) The *International Society of Plasma Medicine* (<http://www.plasmamed.org/>) was founded in 2009.
- (iii) Two young journals, “*Plasma Medicine*” (Begell House Inc., Publishers) and “*Clinical Plasma Medicine*” (Elsevier GmbH) now cater specifically to researchers in this field. Very recently, a book entitled “*Plasma Medicine: Applications of Low-Temperature Gas Plasmas in Medicine and Biology*”<sup>[1]</sup> appeared in print, the first dedicated specifically to this field.

However, the discipline of PM goes much further back in time: it may, in fact, be considered an agglomeration of several distinct areas of research and applications, some of them advanced to the point of therapeutic practice and industrial implementation. As schematically represented in Figure 1, these are:

- (a) Plasma sources designed for biomedical and therapeutic uses;
- (b) Sterilization and decontamination aided by “cold” plasmas;
- (c) Two- and three-dimensional solid surfaces designed for the immobilization of bio-molecules and / or living cells for cell-culture or “tissue engineering”;
- (d) Finally, the actual use of gas-discharge plasmas on living cells or tissues, for biological research or clinical treatments.

We shall start by listing recent review articles of a general nature, through which the interested reader may rapidly acquire an overview of PM. Following this, we briefly address each of the areas identified above separately,

highlighting what we believe to be the most important developments and trends for the future.

As already mentioned, the literature related to the various component-fields that comprise PM has been growing exponentially in recent years. Beside the two above-mentioned new journals exclusively devoted to PM, many articles (including review papers) can be found in “traditional” journals that regularly publish plasma-related research results. For example, three entire issues of the journal *Plasma Processes and Polymers (PPaP)* were devoted to PM, namely Vol. 5, No. 6 (August 2008); Vol. 7, No. 3–4 (March 2010); and Vol. 9, No. 6 (June 2012). A review article in the first, by G. Fridman *et al.*, is entitled “*Applied plasma medicine*”<sup>[2]</sup>, while the lead-review article in the second, by G. Lloyd *et al.*, is entitled “*Gas plasma: medical uses and developments in wound care*”<sup>[3]</sup>; another important contribution, by A. von Keudell *et al.*, bearing the title “*Inactivation of bacteria and biomolecules by low-pressure plasma discharges*”<sup>[4]</sup> reports very extensive results obtained in the course of a multi-year “BIODECON” project funded by the European Commission. That same topic, “plasma sterilization and decontamination”, is the theme of eight articles that comprise the third (2012) special issue of *PPaP* mentioned above, Vol. 9, No. 6, pp 559–629. Similarly, a review article by M.G. Kong *et al.*, entitled “*Plasma medicine: an introductory review*”<sup>[5]</sup> kicks off an issue of the *New Journal of Physics* (Vol. 11, No.11, November 2009) containing numerous articles with the common theme “Focus on Plasma Medicine”.

Let us now address salient features of each of the four sub-fields of PM, (a) to (d) above; we point out principal unanswered questions and anticipated future trends.

**(a) Plasma sources for PM.** Figure 2 is a mosaic of images depicting plasma sources being used for PM research, but also for therapeutic applications, several of them in Greifswald, Germany, where an important collaboration exists between the Leibniz-Institute for Plasma Science and Technology e.V. (INP Greifswald) and neighbouring medical faculties<sup>[6]</sup>. These sources all have certain features in common, namely that the generated plasma discharges are “cold” (gas temperature is near-ambient) and that they operate at atmospheric pressure. Gases being used to feed these plasma sources are generally the noble gases (Ar or He), or air. However,



Michael R. Wertheimer  
<michel.wertheimer@polymtl.ca >, Department of Engineering Physics, École Polytechnique de Montréal, Montreal QC, Canada

Sylvain Coulombe, Department of Chemical Engineering, McGill University, Montreal QC

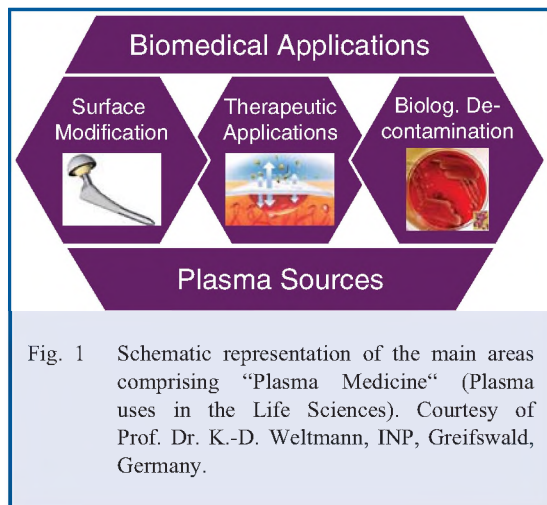


Fig. 1 Schematic representation of the main areas comprising “Plasma Medicine” (Plasma uses in the Life Sciences). Courtesy of Prof. Dr. K.-D. Weltmann, INP, Greifswald, Germany.

at least one source that is already approved world-wide for PM with human patients operates at somewhat higher temperature, namely the *PlasmaJet* system<sup>[3]</sup>, illustrated in Figure 3: Here, a fine beam of neutral Ar plasma, manipulated by a skilled surgeon, releases both thermal and kinetic energy upon contact with diseased tissue. More will be said about it in (d) below. A final illustration in this section, Figure 4, shows a 2.45 GHz microwave-powered “plasma-jet” that was developed at the Max-Planck Institute for extraterrestrial physics (MPE) in

Munich, Germany, extensively studied and used by G. Morfill *et al.*<sup>[5,7]</sup>: a flow of several standard litres per minute (slm) of Ar passing through the discharge zone is directed downstream to the area of the patient’s body being treated (Fig. 4a). Here too, more will be said in section (d) below.

**(b) Sterilization and decontamination.** Bacteria, bacterial spores, endotoxins, harmful proteins such as prions, and other undefined organic matter can all be found on surgical instruments, catheters and endoscopes after medical use. If these expensive devices are to be reused for health-care, they must be subjected to increasingly rigorous sterilization procedures, for example those described in the ISO EN 15883 standard. Just like synthetic organic photoresists used in lithographic steps during the manufacture of integrated circuits<sup>[8]</sup>, these biologically-derived organic solids can be volatilized and removed by low-temperature plasma treatments, or at least deactivated and rendered harmless<sup>[4,9,10]</sup>, using either suitable low- or atmospheric-pressure plasma devices (see also *PPaP* 9(6), 2012). Near-ambient temperature of treatment is important, because many medical devices include plastic parts, or are thermally sensitive for other reasons. Although related journal- and patent literature goes back to the 1960s, and there even exists since many years a commercial device (Johnson & Johnson “Sterad-100S”) that uses plasma to destroy residues of the actual sterilizing agent, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub><sup>[9,10]</sup>, much current work is still aimed at better understanding of the complex mechanisms that involve

the plasmas’ various neutral and ionized active species as well as energetic photons, as they interact with the targeted biological systems. Only very recently has a first fully plasma-based industrial process, in the pharmaceutical domain, been announced<sup>[11]</sup>; this constitutes a major step forward for the many researchers in this field.

**(c) Substrates for cell-culture and tissue engineering.** Commercial cell-culture ware, for example Petri dishes, are made of medical-grade poly(styrene); in order for their surfaces to be “wettable” and thereby to promote cell adhesion and –proliferation, the manufacturers subject those products to surface-modification by plasma-induced “grafting” of oxygen- (and sometimes

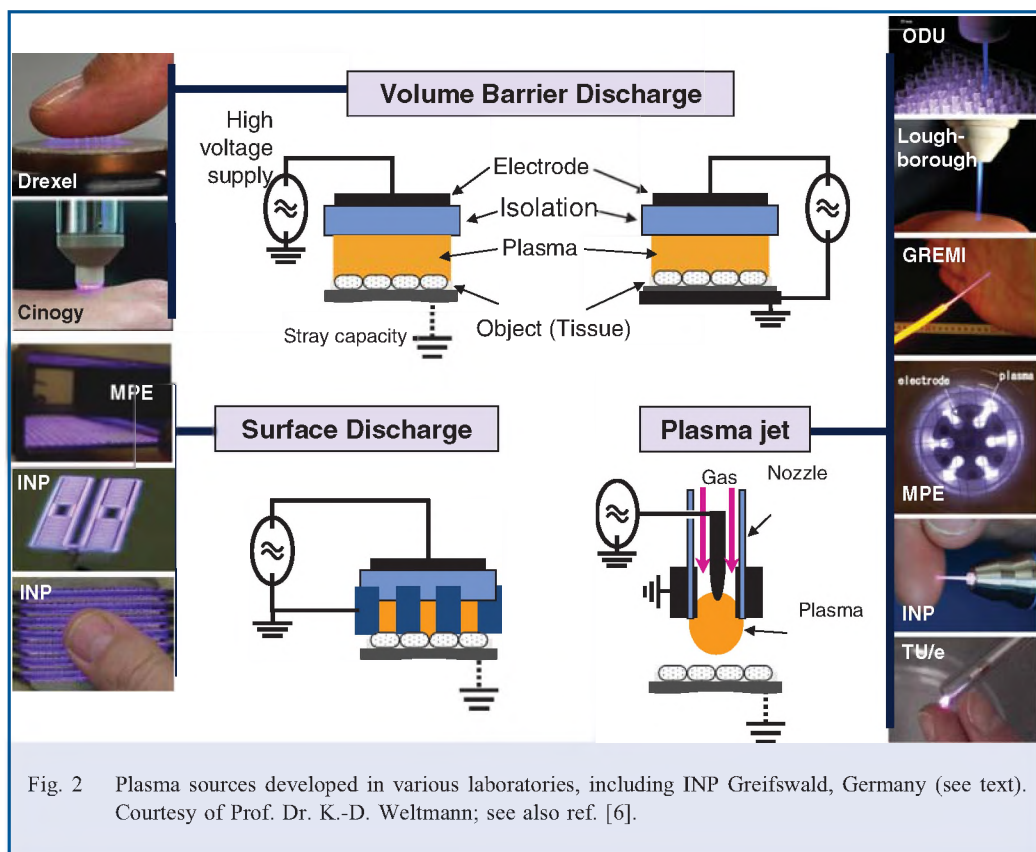


Fig. 2 Plasma sources developed in various laboratories, including INP Greifswald, Germany (see text). Courtesy of Prof. Dr. K.-D. Weltmann; see also ref. [6].



Fig. 3 PlasmaJet System (Plasma Surgical, Inc., Abingdon, UK); from [3], with permission.

biodegradable polymers such as poly(lactide): Wyrwa and coworkers<sup>[13]</sup> used electrospinning to create non-woven scaffolds comprised of sub- $\mu\text{m}$  fibres, which were subsequently coated with an ultra-thin layer of plasma-polymerized allylamine. The coated structures were found to promote adhesion and spreading of human MG-63 osteoblast cells, the eventual aim being to grow a bone-like 3D solid structure from which the original polymer scaffold was removed by bio-degradation. An Italian-British collaboration is pursuing a similar methodology, but using instead a highly porous 3D scaffold made of poly( $\epsilon$ -caprolactone)<sup>[14]</sup>.

nitrogen-)containing polar functional groups. In a recent review article, Siow *et al.*<sup>[12]</sup> describe the now enormous body of world literature wherein plasmas are used both for grafting but also for deposition of thin organic coatings, to generate chemically reactive surfaces for biomolecule immobilization and cell colonization. These techniques are now also being applied to the domain of tissue engineering on three-dimensional (3D) structures, for example ones made of

**(d) Clinical Plasma Medicine.** Just like gas-discharge plasma is capable of destroying prokaryotic cells (bacteria), it can have *beneficial* effects on healthy eukaryotic cells (mammalian cells), or it can be made to preferentially destroy cancerous cells, for example by inducing apoptosis<sup>[15]</sup>. Plasma is now increasingly used therapeutically in endoscopic surgery (see below) and other medical protocols, for example applied in direct contact with living tissues to deactivate pathogens (e.g. bacteria or bio-films); to stop bleeding without damaging healthy tissue; to disinfect wounds

(for example, chronic ulcers, see below) and to assist wound-healing; to treat dermatological disorders, including wrinkling of skin, and in certain dental applications (e.g. whitening of teeth, root-canal treatments, among others). Let us briefly return to Fig. 3: The hand-held jet can act like a “plasma scalpel” that incises diseased tissue, including deep inside the human body for treatments of endometriosis, Barrett’s disease, and numerous others<sup>[3]</sup>. The mechanical agitation of the flowing gas stream dissipates excess liquid in the operative field, while the plasma jet’s thermal energy cuts the (dried) tissue and rapidly coagulates the thin, superficial layers, thereby minimizing blood-loss. The microwave-driven cold atmospheric Ar plasma illustrated in Fig. 4 was demonstrated to be a very safe and effective add-on therapy in patients with chronic infected wounds<sup>[3,16]</sup>. A 5 min. therapy regimen led to 34% higher

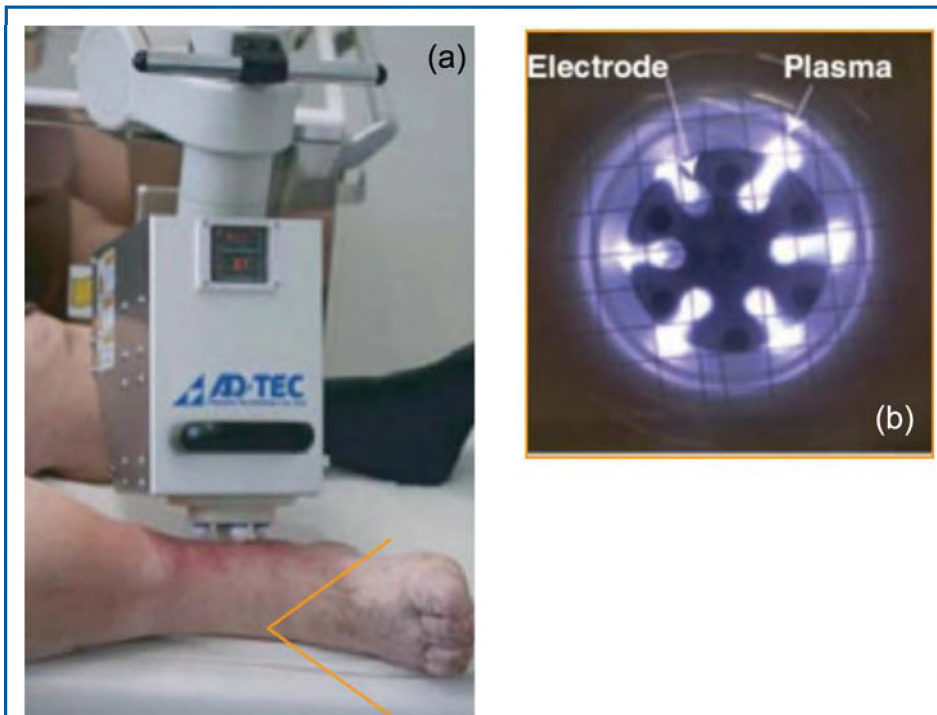


Fig. 4 (a) Microwave-powered plasma torch applied to patient with a chronic leg wound; (b) view into the torch during operation; from [7], with permission.

germ reduction in 291 applications on 36 patients, compared to controls. Subsequent studies revealed that 2 min. treatments were just as effective (40%, 70 applications, 14 patients); the beneficial effects were found to be independent of the bacterial species and their resistance levels. No side-effects occurred and the treatments were well tolerated, even by elderly patients.

In a recent topical review article, Graves<sup>[7]</sup> examines the emerging role of reactive oxygen and nitrogen species (ROS and RNS, respectively) in redox biology, in general, but more specifically in therapeutically highly promising situations like

those listed above. Although the synergistic interplays between plasma chemistry and biology are daunting, he concludes on the optimistic note that progress in science and technology often occurs at the boundaries between seemingly unrelated fields: the present ones (RONS, redox biology, medicine) fall well within this category. In another recent review entitled “*The 2012 Plasma Roadmap*”<sup>[17]</sup>, a two-page sub-section is devoted to PM; its author, G. Kroesen concurs by stating that “*we have to establish a multi-disciplinary scientific community to generate this required understanding*”.

---

## REFERENCES

1. M. Laroussi, M.G. Kong, G. Morfill, W. Scholz, Eds., *Plasma Medicine: Applications of Low-Temperature Gas Plasmas in Medicine and Biology*, Cambridge University Press, Cambridge UK, 2012, 416 pp.
2. G. Fridman, G. Friedman, A. Gutsol, A.B. Shekhter, V.N. Vasilets, and A. Fridman, *Plasma Process. Polym.* **5**, 503–533 (2008).
3. G. Lloyd, G. Friedman, S. Jafari, G. Schultz, A. Fridman, and K. Harding, *Plasma Process. Polym.* **7**, 194–211 (2010).
4. A. von Keudell, P. Awakowicz, and J. Benedikt, + 21 others, *Plasma Process. Polym.* **7**, 327–352 (2010).
5. M.G. Kong, G. Kroesen, G. Morfill, T. Noseknko, T. Shimizu, J. Van Dijk, and J.L. Zimmermann, *New J. Phys.* **11**, 115012, 35 (2009).
6. K.-D. Weltmann, E. Kindel, Th. von Woedtke, M. Hähnel, M. Stieber, and R. Brandenburg, *Pure Appl. Chem.* **82**, 1223–1237 (2010).
7. D.B. Graves, *J. Phys. D : Appl. Phys.* **45**, 263001, (42 pp) (2012).
8. N.G. Einspruch, D.M. Brown, Eds., *VLSI Electronics Microstructure Science, Vol.8: Plasma Processing for VLSI*, Academic Press, Inc., Orlando FL, 1984, 527 pp.
9. S. Lerouge, M.R. Wertheimer, and L’H. Yahia, *Plasmas Polym.* **6**, 175–188 (2001).
10. M. Moisan, J. Barbeau, S. Moreau, J. Pelletier, M. Tabrizian, and L’H. Yahia, *Int. J. Pharmaceutics* **226**, 1–21 (2001).
11. B. Denis, S. Steves, E. Semmler, N. Bibinov, W. Novak, and P. Awakowicz, *Plasma Process. Polym.* **9**, 619–629 (2012).
12. K.S. Siow, L. Britcher, S. Kumar, and H.J. Griesser, *Plasma Process. Polym.* **3**, 392–418 (2006).
13. R. Wyrwa, B. Finke, H. Rebl, N. Mischner, M. Quaas, J. Schaefer, C. Bergemann, J.B. Nebe, K. Schroeder, K.-D. Weltmann, and M. Schnabelrauch, *Adv. Biomater.* **13**, B165–B171 (2011).
14. F. Intraruovo, D. Howard, L. White, R.K. Johal, A.M. Ghaemmaghani, P. Favia, S.M. Howdle, K.M. Shakesheff, and M.R. Alexander, *Acta Biomaterialia* **7**, 3336–3344 (2011).
15. M. Vandamme, E. Robert, S. Pesnel, E. Barbosa, S. Dozias, J. Sobilo, S. Lerondel, A. Le Pape, and J.-M. Pouvesle, *Plasma Process. Polym.* **7**, 264–273 (2010).
16. G. Isbary, G. Morfill, H.U. Schmidt, *et al.*, *Brit. J. Dermatol.* **147**, 78–82 (2010).
17. S. Samukawa, M. Hori, and S. Rauf, +13 others, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **45**, 253001, 37 (2012).

# LES PLASMAS GÉNÉRÉS PAR DES IMPULSIONS LASER ULTRA-BRÈVES ET INTENSES

PAR FRANÇOIS VIDAL, JEAN-CLAUDE KIEFFER, FRANÇOIS LÉGARÉ, JEAN-PIERRE MATTE, ET TSUNEYUKI OZAKI

Depuis leur invention en 1960 (Figure 1), les lasers ont été utilisés pour transformer la matière. Très tôt la technique de la commutation-Q a permis de produire des impulsions de haute puissance ( $\sim$ GW) et d'une durée de l'ordre de la nanoseconde ( $10^{-9}$  s). Dès 1963, il a été possible de vaporiser une surface solide par laser pour en effectuer une analyse par spectroscopie d'émission<sup>[1]</sup>. Le premier témoignage de la formation d'un plasma par laser dans un gaz date de 1964<sup>[2]</sup>. Vers la fin des années 1980, une véritable révolution s'est opérée dans le monde des lasers, avec l'invention de la technique CPA (« chirped pulse amplification »)<sup>[3]</sup>, qui a permis la production d'impulsions laser dont la durée est dans le domaine des femtosecondes ( $10^{-15}$  s) et dont la puissance est de plusieurs ordres de grandeurs plus élevée (maintenant  $\sim 10^{15}$  W – Figure 2) que ce qui était accessible auparavant, ce qui a ouvert la porte à une multitude de nouvelles applications des lasers. Les hautes intensités (puissance par unité de surface, en  $W/cm^2$ ) accessibles ont permis de nouvelles interactions avec les atomes, comme l'ionisation tunnel, et les brèves durées d'impulsion ont permis de provoquer des changements dans la matière sur des temps où les atomes ont à peine le temps de bouger. Ceci entraîne une interaction quasi isochore avec la matière solide, permettant ainsi d'atteindre des régions du diagramme de phase en densité et température inaccessibles auparavant. En particulier la « matière

chaude et dense» ( $\sim 1-100$  eV,  $\sim 0.01-10$   $g/cm^3$ ), qu'on peut produire au moyen d'impulsions laser brèves et intenses<sup>[4]</sup>, est un régime intermédiaire entre le solide et le plasma qui existerait à l'intérieur des planètes massives et dont les propriétés sont encore mal comprises. En portant la température au niveau du keV dans la matière à la densité solide ( $\sim 1$   $g/cm^3$ ), on obtient les sources de rayons X incohérentes les plus brillantes qu'il soit possible de produire en laboratoire<sup>[5]</sup>. Par ailleurs, la déposition ultrarapide de l'énergie dans la matière solide permet le micro-usinage précis de divers matériaux, entraînant des retombées notamment en chirurgie oculaire<sup>[6]</sup>. De plus, comme nous le verrons, la brièveté des durées rend possible la propagation d'impulsions laser très intenses sur des distances considérables dans les gaz ainsi que l'accélération de particules chargées à de hautes énergies.

Dans ce qui suit, nous discuterons de quelques aspects des impulsions laser ultra-brèves et intenses en rapport avec les plasmas, en mettant l'accent particulièrement sur les thématiques qui intéressent les chercheurs du Laboratoire de Sources Femtosecondes (LSF), connu également sous le nom de « Advanced Laser Light Source » (ALLS), de l'INRS-EMT. Mais pour bien comprendre les spécificités de ce type d'impulsions laser et des plasmas qu'ils produisent, il faut d'abord revoir quelques notions concernant l'interaction des lasers intenses avec la matière.

## L'INTERACTION DES LASERS INTENSES AVEC LA MATIÈRE

Pour induire des changements de phase dans la matière, tels que la vaporisation et l'ionisation, il faut qu'une densité suffisante d'énergie laser soit absorbée rapidement dans un petit volume. Les mécanismes d'absorption de l'énergie de lasers intenses par la matière sont très diversifiés et complexes. Pour simplifier, on peut affirmer qu'ils sont de deux types : (1) la photoionisation directe des atomes et molécules, et (2) l'interaction avec les électrons libres. La photoionisation peut consister simplement en l'absorption d'un photon ultraviolet extrême (XUV) dont l'énergie excède le potentiel d'ionisation. Lorsque l'énergie du photon n'est pas suffisante, la photoionisation peut quand même se produire soit par le mécanisme de l'absorption multiphotonique, où plusieurs



### RÉSUMÉ

Depuis environ 25 ans il est possible de générer des impulsions laser dans la gamme des femtosecondes ( $10^{-15}$  s), atteignant des puissances supérieures au térawatt ( $10^{12}$  W). Cette percée a permis d'accéder à de nouveaux états de la matière ionisée et a ouvert de nouveaux champs d'applications qui ne cessent de se développer et de se multiplier avec l'amélioration des sources laser. Dans cet article nous décrivons quelques unes de ces applications qui intéressent particulièrement les chercheurs du laboratoire ALLS de l'INRS-EMT.

