

Extrait de VESTNIK AKADEMII NAUK SSSR No. 8, août 1968  
pages 58-65

CERN LIBRARIES, GENEVA



CM-P00100559

LE SYNCHROTRON A PROTONS DE 70 GeV  
A SERPUKHOV

par

A.A. Naumov

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

(CERN Trans. 69-1)

Genève  
Janvier 1969

LE SYNCHROTRON A PROTONS DE 70 GeV  
A SERPUKHOV

Démarrage et mise au point de l'accélérateur

par A.A. Naumov  
Membre correspondant de l'Académie des Sciences d'URSS

Avant d'aborder la description des travaux de mise en route et de mise au point de l'accélérateur de 70 GeV de l'Institut de Physique des hautes énergies du Comité d'Etat pour l'Utilisation de l'Energie atomique de l'Union des Républiques socialistes soviétiques, qui est entré en opération dans l'année du Jubilé, il est utile de donner un bref aperçu de cette machine unique. La Figure 1 donne une certaine idée de l'aspect extérieur de l'accélérateur. Le schéma des éléments principaux de l'accélérateur est représenté sur la Figure 2.

L'accélérateur est un synchrotron à protons à focalisation forte. L'injecteur est constitué par un accélérateur linéaire qui porte les protons à une énergie de 100 MeV, avec un courant atteignant 100 mA par impulsion. On trouvera une description détaillée du linac dans la communication de l'Académicien A.L. Mints, publiée à la suite de cet article.

Les protons du linac sont conduits par un canal spécial d'une longueur de 80 m, pourvu d'un système optique à focalisation forte, dans la chambre à vide de l'anneau du synchrotron d'une section de 195 x 115 mm, réalisée en acier inoxydable gaufré, d'une épaisseur de 0,4 mm. Le pompage du système est assuré à l'aide de 120 pompes à décharge au titane, d'un débit de 300 l/s chacune. La chambre à vide est disposée entre les pôles de l'électro-aimant annulaire, qui permet le déplacement des protons sur une orbite courbe, ainsi que leur focalisation dans les directions verticale et radiale.

L'électro-aimant est constitué de 120 unités, disposées le long de l'anneau d'une longueur de près de 1,5 km. Chaque unité pèse environ 200 tonnes et elle est composée de 5 blocs formés par collage de feuilles d'acier au silicium d'une épaisseur de 2 mm, matricés selon le profil donné. La focalisation forte est obtenue par la succession des unités à gradient positif et négatif de l'intensité du champ magnétique. Une correction active aussi bien que passive des caractéristiques est assurée par 12 systèmes différents.

L'accélérateur est disposé sous terre, dans un tunnel annulaire. L'électro-aimant pourvu de la chambre à vide est représenté sur la Figure 3.

L'accélération des protons est réalisée par le champ électrique, qui est engendré par 54 résonateurs HF, disposés le long de l'anneau dans les intervalles entre les unités de l'électro-aimant. Dans ces mêmes intervalles, on a placé des amplificateurs à large bande, qui développent dans chaque résonateur une tension de 7 kV. Le système de phase spécial permet d'obtenir une valeur maximale de la tension HF sur le pourtour d'environ 380 kV. Les particules sont accélérées en régime d'auto-phasage. Avec une vitesse de montée de l'intensité du champ magnétique de 6,5 kG/s, la phase d'équilibre s'établit à 30° et l'accroissement moyen d'énergie par tour atteint 180 keV. La fréquence de la tension d'accélération du générateur-pilote passe de 2,6 à 6,1 MHz, parallèlement à l'augmentation de la vitesse des protons. Pour permettre un diapason de fréquences aussi large, les résonateurs d'accélération sont remplis de ferrite. A l'aide de puissants amplificateurs à transistors et à courant continu, chargés par l'enroulement de magnétisation des ferrites, la fréquence propre du résonateur est accordée automatiquement pour une valeur voisine de la fréquence de la tension d'excitation du système haute fréquence. A cet effet, on utilise une contre-réaction sur le système d'accord de la fréquence du résonateur. Tous les 54 amplificateurs haute fréquence sont excités par un seul générateur-pilote, dont la fréquence varie selon un programme composé en accord avec la loi de variation dans le temps du champ magnétique de l'accélérateur. Le rayon de l'orbite d'équilibre du synchrotron

à protons est déterminé par les valeurs de l'intensité du champ magnétique et l'intensité du générateur-pilote.

