

Extrait de VESTNIK AKADEMII NAUK SSSR No. 8, août 1968
pages 66-75

CERN LIBRARIES, GENEVA



CM-P00100560

LE LINAC INJECTEUR

par

A.L. Mints
Académicien

Traduit au CERN par A. Golovanoff
(Original : russe)

(CERN Trans. 69-2)

Genève
Janvier 1969

Dans l'accélérateur à protons de Serpukhov d'une énergie de 70 GeV, l'injection des particules est assurée par un linac prévu pour une énergie de 100 MeV. Cette énergie est quatre fois plus grande que celle du plus grand accélérateur linéaire en URSS qui sert d'injecteur au synchrophasotron de l'Institut de Physique théorique et expérimentale (ITEP) et deux fois plus grande que l'énergie des plus grands accélérateurs linéaires du monde à Brookhaven (USA) et à l'Organisation européenne pour la Recherche nucléaire (CERN).

L'accélérateur linéaire de Serpukhov, tout comme son prototype d'une énergie de 25 MeV¹⁾, est un accélérateur à focalisation forte à ouverture transparente en totalité. Ses paramètres fondamentaux sont donnés dans le tableau suivant.

Les trois résonateurs cylindriques de l'accélérateur ont une longueur de 29,9 m, 27,6 m et 21,9 m respectivement. Les diamètres de leurs cavités internes sont égales à 132,4 cm, 122,0 cm et 108,7 cm. Ces résonateurs en cuivre rouge, jouissent d'un coefficient de qualité élevé.

1) A.L. Mints. Le nouvel accélérateur de protons. "Journal de l'Académie des Sciences d'URSS", 1967, Vol. 6

Paramètres	Notation et unité de mesure	Valeur
Energie de sortie	W_R , MeV	100
Energie d'injection	W_0 , keV	700
Courant de sortie projeté du faisceau	I_m , ua	50 + 100
Durée du courant pulsé de protons	Δt , μsec	12 + 40
Taux de répétition des impulsions	F, Hz	0,2 + 1
Phase synchrone comptée à partir de la valeur maximale du champ électrique d'accélération	φ_s	-38°
Fréquence du champ d'accélération	$\frac{\omega}{2\pi}$ MHz	148,5
Amplitude de l'intensité moyenne du champ sur l'axe	E_0 , $\frac{\text{kv}}{\text{cm}}$	~18
Nombre de résonateurs		3
Coefficient de qualité des résonateurs	Q	68000+42000
Puissance pulsée des pertes dans le cuivre	P, MW	2,0+2,5
Durée des impulsions HF	μsec	300
Dispersion relative des impulsions des particules à la sortie de l'injecteur	$\frac{P - P_s}{P_s}$	± 0,3%
Volume des phases efficace du faisceau à la sortie de l'injecteur	cm.mrad	3,1+4,8
Non-linéarité axiale du champ électrique		± 1 + 2 %
Stabilité de l'amplitude du champ d'accélération	$\frac{\Delta E}{E}$	± 2 %
Stabilité de la phase du champ HF	$\Delta\varphi$	± 3 %
Tolérance sur le décalage de l'axe des lentilles quadripolaires par rapport à l'axe de l'accélérateur	μ	50
Stabilité du gradient du champ magnétique dans chaque lentille	$\left\langle \frac{\Delta G}{G} \right\rangle$	± 1%

L'indice d'efficacité des résonateurs est l'impédance-shunt, égal au rapport du carré de l'amplitude du champ d'accélérateur au double de la puissance des pertes HF dans le cuivre . L'énergie de sortie des particules, 100 MeV, permet encore d'avoir pour l'ensemble de l'injecteur un seul système d'accélération avec une valeur élevée de l'impédance-shunt des résonateurs (de 25 à 15 Mohm/m).

L'accélération des particules est obtenue à l'aide de tubes de glissement disposés le long de l'axe des résonateurs avec une précision élevée; on crée une tension HF atteignant 1 million de volts entre les extrémités de ces tubes. Les longueurs des tubes sont choisies de telle sorte que les particules accélérées se trouvent dans l'intervalle entre leurs extrémités, précisément au moment où la phase de la tension provoque l'accélération et qu'elles soient à l'intérieur des cavités des tubes lorsque la tension a un effet de freinage, afin que l'action de la tension HF sur les particules soit nulle à ce moment. De cette façon, les particules qui auront traversé successivement tous les intervalles entre les tubes de glissement acquièrent une énergie approximativement égale à la somme des tensions appliquées entre les intervalles au cours du temps où les particules s'y trouvaient, multipliée par la charge du proton. Dans le premier résonateur, l'énergie de la particule passe de 0,7 à 37,8 MeV; dans le second de 37,8 à 72,7 MeV; dans le troisième de 72,7 à 100 MeV.

La fréquence du champ HF d'accélération a été prise plus petite de 25 % que dans les linacs injecteurs de 50 MeV du CERN et de Brookhaven, cela afin d'augmenter principalement l'acceptance du canal de l'accélérateur. Il est vrai que ^{du fait de} l'allongement de l'accélérateur qui en a résulté, le coût de sa construction a été plus élevé. Mais les dépenses d'exploitation sont plus réduites à cause de la réduction de la puissance des pertes HF dans les résonateurs.