François Vidal  
<vidal@emt.inrs.ca>, Jean-Claude Kieffer, François Légaré, Jean-Pierre Matte et Tsuneyuki Ozaki, INRS-EMT, Varennes, Québec, Canada.



Fig. 1 Le premier laser fonctionnel, inventé par T. H. Maiman en 1960. (Image du domaine public.)

photons sont absorbés simultanément, et qui caractérise généralement les intensités laser modérées ( $< 10^{13}$  W/cm<sup>2</sup> pour une longueur d'onde de  $\sim 1$   $\mu$ m), soit par l'ionisation tunnel, qui se produit pour les intensités élevées où le champ laser déforme le champ coulombien du noyau pour que l'électron puisse quitter son état lié par effet tunnel. Lorsque la température effective de la matière est modérément élevée, le principal mécanisme d'absorption par les électrons libres est l'absorption collisionnelle (ou Bremsstrahlung inverse), qui implique une collision de l'électron avec un atome ou un ion. En moyenne, l'électron gagne son énergie d'oscillation dans le champ laser à chaque collision. La température des électrons augmentant, ces derniers transfèrent graduellement leur énergie aux atomes de la matrice, entraînant une élévation de température de tout le matériau. L'énergie des électrons peut

augmenter au point d'ioniser les atomes par impact, entraînant ainsi un phénomène d'avalanche électronique qui produit un plasma très dense.

Lorsque la température effective du plasma devient suffisamment élevée, l'absorption collisionnelle devient négligeable car la section efficace de collision entre les particules chargées diminue avec la vitesse relative, et les mécanismes d'absorption deviennent non-collisionnels. Le mécanisme d'absorption non-collisionnelle le plus connu est la force pondéromotrice (une forme de pression de rayonnement) exercée par le laser sur la cible. Cette force est indépendante du signe de la charge et proportionnelle au gradient du profil spatial d'intensité de l'impulsion laser. Elle peut « pousser » les particules chargées et leur communiquer des énergies considérables. Les autres mécanismes d'absorption non-collisionnelle dépendent de la durée d'impulsion. Les phénomènes d'absorption et d'interaction avec la matière en général impliquant des impulsions relativement longues (nanosecondes) ont été principalement étudiés dans le contexte de la fusion nucléaire par laser (voir la section suivante)<sup>[7]</sup>. Pour ces impulsions, l'interaction est non-isochoire et un gradient de densité électronique relativement long a le temps de s'établir au cours de l'interaction, ce qui fait apparaître des phénomènes d'instabilité dans le plasma ainsi que des mécanismes d'absorption particuliers, comme l'absorption résonante où une onde plasma est excitée à la densité critique du plasma, laquelle capture des électrons et les accélère à de hautes vitesses. Ces effets nécessitent typiquement une longueur de gradient d'au moins une longueur d'onde pour être efficaces. Cette longueur de

gradient n'est plus disponible lorsque la durée de l'impulsion laser devient très courte car l'interaction avec la cible solide s'effectue alors d'une manière quasi isochoire. D'autres mécanismes d'absorption surviennent dans ce cas. L'un des mieux connus est le « vacuum heating », ou effet Brunel<sup>[8]</sup>, qui se produit lorsque la polarisation du champ électrique du laser a une composante selon la normale à la cible. Dans ce cas, le champ électrique extrait les électrons de la surface de la cible dans un demi-cycle, puis les propulse à l'intérieur au demi-cycle suivant, et ces derniers emportent ainsi une partie de l'énergie du laser et la déposent dans la cible.

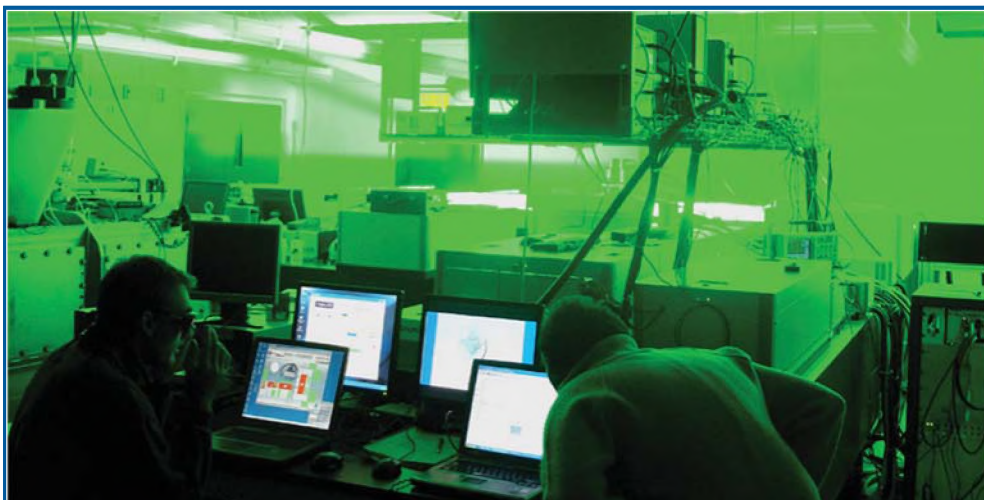


Fig. 2 La chaîne laser 200 TW du laboratoire ALLS peut produire des impulsions de 5 Joules à 0.8  $\mu$ m en 25 femtosecondes à taux de répétition de 10 Hz. Ce système présente une caractéristique hors du commun, soit un contraste très élevé de ( $10^{-10}$  : 1) à la fréquence fondamentale et ceci à pleine puissance.



## LES UTILISATIONS

### L'ablation laser

L'ablation laser constitue l'une des applications les plus importantes des lasers, toutes catégories confondues. Lorsque la densité d'énergie laser déposée dans la matière dépasse celle associée à la cohésion des atomes ou des molécules, la matière est vaporisée: on parle alors d'ablation laser. L'ablation laser est soit utilisée directement, comme pour l'usinage de pièces de diverses dimensions, ou indirectement, comme dans la technique de déposition pulsée par laser (PLD ou «pulsed laser deposition») [9], servant à la fabrication de couches minces, et dans la technique d'analyse chimique LIBS (laser-induced breakdown spectroscopy) où une petite quantité de matière est vaporisée et analysée par spectroscopie d'émission optique [10]. (Cette technique d'analyse chimique polyvalente a culminé récemment avec le système ChemCam équipant le robot d'exploration martienne Curiosity.) L'ablation laser est aussi à la base des recherches sur la fusion nucléaire par laser [11]. Dans les grandes infrastructures des projets NIF («National Ignition Facility») aux USA et Mégajoule en France, la convergence d'une centaine de faisceaux lasers (totalisant presque  $10^{15}$  W) entraîne l'ablation de la surface d'une petite cible sphérique. L'implosion de cette cible, qui résulte de «l'effet fusée», permet d'atteindre les conditions de densité et de température nécessaires pour déclencher la réaction de fusion nucléaire dans la mixture de deutérium et de tritium au centre de la cible.

La plupart des applications de l'ablation laser sont réalisées au moyen d'impulsions relativement longues (nanosecondes). Cependant, les impulsions ultra-brèves ont des avantages substantiels pour la plupart d'entre elles. En effet, il est clairement démontré que les impulsions ultra-brèves produisent une ablation beaucoup plus efficace, localisée et reproductible que les impulsions nanosecondes, ce qui en fait l'outil de prédilection pour le micro- voire le nano-usinage de matériaux par laser [12]. Le fait de pouvoir déposer une grande densité d'énergie à la surface du matériau en un temps très bref entraîne une vaporisation rapide et localisée de la cible, ce qui permet d'éviter que la diffusion de la chaleur dans le matériau altère ses propriétés en dehors de la région d'impact du faisceau. Cet effet est renforcé par une plus grande efficacité de l'ablation dans le cas des impulsions ultra-brèves, *i.e.* une plus faible quantité d'énergie par unité de surface est requise pour l'ablation, comme il a été démontré pour les matériaux diélectriques (verre) et biologiques (cornée) [13]. Dans le cas des cornées, ces propriétés des impulsions ultra-brèves rendent possible une découpe plus fine et précise, ce qui donne de meilleurs résultats qu'avec les techniques chirurgicales traditionnelles [6].

Une conséquence de la vaporisation rapide de la matière au moyen d'impulsions ultra-brèves est l'éjection d'un plus faible nombre de grands agrégats d'atomes en raison du

passage direct de la phase solide à la phase plasma (*i.e.* sans la phase liquide), ce qui permet de fabriquer des couches minces par PLD de meilleure qualité [14]. (Notons que des nanoparticules se forment néanmoins dans le trajet de la matière ablatée vers le substrat où elle est déposée, ainsi qu'en raison d'instabilités thermodynamiques à la surface de la cible [15].) Également, la possibilité de produire une ablation très localisée présente des avantages pour le micro-LIBS, *i.e.* pour le LIBS où la quantité de l'échantillon à analyser est très petite, comme pour les circuits imprimés de micro-électronique et les circuits micro-fluidiques employés pour les analyses biochimiques [16], car le dommage causé est infime.

### Les filaments de plasma

L'une des propriétés les plus étonnantes des impulsions laser ultra-brèves et intenses est la possibilité de se propager sur de grandes distances ( $> 100$  m) [17,18] dans l'air ambiant sans subir les effets de d'élargissement naturel (diffraction), comme une impulsion de faible intensité. Par contraste, la distance de propagation des impulsions laser nanosecondes intenses est limitée par l'effet d'avalanche électronique qui produit éventuellement une densité d'électrons plus élevée que la densité critique (densité à laquelle le plasma devient opaque à la lumière du laser). Ce phénomène d'avalanche n'a pas le temps de se développer pour des impulsions laser suffisamment brèves, même si l'intensité laser dans le filament ( $\sim 10^{14}$  W/cm<sup>2</sup>) est suffisante pour photoioniser efficacement les molécules d'air et fournir les électrons germes. La propagation d'impulsions laser ultra-brèves et intenses dans l'air se fait dans un état de quasi équilibre entre les effets de défocalisation de l'impulsion (diffraction et réfraction par la distribution inhomogène des électrons créés par l'impulsion elle-même) et l'effet d'auto-focalisation dû à l'indice de réfraction nonlinéaire (proportionnel au champ électrique au carré) inhomogène, qui joue le même rôle qu'une lentille convergente. La propagation de la lumière dans ce mode quasi stationnaire, produit un filament de plasma sur son passage dont le diamètre est d'environ 100  $\mu$ m, la densité d'électrons de l'ordre de  $10^{16}$  cm<sup>-3</sup> et la température électronique de l'ordre de 1 eV. Ces filaments de plasma ont suscités de nombreux projets d'applications, comme le déclenchement et le guidage de décharges électriques sur de grandes distances [19], la détection de polluants en haute atmosphère (par l'émission de fluorescence du filament de plasma) [20], et le guidage de faisceaux micro-ondes par la disposition des filaments suivant une géométrie cylindrique [21]. En général, la puissance ( $\sim$ énergie/durée) de l'impulsion doit dépasser un certain seuil (quelques GW pour une longueur d'onde de  $\sim 1$   $\mu$ m) pour que ce mode de propagation puisse se produire. Lorsqu'une impulsion laser contient plusieurs fois cette puissance seuil, l'impulsion laser est instable et se fragmente pour générer plusieurs filaments qui contiennent chacun quelques fois cette puissance seuil [22].

### L'accélération des électrons

Il a été démontré que les impulsions ultra-brèves et intenses peuvent accélérer des électrons à des énergies de l'ordre du GeV (pour les électrons,  $1 \text{ GeV} \equiv 99.999987\%$  de la vitesse de la lumière) sur une distance de  $3.3 \text{ cm}$ <sup>[23]</sup>. Par comparaison, l'accélérateur SLAC de Stanford (utilisant la technique conventionnelle des ondes RF) nécessite  $64 \text{ m}$  pour les amener à une énergie comparable. Ces électrons sont accélérés par une onde plasma qui est excitée dans sillage d'une impulsion laser ultra-brève et très intense qui se propage dans un gaz. Cette onde plasma est excitée grâce à la force pondéromotrice qui induit une oscillation des électrons: le front de l'impulsion laser accélère les électrons devant lui, puis lorsque le maximum de l'impulsion rattrape ces électrons, ils sont accélérés dans la direction opposée. Des électrons libres injectés à grande vitesse dans le sillage de l'impulsion laser peuvent être piégés dans cette onde plasma et être accélérés à la vitesse de l'onde, qui est pratiquement la vitesse de la lumière.

La force pondéromotrice du front de l'impulsion laser pousse aussi des électrons dans la direction transverse par rapport à l'axe de propagation. Ceci laisse un canal chargé positivement dans le sillage de l'impulsion laser. Les électrons, retenus par la force électrostatique, oscillent autour de ce canal chargé positivement en émettant un rayonnement de type synchrotron (appelé « bêatron » dans ce contexte particulier) très collimé mais incohérent temporellement puisque les électrons n'oscillent pas tous en phase. L'intérêt de ce type de source est la très haute énergie des rayons X générés ( $\sim 10 \text{ keV}$ ) ainsi que la faible dimension transverse de la source ( $\sim 2 \mu\text{m}$ ), qui est idéale pour l'imagerie par contraste de phase (Figure 3)<sup>[24]</sup>.

Notons pour terminer que la force pondéromotrice, tout comme l'effet Brunel<sup>[8]</sup>, peut accélérer des électrons dans des feuilles minces de matière solide sans qu'il y ait formation d'une onde plasma. Ces électrons accélérés vont entraîner des ions hors de la cible par l'intermédiaire de la force électrostatique créée par leur déplacement. Il est ainsi possible d'accélérer des protons à des énergies de l'ordre de la dizaine de MeV<sup>[25]</sup>. Les protons peuvent être contenus initialement dans l'hydrogène composant la cible ou dans l'hydrogène adsorbé à la surface de la cible, provenant de l'air ambiant. L'accélération d'ions légers par laser est envisagée dans le contexte de la proton-thérapie principalement pour traiter les tumeurs cutanées.

### Les harmoniques d'ordres élevés et la science attoseconde

Lors de l'ionisation tunnel d'un atome dans un gaz, l'électron traverse la barrière de potentiel avec peu d'énergie et oscille ensuite dans le champ laser. Cette oscillation peut le faire revenir entrer en collision avec l'atome dont il est issu lorsque la polarisation du laser est linéaire. En se recombinant, l'électron émet l'énergie reçue par l'impulsion laser sous forme de rayonnement<sup>[26]</sup> dont le spectre est constitué d'harmoniques (*i.e.* de multiples entiers) de la fréquence du laser incident<sup>[27]</sup>. La génération d'harmoniques d'ordres élevés (GHOE) suscite beaucoup d'intérêt parce qu'elle permet d'envisager la création d'une source laser cohérente dans le domaine des XUV tenant sur une table dans un laboratoire laser conventionnel, à la différence des synchrotrons et des lasers à électrons libres dont les infrastructures sont imposantes et coûteuses. L'un des principaux objectifs de la GHOE est d'arriver à une source compacte permettant de faire de l'imagerie en temps réel de processus chimiques et biologiques dans la « fenêtre de l'eau », *i.e.* pour des longueurs d'onde entre  $2.3$  et  $4.4 \text{ nm}$ , où le contraste entre l'eau et la matière organique est maximum. La GHOE au moyen de gaz rares a aujourd'hui atteint des énergies de photons de l'ordre du keV ( $1 \text{ keV} \equiv 1.2 \text{ nm}$ )<sup>[28]</sup> mais les intensités restent trop faibles pour les applications envisagées. La principale limitation vient de la densité élevée d'électrons libres produite lorsqu'on augmente l'énergie laser, ce qui nuit au processus en accentuant le désaccord de phase entre les harmoniques et l'impulsion laser.

Différentes avenues sont envisagées pour résoudre ce problème. Une solution prometteuse est l'emploi de longueurs d'ondes plus grandes que celles qui sont

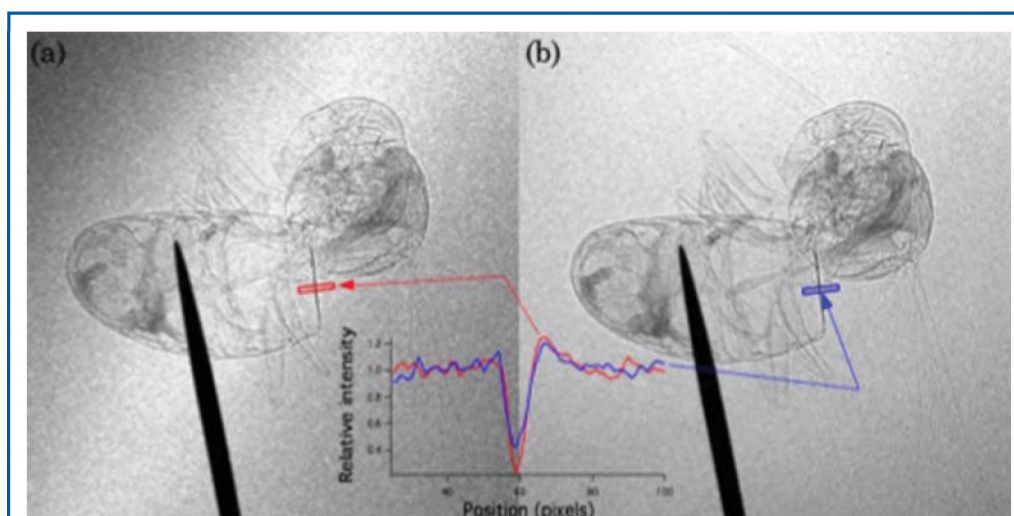


Fig. 3 Image d'une abeille par contraste de phase de rayons X produits par le rayonnement bêatron. (a) Un tir laser. (b) 13 tirs laser. Tiré de la référence [24].

généérées directement par le laser Ti : Saphir (0.8  $\mu\text{m}$ ). Ces longueurs d'onde peuvent être générées au moyen d'un OPA («optical parametric amplifier») à partir d'une impulsion standard à 0.8  $\mu\text{m}$ <sup>[29]</sup>. Le problème ici est cependant d'obtenir les énergies laser suffisantes aux longueurs d'onde et durées d'impulsion désirées. D'autres milieux que les gaz rares ont aussi été étudiés. En fait, en vaporisant une cible solide au moyen d'une première impulsion laser (plasma d'ablation), il devient possible d'étudier pratiquement l'ensemble du tableau périodique pour la GHOE<sup>[30]</sup>. Cette méthode a permis de mettre en évidence des effets nouveaux, pas encore totalement expliqués, qui n'ont pas été observés dans les gaz rares, comme par exemple l'amplification extraordinaire, observée notamment dans l'étain et l'indium, d'un harmonique spécifique lorsque

le plasma possède une raie d'absorption proche de cet harmonique<sup>[31]</sup>.

Une troisième façon de générer des harmoniques d'ordres élevés est d'utiliser une cible solide au lieu d'un gaz ou un plasma d'ablation. Dans ce cas, le mécanisme de GHOE est complètement différent et en principe il fonctionne d'autant mieux que l'intensité laser est élevée. La GHOE dans ce cas est causée par l'oscillation nonlinéaire de la surface de la cible solide sous l'effet du laser incident. Lorsque les électrons sont tirés hors de la cible solide par le champ électrique, ils compriment le faisceau incident sur un temps très bref et produisent des trains d'impulsions attosecondes ( $10^{-18}$  s) qui sont associés à un spectre d'harmoniques d'ordres élevés (par transformation de Fourier)<sup>[32]</sup>. Cette méthode a permis la GHOE jusqu'à plusieurs keV<sup>[33]</sup>. Il a été démontré que des cibles nanostructurées peuvent augmenter le rendement de conversion en harmoniques, ce qui ouvre encore plus de possibilités<sup>[34]</sup>.

Comme mentionné, les phénomènes très rapides d'émission d'électrons par effet tunnel ou d'oscillation de la surface solide qui se produisent lorsque l'amplitude de l'impulsion laser est proche de son maximum, conduisent à la génération de trains d'impulsions ayant des durées dans le domaine des attosecondes, soit beaucoup moins qu'une période du champ laser (2.7 femtosecondes à une longueur d'onde de 0.8  $\mu\text{m}$ ). La maîtrise de ces impulsions ouvre la voie à l'étude de

phénomènes extrêmement rapides se déroulant à l'échelle de l'attoseconde, soit principalement les déplacements des électrons dans les atomes et les molécules, et les effets collectifs dans les plasmas. (La période de l'orbite de l'électron dans l'état fondamental de l'atome d'hydrogène est d'environ 150 attosecondes.) L'attoscience est encore un domaine en émergence même si plusieurs travaux expérimentaux ont déjà employé les impulsions attosecondes pour observer et même contrôler des phénomènes se déroulant sur cette échelle de temps<sup>[35]</sup>.

## CONCLUSION : LE FUTUR

Comme nous l'avons démontré dans cet article, les impulsions laser ultra-brèves et intenses et les plasmas qu'elles génèrent sont appliqués dans une multitude de domaines allant de la dissection de tissus biologique à la génération de rayonnement X, en passant par l'accélération de particules à des vitesses ultra-relativistes. Le développement continu des sources laser permettra d'accéder à des durées plus courtes (attoseconde –  $10^{-18}$  s – ou même zeptoseconde –  $10^{-21}$  s), à un spectre de longueurs d'onde plus étendu, et à des intensités plus élevées. Actuellement, le projet européen ELI («Extreme Light Infrastructure»), en collaboration avec divers laboratoires dans le monde (dont l'INRS-EMT), est certainement le projet le plus ambitieux en ce qui concerne l'accession aux très hautes intensités. En concentrant l'énergie de plusieurs faisceaux laser dans un volume de l'ordre du  $\mu\text{m}^3$  et sur une durée de l'ordre de la femtoseconde, ELI vise une puissance de l'ordre de  $10^{17}$  W, ce qui représente deux ou trois ordres de grandeur de plus par rapport à ce qui est accessible actuellement. Cette puissance fantastique pourrait permettre d'étudier la structure du vide (par la création spontanée de paires électron-positron) et de reproduire en laboratoire les conditions qui ont régné durant les premières millisecondes du début de l'univers. ELI servira aussi à la conception d'accélérateurs compacts pour des applications en physique des particules, avec des retombées anticipées en sciences médicales et des matériaux. L'avenir des lasers intenses, des plasmas qu'ils génèrent et de leurs applications, s'annonce donc extrêmement passionnant et le laboratoire ALLS de l'INRS-EMT participe activement à façonner cet avenir.

## RÉFÉRENCES

1. J. Debras-Guédon and N. Liodec, "De l'utilisation du faisceau d'un amplificateur à ondes lumineuses par émission induite de rayonnement (laser à rubis), comme source énergétique pour l'excitation des spectres d'émission des éléments", *C.R. Acad Sci.* **257**, 3336 (1963).
2. P.D. Maker, R.W. Terhune and C.M. Savage, *Optical third harmonic generation*, Proceedings of the 3rd International Conference on Quantum Electronics, Paris, Columbia University Press, Vol. 2, 1559, 1964.
3. D. Strickland and G. Mourou, "Compression of amplified chirped optical pulses", *Opt. Commun.* **56**, 219 (1985).
4. Y. Ping, A.A. Correa, T. Ogitsu, E. Draeger, E. Schwegler, T. Ao, K. Widmann, D.F. Price, E. Lee, H. Tam, P.T. Springer, D. Hanson, I. Koslow, D. Prendergast, G. Collins, and A. Ng, "Warm dense matter created by isochoric laser heating", *High Energy Density Physics* **6**, 246 (2010).

