Émission de fragments rapides de charge 2 dans les interactions nucléaires de grande énergie

Bernard Tinland, Françoise Bartholin, Adèle Burdet

► To cite this version:

Bernard Tinland, Françoise Bartholin, Adèle Burdet. Émission de fragments rapides de charge 2 dans les interactions nucléaires de grande énergie. *Journal de Physique*, 1963, 24 (8), pp.604-610. 10.1051/jphys:01963002408060400 . jpa-00205537

HAL Id: jpa-00205537

<https://hal.science/jpa-00205537>

Submitted on 1 Jan 1963

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ÉMISSION DE FRAGMENTS RAPIDES DE CHARGE 2 DANS LES INTERACTIONS NUCLÉAIRES DE GRANDE ÉNERGIE

Par BERNARD TINLAND, FRANÇOISE BARTHOLIN et ADELE BURDET,

Institut de Physique Nucléaire de Lyon.

Résumé. — Nous avons étudié les particules de charge 2, d'énergie comprise entre 200 et 600 MeV émises dans les interactions des protons de 22 GeV avec les noyaux de l'émulsion photographique. Nos résultats portent sur la section efficace de production, les distributions énergétique et angulaire, l'association de ces particules aux étoiles à grand nombre de branches. Une interprétation théorique de la production de ces fragments est proposée.

Abstract. — We have studied the particles of charge 2 emitted with an energy between 200 and 600 MeV in the interactions of 22 GeV protons with emulsion nuclei. Our results give the cross section, the energy and angular spectra, and show that such particles are most frequently emitted in many pronged stars. We suggest a theoretical explanation of the production of these particles.

Introduction. — Il est bien connu que les interactions entre noyaux et particules de grande énergie donnent lieu à l'émission de fragments, c'est-à-dire de corpuscules constitués par deux ou plus de deux nucléons [1], [2], [3], [4].

Dans la description usuelle, les réactions nucléaires aux hautes énergies sont considérées comme se faisant en deux phases. La première est une suite de collisions « cascade » entre nucléons du noyau et particule primaire ou particules résultant d'une collision antérieure ; cet ensemble de chocs a pour effet l'éjection d'un certain nombre de particules d'énergie élevée : nucléons du noyau et particules formées dans les collisions individuelles (pions) ; il subsiste un noyau résiduel qui se trouve dans un état excité. La seconde phase de la réaction est constituée par l'évaporation de ce noyau ; c'est par elle que s'explique l'émission de fragments de basse énergie. Mais divers auteurs ont signalé une production de fragments dont l'énergie est trop grande et la distribution angulaire trop anisotrope peut être raisonnablement expliquée par le mécanisme d'évaporation. La cascade ne permet pas non plus d'en rendre compte et jusqu'ici aucune explication sérieuse n'a été proposée, les résultats expérimentaux étant eux-mêmes trop fragmentaires et trop dispersés pour une analyse approfondie.

Il nous a semblé qu'il y avait place pour un travail de recherche systématique relatif à l'émission de fragments ^3He et ^4He ; nous avons donc examiné à ce point de vue les réactions nucléaires entre protons de 22 GeV et noyaux de l'émulsion photographique.

I. Techniques expérimentales. — 1) **EXPLO-
RATION.** — Les émulsions utilisées appar-
tenaient au type standard Ilford G5 de format

$9,5 \times 14,5 \text{ cm}^2 \times 600 \text{ }\mu\text{m}$. Elles faisaient partie d'un stack de 64 pellicules qui furent exposées longitudinalement au faisceau de protons de 22 GeV issu du synchrotron du C. E. R. N. (densité du faisceau 2×10^5 protons/ cm^2).

La proportion de fragments ^3He ou ^4He d'énergie supérieure à 200 MeV est faible. D'autre part, à cette énergie, les traces de tels fragments ne se distinguent pas au simple examen visuel des traces de protons, deutons ou tritons d'énergie moindre. Il est donc pratiquement impossible de les détecter au niveau de l'étoile. Il a semblé préférable de rechercher les traces d' ^4He ou d' ^3He dans leur domaine de parcours où, par l'ionisation et l'aspect général, elles se distinguent suffisamment bien des traces de corpuscules de charge 1 ; des mesures ultérieures d'ionisation permettent d'évaluer la valeur de la charge. Cette méthode est apparue comme ayant un rendement satisfaisant ; la proportion des traces retenues qui ont été finalement attribuées soit à des tritons, soit à des deutons, ne dépasse pas 1/4.

