

DOSIMETRIE DES RAYONNEMENTS CORPUSCULAIRES LOURDS ( $Z \geq 2$ )  
A L'AIDE DE L'ÉMULSION NUCLÉAIRE ET DES DÉTECTEURS  
SOLIDES DE TRACES

D.Haşeganu, M.Nicolae

INST.DE PHYSIQUE ATOMIQUE - BUCAREST

1. INTRODUCTION

La dosimétrie des rayonnements corpusculaires lourds (protons, particules  $\alpha$ , ions lourds) de grands énergies s'avère très importante pour évaluer les risques d'irradiation lors des vols spatiaux et auprès d'accélérateurs. Néanmoins, cette question soulève une série de difficultés pratiques.

Une difficulté importante qui a été déjà soulignée, au cas de la dosimétrie spatiale est, que l'abondance, relativement faible, des particules ayant un LET très élevé rend difficile la discrimination des particules lourds et en conséquence le calcul correct des expositions, quoique, la contribution à la dose totale des particules, ayant un  $Z$  supérieur à deux, est très importante.

Dans ce but, ont été proposées jusqu'à présent, des méthodes à l'aide des émulsions nucléaires de faible sensibilité et des détecteurs solides de traces. [1,2,3,4]

La méthode des émulsions nucléaires de faible sensibilité présente cependant un grand énnui, celui d'une régression importante des traces lors des expositions prologées dans l'espace cosmique, tandis que la méthode des détecteurs solides de traces est limitée, par la sensibilité relativement faible de cette classe de détecteurs. Même le nitrate de cellulose, qui a un seuil de sensibilité situé aux environs de  $1,2 \text{ MeV/mg/cm}^2$ , ne peut pas enregistrer des particules relativistes que au-delà de  $Z \approx 26$  [5].

Dans ce travail, nous avons essayé de développer une méthode pour la dosimétrie des rayonnements corpusculaires lourds ( $Z \geq 2$ ) à l'aide des émulsions nucléaires et des

détecteurs solides des traces en particulier, nitrate de cellulose, qui ait la capacité de couvrir un large interval d'ionisations et qui soit capable d'élogner jusqu'à certain point, les difficultés mentionnées ci-dessus.

Cette méthode se rapporte a l'emploi des paquets mixtes de ces deux types de détecteurs.

Pour diminuer le fading le l'image latente durant les expositions de long durrée, on propose l'emploi d'une émulsion de sensibilité élevée, associé à une méthode discriminatoires de développement, qui permète le développement de toutes les particules ayant une perte spécifique d'énergie superieure à une certaine valeur de seuil.

## 2. Le principe de la méthode de discrimination

On propose l'emploi simultané de quelques paquets d'émulsions nucléaires de sensibilité élevée (sensibles au minimum). Après exposition, chaque'un de ces paquets doit etre développé par une certain variante du révélateur amidol solvatant (AS) qui a été déjà étudié par nous [6, 7] [8, 9] et qui possède une capacité de discrimination très élevée. Chaque variante ( respectivement formule utilisé), du revelateur AS peut être caracterisée par un certain seuil de developpement, exprimé par la perte spécifique d'énergie, minimale, des particules qui produisent des traces développables. De cette manière, il est possible de diviser le spectre énergetique d'ions, en groupes d'ionisation. En principe, le nombre de ceux-ci peut être autant élevé que possible, et égal au nombre des formules (variantes) du révélateur AS utilisées.

Cependant, pour l'usage pratique, en fonction des possibilités experimentales de la méthode, nous nous sommes proposé de limiter les groupes d'ionisation à six, ainsi qu'il est donné dans le tabl.1. Pour ces groupes d'ionisations, nous avons établi les formules du revelateur AS ainsi que, chaque formule ait un seuil de developpement

égal à peu-près à la limite inférieure de l'intervalle de ionisation du groupe correspondant .