5. D. Giulietti and L. A. Gizzi, "X-Ray Emission from Laser Produced Plasmas", *La Rivista del Nuovo Cimento*, **21**, 1 (1998).
6. D.S. Durrie and G.M. Kezirian, "Femtosecond laser versus mechanical keratome flaps in wavefront-guided laser in situ keratomileusis: Prospective contralateral eye study", *Journal of Cataract & Refractive Surgery* **31**, 120 (2005).
7. W. Krueer, *The physics of laser plasma interactions*, Addison-Wesley, 1988.
8. F. Brunel, "Not-so-resonant, resonant absorption", *Phys. Rev. Lett.* **59**, 52 (1987).
9. *Pulsed Laser Deposition of Thin Films*, edited by Douglas B. Chrisey and Graham K. Hubler, John Wiley & Sons, 1994.
10. D.A. Cremers and L.J. Radziemski. *Handbook of Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*, John Wiley & Sons, 2006.
11. J. Nuckolls, L. Wood, A. Thiesen, and G. Zimmerman, "Laser Compression of Matter to Super-High Densities: Thermonuclear (CTR) Applications", *Nature* **239**, 139 (1972).
12. L. Li, M. Hong, M. Schmidt, M. Zhong, A. Malshe, B. Huis in'tVeld, and V. Kovalenko, "Laser nano-manufacturing – State of the art and challenges", *CIRP Annals - Manufacturing Technology* **60**, 735 (2011).
13. L. Hoffart, P. Lassonde, F. Légaré, F. Vidal, N. Sanner, O. Utéza, M. Sentis, J.-C. Kieffer, and I. Brunette, "Surface ablation of corneal stroma with few-cycle laser pulses at 800 nm", *Optics Express* **19**, 230 (2011).
14. J.L.H. Chau, M.-C. Yang, T. Nakamura, S. Sato, C.-C. Yang, and C.-W. Cheng, "Fabrication of ZnO thin films by femtosecond pulsed laser deposition", *Optics & Laser Technology* **42**, 1337 (2010).
15. F. Vidal, T.W. Johnston, S. Laville, O. Barthelemy, M. Chaker, B. Le Drogoff, J. Margot, and M. Sabsabi, "Critical-point phase separation in laser ablation of conductors", *Phys. Rev. Lett.* **86**, 2573 (2001).
16. Y. Godwal, G. Kaigala, V. Hoang, S.-L. Lui, C. Backhouse, Y. Tsui, and R. Fedosejevs, "Elemental analysis using micro Laser-induced Breakdown Spectroscopy ( $\mu$ LIBS) in a microfluidic platform", *Optics Express* **18**, 12435 (2008).
17. A. Braun, G. Korn, X. Liu, D. Du, J. Squier, and G. Mourou, "Self-channeling of high-peak-power femtosecond laser pulses in air", *Optics Letters* **20**, 73 (1995).
18. B. La Fontaine, F. Vidal, Z. Jiang, C.Y. Chien, D. Comtois, A. Desparois, T.W. Johnston, J.-C. Kieffer, and H. Pépin, "Filamentation of ultrashort pulse laser beams resulting from their propagation over long distances in air", *Phys. Plasmas* **16**, 1615 (1999).
19. F. Vidal, D. Comtois, H. Pépin, T. Johnston, C.-Y. Chien, A. Desparois, J.-C. Kieffer, B. La Fontaine, F. Martin, F.A.M. Rizk, H.P. Mercure, and C. Potvin, "The control of lightning using lasers: properties of streamers and leaders in the presence of laser-produced ionization", *C. R. Physique* **3**, 1361 (2002).
20. H.L. Xu and S.L. Chin, "Femtosecond Laser Filamentation for Atmospheric Sensing", *Sensors* **11**, 32 (2011).
21. M. Châteauneuf, S. Payeur, J. Dubois, and J.-C. Kieffer, "Microwave guiding in air by a cylindrical filament array waveguide", *Appl. Phys. Lett.* **92**, 091104 (2008).
22. F. Vidal and T.W. Johnston, "Electromagnetic Beam Breakup: Multiple Filaments, Single Beam Equilibria, and Radiation", *Phys. Rev. Lett.* **77**, 1282 (1996).
23. W.P. Leemans, B. Nagler, A.J. Gonsalves, C. Toth, K. Nakamura, C.G.R. Geddes, E. Esarey, C.B. Schroeder, and S.M. Hooker, "GeV electron beams from centimetre-scale accelerator", *Nature Physics* **418**, 696 (2006).
24. S. Fourmaux, S. Corde, K. Ta Phuoc, P. Lassonde, G. Lebrun, S. Payeur, F. Martin, S. Sebban, V. Malka, A. Rousse, and J.C. Kieffer, "Single shot phase contrast imaging using laser-produced Betatron x-ray beams", *Optics Letters* **36**, 2426 (2011).
25. S. Fourmaux, S. Corde, K. Ta Phuoc, S. Buffechoux, S. Gnedyuk, A. Rousse, A. Krol and J.-C. Kieffer, *Initial steps towards imaging tumors during their irradiation by protons with the 200 TW laser at the Advanced Laser Light Source facility (ALLS)*, Proceedings of SPIE, 8079, Article Number: 80791I (2011).
26. P.B. Corkum, "Plasma Perspective on Strong-Field Multiphoton Ionization", *Phys. Rev. Lett.* **71**, 1994 (1993).
27. X.F. Li, A. L'Huillier, M. Ferray, L.A. Lompre, and G. Mainfray, "Multiple-harmonic generation in rare gases at high laser intensity", *Phys. Rev. A* **39**, 5751 (1989).
28. T. Popmintchev *et al.*, "Bright Coherent Ultrahigh Harmonics in the keV X-ray Regime from Mid-Infrared Femtosecond Lasers", *Science* **336**, 1288 (2012).
29. B.E. Schmidt, A.D. Shiner, M. Giguère, P. Lassonde, C.A. Trallero-Herrero, J.-C. Kieffer, P.B. Corkum, D.M. Villeneuve, and F. Légaré, "High harmonic generation with long-wavelength few-cycle laser pulses", *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **45**, 074008 (2012).
30. R.A. Ganeev, "Harmonic generation in laser-produced plasmas containing atoms, ions and clusters: a review", *J. Mod Opt.* **59**, 409 (2012).
31. L.-B. Elouga-Bom, F. Bouzid, F. Vidal, J.-C. Kieffer, and T. Ozaki, "Correlation of plasma ion densities and phase matching with the intensities of strong single high-order harmonics", *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **41**, 215401 (2008).
32. X. Lavocat-Dubuis, F. Vidal, J.-P. Matte, J.-C. Kieffer, and T. Ozaki, "Multiple attosecond pulse generation in relativistically laser-driven overdense plasmas", *New Journal of Physics* **13**, 023039 (2011).
33. B. Dromey, *et al.*, "Bright Multi-keV Harmonic Generation from Relativistically Oscillating Plasma Surfaces", *Phys. Rev. Lett.* **99**, 085001 (2007).
34. X. Lavocat-Dubuis and J.-P. Matte, "Numerical and theoretical study of the generation of extreme ultraviolet radiation by relativistic interaction with a grating", *Phys. Plasmas* **17**, 093105 (2010).
35. Z. Chang, *Fundamentals of Attosecond Optics*, CRC Press, 2011.

# LA GRAVURE PAR PLASMA: DÉFIS ET PERSPECTIVES

PAR JOËLLE MARGOT ET MOHAMED CHAKER

Depuis ses premiers développements dans les années 70 et son introduction dans les chaînes de fabrication de dispositifs, la gravure par plasma est devenue une des technologies majeures de la microélectronique par sa capacité à reproduire des motifs de plus en plus petits dans des matériaux de grande diversité. De manière plus générale, la gravure par plasma constitue actuellement la méthode dominante pour la reproduction de motifs de très faible dimension dans un grand nombre de domaines où ceux-ci sont requis. L'extraordinaire succès de la gravure par plasma est principalement dû à la rapidité et la souplesse offertes par cette méthode quand il s'agit de transférer des motifs et de contrôler leurs profils dans une vaste gamme de matériaux inorganiques et organiques. Pour cette raison, en plus de la microélectronique, la gravure par plasma a investi tous les secteurs requérant l'élaboration de micro- et nanostructures (photonique, composants RF, dispositifs biomédicaux, senseurs...). Dans le cas de la microélectronique, les tailles des dispositifs sont passées des dimensions supérieures au micromètre du début des années 80 aux quelques dizaines de nanomètres des plus récentes technologies. La tendance dans tous les domaines est à présent de repousser les limites de la technologie à des dimensions ultimes, compatibles avec le secteur émergent des nanotechnologies et de traiter de nouveaux matériaux avec peu de dommages. L'objectif du présent article est de présenter quelques exemples de réalisations obtenues au sein du regroupement Plasma-Québec en matière de gravure de couches minces.

## DÉFIS DE LA GRAVURE PAR PLASMA

La gravure par plasma tire généralement avantage des propriétés physico-chimiques des plasmas. Si le plasma est produit dans un gaz réactif (notamment fluoré ou chloré), les radicaux formés peuvent interagir avec le matériau pour produire des composés plus ou moins volatiles. Si la volatilité est suffisante, les composés s'évaporent spontanément: c'est ce qu'on appelle gravure chimique. Si au contraire elle n'est pas suffisante, l'impact ionique sur la surface peut parfois aider la désorption des composés: c'est la gravure chimique assistée par les ions. Enfin, dans certains cas, aucun composé ne peut se former en surface et ce sont alors les ions qui vont éjecter les atomes de la surface. On parle alors de pulvérisation qui est un processus de gravure purement physique. Dans un article célèbre de 1979,

John Coburn et Harold Winters<sup>[1]</sup> ont démontré que l'action simultanée des ions et des neutres réactifs engendre une synergie telle que la vitesse de gravure résultante est supérieure à la somme des vitesses de gravure chimique et physique seules. Ce résultat montre que le plasma constitue un outil exceptionnel pour la gravure puisqu'il permet de produire les deux types d'espèces simultanément. La quête de la chimie la plus adéquate constitue cependant un enjeu crucial dès lors que la gravure d'un nouveau matériau est requise. De plus, des études d'optimisation doivent être menées pour chaque nouveau cas envisagé puisque le résultat de la gravure dépend de manière souvent critique des rapports respectifs entre les flux d'ions et de neutres réactifs. Un excès de neutres résulte en effet en une gravure rapide mais isotrope, alors qu'un excès d'ions produira des motifs plus anisotropes, mais des taux de gravure plus faibles ou des dommages à la surface. On comprend donc que la gravure par plasma doit s'appuyer sur une bonne connaissance du plasma et de son interaction avec le matériau.

En dépit des nombreux succès enregistrés, les procédés de gravure par plasma se sont essentiellement développés de manière empirique. Il s'agit souvent de «recettes» développées par des utilisateurs pour des matériaux spécifiques et l'absence de réelle étude scientifique lors du développement du procédé limite la dissémination des connaissances. Par conséquent, excepté pour quelques matériaux types qui ont donné lieu à de nombreuses études, en particulier Si et SiO<sub>2</sub>, il n'existe que très peu de documents disponibles pour les matériaux non conventionnels utilisés en électronique, photonique et télécommunications. Parmi ces matériaux plus ou moins exotiques, citons les ferroélectriques (PLZT, BST, SBT), les électro-optiques (SrTiO<sub>3</sub>, LiNbO<sub>3</sub>, Ca<sub>0,28</sub>Ba<sub>0,76</sub>Nb<sub>2</sub>O<sub>6</sub> ou CBN), les matériaux à haute constante diélectrique (ZrO<sub>2</sub>, HfO<sub>2</sub>), à transition métal-isolant (VO<sub>2</sub>), à magnéto-résistance géante (LaSrMnO<sub>3</sub>, PrBaCaMnO<sub>3</sub>), les structures semi-conductrices II-VI (CdZnSe/ZnSe) et les conducteurs non conventionnels (Pt, IrO<sub>2</sub>, ITO, LaNiO<sub>3</sub>). L'optimisation de procédés pour ces divers matériaux constitue donc un défi de taille puisque les études ne peuvent s'appuyer sur pratiquement aucune donnée.

Un autre défi est lié à la qualité de gravure requise par les nouvelles applications. Par exemple, la



J. Margot <joelle.margot@umontreal.ca>, Département de Physique, Université de Montréal.

M. Chaker, INRS-Energie, Matériaux

diminution continue de la taille des transistors en micro-électronique pose des conditions draconiennes sur la tolérance en matière d'anisotropie (vitesse verticale/vitesse horizontale) et de rugosité des parois latérales. Les besoins de rapports d'aspect élevés (rapport profondeur/largeur des motifs) se sont considérablement accrus, motivant les études de gravure dite profonde, alors que les masques de résine deviennent de plus en plus minces à cause de la diminution de la profondeur de champ des nouvelles techniques lithographiques. Ceci requiert l'obtention de sélectivités élevées et conséquemment une très bonne compréhension de la physico-chimie de l'interaction plasma-matériau. D'autres aspects à prendre en considération sont la nécessité d'éviter la non-uniformité microscopique (*i.e.* la dépendance du taux de gravure sur la dimension du motif), la contamination de la surface et les dommages au matériau. Certaines études de ce type sont consacrées à des cas de matériaux simples comme le silicium ou l'oxyde de silicium. Cependant, en ce qui a trait aux matériaux complexes tels que ceux mentionnés ci-dessus, on ne trouve que des études encore fort fractionnaires et le plus souvent élémentaires.

## SOURCES DE PLASMA POUR LA GRAVURE

Au cours des années, les sources de plasma employées pour la gravure ont également considérablement évolué. Les performances limitées des décharges capacitatives ont conduit à la mise au point de systèmes tels que les plasmas ECR (résonance cyclotronique électronique) et les décharges à couplage inductif, ICP pour ne citer que ceux-ci [2]. Ils ont en commun leur fonctionnement en régime de basse pression (généralement inférieure à 10 mTorr) et leur forte densité de particules chargées qui peut être de 4 ordres de grandeur plus élevée que celle des décharges capacitatives. Dans de telles conditions, il est possible d'atteindre des rapports de flux d'ions sur flux de neutres élevés tout en maintenant des températures de neutres faibles. D'autres aspects intéressants sont un potentiel de plasma relativement faible et la possibilité de contrôler de manière indépendante l'énergie et le flux des ions bombardant la surface. Toutes ces caractéristiques procurent un avantage notoire, par exemple dans le cadre de la reproduction de motifs nanométriques ou possédant des rapports d'aspect élevés ou encore lorsqu'il s'agit de graver des matériaux réputés difficiles.

La physico-chimie des plasmas de gravure est complexe, notamment lorsque le gaz plasmagène est fluoré ou chloré. Par exemple, la Fig. 1 montre l'influence de la pression du gaz sur la concentration des ions positifs  $F^+$ ,  $S^+$ ,  $SF^+$ ,  $SF_2^+$ ,  $SF_3^+$ ,  $SF_5^+$ , and  $SFO^+$  dans un plasma de  $SF_6$  (Fig. 1a) et dans un plasma argon/ $SF_6$  à 1 mTorr (Fig. 1b). On notera que même en absence d'oxygène dans le mélange plasmagène, on observe un composé oxygéné  $SFO^+$  dû à la gravure des parois et fenêtres diélectriques. De telles contaminations sont fréquentes dans les plasmas de gravure et doivent être contrôlées. On constate

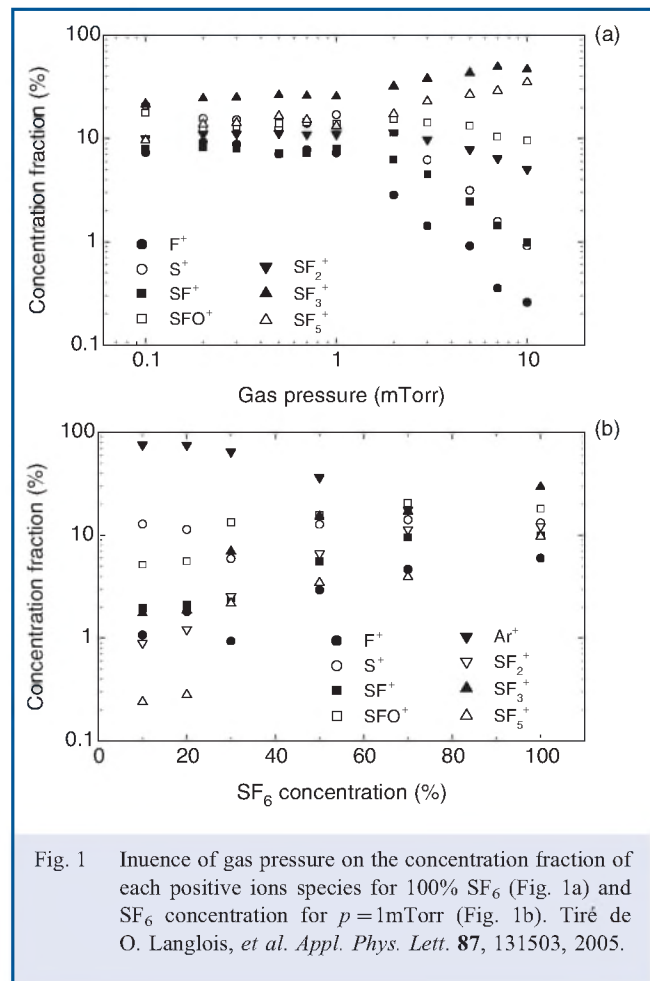


Fig. 1 Influence of gas pressure on the concentration fraction of each positive ions species for 100%  $SF_6$  (Fig. 1a) and  $SF_6$  concentration for  $p = 1$  mTorr (Fig. 1b). Tiré de O. Langlois, *et al. Appl. Phys. Lett.* **87**, 131503, 2005.

également que l'ion dominant est  $SF_3^+$  pour toutes les pressions examinées. En ce qui concerne les autres espèces, les ions légers prennent davantage d'importance à faible pression alors que la concentration des ions lourds augmente significativement avec la pression, ce qui résulte en un accroissement de la masse effective des ions.

## GRAVURE D'OXYDES À COMPOSANTS MULTIPLES

Au cours de la dernière décennie, nous nous sommes intéressés à la gravure de divers matériaux qui présentent un défi technologique pour leur intégration dans des dispositifs. C'est dans ce contexte que nous avons notamment étudié la gravure d'oxydes à composants multiples tels que  $BaSrTiO_3$  (BST),  $SrTiO_3$  (STO) et  $CaBaNb_2O_6$  (CBN). Ces matériaux ont un intérêt majeur pour plusieurs applications dont la fabrication de dispositifs radiofréquence (BST), optiques (STO) et électro-optiques (CBN). La gravure de ces matériaux présente plusieurs défis car leur réactivité chimique vis-à-vis des gaz plasmagènes usuels en gravure, comme les gaz chlorés ou fluorés est très faible. Par exemple, la Fig. 2 montre le

rendement de gravure<sup>1</sup> en fonction de l'énergie des ions (*i.e.* énergie d'accélération par application d'un potentiel au substrat plus le potentiel du plasma) dans le cas du CBN gravé dans du chlore et de l'argon. On remarque que le seuil de gravure est sensiblement le même dans l'argon et le chlore à 1 mTorr, ce qui suggère qu'aucune chimie n'est impliquée dans le processus et que le mécanisme de gravure est la pulvérisation. Lorsque la pression augmente, le seuil de gravure se déplace vers les hautes énergies et le rendement diminue. Ceci indique que la gravure est de moins en moins efficace et suggère qu'une couche superficielle bloque l'accès des espèces au matériau. De fait, des observations SIMS (secondary ion mass spectrometry) indiquent la présence en surface de composés  $\text{BaCl}_2$  and  $\text{NbCl}_2$  qui ne sont pas volatiles dans les conditions utilisées. Des résultats similaires sont obtenus pour le STO dans un mélange argon/ $\text{SF}_6$ . A l'évidence, ces matériaux ne semblent pas présenter de forte réactivité chimique ou alors forment des composés non volatils que l'impact ionique ne suffit pas à éjecter de la surface.

Afin de déterminer si des réactions chimiques peuvent être activées lorsque la température de surface croît, nous avons mesuré la dépendance du rendement de gravure sur la température de la surface du CBN. La Fig. 3 présente les résultats obtenus sous forme de diagramme d'Arrhenius dans des plasmas d'argon, de chlore et de mélange Ar/ $\text{SF}_6$ .

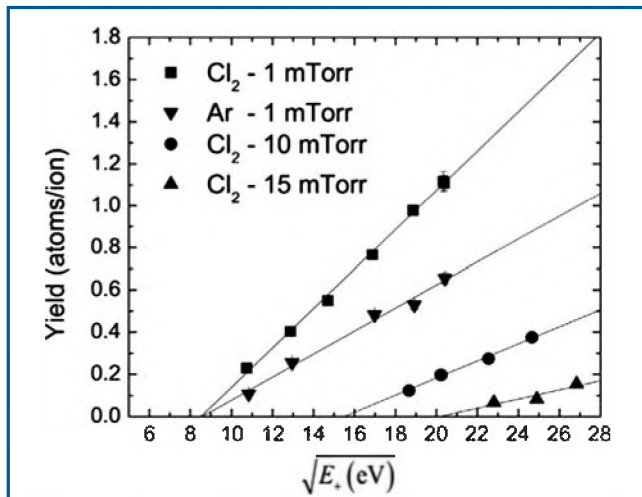


Fig. 2 Dépendance du rendement de gravure du CBN sur l'énergie des ions dans un plasma à couplage inductif produit à 1 mTorr dans l'argon et à 1, 10 et 15 mTorr dans le chlore. Tiré de Bérubé *et al.*, *J. Appl. Phys.* **106**, 063302, 2009.

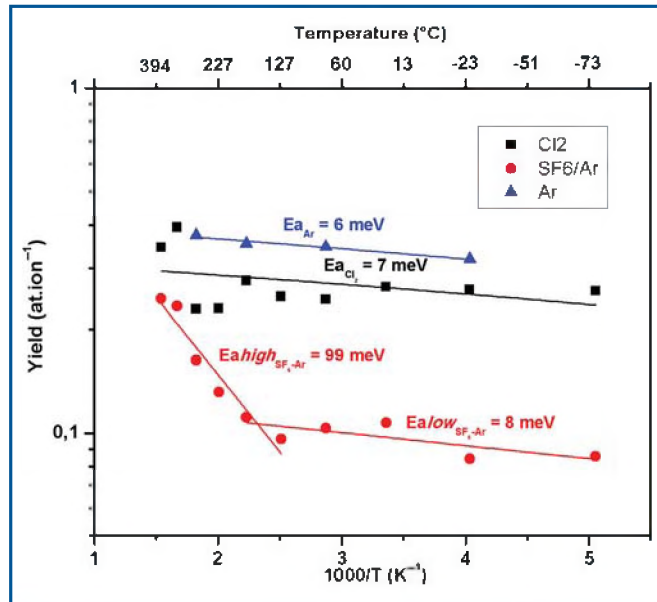


Fig. 3 Diagramme d'Arrhenius illustrant la dépendance du rendement de gravure sur la température de la surface du CBN dans des plasmas d'argon, de chlore et de mélange Ar/ $\text{SF}_6$ .

On remarque que dans tous les cas, les températures d'activation caractérisées par les pentes des courbes observées sont très faibles (typiquement quelques meV), la seule exception étant au-dessus de 150°C dans le mélange Ar/ $\text{SF}_6$  où la température d'activation atteint une centaine de meV. Cette valeur demeure toutefois bien en-dessous de ce qui caractérise une gravure chimique. Ainsi, la gravure du CBN est complètement contrôlée par la pulvérisation.

### CONTRÔLE DU REDÉPÔT DANS LA GRAVURE PAR PULVÉRISATION

Nos travaux passés ont largement montré que pour des matériaux réputés difficiles à graver, les plasmas de haute densité sont capables de fournir des taux de gravure raisonnables avec une bonne sélectivité et l'absence de matériau redéposé sur les arêtes du motif<sup>[3]</sup>. Par exemple, la Fig. 4 montre des motifs obtenus dans des couches minces de platine, un métal présentant une grande inertie chimique. On remarque qu'il est possible d'obtenir des gravures de qualité à basse pression. Par contre, un redépôt significatif commence à apparaître à une pression de 2.5 mTorr et devient important au-delà de 7 mTorr, c'est-à-dire dans le régime de pression à partir duquel opèrent les décharges capacitatives. L'effet de pression observé sur la quantité de redépôt suggère que

1. Par analogie avec le rendement de pulvérisation défini comme le nombre d'atomes pulvérisés de la surface par ion incident, nous définissons le rendement de gravure comme la vitesse de gravure divisée par le flux d'ions incidents et multipliée par la densité atomique du matériau. L'utilisation du rendement de gravure plutôt que de la vitesse de gravure permet de s'affranchir de la dépendance de celle-ci sur le flux d'ions positifs qui diffère selon les conditions expérimentales (pression, nature du gaz, puissance, etc.).