Toute trace repérée est suivie à travers le stack jusqu'à l'étoile, d'une part, jusqu'à sa fin de parcours, d'autre part.

Le domaine de parcours résiduel dans lequel le repérage est effectif est compris entre 1 mm et 5 mm. La perte est probablement petite ; en effet, nous avons utilisé un balayage continu du volume des émulsions par champs de 500 μm ou 1 000 μm suivant l'optique utilisée. Or, une trace d'He est reconnaissable sur une longueur de 5 mm environ. Chaque trace qui nous intéressait était donc repérable dans trois ou quatre champs au moins.

2) **IDENTIFICATION DES TRACES.** — Deux méthodes ont été utilisées : principalement la mesure d'ionisation ; accessoirement la densité des rayons δ .

A) *Mesures d'ionisation.* — Fowler et Perkins [5] ont montré que, dans un large domaine de parcours, l'ionisation pour les corpuscules de charge 1 était proportionnelle à la fonction g donnée par :

$$g = 1/l \cdot \log B/H,$$

où B est le nombre d'amas sur une certaine longueur de trace et H le nombre de lacunes de dimensions supérieures à l sur la même longueur de trace. Soit g_0 la valeur de g au minimum d'ionisation : g_0 est aussi donné par :

$$A_0 = g_0 \cdot \exp(-g_0 d),$$

où g est le diamètre de grains ($\approx 0,65 \mu\text{m}$ dans l'émulsion G5).

Pour des protons, dans le domaine des parcours résiduels supérieurs à 1 cm, le rapport $g' = g/g_0$ a été trouvé très sensiblement égal au rapport I/I_0 des ionisations calculées par la formule classique :

$$I = \frac{4\pi Z^2 e^4}{m_0 v^2} \cdot NZ \left[\log \frac{2m_0 v^2}{J} - \log(1 - \beta^2) - \beta^2 \right],$$

où J est le potentiel d'ionisation moyen, et ceci pour toutes les émulsions de type G5 ou K5.

Nous avons déterminé g_0 sur des traces au plateau d'ionisation, puis $g' = g/g_0$ pour des protons ou des mésons π dans le domaine $g' > 2$.

Aucun étalonnage n'a été publié jusqu'ici pour les traces de particules de charge supérieure à 1. Nous ne disposons pas de plaques exposées à des faisceaux de particules α d'énergie suffisante. Aussi avons-nous dû déduire la courbe d'étalonnage pour les corpuscules ^3He et ^4He , de la courbe obtenue pour les protons. Le procédé employé a été le suivant : nous avons admis que g' ne dépendait que de l'ionisation et non de la charge du corpuscule, ce qui semble raisonnable. Les données relatives aux courbes parcours-énergie ont fourni, pour chaque parcours R d'un ^3He ou d'un ^4He l'énergie cinétique correspondante T , d'où son ionisation, égale, d'après la formule précédente, à 4 fois celle du proton ayant l'énergie $T/4$, et enfin la valeur de g' .

La même méthode s'applique, avec plus de sécurité, car une différence de charge n'intervient pas, aux deutons et aux tritons. La figure 1 donne les courbes $g' = g'(R)$ pour les protons, deutons, tritons, ^3He et ^4He . Les mesures d'ionisation ont été faites systématiquement pour les traces repérées sur différents segments de leur parcours. Les points expérimentaux ainsi obtenus se placent dans la surface hachurée de la figure 1. Ils se rapportent à des « ^3He ou ^4He supposés » ; nous faisons les constatations suivantes :

a) Les points en question sont situés nettement en dehors du domaine de la courbe relative aux tritons ; cette circonstance plaide en faveur de corpuscules de charge 2 ; en effet, il est bien établi, et nous avons pu le vérifier, que les points concer-

FIG. 1.

nant les tritons ou des deutons se placent effectivement sur les courbes « tritons » ou « deutons ».

b) Cependant ces points expérimentaux, dans le domaine des fortes ionisations, sont presque toujours assez sensiblement au-dessous de la courbe théorique ; ce fait n'est pas très étonnant ; en effet, les valeurs de g' concernées sont supérieures à 13, c'est-à-dire appartiennent à un domaine où, pour les corpuscules de charge 1, les mesures sont incertaines et la proportionnalité de g à l'ionisation douteuse. Les considérations sur lesquelles nous nous sommes appuyés (proportionnalité de g à l'ionisation) ne sont pas établies expérimentalement ; d'autre part, il s'agit de g' pour lesquelles les mesures sont affectées d'une erreur considérable. Cependant, les g' observés, très nettement supérieurs à ceux attendus pour un triton, ne permettent pas de mettre sérieusement en doute le fait qu'il s'agisse de corpuscules de charge 2. D'ailleurs si la longueur de la trace est suffisante pour que des valeurs de g' relativement faibles (< 10) soient atteintes, celles-ci sont toujours compatibles avec l'identification ^3He ou ^4He .