TABL.1

Groupes d'ionisation

Groupe N°	dE/dx MeV / $\mu$	dE/dx MeV / mg/cm <sup>2</sup>
I	$< 10^{-2}$	$< 6,6 \cdot 10^{-2}$
II	$10^{-2} - 10^{-1}$	$6,6 \cdot 10^{-2} - 6,6 \cdot 10^{-1}$
III	$10^{-1} - 3 \cdot 10^{-1}$	$6,6 \cdot 10^{-1} - 2$
IV	$3 \cdot 10^{-1} - 1$	2 - 6,6
V	1 - 3	6,6 - 20
VI	$> 3$	$> 20$

3. Le principe de l'action du révélateur amidol solvatant

Il est déjà bien connu que le développement conventionnelle par un révélateur photographique qui contient un agent réducteur, un agent conservant, un agent accélérateur et un agent antivoile est, au principal, un développement chimique, c'est à dire la réduction, sous l'action du révélateur, des ions Ag contenus dans les cristaux d'AgBr exposés. Le développement physique, qui signifie la réduction, sous l'agent révélateur, des ions contenus dans la solution révélatrice et la précipitation de l'argent sous les centres d'image, apparaît ici d'une manière insignifiant. Au contraire, dans le cas des révélateurs amidol solvatant, (AS) étudiés par nous, qui contiennent comme agents principaux amidol, l'agent réducteur et sulfocyanure de sodium, (agent solvatant). dû à la présence du NaSCN, qui possède une capacité dissolvante importante par rapport à l'AgBr, le développement physique a une contribution importante. Des observations au microscope électronique

sur couches d'émulsions nucléaires développées par ces revelateurs [10] ont démontré qu'ils favorisent la formation des grains compacts ayant une taille très proche de celle initiale. Une étude plus en détail que nous avons fait sur cette classe de revelateurs a démontré qu'ils seraient très indiqués pour une série d'applications, parmi lesquelles la discrimination des particules ionisantes dans l'émulsion nucléaire. Utilisés dans ce but, ils nous ont permis de développer des traces individuelles de fission en absence de toute trace  $\alpha$ , une bonne discrimination  $\alpha$  - protons, etc.

La formule de base du revelateur amidol solvatant est la suivante:

Sulfite de sodium anh.	4 g
Amidol (2,4 diamino-phenolchlorhydrate)	0,2 - 2 g
Sulfocyanide de sodium	1 - 9 g

En variant les proportions d'amidol et de sulfocyanide de sodium dans les limites mentionnées, nous avons pu obtenir une gamme très large de revelateurs ayant des propriétés discriminatoires variables.

#### 4. Experiences avec des ions lourds

##### a. A l'aide de l'émulsion nucléaire

La méthode de dosimétrie des rayonnements corpusculaires dont le principe a été décrit ci-dessus, a été expérimentée sur couches d'émulsion nucléaire IFA EN3, sensible au minimum d'ionisation [11], exposées à l'accélérateur U-200 de l'Institut Unifié de Recherches Nucléaires de Dubna (URSS) aux ions:  $C^{12}$ ,  $Ne^{20}$ ,  $A^{40}$ ,  $O^{16}$ ,  $S^{32}$ .

L'exposition de l'émulsion a été faite dans un faisceau d'ions monoénergétiques, sous un angle de  $5-10^\circ$ . L'énergie d'ions a été comprise entre 6 et 10 MeV par nucléon. Les couches exposées ont été développées, suivant

le cas, avec des formules variables du revelateur AS.

Sur les couches d'émulsion développées, nous avons mesuré des parcours et, en fonctions de la distribution des longueurs des traces on a déterminé, pour chaque variante du revelateur AS, le seuil de développement, exprimé par la moindre perte spécifique d'énergie, qui rend les traces développables. Les histogrammes des parcours nous ont permis à conclure que, par rapport à la méthode classique de développement des émulsions nucléaires, la méthode proposée par nous a une capacité discriminatoire supérieure. Par exemple, sur des couches exposées simultanément aux ions d'oxygène et de soufre, ayant la même énergie par nucléon, a été mis en évidence la possibilité de discriminer les ions de soufre de l'oxygène. Tandis que par l'emploi du révélateur AS, la distribution des longueurs des traces de soufre n'est pas affectée, les ions d'oxygène ne sont pas développés. Dans la fig. 1 sont donné les histogrammes des parcours d'ions de soufre et d'oxygène dans les couches d'émulsion développées par le révélateur amidol normale et le revelateurs amidol solvatant, respectivement. La proportion d'ions d'oxygène a été de 5%.

- Fig. 1 -

A la base des résultats expérimentaux, obtenus, on propose l'application de la méthode de discrimination décrite pour diviser le spectre énergétique d'ions, dans les rayons cosmiques primaires, en six groupes d'ionisation.

