



La revue pour l'histoire du CNRS

19 | 2007

Neurosciences : essor et enjeux

IPN : l'émergence des détecteurs à semi-conducteurs

L'impact d'une percée technologique sur la recherche

René Bimbot et Laurence Lavergne



Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/histoire-cnrs/4753>

DOI : 10.4000/histoire-cnrs.4753

ISSN : 1955-2408

Éditeur

CNRS Éditions

Édition imprimée

Date de publication : 31 décembre 2007

ISBN : 978-2-271-06560-5

ISSN : 1298-9800

Référence électronique

René Bimbot et Laurence Lavergne, « IPN : l'émergence des détecteurs à semi-conducteurs », *La revue pour l'histoire du CNRS* [En ligne], 19 | 2007, mis en ligne le 31 décembre 2009, consulté le 03 mai 2019.

URL : <http://journals.openedition.org/histoire-cnrs/4753> ; DOI : 10.4000/histoire-cnrs.4753

Ce document a été généré automatiquement le 3 mai 2019.

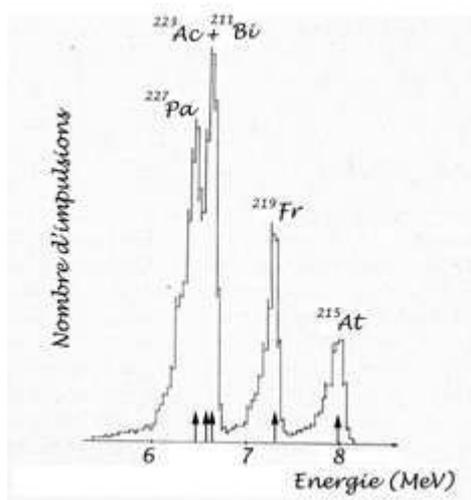
Comité pour l'histoire du CNRS

IPN : l'émergence des détecteurs à semi-conducteurs

L'impact d'une percée technologique sur la recherche

René Bimbot et Laurence Lavergne

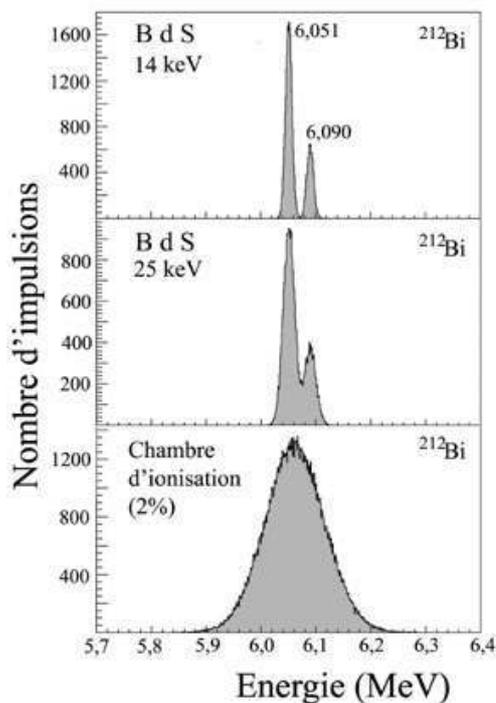
- 1 Au cours des premières années d'existence du Laboratoire de physique nucléaire d'Orsay, toutes les expériences réalisées [1] mettent en jeu des détecteurs classiques, chambres d'ionisation, compteurs proportionnels, scintillateurs. Ceux-ci possèdent généralement une efficacité¹ généralement satisfaisante (celle des chambres d'ionisation atteint couramment 50 %), mais leur pouvoir de résolution² est souvent trop faible par rapport aux exigences des expériences. Par exemple, dans le spectre présenté ci-contre, quatre raies seulement sont visibles, alors qu'il en contient cinq [2].



