Le synchro-cyclotron de 157 MeV

C. Bergamaschi, J.C. Brun, A. Cabrespine, R. Gayraud, J. Génin, H. Langevin-Joliot, Nicolas C.M. Marty, A. Michalowicz, P. Radvanyi, M. Riou, et al.

► To cite this version:

C. Bergamaschi, J.C. Brun, A. Cabrespine, R. Gayraud, J. Génin, et al.. Le synchro-cyclotron de 157 MeV. J. Phys. Radium, 1960, 21 (5), pp.305-314. 10.1051/jphysrad:01960002105030500 . jpa-00236244

HAL Id: jpa-00236244

<https://hal.science/jpa-00236244>

Submitted on 1 Jan 1960

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.

LE SYNCHRO-CYCLOTRON DE 157 MeV

Par MM. C. BERGAMASCHI, J. C. BRUN, A. CABRESPINE, R. GAYRAUD, M^{mes} J. GÉNIN, H. LANGEVIN-JOLIOT et N. MARTY, MM. A. MICHALOWICZ, P. RADVANYI, M. RIOU, J. TEILLAC et C. VICTOR,

Laboratoire de Physique Nucléaire, Faculté des Sciences, Orsay.

Résumé. — Après avoir rappelé les caractéristiques générales du Synchrocyclotron de la Faculté des Sciences (157 MeV en protons) et de son installation, on expose les principales propriétés du faisceau externe de protons (focalisation, définition en énergie, structure en temps avec et sans fréquence de modulation élevée en fin d'accélération, mesures d'intensité par chambre d'ionisation et cylindre de Faraday) et du faisceau de neutrons (spectre en énergie, intensité). On expose également les caractéristiques d'un analyseur magnétique de particules secondaires en construction. On résume enfin les principales utilisations de l'appareil.

Abstract. — The general characteristics of the Synchrocyclotron de la Faculté des Sciences (157 MeV protons) and its setting up are described. The main properties of the external proton beam (focusing, energy definition, time structure with or without additional high modulation frequency at the end of acceleration, intensity measurements with ionization chamber and Faraday cup) and of the neutron beam (energy spectrum, intensity) are given. The characteristics of a magnetic analyser of secondary particles under construction and a summary of the main uses of the machine are also given.

I. Historique. — La construction d'un synchrocyclotron par la Société Philips (Eindhoven) pour la Faculté des Sciences de Paris fut décidée en 1954 à la demande d'Irène Joliot-Curie. L'énergie fixée d'abord à 100 MeV fut ensuite portée à 150 MeV pour permettre la production de protons polarisés par diffusion. L'implantation fut décidée à Orsay sur les terrains que la Faculté venait d'y acquérir. Les travaux de construction débutèrent en 1956 et ceux de montage en 1957 sous la direction de Frédéric Joliot-Curie. Le premier essai de fonctionnement en faisceau interne fut effectué le 4 juin 1958 et on obtint rapidement des intensités élevées, jusqu'à 20 μ A en régime de pointe. En décembre 1958, le faisceau était extrait par régénérateur et canal magnétiques. Le synchrocyclotron a été utilisé depuis pour les irradiations internes et externes avec un régime de fonctionnement très satisfaisant : il fonctionne actuellement en régime continu une centaine d'heures par semaine. De plus un certain nombre de modifications ont pu être introduites, notamment un dispositif H. F. à fréquence de modulation élevée agissant en fin d'accélération pour provoquer une meilleure distribution du faisceau dans le temps.

II. Caractéristiques générales. — Nous résumerons brièvement les caractéristiques techniques de l'appareil qui seront publiées par ailleurs [1].

1) L'ÉLECTRO-AIMANT, d'un poids de 650 tonnes, à des pôles de diamètre 2,80 m avec un entrefer de 30 à 40 cm. Il est alimenté par des bobines en aluminium refroidi par circulation d'eau

(790 000 A. T.). L'induction est de 1,5702 Wb/m² au rayon 120 cm.

2) GÉNÉRATEUR H. F. — C'est un auto-oscillateur à fréquence modulée à 450 périodes par seconde. La modulation de fréquence est obtenue à

FIG. 1. — Générateur HF du synchrocyclotron.

l'aide d'un condensateur tournant, elle est pratiquement sinusoïdale. L'oscillateur est du type « grille à la masse », son schéma de principe est donné figure 1. Le circuit oscillant de sortie est une ligne demi-onde terminée d'un côté par le conden-

téristiques différentes. La bande de fréquences couverte s'étend alors de 11 à 12,5 MHz.