Pour améliorer la stabilité de la position radiale de l'orbite d'équilibre dans la chambre, on prévoit une contre-réaction entre la fréquence du générateur-pilote et les signaux porteurs de l'information sur la position radiale et la position azimutale du faisceau. Un schéma simplifié, expliquant le principe du fonctionnement du système d'accélération, est représenté sur la Figure 4. Une vue d'ensemble du résonateur d'accélération pourvu de son amplificateur est représentée sur la Figure 5.

Les résonateurs d'accélération, les puissants amplificateurs HF et les électrodes de signal se trouvent dans le tunnel annulaire. Le générateur pilote et l'électronique de liaison sont disposés dans la salle de commande principale de l'accélérateur. Les puissants amplificateurs à courant continu et les équipements de puissance se trouvent dans six édifices, disposés sur le territoire délimité par l'anneau. Ces mêmes édifices renferment le système de ventilation du tunnel.

Au cours du processus d'accélération, l'intensité du champ magnétique varie de 76 à 10.000 gauss. L'énergie emmagasinée dans le champ magnétique de l'électro-aimant atteint 120 MJ tandis que la puissance totale de pointe des 4 moto-générateurs à courant

alternatif qui alimentent l'électro-aimant est de 90 MW. L'alimentation des enroulements de l'électro-aimant est assurée par des transformateurs à ignitrons, qui permettent de récupérer à la fin du cycle de travail une partie de l'énergie du champ magnétique au profit du système d'alimentation. L'énergie est accumulée dans des volants calés sur les axes des génératrices. Les Figures 6 et 7 représentent une vue générale de la salle des machines et des transformateurs à ignitrons.

La montée de l'intensité du champ magnétique lors de l'accélération s'effectue selon une loi approximativement linéaire en 2,6 secondes. Pour augmenter l'efficacité d'utilisation de l'accélérateur, on a prévu la possibilité de maintenir aux énergies limites la valeur maximale de l'intensité du champ pendant 1 seconde. L'accélérateur est calculé pour 8 cycles d'accélération par minute.

Pour donner une idée du volume et des particularités des travaux de montage et de mise au point de l'accélérateur de Serpukhov, il suffit, semble-t-il, de dire que plus d'un millier d'organisations et d'entreprises ont participé à sa création.

Le projet physique d'accélérateur a été élaboré par l'Institut de Physique théorique et expérimentale du Comité d'Etat pour l'Utilisation de l'Energie atomique. La réalisation technique du linac injecteur et des systèmes radio-techniques de l'anneau est

revenue principalement à l'Institut Radio-Technique, tandis que l'Institut d'Etude de l'appareillage électrophysique D.V. Efremov était chargé de l'anneau. Les systèmes d'accélération ont été conçus par le bureau d'étude "Komintern". L'équipement de base a été construit par le consortium "Electrosila" à Léninegrad.

Les plans de l'ensemble des bâtiments de l'accélérateur ont été conçus par l'Institut National des Projets. Le projet d'implantation de l'équipement électrique a été élaboré par Tyazhpromelektroproekt. La construction et le montage ont été assurés par les organisations du Comité d'Etat pour l'Utilisation de l'Energie atomique.

L'Institut de Physique des hautes Energies a assumé la direction de la mise en oeuvre de l'accélérateur, sa mise au point et son démarrage conjointement aux instituts qui ont créé l'ensemble de l'équipement principal, la coordination de ces travaux, ainsi que le perfectionnement ultérieur de cet accélérateur.

En abordant la description des travaux de démarrage de l'accélérateur, il convient de remarquer qu'il est impossible d'épuiser dans une brève communication les nombreux problèmes auxquels fut confronté le collectif des collaborateurs de l'Institut de Physique des hautes Energies et d'autres organisations participant à ces travaux. C'est pourquoi nous nous arrêterons

seulement à certaines particularités de la mise au point, aux détails caractéristiques du réglage de certains systèmes, et nous donnerons les résultats finaux qui ont marqué les étapes à notre avis les plus importantes de la mise en oeuvre physique de l'accélérateur.

Le démarrage a été précédé par une minutieuse mise au point de chaque élément, mise au point qui pour de nombreux systèmes a commencé longtemps avant le montage définitif.

