

INSTITUT DE PHYSIQUE NUCLEAIRE,  
ACADEMIE DES SCIENCES D'URSS, NOVOSIBIRSK  
Rapport IYaF 74-87

CERN LIBRARIES, GENEVA



CM-P00100714

PREMIERES EXPERIENCES DE REFROIDISSEMENT ELECTRONIQUE

---

G.I. Budker, N.S. Dikanskij, V.I. Kudelajnen,  
I.N. Meshkov, V.V. Parkhomchuk,  
D.V. Pestrikov, A.N. Skrinskij et B.N. Sukhina

Novosibirsk 1974

Traduit au CERN par N. Mouravieff  
(Original: russe)

(CERN Trans. 75-3)

Genève  
Janvier 1975

## R é s u m é

On décrit les premières expériences de refroidissement électronique, réalisées à des énergies d'environ 65 MeV pour les protons et d'environ 35 KeV pour les électrons. On montre que lorsqu'on fait coïncider les vitesses des protons et des électrons avec une précision de  $1.10^{-3}$ , on observe les effets suivants: amortissement des oscillations bétatroniques; diminution de la dispersion énergétique dans le faisceau de protons et entraînement (accélération ou ralentissement) des protons par les électrons; augmentation de la durée de vie des protons; formation d'atomes neutres d'hydrogène d'une énergie de 65 MeV.

\*\*\*\*\*

La première série d'expériences de refroidissement électronique (mai-juin 1974) a été réalisée à des énergies de 65 MeV pour les protons et d'environ 35 KeV pour les électrons, avec l'installation décrite dans /1/. Voici les principaux résultats obtenus: lorsqu'on fait coïncider les vitesses des protons et des électrons avec une précision de  $\lesssim 10^{-3}$ , on observe les effets suivants: augmentation de la durée de vie des protons  $\tau_p$ ; amortissement des oscillations bétatroniques; diminution de la dispersion énergétique dans le faisceau de protons et entraînement (accélération ou ralentissement) des protons par les électrons. Lorsque l'écart entre les vitesses est porté à  $\approx 2 \cdot 10^{-3}$ , les effets énumérés ci-dessus disparaissent.

Dans ces expériences, après avoir accéléré les protons à l'énergie fixée, on coupait la tension d'accélération et on laissait les protons circuler librement dans un champ magnétique constant. On mettait ensuite en circuit le dispositif fournissant le faisceau d'électrons. La concordance de position et de vitesse des deux faisceaux, nécessaire à l'amortissement optimal /2/, était obtenue par réglage sur le rendement maximal en atomes d'hydrogène (neutres) produits par recombinaison dans les faisceaux en interaction (fig. 1, a).

1. La durée de vie des protons était mesurée en fonction de l'énergie des protons pour une énergie constante des électrons (fig. 1, b) et en fonction de l'énergie des électrons pour une énergie fixe des protons. (Dans les deux cas, il s'agit de l'énergie des protons à la fin du cycle d'accélération). Ces deux dépendances présentent l'une comme l'autre un pic prononcé au voisinage de l'égalité des vitesses moyennes des particules et de demi-largeur  $\Delta E/E \approx \pm 8 \cdot 10^{-4}$ . Par durée de vie on entendait le temps au bout duquel le courant de protons devient e fois moins intense.

La variation du flux de protons  $J$  en fonction du temps (fig. 2) présente un palier caractéristique (courbe 1) qui disparaît en régime de refroidissement (courbe 2) de sorte qu'il ne reste qu'une décroissance exponentielle. Lorsque l'écart entre les vitesses moyennes

devient important, la variation du courant en fonction du temps présente de nouveau un tronçon comportant un palier, tandis que  $\tau_p$  décroît.

La présence d'un pic prononcé sur la courbe  $\tau_p(E)$  et la disparition du palier sur la courbe  $J(t)$  peuvent s'expliquer par la suppression de la diffusion multiple des protons sur le gaz résiduel, suppression qui élimine la dilatation diffuse du faisceau. La durée de vie se trouve alors déterminée par la diffusion simple, ce qui se traduit par une augmentation de  $\tau_p$  d'environ  $\ln(183 Z^{-1/3}) \sim 5$  fois /2/.