La hauteur du Dee est de 20 cm au centre et de 10 cm sur le bord : cette hauteur relativement élevée contribue à assurer une bonne intensité de faisceau puisque les pertes par oscillations verticales sont réduites.

3) SOURCES D'IONS. — La plus fréquemment utilisée est une source à cathode froide dans laquelle on établit un arc par une alimentation de 1 000 V-1 A entre une anode portée à la masse sur le pôle inférieur et une pointe de tungstène au travers d'un canal de diamètre 4 mm par lequel est admis le gaz. C'est cette source qui est utilisée pour les intensités du faisceau interne de quelques μA .

On dispose également d'une source à cathode chaude à filament de tungstène chauffé par un courant continu de 200 A. Elle permet une meilleure stabilité pour les faibles intensités ($10^{-2} \mu\text{A}$).

Une alimentation pulsée pour l'alimentation de l'arc de la source à pointe a été étudiée et mise au point au Laboratoire. Son schéma de principe est indiqué (fig. 2 et 3). L'étage de puissance est réalisé avec 3 lampes de type 6CD6 en parallèle fonctionnant avec une tension anodique de 2 500 volts.

Les réglages sont les suivants : 1° Phase de l'impulsion par rapport à la modulation de fréquence. 2° Largeur de l'impulsion.

Les intensités de faisceau obtenues atteignent et dépassent celles correspondant à l'arc permanent maximum prévu sur la machine (1 A). L'intensité maximum est atteinte pour une impulsion de 100 μs .

La puissance moyenne appliquée à la pointe étant beaucoup plus faible que dans le cas de l'arc permanent, nous espérons que la durée de vie de la pointe sera beaucoup plus grande. Ce régime de fonctionnement présente aussi de gros avantages au point de vue de la souplesse de réglage et de la stabilité de l'intensité du faisceau.

Ce dispositif est actuellement employé en permanence aussi bien pour les irradiations par faisceau interne que pour les expériences à l'aide du faisceau sorti. La durée de vie de cette source ne peut pas encore être estimée.

Des pointes pour lesquelles le travail de sortie des électrons est plus faible que pour le tungstène seront également expérimentées ainsi que des sources de type « Keller ».

4) CHAMBRE D'ACCÉLÉRATION ET EXTRACTION. — La figure 4 représente le plan de la chambre d'accélération avec ses différents organes. Les irradiations internes peuvent être effectuées grâce à un porte-cible (n°1) permettant le refroidissement par eau de la cible (dans laquelle la puissance dissipée peut atteindre 1 kW) et son positionnement entre les rayons 120 et 55 cm (soit entre 157 et 37 MeV).

La surface irradiée au rayon 120 cm est d'environ $0,2 \times 3 \text{ cm}^2$. Le porte-cible peut servir également à la détermination de l'intensité du faisceau interne mesurée sur une cible de cuivre de 3 cm

FIG. 4. — Chambre d'accélération.

d'épaisseur, et à la production de neutrons avec une cible de béryllium. Un porte-cible (n°2) permet les irradiations longues au voisinage du diaphragme protégeant le canal anti-magnétique assurant la sortie des protons en utilisant les protons perdus lors de l'extraction. Celle-ci est assurée par un régénérateur magnétique et un canal anti-magnétique dont l'entrée se trouve au rayon 132 cm. L'extraction par le régénérateur correspond à un rayon de courbure moyen de 120 cm, soit à des protons d'énergie 157 MeV. Le rendement d'extraction varie suivant l'intensité du faisceau entre 5 et 12 %. L'extraction du faisceau a été calculée par N. Verster.

5) DISPOSITION GÉNÉRALE. — La figure 5 représente l'ensemble de l'installation dans la salle du synchro-cyclotron et la salle du faisceau.

Le faisceau externe est focalisé, puis défléchi de façon à assurer deux directions de travail dans la salle du faisceau. Celle-ci est séparée de la salle du synchro-cyclotron par un mur en blocs mobiles en béton lourd (densité 5), d'épaisseur 1,5 m ou plus. Les deux salles sont séparées du reste du bâtiment par des murs fixes de béton ordinaire, d'épaisseur 1 m ou 1,5 m renforcés par endroit par des blocs mobiles.

