

PROPOSITION D'UN SOLENOÏDE A GRANDE ACCEPTANCE
ANGULAIRE POUR LA DETECTION DE PARTICULES CHARGÉES
AUX ANGLES AVANT

-:-

A - INTRODUCTION.

En physique nucléaire, on rencontre actuellement de plus en plus de situations expérimentales où il est impératif de détecter des produits de réaction nucléaire aux angles avant. On peut citer les types d'expériences suivants :

- 1) Expériences de corrélations angulaires particule-gamma ou particule-particule dans la géométrie dite "méthode II" de Litherland et Ferguson¹⁾. En détectant dans une réaction nucléaire $X(a,b)Y^*(c)Z$ la particule b dans une direction confondue avec l'axe de faisceau a , on réalise un fort alignement de l'état nucléaire Y^* . De ce fait, la corrélation (b,c) peut présenter une forte anisotropie que l'on peut relier à diverses grandeurs spectroscopiques mises en jeu (spin de Y^* , de Z , moment emporté par c , rapport de multipolarité, etc). Aux énergies d'un tandem, les sections efficaces sont généralement très fortement piquées vers l'avant; ceci nécessite de pouvoir détecter la particule c autour de zéro degré, plutôt qu'à 180° . D'autre part, on veut que les données expérimentales puissent être analysées dans le cadre d'un formalisme de corrélation angulaire double pour s'affranchir au maximum du mécanisme de réaction. Ceci signifie que l'ouverture du système à zéro degré doit être à symétrie azimutale autour de la direction du faisceau. Enfin, un grand angle solide, ainsi qu'une bonne acceptance en rigidité magnétique sont nécessaires pour des mesures de coïncidences portant sur une large plage d'énergie d'excitation du noyau Y^* .
- 2) Distribution angulaire par pas angulaire serré aux angles avants ($\approx 1^\circ$ (lab)). La bonne définition angulaire est nécessaire pour des réactions dont les sections efficaces oscillent rapidement avec l'angle. C'est le cas par exemple des processus quasi-élastiques entre ions lourds à haute énergie. De plus, la cinématique dans ce dernier cas est telle

que les produits sont émis aux angles avant . Aussi, est-il intéressant de disposer d'un spectromètre qui concilie une bonne définition angulaire $\Delta\theta$ avec un angle solide important. Ceci est réalisable avec un système possédant une acceptation de 360° en ϕ , donc à symétrie azimutale. A titre d'exemple, le tableau 1 donne l'angle solide $\Delta\Omega = 2\pi \sin\theta \Delta\theta$ associé à une ouverture $\Delta\theta = 0,2^\circ$ pour des angles compris entre 1 et 10° .

Tableau 1 $\Delta\Omega = 2\pi \sin\theta \Delta\theta$ ($\Delta\theta = 0,2^\circ$)

θ [deg]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10°
$\Delta\Omega$ [msr]	0,4	0,8	1,2	1,5	1,9	2,3	2,7	3,0	3,5	4,1

On peut ainsi atteindre des angles solides environ 20 fois plus élevés que ceux généralement obtenus avec des spectromètres type split-pôle, fonctionnant avec la même résolution angulaire.

La distribution angulaire pourrait être décrite à l'aide d'un système à obturateur et iris, définissant la région $\theta, \theta + \Delta\theta$. Le fait de travailler avec une faible ouverture permet en outre d'obtenir de faibles aberrations géométriques au point image, où l'on peut donc placer un détecteur conventionnel type $E \times \Delta E$ de petite dimension. On peut également obtenir une bonne définition en temps de vol. Dans les solénoïdes calculés plus loin, les fluctuations relatives de temps de vol sont de l'ordre de 8×10^{-4} pour une ouverture angulaire $\Delta\theta = 1^\circ$. Rappelons qu'une discrimination en nombre de masse de 1 % nécessite un $\Delta E/E$ inférieur à 5×10^{-3} .

Une des applications possibles de cette technique pourrait être par exemple l'observation d'un résidu particulier de fusion de faible section efficace, puisqu'on dispose pour $\Delta\theta$ petit de sa rigidité magnétique, de son énergie, de son ΔE et de son temps de vol.