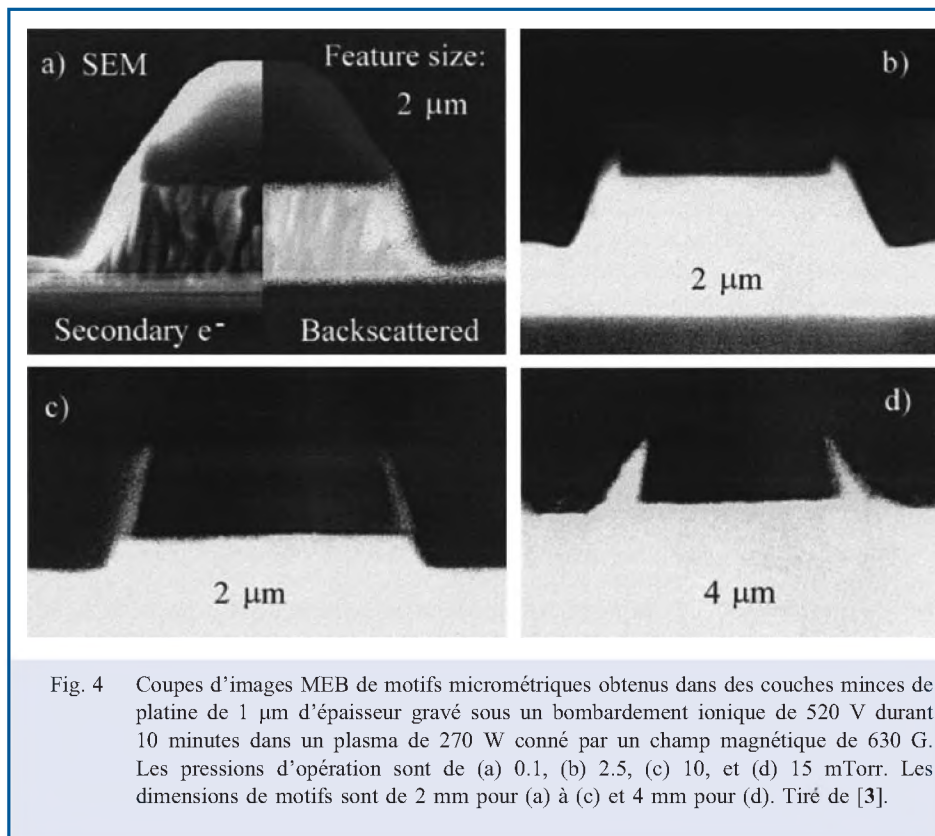


Fig. 4 Coupes d'images MEB de motifs micrométriques obtenus dans des couches minces de platine de  $1 \mu\text{m}$  d'épaisseur gravé sous un bombardement ionique de 520 V durant 10 minutes dans un plasma de 270 W conné par un champ magnétique de 630 G. Les pressions d'opération sont de (a) 0.1, (b) 2.5, (c) 10, et (d) 15 mTorr. Les dimensions de motifs sont de 2 mm pour (a) à (c) et 4 mm pour (d). Tiré de [3].

## CONCLUSION

La gravure par plasma constitue un extraordinaire outil pour transférer des motifs de taille réduite dans des matériaux divers. L'étude de la gravure dans des oxydes à composants multiples a permis de montrer que ces matériaux sont extrêmement inertes chimiquement et que leur gravure est dominée par la pulvérisation, ce qui rend leur intégration dans des dispositifs difficile, à moins d'identifier d'autres voies. Selon les avenues que nous avons explorées, seul un accroissement significatif de la température de surface pourrait permettre de favoriser des mécanismes chimiques. Un tel accroissement est cependant problématique, notamment pour la tenue des résines. Nous avons également montré que la pulvérisation physique est également dominante pour la gravure d'un métal tel que le platine. Dans ce cas, nous avons constaté qu'un important

celui-ci est dû à une interaction entre le matériau pulvérisé et le plasma. De fait, en effectuant des gravures sur des surfaces nues de platine (*i.e.* sans motifs), nous avons été capables d'observer et quantifier le redépôt indirect dû au recollage des espèces pulvérisées sur la surface après interaction avec la phase gazeuse<sup>[4]</sup>. Ainsi, nous avons estimé que dans le cas du platine et du BST, le redépôt indirect peut atteindre plus de 90% lorsque la pression d'opération est de 10 mTorr. L'élaboration de motifs en forme de T inversé nous a permis d'isoler ce redépôt indirect du redépôt direct (ou balistique), c'est-à-dire le dépôt simplement dû au collage des espèces éjectées sur les parois des motifs que leur trajectoire intercepte. Un exemple de redépôt balistique est présenté sur la Fig. 5 et comparé avec le profil simulé à l'aide d'un code numérique basé sur un modèle cellulaire couplé à des techniques Monte-Carlo<sup>[5]</sup>. On constate que ce dépôt se manifeste par une fine couche de platine sur la partie supérieure du motif en T inversé. En comparaison, la Fig. 6 montre un résultat obtenu à 30 mTorr. Dans ce cas, on observe une couche importante sur le côté inférieur du motif ainsi que sur le fond. Ce redépôt ne peut s'expliquer par le dépôt direct de platine éjecté du motif. Il est par conséquent dû à un retour des atomes de platine ayant atteint la zone extérieure du motif. La simulation reproduit cet effet en supposant un retour isotrope des espèces pulvérisées vers la surface.

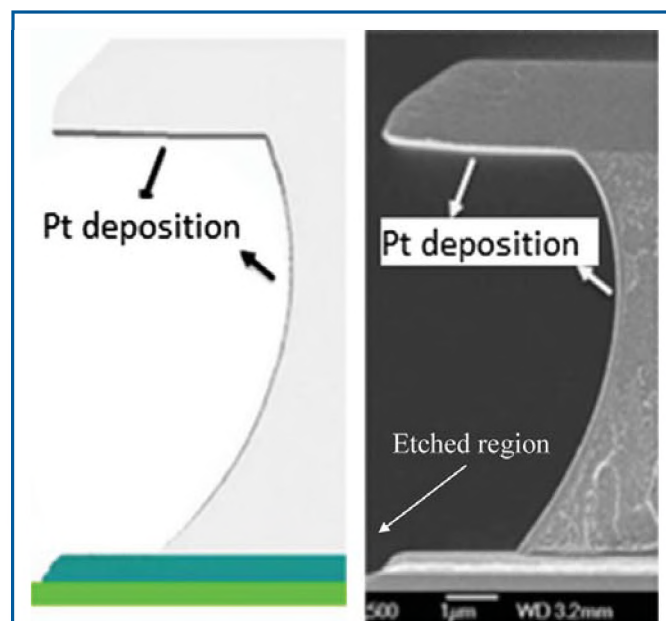


Fig. 5 Redépôt observé (à droite) et simulé (à gauche) pour le platine gravé dans un plasma d'argon à 1 mTorr et une tension d'accélération ionique de 125 V. Adapté du mémoire de maîtrise de M. Laberge.



redépôt de matière pulvérisée se produit, ce qui limite considérablement le taux de gravure effectif et contamine les motifs. Le recours à un plasma opérant à très basse pression (typiquement 1 mTorr) est alors un avantage considérable puisqu'à cette pression, seul le redépôt balistique se manifeste.

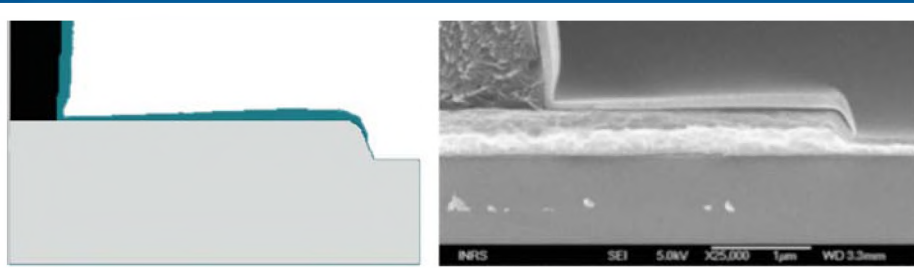


Fig. 6 Redépôt observé (à droite) et simulé (à gauche) pour le platine gravé dans un plasma d'argon à 30 mTorr et une tension d'accélération ionique de 125 V. Adapté du mémoire de maîtrise de M. Laberge.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs sont reconnaissants envers les différentes personnes

ayant contribué aux travaux présentés, étudiants, stagiaires postdoctoraux, personnel professionnel et technique. Parmi

ceux-ci, ils tiennent en particulier à souligner le travail de S. Delprat, M. Laberge, J. Saussac, L. Stafford et S. Vigne.

## REFERENCES

1. J.W. Coburn and H. F. Winters, *J. Appl. Phys.* **50**, 3189 (1979).
2. Oleg A. Popov, *High Density Plasma Sources: Design, Physics, and Performance*, Noyes Publications, 1995.
3. S. Delprat, M. Chaker and J. Margot, *J. Appl. Phys.* **89**, 29 (2001).
4. L. Stafford, J. Margot, S. Delprat, M. Chaker, et S. Pearton, *J. Appl. Phys.* **101**, 083303, (2007).
5. J. Saussac, J. Margot and M. Chaker, **27**, 130 (2009).

# QUANTUM INFORMATION FROM THE FOUNDATIONS TO A NEW TECHNOLOGY (HERZBERG MEMORIAL PUBLIC LECTURE 2012)

BY ANTON ZEILINGER



When I first learned quantum mechanics, I was immediately fascinated by the field. Most impressive was its immense mathematical beauty, which is particularly striking in the Dirac Formalism. Or, if one looks at the Schrödinger Equation: How is it possible that very few mathematical symbols comprise such a breadth of phenomena, all the way from subatomic particles via solid state systems to the physics of the early universe?

But I was also immediately attracted by the fact that apparently, there were problems in understanding what the theory means in a deep sense. Even well-known and famous textbooks somehow tried to avoid the subject of interpretation or analyzed it in a very formal manner. Very soon, I realized that there were actually discussions going on about the philosophical and conceptual consequences of quantum mechanics. But the positions often disagreed strongly.

Anton Zeilinger  
<anton.zeilinger@univie.ac.at>,  
University of Vienna,  
Austrian Academy  
of Sciences.

## INTRODUCTORY REMARKS

I am very grateful for the invitation to give the 2012 Herzberg Memorial Lecture at the occasion of the Annual Meeting of the Canadian Association of Physicists and I am glad to give the lecture in a country where my field of research – foundations of quantum mechanics and quantum information science – has developed very strongly in recent years. This has put Canada among the top countries in the world in the field. It is a particular pleasure to give the lecture here in Calgary. I had the opportunity to see the activities in quantum computing and quantum information science evolve here from the very beginning to the present status. Today the Institute for Quantum Information Science under the leadership of Barry Sanders boasts a unique combination of people with very diverse backgrounds, which is characteristic for the field of quantum information science and certainly important for its future development.

I was totally fascinated by the predictions of quantum mechanics in many ways, particularly by the predictions about the behavior of individual quantum particles. So very soon, already as a student, I became interested in the question whether it would be possible to perform such experiments some day in the laboratory.

So, having worked on my PhD thesis under Helmut Rauch in Vienna on investigations of magnetism using polarized neutron scattering, I was very happy when he invited me to join his pioneering work on neutron interferometry. My first contribution to the field was my participation in the experiment demonstrating that the state of a quantum system rotated by 360 degrees picks up a phase factor of  $-1$ . That experiment was done in parallel also by the group of Sam Werner in Missouri. This result is probably one of the first in the foundations of quantum mechanics which has later been applied in quantum information science. Today, the phase change of a quantum state upon a complete Rabi cycle is ubiquitous, for example in quantum computation. But I am jumping ahead.

The story is quickly told. When quantum mechanics was invented in the first quarter of the 20<sup>th</sup> century, it was immediately clear that it leads to new counter-intuitive predictions for the behavior of individual quantum systems. This was already realized by Max Planck himself. For many years, he searched unsuccessfully for another derivation of the black body radiation, which would not use the quantum concept with the built-in discontinuity that Planck disliked.

Likewise, Einstein – after he had introduced the concept of particles of light (later by Lewis called photons) – soon realized the tension between the particle concept and interference. In the 1909 meeting of the Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte in Salzburg, he analyzed the question of whether a double-slit interference pattern would arise if single photons would pass one by one through the apparatus. His prediction was to the negative, as in his opinion, each particle has to go through either slit only. It therefore cannot carry information whether the other one is open or not. He expected interference to be due to many particles passing through the slits. When they meet at the observation screen, they jointly carry the information that both slits are open. Thus, the interference pattern can arise for high intensities only.

This is clearly one case where Einstein was wrong, as single-particle interference has today been demonstrated in many experiments, not only with photons, but also with systems such as fullerenes or even larger molecules. Quantum interference of states of individual systems is at the heart of many quantum computation protocols today.

Another point which had worried Einstein is the randomness of individual quantum events. It is remarkable that as early as 1917, he expressed his discomfort about the new role randomness plays in quantum physics. So he had realized already then that – while in classical physics randomness is a measure of ignorance – in quantum physics the randomness of the individual event is fundamental and irreducible. It is quite remarkable that he found this before the full theory had been developed by Heisenberg and Schrödinger, which came in 1925 and 1926. In a letter to Max Born of 4.12.1926, Albert Einstein explicitly said: “In any case, I am convinced that God does not play dice.” Actually, he used the word “der Alte”, the old guy, for God, expressing some special kind of familiarity.

Today, the randomness of individual quantum events is at the heart of quantum random number generators, which by all standards are the best available random number generators by any method, be it physical or mathematical. In my group, particularly with Thomas Jennewein, now at the Institute for Quantum Computing (IQC) at the University of Waterloo, we developed a random number generator which is based on a 50/50 beam splitter (see Figure 1). The random numbers

generated that way pass all available tests, and a company to whom we had sent a couple of CDs full of these numbers told us that these were the best random numbers they had ever seen. So this is another case of a fundamental quantum phenomenon in an information context. Good random numbers are useful in many applications.

With the development of the full quantum theory in 1925 and 1926 by Heisenberg and Schrödinger, the debate about its meaning and its philosophical foundation gained significant momentum. Maybe best known is the debate between Bohr and Einstein which took place mainly at the occasion of conferences, for example the 1927 and 1930 Solvay Meetings in Brussels. The essence of these discussions was basically that Albert Einstein requested physics to describe a reality which exists independent of the observer and Niels Bohr held the position that physics primarily concerns what can be said about nature and that all conclusions about reality are indirect.

The workhorse tool of many of these discussions, including the Bohr-Einstein debate, were gedanken experiments which were invented to analyze very clearly the behavior of individual quantum systems in specific situations. It is part of the history of the field of quantum information that many of these gedanken experiments became possible in the 1970s due to technological progress. The main reasons were on the one hand the development of the laser, making possible experiments with photons, particularly on photonic entanglement, and on the other hand the construction of high-flux nuclear reactors, which provided neutron sources, making possible experiments in neutron interferometry.

The direct discussion between Einstein and Bohr was stopped by the tragic political developments in Germany. Einstein immediately decided to emigrate to the United States. But in 1935, a momentous indirect discussion happened. Einstein, together with Boris Podolsky and Nathan Rosen (EPR), published a paper [2] where they suggest that quantum mechanics is incomplete. This was the first paper where the fact that quantum correlations can be stronger than classical correlations was explicitly discussed. Erwin Schrödinger in the same year, in two papers, one in German and one in English, coined the notion of entanglement (in German “Verschränkung”) to describe this new feature of quantum correlations.

Considering two systems which are entangled both in position and in momentum, EPR argued that quantum mechanics is incomplete because, based on the measurement of one of the two quantum systems, one can predict with certainty the corresponding value for the other one. So, if one measures the momentum of one system, one can predict the momentum of the other one with certainty. If one measures the position of the first system, one can predict with certainty the position of the other one. And, following EPR, since the two systems no longer interact, the real physical properties of the second system must be independent of the specific measurement done to the first.

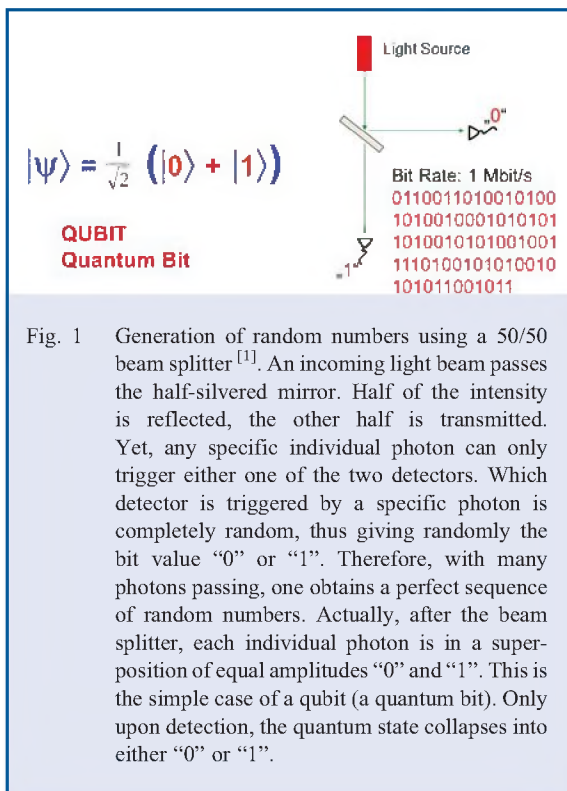


Fig. 1 Generation of random numbers using a 50/50 beam splitter [1]. An incoming light beam passes the half-silvered mirror. Half of the intensity is reflected, the other half is transmitted. Yet, any specific individual photon can only trigger either one of the two detectors. Which detector is triggered by a specific photon is completely random, thus giving randomly the bit value “0” or “1”. Therefore, with many photons passing, one obtains a perfect sequence of random numbers. Actually, after the beam splitter, each individual photon is in a superposition of equal amplitudes “0” and “1”. This is the simple case of a qubit (a quantum bit). Only upon detection, the quantum state collapses into either “0” or “1”.

But Heisenberg's uncertainty principle precludes both position and momentum for one system to be well defined together. Therefore, quantum mechanics must be incomplete, so EPR.

The impact of the EPR paper has a very interesting intellectual history (Figure 2). Immediately after it appeared, the paper received very few citations. The citations were not that bad. Two were those from Schrödinger already mentioned and one was from Bohr. Bohr's position is rather complex, and it is difficult to do it full justice. Basically, he said that measurement on one of the two particles immediately changes the possible predictions one can make for the other one. This may be seen as saying that the quantum state of an entangled system cannot be seen as describing the individual particles separately.

And then, the paper was basically ignored for a long time. So that paper would not have gotten Einstein tenure, according to today's procedures. But later, two remarkable things happened. Firstly, as one sees, the citations really picked up again in the 1960s. This was when John Bell found out that local realism, the philosophical conceptual position of the EPR paper, is in contradiction to quantum mechanics. And in the 1990s, it was discovered that entanglement plays a fundamental role in quantum information concepts.

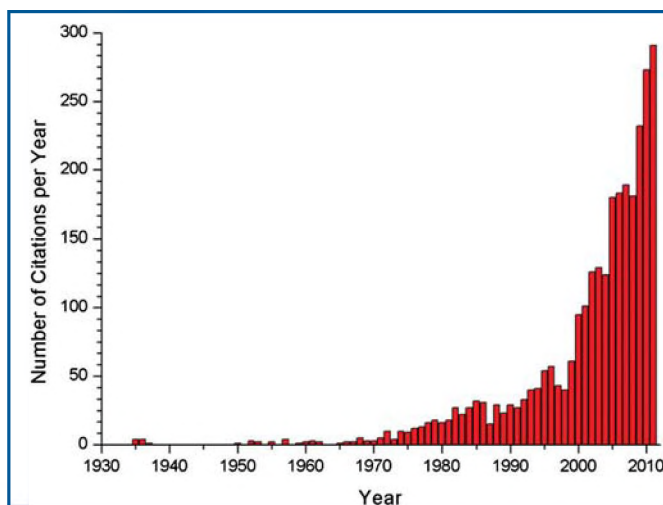


Fig. 2 Number of citations of the original Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) paper of 1935. In the beginning, the paper had very few citations, and then it was essentially ignored for a long time. The first rise came after, in the 1960s, John Bell showed that the local realistic world view exposed in the EPR paper is in conflict with the predictions of quantum mechanics. The really big surge started around 2000. At that time, it turned out that quantum entanglement is a fundamental concept in many quantum information protocols, including quantum computation, quantum teleportation and some versions of quantum cryptography.

It is the position of local realism to assume (a) that systems carry real properties which then determine all measurement results (realism) and (b) that an observation here and now is independent of what somebody else does at the very same time at a distant location (locality). John Bell showed that one can very well explain the perfect correlations between two entangled systems using such local realistic properties. Surprisingly, he found that nonperfect correlations, *i.e.* superpositions for either particle, are such that the local realistic model is in conflict with quantum mechanics. The mathematical formulation of that fact is Bell's inequality. A way to also see the implications of Bell's inequality is that basically, there are situations where classical correlations cannot be as strong as those predicted by quantum mechanics. Today, many experiments have confirmed the predictions of quantum mechanics. Furthermore, as mentioned already, quantum entanglement has become a workhorse in many quantum information protocols.

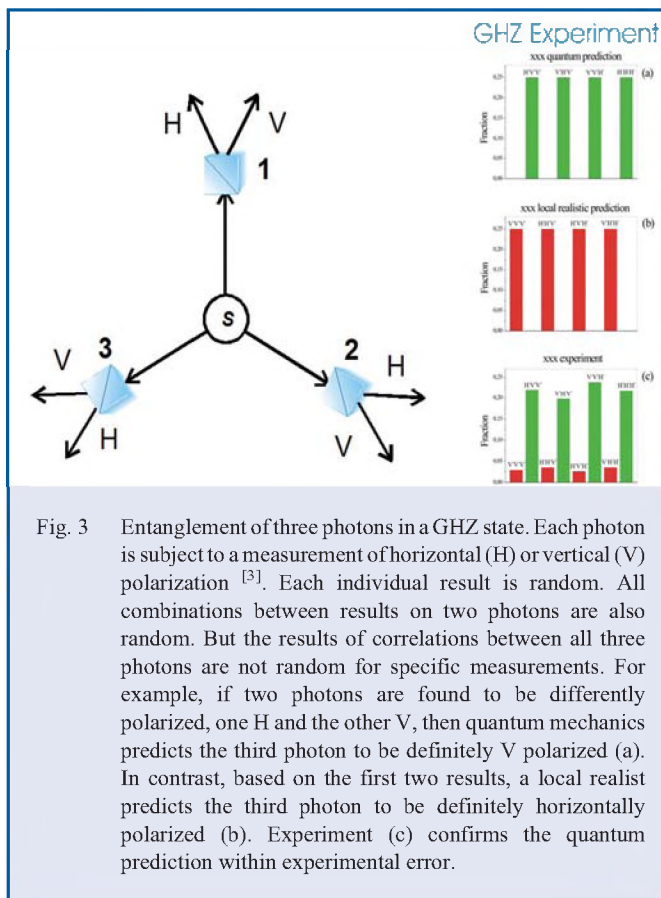
I became interested in quantum entanglement in the early 1980s. At that time, I had been working at the neutron diffraction laboratory at MIT, doing neutron interferometry. At our lab, Mike Horne was a regular visitor who had contributed early to propose various possibilities to test Bell's inequalities in experiment. Together with him, we proposed the first interferometer-based realization of quantum entanglement. This was also the first proposal employing entanglement of momentum, *i.e.* an external variable. Up to that time, all entanglement experiments and proposals had been using internal variables, like spin for example.