Les liaisons électriques entre la salle du faisceau et la salle du synchro-cyclotron d'une part et la

salle d'électronique ont été établies de façon à réduire les temps d'immobilisation dus au passage d'une équipe à l'autre ou à d'éventuelles pannes.

Les liaisons sont effectuées au moyen de 5 types de câbles : coaxiaux 75 Ω et 150 Ω pour les signaux, coaxial 50 Ω pour les signaux ou les hautes-tensions, fil 5 conducteurs et 12 conducteurs. Ces

FIG. 5. — Ensemble de l'installation.

câbles aboutissent à 13 tableaux dans les salles du synchro-cyclotron et du faisceau et à un tableau unique dans la salle d'électronique. Celle-ci est équipée d'une part d'appareils propres à chaque équipe (alimentations et sélecteurs à coïncidence, amplificateurs pour les télescopes à scintillateurs) et d'autre part, d'appareils communs (appareils de mesure de l'intensité du faisceau et de télécommande, sélecteurs d'amplitude à 256, 50 et 20 canaux).

III. Le faisceau externe de protons et ses caractéristiques. — 1) **FORME DU FAISCEAU.** — L'image du faisceau à la sortie du synchro-cyclotron a été obtenue par autoradiogramme de l'activité d'une feuille d'aluminium (fig. 6). Le faisceau présente la forme de deux croissants de lune d'intensité sensiblement égale et la divergence des parties correspondantes du faisceau rend impossible la focalisa-

tion de l'ensemble par la paire de lentilles quadrupolaires dans la disposition actuelle.

Les essais pour augmenter l'intensité d'un des croissants par déplacement du plan magnétique médian du synchro-cyclotron en déséquilibrant les bobines ont été négatifs car l'intensité totale du

FIG. 6. — Autoradiogramme du faisceau de protons à la sortie du canal magnétique (faisceau vers l'observateur).

faisceau diminue considérablement. Nous avons finalement masqué le croissant supérieur et rendu horizontal le faisceau restant à l'aide d'un petit aimant défecteur.

Après la focalisation, le faisceau est défléchi dans le plan horizontal par un aimant défecteur dont la déflexion maximum est $\pm 23^\circ$ et les déflexions utilisées -10° et $+18^\circ$, puis envoyé à travers un mur de béton lourd et sous tuyau vidé dans la salle du faisceau où il est utilisé à une distance de la sortie voisine de 10 m. Le réglage optimum des lentilles quadrupolaires permet d'obtenir à l'entrée de la salle du faisceau une section de 1,8 cm $\times$ 3,5 à 4 cm (hauteur). Pour réduire les dimensions sur les cibles à environ 1,8 $\times$ 3 cm², nous avons dû placer des diaphragmes avant le mur de protection, au prix d'une perte d'intensité admissible dans les expériences actuelles. Des lentilles quadrupolaires de focalisation vont être installées après le mur de protection pour obtenir de meilleurs résultats.

2) **ÉNERGIE ET DISPERSION EN ÉNERGIE.** — Nous avons vu que l'énergie des protons calculés d'après la valeur du champ magnétique est de 157 MeV. Si l'on tient compte de l'absorption intermédiaire, cette énergie est ramenée à 155 MeV sur les cibles d'expérience.

A titre de vérification, l'énergie des protons a été mesurée expérimentalement par la méthode d'absorption. La figure 7 donne le dispositif expérimental schématisé. Un télescope composé de trois scintillateurs plastiques alignés est placé dans le faisceau fonctionnant à régime réduit. Les scintillateurs 1 et 2 servant de moniteur (coïncidences doubles), on compte le nombre de protons traversant un écran de cuivre placé entre 2 et 3 (coïncidences triples) en fonction de l'épaisseur de l'écran. La figure 8 nous donne cette courbe

d'absorption. Le parcours moyen ainsi trouvé permet de remonter, en utilisant les courbes parcours-énergie, à une énergie moyenne de $147,8 \pm 0,4$ MeV, ce qui correspond à une énergie à la sortie du

ption expérimentale et le calcul des fluctuations de parcours nous a conduit à une dispersion naturelle en énergie :

$$\Delta E \simeq 3 \text{ MeV} \text{ soit } \Delta E/E \simeq 2 \text{ \%.}$$

Cette dispersion provient essentiellement de l'amplitude des oscillations radiales du faisceau interne après réduction par le système d'extraction magnétique. Suivant une suggestion de N. Verster, nous avons cherché à la réduire en plaçant sur le porte-cible n° 1, c'est-à-dire assez loin du nœud des trajectoires régénérées, un diaphragme interne de cuivre, d'épaisseur 3 cm qui réduit l'intensité

FIG. 7. — Télescope à protons.