Une autre façon de décrire une distribution angulaire en géométrie $\phi = 360^\circ$ est d'ouvrir complètement l'entrée du spectromètre et de reconstituer les trajectoires à l'aide de deux détecteurs à localisation placés dans la zone image. Une fois les informations en position traitées on peut déterminer simultanément l'angle d'émission et la rigidité magnétique.

- 3) Distribution angulaire d'un produit de réaction à faible correction cinématique et de faible section efficace. Avec son acceptance totale, le système joue le rôle d'un détecteur à grand angle solide, avec une bande passante en rigidité magnétique dépendant de la taille du détecteur au point image. Dans cet usage, l'axe du spectromètre est placé à des angles différents de zéro degré. Cette géométrie pourrait être utilisée pour des réactions induites par des ions légers pour lesquels il y a une faible dépendance cinématique de l'énergie avec l'angle.
- 4) Transfert d'activité. Le système placé à zéro degré peut éventuellement servir à transférer dans la zone image des radioéléments formés à la suite de réactions induites par ions lourds, à la manière d'un jet d'hélium. On peut placer dans la zone image une station de comptage et rapprocher le spectromètre de la cible pour augmenter la transmission. Ce mode d'utilisation doit être comparé cas par cas avec la technique du jet d'hélium. Son efficacité dépend notamment de la cinématique des noyaux de recul, de leur distribution angulaire, de la proportion de l'état de charge pour lequel le spectromètre est réglé. Il peut avoir une application intéressante à des noyaux pour lesquels le jet d'hélium présente un mauvais rendement, ou/et qui auraient des durées de vie brèves (inférieure à 50 msec). Ce pourrait être le cas pour l'observation de certains noyaux très exotiques.

B - RAPPEL DES CARACTERISTIQUES RECHERCHEES

En résumé, pour les types d'expérience décrits plus haut, un tel système devrait présenter les caractéristiques suivantes :

- B1 - symétrie azimutale, lorsqu'il est placé à zéro degré.
- B2 - grande acceptance angulaire, c-à-d grand angle solide.
- B3 - possibilité de faire varier la bande passante en rigidité magnétique.
- B4 - faibles aberrations géométriques, permettant l'usage de détecteurs de petite dimension (notamment des ΔE très minces).

C - PROPOSITION D'UN DETECTEUR SOLENOIDAL SUPRACONDUCTEUR

La caractéristique B1 énoncée ci-dessus ne sera obtenue que dans un champ magnétique invariant par rotation autour d'un axe confondu avec celui du faisceau. En coordonnées cylindriques (r, θ, z) , ce champ ne comporte que 2 composantes $B_z(r, z)$ et $B_r(r, z)$ ($B_\theta = 0$). Un tel champ ne peut être réalisé

dans la pratique que par un solénoïde. Disons tout de suite que des combinaisons de lentilles quadrupolaires peuvent pour certaines classes de trajectoires présenter aussi un certain degré de symétrie azimutale, en ce sens que les angles d'acceptance dans 2 plans perpendiculaires (plans magnétiques) peuvent être égaux. Mais seul, le solénoïde réalise la parfaite symétrie azimutale pour n'importe quelle trajectoire.

Depuis plusieurs années des détecteurs solénoïdaux sont utilisés auprès d'accélérateurs pour l'étude d'électrons de conversion interne sur faisceau²⁾. Plus récemment, les propriétés focalisantes de solénoïdes ont été considérées pour le transport de faisceau sur un accélérateur linéaire à ions lourds³⁾. Grâce à la technologie supraconductrice, on développe actuellement des solénoïdes capables de courber des particules de grande rigidité magnétiques auprès d'accélérateurs, à Dubna et auprès du futur Petra^(*). Auprès de Saturne, la source Criebis sera également dotée d'un solénoïde^(*). Avec la nécessité de détection aux petits angles liée à l'utilisation de faisceaux d'ions lourds, divers groupes aux Etats Unis proposent des dispositifs type quadrupôle magnétique⁴⁾ ou solénoïde⁵⁾, seuls ou inclus dans un ensemble de détection⁶⁾.

1) Propriétés générales d'un solénoïde.

