

ARTILLERIE ATOMIQUE



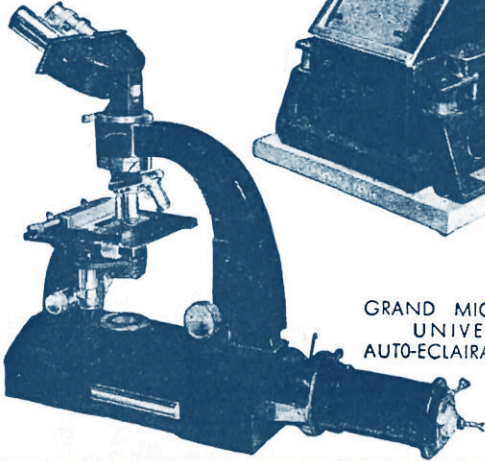
SCIENCE ET VIE

NUMÉRO HORS SÉRIE

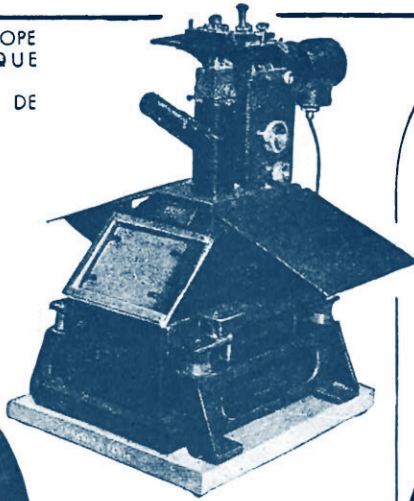
60^F

René
Ravo

NOUVEAU MICROSCOPE
MÉTALLOGRAPHIQUE
T. M. 66
AVEC AMORTISSEUR DE
VIBRATIONS



GRAND MICROSCOPE
UNIVERSEL
AUTO-ECLAIRANT TYPE H



*Pendant,
les années
sombres...*

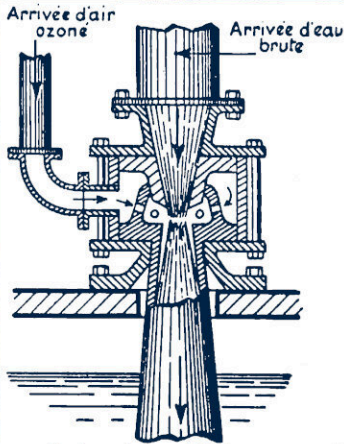
NACHET

*travaillait
pour l'avenir*



MICROSCOPES
SCIENTIFIQUES
POUR TOUTES
APPLICATIONS

MICROSCOPES NACHET, 17, RUE St-SÉVERIN, PARIS-V°. Tél. ODE. 39-26



Sortie d'eau stérilisée
COUPE SCHEMATIQUE
d'un EMULSEUR OTTO
(140 Usines Installées)

MUNICIPALITES, INDUSTRIELS...

A L'AGE DE L'ELECTRICITE
STERILISEZ VOS EAUX
PAR L'AIR ELECTRISÉ...

consultez la

C^{IE} DES EAUX ET DE L'OZONE

PROCEDES: M. P. OTTO.

Capital. 35.000.000^{fr} 4, Rue du Général Foy, à PARIS. (VIII^e)
Lab: 78.90. —

*Captage, Traitement & Distribution des Eaux Potables Industrielles
& d'Irrigation - Installation & Exploitation de SERVICES MUNICIPAUX.*

ARTILLERIE ATOMIQUE

par **Maurice-E. NAHMIAS**

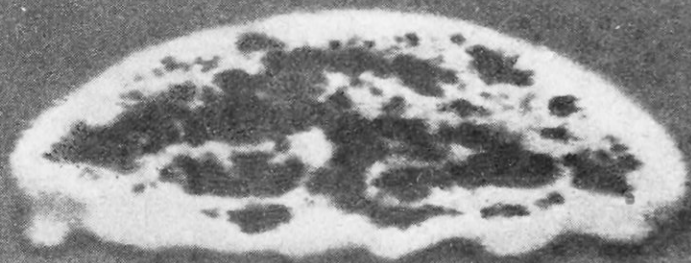
Docteur ès Sciences-Ph.D.

Assistant au Collège de France

Chef du Laboratoire de Radiobiologie de Marseille

SCIENCE ET VIE - NUMÉRO HORS SÉRIE

5, rue de La Baume, PARIS



16 juillet 1945, la première bombe atomique explose au Nouveau-Mexique (États-Unis).

L'AVÈNEMENT récent de la bombe atomique a enfin attiré l'attention du grand public et surtout des Pouvoirs publics sur l'intérêt primordial de la recherche scientifique dans l'existence même d'une nation. On s'est enfin pénétré de l'idée qu'il n'y a pas une recherche appliquée et une autre dans laquelle voguent les esprits purs, mais bien une recherche unique, sous des formes multiples, parmi lesquelles les mathématiques pures ne jouent pas le rôle le moins important.

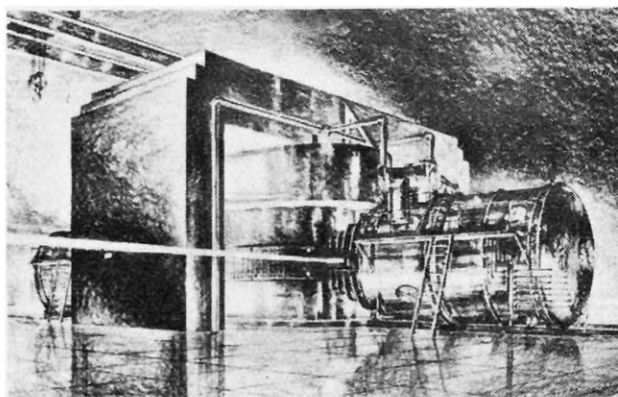
Ainsi, la mise au point d'une réalisation aussi grandiose qu'un bombardement par bombe atomique constitue un exemple frappant de coopération scientifique extraordinairement étendue entre savants spécialisés dans les domaines les plus variés. Il y eut d'abord les recherches des « briseurs d'atomes » ou physiciens dont l'activité s'emploie principalement à élucider expérimentalement les phénomènes mystérieux dont les noyaux des atomes sont le siège. Puis vinrent les spéculations des mathématiciens qui, faisant appel à des analogies hydrodynamiques, prédirent que tel atome devait être plus instable que tel autre. Vinrent ensuite les chimistes qui prouvèrent que les éléments formés à la suite du bombardement des noyaux d'uranium par des neutrons étaient plus légers et non plus lourds que l'uranium. Ce fut alors au tour des spectrographistes de masse d'isoler de l'uranium, tel qu'on le trouve dans la nature, les atomes instables de ceux qui le sont moins. Les spécialistes de la radioactivité achevèrent la solution du problème en préparant des sources maniables de neutrons. On voit venir maintenant les thermodynamiciens et les électrotechniciens qui sont anxieux de maîtriser cette énergie atomique pour la mettre au service de l'industrie.

Sous le terme général d'« artillerie atomique », il est possible de grouper tous les projectiles, électrisés ou non : neutrinos, électrons, positons, mésons, neutrons, protons, deutons, hélions, ions de toutes sortes, constituants infinitésimaux de la matière, à peine discernables avec les moyens les plus puissants dont disposent les laboratoires, qui constituent pour le physicien moderne à la fois des objets d'étude et des armes pour l'exploration profonde du monde matériel. Déjà de merveilleuses applications pratiques ont vu le jour : radioscopie et radiographie médicales et industrielles, microscopie électronique, curiethérapie, neutronthérapie, création de radioéléments artificiels pour les recherches chimiques, biologiques et les traitements médicaux, etc. Depuis peu est apparue la possibilité de libérer en quantité importante l'énergie intra-atomique. Les bombes de Hiroshima et de Nagasaki vont révolutionner non seulement les armements défensifs et offensifs et les principes de la conduite de la guerre, mais sans doute aussi la structure économique du monde de demain. Ces armes nouvelles seront ce que nous ferons d'elles. Les plus avertis parmi les hommes sont incapables de porter un jugement sérieux et « désintéressé » sur les suites immédiates, proches et lointaines, de cette découverte capitale.

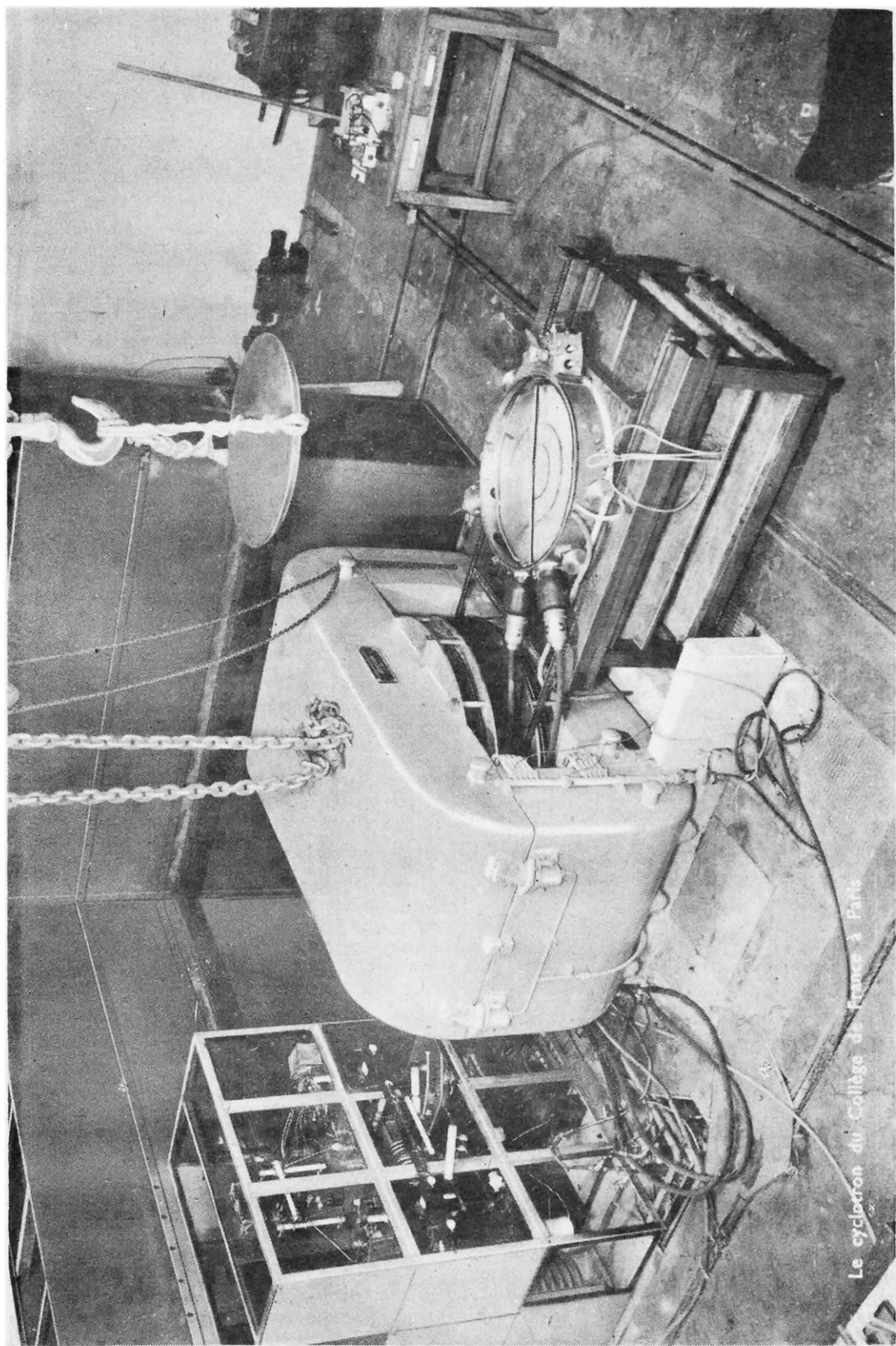
Pour se faire une opinion sur ce problème angoissant de l'après-guerre moderne, il faut en bien connaître les données. Les pages qui suivent sont écrites à l'intention de ceux qui veulent connaître l'essentiel, l'abordable — sans mathématiques — de ces questions de physique moderne.

SOMMAIRE

	Pages
Chapitre premier. — Particules et noyaux atomiques.....	5
— II. — Radioactivité et projectiles naturels.....	9
— III. — Les techniques d'accélération des particules électrisées.....	15
— IV. — Artillerie électronique et rayons X....	38
— V. — Le microscope électronique.....	53
— VI. — L'action biologique des radiations.....	59
— VII. — Neutrons et neutronthérapie.....	63
— VIII. — La radioactivité en biologie.....	69
— IX. — Chimie nucléaire, astrophysique et rayons cosmiques.....	77
— X. — Neutrino, mésoton, positon.....	86
— XI. — De la bombe atomique à l'exploitation industrielle de l'énergie atomique..	93



Le cyclotron est le plus puissant moyen dont on dispose au laboratoire pour pénétrer les noyaux atomiques et provoquer des transmutations. La couverture montre le cyclotron de 4 500 t. du professeur américain E. O. Lawrence, qui doit fournir des énergies de l'ordre de 100 millions d'électrons-volts, et dont le gigantesque électroaimant a servi à construire un des « calutrons » qui ont isolé l'uranium 235 pour la bombe atomique.



Le cyclotron du Collège de France à Paris

PARTICULES ET NOYAUX ATOMIQUES

QU'EST-CE qu'un projectile ? C'est une portion de matière animée d'une certaine vitesse. Qu'entend-on par matière, par masse et par vitesse d'un projectile ? Occupons-nous d'abord de la masse.

Les masses

Le *poids* d'un corps est la force avec laquelle la Terre l'attire. Cette force varie en raison inverse du carré de la distance du corps au centre de la Terre, car tout se passe comme si toute la masse terrestre qui exerce l'attraction était concentrée en son centre. De plus, la force centrifuge due à la rotation de la Terre sur elle-même n'a évidemment pas la même valeur à l'équateur, où elle est maximum, et aux pôles, où elle est nulle. Le poids d'un corps dépend donc de sa position par rapport à la Terre. Notre planète n'étant pas une sphère parfaite, le poids augmente de $1/200^e$ de sa valeur environ lorsqu'on le transporte de l'équateur renflé aux pôles aplatis. Un corps pesant 1 kg-force au niveau de la mer, sous notre latitude, ne pèse plus que 0,999 kg-force à 3 km d'altitude. On ne peut donc pas prendre le kilogramme-force comme étalon universel.

Les physiciens ont choisi pour comparer entre eux les corps matériels une qualité invariable qui est leur *masse*. Elle est fondée sur la constatation suivante : le rapport des poids de deux corps, en un même lieu, est indépendant du lieu où se fait l'expérience (ce lieu peut être choisi n'importe où sur la Terre ou même sur un autre astre). On peut dire aussi, ce qui revient au même, que les poids de différents corps sont proportionnels à des quantités constantes pour chacun d'eux, que nous appellerons leurs « masses », le coefficient de proportionnalité étant le même pour tous, mais variable d'un lieu à un autre. Ce coefficient est *l'intensité de la pesanteur* au lieu considéré, désignée par la lettre *g*.

A Paris, elle est mesurée (dans le système d'unités international centimètre-

gramme-seconde, ou C. G. S.) par le nombre 981. Cela veut dire que, si la résistance de l'air est supprimée — en opérant dans une enceinte vide d'air — la vitesse déjà acquise par un corps qui tombe (qu'il soit une plume ou bloc de plomb) s'accroît d'une vitesse supplémentaire égale à 981 cm par seconde pendant chaque seconde de chute libre.

D'un autre point de vue, la masse d'un corps peut être assimilée à un coefficient d'inertie. Plus la masse est grande et plus il faut d'énergie pour lui imprimer une vitesse donnée, ce qui tombe sous le sens. Cette masse a longtemps été considérée comme invariable. On a reconnu depuis quelques années que cela n'est vrai que si le corps est au repos par rapport au système de référence dans lequel s'effectuent les observations, en l'espèce celui auquel nous sommes liés sur la Terre. Einstein a démontré, et l'expérience a vérifié, que la masse d'un corps en mouvement augmente avec sa vitesse. La loi d'Einstein précise qu'une masse aussi petite que l'on voudra ne peut atteindre la vitesse de la lumière, qui est de 300 000 km/s, sans devenir infinie. Ceci étant absurde, la vitesse de la lumière doit être considérée comme une limite absolue pour les particules matérielles.

Voulons-nous provoquer chez un électron une variation de masse de 1 % de sa valeur au repos ? Nous devrons l'accélérer par une chute de tension de 10 000 V. Pour obtenir le même résultat avec un proton, considérablement plus « lourd », ainsi que nous le verrons plus loin, c'est-à-dire doué d'une inertie beaucoup plus grande, il ne faudra pas moins de 10 millions de volts.

Ceci nous conduit à définir les éléments ultimes de la matière : électrons, protons et neutrons.

La matière

La matière est composée de corps simples et de corps composés. Parmi les corps simples, au nombre de 92 (voir la table

page 34) actuellement connus, on peut citer les plus communs : aluminium, oxygène, fer, étain, et les plus rares : platine, radium, etc. Quant aux corps composés, ils sont innombrables et on en connaît plusieurs centaines de mille, entre lesquels on a coutume de faire une distinction entre ceux du monde minéral et ceux du monde organique. L'eau, le bronze, le laiton, la silice, les kaolins ou alumino-silicates, les micas, etc., appartiennent au premier groupe. Dans le second, domaine de la chimie organique, on trouve les alcools, les levures, les protéines, la cellulose, les hormones, les vitamines, etc. Tous ces corps composés sont des combinaisons entre deux ou plusieurs parmi les 92 corps simples. Ceux-ci, à leur tour, dérivent de l'arrangement plus ou moins compliqué d'un certain nombre de particules élémentaires : protons, électrons et neutrons. Certains théoriciens ont même voulu voir dans le neutron l'assemblage d'un proton et d'un électron. Une, deux ou trois particules élémentaires, voilà les « briques » insécables avec lesquelles tous les édifices matériels sont constitués.

De quoi sont composés enfin ces éléments ultimes ? La réponse semblera très évasive, et pour cause ! Le langage courant devient, dans ce domaine, de plus en plus impuissant à exprimer tout ce que peut recéler une théorie mathématique, et parfois même une simple équation. Nous avons vécu pendant des millénaires dans le domaine « macroscopique » des molécules et des atomes. C'est depuis un demi-siècle à peine que mathématiciens et physiciens jonglent avec les électrons à l'état libre et avec les photons ou « grains » de lumière (voir chapitre IV).

C'est depuis vingt ans seulement qu'est apparu à ces mêmes chercheurs l'aspect « complémentaire » des ondes et des corpuscules. C'est depuis dix ans seulement que le grand rêve des alchimistes est réalisé et que les réactions de transmutation ont ouvert aux hommes le vrai monde « microscopique », celui de l'infiniment petit qui, chose merveilleuse, explique tous les jours un peu plus les mystères de l'infiniment grand cosmique.

Rien d'étonnant donc que notre langage ne puisse suivre cette prodigieuse moisson de découvertes modernes. Il faut faire confiance à ceux qui manipulent mieux les équations ou les appareils que le langage le plus riche et le plus parfait

qui soit. Nous ne serions pas plus avancés de savoir qu'un électron ne peut être considéré ni comme un point, ni comme un anneau, mais plutôt comme un nuage.

Par ailleurs, un électron peut s'annihiler en tant que matière et se transformer intégralement en énergie rayonnante, de l'ordre de un dix-millième de milliardième de watt.seconde. Inversement, et sans qu'il y ait miracle, un rayonnement peut soudainement se métamorphoser et se cristalliser en matière plus pondérable, comme un électron. Si l'électron qui s'évanouit possède une vitesse appréciable, l'énergie rayonnante sera supérieure à 10^{-13} watts.seconde, et pareillement, si l'énergie qui se matérialise est supérieure à cette valeur, l'électron qui en naîtra sera animé d'une vitesse correspondante.

Pour la commodité de l'exposition et pour traiter les problèmes, ne fût-ce qu'en première approximation, on admet que l'électron a une masse insécable de $0,9 \cdot 10^{-27}$ g et un rayon minimum de $1,9 \cdot 10^{-13}$ cm. Il en faudrait

1 100 000 000 000 000 000 000 000 pour faire 1 g. On a trouvé expérimentalement et par diverses méthodes que sa charge électrique négative (signe conventionnel) est de $4,77 \cdot 10^{-10}$ unités électrostatiques C. G. S., soit $1,6 \cdot 10^{-19}$ coulombs.

La masse du proton est 1 840 fois plus grande que celle de l'électron, et sa charge électrique est identique, mais de signe contraire (positif). Si on a découvert des particules comme le *mésoton*, sur lequel nous reviendrons plus loin, ayant des masses intermédiaires entre celle du proton et celle de l'électron, on n'a pu jusqu'ici mettre en évidence expérimentalement l'existence de particules (notamment *neutrinos*, voir chap. X) de masse inférieure à celle de l'électron, dont seules des considérations mathématiques ont conduit à admettre l'existence. Quant au *neutron*, il est dénué de charge électrique, et sa masse est voisine de celle du proton, $1,6 \cdot 10^{-24}$ g.

Les noyaux atomiques

Prenons un proton et, pour compenser sa charge positive, faisons graviter autour de lui un électron. Nous obtenons de cette manière un atome d'hydrogène.

Ajoutons au proton un neutron. Ils forment un noyau dont la charge électrique est toujours égale à celle d'un pro-

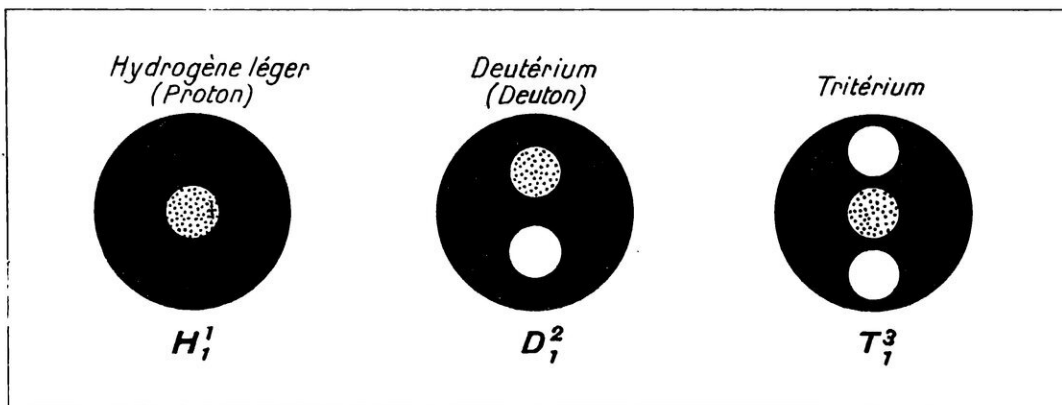


FIG. 1. — LES TROIS SORTES D'HYDROGÈNE

Dans les noyaux se trouvent respectivement : 1 proton, 1 proton et 1 neutron, 1 proton et 2 neutrons. Les protons sont figurés en grisé et les neutrons en blanc.

ton, puisque le neutron ne possède aucune charge électrique, mais dont la masse est double, puisque la masse du neutron est presque identique à celle du proton. Si nous faisons graviter un électron autour de ce noyau, nous obtenons un nouvel atome, électriquement neutre, qui possédera pratiquement les mêmes propriétés chimiques que l'atome précédent, car les propriétés chimiques des éléments dépendent uniquement des électrons planétaires. C'est encore de l'hydrogène. Il en serait de même si l'on ajoutait d'autres neutrons dans le noyau contenant le proton unique. Nous voyons ainsi qu'il peut exister plusieurs sortes d'hydrogène : de l'hydrogène « léger » lorsque aucun neutron n'est soudé au proton, du *deutérium* ou hydrogène « lourd » lorsque un neutron est cimenté au proton dans le noyau, et du *tritérium* si deux neutrons sont groupés avec le proton. Ces trois édifices nucléaires ont des masses égales à une, deux et trois unités de masse (la masse du proton étant prise pour unité) et une charge identique égale à un (la charge du proton, égale et de signe contraire à celle de l'électron, étant prise pour unité).

On dit que ce sont des *isotopes*, mot tiré du grec qui signifie « occupant la même place », en l'occurrence la même case du tableau des éléments chimiques, ou tableau de Mendéléïeff (page 34).

Poursuivons notre construction. Ajoutons un second proton au tritérium. Nous obtenons un noyau de masse 4 et de charge 2. Pour avoir un atome neutre, nous lui attacherons, comme des planètes, deux électrons périphériques. Nous cons-

taterons expérimentalement que nous avons obtenu une substance complètement différente du tritérium, du deutérium ou de l'hydrogène léger. Cette nouvelle entité chimique est l'*hélium*. On le représente par le symbole He en chimie ordinaire, et par He_2^4 en chimie nucléaire pour bien rappeler qu'il s'agit de l'isotope de masse 4 de l'hélium dont la charge est 2.

Si à cet isotope nous ajoutons un troisième proton, nous avons le lithium (Li_3^7) qui n'existe pas à l'état stable dans la nature. Les assemblages de particules obéissent en effet à certaines lois jusqu'ici empiriques, comme celles que l'on rencontre dans le domaine macroscopique, en résistance des matériaux par exemple.

Le Li_3^7 existe et son noyau contient 3 protons et 3 neutrons. Sautons à l'oxygène dont le noyau contient 8 protons et de 7 à 11 neutrons, d'où les isotopes O_8^{16} , O_8^{17} , O_8^{18} et O_8^{19} , ce dernier étant instable et radioactif. Ainsi les propriétés physiques des isotopes d'un élément chimique peuvent être différentes les unes des autres, notamment dans certaines structures fines des spectres optiques, et dans leur stabilité plus ou moins grande, ce qui peut entraîner des taux de désintégration différents pour deux ou plusieurs isotopes radioactifs.

Les noyaux atomiques apparaissent analogues à de grosses gouttes d'eau dont la tension superficielle parviendrait à maintenir rigides certains des édifices possibles avec des gouttelettes élémentaires. De même, une bulle de savon crève lorsque son rayon dépasse une valeur critique.

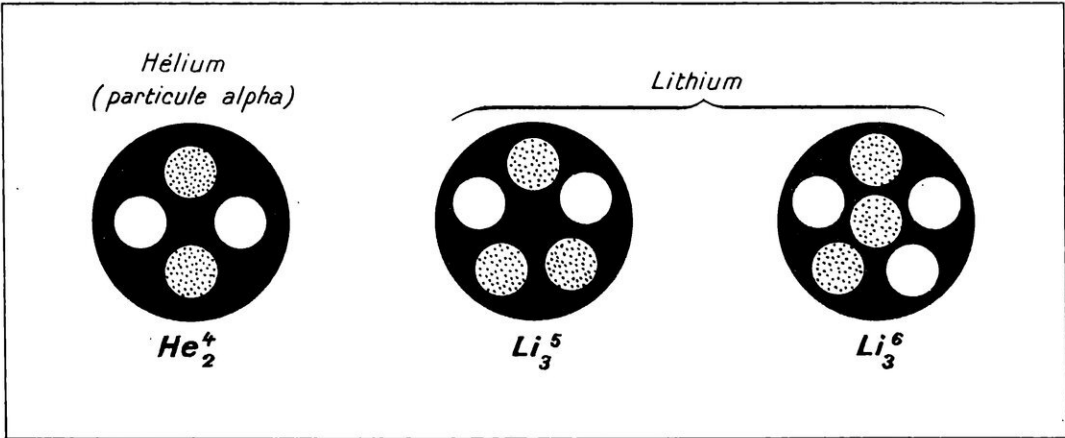


FIG. 2. — NOYAUX D'HÉLIUM ET DE LITHIUM

Dans cette figure, comme dans les schémas analogues qui suivent, il ne faut pas considérer comme rigoureuse la disposition des particules élémentaires. Cette disposition est encore inconnue et probablement régie par des lois de symétrie non précisées.

Pourquoi tel isotope du fer, par exemple, (le Fe^{56}_{26}) forme-t-il 90 % du fer naturel, non seulement sur la Terre, mais aussi dans les aérolithes qui nous tombent du ciel, tandis que son frère, stable comme lui, le Fe^{54}_{26} , qui contient deux neutrons de plus, n'existe qu'au taux de 0,5 % dans le magma de tous les isotopes du fer ? Il y a là probablement encore une question de stabilité nucléaire à la formation et à la conservation. Un édifice nucléaire a sa propre « sensibilité » vis-à-vis des particules ambiantes. Il y a, en effet, dans tout l'Univers, un échange incessant d'énergie sous forme de particules et de radiations. Une artillerie gigantesque transporte matériaux et énergie d'un point à l'autre dans l'espace sidéral. Un équilibre finit par s'établir, et c'est pourquoi nous connaissons déjà quelque 600 édifices nucléaires stables ou radioactifs répartis entre les 92 éléments chimiques actuellement bien catalogués.

En résumé, c'est la vie intérieure des noyaux atomiques qui crée l'individualité chimique. Il est de la plus haute importance pour notre existence même que le noyau d'oxygène O^{16}_8 soit plus stable que son « isobare » (de même masse), l'azote N^{16}_7 . Tous les deux contiennent 16 particules, mais le premier possède 8 protons et 8 neutrons tandis que le second n'a que 7 protons, contre 9 neutrons. L'échange d'un neutron par un proton dans l'azote suffit à rendre la « vie » possible. On peut

citer d'autres exemples impressionnants. Remplaçons un proton par un neutron dans l'atome de mercure Hg^{196}_{80} et nous obtenons un noyau atomique d'or Au^{196}_{79} . Introduisons un neutron dans l'uranium U^{235}_{92} et nous brisons le noyau en récupérant une quantité d'énergie plusieurs millions de fois supérieure à celle que nous y avons introduite.

Certaines de ces modifications s'opèrent spontanément, c'est-à-dire sans que nous puissions les contrôler et pour des causes non élucidées. Ainsi le radium se transformera inéluctablement en ce vil métal qu'est le plomb, et rien ne peut arrêter ou ralentir cette déchéance. L'artillerie cosmique est-elle responsable de ces transmutations ? Nous en discuterons plus loin et nous verrons en détail, dans des cas particuliers, l'origine de l'énergie stockée dans l'atome.

Pour provoquer ces transmutations au laboratoire, pour disséquer les noyaux atomiques et conquérir quelques « parcelles de vérité » ; il faut pouvoir atteindre ces domaines de l'infiniment petit avec une artillerie appropriée.

Nous allons voir comment on utilise les particules atomiques, comment on les accélère, comment on bombarde les atomes et comment les résultats obtenus peuvent bouleverser non seulement les théories, mais l'existence même de millions d'êtres humains.

RADIOACTIVITÉ ET PROJECTILES NATURELS

A la fin du siècle dernier, l'observation des phénomènes de fluorescence excités par les rayons X, que Röntgen venait de découvrir, donna aux physiciens l'idée de reprendre l'étude des corps fluorescents.

C'est au cours de ces travaux que Henri Becquerel, étudiant la fluorescence des sels d'uranium, découvrit par hasard que ces sels impressionnaient la couche sensible d'une plaque photographique à travers du papier noir.

M^{me} Curie fut séduite par cette recherche et la choisit comme sujet de thèse pour un doctorat de physique. Elle chercha dans les minerais d'urane ce qui, en dehors de l'uranium, pouvait émettre ces rayons « pénétrants », et c'est ainsi que, avec l'aide du grand physicien qu'était son mari Pierre Curie, elle découvrit le radium, beaucoup plus « actif » que l'uranium. Le rayonnement émis par ces deux éléments chimiques fut analysé, et l'on mit en évidence qu'il s'agissait pour une part de rayons corpusculaires, et pour une autre part de radiations immatérielles, de nature électromagnétique (fig. 3). Les premiers comprenaient eux-mêmes deux flux de particules : des électrons, chargés négativement (constituant les *rayons bêta*), et des particules chargées positivement comme des protons, mais possédant une charge double et une masse quadruple, analogues donc à des noyaux d'hélium. Ils constituent les *rayons alpha*. Les radiations électromagnétiques furent appelées *rayons gamma*. Ces rayons gamma sont de même nature (électromagnétique) que les ondes de la radio, la lumière visible ou les rayons X, mais de beaucoup plus courte longueur d'onde et beaucoup plus pénétrants. Ils sont issus de perturbations ayant leur siège dans les noyaux, alors que les ondes de la radio sont engendrées par des électrons libres oscillant dans des conducteurs (les antennes) et que lumière et rayons X sont produits, comme nous le verrons plus loin, par des perturbations dans la disposition des électrons plané-

taires, c'est-à-dire bien loin des noyaux atomiques.

L'étude de la radioactivité prit un essor mondial. A Vienne, Berlin, Manchester, Cambridge, Harvard, Chicago, Montréal, des savants se consacrèrent à ces recherches. C'est à Manchester que Rutherford et son élève Bohr, aujourd'hui aussi célèbre que son maître défunt, définirent non seulement les lois auxquelles obéissent les phénomènes radioactifs — indépendamment de leurs causes profondes toujours inconnues — mais imaginèrent en même temps un modèle mécanique de l'atome qui servit de levain à toute la physique moderne. Ils représentèrent l'atome comme un petit système solaire dont le noyau figurait le soleil et les électrons les planètes. Les phénomènes radioactifs furent tout de suite rapportés au noyau, tandis que les rayons X, les rayons ultraviolets, visibles, infrarouges, les valences et, en général, les affinités chimiques étaient attribués aux électrons-planètes. Il est vrai que cette conception admettait l'existence d'électrons à l'intérieur des noyaux pour cimenter les protons, car on ne connaissait à cette époque (1912) ni les neutrons, ni les ondes de de Broglie attachées aux électrons, ni beaucoup d'autres choses qui rendent impossible toute présence d'électrons à l'intérieur des noyaux. Mais la perfection ne s'atteint pas d'emblée, et le modèle d'atome proposé fut d'ailleurs si suggestif qu'il permit de nombreuses découvertes, notamment celle de Moseley, à Manchester. Ce jeune physicien, mort prématurément aux Dardanelles, en 1915, prouva que les spectres d'émission de rayons X donnés par diverses substances suivaient des lois (voir chap. IV) tout à fait conformes aux vues de Rutherford-Bohr.

Voici comment on conçoit encore la radioactivité. On observe que les noyaux d'uranium se désintègrent spontanément et se transmutent ainsi à une cadence invariable en un autre élément chimique. Un noyau d'uranium de masse 238 et de

charge positive 92 : U_{92}^{238} , pris parmi ses congénères à un moment donné fixé par le hasard (car c'est seulement statistiquement que le phénomène obéit à des lois rigoureuses), émet une particule alpha, de masse 4 et de charge 2. Il se transforme ainsi en un élément chimique de charge 90 et de masse 234. Cet élément est lui-même radioactif, et on voit sur le schéma de la figure 4 les transformations successives de ce noyau d'uranium qui finalement arrête sa carrière aventureuse en se fixant — amoindri de 10 charges positives et de 32 unités de masse — dans l'état chimique stable du plomb Pb_{82}^{206} .

La cadence à laquelle se fait une telle opération dans une masse contenant d'innombrables atomes d'uranium (on en compterait 420 milliards de milliards par gramme) est d'allure exponentielle. Cela veut dire que le nombre des atomes qui se désintègrent en une seconde représente toujours la même fraction, la moitié, ou le tiers, ou le dixième, ou le millième, etc., du nombre des atomes restant à désintégrer dans la masse. Il est commode, au lieu de la seconde, de prendre comme unité de temps celui au bout duquel le nombre d'atomes présents a déchu de

moitié. On le désigne généralement par T. La loi exponentielle de Rutherford dit que, si on représente par le chiffre 100 — pour fixer les idées — le nombre d'atomes d'une substance radioactive quelconque présents au début d'une expérience, il ne restera plus que 50 atomes de cette substance au bout de T secondes. Les 50 autres atomes se retrouveront disséminés dans la masse considérée sous une autre forme chimique. Au bout de deux fois T secondes, il n'en restera plus que 25, ou $50 : 2$, ou $100 : 2^2$; au bout de 3 T secondes, plus que 12,5, soit $100 : 2^3$; au bout de 4 T secondes, plus que 6,25, soit $100 : 2^4$; etc.

Cette unité de temps T est appelée *période radioactive*. Elle varie d'un radio-élément à un autre, car la cadence de la désintégration nucléaire peut être plus ou moins rapide. T peut prendre toutes les valeurs possibles entre plusieurs milliards d'années et moins d'un millionième de seconde suivant la nature du noyau. On connaît actuellement une trentaine de radioéléments naturels classés en trois familles, suivant le schéma de la figure 4.

Dans une même substance radioactive, rien ne distingue en général un noyau d'un autre, et c'est le hasard seul qui fait que tel atome de radium, par exemple, se désintègre à tel moment plutôt que son congénère. C'est le phénomène global, statistique, concernant toute la population nucléaire d'une source radioactive qui obéit à la loi de Rutherford, et non chaque désintégration individuelle. On connaît pourtant des éléments comme le radium C ou l'actinium C dont tous les noyaux, bien que possédant le même nombre de protons et de neutrons, ne doivent pas être identiques, car ils se désintègrent de deux manières, non seulement avec des périodes différentes, mais avec des émissions différentes, alpha ou bêta. Ils seraient donc composés de deux sortes d'atomes que l'on appelle des « isomères radioactifs ». On commence seulement à entrevoir les raisons de cette isométrie, et on pense qu'elle réside dans l'état d'excitation des noyaux.

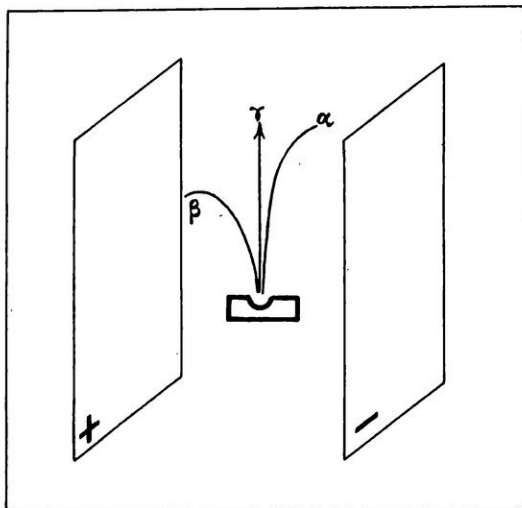


FIG. 3. — LE RAYONNEMENT DES RADIOÉLÉMENTS NATURELS

Le rayonnement complexe émis par le radium, par exemple, peut être analysé en étudiant l'action d'un champ électrique. On voit alors qu'il comprend : les rayons alpha, chargés d'électricité positive, attirés par l'électrode négative ; les rayons bêta, chargés d'électricité négative, attirés par l'électrode positive ; les rayons gamma, très pénétrants, non électrisés et non déviés.

Projectiles naturels

Les particules et radiations émises par les substances radioactives sont animées d'énergies considérables qui en font de véritables projectiles de dimensions atomiques. Cette artillerie fut mise en œuvre

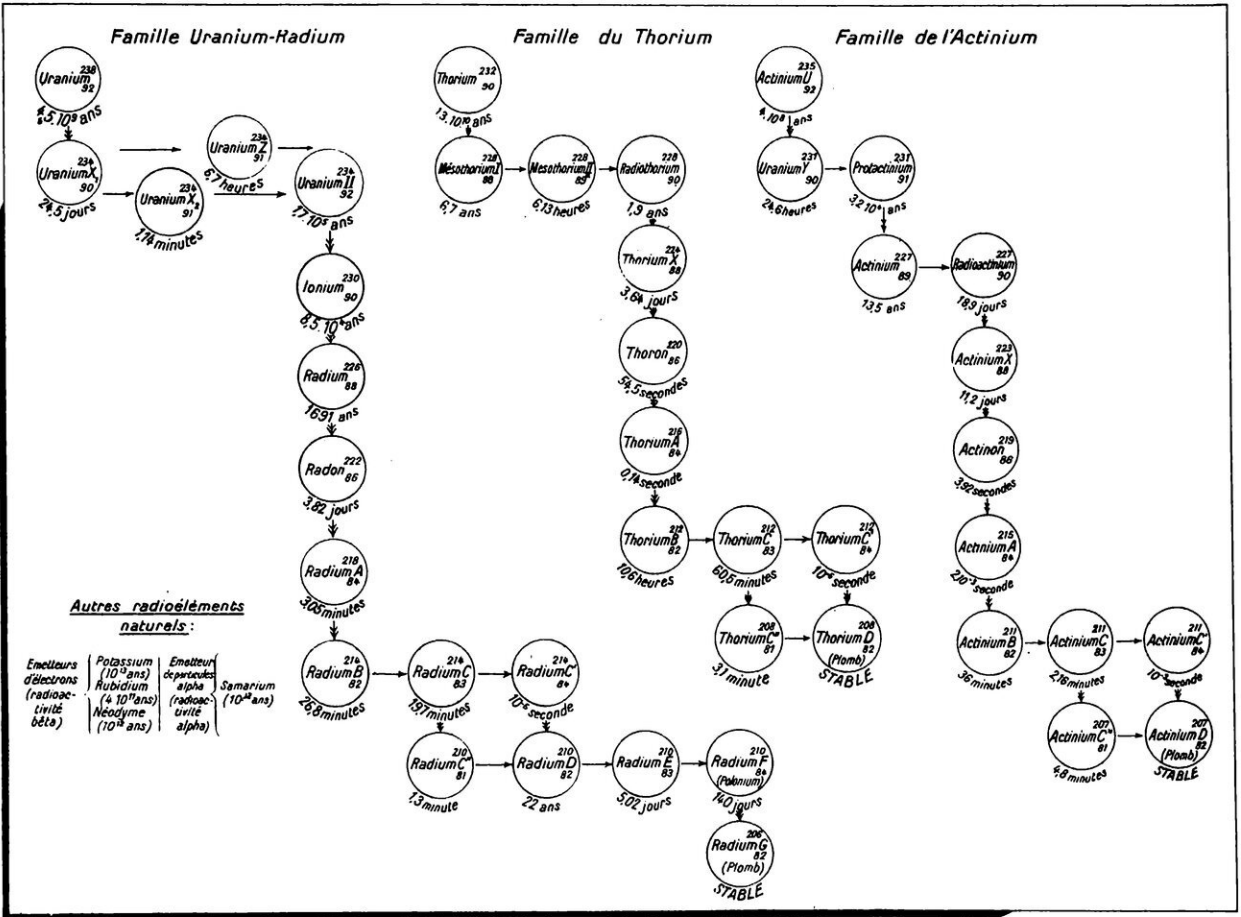


FIG. 4. — LES TROIS FAMILLES DE RADIOÉLÉMENTS NATURELS

Le passage d'un élément au suivant s'accompagne de l'émission soit d'un électron (radioactivité bêta), soit d'une particule alpha (radioactivité alpha). La première est représentée par une flèche simple ; la seconde par une flèche double. Dans le premier cas, la masse du noyau atomique (chiffre du haut) ne change pas, mais, l'électron étant doté d'une charge négative unité, la charge positive du noyau (chiffre du bas) s'accroît d'une unité : le nouvel élément a été placé sur la même ligne horizontale que celui qui lui a donné naissance. Dans le deuxième cas, la particule alpha ayant une masse 4 et une charge 2 (2 protons et 2 neutrons), les chiffres du haut et du bas décroissent, l'un de 4 unités, l'autre de 2 : le nouvel élément a été placé au-dessous du premier. Pour chaque élément nous avons indiqué la « période » radioactive, qui varie énormément d'un élément à l'autre : 1,3 milliard d'années pour le thorium, par exemple, et 1 milliardième de seconde pour le radium C' ou le thorium C'.

en 1919, par Rutherford, contre les noyaux d'azote. Il obtint ainsi la première transmutation provoquée de main d'homme. L'azote se transforme, sous l'action des projectiles alpha émis par le radium ou par le polonium, en oxygène, en expulsant un proton. La réaction I (fig. 5) schématise cette transmutation.

Vu la petitesse des projectiles et des cibles offertes par les noyaux d'azote, il faut un très grand nombre de particules alpha pour atteindre un seul noyau. La plupart des projectiles passent à côté et ne provoquent aucune transmutation. Il faut près d'un million de projectiles alpha pour marquer un coup au but. Les sources radioactives naturelles des laboratoires

n'émettant que quelques milliards de projectiles alpha par seconde ne permettent donc de transmuter que quelques dizaines de milliers de noyaux, c'est-à-dire des masses infinitésimales, seulement mesurables avec des appareils spéciaux : scintillations, chambre de Wilson, compteur de Geiger, sur lesquels nous aurons l'occasion de revenir.

Ce n'est qu'en 1932 que les rayons alpha bombardant du béryllium nous fournirent les premières sources de neutrons, suivant la réaction II (fig. 5).

C'est avec les particules alpha que M. et Mme Joliot-Curie découvrirent en 1934 la radioactivité artificielle, réaction III (fig. 5).

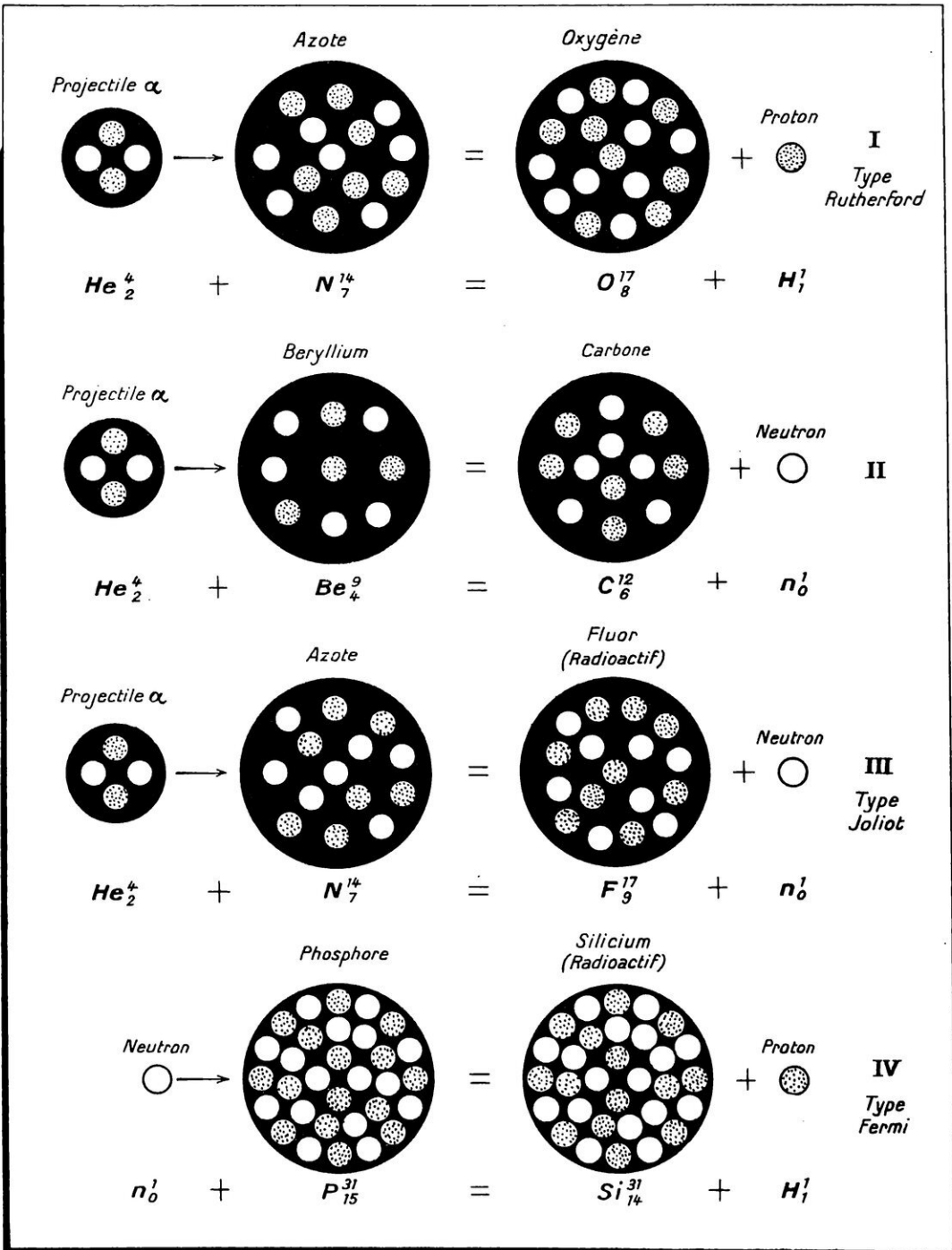


FIG. 5 — QUATRE EXEMPLES DE RÉACTIONS NUCLÉAIRES

Les protons sont ici encore figurés en grisé et les neutrons en blanc. Dans les formules, les chiffres en indices correspondent au nombre de protons des noyaux (charge positive des noyaux) et ceux en exposants au nombre total de particules protons et neutrons (masse des noyaux). La particule alpha, noyau d'hélium, est ainsi représentée par He_2^4 , le proton, noyau d'hydrogène par H_1^1 et le neutron par n_0^1 , car sa charge est nulle et sa masse unité. Pour être complet il aurait fallu faire figurer sur ces formules les énergies dont sont animées les particules incidentes, particules alpha et neutrons, et les particules expulsées, protons et neutrons.

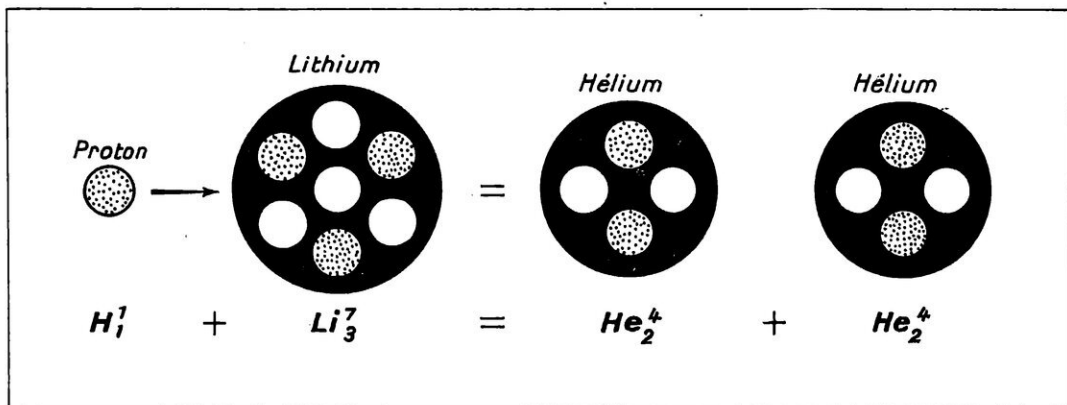


FIG. 6. — LA TRANSMUTATION DU LITHIUM PAR LES PROTONS

Immédiatement après l'annonce de cette découverte, le physicien italien Fermi, à Rome, utilisant les neutrons fournis par la réaction II, découvrit les réactions du type IV qui donnent également des éléments radioactifs artificiels (fig. 5).

Projectiles artificiels

Il fut vite évident que, pour disposer de sources importantes de neutrons ou pour obtenir en grand nombre des transmutations du type Rutherford, Joliot ou Fermi, il fallait produire artificiellement des faisceaux de projectiles plus intenses que ceux que livre la radioactivité naturelle.

Les premiers furent mis en œuvre en 1932, par Cockcroft et Walton à Cambridge. Des noyaux d'hydrogène (protons) accélérés par un champ électrique et dirigés sur une cible de lithium en provoquaient la transmutation avec émission de deux particules alpha (fig. 6).

Simultanément, aux États-Unis, Lawrence, avec son cyclotron, Van de Graaff et Tuve, avec leur machine électrostatique, se mirent à accélérer des noyaux d'hydrogène (protons), des noyaux d'hydrogène lourd de masse 2 (deutons), des noyaux d'hélium (hélions, analogues aux particules qui constituent les rayons alpha des radioéléments naturels).

Grâce à ces techniques perfectionnées d'accélération de particules, que l'on obtient ainsi en beaucoup plus grande quantité et dotées d'énergies supérieures à ce que l'on observe dans les émissions des radioéléments naturels, le nombre de transmutations que l'on sait provoquer augmente presque quotidiennement. En trois ans, de 1934 à 1937, on en réalisa

plus de 600, parmi lesquelles 300 environ donnent des radioéléments artificiels.

Sur le tableau (fig. 8) nous avons groupé un certain nombre de réactions nucléaires typiques. Les premières (I à IV) sont provoquées par des deutons et constituent des sources de neutrons utilisables pour provoquer d'autres transmutations.

Des sources de rayons gamma furent obtenues en bombardant le béryllium ou le bore avec des hélions ou des protons accélérés, ou encore en fabriquant des radioéléments artificiels émetteurs de rayons bêta et gamma, comme le radio-cuivre ou le radioyttrium.

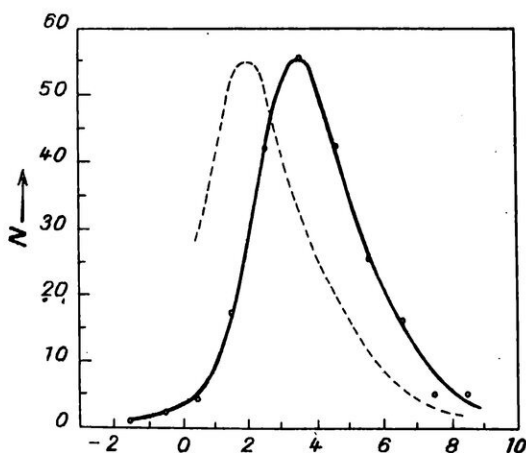


FIG. 7. — COMMENT SE RÉPARTISSENT LES PÉRIODES DES RADIOÉLÉMENTS ARTIFICIELS

En abscisses ont été portées les périodes (ou, plus exactement, les logarithmes des périodes exprimées en secondes) et en ordonnées le nombre de radioéléments correspondants. La courbe en trait interrompu est celle que la théorie laisse prévoir et celle en trait continu celle effectivement relevée.

I	$H_1^2 + H_1^2 = He_2^3 + n_0^1$ Deuton Deuton Hélium Neutron
II	$H_1^2 + Li_3^7 = Be_4^8 + n_0^1$ Deuton Lithium Béryllium Neutron
III	$H_1^2 + Be_4^9 = B_5^{10} + n_0^1$ Deuton Béryllium Bore Neutron
IV	$H_1^2 + B_5^{11} = C_6^{12} + n_0^1$ Deuton Bore Carbone Neutron
V	$H_1^2 + Mg_{12}^{26} = Mg_{12}^{27} + H_1^1$ Deuton Magnésium Magnésium radioactif Proton
VI	$H_1^2 + Se_{36}^{82} = Br_{35}^{82} + 2n_0^1$ Deuton Sélénium Brome radioactif Neutrons
VII	$H_1^2 + Au_{79}^{197} = Ir_{77}^{196} + H_1^1 + He_2^4$ Deuton Or Iridium radioactif Proton Hélium
VIII	$H_1^1 + Se_{36}^{82} = Br_{35}^{82} + n_0^1$ Proton Sélénium Brome radioactif Neutron
IX	$n_0^1 + K_{19}^{39} = K_{18}^{38} + 2n_0^1$ Neutron Potassium Potassium radioactif Neutrons
X	$n_0^1 + Sc_{21}^{45} = Sc_{21}^{43} + 3n_0^1$ Neutron Scandium Scandium radioactif Neutrons
XI	$n_0^1 + Mn_{25}^{55} = V_{23}^{52} + He_2^4$ Neutron Manganèse Vanadium radioactif Hélium
XII	$n_0^1 + Ti_{22}^{50} = Ti_{21}^{51} + \gamma$ Neutron Titane Titane radioactif Radiation gamma
XIII	$n_0^1 + Ir_{77}^{192} = Ir_{77}^{193}$ Neutron Iridium Iridium radioactif
XIV	$n_0^1 + U_{92}^{235} = \text{Rupture du noyau} + \text{neutrons}$ Neutron Uranium
XV	$H_1^2 + Be_4^9 = Be_4^8 + H_1^1$ Deuton Béryllium Béryllium Tritérium
XVI	$H_1^2 + Sn_{50}^{122} = Sb_{51}^{124} + \gamma$ Deuton Etain Antimoine Radiation gamma
XVII	$H_1^1 + Be_4^9 = Be_4^8 + H_1^2$ Proton Béryllium Béryllium Deuton
XVIII	$H_1^1 + F_9^{19} = O_8^{18} + He_2^4$ Proton Fluor Oxygène Hélium
XIX	$H_1^1 + Li_3^7 = Be_4^8 + \gamma$ Proton Lithium Béryllium Radiation gamma
XX	$n_0^1 + N_7^{14} = Be_4^8 + Li_3^7$ Neutron Azote Béryllium Lithium

FIG. 8. — RÉACTIONS NUCLÉAIRES TYPES OBTENUES PAR BOMBARDEMENT DES ATOMES A L'AIDE DE PARTICULES ÉLÉMENTAIRES ACCÉLÉRÉES ARTIFICIELLEMENT (PROTONS OU DEUTONS) OU LIBÉRÉES AU LABORATOIRE (NEUTRONS)

Pour produire des radioéléments artificiels, les réactions des types V à XIII (fig. 8) furent découvertes. Parmi ces dernières on remarquera le bombardement de l'isotope 235 de l'uranium, U_{92}^{235} , par des neutrons, d'un caractère particulier puisqu'il aboutit à la rupture du noyau de l'uranium avec formation de nombreux radioéléments et libération d'une énergie considérable et de plusieurs neutrons. Cette réaction est à la base du fonctionnement de la bombe atomique. Étant donné son importance, nous lui consacrons tout un chapitre (Chap. XI).