Ainsi, la mise en oeuvre du système d'alimentation de l'électro-aimant a été divisée en deux séries. Tandis que s'achevait le montage de la seconde série, la première était déjà au point et l'on pouvait obtenir des courants nominaux atteignant 5000 A. Cela a permis de commencer sans retard les essais d'une moitié de l'électro-aimant annulaire en régime nominal et d'effectuer les mesures magnétiques, en dépit du fait que la deuxième partie du système d'alimentation se trouvait encore en régime de mise au point. Le même principe a été appliqué lors du montage et de la mise au point de l'électro-aimant et de la chambre à vide. Tandis que les expériences magnétiques se déroulaient dans une partie de l'électro-aimant, la chambre à vide était assemblée et pompée dans l'autre partie qui n'était pas excitée. Une telle succession des travaux a permis de raccourcir sensiblement la durée de leur réalisation, de disposer à temps du champ magnétique assurant

le mouvement stable des protons et d'atteindre le vide désiré (environ  $2 \cdot 10^{-6}$  torr) dans la chambre à vide longue de 1,5 km et comportant de nombreuses entrées et ramifications.

Il convient de s'arrêter tout particulièrement aux travaux en vue d'obtenir les caractéristiques magnétiques prescrites de l'électro-aimant. Dès le début du projet et jusqu'au tout dernier moment, ils furent l'objet d'une attention constante. C'est que les exigences de reproductibilité dans le temps et dans l'espace des caractéristiques fondamentales du champ magnétique de l'électro-aimant étaient très sévères. Par exemple, la valeur relative de la composante verticale de l'intensité du champ magnétique doit être maintenue avec une précision de quelque dix-millièmes. Obtenir une précision aussi élevée entraîne de grandes difficultés. Le problème se trouve encore compliqué aux inductions faibles, lorsque la dispersion des champs résiduels dans l'électro-aimant se manifeste avec intensité. Sur l'accélérateur de Serpukhov, cet effet est particulièrement important puisque, pour une énergie d'injection de 100 MeV, l'intensité du champ dans l'entrefer de l'électro-aimant atteint seulement 76 oersted; la valeur des champs résiduels étant alors d'environ 35 oersted.

L'importance des champs résiduels dépend essentiellement des particularités technologiques de la fonderie et du laminage. C'est pourquoi, afin d'obtenir des caractéristiques magnétiques

moyennes des blocs, il fut décidé de mélanger des feuilles d'acier de différentes fusions. Mais, comme il n'était pas possible de rassembler et de matricer simultanément les 20.000 tonnes d'acier nécessaires, il ne fut pas possible non plus d'effectuer ce mélange d'un seul coup pour l'ensemble des blocs. A l'usine, les mesures des caractéristiques magnétiques ont été faites afin de permettre l'assemblage des paquets de l'électro-aimant, de façon à obtenir une distribution moyenne de l'influence de la dispersion des paramètres des blocs. Malgré cela, les unités présentaient une dispersion des caractéristiques magnétiques inadmissible. Afin de réduire les harmoniques de la distribution azimutale voisines des résonances, les unités de l'électro-aimant ont été disposées dans l'anneau selon un programme élaboré à partir des mesures magnétiques réalisées sur un banc de mesures spécialement conçu dans ce but.

A l'issue de ces mesures et de l'installation des unités avec une précision de 0,1 mm, les déformations du champ magnétique restaient quand même largement supérieures aux valeurs admissibles. En outre, les effets liés aux processus non-stationnaires, qui apparaissent au début de chaque cycle lors du branchement de la haute tension sur les enroulements de l'électro-aimant, n'avaient pas été étudiés dans les conditions réelles et il n'existait pas de certitude qu'il ne s'était pas produit pour une raison ou une autre, au cours du montage des unités, des variations des caractéristiques magnétiques déjà fixées.

On a considéré deux voies pour la suite de la mise au point de l'aimant. On pouvait tenter, sans faire d'autres mesures magnétiques, d'accélérer le faisceau de protons en corrigeant le champ sur la base de l'information reçue sur le mouvement du faisceau dans la chambre de l'accélérateur.

De même, on pouvait effectuer des mesures magnétiques minutieuses dans l'électro-aimant annulaire monté, corriger le champ d'après les données obtenues et accélérer le faisceau avant de corriger définitivement l'aimant d'après le faisceau, en ayant déterminé les conditions optimales d'injection et d'accélération des protons. C'est cette voie qui a été choisie.

Au cours des mesures magnétiques définitives, on est parvenu à établir une stabilité suffisante des caractéristiques magnétiques des unités mesurées précédemment. Sur la base des résultats obtenus, on a corrigé les déformations de champ déterminées par les processus stationnaires, et l'on a étudié les phénomènes non stationnaires dans l'électro-aimant, qui ont été considérablement atténués par une correction adéquate; les champs de fuite ont été mesurés et on a évalué leur influence sur la trajectoire du faisceau. En outre, on a décelé et éliminé de nombreux défauts d'assemblage, qui introduisaient des distorsions inadmissibles du champ. A la fin de ces travaux, on a obtenu la certitude que l'électro-aimant pouvait assurer une trajectoire stable des protons dans les processus d'injection et d'accélération.