#### b. Experiences à l'aide des détecteurs solides de traces

Des feuilles de nitrate de cellulose, de 30  $\mu$ m environ dont les caractéristiques ont été présentées dans un autre travail [12], ont été exposées à l'accélérateur d'ions U200 de l'Institut de Recherches Nucléaires de Dubna, (URSS) aux ions de C, Ne, Ar, dans les mêmes conditions que l'émulsion nucléaire. Après l'exposition, les détecteurs ont été attaqués, par NaOH 20%, pour différentes durées, à 60° et a

70°. Comme une attaque plus intense s'avère plus efficace, nous avons déterminé le seuil d'enregistrement du détecteur dans les conditions d'une attaque à 70°C pour 10 min. Dans ces conditions, ont été établies les histogrammes de la distribution des parcours pour les ions mentionnés, ayant les suivantes énergies:

<u>Ion</u>	<u>MeV</u>	<u>MeV/nucléon</u>
C	81,5	6,7
Ne	176,0	8,0
Ar	215,0	5,4

Le seuil d'enregistrement du détecteur a été déterminé par l'emploi des données pour les particules  $\alpha$  de  $\text{Am}^{241}$  ( $E = 5,48 \text{ MeV}$ ) selon la méthode décrite en [12]

TABL.2

Parcours des ions de C,Ne,Ar enregistrés dans le nitrate de cellulose

Ions	(dE/dx) seuil		Parcours $\mu\text{m}$	Energie des ions E, MeV	Energie de seuil $E_S$ , MeV
	$\frac{\text{MeV}}{\text{cm}}$	$\frac{\text{MeV} \cdot \text{cm}^2}{\text{g}}$			
Particules $\alpha$	$2,1 \cdot 10^3$	$1,35 \cdot 10^3$	$20,1 \pm 2,1$	5,48	$4,12 \pm 0,15$
Carbon	-	-	$44,5 \pm 5,4$	81,50	38
Néon	-	-	$147,0 \pm 5,0$	176	$> 176$
Argon	-	-	$67,5 \pm 2,3$	215	$> 215$

Du tabl.2, il en résulte que les parcours des ions d'Ar et de Ne sont enregistrés intégralement, tandis que les parcours de C dans une proportion supérieure à 30%. Ces données nous indiquent que le détecteur de nitrate de cellulose étudié par nous peut être utilisé pour la dosimétrie des rayonnements corpusculaires lourds, au delà d'une perte d'énergie de  $1,35 \text{ MeV/mg/cm}^2$ , ce qui se rapproche très bien

aux données de Benton qui a mesuré pour le nitrate de cellulose un seuil de  $1,1 \text{ MeV/mg/cm}^2$  [5].

Application de la méthode à la dosimétrie des ions  
lourds

Six paquets d'une émulsion nucléaire sensible au minimum, chacun contenant quelque couches de  $100 \mu\text{m}$ , sont exposées dans une géométrie identique, avec un paquet de quelques feuilles de nitrate de cellulose ayant chacun une épaisseur de  $30-60 \mu\text{m}$ . Pour diviser le spectre d'ions en groupes d'ionisation chaque paquet d'émulsion disons,  $i$ , doit être développé par une certaine variante du révélateur AS, donnée dans le tabl.3. Cela signifie que le révélateur de composition correspondante au groupe  $i$  ( $i = 1 \dots 6$ ) sera capable de développer toutes les traces des particules  $\alpha$  ayant une perte spécifique d'énergie égale ou supérieur à la valeur de seuil pour le groupe  $i$ .

TABL.3  
Les groupes d'ionisation et la composition des révélateurs AS, correspondante.

Composi- tion du rével.AS.	Perte spécifique d'énergie MeV/ $\mu\text{m}$					
	I	II	III	IV	V	VI
	$10^{-2}$	$10^{-2}-10^{-1}$	$10^{-1}-3 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-1}-1$	$1-3$	$3$
Natrium sulfite	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
Amidole	2	1	0.5	0.5	0.5	0.3
Natrium rodanide	0.3	3	3	5	7	8
Potassium bromide	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
Citric acid	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

Pour déterminer la dose absorbée qui correspond à chaque groupe d'ionisation, le nombre des traces enregistrées par  $1 \text{ cm}^2$  de détecteur doit être mesuré. La dose absorbée sera déterminée par la relation:

$$D_i = K E_i \quad \text{où}$$

$E_i$  = l'énergie déposée dans le détecteur, qui revient

à 1 cm<sup>2</sup>, dans l'intervall „i" d'ionisation.