Spectre du protactinium 227 et de ses descendants. Le groupe de deux pics vers 6,6 MeV contient en fait les contributions (indiquées par des flèches) du protactinium 227 à 6,46 MeV et de deux de ses descendants, l'actinium 223 à 6,64 MeV et le bismuth 211 à 6,60 MeV (d'après [2]). © IPN Orsay

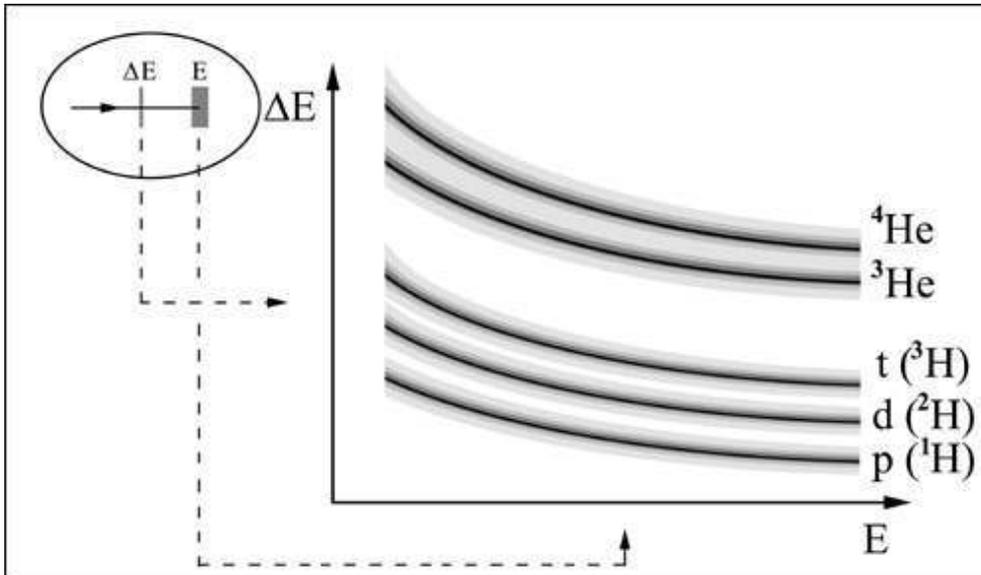
- 2 Lorsqu'il s'agit de détecter des rayonnements gamma, les détecteurs privilégiés sont les cristaux d'iodure de sodium (NaI). Ceux-ci sont couramment utilisés par les spectroscopistes qui mesurent avec précision l'abondance et l'énergie des rayonnements gamma émis au cours de la désintégration de noyaux radioactifs³, mais on les retrouve aussi dans des expériences sur faisceau, éventuellement associés à des scintillateurs d'iodure de césium (CsI) pour la détection des particules chargées [3]. Qu'elles soient orientées vers l'étude de la structure nucléaire ou vers les mécanismes de réactions [1], ces expériences sur faisceau nécessitent souvent d'identifier les particules chargées détectées en même temps que l'on mesure leur énergie. Une telle identification s'effectue au moyen de « télescopes », associant un détecteur mince (CsI ou plastique scintillant) que la particule traverse en déposant une partie $\frac{E_0}{E}$ de son énergie, et un détecteur épais (CsI, ou NaI), aligné avec le premier, où la particule perd son énergie restante E [4, 5]. La faible résolution de ces dispositifs se traduit par des limitations sur la précision des énergies mesurées, mais aussi sur le pouvoir discriminant des télescopes, qui s'avèrent souvent incapables de séparer des isotopes des éléments même légers, au-delà du béryllium ($Z=4$).
- 3 Dans ces premières années de fonctionnement du laboratoire de physique nucléaire d'Orsay, l'insuffisante résolution des détecteurs constitue donc une des limitations cruciales pour la physique expérimentale. Pour pallier ces difficultés, les expérimentateurs mettent en oeuvre de multiples stratégies dont les plus courantes sont le recours à des séparations chimiques poussées, voire à des séparations isotopiques, et à l'utilisation de spectromètres - ou analyseurs - magnétiques [1] pour les particules chargées [5]. Ces méthodes lourdes compliquent beaucoup les expériences sans toujours apporter un remède efficace. La solution, quasi-miraculeuse, viendra des détecteurs à

semi-conducteurs (silicium et germanium), communément appelés « jonctions », qui font alors leur apparition dans les laboratoires.



