

PRINCIPES ET TECHNIQUES DE LA DETECTION

JOËL POUTHAS

*Institut de Physique Nucléaire
IN2P3-CNRS, Université Paris-Sud
91406 Orsay Cedex*

Résumé

Le cours avait pour objectif de résumer les principes de fonctionnement des principaux détecteurs utilisés dans les expériences de physique nucléaire. Après des généralités sur la détection, les deux principales familles de détecteurs ont été présentées : les détecteurs à ionisation de type gazeux ou à semi-conducteurs et les détecteurs à émission de lumière (scintillateurs et photo-détecteurs). Le contenu de ces cours a fait l'objet de plusieurs livres et articles. Des commentaires bibliographiques nous ont paru être la méthode la plus efficace pour retrouver l'essentiel du cours et surtout permettre un approfondissement dans les domaines d'intérêt du lecteur.

Abstract

The aim of the lessons was to summarize the working principles of the main detectors used in nuclear physics experiments. After some general considerations, the two main detector families were presented: gaseous and semiconductor ionization detectors and detectors making use of light emission (scintillators and photo-detectors). Those subjects are developed in several books and dedicated papers. Instead of writing a new and necessary limited version, I think that it is more useful to propose a list of references with associated commentaries. I hope that it will give the opportunity to the reader to look for information in his particular field of interest.

1. Introduction

La version écrite du cours n'est pas un résumé de la version orale car j'ai estimé que l'essentiel des informations peut se trouver sous différentes formes dans différents livres, articles et présentations sur le Web. J'ai préféré donner une bibliographie commentée qui me paraît beaucoup plus utile au lecteur qui souhaite retrouver les éléments de base et approfondir les sujets liés à ses domaines d'intérêt.

Les références bibliographiques sont de différentes origines qui n'ont pas les mêmes statut sur le contrôle de l'information :

- Livres généraux
- Chapitres de livres. Articles et documents de revue
- Cours disponibles sur le Web
- Articles spécifiques
- Documents de collaborations. Rapports internes. Thèses

Les livres ou les chapitres de livres publiés par un éditeur dans un ouvrage collectif ont en général fait l'objet d'un travail en profondeur et sont des sources riches en information tout particulièrement pour aborder un sujet. Souvent de conception assez ancienne, ils contiennent néanmoins les principaux fondements et les références bibliographiques essentielles. Pour les nouveaux détecteurs gazeux apparus dans les années 1990 et qui ne sont pas traités dans ces livres, on peut consulter les articles de synthèse de Fabio Sauli présentés à différentes conférences ou mon cours dédié (avec une version écrite) de l'Ecole Joliot Curie en 2001.

Les articles spécialisés sont principalement extraits de la revue « Nuclear Instruments and Methods in Physics Research ». Malheureusement, cette revue a de plus en plus tendance à publier (sans distinction spéciale) des comptes rendus de conférences et même d'ateliers (Workshop) où les contrôles par les éditeurs scientifiques sont en général beaucoup moins sévères que ceux des « referees ». Bien que moins souvent citée pour les détecteurs, il ne faut pas oublier la revue I.E.E.E. Transactions on Nuclear Science qui a aussi publié beaucoup d'articles de base dans le domaine. Les Conférences annuelles organisées par IEEE sont aussi une source d'actualité même si elles ont aussi leur lot de présentations simplement descriptives de dispositifs expérimentaux. Pour approfondir la compréhension des principes de base de certains détecteurs, il ne faut pas avoir peur de lire des articles anciens (années 60 et 70) à une époque où l'étude des détecteurs était considérée comme un domaine de physique et non comme un simple domaine d'application technique.

Les « grands détecteurs » comme ATLAS, CMS ou ALICE au CERN font l'objet de publications spécifiques à différents stades de leur construction : T.P. (Technical Proposal), T.D.R. (Technical Design Report) et nombreuses notes internes. Cette volumineuse documentation, organisée par Collaboration et classe de détecteurs (détecteurs de vertex, calorimètre électromagnétique ou hadronique, bras dimuon...) traite en détails certains aspects technologiques des détecteurs qui sont rarement décrits dans les autres sources. Elle est en grande partie accessible sur le site Web du CERN. Il faut quand même se méfier de certaines justifications des solutions proposées (en particulier dans les TP) car ces documents constituent aussi la base de défense du projet devant les instances de tutelle.

Le Web est aujourd'hui une source très importante et rapide de documentation sur laquelle il faut conserver un esprit critique, en particulier sur les pages personnelles qui n'engagent que leurs auteurs.