Par contre, le faible décalage existant entre les courbes concernant ^3He ou ^4He ne permet pas une discrimination entre ces deux types de fragments. Nous avons donc été conduits à présenter tous les résultats dans les deux hypothèses : fragments de masse 3 et fragments de masse 4. Il est bien évidemment possible, voire probable, qu'en fait, les fragments des deux types soient présents. Nous verrons que l'interprétation théorique des résultats serait probablement plus aisée si la mesure de la masse était possible ; notre technique dans son état actuel ne le permet pas.

B) *Densité des rayons δ .* — Nous avons utilisé la densité des rayons δ comme moyen de contrôle de l'identification de certaines traces. (son emploi

systématique était rendu difficile par le fond élevé dû à l'intensité de l'exposition). La convention des trois grains a été adoptée : sont comptées comme rayons δ , les traces d'électron issues de la trace principale et comprenant au moins trois grains. Les mesures ont été faites dans le domaine de parcours résiduel : 1 mm-2 mm et donnent en moyenne une densité de 4 à 5 rayons δ par 100 μ m pour les fragments étudiés ; ces résultats sont comparables à ceux énoncés par divers auteurs (Sørensen notamment). Pour des particules de charge 1, la densité de rayons δ serait quatre fois plus faible. L'identification proposée apparaît donc bien confirmée.

3) CONCLUSION. — Les traces repérées se classent en deux groupes :

a) un petit nombre de traces de corpuscules de charge 1 (notamment des tritons) : environ 25 % du total ;

b) des traces dont l'ionisation et la densité de rayon δ sont incompatibles avec celles des corpuscules de charge 1, mais compatibles avec celles de corpuscules de charge 2. Ces traces ont été attribuées à des fragments ^3He ou ^4He .

La méthode d'exploration que nous avons utilisée permet donc de repérer des fragments de charge 2 à des traces sensiblement horizontales sans contamination excessive.

II. Caractéristiques de l'émission des fragments ^3He ou ^4He . — 1. CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES OBJET DES EXPÉRIENCES. — Les caractéristiques physiques relatives à l'émission des fragments ^3He ou ^4He qu'il y a lieu de déterminer, sont les suivantes : sections efficaces globales de production ; distribution angulaire ; distribution énergétique ; corrélation entre l'énergie du fragment et son

angle d'émission ; corrélation entre la probabilité de l'émission d'un fragment de charge 2 et les caractéristiques de l'interaction (nombre total de particules émises notamment).

2. INCIDENCE DES CONDITIONS D'EXPÉRIENCE SUR LES RÉSULTATS. — 340 fragments probables d' ^3He ou ^4He ont été repérés ; parmi ceux-ci, 50 ayant une longueur supérieure à 1 cm (énergie 200 MeV, environ) ont été retenus et identifiés définitivement.

D'importants facteurs de correction, due à la géométrie de l'exploration, sont nécessaires. On les trouvera dans le travail de l'un de nous. Les résultats donnés ici sont les résultats corrigés.

3. CARACTÉRISTIQUES DES ÉTOILES DE RÉACTIONS DONNANT LIEU À L'ÉMISSION DE FRAGMENTS ^3He ou ^4He . — Les caractéristiques des événements d'interaction proton-noyau ayant donné lieu à l'émission de fragments ont été étudiés systématiquement. Soient :

N_s le nombre de traces de gerbes (constituées par des pions et des protons de grande énergie),

N_g Le nombre de traces grises (essentiellement des protons d'énergie comprise entre 30 MeV et 400 MeV),

N_b le nombre de traces noires (protons, deutons, tritons de faible énergie).