L'accélération est produite essentiellement par l'énergie accumulée dans les résonateurs. Toutefois, dans les cas où on a à faire à des faisceaux intenses de particules, l'amplitude du champ d'accélération au cours d'une impulsion de protons, d'une durée de 12 μ sec, peut diminuer considérablement. Afin de l'éviter, on prévoit de forcer le régime des générateurs HF pendant l'impulsion. En particulier, il existe une possibilité de correction de la partie horizontale de l'impulsion de tension d'anode par un réglage individuel des inductances des cellules de la ligne de formation dans les dispositifs de modulation. En outre, on a prévu une réserve d'énergie des générateurs HF.

Grâce au fait que le système d'accélération a seulement trois résonateurs et que le nombre d'espacements morts entre eux est donc petit, les paramètres calculés du faisceau à la sortie de l'accélérateur ont été améliorés. De plus, le nombre de résonateurs

réduit a permis de simplifier dans une certaine mesure l'appareillage radiotechnique. La réduction du nombre de résonateurs entraîne une augmentation de leur longueur, ce qui exige l'élévation de la puissance qui leur est appliquée. Ceci rapproche la fréquence du mode parasite le plus voisin de la fréquence de travail, ce qui complique le redressement du champ dans le résonateur et son maintien pendant le processus de travail de l'accélérateur. La longueur et le diamètre des résonateurs sont choisis de telle façon que la puissance HF qu'ils consomment soit presque identique. Il a été ainsi possible d'unifier les cascades de sortie des générateurs HF.

Le champ électrique dans l'accélérateur a pu être régulé le long de l'axe avec une précision atteignant $\pm 1-2\%$.

Les mesures ont montré que le mode d'oscillations le plus voisin dans le premier résonateur diffère de la fréquence de travail de 0,042 %. Toutefois, une position aussi voisine du mode parasite n'altère pas le fonctionnement de l'accélérateur grâce à son accord précis, au coefficient de qualité élevé, et à la détermination de l'endroit adéquat d'excitation des résonateurs.

Trois puissantes cascades de sortie, à circuits coaxiaux de type demi-longueur d'onde, ont un excitateur commun dont la première cascade reçoit d'un générateur-pilote à quartz la fréquence de la tension HF avec des petits paliers de multiplication. Toutes

les cascades de sortie peuvent fournir à leurs résonateurs une puissance atteignant 4-5 MW.

Pour accélérer des faisceaux de particules d'intensité maximale, il est possible de doubler la puissance HF dans les générateurs sans les transformer, en adjoignant à chaque résonateur une deuxième cascade de sortie.

La triode GI-27A de la cascade de sortie est reliée, par construction, à un transformateur coaxial accordé et à une boucle de transmission. La triode est placée directement sur la bride de la chambre à vide du générateur, si bien que la boucle de transmission se trouve couplée par induction à la cavité du résonateur.

La cavité du résonateur est séparée, du point de vue du vide, de la boucle de transmission par un diaphragme diélectrique spécial, à base d'époxyde, dans lequel les pertes HF sont suffisamment petites.

L'excitateur à trois cascades de sortie est relié aux amplificateurs de puissance de sortie par des feeders coaxiaux constitués de câbles polyéthylène ($W = 50 \text{ ohm}$).

Pour stabiliser le champ d'accélération dans les résonateurs, on dispose d'un système de réglage automatique de la

phase (ARF) de la tension d'accélération, ainsi que d'un système spécial de stabilisation de la température dans les résonateurs et les tubes de glissement dans des limites étroites. Le système ARF corrige la phase des oscillations HF en agissant sur l'accord du résonateur. En outre, il stabilise la fréquence du résonateur dans la résonance (y compris lors de la correction de la pente du champ électrique). Pour la stabilisation de l'amplitude de la tension d'accélération, on utilise dans les modulateurs un schéma de stabilisation de la tension de charge de la ligne de formation d'une précision de $\pm 0,1 \%$. La tension de chauffage des lampes des générateurs est stabilisée avec une précision de $\pm 0,5 \%$. L'ensemble de l'appareillage est asservi avec une grande précision aux signaux engendrés par un système spécial de temporisation.

On a prévu aussi dans l'accélérateur un système d'observation du faisceau, comprenant six stations d'observation munies d'un appareillage d'enregistrement et d'un aimant analyseur.

Les lentilles électromagnétiques quadripolaires de focalisation sont disposées à l'intérieur des tubes de glissement, placés le long de l'axe de l'accélérateur.

La chaleur des parois du résonateur est éliminée par circulation d'eau, dans une tubulure de cuivre soudée à l'extérieur des parois. La température des résonateurs est stabilisée à $\pm 0,2^\circ\text{C}$

près.