2. Livres généraux

- G. F. Knoll, Radiation Detection et Measurement, John Wiley (1989) (Première édition 1979, dernière édition 2000)

- W. R. Leo, Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments, Springer-Verlag, (1994) (Première édition 1987)

Les livres de Knoll et de Leo, écrits sur des plans identiques, sont sans doute les ouvrages les plus lus. Ils restent très intéressants pour les phénomènes de base (interaction rayonnement matière, compteur proportionnel, détecteurs semiconducteurs...) mais n'abordent que très peu les techniques de détection en physique des hautes énergies.

- C. F.N. Tsoufanidis, Measurements and Detection of Radiation, Taylor & Francis, (1995) (Première édition 1983)

Le livre de Tsoufanidis contient comme les précédents des chapitres sur les principaux détecteurs de basse énergie. Une part importante est aussi consacrée à des techniques expérimentales telles que la spectroscopie (gammas et neutrons) ou l'analyse par activation.

- C. F. G. Delaney and E. C. Finch, Radiation Detectors, Oxford University Press, 1992

Ce livre est, comme indiqué dans la préface, restreint à la détection des rayonnements au dessous de 100 MeV. Les explications sont souvent assez longues et rendent la lecture plus ennuyeuse que celle des trois ouvrages précédents.

- K. Kleinknecht, Detectors for particle radiation, Cambridge University Press, 1998 (Première édition : en allemand 1985, en anglais 1986)

Ce livre traite des détecteurs en physique des particules. Après un chapitre d'introduction (Physics foundations), le découpage se fait par thèmes de mesure : ionisation, position, temps, identification, énergie, impulsion. Le dernier chapitre présente quelques exemples de détecteurs.

- C. Grupen, Particle Detectors, Cambridge University Press, 1996

Le livre de Grupen est entièrement consacré aux détecteurs en physique des particules. Après un premier chapitre sur l'interaction particule / matière, les détecteurs sont classés suivant les méthodes expérimentales : mesures d'ionisation et de trajectoires, de temps, d'impulsion, identification de particules... Malgré une édition récente, on peut y trouver aussi la description d'anciens détecteurs peu ou pas utilisés aujourd'hui comme les chambres à bulles, à étincelles ou les émulsions.

- R. C. Fernow, Introduction to experimental particle physics, Cambridge University Press, 1986

Ce livre ne traite pas uniquement des détecteurs, mais aussi de quelques rappels de physique expérimentale. Les chapitres 7 à 12 sont consacrés aux détecteurs mais principalement en physique des hautes énergies.

3. Livres spécifiques

- W. Blum and L. Rolandi, Particle Detection with Drift Chambers, Springer-Verlag, 1993

Comme son titre ne l'indique pas à première vue, ce livre n'est pas uniquement intéressant pour les chambres à dérive. Plus précisément, il traite des fondements et des mesures d'ionisation dans les gaz, de dérive et d'amplification. Il traite aussi les aspects électrostatiques, la création du signal et la précision des mesures. C'est un livre très riche dans le domaine des détecteurs gazeux à ionisation.

- G. Lutz, Semiconductor Radiation Detectors, Springer: Device Physics, 1999
Après une première partie sur les principes et les structures de base des semiconducteurs, le livre traite des détecteurs utilisés pour les mesures d'énergie et de position. Il aborde également l'électronique associée et son intégration ainsi que d'autres aspects comme les technologies de fabrication et la résistance aux rayonnements. C'est un livre complet dans le domaine.

- Experimental Techniques in High-Energy Nuclear and Particle Physics, (ed ; T. Ferbel), World Scientific, 1991 (Première édition 1987)
Le livre de Ferbel est composé d'une réédition fac simile d'articles déjà publiés, mais pas toujours faciles à trouver. C'est le cas du document de F. Sauli [Principles of Operation of Multiwire Proportional Chambers, CERN Report 77/09 (1977)] qui reste encore aujourd'hui une source essentielle sur les chambres à fils.

- Experimental Techniques in Nuclear Physics, (ed. N. Poenaru et W. Greiner), Walter de Gruyter, 1997
Le livre de Poenaru et Greiner dont les 16 chapitres sont écrits par différents auteurs est principalement consacré (comme indiqué par son titre) à la physique nucléaire. Il traite de détecteurs (détecteurs gazeux, scintillateurs...) et de techniques expérimentales (détection des neutrons, mesure de durée de vie, télescopes pour l'identification de noyaux...). Les articles sont de niveau inégal.