Bien d'autres réactions typiques furent mises en évidence, au cours desquelles il y a transmutation des éléments bombardés, avec production d'éléments stables. Les réactions XV, XVI, XVII, XVIII, XIX et XX, obtenues tant avec des deutons qu'avec des protons ou des neutrons, en sont des exemples. Il n'est pas jusqu'aux rayons bêta (électrons) ou gamma (radiations électromagnétiques) qui ne puissent provoquer des transmutations. Bombardé par des électrons, le béryllium donne un de ses isotopes en émettant un neutron. Sous l'action de rayons gamma appropriés, le cuivre donne du radiocouvre en expulsant un neutron et le magnésium donne du sodium en émettant un proton. Nous verrons, à propos du *bétatron*, l'intérêt qui s'attache à l'obtention d'électrons dotés d'énergies élevées et de radiations électromagnétiques très pénétrantes.

L'emploi des produits de ces réactions, déchets de noyaux, particules libérées et radiations électromagnétiques émises fera l'objet d'autres chapitres. Mais il n'est pas inutile de souligner ici le caractère d'ores et déjà utilitaire des résultats acquis. La complexité de l'appareillage mis en œuvre dans ces recherches, le caractère abstrait des spéculations mathématiques qui les ont guidées ont pu sembler au profane bien loin des contingences de la vie humaine.

Les contemporains d'Ampère ou de Faraday souriaient sans doute aussi des travaux sans utilité apparente qui devaient nous donner la gamme innombrable des moteurs électriques, pour ne citer que cette seule réalisation. Cette fois, la recherche pure a été suivie de très près par les applications pratiques, et quelles applications ! médecine, biologie, industrie, guerre...

LES TECHNIQUES MODERNES D'ACCÉLÉRATION DES PARTICULES ÉLECTRISÉES

LA physique, la chimie, la biologie, la médecine font un emploi chaque jour plus étendu des particules atomiques électrisées, protons, deutons, hélions, ions de diverses natures, qui, accélérées par des champs électriques et magnétiques, peuvent acquérir une énergie considérable. Ces projectiles sont alors capables de produire, quand ils bombardent la matière, divers effets utiles : émission de rayons X, ruptures de noyaux atomiques, transmutations, émission de neutrons, destruction de tissus cancéreux, mutations, etc.

La production de faisceaux intenses de particules dotées de grandes vitesses exige la mise en œuvre d'un appareillage complexe qui comporte le plus souvent un générateur à très haute tension (un ou plusieurs millions de volts) alimentant un tube accélérateur où règne un vide poussé. Dans ce tube, les particules électrisées sont émises à une extrémité et, se trouvant dans un champ électrique de valeur élevée, sont soumises à une force dirigée suivant les lignes de force du champ, c'est-à-dire suivant l'axe du tube. Elles acquièrent rapidement une grande vitesse, d'autant plus grande que la chute de tension entre les deux extrémités du tube est plus élevée, et vont frapper finalement la cible qui leur est offerte.

D'autres techniques d'accélération font appel, non plus à la haute tension, mais à la haute fréquence. Tel est le cas des cyclotrons, en particulier, qui équipent maintenant de nombreux laboratoires dans tous les pays du monde. Enfin, nous verrons qu'un appareil de création récente, le béatron, qui opère, comme son nom le laisse deviner, sur des électrons (ou rayons bêta), est capable, avec des moyens relativement simples, de leur conférer des énergies considérables, les rendant aptes à effectuer, eux aussi, des transmutations.

Les générateurs de très hautes tensions

Pour créer une différence de potentiel entre deux conducteurs, on peut utiliser des machines de types divers. Nous allons les passer rapidement en revue.

Les *dynamos* courantes fournissent jusqu'à 1 000 V environ et, si des dynamos spéciales peuvent aller jusqu'à 20 000 V, cela est encore bien peu de chose en face des millions de volts que l'on obtient couramment avec les générateurs électrostatiques dont il sera question plus loin.

Les *batteries de piles et d'accumulateurs* sont à la fois encombrantes et d'un entretien difficile. On les utilise principalement pour la production de rayons X de grandes longueurs d'ondes, monochromatiques. Ce sont des rayons « mous », peu pénétrants, engendrés dans des tubes auxquels on applique une tension relativement peu élevée. Le rayonnement mou du molybdène (électrons frappant une anticathode de molybdène) a servi à Holweck et Lacassagne dans leurs travaux sur la délimitation des zones sensibles de certains microorganismes.

Avec les *bobines d'induction*, on produit aisément des tensions de l'ordre de 100 000 V, avec un faible débit.

On obtient des tensions sensiblement plus élevées, pendant un temps très court, avec les *générateurs à impulsions*, constitués par des batteries de condensateurs chargés en parallèle par une source à tension constante de quelques milliers de volts (fig. 10). Des éclateurs à boules mettent brusquement en série les condensateurs et fournissent une tension qui dure une fraction de seconde. Les condensateurs se rechargent à nouveau et le cycle recommence. L'installation du laboratoire Ampère, dirigé par le professeur Joliot, est illustrée sur la figure 9.

Le multiplicateur de tension, ou générateur en cascade, n'est qu'un modèle perfectionné du générateur précédent. Préconisé par Greinacher au début du siècle, il a été mis au point au Cavendish Laboratory, à Cambridge (Angleterre) par Cockcroft et Walton. La société Philips construit de tels générateurs comme celui de la figure 11, dont le schéma est donné par la figure 12.

La tension maximum de ces multiplicateurs est limitée, comme dans les générateurs électrostatiques (voir plus loin), mais ils peuvent fournir des courants ioniques importants, avec moins de difficultés que ces derniers. Les redresseurs sont soit des soupapes électroniques, appelées *kénotrons*, dont le filament peut être chauffé par des génératrices séparées entraînées au moyen de courroies isolantes, soit des redresseurs à gaz, soit enfin des valves à vapeur de mercure chauffées par un émetteur de haute fréquence. Quelques expérimenta-



FIG. 9. — TUBE PRODUCTEUR DE RAYONS X DE TRÈS GRANDE ÉNERGIE (3 MILLIONS DE VOLTS) AU LABORATOIRE AMPÈRE (CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ; DIRECTEUR : M. JOLIOT)

On aperçoit, à gauche, le générateur à impulsions et, au fond, le générateur à tension pulsatoire.

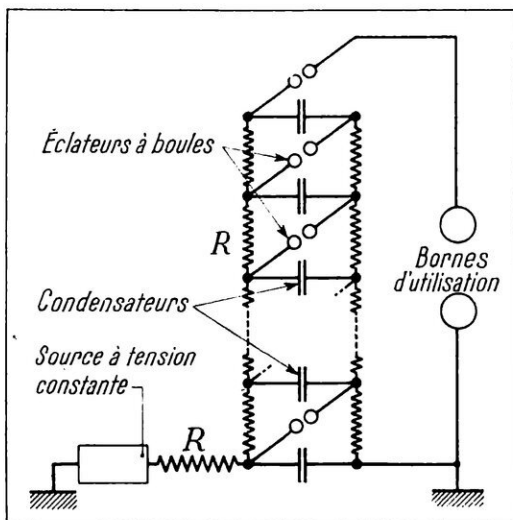


FIG. 10. — PRINCIPE DU GÉNÉRATEUR A IMPULSIONS

Les condensateurs sont chargés en parallèle à travers la résistance R par une source à tension constante de quelques dizaines de milliers de volts. Lorsque la tension atteint une valeur suffisante, des étincelles jaillissent entre les boules des éclateurs et les condensateurs se trouvent ainsi brusquement mis en série. Le tube d'accélération des ions est branché entre les bornes d'utilisation où, pendant un temps très court, est disponible une tension égale à la tension de chaque condensateur individuel multipliée par le nombre de condensateurs.

teurs utilisent même un banc vertical de plusieurs kénotrons démontables, dont le vide est fait en parallèle avec celui du tube accélérateur.

Lorsqu'on se tient au-dessous du million de volts, les meilleurs engins semblent bien être les transformateurs combinés ou non avec des soupapes électroniques (kénotrons).

On obtient, par exemple, d'assez hauts voltages (alternatifs) au moyen de plusieurs transformateurs étagés dont les primaires sont alimentés chacun par une dérivation sur le secondaire du transformateur qui le précède.

Si on applique la tension alternative fournie par le secondaire d'un transformateur sur un tube à cathode chaude ou à électrodes de forme convenable (une pointe en face d'une plaque), on redresse automatiquement cette tension sur une des deux demi-périodes (fig. 13). On peut alors appliquer directement cette tension redressée sur un tube à rayons X, par exemple, sans craindre l'onde inverse qui, avec la tension alternative, met parfois le tube hors d'usage.

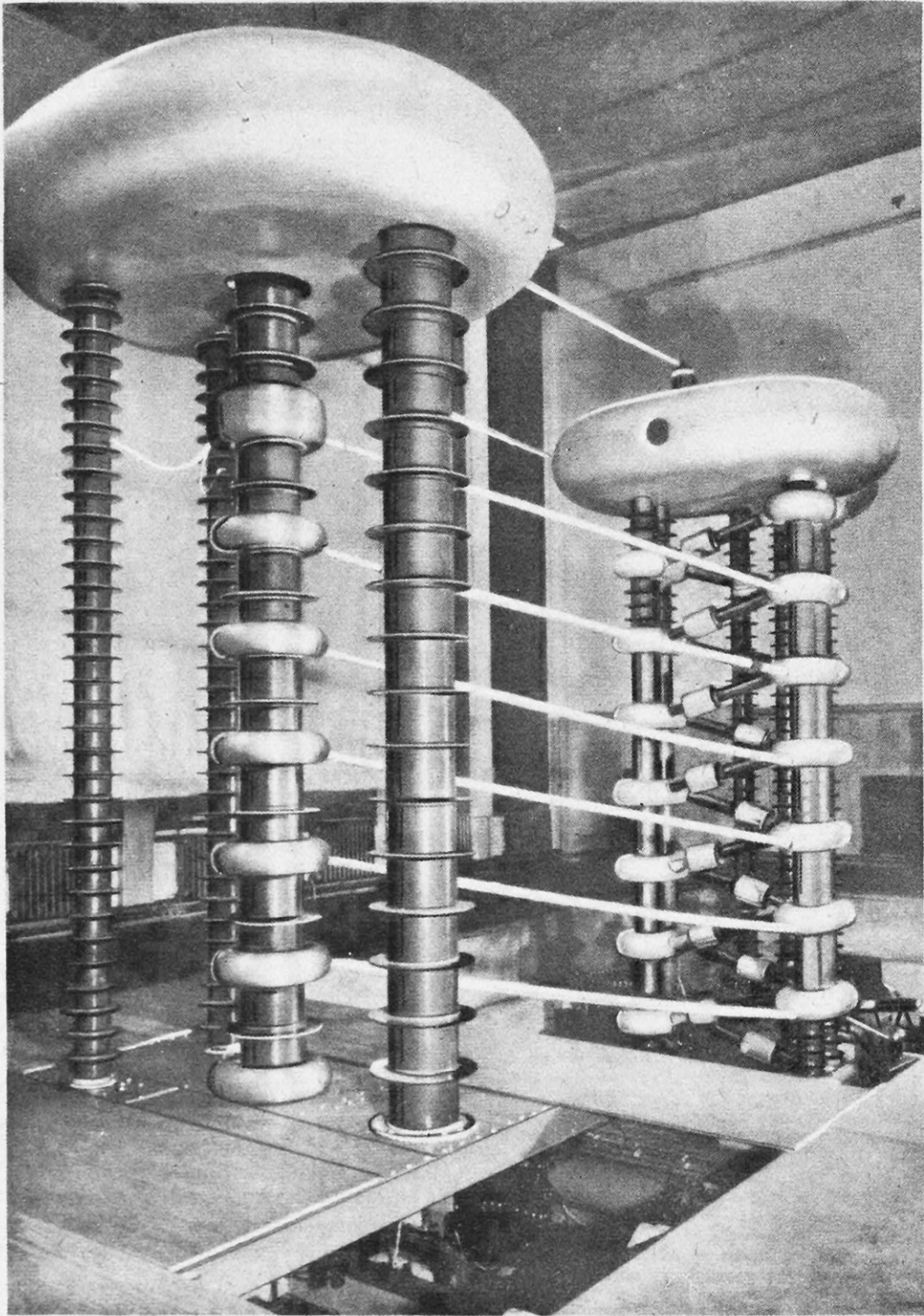


FIG. 11. — INSTALLATION A 1 250 000 VOLTS POUR LA TRANSMUTATION DES NOYAUX ATOMIQUES

On voit au premier plan, à gauche, le tube accélérateur de 4 m de long, avec, en sous-sol, la cabine de travail où s'effectuent les transmutations. Au fond et à droite, le multiplicateur de tension dont les étages successifs sont reliés aux sections correspondantes du tube accélérateur (Laboratoires Philips).

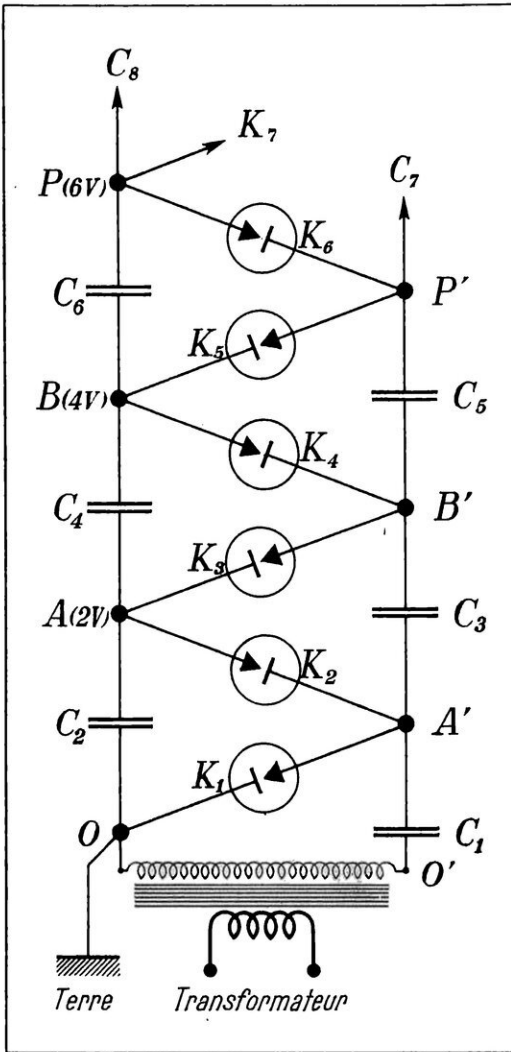


FIG. 12. — SCHEMA D'UN MULTIPLICATEUR DE TENSION

Il est alimenté en courant alternatif par le transformateur et fournit de très hautes tensions continues à l'aide de valves à gaz ionisé (phanotrons) ou à filament chaud (kénotrons) disposées sur les ponts, entre les deux colonnes. Le kénotron K_1 , ne laissant passer le courant que dans un sens, le condensateur C_1 reste chargé à la valeur maximum $+V$ de la tension d'alimentation. Le potentiel du point A, égal à celui de O' plus V , oscille donc entre 0 et $+V$. Pour la même raison, K_2 , ne laissant passer le courant que dans un sens, le condensateur C_2 restera chargé à la valeur maximum de sa tension d'alimentation, soit $+2V$. Le potentiel du point A, égal à celui de $O' + 2V$, sera donc constant et égal à $2V$. Les points B, P, etc., des étages successifs seront par suite aux potentiels continus $4V$, $6V$, etc.

La figure 14 montre comment on redresse les deux phases de la tension alternative, ce qui permet de faire fonctionner le tube d'une façon continue. Enfin le schéma de la figure 15, se rapporte à du

courant triphasé. En ajoutant des condensateurs et des résistances à cette installation, on stabilise rigoureusement la tension aux bornes du tube accélérateur. Redressement et stabilisation de la tension sont courants dans l'appareillage pour traitements par les rayons X (roentgenthérapie).

Le montage de la figure 16 est dû à Latour et Greinacher. Il est construit en France pour la Compagnie générale de Radiologie. Sa réalisation, représentée sur la figure 17, peut être vue dans la plupart de nos centres anticancéreux.

Le fonctionnement du générateur étagé pour 600 000 V continus, représenté par la figure 19, dérive du même montage, avec des particularités que souligne le schéma partiel (fig. 18).

En ce qui concerne les soupapes, nous mentionnerons que M. Planiol est arrivé à mettre au point, au laboratoire de l'École Normale Supérieure, un appareillage de très haute tension avec des redresseurs secs groupés en parallèle (pour permettre le passage de quelques milliampères) et en série (pour permettre d'atteindre plusieurs dizaines de kilovolts).

Les tubes supportant des tensions supérieures à un demi-million de volts ont fait leur apparition un peu partout (fig. 20). La figure 21 donne le schéma d'un tube démontable actuellement aux essais au centre anticancéreux de Marseille. Ce tube permettra d'accélérer des électrons ou des ions et donnera ainsi des rayons X ou des neutrons. Chaque section isolante peut supporter 100 kilovolts et seules des questions matérielles de stabilité et d'étanchéité limitent le nombre de ces sections à la dizaine, c'est-à-dire à une tension maximum de 1 million de volts. La figure 22 montre ce tube avec deux sections.

Les générateurs électrostatiques

Les machines électrostatiques classiques sont à frottement comme celle de Ramsden ou à influence, comme celle de Wimshurst. Elles fournissent facilement quelques dizaines de milliers de volts, mais un courant de l'ordre du dixième de milliampère seulement.

La forme la plus moderne de ces appareils est donnée par les fameux générateurs électrostatiques du type mis au point dans les laboratoires de Van de Graaff et de Tuve, aux États-Unis. La figure 23 montre un tel générateur pour 5 millions de

volts. On peut voir sur cette figure (et on pouvait le constater sur le modèle analogue qui existait au Palais de la Découverte à Paris) deux colonnes isolantes supportant chacune une sphère métallique. Ces pièces sont creuses et, dans la colonne de droite, des courroies verticales sans fin transportent vers la sphère les charges positives, tandis que la sphère de gauche est chargée de la même manière à un potentiel négatif (fig. 24).

La tension maximum que l'on peut obtenir ainsi est essentiellement fonction de l'état de l'air qui environne la sphère et les courroies, ainsi que de la forme des surfaces voisines, qui se trouvent au potentiel du sol.

L'appareil peut fournir + 2,5 millions de volts pour une sphère et -2,5 millions de volts sur l'autre. Si on installait un tube accélérateur de particules électrisées entre ces deux sphères, on aurait une tension utilisable de 5 millions de volts (5 MV). Le laboratoire d'essais se trouve alors logé dans la sphère positive, si on expérimente avec des électrons ou des rayons X. Si on veut travailler avec des ions positifs très énergiques, ou avec des neutrons produits par ces ions, on change la polarité des sphères en modifiant convenablement les postes à tension constante qui alimentent les courroies. Le laboratoire se trouve alors dans la même sphère, chargée cette fois négativement. Les expérimentateurs, étant isolés du sol, ne s'aperçoivent pratiquement pas qu'ils sont dans une enceinte si fortement électrisée.

Pour des raisons de stabilité et d'étanchéité du tube accélérateur, on dispose généralement celui-ci verticalement comme sur la figure 25, et on relie sa partie inférieure, qui contient la chambre des cibles, à la terre. Sa partie supérieure est portée à un potentiel positif ou négatif, suivant que l'on désire accélérer des ions ou des électrons.

Pour atteindre des potentiels de plusieurs millions de volts sur une seule sphère (dispositif accélérateur vertical), on place l'ensemble du générateur et du tube à l'intérieur d'une enceinte étanche (fig. 26) dans laquelle on introduit un gaz (tétrachlorure de carbone, air comprimé, etc.) dont le potentiel disruptif est plus élevé que celui de l'air normal. La plus haute énergie ainsi obtenue est de 5 millions de volts (fig. 27).

M. Pauthenier a modifié la technique

de Van de Graaff-Tuve en remplaçant les courroies par des poussières de verre entraînées par un courant d'air à l'intérieur d'un cylindre isolant supportant une sphère métallique. Les charges électriques sont transmises aux poussières par des ions qu'émettent, à la base du cylindre isolant, des pointes ou des fils fins portés à quelques milliers de volts par un groupe transformateur-redresseur.

Les générateurs électrostatiques fournissent facilement des courants ioniques de l'ordre du milliampère, ce qui est leur principal avantage sur la technique du cyclotron que nous décrivons plus loin, avec laquelle on a rarement atteint des courants de plus de 100 μ A.

L'intensité du courant que peut transporter une courroie isolante est proportionnelle à sa largeur et à sa vitesse de

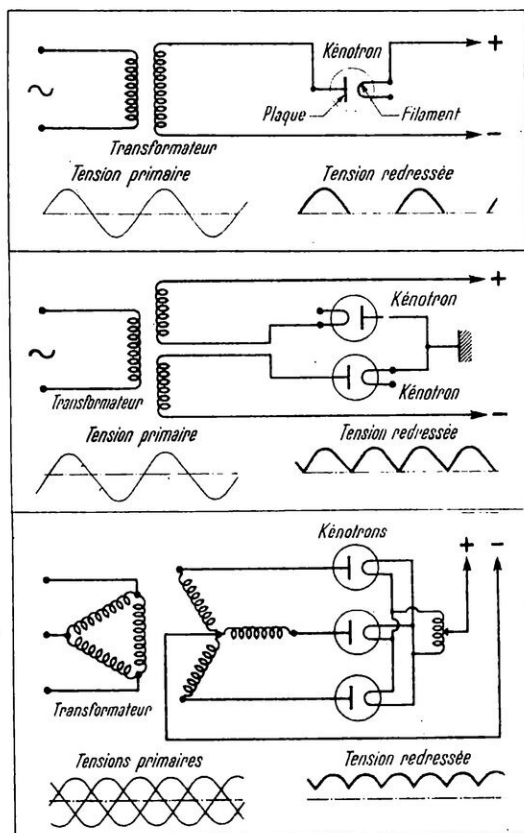
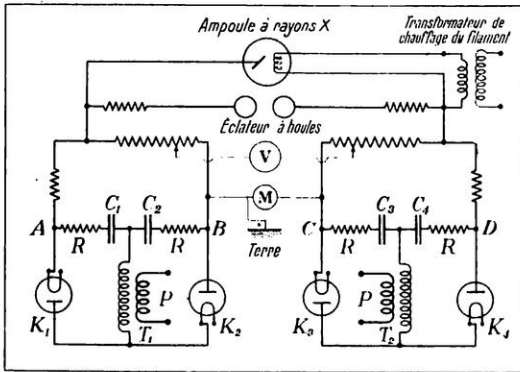


FIG. 13, 14 ET 15. — SCHEMAS D'EMPLOI DES KÉNOTRONS POUR LE REDRESSEMENT DES TENSIONS ALTERNATIVES. En haut, redressement d'une seule alternance. Au centre, redressement des deux alternances par deux kénотrons montés en sens inverse. En bas, redressement d'une tension triphasée.



première alternance, il atteint donc le potentiel $+2V$. À son potentiel $-V$ acquis précédemment, donne $-2V$. On dispose donc, en définitive, d'une différence de potentiel $4V$ d'une borne à l'autre de l'ampoule à rayons X.

déplacement. Cette dernière pouvant difficilement dépasser 200 m/s, on a intérêt à augmenter soit la surface, soit le nombre des courroies.

Il existe à l'Institut du Cancer de Boston un générateur électrostatique pour l'accé-

FIG. 16. — MONTAGE DE LATOUR ET GREINACHER POUR L'ALIMENTATION DES TUBES A RAYONS X POUR RADIOTHÉRAPIE

Voici comment on peut expliquer le fonctionnement, de ce montage. Supposons les condensateurs C_1, C_2, C_3, C_4 tous déchargés et lançons le courant dans les transformateurs T_1 et T_2 . Pendant une alternance du courant, les deux kénotrons K_1 et K_3 laissent passer le courant et les condensateurs C_1 et C_3 se chargent à travers les résistances R . Les bornes A et C deviennent positives et portées au potentiel $+V$, mais le côté C étant à la terre, c'est la borne D qui se trouve portée au potentiel $-V$. Pendant l'alternance suivante, les kénotrons K_2 et K_4 laissent passer le courant et chargent les condensateurs C_2 et C_4 à travers les résistances R . La borne B étant à la terre, c'est la borne A qui est portée au potentiel $+V$. Comme ce point était déjà à $+V$ à la suite de la

lération d'électrons qui permet d'obtenir des rayons X de 1 million de volts.

La foudre

Le vieux rêve de l'utilisation de la foudre a commencé à se réaliser lorsque les physi-

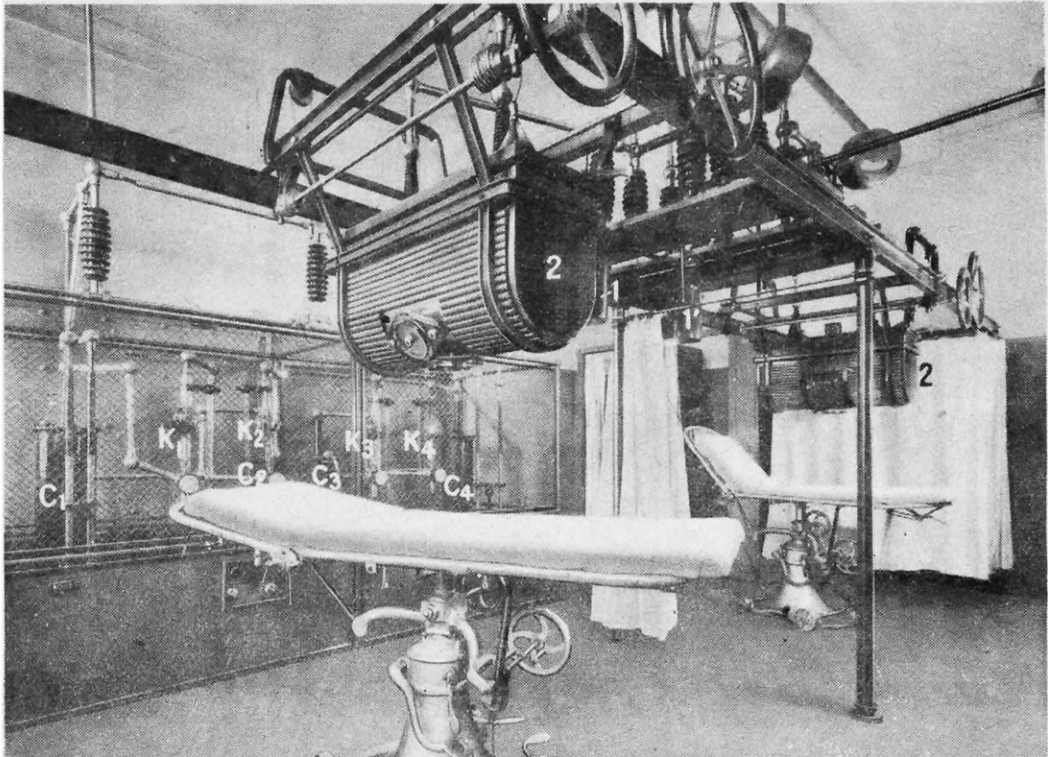
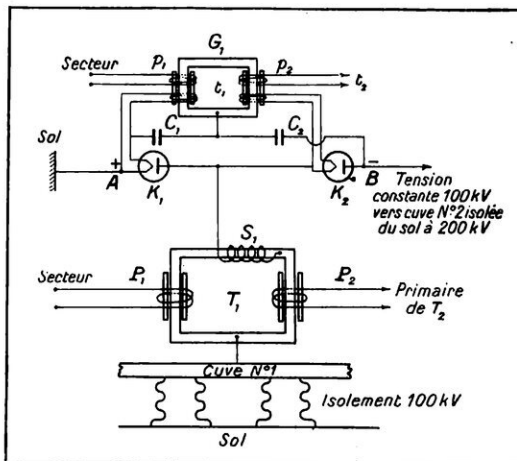


FIG. 17. — UNE INSTALLATION MODERNE DE TRAITEMENT PAR LES RAYONS X

On retrouve sur cette photographie les éléments du schéma de la figure 16 : les quatre kénotrons K_1, K_2, K_3, K_4 , et les quatre condensateurs C_1, C_2, C_3, C_4 . Les transformateurs de chauffage des filaments sont en 1 et 1' et les tubes Coolidge en 2 et 2', dans des cuves pleines d'huile, refroidis par une circulation d'eau dont on aperçoit les canalisations (Compagnie Générale de Radiologie).

FIG. 18. — SCHÉMA DU GÉNÉRATEUR DE 600 000 VOLTS DE LA FIGURE 19.

Le schéma ci-dessus est celui du premier élément du groupe G_1 qui fournit la haute tension négative. Dans la même cuve sont groupés : le transformateur T_1 , alimenté par le secteur basse tension et qui fournit, par le secondaire S_1 , la haute tension alternative qui est redressée par les kénotrons K_1 , K_2 et les condensateurs C_1 et C_2 , portant le point B à une tension de $-100\ 000\ V$; le transformateur t_1 , alimenté par le secteur basse tension et qui fournit le courant de chauffage des filaments des kénotrons. Le point B est relié au point correspondant au point A dans la deuxième cuve, les éléments se trouvant ainsi en série. L'alimentation des transformateurs t_2 et T_2 de la deuxième cuve s'effectue en basse tension par les enroulements p_2 et P_2 isolés sur les armatures des transformateurs t_1 et T_1 . Les cuves, étant aux potentiels des points tels que B, sont isolées du sol. Le groupe G_2 fournit une tension positive d'une manière analogue. Le tube d'accélération est branché entre ces deux groupes et supporte donc $600\ 000\ V$.



ciens, émules de Franklin, essayèrent de capter les millions de volts que ce phénomène atmosphérique prodigue libéralement dans certaines régions montagneuses. En Suisse, au Monte Generoso, Brasch, Lange et

Curt Urban réussirent, entre 1928 et 1933, à domestiquer quelque peu cette force naturelle. Un treillis de fils métalliques convenablement protégé contre les effluves et suspendu à 80 m du sol parvint à

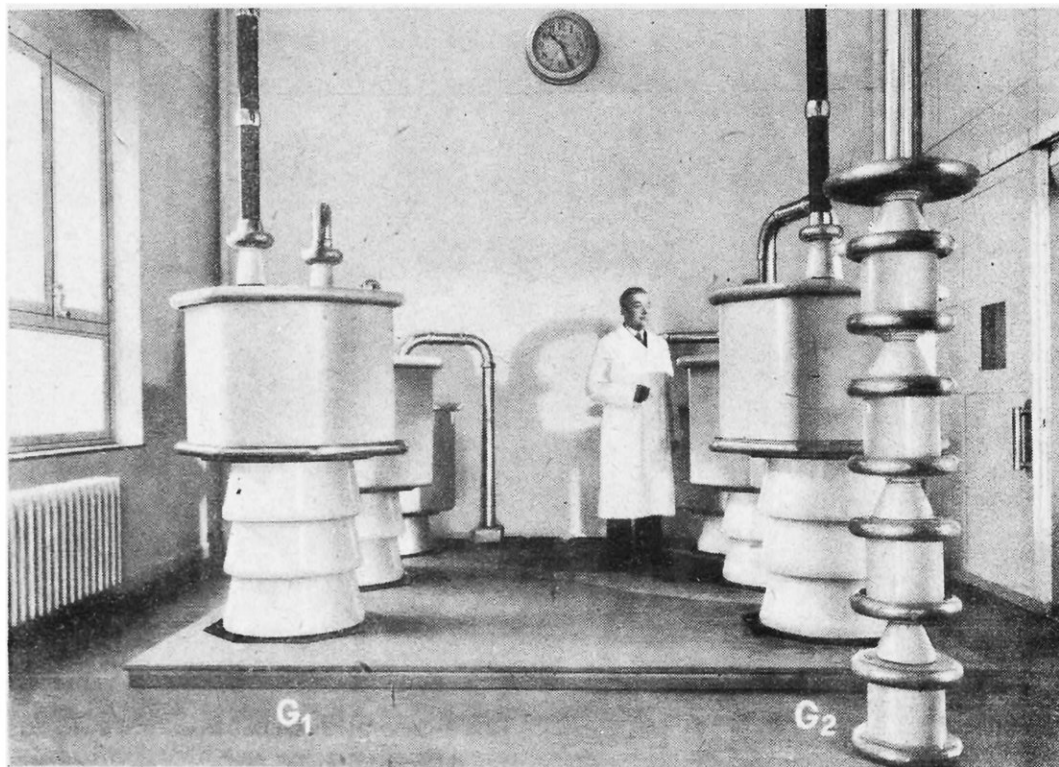


FIG. 19. — GÉNÉRATEUR ÉTAGÉ DE 600 000 VOLTS (COMPAGNIE GÉNÉRALE DE RADIOLOGIE)

Le groupe G_1 fournit $-300\ 000\ V$ et le groupe G_2 $+300\ 000\ V$ lorsqu'il s'agit d'accélérer des ions (obtention de neutrons par bombardement de béryllium par exemple). Les tensions sont inversées dans le cas d'accélération d'électrons (production de rayons X par bombardement d'une cible de tungstène par exemple). On voit au premier plan, à droite, les transformateurs étagés fournissant le courant au filament de l'ampoule à rayons X.

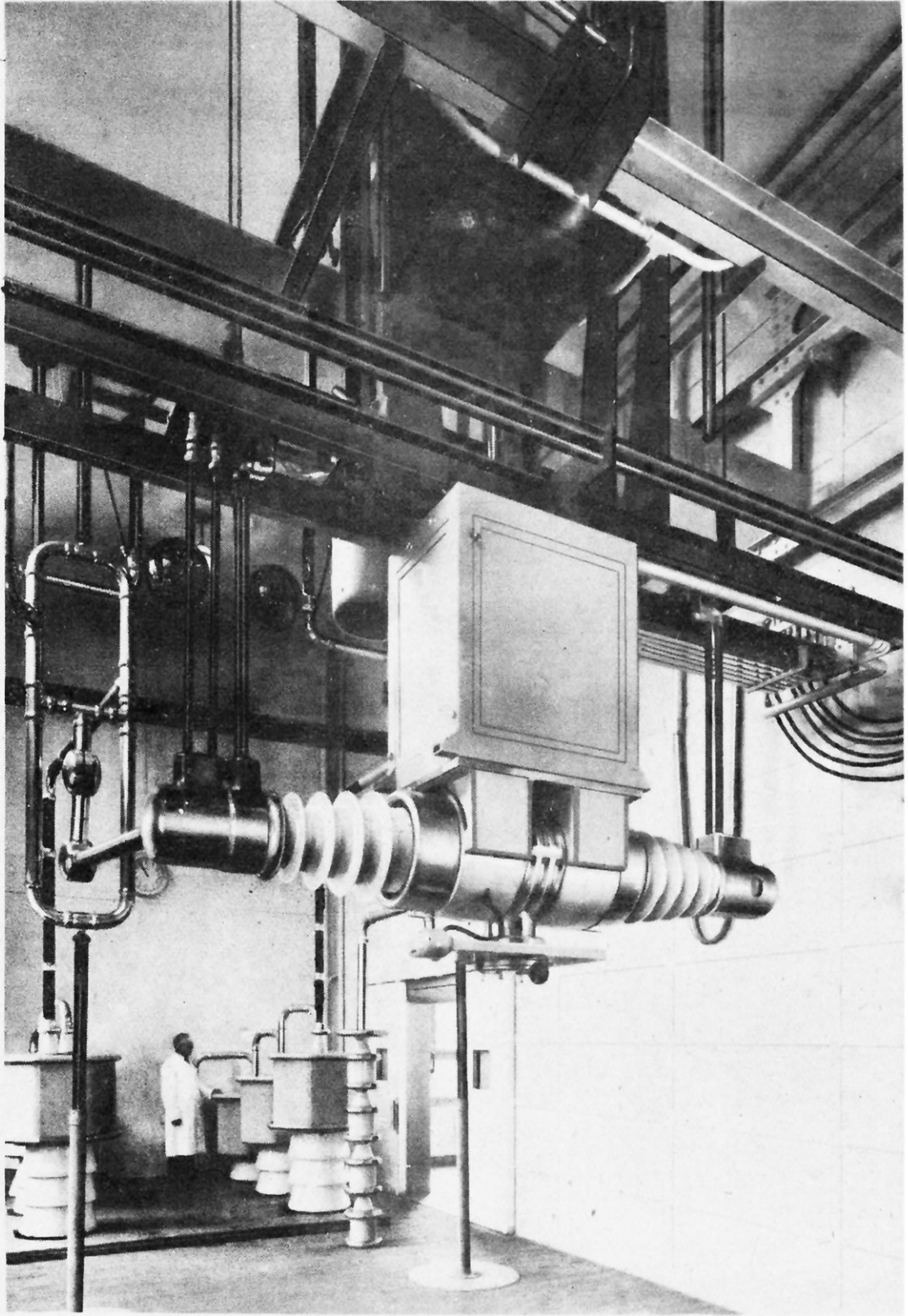


FIG. 20. — UNE INSTALLATION DE RADIOTHÉRAPIE A 600 000 VOLTS (COMPAGNIE GÉNÉRALE DE RADIOLOGIE.)

capter assez de charges positives des nuages pour donner un arc de 4,5 m, ce qui correspond à une tension de l'ordre de 10 millions de volts. La décharge dure moins d'une centième de seconde et transporte quelques dizaines de milliers d'am-pères. Ces auteurs voulaient accélérer des protons. L'un d'eux, Curt Urban, paya de sa vie ces essais dangereux. Pour l'instant, ces recherches sont interrompues.

Les accélérateurs à haute fréquence

Dans les accélérateurs à haute fréquence, les particules électrisées, protons, deutons ou électrons, reçoivent une série d'impulsions successives qui accroissent leur énergie cinétique jusqu'au moment où les projectiles viennent frapper la cible qui leur est offerte. Alors qu'avec les engins décrits jusqu'ici on pouvait séparer le générateur de tension et le tube accélérateur, une telle distinction n'est plus de mise, car l'appareillage forme un ensemble impossible à dissocier.

Nous signalerons tout d'abord le *quart d'onde haute fréquence* dû principalement à Sloan. Cet appareil se rattache encore aux accélérateurs précédents en ce sens que les projectiles électrisés ne reçoivent pas la série d'impulsions que nous venons d'annoncer, mais sont accélérés comme dans un tube accélérateur entre la cathode qui les a émis et une anode portée à une tension très élevée. Cette anode (fig. 28) n'est autre que l'extrémité d'une antenne vibrant en quart d'onde, c'est-à-dire de telle manière que ce soit à l'extrémité de l'antenne que la tension atteigne les valeurs les plus élevées. L'antenne, alimentée comme le secondaire d'un transformateur, est disposée dans le vide.

Avec une longueur d'onde du poste oscillant de 50 m, Sloan a atteint 800 000 V sur l'anode. Les centres anticancéreux de San Francisco et de New-York utilisent des installations de ce type.

L'accélérateur haute fréquence schématisé sur la figure 29 a été proposé par

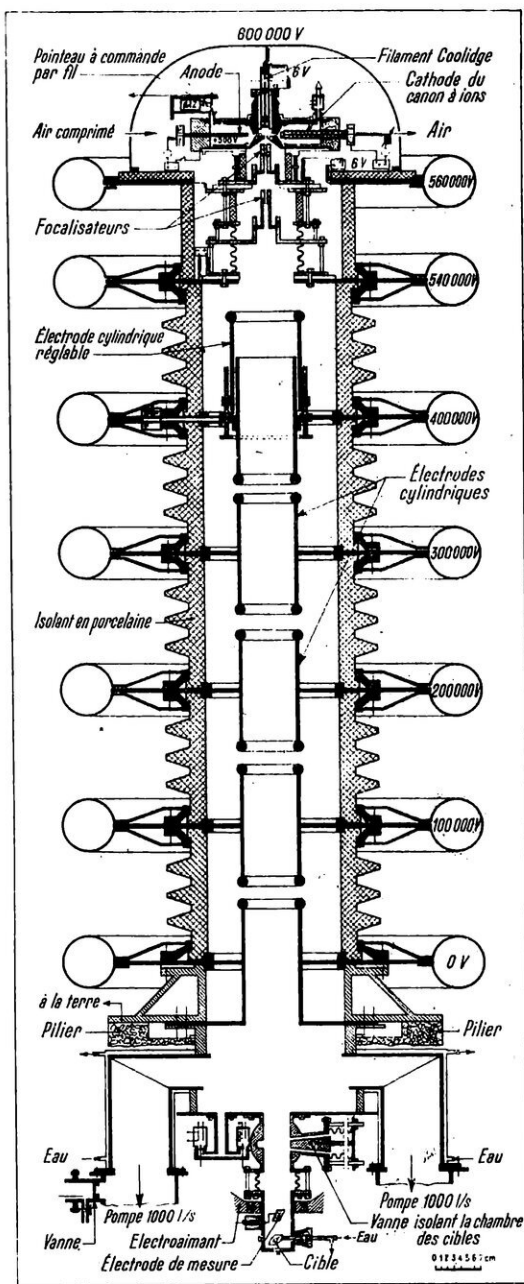


FIG. 21. — SCHÉMA DU TUBE DÉMONTABLE POUR 600 000 VOLTS ACTUELLEMENT AUX ESSAIS AU CENTRE ANTICANÉREUX DE MARSEILLE

Ce tube est destiné à l'accélération d'ions ou d'électrons pour la production de neutrons ou de rayons X. Dans le premier cas, les diverses sections du tube sont portées à des potentiels positifs, atteignant + 600 000 V à la partie supérieure. Les ions sont engendrés par un « canon à ions » qui comprend essentiellement une cathode horizontale émettant des électrons qui, accélérés par l'anode qui lui fait face, rencontrent sur leur passage les molécules du gaz convenable introduit dans le canon et les ionisent. Le faisceau d'ions est concentré par la focalisation, traverse verticalement les électrodes à des potentiels décroissants et tombe sur la cible qui lui est offerte (béryllium ou lithium), laquelle émet des neutrons. Pour la production des rayons X, les diverses sections du tube sont portées à des potentiels négatifs (- 600 000 V pour le sommet du tube) et les électrons à accélérer sont émis directement par le filament Coolidge vertical. Ils frappent, en bas du tube, une cible en tungstène qui émet le rayonnement X.

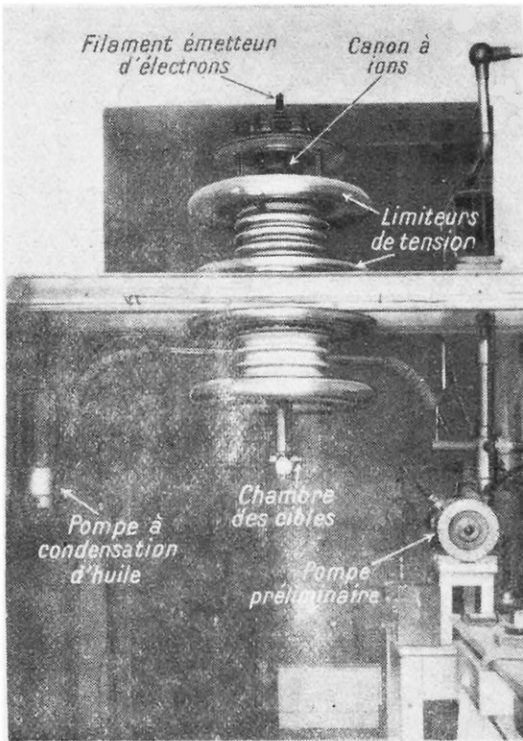


FIG. 22. — LE TUBE DÉMONTABLE, POUR 200 000 VOLTS, DU CENTRE ANTICANCÉREUX DE MARSEILLE

Ce sont les deux premières sections du tube pour 600 000 V dont la figure 21 donne le schéma.

Widerøe et mis au point par Sloan et Lawrence aux États-Unis et par J. Thibaud en France. Il se compose d'un tube en plusieurs sections, où l'on fait le vide continuellement et où sont disposées un certain nombre d'électrodes cylindriques de longueurs croissantes. Il y a deux jeux d'électrodes, paires et impaires, si on les numérote à partir de l'extrémité du tube, et chacun des deux jeux est relié à une des bornes d'un petit poste d'émission qui fournit la tension haute fréquence.

La particule électrisée émise à l'extrémité du tube traverse successivement les électrodes. Tant qu'elle se trouve à l'intérieur d'une électrode quelconque, la polarité et les variations de tension de cette dernière sont sans influence sur elle. C'est seulement au passage de l'une à l'autre que les actions électrostatiques peuvent s'exercer. Ainsi, à son passage de la première à la seconde électrode, la particule subit une impulsion électrostatique, étant repoussée par l'électrode qu'elle quitte et attirée par celle où elle s'engage. Elle voit donc sa vitesse augmenter. Au

moment de son passage de la deuxième électrode à la troisième, la haute fréquence a changé de signe et atteint de nouveau sa valeur absolue maximum, de sorte que la particule reçoit une nouvelle impulsion. La tension haute fréquence change encore de signe et accélère la particule au passage de la troisième électrode à la quatrième et ainsi de suite. L'augmentation progressive de la longueur des électrodes accélératrices est évidemment imposée par la variation de vitesse de la particule. Avec ce dispositif, Sloan et Lawrence ont obtenu sur une longueur d'onde de 30 m et avec un voltage haute fréquence de 42 000 V appliqué sur une trentaine de cylindres accélérateurs, un courant de $0,1 \mu\text{A}$ de mercure ionisé, les particules étant dotées d'une énergie équivalente à celle que leur aurait communiquée une tension continue de 1 million de volts.

Le rhumbatron

A l'Université Stanford, en Californie, Hansen a étudié, sous le nom de « rhumbatron » ou oscillateur rythmique, un nouveau genre de résonateur pour ondes hertziennes devant permettre d'accélérer des électrons (fig. 30). On démontre en électrotechnique que toute surface conductrice fermée possède certaines fréquences de résonance qui sont déterminées par la grandeur et la forme de la surface. Il apparaît que, si on pouvait faire voyager un électron plusieurs fois à l'intérieur d'une telle enceinte, possédant un facteur de surtension de l'ordre 50 000 V, on obtiendrait une accélération considérable.

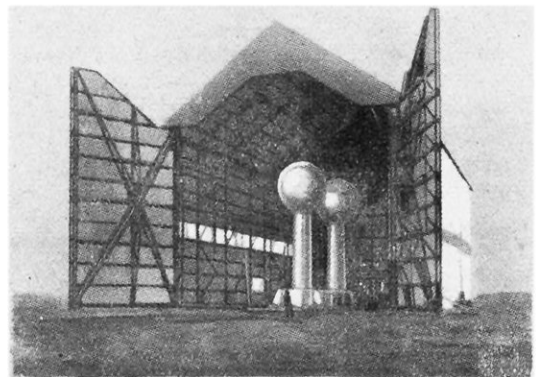


FIG. 23. — GÉNÉRATEUR ÉLECTROSTATIQUE POUR 5 MILLIONS DE VOLTS, DU MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, INSTALLÉ DANS UN HANGAR A DIRIGEABLE

La trajectoire de l'électron, accélérée dans un sens — de gauche à droite par exemple, — devrait être courbée de 180° par un champ magnétique et renvoyée de droite à gauche. Cette seconde accélération serait suivie de plusieurs autres, à la seule condition qu'on puisse maintenir le synchronisme entre le temps que met l'électron pour parcourir le trajet entre les électroaimants placés aux deux extrémités du rhumbatron et la demi-période de l'onde à haute fréquence qui peut être entretenue dans cette enceinte. On se trouve limité dans ce domaine par le fait que la masse de l'électron augmente avec sa vitesse, comme le veulent les lois de la relativité auxquelles nous avons fait allusion au chapitre premier. Il arrive un moment où cet accroissement ne peut plus être compensé par une disposition convenable des électroaimants provoquant le retournement des trajectoires des électrons.

Nous retrouverons des considérations analogues à propos du cyclotron et du bêta-tron.

Le cyclotron

Depuis la découverte, en 1934, par M. et M^{me} Joliot-Curie, de la radioactivité artificielle, de nombreux radioéléments

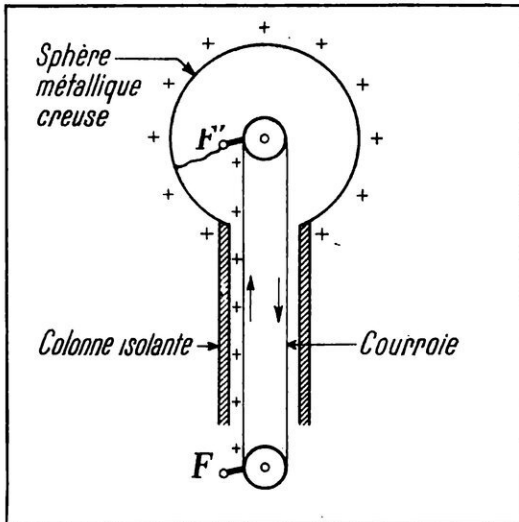


FIG. 24. — COMMENT SONT CHARGÉES LES SPHÈRES DES GÉNÉRATEURS ÉLECTROSTATIQUES

Les charges électriques sont transportées par une courroie isolante sans fin, en papier, en soie, ou en tissu caoutchouté. Elles y sont déposées par un peigne métallique F qui émet des ions par ses pointes. Un deuxième peigne F' les recueille dans la sphère, où elles se portent à la surface et s'accumulent.

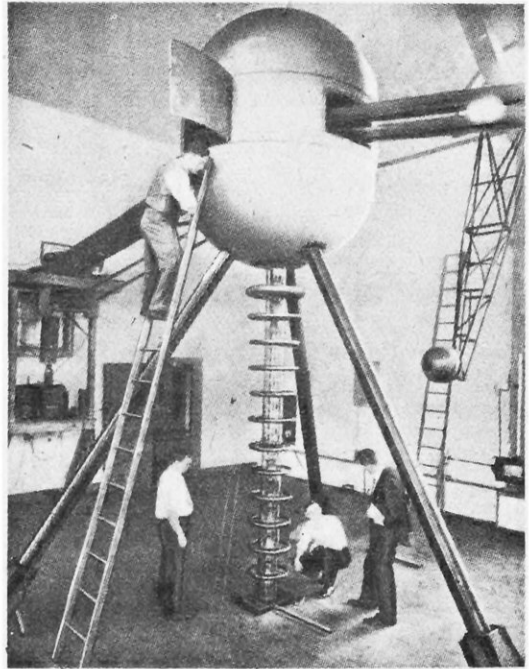


FIG. 25. — GÉNÉRATEUR ÉLECTROSTATIQUE DE 1,2 MILLIONS DE VOLTS, DE LA CARNEGIE INSTITUTION, A WASHINGTON, AVEC SON TUBE D'ACCÉLÉRATION VERTICAL

La sphère collectrice, de 2 m de diamètre, est chargée par la grande courroie visible en haut et à droite (la petite courroie entraîne la dynamo du générateur d'ions). Les ions, accélérés dans le tube vertical, frappent les cibles qui leur sont offertes dans le laboratoire du sous-sol.

nouveaux ont été trouvés. Parmi eux, une dizaine environ l'ont été en France, une cinquantaine d'autres dans divers laboratoires européens et le reste, la grande majorité, en Amérique, principalement avec le cyclotron de Berkeley, à l'Université de Californie.

Le cyclotron est tout indiqué, en effet, pour fournir facilement, sans emploi de hautes tensions, et par conséquent sans toutes les difficultés d'encombrement, de claquages d'isolants, etc., inhérentes aux autres méthodes, des particules en nombre considérable et animées de vitesses capable de désintégrer presque tous les noyaux.

Il fut une époque où, la technique du cyclotron n'étant pas tout à fait parfaite, il était recommandé de se servir de toute autre installation pour accélérer des ions jusqu'à 1 million de volts. Aujourd'hui, de petits cyclotrons, comme celui représenté sur la figure 32, minutieusement mis au point, peuvent rivaliser avec n'importe quelle autre machine. Pour les tensions

élevées, la question ne se pose plus, car il n'existe rien d'autre que le cyclotron.

C'est en 1932 que Lawrence et Livingston ont mis définitivement au point leur modèle de cyclotron. Le prix Nobel de physique pour 1939 a été attribué à E. O. Lawrence pour cette découverte. Lawrence et Livingston obtenaient alors des protons d'une énergie correspondant à une tension de 80 000 V en n'appliquant que 1 600 V sur les électrodes d'accélération (fig. 31). Dès avant la guerre, en 1939, le professeur Lawrence et ses collaborateurs ont obtenu, à Berkeley (Californie), un faisceau de deutons de 22 millions de volts.

En 1935, il n'existait encore au monde qu'un seul cyclotron ; on en compterait aujourd'hui une cinquantaine, les uns en fonctionnement, les autres en cours de montage. Le premier cyclotron de Lawrence et Livingston ne coûta pas plus de 30 000 fr ; le dernier modèle de cyclotron de Berkeley, actuellement en construction, coûtera près de 200 millions de francs. Le laboratoire de chimie nucléaire du Collège de France, dirigé par M. Joliot, possède depuis 1938 un cyclotron pesant plus de

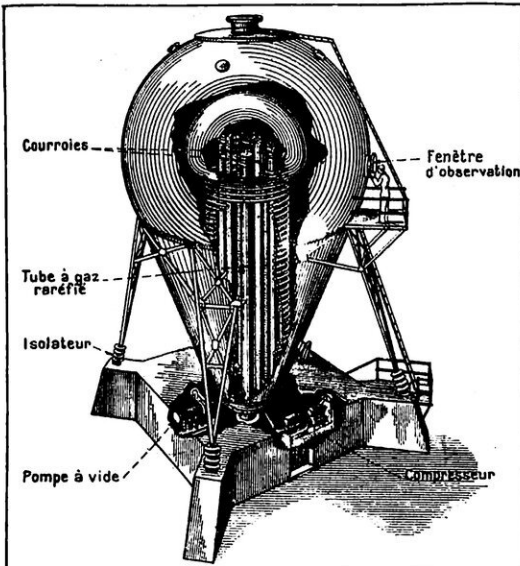


FIG. 26. — LE GÉNÉRATEUR ÉLECTROSTATIQUE A 5 MILLIONS DE VOLTS DE EAST-PITTSBURG (ÉTATS-UNIS)

Ce générateur, qui comporte une seule sphère, est installé dans une enceinte d'acier soudé capable de supporter une pression intérieure de 8 kg/cm^2 . La sphère collectrice peut ainsi soutenir des tensions plus élevées que dans le montage simple de la figure 24. L'accélération des ions s'effectue dans le tube central.



FIG. 27. — VUE EXTERIEURE DU NOUVEAU GÉNÉRATEUR POUR 5 MILLIONS DE VOLTS DE LA CARNEGIE INSTITUTION A WASHINGTON.

Ce générateur a l'aspect extérieur d'un observatoire astronomique, le dôme étant figuré par l'enceinte en acier soudé où est enfermé sous pression le générateur proprement dit.

30 t, et Marseille en a un plus modeste depuis 1944 (fig. 32). Ils permettront à la science française de développer, elle aussi, cette technique si féconde à la fois en physique atomique et en biologie.

L'installation d'un cyclotron comprend trois parties principales : un électroaimant, un poste de haute fréquence, et enfin la boîte du cyclotron proprement dit, où les ions sont accélérés.

L'électroaimant peut être plus ou moins puissant. Le premier qu'ont utilisé, en 1930, Lawrence et Edlisen donnait un champ maximum de 5 000 gauss dans un entrefer de 20 cm, sur un diamètre de 30 cm. Il en existe actuellement une douzaine de tailles différentes. Celui du Laboratoire de chimie nucléaire du Collège de France donne un champ maximum de 21 000 gauss dans un entrefer de 9 cm sur un diamètre de 80 cm (fig. 34).