Les résonateurs ont une forme cylindrique; ils ne sont pas démontables et sont réalisés en plaques de cuivre rouge d'une épaisseur de 6 mm soudées entre elles. Afin d'augmenter la rigidité de l'ensemble, le cylindre de cuivre est solidaire d'une carcasse extérieure en arceaux d'acier. Pour l'installation et l'ajustage des tubes de drift, les résonateurs comportent de larges trous d'homme rectangulaires ($500 \times 1000 \text{ mm}^2$). Ils sont munis de plaquettes rectangulaires amovibles servant à régulariser le champ. La paroi cylindrique du résonateur présente encore d'autres ouvertures pour les plaques d'ajustage automatique de la fréquence, les plaques qui règlent la pente du champ HF, pour la connexion avec le générateur HF, etc.

Les tubes de drift sont placés de telle sorte que dans les trois résonateurs le système commence et finit par un demi-tube de drift. Mis à part ces paires de demi-tubes, les résonateurs comportent : le premier 93, le second 41 et le troisième 26 tubes de drift. Dans le premier résonateur, leur diamètre diminue avec l'augmentation de la vitesse des particules de 23 à 10 cm. Dans le second et le troisième résonateurs, les tubes ont un même diamètre: 10 cm. Le choix du diamètre est déterminé par deux facteurs. Sa réduction au minimum est fixée par le désir d'avoir la plus haute résistance de shunt possible, mais en même temps le diamètre ne

doit pas être inférieur à 10 cm, car il est nécessaire de placer dans les cavités des tubes les lentilles magnétiques avec une ouverture suffisante à l'intérieur des tubes pour ne pas gêner le passage du faisceau de particules accéléré. Le diamètre de l'ouverture des tubes de drift du premier résonateur est de 2 à 3 cm, dans le second et le troisième de 3,5 et 4 cm. Les rayons de l'arrondi des bords des tubes sont déterminés de telle sorte que l'intensité maximale du champ à leur surface ne dépasse nulle part 230 kV/cm.

Le système de focalisation de l'accélérateur est composé de lentilles quadripolaires électromagnétiques à alimentation pulsée. Dans chaque tube de drift, est placée une lentille quadripolaire. Leur succession est choisie de telle sorte que le canal de focalisation ait un pouvoir transmetteur élevé. Ce système assure la stabilité des oscillations transversales.

Les pôles des lentilles électromagnétiques ont une forme permettant d'obtenir le champ focalisant optimal. A l'intérieur des tubes de drift, sont placés des tubes, dits d'ouverture, en acier inoxydable de 1 mm d'épaisseur. Il est apparu que l'effet d'une spire court-circuitée (le tube d'ouverture constitue cette spire) est tellement faible que la valeur des distorsions en tous points du champ à l'intérieur du tube ne dépasse pas 1 %. L'alimentation pulsée des lentilles électromagnétiques s'effectue par paires,

et l'on utilise à cet effet la décharge oscillante d'un condensateur dans l'enroulement d'une lentille par un organe de commande.

Ce dernier

est un thyatron. La construction des tubes de drift et le système d'alimentation pulsée ont été élaborés par l'Institut d'Etude de l'appareillage électrophysique D.V. Efremov.

L'alimentation pulsée des lentilles a été appliquée afin de diminuer le dégagement thermique des enroulements; il a été possible de l'utiliser du fait de la présence dans l'accélérateur de systèmes pulsés d'alimentation HF et du caractère pulsé du faisceau de protons accélérés.

Le système d'alimentation permet de faire un réglage individuel de la valeur des gradients du champ magnétique de chaque paire de lentilles. En outre, on peut régler en même temps les gradients de l'ensemble des lentilles d'un résonateur donné et aussi modifier la pente de la progression du gradient dans le résonateur entre l'entrée et la sortie.

Les tubes de drift sont refroidis thermostatiquement par une circulation d'eau distillée.

Tous les éléments du système de régulation automatique de la phase et de la fréquence dans les résonateurs, y compris les

sondes, l'appareillage de commande et de contrôle, les organes d'exécution et les rotateurs de phase, permettent d'établir et de stabiliser une différence de phase entre résonateurs à $\pm 2^\circ$ près et d'accorder les résonateurs pour la fréquence de l'excitation HF.

Le système à vide maintient à l'intérieur des résonateurs une pression de l'ordre de 1.10^{-6} mmHg. A la différence de l'ensemble des linacs soviétiques ou étrangers connus, les résonateurs sont installés à l'intérieur d'une enveloppe où règne un prévide de l'ordre de 0,1 mmHg.

Une telle conception a permis de sortir la majeure partie des étanchéités de caoutchouc donnant lieu à un dégazage dans l'enceinte du prévide et d'en libérer la cavité interne des résonateurs. Les soudures des canalisations de refroidissement et des autres dispositifs auxiliaires sont aussi sorties dans l'enceinte de prévide.

L'utilisation d'un système de vide à doubles parois et le pompage à l'aide de pompes au titane exclusivement se sont révélés parfaitement justifiés. Pour une pression dans l'enveloppe de prévide de l'ordre de 0,1 à 0,5 mmHg, la pression à l'intérieur des résonateurs après traitement HF se révèle inférieure à 1.10^{-6} mmHg.