2. La suppression de la dilatation diffuse est confirmée par les mesures directes de la dimension verticale (fig. 3). Ces mesures ont été effectuées à l'aide d'un compteur à scintillation traversant le faisceau de protons à une vitesse de 0,3 cm/sec. /1/. Les mesures ont montré que sans le faisceau d'électrons le carré de la dimension verticale croît linéairement avec le temps (ligne droite 4), tandis qu'en présence du faisceau d'électrons il reste constant dans les limites de la résolution (ligne droite 1). Si on augmente artificiellement les dimensions du faisceau, ces dernières diminuent jusqu'à la valeur stabilisée  $\Delta Z \approx 6$  mm (points 2, 3). Les dimensions du faisceau de protons ont été mesurées par éjection du faisceau sur une sonde à guide de lumière. Les observations visuelles sont en accord qualitatif avec ces mesures:  $\Delta Z \approx 6$  mm.

3. La mesure de la position radiale des protons à l'aide de sondes d'ouverture a montré que la position du faisceau de protons refroidi (pour une énergie déterminée des protons au début du refroidissement) dépendait de l'énergie des électrons. Les oscillogrammes (fig. 4) montrent la variation de l'intensité des protons diffusés en fonction de la position de la sonde radiale traversant le faisceau. On voit clairement le déplacement radial du faisceau de protons pour différentes énergies des électrons. L'oscillogramme du bas illustre l'entraînement partiel des protons lors d'une variation rapide de l'énergie des électrons. La fig. 5 donne le diagramme obtenu pour la variation de la position radiale du faisceau

de protons en fonction de l'énergie des électrons. Le déplacement radial à champ de guidage constant et tension d'accélération coupée, correspond à la variation de l'énergie des protons. On voit qu'à l'intérieur du faisceau d'électrons le déplacement radial des protons dépend linéairement du désaccord de l'énergie des électrons et concorde avec une certaine valeur  $\Psi \approx 0.8$  ( $\Psi = d \ln r / d \ln p$ ). Ce résultat a incité à essayer d'accélérer les protons à l'aide d'un faisceau d'électrons. A cette fin, après enclenchement du régime de refroidissement, l'énergie des électrons  $E_e$  et le champ magnétique du dispositif d'accumulation  $B$  ont été lentement augmentés de manière concertée (commande par ordinateur) pour que l'orbite des protons ne soit pas déplacée. Comme on pouvait s'y attendre, l'accroissement d'énergie maximal qui peut être obtenu dans un cycle d'accélération de cette sorte dépend du rapport  $(\dot{E}_e / E_e) / (\dot{B} / B)$ . La valeur optimale du temps d'accélération jusqu'à  $\Delta E_p / E_p = 1,2\%$  était de 200 sec., ce qui donne  $dE_p / dt \approx 4$  KeV/sec. Si l'on admet qu'avec une telle accélération les faisceaux ne peuvent s'écarter l'un de l'autre de plus de la demi-dimension du faisceau d'électrons, on peut évaluer la durée caractéristique de la diminution de la dispersion énergétique des protons  $\tau_E$  :

$$\frac{d\Delta E}{dt} \approx \frac{\Delta E_p}{\tau_E} \approx \frac{2 E_p}{\tau_E} \Psi^{-1} \frac{\Delta r}{r}$$

ce qui donne  $\tau_E \approx 20$  sec.

Notons que l'allure de la courbe du rendement en neutres (fig. 1, a) peut aussi s'expliquer par l'effet d'entraînement des protons par le faisceau d'électrons dans le champ magnétique continu du dispositif d'accumulation. Deux vallées accompagnant un pic prononcé sont dues au réglage de la vitesse moyenne des protons sur la vitesse moyenne des électrons et au fait que les protons sortent du faisceau d'électrons suivant le rayon. Lorsque l'accord des vitesses est très poussé, l'effet d'entraînement disparaît et le faisceau de protons reste à l'intérieur du faisceau d'électrons. Le coefficient de recombinaison pour un accord optimal des vitesses est  $\alpha = 1,5 \cdot 10^{-13}$  cm<sup>3</sup>/sec.

