

FORMATION DE TRACES D'IONS LOURDS RAPIDES DANS L'ÉMULSION

M. JENSEN, L. LARSSON, O. MATHIESEN, R. ROSANDER (*)

Traduit de l'anglais par H. FRANÇOIS (**)

(Manuscrit reçu le 19 mars 1974)

RÉSUMÉ

On a réalisé une étude détaillée des traces d'ions lourds rapides dans une émulsion nucléaire sensible aux électrons du type ILFORD G 5. En utilisant un photomètre à fente étroite pour la mesure des traces nucléaires, on a enregistré des profils transversaux d'absorption de 27 traces de noyaux ayant pour nombres de charge 14, 16, 20, 24 et 26 couvrant l'intervalle de vitesse 0,3 c à 0,8 c. Les charges des noyaux lourds provenant des rayonnements cosmiques ont été déterminées auparavant par des méthodes photométriques.

Les profils théoriques de traces sont calculés à partir des distributions de densité d'énergie autour de la trace du passage d'un ion. Cette distribution de dose est évaluée selon la théorie des rayons δ et de la structure de traces décrites par KATZ et ses collaborateurs. En utilisant une méthode d'optimisation des paramètres les profils calculés sont ajustés aux données expérimentales.

De cette comparaison, nous pouvons conclure qu'un accord raisonnable entre les profils expérimentaux et les profils calculés peut être obtenu si on compense convenablement la lumière diffusée dans l'émulsion.

ABSTRACT

A detailed study of the tracks of fast, heavy ions in an electron-sensitive nuclear emulsion of type Ilford G5 have been carried out. Using a nuclear track photometer with a narrow slit we have registered transverse absorption profiles on 27 tracks of nuclei with charge numbers 14, 16, 20, 24 and 26, covering the velocity interval 0.3c to 0.8c. The charges of the heavy nuclei, emanating from the cosmic radiation, were determined earlier by photometric methods.

Theoretical track profiles were computed from the distribution of energy dose around the path of a passing ion. This dose distribution was evaluated according to the delta-ray theory of track structure developed by Katz and co-workers. Utilizing a parameter optimization algorithm, the calculated profiles were fitted to the experimental data. From this comparison we can conclude that a reasonable agreement between experimental and calculated profiles can be obtained if we can adequately compensate for the backscattered light in the emulsion.

(*) Division du rayonnement cosmique Département de Physique, Université de Lund - Suède.

(**) Département de Protection, Service Technique d'Etudes de Protection et de Pollution Atmosphérique, B.P. n° 6, F 92260 Fontenay-aux-Roses.

INTRODUCTION

Dans cet exposé nous avons l'intention de décrire quelques résultats expérimentaux récents concernant la formation des traces d'ions lourds dans l'émulsion nucléaire. Les valeurs observées ont été obtenues à la suite d'étude de noyaux du rayonnement cosmique enregistrés dans des émulsions nucléaires ILFORD G₅ sensibles aux électrons, exposées au rayonnement cosmique au moyen de ballons stratosphériques.

Les idées admises au sujet de la formation des traces dans les émulsions nucléaires résultent des premiers travaux de BIZZETTI et DELLA CORTE [1]. Ces auteurs ont établi une théorie pour la dernière partie de la trace d'un ion lourd, fondée sur l'idée que l'effet de traces se produit essentiellement à partir de l'interaction des électrons secondaires avec le détecteur. Pendant ces dernières années, ce modèle a été modifié et ensuite développé par KATZ et ses collaborateurs [2-4] pour mettre au point une théorie qui serait applicable aux particules de n'importe quelle vitesse et qui décrirait la réponse de nombreux systèmes physiques, chimiques et biologiques [5]. Jusqu'à présent très peu de tentatives ont été faites pour confronter ces théories à des résultats expérimentaux [6-7].

