

## Photodétection

Dès les premiers jours de la recherche en physique des particules, les détecteurs de photons ont été l'un des éléments essentiels de la boîte à outils de l'expérimentateur. Les techniques principales de détection des particules chargées sont basées soit sur la sensibilité à l'ionisation produite au passage d'une particule, soit sur la sensibilité aux photons produit par scintillation, fluorescence, effet Chérenkov, rayonnement synchrotron ou encore annihilation.

Le premier détecteur de lumière, l'œil humain, reste encore aujourd'hui l'un des plus évolués des instruments d'imagerie des photons. Aucun système élaboré à ce jour ne peut se comparer à l'œil en ce qui concerne la sensibilité, la résolution spectrale, la granularité, l'acquisition des données et les capacités d'analyse de ces données.

La découverte des rayons X par Wilhelm Roentgen en 1895 s'est faite par l'observation d'un écran fluorescent exposé à un tube à rayons cathodiques. Seize ans plus tard, Ernest Rutherford et ses étudiants découvraient l'existence d'un noyau dans l'atome en observant les éclairs lumineux produits par l'impact des particules sur des écrans fluorescents.

Les plaques photographiques, soit couplées à des chambres de Wilson (et plus tard à des chambres à bulles), soit utilisées directement sous forme d'émulsions, ont permis les premières d'enregistrer les interactions des particules avec la matière. Cependant, la tendance générale qui s'est manifestée en physique des particules expérimentale vers la détection en temps réel et le traitement numérique a grandement réduit le rôle des films photographiques.

L'invention du tube photomultiplicateur à vide en 1936 a également ouvert les portes sur un nouvel aspect de l'expérimentation en permettant la chronométrie précise des événements jusqu'au millionième de millionième de seconde.

La découverte de l'antiproton par O. Chamberlain, E. Segré, C. Wiegand et



T. Ypsilantis en 1955 a été réalisée grâce à des mesures précises des vitesses des particules. Les techniques des compteurs Chérenkov et de la mesure du temps de vol ont été nécessaires pour distinguer les antiprotons plus lourds et plus lents des mésons bien plus nombreux, légers et rapides. Les signaux de deux scintillateurs plastiques éloignés l'un de l'autre étaient tous deux observés par un tube photomultiplicateur et traités électroniquement pour enregistrer le temps de vol des particules parcourant l'espace qui les séparait.

Après l'apparition des dispositifs semi-conducteurs photosensibles dans les années 50, les progrès se sont ralentis dans le domaine des photodétecteurs. Les dispositifs nouveaux étaient le plus souvent des améliorations ou des variantes de dispositifs existants optimisés pour des conditions d'utilisation spécifiques. Cependant la situation a considérablement évolué durant la dernière décennie.

Grâce à la recherche dans les compagnies privées comme dans les laboratoires publics, il s'est produit un développement rapide des connaissances et des techniques de base dans le domaine de la détection des photons et de l'imagerie aboutissant à l'introduction de dispositifs semi-conducteurs, gazeux et à vide complètement nouveaux.

En recherche fondamentale, l'impulsion pour améliorer les détecteurs est venue des astronomes et de leur désir de scruter le ciel sur une très large gamme d'énergies et des

conditions expérimentales extrêmement difficiles rencontrées dans les accélérateurs modernes à collision de faisceaux. Dans le secteur du privé, le souhait de scruter plus profondément l'intérieur du corps humain et la nécessité d'améliorer les techniques de diagnostic médical semblent être le principal aiguillon.

Du fait de ces progrès considérables, Pierre Besson du CEA, Direction des Sciences de la Matière (DSM), DAPNIA, a pensé et proposé l'idée d'une conférence internationale sur les développements nouveaux en photodétection. Puis, avec l'aide d'un comité local de physiciens de l'IN2P3 (Institut de Physique Nucléaire et de Physique des Particules) et de la DSM, il a organisé la première conférence internationale sur les innovations en photodétection.

La conférence dénommée Beaune 96 s'est tenue à Beaune, France, sous le parrainage de la DSM, de l'IN2P3, du Ministère de la Recherche et de la Commission Européenne. Quelque 180 participants de 16 pays y ont pris part. Parmi eux se trouvaient des physiciens et des ingénieurs travaillant dans des domaines différents: physique des hautes énergies, nucléaire, astrophysique et instrumentation médicale.