Le temps d'amortissement des oscillations bétatroniques peut être évalué en comparant la vitesse de diffusion (fig. 3, ligne droite 4) avec les dimensions stabilisées (ligne droite 1)

$$\tau_{\text{det}} = \frac{2 a_0^2}{d a^2 / dt} \simeq 17 \pm 4 \text{ sec.}$$

A partir du décrétement d'oscillations bétatroniques, en admettant une distribution maxwellienne des électrons selon les vitesses, on peut évaluer la température  $T_{\perp}$  du faisceau d'électrons /2/. On a constaté qu'elle était  $T_{\perp} \simeq 0,6 \text{ eV}$ , ce qui correspond à  $\theta_e = (v_{\perp} / v_{\parallel}) = 4.10^{-3}$ .

Il convient de voir dans les résultats obtenus une preuve qualitative de la possibilité d'amortir les oscillations par le procédé de refroidissement électronique.

La principale difficulté qu'il a fallu surmonter dans cette série d'expériences était la détérioration du vide à l'enclenchement du faisceau d'électrons. Les mesures de durée de vie ont montré que la pression dans l'enceinte à vide était proportionnelle au courant d'électrons, et avec un courant  $J_e = 100 \text{ mA}$  elle était  $P = 5.10^{-8} \text{ torr}$ . L'enclenchement simultané du faisceau d'électrons et des pompes à décharge magnétique réparties sur la section de rencontre des faisceaux entraînait la perte des protons. Les recherches ont montré que lorsque le courant d'électrons est supérieur à 10 mA, il s'accumule dans la section de rencontre une charge qui crée un champ électrique d'une intensité  $E \simeq 300 \text{ V/cm}$ , car la section de refroidissement constitue un piège comportant un champ magnétique longitudinal et des bouchons électrostatiques aux extrémités. L'accumulation de la charge semble due au flux d'atomes rapides qui se forment lors du fonctionnement des pompes à décharge magnétique; lorsque les pompes étaient mises hors circuit, il n'y avait pas d'accumulation de charge.

Dans la série d'expériences suivante, il est prévu de perfectionner les techniques de mesure des paramètres des faisceaux de protons et d'électrons /1/, d'améliorer le vide et d'adopter le pompage d'ions à l'endroit où les faisceaux se rencontrent. Il est prévu d'effectuer par la suite des recherches sur les régimes d'amortissement non-linéaires (avec valeurs élevées des amplitudes d'oscillations, des angles et des écarts de vitesse).

\*\*\*\*\*

B i b l i o g r a p h i e

1. V.V. Anashin, G.I. Budker, N.S. Dikanskij, V.I. Kudelajnen, A.S. Medvedko, I.N. Meshkov, V.V. Parkhomchuk, D.V. Pestrikov, V.G. Ponomarenko, P.A. Salimov, A.N. Skrinskij, B.N. Sukhina. "Installation pour les expériences de refroidissement électronique", rapport au IVE congrès de l'URSS sur les accélérateurs de particules chargées (1974).
2. G.I. Budker, Ya.S. Derbenev, N.S. Dikanskij, V.V. Parkhomchuk, D.V. Pestrikov, A.N. Skrinskij. "Cinétique du refroidissement électronique", rapport au IVE congrès de l'URSS sur les accélérateurs de particules chargées (1974).