Les autres éléments de l'ensemble de l'accélérateur ont été mis au point et vérifiés avec la même minutie; en particulier, on a attaché une grande attention au système de vide et aux stations d'accélération. Le réglage élément par élément des systèmes HF a été effectué aussi longtemps au préalable. L'accord d'ensemble des stations a été réalisé après installation des résonateurs dans l'anneau, et l'on s'est attaché tout particulièrement à la mise en phase de la tension, compte tenu de la disposition des 54 stations d'accélération.

L'envoi du faisceau de l'accélérateur linéaire dans le canal et son injection ont commencé le 28 août 1967. Le 17 septembre, on obtenait les 20 premiers tours du faisceau (régime de circulation).

Le faisceau de protons était injecté dans la chambre avec l'aimant en régime nominal de travail, mais les stations d'accélération n'étaient pas en fonctionnement à cette étape. Les protons injectés étaient capturés et le faisceau se déplaçait le long d'une trajectoire spiralée vers la paroi interne de la chambre. Au bout de 20 tours environ, il se perdait sur l'une des saillies intérieures de la chambre. La Figure 8 représente 20 impulsions correspondant à 20 passages du faisceau au voisinage d'une électrode pick-up électrostatique (l'axe des abscisses représente le temps et l'axe des ordonnées l'amplitude de la tension sur le pick-up). Ce résultat encourageant leva tous les doutes sur le caractère judicieux du choix et de la

correction des caractéristiques fondamentales du champ de l'électro-aimant et a permis de planifier avec plus de sûreté l'étape suivante du travail, c'est-à-dire l'accélération.

On a d'abord tenté d'accélérer les protons avec le générateur-pilote du système d'accélération fonctionnant selon un programme défini par le champ magnétique sans contre-réaction sur le faisceau. Mais avec ce régime, au voisinage de l'énergie critique où les exigences de la précision de l'accord entre la loi de variation dans le temps de la fréquence du champ d'accélération et l'intensité du champ dans l'entrefer de l'électro-aimant augmentent beaucoup, l'accélération s'interrompait. Cette difficulté a pu être surmontée une fois le système de contre-réaction sur le faisceau accordé et mis en marche.

Le 14 décembre 1967, les protons ont été accélérés à une énergie supérieure à 70 GeV.

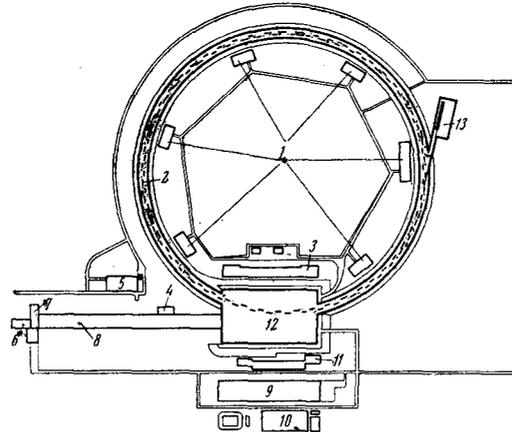
La Figure 9 représente l'oscillogramme de la tension sur l'électrode pick-up. Le temps est compté selon l'axe horizontal. Le faisceau était accéléré pendant 2,5 secondes. Comme on voit sur cet oscillogramme, il se produit des pertes sensibles du faisceau seulement en début de cycle. L'intensité en fin de cycle atteignait une valeur de  $1-2 \cdot 10^9$  protons par impulsion. Avec l'obtention de ces résultats, s'achevait le programme de mise en route physique de l'accélérateur.

Bien qu'il n'ait pas été réalisé d'études expérimentales détaillées de la dynamique du faisceau, que tous les systèmes de commande et d'observation n'aient pas été mis en oeuvre et que de nombreux organes de l'accélérateur n'étaient pas définitivement au point, ces résultats ont joué un rôle décisif dans la planification des travaux ultérieurs et ont donné l'assurance du succès de la réalisation des possibilités prévues pour l'accélérateur au moment de sa construction.