FIG. 8. — Courbe d'absorption du faisceau de protons.

tuyau vidé de $154,1 \pm 0,5$ MeV, compatible avec la valeur calculée.

L'analyse de la pente de la courbe en fin de parcours permet également de déduire un ordre de grandeur de la dispersion en énergie des protons du faisceau. La dispersion de parcours observée autour du parcours moyen est due en effet à deux causes : 1) Dispersion en énergie des protons incidents. 2) Pour une énergie fixe, les fluctuations de parcours dans l'absorbant (straggling). Ces fluctuations de parcours peuvent être estimées théoriquement. L'analyse de la courbe d'absor-

FIG. 9. — Spectre des protons de 155 MeV diffusés à 30° par le carbone avec et sans diaphragme interne.

du faisceau externe de moitié. La figure 9 indique les spectres en énergie des protons diffusés à 30° élastiquement et inélastiquement (niveaux de 4,4 et 9,6 MeV) par le carbone obtenus avec le télescope décrit dans la communication de Garron et al. avec et sans diaphragme interne. On voit nettement en comparant les courbes l'effet de la diminution de la dispersion du faisceau primaire par le diaphragme interne, amenée à une valeur négligeable par rapport à la résolution propre du télescope comme le montre le fait qu'aucune amélioration n'apparaît en plaçant le diaphragme interne à un rayon inférieur. La résolution globale passe ainsi de 3,5 % à 1,8 % à 155 MeV ce qui correspondrait à une dispersion en énergie du faisceau sans diaphragme

de l'ordre de 4,5 MeV, voisine de la valeur déterminée plus haut. En diminuant par cette méthode la dispersion en énergie du faisceau, on diminue également la durée de chaque impulsion.

3) **STRUCTURE EN TEMPS.** — Les impulsions du faisceau sorti ont une durée de 25 μ s environ toutes les 2 200 μ s.

Les conditions d'utilisation du faisceau par les appareils de mesure de particules sont mauvaises à cause du faible temps d'occupation (1 %). Cela conduit à des expériences de très longue durée et rend même très délicates certaines expériences par coïncidences. Un dispositif permettant de s'affranchir de cet inconvénient a été réalisé au laboratoire.

Le principe de la méthode employée, d'après une suggestion de R. Keller [2] est le suivant. Le programme H. F. principal est supprimé par blocage de l'autooscillation, juste avant que l'impulsion ne sorte du synchro-cyclotron et il est remplacé par un programme appliqué sur une électrode auxiliaire (voir fig. 4), et modulé à fréquence élevée, ce qui permet de faire sortir des impulsions réparties sur toute la période de modulation du programme principal. Le fonctionnement peut être synchrocyclotronique à fréquence élevée ou stochastique. Les premiers essais ayant été très satisfaisants, ce dispositif a été immédiatement mis en fonctionnement permanent et permet des taux de comptage au moins dix fois plus élevés qu'auparavant.

Le générateur H. F. établissant le programme auxiliaire est modulé en fréquence de 20,5 à 21 MHz et la puissance d'alimentation pour le rendement optimum est d'environ 4 kW. (Voir plus loin la communication de A. Cabrespine.)

4) **MESURE DE L'INTENSITÉ DU FAISCEAU.** — Les appareils servant à mesurer le flux de protons placés dans le faisceau, doivent être conçus de façon à ne produire qu'un minimum de diffusion et ne changer que peu l'énergie des particules. Dans ce but on a construit trois chambres d'ionisation, une chambre à électrons secondaires, un cylindre de Faraday utilisé pour l'étalonnage absolu des appareils précédents, ainsi que deux systèmes intégrateurs des courants collectés.

