SPECTROMÉTRIE DES NEUTRONS AUTOUR DES ACCÉLÉRATEURS DE SACLAY A L'AIDE DES ÉMULSIONS NUCLÉAIRES ET D'UN COMPTEUR PROPORTIONNEL A HÉLIUM-3

H. VIALETTES *

(Manuscrit reçu le 25 mai 1967)

RÉSUMÉ

La spectrométrie des neutrons autour des accélérateurs de Saclay est effectuée à l'aide des émulsions nucléaires et d'un compteur proportionnel à hélium-3. Ces deux méthodes présentent l'avantage de se compléter parfaitement puisque l'hélium-3 couvre la gamme d'énergie comprise entre les thermiques et 2 MeV, et les émulsions, la gamme de 0,6 à 14 MeV.

Après un rappel rapide des principes de ces méthodes, l'auteur donne les résultats expérimentaux obtenus dans les salles du cyclotron à énergie fixe et du cyclotron à énergie variable, et dans les zones normalement occupées par le personnel à proximité du synchrotron à protons de 3 GeV Saturne et de l'accélérateur linéaire d'électrons 45 MeV. Ces résultats sont utilisés pour discuter la validité des mesures effectuées avec les émulsions nucléaires pour la dosimétrie du personnel. On montre en particulier, que si dans certains cas cette mesure est bien représentative de la dose réellement reçue par le personnel, dans d'autres cas, au contraire, la sous-estimation de la dose peut dépasser un facteur 2.

ABSTRACT

Neutron spectrometry near Saclay accelerators is made with nuclear emulsions and helium-3 filled proportional counter. Between several other advantages, these two methods are well complementary, covering the energy range between thermal and 2 MeV neutrons with helium-3 and 0,6 to 14 MeV with nuclear emulsions.

After a brief reminder on the principles on these methods, author gives experimental results obtained in the fixed energy and variable energy cyclotrons rooms and in some areas usually occupied by workers near Saturne proton synchrotron and 45 MeV electron linac.

These results are used to discuss the validity of measurements made with nuclear emulsions for personal dosimetry. They show in particular, that if in some cases these measurements represent quite well the dose received by people, in other cases on the contrary, the under estimation is greater than a factor of two.

I - ÉMULSIONS NUCLÉAIRES

L'utilisation des émulsions nucléaires pour la spectrométrie des neutrons est pratiquée depuis longtemps et il n'y a pas lieu de s'étendre sur les principes

* Service de Protection contre les Radiations, Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay, B.P. n° 2 - (91) Gif-sur-Yvette.

de base. Il faut toutefois signaler que dans le cas de la radioprotection, l'utilisation des émulsions est plus délicate que dans le domaine de la physique nucléaire pure; en effet, le physicien de radioprotection s'intéresse au spectre des neutrons présents en un point de l'installation dont il a la charge et non au spectre des neutrons issus d'une cible bombardée dans des conditions bien déterminées. Alors que dans le dernier cas, le physicien peut fixer des conditions de géométrie qui lui facilitent l'exploitation de ses résultats, ceci s'avère impossible dans le premier cas où il est nécessaire que l'émulsion reçoive des neutrons dans 4π . La méthode utilisée ici est la méthode de différentiation du spectre des protons de recul proposée par F. REINES et N. NERESSON [1] et [2].

Les émulsions utilisées sont du type ILFORD K2 de 400 μm . Les traces de protons de recul sont mesurées à l'aide d'un microscope LEITZ-ORTHOLUX.

I.1. RÉSULTATS OBTENUS

Des mesures ont été effectuées dans la salle du cyclotron à énergie fixe et dans la salle du cyclotron à énergie variable de Saclay. La première figure présente le spectre de neutrons obtenu dans la salle du cyclotron à énergie fixe fonctionnant en α de 44 MeV. Ce spectre présente un pic assez large vers 3-4 MeV et s'étend jusqu'à 9 MeV. La forme du spectre est à peu près identique à celle que l'on obtiendrait au voisinage d'une cible mais les énergies sont plus faibles.