Le poste de haute fréquence est iden-

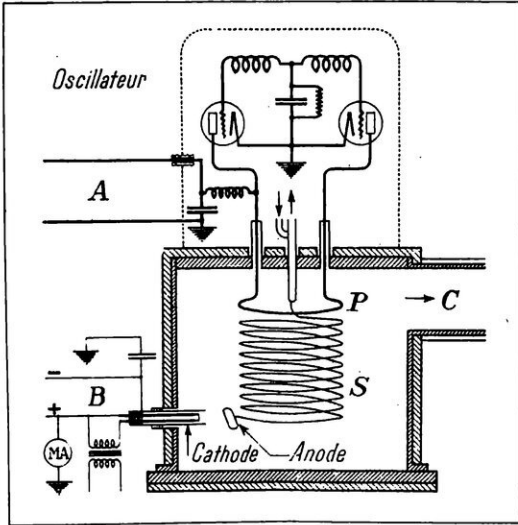


FIG. 28. — LE QUART D'ONDE HAUTE FRÉQUENCE GÉNÉRATEUR DE RAYONS X

L'appareil est alimenté par une tension alternative A de l'ordre de 15 000 V, 60 périodes. L'oscillateur débite sur l'inducteur primaire P. Le secondaire S, où des courants de haute fréquence sont induits, vibre en « quart d'onde », ce qui porte son extrémité où est placée l'anode émettrice de rayons X à une tension très élevée. Elle est refroidie par une circulation d'eau. B est la tension de polarisation et C la canalisation par où on fait le vide dans l'appareil.

tique à un poste émetteur de T. S. F. Il peut être d'une puissance de quelques centaines de watts pour les petits cyclotrons; il atteint quelques dizaines de kilowatts pour les grands cyclotrons.

La boîte du cyclotron est construite pour remplir le but qu'on s'est proposé lorsqu'on a décidé de construire un cyclotron donné. Elle doit s'adapter parfaite-

ment entre les pièces polaires et doit avoir un rayon et une hauteur conformes aux énergies et aux intensités des faisceaux que l'on désire obtenir. Celle du Collège de France a 9 cm de haut entre les deux couvercles formant eux-mêmes une partie des pièces polaires. Ce cyclotron, de 80 cm de diamètre, a été construit dans le but d'obtenir des faisceaux de très haut voltage plutôt que des faisceaux riches en ions.

La figure 35 représente schématiquement la boîte du cyclotron. On voit, en bas, une coupe verticale de l'appareil sur laquelle T₁ et T₂ sont les pièces polaires, et 1 et 2 les deux électrodes creuses qui accélèrent les ions et auxquelles on applique la haute fréquence. Voici l'ordre des opérations. Lorsque la boîte est fermée par ses deux couvercles et qu'elle est glissée entre les deux pièces polaires, on y fait un très bon vide par l'orifice V au moyen de pompes puissantes. Dès que l'on atteint une pression de l'ordre du millionième de millimètre de mercure, on introduit une toute petite quantité d'un gaz déterminé. Pour fixer les idées, supposons que ce soit de l'hydrogène. Au centre du cyclotron, il existe un filament F de tungstène, que l'on porte au rouge vif au moyen d'un courant électrique. Ce filament émet un nombre considérable d'électrons que l'on accélère par une électrode placée juste au-dessous et à laquelle on applique une tension positive de l'ordre de 1 000 V. Il y a intérêt à alimenter le filament par un courant alternatif de grande fréquence, et non par du courant continu, afin d'éviter que sa déformation

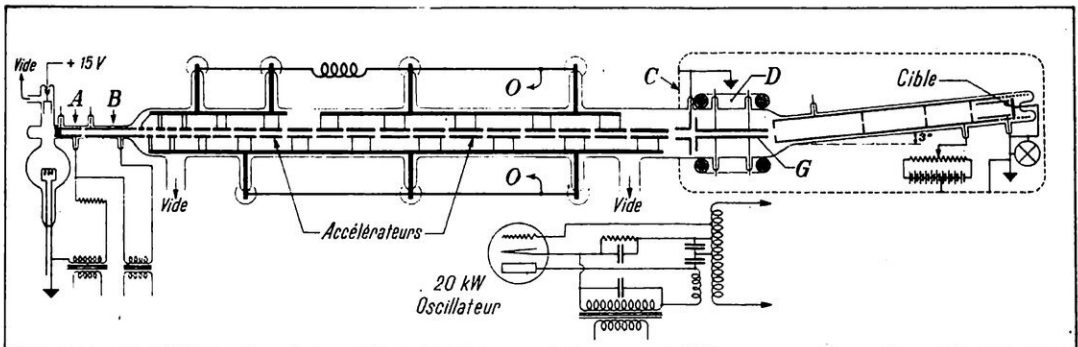


FIG. 29. — SCHÉMA DE L'ACCÉLÉRATEUR A HAUTE FRÉQUENCE DE SLOAN ET LAWRENCE

Les ions produits à l'extrémité gauche sont canalisés et focalisés par les électrodes A et B, puis sont accélérés à leur passage à travers la série des cylindres du tube reliés à un oscillateur à haute fréquence (représenté en bas). La chambre des cibles est protégée par un écran électrostatique C; D, déflecteur magnétique pour les ions vagabonds; G, plaques de déviation électrostatique.

dans le champ magnétique rende sa vie très courte.

Les électrons ainsi accélérés vont bombarder les molécules d'hydrogène introduites dans la boîte et leur arracher leur électron périphérique. Nous aurons alors des ions d'hydrogène ou protons. Comme les protons portent une charge électrique positive, ils décrivent sous l'action du champ magnétique vertical des cercles dans un plan horizontal. Dans leur course circulaire, ils passent alternativement dans les électrodes creuses 1 et 2. Entre ces électrodes on applique une chute de tension de l'ordre de 50 000 V. En alternant le sens de cette chute un million de fois par seconde, par exemple, on imprime ainsi, à chaque demi-tour, une accélération électrostatique de 50 000 V à tous les ions qui mettront un millionième de seconde pour traverser entièrement l'une des deux électrodes. Prenons en effet un ion qui vient de parcourir un demi-cercle de rayon r_1 dans l'électrode 1, en un millionième de seconde. Lorsqu'il entre en 2, le voltage entre 1 et 2 ayant justement changé de polarité, l'ion subit une accélération qui lui fait décrire en 2 un demi-cercle, de rayon r_2 légèrement supérieur, d'environ 1 mm, à r_1 . Son trajet va se trouver augmenté, mais, sa vitesse s'étant également accrue, il arrivera à la sortie de 2 encore une fois au bout d'un millionième de seconde. Comme, à ce moment-là, la polarité des électrodes, s'étant inversée, atteint un nouveau maximum en valeur absolue, l'ion subira encore une accélération et décrira en 1 un demi-cercle de rayon r_3 légèrement supérieur à r_2 ... et ainsi de suite. De la sorte, l'ion décrira une spirale dont quelques boucles sont représentées sur la figure 35. Arrivé en 3 avec une énergie correspondant au nombre de fois qu'il a subi le voltage accélérateur des électrodes (100 fois 50 000 V, soit 5 millions de volts, par exemple), l'ion sera finalement dévié de la route circulaire que lui impose constamment le champ magnétique par l'électrode 3 portée à un potentiel statique négatif de l'ordre de 70 000 V. La porte P étant ouverte, l'ion tombera alors sur la cible C et désintégrera ou non un atome. Si nous faisons arriver des milliards et des milliards de projectiles en C, nous arriverons à désintégrer plusieurs millions d'atomes de la substance placée en C.

Pour des particules de nature donnée

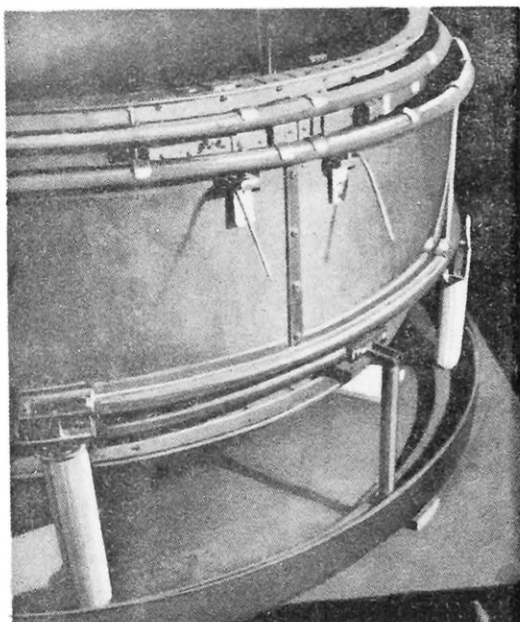


FIG. 30. — LE RHUMBATRON DE HANSEN

(protons, deutons ou hélions), il existe évidemment une relation entre l'intensité du champ magnétique et la fréquence d'inversion des tensions accélératrices, c'est-à-dire la longueur d'onde du poste à haute fréquence. Il faut qu'il y ait synchronisme pour que les particules reçoivent toujours les impulsions au moment voulu.

Ainsi, dans le cas des protons, avec un poste émetteur réglé sur 22 m de longueur d'onde, nous aurons le synchronisme avec un champ de 9 000 gauss. Les protons obtenus dans un cyclotron qui permet un rayon final de 35 cm pourront avoir une énergie maximum de 4,6 millions de volts. Si le gaz introduit dans la boîte était de l'hydrogène lourd, on aurait des deutons de 9,2 millions, et, avec l'hélium, des hélions de 18,4 millions de volts (avec ces deux derniers gaz, le synchronisme s'obtiendrait en poussant le champ magnétique jusqu'à 18 000 gauss).

Pour les énergies supérieures à quelques millions de volts dans le cas des particules lourdes et seulement à 10 000 V dans le cas des électrons, la variation de la masse des particules avec leur vitesse, que fait prévoir la théorie de la relativité, commence à devenir sensible. Or, dans un cyclotron, il faut qu'il y ait constamment synchronisme et « focalisation » magnétique et électrostatique des ions dans le plan médian des deux électrodes. Pour

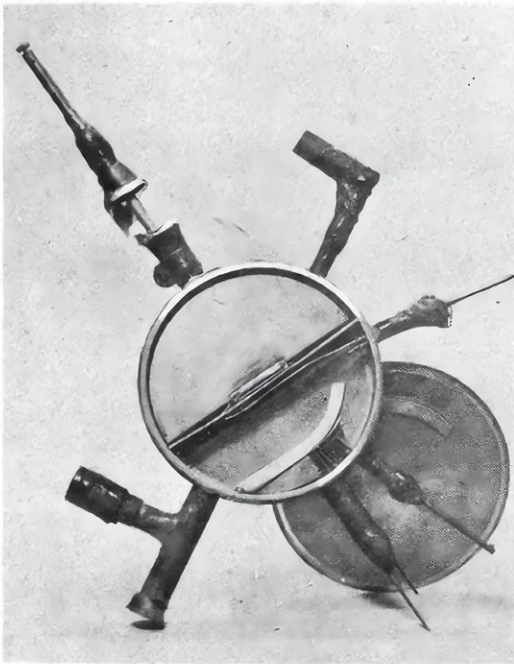


FIG. 31. — MODÈLE N° 2 DU CYCLOTRON DE LAWRENCE, CONSTRUIT EN COLLABORATION AVEC LIVINGSTON

Sur l'électrode, en haut, à gauche, étaient appliqués 1 600 V; on obtenait un faisceau de protons de 80 000 V.

maintenir le synchronisme dans les régions où l'ion possède déjà une masse supérieure de 1 p. 100 à sa masse au repos, il faudrait augmenter la valeur du champ, en interposant, par exemple, des anneaux métalliques dans l'entrefer dans des positions convenables. Par contre, dans ces régions, il faut que le champ magnétique décroisse un peu pour maintenir la focalisation. Un compromis s'établit donc qui interdit de nourrir l'espoir d'augmenter indéfiniment d'une façon simple l'énergie des ions avec des cyclotrons géants. Celui de la page 32, qui représente le modèle de 1938 de Berkeley, donne déjà des deutons de 22 millions de volts.

Les applications du cyclotron

Les applications actuelles du cyclotron sont de trois ordres : purement physiques, industrielles et biologiques. Elles sont fondées sur des réactions nucléaires de désintégration, ou transmutations, qui sont suivies ou non de création d'éléments radioactifs ou d'émission de neutrons.

La figure 37 illustre deux exemples de

réactions nucléaires typiques, très courantes avec les cyclotrons. On voit que le béryllium, bombardé par des particules alpha (noyau d'hélium ou hélions) donne du carbone en libérant des neutrons. Le lithium de masse 7, d'autre part, bombardé par des deutons (noyaux d'hydrogène lourd) livre du lithium de masse 8, qui n'est pas stable. Il se désintègre à son tour, tout comme un radioélément naturel, et avec une période qui lui est propre en émettant des rayons bêta (électrons).

Il faut remarquer que les rayons bêta émis par les radioéléments naturels atteignent une énergie d'à peine 2 millions d'électrons-volts. Ceux de quelques radioéléments artificiels dépassent 10 millions d'électrons-volts. La même chose se passe avec les rayons gamma. D'un autre côté, le perfectionnement des techniques d'attaque de la matière a permis d'obtenir avec des cyclotrons des rayons alpha de plus de 30 millions d'électrons-volts et en quantités beaucoup plus considérables que celles émises par les sources les plus intenses de radioéléments émetteurs alpha, comme le polonium. D'ailleurs, les rayons alpha

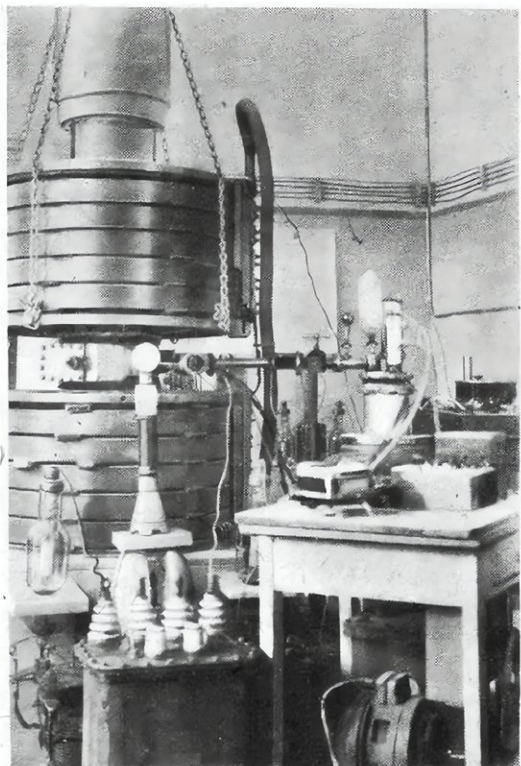


FIG. 32. — LE PETIT CYCLOTRON DE MARSEILLE

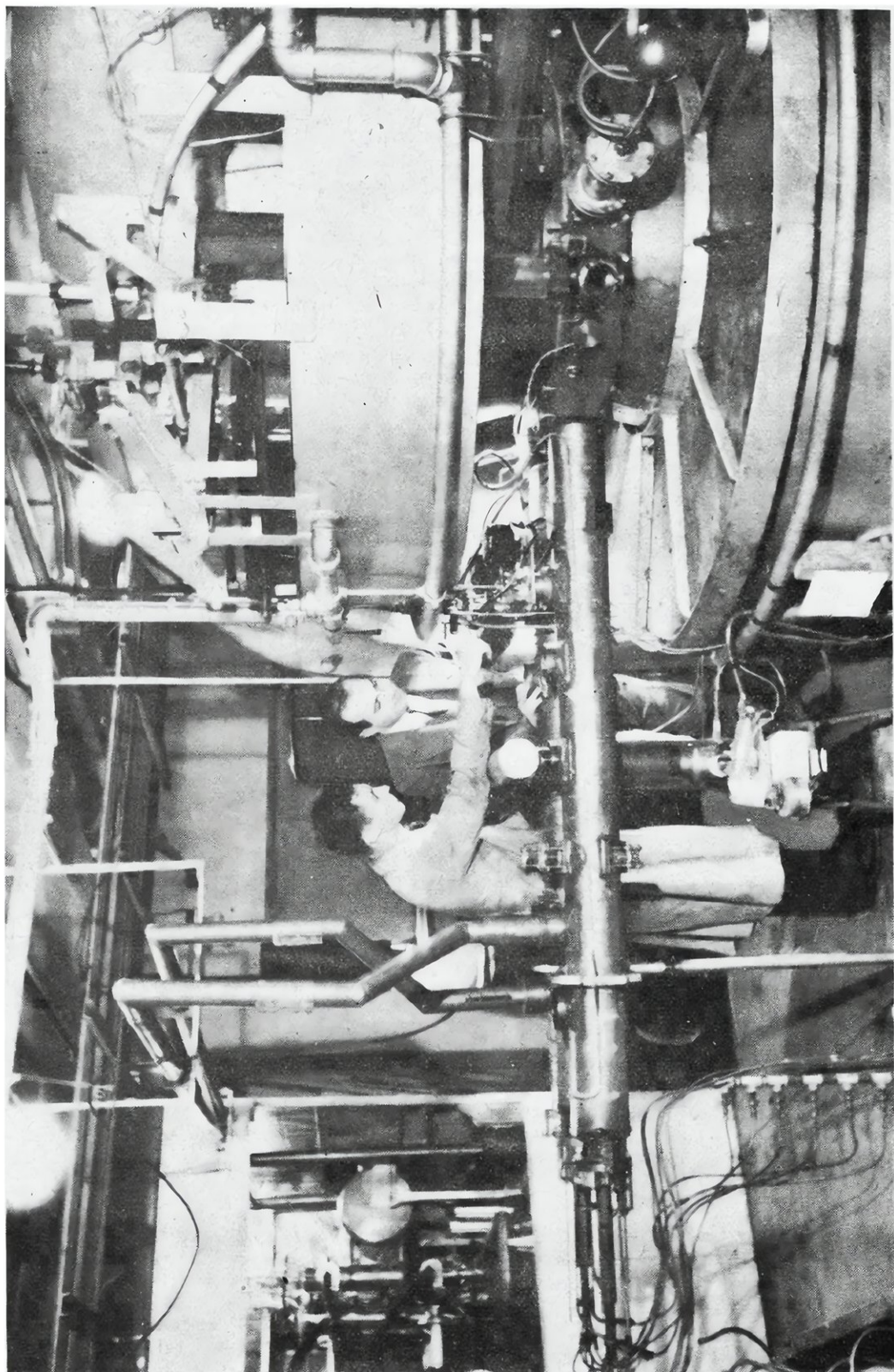


FIG. 33. — LE CYCLOTRON DE 1 MÈTRE DE DIAMÈTRE DE L'UNIVERSITÉ DE COLUMBIA (NEW YORK CITY)

On aperçoit à gauche la ligne d'attaque haute fréquence des électrodes placées entre les pièces polaires et vibrant en quart d'onde. Au centre, de face, le professeur Dunning.

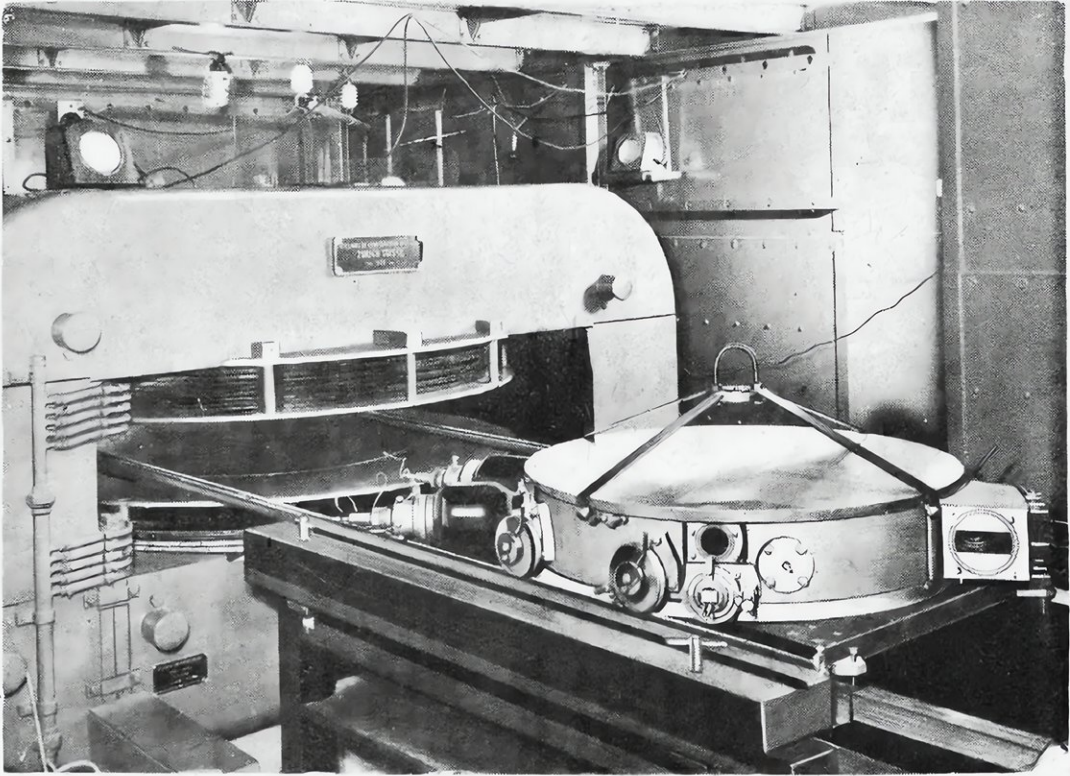


FIG. 34. — LE CYCLOTRON DU COLLÈGE DE FRANCE A PARIS, LABORATOIRE DE M. JOLIOT : LA BOITE D'ACCÉLÉRATION A ÉTÉ GLISSÉE HORS DES PIÈCES POLAIRES DE L'ÉLECTROAIMANT

naturels les plus pénétrants ne dépassent pas 8 millions d'électrons-volts.

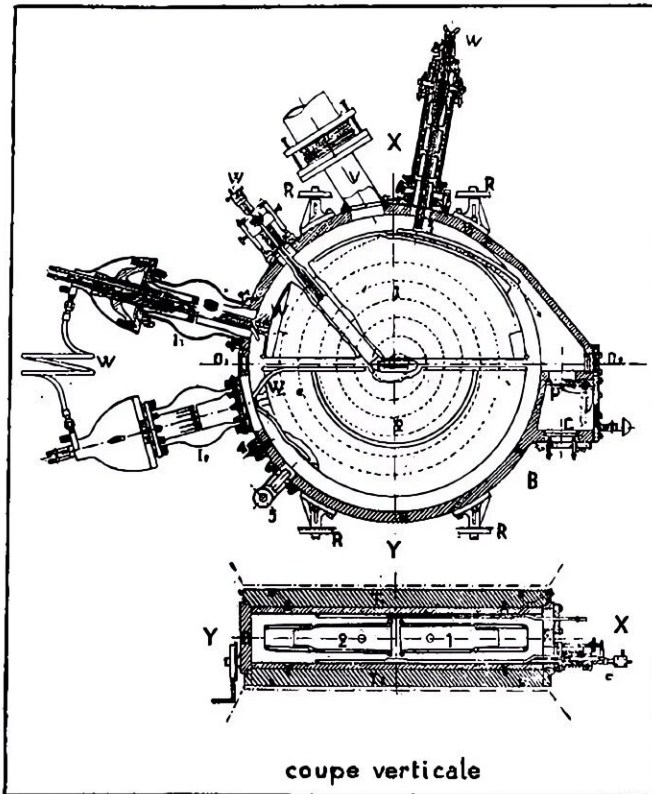
Les superprojectiles fournis par le cyclotron doivent permettre aux physiciens de désintégrer n'importe quel atome. On sait que l'énergie emmagasinée dans les noyaux est colossale et c'est aux recherches effectuées avec le cyclotron que nous devons la mise au point du problème de la libération et de l'exploitation de cette énergie, sous la forme de la bombe atomique (voir chap. XI). Il reste à transposer cette réalisation sur le plan industriel.

Sans aller même si loin, on peut penser que l'industrie tirera grand profit des cyclotrons. Un exemple personnel illustrera, pensons-nous, tout un programme. En 1937, lors d'un voyage aux États-Unis, nous eûmes l'occasion d'entreprendre une petite recherche à l'aide du grand cyclotron de Berkeley. Il s'agissait, entre autres, d'irradier du bore avec cette source énorme de neutrons. Le bore était extrêmement pur et, par surcroît de précaution, l'analyse chimique fut faite soigneusement et les impuretés bien chiffrées. Après irra-

diation, nous étudîâmes les groupes de rayons bêta qu'il émettait, au moyen d'appareils appropriés (compteurs de Geiger-Muller et chambre de Wilson). Nous pûmes déceler ainsi des traces de quatre impuretés, qui n'avaient pas pu être vues précédemment, même au spectroscope. C'étaient les radioéléments à périodes bien connues dérivant de ces impuretés qui avaient révélé leur présence dans l'échantillon étudié.

Un autre exemple typique : pour radiographier de grosses pièces métalliques, on dispose de tubes à rayons X dépassant rarement le million de volts. On peut, à la rigueur, employer les rayons gamma du radium (2 millions de volts) et même ceux du mélange radium plus béryllium (5 millions de volts). On pourrait aujourd'hui imaginer un dispositif permettant d'utiliser les rayons gamma émis par le lithium bombardé par des protons dans un cyclotron. Ces rayons atteignent 17 millions de volts et permettraient de faire des radiographies de pièces métalliques très volumineuses.

Nous n'insisterons pas davantage sur



ces applications, passant maintenant à celles d'ordre médical et biologique.

Médecins et biologistes sont loin d'être d'accord sur les causes du cancer. Ce n'est que depuis peu que l'on est capable, au laboratoire, de provoquer certaines formes de cancer, et il est permis d'espérer que cette technique rendra le problème plus accessible. Il est toutefois admis que les rayons X et les rayons gamma du radium à doses convenables — car l'excès, ici, comme dans certains médicaments-poisons, provoque le mal même que l'on veut guérir — arrivent à détruire certaines tumeurs, cancéreuses ou non. On a commencé seulement à entrevoir la possibilité d'utiliser aussi dans ce but les neutrons. D'autre part, un vaste champ d'applications s'est ouvert en biologie et en médecine aux radioéléments

FIG. 35. — VUE SCHEMATIQUE D'UN CYCLOTRON

Les électrodes accélératrices semi-circulaires (en forme de D) sont, en 1 et 2, supportées par les isolants I_1 et I_2 , l'électrode de déflexion en 3. La petite électrode 4 sert à mesurer la tension de l'électrode 2. Les couvercles des pièces polaires T_1 et T_2 ferment la boîte, dans laquelle le réglage des électrodes est contrôlé par les fenêtres O_1 et O_2 . Le vide est fait par V et parachevé au moyen d'une trappe à air liquide 5 près de laquelle se fait l'entrée du gaz (hydrogène léger ou lourd, hélium, etc.) qui fournit les projectiles ionisés par les électrons émis par le filament central F . La spirale parcourue par les ions est ici très simplifiée; ils atteignent la cible C à travers la porte P . L'ensemble repose sur des roues R qui roulent sur des rails.

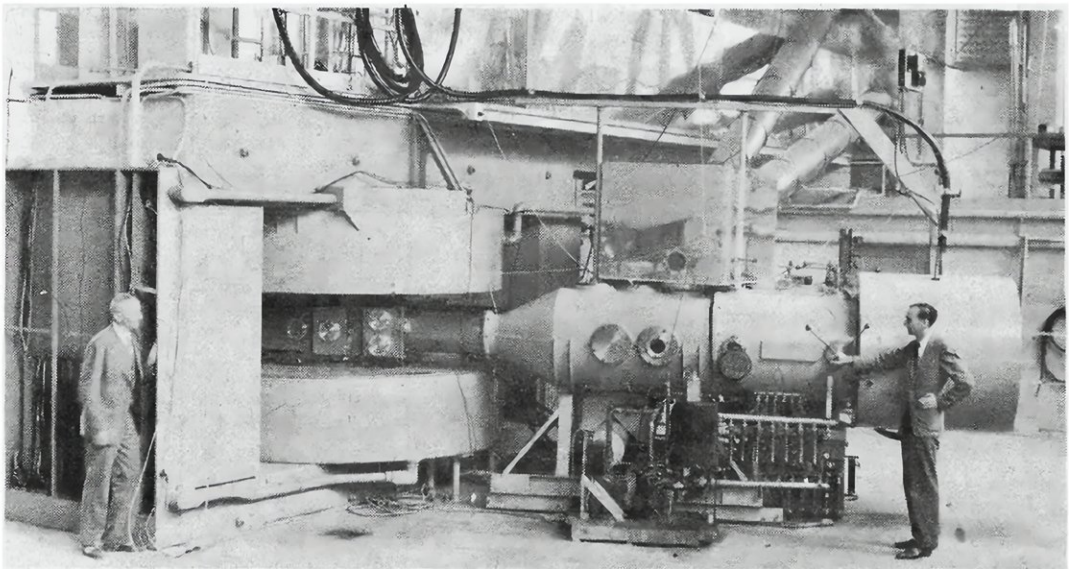


FIG. 36. — LE GRAND CYCLOTRON DE BERKELEY (CALIFORNIE) QUI A LIVRÉ DES DEUTONS DE 22 MILLIONS DE VOLTS

artificiels : étude du métabolisme de certains corps, aliments ou médicaments, traitements locaux par les radiations émises par les radioéléments absorbés ou injectés, voyageant dans le corps et s'accumulant dans certains organes pour s'y désintégrer, etc.

Les chapitres VI, VII et VIII sont consacrés à ces questions.

Le bêtatron

Nous avons signalé page 28 les difficultés qui résultaient, pour le fonctionnement correct du cyclotron, de la variation de la masse des particules avec leur vitesse, suivant la théorie de la relativité. Il suffit

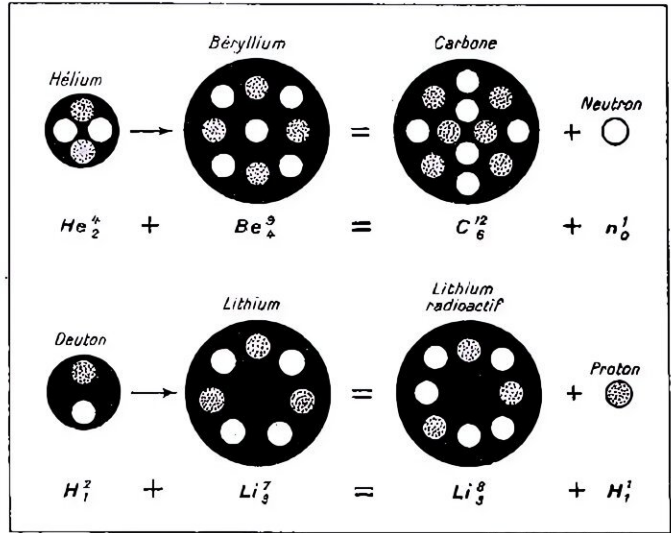
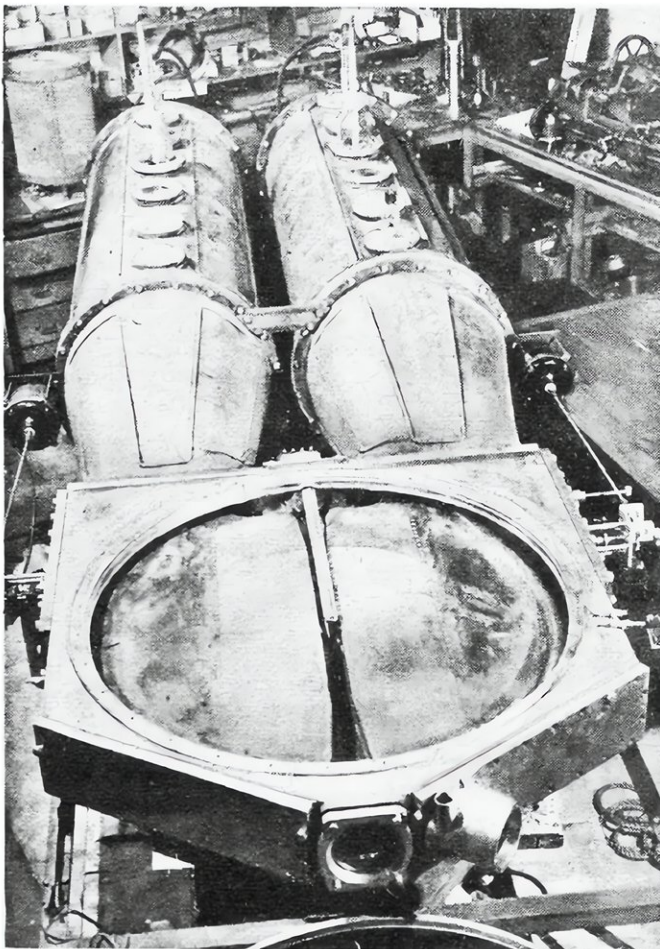


FIG. 37. — RÉACTIONS NUCLÉAIRES TYPES OBTENUES AVEC UN CYCLOTRON
 La première libère des neutrons, la seconde fournit un élément radioactif artificiel.



d'une variation de masse de 1 % pour que le synchronisme entre la rotation des particules et l'inversion périodique de la tension accélératrice ne soit plus possible sans l'emploi de dispositifs correcteurs qui ne sont que des palliatifs. Pour le proton, le plus léger de tous les ions, cette variation de masse se produit quand il acquiert une énergie de dix millions d'électrons-volts. Avec un électron, il suffit, pour l'obtenir, de 10 000 volts. L'électron atteint, dès le premier tour dans le cyclotron, une vitesse prohibitive.

Il fallait donc trouver autre chose, et c'est le professeur Kerst, du Centre physique de l'Université de l'Illinois, qui a réalisé en 1939 l'appareil capable d'accélérer les électrons

FIG. 38. — LES CHAMBRES D'ACCÉLÉRATION DU CYCLOTRON DU MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY (ÉTATS-UNIS)

Ces chambres ont été extraites des pièces polaires de l'électroaimant. On aperçoit au centre le canon à ions et à l'arrière-plan les supports des électrodes creuses en forme de D ou « dees », qui oscillent en quart d'onde.

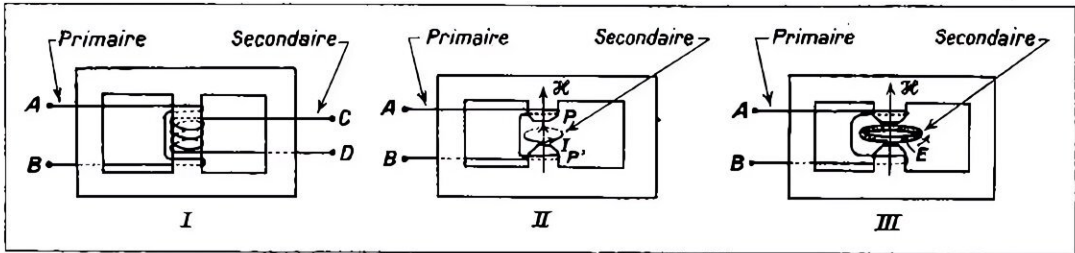


FIG. 39. — LE PRINCIPE DU FONCTIONNEMENT DU BÉTATRON

En I, on a représenté schématiquement un transformateur. Lorsqu'on envoie un courant dans le circuit AB (primaire), on fait naître dans le circuit CD (secondaire) une force électromotrice d'induction. En particulier, II, le secondaire peut être une simple spire de cuivre placée entre les pièces polaires P et P' d'un électroaimant. Si nous produisons dans l'entrefer PP' un champ vertical dirigé de bas en haut et d'intensité croissante, les électrons libres à l'intérieur du fil de cuivre sont accélérés dans le sens de la flèche. Mais, ici, les électrons sont freinés par le métal résistant; ils perdent de leur énergie transformée en chaleur et leur vitesse est modérée. Mais, si nous remplaçons le conducteur de cuivre par un tube de verre creux dans lequel on injecte des électrons (fig. 40), ceux-ci se mettent en mouvement sans éprouver aucun freinage, et la vitesse qu'ils acquièrent est uniquement fonction de l'accélération qu'ils reçoivent de la part du champ variable.

et de leur communiquer une énergie comparable à celles qu'ils possèdent dans le rayonnement bêta du radium. D'où le nom de bétatron donné à son invention.

Ici encore, la particule électrisée tourne dans un plan sous l'action d'un champ magnétique perpendiculaire à ce plan. Mais, au lieu que les impulsions accélératrices soient discontinues et appliquées à chaque passage de la particule sur une portion donnée de sa trajectoire, ici l'impulsion est continue. Elle est de la même nature que celle qui provoque la naissance d'un courant dans le secondaire d'un transformateur.

Supposons que l'on injecte un électron dans une direction perpendiculaire au champ magnétique supposé provisoirement constant, cette particule prendra un mouvement circulaire uniforme, et on peut assimiler sa trajectoire à un conducteur où passe une certaine intensité (la charge de l'électron multipliée par le nombre de tours par seconde). Mais, dans le bétatron, le champ magnétique est variable. Il est produit par un électroaimant dans lequel on envoie un courant alternatif de quelques centaines de cycles par seconde.

Lorsque le champ magnétique varie entre sa valeur minimum et sa valeur maximum, le flux qui passe dans la

« spire » formée par la trajectoire considérée varie lui aussi. Et, d'après les lois de l'induction électromagnétique, l'intensité du courant qui passe dans la spire variera. Elle augmentera si l'électron tourne dans le sens convenable. Or, il n'existe qu'un moyen de faire varier l'intensité dans le conducteur envisagé, c'est d'augmenter le nombre de tours faits par l'électron en une seconde. L'électron sera donc accéléré par la variation du champ.

Dans la pratique, le bétatron se présente sous la forme d'un tube annulaire dans

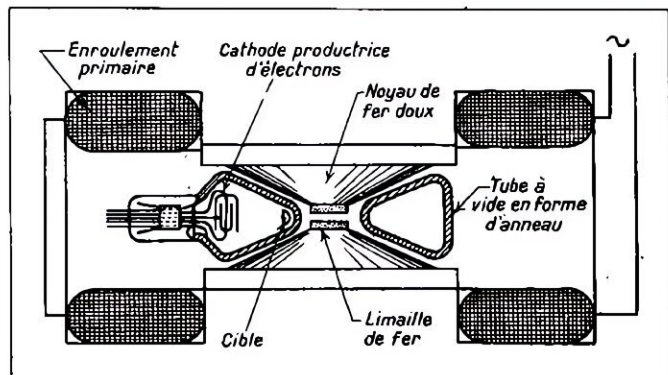


FIG. 40. — COUPE SCHÉMATIQUE D'UN BÉTATRON

Le bétatron est constitué d'un tube annulaire où l'on a fait un vide très poussé, placé dans l'entrefer d'un électroaimant. A l'intérieur du tube, on place un injecteur d'électrons (filament chauffé produisant des électrons, accélérés ensuite par une petite différence de potentiel). L'injection se produit au moment où le champ apparaît et commence à croître, soit dans un sens, soit dans l'autre (deux fois par période). Les électrons font un très grand nombre de tours dans l'anneau (environ 150 000 dans le plus puissant appareil réalisé à l'heure actuelle) et acquièrent une vitesse considérable (295 000 km/s dans le même appareil), avant de frapper la cible de tungstène, qui devient un émetteur de rayons X très pénétrants.

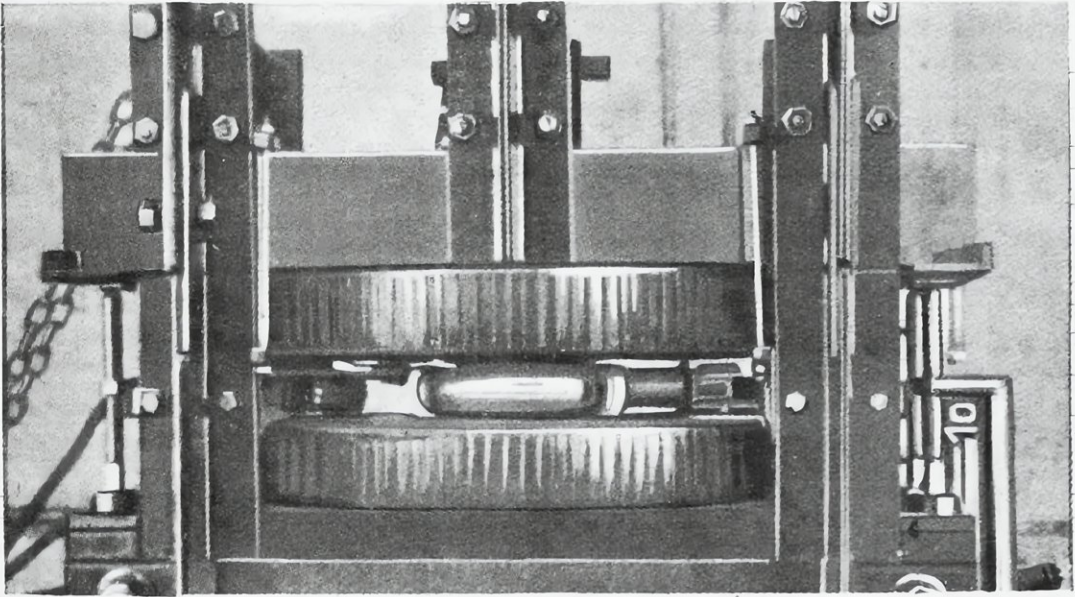


FIG. 41. — LE BÉTATRON DE 20 MILLIONS DE VOLTS DU CENTRE DE PHYSIQUE DE L'UNIVERSITÉ DE L'ILLINOIS

Cet appareil, construit sous la direction du professeur Kerst, ne pèse pas moins de 4 t avec ses accessoires, et on aura une idée de ses dimensions en sachant que le tube annulaire placé dans l'entrefer de l'électroaimant a un diamètre extérieur de 48 cm.

lequel on fait le vide et qui fait office de secondaire d'un transformateur. Il est placé perpendiculairement aux lignes de force dans l'entrefer d'un électroaimant. Au moment où le champ commence à croître, on injecte dans l'appareil des électrons. Ils se mettent à tourner dans l'espace annulaire sous l'action du champ magnétique et ils décrivent avec une vitesse croissante une spirale de plus en plus étroite, en se rapprochant de l'axe de l'anneau, jusqu'au moment où ils rencontrent une anode de tungstène refroidie et produisent des rayons X. L'accélération des électrons cesse quand le champ atteint sa valeur maximum. Le champ décroît, passe par une valeur nulle et peut de nouveau accélérer des électrons pendant un quart de période, mais dans le sens de rotation opposé.

Le bétatron fournit donc d'une manière discontinue deux faisceaux distincts de rayon bêta ou de rayons X. On place au centre des pièces polaires quelques disques de fer dont l'aimantation progressive au cours de chaque alternance a pour effet, par une variation convenable du champ, de canaliser les électrons soit vers l'anode, soit vers la fenêtre de sortie de l'appareil.

Dans le bétatron le plus puissant réalisé actuellement (fig. 41), celui de 20 millions de volts du professeur Kerst, les électrons parcourent une distance de 400 km et

atteignent une vitesse de 295 000 km/s ce qui leur donne une masse égale à six fois leur masse au repos. Pour obtenir ce résultat, on n'a pas eu besoin de générateur à haute tension ni de différence de potentiel élevée.

Des appareils de 2 à 3 millions de volts étaient construits en 1940 (fig. 42) et la General Electric (États-Unis) réalise en ce moment, sur les indications de Kerst, un bétatron de 100 millions de volts.

L'énergie des électrons accélérés par le bétatron est proportionnelle au champ magnétique et au rayon des orbites électroniques.

Les applications du bétatron

Quel intérêt y a-t-il à obtenir des électrons de plus en plus rapides ?

Tout d'abord, le bétatron sert à produire des rayons X beaucoup plus « durs » que ceux que nous offrent les tubes classiques. Ceux-ci sont, pour les applications médicales, de l'ordre de 200 000 à 400 000 V. Pour les applications à la radiographie métallurgique, on n'a guère pu dépasser 1 million de volts. Une autre source de radiations électromagnétiques nous est offerte par les rayons gamma du radium. Les deux bandes utilisées en radiothérapie et radiographie par rayons gamma correspondent à des énergies de 600 000 V et 2 millions de V. Le bétatron fournit donc

des radiations plus pénétrantes que les appareils classiques et même que le radium.

Du point de vue de la radiothérapie, l'intérêt de l'emploi de ces radiations résiderait en ce que, au lieu d'avoir leur efficacité maximum sur la peau même et dans les tissus immédiatement sous-jacents, celle-ci se manifesterait à 3 ou 4 cm de profondeur.

Pour les applications à la radiographie métallurgique, les radiations produites par les électrons accélérés à 20 millions de volts traversent plusieurs dizaines de centimètres de plomb avant de perdre la moitié de leur intensité. Avec ces radiations, on a pu radiographier une génératrice de grande puissance. Mais, à partir de 1 million de volts, un phénomène nouveau vient contrebalancer le gain réalisé par l'emploi de rayons de plus en plus durs : c'est la transformation de l'énergie électromagnétique en matière (un photon donnant naissance à une paire électron-positon). En expérimentant avec le bêtatron de 20 millions de volts, les Américains Adams et Clerk ont montré qu'aux environs de 3 millions de volts un accroissement de potentiel réduisait, au lieu de l'augmenter, la pénétration des rayons X dans le plomb ; mais, à partir de 5 millions de volts, dureté et pénétration varient de nouveau dans le même sens.

On peut également envisager de bombarder directement, pour les tuer, les cellules vivantes cancéreuses par un faisceau d'électrons accélérés. Des essais ont été effectués avec le bêtatron de Kerst, non sur des tissus vivants, mais sur des plaques de cellulose, substance dont la composition chimique se rapproche suffisamment de celle de la matière vivante pour que les résultats soient comparables. De ces expériences, il résulte que le faisceau de rayons bêta pénétrerait à 10 cm environ sous la peau et donnerait une efficacité maximum vers 7,5 cm. L'avantage de la « bêtathérapie » serait une localisation beaucoup plus étroite des effets obtenus, comparés avec ceux de rayons X. On attaquerait ainsi le moins possible de cellules saines pour tuer les cellules cancéreuses. Avec des électrons de 25 à 30 millions de volts, qui traversent environ la moitié de l'épaisseur du corps, on atteindrait n'importe quelle partie de l'organisme humain avec le minimum de dégâts pour cet organisme.

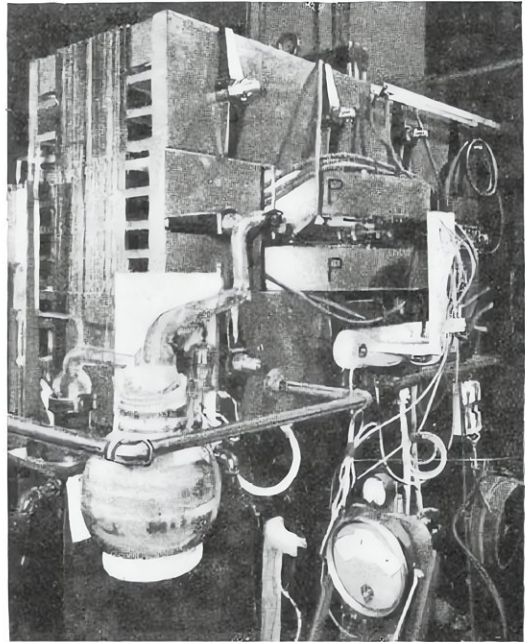


FIG. 42. — LE BÊTATRON DE 3 MILLIONS DE VOLTS DU PROFESSEUR KERST

On aperçoit, marquées de la lettre P, les deux bobines de l'électroaimant et, dans l'entrefer, l'anneau de verre creux dans lequel on fait le vide. Au premier plan, les appareils servant à réaliser un vide poussé dans l'anneau.

Enfin, le bêtatron est, comme le cyclotron, un appareil à briser les noyaux atomiques, mais les bêtatrons actuels ne sont pas encore assez puissants pour effectuer ces réactions nucléaires avec un rendement intéressant ; il faudra pour cela atteindre des potentiels de 65 millions de volts. L'intérêt du bêtatron réside en ce qu'il permet de mesurer avec exactitude l'énergie nécessaire à la rupture de ces noyaux. C'est ainsi qu'on a évalué respectivement à 11 et 19 millions de volts l'énergie des projectiles nécessaires pour briser les noyaux de cuivre et de carbone.

On voit donc que la réalisation de bêtatrons de plus en plus puissants aura des applications très intéressantes. Mentionnons-en encore une pour finir : les faisceaux d'électrons de grande énergie obtenus avec des appareils de 100 millions de volts et plus ouvriront peut-être la voie aux expériences de laboratoire sur les rayons cosmiques, ces rayons qui sans arrêt bombardent la Terre et dont l'origine est une des grandes énigmes de notre Univers (voir chapitre IX).

ARTILLERIE ÉLECTRONIQUE ET RAYONS X

L'ATOME, tel que nous l'avons sommairement décrit au chapitre premier, comporte essentiellement un noyau chargé positivement et où est concentrée pratiquement toute la masse et une atmosphère d'électrons tourbillonnant autour de ce noyau. Nous sommes ainsi amenés à distinguer deux sortes de phénomènes :

1° Ceux qui intéressent le noyau atomique : ce sont les transmutations, domaine de la nouvelle chimie nucléaire ;

2° Ceux qui se limitent aux électrons planétaires, entre lesquels il faut encore distinguer les électrons les plus éloignés du noyau, donc les plus mobiles, formant en quelque sorte la haute atmosphère de l'atome, et les électrons les plus profonds, voisins du noyau, plus difficiles à atteindre.

Les premiers entrent en jeu dans de très nombreux phénomènes, tels que l'émission et l'absorption de la lumière, les réactions chimiques, la cohésion, la conductibilité électrique, etc. ; les seconds, dans l'émission et l'absorption des rayons X. C'est à quelques-uns des phénomènes qui intéressent les électrons planétaires et les électrons libres que ce chapitre est consacré.

Les photons

Lorsque les électrons périphériques d'un atome sont perturbés par d'autres électrons ou par des radiations électromagnétiques, ils leur empruntent de l'énergie, qu'ils se dépêchent de restituer en revenant à leur équilibre habituel. Ils la restituent sous forme de lumière visible ou invisible (infrarouge ou ultraviolet) s'il s'agit d'électrons périphériques, ou de rayons X s'il s'agit d'électrons des niveaux profonds. On a reconnu aujourd'hui que lumière et rayons X ont une double nature, ondulatoire puisqu'il s'agit de radiations électromagnétiques, et corpusculaire puisque l'énergie transportée l'est sous forme de « grains » insécables, les *photons*, dont la valeur est proportionnelle à la fréquence du rayonnement

(où, ce qui revient au même, inversement proportionnelle à sa longueur d'onde).

Cette conception est le fruit d'un demi-siècle de tâtonnements que nous ne rappellerons pas, nous bornant à souligner l'expérience cruciale prouvant l'existence des photons. On sait que certaines substances, lorsqu'elles sont irradiées par des rayons ultraviolets (Millikan), par des rayons X (Maurice de Broglie) ou par des rayons gamma (Thibaud, Ellis), émettent des électrons. C'est l'effet photoélectrique sur lequel repose le fonctionnement des cellules photoélectriques. Les électrons émis ont des propriétés qui dépendent uniquement de la fréquence du rayonnement. Ainsi, le nombre des électrons émis par le lithium bombardé par des rayons ultraviolets est fonction de l'intensité du rayonnement, mais l'énergie de ces photoélectrons est la même pour tous et ne varie qu'avec la fréquence des rayons incidents. Cette observation ne peut s'interpréter avec une conception purement ondulatoire des radiations, qui impliquerait une répartition homogène de l'énergie dans les ondes. Seule, la conception corpusculaire d'Einstein peut en expliquer toutes les particularités. Cette théorie est d'ailleurs la seule à expliquer aussi d'autres observations en contradiction avec la théorie ondulatoire (fréquence limite des spectres de rayons X, effet Raman, effet Compton).

Mais la conception purement corpusculaire de la lumière est impuissante à expliquer les phénomènes d'interférence et de diffraction, et là il faut faire intervenir des ondes. La liaison entre les deux conceptions, corpusculaire et ondulatoire, s'opère en faisant intervenir les probabilités. Le carré de l'amplitude de l'onde mesure le nombre de corpuscules par unité de volume présents en un point, si l'on a une infinité de corpuscules associés à la même onde, ou bien mesure la probabilité de présence du corpuscule en un point, s'il s'agit d'un seul corpuscule.

Cette conception dualiste ne s'applique

pas seulement aux « grains d'énergie » ou photons, mais aussi aux corpuscules matériels, électrons par exemple, auxquels, depuis Louis de Broglie, on attache des ondes pilotes qui déterminent comme précédemment leurs probabilités de présence en un lieu donné (1).

L'électron

La mesure de la charge électrique de l'électron a fait l'objet de nombreuses recherches. On peut l'obtenir par plusieurs méthodes dont nous ne citerons que deux, fondées l'une sur la dissociation électrolytique, l'autre sur l'effet Zeemann.

Lors de la dissolution d'un composé dans l'eau, un certain nombre de molécules du corps dissous se partagent en deux tronçons, des ions, comme les a baptisés Faraday. Chacun de ces ions est formé par un atome ou un groupe d'atomes, entrant dans la constitution de la molécule du corps considéré, chargé d'électricité. L'un, le *cation*, possède une charge positive, due au fait qu'il a perdu un ou plusieurs électrons périphériques ; l'autre, l'*anion*, possède une charge négative, due au fait qu'il a fixé les électrons perdus par le cation.

Le degré de dissociation des molécules mesure en quelque sorte le degré d'acidité de la solution. Pour donner, sous une

forme laconique, la mesure de ce degré de dissociation, on a imaginé une notation spéciale, le *pH*. Il varie de 0 à 14, le *pH* de l'eau pure étant 7, celui des acides étant compris entre 7 et 0, et celui des bases entre 7 et 14. Le *pH* du sang est 7,35, donc très légèrement basique par rapport à l'eau que l'on considère comme neutre. L'expérience montre que la concentration des ions H^+ dans l'eau y est égale à celle des ions $(OH)^-$ et qu'elle est voisine du dix-millionième, ou 10^{-7} , c'est-à-dire qu'une molécule d'eau (H^2O) sur 10 millions est dissociée en H^+ et $(OH)^-$. En prenant le logarithme de $1/10\ 000\ 000$ et en le changeant de signe, on obtient le chiffre 7 qui est le *pH* de l'eau pure.

Le phénomène d'électrolyse consiste à séparer les ions positifs des ions négatifs dans une solution. En faisant passer un courant continu dans une cuve contenant du sulfate de cuivre (SO^4Cu), on fait déposer du cuivre sur la cathode (cation Cu^+ sur l'électrode négative) pendant que le radical $(SO^4)^-$ négatif se porte vers l'anode (où il se formera de l'acide sulfurique à cause de la présence d'eau dans la solution).

Il semble que nous nous soyons éloignés de notre sujet. Il n'en est rien, car on observe que, pour dissocier électrolytiquement une molécule-gramme d'un corps quelconque en deux ions monovalents, il faut fournir à l'électrolyte 96 500 coulombs. Comme on sait qu'il y a $6 \cdot 10^{23}$ molécules en deux tronçons électrisés, il faut $96\ 500/6 \cdot 10^{23}$, soit $1,6 \cdot 10^{-19}$ cou-

(1) Tous les phénomènes observés avec des ondes (interférences, diffraction) se produisent par suite indirectement avec les électrons. Sur ce fait est fondée en particulier la méthode d'analyse cristalline par diffraction des électrons, d'ores et déjà mise en œuvre dans certains laboratoires industriels.

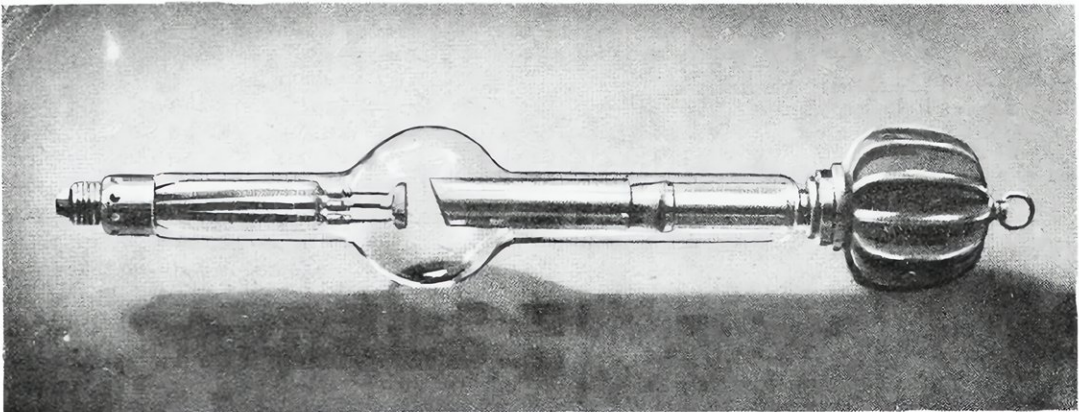


FIG. 43. — UN TUBE A RAYONS X POUR RADIODIAGNOSTIC

Ce tube peut fonctionner sous une tension allant jusqu'à 110 000 V. On remarquera, à droite, le radiateur à ailettes qui assure le refroidissement de l'anode. (Compagnie Générale de Radiologie.)