En considérant tout ce que peut apporter la théorie de KATZ à l'étalonnage dans des expériences sur le rayonnement cosmique, nous avons été amenés à proposer un programme dans lequel la théorie est confrontée avec la structure de la trace observée dans l'émulsion nucléaire. La première étude présentée à la conférence de Bucarest en 1972 [8] traite des traces d'ions lourds ayant une vitesse inférieure à 0,3 c. Les mesures étaient faites avec deux types d'émulsions nucléaires de sensibilités différentes, en utilisant un photomètre pour traces nucléaires. On constatait le meilleur accord avec la théorie de KATZ pour l'émulsion la moins sensible ILFORD K₂, tandis que, pour l'émulsion ILFORD G₅, sensible aux électrons, les largeurs théoriques des traces ne pouvaient pas s'accorder avec les résultats expérimentaux. Dans un autre rapport présenté à la conférence de Bucarest [9], on montrait qu'un accord raisonnable entre les valeurs prévues par la théorie et les mesures de traces d'ions fer dans l'émulsion ILFORD G₅ sous-développée pouvait être obtenu à la condition qu'un autre paramètre soit intégré dans le calcul théorique. Ce paramètre devrait compenser l'influence de la lumière rétrodiffusée dans l'émulsion.

Dans ce travail nous présentons quelques-uns des résultats d'une étude plus générale sur les traces de particules ayant pour nombres de charges 14, 16, 20, 24 et 26 et des vitesses comprises entre 0,3 c et 0,8 c. Quelques résultats préliminaires ont déjà été présentés en 1973 à la Conférence de Denver [10].

DESCRIPTION EXPÉRIMENTALE ET MESURE

Dans ce travail, nous avons utilisé un détecteur à émulsion nucléaire composé de 65 films ILFORD G₅. L'étude est basée sur un nombre de traces d'ions lourds ayant un parcours résiduel connu. La charge de la particule a été déterminée par

SÖDERSTRÖM et ses collaborateurs [11]. Les traces sont choisies de sorte qu'on minimise les erreurs systématiques causées par la profondeur, le traitement et la diffusion de la lumière. Les mesures des traces sont réalisées sur le photomètre de traces nucléaires, qui a été décrit par JACOBSON et ses collaborateurs [12]. Un schéma de l'appareillage de photométrie est présenté sur la figure 1. Pendant les

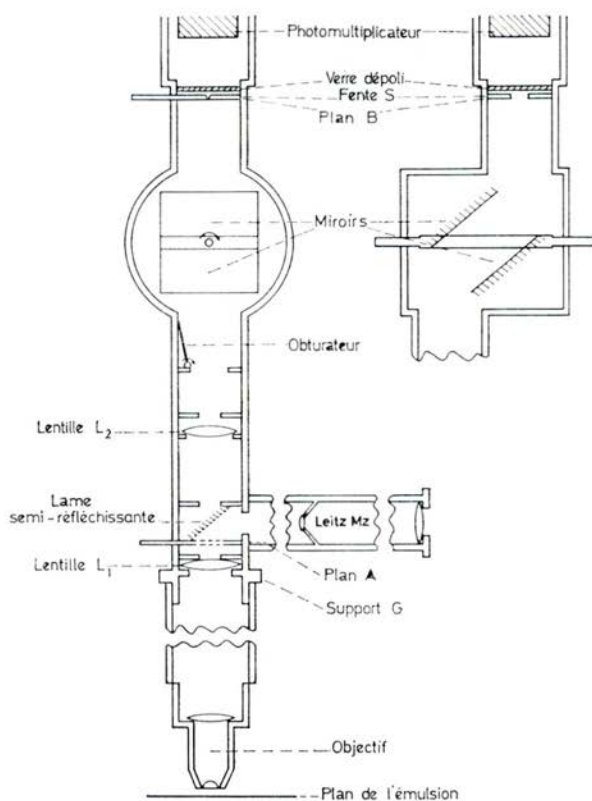


FIG. 1. — Schéma de l'optique du photomètre à traces nucléaires.

lectures, l'image du segment de la trace se déplace perpendiculairement à travers une fente étroite. La transmission de la lumière est mesurée à des intervalles de 1 micron sur une distance latérale d'environ 85 microns de chaque côté de l'axe de la trace, créant un « profil de trace » (fig. 2). La transmission de la lumière pour chaque profil est enregistrée automatiquement sous forme digitale sur bande perforée. Le schéma de la figure 3 montre l'équipement électronique.