La répartition des étoiles ayant donné lieu à l'émission de fragments en fonction du nombre de branches (grises et noires : $N_b + N_g$) est comparée (fig. 2) à la répartition générale concernant l'ensemble des étoiles (Manfredini et al.) [7]. Les nombres moyens de branches par étoile sont respectivement :

$N_b + N_g = 17,2$ pour les étoiles « à fragments » (50).

$N_b + N_g = 7,4$ pour l'ensemble des étoiles (1 586).

FIG. 2. — Nombre (normalisé) d'étoiles ayant plus de 0, 1, ..., 33 branches grises et noires.

Il est possible de procéder à une analyse plus précise. Parmi les 183 étoiles à 0 branche grise ou noire observées par Manfredini, 70 environ doivent être dues à l'interaction avec des protons libres de l'émulsion. Les étoiles d'interaction avec un noyau léger, d'autre part, ont des $N_b + N_g$ au plus égaux à 8 et le plus fréquemment (80 % des cas) compris entre 3 et 8. Trois fragments seulement proviennent d'étoiles répondant à cette condition. Donc, 92 % au moins des fragments étudiés, sont émis dans des interactions avec des noyaux Ag ou Br.

4. PROBABILITÉ D'ÉMISSION D'UN FRAGMENT He D'ÉNERGIE COMPRISE ENTRE 200 MeV ET 600 MeV. — Dans un volume de 30,6 cm³ d'émulsion, 50 fragments « repérables » ont été observés. Le nombre de fragments réellement émis est calculé à l'aide des facteurs de correction géométrique, il est égal à 420 environ. Les sections efficaces de réaction des protons de 22 GeV avec les noyaux constituant l'émulsion n'ont pas été déterminées, mais se déduisent facilement des sections efficaces d'interaction proton-nucléon. Adoptant $\sigma_{p-p} = \sigma_{p-n} = 42$ mb, nous déduisons d'après les travaux de G. Philbert [8] :

$$\langle \sigma \rangle_L = 250 \text{ mb} \quad \text{et} \quad \langle \sigma \rangle_H = 990 \text{ mb},$$

où $\langle \sigma \rangle_H$ et $\langle \sigma \rangle_L$ désignent les moyennes des sections efficaces pour les noyaux lourds (Ag et Br) et les noyaux légers (C, N, O) de l'émulsion. Ainsi que nous l'avons vu, les fragments observés proviennent tous d'une interaction avec un noyau complexe ; si nous admettons que les trois fragments signalés comme pouvant provenir d'une interaction avec un noyau léger, proviennent effectivement d'une telle interaction, nous obtenons :

$$(\sigma^3\text{He} - {}^4\text{He}/\sigma t)_H = 1,03 \times 10^{-4}$$

$$\text{et} \quad (\sigma^3\text{He} - {}^4\text{He}/\sigma t)_L = 2 \times 10^{-5},$$

où les $\sigma^3\text{He} - {}^4\text{He}$ sont les sections efficaces de réaction avec émission d'un ${}^3\text{He}$ ou d'un ${}^4\text{He}$ d'énergie comprise entre 200 et 600 MeV.

FIG. 3. — Distribution angulaire corrigée.

Si nous supposons que tous les fragments sont émis dans un événement de noyau lourd, nous obtenons :

$$(\sigma^3\text{He} - {}^4\text{He}/\sigma t)_H = 1,1 \times 10^{-4}.$$

Nous n'avons trouvé dans la littérature aucun élément susceptible de procurer une comparaison avec nos résultats.

5. DISTRIBUTION ANGULAIRE. — La correction géométrique a été appliquée pour la détermination du nombre de fragments émis dans une direction donnée. Nous donnons la distribution angulaire vraie (corrigée) :

$$dN/d\theta = f(\theta). \quad \text{Figure 3.}$$

Elle fait apparaître une très nette prépondérance de l'émission vers l'avant ($N_{FW}/N_{BW} = 21,2$) et même de l'émission sous des angles très faibles. Il est bien connu que l'émission des fragments de faible énergie ($T < 50$ MeV) est presque isotrope ($N_{FW}/N_{BW} = 1,2$ à $1,4$).

6. CORRÉLATION ÉNERGIE-ANGLE D'ÉMISSION. — L'étude de cette corrélation est importante pour la détermination du spectre énergétique vrai ; elle présente aussi un intérêt intrinsèque. La figure 4

FIG. 4.

donne la répartition des points représentatifs des fragments.