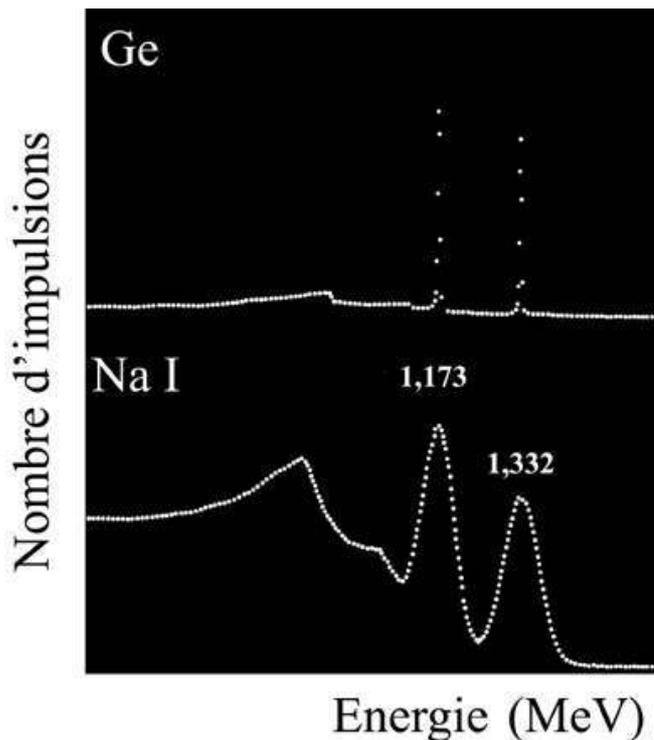
Spectre γ du bismuth 212. Allure des distributions obtenues avec une chambre d'ionisation de résolution égale à 2 %, (120 keV, en bas), avec des détecteurs à barrière de surface (B d S) de résolution moyenne (25 keV, au milieu) et de haute résolution (14 keV, en haut). © IPN Orsay/ Remerciements à Stéphane Bimbot

- 4 Les détecteurs à semi-conducteurs sont apparus dès 1949 [6], aux laboratoires Bell (Murray Hill, New Jersey, États-Unis)⁴. Leur mise au point se développe au cours des années 1950, aux États- Unis, au Canada, en URSS, mais aussi en France (Centre d'études nucléaires de Saclay, Centre de recherches nucléaires de Strasbourg, École normale supérieure). En 1963 se tient à Liège le premier colloque européen sur ce thème⁵ [8]. Les jonctions au silicium y sont omniprésentes. Leurs performances, et en particulier leur résolution, vont surclasser celles des détecteurs classiques.
- 5 C'est aussi en 1963 qu'est mis au point le procédé de migration de lithium dans le germanium. Cette technique permettra l'essor d'une nouvelle spectroscopie gamma grâce aux résolutions inégalées que les jonctions Ge(Li) ainsi réalisés permettront d'atteindre.
- 6 À l'IPN, après quelques tentatives isolées pour réaliser des détecteurs à semi-conducteurs, ce sont les travaux de thèse de Luc Marcus [9], commencés en 1965, qui marquent le départ d'un effort important de développement de la technologie du germanium. Cet effort sera ensuite étendu à celle du silicium.