Le programme s'articulait autour de sessions plénières, consacrées aux sujets les plus importants, complétées par des sessions d'affiches comptant plus de 90 contributions réparties sur cinq jours. Une exposition industrielle consacrée aux produits dérivés a donné lieu à d'intéressantes discussions. Les entreprises ont également

exposé leurs travaux les plus récents. On trouvera les comptes rendus de la conférence dans NIM A 387 (1997).

Georges Charpak, du CERN, lauréat du prix Nobel de physique, présidait la session initiale. Dans son allocution d'ouverture, il a rappelé aux participants les bienfaits pour l'humanité de l'imagerie par les photons et les obligations morales des scientifiques quant au transfert rapide des idées et des technologies nouvelles vers le domaine de l'imagerie médicale.

Amos Breskin de l'Institut Weizmann a présenté le premier exposé, un excellent tour d'horizon sur la détection des photons intitulé 'Les détecteurs de photons pour le 21<sup>e</sup> siècle' qui plantait le décor de la conférence en faisant le point sur l'état actuel du domaine; il a décrit les recherches en cours et analysé l'orientation des recherches pour la prochaine décennie.

L. Vigroux (CEA/DSM/DAPNIA) a dressé l'état des lieux en astronomie où une génération de détecteurs entièrement nouveaux a été mise au point. Dans les deux domaines, la situation actuelle d'évolution et d'innovation est sans précédent, presque chaque année apparaissent des dispositifs nouveaux et des techniques inédites.

Du fait de leurs sensibilités et caractéristiques différentes, on classe souvent les photodétecteurs en trois groupes: dispositifs à vide, photodétecteurs gazeux et dispositifs à semi-conducteurs. La conférence a traité des avancées significatives dans les trois catégories et des contributions substantielles sont venues aussi bien de la physique appliquée que de la recherche fondamentale.

Dans le cas des dispositifs à vide, les contributions ont montré une tendance vers la mise au point de détecteurs à localisation. Ils sont utilisés en imagerie médicale et scientifique et pour la lecture de détecteurs produisant de la lumière dans des fibres ou des faisceaux de fibres. Certains dispositifs hybrides (voir p.8) dans lesquels la fenêtre d'entrée et la photocathode sont identiques à ceux d'un photomultiplicateur normal, mais dans lesquels un détecteur à diode au silicium remplace les étages de dynodes multiplicatrices, connaissent un développement très prometteur. Le

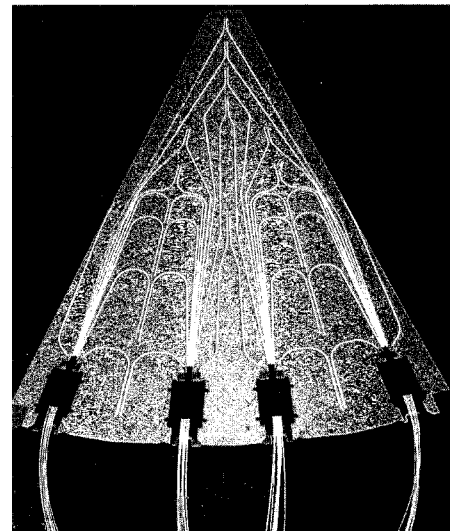
bombardement direct des photo-électrons produit le signal électronique. Les avantages les plus importants de l'approche hybride sont la stabilité du gain, la granularisation potentielle, l'insensibilité au champ magnétique, l'uniformité de la réponse et la capacité de comptage des photons individuels.

Les exposés ont également mis en évidence les progrès significatifs des photomultiplicateurs à dynodes grillagées conçus pour l'emploi dans les champs magnétiques ou pour des applications exigeant la localisation. Apparus il y a une dizaine d'années, les dispositifs à dynodes grillagées ont été très rapidement mis en oeuvre en physique des hautes énergies. Les progrès présentés à la conférence concernaient une réduction considérable de la diaphonie, c'est-à-dire de la quantité de signal d'un certain pixel ou grain optique apparaissant de façon erronée dans les pixels électroniques adjacents.