Les noyaux les plus énergiques apparaissent clairement être émis sous des angles plus faibles que les noyaux moins énergiques. Aucune correction, ni géométrique, ni de rendement, n'ayant été faite, la densité des points représentatifs n'a pas de signification physique.

7. SPECTRES ÉNERGÉTIQUES. — L'obtention du spectre énergétique oblige à opérer un assez grand nombre de corrections sur les résultats bruts, corrections dont l'importance est telle que les résul-

tats définitifs ont seulement une valeur indicative.

a) La correction de rendement est grande pour les traces les plus longues : celles-ci sont en effet émises préférentiellement vers l'avant et se terminent dans un domaine qui échappe à l'exploration.

b) La correction géométrique est plus particulièrement importante pour les traces émises sous des angles compris entre 45° et 135° ; dans ce domaine d'angles, ce sont, comme nous l'avons vu dans le paragraphe précédent, surtout des fragments d'énergie inférieure à 350 MeV qui se trouvent émis (sur la figure 5 sont reportés les spectres éner-

FIG. 5. — Distribution énergétique corrigée.

gétiques corrigés dans les deux hypothèses où les fragments sont tous des ^3He ou tous des ^4He).

Le facteur de correction angulaire a été établi compte-tenu des résultats de corrélation (fig. 4). Nous avons admis simplement que pour un angle donné, ce facteur prenait deux valeurs : l'une correspondant aux fragments d'énergie 200 à 400 MeV ; l'autre correspondant aux fragments d'énergie 400 à 600 MeV.

Les données montrent en effet que les répartitions angulaires des fragments sont bien différenciées pour ces deux domaines mais à peu près indépendantes de l'énergie dans chacun d'entre eux. Les deux limites du spectre sont données par les conditions expérimentales. Il ressort du résultat que la fréquence d'émission des fragments est une fonction décroissante de leur énergie. Il s'agit là d'un résultat qui, sous forme qualitative, est bien connu.

8. CONCLUSIONS GÉNÉRALES DE L'ÉTUDE EXPÉRIMENTALE. — L'étude expérimentale permet de dégager les conclusions générales suivantes :

a) Des fragments ^3He et ^4He d'énergie comprise entre 200 et 600 MeV sont mis, essentiellement dans les interactions p -noyaux Ag ou Br avec une fréquence de l'ordre de 10^{-4} par interaction.

b) Ces fragments sont émis vers l'avant ; l'angle d'émission moyen est d'autant plus faible que l'énergie du fragment est plus élevée.

c) Le nombre de fragments est d'autant plus faible que leur énergie est plus élevée.

d) Leur production paraît associée à des événements nucléaires dans lesquels il y a émission d'un grand nombre de particules.

IV. Discussion des résultats basés sur l'interprétation théorique.

— 1) AUTRES DONNÉES EXPÉRIMENTALES. — A l'aide d'une technique de compteurs, des ^3He ont été observés émis à $8,4^\circ$, à des énergies de 2,3 GeV en même temps d'ailleurs que des tritons et des deutons dans les interactions p -Al à 25 GeV (Lundby [9]). Les expériences ne fournissent pas la probabilité de production par interaction, mais seulement, pour un angle et une énergie donnés, le rapport entre celle-ci et la probabilité de production de protons dont le moment est égal à 0,65 fois celui des ^3He . Ce rapport est égal à 10^{-4} (^3He de moment 4,3 GeV/c, p de moment 2,8 GeV/c émis à $8,4^\circ$). Nous avons essayé d'aboutir à une évaluation de la fréquence d'émission par interaction en formulant diverses hypothèses, plausibles, mais ne reposant pas sur une base expérimentale sûre :

a) Les protons de grande énergie sont supposés émis avec une fréquence de 0,05 par GeV dans l'intervalle d'énergie 1-6 GeV. Nous obtenons cette fréquence en admettant :

— que les protons de grande énergie proviennent des réactions :

ou

— que ces réactions donnent un proton dans l'intervalle 1-6 GeV avec une probabilité de 0,5 ;

— que les protons rapides ne subissent pas de collision secondaire abaissant leur énergie au-dessous de 1 GeV dans 50 % des cas.

b) Les distributions angulaires et énergétiques des ^3He et des protons dans le domaine 1-6 GeV sont considérées comme étant les mêmes.