Le nombre de traces de particules de charges et de vitesses différentes est présenté dans le tableau I. Pour des raisons numériques, tous les points de mesure, environ 84 000, n'ont pas pu être utilisés pour cette comparaison avec la théorie. Les valeurs sont réduites et lissées par analyse sur ordinateur pour donner les

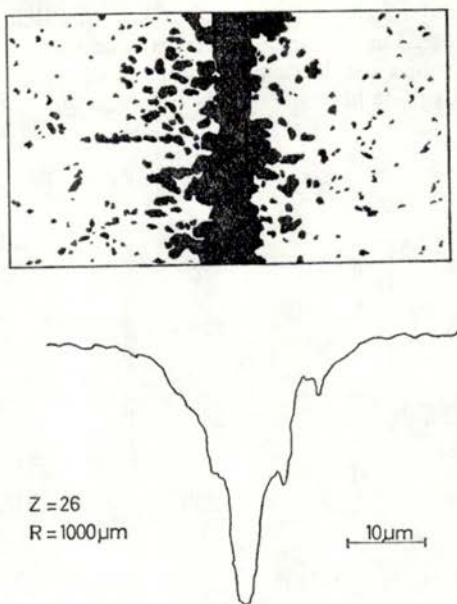


FIG. 2. — Partie d'une trace dans une émulsion nucléaire et profil de transmission correspondant.

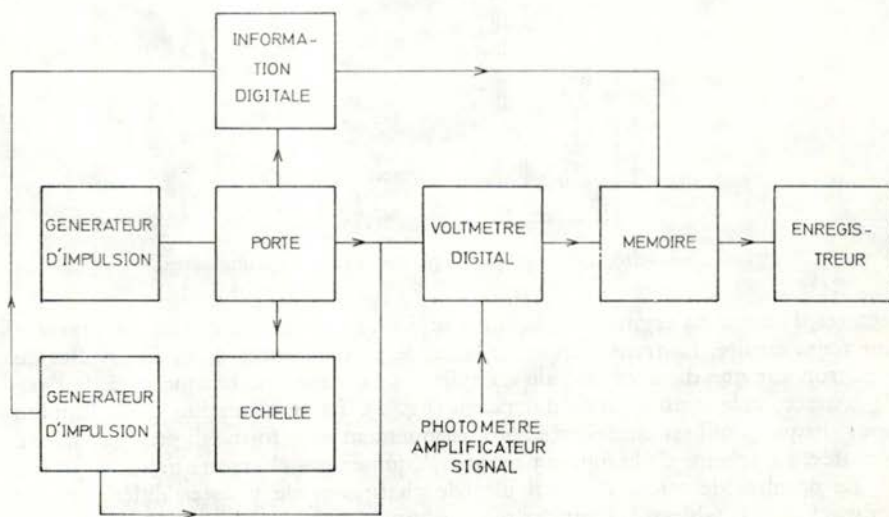


FIG. 3. — Schéma montrant l'équipement électronique.

TABLEAU I

NOMBRE DE TRACES UTILISEES POUR CHAQUE β ET Z

Z	β	0,30	0,40	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80
14		3	4	4	4	4	5	4	2	-
16		3	3	4	4	4	4	3	-	-
20		2	2	4	4	5	4	3	-	-
24		3	-	3	4	3	4	3	-	-
26		3	5	6	5	6	6	6	6	5

valeurs de la transmission à six distances latérales du centre de la trace de 0,5 - 1,5 - 4,5 - 8,5 - 13,5 et 39,5 microns. Dans une seconde étape de réduction et de lissage, les valeurs moyennes de la transmission pour une charge et une distance latérale données sont obtenues pour cinq valeurs de la vitesse : 0,3 - 0,4 - 0,5 - 0,6 et 0,7 fois la vitesse de la lumière. Ceci nous donne 30 points pour chaque nombre de charge ou 150 points de valeurs réduites. Ceux-ci sont utilisés pour éprouver le modèle théorique de la formation des traces.