Then, in 1987, Danny Greenberger, whom I also had known from my MIT days, visited me in Vienna as a Fulbright Professor. On the first day, we sat down together to decide what we wanted to do. It turned out that we both had been wondering whether anything new might happen if one studies entanglement beyond two particles. To our great surprise, we found cases of entanglement of three or more particles where something completely new and unexpected was predicted by quantum mechanics. These are situations where, based on measurements on two of the particles, one can predict with certainty what the respective property of the third is.

For example, in specific cases, when you know the measurement results of the spins of two spin  $\frac{1}{2}$  particles entangled with each other and with a third particle, a quantum physicist can predict with certainty what the spin of the third particle is. But remarkably, for the same experimental situation, a local realist would predict exactly the opposite. Both base their predictions on the same results of the first two particles. So this was very striking. There was a contradiction which was not statistical any more, between quantum mechanics and local realism. It was a definite prediction for each individual particle. We were very surprised by that discovery, because we would have expected, in hindsight naïvely, that quantum mechanics would agree with classical physics at least in those cases where one can make predictions with unit probability, that is, with certainty.

After we had discovered this, it became my scientific goal to realize such states in the laboratory, that is, to go beyond two-particle entanglement. It turned out that this was much more demanding and challenging than I had expected. We had to develop many new tools. For instance, nobody at that time had any realistic idea based on the experimental technology at that time, how to produce three-particle entanglement. What we came up with was to have two pairs of entangled particles and to subject one of the four particles to a measurement which erases any information to which of the two pairs it belonged. Then the other three are entangled! Finally, in 1998, we succeeded in performing the experiment (Figure 3), confirming perfectly the predictions of quantum mechanics.

Along the way, we developed many tools which today have become important in quantum information protocols. A characteristic example is quantum teleportation. When it was first suggested by Bennett, Brassard, Crépeau, Jozsa, Peres and Wootters in 1993<sup>[4]</sup>, our immediate reaction was that this is completely impossible to do. At that time, we were not aware of the fact yet that on the long road towards realizing three-particle entanglement, we already were working on developing the right tools to also do quantum teleportation. So in 1997, we finally succeeded.



Today, the multi-particle states which we found are called GHZ states, after the authors, where H refers to Horne. To our surprise, it turned out that GHZ states are not only of fundamental interest. They are today an essential workhorse in many quantum information and quantum computation paradigms, to the point that they are now a PACS entry.

If we talk a little bit about the present situation and the future development of quantum information, the application which is most advanced is quantum cryptography. This has been discussed in detail in the Herzberg Memorial Lecture by Raymond Laflamme in 2008<sup>[5]</sup>. The present situation is such that distances of more than 100 km can be covered. Most interestingly, it turns out that entanglement-based quantum cryptography offers strong security in the following sense. Suppose you are a customer of a quantum cryptography provider. You want to be absolutely certain that nobody listens in. When a provider uses quantum entanglement to supply the secret key, which you use for encoding information, you can easily check whether he is playing fair or not. You simply check for a sub-set of the measurements on the two particles, whether they violate a Bell inequality. If this is the case with a sufficient safety margin, then you do not need to know which devices the provider is actually using. But ideally, this implies that the test of Bell's inequalities is loophole-free, which at present is not the case for long distances yet. A loophole-free experiment means that a sufficiently large subset of all particles is measured, typically about two thirds. Then, no local realistic explanation will be possible any more, and any action of an eavesdropper would lead to a breakdown of entanglement and therefore make the data look unentangled. Thus, the action of the eavesdropper can easily be discovered, making the communication secure. It is to be expected that such a loophole-free long-distance quantum experiment with photons will be performed within reasonable time.

A more futuristic application is quantum teleportation. It is generally understood that quantum teleportation and its generalization to quantum repeaters is an ideal way how future quantum computers could communicate with each other. It will allow teleportation of a quantum state from the output of one quantum computer to the input of another one. To demonstrate the feasibility of long-distance teleportation, recently experiments were performed in China by the group of Jian-Wei Pan<sup>[6]</sup> and by my group in Vienna.

The arrangement and the set-up of our teleportation experiment<sup>[7]</sup> between the Canary Islands of La Palma and Tenerife are shown in Figure 4. That experiment demonstrated that it is possible to teleport individual quantum states between these islands over distances of 143 km. Both the Chinese experiment and ours provide convincing proof that quantum communication with low-flying satellites is possible, even at the advanced level of teleporting a quantum state up to a satellite or down from a satellite. In the long run, we are working on doing quantum communication and quantum teleportation in space, this time in collaboration with the group of Jian-Wei Pan at the Chinese Academy of Sciences.

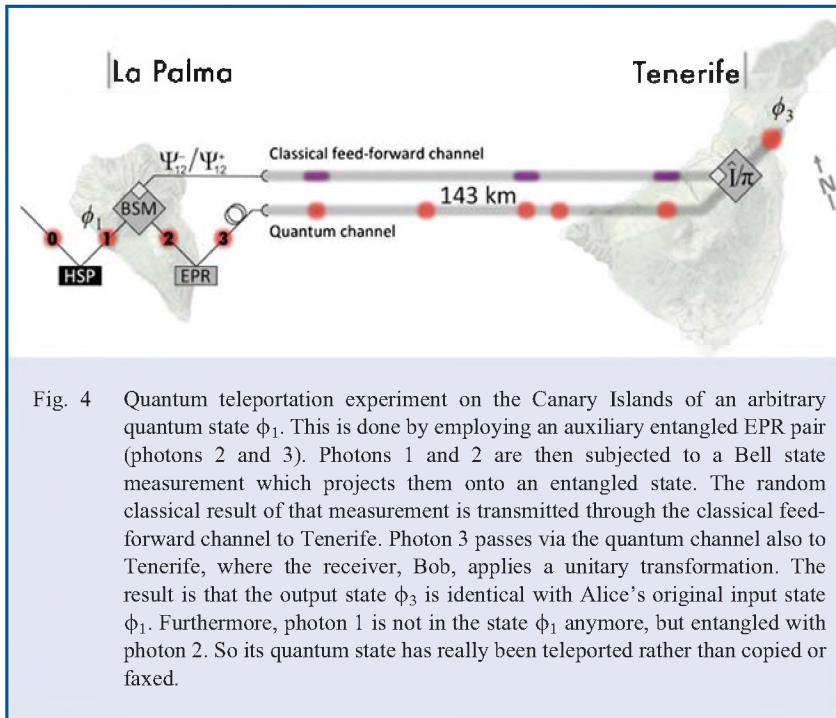


Fig. 4 Quantum teleportation experiment on the Canary Islands of an arbitrary quantum state  $\phi_1$ . This is done by employing an auxiliary entangled EPR pair (photons 2 and 3). Photons 1 and 2 are then subjected to a Bell state measurement which projects them onto an entangled state. The random classical result of that measurement is transmitted through the classical feed-forward channel to Tenerife. Photon 3 passes via the quantum channel also to Tenerife, where the receiver, Bob, applies a unitary transformation. The result is that the output state  $\phi_3$  is identical with Alice's original input state  $\phi_1$ . Furthermore, photon 1 is not in the state  $\phi_1$  anymore, but entangled with photon 2. So its quantum state has really been teleported rather than copied or faxed.

Figure 5 shows an artist's sketch of a futuristic experiment for the long-distance distribution of entanglement using the International Space Station ISS. It is evident that such an

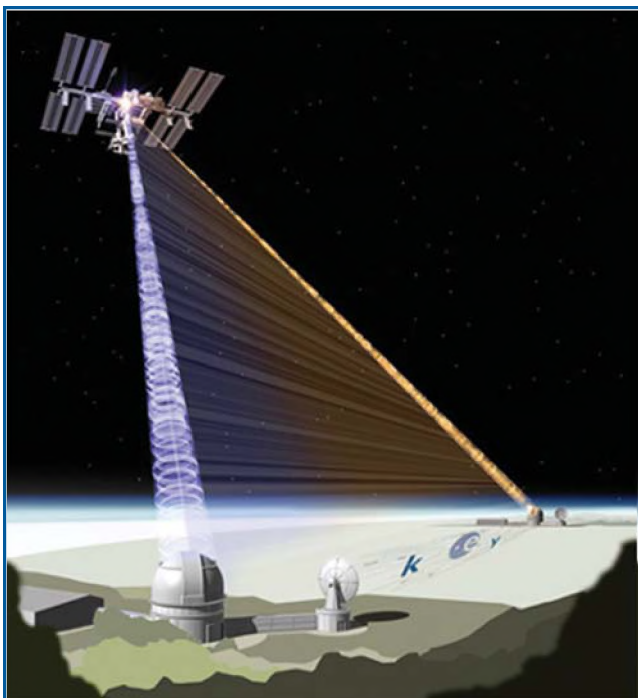


Fig. 5 Artist's sketch of a futuristic quantum entanglement experiment using the International Space Station ISS.

experiment is very challenging, as we have a moving source for the entangled state. But on the other hand, the big advantage of space-based quantum communication is that these photons only have to traverse a few kilometers of atmosphere, which leads to a much lower attenuation than on the ground over the same distance.

Experiments reflecting individual photons back from a satellite demonstrate that such a space-based quantum communication scenario is possible.

From today's point of view, the most advanced application of these fundamental quantum phenomena will be quantum computation. Again, I would like to refer to the presentation by Raymond Laflamme for the general concepts. A most interesting development happened since the time when he gave the Herzberg Lecture.

Imagine a future quantum internet with central servers, which have the full power of quantum computation. Then, if you are a client using these servers, you want to make absolutely sure that the operator of the central server has no idea which kind of problem you are working on. Are you calculating the development of some market prices, or are you just playing a quantum computer game? Also, you want to make sure that the server has no idea which data you are using.

Recently, it was shown by Broadbent, Fitzsimons and Kashefi that it is possible to operate a quantum server in a way which fulfills these demands. The client only has to be able to prepare individual quantum bits, individual qubits, in an arbitrary quantum state. He then sends these quantum bits to the quantum server who entangles them with each other. This highly entangled so-called cluster state is basically the central registry of the quantum computer. The calculation then proceeds as a sequence of measurements on this entangled state. Each sequence of measurements is characteristic for a specific algorithm. It is important that the operator of the server has no idea in which states the original qubits were, and he has no possibility to find out because of the theorem that arbitrary quantum states cannot be cloned. Therefore, the operator has no idea what the meaning of the instructions which you tell him in order to implement your computation is. He also has no idea what the meaning of the measurement results is. Only you as the client know how to interpret the measurement results such that they give you the final result of your computation.

Recently in my group with Stefanie Barz and Philip Walther and in collaboration with the original proposers of the concept [8], we demonstrated experimentally that such a scheme is possible in principle. This not only answers to the

positive the old question whether blind computation can be realized. It also adds to the incentive of building a quantum internet in the future.

It may be safe to expect that quantum computation will become a reality on a time scale of the order of 15 to 20 years. This is also the time scale when, according to Moore's Law and as pointed out by Laflamme, present computer technology will be at a limit which is defined such that the carriers of information are so small that an individual system carries an individual bit. So, two independent developments have a tendency that they will meet in the future. The development of present computation from above and the development of quantum computation from below.

Which technology will eventually be realized in real-world quantum computers is completely open today. There are many concepts and ideas being tested. They use, for example, photons, ions, atoms, superconductors, semiconductors etc. etc. Maybe each of these technologies will have its own specific application. But if we have learned anything from the development of new technologies in history, then it is

completely impossible to predict which way it will go and what a new technology will be used for. It is well known, for example, that the laser was seen for a long time as a great solution for problems which we don't know yet. To give another example, when Heinrich Hertz did his first experiment on the propagation of electromagnetic waves, the referees supported his proposal. They recommended that he should get his money because of the fundamental importance of his work even as, they said, "this will never lead to a practical application". I personally remember having heard similar comments in the 1970s about work on the foundations of quantum mechanics.

### ACKNOWLEDGEMENTS

The results I have reported here would have been completely impossible without the many collaborators I had the privilege and pleasure to work with over my scientific life. Also, I appreciate the financial support from many sources, most notably the Austrian Science Fund, the Austrian Ministry of Science and the European Commission.

---

### REFERENCES

1. T. Jennewein, U. Achleitner, G. Weihs, H. Weinfurter, and A. Zeilinger, "A Fast and Compact Quantum Random Number Generator", *Rev. Sci. Instr.* **71**, 1675–1680 (2000).
2. A. Einstein, B. Podolsky, and N. Rosen, "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?", *Physical Review* **47**(10), 777–780 (1935).
3. D. M. Greenberger, M. A. Horne, and A. Zeilinger, "Going Beyond Bell's Theorem", in 'Bell's Theorem, Quantum Theory, and Conceptions of the Universe', M. Kafatos (Ed.), Kluwer, Dordrecht, 69–72 (1989).
4. C. H. Bennett, G. Brassard, C. Crépeau, R. Jozsa, A. Peres, and W. K. Wootters, "Teleporting an Unknown Quantum State via Dual Classical and Einstein-Podolsky-Rosen Channels", *Phys. Rev. Lett.* **70**, 1895–1899 (1993).
5. R. Laflamme and J. Chamilliar, "The 2008 CAP Herzberg Lecture: Harnessing the Quantum World", *Physics in Canada / La Physique au Canada* **65**(1), 23–28 (2009).
6. J. Yin, J.-G. Ren, H. Lu, Y. Cao, H.-L. Yong, Y.-P. Wu, C. Liu, S.-K. Liao, F. Zhou, Y. Jiang, X.-D. Cai, P. Xu, G.-S. Pan, J.-J. Jia, Y.-M. Huang, H. Yin, J.-Y. Wang, Y.-A. Chen, C.-Z. Peng, and J.-W. Pan, "Quantum teleportation and entanglement distribution over 100-kilometre free-space channels", *Nature* **488**, 185–188 (2012).
7. X.-S. Ma, T. Herbst, T. Scheidl, D. Wang, S. Kropatschek, W. Naylor, B. Wittmann, A. Mech, J. Kofler, E. Anisimova, V. Makarov, T. Jennewein, R. Ursin, and A. Zeilinger, "Quantum teleportation over 143 kilometres using active feed-forward", *Nature* **489**, 269–273 (2012).
8. S. Barz, E. Kashefi, A. Broadbent, J. Fitzsimons, A. Zeilinger, and P. Walther, "Demonstration of Blind Quantum Computing", *Science* **335**(6066), 303–308 (2012).

### Biography

Ever since Anton Zeilinger first learned about quantum mechanics as a student, he has been interested in its foundations. Then, already in the 1970s, he investigated quantum phenomena in neutron interferometry. In the 1980s he began to work on quantum entanglement and in the 1990s also on atom and molecule interferometry. All his work was initially motivated by the counter-intuitive predictions of quantum mechanics for individual systems. To his great surprise, the fundamental phenomena observed have become basic paradigms for a new field, the science and technology of quantum information, signified by concepts such as quantum communication, quantum cryptography and quantum computation. This earned him the inaugural Isaac Newton Medal of the Institute of Physics (UK) "for his pioneering conceptual and experimental contributions to the foundations of quantum physics, which have become the cornerstone for the rapidly-evolving field of quantum information." In his free time, Anton Zeilinger is interested in classical waves, for example those emanating from his cello, or the waves on water he observes from his sailboat.

## A REPORT ON MY ATTENDANCE AT THE 2012 CERN HIGH SCHOOL TEACHERS CONFERENCE

27 June 2012

To receive the 2012 CAP Award for “Excellence in Teaching High School/CEGEP Physics (Prairie provinces and the Northwest Territories)” is both an honour and humbling. Upon the announcement, the support from my students has been overwhelming. To find out that I have been selected to travel to CERN (being sponsored by the Institute for Particle Physics, the Perimeter Institute for Theoretical Physics, TRIUMF, and the Canadian Association of Physicists) has to be one of the biggest highlights of my career as a physics teacher. Since my childhood I have known about CERN and have had a keen interest in astronomy and physics.

I expect to take a great deal back to my students, school and other teachers.

26 July 2012

I arrived at Geneva in the rain which continued while making my way to CERN. The 15 minute walk in the rain from the entrance gate to the residence was a great ending to the trip from Winnipeg (Air Canada really messed up and left me stranded and it took over 40 hours to get to Geneva, with several errors on the part of Air Canada). But, the warm reception the next day started to put that two day experience out of my mind.

I did not know that I was going to be part of the HST programme and what the HST programme was all about. Now that I have gone through it and I reflect on my experience, I must recommend it to all physics teachers. It is an amazing, intense programme. The international atmosphere and meeting teachers from around the world to share ideas and experiences is great.  
<https://cdsweb.cern.ch/record/1476906>

So, what was it all about?

At CERN, the stated goal of the HST programme is to help physics teachers to:

1. RAISE AND MAINTAIN THE INTEREST OF STUDENTS IN MODERN SCIENCE
  - Motivate them to continue scientific education at school
  - Help them to better understand the physical world

2. INSTILL A FEELING OF MYSTERY AND DISCOVERY POTENTIAL

- Motivate students to take up physics at universities
- Improve scientific literacy
- Prepare the future generation of physicists

### SCIENCE IS ALIVE!

There is not much that I can tell about CERN to anyone who is a member of CAP, PI, IPP, or TRIUMF, that they do not already know. But to be at CERN on Wednesday, 4<sup>th</sup> July, for the big announcement of a new particle could only be surpassed by being able to spend part of the morning before with Peter Higgs and talking with him about his work.



Goronwy Jones (middle) introduces Brian Dentry (right) to Peter Higgs (left) after Dr. Higgs gave a talk about “The Higgs Boson”. This talk took place the morning before the big announcement on Wednesday, July 4, 2012.



The 2012 CERN HS Workshop participants.





Part of the group at work just before another lecture at 4:23 p.m.

As a teacher, this experience was great. Not only do I have a great deal to share with my students, but it will have an effect on what happens in my physics classes. Also, I owe it to my profession and to those who have supported me in this experience, to share with other teachers.

If you wish, I will keep in contact with you and share with you what this positive experience at CERN has meant. I have attached just a few of the couple of thousand pictures that I took.

16 October 2012

I must add the following:

Upon my return to school at the beginning of September, I found out that my school division has made major changes to the computer systems that included

the software which everything runs under. This has created "Very Interesting Times".

Still, I have been able to share this summer's experience at CERN several times already and this Friday, 19 October, 2012, I will be giving an hour presentation to a group of physics teachers (I will also be conducting 2 other workshops/presentations on that day). I want to thank everyone involved who supported me so that I can do this.

While at CERN, it was a very pleasant surprise to have PI show up and give a workshop and make themselves available to us. I had the pleasure of meeting Dave last year when he came to Winnipeg and gave a workshop.

Once again, thanks.

Brian Dentry

<https://cdsweb.cern.ch/record/1476906>

<http://www.discoverthecosmos.eu/news/92>



I am demonstrating how to assemble a cloud chamber.

# CAP DEPARTMENTAL MEMBERS / MEMBRES DÉPARTEMENTAUX DE L'ACP

## - Physics Departments / Départements de physique -

(as of 2012 December 31 / au 31 décembre 2012)

Acadia University	Royal Military College of Canada	University of Manitoba
Bishop's University	Ryerson University	University of New Brunswick
Brock University	Saint Mary's University	University of Northern British Columbia
Carleton University	Simon Fraser University	University of Ontario Institute of Technology
CEGEP Garneau	St. Francis Xavier University	University of Ottawa
Collège Ahuntsic	Thompson Rivers University	University of Prince Edward Island
Collège Montmorency	Trent University	University of Regina
Concordia University	Université de Moncton	University of Saskatchewan
Dalhousie University	Université de Montréal	University of the Fraser Valley
Lakehead University	Université de Sherbrooke	University of Toronto
Laurentian University	Université du Québec à Trois-Rivières	University of Victoria
McGill University	Université Laval	University of Waterloo
McMaster University	University of Alberta	University of Western Ontario
Memorial Univ. of Newfoundland	University of British Columbia	University of Windsor
Mount Allison University	University of Calgary	University of Winnipeg
Okanagan College	University of Guelph	Wilfrid Laurier University
Queen's University	University of Lethbridge	York University

# CAP SUSTAINING MEMBERS / MEMBRES DE SOUTIEN DE L'ACP

(as of 2012 December 31 / au 31 décembre 2012)

+ one anonymous donor

A. John Alcock	Gregory R.J. Grondin	Michael O'Neill	John G.V. Taylor
Thomas K. Alexander	Elmer H. Hara	Allan A. Offenberger	Michael Thewalt
C. Bruce Bigham	Richard J. Hemingway	Shelley A. Page	David J. Thomson
Judith Braffman-Miller	Akira Hirose	J. Michael Pearson	Gregory Trayling
Harvey A. Buckmaster	Brian Jackel	David Poulin	Isabel M. Trigger
Marie D'Iorio	Thomas E. Jackman	Klaus E. Rieckhoff	William Trischuk
John G. Dekker	Béla Joós	Robert G.H. Robertson	Jacques Trudel
Christian Demers	Christine A. Kraus	John A. Rowlands	Sreeram Valluri
Charles Doiron	Ron M. Lees	Pierre Savard	H.M. Van Driel
Nicolas Doiron-Leyraud	Robert B. Mann	Pekka Kalervo Sinervo	Paul S. Vincett
Gordon W.F. Drake	Louis Marchildon	Issam Sinjab	Erich Vogt
David Grice	David B. McLay	W. James Slater	Mark A. Walton
Giovanni Fanchini	J.C. Douglas Milton	Alec T. Stewart	Andreas T. Warburton
Robert Fedesojevs	Michael R. Morrow	Arthur O. Stinner	
Henry R. Glyde	Ann-Lise Norman	Louis Taillefer	

# CAP CORPORATE AND INSTITUTIONAL MEMBERS / MEMBRES CORPORATIFS ET INSTITUTIONNELS DE L'ACP

(as of 2012 December 31 / au 31 décembre 2012)

The Corporate and Institutional Members of the Canadian Association of Physicists are groups of corporations, laboratories, and institutions who, through their membership, support the activities of the Association. The entire proceeds of corporate membership dues are paid into the CAP Educational Trust Fund.

Les membres corporatifs et institutionnels de l'Association canadienne des physiciens et physiciennes sont des groupes de corporations, de laboratoires ou d'institutions qui supportent financièrement les activités de l'Association. Les revenus des contributions déductibles aux fins d'impôt des membres corporatifs sont entièrement versés au Fonds Éducatif de l'ACP.

## CORPORATE/CORPORATIFS

AGILENT TECHNOLOGIES, VACUUM PRODUCTS DIVISION  
BERKELEY NUCLEONICS CORP.  
BUBBLE TECHNOLOGY INDUSTRIES  
CANBERRA CO.  
CCR PROCESS PRODUCTS

KURT J. LESKER CANADA INC.  
OCI VACUUM MICROENGINEERING INC.  
OPTTECH INCORPORATED  
PLASMIQUE INC.  
SYSTEMS FOR RESEARCH CORP.  
TEACHSPIN INC.

## INSTITUTIONAL/INSTITUTIONNELS

CANADIAN LIGHT SOURCE INC.  
INSTITUTE FOR QUANTUM COMPUTING  
PERIMETER INSTITUTE FOR THEORETICAL PHYSICS  
SNOLAB  
TRIUMF

The Canadian Association of Physicists cordially invites interested corporations and institutions to make application for Corporate or Institutional membership. Address all inquiries to the Executive Director

L'Association canadienne des physiciens et physiciennes invite cordialement corporations et institutions à faire partie des membres corporatifs ou institutionnels. Renseignements auprès de la directrice exécutive.