Dans ces conditions, il y aurait environ 4×10^{-6} ^3He par intervalle d'énergie égal à 1 GeV, soit 4×10^{-7} par 100 MeV dans le domaine 1-6 GeV. Étant donné le caractère fort incertain des hypothèses, ce chiffre a une valeur purement indicative. Il est à rapprocher de celui que nous obtenons dans l'intervalle 400-600 MeV pour l'ensemble $^3\text{He} + ^4\text{He}$, soit environ, après les corrections, 5×10^{-6} par 100 MeV (les noyaux en interaction sont d'ailleurs de $A \approx 95$ dans notre cas au lieu d'être de $A \approx 27$).

Nous considérons les deux résultats comme compatibles et pouvant confirmer la décroissance

de la fréquence d'émission avec l'énergie du fragment.

2. BASES DE L'INTERPRÉTATION THÉORIQUE. — La recherche d'une théorie susceptible de rendre compte quantitativement des phénomènes mis en évidence, déborderait le cadre de ce mémoire. Elle obligerait en effet à un calcul complet de la cascade intra-nucléaire, calcul extrêmement pénible et dont seuls jusqu'ici certains éléments ont été résolus. Aussi nous nous bornerons à donner quelques indications qualitatives sur le degré de plausibilité des différents mécanismes susceptibles d'être invoqués pour expliquer la formation des fragments He énergiques. Trois types de processus peuvent être pris en considération : 1) L'évaporation ; 2) L'interaction du proton avec des sous-structures intra-nucléaires ; 3) La formation de structures d' ^3H , ^3He dans les interactions proton-proton.

1° *L'évaporation*. — Ainsi que nous l'avions indiqué dans l'introduction tous les auteurs qui nous ont précédés ont estimé que l'évaporation ne pouvait expliquer l'émission de ces fragments rapides. Notre travail nous permet de confirmer totalement ce point de vue par deux de ses résultats : l'extension du spectre énergétique jusqu'à 100 MeV et la très forte anisotropie de la distribution angulaire.

2° *Sous-structures*. — Les fragments sont produits dans les collisions de particules incidentes ou de particules rapides de la cascade avec des sous-structures nucléaires éphémères, telles que ^2H , ^3H , ^3He , ^4He Cette hypothèse a été notamment avancée par P. Cüer et ses collaborateurs et sa vérification a fait l'objet de divers travaux de l'école strasbourgeoise. Il n'est guère douteux que de telles sous-structures existent et qu'elles jouent un rôle dans certaines interactions de moyenne ou de grande énergie. Ainsi des interactions ont été observées, provoquées par des protons de 330 MeV (Combe [10]) ou de 1 GeV (Philbert, non publié) qui s'expliquent par la collision du proton rapide avec un ^4He appartenant à un ^{12}C ou à un ^{16}O . Nous ne pensons pas que la théorie proposée vaille pour les fragments que nous observons. Les objections sont les suivantes :

a) Nous pouvons supposer d'abord que ce serait l'interaction primaire du proton de grande énergie qui interviendrait. Il ne pourrait guère s'agir que d'une diffusion élastique du proton et de la sous-structure. En effet, aucun phénomène du type :

n'a été observé jusqu'ici. Or la diffusion inélastique d'un proton avec une sous-structure serait très analogue à la diffusion de diffraction p-noyau léger : l'énergie transmise à la sous-structure serait faible (30-40 MeV) et il serait émis à 90°.

D'autre part, il n'y avait aucune raison pour que

les étoiles à grand nombre de branches se trouvent favorisées par la production de fragments. Le phénomène inverse devrait plutôt se produire. En effet, le fragment (émis vers l'avant, d'après nos observations) aurait d'autant plus de chances d'être décomposé par une interaction ultérieure de la cascade, que la collision primaire se ferait, par rapport au noyau, avec un paramètre d'impact petit ; et à un tel paramètre correspond une cascade longue, donc l'émission d'un grand nombre de particules de moyenne et faible énergie. L'hypothèse de la production de fragments He par collision d'un proton primaire avec une sous-structure, ne nous paraît donc pas soutenable.

b) Admettons maintenant que les fragments soient formés dans des interactions secondaires (dues par exemple à des protons ou des pions de cascade dont l'énergie serait comprise entre 1 et quelques GeV). En ce cas, les remarques précédentes relatives à l'énergie et à l'orientation (mais dans une moindre mesure, car la direction des particules responsables de l'interaction n'est plus aussi bien définie) s'appliquent encore. D'autre part, on devrait observer l'émission de fragments dans les « petites étoiles » dues à des primaires de 1 à quelques GeV, ce qui ne semble pas être le cas.