1° **Circuits intégrateurs.** — La figure 10 donne le principe des circuits intégrateurs utilisés. Le courant collecté charge une capacité C_1 . Lorsque le potentiel sur C_1 atteint une valeur v fixée, un circuit trigger est déclenché ; un coup est inscrit sur un numérateur et un relais envoie une charge $-C_2 V = C_1 v$ sur l'entrée ; le système revient alors à l'état initial. En choisissant $V = 100 v$ et $C_1 = 100 C_2$, on a pratiquement pour la charge totale arrivée sur l'intégrateur : $Q = nC_2 V$, n étant le nombre de coups comptés. Ceci est indépendant des variations possibles du seuil de déclenchement

du trigger ou des variations du gain de l'amplificateur à courant continu qui sert d'adaptateur d'impédance, et qui, monté en contre-réaction totale assure par ailleurs une très grande stabilité

FIG. 10. — Circuit intégrateur.

de l'ensemble. La précision des mesures ultérieures dépendra donc essentiellement de la précision avec laquelle sont connues C_2 et V . V a été étalonné à 1 ‰ ; quant aux valeurs de C_2 (l'appareil comporte plusieurs sensibilités) elles ont été mesurées en intégrant à l'aide de l'appareil des courants connus avec précision (obtenus à l'aide de piles et de résistances préalablement étalonnées). L'ensemble intégrateur a ainsi été étalonné à 5 ‰ pour des courants allant jusqu'à 10^{-10} A. Toutes les mesures se sont montrées reproductibles et fidèles à cette précision après 6 mois de fonctionnement.

2° **Cylindre de Faraday.** — La figure 11 donne le schéma du cylindre de Faraday. Le cylindre creux en laiton absorbant complètement les protons est placé dans une enceinte vide (10^{-4} mm de Hg). Un champ magnétique transversal de l'ordre de 200 gauss, créé à l'aide de petits aimants permanents, ramène sur le cylindre les électrons qui

FIG. 11. — Cage de Faraday.

pourraient s'en échapper et empêche les électrons créés sur la fenêtre d'entrée d'atteindre le cylindre. Les dimensions et la disposition géométrique sont d'ailleurs prévues de façon que le nombre d'électrons pouvant s'échapper ou pouvant de l'entrée atteindre le cylindre, soit inférieur à 2 ‰ du

nombre de charges apportées par les protons. En plus une électrode mince en aluminium, permet de vérifier, en faisant varier la polarité de la tension appliquée, que le courant d'ionisation résiduel est négligeable. Ainsi la charge mesurée, à la précision de l'intégrateur, est directement reliée au nombre de protons N absorbés par la relation : $Q = Ne^+$, e^+ étant la charge élémentaire.

3° Chambres d'ionisation. — Le schéma des chambres d'ionisation est donné sur la figure 12. Les anneaux de garde ne sont pas représentés.

FIG. 12. — Chambre d'ionisation.

Chaque chambre est en fait constituée par 4 chambres d'ionisation en parallèle de 1,5 cm d'épaisseur chacune. Les électrodes sont en aluminium de 0,01 mm d'épaisseur. Les fenêtres d'entrée sont en aluminium de 0,1 mm. Les chambres sont remplies d'air sec à une légère surpression (de 50 à 100 cm d'eau au-dessus de la pression atmosphérique). Elles sont parfaitement étanches. Avec une tension de 2 000 volts entre les électrodes, on peut ainsi mesurer des courants allant de 10^{-10} jusqu'à 10^{-6} ampères sans saturation.

Tenant compte de la perte d'énergie calculée des protons dans l'épaisseur utile de la chambre ($E = 38,3$ keV) de l'énergie nécessaire pour créer une paire d'ions dans l'air ($\epsilon = 35,5$ eV) le gain prévu était pour la première chambre :

$$G = E/\epsilon = 1\,078 \pm 50.$$

4° Chambre à électrons secondaires. — La chambre à électrons secondaires est identique au point de vue construction à la chambre d'ionisation. Elle est prévue pour mesurer des courants de protons correspondant dans la chambre d'ionisation à des courants supérieurs à 10^{-6} ampères, pour lesquels la saturation n'est plus assurée. L'enceinte de la chambre est vidée (10^{-4} mm de Hg). Dans ce cas les charges collectées proviennent des électrons éjectés par les protons des fenêtres d'aluminium. Le courant doit être d'autant plus grand que le nombre de fenêtres est important. Une faible tension v de l'ordre de 100 volts entre les électrodes est suffisante pour assurer la collecte des charges. Le gain de cette chambre est difficilement calculable mais doit être inférieur à 1, ce qui la destine à la détection des courants de protons très intenses.