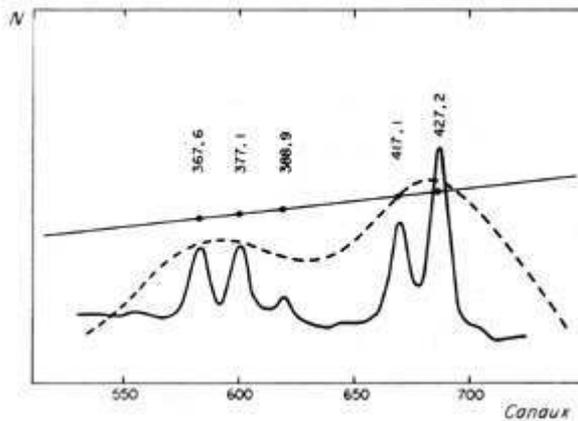
Identification des particules par un télescope E-E. En reportant dans un diagramme la perte d'énergie ΔE mesurée par un détecteur en fonction de l'énergie restante E mesurée dans l'autre, les événements se regroupent autour de lignes caractérisant chacune des particules détectées. Si la résolution n'est pas suffisante, les régions ainsi définies s'interpénètrent, ce qui limite le pouvoir d'identification du système. © IPN Orsay

- 7 À partir de 1960, les détecteurs à jonction commencent à être utilisés au Laboratoire de physique nucléaire d'Orsay. Bien qu'encore sporadiques, ces premières expériences montrent bien comment s'amorce la rupture avec les méthodes classiques qui se généralisera dans les années qui suivront.



Spectre γ du cobalt 60. Allure des distributions mesurées par un scintillateur d'iodure de sodium de résolution égale à 7 %, soit 90 keV (en bas), et par un détecteur au germanium de résolution égale à 3 keV (en haut). © IPN Orsay