Les figures suivantes (2, 3, 4, 5) montrent les spectres obtenus simultanément en des points différents de la salle. Le cyclotron à énergie variable fonctionnant en protons de 24 MeV, les spectres des figures 2, 3 et 4 sont à peu près identiques; on obtient un pic très prononcé vers 1-2 MeV et un léger pic vers 4 MeV. La forme du spectre de la figure 5 est semblable à celle des trois spectres précédents mais les énergies sont plus élevées. Ceci met bien en évidence l'influence des masses métalliques du cyclotron lui-même sur la diffusion des neutrons et la dégradation en énergie du spectre.

II - COMPTEUR A HÉLIUM-3

II.1. PRINCIPE D'UTILISATION

Le principe d'un compteur proportionnel rempli d'hélium-3 pour la détection des neutrons et les premiers résultats expérimentaux publiés sont dus à R. BACHELOR et ses collaborateurs [3] et [4].

La réaction utilisée dans ce compteur est la suivante :

Trois considérations font que cette réaction est particulièrement intéressante pour la spectrométrie des neutrons :

- la valeur du Q de la réaction est assez élevée pour permettre une bonne discrimination γ -neutrons et assez faible pour que la résolution du spectromètre soit bonne;
- la section efficace est bien connue et elle ne présente pas de pic de résonance;
- les produits de la réaction restent dans leur état fondamental et l'énergie totale de la réaction (0,764 MeV + l'énergie initiale du neutron) est dis-

tribuée entre le proton et le triton et perdue dans le compteur par ionisation du gaz. L'impulsion de sortie sera alors proportionnelle à l'énergie totale de la réaction et on pourra facilement en déduire l'énergie du neutron $E_n = E_{tot} - 0,764 \text{ MeV}$.

Le principe d'utilisation est donc très simple mais l'utilisation pratique se heurte à un certain nombre de difficultés comme nous le verrons plus loin.

II.2. RÉSULTATS OBTENUS

Comme test de la méthode, nous avons mesuré le spectre émis par une source de polonium-lithium (fig. 6). On voit que l'accord est excellent avec les résultats théoriques de W.N. HESS [5].

Cette méthode a été utilisée pour mesurer les spectres de neutrons dans des zones normalement occupées par le personnel au voisinage de Saturne et de l'accélérateur linéaire d'électrons 45 MeV.

Après de Saturne, deux spectres ont été relevés au même endroit mais pour des conditions différentes de fonctionnement. La figure 7 montre le spectre obtenu pendant un fonctionnement normal, en cible externe placée dans une casemate à protection homogène. Ce spectre est très dégradé en énergie et présente une énergie moyenne de l'ordre de 650 keV. La figure 8 montre le spectre obtenu au même endroit mais alors que le faisceau est partiellement arrêté dans une zone de l'anneau où la protection biologique est plus faible et moins homogène.

La forme de ce spectre est totalement différente de celle du spectre de la figure 7 et on note une contribution très importante des neutrons d'énergie comprise entre 1 et 3 MeV.

Après de l'accélérateur linéaire d'électrons de 45 MeV, la mesure a été effectuée sur une terrasse située au premier étage du bâtiment et surplombant le massif de l'accélérateur et le départ des bases de temps de vol sud. Le spectre obtenu (fig. 9) présente une dégradation en énergie très importante; son énergie moyenne est de l'ordre de 350 keV.

III - UTILISATION DE CES RÉSULTATS POUR L'INTERPRÉTATION DES LECTURES DES DOSIMÈTRES INDIVIDUELS

La dosimétrie individuelle en ce qui concerne les neutrons rapides est effectuée au moyen d'émulsions nucléaires sensibles aux protons de recul produits par les neutrons dans le radiateur hydrogéné entourant l'émulsion. Le principal défaut de ce dosimètre provient du fait que son seuil de détection est élevé et l'on est conduit tout naturellement en considérant les valeurs des énergies moyennes des spectres présentés plus haut, à se demander quelle est la fraction du spectre de neutrons pour laquelle l'émulsion est aveugle, et par voie de conséquence, quelle est la dose réellement reçue par un travailleur exposé dans les mêmes conditions que le détecteur. Il faut noter que l'on ne s'intéresse ici qu'à l'interprétation physique des résultats en relation avec le dosimètre seul sans faire intervenir des facteurs tels que le facteur d'accumulation liés essentiellement aux conditions expérimentales d'irradiation.