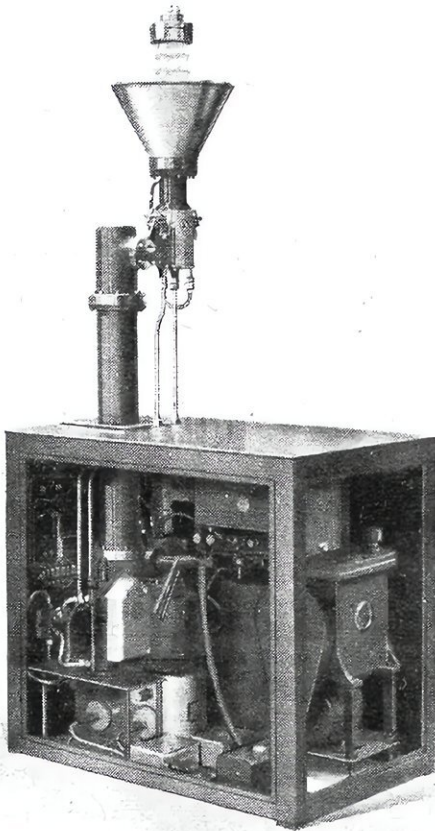


FIG. 44. — TUBE MÉTALLIQUE DÉMONTABLE DE 100 000 VOLTS POUR RADIOCRISTALLOGRAPHIE

La partie supérieure du tube est entourée d'un cône protégeant l'opérateur contre la haute tension. Dans le socle de l'appareil est logé le groupe de pompage automatique qui comprend, en série, une pompe rotative à palettes, une pompe à condensation de mercure et une pompe à condensation d'huile.
(C. G. R.)

lombs, ou $4,8 \cdot 10^{-10}$ unités électrostatiques. Ce nombre représente donc la charge de l'électron.

La charge de l'électron peut aussi se déduire de l'effet Zeemann. Voici en quoi ce dernier consiste. Nous avons vu que les radiations lumineuses émises par un atome proviennent des mouvements des électrons périphériques lors de leur réarrangement à la suite d'une perturbation d'origine extérieure. Ces mouvements sont oscillatoires et de même période que la lumière émise.

Cette période peut se modifier dans un champ magnétique uniforme, et on doit donc observer dans le spectre l'apparition de nouvelles raies d'émission ayant des fréquences inférieures et supérieures

à celle de la raie fondamentale. C'est bien le cas, et, de la connaissance de la valeur du champ magnétique et de l'observation des fréquences des raies spectrales, on peut déduire la charge des électrons.

La spectroscopie

Ceci nous amène à dire quelques mots de la spectroscopie. Les longueurs d'ondes des radiations émises par un atome sont en nombre limité, puisqu'elles sont liées aux sauts brusques que font les électrons entre les divers niveaux d'énergie qui correspondent aux orbites stables qu'ils peuvent occuper dans l'atmosphère électronique de l'atome. Ces longueurs d'onde sont donc caractéristiques de l'atome particulier considéré et peuvent servir à l'identifier. Malgré les lois qui limitent leurs mouvements, les électrons ont une grande liberté d'action puisque, si on voulait classer toutes les radiations de fréquences possibles, on arriverait à plus d'un million.

L'œil humain peut différencier quelques centaines de milliers de fréquences dans le spectre visible qui va du violet au rouge. Le spectrographe en révèle déjà plus de 250 000, dont près de 110 000 sont cataloguées dans le domaine des longueurs d'ondes qui va de 2 000 à 10 000 angströms (rappelons que l'angström est une unité de longueur qui vaut un dix-millionième de millimètre).

La spectroscopie constitue un moyen d'exploration qualitatif et quantitatif, non seulement inestimable pour le physicien et le chimiste, mais de plus en plus indispensable dans l'industrie, la biologie, la criminologie, etc. Pour l'astronome, on a pu dire que le spectrographe est à la fois un thermomètre, un chronomètre, un micromètre, une balance et un super-télescope.

Les rayons X

Les électrons jouent un rôle capital dans une multitude de phénomènes dont les applications pratiques sont innombrables. Toute l'électrotechnique découle en somme de l'existence des électrons. L'éclairage (depuis la lampe d'Edison), les tubes luminescents, les oscillographes cathodiques, la télévision, etc., sont autant de chapitres qui exigeraient de longs développements, mais que nous laisserons de côté pour aborder seulement deux sujets qui ont un rapport plus direct

avec la physique moderne : les rayons X et les lampes à électrodes multiples, réservant le microscope électronique pour le chapitre V.

Pour produire des rayons X, on lance un faisceau d'électrons rapides contre une cible. L'opération s'effectue dans une ampoule vidée de toute trace d'air pour ne pas ralentir les électrons qui vont de la cathode émettrice à l'anode et pour empêcher des étincelles de jaillir entre ces deux électrodes. Le vide doit être d'autant plus poussé que la tension aux bornes de l'ampoule est plus élevée.

On peut soit vider le tube une fois pour toutes (fig. 43), après avoir soigneusement fait dégazer les pièces intérieures, et le sceller, soit pomper constamment l'ampoule que l'on construit alors avec des pièces jointives ou serrées sur des caoutchoucs (fig. 44). Les pompes à condensation de vapeur d'huile permettent d'atteindre facilement des vides inférieurs au milliardième de la pression atmosphérique.

La cathode du tube, émettrice des électrons, est constituée par un filament de tungstène, parfois recouvert d'oxyde de thorium ou autre, bon émetteur d'électrons. Ce filament (dit filament Coolidge) est chauffé au moyen d'un transformateur ou toute autre source de courant.

Porté au rouge, il émet une quantité considérable d'électrons dont le nombre augmente avec la température du filament (comme sa puissance 1,5). Toute trace d'oxygène dans l'ampoule formerait avec le tungstène du filament un oxyde dont la température de fusion est inférieure à celle du tungstène pur — qui est de $3\,350^{\circ}\text{C}$ —, et le filament se volatiliserait rapidement.

L'anode est généralement en tungstène à cause du point de fusion élevé de ce métal. L'or et le plomb seraient préférables pour les radiations très pénétrantes, mais leurs points de fusion sont à $1\,063^{\circ}$ et 327°C . L'anode serait vite portée au rouge et même fondue par la chaleur que dégagent les projectiles électroniques qui viennent la frapper, si on ne prenait pas la précaution de limiter le débit d'électrons en agissant sur le chauffage de la cathode, et de refroidir énergiquement l'anode. Ceci s'obtient de plusieurs façons. On peut, pour les débits de quelques milliampères, adjoindre un radiateur à ailettes au support de l'anode (fig. 43). Pour une ampoule de radiothérapie qui doit fonctionner pendant plusieurs minutes, l'anode et son support sont refroidis par de l'eau ou de l'huile. Un canal est creusé dans le support d'anode et vient aboutir sur la sur-

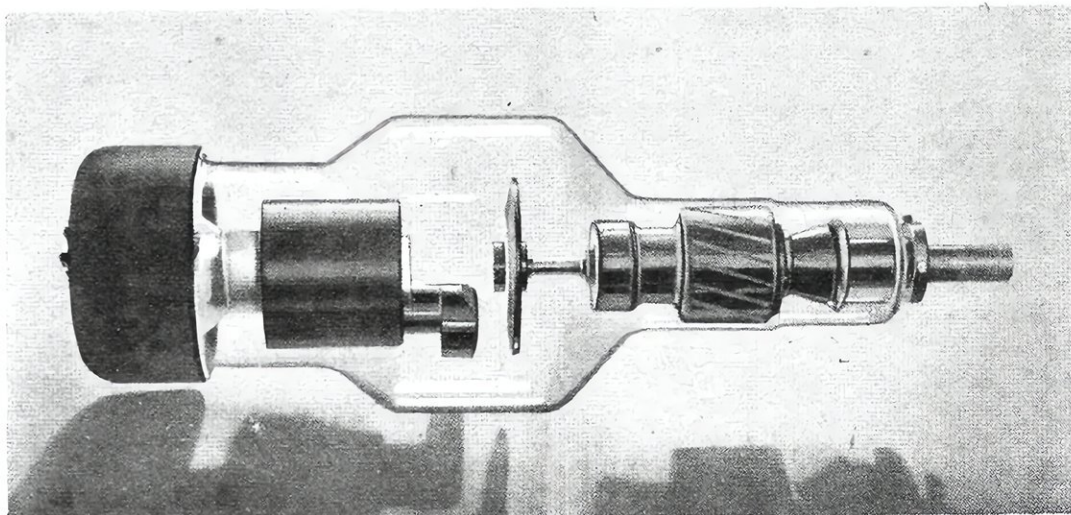


FIG. 45. — UN TUBE A RAYONS X A ANODE TOURNANTE

L'anode, que viennent frapper les électrons, est constituée par un disque en tungstène taillé en biseau, porté à l'extrémité de l'arbre du rotor d'un petit moteur alimenté directement par le secteur alternatif (le stator de ce moteur à champ tournant est extérieur au tube et n'a pas été représenté). Le disque anodique tourne ainsi à la vitesse de 2 750 tours/mn, soit un tour en 1/50 de seconde et l'émission des rayons X se fait ainsi à partir d'une surface constamment renouvelée au cours d'une rotation. (Compagnie Générale de Radiologie).

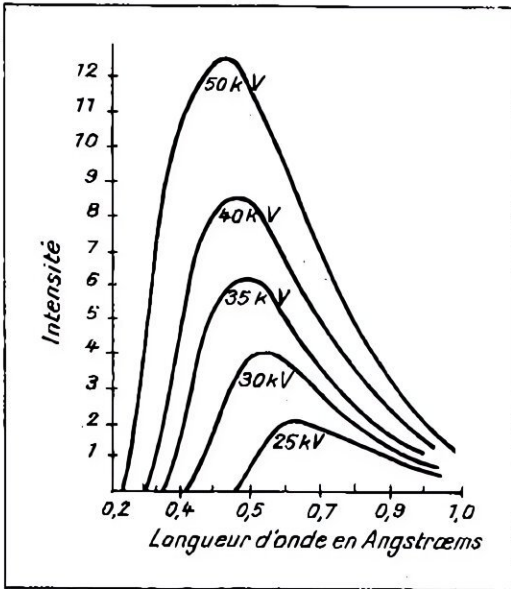


FIG. 46. — LE SPECTRE CONTINU D'UNE ÉMISSION DE RAYONS X

Les courbes ci-dessus montrent la répartition de l'énergie dans le rayonnement X d'une anode en tungstène frappée par des électrons accélérés sous des tensions variant de 25 000 à 50 000 V.

face interne de celle-ci, amenant ainsi le liquide au contact de la pastille métallique, de quelques millimètres d'épaisseur, qui reçoit les électrons de la cathode.

Pour les très grands débits sous de très hautes tensions, l'anode doit dissiper par seconde plusieurs kilowatts (1 milliampère sous 1 million de volts représente une puissance de 1 kW). On a imaginé dans ce cas des anodes mobiles que des champs magnétiques, extérieurs à l'ampoule, font tourner autour d'un axe (fig. 45). Le point d'impact des électrons se déplace de cette façon assez vite pour éviter la fusion et a le temps de se refroidir avant de revenir devant le faisceau.

L'émission des rayons X

Comment explique-t-on, de nos jours, les processus d'émission et d'absorption des rayons X ?

L'analyse au spectrographe d'un faisceau de rayons X révèle la présence de deux sortes de radiations : un fond continu, sur lequel viennent se détacher des raies nettement accusées, caractéristiques de l'élément émetteur. Le fond continu est attribué au ralentissement qu'éprouvent les électrons-projectiles à leur passage à travers les atomes. On voit, figure 46,

comment est répartie l'énergie dans le spectre continu d'un faisceau de rayons émis par une anode en tungstène. La particularité la plus frappante d'une telle courbe est son arrêt brusque sur la gauche, du côté des faibles longueurs d'onde ou des hautes fréquences. C'est qu'en effet il ne faut pas perdre de vue que l'énergie du rayonnement X est toujours représentée par des *photons*, insécables, dont on obtient la valeur en multipliant la fréquence par un facteur constant ou quantum d'action de Planck (numériquement égal à $6,55 \cdot 10^{-27}$ lorsqu'on prend pour la vitesse de la lumière $3 \cdot 10^{10}$ cm par seconde, qu'on exprime la longueur d'onde en centimètre, la charge et le voltage de l'électron en unités c. g. s. e. s.)

Plus on considère des fréquences élevées (c'est-à-dire des longueurs d'onde petites) et plus la valeur du photon X est grande. Il est évident qu'elle ne peut dépasser l'énergie des électrons projectiles, qui constitue une limite supérieure. Si l'on trace des courbes analogues pour des tensions d'accélération croissantes, cette limite se déplace vers la gauche.

Quant aux raies caractéristiques du spectre, elles sont dues aux sauts des électrons planétaires de l'atome, perturbés par les électrons-projectiles. Nous avons dit, en effet, que ces électrons sont groupés normalement suivant certaines lois sur un certain nombre d'orbites plus ou moins proches du noyau. On désigne généralement ces orbites par les lettres K, L, M... en commençant par la plus proche du noyau.

Pour le tungstène (fig. 47), on a ainsi six couches entre lesquelles sont répartis 74 électrons : K, 2 électrons ; L, 8 électrons ; M, 18 électrons ; N, 32 électrons ; O, 12 électrons ; P, 2 électrons. Le noyau a un diamètre de l'ordre du dix-millième de milliardième de centimètre, tandis que les diamètres des orbites P sont de l'ordre du dix-millionième de centimètre. Pour rendre les choses tangibles, multiplions ces dimensions par le facteur 10^{13} (10 000 milliards) : le noyau devient gros comme une bille de 1 cm de diamètre et les électrons P gravitent à 10 km de lui. Ainsi le noyau, placé sur le parvis Notre-Dame à Paris, exercerait sa puissance d'attraction sur 74 billes aussi petites que lui, éparpillées sur le grand Paris, jusqu'à une circonférence passant par Châtenay-Malabry.

Lorsqu'un de ces électrons planétaires est heurté par un électron-projectile rapide, il est soit expulsé complètement de l'atome, soit chassé seulement sur une autre orbite : de K à L, de L à M, de K à M, etc. En fait, au lieu d'orbites, il vaudrait mieux parler de « niveaux d'énergie ». On peut dire que l'énergie potentielle d'un électron est d'autant plus grande qu'il est plus éloigné du noyau et qu'en retombant vers celui-ci il restitue de l'énergie, tout comme une pierre tombant d'une certaine hauteur. Le nouveau niveau atteint, correspondant donc à une énergie supérieure, l'électron retombera au niveau primitif, en une ou plusieurs étapes, en émettant une ou plusieurs radiations de fréquences bien déterminées, égales au quotient de la différence des énergies des niveaux considérés par la constante de Planck indiquée plus haut. On observera sur le spectre une raie de fréquence bien déterminée. Pour la même raison que pour le spectre continu, on ne pourra observer de raie ayant une fréquence supérieure à celle qui correspond à l'énergie des électrons-projectiles incidents. L'ensemble des raies observées dans l'émission, obtenues avec un élément donné, ici le tungstène, est caractéristique des valeurs des niveaux d'énergie de cet élément, et permet donc de reconnaître entre tous les autres, l'élément considéré.

L'absorption des rayons X

L'absorption des rayons X par la matière est un phénomène complexe. Lorsqu'un faisceau de ces rayons traverse la matière (les rayons gamma se comportent d'une manière analogue), il y abandonne une partie de son énergie qui est transformée en chaleur, en rayonnement secondaire, provoque l'expulsion d'électrons (effet photoélectrique) et enfin parfois, au dessus d'un million de volts, « matérialise » des paires d'électrons négatifs et positifs (positons).

Pour une radiation de longueur d'onde donnée, chaque substance a un pouvoir absorbant propre ou *coefficient d'absorption*. La loi générale d'absorption est une loi « exponentielle », qui exprime le fait que chacune des couches successives de matière traversée absorbe toujours la même fraction (dépendant du coefficient d'absorption) du rayonnement qui lui parvient. L'absorption résulte des rencontres des photons X avec les électrons

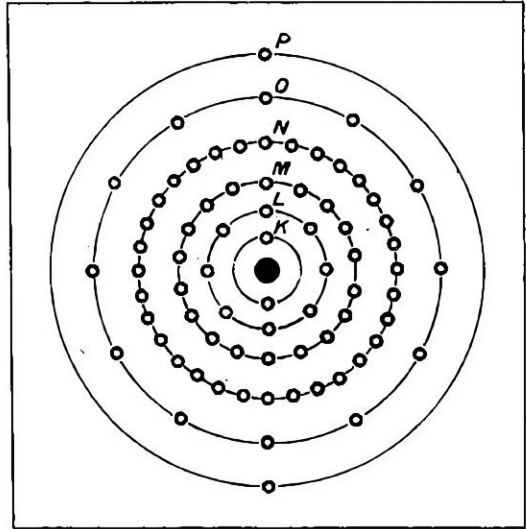


FIG. 47. — REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DE L'ATOME DE TUNGSTÈNE

Autour du noyau chargé positivement, les électrons sont répartis entre six niveaux principaux qui portent respectivement, en partant du centre : 2, 8, 18, 32, 12 et 2 électrons. Ils sont figurés ici schématiquement par des cercles, la véritable disposition étant pratiquement inconnue. Le saut d'un électron d'un niveau tel que K à un autre niveau L, M, N, etc., ou tel que L à M, N, O, etc., s'effectue avec absorption d'une quantité déterminée d'énergie. Quand l'électron déplacé retombe sur son niveau d'origine, cette énergie est émise sous forme de rayonnement, d'une longueur d'onde d'autant plus petite que le niveau est plus proche du noyau. Ceci n'est qu'une approximation, car la place laissée libre par un électron n'est pas forcément réoccupée par le même.

satellites des noyaux (l'action des noyaux eux-mêmes est négligeable), et il est clair, par suite, que, pour une radiation donnée, le coefficient d'absorption doit augmenter à mesure qu'on s'élève dans la suite des éléments. Autrement dit, une certaine radiation, pour être absorbée de moitié, exigera plus d'épaisseur d'aluminium (13 électrons) que de plomb (82 électrons). De même, pour un élément donné, le plomb par exemple, l'augmentation de la fréquence de la radiation aura pour effet une augmentation correspondante de l'épaisseur nécessaire pour en absorber la moitié. Autrement dit, le coefficient d'absorption diminue lorsque la fréquence, donc l'énergie des rayons X, augmente. On note évidemment des anomalies dans la variation de ce coefficient en fonction de la longueur d'onde toutes les fois que celle-ci correspond à une raie d'émission de l'élément traversé. Il y a comme un effet de résonance qui fait faire un bond

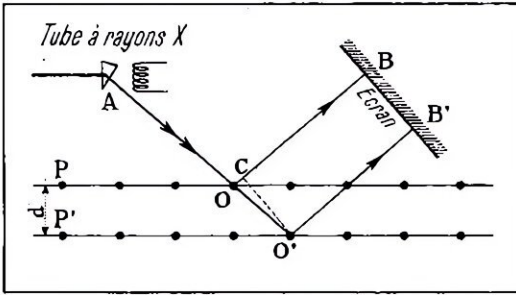


FIG. 48. — SCHEMA DE PRINCIPE DE LA DIFFRACTION DES RAYONS X

A leur arrivée sur l'écran, en B et B', les deux rayons réfléchis n'ont pas parcouru, depuis le point A, des chemins égaux. Le premier contient la distance OO' que ne contient pas le second et ce dernier la distance OC que ne contient pas le premier. La « différence de marche » est donc égale à la différence entre ces deux longueurs. Si elle est un multiple entier de la longueur d'onde du faisceau incident, on aura un point brillant sur l'écran, B et B' étant pratiquement confondus, car la distance d qui sépare les plans réticulaires P et P' du cristal est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde du rayonnement X.

au coefficient d'absorption pour cette fréquence. D'autres anomalies se manifestent lors de la formation des paires d'électrons de signes opposées ; nous n'y insisterons pas.

La diffraction des rayons X

Le domaine des applications des rayons X est très étendu et plusieurs volumes seraient nécessaires pour les traiter toutes. Aussi nous bornerons-nous à évoquer quelques-unes, choisies parmi les plus importantes.

L'étude des propriétés des rayons X a conduit à deux séries d'applications pratiques : d'une part, la radiographie, qui a pris une extension très grande, non seule-

ment en médecine, mais aussi dans l'industrie pour le contrôle non destructif des pièces métallurgiques (ce qui a en outre été étendu à l'utilisation des rayons gamma émis par les substances radioactives) ; d'autre part, l'analyse cristalline, fondée sur le phénomène de la diffraction.

Un cristal est une sorte d'immense molécule dans laquelle les atomes sont disposés à l'intersection de plans régulièrement espacés. Que se passe-t-il quand un faisceau de rayons X traverse un cristal ? Chaque atome atteint par les rayons X renvoie l'énergie lumineuse qui lui est apportée par la radiation incidente dans toutes les directions de l'espace. L'addition de toutes ces radiations correspond à une onde unique, « enveloppe » de toutes les ondes élémentaires dont chaque particule est le centre. On verrait par un calcul simple que cette onde résultante a une intensité pratiquement nulle dans toutes les directions, sauf dans celle qui correspond à la réflexion régulière suivant les lois classiques de l'optique (égalité de l'angle d'incidence et de l'angle de réflexion) sur les plans « réticulaires » du cristal, c'est-à-dire ceux où sont distribués les nœuds du réseau cristallin. Encore faut-il que l'angle d'incidence en question réponde à des conditions spéciales.

On voit que sur la figure 48 que, suivant la longueur d'onde de la radiation X utilisée et suivant les valeurs des distances réticulaires (qui sont très nombreuses et diversement orientées dans un cristal) nous observerons des points ou des raies plus ou moins brillants en certains endroits d'une plaque photographique convenablement disposée sur le tra-

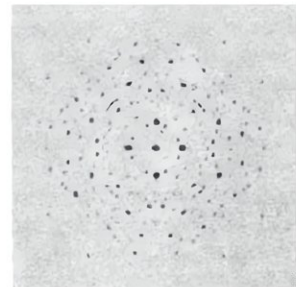
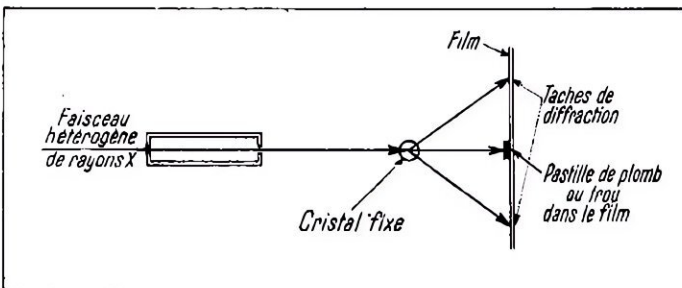


FIG. 49 ET 50. — PRINCIPE DE LA MÉTHODE DE LAUE ET DIAGRAMME DE BOLÉITE QUADRATIQUE (D'APRÈS M. R. HOCART)

Le cristal fixe est frappé par un faisceau hétérogène de rayons X. Chaque plan réticulaire réfléchit et diffracte les rayons d'une longueur d'onde déterminée, donnant une tache de diffraction. Sur le trajet du faisceau direct a été placée une pastille de plomb pour absorber ce rayonnement de grande intensité, ou, ce qui est préférable, on perce le film et on laisse ainsi passer le faisceau direct.

jet des faisceaux diffractés.

Pratiquement, avec un cristal donné, on pourra avec une incidence constante et toute une gamme de longueurs d'ondes, soit avec une seule longueur d'onde et toute une gamme d'incidences. Dans le premier cas, avec la méthode dite de Laue (fig. 49 et 50), la première en date, on envoie sur un cristal fixe un faisceau de rayons X de toutes longueurs d'ondes : les réfractions à travers tous les plans réticulaires donnent des groupes de taches lumineuses telles que celles de la figure 50. Dans le second, avec la méthode Bragg (fig. 51 et 52), on fait appel à un faisceau d'une seule longueur d'onde monochromatique (on l'obtient en utilisant un tube à anticathode en cuivre, molybdène, etc., soumise à un bombardement électronique d'énergie suffisante pour exciter le rayonnement caractéristique du métal) et le cristal est monté sur un support tournant.

Point n'est besoin cependant de disposer d'un cristal de grande dimension. Une poudre très fine est composée de grains ayant un diamètre de l'ordre du millième de millimètre. Un seul de ces grains contient des centaines de cristallites élémentaires. Si on fait tomber un faisceau de rayons X sur une telle poudre, tous les cristaux qui se trouveront dans une orientation favorable diffractent les rayons, suivant un cône de révolution autour du rayon incident. Comme on peut admettre, étant donné le grand nombre des cristaux, que toutes les orientations sont représentées, on observera, comme dans la méthode précédente, un spectre d'anneaux circulaires, si on le conserve tout entier, ou d'arcs de cercle si on en découpe seulement une bande. C'est la méthode de Debye et Scherrer ou méthode des poudres qu'illustrent les figures 53 et 54.

On peut, par les procédés précédents, constituer, grâce à l'examen de substances cristallines pures et bien définies, une sorte de catalogue de spectres de rayons X auquel on se référera lors-

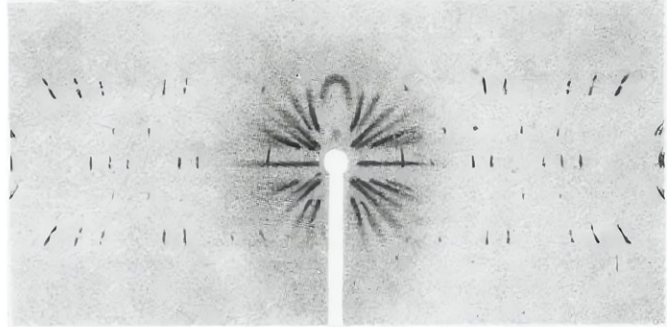
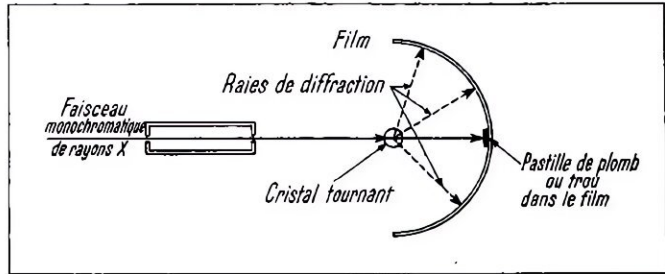


FIG. 51 ET 52. — PRINCIPE DE LA MÉTHODE DE BRAGG OU DU CRISTAL TOURNANT ET DIAGRAMME DU SEL GEMME

Le cristal tournant est frappé par un faisceau monochromatique de rayons X. Quand un plan réticulaire du cristal reçoit le faisceau sous l'incidence voulue, fonction de la longueur d'onde fixe et de la distance réticulaire, il la diffracte, donnant une raie lumineuse sur le film.

qu'on voudra analyser un échantillon nouveau.

On pourra faire subir aux corps étalons différents traitements (dessiccation, chauffage, etc.) et suivre au spectrographe à rayons X, les modifications de structure qui en résultent. On obtiendra ainsi autant de points de repère dont on pourra le cas échéant faire son profit pour l'analyse de corps inconnus.

La diffraction des rayons X donne la possibilité de faire des analyses non seulement qualitatives, mais quantitatives, par comparaison de l'intensité des raies obtenues avec une poudre de cristaux purs, et des mêmes raies observées avec l'échantillon à étudier. On ne peut cependant parler là de mesures précises, car l'absorption par les constituants du mélange, les conditions différentes d'irradiation et de développement des clichés introduisent des erreurs. C'est pourquoi, il est préférable d'employer la méthode que nous avons mise au point et qui est exposée dans la légende des figures 55 et 56.

Dans notre exposé de la diffraction des rayons X, nous n'avons pas fait intervenir jusqu'ici les dimensions des cristaux.

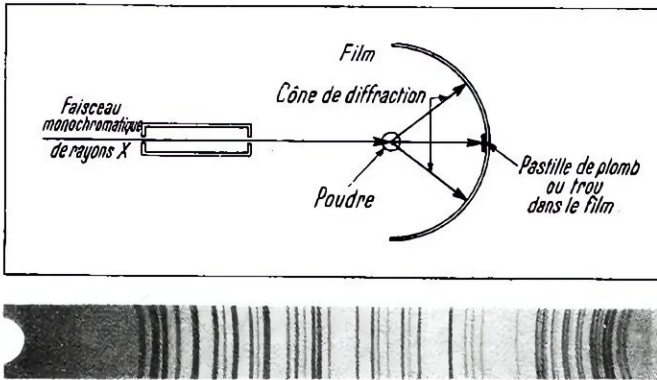


FIG. 53 ET 54. — PRINCIPE DE LA MÉTHODE DE DEBYE-SCHERRER OU MÉTHODE DES POUDRES ET SPECTRE DU QUARTZ

Les plans réticulaires des particules finement pulvérisées possèdent toutes les orientations possibles. Par suite, à chacun d'eux correspondra un cône de diffraction, puisqu'on peut toujours trouver des particules dont l'orientation concorde avec la distance réticulaire et la longueur d'onde unique du rayonnement incident. Sur le spectre du quartz obtenu avec la raie K du cuivre, les doublets visibles à droite de la figure sont dus aux raies des deux sous-niveaux de la couche électronique K du cuivre.

En effet, ceux-ci, si petits soient-ils (de l'ordre du micron) peuvent être considérés comme très grands par rapport aux distances entre les atomes. Il n'en est plus de même si nous étudions une substance à l'état amorphe, c'est-à-dire à la phase élémentaire de la cristallisation. Dans ce cas, les cristallites comportent un nombre d'atomes qu'on ne peut pas considérer comme infiniment grand. Il en résultera que les plages lumineuses des raies seront beaucoup moins nettement délimitées. Si nous traçons la courbe de l'intensité lumineuse d'une raie du spectre, cette courbe sera d'autant moins « pointue » que les cristallites comprendront moins d'atomes. Ceci nous permet d'évaluer les dimensions des cristaux élémentaires d'une roche amorphe (fig. 57 et 58).

Avec des substances parfaitement amorphes, on n'observerait plus guère que des halos mal définis, qui permettraient cependant encore, dans une certaine mesure, de connaître la répartition des atomes de la molécule. L'emploi des rayons X a, en particulier, rendu ainsi de très grands services dans l'étude de la structure de la cellulose, des textiles artificiels, par exemple, et du caoutchouc.

La lutte contre le cancer

Contre le cancer, trois armes ont été employées, la chimiothérapie, la chirurgie, les radiations.

La chimiothérapie est encore inexistante. On a proposé de nombreux remèdes médicaux du cancer. Les charlatans en offrent tous les jours. Or, il n'existe pas encore de remède ayant une efficacité quelconque contre le cancer.

La chirurgie du cancer est l'arme qui convient le mieux pour certaines localisations : poumon, tube digestif, sein, cerveau. Elle ne peut prétendre toutefois guérir le cancer que si ce dernier est pris au stade initial, où il constitue encore une maladie locale, non généralisée. Le bistouri peut s'y aider des progrès de la technique électrique : les appareils d'électro-coagulation, le bistouri électrique en particulier, permettent, dans certains cas, de limiter les dangers

d'essaimage que crée l'ouverture des vaisseaux sanguins inséparable de tout acte chirurgical.

L'utilisation des radiations pour détruire par ionisation, les cellules de la tumeur constitue la radiothérapie. Jusqu'à ces derniers temps, on utilisait, uniquement par applications externes, les rayons gamma du radium. Il est permis d'espérer maintenant l'emploi des éléments radioactifs artificiels (voir chap. VIII), découverts par M. et M^{me} Joliot-Curie, et peut-être aussi la neutronthérapie à partir des neutrons engendrés par un cyclotron (voir chap. VII).

La radiothérapie repose sur des bases biologiques certaines. Nous ignorons les causes de la radiosensibilité des tissus.

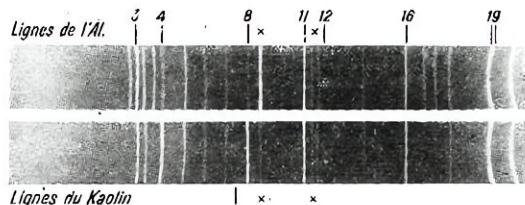


FIG. 55. — SPECTRES DESTINÉS AU DOSAGE DU QUARTZ. En haut, il s'agit d'un fil d'aluminium enduit de quartz pur; en bas, d'un fil d'aluminium enduit d'une terre contenant une proportion inconnue de quartz. Les lignes dues au quartz et marquées d'une croix sont celles qui ont servi au dosage. (Voir fig. 56.)

Mais c'est Pierre Curie lui-même, transportant dans la poche de son gilet les premiers éléments radioactifs qu'il venait de découvrir, qui constata une brûlure de la peau à leur niveau. Bergonié et Tribondeau montrèrent peu après que la radiosensibilité d'une cellule est maximum au moment de sa division. Il n'est donc pas surprenant que les tissus cancéreux, qui sont le siège de caryocinèses incessantes, soient plus sensibles aux radiations que les tissus normaux. Regaud a montré que c'est à la multiplication rapide des cellules souches qu'un tissu doit sa radiosensibilité. Les cancers formés de cellules dont le pouvoir de reproduction semble infini sont donc des tissus spécialement radiosensibles.

C'est la marge de radiosensibilité qui sépare les éléments cancéreux des éléments sains que fait jouer la thérapeutique par les radiations. Un traitement bien conduit doit tuer les cellules cancéreuses radiosensibles en respectant les éléments sains radio-résistants. Le problème ainsi posé se montre dans toute sa complexité.

Théoriquement, les radiations capables de tuer les cellules malades en respectant les cellules saines constituent un traitement idéal du cancer. Pratiquement, les difficultés sont multiples. Tous les tissus cancéreux n'ont pas la même radiosensibilité. Certains paraissent résistants. Certains tissus normaux présentent des cellules dont la fonction est de réparer les destructions cellulaires, et qui ont une activité caryocinétique (donc une radiosensibilité élevée). La marge de sécurité thérapeutique est réduite d'autant. L'expérience clinique et thérapeutique, le recul dans le temps sont déjà suffisants pour classer les tumeurs en radiosensibles et radiorésistantes et pour se faire une idée de la dose à appliquer.

L'étude du stroma (Roussy et Leroux), c'est-à-dire des éléments conjonctivo-vasculaires qui entourent les cellules tumorales proprement dites, renseigne également sur les possibilités et les chances de succès d'un traitement par les radiations.

L'évaluation, si imprécise soit-elle, du nombre relatif des cellules en voie de division par rapport au nombre de cellules au repos dans un fragment de tumeur (indice caryocinétique) fournit également un élément d'appréciation.

Les nombreuses observations prati-

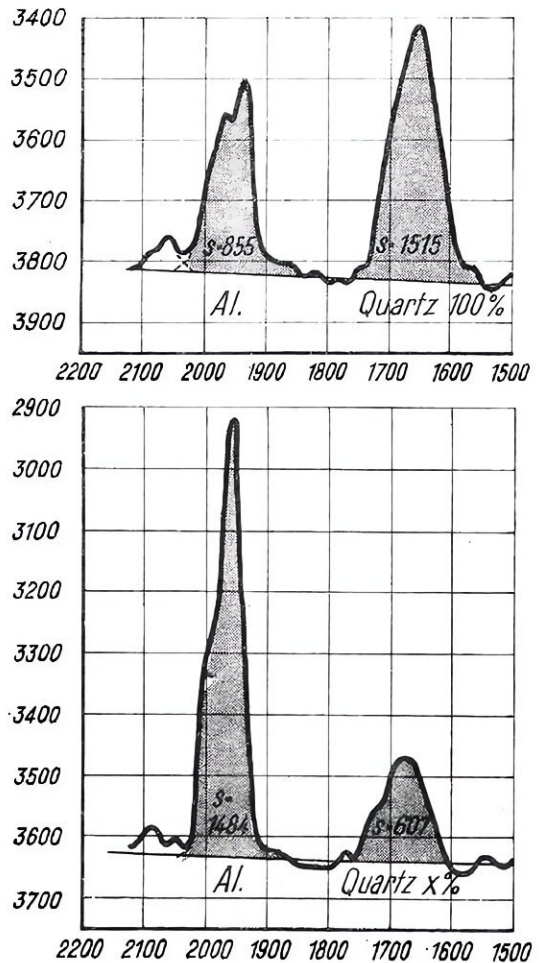


FIG. 56. — EXEMPLE DE DOSAGE PAR LA COMPARAISON DES COURBES PHOTOMÉTRIQUES DE DIFFRACTION

Il s'agit ici de doser le quartz contenu dans une poudre. On prend un fil d'aluminium enduit de baume de Canada et pesé avec soin. On le roule sur un petit tas de quartz pur dont les grains vont y adhérer et on pèse à nouveau. Par différence, on connaît le poids de la poudre de quartz qui y est restée fixée. Le fil, suspendu à un dispositif hélicoïdal pour que toute la masse de quartz soit irradiée par le faisceau de rayons X, donne un spectrogramme de quartz surimposé au spectrogramme du fil d'aluminium, tel que celui qui est représenté sur la figure 58, en haut. Prenons une ligne quelconque du spectre de l'aluminium et mesurons son intensité au microphotomètre. Faisons de même pour une ligne de quartz voisine de cette raie. Maintenant, répétons tout le processus, mesure du poids, prise du spectrogramme et mesure au microphotomètre, avec la poudre à analyser et qui contient un pourcentage inconnu de quartz. Le dépouillement microphotométrique donne les surfaces des raies telles qu'on les voit sur la figure ci-dessus. En haut, figure d'abord la raie de l'aluminium (support) et ensuite la raie du quartz 100%. En bas, la même raie de l'aluminium d'abord et celle du quartz à x% ensuite. Pour avoir le pourcentage inconnu x, il suffit de faire le rapport des intensités des raies et de le diviser par le rapport des poids.

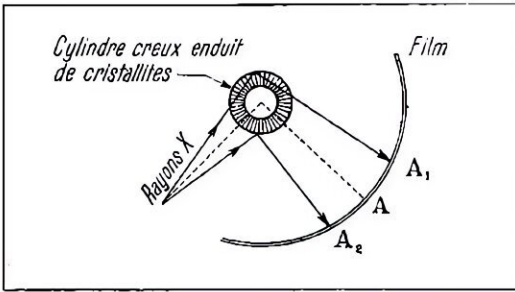


FIG. 57. — PRINCIPE DE LA MESURE DE LA DIMENSION DES CRISTALLITES (MÉTHODE DE BRILL)

On constitue un cylindre de collodion portant sur sa surface la poudre cristalline à utiliser. On voit qu'en dirigeant sur ce cylindre un faisceau de rayons X, on dédouble le faisceau réfléchi. (Voir la figure 58.)

quées depuis une vingtaine d'années, précisées par des examens anatomopathologiques, ont permis de juger l'efficacité du traitement radiothérapique du cancer. Dans certains cas, les résultats sont excellents, les guérisons nombreuses, en entendant par guérison une survie de cinq ans, sans récurrence locale ni généralisation.

De grosses difficultés ont dû être vaincues pour l'établissement d'une dose efficace. Les radiations, agissant comme nombre d'agents pharmacodynamiques, ont une action opposée suivant qu'elles sont administrées à très faibles doses ou à des doses plus élevées. A faible dose, les rayons, au lieu d'entraver la prolifération cellulaire, peuvent l'exciter. Par une action légère mais répétée, ils peuvent entraîner la division de la cellule. Chacun a entendu parler du cancer des radiologistes.

Un premier traitement mal conduit peut aussi entraîner des difficultés si, ayant été insuffisant, le traitement de la lésion exige une irradiation ultérieure. Les cellules, d'abord radiosensibles, peuvent devenir radiorésistantes. Inversement, la peau saine recouvrant une tumeur profonde, après avoir résisté à un premier traitement, peut être le siège de troubles graves au cours d'une deuxième application. Ces accidents deviennent toutefois de moins en moins fréquents depuis que l'art du radiothérapeute a progressé et repose maintenant sur des bases certaines. On ne saurait trop insister, à ce point de vue, sur les services rendus par les centres anticancéreux créés en France depuis une vingtaine d'années et où le traitement des malades confié à des spécialistes éprouvés,

avec la possibilité d'entretenir des statistiques sûres, a été un élément de progrès certain dans le traitement du cancer.

La technique de l'utilisation des rayons X en radiothérapie est simple (roentgen-thérapie). Ils naissent d'ampoules soumises à des tensions variant entre 150 000 et 600 000 V. La tension la plus employée à l'heure actuelle est 200 000 V (tension constante). Les irradiations sont discontinues et consistent en séances d'une durée d'une demi-heure à trois quarts d'heure, répétées tous les jours ou tous les deux jours.

Le radium est aussi utilisé en radiothérapie (curiethérapie) comme source de rayons gamma dont la nature physique est voisine de celle des rayons X. Sa désintégration, qui aboutit au plomb, est représentée par le schéma de la figure 4.

Les rayons gamma produits proviennent du radium B et C ; ils ont des énergies différentes et on peut distinguer trois bandes dans leur spectre : celle de 600 kV, celle de 1 300 kV et celle de 1 800 kV. Ces radiations sont capables de traverser le corps humain et d'y provoquer, tout comme les rayons X, des phénomènes d'ionisation dus aux élec-

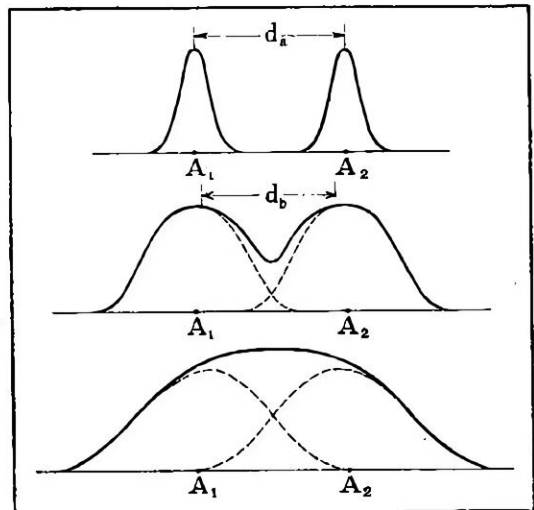


FIG. 58. — LE DÉDOUBLEMENT DES RAIES POUR L'ÉVALUATION DE LA DIMENSION DES CRISTALLITES

En haut, les deux contours microphotométriques, bien formés et distincts, correspondent à des cristallites de dimensions appréciables. Ils tendent à empiéter l'un sur l'autre et à se confondre même, lorsque la dimension des cristallites devient trop faible. La mesure de la distance qui sépare les maximum permet d'évaluer ces dimensions,

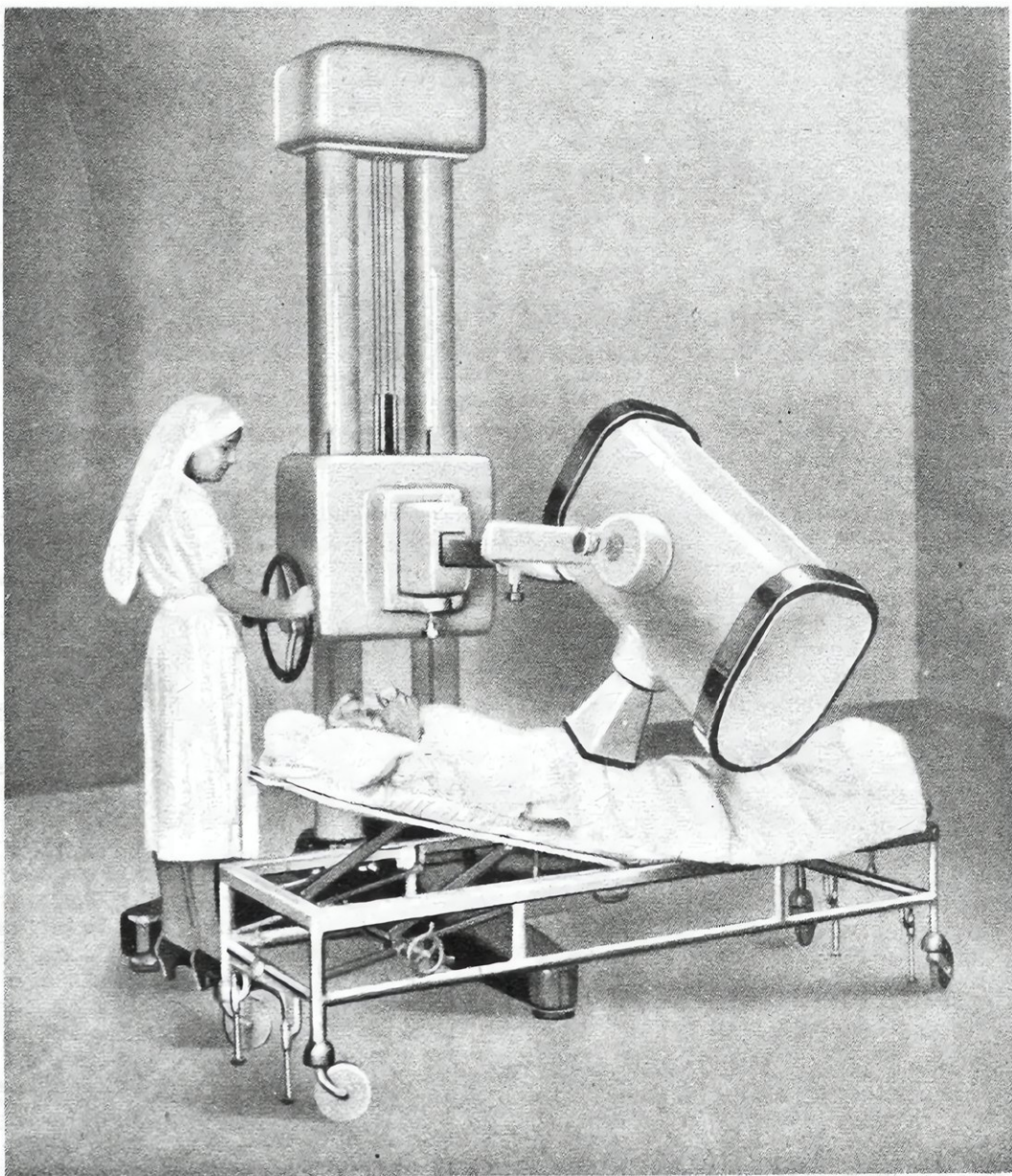


FIG. 59. — UNE INSTALLATION A 200 000 VOLTS POUR RADIOTHÉRAPIE PROFONDE

trons qu'ils arrachent aux molécules (rayons bêta secondaires).

Le radium est utilisé sous forme de sulfate, de bromure et de carbonate que l'on place dans des enveloppes de platine, qui ne laissent passer que les rayons gamma. Les rayons bêta secondaires, nocifs pour la peau et les muqueuses, sont éliminés par une filtration à l'aide de substances légères : caoutchouc, liège, cire d'abeille.

Le radium, dont la moitié de la masse se transmute en mille six cent quatre-

vingt onze ans, produit constamment par sa désintégration un gaz également radioactif, le radon, d'une vie beaucoup plus courte, puisque sa période n'est que de trois à huit jours. Le radon est rassemblé à mesure qu'il se dégage et condensé dans un tube capillaire refroidi à l'air liquide. Détaché de l'appareil extracteur, ce tube peut être employé pour la radiothérapie à la place des aiguilles de radium. On peut aussi utiliser les sources de mésothorium qui coûtent moins cher



FIG. 60. — LE TRAITEMENT D'UN CANCER DE LA FACE PAR LA RADIOTHÉRAPIE
A gauche, la malade avant traitement. A droite, la tumeur a complètement disparu.

que celles de radium, mais qui durent moins longtemps ; la période du mésotorium est en effet de six à sept ans. Les rayons gamma émis par le mésotorium sont principalement situés dans les bandes énergétiques suivantes : 1 700 kV, 2 000 kV et 2 650 kV ; ils sont donc plus pénétrants que ceux émis par la famille du radium. Les tubes radifères sont généralement

placés aussi uniformément que possible autour de la tumeur qu'il s'agit d'irradier. On utilise à cet effet des moulages (fig. 61) sur lesquels, ou dans lesquels, on place ces tubes. Malgré tous les soins et artifices apportés dans ces traitements, l'opérateur est mis dans l'alternative suivante : soit d'irradier de près la tumeur, ce qui entraîne un manque d'uniformité, à cause des petites dimensions des tubes radifères, soit d'éloigner les tubes de façon à croiser les faisceaux des rayons et à uniformiser la dose. Comme l'intensité du rayonnement de la source radioactive diminue comme l'inverse du carré de cette distance, on voit qu'en éloignant les tubes on diminue énormément la dose. On compense cette déficience en augmentant le nombre de tubes ou en prolongeant le temps d'irradiation. Le nombre limité de tubes dont dispose un centre anticancéreux force souvent l'opérateur à avoir recours aux longs temps d'applications. Ceci n'est pas sans compliquer le problème car, *grosso modo*, comme dans le cas des poisons, une faible dose dans le temps peut, dans certains cas, rendre la tumeur radiorésistante, ou même faire plus de mal que de bien en excitant la prolifération cellulaire maligne de la tumeur.

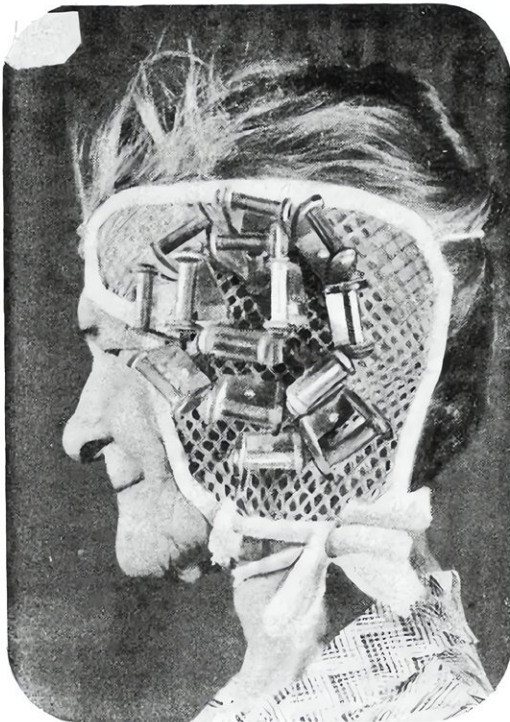


FIG. 61. — LE TRAITEMENT D'UNE TUMEUR PAR CURIE-THÉRAPIE

Les quatorze tubes de radium sont répartis sur un moulage de la tumeur en celluloid.

Toutes ces solutions laissent, comme on le voit, à désirer et la radioactivité artificielle offrira peut-être la solution idéale. On pourra établir des moulages métalliques, semi-métalliques ou contenant des sels convenables qui, irradiés préalablement sur toutes les faces par des deutrons ou des neutrons, présenteront une radioactivité uniforme. Ainsi, par exemple,

le radiocouvre émetteur de rayons bêta et gamma de période de douze heures, que l'on obtient en bombardant le cuivre avec des deutons ou des neutrons, pourra avantageusement remplacer le radium C en curiethérapie.

Bien entendu, pour produire du radiocouvre en quantité suffisante, il faudra des faisceaux de deutons de plusieurs dizaines de microampères, et, comme le rendement croît aussi avec l'énergie des particules incidentes, on devra pouvoir atteindre des énergies deutoniques de plusieurs dizaines de millions de volts. Seuls donc les centres proches d'un cyclotron géant pourront bénéficier de telles sources radioactives pour curiethérapie.

Les progrès réalisés depuis une vingtaine d'années dans le domaine de nos connaissances sur la nature du cancer et sur son traitement sont certains. Tous les progrès récents de la physique et de la chimie et de la biologie y ont concouru. La part qui revient à l'observation clinique est également considérable. Le temps a déjà pu jouer un rôle important dans l'établissement des statistiques faisant intervenir un élément de guérison. Et peut-être le moment n'est-il pas très éloigné où l'on pourra affirmer que tel traitement physique, chirurgical ou mixte guérit telle forme ou telle localisation du cancer.

Autres applications des rayons X

Nous avons vu que l'observation des raies caractéristiques d'une substance pouvait en préciser la nature. C'est là que réside tout un chapitre de l'analyse chimique qualitative et quantitative.

De l'observation des diagrammes de diffraction par les substances cristallines ou pseudo-cristallines, on peut déduire des renseignements sur leurs propriétés physiques et sur leurs variations au cours de traitements thermiques, mécaniques chimiques et même au cours de l'ensemble des modifications provoquées par la « vie » d'une substance biologique par exemple.

Les diamantaires s'en servent pour dépister les faux joyaux. Une perle fine donne un diagramme différent de celui d'une perle de culture (fig. 63).

Les musées, les antiquaires, et les amateurs d'art ont trouvé dans les radiographies des tableaux un moyen élégant de faire ressortir des défauts où les

images estompées et camouflées. Les sculptures et motifs architecturaux ont parfois avantage à être radiographiés pour mieux être préservés.

La recherche dans l'art des couleurs, des vitraux anciens spécialement, utilise la technique des rayons X. Dans la mesure des épaisseurs des couches d'émail sur les poteries, par exemple, les rayons X sont d'un grand secours.

La radiographie a été utilisée sur une très grande échelle pendant la guerre pour localiser géométriquement les projectiles chez les blessés. Elle a inspiré les industriels dans la recherche des défauts de pièces, cachées à la vue, pendant le fonctionnement d'un ensemble. Les radiographies de moteurs d'avions sont aussi précieuses que celles des pales d'hélice. On a même mis au point le cinéma radiographique. Une camera photographie à une certaine cadence les images qui apparaissent sur un écran fluorescent de radioscopie.

Dans le domaine de la radiographie de pièces importantes, il faut mentionner

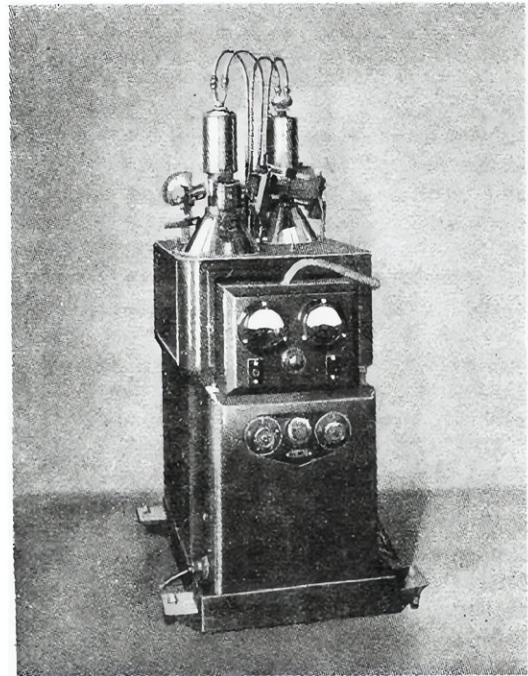


FIG. 62. — ENSEMBLE D'UN GROUPE POUR LA RADIOCRISTALLOGRAPHIE INDUSTRIELLE

On aperçoit, à la partie supérieure, les deux tubes scellés fonctionnant sous 45 000 V, ainsi que les différents accessoires, porte-films, etc. (Compagnie Générale de Radiologie.)

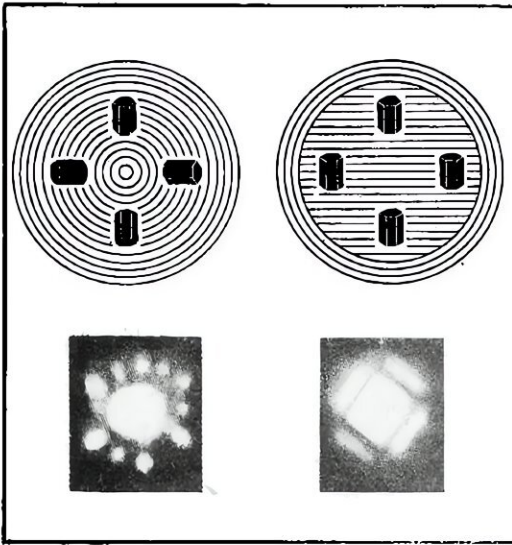


FIG. 63. — SPECTROGRAMME D'UNE PERLE FINE (À GAUCHE) ET D'UNE PERLE DE CULTURE (À DROITE)

La perle fine donne une figure à symétrie plus élevée que la perle de culture. La première est constituée par des couches minces concentriques de nacre (petits cristaux de carbonate de chaux) dont on a représenté quatre sur le schéma de gauche. À droite, on voit comment est formée une perle de culture : au centre, des couches planes de nacre (suivant la disposition des quatre cristaux figurés à grande échelle), et à l'extérieur de ce noyau quelques couches minces concentriques de petits cristaux de carbonate de chaux déposés par l'huître.

l'innovation qui consiste à utiliser soit des tubes de radon, soit des aiguilles de radium, soit enfin de la peinture radioactive contenant un peu de radioytrium par exemple, ou un autre radioélément de vie moyenne de quelques jours comme ceux que l'on « fabrique » avec des cyclotrons. Il ne faut pas que la période soit trop longue, car les servants d'une pièce d'artillerie, par exemple, peinte pour être radiographiée par ce procédé (rayons gamma) pourraient à la longue être lésés par la radioactivité rémanente. Enfin, on peut rattacher à ce chapitre des applications de l'artillerie atomique celle des rayons alpha des corps radioactifs qui rendent fluorescents certains sels comme le font les rayons X. En mélangeant des quantités infinitésimales de radium avec une peinture au sulfure de zinc, par exemple, on peut peindre des cadrans lumineux pour les montres, les boussoles, les appareils de bord des avions et des sous-marins. Pour les avions, on évite ainsi d'avoir à éclairer les panneaux ou la cabine, et, pour les sous-marins, on économise du courant électrique.