K = un coefficient pour passer de l'énergie aux unités de dose absorbée (rad) ou d'équivalent de dose (rem).

L'énergie absorbée E, peut être calculée par la relation:

$$E = \left(\frac{dE}{dx}\right)_i \left[ \sum R_{i-1} - \sum R_i \right]$$

où

$\left(\frac{dE}{dx}\right)_i$  = la perte linéaire moyenne d'énergie,  $(LET)_{\infty}$ , pour le groupe i

$R_i$  = la somme des tous les parcours enregistrés dans 1 cm<sup>2</sup> de détecteur, correspondante au groupe i et  $R_{i-1}$ , la même grandeur pour le groupe (i-1).

Il en résulte que pour déterminer la dose absorbée pour un groupe donné, d'ionisation, correspondant au tabl. 3, il est nécessaire de mesurer seulement le nombre de traces par 1 cm<sup>2</sup> et de calculer une perte spécifique moyenne d'énergie pour cette interval d'ionisation. La dose totale absorbé sera:

$$D_{\text{totale}} = \sum_{i=1}^{i=6} E_i$$

Selon la méthode decrite ci-au dessus nous avons tracé un graphique (fig.2) qui donne, pour deux des groupes d'ionisation du tabl.3, que nous avons eu la possibilité d'experimenter, la variation de l'énergie de seuil d'enregistrement, en MeV/nucléon en fonction du Z des ions, dans l'émulsion nucléaire IFA EN3, developper par le révélateur AS. Sur le même graphique, nous avons tracé la courbe correspondante au nitrate de cellulose. Il en résulte que la sensibilité du nitrate se situe intermediairement entre les groupes III et V.



### Conclusions

La méthode pour la dosimétrie des rayonnements corpusculaires lourds, proposé par nous, à l'aide des émulsions nucléaires, qui permet de diviser le spectre des ions en groupes d'ionisation, couvre un interval assez large du spectre énergétique des ions présents dans les rayons cosmiques primaires. En ce qui concerne sa sensibilité, elle est supérieure au détecteur de nitrate de cellulose. Par exemple, par cette méthode on peut détecter des particules relativistes au delà d'un  $Z = 12$ , même dans le groupe III, tandis que le seuil relativiste du nitrate se situe au  $Z = 26$ . En même temps, la méthode permet d'éloigner le fond des traces de protons relativistes, qui ne sont point développées.

Les auteurs adressent leurs chaleureux remerciements aux Drs. V.P. Pereligin et S.P. Treteacova qui ont organisé et donné leurs précieux concours pendant les expositions des émulsions et des détecteurs à l'accélérateur d'ions de l'Institut Unifié de Recherche Nucléaire de Dubna, U.R.S.S.

### BIBLIOGRAPHIE

1. E.V. Benton, E. Tochilin - Health. Phys. 12 (1966) 49.
2. E.V. Benton, M.M. Colver - Health. Phys. 13 (1967) 495.
3. E.M. Veprik, E.E. Kovalev, S.S. Skortov, L.H. Simaerin -  
- Voprosi Dosimetrii 7, 153.
4. E.V. Benton, R.P. Henke, R.G. Richmond  
- Radiation Effects, 3 (1970) 39.
5. E.V. Benton - A Study of charged particle tracks in  
cellulose nitrate - USNRDL -TR - 68 - 14.
6. M. Nicolae - Patent R.S.R. 52. 405/24.11.1969.
7. D. Haseganu, M. Nicolae - Rev. Roum. Phys. 15, 2, 225, (1970).
8. D. Haseganu - Rev. Roum. Phys. 15, 1, 99, (1970).
9. D. Haseganu - Rev. Roum. Phys. 15, 8, 869, (1970).
10. M. Nicolae - Sci. Ind. Phot. Nr. 7 - 8, (1966), 162.
11. M. Nicolae - Rev. Roum. Phys. 15 (1970) 455.
12. M. Nicolae - Rev. Roum. Phys. 15 (1971) 881.