III.1. SPECTRES OBTENUS DANS LES SALLES DES CYCLOTRONS

Prenons comme ordre de grandeur du seuil de sensibilité du dosimètre 500 keV. Les figures 1 à 5 montrent que la partie du spectre comprise entre 0 et 500 keV est négligeable devant la partie située au-dessus de 500 keV. Il s'ensuit qu'un travailleur irradié dans la salle du cyclotron pendant le fonctionnement de l'accélérateur aura réellement reçu la dose indiquée par son dosimètre individuel.

III.2. SPECTRES OBTENUS A L'EXTÉRIEUR DES PROTECTIONS

On voit que dans le cas du spectre de la figure 8 comme dans les cas ci-dessus on peut négliger en première approximation la partie du spectre d'énergie inférieure à 500 keV.

Par contre dans les figures 7 et 9 on voit immédiatement que cette partie du spectre est extrêmement importante et qu'il serait grave de la négliger car cela amènerait une erreur importante dans la détermination de l'équivalent de dose. A partir des spectres de fluence différentielle en fonction de l'énergie, obtenus avec le spectromètre à hélium-3, on peut tracer le spectre différentiel d'équivalent de dose en fonction de l'énergie. La figure 10 donne ce spectre pour Saturne à partir du spectre de la figure 7. L'aire hachurée qui correspond à la fraction de dose vue par l'émulsion ne représente que 47 % de l'aire totale sous la courbe.

De même, pour la figure 11 tracée à partir de la courbe de la figure 9, l'aire hachurée ne correspond qu'à 40 % de l'aire totale.

On voit donc que dans les deux cas, l'erreur commise sur l'estimation de la dose reçue par le personnel à partir de la lecture des dosimètres individuels est supérieure à un facteur 2.

IV - DIFFICULTÉS D'UTILISATION

IV.1. EMULSIONS NUCLÉAIRES

La plus grosse difficulté à laquelle on se heurte dans l'utilisation des émulsions nucléaires pour la spectrométrie des neutrons provient de la durée du dépouillement; pour avoir une statistique correcte il est nécessaire de mesurer 1 000 ou 2 000 traces par émulsion, de sorte que le temps nécessaire pour ce travail, compte tenu de la fatigue de l'opérateur, est de l'ordre de 2 à 3 semaines par émulsion. Pour améliorer le rendement et la précision des mesures, nous étudions actuellement, en collaboration avec le Département de Physique Corpusculaire du C.N.R.S. de Strasbourg, la fabrication d'un dispositif semi-automatique directement adapté au microscope. Rappelons d'autre part, que dans le cas des émulsions irradiées dans un angle de 4π sr, la précision obtenue est moins bonne que dans le cas des émulsions irradiées avec un faisceau de neutrons collimaté.

IV.2. COMPTEUR PROPORTIONNEL A HÉLIUM-3

L'exploitation des résultats fournis par le compteur proportionnel à hélium-3 est rendue délicate par le fait que le spectre en impulsions est perturbé par deux effets parasites que l'on appelle couramment effet de recul et effet de parois [6].

L'effet de recul est dû à la réaction ${}^3\text{He}(n,n') {}^3\text{He}$ au cours de laquelle les hélium-3 de recul emportent une énergie qui dissipée par ionisation dans le gaz du compteur, donne lieu à des impulsions parasites.

L'effet de parois est dû au fait que les produits de la réaction (protons et tritons) ont une certaine probabilité de heurter les parois du compteur avant d'avoir perdu toute leur énergie par ionisation, de sorte que l'impulsion recueillie à la sortie du compteur sera plus faible que l'impulsion que l'on aurait obtenue si toute l'énergie avait été dissipée dans le compteur.