Les tubes électroniques

Si l'on entoure un filament incandescent par un cylindre, on observe le passage d'un courant lorsque le cylindre est porté à un potentiel positif par rapport à celui du filament. C'est que le filament émet un flux d'électrons qui va frapper l'anode. On a ainsi réalisé une *diode* ou redresseuse. Si on porte, en effet, le cylindre à une tension alternative, seule l'alternance positive pourra passer à travers la diode.

Ce tube est le plus simple de l'immense famille des tubes électroniques auxquels il faudrait consacrer plusieurs volumes, et dont les applications sont véritablement innombrables. Nous ne pouvons songer à les décrire ici et nous nous bornerons à une énumération rapide, forcément incomplète.

Chacun connaît les lampes à trois ou plusieurs électrodes qui équipent les postes d'émission et de réception et ont rendu possible l'essor de la radiodiffusion, les radiocommunications intercontinentales, la télévision (qui fait appel aussi aux cellules photoélectriques et aux tubes à rayons cathodiques), etc. L'étude de la réflexion des ondes électromagnétiques sur les couches d'électrons (Heaviside) qui entourent notre planète dans la haute atmosphère ont servi de prélude à un magnifique essor du radar, fondé sur la réflexion des ondes très courtes sur les obstacles matériels. Repérer des avions, des V-1, des sous-marins, des canots de rescapés, des indices géographiques pour la navigation sans visibilité, etc., voici ce que le radar rend possible, et ceci grâce aux courants électroniques.

Les relais électromécaniques du type thyratrons ou phanotrons doivent être ajoutés à notre liste. Enfin, les fours à haute fréquence nécessitent de vrais postes d'émission au même titre que les cyclotrons. À une échelle plus réduite, les postes de moyenne fréquence pour diathermie, électrocoagulation, etc., sont mus par des oscillations entretenues par triodes.

N'oublions pas les applications des phénomènes piézoélectriques et des ultrasons qui les accompagnent.

Enfin, une importante découverte va ouvrir, dans les années à venir, des horizons nouveaux d'une portée insoupçonnée. Il s'agit du microscope électronique auquel nous consacrons le chapitre suivant.

LE MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE

LE microscope optique, après un développement plus que centenaire, a atteint pratiquement de nos jours la limite extrême de ses possibilités. Cela ne tient pas, comme on pourrait le croire, à des détails techniques, mais à la nature même de la lumière. Un système optique quelconque, quelle que soit sa perfection, donnera toujours, d'un point lumineux objet, une image formée non pas par un point, mais par une tache entourée d'un certain nombre d'anneaux dus à la diffraction. L'intensité des anneaux lumineux décroît en fonction de leur rayon. Dans la pra-

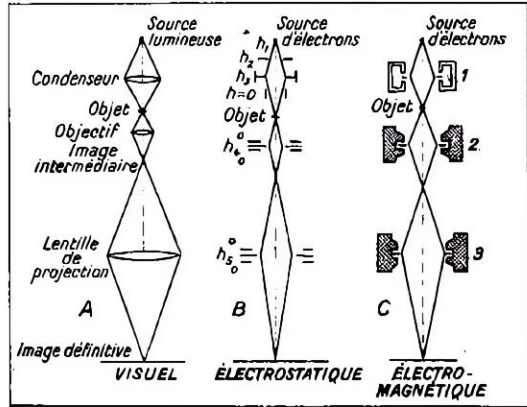


FIG. 65. — SCHEMAS COMPARATIFS DES TRAJETS D'UN FAISCEAU LUMINEUX OU ÉLECTRONIQUE DANS UN MICROSCOPE OPTIQUE, ÉLECTROSTATIQUE OU ÉLECTROMAGNÉTIQUE

A, système optique, lentilles en verre ou en quartz. — B, système électrostatique avec les tensions constantes h_1, h_2, h_3, h_4 et h_5 . — C, système électromagnétique avec, en 1, 2 et 3, les lentilles constituées par des électroaimants ou même des aimants permanents munis de cavités ou de coupures dans les armatures. (On n'a pas pu faire ressortir le pouvoir d'agrandissement sur les deux figures 64 et 65).

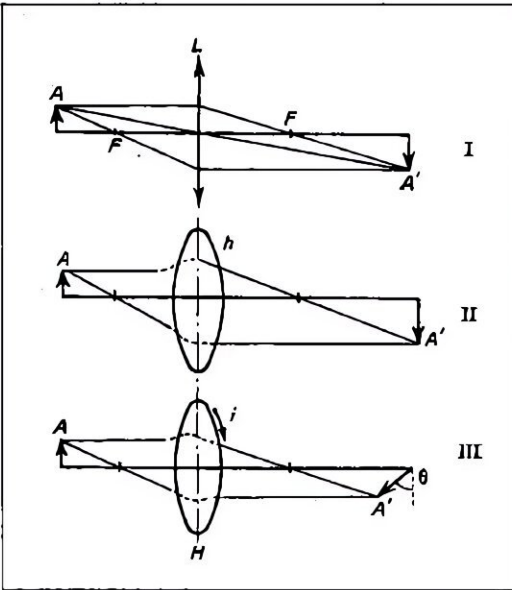


FIG. 64. — SCHEMAS DE PRINCIPE DE DIFFÉRENTES LENTILLES

En I: les rayons lumineux issus de A sont réfractés par la lentille L et aboutissent au point image A'. En II: les électrons issus du point-objet A sont réfractés par la lentille électrostatique h et aboutissent au point-image A'. Le champ h est produit par un diaphragme porté à un certain potentiel. En III: les électrons issus de A sont réfractés par le champ magnétique H et aboutissent au point-image A' avec rotation d'un certain angle. Le champ H est produit par le passage du courant dans une spire.

tique, ils peuvent être négligés et le phénomène réduit à sa tache centrale. Ainsi deux points de l'objet très voisins donneront deux taches lumineuses qui empiéteront plus ou moins l'une sur l'autre, jusqu'à ne plus pouvoir être distinguées, qu'on les observe directement ou que l'on prenne une photographie. Il ne servirait à rien d'augmenter le grossissement des lentilles: l'image deviendrait plus vaste, mais aussi plus floue.

Le rayon de la tache centrale donnée par un point lumineux est proportionnel à la longueur d'onde de la lumière émise ou réfléchi par ce point lumineux et inversement proportionnel à l'indice de réfraction du milieu dans lequel se trouve l'objet. Aussi, pour diminuer le rayon de cette tache, faut-il employer les longueurs d'ondes les plus courtes compatibles avec

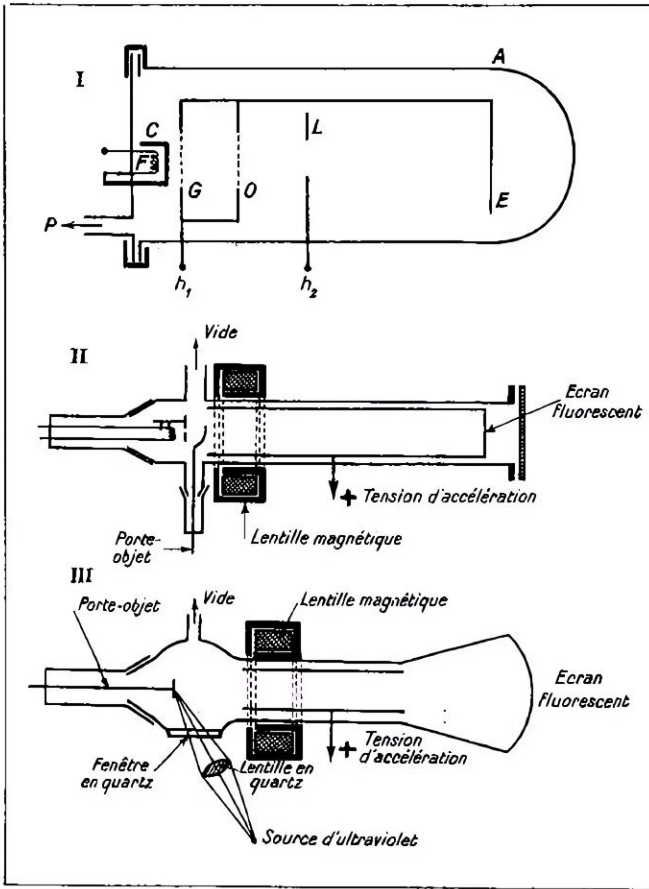


FIG. 66, 67 ET 68. — MICROSCOPES ÉLECTRONIQUES SIMPLES

I. Microscope électrostatique : Dans l'ampoule étanche A, vidée par la pompe P, le filament incandescent F chauffe la cathode C émettrice d'électrons. Ceux-ci, accélérés par la grille G portée au potentiel h_1 , traversent l'objet extrêmement mince O et sont diffractés par la lentille électrostatique L portée au potentiel h_2 . L'image se forme sur l'écran fluorescent E. — II. Microscope électromagnétique. — III. Microscope électronique utilisant l'effet photoélectrique en lumière ultraviolette : L'objet est éclairé par un faisceau de rayons ultraviolets et émet des électrons qui, accélérés et diffractés, vont former une image sur l'écran.

la vue ou avec l'emploi de plaques photographiques spéciales, et immerger l'objet dans un liquide d'indice supérieur à l'unité. En lumière blanche ordinaire, avec l'ouverture maximum pratiquement réalisable, le pouvoir séparateur (la plus petite distance de deux points donnant des images distinctes) d'une image ne dépasse pas 2 dixièmes de micron, soit 2 dix-millièmes de millimètre. L'emploi de l'ultraviolet a permis de séparer des points distants de 1 dix-millième de millimètre ou 1 dixième de micron. Le grossissement utile voisin de 2 000 qui en résulte constitue l'extrême limite des progrès

réalisables avec le microscope ordinaire.

Il devait venir naturellement à l'esprit de faire appel aux rayons X, dont les longueurs d'onde s'échelonnent entre le dix-millième et le cent-millionième de millimètre. Toutes les tentatives dans ce sens échouèrent parce que les rayons X ne se prêtent pas à la réfraction ; on ne connaît pas de lentilles pour ces rayons.

On sait aujourd'hui (p. 38) que les électrons sont accompagnés d'ondes (Louis de Broglie) et que la longueur d'onde de ces radiations est très petite. Elle est déjà de 1 angström pour des électrons accélérés sous 150 V, alors que les rayons ultraviolets, utilisés en ultra-microscopie optique ont des longueurs d'onde de 300 angströms. N'est-il donc pas possible de se servir de ces ondes en microscopie ? Le succès fut éclatant dans cette voie et les grossissements que l'on peut déjà atteindre sont de l'ordre de cinquante mille fois. On entrevoit des pouvoirs séparateurs possibles, dépassant 200 000, lorsque les corrections apportées actuellement aux aberrations chromatiques et de sphéricité des lentilles électroniques seront mieux conditionnées. Mais, d'autre part, dans la pratique, on ne peut pas indéfiniment diminuer la longueur d'onde employée, ou, ce qui revient

au même, on ne peut pas accélérer des électrons sous de très hautes tensions, car, devant traverser l'échantillon à l'étude, ils finiraient par le détériorer. Des électrons de 150 000 V sont accompagnés d'ondes de 0,03 angström, soit cent mille fois plus courtes que celles des rayons ultraviolets et ouvrent déjà un vaste champ de recherches microscopiques nouvelles, notamment en biologie.

La figure-64 montre l'analogie qui existe entre la « marche » des rayons lumineux à travers une lentille de verre et celle des « rayons » électroniques à travers des lentilles électrostatiques ou

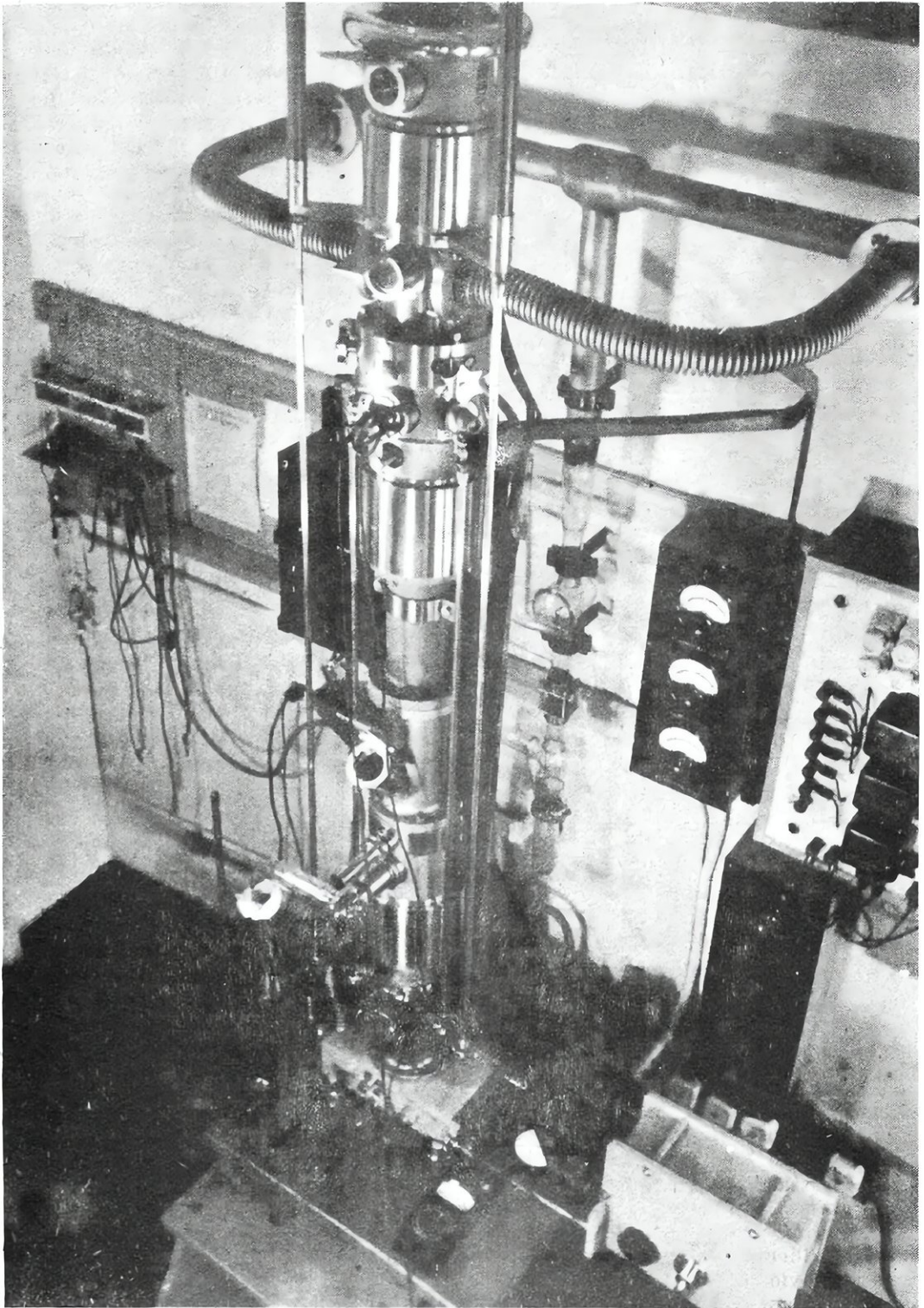


FIG. 69. — LE MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE UNIVERSEL (ÉLECTROMAGNÉTIQUE ET ÉLECTROSTATIQUE) DE MANFRED VON ARDENNE, QUI PERMET LA PRISE DE VUES CINÉMATOGRAPHIQUES

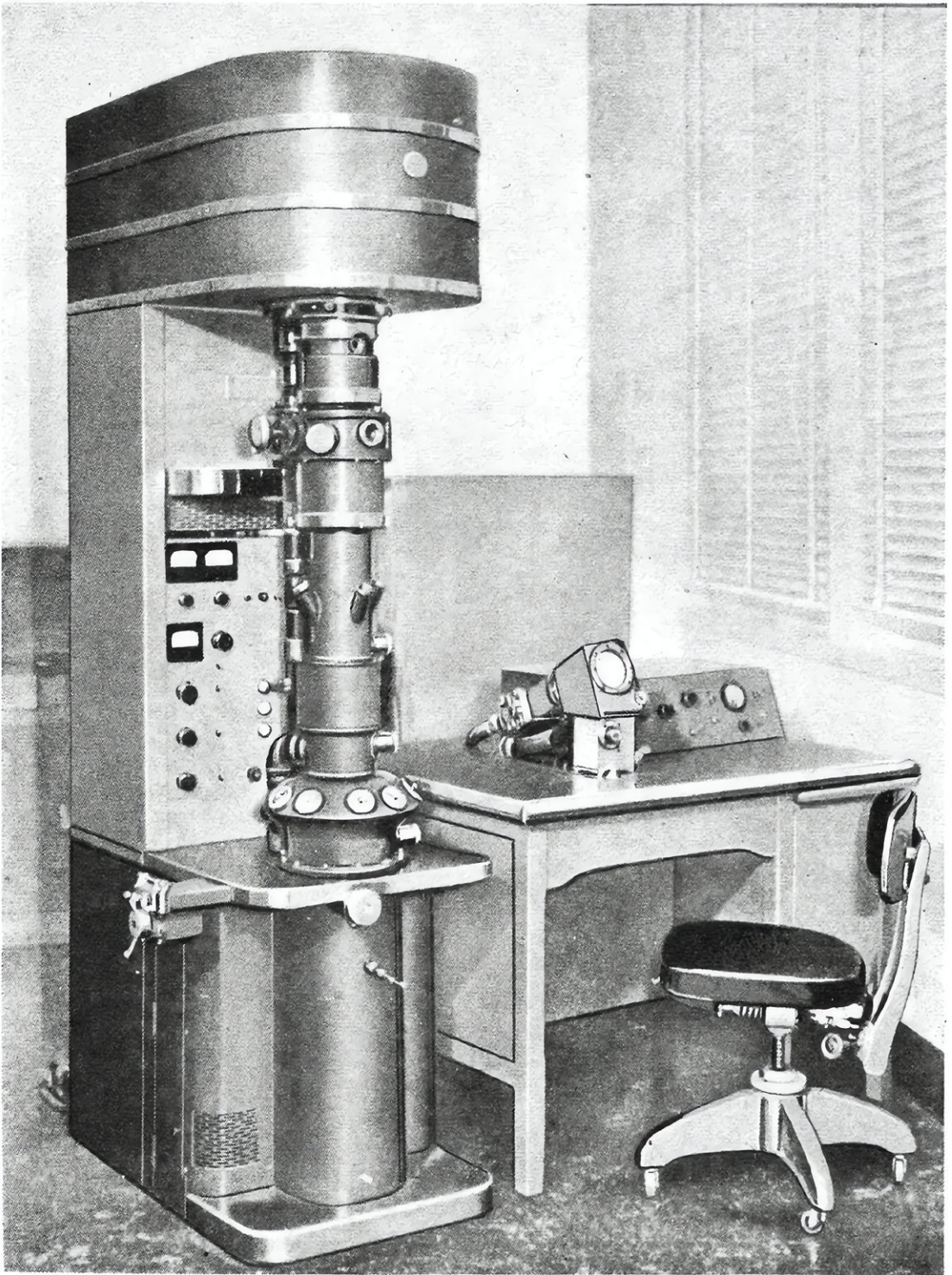


FIG. 70. — DEUX TYPES DE MICROSCOPES ÉLECTRONIQUES AMÉRICAINS

A gauche, microscope électronique du type maintenant classique, dont plusieurs exemplaires ont été livrés à l'industrie et aux laboratoires. A droite, le petit modèle expérimental dont on prévoit la construction en grande série (voir fig. 71).

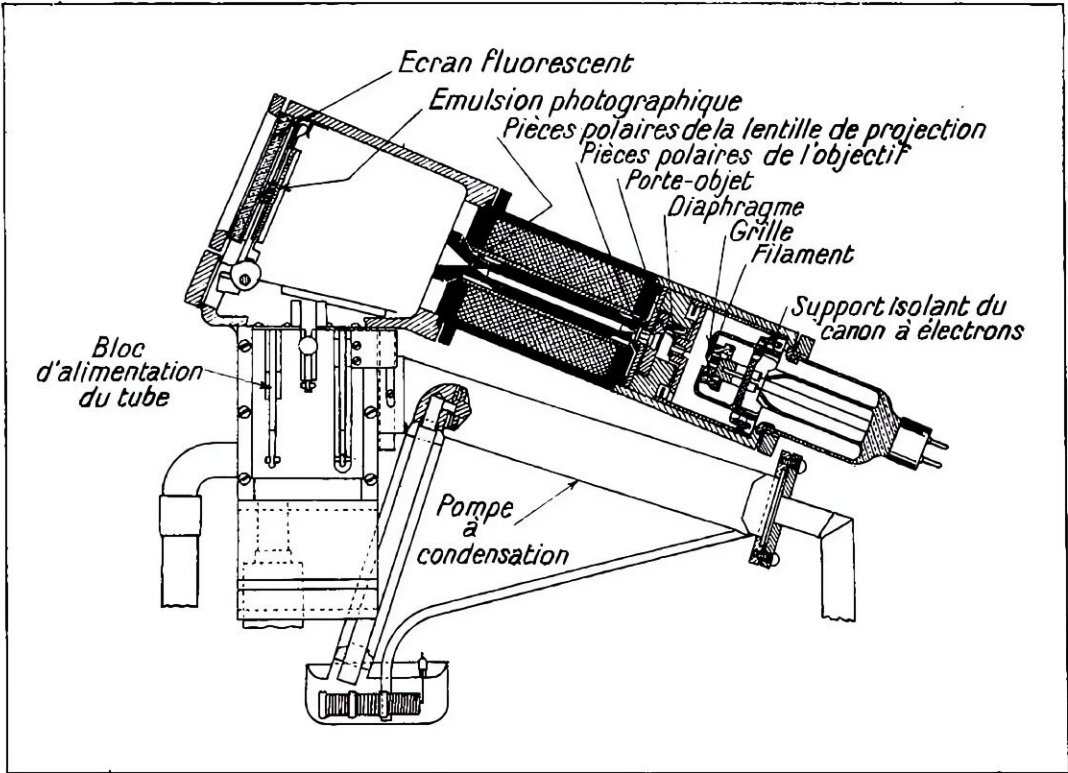


FIG. 71. — COUPE SCHÉMATIQUE DU PETIT MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE AMÉRICAIN DE LA FIGURE 70.

magnétiques. Avec ces dernières, se produit un phénomène nouveau pour les opticiens, une rotation de l'image. La figure 65 illustre des processus semblables avec des combinaisons de lentilles optiques, électrostatiques, ou magnétiques.

La figure 66 montre le schéma d'un microscope électronique très simple,

du modèle électrostatique. Celui de la figure 67 est de modèle magnétique. L'avantage de ces derniers réside surtout dans le fait qu'ils évitent les hautes tensions stabilisées et les vides très poussés qu'elles exigent. La figure 68 montre un autre dispositif où l'objet n'est pas traversé par des électrons, mais bombardé

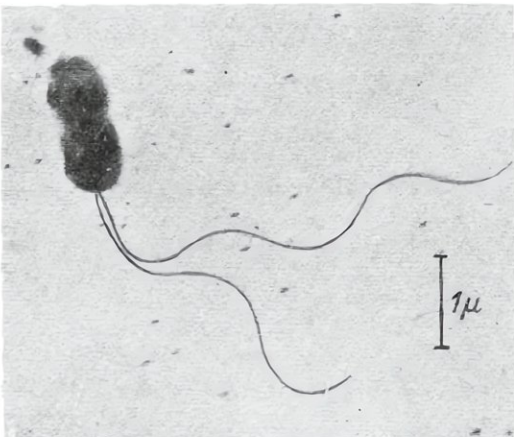


FIG. 72. — UN BACILLE PYCOCYANIQUE GROSSI 8 000 FOIS



FIG. 73. — LES PRODUITS DE LA RÉACTION DU SILICATE TRICALCIQUE ET DE L'EAU (PRISE DU CIMENT) GROSSI 31 000 FOIS AU MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE

On distingue ici les cristaux d'hydro-silicate et les spherulites de chaux.

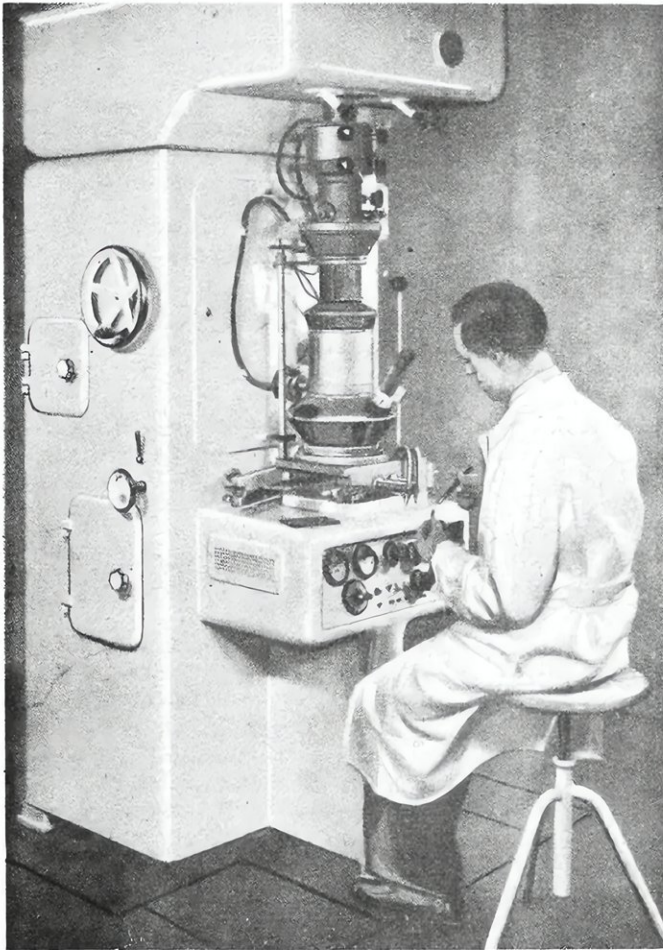


FIG. 74. — LE MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE SIEMENS

par des photons ultraviolets qui provoquent l'émission d'électrons par l'objet lui-même, par effet photoélectrique.

Le microscope « théorique » de Heisenberg et le « principe d'incertitude »

Les théories physiques modernes ont eu une grande influence sur les courants philosophiques. Les discontinuités introduites par Plank, la relativité d'Einstein et la théorie ondulatoire de de Broglie ont introduit des éléments nouveaux dans les discussions philosophiques. Il ne convient pas d'insister ici sur cet aspect des théories modernes. Mais, puisqu'il est question de microscopie, il est intéressant de mentionner un principe très important qui découle des conceptions actuelles.

Supposons un électron rapide traversant

le champ de vision d'un microscope « imaginaire », inventé pour rendre tangibles des déductions purement mathématiques. Si nous désirons, à un moment bien déterminé, connaître les caractéristiques de position et de vitesse de ce projectile, nous sommes bien obligés de troubler son mouvement, introduisant par cela même des erreurs sur les quantités à mesurer. Nous ne connaissons sa position avec précision qu'en l'arrêtant ou le ralentissant. Le principe de Heisenberg exprime que, si nous désirons connaître simultanément la position et la vitesse d'un corps à un moment donné, nous devons nous contenter d'une certaine approximation dans la vitesse si nous voulons une grande précision dans la position, et, inversement, une grande approximation dans la position si nous exigeons une grande précision sur la vitesse. Les formules nous fixent le produit de ces deux incertitudes comme étant supérieur à la constante de Planck. Le calcul montre que, dans le monde des électrons, si nous voulons une précision de l'ordre de l'angström dans la position, il nous faudra

admettre une incertitude supérieure ou égale à 7000 km/s sur la vitesse du projectile, ce qui n'est d'ailleurs pas si mal si le projectile se meut déjà à des vitesses de plus de 200 000 km/s.

Le principe d'incertitude peut être laissé de côté dans le monde où nous vivons. Exemple : une masse de 0,1 g peut être localisée à 1 millième de millimètre près, si on veut simultanément connaître sa vitesse à 10^{-20} près. Si on se contente d'une moindre précision sur la vitesse, on augmentera la précision sur la position. Les deux valeurs sont plus que satisfaisantes et il n'y a pratiquement pas d'incertitudes dans le monde macroscopique. Comme c'est dans un tel monde que nous vivons, il est superflu d'encombrer notre philosophie de la vie, et du libre arbitre en particulier, avec des déductions mathématiques d'un « autre monde ».

L'ACTION BIOLOGIQUE DES RADIATIONS

Au cours de leur « vie », les ions formés dans les substances traversées par des radiations sont capables d'exercer des actions diverses. Tout d'abord, s'ils ont été arrachés et projetés avec une certaine énergie, les électrons peuvent à leur tour ioniser les atomes environnants et donner ainsi naissance à des électrons dits *secondaires*. Ils peuvent servir de centres d'attraction pour des gouttelettes d'eau en cours de condensation et donner ainsi naissance aux traînées visibles dans les chambres de Wilson (page 85). Ils peuvent charger négativement un fil, ou le décharger et communiquer ainsi une perturbation électrique à un appareil de mesure : électroscope, électromètre, compteur de Geiger (page 74). Ils sont capables enfin de modifier l'état électrique des colloïdes et de provoquer des changements visibles ou invisibles au sein des liquides organiques. C'est probablement à cette dernière catégorie d'effets qu'appartiennent les modifications observées dans les tissus soumis à l'action des radiations.

L'action biologique des radiations la plus connue est celle due aux rayons solaires. Elle se manifeste à nous sous divers aspects dont l'assimilation chlorophyllienne des plantes, le brunissement de la peau des individus, des effets anti-rachitiques, les taches de rousseur, les érythèmes ou coups de soleil sont les plus spectaculaires.

Ce n'est que quelques années après la découverte du radium que Pierre Curie observa incidemment l'action biologique des radioéléments sur lui-même. De là est née la *curiethérapie* et, plus tard, toute la *radiothérapie* qui comprend aussi la *raëntgenthérapie* (traitement par les rayons X). Comment explique-t-on ces effets ? Les théories ne manquent évidemment pas, mais elles sont loin de donner entière satisfaction.

La première en date remonte à 1922 et a été exposée par Dessauer. Connue sous le nom de « théorie quantique » ou du « point chaud », elle a été développée par Crowther en Angleterre, M^{me} Curie, Hol-

weck et Lacassagne en France et par d'autres. Les radiations agiraient par action photochimique sur de petites régions cellulaires. La loi de ces actions serait analogue à celle d'action de masse en chimie, et son expression mathématique à celle d'une loi de probabilité. Autrement dit, la décroissance des survivants d'une culture irradiée par des doses croissantes serait d'allure exponentielle. L'expérience confirme ce point de vue.

Pour Dessauer, la recombinaison des ions au sein des cellules irradiées dégagerait assez de chaleur pour provoquer divers phénomènes, oxydations, réduction, et même jusqu'à des phénomènes de coagulation. Ainsi un électron d'une dizaine de volts dégagerait, en se recombinant à l'atome d'où il a été arraché, $0,5 \cdot 10^{-18}$ calories, ce qui élèverait de 100° la température d'une molécule de poids moléculaire 3 000. Pour des électrons arrachés par des radiations de plusieurs dizaines de milliers de volts, cette élévation de température locale serait énormément plus considérable. Du point de vue physique, il est difficile d'admettre une telle localisation de la température, et, d'autre part, la recombinaison des ions dans un milieu solide est loin d'être aussi simple.

La cellule contient des organites plus ou moins sensibles, comme le noyau, les chromosomes, les gènes, etc. Les photons électromagnétiques ou les corpuscules sont absorbés différemment par les substances qui les constituent ; les organites couvrent, d'autre part, des surfaces différentes sur le diamètre apparent des cellules irradiées et sont donc plus ou moins fréquemment touchés. Les ions libérés dans ces milieux interviennent à leur tour. Ils y changent la concentration ionique et, par conséquent, le pH, ou degré d'acidité (voir chapitre IV), la pression osmotique et l'état électrique des colloïdes, la perméabilité de la membrane cellulaire, forment des oxydes, notamment de l'eau oxygénée, etc.

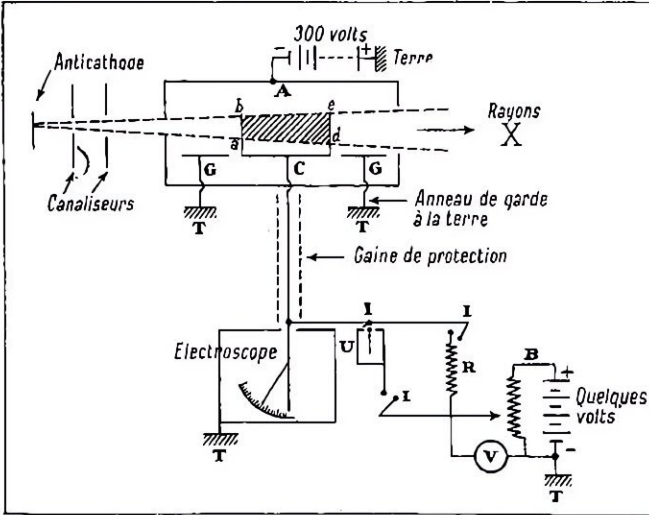


FIG. 75. — LA MESURE DE L'ÉNERGIE D'UN FAISCEAU DE RAYONS X

L'électrode C rassemble les électrons libérés dans le volume abcd par le passage des rayons X. Les interrupteurs I permettent de brancher sur l'électroscope soit la résistance R, soit la chambre d'ionisation U à source d'uranium scellée.

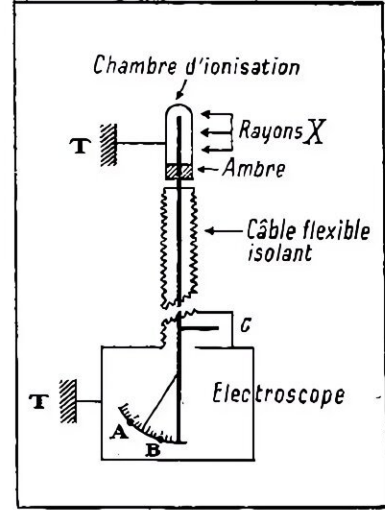


FIG. 76. — CHAMBRE D'IONISATION POUR LE DOSAGE DES RAYONS X

Le passage des rayons X dans la chambre ionise l'air et provoque la décharge de l'électroscope.

Comme on le voit, le phénomène élémentaire est assez complexe. Mais d'autres facteurs encore interviennent.

Dans un milieu composé de cellules en apparence identiques, on peut supposer, et l'expérience le confirme, qu'il existe des variations individuelles. À plus forte raison dans un milieu contenant des cellules de natures ou d'âges différents. La vie antérieure de la cellule, son milieu nourricier sont parfois des facteurs à considérer dans l'interprétation d'une expérience.

Enfin, le facteur temps est primordial. Une même dose donnée en une, deux ou plusieurs fois ne provoquera pas le même effet biologique. Le temps qui s'écoule entre l'administration d'une dose et la suivante joue un rôle essentiel. La cellule, en effet, « récupère » et se restaure, si la dose administrée n'a pas atteint le seuil de mort ou de lésion quasi mortelle.

La pénétration du rayonnement, qui augmente avec sa fréquence s'il est ondulatoire, la nature même de ce rayonnement s'il est corpusculaire (alpha, bêta, neutrons), les actions qu'il a subies avant son action sur la cellule (parcours restant des rayons alpha, ralentissement des neutrons) ne sont pas les moindres parmi les précisions requises pour définir une expérience.

De tous ces facteurs à bien délimiter, il en est qui nous échappent complètement. D'autres, au contraire, comme la mesure exacte des « doses », peuvent être déterminés avec tous les raffinements techniques souhaitables.

Le dosage des rayons X

Depuis la découverte des rayons X et des propriétés radioactives de certains éléments chimiques, le problème de la mesure de l'énergie présente dans les rayonnements pénétrants a préoccupé les physiciens d'abord, les médecins ensuite. Les premiers biologistes qui ont étudié les effets des rayons X sur les organismes vivants ne pouvaient attendre que les physiciens leur eussent fourni le moyen de rendre leurs observations strictement comparables. Ils ont donc mis au point des méthodes biologiques de dosage. Malheureusement, les propriétés de la matière vivante varient avec d'innombrables facteurs qu'il est malaisé de préciser. Faute de pouvoir chiffrer sans ambiguïté les conditions physiques des expériences, nombre de travaux de radiobiologie apparaissent aujourd'hui dénués de valeur scientifique. La découverte de la radioactivité artificielle et les premières tentatives d'application des neutrons en biologie ont amené au premier plan le problème

du dosage rigoureux des radiations, sans lequel il n'est pas plus possible de poursuivre un traitement médical rationnel que de conduire des recherches originales dans ce domaine encore si incomplètement exploré.

Nous laisserons ici de côté les méthodes de dosage d'ordre biologique. Bien que présentant un intérêt réel, elles sont aujourd'hui pratiquement délaissées au bénéfice des méthodes physiques. Leur difficulté de mise en œuvre tient à la quasi-impossibilité où se trouvent les divers chercheurs de travailler sur un matériel absolument comparable et à la minutie de leur technique. Il est cependant indispensable que les laboratoires de recherches continuent à étalonner les techniques physiques par des réactions biologiques faisant appel à un matériel vivant judicieusement choisi. Les méthodes les plus en vue font intervenir la dose « érythème » chez l'homme, l'arrêt du développement de certaines levures ou la stérilisation des œufs d'ascaris.

La plus en vogue des méthodes physico-chimiques au début du siècle était la méthode de Villard, fondée sur le brunissement des pastilles de platino-cyanure jaune de baryum en fonction de l'intensité du rayonnement X incident. On utilisa aussi la réduction du sublimé en présence de chlorure d'ammonium, ce qui donne naissance à un trouble blanc de calomel.

Dans le domaine des actions chimiques, celle dont l'importance est primordiale est le noircissement des émulsions photographiques. Bien que cette réaction soit inutilisable en tant que méthode dosimétrique, elle est très employée en radiographie pour le choix des films.

Différentes méthodes électriques de dosage des rayons X ont été proposées. Citons, à titre d'exemple : l'utilisation du bolomètre, et du radiomicromètre de Boys, celui d'une cellule photoélectrique au sélénium, dont les indications demeurent trop dépendantes de la tension appliquée au tube à rayons X. La méthode électrique universellement adoptée aujourd'hui est celle qui consiste à mesurer l'ionisation provo-

quée dans un gaz par le passage des rayons X.

Les rayons X arrachent des électrons aux atomes qu'ils rencontrent. Ces électrons, auxquels se trouve communiquée une énergie appréciable, déplacent à leur tour d'autres électrons, et ainsi de suite, la chaîne ne s'arrêtant que lorsque le dernier d'entre eux n'a pas une énergie suffisante à communiquer à son voisin. Cette énergie-limite est de 35 électrons-volts. Un projectile matériel ou un photon (pour les rayons X ou gamma par exemple) dissocie un atome électriquement neutre en un électron (chargé négativement) et un « ion » chargé positivement. Si, dans une enceinte gazeuse bombardée par des rayons X, on dispose une électrode maintenue à un potentiel positif, on observe que les électrons primaires, secondaires, etc., arrachés aux atomes du gaz, iront vers cette électrode et les ions positifs vers une autre électrode.

La figure 75 représente un tel dispositif. La chambre d'ionisation est portée à un potentiel négatif de quelques centaines de volts. Ceci a pour effet de repousser les électrons vers l'électrode collectrice C. La charge accumulée sur cette électrode est compensée par celle, de signe opposé, fournie par le dispositif B. On a ainsi une méthode de « zéro » qui permet, en observant au microscope la feuille de l'électroscope, de mesurer l'ionisation provoquée par le faisceau dans le volume hachuré *abcd*. Cette ionisation est indé-

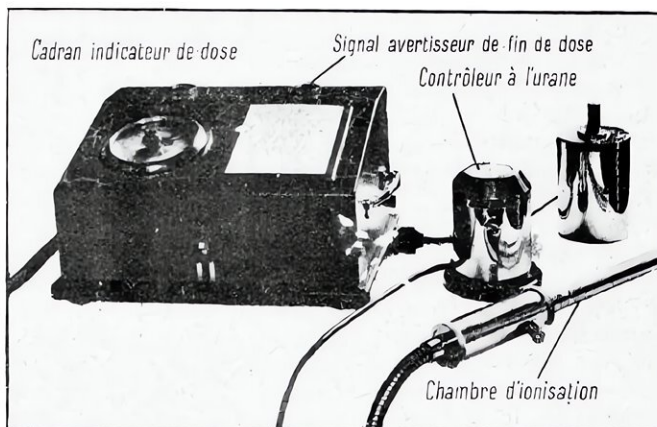


FIG. 77. — LE DOSIMÈTRE INTÉGRATEUR DE STRAUSS

Cet appareil comporte un cadran sur lequel on lit la dose reçue, un signal qui indique quand la dose prescrite est atteinte et un dispositif d'arrêt automatique de l'irradiation. On remarque également le contrôleur à l'urane qui sert à étalonner l'appareil.

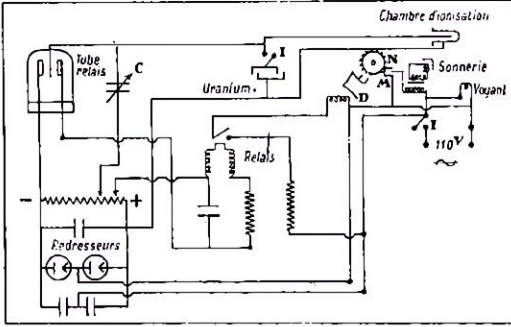


FIG. 78. — SCHÉMA D'ENSEMBLE DU DOSIMÈTRE INTÉGRATEUR DE MUTSCHELLER

Le courant dû à l'ionisation de la chambre exploratrice produit, à un moment donné, une décharge dans le tube-relais. Cette décharge instantanée est transmise au relais mécanique qui actionne le déclencheur D et fait avancer d'un chiffre le numérateur N. L'aiguille mobile M est munie d'un contact électrique qui déclenche automatiquement la sonnerie quand la dose fixée à l'avance est atteinte. Le condensateur C permet de régler la sensibilité de l'appareil et la source standard d'uranium de contrôler son étalonnage.

pendante de la qualité des rayons X et ne dépend que de leur énergie.

Cette énergie est rapportée à une unité universellement adoptée, le Röntgen ou r international. C'est, par définition, la quantité de rayons X qui, lorsque tous les électrons secondaires sont utilisés et que la radiation diffusée est évitée, produit dans 1 cm³ — à la température et pression normales — un degré de conductibilité qui donne une unité électrostatique lorsque cette charge est mesurée dans des conditions de saturation. Pour contrôler les mesures, il est bon d'avoir à sa disposition, dans un système compensateur B (fig. 75), une source constante de rayons ionisants constitués par un tube scellé d'uranium. Cette source, étalonnée par ailleurs, servira de temps à autre à étalonner l'appareil de mesures.

Dans les expériences courantes, le dispositif de la figure 76 est suffisant. On charge avec un bâton d'ébonite la feuille de l'électroscope (en déplaçant momentanément le capuchon protecteur C) ; on place la petite chambre d'ionisation près de l'endroit à irradier, et on lance les rayons.

La feuille de l'électroscope commence à descendre et on chronomètre le temps qu'elle met à aller de la division A à la division B. L'inverse de ce temps est proportionnel à l'énergie du faisceau, car

plus le faisceau est intense et plus ce temps de chute est court.

L'appareil le plus précis actuellement utilisé dans les grands hôpitaux est le dosimètre intégrateur (fig. 77). Le schéma de la figure 78 est celui de Mutscheller, de construction américaine, et se distingue par de petites variantes sans grande importance des nombreux autres dispositifs construits sur le même principe. La petite chambre d'ionisation est placée tout près de l'organe à irradier, ou dans une position telle que la correction soit acceptable. Il ne faut pas, en effet, que la mesure au dosimètre donne un chiffre trop différent de celui que le calcul donne pour l'organe irradié, compte tenu de leurs distances respectives à l'ampoule. Il faut éviter aussi le rayonnement diffusé par la peau. Enfin on utilisera différents modèles de chambres d'ionisation suivant la pénétration du rayonnement à mesurer.

Cette chambre peut être aussi utilisée pour explorer en profondeur un « fantôme » d'eau figurant le corps humain.

Le dosimètre comporte un compteur étalonné en unités Röntgen et porte sur son cadran une aiguille mobile munie d'un contact électrique. Au début de l'irradiation, on fixe cette aiguille sur le nombre de Röntgens que l'on veut administrer, et, lorsque cette dose est effectivement reçue par la chambre, une sonnerie est actionnée automatiquement et le courant interrompu dans l'ampoule. Bien entendu, on tiendra compte des distances et des surfaces pour passer de la dose de la chambre d'ionisation à celle reçue par l'organe.

L'emploi du dosimètre permet seul le dosage physique du rayonnement reçu (1). Il est loin cependant de résoudre entièrement le problème physiologique de l'irradiation. Il restera, en effet, au praticien à déterminer la manière correcte d'administrer une dose déterminée, la durée de l'irradiation présentant une grande importance.

Mais ce sont là des problèmes de pratique médicale que nous n'examinerons pas ici. Le rôle du physicien, qui a fourni au médecin une arme nouvelle extrêmement puissante, s'arrête lorsqu'il lui a indiqué le moyen de l'employer avec toute la précision nécessaire.

(1) On trouvera au chapitre suivant l'exposé des méthodes de dosage des neutrons.

NEUTRONS ET NEUTRONTHÉRAPIE

DEPUIS leur découverte en 1932, les neutrons ont joué un rôle important dans les recherches de science pure touchant la structure la plus intime de la matière, celle des noyaux atomiques. Leur intérêt n'est pas moindre dans d'autres domaines, d'applications plus immédiates, chimie, biologie et même médecine.

Le neutron, nous l'avons dit, est un des éléments de base de l'architecture du noyau des atomes. L'hypothèse de son existence a été émise dès 1920 par Harkins, et c'est Chadwick qui prouva sa réalité. C'est un corpuscule matériel, de masse voisine de celle du noyau de l'atome d'hydrogène (proton), mais de charge électrique nulle (alors que le proton porte une charge positive).

C'est à cette absence de charge électrique que doit être attribué le grand pouvoir de pénétration des neutrons dans la matière. N'a-t-on pas observé que des neutrons rapides sont capables de traverser plusieurs mètres de plomb, alors que des protons ou des particules alpha (noyaux d'hélium) sont arrêtés par bien moins d'un millimètre ? Nous avons vu qu'un atome est constitué par un groupe de particules électrisées, comprenant un noyau chargé positivement et un nombre plus ou moins grand d'électrons chargés négativement. Un neutron traversera donc la matière sans être sollicité par ces charges électriques. Mais nous avons vu aussi que, par comparaison avec leurs dimensions propres, des distances énormes séparent ces particules les unes des autres. La rencontre directe d'un neutron avec un noyau sera donc un phénomène très rare. Si cette rencontre se produit cependant, il franchira sans peine la barrière électrostatique qui protège le noyau et s'y incorporera, réalisant une transmutation. Alors qu'une particule électrisée (ion) doit posséder une énergie cinétique considérable pour franchir cette barrière, des projectiles neutroniques, même lents, atteindront sans difficulté les noyaux. C'est pourquoi les neutrons représentent des agents de transmutation particulièrement précieux, et cette propriété est mise en œuvre couramment au laboratoire en vue de la production des sources radioactives « artificielles », la

plupart des noyaux transmutés par les neutrons étant instables.

Générateurs de neutrons

Pour produire des neutrons, on s'adresse à des réactions nucléaires. La plus couramment utilisée est celle provoquée par le bombardement de certains éléments comme le béryllium (appelé aussi glucinium) par les projectiles alpha (noyau d'hélium) qui sont continuellement émis par les substances radioactives naturelles, radium, actinium, thorium, etc. (fig. 80). Le béryllium (de béryl ou émeraude) est un métal léger, grisâtre, très dur, mais très cassant, ce qui permet de le réduire en poudre. Pratiquement, on mélange intimement de la poudre de béryllium avec du radon (ou émanation du radium), dans un tube scellé. Le radon est un gaz que l'on obtient facilement par pompage sur une solution de sel de radium. Si on ne dispose pas d'appareils extracteurs d'émanation radioactive, on peut faire intervenir le phénomène de désintégration du béryllium par des rayons gamma émis par un radioélément (fig. 80). Les tubes scellés contenant des sels de radium que l'on utilise en curiethérapie peuvent ainsi servir à la production de neutrons, soit en mélangeant les sels avec du béryllium pulvérisé et rigoureusement sec (1), soit en entourant les tubes avec du béryllium pulvérisé ou non, car, ici, ce sont les rayons γ et non les rayons α éminemment absorbables, qui provoquent la réaction.

Ces deux moyens sont évidemment très modestes. Pour disposer de fortes sources neutroniques, on utilise ou bien des particules alpha naturelles, ou bien des courants très intenses d'ions animés de grandes vitesses. Ces ions sont, soit des protons (noyaux d'hydrogène), soit des deutons (noyaux d'hydrogène lourd de masse 2), soit des hélions ou particules alpha (noyaux d'hélium). Pour les accélérer, on fait appel à une des techniques exposées au chapitre III.

La cible offerte au faisceau d'ions est constituée d'un métal léger, béryllium,

(1) Si on néglige cette précaution, le tube éclate, car le radium décompose l'eau en hydrogène et oxygène qui, en se recombinant, dégagent beaucoup d'énergie (à l'échelle moléculaire).

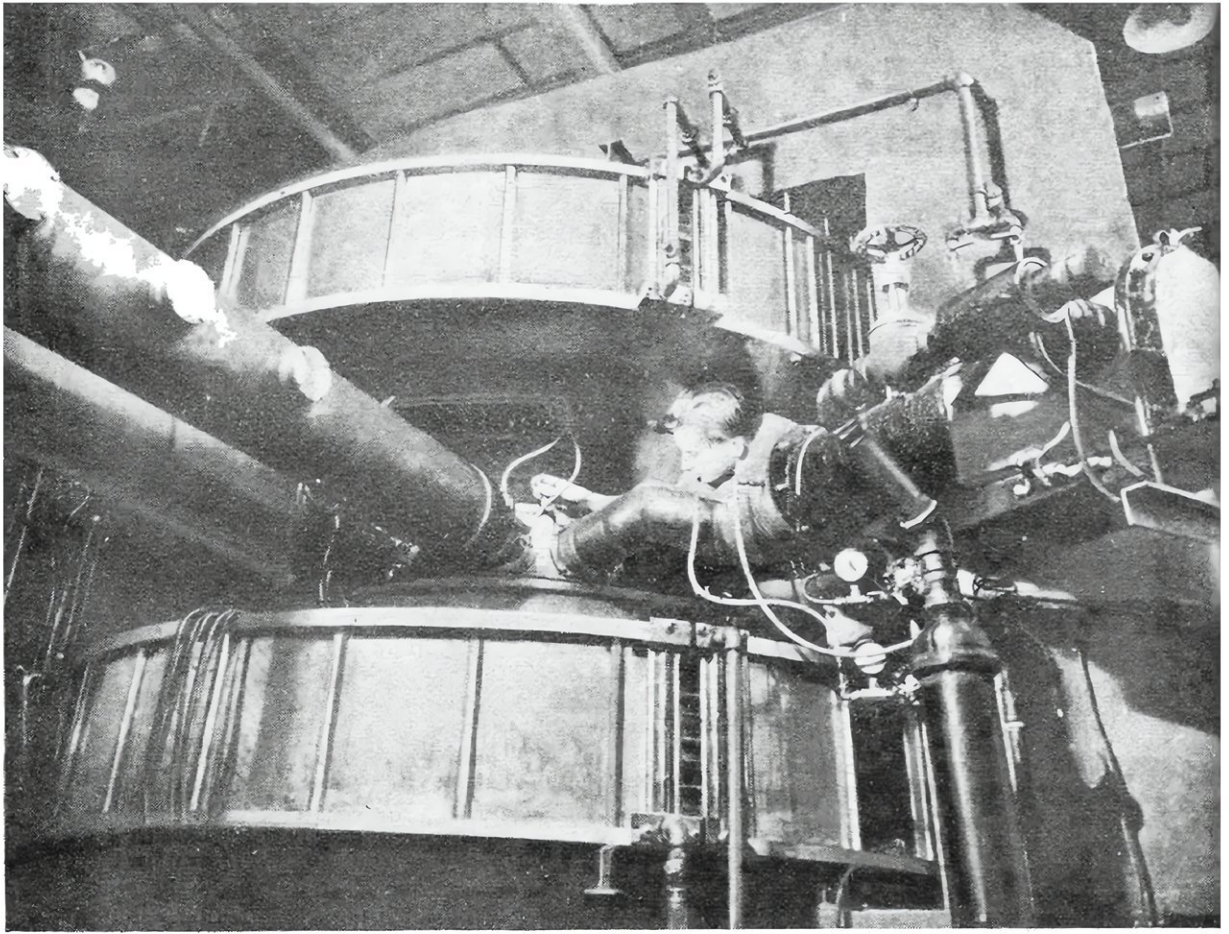


FIG. 79. — LE CYCLÉTRON DE L'UNIVERSITÉ DE HARVARD, AUX ÉTATS-UNIS

Cet appareil est utilisé pour l'accélération de deutons ou de particules alpha qui, bombardant une cible de béryllium, le désintègrent en provoquant l'émission de neutrons. Cette émission de neutrons ne s'obtient pas nécessairement au voisinage du cyclotron, car les ions accélérés peuvent être déviés et dirigés à volonté par des électrodes convenables et dans des tubes vidés pour ne point ralentir les ions. Il est possible, par suite, de disposer les cibles de béryllium, sources de neutrons, en d'autres parties du bâtiment où est logé le cyclotron, aux lieux les plus convenables pour les expériences biologiques ou les traitements neutrouthérapiques. Les cyclotrons permettent d'obtenir des faisceaux de neutrons aussi puissants que si on mélangeait plusieurs kilogrammes de radium avec du béryllium.

bore ou lithium, plus rarement par de la glace d'eau lourde (où l'hydrogène habituel est remplacé par l'hydrogène lourd). La transmutation sous l'influence des ions est pratiquement inobservable avec les méthodes ordinaires. En effet, pour le béryllium par exemple, un atome-gramme de ce corps (9,02 g) compte 10^{23} noyaux, nombre énorme. Bien qu'un courant ionique de 1 microampère désintègre 10^{10} noyaux par seconde et cause l'émission d'autant de neutrons, il faudrait environ mille années pour transmuter à ce régime 1 g de béryllium.

Par contre, l'émission neutronique de 10^{13} neutrons par seconde est observable et immédiatement utilisable, soit dans des

expériences de physique nucléaire, soit en biologie.

L'action biologique comparée des rayons X et des neutrons

L'ionisation que les neutrons produisent dans l'air est due à la transmutation des noyaux atomiques d'azote en noyaux de bore, avec expulsion de particules alpha. Dans les milieux biologiques, leur action est complexe. Les neutrons y trouvent un grand nombre d'atomes d'hydrogène auxquels ils se heurtent en leur communiquant des vitesses élevées et en les ionisant en partie. Ces protons ionisés à leur tour les atomes voisins, mais, vu leur masse, leur parcours moyen reste faible, d'où une loca-

lisation très poussée des effets biologiques des neutrons. Les noyaux d'hydrogène ou protons peuvent aussi s'amalgamer avec des neutrons pour former des noyaux de deutérium, ou hydrogène lourd, avec libération d'énergie intraatomique sous forme de rayons gamma de près de 2 millions d'électrons-volts d'énergie. Ces rayons gamma arrachent des électrons aux molécules du gaz et, à leur tour, ces électrons ionisent le milieu ambiant. Les neutrons, en outre, peuvent créer localement de minimes quantités de radioéléments artificiels, qui, en se désintégrant, ajoutent encore à l'ionisation locale du tissu irradié.