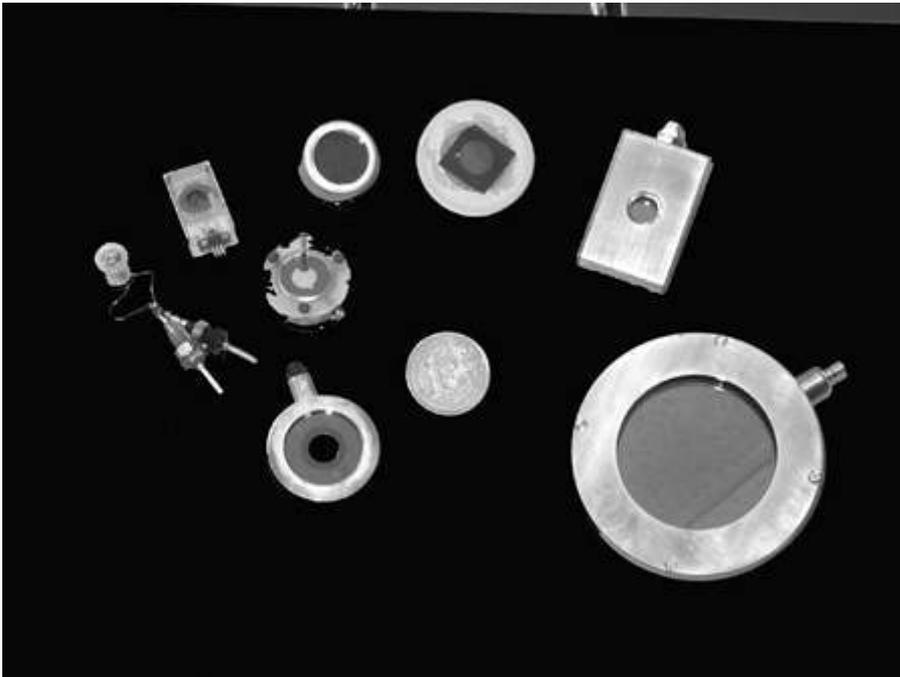
- 8 Très logiquement, les jonctions à barrière de surface trouvent une application en spectrométrie alpha, l'épaisseur de la zone sensible coïncidant exactement avec le parcours de particules alpha d'une dizaine de MeV⁶. En particulier, ils vont permettre la mise en évidence d'un certain nombre de structures fines inconnues (séries de raies à d'énergies très proches les unes des autres) dans les spectres α des isotopes 227, 228, 229 et 230 du protactinium et de leurs descendants [10]. Très vite, ces nouveaux détecteurs seront aussi utilisés pour des expériences étudiant la structure nucléaire par des faisceaux de basse énergie.
- 9 Dès 1961-1962, pour une expérience visant à étudier la fission issue de l'interaction de protons de 155 MeV avec des éléments lourds, il apparaît nécessaire de détecter les fragments de fission en présence de nombreuses particules légères. Les performances de scintillateurs classiques (CsI de très faible épaisseur) et de barrières de surface sont comparées dans cet objectif. Ce sont ces dernières qui seront retenues et cette étude sera réalisée par L. Kowalski et C. Stéphan dans les années qui suivront [11].
- 10 Les autres équipes engagées dans des expériences utilisant le faisceau du synchrocyclotron ne mirent pas en œuvre aussi rapidement ces nouveaux modes de détection. Il faut dire qu'elles venaient de fournir un important effort d'équipement en détecteurs classiques et de s'investir dans la mise en route de l'analyseur magnétique associé à cette machine [1].
- 11 Paradoxalement, c'est une équipe de chimistes nucléaires, animée par Marc Lefort, qui, en 1962 fut la première à utiliser des télescopes de détecteurs à jonction pour identifier les particules alpha émises au cours des réactions nucléaires induites par les protons sur diverses cibles⁷.
- 12 Plus précise et plus facile à mettre en œuvre que la technique radiochimique qu'ils utilisaient auparavant, cette méthode directe permettait en outre de distinguer les deux isotopes de l'hélium (³He et ⁴He, ce dernier étant également la particule alpha) [12].
- 13 Enfin, dès qu'ils furent opérationnels, les détecteurs Ge(Li) apportèrent une amélioration considérable à la spectrométrie α . C'est ainsi que des raies α espacées d'une dizaine de keV non séparées par un scintillateur NaI purent être observées dès 1965 lors de la désintégration de ¹⁷⁷W en ¹⁷⁷Ta⁸ [13].
- 14 C'est donc entre 1963 et 1965 que s'opère, à l'Institut de physique nucléaire, la véritable mutation vers l'utilisation intensive de ces nouvelles techniques. Des détecteurs au silicium de plus en plus minces, dont la résolution augmente sans cesse, de forme carrée, circulaire ou annulaire, vont peu à peu envahir tout le laboratoire. Des jonctions à localisation remplaceront désormais les scintillateurs⁹ équipant le plan focal des spectromètres magnétiques. Des blocs de germanium de plus en plus gros (30, 50, 100 cm³) et de résolution toujours meilleure permettront d'étendre la spectroscopie gamma à nombre d'isotopes qui auraient été inaccessibles avec les seuls iodures de sodium. Avant la fin de la décennie, pratiquement toutes les expériences seront équipées de détecteurs à semi-conducteurs.



Transitions gamma dans le tantale 177. Les spectres obtenus avec un détecteur Ge(Li), en trait plein et avec un scintillateur NaI, en pointillé, permettent d'apprécier le gain en résolution. Les énergies indiquées ont été déterminées par un spectromètre magnétique analysant les électrons de conversion* des mêmes rayonnements [13]. *À l'émission d'un rayonnement gamma par un noyau peut se substituer celle d'un électron du cortège atomique qui emporte la même énergie diminuée de l'énergie de liaison de l'électron. C'est le phénomène de conversion électronique. © IPN Orsay

- 15 L'Institut de physique nucléaire créera son propre service de détecteurs en 1970. Ce service fournira l'Institut et bien d'autres laboratoires pendant de longues années¹⁰. Les technologies des détecteurs à semi-conducteurs ne cesseront de s'améliorer, avec des avancées majeures notamment au début des années 1980. Pour ce qui est du germanium, nous mentionnerons l'avènement de cristaux ultra purs rendant inutile la migration de lithium et les contraintes afférentes¹¹, et, en ce qui concerne le silicium, la possibilité de créer des détecteurs de surface toujours plus grande et surtout l'introduction des techniques de microélectronique pour la fabrication en série des détecteurs. Ces progrès s'accompagneront d'un véritable essor de l'électronique associée. On passera alors de la fabrication « artisanale » à une production industrielle, permettant la construction

d'ensembles de détection constitués de quelques dizaines à plusieurs millions de voies, et principalement utilisés en physique des particules.