Un solénoïde est constitué d'un enroulement autour d'une surface cylindrique, dont l'axe peut être placé sur la direction zéro degré du faisceau. Le champ magnétique créé par cet enroulement est essentiellement parallèle à la direction Oz du faisceau (composante B_z). Une composante radiale B_r apparaît lorsqu'on s'éloigne de l'axe, et aux deux extrémités du solénoïde. Les particules émises à partir d'un point (la cible) sur l'axe avec un certain angle peuvent être refocalisées à la sortie du solénoïde sur son axe en un point qui dépend à la fois de l'angle d'émission et de leur rigidité magnétique.

(*) les caractéristiques de solénoïde existants ou en projet :

- Dubna :	longueur 120 cm,	diamètre du bobinage :	12 cm,	champ max	2,5 T
- Petra :	" 300 cm,	"	" 80 cm,	" "	5 T
- Criebis :	" 150 cm,	"	" 35 cm,	" "	3 T

Lorsque la focalisation a lieu, on s'attend a priori à ce que les aberrations géométriques soient faibles. En effet, la trajectoire dans la zone image où le champ devient nul recoupera nécessairement l'axe (théorème de Bosch - voir appendice).

Dans l'approximation de Gauss, le solénoïde joue le rôle d'une lentille convergente de distance focale (approximation de lentille mince), donnée par la relation :

$$\frac{1}{f} = \frac{B_z^2 L}{4(B\rho)^2}$$

où L représente la longueur du solénoïde, B_z^2 la valeur moyenne sur l'axe du carré du champ et ($B\rho$) la rigidité magnétique de la particule. On constate sur cette relation que pour focaliser des particules de $B\rho \approx 1.5$ à 2 Tesla xm sur une distance de l'ordre du mètre, il faut réaliser des champs B_z de plusieurs Teslas, c-a-d recourir à la technique supra conductrice. Les mêmes distances focales pourraient être obtenues avec des systèmes de lentilles quadripolaires produisant des champs magnétiques moins élevés. Néanmoins, les avantages du solénoïde par rapport à un système de quadripôles nous paraissent l'emporter suffisamment pour proposer la solution solénoïdale. En effet :

a - le solénoïde par construction peut présenter une symétrie azimutale quasi parfaite, car la technique supraconductrice permet d'utiliser un conducteur électrique de faible section; les dissymétries introduites par les connexions électriques peuvent dans ce cas être pratiquement annulées. La réalisation pratique d'un solénoïde peut donc être rendue conforme à son modèle théorique. Ses caractéristiques sont prévisibles avec sûreté. Ceci n'est pas toujours le cas avec la réalisation d'un système de lentilles quadripolaires (avec ou sans fer) qui nécessite de nombreux enroulements à géométrie plus compliquée. D'autre part, la symétrie azimutale pour des lentilles quadripolaires n'est pas réelle même si l'on considère comme de Vries⁴¹ un système de 3 lentilles ayant la propriété d'avoir des angles d'acceptance $\theta_x = \theta_y = 10^\circ$ égaux dans les 2 plans magnétiques CDC et DCD. La symétrie azimutale serait presque assurée dans ce dernier cas, si l'on pouvait considérer les 2 mouvements en x et y découplés, ce qui n'est probablement pas le cas pour des ouvertures aussi importantes. De plus, il n'est pas clair que pour des particules dont le $(B\rho)$ diffère de $(B\rho)_{opt}$ les angles d'acceptance (inférieurs à 10.8°) restent toujours égaux dans les 2 plans X et Y. Le solénoïde en revanche assure automatiquement la symétrie azimutale pour n'importe quelle trajectoire.

b - le réglage d'un solénoïde doit être simple, car il ne met en jeu qu'un seul courant, alors que l'utilisation d'un triplet de lentilles quadrupolaires à "symétrie axiale" nécessite le réglage de 3 courants indépendants, et la construction de 3 lentilles différentes (influence sur le coût).

c - les aberrations géométriques d'un solénoïde sont plus faibles que celles d'un système de 3 lentilles (calculs effectués à M.S.U.⁵).

2) Caractéristiques proposées.