Nous avons vu au chapitre précédent que l'action biologique d'une radiation est étroitement liée à l'ionisation qu'elle provoque dans les tissus. Cette ionisation est mesurée d'une manière générale au « dosimètre intégrateur » (fig. 77). Dans le cas des neutrons, pour se rapprocher des conditions offertes par le corps humain, qui contient un fort pourcentage d'hydrogène, on remplace dans ces mesures l'air de la chambre d'ionisation par du méthane qui, par suite de la présence de ses atomes d'hydrogène, donne des indications numé-

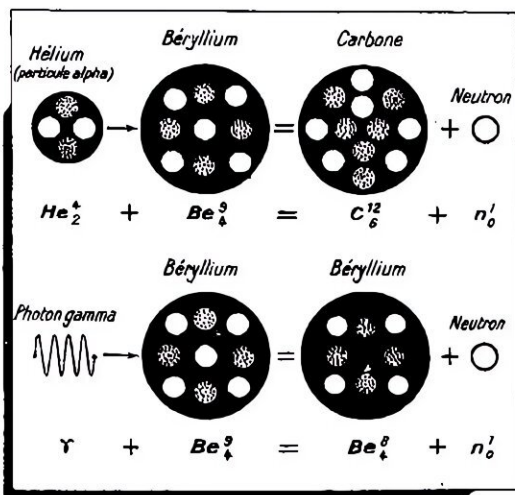


FIG. 80. — DEUX RÉACTIONS NUCLÉAIRES LIVRANT DES NEUTRONS EN PETITES QUANTITÉS POUR L'EXPÉRIMENTATION AU LABORATOIRE

Dans les deux cas, de la poudre de béryllium est bombardée soit par des particules alpha, soit par des rayons gamma émis par un corps radioactif. Avec les neutrons, on obtient dans le premier cas du carbone, dans le second un isotope du béryllium. (Les notations employées sont les mêmes qu'à la page 12.)

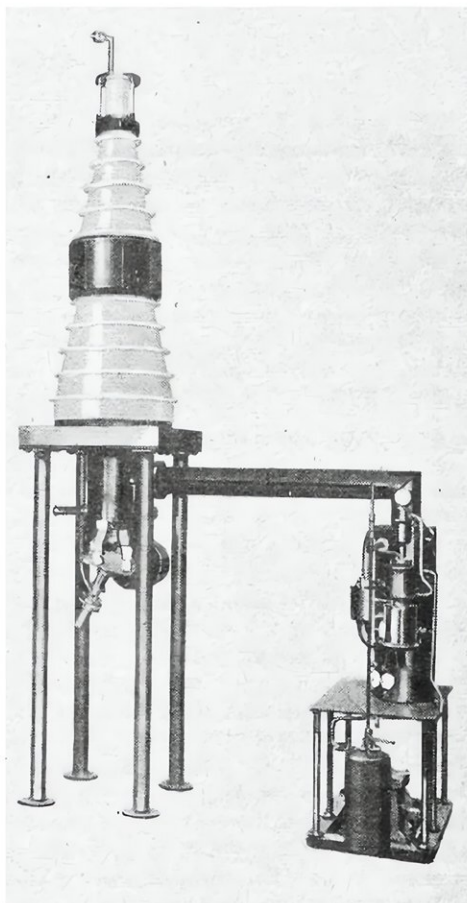


FIG. 81. — TUBE ACCÉLÉRATEUR DE DEUTONS (NOYAUX D'HYDROGÈNE LOURD) POUR LA PRODUCTION DE NEUTRONS (C. G. R.)

On aperçoit à droite le groupe de pompage. Les deutons sont accélérés de haut en bas du tube et tombent sur une cible de béryllium. Le tube mesure environ 2 m de hauteur.

riques triples de celles du dosimètre à air. Il suffira de graduer l'appareil en conséquence.

Les doses de neutrons, comme celles de rayons X, sont évaluées en röntgens, un röntgen de neutrons étant, par définition, la quantité de neutrons qui donne le même effet qu'un röntgen de rayons X sur un dosimètre standard à air. L'action biologique, c'est-à-dire l'ionisation produite dans le tissu vivant, de ce röntgen de neutrons est-elle supérieure ou inférieure à celle provoquée par un röntgen de rayons X ? Un calcul simple va nous le montrer.

L'ionisation produite par 1 röntgen de rayons X peut s'évaluer par le chiffre 820, qui représente la densité par rapport à l'air du tissu irradié, soit, en pratique, celle de l'eau : il se produit, en effet, 820 fois plus d'ions dans 1 cm³ d'eau que dans

1 cm³ d'air à la pression normale. Pour évaluer l'ionisation produite par 1 röntgen de neutrons, nous prendrons pour intermédiaire le méthane. Nous avons vu que dans celui-ci, à la pression atmosphérique, l'ionisation était triple de ce qu'elle est dans l'air. On passe du méthane aux tissus biologiques en remarquant que dans ceux-ci la proportion d'hydrogène, donc l'ionisation, est moitié moindre, toutes choses égales d'ailleurs. Donc l'ionisation due à un röntgen de neutrons serait $\frac{3}{2} \times \frac{820}{0,7}$, en

tenant compte de la densité des tissus biologiques par rapport à l'air (820) et de celle du méthane par rapport à l'air (0,7). On trouve ainsi $2,1 \times 820$. Donc 1 röntgen de neutrons est 2,1 fois plus actif biologiquement que 1 röntgen de rayons X.

A côté de cette méthode de dosage au dosimètre classique, une autre méthode très élégante vient d'être mise au point à l'Institut du Radium par MM. Bonnet-Maury et Frilley. Elle consiste à doser l'eau oxygénée produite dans une enceinte pleine d'eau et traversée par des radiations ionisantes. Les neutrons se prêtent à cette dosimétrie par l'entremise de l'ionisation causée par les protons projetés au sein de l'eau.

On pourra aussi très facilement, en pratique, mesurer les doses de neutrons administrées en plaçant tout autour de l'objet étudié des pastilles de soufre et en mesurant la quantité de radioélément formé dans ces pastilles par les neutrons incidents. On éliminera de la sorte de nombreuses erreurs et on sera dispensé de faire certaines corrections. On passera ensuite des mesures de radioactivité de ces échantillons témoins à des unités röntgen, par exemple par étalonnage avec un dosimètre standard.

La sélectivité des neutrons

L'ionisation produite par les neutrons dans des tissus biologiques est non seulement supérieure à celle provoquée par un même nombre de röntgens en rayons X ou gamma, mais elle est de qualité différente. En effet, l'ionisation par neutrons est, comme nous l'avons vu, plus localisée que celle provoquée par les rayons X et gamma, tout en étant moins localisée que celle due, soit aux rayons bêta primaires, soit aux corpuscules alpha. En outre, on a démontré que l'effet biologique est loin de varier proportionnellement avec l'ionisation,

ainsi, en opérant avec des rayons alpha de différentes énergies et provoquant par conséquent un nombre variable d'ions par centimètre cube, on a trouvé que l'effet biologique varie comme la troisième puissance environ de l'ionisation. En d'autres termes, l'effet biologique provoqué par une certaine dose en röntgens de neutrons n'est pas toujours 2,1 fois plus « intense » que celui dû à la même dose en rayons X, mais peut être beaucoup plus « intense ». Ce terme étant assez vague, nous dirons plutôt que, pour reproduire un effet biologique déterminé provoqué par une dose de n röntgens en neutrons, il ne suffira pas toujours de donner une dose de $2,1 n$ röntgens en rayons X.

Prenons quelques exemples numériques. On a trouvé (voir courbes de la figure 82) qu'il fallait 90 röntgens en neutrons pour tuer la moitié des œufs de mouche, tandis qu'il en faut 190 en rayons X. Donc, en termes de mesures au dosimètre standard à air, les neutrons sont ici deux fois plus efficaces que les rayons X.

De la même façon, on a trouvé que ce rapport est égal à 2,5 en ce qui concerne les spores de fougères.

Mais la figure 83 montre qu'il faut cinq fois plus de rayons X que de neutrons pour abrégier la vie d'une souris.

La figure 84 illustre le fait qu'il faut quatre fois plus de rayons X que de neutrons pour endommager un certain pourcentage de cellules cancéreuses. Les figures 85 et 86 donnent respectivement les valeurs 5 et 4 pour ce rapport des doses avec divers

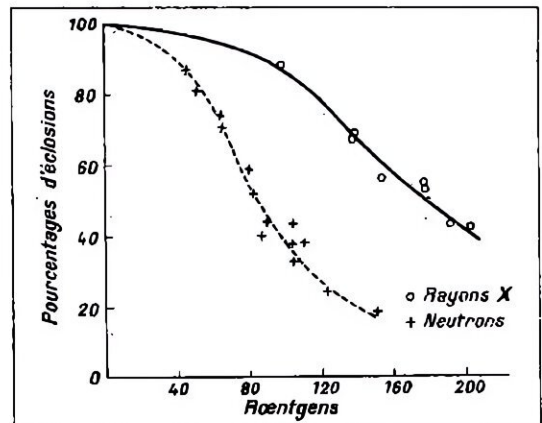


FIG. 82. — STÉRILISATION D'ŒUFS DE MOUCHE DRÉOPHILE PAR IRRADIATION

Les neutrons sont ici deux fois plus actifs que les rayons X.

éléments biologiques. Ce rapport devrait rester constant si les neutrons avaient le même « sélectivité » que les rayons X.

Ce qui est important en thérapie, c'est l'effet produit par une radiation, sur une tumeur par exemple, relativement à celui causé sur les cellules environnantes et sur l'individu en général. Voyons donc ce que nous pouvons déduire dans ce sens à partir des graphiques des figures 83 et 84. Ces deux figures traduisant les résultats d'expériences faites dans des conditions différentes, les chiffres ne sont pas comparables en valeur absolue, mais leurs rapports fournissent d'utiles indications. La figure 84 montre qu'il faut 720 röntgens en neutrons pour détruire la moitié des cellules cancéreuses présentes et la figure 83 qu'il faut 120 röntgens en neutrons, au minimum, pour commencer à tuer des souris. Le rapport de ces deux nombres est $\frac{1}{6}$, ce que

l'on peut traduire en disant qu'une souris peut supporter sans mourir jusqu'au sixième de la dose qui tue 50 % des cellules cancéreuses. Pour les rayons X, les chiffres correspondants sont 3 600 röntgens et 400 röntgens dont le rapport est $\frac{1}{9}$: une souris ne supporterait donc que le neuvième seulement de la dose en rayons X, contre le sixième précédemment pour les neutrons.

Comme, pour avoir un effet biologique déterminé, il suffit d'une dose de neutrons moindre, on a donc avec ces particules le double avantage de guérir plus vite et de

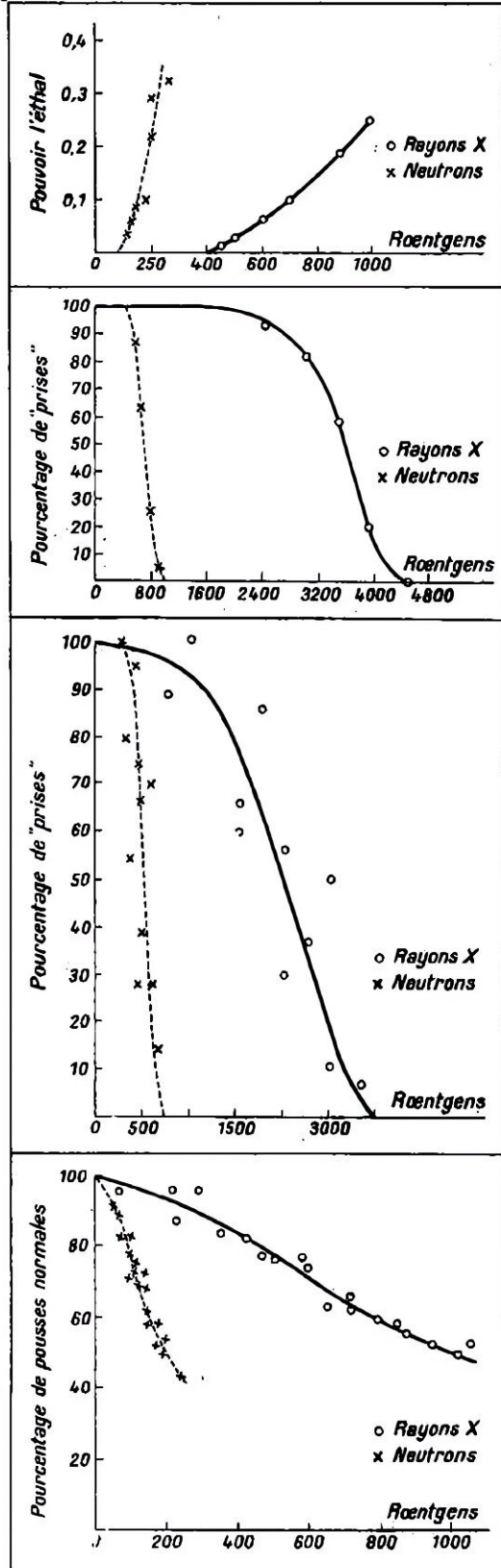
FIG. 83, 84, 85 ET 86. — COURBES ILLUSTRANT L'ACTION BIOLOGIQUE DES NEUTRONS. DE HAUT EN BAS :

Comment les souris résistent à l'irradiation complète. En ordonnée a été porté le « pouvoir létal », c'est-à-dire l'inverse du nombre de jours pendant lesquels la souris a survécu à l'irradiation. Les neutrons se sont montrés cinq fois plus actifs que les rayons X.

Action de l'irradiation sur des cancers (carcinomes de la mamelle de souris). Le tissu cancéreux irradié a été inoculé à des animaux sains, et on a porté en ordonnée le pourcentage des « prises ». Les neutrons se sont montrés là quatre fois plus actifs.

Action de l'irradiation sur le sarcome 180 de souris. En ordonnée sont portés les pourcentages de transplantations réussies avec du sarcome 180 irradié par des doses croissantes de rayons X et de neutrons. Ces derniers sont cinq fois plus actifs que les rayons X.

Germination de grains de blé irradiés. A la suite d'irradiations par des doses croissantes de rayons X et de neutrons, on note des retards variables dans la pousse des racines primaires. Les neutrons ont été quatre fois plus actifs que les rayons X.



léser beaucoup moins l'état général du sujet. Cet heureux résultat peut être amplifié en badigeonnant la tumeur avec de l'acide borique. Les neutrons désintègrent le bore en lithium et en hélium qui sont projetés avec des vitesses considérables. Ces fragments nucléaires ionisent d'une façon très localisée la tumeur et épargnent les cellules saines avoisinantes.

La neutronthérapie

L'utilisation des neutrons en thérapie du cancer semble *a priori* devoir être considérée sérieusement. Avant de passer aux expériences cliniques, qui seraient à la rigueur faisables sur des sujets condamnés, il faut multiplier les expériences biologiques. Il ne s'agit pas de répéter avec les neutrons les lamentables expériences empiriques faites avec d'autres radiations.

Dans le traitement des cancers internes, notamment de ceux des voies digestives, il est extrêmement difficile d'éviter l'irradiation massive de l'individu. Dans certains centres anticancéreux, notamment en Allemagne, on a eu recours à des solutions contenant du polonium que l'on faisait ingérer aux malades. Les tissus néoplasiques étaient ainsi fortement irradiés par les rayons de ce radioélément, mais, malheureusement, les tissus environnants étaient aussi si fortement touchés que le patient en mourait. Ce grave inconvénient était surtout imputable à la vie assez longue du polonium (plusieurs mois).

Avec les neutrons, on pourrait envisager d'irradier les cancers de l'estomac, par exemple en y introduisant une source amovible à volonté. Un petit tube de radon ou de radium contenant du béryllium en poudre est préférable à une source artificielle externe (cyclotron, etc.). Il faut, en effet, éviter d'irradier inutilement un organisme avec des neutrons, car on connaît encore très mal leurs effets. On sait déjà pourtant que les neutrons peuvent, à forte dose, comme les rayons X et autres radiations, provoquer des cancers (Lacassagne).

Nous avons vu que la dosimétrie des neutrons était chose aisée. La protection est également plus facile contre les neutrons que contre les rayons X ou gamma. Il se trouve que toute substance contenant de nombreux atomes d'hydrogène (1),

comme l'eau ou la paraffine, absorbe très vite un faisceau de neutrons. Il sera donc facile et peu coûteux de canaliser les corpuscules. Lorsqu'il s'agit de se protéger contre des faisceaux de neutrons fournis par un cyclotron, ou toute autre machine, il suffit tout d'abord d'augmenter les écrans d'eau. Le choc des neutrons avec les noyaux de l'hydrogène, qui ont sensiblement la même masse, entraîne un échange d'énergie considérable, et les neutrons ralentis sont facilement absorbés par les noyaux. Une épaisseur d'eau de 1 m assurera une protection efficace, alors qu'il faudrait plus de 10 m de plomb.

On ajoutera à ce liquide quelques kilogrammes de borax. Cette dernière précaution est destinée à supprimer la composante gamma de 2 millions d'électrons-volts signalée plus haut et qui est émise lors de la formation de noyaux de deutérium dans l'eau pure. Avec les noyaux de bore éparpillés dans l'eau, la réaction nucléaire ne dégage pratiquement pas de rayonnement pénétrant.

On éloignera aussi de la source de neutrons tout appareil ou objet susceptible de s'activer. Les neutrons forment des radioéléments pouvant avoir des périodes radioactives assez longues, de telle sorte que les instruments, objets ou matières premières « activés » accidentellement, seront de véritables « poisons » de laboratoire, au même titre et avec plus d'inconvénients que les vapeurs de sodium dans un laboratoire de spectroscopie. Les mouvements propres des appareils de mesure peuvent atteindre de telles valeurs que toute recherche est rendue difficile sinon impossible.

Il faut aussi avoir toujours présent à l'esprit le fait que, si nous sommes pratiquement transparents aux rayons X et gamma très pénétrants, nous sommes pratiquement opaques aux neutrons. Le corps humain contient énormément d'eau, et une radiographie aux neutrons sur écran lumineux approprié donnerait l'inverse d'une radiographie aux rayons X. Les os laisseraient passer plus de neutrons que la chair et apparaîtraient sur le négatif plus sombres que les autres tissus. Il en résulte que le laisser-aller coutumier avec les rayons X serait catastrophique avec les neutrons.

(1) Ceci découle des lois de la mécanique classique suivant lesquelles le maximum d'énergie (100 %) est

peut être transmis par un projectile à une cible lorsque leurs deux masses sont égales

LA RADIOACTIVITÉ EN BIOLOGIE

Radioéléments naturels

Dès le début du siècle, les radioéléments naturels furent non seulement employés pour irradier de l'extérieur un objet biologique, mais ils furent également administrés en injections, en inhalations et par ingestion. On eut recours aussi à la voie cutanée sous forme de bains de boues radioactives, de badigeonnages, voire même de sous-vêtements soi-disant traités au radium ! On démontra, en empêchant le patient de respirer les émanations du bain, que le radon traversait la peau, puisqu'on trouva les descendants de ce gaz (radium B et radium C) dans le sang du baigneur.

Le Dr Vignal employait des emplâtres radioactifs dans le traitement de verrues, psoriasis et dermatoses. Le Dr Bertolotti inaugura à Turin la méthode dite de « radio-ionisation ». Elle consistait dans l'emploi soit d'un emplâtre de boue, soit d'une solution radioactive comme électrode de galvanisation. Les ions radioactifs étaient entraînés par le courant électrique dans l'intérieur même des tissus et agissaient, semble-t-il, sur les sièges inflammatoires.

Les premières recherches entreprises par Curie, Balthazard et Bouchard (1904) sur les modifications de la formule sanguine dues à l'action du radon, du thoron ou des sels radioactifs, donnèrent des résultats contradictoires concernant l'influence sur les globules blancs ou rouges, sur le temps de coagulation, sur l'atrophie de la rate ou la dégénérescence des ganglions. On observa toutefois des variations suivant les doses et suivant les périodes d'observation. Il fut prouvé, en outre, que l'usage interne de ces substances avait une certaine action sur l'appareil cardiovasculaire, provoquait notamment une baisse de tension sur les hypertendus.

Plus tard, vers 1930, on s'aperçut des méfaits causés par l'accumulation, dans certaines parties de l'organisme, du radium D, descendant à longue période du radium. La figure 87 montre une radiographie

obtenue en appliquant sur une plaque photographique le fémur d'une ouvrière morte à la suite d'ingestions répétées de faibles traces de radium. Cette personne, ainsi que d'autres ouvrières mortes de la même façon, était préposée à la peinture de cadrans lumineux de montres. Ces peintures contiennent du sulfure de zinc et des traces de sels de radium. Les rayons alpha du radium, bombardant les molécules de sulfure de zinc, les rendent fluorescentes, et les cadrans deviennent ainsi lisibles dans l'obscurité. Ces peintures sont déposées au moyen de pinceaux très fins. Ces ouvrières avaient la fâcheuse habitude d'humecter souvent ces pinceaux sur leur langue. Elles arrivaient ainsi à ingérer mensuellement quelques microgrammes de radium. On observa dans leur cas, comme on l'avait fait précédemment chez des lapins, une localisation très marquée des corps radioactifs absorbés. Ainsi on retrouva 80 % de radioactivité dans les os et dans la moelle.

La toxicité des radioéléments est évidemment moins à craindre avec des corps à période relativement courte, comme le mésothorium ou le thoron. On se sert encore d'injections intraveineuses d'une solution de dioxyde de thorium soit pour le traitement des angines de poitrine ou de certains rhumatismes, soit pour le diagnostic radiologique des maladies du foie, de la rate, des artères du cerveau et pour l'examen des sinus.

Radioéléments artificiels

La découverte des radioéléments artificiels par Frédéric Joliot et Irène Joliot-Curie, en 1934, fit entrevoir tout de suite des possibilités nouvelles, non seulement au point de vue thérapeutique, mais aussi au point de vue des recherches biologiques, en utilisant ces radioéléments comme « indicateurs » de métabolisme, c'est-à-dire d'échanges organiques.

Dès 1923, Hevesy, savant danois, avait montré comment on pouvait mettre à profit la propriété que possèdent les cellules

vivantes d'assimiler sans différenciation n'importe quel isotope (1) d'un élément chimique donné, pour analyser le processus d'absorption par les plantes du radium D et du thorium B qui sont isotopes du plomb. On a, en effet, prouvé que les pourcentages isotopiques des éléments chimiques dans la nature se retrouvent intégralement dans les cellules végétales et animales. Ceci ne serait pas le cas si les cellules vivantes pouvaient différencier, par exemple, le plomb de masse atomique 206 de celui de masse 208, dont les concentrations isotopiques dans le plomb ordinaire sont respectivement 26,3 p. 100 et 51,5 p. 100. Le radium D, de période voisine de vingt-deux ans, est un isotope 210 du plomb, et *a priori* il ne devrait pas être différencié de ses congénères non radioactifs. En analysant donc l'absorption par une plante d'une certaine dose de radium D on peut en déduire que du plomb chimique vulgaire, non radioactif, aurait été assimilé de la même façon.

Ici, il faut faire une réserve qui pose un grand point d'interrogation. Est-il bien certain que la perméabilité cellulaire ne soit pas altérée par les rayons émis par les atomes radioactifs ? Il semblerait que l'administration de doses de plus en plus massives d'un radioélément servant d'indicateur d'absorption ou de métabolisme cellulaire conduirait à des résultats substantiellement différents *si la perméabilité cellulaire était modifiée par le rayonnement de la substance chimique absorbée*. Jusqu'ici,

(1) Voir page 7.

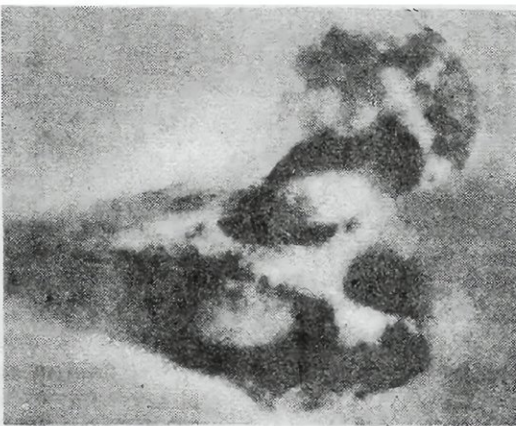


FIG. 87. — PHOTOGRAPHIE DE DÉPÔTS RADIOACTIFS DANS LES OS D'UN PEINTRE SUR CADRANS DE MONTRE

avec les doses assez faibles que l'on a utilisées, on n'a pas mis en évidence un tel phénomène. A l'avenir, lorsque nous pourrons disposer de très fortes sources de radioéléments artificiels, il sera intéressant de commencer par bien délimiter cet aspect du problème.

Les indicateurs

Pour suivre le sort d'une substance dans un organisme, en la distinguant toujours de celle qui se trouverait dans l'organisme au début de l'expérience, on peut faire appel à un *isomère* (composé formé des mêmes éléments, dans les mêmes proportions, mais combinés différemment), ou à un dérivé facilement décelable de cette substance. Malheureusement, on n'est pas sûr que les cellules ne différencient pas la substance biologique normale de son « remplaçant ». Si on peut séparer les isotopes de la substance à « suivre », comme, par exemple, en préparant et en administrant de l'eau lourde au lieu d'eau ordinaire, on pourra déterminer au moyen de méthodes spectroscopiques les processus d'absorption et d'élimination de cette substance, sans être nullement gêné par le *contenu étranger à l'expérience*. Ainsi, en buvant une tasse de thé à l'eau lourde, nous pourrions suivre au spectrographe son élimination, en fonction du temps, sans être gêné ni par la présence d'eau dans l'organisme, antérieurement à l'expérience qui débute avec l'ingestion de cette tasse de thé, ni par les liquides que nous pourrions prendre immédiatement après et durant tout le temps que durera l'expérience (ces eaux ne contiennent pratiquement pas de molécules d'hydrogène lourd). Dans le cas de l'eau lourde, on a pu, de la façon précitée, mettre en évidence dans l'organisme, *quinze jours* après l'absorption de la tasse de thé à l'eau lourde, des traces spectrographiquement visibles de cette substance.

La séparation des isotopes nécessite une technique compliquée (voir chap. XI), mais qui progresse constamment. La mise en évidence, dans les spectres optiques ou dans les spectres de masse, des concentrations isotopiques nécessite également un appareillage assez important. Nous n'entrerons pas dans le détail de ces méthodes. Nous nous occuperons exclusivement de la technique des indicateurs radioactifs.

Nous connaissons aujourd'hui quelque

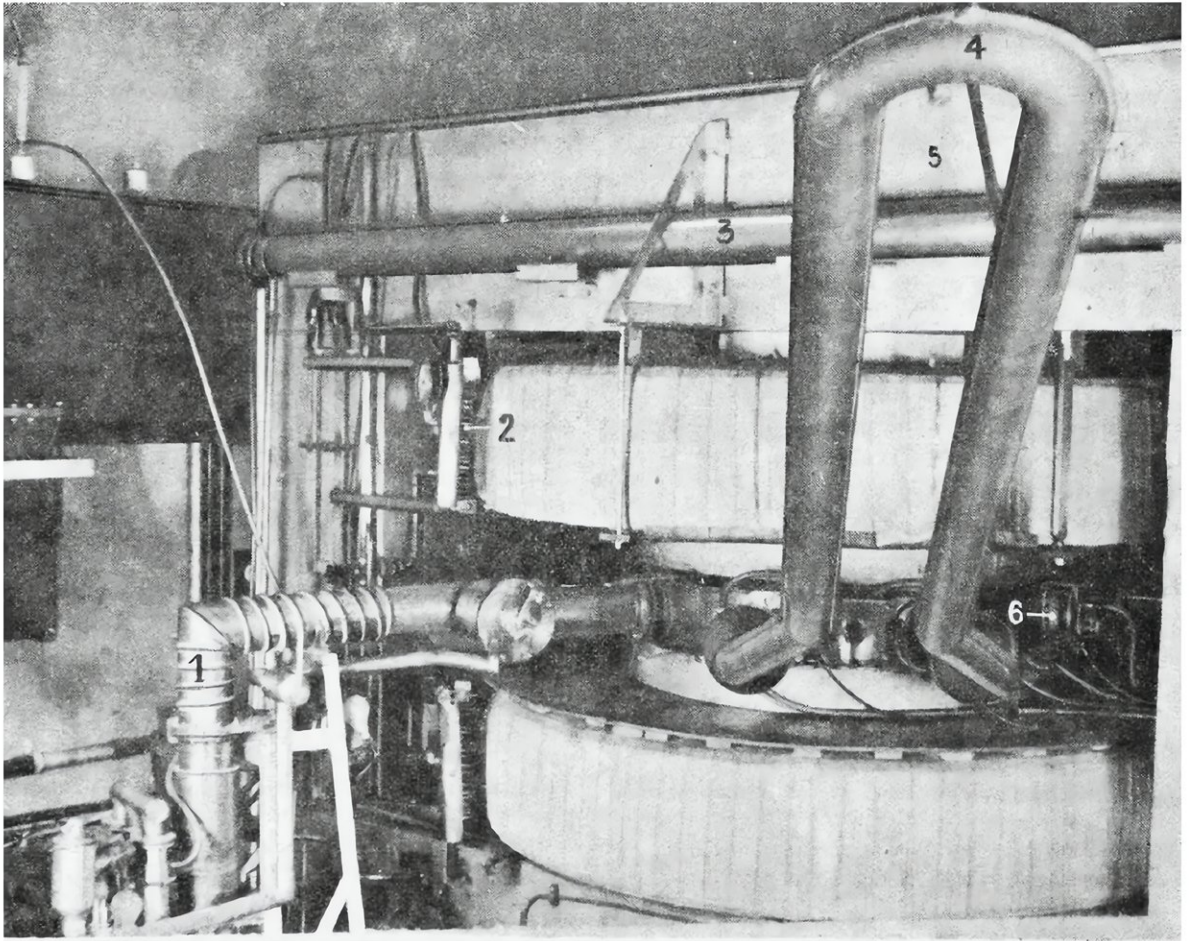


FIG. 88. — LE CYCLOTRON DE L'UNIVERSITÉ DE PURDUE AUX ÉTATS-UNIS

(On aperçoit en 1, les canalisations des pompes à vide ; en 2, les circuits d'eau pour le refroidissement des bobines de l'électroaimant ; en 3, un « feeder » amenant du courant sous haute tension ; en 4, la ligne d'attaque haute fréquence des électrodes du cyclotron ; en 5, l'armature de l'électroaimant ; en 6, le support du filament du cyclotron.

trois cents radioéléments émetteurs d'électrons négatifs ou positifs. Leurs périodes varient de la fraction de seconde à quelques années. On n'a donc que l'embarras du choix entre tous les éléments chimiques non toxiques, à période convenable, pas trop courte, pour pouvoir les suivre facilement, ni trop longue, pour éviter leur accumulation prolongée dans l'organisme.

Il importe de souligner qu'il est indispensable de connaître à fond toutes les finesses de la radioactivité pour faire œuvre utile dans ce domaine. Nombreuses sont les publications qui non seulement n'ont aucune valeur réelle, mais qui, par l'incompétence de leurs auteurs, ont fait perdre des heures précieuses à d'autres chercheurs. Ainsi certains biologistes ont avancé l'hypothèse suivant laquelle la radioactivité naturelle du potassium contenu dans le corps humain serait un facteur

biologique important dans les caryocinèses cellulaires. Le cancer, qui est une résultante d'une caryocinèse anormale et désordonnée, serait dû, d'après ces biologistes, en grande partie à une concentration excessive du radiopotassium dans une région du corps humain.

Nous avons repris les expériences sur la radioactivité du potassium et analysé sa période radioactive ainsi que les rayons émis. Nous en avons déduit que l'effet d'ionisation auquel on peut s'attendre dans le corps humain et même dans un néoplasme est très probablement négligeable. Cet effet serait de l'ordre de grandeur de celui occasionné par les rayons cosmiques auxquels nous sommes constamment exposés. La cause des proliférations cancéreuses ne semble donc pas pouvoir être imputée à la radioactivité naturelle du potassium contenu dans notre orga-

RADIOÉLÉMENTS ARTIFICIELS	PÉRIODE	ÉMISSION
<i>Période de moins d'une heure :</i>		
Carbone C ¹¹	mn 21,3	électron positif
Azote N ¹³	10,5	—
Oxygène O ¹⁵	2,1	—
Magnésium Mg ²⁷	10	électron négatif rayon gamma
Aluminium Al ²⁹	10	électron négatif
Phosphore P ³⁰	2,5	électron positif
Chlore Cl ³⁴	3,1	—
Zinc Zn ⁶⁵	60	—
Sélénium Se ⁸¹	56	électron négatif
Iridium Ir ¹⁸⁸	25	—
<i>Période de moins d'un jour :</i>		
Fluor F ¹⁸	h mn 1 45	électron positif
Sodium Na ²⁴	14 45	électron négatif rayon gamma
Magnésium Mg ²⁸	15 45	électron positif
Silicium Si ³¹	2 20	électron négatif
Argon Ar ⁴¹	1 50	électron négatif rayon gamma
Krypton Kr ⁸⁵	4 50	électron négatif rayon gamma
Calcium Ca ⁴⁵	2 25	électron négatif
Cuivre Cu ⁶⁴	12 45	—
Gadolinium Gd ⁷²	23	électron négatif rayon gamma
Brome Br ⁸⁰	4 10	électron négatif
Cadmium Cd ¹¹⁰	4 15	—
Baryum Ba ¹³⁹	1 25	—
Plomb Pb ²⁰⁹	3	—
<i>Période de plus d'un jour :</i>		
Phosphore P ³²	14,8 j	électron négatif
Soufre S ³⁵	80 j	—
Arsenic As ⁷⁶	24 à 26 h	électron négatif rayon gamma
Argent Ag ¹⁰⁸	8 j	électron négatif
Bismuth Bi ²¹⁰	5 j	électron négatif

FIG. 89. — QUELQUES RADIOÉLÉMENTS ARTIFICIELS UTILISÉS COMME RADIOINDICATEURS DANS DES RECHERCHES PHYSIQUES, CHIMIQUES OU BIOLOGIQUES

Dans la première colonne a été porté le nom de l'élément et son symbole accompagné de sa masse atomique. Dans la deuxième, on trouve sa « période », c'est-à-dire le temps au bout duquel la moitié des atomes présents à l'origine sont désintégrés. Enfin, dans la troisième colonne, figure la nature du rayonnement qui accompagne la désintégration. Le dernier radioélément Bi²¹⁰ devient, après désintégration bêta, du polonium qui est identique au polonium émetteur alpha de la radioactivité naturelle.

nisme. Au total, une trentaine de travaux pour rien.

Applications générales des radio-indicateurs

Les indicateurs radioactifs ont déjà reçu de nombreuses applications, surtout au laboratoire. C'est ainsi qu'ils ont été

utilisés dans des études de solubilité et d'adsorption. La théorie ionique y a trouvé un moyen de confirmation de certains échanges entre les ions. La chimie physique des surfaces monomoléculaires a mis également à profit ce nouveau moyen d'investigation.

En physique, on peut déjà citer des études de diffusion. On a pu, d'autre part, obtenir des résultats d'une application imprévue. C'est ainsi que Bonnet-Maury étudia vers 1929 la loi suivant laquelle du polonium évaporé dans le vide se répartit sur une surface, ceci grâce à la radioactivité du polonium. Strong, vers 1936, extrapola ces lois à l'aluminium dans les procédés modernes d'aluminisation des miroirs de télescope.

En technologie, on se sert du radon pour mesurer la perméabilité des tissus. Des masques à gaz et des chambres d'essais ou de protection pour les gaz de combat ont été mis à l'épreuve par la mesure du radon qui s'y infiltre. Enfin, et cela n'épuise pas la question, on étudie, en céramique, les épaisseurs des vernis et leur uniformité en mélangeant un sel radioactif à la pâte ou aux solutions et en mesurant l'activité en un point à nu ou recouvert d'une couche de vernis d'épaisseur inconnue. Les lois de l'absorption des rayons alpha ou bêta permettent de déduire de ces deux mesures l'épaisseur de la couche.

Dans la lutte contre les insectes, les radioindicateurs ont permis de se rendre compte de ce que les insectes prennent ou transmettent.

Le radiosoufre, de période quatre-vingt-dix jours, a été employé pour étudier le métabolisme de la vitamine B₁ chez l'homme, l'apparition du soufre dans le blanc d'œuf, etc.

Le radioarsenic a servi à analyser le métabolisme des composés de l'arsenic chez les végétaux et chez les animaux.

Le radiocalcium et le radiostrontium nous font suivre le métabolisme minéral, surtout pendant la grossesse et l'allaitement.

Le radiophosphore

On a trouvé que le temps moyen de transit du phosphore dans le corps du lapin est de trente jours environ et que le radiophosphore s'infiltrait vite dans les dents, même lorsqu'elles ont depuis longtemps atteint leur stabilité. Cette infiltra-

tion atteint les parties terminales et prouve l'importance d'un régime phosphoré même chez l'adulte, et surtout chez la femme enceinte. On a constaté une absorption très importante de phosphore par le fœtus et le placenta ; que les leucémiques (individus possédant des globules blancs en abondance) absorbent plus de phosphore que les gens normaux ; qu'en présence ou qu'en absence de graisses la plus grande partie de la production des phospholipides (graisses phosphorées) par le système gastro-intestinal est due au petit intestin. L'estomac et le gros intestin interviennent peu dans ce métabolisme. L'ablation du système gastro-intestinal et des reins ne change pas le métabolisme des phospholipides dans le foie.

L'observation des métabolismes chez les malades et chez les bien portants peut non seulement éclairer certains aspects de la maladie, mais peut aussi aider à l'établissement d'un diagnostic. On sait qu'un diagnostic n'est pas toujours facile à établir. Dans le cas du cancer, le problème est si complexe que de nombreuses réactions sérologiques ou autres se sont montrées incapables de donner avec une grande sûreté un diagnostic sérieux. Il est possible que les indicateurs radioactifs nous fournissent un jour une technique de dépistage du cancer. Voici déjà quelques observations encourageantes dans ce sens.

Sur la figure 90, on peut voir que le pourcentage de phosphore administré et trouvé sous forme de phospholipide par gramme de tissu du foie d'une souris normale est plus élevé que celui donné par une souris porteuse du

sarcome 180. Mieux encore, sur la figure 91, on peut constater que le pourcentage de phosphore administré et trouvé sous forme de phospholipide par gramme de tissu mammaire carcinomateux de souris est supérieur dans un cancer jeune à ce qu'il est dans un cancer plus évolué. Cette question étant d'une très grande importance, il vaut la peine que nous l'examinions en détail.

On remarquera sur la figure 90 les allures différentes du métabolisme du phosphore dans le muscle et dans le foie. Les courbes genre « muscle », qui indiquent une accumulation lente et continue de phosphore, sont également communes aux substances cérébrales et osseuses. Dans le cas de ces dernières, il a été prouvé que l'on a bien affaire à un processus dynamique qui intéresse les parties les plus intimes du squelette. Au bout d'un mois, après ingestion régulière de phosphore marqué (c'est-à-dire d'une quantité pondérable et bien connue de phosphore ordinaire auquel on a ajouté une quantité impondérable, mais mesurable en activité au compteur de Geiger) (fig. 92) un dixième du phosphore contenu dans les os sous forme de phosphate de calcium a été remplacé par le phosphore ingéré.

Avant d'aller plus loin, précisons la technique qui aboutit à l'établissement d'une courbe comme celles de la figure 90.

Soit tout d'abord 1 mg de phosphore auquel on ajoute une minime quantité de phosphore radioactif (en irradiant ce milligramme de phosphore par des deutons par exemple). Nous observons au début de l'expé-

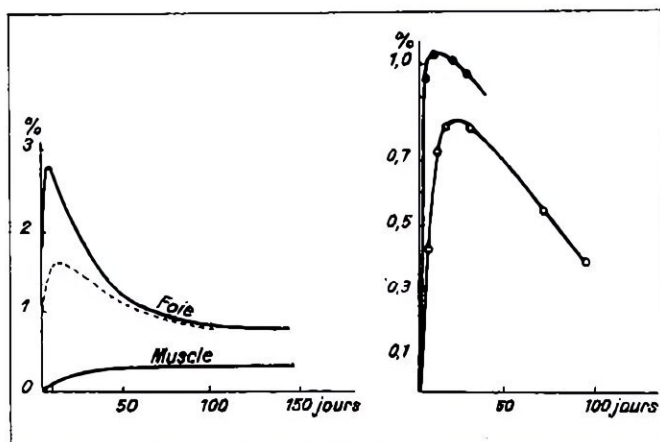


FIG. 90 ET 91. — LE RADIOPHOSPHORE ET LE DIAGNOSTIC DU CANCER

A gauche, les ordonnées représentent le pourcentage du phosphore administré et trouvé sous forme de phospholipide par gramme du foie (et de muscles) d'une souris normale (courbe en trait plein) et d'une souris porteuse du sarcome 180 (courbe pointillée). A droite, les ordonnées représentent le pourcentage du phosphore administré et trouvé sous forme de phospholipide par gramme de tissu mammaire carcinomateux de souris. En abscisses sont portés les nombres de jours écoulés après administration du radiophosphore de 14,8 jours de période. La courbe supérieure est donnée par une souris porteuse du néoplasme depuis 9 jours, tandis que la courbe inférieure est due à une tumeur vieille de 23 jours (mori proëhe).

rience que ce milligramme de phosphore présente une *activité* de 1 000 coups par minute au compteur de Geiger. L'animal reçoit cette substance et est sacrifié quelques heures après. La période du radiophosphore étant de près de seize jours, nous simplifierons en disant que l'*activité* de la substance administrée n'a pas déchu durant ces quelques heures. Si nous examinons le foie de cet animal et que nous trouvons une *activité* de 10 coups par minute, nous serions en droit de dire qu'un centième de milligramme de radiophosphore est venu se fixer sur ce foie pendant ce laps de temps. Nous répéterons intégralement l'expérience avec une demi-douzaine d'animaux et nous prendrons la moyenne, qui sera proche d'un centième de milligramme. Ce chiffre, ramené à 1 g du tissu examiné, nous fournira un point sur le graphique. En opérant de même sur d'autres groupes d'animaux, à différents intervalles de temps, nous aurons d'autres points. Nous ferons ensuite passer une courbe continue par ces points.

Lorsque le temps au bout duquel on fait la mesure d'*activité* du tissu approche et dépasse celui qui représente la période du radioélément, on aura soin de faire la correction convenable. Ainsi, au bout de quinze jours, l'*activité* de la substance que nous avons considérée est passée de 1 000 à 500 coups par minute. Si nous trouvons à ce moment-là une *activité* de 5 coups par minute dans un tissu, nous en déduirons cette fois encore qu'un centième de la substance s'est fixé sur ce tissu. Pour éviter des corrections fastidieuses, on prélève au début de l'expérience une fraction de la substance à administrer et on détermine son *activité* toutes les fois que l'*activité* d'un tissu est mesurée. De la décroissance observée chez le témoin on déduit aisément la correction à apporter à la valeur initiale de l'*activité* qu'il faut considérer ce jour-là (1).

Nous ferons grâce au lecteur des nombreuses autres précautions que l'on doit prendre dans ces mesures. Il faut notamment connaître les spectres bêta et les raies gamma des radioéléments utilisés, ainsi que leurs lois d'absorption dans les

(1) S'il ne s'agit que de comparer les « fixations » dans différents organes, au bout d'un temps donné les mesures relatives seront évidemment suffisantes et ne comporteront, par conséquent, pas de corrections de décroissance.

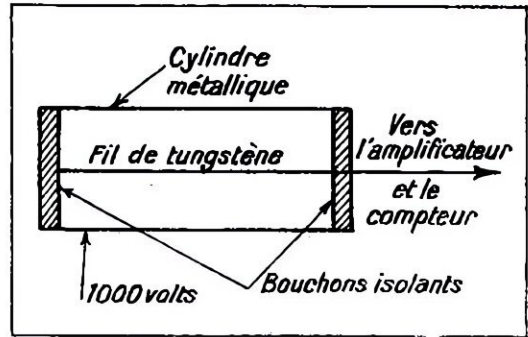


FIG. 92. — SCHÉMA D'UN COMPTEUR GEIGER-MULLER

Cet appareil se compose d'un cylindre métallique porté à un potentiel de près de 1 000 V par rapport au sol et où règne un vide peu poussé. Quand une particule (ou plusieurs simultanément) traverse la paroi du cylindre, elle en arrache des électrons qui pénètrent dans l'enceinte et ionisent les molécules du gaz, ce qui amène une décharge dans le tube. Amplifiée, cette décharge peut actionner un numérateur analogue aux numérateurs de communications téléphoniques. On peut ainsi compter le nombre minimum de particules qui rencontrent le tube. Pour mesurer leur énergie, on intercale des absorbants entre la source et le compteur.

tissus. Il faut bien avoir en main la technique des mesures d'*activité* et connaître les erreurs statistiques, instrumentales et accidentelles auxquelles on doit s'attendre. A ce prix seulement on pourra discuter utilement sur les courbes établies.

Revenons maintenant au radiophosphore pour exposer les autres travaux accomplis avec cet indicateur.

Chez les souris rendues lymphomateuses, le métabolisme du phosphore est plus faible que chez la souris atteinte d'un cancer de la mamelle (le tiers environ). La courbe de fixation est toutefois analogue, c'est-à-dire du *type actif* ou *type foie*. Ici l'âge de la tumeur ne semble pas influencer sur le métabolisme du phosphore, ce qui montre bien que le lymphome, tout au moins au début de son évolution, est une tumeur localisée.

Si on considère des souris atteintes de lymphosarcome, on observe un métabolisme du phosphore très voisin de celui propre au carcinome mammaire, bien que le lymphosarcome soit très proche parent du lymphome.

Avec le sarcome 180, on observe le fait intéressant, suivant. Ce cancer présente parfois une régression spontanée. Une tumeur en régression montre une courbe d'assimilation du phosphore nettement plus basse que celle d'une tumeur vivace.

Nous avons vu que les muscles et les os fixent continuellement du phosphore. Vu la grande masse de ces deux tissus dans notre organisme, il s'ensuit que le radio-phosphore s'accumule principalement dans notre squelette. Ceci a été mis à profit pour obtenir des rémissions dans certains cas de leucémie chronique (affections de la moelle osseuse) en administrant du radio-phosphore qui agit *in situ* et qui donne des résultats analogues à ceux obtenus par irradiation aux rayons X.

On savait déjà en thérapeutique que les phosphates remplacent avantageusement le phosphore métalloïdique. Le radio-phosphore administré sous forme de phosphate est, en effet, plus rapidement absorbé que sous forme de phosphore blanc ou rouge.

Dans le processus des fermentations alcooliques végétales, ainsi que dans les processus analogues dénommés glycolyses chez les animaux, la dégradation des sucres en gaz carbonique et en alcool éthylique comporte de nombreux stades intermédiaires qui mettent en jeu des dérivés phosphorés complexes comme la cozymase (contenant de la vitamine PP ou amide nicotinique) ou la carboxylase (contenant de la vitamine B₁). L'emploi du radiophosphore dans le déchiffrement de ces hiéroglyphes chimiques ouvre la voie à tout un domaine de vérifications, notamment avec certaines théories sur les causes du cancer. Certains auteurs prétendent, en effet, que les phénomènes de glycolyse sont intimement liés à l'éclosion d'états précancéreux et que, de plus, le facteur héréditaire n'est pas négligeable dans ces phénomènes.

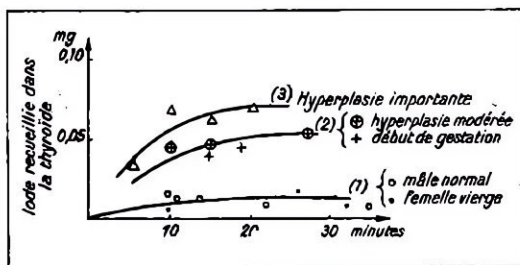


FIG. 93. — L'ASSIMILATION DE L'IODE PAR LA THYROÏDE DU LAPIN

Les mesures sont faites sur les glandes de l'animal sacrifié quelques minutes après l'injection de radio-iode de 23 minutes de période. La courbe supérieure montre qu'en excitant la thyroïde (par injection d'extrait de pituitaire) on augmente son pouvoir sélectif d'assimilation iodique.

Le radio-iode

Le radio-iode a une période de vingt-huit minutes. Les recherches que l'on peut entreprendre avec cet indicateur doivent donc être menées assez rapidement. Un autre isotope radioactif de l'iode a été fabriqué, mais moins abondamment, et possède une période de treize jours. Toutes les recherches que nous allons résumer se rapportent à celui de vingt-huit minutes de période.

Ces recherches se sont surtout centrées sur le métabolisme thyroïdien. On sait que la thyroïde possède de nombreuses fonctions, dont la principale est celle de fixer l'iode du sang pour en faire une hormone essentielle : la thyroxine. Les maladies de la thyroïde sont si courantes et ses caractères si variés que presque tout le monde en connaît une manifestation. Ainsi l'hyperthyroïdisme fait baisser la température et le rythme des pulsations. Elle cause de l'obésité, de la pâleur, de l'anémie, de la calvitie, de l'indolence. Le crétinisme est lié à un développement embryonnaire faible de la thyroïde. Par ailleurs, l'hyperthyroïdisme, ou maladie de Basedow, ou goitre exophtalmique, fait monter la température, donne de la tachycardie, cause de la maigreur, agrandit démesurément les yeux et rend hypersensible.

Nous sécrétions normalement 1 mg de thyroxine par vingt-quatre heures. L'activité de la thyroïde, qui conditionne les processus d'oxydation de l'organisme, est elle-même sous la dépendance d'au moins une hormone : l'hormone hypophysaire. La figure 93 montre l'augmentation observée dans la fixation d'iode chez un animal soumis à des injections d'extrait de pituitaire. Il a même été prouvé (Laboratoire de Synthèse Atomique; directeur, M. Joliot) que l'hypophysectomie (ablation de l'hypophyse) entraîne non seulement une diminution de l'iode fixé, mais aussi une plus grande diminution dans l'élimination de l'iode par la thyroïde, ce qui a pour effet d'augmenter sans grande utilité sa teneur en iode. Cette accumulation provoquée peut être mise à profit dans la lutte contre le cancer thyroïdien si on utilise le radio-iode de treize jours de période.

Si on fait avaler une solution neutre contenant de l'iodure de sodium présentant une certaine « activité », on observe,

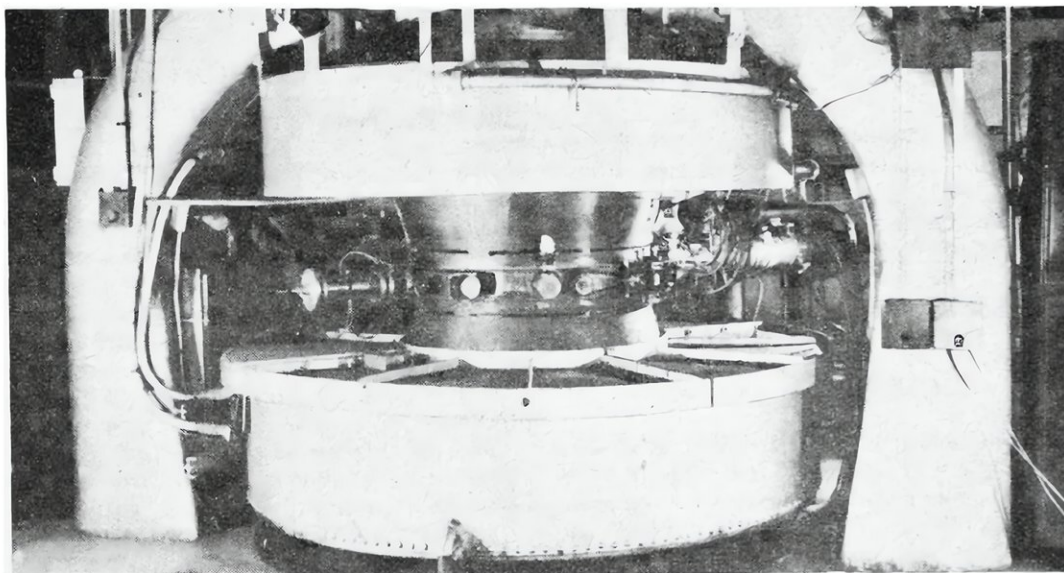


FIG. 94. — LE CYCLOTRON DE L'UNIVERSITÉ COLUMBIA, A NEW-YORK

en faisant placer la main de l'individu devant un compteur de Geiger, une émission de rayons gamma qui apparaît entre la troisième et la sixième minute après ingestion, augmente et se stabilise au bout de trois heures. On constate presque la même chose avec du radiosodium, du radiochlore, du radiobrome et du radiopotassium. Toutefois, avec ce dernier, l'activité débute vers la dixième minute, croît plus lentement que pour les quatre autres indicateurs et ne se stabilise qu'au bout de cinq heures. Les courbes de fixation de ces cinq radioéléments dans les tissus de la main varient dans leur allure générale suivant les individus. Elles varient même pour le même individu lorsque son état général varie. Ces différences sont probablement liées aux variations du métabolisme et pourraient remplacer, dans certains cas de diagnostic difficile, les mesures quantitatives de métabolisme.

Le radiofer

Le métabolisme du fer est un sujet très contesté. Le fer existe dans le corps sous diverses combinaisons : hémoglobine des globules rouges du sang, hémoglobine des muscles, dans le foie, la moelle, etc. Le fer peut exister sous diverses formes dans le même tissu, et sa recherche dans les fèces, par exemple, peut être entravée par la présence de calcium et de phosphore.

Une chose est déjà acquise grâce à l'utilisation du radiofer comme indicateur du métabolisme de ce métal. Il semblerait que l'anémie rende la paroi intestinale

plus perméable au fer et que celui-ci soit pris dans ce cas en plus grande quantité par le courant sanguin. L'analyse classique ne montre une modification appréciable de la formule sanguine d'un chien anémié et alimenté ensuite avec du fer qu'au bout de trois à cinq jours, tandis que la mesure au compteur Geiger montre que le fer administré est déjà dans les globules rouges bien avant, en fait, entre la quatrième et la huitième heure après ingestion. Au bout du cinquième jour, l'animal a éliminé 63 % du fer avalé et en a retenu 8,7 % dans son sang et 0,4 % dans son foie. Le radiofer a une période de quarante-sept jours.

Historadiographie

Nous ne voulons pas clore ce chapitre sans signaler qu'il existe une autre méthode mise au point par l'École de Montpellier, sous la direction de son éminent directeur du Centre anticancéreux, le professeur Lamarque. Elle a pris le nom d'*historadiographie* et consiste à mettre en évidence, au moyen de rayons X mous, la présence d'éléments de poids atomiques élevés dans des coupes effectuées dans des tissus biologiques. Appliquée au bismuth, plomb, or, etc., elle a donné des résultats qualitatifs appréciables.

Les techniques chimiques, spectroscopiques, spectrographiques et historadiographiques, jointes à la méthode des radio-indicateurs, ont fourni à la biologie de puissants moyens d'études qualitatives et quantitatives des phénomènes dont la matière vivante est le siège.

CHIMIE NUCLÉAIRE ASTROPHYSIQUE RAYONS COSMIQUES

Age de la Terre

Dès le début de la découverte de la radioactivité, on observa que certains cristaux contenant des inclusions radioactives présentaient des anneaux colorés ou *halos pléichroïques* de quelques microns de diamètre, visibles au microscope. On s'aperçut que ces colorations étaient dues aux rayons alpha émis par ces inclusions radioactives. Le rayon du halo est égal au parcours des rayons alpha du radium dans la roche, soit 23 microns dans la biotite. On calcula qu'il fallait à un milliardième de milliardième de gramme de radium 300 millions d'années pour donner un halo visible autour de l'inclusion.

On trouva ensuite des minerais contenant de l'hélium, également dû à des inclusions de radioéléments. Les rayons alpha sont en effet des noyaux d'hélium, et la teneur d'une roche en hélium donne une idée des radioéléments qui y sont désintégrés au cours des âges. Toutes les évaluations donnent à ces roches un âge minimum de un milliard d'années, ce qui concorde assez bien avec les chiffres obtenus d'après d'autres données.

L'énergie des astres

Il est certain aujourd'hui, comme le démontre, par exemple, l'existence de fossiles de l'ère primaire, que, depuis bien longtemps, les conditions climatiques n'ont pas varié essentiellement à la surface de la Terre et que, par suite, depuis plusieurs centaines de millions d'années au moins, l'apport du Soleil à la Terre n'a pas varié. De quelle nature est donc cette source d'énergie inépuisable qui lui permet de rayonner avec une telle constance près de 10 milliards d'ergs par centimètre carré de sa surface et par seconde ? A 149 millions de kilomètres du Soleil, 10 millions d'ergs parviennent chaque seconde sur un centimètre carré de surface de la Terre. La pression de cette

énergie tombant normalement sur un hectare de la Terre est d'environ 5 g, ce qui représente 60 000 t sur le grand cercle du globe terrestre. Cette force s'ajoute à celle de la force centrifuge pour faire équilibre à l'attraction qui tient la Terre prisonnière sur son orbite.