Au total six groupes ont fait état de leur emploi actuel ou prévu de phototubes à localisation ou de photodiodes hybrides: calorimètre CDF amélioré (M. Lindgren, UCLA), spectromètre petits angles de H1 (K. Hiller, DESY), calorimètre chachlik de DELPHI (M. Bonosini, INFN Milan), calorimètre hadronique de CMS (J.E. Elias, laboratoire Fermi, et P. Cushman, Minnesota), détecteur Chérenkov à focalisation annulaire de LHC-B (D. Websdale, Imperial College, et J. Séguinot, Collège de France), gamma-caméras médicales (D. Puertolas, INFN Rome).

Les détecteurs gazeux sont basés sur la photoconversion suivie de la multiplication de la charge dans un gaz. Souvent il s'agit d'applications de grandes dimensions car aucune autre technique n'offre à un coût abordable la possibilité de couvrir des mètres carrés de surface. Les applications à la physique de l'imagerie par anneaux Chérenkov et à l'imagerie médicale des rayons gammas ont en commun une exigence fondamentale: elles demandent toutes deux un bon rendement pour les photons des régions du bleu et de l'ultra-violet. Comme la plupart des matériaux des photocathodes ne sont exploitables que dans le vide, la solution miracle pour les détecteurs à gaz peut être,

*Les améliorations apportées au calorimètre-bouchon du détecteur CDF au Tévatron du laboratoire Fermi constituent un exemple où les techniques des scintillateurs ont bénéficié du développement de photodétecteurs comprenant de nombreux pixels dans un seul boîtier (comme le photodétecteur hybride – voir page 8). On recueille la lumière d'une mosaïque de carreaux scintillants indépendants à l'aide des fibres à décalage de longueur d'onde qui y sont noyées, ces fibres sont raccordées à d'autres fibres claires qui convoient le signal jusqu'à des photodétecteurs accessibles.*

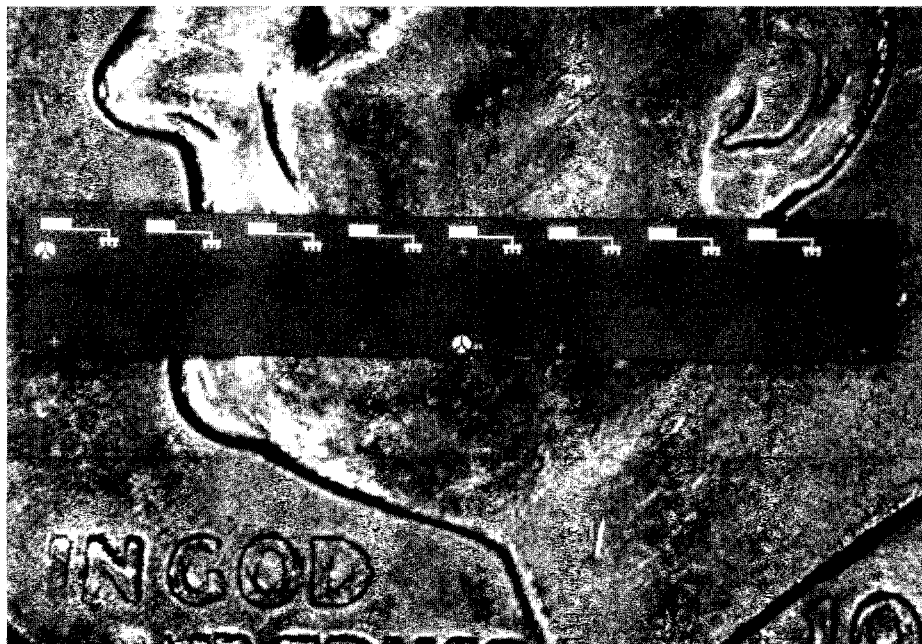


soit une vapeur photosensible à température ambiante, soit une photocathode stable en présence d'air qui puisse être appliquée comme de la peinture ou une tapisserie.

Depuis peu on considère que l'iodure de césium représente le meilleur candidat dans cette dernière catégorie. Les progrès dans les photodétecteurs à amplification dans un gaz (J. Va'vra, SLAC) et les contributions de quelques groupes méticuleux et compétents (J. Friese pour HADES, M. Staric pour HERA-B et C. Coluzza pour RD26 au CERN) montrent qu'il est nécessaire d'étudier davantage des sujets relatifs aux interactions entre la qualité de la surface, la structure micro-cristalline et le rendement quantique. Etant donné que l'innovation technologique de l'iodure de césium date seulement de la dernière décennie, les perspectives sont favorables en ce qui concerne le développement de photocathodes de grandes surfaces.