5° Étalonnage. — L'étalonnage des différentes chambres a été effectué par rapport au cylindre de Faraday de la façon suivante : la chambre d'ionisation (ou la chambre à électrons secondaires) est placée dans le faisceau juste devant la cage de Faraday. Les courants collectés dans les deux détecteurs sont envoyés simultanément sur deux intégrateurs étalonnés et l'on compare les charges mesurées. A titre de contrôle, la chambre à électrons secondaires est étalonnée par rapport à la chambre d'ionisation de la même façon. Les mesures sont faites à divers flux de protons. Toutes les mesures ont été concordantes. Les résultats ont été les suivants :

Première chambre d'ionisation : $G = 1\,047 \pm 8$
(en accord avec le calcul)

Chambre à électrons secondaires :

$$G = 0,234 \pm 0,003.$$

Dans la mesure d'un flux de protons, à cette imprécision s'ajoute naturellement l'imprécision propre à chaque mesure, dont est affecté l'intégrateur. Les mesures de courants de protons peuvent donc finalement être faites à la chambre d'ionisation à une précision de 1,5 % dans tout le domaine des courants utilisés.

Ces mesures ont été reprises 6 mois après le premier étalonnage et ont donné un résultat parfaitement concordant. Pour les deux autres chambres d'ionisation en utilisation, les gains sont légèrement différents (+ 3 % et + 5 %) correspondant aux pressions différentes de gaz dans ces chambres.

IV. Faisceau de neutrons. Moniteurs et spectre.

— On obtient un faisceau de neutrons de grande énergie en canalisant les neutrons émis à 0° par une cible de béryllium bombardée par le faisceau interne de protons. La distribution en énergie de ces protons présente un pic important un peu en dessous de l'énergie des protons incidents [3].

Dans notre cas, on fait tourner les protons en

sens inverse de celui utilisé pour l'extraction du faisceau de protons en inversant le champ magnétique. Le fonctionnement, dans ces conditions, est satisfaisant ; la valeur du champ sur lequel se fait la régulation est cependant un peu plus faible que dans le cas ordinaire.

Nous avons utilisé jusqu'ici une cible de Be de 10 mm d'épaisseur (8,5 MeV pour les protons incidents) et de hauteur 30 mm, placée au rayon 119 cm, ce qui correspond à une énergie des protons de 152,7 MeV.

La canalisation utilisée est encore assez simple et sera améliorée par la suite. Elle comporte deux cylindres de fonte de diamètre 19,4 cm, de longueur 50 cm chacun placés dans des tubes d'acier noyés dans des blocs de béton lourd constituant le mur de séparation entre la salle du synchrocyclotron et la salle du faisceau. L'épaisseur du mur dans la direction des neutrons était au minimum de 153 cm. Les cylindres de fonte comportent au centre un trou rectangulaire de section 3×5 cm par lequel passent les neutrons. L'entrée du canaliseur est à environ 526 cm de la cible de Be ; l'axe du canaliseur fait actuellement un angle de $0^{\circ}6$ par rapport à la direction des protons incidents. Quelques blocs de béton supplémentaire ont été ajoutés au voisinage des détecteurs.

Le flux de neutrons a été mesuré en plaçant aux endroits intéressants de petits disques de polystyrène $(CH)_n$ de 1 mm d'épaisseur. On mesure, après une irradiation constante pendant un temps donné, l'activité du carbone 11 (période 20,4 minutes) formé. La section efficace de la réaction de formation $^{12}C(n, 2n)^{11}C$ ne varie pas beaucoup avec l'énergie au-dessus d'un seuil effectif d'environ 22 MeV. Les β^+ de ^{11}C sont comptés avec un compteur à scintillations préalablement étalonné.

Le flux maximum de neutrons ainsi déterminé dans des conditions stables à l'emplacement utilisé pour les premières expériences (138 cm après la sortie du canaliseur) a été trouvé égal à $\sim 2 \cdot 10^6$ neutrons de plus de 22 MeV par seconde et par cm^2 .

Par la même méthode, on a vérifié que la distribution spatiale des neutrons de plus de 22 MeV dans le plan perpendiculaire à l'axe du faisceau correspondait approximativement à l'ombre du canaliseur.

Nous avons utilisé, tout au début, comme moniteurs des compteurs à BF_3 et des compteurs à protons de recul de fabrication RCL. Mais ces compteurs présentent l'inconvénient d'être sensibles non pas aux neutrons de grande énergie utilisés dans les expériences, mais à des neutrons beaucoup moins rapides. Or, le rapport des intensités des neutrons rapides aux neutrons lents peut subir des fluctuations au cours du temps. De plus, les compteurs à BF_3 et à protons de recul doivent être protégés par de grandes quantités de béton pour ne pas être saturés. Il était donc nécessaire de disposer d'un

moniteur à grande énergie pouvant être placé directement dans le faisceau.