La désintégration de la matière et sa transformation en énergie (1) représente la seule source d'énergie à laquelle il soit possible de rapporter le rayonnement des astres, la seule qui puisse fournir une explication satisfaisante et de l'intensité élevée et de la constance de ce rayonnement. Traduit en masse, le rayonnement actuel du Soleil représente une perte de 4 millions de tonnes par seconde, masse infime par comparaison avec la masse totale de l'astre, lequel, à ce rythme, pourrait rayonner pendant plus de dix mille milliards d'années.

Il n'est donc pas nécessaire, puisqu'il ne s'agit ici que de quelques milliards d'années, d'envisager une *annihilation totale* de la matière pour justifier le débit énergétique des astres, et nos connaissances des transmutations et des réactions nucléaires est d'ores et déjà suffisante pour que puisse être imaginé un mécanisme de libération de l'énergie atomique expliquant la stabilité des astres pendant de très longues périodes. C'est un tel mécanisme que le mathématicien Bethe a proposé récemment, et les nombreux recoupements que l'on peut faire, concernant notamment la composition des astres et leur teneur en hydrogène, leur température centrale, etc., confèrent à ces explications un degré élevé de probabilité.

La haute température, plusieurs millions de degrés, qui règne au sein des étoiles traduit une agitation thermique formidable de toutes les particules présentes, parmi lesquelles se trouvent des protons (ou noyaux d'hydrogène) animés de vitesses considérables. Ce sont les protons qui jouent le rôle principal d'agents de

(1) Suivant la loi d'Einstein : Énergie = Masse × carré de la vitesse de la lumière.

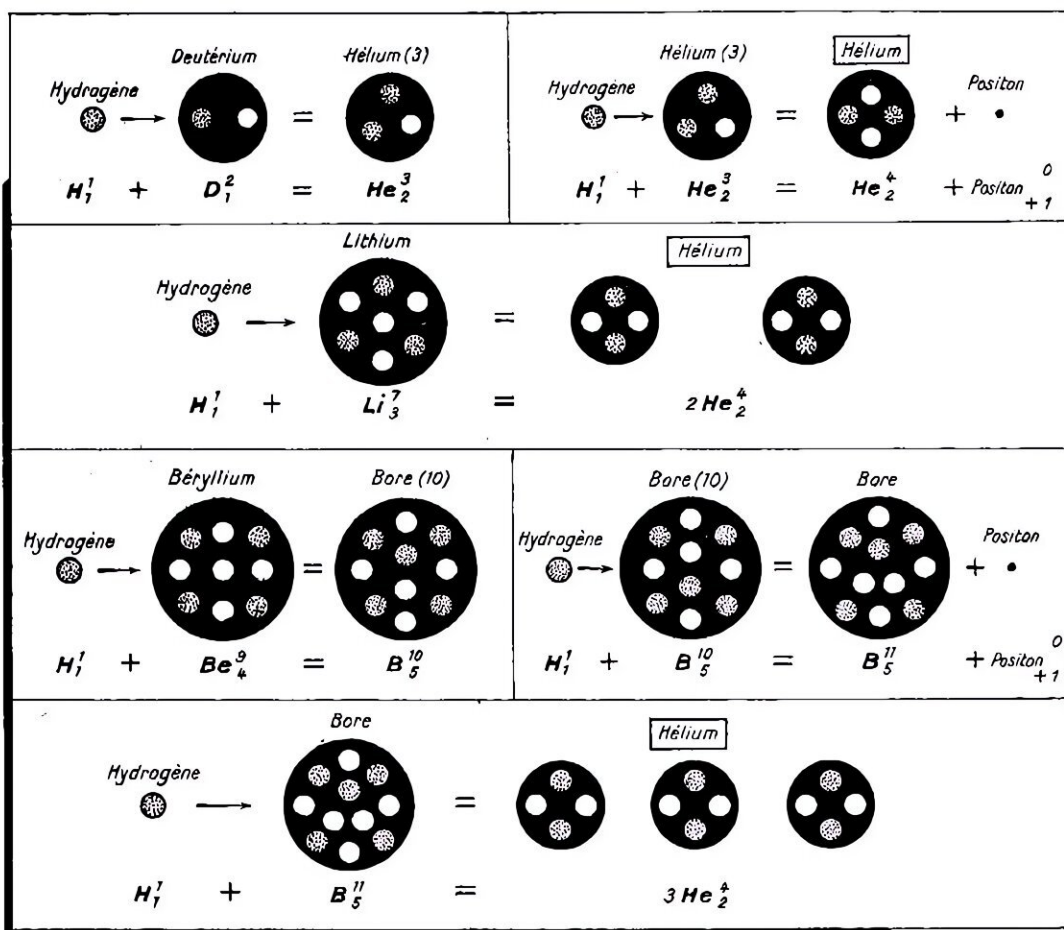


FIG. 95. — TROIS GROUPES DE RÉACTIONS NUCLÉAIRES QUI ALIMENTENT LES PREMIÈRES PHASES DE LA VIE D'UNE ÉTOILE

On remarquera que le terme final de ces transmutations est toujours l'hélium. Pour les schémas de noyaux et les notations employés ci-dessus, voir chapitre II.

transmutation, comme dans les laboratoires terrestres. Sur les figures 95 et 96, ont été rassemblés les schémas des réactions nucléaires auxquelles on rapporte aujourd'hui la production d'énergie des étoiles. Les premières (fig. 95) concernent une période relativement courte de leur « vie ». Dès que, par l'effet de la contraction et par suite de la libération de l'énergie de gravitation, la masse de matière que représente une étoile en formation s'échauffe et atteint 400 000°, les protons acquièrent une énergie suffisante pour s'attaquer au deutérium et, par l'intermédiaire de l'isotope 3 de l'hélium, livrer de l'hélium, terme final de toutes les réactions nucléaires des étoiles. Les autres réactions interviennent à des températures plus élevées : transmutation

du lithium vers 2 millions de degrés, du béryllium vers 3,5 millions de degrés, du bore vers 5 millions de degrés, aboutissant toujours à la formation d'hélium inerte.

C'est à des températures encore plus grandes, entre 15 et 18 millions de degrés au moins, qu'ont lieu les réactions de la figure 96 qui constituent le « cycle de Bethe ». On remarquera, en effet, que cette série débute par la transmutation du carbone, qui se retrouve intégralement comme produit de la dernière réaction et qui n'a donc joué que le rôle d'un catalyseur dans la formation, en définitive, d'hélium à partir de noyaux d'hydrogène. Cette formation s'accompagne d'une importante libération d'énergie par suite de la disparition d'une partie des masses en présence : la masse de l'hélium est exac-

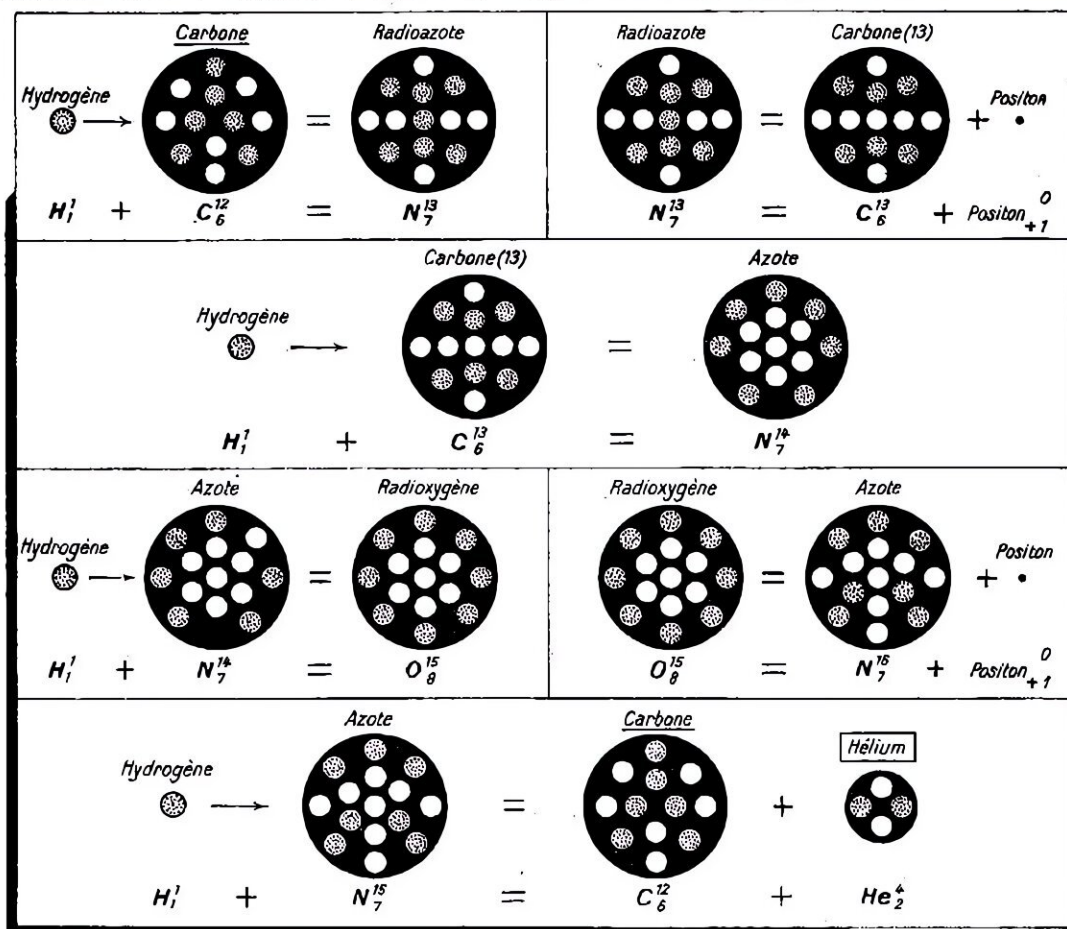


FIG. 96. — LE CYCLE DE BETHE, SOURCE PRINCIPALE DE L'ÉNERGIE STELLAIRE

Le carbone de la première réaction se retrouve à la dernière et a joué en somme le rôle de catalyseur dans la condensation de quatre atomes d'hydrogène en un atome d'hélium avec libération d'une grande quantité d'énergie correspondant à la perte de masse dans cette opération.

tement 4,00385 contre 4,0324 pour les 4 noyaux d'hydrogène ($4 \times 1,0081$). Il en résulte une libération d'énergie de 5.10^{-15} W.s par atome d'hélium formé, soit près de 10^9 joules par molécule-gramme (4 g) d'hélium. Ces réactions pourront donc entretenir le rayonnement des astres jusqu'à épuisement de l'hydrogène. Notre Soleil contient encore 36 % de sa masse d'hydrogène. Nous voilà donc tranquilisés pour sa vie future. Il contient par ailleurs 64 % d'éléments lourds, notamment du fer, dont la formation peut être due soit à un processus beaucoup plus compliqué que celui envisagé plus haut et qui s'arrête à l'oxygène 15, élément encore léger, soit à une genèse en rapport avec celle de l'Univers même.

Il y a d'ailleurs une grosse lacune dans

la théorie de Bethe. Elle provient du fait que certaines étoiles à température centrale relativement faible, comme Capella, Antarès, etc. (géantes), où les protons ne sont pas animés des vitesses exigées dans le cycle exposé, rayonnent pourtant beaucoup et depuis très longtemps, sans perdre une fraction importante de leur masse.

La découverte des rayons cosmiques

Le problème des rayons cosmiques compte parmi ceux que la science moderne n'a pu encore résoudre complètement.

Vers 1900, de nombreux physiciens, en particulier Elster et Geitel, en Allemagne, et C. T. R. Wilson, en Angleterre, observèrent que des électroscopes (fig. 98)

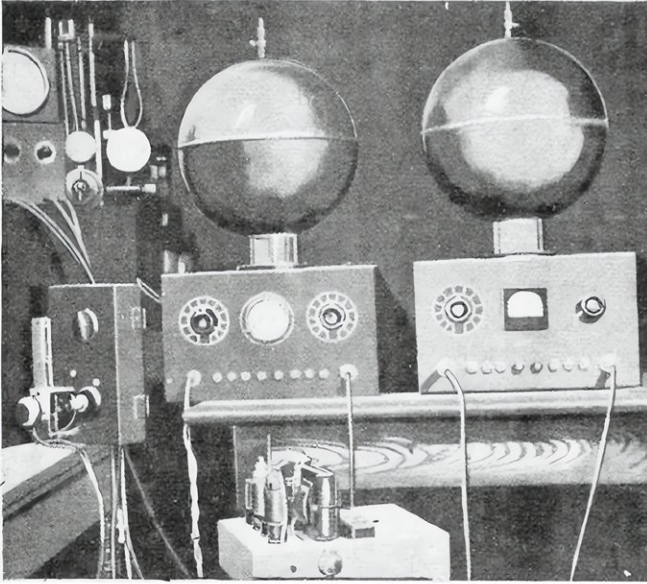


FIG. 97. — DEUX GROSSES CHAMBRES D'IONISATION POUR L'ÉTUDE DE LA RADIATION COSMIQUE

chargés et bien protégés contre les fuites électriques et contre les rayonnements radioactifs ou lumineux « fuyaient » quand même légèrement. L'équipage de l'électroscope étant relié à une chambre d'ionisation (1), la « fuite » est d'autant plus importante que la chambre est plus grande. Si l'on enfonce l'appareil dans le sol ou qu'on le protège de tous côtés par des plaques métalliques — en fer ou en plomb, par exemple, — la fuite diminue en fonction de l'épaisseur (après une épaisseur minimum, voir plus loin le paragraphe sur les « gerbes ») et de la densité de la matière absorbante protectrice. Un appareil que l'on emporte en montagne et que l'on confie à un ballon se décharge au contraire avec une rapidité qui augmente avec l'altitude. Ces constatations, répétées un grand nombre de fois, éliminent automatiquement toute cause d'erreur imputable à de mauvais isolants ou à une radioactivité ambiante.

(1) C'est-à-dire une enceinte dans laquelle le passage de certains rayonnements, corpusculaires (par exemple : électrons) ou électromagnétiques (par exemple : rayons X), rend l'air conducteur. Les molécules frappées sont, en effet, ionisées ; les particules électrisées positivement et négativement libérées lors de cette opération sont attirées respectivement par l'une ou l'autre des électrodes de la chambre (la paroi de la chambre constitue, en général, une des électrodes), provoquant une décharge partielle.

La seule conclusion qui vient à l'esprit est que le phénomène est dû à une radiation venant de la haute atmosphère, très probablement d'origine sidérale, qui serait extrêmement pénétrante et capable d'ioniser et de rendre ainsi conducteur l'air qu'elle traverse.

Par analogie avec les rayons X ou avec les rayons émis par les substances radioactives, on a constaté que le rayonnement cosmique est composé de projectiles de plusieurs sortes : des *protons*, des *neutrons*, des *mésotons* (charge positive ou négative ; masse égale au $1/9$ environ de celle du proton ; voir chapitre X) ; des *électrons* (positifs ou négatifs) et enfin des *rayons gamma*.

On ne connaît pas encore toutes les liaisons qui existent entre ces projectiles, mais on en connaît tout de même quelques-unes. Ainsi, les rayons gamma peuvent donner naissance, par matérialisation, à des couples de positons et de négatons. Ces particules peuvent inversement, par dématérialisation, engendrer des rayons gamma. Quand on parle d'énergie à propos de rayons cosmiques, il faut tout de suite s'adapter à des échelles auxquelles nous ne sommes pas habitués. Imaginez une ampoule à rayons X aux bornes de laquelle on ne mettrait pas 100 000 ou 200 000 V, comme on le fait pour les radiographies, mais entre mille et un million de fois ce voltage. Évidemment, de telles ampoules à rayons X sont impossibles à construire ; d'autres appareils, comme le cyclotron ou le bêtatron, ou certaines réactions nucléaires provoquées au laboratoire arriveront peut-être à nous donner des particules aussi énergiques que les moins énergiques du rayonnement cosmique.

Les rayons cosmiques peuvent traverser des épaisseurs allant jusqu'à 100 m d'eau et actionner encore les appareils comme les électroscopes, les compteurs Geiger-Muller (fig. 92) ou les chambres de Wilson (fig. 102).

On est parvenu à réaliser des appareils d'une ingéniosité surprenante pour déceler les rayons cosmiques. Ainsi les impulsions d'un compteur Geiger-Muller, amplifiées

par un poste minuscule, peuvent agir sur un petit émetteur de T. S. F. et lancer alors un signal caractéristique. Si on met également en liaison avec ce poste d'émission un système barométrique, on aura, à des intervalles réglés d'avance, un signal particulier correspondant à une certaine valeur de la pression barométrique. Cet appareil permet ainsi l'observation du rayonnement cosmique en fonction de l'altitude. On le fixe soigneusement dans la nacelle d'un ballon que l'on laisse librement monter dans l'atmosphère. A terre, on enregistre, au poste de réception, les signaux télégraphiques venant du ballon. On peut ainsi établir une courbe de l'intensité du rayonnement cosmique (fréquence des signaux des compteurs) en fonction de l'altitude (signaux de la pression barométrique).

On emporte aussi de tels appareils dans des ballons pilotés ou dans des avions. On enregistre alors automatiquement l'intensité du rayonnement en fonction de l'altitude.

On rend les mesures encore plus intéressantes en utilisant l'artifice suivant : comme le rayonnement cosmique arrive de tous les côtés, qu'il est, comme on dit, « isotrope », on délimite une certaine direction — pour éliminer l'effet de la radiation venant latéralement — en construisant ce qu'on appelle un « télescope de compteurs Geiger-Muller » (fig. 99). Seuls, les rayons compris dans un certain cône ou angle solide sont enregistrés.

Comme la vitesse des rayons est de l'ordre de celle de la lumière, un rayon frappant les trois compteurs les traversera presque simultanément. Ce rayon donnera ce qu'on appelle un « top de coïncidence ». L'appareil attaché à ces compteurs est construit de telle sorte qu'il n'est actionné que lorsqu'il y a « coïncidence », et, par conséquent, délimitation absolue de la direction d'arrivée des rayons. On peut évidemment explorer ainsi successivement l'intensité du rayonnement venant de toutes les directions de l'espace.

Pour déterminer la qualité du rayonnement, son énergie par exemple, on entrepose entre les compteurs des écrans de plomb. Traverseront évidemment les compteurs les seuls rayons qui auront assez d'énergie pour ne pas être arrêtés par les écrans. En faisant varier l'épaisseur des écrans, on établira ainsi une courbe, pour une altitude déterminée, du nombre de

rayons en fonction de l'épaisseur de plomb, ou, ce qui revient au même, en fonction de l'énergie de ces rayons.

Pour déterminer la nature des particules, on a recours à d'autres méthodes. Pour déceler la présence de neutrons, on a fait appel entre autres à la radioactivité artificielle qu'ils sont capables de produire dans certains éléments chimiques. Pour déceler les particules électrisées : protons, mésons, électrons, on a la chambre de Wilson avec champ magnétique. Les particules électrisées qui traversent la chambre Wilson se comportent comme un courant et s'enroulent autour des lignes de force du champ magnétique. La courbure de ces trajectoires est fonction de la masse et de la vitesse du projectile. Comme le nombre d'ions créés par le projectile dans la chambre de Wilson dépend plus de la masse que de la vitesse, on a ainsi un moyen, non infaillible, mais assez rai-

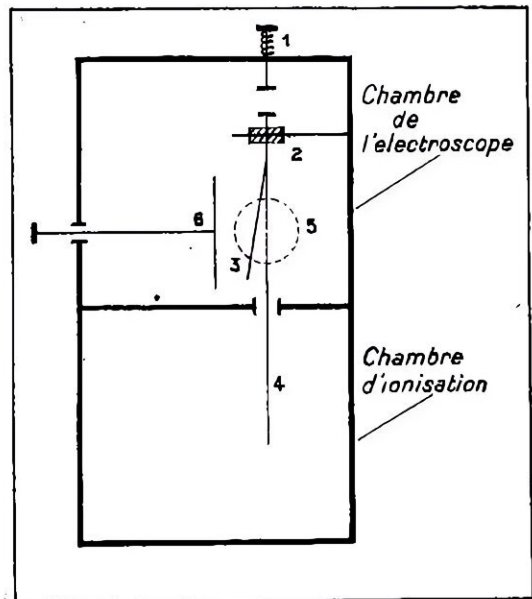


FIG. 98. — SCHEMA D'UN ELECTROSCOPE POUR L'ETUDE DES RAYONS COSMIQUES

Sous l'influence de charges électriques apportées par un bâton d'ébonite, frotté avec de la laine et appliqué en 1, sur le chargeur muni d'un ressort de rappel, et, par cette entremise, sur l'équipage porté par le bouchon d'ambre isolant 2, la feuille 3 s'écarte de la tige 4. Dans le champ visuel 5 d'un microscope perpendiculaire à la figure, on suit sur une échelle divisée la chute de la feuille vers la tige. Si l'on place une substance radioactive dans la chambre d'ionisation, le temps de chute mesure l'intensité du rayonnement émis par la substance. La pièce 6 sert à bloquer la feuille sur la tige pendant le transport de l'appareil.

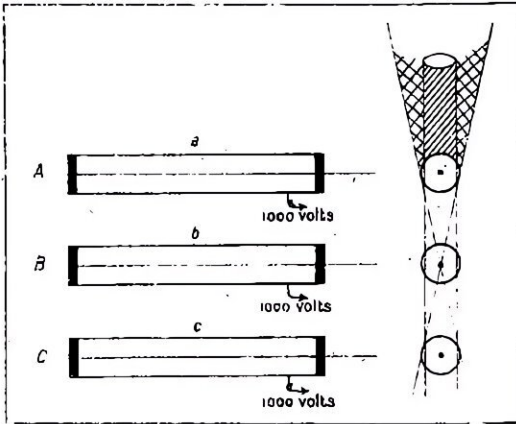


FIG. 99. — UN « TÉLESCOPE » DE COMPTEURS GEIGER-MULLER

A gauche, les trois compteurs sont vus de face, en A, B, C. Des plaques métalliques sont disposées en a, b, c, pour analyser la qualité des rayons incidents. A droite, les compteurs sont vus de profil. La partie centrale détermine la direction dans laquelle est braqué le télescope.

sonnable, pour évaluer la masse du projectile. Celle-ci étant connue, on tire sa vitesse de la mesure de la courbure de la trajectoire. La figure 104 montre des trajectoires d'électrons de différentes vitesses.

Au lieu de faire fonctionner continuellement la chambre de Wilson, on lui adjoint le dispositif télescopique de compteurs Geiger-Muller comme indiqué sur la figure 100. Le top de « coïncidence » actionne un relais qui déclenche la détente de la chambre de Wilson ainsi que l'éclairage. Le champ magnétique existe en permanence, et chaque photographie obtenue grâce à cet ingénieux mécanisme, imaginé par Blackett et Occhialini, est immédiatement utilisable.

Dernièrement, on a employé avec profit des plaques photographiques spéciales dans l'émulsion desquelles les rayons cosmiques laissent des traces très visibles au microscope.

L'effet de latitude

C'est à Birkeland et Størmer que l'on doit l'analyse mathématique de l'influence du magnétisme de la Terre sur un courant de particules électrisées. Ces calculs, assez compliqués, le deviennent encore plus lorsqu'on fait intervenir la présence de l'atmosphère terrestre. En effet, l'absorption des rayons cosmiques par notre

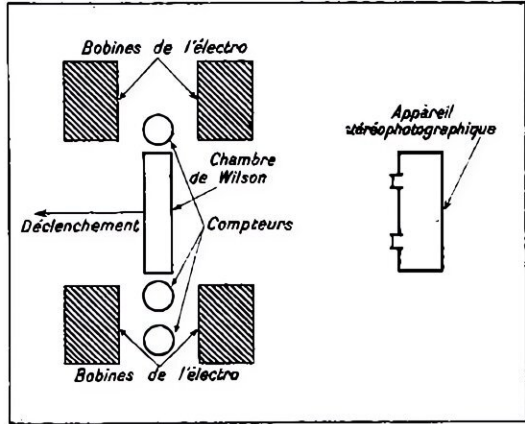


FIG. 100. — SCHÉMA D'UN TÉLESCOPE DE COMPTEURS GEIGER-MULLER ACTIONNANT UNE CHAMBRE DE WILSON

Les compteurs sont disposés de part et d'autre de la chambre de Wilson. L'appareil à déclenchement est actionné par l'amplificateur à coïncidence qui leur est lié. Le dispositif d'éclairage de la chambre de Wilson n'est pas figuré ici, il est perpendiculaire au plan du schéma.

atmosphère est assez importante. Un rayon arrivant du zénith et traversant ainsi notre atmosphère verticalement est ralenti comme s'il avait parcouru 10 m d'eau.

Si on confronte les recherches des innombrables observateurs éparpillés sous différentes latitudes et altitudes, on constate que le rayonnement cosmique est minimum à l'équateur géomagnétique, et croît d'environ 14 % lorsqu'on s'approche de la latitude de 40° nord ou sud. Il reste ensuite constant jusqu'aux pôles magnétiques. Cette variation se rapporte aux mesures effectuées au niveau de la mer. Si on s'élève vers 4 000 m, on observe plus de 30 % d'augmentation. Pour des latitudes supérieures à 45°, on a malheureusement très peu de données expérimentales.

En faisant l'hypothèse, assez probable en ce qui concerne une bonne partie de la radiation, que le rayonnement cosmique primaire, c'est-à-dire celui qui frappe la partie extérieure de notre atmosphère, soit constitué par des électrons positifs et négatifs, Størmer a calculé (voir le tableau ci-contre) l'énergie minimum que devraient avoir des électrons pour atteindre la surface de la Terre à différentes latitudes.

Par suite, donc, du champ magnétique terrestre qui dévie les particules électri-

Latitude nord ou sud (degrés)	0 (Équateur)	10	30	50	70
Énergie (milliards de volts)	10,4	9,85	6,6	2,6	0,2

FIG. 101. — TABLEAU DONNANT L'ÉNERGIE MINIMUM QUE DOIVENT POSSÉDER DES ÉLECTRONS COSMIQUES POUR FRAPPER LA TERRE A DIFFÉRENTS LATITUDES

sées, on voit que les pôles seront soumis à une pluie de projectiles d'une gamme d'énergie très étendue. On doit donc s'attendre à une augmentation sensible de l'intensité de la radiation cosmique à mesure que l'on navigue de l'équateur aux pôles. Ceci est bien le cas, mais cette augmentation est freinée par le fait que seuls des électrons de plus de 4 milliards de volts peuvent traverser notre atmosphère. Ceux d'énergie inférieure sont complètement absorbés en route. Il est évident que cette absorption sera moins importante en haute altitude, vu que les couches denses de notre atmosphère sont très proches de la surface de la Terre. On retrouve encore ici le fait expérimental, signalé plus haut, d'une augmentation plus importante en fonction de la latitude, lorsque les observations sont faites en se déplaçant à une altitude de l'ordre de 4 000 m au-dessus du niveau de la mer.

La théorie va même plus loin. Elle prédit un excès de particules venant de l'ouest sur celles venant de l'est, si on admet que, dans le rayonnement incident, les positons prédominent. L'expérience faite par Johnson, par 31° de latitude nord et à 2 555 m d'altitude, confirme un excès de radiation ouest

de près de 15 % sur celle venant de l'est.

Afin d'avoir une idée directrice sur l'origine de la radiation cosmique, on s'est demandé si elle variait en fonction du passage au zénith de tel groupe de constellations et surtout de la Voie Lactée. Des mesures de longue haleine furent entreprises un peu partout. Les résultats furent négatifs. On rechercha alors une variation en fonction du temps solaire (de l'heure locale). Même échec, si ce n'est des variations du même ordre de grandeur que les erreurs expérimentales. La même chose peut être dite concernant les comparaisons entre les mesures faites en hiver et en été.

On peut uniquement signaler comme curieux le fait suivant : l'énergie reçue sous forme de rayonnement par seconde sur un centimètre carré au niveau de la mer est de 3,5 millièmes d'erg, valeur

qui est très proche de celle reçue sous forme de lumière stellaire

Les « gerbes »

Il est extrêmement difficile d'interpréter d'une façon simple une série d'observations sur la radiation cosmique.

En effet, cette radiation globale comprend :

- 1° Le rayonne-

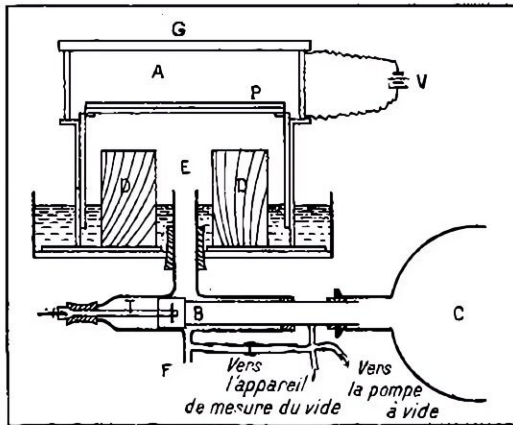


FIG. 102. — COUPE SCHÉMATIQUE D'UNE CHAMBRE DE WILSON

Cette chambre est du type horizontal; on en fait aussi de verticales, dont on comprendra sans peine le fonctionnement en tournant la figure d'un quart de tour vers la droite. Le ballon C est continuellement vidé par la pompe à vide. Il est mis brusquement en communication avec la chambre E lorsque le bouchon B est tiré par la tige T. A ce moment, le piston P s'abaisse brusquement, provoquant la formation de brouillard dans la chambre A. Toute particule ionisante traversant la chambre pendant la détente condense le brouillard sur son passage. Si on illumine A au moyen d'un arc électrique ou de fortes lampes survoltées, on aperçoit et on peut photographier à travers la glace G la trace de la particule par les gouttelettes d'eau qu'elle a laissées sur sa trajectoire. Quand on referme le bouchon B, l'air entre par F et le piston reprend sa position initiale. Quelques volts fournis par une source de courant continu, V, servent à « balayer » les ions entre les détentes. Ce voltage est appliqué entre le corps de l'appareil et un anneau d'aluminium collé sur la surface interne de la glace G.

ment primaire direct qui a survécu aux rencontres atomiques avant d'atteindre l'appareil. Comme la nature exacte de ce rayonnement nous échappe encore, qu'on ne sait pas le pourcentage des protons, des neutrons, des mésons, des électrons et des rayons gamma incidents, qu'en plus les lois d'absorption qu'ils subissent sont assez différentes, la complication est déjà assez apparente ;

2° Le rayonnement secondaire, issu de la transformation, dégénérescence ou absorption du rayonnement complexe *primaire*. Ainsi : *a*) un rayon gamma très énergétique peut donner naissance par matérialisation à une « gerbe » d'électrons de deux signes (1) : *b*) un méson bombardé

(1) Dans le plomb, la formation de gerbes augmente d'abord avec l'épaisseur de métal traversé. Après 2 cm de plomb, le nombre de gerbes tend vers

par un rayon gamma peut engendrer un photon ou un neutron : *c*) les neutrons bombardant les éléments chimiques de l'atmosphère créent des radioéléments émetteurs d'électrons.

3° Le rayonnement tertiaire, issu de la transformation, dégénérescence ou absorption du rayonnement complexe *secondaire*. Les particules des gerbes peuvent, par dématérialisation, donner naissance à des rayons gamma, etc.

Cette énumération succincte de « complications » s'ajoute aux inconnues concernant les énergies respectives des projectiles et les conditions géographiques de l'expérience.

Où prennent naissance les rayons cosmiques ?

Les deux théories les plus en vogue, jusqu'à la découverte des mésons dans les radiations cosmiques (en 1938), étaient celles de Wilson et de Regener. Wilson suppose les orages de la haute atmosphère responsables des rayons cosmiques. Si on parvenait à imaginer un mécanisme possible pour un tel processus et à expliquer l'isotropie du rayonnement, la théorie des orages serait assez séduisante. Regener suppose que la radiation cosmique aurait pu être engendrée à une époque voisine du début de l'évolution de l'Univers et qu'elle serait devenue depuis isotrope à force de voyager à l'intérieur de notre monde. Ce serait, en quelque sorte, un rayonnement « fossile ».

Eddington estime que la quantité moyenne de matière rencontrée par un rayon traversant l'Univers est équivalente, en absorption, à 7 cm d'eau, ce qui représente à peine 1 % de l'absorption de notre atmosphère. Le maître a,

zéro. L'explication, ici, est assez simple. Les chocs dans les deux premiers centimètres de plomb donnent naissance aux rayons de gerbes. Les couches métalliques qui suivent cette épaisseur optimum de 2 cm ralentissent et font disparaître les rayons par dispersion dans la masse.

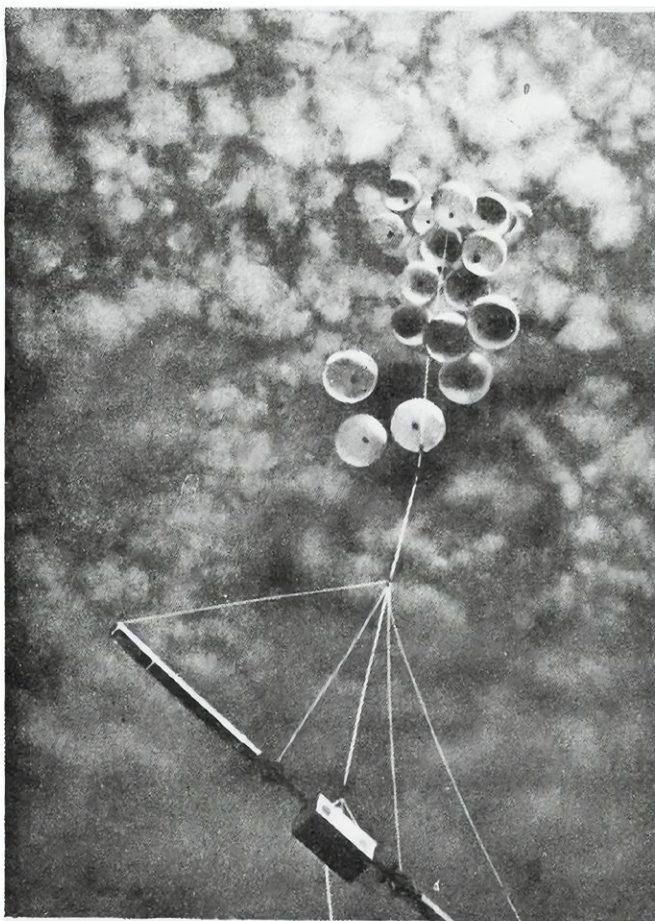


FIG. 103. — L'ÉTUDE DES « GERBES » COSMIQUES EN HAUTE ALTITUDE (TRAVAUX DE M. PIERRE AUGER ET SES COLLABORATEURS A L'UNIVERSITÉ DE CHICAGO, 1943)

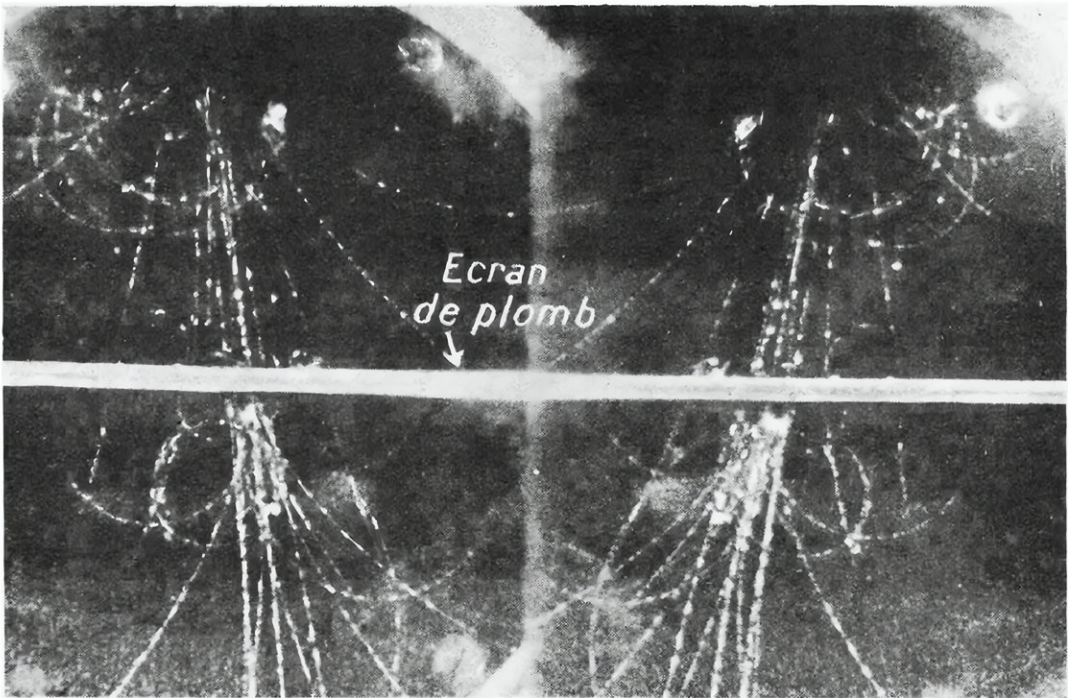


FIG. 104. — PHOTOGRAPHIE STÉRÉOSCOPIQUE D'UNE GERBE DE RAYONS COSMIQUES

Les trajectoires appartiennent à des électrons des deux signes et de différentes énergies. On voit qu'après avoir traversé la plaque de plomb les rayons ont perdu une partie de leur énergie et qu'ils sont courbés plus facilement par le champ magnétique.

d'un autre côté, montré que l'énergie totale des rayons cosmiques supposée être uniformément distribuée à travers l'espace peut atteindre jusqu'à un millième de l'énergie totale — sous forme de masse — existant dans l'Univers.

On voit que le problème de la radiation cosmique est intimement lié à celui de la cosmogonie. Cette question vient de prendre un surcroît d'intérêt à la suite de la découverte, d'une part, du mésoton, (voir chapitre X), d'autre part, de la rupture de certains noyaux atomiques (voir chapitre XI). Le théoricien suédois Alfven vient de suggérer que la radiation cosmique pourrait être produite par un monumental cyclotron cosmique que les champs électriques et magnétiques des étoiles alimenteraient.

Le rayonnement cosmique et la biologie

Les mutations sont des phénomènes biologiques de variation brusque dans les caractères héréditaires des espèces. Certains biologistes ont vu là un des principaux facteurs de l'évolution permettant la

création d'espèces nouvelles, encore que le nombre des mutations observées de nos jours apparaisse tout à fait insuffisant. Expérimentalement, de telles mutations ont été obtenues de différentes façons. Les rayons ultraviolets, les rayons X, les rayons des sources radioactives peuvent en provoquer chez des organismes inférieurs. La radiation cosmique serait, paraît-il, capable d'en susciter surtout chez des organismes exposés aux hautes altitudes, où les conditions ambiantes et la plus forte intensité de la radiation seraient des facteurs concourants. En laissant pour le moment de côté la question de savoir si des protons ou des neutrons ne peuvent pas servir de véhicules à des germes vivants ultramicroscopiques et ensemercer ainsi des « milieux propices » dans l'Univers, on peut se contenter de penser, sans trop s'aventurer dans la fantaisie, que, si la radiation cosmique, à une certaine époque de l'évolution du monde, avait une intensité et une qualité autres que celles observées actuellement, il ne serait pas impossible de lui attribuer alors quelques mutations mystérieuses des espèces terrestres.

NEUTRINO, MÉSONON, POSITON

POUR expliquer la constitution de l'Univers physique et les phénomènes qui s'y manifestent, le physicien fait appel, comme nous l'avons vu, à quelques particules élémentaires (électrons, protons et neutrons) et s'appuie sur un petit nombre de principes tels que celui de la conservation de l'énergie, celui de la relativité, etc. L'existence de ces particules élémentaires et la généralité de ces principes sont démontrées toutes deux par de très nombreuses expériences. Il est toutefois un domaine de la science où le principe de la conservation de l'énergie semble être en défaut : celui d'une forme particulière de radioactivité avec émission de rayons bêta, considérés jusqu'ici comme composés uniquement d'électrons.

On sait que les substances radioactives émettent des particules alpha (noyaux d'hélium), des particules bêta (apparemment des électrons négatifs) et des rayons gamma. Lorsqu'on analyse soigneusement les processus nucléaires — dont le siège est dans le noyau des atomes — on arrive à expliquer les émissions de particules alpha et de rayons gamma sans trop de difficultés. Il en est autrement lorsqu'on s'occupe de la radioactivité bêta.

Il découle, en effet, de l'observation des rayons alpha et des rayons gamma que ceux-ci sont incontestablement émis par des noyaux atomiques identiques. Donc tout élément radioactif (c'est-à-dire émetteur de rayons bêta) issu d'un parent radioactif alpha, doit posséder des noyaux identiques, et, puisque les produits de la désintégration sont identiques pour tous les noyaux, toutes les particules bêta devraient posséder la même énergie, et l'on devrait observer, à l'aide d'un appareil tel que celui de la figure 105, une *rate* étroite et non un *spectre* plus ou moins étalé. L'existence d'un tel spectre, mis en évidence par le physicien anglais Chadwick, démontre que les particules bêta peuvent être émises par des noyaux identiques avec des énergies différentes, ce qui met en défaut le principe de la conser-

vation de l'énergie. Pour sauver l'intégrité de ce principe qui domine toute la physique, on a été amené à imaginer un rayonnement « compensateur ». A chaque rayon bêta d'énergie E inférieure à l'énergie maximum W de la courbe correspondrait une particule d'énergie $W-E$. Ainsi se trouve introduit le *neutrino*, dont l'existence a été suggérée par le théoricien suisse Paoli (1) : lors de la désintégration d'un noyau radioactif bêta, l'énergie serait répartie entre les rayons bêta et les neutrinos.

Quelles seraient les propriétés physiques de cette nouvelle particule élémentaire ? *Sa charge électrique serait nulle*, car, si elle était positive ou négative, son expulsion du noyau entraînerait une variation de la charge du noyau qui se superposerait à celle due au départ de la particule bêta (électron) et entraînerait la formation d'un autre élément chimique que celui effectivement obtenu.

Voyons maintenant ce que serait sa masse. Nous savons que toute émission bêta ne change pratiquement pas la masse du noyau émetteur. Il s'ensuit que la masse du neutrino doit être de l'ordre de la masse des particules bêta. En fait, si on étudie soigneusement la théorie de la radioactivité bêta, telle qu'elle a été formulée par le physicien théoricien italien Fermi d'après l'hypothèse de Paoli, on arrive à prédire la forme de la fin du spectre bêta en fonction de la masse hypothétique du neutrino. Une fin de spectre à tangente horizontale serait à prévoir si le neutrino avait une masse nulle, tandis que, s'il avait une masse voisine de celle de l'électron, on devrait observer une chute abrupte du spectre avec une tangente presque verticale. Or, l'expérience prouve que les spectres bêta ont des tangentes horizontales pour les fins de spectres : *donc la masse du neutrino doit être proche de zéro*.

D'autres propriétés peuvent être attachées à une particule en dehors de sa

(1) A qui vient d'être décorné le prix Nobel de physique pour 1945.

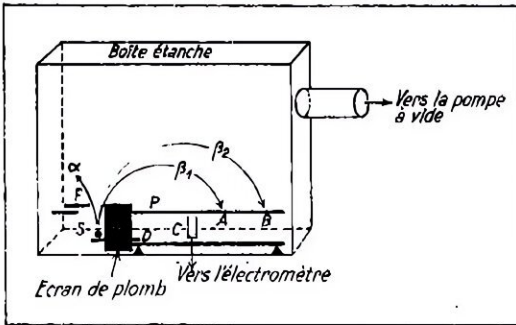


FIG. 105 — SCHÉMA DE PRINCIPE DE LA MESURE DE L'ÉNERGIE DES RAYONS BÊTA ÉMIS PAR UN ÉLÉMENT RADIOACTIF

La source radioactive *S* émet des rayons bêta et gamma (si elle émet également des rayons alpha, ils peuvent être arrêtés par une feuille mince de cellophane placée sur *S* sinon, ils sont déviés dans le sens inverse des rayons bêta, car ils sont chargés positivement). *F*, fente de réglage. *P*, plaque photographique. *D*, support du cylindre de Faraday *C*. Un puissant champ magnétique s'exerce perpendiculairement au plan de la figure et provoque la courbure des trajectoires des particules électrisées. L'énergie du rayon *SA* est inférieure à celle du rayon *SB*, et de la position des raies *A* et *B* sur la plaque on déduit la valeur de l'énergie de chaque groupe de rayons

masse et de sa charge électrique. Il y a encore le « spin » et le « moment magnétique ».

Nous ne pouvons entrer ici dans le détail de ces deux caractéristiques physiques. Qu'il nous suffise de dire que toutes les particules élémentaires : électrons (négatifs ou positifs), protons, neutrons et même les combinaisons matérielles comme les particules alpha, qui ne sont que des noyaux d'hélium, les deutons qui sont des combinaisons d'un proton et d'un neutron, etc., ont des valeurs de « spin » et de moment magnétique assez bien connues. Quelles seraient-elles pour le neutrino ?

Le « spin » des électrons ou rayons bêta est fractionnaire et égal à $1/2$, tandis que le « spin » des particules lourdes comme les protons, les neutrons, est entier et égal à 1 . Nous devons donc nous attendre à observer chez le noyau émetteur bêta un changement de « spin » après l'expulsion de la particule. Ainsi le radiolithium de masse 8 est composé de 3 protons, qui lui donnent la charge posi-

tive 3, et de 5 neutrons. Ces huit particules lourdes ont toutes des « spins » entiers. Le noyau de radiolithium doit donc avoir un « spin » entier. Sitôt que la particule bêta est expulsée, elle emporte une fraction $1/2$ du « spin » ; on devrait par conséquent se trouver en présence d'un noyau résultant de béryllium ayant un spin différent de $1/2$ d'un nombre entier. Or tel n'est pas le cas. Les noyaux résultant d'un processus bêta ont le même « spin » que les noyaux émetteurs. Comme la conservation du « spin » est aussi importante que la conservation de l'énergie, nous sommes forcés de joindre au neutrino un « spin » fractionnaire $1/2$.

En résumé, nous nous trouvons en présence d'une particule nouvelle et hypothétique ayant une masse proche de zéro, une charge électrique nulle et un « spin » $1/2$. Les particules élémentaires ne sont accessibles à l'observation que par l'ionisation qu'elles provoquent dans leurs voyages à travers certains milieux. Si on cherche par le calcul le pouvoir ionisant d'un neutrino, on trouve une valeur dérisoire. Cette propriété est, en effet, liée à la charge et à la masse du projectile. Une seule chance restait aux physiciens pour observer le neutrino et confirmer ainsi son existence. Il s'agissait de compter sur son moment magnétique. Le moment magnétique d'une particule, surtout lorsqu'elle est électriquement neutre, est actuellement imprévisible par le calcul. Mais ce que le calcul peut indiquer, c'est la valeur de l'ionisation que l'on pourrait observer si une telle particule avait tel ou tel moment magné-

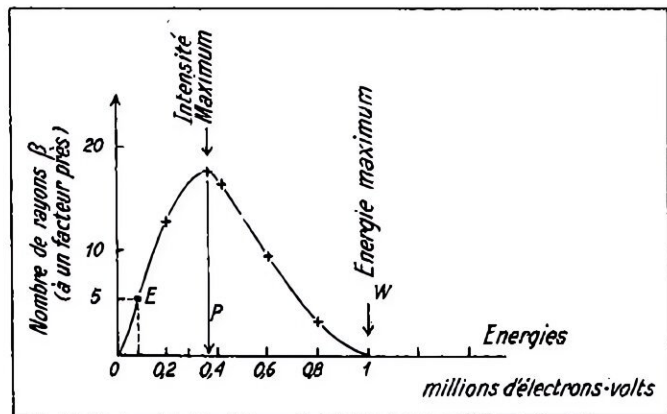


FIG. 106. — SPECTRE ÉNERGÉTIQUE DES RAYONS BÊTA ÉMIS PAR LE RADIUM

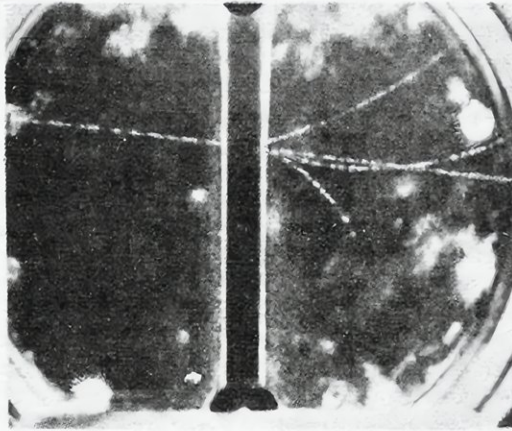


FIG. 107. — UNE PETITE « GERBE » PHOTOGRAPHIÉE DANS LA CHAMBRE DE WILSON

Cette vue montre une particule cosmique de grande énergie venant de la gauche de la figure et tombant sur une plaque de platine de 1 cm d'épaisseur. Elle donne naissance à une petite gerbe d'électrons, et de positons que l'on distingue grâce à la courbure en sens inverse de leurs trajectoires dans le champ magnétique intense créé dans la chambre. (Neddermeyer et Anderson.)

tique. Ce calcul fut entrepris par Bethe, et la recherche de l'ionisation ainsi prévue occupa pendant un an l'auteur de cet ouvrage.

Il s'agissait d'arrêter complètement avec du plomb tout le rayonnement gamma d'une source de 5 g de radium et d'analyser au compteur de Geiger la radiation restante. Si le neutrino possédait un moment magnétique, même très petit, l'expérience en question devait le mettre en évidence.

L'effet à observer étant très faible, il fallait se placer dans des conditions telles que le mouvement propre des compteurs de Geiger fût négligeable. Pour cela, il convenait d'absorber une grande partie

du rayonnement cosmique qui est cause de ce mouvement propre. Le laboratoire fut installé à 30 m sous terre, sur la plateforme d'une station de métropolitain (l'absorption du rayonnement cosmique était équivalente à celle de 60 m d'eau, la densité du terrain étant d'environ deux fois celle de l'eau).

Mais aucun résultat positif ne fut obtenu. D'autres expériences furent tentées ailleurs avec le même insuccès. On admet aujourd'hui que, si un moment magnétique quelconque est attaché au neutrino, il doit être tellement petit qu'il ne peut pas contribuer à créer une seule paire d'ions sur un parcours d'un demi-million de kilomètres d'air. A titre de comparaison, signalons qu'une particule alpha produit environ 30 000 ions par centimètre d'air et qu'un rayon X perd 35 V seulement de son énergie à chaque ionisation qu'il cause sur son parcours. Comme les rayons X très pénétrants, ayant des voltages équivalents de l'ordre de 300 000 V, sont absorbés par quelques mètres d'air ou quelques centimètres de muscles, on voit que l'ionisation est très intense.

Nous pouvons, au contraire, envoyer des milliards et des milliards de neutrinos de n'importe quelle énergie à travers une chambre de Wilson pendant des jours et des mois d'expériences, sans qu'on trouve jamais une trajectoire ou un simple ion prouvant l'existence de ces particules.

C'est l'ensemble de ces attributs physiques presque inexistantes qui fit appeler le neutrino la particule *nécessaire*, mais *métaphysique*. Le neutrino, bien que nécessaire dans l'établissement d'une théorie du rayonnement bêta ne comportant pas d'entorse au principe de la conserva-

D'APRÈS FERMI	D'APRÈS YUKAWA
Neutron → proton + électron + neutrino.	Neutron → proton + méson négatif.
	↓
	électron + neutrino.
Proton → neutron + positon + neutrino.	Proton → neutron + méson positif.
	↓
	positon + neutrino.

FIG. 108. — LE MÉCANISME DE LA RADIOACTIVITÉ BÊTA, D'APRÈS FERMI ET YUKAWA, CE DERNIER FAISANT INTERVENIR LE MÉSON, NÉGATIF OU POSITIF

tion de l'énergie, ne suffit pas tout de même pour expliquer tous les phénomènes que l'on observe avec de tels radioéléments. La théorie de Fermi est impuissante, par exemple, à expliquer les « vies » ou périodes des radioéléments bêta. Aussi a-t-il été nécessaire d'imaginer quelque chose de complémentaire et de plus satisfaisant. Le théoricien japonais Yukawa a avancé sa théorie du *mésoton*, autre nouvelle particule élémentaire qui, avec le neutrino, parvient à donner une image plus correcte de la radioactivité bêta. Or, il se trouve que l'existence du mésoton ne fait plus de doute, puisqu'il a été observé à l'état libre dans la radiation cosmique.

Dans un autre ordre d'idées, Louis de Broglie a mis, dernièrement, au premier plan l'importance de l'hypothèse du neutrino, en construisant une théorie très séduisante des photons issus de la combinaison de deux neutrinos.

Acceptons donc l'existence du neutrino, même si nous sommes encore incapables de la mettre en évidence, et ceci jusqu'à preuve du contraire. Il existe d'ailleurs certains faits expérimentaux (Allen aux États-Unis) qui tendent à prouver l'existence du neutrino par l'observation du faible recul des noyaux atomiques lors d'une émission bêta.

Le positon

Le mathématicien anglais Dirac fut amené, vers 1930, à émettre deux hypothèses révolutionnaires, dont le plus surprenant est qu'elles furent confirmées par l'expérience, ce qui a valu une particule de plus à l'arsenal du physicien et un prix Nobel à chacun des deux parrains de la particule, le second étant Anderson, physicien au California Institute of Technology, lequel découvrit le positon dans le rayonnement cosmique. Alors que, jusque-là, les physiciens ne pouvaient imaginer l'existence de particules possédant une énergie négative, Dirac posa deux hypothèses : a) les états d'énergie négative existent (1); b) une place vide dans les états d'énergie négative se manifeste comme une particule chargée positivement.

Dirac crut que cette « lacune » ou « trou » pouvait être identifiée avec le

(1) Au sens du principe d'exclusion de Paoli, ces états seraient tous « occupés ». Nous ne pouvons nous étendre ici sur ces considérations.

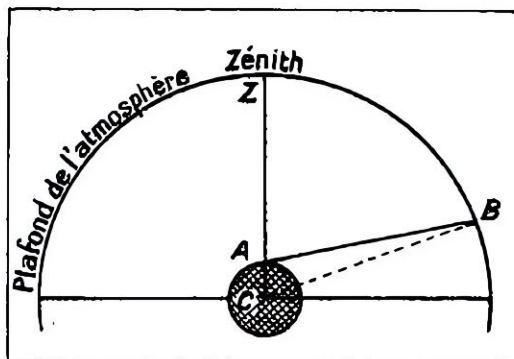


FIG. 109. — POURQUOI ON DOIT OBSERVER PLUS DE MÉSONONS AU ZÉNITH QUE DANS TOUTE AUTRE DIRECTION

Si l'observation était faite au centre C de la Terre, la distance parcourue par une particule cosmique serait la même dans n'importe quelle direction, car CZ est égal à CB. Mais, pour toute observation faite à la surface de la Terre, au point A par exemple, il y a une direction privilégiée, AZ étant plus petit que toute autre droite telle que AB.

proton que l'on sait être chargé positivement. On ne s'expliquait d'ailleurs pas pourquoi alors sa masse était 1 840 fois plus grande que celle de l'électron. C'est alors que la découverte de l'électron de charge positive dans le rayonnement cosmique donna la solution du problème. Les « trous » de Dirac furent appelés des *positons*.

On observa, comme le prédisait la théorie, que la vie du positon était très brève.

Comme il est arrivé souvent dans des circonstances analogues, on finit, après la découverte d'Anderson, par trouver des positons partout. On découvrit des positons dans d'innombrables photographies de rayons cosmiques prises à la chambre Wilson et dont l'interprétation, antérieurement à la découverte d'Anderson, avait été toute différente. Frédéric Joliot et Irène Curie découvrirent la radioactivité artificielle avec émission de positons. Auparavant, F. Joliot et J. Thibaud avaient montré que la matérialisation de l'énergie et la dématérialisation ou annihilation de la matière étaient incontestables.