Actuellement, on poursuit l'étape suivante de la mise au point de l'accélérateur : l'accord définitif de tous ces systèmes, l'étude de la dynamique du faisceau dans la chambre de l'accélérateur, l'augmentation de l'intensité du faisceau jusqu'à  $10^{11}$ - $10^{12}$  particules par impulsion, l'extraction de particules secondaires d'abord puis de particules primaires, et enfin la réalisation depuis le milieu de la présente année, d'expériences physiques.



1. Vue générale de l'accélérateur

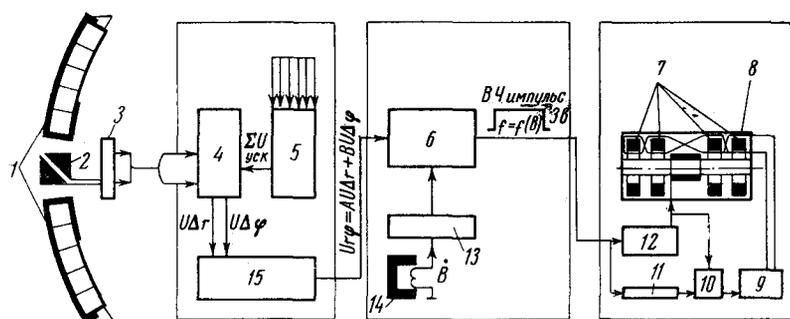


2. Plan de disposition des principaux éléments de l'accélérateur.

- 1 - alimentation et commande du blocage et de la signalisation des systèmes d'accélération et centres de ventilation;
- 2 - tunnel annulaire,
- 3 - corps de laboratoire,
- 4 - salle pour la chambre à bulles à hydrogène,
- 5 - local des échangeurs de chaleur,
- 6 - salle pour la chambre à bulles à hydrogène "Mirabelle",
- 7 - salle pour la chambre à bulles à propane "Skat",
- 8 - galerie,
- 9 - centrale énergétique,
- 10 - sous-station réductrice,
- 11 - corps de laboratoire,
- 12 - hall expérimental,
- 13 - injecteur.

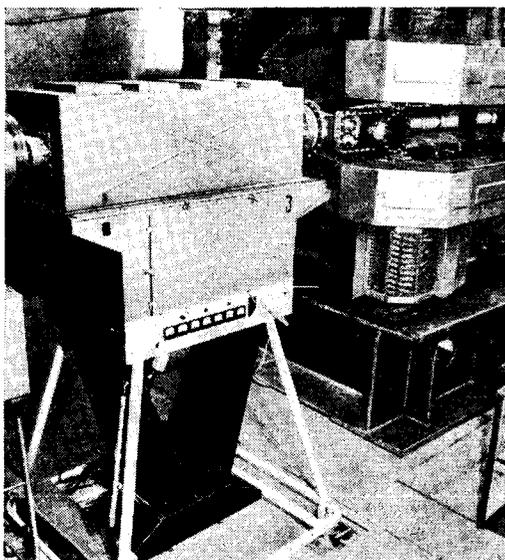


3. Tunnel où sont disposés les principaux éléments de l'accélérateur annulaire.



4. Schéma simplifié du système d'accélération :

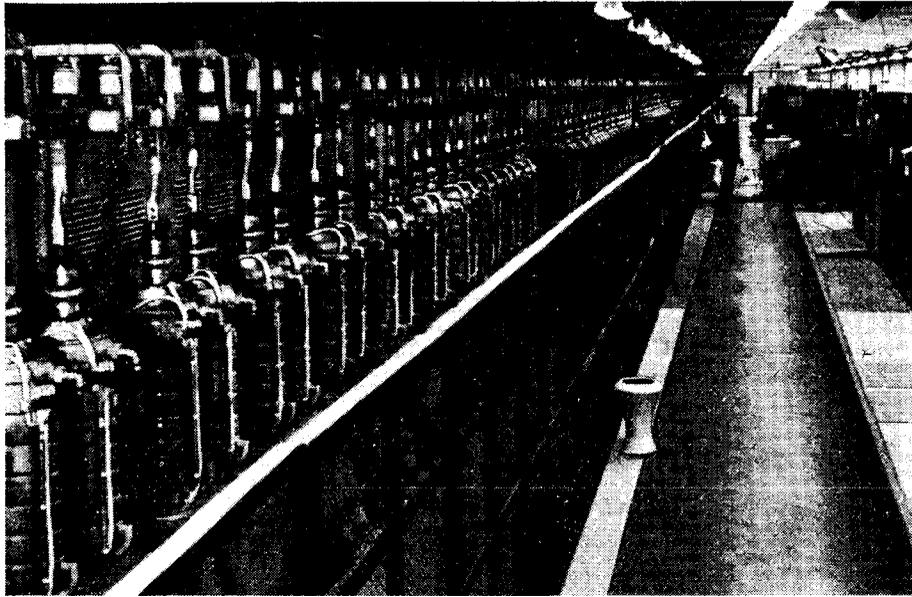
- 1 - unité de l'électro-aimant,
- 2 - électrode d'observation,
- 3 - bloc d'entrée,
- 4 - transformateur,
- 5 - sommateur,
- 6 - générateur-pilote,
- 7 - ferrite,
- 8 - résonateur,
- 9 - amplificateur à courant continu,
- 10 - détecteur de phases,
- 11 - ligne de retard,
- 12 - amplificateur haute fréquence,
- 13 - intégrateur, programmeur,
- 14 - aimant de mesure
- 15 - sommateur, correcteur.