- Instrumentation in High Energy Physics (ed. F. Sauli), World Scientific, 1992
Sous la plume d'auteurs différents, ce livre comprend 6 chapitres bien documentés sur les principes de base mais les descriptions de certains ensembles de détecteurs sont (en raison de la date d'édition) un peu anciennes : Silicon Microstrip Detectors ; The Time Projection Chamber ; Fast scintillators ; Electromagnetic and Hadronic Calorimeters ; Liquid Detectors for Calorimetry ; Large Area and Muon Detectors.

- Particle Physics Booklet, July 2008
Ce livre de poche, régulièrement remis à jour, contient beaucoup de données (tables, formules, explications de base...). C'est un abrégé de Review of Particle Physics, dernière édition : C.Amsler et al, Physics Letters B 667, 1 (2008). On peut se le procurer à la documentation du CERN. Pour une information plus complète, on peut consulter l'édition sur le WEB : <http://pdg.lbl.gov>
Pour la partie détecteurs : <http://pdg.lbl.gov/2008/reviews/pardetrpp.pdf>
Comme les autres items, la partie sur les détecteurs (72 pages, 153 références) est régulièrement remise à jour (signé et daté) par de très bons spécialistes du domaine. Même si l'orientation est nettement vers la physique des particules, on y trouve une bonne présentation des principes de base.

4. Cours de l'Ecole Joliot-Curie

Les techniques expérimentales en physique nucléaire reviennent régulièrement comme thème de l'Ecole Joliot-Curie. Tous les cours écrits sont disponibles sur le site web de l'Ecole.

Instrumentation en Physique Nucléaire et en Physique des Particules,
Ecole Joliot-Curie de Physique Nucléaire 1988

Physique nucléaire instrumentale : des éléments pour un bon choix,
Ecole Joliot-Curie de Physique Nucléaire 1994

Physique nucléaire instrumentale : de la mesure à la grandeur physique,
Ecole Joliot-Curie de Physique Nucléaire 2001

Le cours de Stéphanie donné en 2001 constitue une très bonne approche générale sur les détecteurs en physique nucléaire :

S. Ottini-Hustache, L'interaction rayonnement-matière et les grandes familles de détecteurs , Ecole Joliot-Curie 2001, pages 1-64.

5. Quelques cours sur le Web

Des cours sur les détecteurs sous forme de transparents ou parfois de version écrite sont accessibles sur le Web. Malheureusement, cette forme de diffusion n'est pas toujours pérenne et certains sites ne sont pas maintenus ou sont en accès réservé. En 2008, les trois adresses données ci-dessous étaient fonctionnelles

The Particle Detector BriefBook.(R.K. Bock et A.Valiescu)

<http://physics.web.cern.ch/Physics/ParticleDetector/BriefBook>

Ce document a une forme particulière de glossaire (en anglais) avec de nombreux renvois et prend tout son intérêt lorsqu'on recherche la signification de termes spécifiques liés aux détecteurs et plus généralement aux techniques expérimentales.

« Summer Student Lectures » du CERN

<http://cdsweb.cern.ch/collection/Summer%20Student%20Lectures?ln=fr&as=1>

Ce site de cours du CERN orienté sur la physique des particules contient de nombreux éléments qu'on peut rechercher par des mots clés. En ce qui concerne les détecteurs, on peut consulter les cours « Particle Detectors » de C. Joram. Pour les cours donnés en 2001 et en 2002, on peut avoir accès aux transparents (Joram -> Talk -> Transparencies). J'ai utilisé certains transparents de Christian Joram pour mes cours sur les scintillateurs et photodétecteurs.

Detector Techniques Lectures at SLAC

<http://www-group.slac.stanford.edu/sluo/lectures/Detector-Lectures.html>

Sur ce site on peut trouver la série de cours donnés au Laboratoire SLAC (USA) de septembre 1998 à février 1999. Les cours ont été donnés par des spécialistes comme J. Va'vra pour une partie des détecteurs gazeux. Certains cours sont rédigés et d'autres sont constitués de transparents ou de notes de cours. L'orientation est sur la physique des hautes énergies mais les premiers cours sur les « basic concepts » des détecteurs gazeux ou semiconducteurs ainsi que sur l'électronique sont très pédagogiques et utiles pour la compréhension des principes de la détection en physique nucléaire. C'est une documentation inégale mais en général très intéressante.