A titre d'exemple, nous avons fixé un certain nombre de caractéristiques que devraient avoir un solénoïde, fonctionnant dans le mode symétrique. De ces caractéristiques découlent un projet calculé dans les hypothèses suivantes :

a - on a intérêt à rapprocher au maximum le point objet (c-a-d la cible) de l'entrée du solénoïde pour obtenir l'angle solide maximum. Néanmoins, pour des raisons d'encombrement (présence d'une chambre objet, de système de détection associés), nous avons fixé cette distance à 60 cm.

b - la rigidité magnétique maximum que nous avons considérée a été fixée à 1,5 Txm ce qui correspond par exemple à des ions de Fe^{20+} de 700 MeV environ.

c - nous avons fixé, quelque peu arbitrairement un angle d'acceptance maximum de 10° , ce qui correspond à un angle solide de 100 msr, et ceci pour des particules ne présentant pas de variation cinématique de l'énergie avec l'angle d'émission.

d - les calculs ont été menés dans le cadre d'un modèle simplifié

- nous avons négligé l'épaisseur du bobinage du solénoïde.
- absence de fer autour du solénoïde.
- les composantes $B_r(r,z)$ et $B_z(r,z)$ du champ ont été calculées à partir du champ sur l'axe (voir appendice) par un développement limité au 3e ordre en r pour B_r et du 4e ordre pour B_z .

- on a imposé que les trajectoires soient incluses dans un cylindre de diamètre égal à 85 % de celui du bobinage.

e - le calcul a été effectué pour un seul solénoïde fonctionnant dans le mode objet-image symétrique, pour lequel le grandissement est de 1.

Ces conditions sont satisfaites pour divers jeux de paramètres laissant $\bar{B}^2 L$ grosso modo constant (dans l'hypothèse très simplifiée de la lentille mince). Les calculs que nous avons effectués sont des calculs de trajectoires exacts, prenant donc en compte les aberrations dans le cadre des hypothèses énoncées ci-dessus.

3) Résultats.

3.1. Géométries envisageables.

Trois solutions sont données dans le tableau ci-dessous.

($B_0 = 1.5 \text{ Tm}$, distance cible = 80 cm, $\theta_{\text{max}} = 10^\circ$)

solénoïdes → caractéristiques	1	2	3
longueur du solénoïde (cm)	100	150	200
diamètre du bobinage (cm)	18	21	24
champ max au centre (Tesla)	5,6	4,10	3,3
diamètre de l'élongation min des trajectoires pour $\theta \leq 10^\circ$ (en mm)	8,5	8,1	7,9

Les aberrations géométriques obtenues sont sensiblement plus faibles qu'avec un système de lentilles quadrupolaires.

3.2. Bande passante en (B_0)

Plaçant au point image un détecteur circulaire et limitant les trajectoires à 10° , on peut aussi obtenir le pouvoir de transmission du solénoïde en fonction de la rigidité magnétique des particules.

La largeur de la bande passante en Bp augmente avec le diamètre du détecteur circulaire. Elle est de $\pm 3,5 \%$ pour un détecteur de 450 mm^2 (largeur à mi-hauteur soit 50 msr) et de $\pm 6 \%$ pour un détecteur de 1200 mm^2 (on sait faire actuellement des barrières de surface de grandes dimensions).

On peut également réduire la bande passante en diminuant le diamètre du détecteur sans pour autant perdre de l'angle solide. Si on veut par contre définir rigoureusement la bande passante, on est obligé de placer un disque obturateur à l'entrée du solénoïde, donc de perdre de l'angle solide. A titre d'exemple, on peut accepter des particules dans une bande passante à coupure franche de $\pm 1,5 \%$ en (Bp), pour un détecteur de 76 mm^2 , en plaçant un disque à l'entrée qui ne laisse que 50 msr, valeur déjà assez confortable.

En conclusion, si on utilise un détecteur circulaire, au plan image, on peut envisager deux types de fonctionnement :

- un avec large bande passante donc grand détecteur, pour des expériences où les problèmes d'identification ne se posent pas (essentiellement ions légers) et où l'on souhaite observer simultanément une grande zone d'excitation (par exemple pour des expériences de coïncidences).

- un avec une bande passante étroite, avec coupure franche, pour des expériences nécessitant soit un rejet total du pic élastique, soit une identification (dans ce cas, un télescope $E \times \Delta E$ peut être utilisé en raison du petit diamètre requis dans ce cas de figure).

4) Autres géométries.

Au lieu d'utiliser un seul solénoïde dans le mode symétrique, on peut envisager⁵⁾ deux solénoïdes séparés, la cible étant placée au foyer objet du premier et la détection s'effectuant au foyer image du second.