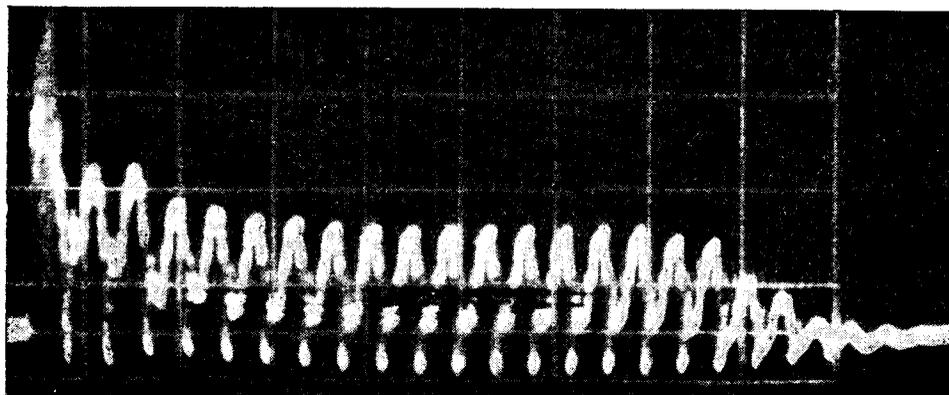
5. Aspect du système d'accélération.



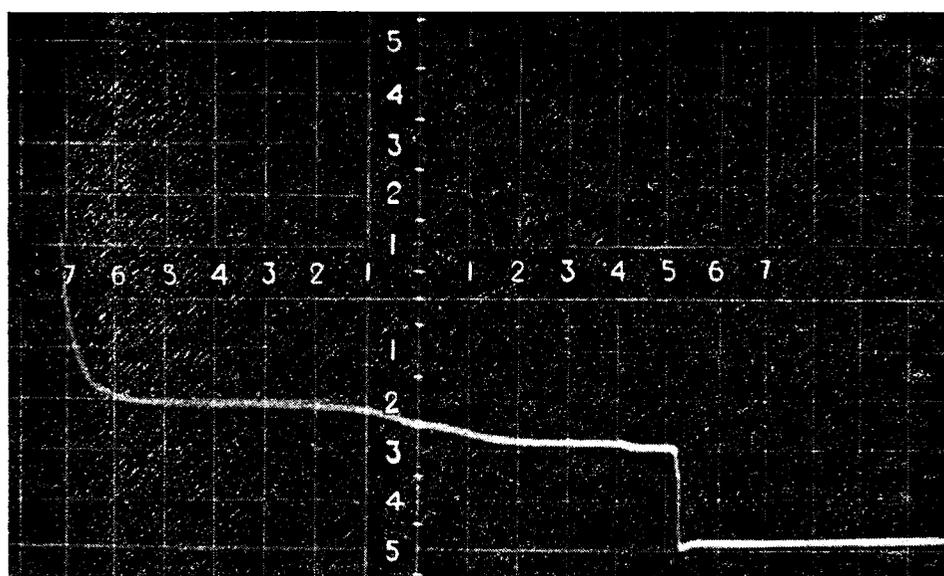
6. Salle des machines du système d'alimentation de l'électro-aimant de l'accélérateur.



7. Salle des ignitrons du système d'alimentation de l'électro-aimant de l'accélérateur.



8. Oscillogramme des signaux des électrodes de mesure, caractérisant le nombre de tours accomplis par le faisceau après capture (sans accélération).



9. Oscillogramme caractérisant la durée d'accélération et l'énergie des particules accélérées. La fin du signal correspond à l'énergie de 76 GeV.