\*\*\*\*\*



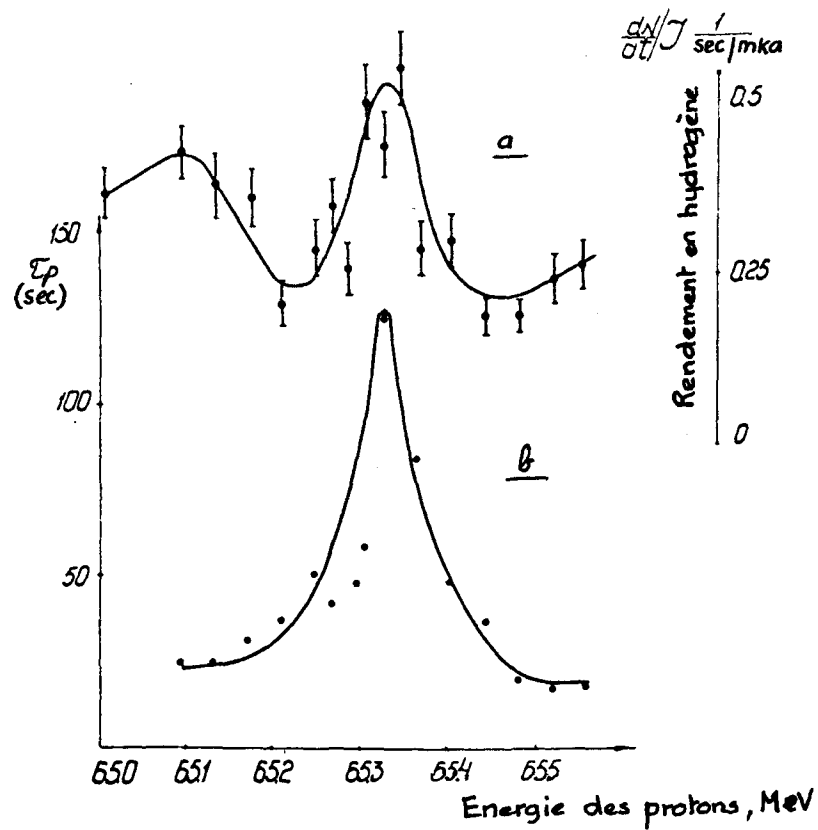


Fig. 1. Variation en fonction de l'énergie des protons; a) du rendement en atomes neutres d'hydrogène et b) de la durée de vie du faisceau de protons dans le cas d'une énergie fixe des électrons et d'un courant de protons de 100 mA.

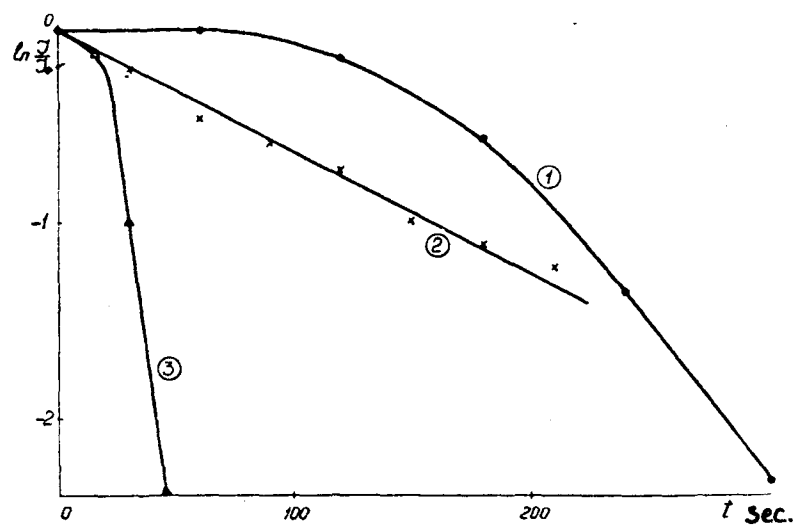


Fig. 2. Variation du courant de protons en fonction du temps: 1):  $J_e = 0$ ; 2):  $J_e = 100$  mA; 1'énergie des électrons est optimale  $J_e = 100$  mA; 3): 1'énergie des électrons est réglée sur  $\Delta E/E \approx 5 \cdot 10^{-3}$ .