CALCUL DES PROFILS THÉORIQUES DE TRACES

Dans le calcul de la distribution de la densité d'énergie autour du passage d'un ion lourd, nous avons en général suivi la théorie des rayons δ décrite par KATZ et ses collaborateurs [4]. Cependant, nous supposons que tous les électrons secondaires sont éjectés perpendiculairement à la trajectoire de l'ion [9]. La transmission de la lumière parallèle, T_p , à travers l'émulsion est calculée à partir de la probabilité de distribution pour le développement des grains d'émulsion [4]. Pour compenser la lumière rétrodiffusée dans l'émulsion, on établit un modèle pour une photométrie à grande ouverture en supposant que l'absorption observée $1 - T$ peut être déterminée à partir d'un développement en série de $1 - T_p$, T_p étant l'absorption de la lumière parallèle. Ainsi, on peut exprimer l'absorption sous la forme :

$$1 - T = a_0 + a_1 (1 - T_p) + a_2 (1 - T_p)^2 + \dots$$

Dans cette étude, nous considérons jusqu'à présent trois cas spéciaux, comme on peut le voir dans le tableau II. Les profils théoriques ont été ajustés aux points expérimentaux au moyen d'un paramètre d'optimisation algorithmique. La quantité minimisée par le procédé est la somme des carrés des différences entre les valeurs calculées et les valeurs expérimentales. Cette quantité, pour les trois cas que nous avons étudiés, est également présentée dans le tableau II.

TABLEAU 2

Cas	a_0	a_1	a_2	carré de la somme
1	0 (fixé)	1 (fixé)	-0,22	0,115
2	0 (fixé)	0,83	0 (fixé)	0,195
3	0,015	0,93	-0,16	0,105

Dans la théorie originale, KATZ utilise deux constantes fondamentales : E_0 qui est la dose caractéristique pour la sensibilisation et le développement de 63 % des grains d'émulsion pour une exposition uniforme, et α qui est un facteur de multiplication pour la section efficace géométrique, dans le but de tenir compte de la diffusion RALLEGH dans l'émulsion, à cause de la petite dimension des grains. Pour les émulsions utilisées dans la présente étude, nous avons déterminé E_0 en comptant les grains dans les traces de particules faiblement ionisantes comme le décrit KATZ [4]. La valeur de E_0 que nous trouvons est 10,5 keV μm^{-3} .

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les figures 4a et b montrent les profils ajustés pour le cas n° 1 ainsi que les valeurs des points pour $Z = 14$ et 26. L'ajustage a été fait pour toutes les 5 vitesses et pour toutes les valeurs de Z . Les résultats obtenus pour les autres nombres de charge sont très proches de ceux donnés pour $Z = 14$ et 26, la valeur obtenue pour la constante a_2 est - 0,22.

Dans le cas n° 2, a_1 est traité comme un paramètre ajustable. Dans ce cas, comme dans le modèle original de KATZ, on ne tient pas compte de la lumière diffusée dans le cône d'acceptation. Cet ajustage donne une somme des carrés supérieure de 65 % à celle du cas n° 1.

Les paramètres obtenus pour le cas n° 3 sont présentés dans le tableau II. Il est raisonnable d'attendre une faible valeur pour a_0 auquel nous n'attribuons aucune signification physique et des valeurs de a_1 et a_2 semblables à celles du cas n° 1. A partir des résultats du cas n° 3, nous concluons que, essentiellement, l'interprétation physique du modèle théorique du cas n° 1 est justifiée.

Au cours des dernières années, le modèle de la formation de traces décrit par KATZ et ses collaborateurs a été appliqué à de nombreux systèmes biologiques de détection [5, 13]. L'analyse des résultats de ces travaux réclame une meilleure compréhension de plusieurs nouvelles propriétés biophysiques, telles que les statistiques d'iractivation et la taille des éléments sensibles. Nous avons le sentiment que, tandis que le modèle de formation de traces peut être développé avec succès dans de nouveaux domaines de la recherche, la grande résolution spectrale de l'émulsion nucléaire offre encore la meilleure possibilité de vérification détaillée des éléments fondamentaux du modèle.