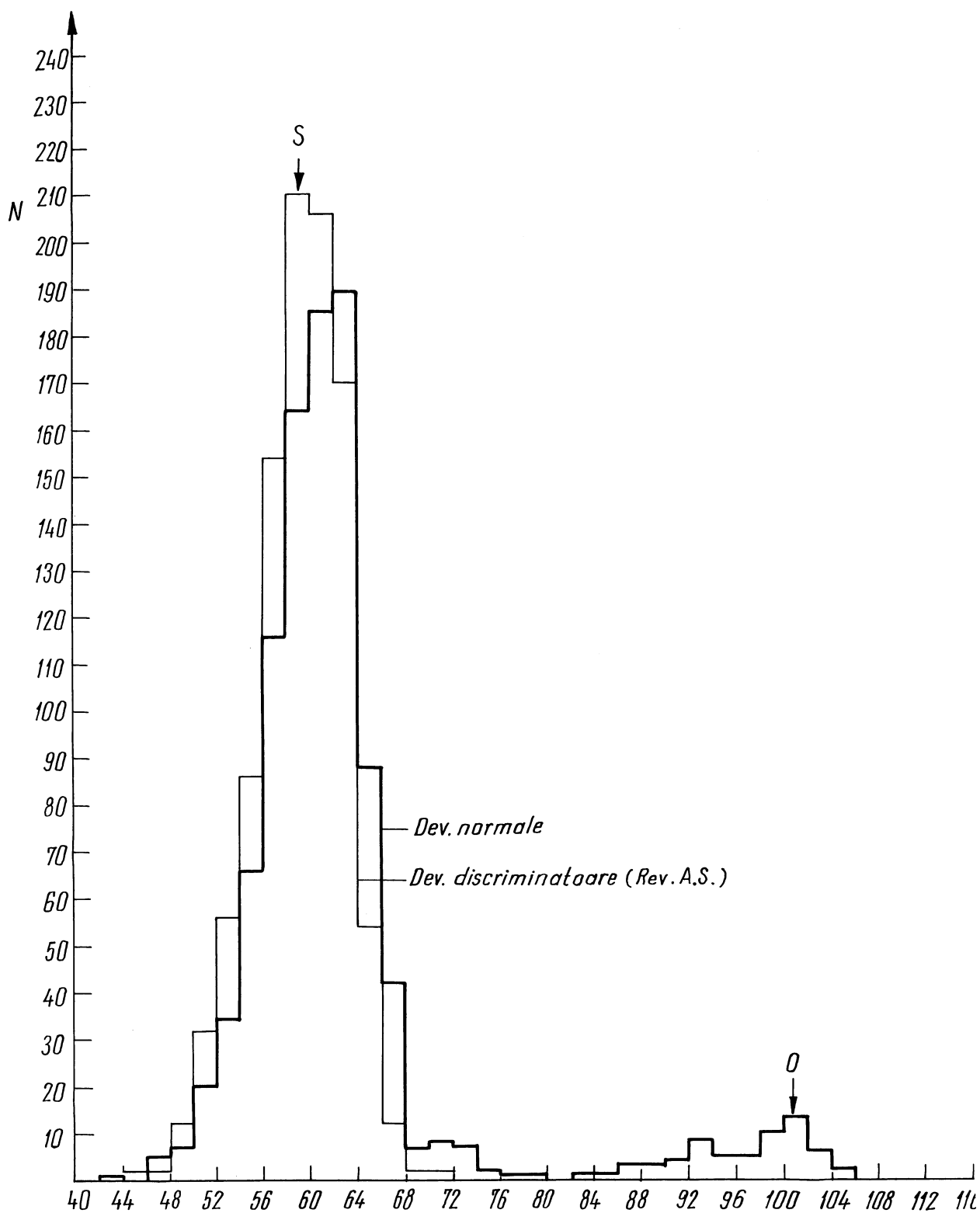


Fig. 1 Histogrammes des parcours des ions de soufre et d'oxygène en couches d'emulsion nucléaire développées par les revelateurs amidol normal et AS respectivement.

Fig.2 Variation de l'énergie du seuil d'enregistrement en fonction de Z des ions dans l'émulsion nucléaire IFA EN3 développée par le revelateur AS pour les groupes III et V et dans le nitrate de cellulose