C'est pourquoi, M. L. Kowalski a réalisé au laboratoire une chambre à fission à bismuth sur le modèle de celles qui ont été utilisées au Radiation Laboratory de Berkeley. Une telle chambre fonctionne en chambre d'ionisation à impulsions multiplaques, la moitié des électrodes étant couvertes d'un dépôt mince de bismuth. Le bismuth ne subit pratiquement la fission que sous l'action de neutrons (ou de protons) d'énergie supérieure à 50 MeV environ. Un discriminateur de hauteurs d'impulsions permet de compter les fragments de fission beaucoup plus ionisants que les autres particules chargées. Il faut naturellement réduire les effets de l'empilement des impulsions de protons secondaires (beaucoup plus nombreux que les fragments de fission). Ces effets d'empilement seront sans doute beaucoup moins importants pour un fonctionnement du synchrocyclotron avec le dee auxiliaire stochastique, par suite de l'amélioration de la structure en temps du faisceau. La quantité totale de bismuth est de 1,4 g déposée sur une surface totale de $550 cm^2$ ⁽¹⁾.

En utilisant comme moniteur la chambre à

FIG. 13. — Spectre de neutrons du synchrocyclotron E_p 152,7 MeV, cible de Be de 10 mm (8,5 MeV).

fission à bismuth, nous avons fait une détermination préliminaire du spectre d'énergie du faisceau de neutrons obtenu dans les conditions décrites ci-dessus. Avec un télescope de faible ouverture angulaire qui comportait un gros scintillateur CsI(Tl) permettant l'absorption complète des pro-

⁽¹⁾ La chambre à fission à bismuth fera l'objet d'une publication ultérieure.

tons les plus énergiques, nous avons mesuré les spectres d'énergie des protons émis à 16° (laboratoire) par des cibles de polyéthylène $[(CH_2)_n]$ et de carbone placées dans le faisceau de neutrons. Par différence, en tenant compte du fond mesuré en l'absence de cible, on obtient le spectre des protons de recul dus à la diffusion des neutrons sur l'hydrogène. On remonte aux énergies des protons au milieu de la cible et le spectre est corrigé de l'effet des chocs inélastiques des protons dans le gros cristal. Le spectre d'énergie des neutrons (fig. 13) est ensuite déduit de celui des protons, compte tenu de la variation de la section efficace de diffusion n-p à 16° en fonction de l'énergie.

Ce spectre présente un large maximum autour de 143 MeV. Il est vraisemblable que la largeur de ce pic pourra être réduite — du côté des basses énergies — par une meilleure canalisation du faisceau des neutrons [3].

V. Analyseur magnétique. — Un analyseur magnétique des particules chargées secondaires des réactions provoquées par le faisceau externe de protons est en cours de réalisation actuellement ; l'exécution des travaux a été confiée à la S. F. A. C. du Creusot d'après un projet du D^r Mileikowsky (Suède) qui a fait également exécuter les pièces polaires. Cet appareil doit être livré en juillet 1960. Pendant l'arrêt de la machine durant la période de vacances d'été de 1959, des travaux de renforcement et de préparation du sol ont été effectués dans la salle du faisceau en vue de son installation (voir fig. 5).

1) PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DE L'ANALYSEUR. — Le champ magnétique est limité à un secteur de rayon de courbure moyen 170 cm et d'ouverture 120° . Durant la traversée de l'appareil, les particules à analyser sont soumises à une induction magnétique que l'on peut faire varier au moins de 1 700 à 17 000 gauss. Cette dernière valeur correspond à la focalisation de tritons d'énergie 132 MeV. Pour augmenter la dispersion en énergie de l'appareil, le champ magnétique est inhomogène. L'indice caractéristique de cette inhomogénéité est choisi égal à $1/2$ de façon à avoir double focalisation verticale et horizontale. L'angle solide maximum sera $3 \cdot 10^{-4}$ de la sphère totale et la résolution en énergie de 2/1 000 pour une source de quelques mm de large.

L'aimant pèsera 200 tonnes et sera solidaire d'une chambre à réaction de 200 cm de diamètre et 60 cm de hauteur. L'ensemble chambre à réaction et aimant pourra tourner autour d'un axe vertical passant par la cible grâce à un chemin de roulement de 13,60 mètres de diamètre.