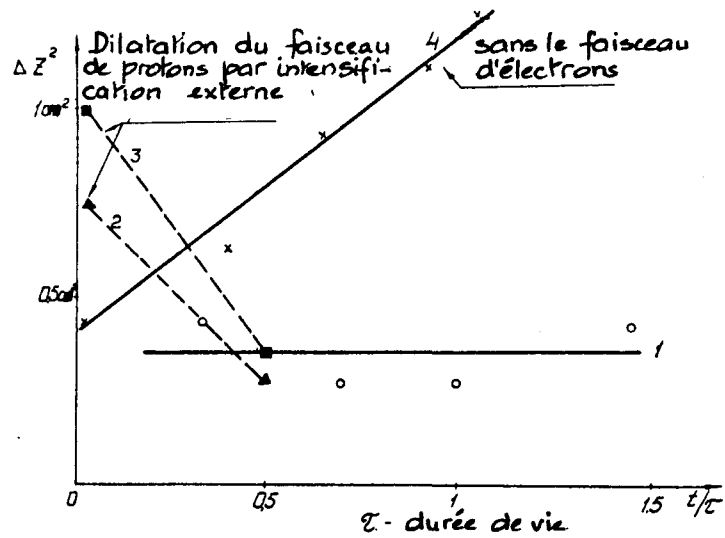
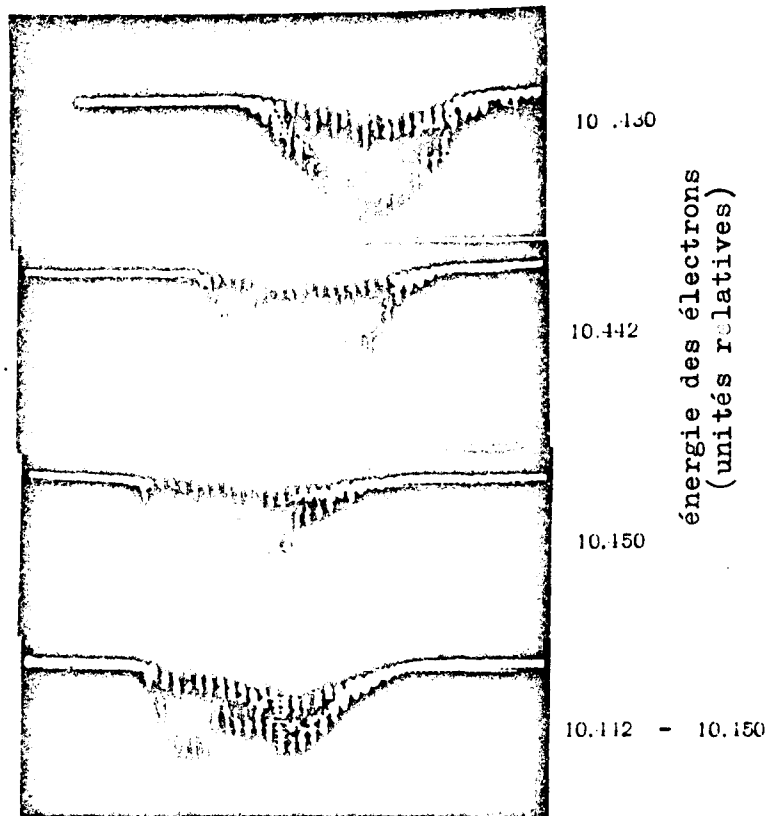


Fig. 3. Variation en fonction du temps de la dimension verticale du faisceau de protons: 1)  $I_e = 100$  mA; 2), 3)  $I_e = 100$  mA avec dilatation préalable du faisceau de protons par intensification externe; 4)  $I_e = 0$ .



"Entraînement" du faisceau de protons par le faisceau d'électrons.

Fig. 4. "Entraînement" du faisceau de protons par le faisceau d'électrons: déplacement du faisceau de protons en fonction de l'énergie des électrons (signal du compteur à scintillation).

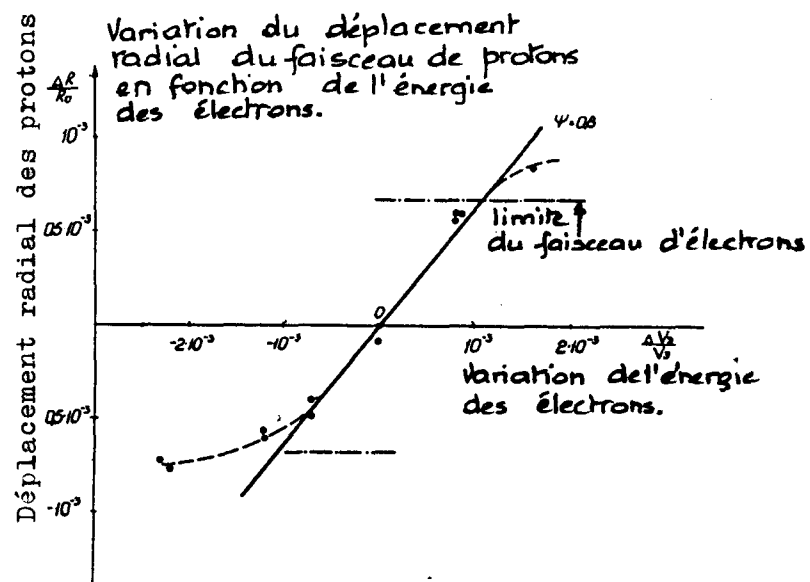


Fig. 5. Variation du déplacement radial du faisceau de protons en fonction de l'énergie des électrons.