En maintenant ce prévide dans l'enveloppe externe, on obtenait la pression prévue dans les résonateurs au bout de quelques heures de fonctionnement des pompes.

Le système de vide en cascade, appliqué dans le linac injecteur de 100 MeV, permet de réduire sensiblement les dégagements dans le résonateur provenant de l'enveloppe qui l'entoure, du fait que la pression qui règne entre les parois externes du résonateur et les parois internes de l'enveloppe se maintient au niveau de 0,1 mmHg.

Le pompage de la cavité des résonateurs est assuré par 36 pompes magnétiques à décharge électrique et à absorption ionique de titane, de type VAT, qui présentent une fiabilité d'exploitation élevée. Une fois le dégagement réduit, une partie de ces pompes est débranchée. La vitesse de pompage de chaque pompe montée sur sa bride est de 600 l/s.

Trois cloisons transversales divisent l'enveloppe de prévide en trois sections indépendantes. Le fond de l'enveloppe de prévide n'a pas besoin de démontage. Les éléments supérieurs de l'enveloppe, d'une longueur de 6 m, sont amovibles. Deux ponts-roulants, mobiles le long de l'accélérateur, servent à l'assemblage et au démontage de l'enveloppe.

La source ionique est constituée par un duoplasmotron. Les protons sont préalablement accélérés dans un tube électrostatique sectionné, à une énergie de 700 keV. La tension d'un transformateur pulsé est appliquée à ce tube. Tous ces dispositifs font partie du préinjecteur. La composante protonique du courant du faisceau à la sortie du préinjecteur atteint environ 300 mA par impulsion.

Le faisceau est accordé avec le canal de focalisation de l'injecteur à l'aide d'une chaîne de 6 paires de lentilles quadripolaires installées entre le tube accélérateur du préinjecteur et le linac proprement dit. Le diamètre d'ouverture des lentilles quadripolaires est de 40 mm.

Le résonateur et l'enveloppe prennent appui sur des fondations en béton surmontées de poutres d'acier (leur position est réglable à l'aide de vérins). Les extrémités inférieures des tiges des tubes de glissement sont fixées à ces poutres à l'aide de mécanismes d'ajustage spéciaux.

L'équipement principal du linac est disposé dans un bâtiment spécial en sous-sol. Le bâtiment est composé d'une salle principale et d'un local auxiliaire. La salle principale abrite le préinjecteur, le linac proprement dit, les équipements d'alimentation HF avec les modulateurs, les systèmes d'alimentation pulsée

Dans
des lentilles et de pompage de vide poussé. Le local auxiliaire, séparé de la salle principale par une paroi de béton de blindage, sont disposées les pompes de prévide et les pompes du système de refroidissement de l'eau. La partie en surface du local auxiliaire abrite la salle de commande de l'accélérateur qui groupe les appareillages de régulation automatique, de temporisation, le système d'observation du faisceau et le poste principal de commande.

Toutes les commandes et contrôles des régimes des générateurs et modulateurs, disposés dans la proximité immédiate de l'accélérateur, sont manoeuvrés à distance à partir de la salle de radio-électronique de l'accélérateur linéaire.

L'important ensemble de travaux de mise en route et d'ajustement avait pour but la vérification de la correspondance des paramètres réels du linac injecteur avec les valeurs prévues. Après le démarrage physique de l'accélérateur (28 juillet 1967), l'énergie des protons à la sortie s'est révélée égale à 100 MeV. Lors des travaux de mise au point pour la réduction de la nocivité biologique et de la radio-activité induite, aussi bien auprès du linac qu'auprès des éléments de la partie annulaire du synchrotron à protons, l'intensité du faisceau de particules introduit dans la chambre à vide (qui se trouve dans l'entrefer de l'électro-aimant) a été volontairement rendue inférieure à 5 mA à l'aide de diaphragmes à très petite ouverture placés à l'entrée du linac et d'un collimateur à sa sortie.

Comme l'a confirmé la vérification, les tubes de drift ont été ajustés à l'aide d'un microtélescope optique de précision d'une façon très minutieuse (mieux que 50μ). La précision de la position des tubes a été vérifiée par une méthode d'interférence à l'aide du rayon d'un générateur optique d'oscillations cohérentes.

La puissance élevée des générateurs HF et le choix judicieux de leurs paramètres ont permis d'obtenir dans un bref délai le champ d'accélération nécessaire, ^{et} d'éviter les difficultés rencontrées lors de la mise en route de nombreux linacs étrangers par suite de l'effet dit de multipackage (décharge résonante).

Le dispositif de timing a assuré, de façon fiable, une synchronisation précise de l'ensemble des équipements technologiques spéciaux et de l'appareillage de contrôle et de mesure de l'accélérateur linéaire. Les limites de réglage des retards des différentes impulsions dans les canaux sont comprises entre 20 et 650 μ sec.