CANADIAN ASSOCIATION OF PHYSICISTS / ASSOCIATION CANADIENNE DES PHYSICIENS ET PHYSICIENNES  
Suite / Pièce 112, Imm. McDonald Bldg., Univ. of Ottawa, 150 Louis Pasteur, Ottawa, Ontario K1N 6N5  
Phone / Tél : (613) 562-5614; Fax / Téléc : (613) 562-5615; Email / courriel : CAP@uottawa.ca  
INTERNET - HTTP://WWW.CAP.CA

## RAGNAR GALT DWORSCHAK (1964–2012)



After a life of intellectual curiosity, discovery and passion for learning, Ragnar Galt Dworschak, beloved son of Hermann Gerald Dworschak and the late Diana Elizabeth Warren, and brother of Cathy Szata and Caroline Anne Dworschak passed away on October 8th, 2012.

Ragnar attended D. Roy Kennedy Public School, Ottawa, followed by Merivale High School, Ottawa. He graduated with a B.Sc. in Applied Physics from University of Waterloo in 1987, an M.Sc. in Applied Physics from Queens University in 1990 and a Ph.D. in Physics from the University of Manitoba in 2004. During his Masters program, he also worked for NRC, developing techniques for explosives detection for civil aviation anti-terrorism. From 2005 to 2010, he worked at Atomic Energy of Canada Limited, first in the Fuel Channels Division and then in the Reactor Physics Branch, performing reactor core physics modelling for GEN-IV Reactors. In 2010, he left AECL and joined Best Theratronics Ltd. as Director of Technical Services, where he acted as the technical interface between Physics, Engineering, Sales, Marketing, the agent and client base and the academic community. His work at Best Theratronics allowed him to travel around the world, engage in discussions about physics and nuclear medicine and participate in numerous working groups at the International Atomic Energy Agency in Vienna.

Through his work and personal travel, he appreciated living and working with many diverse cultures around the world. He was also an active member of both the Canadian Nuclear Society (CNS) and Canadian Association of Physicists (CAP). While in Chalk River, he was elected Chair of the CNS Chalk River Branch for 2 consecutive years, inspiring young minds to get involved with the Society and participate in Educational and Outreach activities. After leaving Chalk River, he remained active in the CNS as part of the Ottawa Branch, where he continued to participate in Technical Seminars or as a judge in Regional Science Fairs and other

activities. Ragnar joined the CAP as an undergraduate student in 1987 and maintained his membership throughout his career. He became a Regional Councillor in 2007 while working with AECL and was so committed to the organization that he convinced Best Theratronics to support his continued involvement on Council when he changed jobs in 2010. He remained a Councillor until June 2012. Ragnar obtained his P.Phys. licence in 2009. He participated in CAP Congresses, often as the representative at AECL's exhibit booth. He was instrumental in encouraging AECL to create a best student presentation award in fields relevant to the work carried on at AECL.

Ragnar had a unique combination of a scientific mind with its openness and analytical capabilities, a highly creative artistic mind, and a deeply compassionate side, full of empathy for others. His engagement in the fine arts, especially music, was integral to his life. He was the recipient of a Gloucester Achievement Award for his outstanding contribution to Music. He played his trombone in many ensembles and lent his beautiful deep voice to many choirs, including the United Nations Choir in Vienna. Ragnar delighted in his years working with the Deep River Players. His commanding presence, voice and sense of humour added greatly to the various productions. For 17 consecutive years, Ragnar volunteered at the Winnipeg Folk Festival and was a very valued and respected daytime stage manager at the Bluestem Stage.

Ragnar derived much pleasure from bicycling for fundraisers such as the Multiple Sclerosis Society and enjoyed playing racquetball or squash. Outdoor life especially appealed to him and he spent many of his summers with his Manitoba family working on farms and enjoyed developing his own farm near Chalk River. He also received an outstanding award from the Canadian Blood Donor Society for his well over 200 blood and plasma donations.

He will be greatly missed by all those who knew him.

Ruxandra Dranga  
Atomic Energy of Canada Limited

## CAP CONGRESS

27 au 31 mai 2013

[www.cap.ca/fr/congres/2013](http://www.cap.ca/fr/congres/2013)

2013 May 27–31

[www.cap.ca/en/congress/2013](http://www.cap.ca/en/congress/2013)



### Mark your calendars: May 27–31, 2013 CAP Congress, Université de Montréal

**Herzberg Public Lecturer: Serge Haroche** (Collège de France & École Normale Supérieure)  
*Juggling with photons in a box to explore the quantum world*

**Plenary Speakers:** **Lefebvre, Michel** (ATLAS Canada and Univ. of Victoria)  
*Discovery at the Large Hadron Collider*

**Redish, Edward (Joe)** (University of Maryland)  
*How should we think about how our students think?  
What we learn from PER*

**Sherrill, Bradley** (Michigan State University)  
*From Isotopes to the Stars*

For updates and program information, bookmark the Congress web site at:  
<http://www.cap.ca/en/congress/2013>

### FUTURE CAP CONGRESS

2014 - June 16–20  
Laurentian University, Sudbury, ON

2015 - June (exact date to come)  
University of Alberta, Edmonton, AB

## CONGRÈS DE L'ACP

27 au 31 mai 2013

[www.cap.ca/fr/congres/2013](http://www.cap.ca/fr/congres/2013)

2013 May 27–31

[www.cap.ca/en/congress/2013](http://www.cap.ca/en/congress/2013)

Université de Montréal

## À vos agendas : 27 au 31 juin 2013 Congrès de l'ACP, Université de Montréal

**Conférencier Herzberg : Serge Haroche** (Collège de France et École Normale Supérieure)  
*Jongler avec des photons en boîte pour explorer le monde quantique*

**Conférenciers pléniers : Lefebvre, Michel** (ATLAS Canada et Univ. of Victoria)  
*Discovery at the Large Hadron Collider*

**Redish, Edward (Joe)** (University of Maryland)  
*How should we think about how our students think?  
What we learn from PER*

**Sherrill, Bradley** (Michigan State University)  
*From Isotopes to the Stars*

**Pour des mises à jour et des renseignements sur le programme, visitez :**  
<http://www.cap.ca/fr/congres/2013>

## PROCHAINS CONGRÈS DE L'ACP

2014 - du 16 au 20 juin  
Université Laurentienne, Sudbury, ON

2015 - juin (dates à préciser)  
Université de l'Alberta, Edmonton, AB

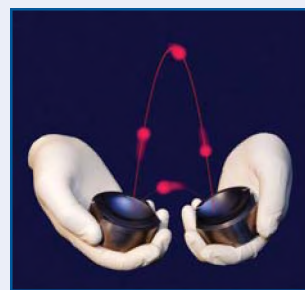
## 2013 HERZBERG MEMORIAL PUBLIC LECTURE



**SERGE HAROCHE**  
Collège de France and École  
Normale Supérieure

### *JUGGLING WITH PHOTONS IN A BOX TO EXPLORE THE QUANTUM WORLD*

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL  
MONDAY, 27 MAY 2013 - 19H30



We have known, since Einstein's seminal paper of 1905 on the photoelectric effect, that light, known since Maxwell to be an electromagnetic wave, is also made of discrete quanta, the photons. This strange wave-particle dualism has opened the way to the quantum theory and revolutionized physics. When they discussed among themselves the counter-intuitive quantum concepts, the fathers of the theory - Einstein, Bohr and Schrödinger among them - used to describe «thought experiments» in which they imagined that they freely manipulated photons, electrons or atoms and observed their weird behaviour. At the same time, they believed that these ideal experiments would be forever impossible to turn into actual ones in the laboratory. A major difficulty to realize these experiments with photons is that they are very fragile and elusive particles, usually destroyed upon detection. Technological advances have recently changed this state of affairs and made it possible to manipulate photons in ways which were previously thought impossible. I will describe this adventure and show how we have built a “photon box” in which we can count light quanta without destroying them, as we can do with marbles in a bag. We have also “tailored” the light trapped in the box and generated laboratory versions of the famous Schrödinger cat which the Austrian physicist imagined to be suspended between life and death. In our case, the “cat” is made of photons instead of atoms and it is maintained “half-way” between two states which classical physicists would consider to be incompatible. By studying this strange behaviour, we get a deeper knowledge about the quantum laws and we learn tricks that we hope to use one day for developing new technologies which could improve the precision of measurements, the secrecy of communications or the power of computer simulations.

### NSERC PRESENTATION AT CONGRESS

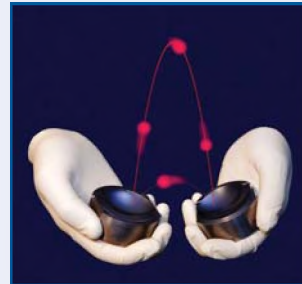
Elizabeth Boston, Director, Mathematical, Environmental and Physical Sciences at NSERC, will be making a presentation to Congress delegates around 2:30 p.m. on Wednesday, May 29. She will be available to answer questions following the presentation.

## CONFÉRENCE COMMÉMORATIVE PUBLIQUE HERZBERG 2013



**SERGE HAROCHE**  
Collège de France et École  
Normale Supérieure

***JONGLER AVEC DES PHOTONS  
EN BOÎTE POUR EXPLORER LE  
MONDE QUANTIQUE***



Depuis l'article fondateur d'Einstein sur l'effet photoélectrique de 1905, nous savons que la lumière, connue depuis Maxwell comme une onde électromagnétique, est aussi composée de particules élémentaires ou quanta : les photons. Cet étrange dualisme onde-particule a ouvert la voie à la théorie quantique et révolutionné la physique. Lorsqu'ils discutaient entre eux des concepts quantiques qui sont si contraires à notre intuition classique, les pères de la théorie – notamment Einstein, Bohr et Schrödinger - décrivaient des « *expériences de pensée* » dans lesquelles ils s'imaginaient manipulant librement des photons, des électrons ou des atomes et observant leur comportement bizarre. Ils croyaient cependant qu'il serait à jamais impossible de réaliser effectivement ces expériences idéales en laboratoire. Pour effectuer de telles expériences avec des photons, il faut en particulier surmonter une grande difficulté liée à l'extrême fragilité de ces particules de lumière qui sont généralement détruites dès qu'elles sont détectées. Les progrès technologiques ont récemment changé cette situation et permis de manipuler des photons de façons qui semblaient auparavant hors de portée. Je décrirai cette aventure et montrerai comment nous avons construit une « boîte à photons » où, sans les détruire, nous pouvons compter les quanta de la lumière à la manière de billes dans un sac. Nous avons aussi pu « façonner » des états étranges de lumière emprisonnée dans notre boîte à photons et y produire des versions de laboratoire du célèbre chat de Schrödinger, que le physicien autrichien imaginait dans une superposition d'états simultanément « mort » et « vivant ». Dans le cas qui nous occupe, le « chat » est composé de photons au lieu d'atomes, et il est maintenu « à mi-chemin » entre deux états que les physiciens classiques estimeraient incompatibles. L'étude de ce comportement étrange nous permet de comprendre les lois quantiques et d'apprendre à exploiter des processus que nous espérons pouvoir utiliser un jour pour mettre au point de nouvelles technologies susceptibles d'améliorer la précision de certaines mesures, la confidentialité des communications ou la puissance des simulations informatiques.

## UNE PRÉSENTATION DU CRSNG AU CONGRÈS

Elizabeth Boston, Directrice, Sciences mathématiques, environnementales et physiques du CRSNG, fera une présentation aux délégués du Congrès vers 14h30, le mercredi 29 mai. Elle sera disponible après sa présentation pour répondre aux questions.

## 2013 INVITED SPEAKERS / CONFÉRENCIERS INVITÉS 2013

### HERZBERG SPEAKER / CONFÉRENCIER HERZBERG

**HAROCHE, Serge**

Collège de France & École Normale Supérieure, Paris  
*Juggling with photons in a box to explore the quantum world*

### PLENARY SPEAKERS / CONFÉRENCIERS PLÉNIERS

**REDISH, Edward (Joe) F.**

University of Maryland  
*How should we think about how our students think?  
 What we learn from PER.*

**SHERRILL, Bradley**

Michigan State University  
*From Isotopes to the Stars*

**LEFEBVRE, Michel**

ATLAS Canada and the University of Victoria  
*Discovery at the Large Hadron Collider*

### JOINT SESSION SPEAKERS / CONFÉRENCIERS DES SESSIONS CONJOINTS

**ABANIN, Dmitry**

Perimeter Institute  
*Many-body Entanglement*

(DTP-DCMMP/DPT-DPMCM)

**REDISH, Edward (Joe) F.**

University of Maryland  
*Curriculum Development and Revitalization*

(DPE-SALTISE/DEP-SALTISE)

**BURKOV, Anton**

University of Waterloo  
*Condensed Matter Theory*

(DTP-DCMMP/DPT-DPMCM)

**RUTENBERG, Andrew**

Dalhousie University  
*Pattern Formation and Statistical Mechanics of Non-Equilibrium Systems*

(DTP-DCMMP-DMBP/  
 DPT-DPMCM-DPMB)

**DEBRUYN, John**

University of Western Ontario  
*Pattern Formation and Statistical Mechanics of Non-Equilibrium Systems*

(DTP-DCMMP-DMBP/  
 DPT-DPMCM-DPMB)

**SAINTILLAN, David**

University of Illinois, Urbana-Champaign  
*Soft Matter and Biophysics*

(DMBP-DCMMP/DPMB-DPMCM)

**DENTON, Alan**

North Dakota  
*Soft Matter and Biophysics*

(DMBP-DCMMP/DPMB-DPMCM)

**SANDERS, Barry**

University of Calgary  
*Quantum Entanglement and Computation*

(DTP-DCMMP-DAMOPC/  
 DPT-DPMCM-DPAMPC)

**GROVER, Tarun**

UCSB  
*Condensed Matter Theory*

(DTP-DCMMP-DAMOPC/  
 DPT-DPMCM-DPAMPC)

**SWINGLE, B.**

Harvard University  
*Many-body Entanglement*

(DTP-DCMMP-DAMOPC/  
 DPT-DPMCM-DPAMPC)

**KASPI, Victoria**

McGill University  
*Teaching Medal Talk*

(CEWIP-DPE/CEFEP-DEP)

**YAVIN, Itay**

McMaster University  
*New Developments in Particle and Nuclear Theory*

(DTP-DNP-PPD/DPT-DPN-PPD)

**LOGAN, Heather**

Carleton University  
*Advances in Particle Theory-Focus on Higgs*

(DTP-PPD/DPT-PPD)

**MARZLIN, Karl-Peter**

St. Francis Xavier University  
*Quantum Entanglement and Computation*

(DTP-DCMMP-DAMOPC/  
 DPT-DPMCM-DPAMPC)



## INVITED SPEAKERS / CONFÉRENCIERS INVITES

## DCMMP/DPMCM

**ATKINSON, W.A.** (DCMMP/DPMCM)  
Trent University  
*Computational Advances*

**BROUN, David** (DCMMP/DPMCM)  
Simon Fraser University  
*High Temperature Superconductors*

**CHAKRABORTY, Tapash** (DCMMP/DPMCM)  
University of Manitoba  
*Graphene*

**CLANCY, Patrick** (DCMMP/DPMCM)  
University of Toronto  
*Exotic Quantum Magnets*

**COHEN, Itai** (DCMMP/DPMCM)  
Cornell  
*Soft Matter*

**CÔTÉ, René** (DCMMP/DPMCM)  
Université de Sherbrooke  
*Graphene*

**DE SOUSA, Rogerio** (DCMMP/DPMCM)  
University of Victoria  
*Multifunctional Materials*

**GARATE, Ion** (DCMMP/DPMCM)  
Université de Sherbrooke  
*Topological Insulators*

**HAWTHORN, David** (DCMMP/DPMCM)  
University of Waterloo  
*High Temperature Superconductors*

**HAYAT, Alex** (DCMMP/DPMCM)  
University of Toronto  
*Topological Insulators*

**HILKE, Michael** (DCMMP/DPMCM)  
McGill University  
*Graphene*

**MADHAVAN, Vidya** (DCMMP/DPMCM)  
Boston College  
*Topological Insulators*

**MENON, Narayan** (DCMMP/DPMCM)  
University of Massachusetts, Amherst  
*Soft Matter*

**QUILLIAM, J.A.** (DCMMP/DPMCM)  
Université de Sherbrooke  
*Exotic Quantum Magnets*

**ROSEI, Federico** (DCMMP/DPMCM)  
INRS  
*Multifunctional Materials*

**SÉNÉCHAL, David** (DCMMP/DPMCM)  
Université de Sherbrooke  
*Computational Advances*

## DIMP/DPIM

**FLUERARU, Costel** (DIMP/DPIM)  
National Research Council Canada  
*General Instrumentation*

**MOAZZEN-AHMADI, Nasser** (DIMP/DPIM)  
University of Calgary  
*General Instrumentation*

## DMBP/DPMB

**BARZDA, Virgis** (DMBP/DPMB)  
University of Toronto  
*Biophotonics II*

**CHAN, Hue Sun** (DMBP/DPMB)  
University of Toronto  
*Computational Biophysics*

**CHITRANI, Devika** (DMBP/DPMB)  
Ryerson University  
*Biophotonics II*

**COSA, Gonzalo** (DMBP/DPMB)  
McGill University  
*Cellular Biophysics*

**DE HAAN, Hendrick** (DMBP/DPMB)  
University of Ottawa  
*Biopolymers*

**DESPRES, Philippe** (DMBP/DPMB)  
Université de Montréal  
*Nuclear Techniques in Medicine*

**EL NAQA, Issam** (DMBP/DPMB)  
McGill University  
*Medical Physics*

**FLEMING, David** (DMBP/DPMB)  
Mount Alison University  
*Medical Physics*

**FORDE, Nancy** (DMBP/DPMB)  
Simon Fraser University  
*Molecular Biophysics*

**HIGGS, Paul** (DMBP/DPMB)  
McMaster University  
*Computational Biophysics*

**HOEHR, Cornelia** (DMBP/DPMB)  
TRIUMF  
*Nuclear Techniques in Medicine*

**JONES, Elizabeth** (DMBP/DPMB)  
Lady Davis Institute Montreal  
*Medical Imaging*

**LESLIE, Sabrina** (DMBP/DPMB)  
McGill University  
*Biopolymers*

<b>READER, Andrew</b> McGill University <i>Medical Imaging</i>	(DMBP/DPMB)	<b>KAMRAN, Nicky</b> McGill University <i>Mathematical Physics</i>	(DTP/DPT)
<b>ROCHELEAU, Jonathan</b> University of Toronto <i>Cellular Biophysics</i>	(DMBP/DPMB)	<b>KASPI, Victoria</b> McGill University <i>Theoretical Astrophysics</i>	(DTP/DPT)
<b>TABARD-COSSA, Vincent</b> University of Ottawa <i>Molecular Biophysics</i>	(DMBP/DPMB)	<b>LAKE, Kayll</b> Queen's University <i>Relativity and Gravitation</i>	(DTP/DPT)
<b>DPE/DEP</b>		<b>MACKENZIE, Richard</b> Université de Montréal <i>Field Theory and Strings</i>	(DTP/DPT)
<b>DESLAURIERS, Louis</b> University of British Columbia <i>Teaching Physics to a Wider Audience</i>	(DPE/DEP)	<b>MALONEY, Alex</b> McGill University <i>Field Theory and Strings</i>	(DTP/DPT)
<b>REDISH, Edward (Joe) F.</b> University of Maryland <i>Teaching Physics to a Wider Audience</i>	(DPE/DEP)	<b>MANN, Robert</b> University of Waterloo <i>Quantum Gravity and Quantum Cosmology</i>	(DTP/DPT)
<b>ST-MAURICE, Jean-Pierre</b> University of Saskatchewan <i>Fusion, laser and space plasmas</i>	(DPE/DEP)	<b>NELSON, Lorne</b> Bishop's University <i>Theoretical Astrophysics</i>	(DTP/DPT)
<b>DPP/DPP</b>		<b>PAGE, Don</b> University of Alberta <i>Cosmology</i>	(DTP/DPT)
<b>GHERARDI, Nicolas</b> Université Paul Sabatier <i>Plasma applications</i>	(DPP/DPP)	<b>PFEIFFER, Harald</b> CITA <i>Relativity and Gravitation</i>	(DTP/DPT)
<b>MEUNIER, Jean-Luc</b> McGill University <i>Plasma applications</i>	(DPP/DPP)	<b>SEAHRA, Sanjeev</b> University of New Brunswick <i>Quantum Gravity and Quantum Cosmology</i>	(DTP/DPT)
<b>MOISAN, Michel</b> Université de Montréal <i>Plasma applications</i>	(DPP/DPP)	<b>SIGURDSON, Kris</b> University of British Columbia <i>Cosmology</i>	(DTP/DPT)
<b>OZAKI, Tsuneyuki</b> INRS-Varennes <i>Laser-matter Interactions</i>	(DPP/DPP)	<b>STEELE, Tom</b> University of Saskatchewan <i>Heavy Mesons</i>	(DTP/DPT)
<b>DTP/DPT</b>		<b>VISHNIAC, Ethan</b> University of Saskatchewan <i>Theoretical Astrophysics</i>	(DTP/DPT)
<b>CLINÉ, Jim</b> McGill University <i>Cosmology</i>	(DTP/DPT)	<b>WIDROW, Larry</b> Queen's University <i>Cosmology</i>	(DTP/DPT)
<b>DICK, Rainer</b> University of Saskatchewan <i>Mathematical Physics</i>	(DTP/DPT)		
<b>HARNETT, Derek</b> University of the Fraser Valley <i>Heavy Mesons</i>	(DTP/DPT)		

This published list was compiled in early March and is subject to change. Visit <http://www.cap.ca/en/node/2346> for the most recent list of invited speakers.

Cette liste a été compilée au début du mois de mars et est sujette à changement. Visitez <http://www.cap.ca/fr/node/2347> pour la plus récente liste des conférencier(ère)s invité(e)s.

## BERKELEY NUCLEONICS

Berkeley Nucleonics, an authority in the nuclear science community, is offering an educational introduction to Nuclear Scintillation Detectors in an online training module.

Scintillation detectors are woven into the fabric of many nuclear applications. From medicine to industrial process controls to power, the nuclear community is increasingly addressing world concerns. As a member of this technical community for 50 years, we offer valuable perspectives and hands-on expertise to engineers just getting started. Our web-based general introduction course should serve as a springboard for deeper exploration in more granular fields.

The web-based course takes 4 hours and touches on many aspects of nuclear materials, from the components of a PMT to temperature effects on crystals. This introductory course will begin to familiarize students with common terminology (anode, photocathode, PMT, isotope identification, peak resolution, photodiode, etc) and offer students the flexibility to complete it on their own schedule.

As the nuclear sciences grow in popularity and applications, an entry level introduction course is a handy prerequisite to classroom or workshop discussions. The course is made available to instructors digitally as well to address any hosting requirements. Radiation detector training is also valuable to Hazmat professionals or Fire Fighters who seek a deeper understanding of the components in nuclear detection and isotope identification.



“BNC supports a wide range of customers varying from operational field needs to demanding research programs. We integrate those experiences into our widely acclaimed hands on training programs. This web module is our natural extension, allowing users to train when most convenient for them”, remarked Robert Corsetti, the company’s Director of Sales and Marketing. “The interactive nature of the training is really interesting also.”

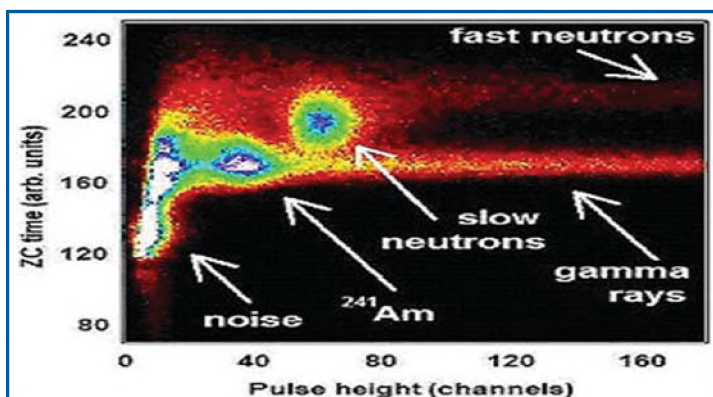
Please contact our office for a PPT copy of this training course.