D'après des calculs effectués à M.S.U.⁵⁾ il apparaît, toute chose égale par ailleurs (angle solide, distance objet, géométrie des solénoïdes) qu'on réduise notablement la dimension de la tâche de point image d'un facteur deux environ. Dans ce cas, on diminue également le champ dans chacun des bobinages, encore que cette diminution ne soit que d'un facteur 1.6 (au

lieu de 2). Outre cette propriété, les avantages d'utiliser 2 solénoïdes sont les suivants :

- possibilité d'un point de focalisation intermédiaire, pour des mesures de temps de vol utilisant des galettes microcanaux,
- diminution des fluctuations relatives des temps de vol, liées à la grande ouverture angulaire, ainsi qu'augmentation de ce temps de vol nécessaire pour des questions d'identification (le signal start est donné alors soit par un rayonnement associé dans des expériences de coïncidence, soit encore par l'éventuelle structure en temps du faisceau de l'accélérateur).
- probablement meilleure séparation en E_p (à cause de la zone libre entre les 2 solénoïdes). Ce dernier point reste à préciser par des calculs. Cette propriété serait intéressante pour l'élimination des élastiques du faisceau, notamment lorsque l'on règle les solénoïdes pour focaliser des particules de (E_p) inférieur à celui du faisceau.

D - EVALUATION APPROXIMATIVE DU PROJET.

L'évaluation approximative de ce projet est basée sur la possibilité de sa réalisation par l'I.P.N. avec le concours éventuel du service de mesures magnétiques de Saclay (en ce qui concerne la partie supra). La partie cryogénie pourrait être étudiée par le service du froid de M. BÜHLER. Une première estimation peut être faite à partir du coût du solénoïde de la source d'ions Criebis pour saturne, réalisée précisément par l'IPN et la CEA.

Ce solénoïde ($L = 150$ cm, $\phi = 35$ cm, $B = 3T$) est évalué à une somme de l'ordre de 0,35 MF se décomposant en : - fil : 0,15 MF
- cryogénie + mécanique : 0,2 MF.

Le projet d'un solénoïde dans le cas de figure n°2 pourrait être de l'ordre de 0,4 à 0,5 MF.

Un crédit d'étude de l'ordre de 70 kF pourrait servir à réaliser les tâches suivantes dans le courant de l'année 1978 :

- 1) Etude du projet dans sa configuration finale (calculs de trajectoires avec un solénoïde réel, entouré de fer -optimisation de la forme du cylindre sur lequel s'appuie le solénoïde- recherche d'un fonctionnement à $B_p < B_0$ (faisceau) (important pour les processus quasi-élastiques ou de fusion).
- 2) Réaliser des plans pour l'exécution (mécanique de soutien, étude du déplacement angulaire du système, étude du cryostat, de l'alimentation en hélium liquide, de l'alimentation électrique, des systèmes de sécurité).
- 3) Etude d'un système de détection à localisation permettant la reconstitution des trajectoires (information sur l'angle d'émission et sur la rigidité magnétique de la particule). Un tel dispositif serait très utile dans la mesure où il permettrait à la fois l'identification et l'utilisation d'un grand angle solide.
- 4) Etude de la possibilité d'utiliser le solénoïde pour le transfert d'activité, et les implications techniques d'une telle option.

APPENDICE

EQUATIONS DU MOUVEMENT D'UNE PARTICULE DANS UN CHAMP MAGNETIQUE A SYMETRIE AZIMUTALE

Nous rappelons ici brièvement la structure des trajectoires découlant de l'équation du mouvement des particules.

1 - STRUCTURE DU CHAMP MAGNETIQUE.

On utilise naturellement les coordonnées cylindriques (r, θ, z) en prenant l'axe Oz comme axe de symétrie. Le champ \vec{B} a deux composantes $B_z(r, z)$ et $B_r(r, z)$, cette dernière s'annulant sur l'axe. Ces composantes dérivent d'un potentiel scalaire φ (dans la zone intérieure ou extérieure du bobinage où la densité de courant est nulle)

$$B_z = \frac{\partial \varphi}{\partial z} \quad \text{et} \quad B_r = \frac{\partial \varphi}{\partial r} \quad \text{où} \quad \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) = 0$$