Détecteurs au silicium. On distingue en particulier à l'extrême gauche, un des tout premiers détecteurs utilisés à l'IPN (5 mm² de surface), puis des jonctions de formes différentes, dont une jonction annulaire, et à l'extrême droite une jonction de grande surface (12 cm²) et de faible épaisseur (50 μm), réalisée par le service « Détecteurs à semi-conducteurs » de l'IPN dans les années 1990. La pièce de un euro donne l'échelle de taille de ces détecteurs. © IPN Orsay

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Bimbot R. « Les années Synchro (1958-1966) » *In La revue pour l'histoire du CNRS*, n° 17, été 2007, pp. 40-45.
- [2] Simonoff G. N. « Réactions nucléaires de spallation induites sur le thorium par des protons de 150 MeV », thèse, Orsay, 1961.
- [3] Zamudio J. *et al.* Mesures de corrélations angulaires (p, α) dans les réactions... *Nucl. Phys.*, 1964, 51, p. 212.
- [4] Radvanyi P., Genin J. *Étude des deutons et tritons émis lors du bombardement de noyaux de carbone par des protons de 155 MeV.* *J. Phys. Rad.*, 1960, 21, p. 322.
- [5] Jacmart J. C. *et al.* *Inelastic scattering of 156 MeV protons on light nuclei.* *Proc. Int. Conf. Padua*, 1962, p. 1145.
- [6] Mac Kay K. G. *A germanium counter.* *Phys. Rev.*, 1949, 76, p. 1537.
- [7] Brangança Gil F. « Contribution à l'étude de la famille du Pa 231 par des corrélations angulaires de quelques cascades $^{231}\text{Pa} \rightarrow ^{231}\text{Ac}$ et $^{231}\text{Pa} \rightarrow ^{231}\text{Th}$ », thèse, Orsay, 1961.

- [8] Colloque sur l'utilisation des détecteurs à semi-conducteurs en physique nucléaire, Liège (septembre 1963), Mémoires de la Société Royale des Sciences de Liège, 1964, vol. 10, n°2.
- [9] Marcus L. « Contribution à l'étude des détecteurs au germanium et à leur utilisation en particules chargées. Application à l'étude expérimentale des réactions (d,d') (d,p) (d,t) à 80 MeV sur ^{12}C », thèse, Orsay, 1970.
- [10] Briand J.-P., Lefort M. *Étude de l'émission alpha de la série ^{224}Ac ^{220}Fr ^{216}At ^{212}Th* . *Phys. Lett.*, 1964, 10, p. 1.
- [11] Kowalski L. *et al.* « Fission des noyaux lourds à grande énergie ». In *Annuaire 1960-1961 du Laboratoire Joliot-Curie de physique nucléaire*, p. 26. Voir aussi Kowalski L., thèse, Orsay, 1963, et Stéphan C., thèse, Orsay, 1966.
- [12] Dubost H. *et al.* *^4He and ^3He particles from Au, Bi, and Th nuclides bombarded by 157 MeV protons.* *Phys. Rev.*, 1964, 136, B1618.
- [13] Ader B., Perrin N. « Isotopes du tungstène déficient en neutrons : ^{175}W , ^{177}W ». In *Annuaire 1965 de l'Institut de physique nucléaire*, p. 23.
- [14] Ader B., Perrin N. Niveaux d'énergie du ^{177}Ta . *Nucl. Phys.*, 1972, 197/2, p. 593.