P. Miné du LPNHE a récapitulé les recherches de nouvelles vapeurs organiques sensibles aux ultra-violets, les résultats les plus prometteurs provenant d'une classe de dérivés du ferrocène. Les progrès des photodétecteurs à semi-conducteurs ont été encore plus spectaculaires. Les photodiodes à avalanche (APD) sont

Réseau linéaire de photodétecteur de 1 mm de diamètre à 8 éléments destiné à un VLPC (compteur de photons du domaine visible) et destiné à l'amélioration de l'expérience D0 au Tévatron du laboratoire Fermi, avec lecteur de trajectographe à fibres scintillantes et un pixel VLPC par fibre du trajectographe. Grâce à un rendement quantique élevé et à un bruit faible, ce système permet la lecture fibre par fibre avec un niveau de lumière très bas.



arrivées à maturité, deux structures entièrement nouvelles ont été inventées et les premiers résultats sont apparus sur les détecteurs à semi-conducteurs composés. Les neuf présentations concernaient différents aspects des APD modernes, ces travaux sont poussés par les exigences de lecture dans l'environnement du LHC au CERN. Un excellent tour d'horizon sur l'emploi des photodiodes à avalanche pour la détection des particules (J.P. Pansart, CEA Saclay) a servi d'introduction à la session sur les APD.

Les compteurs de photons dans le domaine visible (VLPC) représentent une nouvelle idée de photodétecteurs à semi-conducteurs tirant parti du gain obtenu dans la bande interdite où la conduction est assurée par les impuretés. Mise au point à l'origine pour des applications à la vision nocturne, cette nouvelle variante permet d'utiliser de grands détecteurs à fibres scintillantes pour la trajectographie des particules. La combinaison d'un bon rendement quantique et d'une excellente efficacité de détection des photoélectrons individuels répond exactement aux exigences. M. Wayne, Notre Dame, a présenté les très bons résultats obtenus à l'aide d'un système de

lecture prototype à fibres scintillantes comptant 3000 VLPC exploités sur plusieurs mois dans le détecteur D0 amélioré au laboratoire Fermi.

L'autre structure nouvelle de photodétection à semi-conducteurs repose sur des avalanches auto-coupantes dans une région de champ électrique élevé. Appelée MRS, car il s'agit d'une structure métal-couche résistive-silicium, son principe consiste à convertir les photons incidents en paires électron-trou, à permettre aux électrons de migrer vers la région de champ élevé, puis à couper l'avalanche qui se développe grâce à une couche résistive empêchant la formation d'une étincelle. Une fois encore ces idées ont jailli durant la dernière décennie en réponse aux exigences que suscitent les collisionneurs et accélérateurs de particules ainsi que l'imagerie médicale pour le diagnostic.

Les progrès annoncés à la conférence comprenaient l'extension de la sensibilité vers les longueurs d'ondes plus courtes et une meilleure robustesse face au vieillissement dans des conditions de forte illumination. Cette technologie encore dans l'enfance promet beaucoup pour l'avenir. Beaune 96, la première conférence moderne sur les progrès

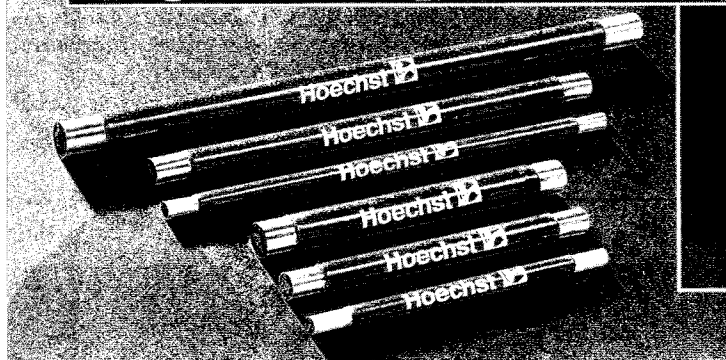
des photodétecteurs, a été inondée de progrès technologiques récents. La décennie écoulée a vu l'apparition d'innovations de grande portée dans la détection des photons et l'imagerie. Les séances de la réunion ont permis de combiner efficacement les grandes synthèses et les présentations d'exposés sur les recherches les plus avancées.