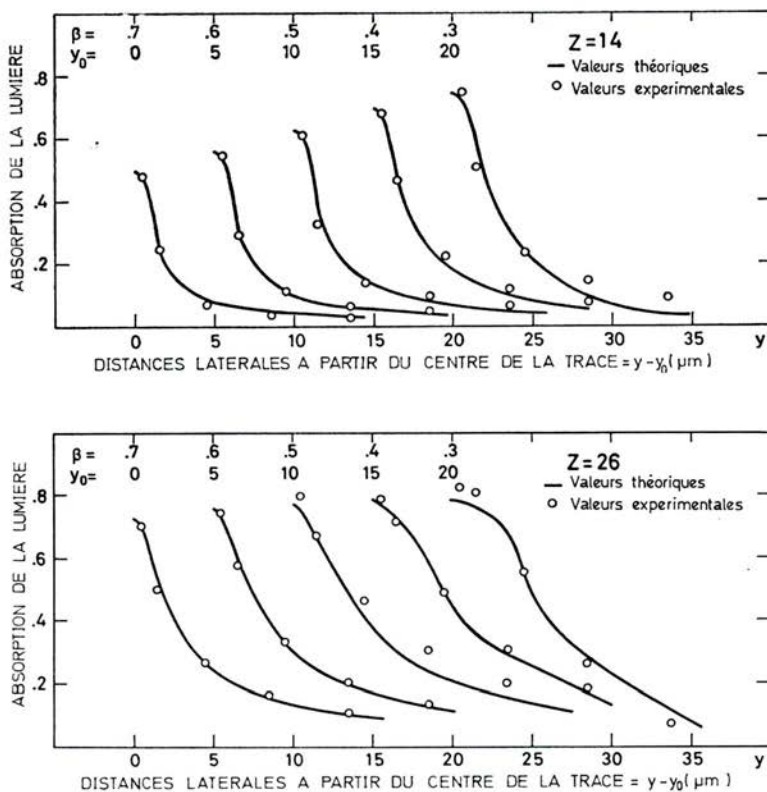


FIG. 4. — Comparaison entre les profils de l'absorption calculée et les résultats expérimentaux.

a. $Z = 14$

b. $Z = 26$

Le travail que nous venons de décrire se poursuit. L'interprétation physique des termes de la formule donnée nous donne une possibilité de distinguer entre la réponse de l'émulsion au passage de l'ion et la réponse du photomètre à la structure de la trace. Des efforts seront faits pour améliorer la théorie dans les deux domaines.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] BIZZETI P.G., DELLA CORTE M., *Nuovo Cimento*, **11** (1959), 317.
- [2] KATZ R., BUTTS J.J. *Phys. Rev.*, **137** (1965), 198.
- [3] KOBETICH E.J., KATZ R. *Phys. Rev.*, **170** (1968), 405.
- [4] KATZ R., KOBETICH E.J. *Phys. Rev.*, **186** (1969), 344.

- [5] KATZ R., SHARMA S.C., HOMAYOONFAR M. *Nucl. Instr. and Meth.*, **100** (1972), 13.
- [6] LIM Y.K., FUKUI K. *Nucl. Instr. and Meth.*, **44** (1966), 261.
- [7] GAUR R.K., SHARMA A.P. *Indian J. pure appl. Phys.*, **8** (1970), 468.
- [8] ROSANDER R., JACOBSON L. *Proc. 8th Int. Conf. Nucl. Phot. SSTD*, Bucharest 1972, to be published.
- [9] MATHIESEN O. *Proc. 8th Int. Conf. Nucl. Phot. SSTD*, Bucharest 1972, to be published.
- [10] JENSEN M., LARSSON L., MATHIESEN O., ROSANDER R. *Proc. 13th Int. Conf. Cosmic Rays*, Denver, Colorado, 1973.
- [11] SÖDERSTRÖM K., LINDSTAM S., BEHRNETZ S., KRISTIANSSON K. *Astrophys. Space Sci.*, **21** (1973), 211.
- [12] JACOBSON L., JÖNSSON G., SÖDERSTRÖM K., HAKANSSON H. *Nucl. Instr. and Meth.* (1973) to be published.
- [13] KATZ R., ACKERSON B., HOMAYOONFAR M., SHARMA S.C. *Radiation Research*, **47** (1971), 402.