NOTES

1. L'efficacité d'un détecteur est sa capacité à détecter une fraction importante des particules émises par une source donnée. Elle dépend de sa position par rapport à la source, de ses dimensions, et de sa plus ou moins grande transparence aux particules détectées.
2. La résolution d'un détecteur chiffre son aptitude à distinguer des particules d'énergies différentes mais voisines. Elle se mesure par la largeur à mi-hauteur du pic correspondant à la détection de particules possédant toutes la même énergie. Plus cette largeur est faible, plus le pouvoir de résolution du détecteur est élevé.
3. Cependant, la piètre résolution des détecteurs oblige les physiciens à se concentrer sur les noyaux présentant les spectres les moins complexes, tels les noyaux dits « pairs-pairs », parce qu'ils possèdent des nombres pairs de protons et de neutrons. Voir, par exemple, Gershell C. *et al.* « Schémas de niveaux excités des isotopes pairs-pairs 130, 132, 134 du baryum », In *Rapport annuel de l'Institut du radium, Physique nucléaire*, 1962-1963, p. 48.
4. Sur la lancée des formidables recherches sur les semi-conducteurs menés sous la houlette de W. Brattain, J. Bardeen et W. Shockley, inventeurs du premier transistor au germanium en décembre 1947.
5. Les premières contributions sur ces nouveaux détecteurs étaient apparues au cours du 7^e symposium sur les compteurs à scintillation (Gatlinburg, Tennessee, octobre 1960).
6. La toute première utilisation à l'IPN d'un détecteur silicium (5 mm², fabriqué par la société RCA VICTOR, Canada) apparaît dans le rapport annuel 1959-60. Il s'agit d'une étude du radium 223 et de ses dérivés au moyen de corrélations angulaires alpha/gamma [7].
7. L'objectif de cette expérience était la recherche de sous structures alpha dans les noyaux lourds, et ces chercheurs avaient jusque-là, utilisé une méthode indirecte, l'étude des réactions secondaires induites par ces particules alpha dans les noyaux/cibles qui impliquait des séparations chimiques poussées.

8. Quelques années plus tard, les mêmes auteurs avaient remarquablement progressé sur l'étude de ce noyau, mettant en évidence une profusion de niveaux grâce à la puissance des détecteurs à semi-conducteurs [14].

9. Ou autres détecteurs classiques.

10. Ce service existe toujours aujourd'hui.

11. Un détecteur germanium fonctionne à la température de l'azote liquide (77 K, ou - 196 °C). Les détecteurs Ge(Li), compensés au lithium, devaient être en permanence refroidis, ce qui constituait une contrainte majeure pour les expérimentateurs. Avec l'avènement des détecteurs de germanium ultra pur, la mise en froid ne se fait que lors de l'utilisation.

RÉSUMÉS

Au début des années 1960, l'arrivée de nouveaux détecteurs de particules à base de semi-conducteurs dans les laboratoires a profondément bouleversé la conception des expériences et considérablement enrichi les résultats obtenus. L'influence d'une telle avancée technologique sur les recherches menées au laboratoire de physique nucléaire d'Orsay est analysée dans cet article.

In the early sixties, new detectors, based upon semi-conductors appeared in the laboratories. At the Orsay "Laboratoire de physique nucléaire" as in the other laboratories, the availability of these new devices deeply modified the conception of experiments and considerably enriched their results. The influence of such a technological break through on fundamental research is analyzed in this paper.

INDEX

Mots-clés : Orsay, détecteurs à semi-conducteurs, détecteurs, semi-conducteurs, IPN, scintillateurs

AUTEURS

RENÉ BIMBOT

René Bimbot est agrégé de physique, docteur ès sciences, directeur de recherche émérite à l'IPN et au CNRS.

LAURENCE LAVERGNE

Laurence Lavergne est ingénieur de recherche au CNRS, responsable du Service « Détecteurs à semi-conducteurs » à l'IPN.