L'angle minimum d'analyse des particules secondaires issues de la cible par rapport à la direction des protons incidents sera 6° .

La chambre à réaction dont la réalisation est en cours également et qui doit être livrée en même temps que l'analyseur sera fermée latéralement par une fenêtre mince, elle comportera un système de changement de cibles par télécommande (voir fig. 4).

2) UTILISATION PRÉVUE. — Grâce à la grande résolution de l'appareil, il sera possible de séparer du certain nombre de niveaux excités des noyaux résiduels des réactions nucléaires ; on pourra analyser les particules secondaires depuis les tritons d'au moins 130 MeV jusqu'aux particules de faible énergie et, par ailleurs, séparer les groupes de protons obtenus par diffusion inélastique sur des noyaux variés en vue d'études de polarisation.

VI. Utilisation du synchrocyclotron. — Dès la mise en marche du synchrocyclotron en faisceau interne, en juin 1958, des irradiations de différentes cibles ont été effectuées. La pleine utilisation de la machine (faisceaux interne et externe) a commencé en avril 1959.

A partir de cette date, la machine a tout d'abord fonctionné avec deux équipes de conduite par jour à raison de 60 heures en moyenne par semaine (expériences de physique sur le faisceau 48 h, irradiations 4 h, entretien 8 h).

Après une interruption due à un certain nombre de travaux sur la machine, l'exploitation du synchro-cyclotron est passée en novembre 1959 au régime de 24 h sur 24 (3 équipes de conduite) pendant 5 jours par semaine avec la répartition suivante :

	Expériences de physique sur le faisceau externe (4 équipes de physiciens)	85 h
Moyenne par semaine	Irradiations, représentant en moyenne 6 irradiations ⁽¹⁾	10 h
	Perfectionnements techniques	7 h
	Entretien	9 h

Depuis fin novembre 1959, la première panne nécessitant un arrêt de plus de quelques heures était due à la rupture de l'un des roulements à billes du modulateur, le 5 février.

Actuellement, environ trente physiciens et chimistes effectuent des expériences à l'aide de la machine.

Les recherches entreprises avec le synchrocyclotron portent actuellement, surtout, sur les réactions nucléaires vers 150 MeV. Un proton ou un neutron de cette énergie a justement une longueur d'onde associée de l'ordre de grandeur du rayon d'un noyau léger. Divers processus d'interaction directe — diffusion inélastique, quasi-élastique et pick-up —, l'évaporation des nucléons et

(1) D'autre part, des irradiations s'effectuent en permanence sur une portion non utilisée du faisceau en régime de faisceau externe.

l'émission de photons sont étudiés par l'intermédiaire des spectres d'énergie et des distributions angulaires des particules émises. On se propose d'obtenir ainsi des renseignements sur le mécanisme de ces réactions et sur les différentes caractéristiques de la structure nucléaire.

Certaines expériences sont effectuées sur diverses réactions de spallation et aussi de fission par des méthodes radiochimiques : mesures des sections efficaces en déterminant par leur rayonnement ou par spectrométrie de masse, les quantités d'isotopes radioactifs ou stables formés. Le séparateur d'isotopes, construit au laboratoire par R. Bernas, est très utile pour ce genre d'études.

Des mesures ont été faites également sur les

caractéristiques radioactives de quelques isotopes formés qui se trouvent relativement loin de la zone de stabilité.

Enfin, d'autres expériences ont commencé sur la diffusion nucléon-nucléon, tout d'abord sur la section efficace de diffusion p-p. Des expériences sur la polarisation des nucléons sont en projet, en vue de mesurer certains des coefficients intervenant dans la détermination de la matrice de diffusion. Une source de protons polarisés, basée sur le principe étudié par Keller [4] est en projet au laboratoire. Il sera possible également d'obtenir un faisceau de protons polarisés par diffusion sur une cible de carbone placée dans le faisceau régénéré avant le canal anti-magnétique.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] *Rev. Techn. Philips*, à paraître.
 - [2] KELLER (R.), Int. Conf. on High Energy Accelerators and Instrumentation, CERN, 1959, 187.
 - [3] SIEGEL (R. T.), Détecteurs de neutrons à grande énergie. *Handbuch der Physik*, 1958, **45**, II, 486.
 - [4] KELLER (R.), Rapport CERN 5 730.
-