Les sujets les plus pointus sont toujours passionnants par eux-mêmes, mais tout un chacun a pu apprécier la synergie qui est apparue avec les applications à la médecine. Les participants se sont accordés à prévoir que la prochaine conférence, Beaune 99, verrait l'apparition d'avancées encore plus importantes, avec la possibilité que se révèle encore une autre technique radicalement nouvelle.

*Par John Elias, Laboratoire FERMI*

**Move forward with HTS applications**

**using Hoechst superconductors**



Our proprietary Melt Cast Process (MCP) for producing BSCCO 2212 bulk material permits the manufacture of a wide variety of shapes. It also allows the integration of low resistance silver contacts and easy mechanical processing.

HTS current leads based on MCP BSCCO rods and tubes from Hoechst are the first application of ceramic superconductors in electrical power engineering

with currents up to 10.000 A. A reduction of the heat load to the 4K level by more than a factor of 10 was achieved. This results in a significant reduction of the refrigeration costs and allows new innovative cooling concepts.

Parts of up to 400 mm in length or diameter can also be used in applications in the field of magnetic shielding, current limiters or others.

If you are interested in further information, please contact:

Hoechst AG  
attn. Dr. S. Gauss,  
Corporate Research  
& Technology, HTSL  
D-65926 Frankfurt, Germany  
Tel: (+49) 69-305-1 66 54  
Fax: (+49) 69-305-1 64 36  
E-mail: hts@crt.hoechst.com

**Hoechst** ■



**UNIVERSITY OF  
OXFORD**

in association with St Hilda's College  
or Linacre College

**University Lectureship in Physics**  
(Theoretical Physics)

Applications are invited for the above post, which is available from 1 October 1998, from candidates with research interests in theoretical physics overlapping particle physics, astrophysics and cosmology.

Under arrangements described in the further particulars the successful candidate may be offered either a tutorial fellowship at St Hilda's College, in which case the stipend will be on a scale £16,045 - £29,875 with additional college emoluments for the tutorial appointment bringing the combined salary according to age up to £35,754, or a non-tutorial fellowship at Linacre College, in which case the stipend will be according to age on a scale £16,045 - £33,202.

Further particulars (containing details of the duties and full range of emoluments and allowances attaching to both the university and the college posts) may be obtained from Mrs G Dancey, Theoretical Physics, 1 Keble Road, Oxford OX1 3NP, England. Tel: (44) (1865) 273995, Fax (44) (1865) 273947. Email: G.Dancey1@physics.ox.ac.uk.

**Applications (8 copies except in the case of overseas candidates when only one is required) should be submitted to Mrs Dancey by 17 April 1998. These should include a curriculum vitae, a list of publications, a brief statement of research interests/plans and teaching experience, and the names, addresses, telephone and fax numbers of three referees (not more than two from the same institution), who should be asked to write letters of reference to arrive by the same date.**

**The University is an Equal Opportunities Employer.**



**THE PHYSICS INSTITUTE AT  
BONN UNIVERSITY**

has a

**Professorship (C3)**

to be filled for the academic year 1999.

The research activities of the Physics Institute currently include experiments in high energy particle physics at HERA (ZEUS), LEP (OPAL) and LHC (ATLAS), experiments of medium energy physics and synchrotron light at ELSA and MAMI as well as experiments on physics of the earth's atmosphere.

Particularly adapted for this position are applicants who are interested in research at the electron-positron and proton-proton storage rings at CERN, are experienced in experimental high energy physics and in the development of novel detection techniques.

The teaching duties will involve courses on particle physics, on experimental techniques and on courses for first and second year students who are not majoring in physics.

The conditions of employment are described in § 49 of the North-Rhine-Westphalia University Law. The University of Bonn particularly encourages applications from qualified women. Applications from handicapped individuals will also be given priority.

Applications with the usual documents should be sent before **31.03.1998** to:

Vorsitzender der  
Fachgruppe Physik/Astronomie  
Endenicher Allee 11-13  
53115 Bonn

GERMANY