Press Contact:

Bernadette Jamieson, 800-234-7858 x210, bernadette.jamieson@berkeleynucleonics.com

Technical Contact:

Robert Corsetti, 800-234-7858 x250, robert.corsetti@berkeleynucleonics.com



## BOOK REVIEW POLICY

Books may be requested from the Book Review Editor, Richard Marchand, by using the online book request form at <http://www.cap.ca>.

CAP members are given the first opportunity to request books. For non-members, only those residing in Canada may request a book. Requests from non-members will only be considered one month after the distribution date of the issue of *Physics in Canada* in which the book was published as being available (e.g. a book listed in the January-March issue of *Physics in Canada* will be made available to non-members at the end of April).

The Book Review Editor reserves the right to limit the number of books provided to reviewers each year. He also reserves the right to modify any submitted review for style and clarity. When rewording is required, the Book Review Editor will endeavour to preserve the intended meaning and, in so doing, may find it necessary to consult the reviewer. Reviewers submit a 300–500 word review for publication in PiC and posting on the website; however, they can choose to submit a longer review for the website together with the shorter one for PiC.

## LA POLITIQUE POUR LA CRITIQUE DE LIVRES

*Si vous voulez faire l'évaluation critique d'un ouvrage, veuillez entrer en contact avec le responsable de la critique de livres, Richard Marchand, en utilisant le formulaire de demande électronique à <http://www.cap.ca>.*

*Les membres de l'ACP auront priorité pour les demandes de livres. Ceux qui ne sont pas membres et qui résident au Canada peuvent faire une demande de livres. Les demandes des non-membres ne seront examinées qu'un mois après la date de distribution du numéro de la Physique au Canada dans lequel le livre aura été déclaré disponible (p. ex., un livre figurant dans le numéro de janvier-mars de la Physique au Canada sera mis à la disposition des non-membres à la fin d'avril).*

*Le Directeur de la critique de livres se réserve le droit de limiter le nombre de livres confiés chaque année aux examinateurs. Il se réserve, en outre, le droit de modifier toute critique présentée afin d'en améliorer le style et la clarté. S'il lui faut reformuler une critique, il s'efforcera de conserver le sens voulu par l'auteur de la critique et, à cette fin, il pourra juger nécessaire de le consulter. Les critiques pour publication dans la PaC doivent être de 300 à 500 mots. Ces critiques seront aussi affichées sur le web ; s'ils le désirent les examinateurs peuvent soumettre une plus longue version pour le web.*

## BOOKS RECEIVED / LIVRES REÇUS

The following titles have recently been received for review. Readers are invited to write reviews, in English or French, of books of interest to them. Books may be requested from the book review editor, Richard Marchand, by using the online request form at [www.cap.ca](http://www.cap.ca). Note that book titles followed by a [v] will be made available electronically; following the publication of a review, the reviewer will receive a hard copy directly from the publisher.

A list of all books available for review, books out for review and copies of book reviews published since 2000 are available on-line at [www.cap.ca](http://www.cap.ca).

In addition to books listed here, readers are invited to consider writing reviews of recent publications, or comparative reviews on books in topics of interest to the physics community. This could include for example, books used for teaching and learning physics, or technical references aimed at professional researchers.

*Les titres suivants ont été reçus aux fins de critique. Nous invitons nos lecteurs à nous soumettre une critique en anglais ou en français, sur les sujets de leur choix. Des copies des différents ouvrages peuvent être obtenues en faisant la demande au responsable de la critique de livres, Richard Marchand, à [www.cap.ca](http://www.cap.ca). Veuillez noter que les titres suivis de [v] seront accessibles électroniquement. Suite à la publication de sa critique, l'auteur pourra recevoir une copie papier directement de la maison d'édition.*

*Les listes de livres disponibles pour critique, ceux en voie de révision, ainsi que des exemples de critiques publiées depuis 2000 sont disponible sur : [www.cap.ca](http://www.cap.ca).*

*En plus des titres mentionnés ci-dessous, les lecteurs sont invités à soumettre des revues sur des ouvrages récents, ou des revues thématiques comparées sur des sujets particuliers. Celles-ci pourraient par exemple porter sur des ouvrages de nature pédagogique, ou des textes de références destinés à des professionnels.*

### GENERAL INTEREST

ATLAS OF ASTRONOMICAL DISCOVERIES [v], Govert Schilling, Springer, 2011; pp. 243; ISBN: 978-1441978103; Price: \$28.30.

FAINT OBJECTS AND HOW TO OBSERVE THEM [v], Brian Cudnik, Springer, 2013; pp. 263; ISBN: 978-1-4419-6756-5; Price: \$29.21.

HOW TO BUILD A HABITABLE PLANET: THE STORY OF EARTH FROM THE BIG BANG TO HUMANKIND (REVISED AND EXPANDED EDITION) [v], Charles H. Langmuir and Wally Broecker, Princeton University Press, 2012; pp. 720; ISBN: 9780691140063; Price: \$33.38.

QUANTUM MODELS OF COGNITION AND DECISION, Jerome R. Busemeyer & Peter D Bruza, Cambridge University Press, 2012; pp. 407; ISBN: 978-1-107-01199-1; Price: \$100.95.

TELESCOPES AND TECHNIQUES [v], C. R. Kitchin, Springer, 2013; pp. 255; ISBN: 978-1-4614-4890-7; Price: \$47.40.

THE NONLINEAR WORLD [v], Yoshitsugu Oono, Springer, 2013; pp. 299; ISBN: 978-4-431-54028-1; Price: \$108.74.

### UNDERGRADUATE TEXTS

SOLVED PROBLEMS IN QUANTUM AND STATISTICAL MECHANICS [v], Michele Cini, Francesco Fucito and Mauro Sbragaglia, Springer, 2012; pp. 399; ISBN: 978-88-470-2314-7; Price: \$67.44.

### GRADUATE TEXTS AND PROCEEDINGS

A HISTORY OF THE ELECTRON, J.J. and G.P. Thomson, Juame Navarro, Cambridge University Press, 2012; pp. 186; ISBN: 978-1-107-00522-8 (HC); Price: \$81.95.

COMPUTATIONAL FLUID AND PARTICLE DYNAMICS IN THE HUMAN RESPIRATORY SYSTEM [v], Jiyuan Tu, Kiao Inthavong, Springer, 2013; pp. 335; ISBN: 978-94-007-4487-5; Price: \$142.18.

**DILUTE MAGNETIC ALLOYS**, Jun Kondo, Cambridge University Press, 2012; pp. 261; ISBN: 978-1-107-02418-2; Price: \$100.95.

**DO WE REALLY UNDERSTAND QUANTUM MECHANICS?**, Frank Laloë, Cambridge University Press, 2012; pp. 392; ISBN: 978-1-107-02501-1; Price: \$76.95.

**GRAVITY, A GEOMETRICAL COURSE [v]**, Pietro Giuseppe Frè, Springer, 2013; pp. 336; ISBN: 978-94-007-5360-0; Price: \$102.45.

**HIGH ENERGY ASTROPHYSICS [v]**, Thierry J.-L. Courvoisier, Springer, 2013; pp. 332; ISBN: 978-3-642-30969-4; Price: \$79.49.

**MAGNETIC NANOSTRUCTURES [v]**, Hartmut Zabel, Michael Farle, Springer, 2013; pp. 283; ISBN: 978-3-642-32041-5; Price: \$111.97.

**MATERIALS AND RELIABILITY HANDBOOK FOR SEMICONDUCTOR OPTICAL AND ELECTRON DEVICES**, J.T. Mendonça, Hugo Terças, Springer, 2013; pp. 398; ISBN: 978-1-4614-4336-0; Price: \$181.68.

**PHOTOEMISSION SPECTROSCOPY ON HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTOR [v]**, Wentao Zhang, Springer, 2013; pp. 139; ISBN: 978-3-642-32471-0; Price: \$102.38.

**PHYSICS OF ULTRA-COLD MATTER [v]**, J.T. Mendonça, Hugo Terças, Springer, 2013; pp. 398; ISBN: 978-1-4614-5412-0; Price: \$141.54.

**PLASMA ASTROPHYSICS, PART II RECONNECTION AND FLARES [v]**, Boris V. Somov, Springer, 2013; pp. 504; ISBN: 978-1-4614-4294-3; Price: \$165.42.

**PRINCIPLES OF NANO-OPTICS (SECOND EDITION)**, Lukas Novotny & Bert Hecht, Cambridge University Press, 2012; pp. 564; ISBN: 978-1-107-00546-4; Price: \$91.95.

**SOLAR AND STELLAR DYNAMOS [v]**, Paul Charbonneau, Springer, 2013; pp. 237; ISBN: 978-3-642-32092-7; Price: \$84.05.

**STATISTICAL PHYSICS OF NANOPARTICLES IN THE GAS PHASE [v]**, Klavs Hansen, Springer, 2013; pp. 282; ISBN: 978-94-007-5838-4; Price: \$141.97.

**STATISTICAL THERMODYNAMICS UNDESTANDING THE PROPERTIES OF MACROSCOPIC SYSTEMS (COPY 1)**, Lukong Cornelius Fai & Gary Mathew Wysin, Taylor & Francis Group, 2013; pp. 534; ISBN: 978-1-4665-1067-8; Price: \$79.95.

**STATISTICAL THERMODYNAMICS UNDESTANDING THE PROPERTIES OF MACROSCOPIC SYSTEMS (COPY 2)**, Lukong Cornelius Fai & Gary Mathew Wysin, Taylor & Francis Group, 2013; pp. 534; ISBN: 978-1-4665-1067-8; Price: \$10.99.

**STRUCTURE OF MATERIALS: AN INTRODUCTION TO CRYSTALLOGRAPHY, DIFFRACTION, AND SYMMETRY (SECOND EDITION)**, Marc De Graff & Michael E McHenry, Cambridge University Press, 2012; pp. 739; ISBN: 978-1-107-00587-7; Price: \$116.95.

## BOOK REVIEWS / CRITIQUES DE LIVRES

Book reviews for the following books have been received and posted to the Physics in Canada section of the CAP's website: <http://www.cap.ca>. When available, the url to longer versions are listed with the book details.

*Des revues critiques ont été reçues pour les livres suivants et ont été affichées dans la section "La Physique au Canada" de la page web de l'ACP: <http://www.cap.ca>. Quand disponible, un lien url à une critique plus longue est indiqué avec les détails du livre.*

**BASICS OF PET IMAGING: PHYSICS, CHEMISTRY, AND REGULATIONS**, 2nd Ed., Gopal B. Saha, Springer, 2010. ISBN: 978-1-4419-0804-9; Price: \$50.21.

I have had an opportunity to read through the second edition of this fine text which builds on the market acceptance and simplicity of the first edition, published in 2005. Considering the recent explosion in the global installed base of positron emission tomography (PET) scanners, this revised edition constitutes a timely addition to the scientific literature. The target audience as stated by the author in the preface includes: "nuclear medicine professionals such as physicians, technologists, and residents, along with students preparing for their board examinations or in training." To this list I would add diagnostic medical physicists in clinical practice with an interest in PET imaging, medical physics residents in a diagnostic imaging residency, and medical physics graduate students taking an imaging course. An instructor teaching a graduate course in medical imaging – or a specific course in

nuclear medicine imaging – may also consider adopting or recommending this text for class use.

This text is a rather compact (237 pages), yet reasonably complete overview of the field of PET imaging. Compared to the more authoritative "*Physics in Nuclear Medicine*, 3<sup>rd</sup> Ed" by Cherry, Soerensen, and Phelps (523 pages), it is more compact and less mathematically sophisticated. However, Cherry's text – unlike Saha's – covers not just PET imaging, but all of nuclear medicine (i.e. SPECT imaging, etc.). This reviewer was pleased to see end-of-chapter questions, which a potential instructor considering adoption for in-class use might appreciate. This additional academic enticement is missing in Cherry's text. The book contains 12 chapters, and a brief chapter by chapter review follows.

Chapter 1 is a fairly unremarkable introduction to nuclear decay and radiation interaction mechanisms. In chapter 2, the book's inherent value comes into better focus: here the author makes a careful comparison of the overall system performance for the three most important in - use

clinical systems, the Philips Gemini, Siemens Biograph, and General Electric Discovery, systems. This comparison can be of great value to physicists and administrators making acquisition recommendations. An insightful comparison of the physical performance of different scintillator materials currently used by the different manufacturers is also included in this chapter. Chapter 3 is concerned with factors degrading image quality such as photon attenuation. This reviewer found the treatment of scatter vs. random coincidences, i.e. why they occur and how they are corrected for, especially illuminating. Chapter 4 contains a very elemental and summarized treatment of the two most frequently used algorithms for image reconstruction in PET: filtered back projection, and iterative reconstruction. More mathematically formal treatments of these algorithms can be easily found in other imaging texts, i.e. Webb's *Introduction to Biomedical Imaging*. Chapter 5 is a most condensed (7 page) overview of the architecture of modern medical imaging platforms and formats, such as the Digital Imaging and Communications in Medicine

(DICOM), and the Picture Archival and Communications System (PACS). Chapter 6 is an abbreviated review of the definitions of the main system performance parameters of PET systems, and the recommended quality control procedures; those to be done upon commissioning, and during the clinical life of the system. As the author points out, the interested reader should consult the National Electrical Manufacturer's document NEMA NU 2- 2007 which at present is the definitive document regarding this matter. In any case, clinical medical physicists responsible for the commissioning or operation of PET systems should find a review of this chapter rewarding. Chapters 7 and 8 are an introduction to the other side of the PET equation: radiopharmaceutical production and dispensing. Chapter 7 is concerned with the principles of cyclotron operations and the production of the most frequently utilized PET radioisotopes: F-18, C-11, N-13, and O-15. It would be of essentially academic interest to clinical physicists working in PET imaging, since ordinarily the clinical physicist would not be involved with the production of the actual radioisotopes. Chapter 8 introduces elemental concepts of radiochemistry used in the radiolabelling of metabolically relevant molecules. It is aimed primarily at the reader with a background in organic chemistry, and as such, it is of very limited interest to the medical physicist and can thus easily be glossed over without loss of continuity. Chapter 9 is concerned with administrative aspects of PET radiopharmaceuticals, such as obtaining proper governmental clearances to bring a product to market, as well as radiation protection regulations. Since the book's author is based in the U.S., the approach is completely U.S.-centric and would be of limited relevance in a Canadian or international context. Chapter 10 discusses reimbursement procedures for PET studies in the U.S. insurance context, and is therefore completely irrelevant in the Canadian context. Thus, chapters 9 and 10 could easily be skipped by the medical physicist not based in the U.S., without any significant loss. Chapter 11 is an effective presentation of the subject of the design and cost considerations of a PET center, and it does include a section on the design considerations of a cyclotron vault. The reader should be reminded again that not every PET center will be cyclotron equipped. In fact, the vast majority of PET centers do not have a cyclotron on site, but rather rely on a nearby cyclotron for the provision of the radiopharmaceuticals. Parts of this chapter would also be of interest to the hospital administrator contemplating the installation of a PET center at his center. Chapter 12 - the last - is an introduction to the clinical aspects of specific PET procedures, and is therefore better addressed to the technologist or physician, but is still interesting reading for the clinical medical physicist. The book concludes with six appendices which are relevant to the contents of the chapters.

As is to be expected of any text of this type which attempts to cover many aspects of a rapidly

evolving technology, it does contain weaknesses and errors. For example, since in the modern radiological imaging environment the electronic management of data is of such import, chapter 5 (on image storage & display) could easily be expanded to review at least in cursory fashion some of the more frequently utilized image processing capabilities. As examples of specific topics that this reviewer would have welcomed are the relevance of different filters for image reconstruction, window settings, region of interest (ROI) algorithms, standard uptake volume (SUV) algorithms etc. As examples of minor errors that slipped through the editorial review process, in chapter 6 the author states: "*The geometric efficiency of a PET scanner is defined by the solid angle projected by the source of activity at the detector.*" In fact, it is the other way around, the geometric efficiency is defined as the solid angle (divided by  $4\pi$ ) subtended by the detectors as viewed from the source. Also in chapter 6, the author defines image contrast (eq. 6.6) as  $C = (A - B)/A$  where A and B are count densities in normal and abnormal tissues respectively. This definition has the inconvenience that negative contrasts can occur and it would have been preferable to give the more frequently given definition  $C = |(A - B)|/A$  which obviates this difficulty.

In spite of these minor faults, my overall impression is that this compact text - which is almost a manual - does an excellent job of presenting the most relevant aspects of up to date PET technology to a wide target audience which includes the clinical medical physicist. Perhaps for the medical physicist, the most valuable information presented is not so much the physics of PET as such, but rather those aspects of PET with which the physicist would normally not concern him/herself, such as cost analysis, radiochemistry fundamentals, and clinical patient procedures. Amazon.ca advertises the book for \$50.21 CDN, which this reviewer finds very modest. Any clinical medical physicist considering working in the field of PET would derive some benefit from reading at least some chapters in this book.

Eduardo Galiano-Riveros, Ph.D., P. Phys.  
Associate Professor of Medical Physics  
Physics Department, Laurentian University,  
Sudbury, ON.

**DATA ANALYSIS FOR PHYSICAL SCIENTISTS: FEATURING EXCEL, 2ND ED.**, Les Kirkup, Cambridge University Press (2012), ISBN: 978-0-521-88372-6; Price: \$75.00.

I have traditionally avoided Microsoft Excel like the plague when analysing data, preferring what I would consider to be more appropriate tools such as STATA, Sigmaplot, Origin or Matlab. While the title of the second edition of "Data Analysis for Physical Scientists: Featuring Excel" by Les Kirkup has been changed slightly to de-emphasise the role of Excel, I still approached this book with some trepidation. I came away

pleasantly surprised and with a greater openness to the use of Excel for scientific data analysis.

This book is aimed at undergraduate students and provides an excellent introduction to scientific data analysis, distributions, measurement uncertainty, linear and non-linear least squares and tests of significance. The book has an attractive uncluttered layout, with numerous examples, exercises and problems. The author not only provides a clear introduction to the principles of data analysis, but also shows how to apply them and illustrates many of the examples with the aid of Excel 2010 built-in functions and features. This allows the reader to independently explore the material further, which in my experience makes learning more interesting and leads to a quicker grasp of the fundamentals. I particularly appreciated the footnotes which are used to elaborate certain points in the text while still keeping the material flowing briskly.

The Introductory chapter on data analysis is followed by an obligatory chapter entitled "Introduction to Excel" which many readers may feel to be redundant particularly if they have already used Excel. In spite of having used Excel, arguably somewhat superficially, for many years, I found this chapter a useful refresher that included a number of (for me) hidden gems. The chapter on measurement, error and uncertainty continues the good use of examples to lead the reader through the process of measurement, the difference between precision and accuracy, types of errors and uncertainties. I was pleased to see some discussion on dealing with outliers, although here I would have appreciated seeing some additional references provided for the reader who wished to explore this area in greater detail.

The author also does an admirable job of introducing least square fitting. In addition to covering the material found in most introductory texts he also covers two areas that I find students are particularly weak in; estimating the uncertainties in the parameters and methods for comparing the equations being used to fit data. The penultimate chapter covers tests of significance and analysis of variance before the final chapter introduces the data analysis tools in Excel and the Analysis ToolPak which enable ANOVA and further analysis and testing to be explored.

While neither this book, nor Excel is likely to replace my other books or software as data analysis tools, I would highly recommend this book for undergraduate physics students and I will certainly be asking my graduate students to read it prior to starting their research.

Stephen Pistorius, Ph.D., P. Phys.  
Professor, Department of Physics and Astronomy,  
University of Manitoba, Winnipeg.

**INTERNAL GRAVITY WAVES**, Bruce R. Sutherland, Cambridge University Press, 2010,

pp. 377, ISBN: 978-0-521-83915-0 (hc); Price: \$120 U.S.

L'étude des ondes internes de gravité ne se résume pas uniquement à un intérêt théorique car ces ondes sont présentes naturellement dans l'atmosphère et les océans. Dans l'atmosphère, elles influencent la structure thermique de celle-ci, et dans les océans elles causent d'importants effets de mélange. Même si les ondes internes ne jouent pas un rôle important dans l'évolution du climat et des conditions météorologiques, leur influence est non-négligeable. Le fait de ne pas en tenir compte dans les modèles numériques peut occasionner de mauvaises prévisions des vents et de la température dans l'atmosphère. Leur absence dans les modèles pourrait aussi mener à des mélanges turbulents et à de la diffusion différents de ce qui est observé dans les océans.

Le premier chapitre introduit brièvement la notion de fluide stratifié et d'ondes internes de gravité, ainsi que les notions de thermodynamique et de dynamique de l'atmosphère et de l'océan. Par la suite, des notions d'ondes périodiques et de paquets d'ondes sont présentées. Ce chapitre est suffisamment clair et précis pour qu'un lecteur, connaissant uniquement le calcul différentiel, puisse s'y retrouver.

Dans le second chapitre, l'auteur décrit les ondes à l'interface de deux fluides de densités différentes et les ondes qui interviennent dans un fluide à multicouche. On débute avec la description de la structure et de l'évolution périodique des ondes de petite amplitude, telles les ondes de surface, même si elles ne sont pas à proprement parler des ondes de gravité interne. La description mathématique de celles-ci est étendue aux ondes entre différentes interfaces. On poursuit la présentation avec les ondes à l'interface entre eau saline et eau douce ou eau chaude et eau froide. De façon générale ces interfaces peuvent être autant entre des milieux gazeux que liquides. La présence de cisaillement horizontal dans ce cas aura pour effet de produire des instabilités et des perturbations (ondes de Kelvin Helmholtz, Taylor et Holmboe). En tenant compte du fait que ces ondes peuvent aussi être influencées par la rotation, on introduit l'étude des ondes inertielles. Il est intéressant à ce stade de la lecture, d'observer les illustrations graphiques sur le site web de l'auteur à l'Université de l'Alberta, ainsi que celles de simulations numériques des ondes à des interfaces telles que présentées sur le site web du département de mathématique appliquée de l'Université de Waterloo.

Le chapitre 3 présente plus spécifiquement les ondes internes de petite amplitude dans un fluide uniformément stratifié. Ainsi, si la densité dans le fluide diminue lentement avec la hauteur, celui-ci peut supporter des ondes internes qui oscilleront de bas en haut, selon la fréquence de flottaison, et qui ne seront pas nécessairement confinées près d'une interface. On fait intervenir dans ce cas des ondes dites Boussinesq. Dans le cas où la densité ou la température potentielle diminue signifi-

tivement, on fera intervenir les notions d'ondes non-Boussinesq ou anélastiques dans le cas d'un gaz comme l'atmosphère. On étend par la suite les résultats obtenus en incluant l'influence de la rotation, du cisaillement et des frontières. Ce chapitre nécessite des connaissances relatives à la solution d'équations différentielles partielles.

Le chapitre 4 introduit les mathématiques nécessaires à l'étude des ondes d'amplitude faible mais non-négligeable. On dira de celles-ci qu'elles sont faiblement non-linéaires. On utilise donc la théorie des perturbations pour estimer les effets non-linéaires de premier ordre et ainsi examiner comment ils modifient l'évolution des ondes internes et à une interface. Cela permet en outre de faire intervenir une nouvelle classe d'ondes, les ondes solitaires. Ce chapitre décrit aussi diverses formes d'instabilités associées aux ondes telles l'instabilité dite, de modulation, subharmonique, de retournement et de cisaillement. Après cette description mathématique avancée, il est intéressant de retourner à l'étude des ondes internes, telles que perçues dans la nature, avec la lecture du récent numéro spécial sur les ondes internes dans l'océan, dans la revue *The Official Magazine of the Oceanography Society*, Volume 25, Number 2, June 2012.