Connaissant le champ $B_z(0, z) = B(z)$ sur l'axe, on peut obtenir B_z et B_r hors de l'axe par un développement limité, qui satisfait aux équations de Maxwell ci-dessus :

$$B_z(r, z) = B(z) - \frac{r^2}{4} B'' + \dots + \frac{(-)^n}{(n!)^2} \left(\frac{r}{2}\right)^{2n} B^{(2n)}$$

$$B_r(r, z) = -\frac{r}{2} B' + \dots + \frac{(-)^n}{n!(n-1)!} \left(\frac{r}{2}\right)^{2n-1} B^{(2n-1)}$$

2 - EQUATIONS DU MOUVEMENT

En projetant l'équation du mouvement $\vec{f} = m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = e \vec{v} \wedge \vec{B}$ en coordonnées cylindriques on obtient :

$$r'' - r\theta'^2 = \frac{e}{m} r \theta' B_z \tag{1}$$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dt} (r^2 \theta') = \frac{e}{m} (z' B_r - r' B_z) \tag{2}$$

$$z'' = -\frac{e}{m} r \theta' B_r \tag{3}$$

On a l'intégrale première usuelle $v_D^2 = r'^2 + (r\theta')^2 + z'^2$ et une autre découlant de la symétrie azimutale du champ (théorème de Bosh) :

$$r^2 \theta' = - \frac{e}{m} \int_0^r r B_z(r, z) dr + C \quad (4)$$

Cette relation montre la nature focalisante d'un tel type de champ. En effet pour une trajectoire quittant l'axe ($t = 0$ $r = 0$) on a

$$C = 0 \text{ d'où } r^2 \theta' = - \frac{e}{m} \int_0^r r B_z(r, z) dr \quad (5)$$

A partir du moment où B_z devient nul, $\theta' = 0$, c-a-d que la trajectoire qui est devenue une droite raccourpera nécessairement l'axe (en un point réel ou virtuel). En d'autres termes l'action du solénoïde sera de faire tourner la trajectoire (eq. 4) tout en l'incurvant de manière à refocaliser sur l'axe. Tout ce qui importe donc c'est de résoudre l'équation différentielle donnant l'élongation $r(z)$ en fonction de la distance sur l'axe. En éliminant le temps dans les équations du mouvement, on aboutit à l'équation suivante :

$$\frac{v_0^2 - r^2 \theta'^2}{1 + \left(\frac{dr}{dz}\right)^2} - \frac{d^2 r}{dz^2} - \frac{e}{m} B_r r \theta' \frac{dr}{dz} - r \theta'^2 - \frac{e}{m} B_z r \theta' = 0 \quad (6)$$

où θ' est donné par la th. de Bosch (éq. 5).

3 - APPROXIMATION DE GAUSS :

Dans cette approximation, on ne considère que des rayons paraxiaux; on peut alors développer B_r et B_z au 1er ordre :

$$B_z(r, z) \approx B(z) \\ B_r(r, z) = 0 \quad \frac{dr}{dz} \ll 1$$

Les équations (5 et 6) se simplifient et donnent : $\theta' = - \frac{e}{2m} B(z)$

$$\frac{d^2 r}{dz^2} = - \left[\frac{B(z)}{2(B_0)} \right]^2 r :$$

Dans cette approximation le système est toujours focalisant (contrairement par ex. à une lentille quadrupolaire). A partir de cette relation on développe un modèle à lentille mince où l'on détermine plans principaux, foyers, distance focale. Pour plus de détail on se référera à l'ouvrage de Grivet⁷].

BIBLIOGRAPHIE

- 1 - A.E. LITHERLAND et A.J. FERGUSON, Can. J. Phys. 39 (1961) 788
- 2 - R. KLANK et R.A. RISTEN, International Conference on Radioactivity in Nuclear spectroscopy, Nashville 1964.
- 3 - A.H. JAFFEY et Tat KHDE, Nucl. Inst. and Meth. 121 (1974) 413.
- 4 - R.M. DE VRIES et D. ELLMORE, "A Superconducting quadrupole collector with large solid angle for high energy heavy-ion experiments" UR - NSRL - 138.
- 5 - E. KASHY et J. NOLEN, communication privée et rapports internes de Michigan State University.
- 6 - R.M. DE VRIES et D. ELLMORE, "A proposal to build a superconducting heavy-ion spectrometer with very large solid angle" UR - NSRL - 142.
- 7 - P. GRIVET - Optique électronique (Bordas - 1955).