Nous concluons donc que l'existence de sous-structures ayant les propriétés de potentiel d'un ^3He ou ^4He ne peut être invoquée pour expliquer la production de fragments.

3. *Formation de fragments dans les interactions primaires* $p + p$. — Hagedorn a suggéré que les processus suivants sont responsables de la formation de fragments rapides :

L'existence du processus (1) n'est guère douteuse. A des énergies de l'ordre du GeV, la probabilité relative d'une réaction de type (1) n'est pas négligeable, et il n'y a pas de raison théorique pour qu'elle s'annule complètement à des énergies plus élevées.

Une preuve, mais celle-là non décisive, de l'interprétation de (2) pourrait être la présence de ^3He et ^3H de grande énergie (Lundby [9]) et l'absence de ^4He (Cocconi, Lundby [9]). Les deutons de grande énergie (3,75 GeV) peuvent s'expliquer par l'interaction (1), les ^3He d'énergie voisine de 2,3 GeV proviennent peut-être du processus (2). Par contre, il paraît douteux que (2) intervienne dans la formation de fragments He de 200 à 600 MeV.

L'objection a déjà été formulée à propos des sous-structures et est la suivante : (2) se produirait dans une interaction primaire ou peut-être dans une des premières interactions secondaires de la

cascade ; il n'y aurait aucune raison de trouver les fragments associés aux « grandes étoiles ». Aussi l'idée suivante a-t-elle été avancée : les ^3He seraient formés dans deux processus consécutifs :

a) Formation de d rapides par (1).

b) Formation de ^3He (et de ^3H) dans l'interaction secondaire des d rapides avec un nucléon du noyau :

c) Un processus supplémentaire expliquerait la formation éventuelle des ^4He .

Cette idée ne paraît se heurter à aucune objection décisive. Elle explique aussi bien la production vers l'avant (ainsi que le montrerait l'étude cinématique) et l'association des He aux grandes étoiles. Elle a l'avantage de ne faire intervenir que les processus expérimentaux observés. La réaction $d + p \rightarrow ^3\text{He} + \pi$ a en effet été observée par

Abashian, Booth et Crowe [12] avec des deutons de 624 à 742 MeV. Une vérification expérimentale possible serait la détermination du rapport nombre de fragments ^3He au nombre de fragments ^4He .

Une telle détermination à l'aide des techniques usuelles de l'émulsion nucléaire est exclue. L'emploi des champs pulsés la permettrait peut-être.

Nous remercions M. le P^r G. Philbert sous la direction duquel ce travail a été effectué. Nous remercions également M. le P^r Cüer et ses collaborateurs qui ont bien voulu se charger du développement des émulsions, lequel s'est révélé en tous points excellent. Les mesures expérimentales n'auraient pu être menées à bien sans l'équipement de précision que M. le P^r A. Sarazin, Directeur de l'Institut de Physique Nucléaire de Lyon, a bien voulu mettre à notre disposition.

Manuscrit reçu le 29 mars 1963.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] MUNIR (B. A.), *Phil. Mag.*, 1956, **4**, 355.
- [2] GOLDSACK (S. J.), LOCK (W. O.), MUNIR (B. A.), *Phil. Mag.*, 1957, **14**, 149.
- [3] NAKAGAWA, TAMAI, NOMOTO, *Nuov. Cimento*, 1958, **9**, 780.
- [4] BAUMANN (G.), BRAUN (H.), CÜER (P.), *C. R. A. S.*, 1962, **254**, 1966.
- [5] FOWLER (P. H.), PERKINS (D. H.), *Phil. Mag.*, 1955, **377**, 587.
- [6] DEMERS (P.), Ionographie (Presses Univ. de Montréal), p. 295.
- [7] MANFREDINI, *Nuov. Cimento*, 1961, **3**, 469.
- [8] PHILBERT (G.), *C. R. A. S.*, 1958, **246**, 591.
- [9] LUNDBY (A.), Congrès de Rochester, 1960.
- [10] COMBE (J.), *Nuov. Cimento*, 1956, Suppl. 3, 182.
- [11] COCCONI (G.), Congrès de Rochester, 1960.
- [12] ABASHIAN (A.), BOOTH (N. E.), CROWE (K. M.), Congrès de Rochester, 1960.