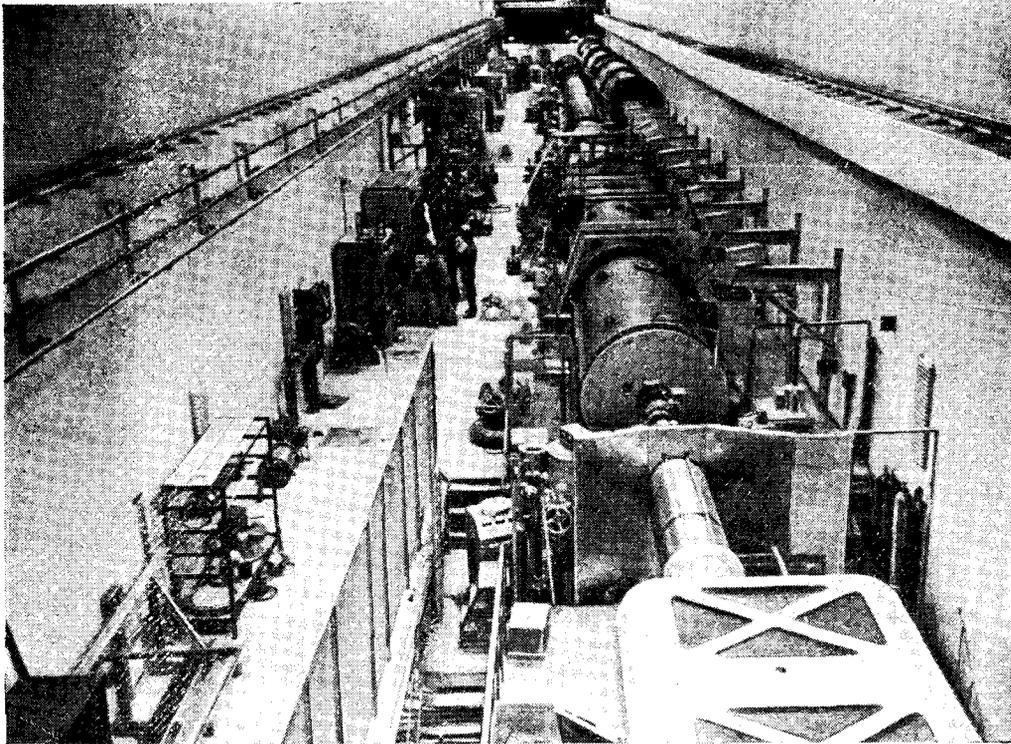
Le système d'observation du faisceau de particules accélérées (y compris les sondes, préamplificateurs et l'ensemble de l'appareillage de mesure et de commande), a permis d'enregistrer un faisceau de protons d'une intensité supérieure à 0,03 mA dans le canal d'accord à l'entrée des résonateurs 1, 2 et 3, ainsi qu'à la sortie du troisième résonateur. La mesure de l'intensité du courant du faisceau s'est révélée possible à partir de 0,3 mA. Le

système d'observation a permis, de même, d'estimer la section transversale et la position du faisceau à l'entrée de l'accélérateur et à sa sortie.

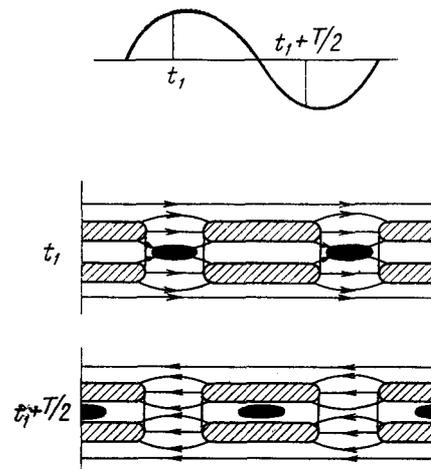
La télécommande des niveaux des champs HF et la mesure de leurs amplitudes en trois points de chaque résonateur étaient effectuées à partir du poste de commande central de l'injecteur. A partir de ce poste, on télécommande aussi la pente du champ électrique dans les résonateurs. Le poste est pourvu d'appareils de mesure de l'intensité du faisceau.

Le démarrage du linac obtenu un mois et demi avant la date fixée est le résultat des efforts intenses des savants, des ingénieurs, techniciens et ouvriers de l'Institut de Radiotechnique, de l'Institut de Physique des hautes énergies, de l'Institut de Physique théorique et expérimentale et de l'Institut d'Etude de l'appareillage électrophysique D.V. Efremov.²⁾