Le chapitre 5 commence par le développement théorique de la génération d'ondes de gravité interne par un cylindre oscillant. Ce développement mathématique plus avancé ouvre la porte aux études expérimentales en laboratoire, permettant de vérifier les limites de la théorie. Le chapitre enchaîne avec un aperçu d'une application plus réaliste et plus pertinente à la géophysique, soit la génération d'ondes associées aux marées ou aux variations de topographie sous-marine. Enfin, le dernier chapitre examine comment les ondes internes se propagent lorsque le milieu est non-uniforme, comme lorsque la profondeur, la stratification, le courant ou le vent varient. L'auteur présente, pour terminer, une brève discussion des spectres empiriques d'ondes dans l'atmosphère et dans l'océan (voir aussi *The Garrett and Munk Internal Wave Spectra Matlab Toolbox*, School of Earth and Ocean Sciences, University of Victoria).

Chaque chapitre se termine avec une série d'exercices pédagogiques sur le thème abordé. L'auteur nous suggère aussi, à la fin du volume, des lectures sur la plupart des thèmes mentionnés. Je considère que *Internal Gravity Waves* par Bruce R. Sutherland présente un traitement approfondi et spécialisé du sujet. Ce volume ne peut être considéré comme une introduction au sujet des ondes internes de gravité, même si le contenu permet au lecteur non familier de s'y initier.

André April  
Environnement Canada

**MATHEMATICAL METHODS FOR OPTICAL PHYSICS AND ENGINEERING**, Gregory J. Gbur, Cambridge University Press (2011), pp. 800,

ISSN: No.: 978-0-521-51610-5; Price: \$90.00 USD.

My thoughts on Gregory J. Gbur's *Mathematical Methods for Optical Physics and Engineering* can be summed up in one phrase: I wish I had this book while completing my undergraduate program. In my opinion, Gbur has written a great mathematical physics textbook which should appeal to both senior undergraduate and graduate students. While the content is bent toward those with a background in optics, much of the covered material should be of interest to a broader physics audience.

Many of the usual mathematical physics concepts are discussed, with chapters covering vector algebra and vector calculus, linear algebra, complex analysis, distributions, infinite series, Fourier series, Green's functions, ordinary differential equations, and partial differential equations. Additionally, the author has included discussions on integral and discrete transforms, Bessel functions, Legendre functions, the calculus of variations, as well as asymptotic techniques.

The text was very readable, being presented in a somewhat informal fashion akin to Griffith's *Introduction to Electrodynamics*. Like this classic text, Gbur chooses to demonstrate the outlined concepts through example, with many of the chapters containing a number of worked-out sample problems. Furthermore, the author strives to frame the material within the larger scope of research optical physics, basing some end-of-chapter questions around various peer-reviewed journal articles in which preceding discussed mathematical concepts were utilized. The reader is thus compelled to analyze these published results within the context of the discussed mathematical framework. In addition, at a number of instances throughout the book, the author touches on how a given mathematical methodology can be applied in computational physics. With these points in mind, I found that the text maintained a satisfying balance between mathematical rigour and practical applications.

As alluded to above, the audience for this book is thought to be broader than what the title would suggest. The chapters on linear algebra and vector calculus, for example, would be great mathematical primers for students in senior undergraduate courses on quantum mechanics and electrodynamics, respectively. Counter to the general appeal of much of the book, however, the author has included "Focus" sections at the end of many of the chapters which highlight how a particular mathematical construct can be applied to a given optical phenomenon. This focus material covers a wide range of optical physics, such as Bragg scattering in crystals and optical cloaking, and those without a reasonable background in the relevant subject matter may find these sections confusing. Fortunately, these sections can be overlooked with little to no impact on the flow of the book.

As someone who has conducted research related to optical physics, I foresee that *Mathematical Methods for Optical Physics and Engineering* will be an indispensable reference tool on my bookshelf. Given the approachable nature of the writing style as well as the clarity with which the material is presented, I view it as an insightful, contemporary book which would serve as a great text for an introductory course in mathematical physics.

Lance Parsons  
Physics and Physical Oceanography  
Memorial University

**OPTICAL PHYSICS**, A. Lipson, S.G. Lipson, H. Lipson, Cambridge University Press, 2011, pp. 572, ISBN: 978-0-521-49345-1; Price US \$75.

What is it about optics and families? For many years at Simon Fraser University, our fourth-year course on Optics used the text *Introduction to Optics*, whose third edition was written by three Pedrotti brothers. More recently, we have switched to *Optical Physics*, which boasts three generations of Lipsons and now has been updated to a fourth edition. (Henry Lipson, *pater familia* and co-author of the first two editions, passed away in 1991.) The defining feature of this book is that it treats optics as a branch of physics, not a subject unto itself for “optical engineers.” It is the book you should consider for a course taught to physicists. At SFU, the course is taught concurrently with one on electrodynamics, which handles the background on waves and Maxwell’s equations, Fresnel coefficients, and treatments of optical properties of matter, leaving time to focus on applications such as a treatment of lasers and, occasionally, semi-classical nonlinear optics.

The outstanding example of the Lipson approach lies in the book’s treatment of Fraunhofer diffraction, whose treatment goes back to the original 1969 edition of the book, which integrated discussions of optics to X-ray crystallography, neutron diffraction, and other wave probes of structure. Thus, there are threads throughout the book that address common issues, including reciprocal lattice vectors, fluctuations (Debye-Waller factors, speckle, etc.), and the inference of structure from intensity measurements (phase retrieval). The Lipson book shows that learning optics can not only open the door to applications but also provide alternate intuitions about solid state physics, etc. The discussion of laboratory demonstrations in technology, while dated, remains valuable conceptually and can inspire course demonstrations.

Another strength of the book is the quality of its problems, which are often creative, difficult, and reinforce physical intuition. Indeed, what first seduced me about this book was a problem matching 20 diffraction masks with 20 patterns. The masks are well chosen, with obvious inspiration for variations. Although some problems need hints, they are better than the

routine, uninspired exercises that many books offer.

Relative to earlier editions, the authors (including newcomer Ariel Lipson) have modernized notation (sorely needed), added many new modern topics and applications, and updated the format, with introductions, summaries, and notes in the margins. Many of the new topics, such as non-imaging optics, negative-index materials, super-resolution microscopy, and optical tweezers, were ones that I had added informally on my own. Now it’s all there! (And there are many topics I was unfamiliar with or did not see how to present: surface plasmon resonance, omnidirectional reflectors, photonic crystals, and more.) Though old, optics remains vital: not a year goes without some new application or fundamental insight appearing in top journals (sometimes, as with cloaking, in the popular press), explainable to undergraduate students. Few other fields of physics can make a similar claim.

Weaknesses? The book is sometimes too qualitative. Building physical intuition is a worthy goal, but sometimes students need a step-by-step derivation. Also, some of the qualitative explanations make sense to someone who already knows the material but will be mysterious to one encountering it for the first time. Areas that would have benefited from a more explicit treatment include

- Fermat’s principle: there should be links to the calculus of variations, the ray equations, a real calculation of mirages, etc.
- Group velocity: The method of stationary phase should be presented, not talked around.
- Wave propagation in anisotropic media: optics is a good place to learn about tensors, and there is no need to finesse explicit calculations, such as the velocities of waves in different directions.
- Diffraction: the treatment of a Gaussian beam is better done using Fourier transforms, starting from the paraxial approximation to the Helmholtz equation.
- Fourier methods: the treatment is frustratingly vague in places. For example, the transform of the comb function has one prefactor in Chapter 4 and another in Chapter 9. These are small issues, but students get hung up on them.

Still, such quibbles are small blemishes in the overall appeal of a book that remains the best treatment I know of optics as a branch of physics. Its reasonable price is all the more reason to give it a try.

John Bechhoefer  
Simon Fraser University

**PARTICLE DETECTORS, SECOND EDITION**, Claus Grupen and Boris Shwartz, Cambridge University Press, 2008; pp. 651, ISBN: 978-0-521-84006-4 (hardback); Price: \$156.18.

This book offers a thorough course in the physics of subatomic particle detection, at a level suitable for advanced graduate students or researchers in the field. While the emphasis is on detectors for high-energy physics, the principles are equally applicable to particle detection in nuclear, medical, astro- and condensed matter physics. Indeed, chapter 16 is devoted to applications in imaging of blood vessels, cancer therapy, tribology, and gamma-ray astronomy.

The first chapter deals with interactions of particles and radiation with matter. Important results, such as the Bethe-Bloch equation for ionization energy loss, are carefully documented but not derived, and references to the primary literature are given. Following this are short chapters discussing detector resolution and counting statistics, radiation dose measurement, and accelerators. The latter only briefly describes linacs and synchrotrons, to the exclusion of other types.

The real meat of the book starts in chapter 5, which discusses ionization counters (gaseous, liquid and solid state), scintillation counters and their adjunct photon detectors, Cerenkov counters, and transition radiation detectors. Chapter 6 covers historical track detectors (cloud and bubble chambers, streamer chambers, emulsions, plastic foil detectors) which are infrequently used in modern research. Chapter 7 discusses tracking detectors (multi-wire and micropattern gas detectors, silicon strips, and scintillating fibre arrays). Chapter 8 discusses calorimetry, including electromagnetic and hadronic calorimeters in detail, as well as a discussion of cryogenic calorimeters used for Dark Matter searches. Following this are chapters on particle identification and neutron detection, and neutrino detection. Chapter 11 deals with momentum measurement in magnetic spectrometers, with careful discussion of the effects of track resolution and multiple scattering on momentum resolution. Only the non-focusing magnetic spectrometers normally used in high-energy physics are considered, not the high-resolution focusing magnetic spectrometers frequently used in nuclear physics. Chapter 12 discusses ageing effects in gaseous detectors and radiation effects in scintillation, Cerenkov, and silicon detectors. Chapter 13 is a detailed look at the Belle detector, as a case study of how the various components discussed in previous chapters is integrated into one detector system. Chapters 14 and 15 cover electronics and data analysis.

Chapter 16 was discussed earlier. Chapter 17 is a valuable “Glossary” which summarizes the important results from the entire book; reading the 21 pages of this chapter alone would be a good introduction to the salient points for those who don’t have time to read the whole book! At the end of each chapter, there is a set of typically 3 to 6 problems for the student to solve, with solutions given at the end of the book, and a set of references to the primary literature. The book concludes with a set of Appendices containing a table of



fundamental constants, definition and conversion of physical units, properties of materials important to detector construction, a list of Monte Carlo event generators, and decay level schemes of common radioactive sources.

The small quibble that I have is that, because the first edition was translated from German, the English grammar is not always perfect, and this

persists into the current edition. On page 83, for example, the text reads "...cavities which are fed by a radiofrequency generation" rather than "...a radiofrequency generator". As another example, on page 137, we read that "semiconductor photodetectors are known for a long time" instead of "have been known for a long time". These few grammatical errors do not materially

detract from an excellent book that can be warmly recommended to all workers in the field of particle detectors.

Stanley Yen, Ph.D.

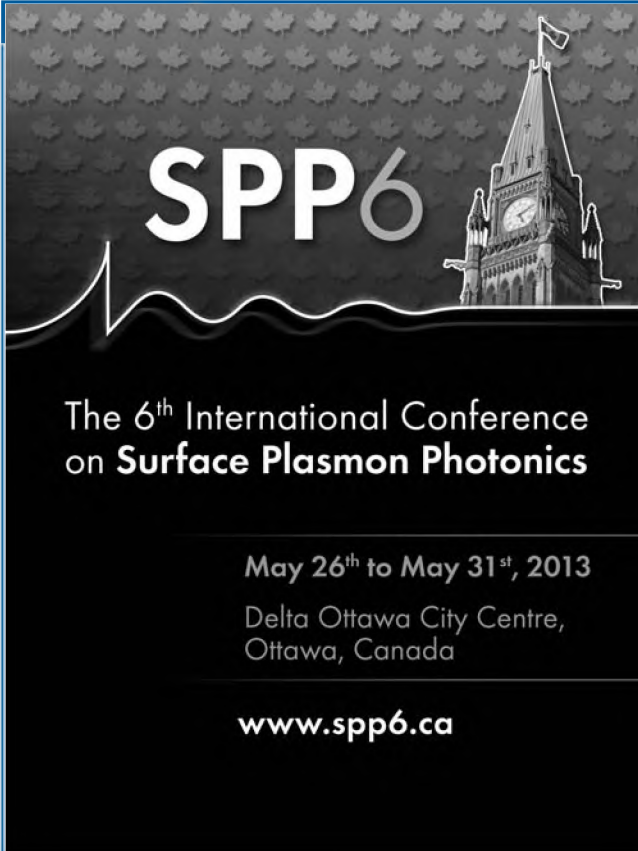
TRIUMF

Adjunct Professor, Department of Physics and Astronomy, UBC

The Editorial Board welcomes articles from readers suitable for, and understandable to, any practising or student physicist. Review papers and contributions of general interest of up to four journal pages in length are particularly welcome. See Suggestions for theme topics and guest editors are also welcome and should be sent to [bjoos@uottawa.ca](mailto:bjoos@uottawa.ca).

Le comité de rédaction invite les lecteurs à soumettre des articles qui intéresseraient et seraient compris par tout physicien, ou physicienne, et étudiant ou étudiante en physique. Les articles de synthèse d'une longueur d'au plus quatre pages de revue sont en particulier bienvenus.

Des suggestions de sujets pour des revues à thème sont aussi bienvenues et pourront être envoyées à [bjoos@uottawa.ca](mailto:bjoos@uottawa.ca).



**SPP6**

The 6<sup>th</sup> International Conference  
on **Surface Plasmon Photonics**

May 26<sup>th</sup> to May 31<sup>st</sup>, 2013

Delta Ottawa City Centre,  
Ottawa, Canada

[www.spp6.ca](http://www.spp6.ca)



## Canada Excellence Research Chair in Experimental Particle Astrophysics Queen's University, Kingston, Ontario, Canada

Applications are now invited for a Canada Excellence Research Chair (CERC) in Particle Astrophysics in the Department of Physics, Engineering Physics, and Astronomy. The CERC program awards world-renowned researchers and their teams up to \$10 million over seven years to establish ambitious research programs at Canadian universities. Information about the program can be found at <http://www.cerc.gc.ca/hp-pa-eng.shtml>. The position will be at the rank of Professor; the appointee will be a distinguished scientist with an international reputation for research excellence in experimental particle astrophysics and a demonstrated record of teaching excellence. The salary offered will be commensurate with qualifications and experience. The world-leading SNOLAB underground research facility ([www.snolab.ca](http://www.snolab.ca)) provides an excellent opportunity for frontier research work in the field of particle astrophysics. Faculty members in the current Queen's Particle Astrophysics group (<http://sno.phy.queensu.ca/group/>) were extensively involved in the very successful Sudbury Neutrino Observatory (SNO) experiment and in the establishment of SNOLAB, and are leading members of the PICASSO, DEAP, and SuperCDMS dark matter experiments and the SNO + experiment studying neutrino-less double beta decay and solar, geo, and supernova neutrinos. The group also has close ties with researchers in the Astronomy group at Queen's. The SNOLAB scientific program is identified in the Queen's Strategic Research Plan as an important priority for the University and Queen's is committed to maintaining leadership in this field.

Candidates should submit a detailed curriculum vitae, a statement of research and teaching interests, and the names of three referees including their contact information to:

Dr. Geoff Lockwood, Head Department of Physics, Engineering Physics & Astronomy

Queen's University Kingston, Ontario, Canada K7L 3N6

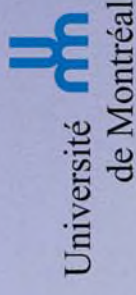
E-mail: [lockwood@physics.queensu.ca](mailto:lockwood@physics.queensu.ca) Tel: (613) 533-6000 x 74797 Fax: (613) 533-6463.

The review of applications will begin on April 10, 2013 and will continue until the position is filled. The preferred starting date is July 1, 2014.

Queen's University is one of Canada's leading research-intensive universities. The Department of Physics, Engineering Physics, and Astronomy has 31 faculty members working in the areas of astronomy and astrophysics, condensed matter physics and optics, engineering and applied physics, medical physics, and particle astrophysics (<http://www.physics.queensu.ca/>). The university is situated on traditional Anishinabe and Haudenosaunee territories on the shores of Lake Ontario, near the mouth of the St. Lawrence River and the Thousand Islands, and is considered a top destination for sailing. In 2012, Kingston ranked as one of the best places to live in Canada. The University invites applications from all qualified individuals. Queen's is committed to employment equity and diversity in the workplace and welcomes applications from women, visible minorities, aboriginal people, persons with disabilities, and persons of any sexual orientation or gender identity. All qualified candidates are encouraged to apply; however, Canadian citizens and permanent residents of Canada will be given priority. The academic staff at Queen's is governed by a collective agreement between QUFA and the University, which is posted at <http://www.queensu.ca/provost/faculty/facultyrelations/qufa/collectiveagreement.html>.



Canadian Association of Physicists  
Association canadienne des physiciens et physiciennes



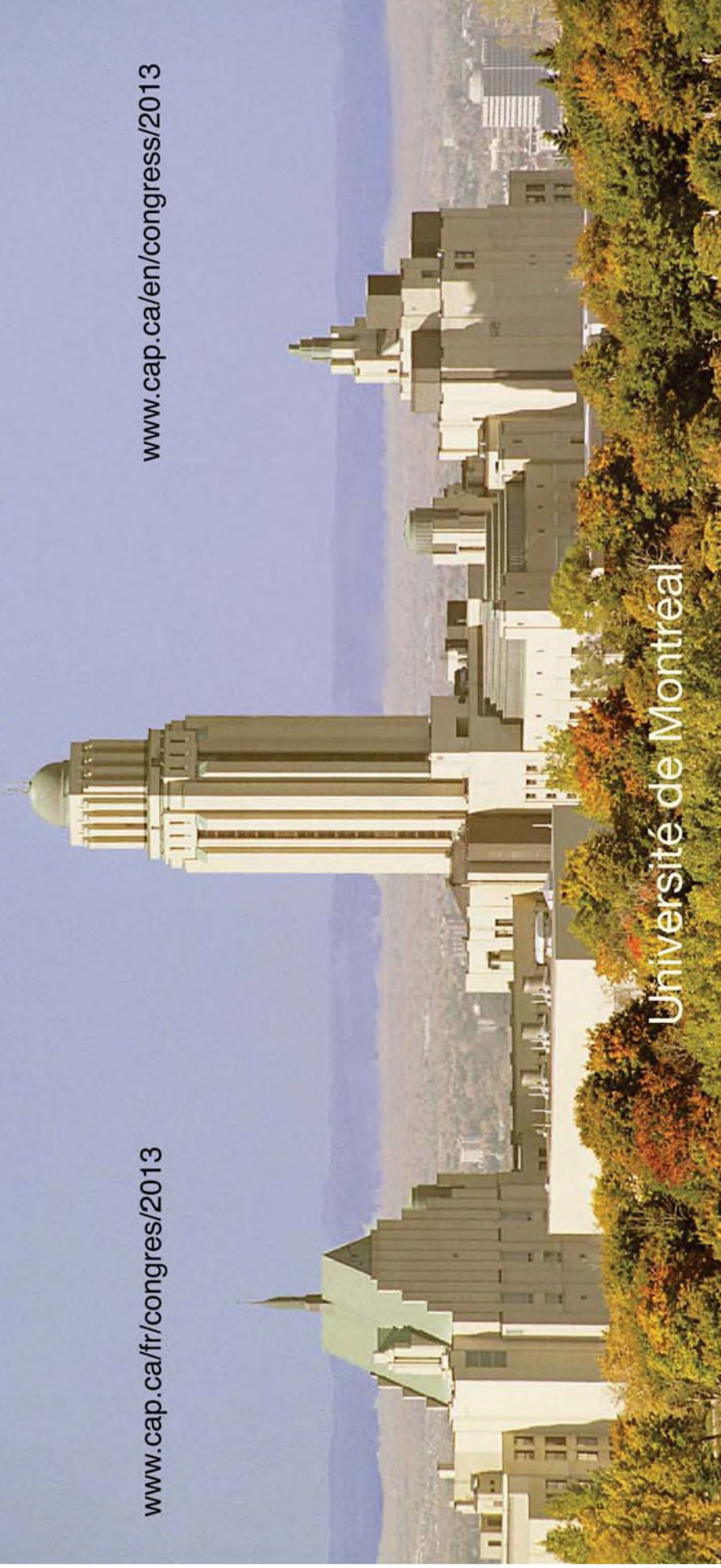
# Congrès de l'ACP-CAP Congress

27 - 31 mai 2013 / May 27 - 31, 2013

[www.cap.ca/fr/congres/2013](http://www.cap.ca/fr/congres/2013)

[www.cap.ca/en/congress/2013](http://www.cap.ca/en/congress/2013)

Université de Montréal



Université d'Ottawa  
University of Ottawa



Carleton University

Graduate Opportunities in Physics

# OTTAWA - CANADA

Études supérieures en physique

University of Ottawa and Carleton University

*A global technology centre and home to national research facilities and institutions, Ottawa provides an ideal setting for graduate studies in physics.*



© Copyright 2012 Roy Tennant, FreeLargePhotos.com



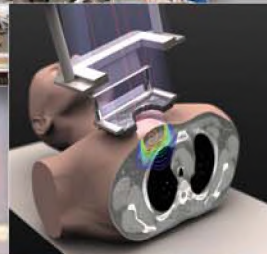
© Copyright 2012 Roy Tennant, FreeLargePhotos.com

**The Ottawa-Carleton Institute for Physics (OCIP)** combines the research strengths of the University of Ottawa and Carleton University by linking their M.Sc. and Ph.D. programs. This unity provides a wide range of research possibilities that are enhanced by 46 regular faculty members and 31 adjunct professors in local institutions such as the National Research Council, the Communications Research Centre, medical facilities and industry. Graduate students are guaranteed financial support through teaching and research assistantships.

**Carleton University** specializes in particle physics and medical physics. Activities in particle physics include ATLAS at the CERN laboratory, SNOLab experiments and detector development as well as theoretical studies in strong and electroweak interactions, extensions of the standard model, quark models, particle astrophysics, and string theory. Medical physics research activities include cancer radiation therapy, medical biophysics especially radiobiology, and imaging with mri, x rays, SPECT and PET. The Ph.D. program in medical physics is accredited by CAMPEP.

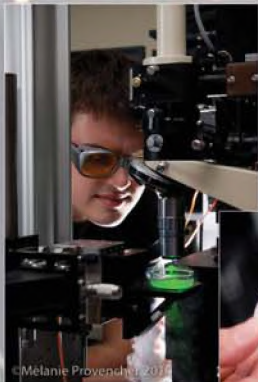


ATLAS Experiment © 2012 CERN



**The University of Ottawa** offers research programs in condensed matter physics and biological physics with an emphasis on interdisciplinary studies: high pressure physics, nanostructures, novel alloys, surface physics, soft matter, systems biology, neurophysics, and environmental systems. Research in the rapidly growing field of photonics includes medical biophotonics, fibre optics and ultra-fast photonics.

**L'Université d'Ottawa** offre des programmes de recherche en **physique de la matière condensée** et en **physique biologique** avec une importante composante interdisciplinaire: haute pression, nanostructures, nouveaux alliages, physique des surfaces, matière molle, systèmes biologiques, neurophysique et systèmes environnementaux. La recherche dans le domaine en pleine expansion de la **photonique** inclut la biophotonique médicale, la fibre optique et la photonique ultra-rapide.



©Melanie Provencien, 2012



©Melanie Provencien, 2012

For information, go to:

[www.physics.carleton.ca](http://www.physics.carleton.ca) | [www.physics.uottawa.ca](http://www.physics.uottawa.ca)

ALL UN-  
DELIVER  
ABLE  
COPIES  
IN  
CANADA  
/ TOUTE  
CORRES  
PONDAN  
CE NE  
POUVANT  
ETRE  
LIVREE  
AU  
CANADA

should be  
returned to  
/  
devra être  
retournée  
à :

Canadian  
Association of  
Physicists/  
L'Association  
canadienne  
des  
physiciens et  
physiciennes

Suite/bur. 112  
Imm. McDonald  
Bldg.  
Univ. of  
d'Ottawa,  
150 Louis  
Pasteur,  
Ottawa,  
Ontario  
K1N 6N5

Canadian Publications  
Product Sales Agreement No.  
40036324 / Numéro de  
convention pour les envois de  
publications canadiennes :  
40036324