Pour des énergies de neutrons supérieures à quelques MeV, les corrections dues à ces deux effets deviennent trop importantes et des réactions parasites telles que ${}^3\text{He}(n, d) D$ et ${}^3\text{He}(n, np) D$ viennent encore compliquer le spectre en impulsions.

Pour des spectres très dégradés en énergie, on observe des empilements d'impulsions dus à la trop grande sensibilité du compteur pour les neutrons thermiques et les neutrons lents.

Enfin, il faut noter que la sensibilité de ce compteur pour les neutrons rapides n'est pas très élevée de sorte que les temps de comptage sont souvent assez longs. Pour avoir une bonne statistique quand on effectue des mesures de spectres dégradés autour des accélérateurs de Saclay, on considère que le compteur doit recevoir une fluence de neutrons correspondant à un équivalent de dose de 200 mrem.

CONCLUSION

Les courbes présentées ici montrent que l'utilisation des émulsions nucléaires et du compteur proportionnel à hélium-3 pour la spectrométrie des neutrons rapides en radioprotection donne d'excellents résultats. Ces deux méthodes se complètent parfaitement puisque le compteur à hélium-3 ne présente pas de seuil en énergie et permet par conséquent, de bien mesurer les spectres de neutrons d'énergie intermédiaire qui ne sont pas vus par les émulsions nucléaires.

D'autre part, le compteur à hélium-3 permet d'obtenir par programmation des résultats, le spectre différentiel d'équivalent de dose en fonction de l'énergie. Une application pratique nous a permis de montrer que les dosimètres individuels pouvaient dans certains cas, sous-estimer la dose réellement reçue par le personnel d'un facteur supérieur à 2.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] REINES F. Neutron spectra from proton recoils in photographic emulsions. *Phys. Rev.* 74 - 1565 (L) (1948).
- [2] NERESSON, N. et REINES, F. Neutron energy distributions inside the fast reactor. *Los Alamos report* 1192 (1950).
- [3] BATCHELOR, R. Neutron energy measurements with a filled proportional counter. *Proc. Phys. Soc.* (London).
- [4] BATCHELOR, R. et coll. Hélium-3 filled proportional counter for neutron spectroscopy. *Rev. Sci. Instr.* 26 - 1037 (1955).
- [5] HESS, W.N. Neutrons from (α, n) sources. *U.C.R.L.* 3839 (1957).
- [6] VIALETES, H. et LE THANH, P. Utilisation du compteur proportionnel à hélium-3 pour la spectrométrie des neutrons. Rapport C.E.A. à paraître.

FIG. 1. — Spectre des neutrons dans la salle du cyclotron à énergie fixe fonctionnant en α de 44 MeV

FIG. 2. — Spectre des neutrons dans la salle du cyclotron à énergie variable fonctionnant en protons de 24 MeV

FIG. 3. — Spectre des neutrons dans la salle du cyclotron à énergie variable fonctionnant en protons de 24 MeV

FIG. 4. — Spectre des neutrons dans la salle du cyclotron à énergie variable fonctionnant en protons de 24 MeV

FIG. 5. — Spectre des neutrons dans la salle du cyclotron à énergie variable fonctionnant en protons de 24 MeV

FIG. 6. — Spectre des neutrons émis par une source de polonium-lithium

FIG. 7. — Spectre dégradé auprès du synchrotron à protons Saturne

FIG. 8. — Spectre dégradé auprès du synchrotron à protons Saturne

FIG. 9. — Spectre dégradé auprès de l'accélérateur linéaire d'électrons 45 MeV

FIG. 10. — Spectre différentiel d'équivalent de dose en fonction de l'énergie auprès du synchrotron à protons Saturne

FIG. 11. — Spectre différentiel d'équivalent de dose en fonction de l'énergie auprès de l'accélérateur linéaire d'électrons 45 MeV

FIG. 12. — Spectromètre à hélium-3 - Vue d'ensemble