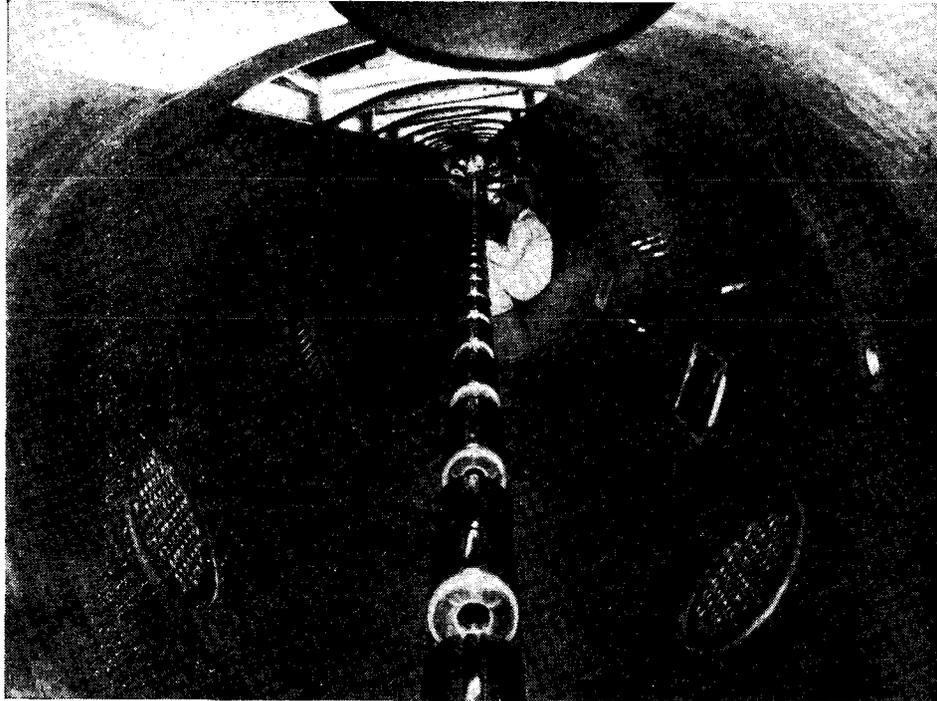
²⁾ Les principales contributions à la création et au lancement de l'accélérateur appartiennent à I.K. Nevyazhskij, I.M. Kapchinskij, B.E. Murin, M.I. Basalaev, B.I. Polyakov, N.V. Kovalev, S.A. Il'evskij, A.A. Zhdanko, V.G. Kul'man, E.A. Khesed.



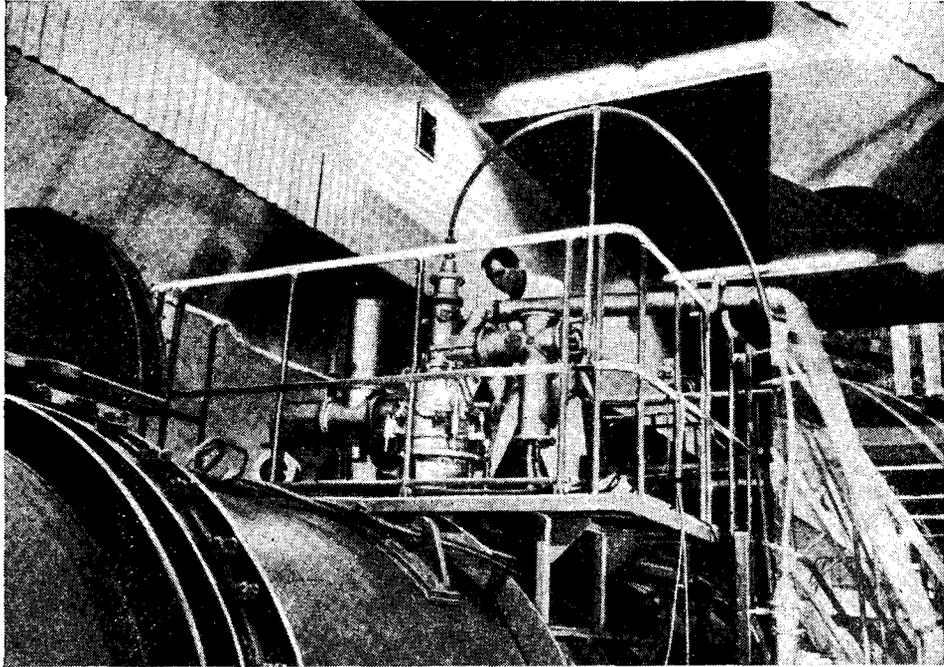
1. Galerie du linac injecteur au moment de l'assemblage de l'enveloppe de prévide. Au premier plan, le préinjecteur.



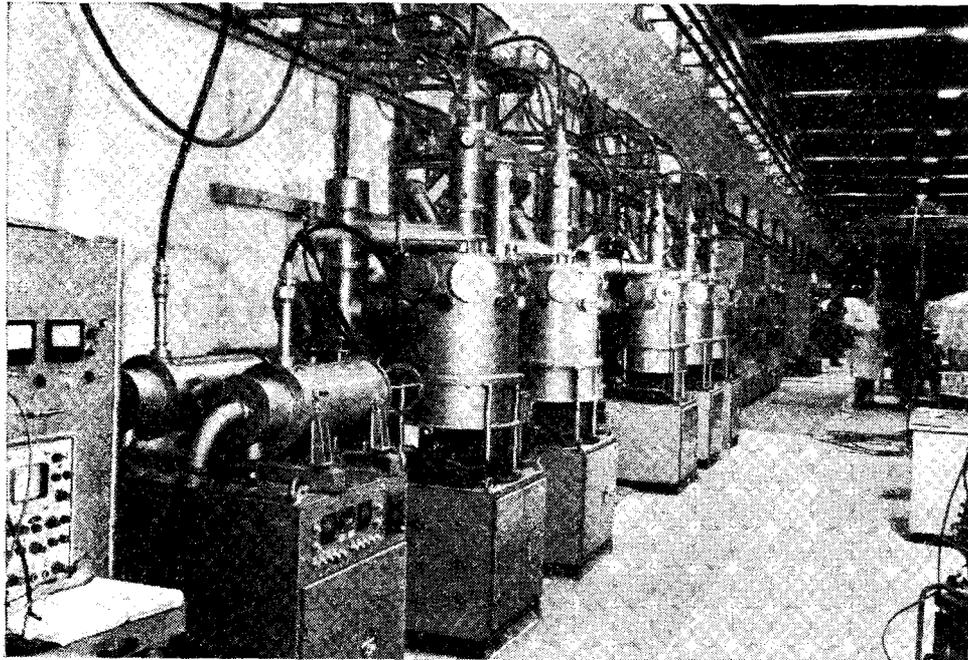
2. Schéma de l'accélération des paquets de protons dans l'accélérateur linéaire. En haut : variation de l'intensité du champ électrique dans le temps. En bas : ligne de force du champ électrique entre les extrémités des tubes de drift aux instants t_1 ($t_1 + T/2$). Les sections des tubes de drift sont hachurées. Les paquets de protons sont représentés en noir.



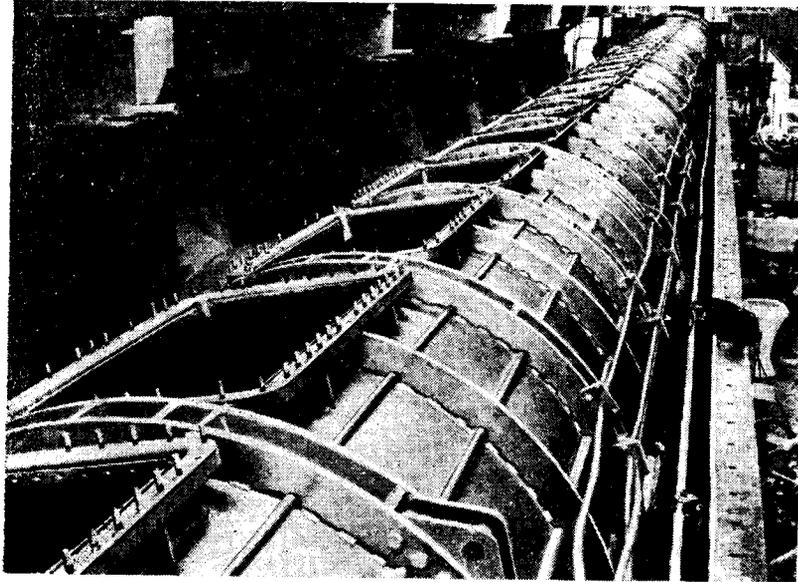
3. Vue intérieure des résonateurs. Les tubes de drift sont placés le long de l'axe. Les grilles à droite et à gauche sont placées sur les orifices des pompes de vide poussé.



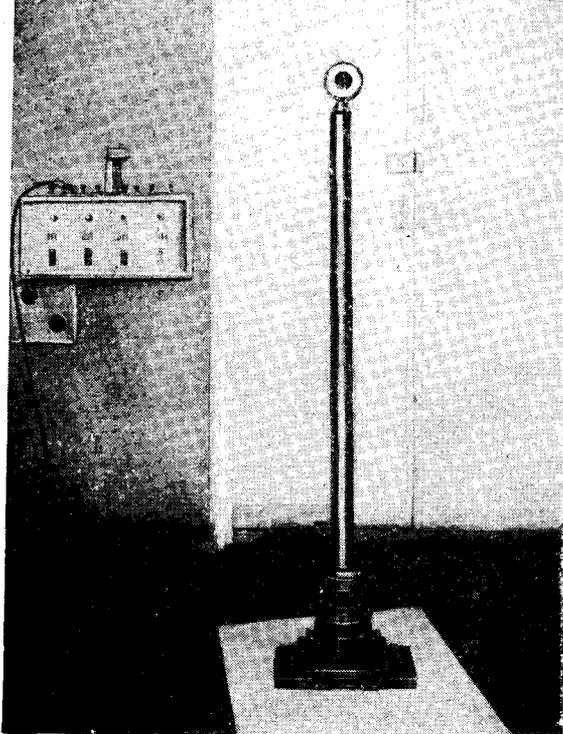
4. Plateforme surmontant l'enveloppe de prévide, portant la cascade de sortie de puissance du générateur HF.



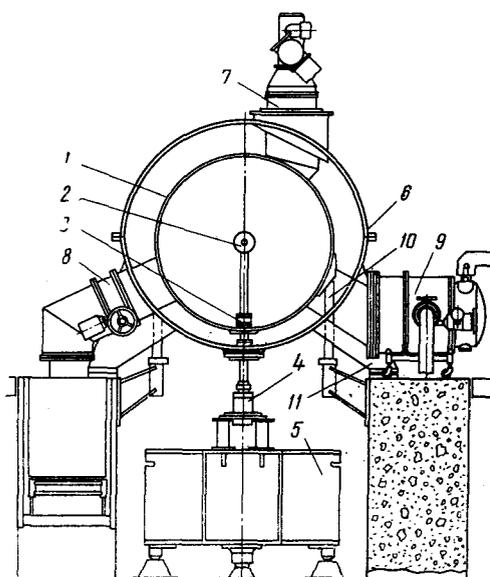
5. Excitateur des cascades de sortie des générateurs HF de puissance.



6. Montage des résonateurs dans la partie inférieure de l'enveloppe de prévide. On voit sur la photo les canalisations de refroidissement des résonateurs et les arceaux de rigidité fixés à la paroi externe des résonateurs.

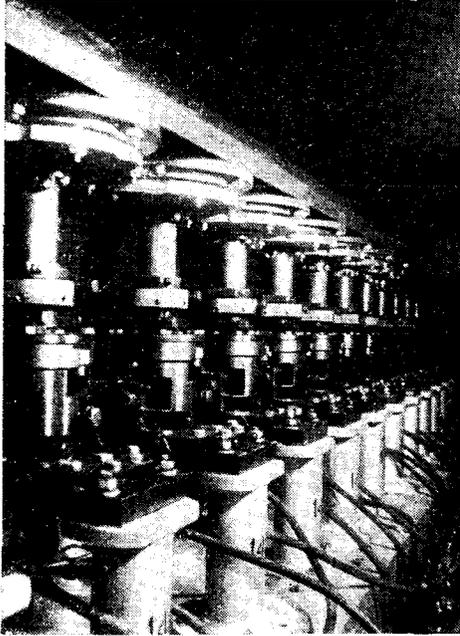


7. Vue en bout d'un tube de drift supporté par sa tige, fixé au mécanisme d'ajustage (en bas).

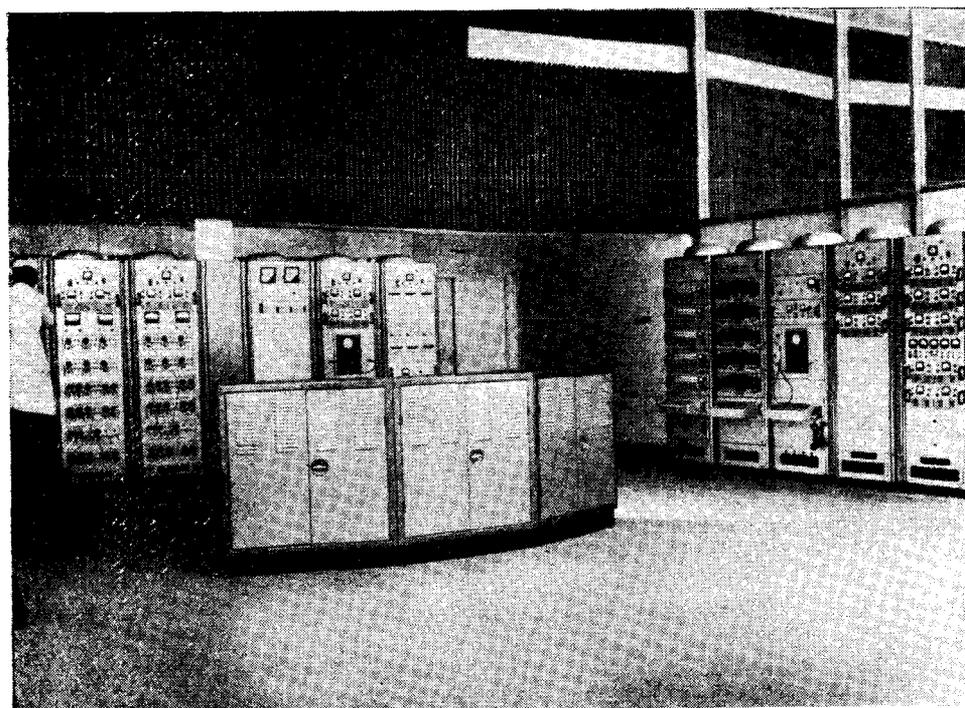


8. Section transversale du linac.

1 - résonateur, 2 - tube de drift, 3 - boudin, 4 - mécanisme d'ajustement, 5 - poutre d'appui, 6 - enveloppe de prévide, 7 - cascade de sortie de l'amplificateur de puissance HF, 8 - pompe au titane de vide poussé, 9 - piège à azote, 10 - support des résonateurs, 11 - support de l'enveloppe de prévide.



9. Mécanisme d'ajustage pour le positionnement de précision et la fixation des tubes de drift.



10. Appareillage électronique de commande des systèmes de stabilisation automatique de l'amplitude de la tension d'accélération, de stabilisation automatique de la fréquence et de la phase des résonateurs. Au premier plan : poste de télécommande du linac.