Un photon X ou gamma d'énergie supérieure à un million de volts est capable de se matérialiser en une paire d'électrons positifs et négatifs. La dématérialisation est, au contraire, le passage d'un électron négatif de l'état d'énergie positive à un état non occupé dans le continuum des états d'énergie négative. Tout

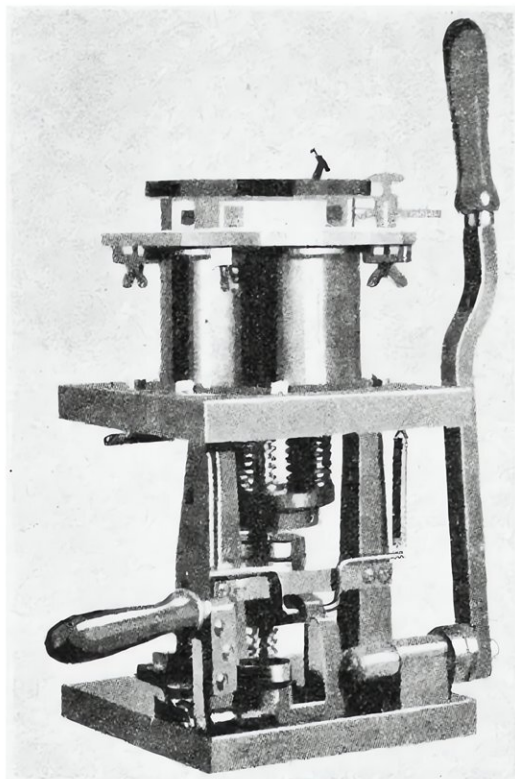


FIG. 110. — UNE CHAMBRE DE WILSON PORTATIVE

Dans le cylindre central se meut un piston dont la surface libre est recouverte d'une couche de gélatine imbibée d'eau. Les ressorts à houppe très puissants déclenchés par la poignée de gauche manœuvrent le piston rapidement, la détente provoquant la condensation de vapeur d'eau dans le cylindre. Le passage de particules électrisées dans la chambre provoque l'ionisation de l'air sur leur chemin, chacun des ions formés constituant un centre de condensation pour la vapeur d'eau. Éclairée convenablement, cette traînée de gouttelettes matérialise la trajectoire de la particule. La poignée de droite sert à armer le ressort.

s'équilibrerait donc à la longue en tendant vers l'état initial par des processus réversibles de matérialisation et de dématérialisation.

Il reste à expliquer pourquoi il y a un surcroît d'électrons négatifs dans notre Univers.

Le méson

Nous avons vu que les modalités de l'émission de particules bêta (électrons négatifs et positifs) par les éléments radioactifs avaient conduit à admettre l'existence d'une particule quasi immatérielle, le *neutrino*, doué de propriétés paradoxales et qui n'a pu jusqu'à aujourd'hui être retrouvée expérimentalement. Cette hypo-

thèse n'est pas parvenue malheureusement à rendre compte de tous les faits. En particulier, la théorie de Fermi faisait prévoir des valeurs beaucoup trop faibles pour les périodes des radioéléments bêta tant naturels qu'artificiels. Il a donc fallu faire une hypothèse supplémentaire et introduire dans la théorie un processus capable d'allonger la période de l'atome radioactif. Voici la solution proposée par le Japonais Yukawa.

Pour Fermi, le corpuscule bêta (électron) est émis en même temps qu'un neutrino par le noyau de l'atome, par suite de la transformation, au sein de celui-ci, d'un neutron en un proton.

Pour Yukawa, le processus est plus complexe et fait intervenir une entité nouvelle, le *mésoton*, dont il existerait, pour les besoins de la cause, deux variétés, l'une négative, l'autre positive.

Le tableau de la figure 108 schématise le mécanisme.

Par le calcul, Yukawa était parvenu à parfaire la théorie de Fermi et à justifier l'ordre de grandeur des forces nucléaires mises en jeu en donnant au méson une masse hypothétique égale à environ 200 fois celle de l'électron au repos, et une « vie » moyenne de l'ordre du cent-millionième de seconde.

Le plus surprenant fut qu'un aspect de ces vues purement théoriques reçut une confirmation éclatante par l'expérience.

On trouva, en effet, dans les clichés pris à l'aide d'une chambre de Wilson, des trajectoires cosmiques dont les traces photographiques n'étaient imputables ni à des électrons, ni à des protons. Elles ne pouvaient être dues qu'à des particules de masse intermédiaire et de charge électrique parfois positive et parfois négative. La mesure de la densité des ions (1) créés sur ces trajectoires fixait la limite de cette masse du méson entre 100 et 300 fois celle de l'électron.

L'accord entre la théorie et l'expérience en ce qui concerne la vie moyenne du méson est aussi bon. En effet, on trouve pour cette particule, à l'état libre (c'est-à-dire sans préjuger de son comportement dans les noyaux atomiques où elle n'est pas libre comme dans le rayonnement

(1) Les lois relatives à ces mesures sont loin d'être bien connues, car nous ne disposons pas à volonté de particules de très fortes énergies. On voit tout l'intérêt qu'il y a à construire des cyclotrons géants.

cosmique), une vie moyenne de l'ordre du millionième de seconde ; sa vitesse étant voisine de celle de la lumière (300 000 km/s), on en déduit que son libre parcours moyen est de l'ordre de 300 m.

Donc, dans nos laboratoires, situés pratiquement près du niveau de la mer, nous ne pouvons guère observer que les mésonons qui ont pris naissance à de faibles altitudes. Une des conséquences de cette vie moyenne si courte devrait être l'observation de certaines différences dans l'intensité et la qualité de la composante mésononique du rayonnement cosmique en fonction de l'altitude du laboratoire. De plus, dans un laboratoire déterminé, on devrait aussi observer des différences analogues en fonction de l'angle d'inclinaison sur l'horizontale du « télescope » de compteurs de Geiger. Il est évident que, dans la position zénithale, on détectera plus de particules qu'à 30° sur l'horizontale, par exemple, les particules du rayonnement cosmique étant moins ralenties et moins désintégrées dans la première direction que dans la deuxième.

De même, la température moyenne de l'atmosphère doit faire sentir son influence. En effet, lorsque la température s'élève, vers midi du temps solaire, les couches atmosphériques se dilatent et la zone où les particules cosmiques sont susceptibles de perdre de l'énergie s'étend en hauteur. Le voyage étant plus longuement accidenté, on devra observer, venant du zénith, moins de mésonons à midi qu'à minuit. Les observations à ce sujet sont faites soit à la chambre de Wilson contrôlée par des compteurs Geiger, soit par une série de compteurs.

De la nature de ces variations en fonction : de l'altitude, de la température, de l'angle du cône d'observation et de l'absorption du rayonnement cosmique dans différents matériaux, on peut déduire la vie moyenne du mésonon.

Le mésonon et sa désintégration spontanée expliqueraient, outre les phénomènes liés à la radioactivité, et dont le détail théorique ne peut être donné ici, certains aspects du rayonnement cosmique. C'est ainsi que les « gerbes » cosmiques seraient dues en partie à la disparition de ces mésonons qui, parvenus rapidement au terme de leur brève carrière, seraient capables d'exploser en quelques douzaines de particules électroniques et positoniques (fig. 104). Certaines condi-

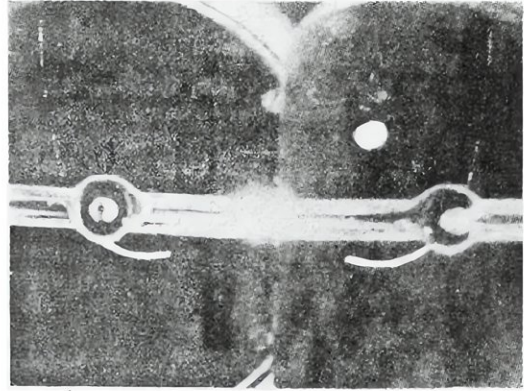


FIG. 111. — VUE STÉRÉOSCOPIQUE DE LA TRAJECTOIRE D'UN MÉSONON

La particule incidente, venant du haut de la figure, est à peine visible. Elle est ralentie à son passage à travers le compteur de Geiger placé au centre de la chambre de Wilson et sa trajectoire est alors parfaitement visible. De la valeur du champ magnétique qui s'exerce dans la chambre, de l'épaisseur de matière traversée, du rayon de courbure et de la densité d'ionisation de la trajectoire, on déduit qu'il s'agit d'un mésonon de masse 220 fois environ supérieure à celle de l'électron au repos. Le passage à travers le compteur déclenche la prise de vue. (Neddermeyer et Anderson.)

tions ambiantes seraient nécessaires pour que ce processus ait lieu. Le champ de force au voisinage d'un noyau de plomb serait, par exemple, plus propice à la création d'une gerbe de particules, à partir d'un mésonon, que le vide interplanétaire, voire même que les noyaux légers d'oxygène et d'azote qui sont les principaux constituants de notre atmosphère.

Le proton négatif

Entre les photons, les neutrons, les protons et les mésonons des deux signes du rayonnement cosmique, il est possible d'imaginer un grand nombre de réactions permettant de passer des uns aux autres. On en imaginerait un nombre beaucoup plus grand encore si on admettait l'existence d'un *proton négatif*.

Cette hypothèse est très séduisante, car on aurait ainsi une symétrie attrayante entre les particules élémentaires :

électron	positon
mésoton négatif	mésoton positif
proton négatif	proton positif

En fait, on a même suggéré, pour expliquer les forces d'échange et d'interaction entre particules, non seulement l'existence du proton négatif, mais aussi celle du mésonon de charge nulle ou *neutretto*.

Il était intéressant de tenter une vérifi-

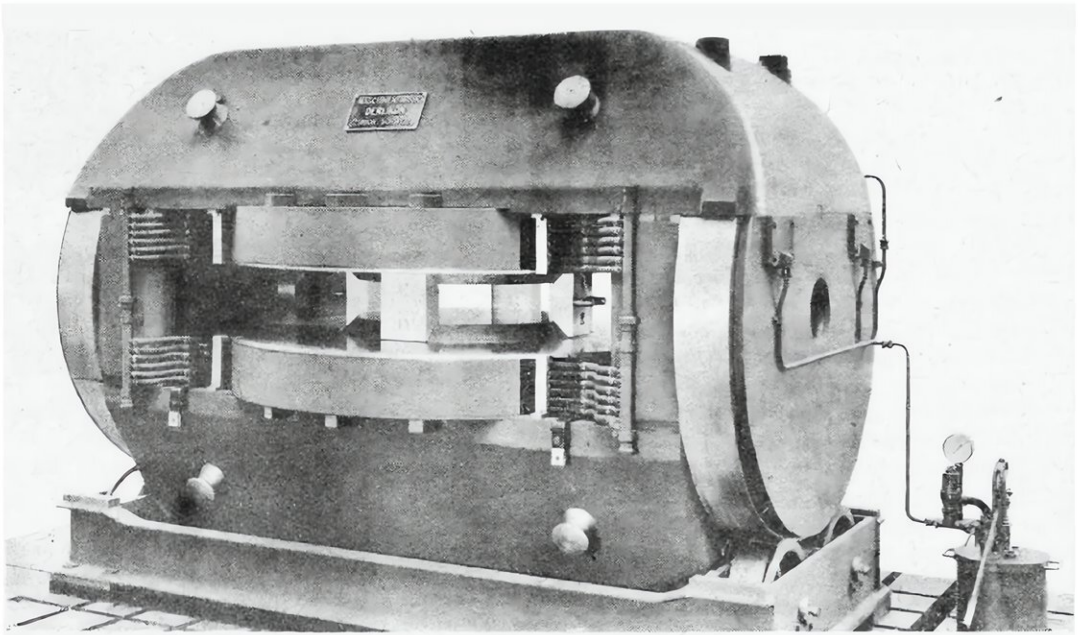


FIG. 112. — L'ÉLECTROAIMANT DU CYCLOTRON DE ZURICH

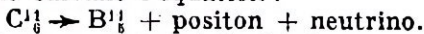
Cet instrument, construit sur la demande du professeur Scherrer, peut se mettre en position verticale pour l'étude du rayonnement cosmique (Ateliers (Erlikon).

cation expérimentale et de voir, par exemple, si certaines réactions nucléaires, *a priori* possibles uniquement si le proton négatif existe, avaient effectivement lieu.

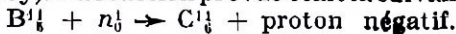
Nous avons eu l'occasion de nous occuper de ce problème. Nous avons choisi la réaction nucléaire du Bore qui, bombardé par des protons, donne du Carbone radioactif dont l'émission positonique décroît, après le bombardement, avec une période de 21 minutes. Voici le schéma de ce processus :



le carbone radioactif formé se désintégrant suivant l'équation :



Nous avons tenté de fabriquer ce carbone radioactif en bombardant du bore non pas avec des protons, mais avec une source très intense de neutrons (cyclotron de Berkeley). La réaction prévue était la suivante :



Si le proton négatif pouvait être émis, nous aurions dû observer la radioactivité de 21 minutes du carbone. Le résultat expérimental a été négatif.

Il est intéressant de signaler à ce propos que, d'après des considérations théoriques toutes différentes, le mathématicien russe Gamow prévoit aussi l'existence possible

du proton négatif. Nous n'entrerons pas dans le détail de cette théorie dont une des conclusions ne manque pas de grandeur.

Gamow envisage l'existence d'Univers, dont la matière serait « l'image » de celle que nous rencontrons dans notre Univers propre, celui qui englobe la Voie Lactée.

Sur la Terre et sur les étoiles de notre galaxie, les protons positifs confèrent la charge électrique aux noyaux et les électrons occupent les orbites autour de ces noyaux. Dans une galaxie « image » de la nôtre, les charges électriques seraient inversement réparties. Les noyaux seraient chargés par des protons négatifs et les orbites seraient occupées par des positons. Si on n'a, jusqu'ici, aucune preuve de l'existence du proton négatif, rien ne prouve cependant que la théorie de Gamow ne soit exacte dans une galaxie « image » de la nôtre. On ne voit pas encore comment la vérifier, car on ne doit s'attendre à observer aucune différence dans les spectres de la lumière venant de ces galaxies par rapport à ceux donnés par les astres de notre Univers.

La rencontre, ou le voisinage éventuel, de deux galaxies « images » occasionnerait une catastrophe monstre où leurs masses se dématérialiseraient en donnant naissance à des rayonnements divers.

DE LA BOMBE ATOMIQUE A L'EXPLOITATION INDUSTRIELLE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE

La rupture de l'uranium

C'est en 1934 que le physicien italien Fermi (1) et ses élèves, à Rome, étudiant systématiquement les effets du bombardement de tous les éléments connus par des neutrons, observèrent avec le plus grand intérêt, entre eux, l'uranium, la naissance de plusieurs radioéléments artificiels, émetteurs de rayons bêta (électrons). Les périodes de ces radioéléments furent fixées aux environs de 10 secondes, 40 secondes, 13 minutes, 90 minutes et plus de 2 heures.

La première hypothèse avancée pour expliquer ces constatations était celle de la capture d'un neutron (masse 1) par le noyau d'uranium (masse 238), d'où formation d'un noyau d'uranium de nombre de masse 239, isotope du précédent. Ce noyau radioactif aurait, en se désintégrant, émis un électron (rayon bêta) et serait ainsi devenu un noyau de nombre de masse inchangée, 239, et de charge accrue d'une unité, 93 (la perte d'une unité de charge négative, due au départ d'un électron, équivaut au gain d'une unité de charge positive). L'élément 93 ainsi formé, dit « transuraniens » parce qu'il se placerait dans la classification générale des éléments après l'uranium, dernier terme connu jusque-là, ne devait pas exister dans la nature du fait de sa courte « vie ». Il devait se désintégrer en effet rapidement, d'après Fermi, en émettant un nouvel électron, d'où l'élément de numéro atomique 94 qui, à son tour, serait responsable du 95, et ainsi de suite.

Une deuxième hypothèse envisageait la capture d'un neutron par un noyau d'uranium, avec expulsion d'un proton, ce qui donnait un noyau de nombre de masse inchangée, 238 (neutron et proton ayant la même masse unité), mais de charge réduite à 91 (le proton ayant emporté une unité de charge). On aurait eu

affaire là à un isotope du protactinium (91), qui, par émission d'un électron (rayon bêta), aurait redonné de l'uranium (92). Cette interprétation se heurtait à des difficultés considérables, obligeant à admettre de multiples « isomères » pour justifier les différentes périodes radioactives observées. (Des noyaux « isomères » sont des noyaux en apparence identiques, de même charge et de même masse, mais néanmoins dans des états différents, puisqu'ils se désintègrent avec des périodes variées et parfois en émettant des particules différentes ; le radium C, l'actinium C, et le thorium C de la figure 4 en sont des exemples.)

Une troisième hypothèse enfin envisageait la capture du neutron avec expulsion d'une ou deux particules alpha et formation, par conséquent, d'un noyau de charge 90 ou 88 (la particule alpha porte une charge égale à 2). Ici encore l'isomérisie multiple constituait un écueil. D'autre part, on n'est jamais parvenu à observer de particules alpha projetées par les noyaux en cause. Finalement, des analyses chimiques minutieuses prouvèrent que les radioéléments formés ne pouvaient être des isotopes des éléments 86 à 92.

La première hypothèse comportant la formation d'éléments transuraniens semblait donc la plus probable, d'autant plus que d'autres périodes radioactives étaient venues s'ajouter aux cinq déjà connues. Pourtant, en essayant de bien identifier les radioéléments transuraniens, divers chercheurs et notamment M^{me} Joliot-Curie et M. Savitch, en France, puis Hahn et Strassmann, en Allemagne, observèrent que ces radioéléments possédaient certaines propriétés chimiques de terres rares (lanthane) ou d'éléments alcalino-terreux, sans être des isotopes du radium ou de l'actinium. Autrement dit, au lieu d'être homologues des éléments des colonnes (voir le tableau de Mendéléïeff, page 34) supérieures à celle de l'uranium, comme par exemple celle du rhénium, ou celle de l'osmium, etc., les radioéléments formés

(1) Prix Nobel de physique en 1938 et professeur aux États-Unis depuis 1939.

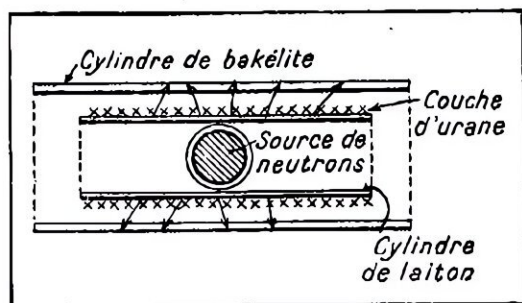


FIG. 113. — COMMENT A ÉTÉ MISE EN ÉVIDENCE LA FORMATION DE CORPS RADIOACTIFS LORS DU BOMBARDEMENT DE L'URANIUM PAR DES NEUTRONS (JOLIOT)

Les atomes d'uranium explosent et projettent des fragments radioactifs sur le cylindre en bakélite, où ils sont ensuite détectés.

étaient homologues du baryum, du lanthane, voire même de gaz rares comme le krypton et le xénon.

Pendant trois ans (1936 à 1939), ce problème défia la sagacité des physiciens et des chimistes. Au début de 1939, Hahn et Strassmann prouvèrent d'une manière irréfutable qu'un au moins des nouveaux éléments que l'on pensait être transuraniens était en fait un isotope du baryum, dont le numéro atomique et la masse sont, tous deux, environ la moitié du numéro atomique et de la masse de l'uranium.

La seule explication possible de cette découverte était l'existence d'un nouveau mode de désintégration consistant en la fragmentation du noyau de l'uranium en deux ou plusieurs morceaux possédant chacun une masse importante, puisqu'ils appartiennent à la famille des alcalino-terreux, alors que les modes jusque-là classiques de désintégration comportaient seulement l'émission de particules de faible masse, électrons, protons, ou particules alpha. Ce n'était plus à un phénomène comparable à une « évaporation nucléaire » qu'on avait affaire, mais à un véritable éclatement. Immédiatement, et presque simultanément, plusieurs chercheurs s'ingénierent à contrôler cette hypothèse.

M. Joliot, en France, M. Frisch et M^{lle} Meitner, à Copenhague, furent les premiers à mettre en évidence expérimentalement ce nouveau mode de désintégration, par rupture d'un noyau (le phénomène se produit aussi avec le thorium, l'ionium et le protactinium bombardés par des neutrons).

Voici, pour bien situer le phénomène,

la description détaillée de l'expérience de M. Joliot.

Une source de neutrons (ampoule en verre contenant du radon et du béryllium) est placée (fig. 113) à l'intérieur d'un cylindre de laiton de 20 mm de diamètre et de 5 cm de hauteur. On recouvre la surface extérieure de ce cylindre avec de l'oxyde d'urane. A 3 mm de la surface d'urane, on place un cylindre concentrique de bakélite. On observe qu'en présence de la source de neutrons le cylindre de bakélite reçoit de nombreux fragments atomiques provenant de la rupture de certains noyaux d'uranium. Le cylindre de bakélite, transporté autour d'un compteur Geiger-Muller (page 74) donne, en effet, un nombre assez important d'impulsions électriques dont le nombre va en décroissant en fonction du temps. Les fragments qui se sont fixés dans la bakélite sont donc radioactifs et les périodes des radioéléments formés sont retrouvées par cette élégante méthode de projection atomique.

La figure 114 montre un autre dispositif, dû à M. J. Thibaud, de détection des fragments atomiques. En S, on place la source de neutrons et en E un écran de plomb, pour arrêter les rayons gamma et ne laisser passer que les neutrons. Puis vient la couche d'urane. Les fragments projetés vers l'avant sont captés par l'électrode collectrice qui les transmet à l'amplificateur. Ce dernier actionne un oscillographe qui inscrit finalement sur un film les impulsions électriques dont les fragments atomiques sont la cause. Dès le début de l'étude des ruptures nucléaires, M. Thibaud a mis ainsi en lumière la formation, en particulier, de radioéléments isotopes du brome. On en connaît actuellement une trentaine.

En résumé, on a pu identifier par différentes méthodes des fragments provenant de la rupture de l'uranium ayant les propriétés des terres rares (lanthane), des alcalino-terreux, (baryum), des halogènes (iode, brome), des alcalins (césium, rubidium) et des gaz rares (krypton), bref, des éléments ayant des masses comprises d'une part entre 90 et 100 unités et, d'autre part, entre 134 et 144 unités.

M. Joliot a mis en évidence à la chambre Wilson (fig. 102), la rupture d'un noyau d'uranium. La figure 115 montre l'un des fragments issus de ce cataclysme nucléaire et projeté hors de l'uranium en même temps que deux-particules alpha.

Le mécanisme de la rupture

Le processus de la rupture s'expliquerait ainsi : un neutron pénètre dans l'enceinte d'un noyau ; son énergie se répartit uniformément entre les autres particules constitutives. Il y a ainsi une espèce d'agitation dans ce petit univers lilliputien. Plusieurs facteurs régissant la stabilité de ce monde entrent en conflit et, finalement, la goutte cosmique en miniature que constitue un noyau se scinde en deux. Les deux fragments, chargés positivement et trop proches, se repoussent en vertu de la loi de Coulomb, et le divorce avec rupture violente est consommé. Chaque conjoint emporte avec lui environ la moitié de l'énergie libérée, soit près de 100 millions d'électrons-volts. Cette énergie est mesurée par l'observation des parcours dans l'air (ou dans certaines substances) des fragments nucléaires et des particules bêta qu'eux et leurs descendants émettent en se désintégrant.

D'après les idées actuellement admises sur la stabilité des noyaux atomiques, de telles ruptures de noyaux sont parfaitement possibles.

En effet, nous avons vu (chapitre I) que les noyaux sont constitués par des assemblages de neutrons et de protons. Si l'on compare la masse d'un noyau quelconque à la somme des masses que possèdent, à l'état libre, les particules qui le constituent, on constate toujours une petite différence, variable d'un élément à un autre. Lorsque le noyau est stable, cette différence correspond à une « perte de masse » dans le noyau, qui, traduite en énergie (puisque masse et énergie sont équivalentes), représente l'énergie de liaison du noyau. Cette énergie de liaison peut être considérable. Dans un noyau d'hélium (particule alpha), par exemple, elle atteint 0,03 unités de masse, soit $4,5 \times 10^{-6}$ ergs, ce qui correspond, pour une molécule-gramme d'hélium (4,002 g) à 190 000 kWh. Cette valeur énorme explique la grande stabilité des noyaux d'hélium et montre de quelle source d'énergie phénoménale et vraiment inépuisable on disposera quand on saura combiner les protons et les neutrons. Nous en sommes encore loin. C'est d'ailleurs la transformation de l'hydrogène en hélium qui alimente les prodigieuses centrales thermiques des étoiles, ainsi que nous l'avons vu au chapitre IX.

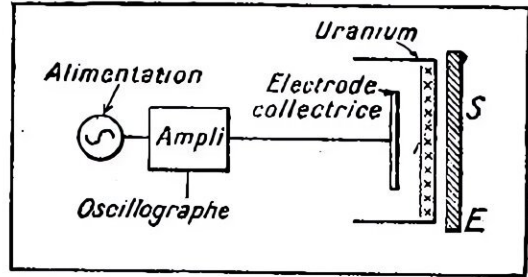


FIG. 114. — UNE AUTRE MÉTHODE POUR METTRE EN ÉVIDENCE LA RUPTURE DE L'URANIUM (THIBAUD)

La source de neutrons *S*, isolée par la plaque de plomb *E*, qui ne laisse passer que les neutrons, bombarde l'uranium. Les produits de l'explosion des atomes sont recueillis par l'électrode et décelés par un oscillographe.

La valeur de l'énergie de liaison des particules dans les noyaux a pu être déterminée pour les différents éléments connus. Si on met à part des fluctuations irrégulières pour les tout premiers, les plus légers, on constate que cette énergie, qui mesure la stabilité, augmente d'abord rapidement quand on passe des noyaux simples aux atomes plus complexes, atteint son maximum pour des nombres de masse de l'ordre de 60, et décroît ensuite graduellement, jusqu'à devenir négative pour les noyaux les plus lourds, qui sont en effet naturellement instables. D'où deux méthodes pour libérer de l'énergie par transmutation : ou combiner deux atomes légers pour former des atomes plus lourds, groupant entre 40 et 100 particules, ou bien scinder les atomes les plus lourds et les fragmenter en atomes de poids moyen. C'est cette fragmentation qui est réalisée avec l'uranium.

Les forces qui maintiennent l'assemblage des particules dans les noyaux sont de nature encore inconnue, mais on a constaté que seules certaines combinaisons de neutrons et de protons sont stables. Chez les noyaux légers stables, le nombre de neutrons est sensiblement égal à celui des protons. La proportion de neutrons augmente quand on progresse dans la classification des éléments. Dans le noyau de l'uranium commun, on trouve 92 protons et 146 neutrons. Donc toute rupture d'un noyau d'uranium en deux noyaux moyens, par exemple en césium et rubidium, nous mettra en présence de fragments eux-mêmes instables qui devront se débarrasser de leurs neutrons en surnombre. Ceux-ci pourront atteindre une dizaine.

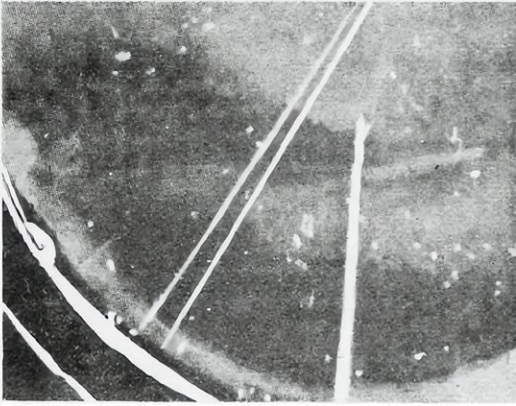


FIG. 115. — TRAJECTOIRE D'UN ATOME PROVENANT D'EXPLOSION DE L'URANIUM, PHOTOGRAPHIÉE A LA CHAMBRE DE WILSON PAR M. JOLIOU (FÉVRIER 1939)

L'uranium était introduit dans la chambre sous forme d'oxyde d'urane (UO_2) déposé sur une feuille de papier. La trajectoire du fragment apparaît sous l'aspect de la traînée épaisse de droite. La chambre fonctionnait sous la pression réduite de 18 cm de mercure, ce qui explique la longueur de la trajectoire. Ramenée à la pression normale de 76 cm de mercure, elle n'aurait eu que 9 mm de long. Les deux traînées fines de gauche sont celles de noyaux alpha dus à la radioactivité de l'uranium. On notera que la densité ionique de la traînée engendrée par le fragment d'uranium est beaucoup plus grande que celle des rayons alpha, ce fragment portant plusieurs charges et étant doté d'une masse beaucoup plus grande.

L'élimination de ces neutrons pourra se faire de deux manières.

Quand, au sein d'un noyau, un neutron se transformera en un proton (par expulsion d'un électron, qui, emportant une charge négative unité, provoque l'apparition d'une charge positive supplémentaire), l'excès du nombre des neutrons se réduit doublement puisque le nombre de protons augmentera d'une unité et que celui des neutrons diminuera d'autant. Les produits de l'éclatement de l'uranium seront donc des corps radioactifs bêta, et on observera environ une demi-douzaine de ces éléments constituant une famille, car ils dériveront les uns des autres, aboutissant à des noyaux stables de numéro atomique supérieur de quelques unités à celui du fragment original. Ainsi le césium $^{137}_{55}$ se désintégrerait en baryum $^{137}_{56}$; ce dernier en lanthane $^{137}_{57}$, qui, à son tour, deviendrait, par une quatrième émission bêta, du cérium $^{137}_{58}$. Enfin, celui-ci aboutirait au praséodyme stable $^{137}_{59}$.

Mais, au lieu de se débarrasser du surplus des neutrons par radioactivité bêta,

les fragments peuvent les rejeter purement et simplement au dehors des noyaux. C'est là un phénomène mis en évidence dès le printemps de 1939 par M. Joliot et ses collaborateurs, Halban et Kowarski, et dont l'importance est capitale, car il démontre la possibilité de réaliser des *réactions en chaîne*. En effet, imaginons un neutron incident, qui vient faire exploser un noyau d'uranium. Avec les fragments issus de cette rupture, *plusieurs neutrons* sont émis qui, à leur tour, bombarderont les atomes d'uranium restés intacts. Le cycle continuera théoriquement, par une multiplication incessante du nombre de neutrons et de ruptures. (Les premières expériences de M. Joliot avaient montré que le nombre des neutrons émis lors de la rupture d'un atome d'uranium était de trois environ.)

Pour la première fois on apercevait ainsi la possibilité d'atteindre pratiquement les prodigieuses quantités d'énergie stockées dans les noyaux atomiques.

En effet, si la rupture du noyau de l'uranium avait fourni seulement de l'énergie, même en quantité considérable, à l'échelle atomique, sans libérer des neutrons supplémentaires, il aurait fallu, pour provoquer un nombre de ruptures suffisant pour que l'énergie soit chiffrable à l'échelle humaine, en kilowatts-heures, effectuer des bombardements par neutrons d'une telle intensité que le prix de revient aurait été inabordable. Au contraire, la libération au cours de la rupture de *plus d'un neutron secondaire* doit permettre à d'autres ruptures de se produire et par suite à la réaction nucléaire de se propager au sein d'une masse *convenable* d'uranium, une fois qu'elle a été amorcée en un de ces points. Cet amorçage n'exige évidemment qu'une quantité d'énergie relativement faible, fraction infime de l'énergie libérée par la réaction en chaîne.

Ainsi qu'il était naturel, dès que ces faits furent établis, les laboratoires de physique atomique de tous les pays du monde se mirent fébrilement au travail. Bien que cette réserve immense de « combustible atomique » parut encore bien loin de son exploitation pratique, même à petite échelle, les recherches à son sujet tombèrent dans le domaine des travaux intéressant la défense nationale. Seuls quelques initiés savaient qu'on les poursuivait activement, dans les deux camps des **belligérants**.

La bombe atomique

Le lundi 6 août 1945, à 9 heures (temps local), la première bombe atomique était lancée d'un avion sur la base navale japonaise de Hiroshima, causant des dégâts considérables.

Le 9 août, une deuxième bombe anéantissait le tiers de Nagasaki, et, le 10 août, le Japon offrait sa capitulation sans conditions.

Ainsi, l'équipe de spécialistes qui travaillaient aux États-Unis avait la première atteint le but. Ce n'est pas sans effroi que l'on songe à ce qu'aurait été la suite des événements si les recherches fébriles des Allemands et des Japonais dans le même domaine avaient porté leurs fruits avant celles des Américains.

C'est évidemment aux États-Unis, où l'on hésite rarement devant les entreprises grandioses, que ces travaux avaient le plus de chances d'atteindre le stade des réalisations pratiques. N'y a-t-on pas consacré depuis 1940 plus de 200 milliards de francs? On a dit d'ailleurs que la dépense globale qu'ont entraînée ces recherches représentait seulement l'équivalent de sept jours de guerre pour les États-Unis.

Les détails de fabrication de la bombe atomique constituent le « secret » de cette nouvelle pyrotechnique. Mais il est cependant possible, d'ores et déjà, de préciser les bases théoriques sur lesquelles reposent la construction et le fonctionnement du nouvel engin et que mettront en œuvre demain les centrales de types nouveaux qui exploiteront les énormes sources d'énergie que la science met aujourd'hui à la portée de l'homme.

Qu'est-ce que l'uranium?

L'uranium se trouve assez abondamment dans la nature sous formes d'oxydes. Il existe des mines d'uranium en Tchécoslovaquie, aux États-Unis, au Canada, au Congo belge, en Colombie, en Argentine, etc. Il existe des gisements non exploités en France (Autun). L'oxyde d'urane est utilisé depuis longtemps en petites quantités dans l'industrie céramique

A mesure que l'uranium se désintègre spontanément (de moitié en quelques milliards d'années), il donne naissance notamment au radium qui s'accumule ainsi dans le minerai. Suivant les vicissitudes géologiques de la couche uranifère, on aura plus ou moins de radium accumulé, d'où les richesses variables en radium observées dans les différents gisements terrestres. L'ordre de grandeur est de 1 g de radium par tonne de minerai d'oxyde d'uranium. La figure 4 (p. 11) montre les désintégrations successives des éléments radioactifs de la famille de l'uranium qui aboutissent au plomb.

Dans tous les gisements, l'uranium se présente en un certain nombre d'isotopes.

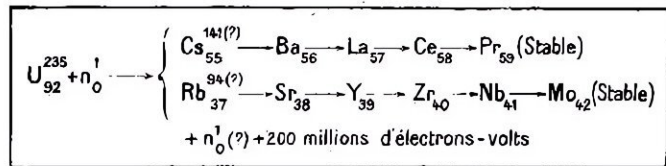


FIG. 116. — LA RUPTURE DU NOYAU DE L'URANIUM

L'uranium frappé par un neutron se scinde en deux fragments, eux-mêmes radioactifs. L'incertitude règne quant à la nature exacte des produits de la scission et le nombre de neutrons secondaires libérés. On trouvera, en se reportant au tableau de Mendéléïeff (p. 34), les noms des éléments correspondant aux symboles indiqués. Le diagramme ne tient pas compte de l'influence de la vitesse des neutrons

Le plus abondant est l'uranium 238, qui représente 99,2 % de l'ensemble. Puis vient l'uranium 235 avec 0,7 %, et l'uranium 234 avec 0,006 %.

Uranium 235 et plutonium

Ainsi, dans un bloc d'uranium-métal se trouvent en présence trois sortes de noyaux, de masses respectives 238, 235 et 234. Ces derniers sont en proportions beaucoup trop faibles pour pouvoir jouer un rôle intéressant, au moins en première approximation, et nous les laisserons de côté. La première question à trancher est de savoir si les neutrons ont une action identique sur les noyaux 238 et 235. La réponse a été donnée par le grand physicien mathématicien danois Niels Bohr qui, au cours d'un séjour aux États-Unis au début de 1939, mit au point, en collaboration avec un de ses anciens élèves, le professeur J.-A. Wheeler, de l'Université de Princeton (New Jersey), une théorie nouvelle de la stabilité des noyaux. Cette théorie prédisait que, si l'uranium

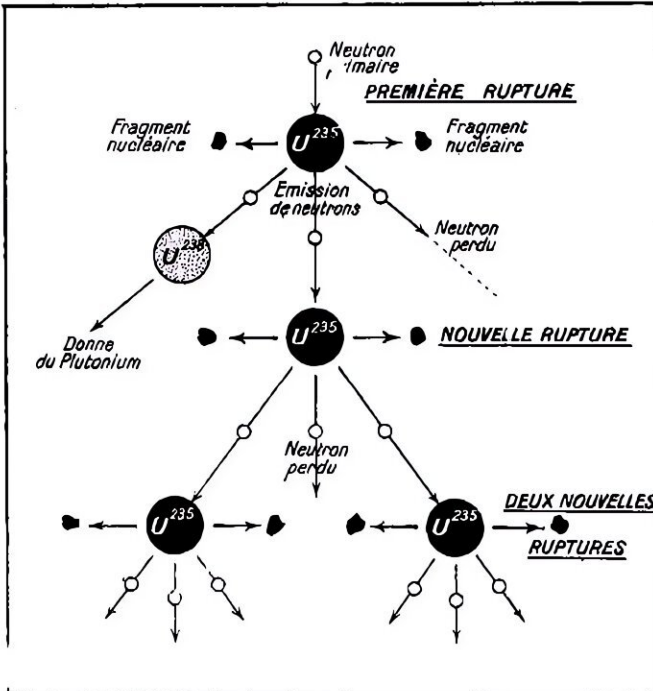


FIG. 117. — SCHÉMA DE PRINCIPE D'UNE « RÉACTION EN CHAÎNE »

238 et l'uranium 235 pouvaient fournir des ruptures explosives lorsqu'ils étaient bombardés par des neutrons rapides, donc de grande énergie, la probabilité d'obtenir des ruptures de noyaux était beaucoup plus grande en bombardant l'uranium 235 avec des neutrons lents de très faible énergie.

Ce phénomène fut remarquablement vérifié en mars 1940, par les professeurs Dunning et Grosse, de l'Université de Columbia (New-York), en bombardant avec des neutrons fournis par le cyclotron de cette Université un échantillon d'uranium 235 concentré, obtenu par le professeur Nier de l'Université de Minnesota à l'aide du spectrographe de masse (nous aurons l'occasion d'indiquer un peu plus loin le principe de cet appareil).

Mais l'uranium 238 présente en outre une propriété particulière, celle d'absorber avec une très grande facilité, sans se rompre, les neutrons lorsque ceux-ci possèdent une énergie comprise entre des limites très étroites, véritable niveau de « résonance », comme disent les physiciens dans leurs plus récentes théories nucléaires, que nous ne pouvons songer à aborder ici. Cette énergie de « résonance » est intermédiaire entre celle, très élevée,

qui provoque, d'ailleurs rarement, la rupture de l'uranium 238 et celle, très basse, qui provoque si facilement celle de l'uranium 235. Le noyau d'uranium 238 qui a absorbé un tel neutron voit sa masse atteindre 239 : c'est un nouvel isotope, l'uranium 239. Il est instable et émet un électron (particule bêta). De ce fait, la charge positive du noyau s'accroît d'une unité et passe de 92 à 93. Nous avons affaire là à un nouvel élément, le neptunium ${}_{93}^{239}$, qui est lui-même radioactif, émetteur de rayons bêta (électrons) avec une période assez courte, inférieure à deux jours. Chaque noyau de neptunium perdant un électron voit sa charge positive passer de 93 à 94. Il devient le plutonium ${}_{94}^{239}$. Les éléments de numéros atomiques 95 et 96 ont été obtenus récemment en bombardant l'uranium et le plutonium avec

des particules alpha et des deutons très énergiques donnés par le cyclotron de Berkeley.

En réalité, le plutonium a été obtenu pour la première fois à l'Université de Berkeley, en bombardant de l'uranium 238 avec des deutons, ce qui donne du neptunium 238 et deux neutrons. Le neptunium 238, par émission bêta (électrons), donne du plutonium 238 qui retourne, par émission alpha (période d'environ 50 ans) à l'état d'uranium 234. En 1942, Berkeley et d'autres centres possédant des cyclotrons avaient constitué un stock de 500 microgrammes de plutonium 238 qui ont permis d'amorcer la chimie du plutonium, qui fut utilisée plus tard pour l'isotope 239, fabriqué plus rapidement dans les « piles » et qui présente d'ailleurs une plus grande probabilité de fission que le plutonium 238. On connaît maintenant quatre états d'oxydation du plutonium correspondant aux valences positives 3, 4, 5 et 6. Le plutonium se désintègre spontanément avec une période radioactive très longue. Il émet des rayons alpha et devient de l'uranium 235.

Le plutonium, ainsi que le prédit la théorie de Bohr-Wheeler, présente le même phénomène de rupture par bombardement avec des neutrons lents que

l'uranium 235. Ces deux éléments intéresseront donc au même titre les savants à la recherche de procédés pratiques de libération de l'énergie atomique.

Signalons également que la rupture des noyaux se produit avec d'autres éléments que l'uranium ou le plutonium. C'est ainsi que le thorium $^{232}_{90}\text{Th}$ se comporte comme l'uranium 238, en présence de neutrons rapides. Le protactinium $^{231}_{91}\text{Pa}$, élément très rare dans la croûte terrestre, se comporte d'une manière intermédiaire entre l'uranium 238 et l'uranium 235. Enfin, le phénomène de rupture peut être observé avec l'ionium. La théorie de Bohr-Wheeler justifie toutes ces observations et il semble qu'on puisse lui faire confiance pour les recherches futures, car elle prédit le comportement, du point de vue rupture, de tous les noyaux lourds, connus ou inconnus.

Les réactions en chaîne

Parler de l'action d'un neutron sur un noyau est certes un moyen d'exposition commode. Il ne faudrait pas qu'il fasse illusion sur l'état rudimentaire de nos connaissances. Mettons les choses au mieux : supposons que nous suivions un neutron isolé dont la vitesse, donc l'énergie, nous soit parfaitement connue et qu'il vienne à rencontrer un atome d'uranium 238. Sommes-nous en mesure d'annoncer ce qui va se passer ? Certainement pas. Tout ce que nous pouvons dire, c'est qu'il y a, par exemple, 1 chance sur 100 pour que nous assistions à la rupture du noyau avec émission de nouveaux neutrons, 40 chances sur 100 pour que le neutron soit absorbé sans rupture, et 59 chances sur 10 pour que le neutron rebondisse plus ou moins élastiquement sur le noyau en laissant celui-ci inaltéré. Les probabilités dominent tous ces phénomènes, et le calcul des probabilités est seul capable de guider nos spéculations.

Supposons que nous disposions d'uranium-métal tel que nous pouvons l'extraire des minerais naturels et rassemblons-en un bloc de 238 g environ. Étant donnée la grande densité de l'uranium, il occupera environ 10 cm^3 . Dans cette masse sont en présence près de un million de milliards de milliards ou 10^{24} atomes d'uranium 238, 10^{21} atomes d'uranium 235, et un nombre inchiffrable, mais toujours très grand, d'atomes divers provenant d'impuretés. Nous citerons

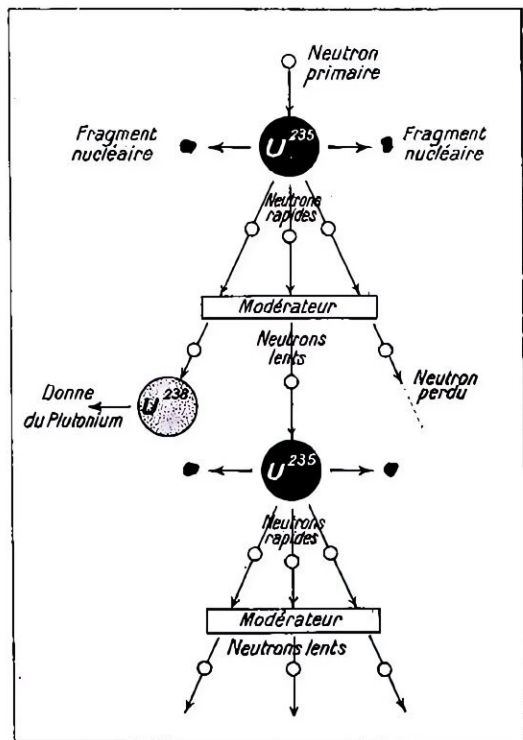


FIG. 118. — SCHEMA DE PRINCIPE D'UNE « RÉACTION EN CHAÎNE », AVEC RALENTISSEMENT DES NEUTRONS

encore, mais seulement pour souligner la complexité des phénomènes : 1° les millions de noyaux d'hélium projetés en tous sens par la désintégration de l'uranium, qui, ne l'oublions pas, est radioactif ; 2° tous les descendants de la famille de l'uranium qui émettent eux-mêmes des particules diverses ; 3° les produits de désintégration des impuretés qui se transmutent sous ces bombardements ; 4° des centaines de milliards d'électrons.

Supposons qu'à un instant donné il y ait 100 neutrons dans cette masse. Que va-t-il leur advenir ? Un certain nombre d'éventualités sont à considérer :

- a) Des neutrons peuvent traverser toute la masse sans rencontrer d'atomes et se perdre à l'extérieur ;
- b) Des neutrons peuvent être absorbés par des impuretés ;
- c) Des neutrons peuvent être absorbés par des noyaux d'uranium 238 sans provoquer de ruptures, et donner du neptunium, puis du plutonium ;
- d) Des neutrons peuvent causer la rupture de noyaux d'uranium 235 et 238. Ce sont ces derniers seuls qui provoqueront la libération de nouveaux neutrons. Sup-

posons que ceux-ci soient au nombre de 110, contre 100 neutrons primaires. Nous pouvons dire que nous avons réalisé un système, où le facteur de multiplication des neutrons est 1,10 et où s'amorce une réaction en chaîne. Par contre, si les neutrons secondaires ne sont que 99 par exemple, le facteur de multiplication 0,99 tombe au-dessous de l'unité et aucune réaction en chaîne ne peut s'établir. Rien ne prouve *a priori* qu'il soit possible d'obtenir des facteurs de multiplication supérieurs à l'unité.

Le volume critique

Pour réduire le nombre des neutrons perdus, il faut évidemment diminuer tout d'abord la proportion des impuretés, donc opérer avec des produits extrêmement purs. Des teneurs de quelques millièmes seulement sont admissibles, et encore convient-il d'éviter à tout prix des éléments comme le bore, puissant absorbant de neutrons.

On remarquera, par ailleurs, que la libération de neutrons nouveaux dans la masse est, pour une densité constante, un effet de volume, tandis que la perte de neutrons dans l'espace ambiant s'effectue à travers la surface. Si donc on accroît la masse, la surface croissant plus lentement que le volume, la proportion du nombre de neutrons perdus à celui des neutrons actifs diminue. D'où un moyen évident pour obtenir un système où se développe une réaction en chaîne : accroître la masse réactive jusqu'à ce que le facteur de multiplication dépasse l'unité (1). On

(1) Signalons que, pour réduire la proportion des neutrons perdus pour la réaction par fuite à travers les parois et, par conséquent, pour pouvoir opérer avec une masse critique plus faible, on peut disposer autour d'elle une enveloppe de graphite qui agit comme réflecteur.

voit en même temps qu'un tel système doit être stable, puisque, le dégagement d'énergie se traduisant par une élévation de température, la masse se dilatera, sa surface augmentera et le nombre de neutrons évadés croîtra, tandis que celui des neutrons actifs restera constant, la masse ici restant constante dans un volume accru.

En fait, on pourrait augmenter indéfiniment les dimensions d'un bloc d'uranium naturel d'une pureté absolue sans que puisse se produire de réaction en chaîne. Cela tient à ce que la répartition de l'énergie entre les neutrons dans un bloc de cette sorte est telle que la probabilité pour qu'ils soient absorbés par l'uranium 238 sans rupture du noyau est beaucoup plus grande que pour qu'ils provoquent des ruptures de l'une ou l'autre espèce de noyaux. Il faut donc trouver un moyen pratique soit pour éliminer l'isotope 238, soit pour l'empêcher d'absorber les neutrons. Le premier moyen revient à isoler l'isotope 235, opération délicate dont nous parlerons plus loin, à moins qu'on ne préfère fabriquer du plutonium dont le comportement est analogue à celui de l'uranium 235. Le second conduit à l'emploi de « modérateurs » et à la construction des « piles » au graphite ou à l'eau lourde.

Les « modérateurs »

Nous avons dit que la rupture de l'uranium 235, phénomène dont l'importance est primordiale pour la multiplication des neutrons, atteignait sa probabilité la plus élevée pour des valeurs très faibles de l'énergie des neutrons de bombardement. Or les neutrons provenant des ruptures de noyaux sont animés d'énergies considérables, plusieurs dizaines de milliers d'électron-volts, contre 0,005 électron-volt environ pour l'énergie la plus favorable. Les neutrons animés de telles faibles vitesses sont dits « neutrons thermiques ».

Il faut ralentir les neutrons de rupture, et ce ralentissement s'obtient sans difficulté majeure en plaçant sur leur trajet des obstacles auxquels ils se heurteront en perdant à chaque choc une partie de leur énergie. Ces ob-

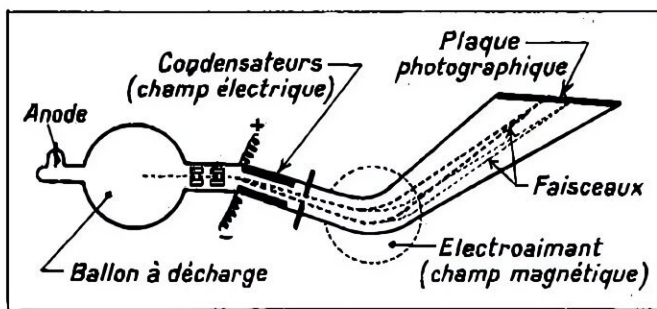


FIG. 119. — SCHÉMA D'UN SPECTROGRAPHE DE MASSE

Suivant la valeur du rapport de la charge des atomes à leur masse, chaque isotope, différemment dévié, va frapper un point particulier de la plaque collectrice et s'y accumule.

stacles ne seront autres que des noyaux atomiques convenables. En application des lois de la mécanique classique, il faudra choisir des atomes légers, car, dans un choc élastique, l'énergie cédée par un projectile à une cible est maximum quand les masses sont égales. On s'efforce de les rendre au moins voisines. Le « modérateur » des neutrons sera donc soit l'hydrogène lourd ou deutérium (sous forme d'eau lourde), soit le carbone (sous forme de graphite purifié), soit le béryllium. On laisse ainsi de côté l'hélium, difficile à manier parce que gazeux et ne donnant pas de composés denses, le lithium et le bore qui absorbent les neutrons, et l'hydrogène de masse 1 qui absorbe les neutrons également en donnant de l'hydrogène lourd.

Parvenu en ce point de notre exposé, nous pouvons préciser les grandes lignes des méthodes qui permettront une utilisation pratique de l'énergie de rupture des atomes d'uranium :

— Ou bien rassembler une masse suffisante d'uranium 235 (par élimination de l'uranium 238 contenu dans le mélange naturel des deux isotopes) ou de plutonium (fabriqué par transmutation de l'uranium 238 dans un empilement convenable ou « pile ») ;

— Ou bien utiliser une masse suffisante d'uranium naturel, oxyde naturel purifié, mélangé à un « modérateur » et constituant la « pile ».

Ces deux méthodes ont été mises en application aux États-Unis. Nous parlerons en premier lieu de la deuxième, car c'est elle qui est aussi à la base de la fabrication du plutonium.

Les « piles »

Dans une masse d'uranium naturel, mélange des deux isotopes, additionné d'un « modérateur », les neutrons émis à grande vitesse lors des ruptures perdent leur énergie dans une série de chocs, tant contre les atomes lourds de l'uranium eux-mêmes (chocs inélastiques qui ne jouent de rôle appréciable que lorsque la vitesse des neutrons est encore assez grande), que contre les atomes légers du « modérateur ». Leur vitesse décroît ainsi progressivement, de sorte que leur énergie atteint quelques volts et qu'ils passent ainsi par le « niveau de résonance » mentionné précédemment, auquel ils sont absorbés en grand nombre par les noyaux

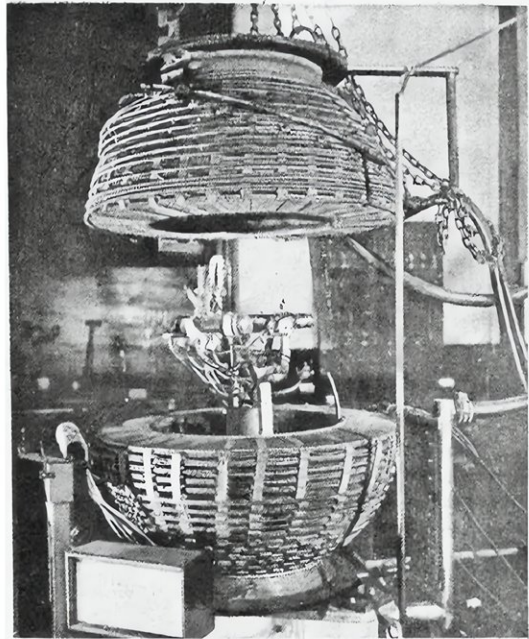


FIG. 120. — UN MODÈLE AMÉRICAIN DE SPECTROGRAPHE DE MASSE POUR L'ISOLEMENT DES ISOTOPES PURS (WESTINGHOUSE)

d'uranium 238, avec production de neptunium, puis de plutonium. L'idéal serait, dans le cas où l'on veut fabriquer du plutonium, de favoriser cette absorption en gardant juste le nombre de neutrons nécessaires pour entretenir la réaction en chaîne par rupture du nombre correspondant de noyaux 235. En fait, la tendance à l'absorption par l'uranium 238 est si grande que la réaction en chaîne ne pourrait s'établir dans ces conditions. Il est indispensable de soustraire les neutrons, ou plus exactement un nombre appréciable d'entre eux, à l'action de l'uranium 238, au moment où leur énergie passe par le « niveau de résonance ». Ceci ne peut s'obtenir par un mélange intime du « modérateur » et de l'uranium, mais seulement en disposant des blocs d'uranium convenablement espacés au sein d'une masse homogène de « modérateur ». On réalise ainsi ce qu'on appelle outre-Atlantique un « lattice » et en France un « réseau ». L'espacement des blocs sera différent suivant la nature du « modérateur ». Dans le graphite, il est de l'ordre de 40 cm, dans l'eau lourde il serait sensiblement inférieur, et les « piles » à l'eau lourde seront ainsi plus compactes que celles en graphite. Malheureusement, l'eau lourde

coûte plus cher et s'obtient moins facilement que le graphite. C'est une des raisons pour lesquelles ce « modérateur » a été abandonné en Amérique. Une autre raison réside dans le fait qu'une « pile » solide de graphite se prête mieux aux expériences et présente moins d'aléas (fuites, corrosion, évaporation, etc.) qu'une pile à l'eau lourde. L'Intelligence Service a pu savoir qu'en 1944 les Allemands envisageaient d'utiliser comme modérateur de la paraffine ne contenant que de l'hydrogène lourd.

On cherche donc par le calcul et par tâtonnements les dimensions les meilleures pour les blocs d'uranium et leurs distances mutuelles dans le cube ou la sphère de graphite.

La première pile ainsi réalisée avec du graphite fonctionna à Chicago le 2 décembre 1942. Elle fut construite par le physicien italien Fermi et ses collaborateurs qui lui donnèrent la forme d'une sphère aplatie. Le graphite était taillé en briques, empilées les unes sur les autres, et dont une sur deux portait en ses angles les blocs d'uranium. Malgré le soin apporté au calcul de la masse critique, celle-ci fut atteinte alors qu'on n'avait pas encore installé les trois quarts des blocs prévus. La pile contenait alors près de 6 tonnes de métal. Une dizaine de fentes avaient été ménagées dans l'ensemble pour permettre des mesures (on trouva ainsi que le facteur de multiplication atteint était de 1,007) et aussi le contrôle de la réaction. C'est ainsi que, bien avant d'atteindre la masse critique, on avait par prudence introduit des bandes de cadmium dans ces fentes. Une fois par jour, on les retirait avec précaution, en mesurant l'évolution du nombre des neutrons en activité dans la pile. On approcha ainsi lentement et sûrement de la masse critique. Pour le démarrage de la réaction, aucun dispositif spécial, tel qu'une source extérieure de neutrons, n'est nécessaire. Il y a toujours suffisamment de neutrons erratiques dans la masse, soit d'origine cosmique, soit qu'ils proviennent de l'explosion spontanée d'un atome d'uranium (de telles explosions se produisent toujours, bien qu'avec une probabilité relativement faible), soit, et ceux-là sont les plus nombreux, qu'ils soient émis par les impuretés de la masse sous l'effet de bombardement par les rayons alpha dus à la radioactivité de l'uranium. L'arrêt de la

réaction s'opérait à volonté en engageant dans les fentes de telles bandes de cadmium ou d'acier au bore, tous deux puissants absorbants de neutrons. Pendant le fonctionnement, toutes les bandes étaient extraites, sauf une qui était reliée à un dispositif de contrôle automatique consistant en deux moteurs électriques commandés par une chambre d'ionisation et un système amplificateur. Ainsi, lorsque l'intensité de la réaction venait à croître, la bande absorbante était poussée dans la pile et, inversement, était extraite lorsque l'intensité décroissait (1).

Le niveau énergétique de la pile fut maintenu au début à 0,5 W. Peu après, on augmenta ses dimensions et on atteignit 200 W, puissance qui ne fut pas dépassée de crainte que les radiations émises ne viennent affecter le personnel appelé à circuler dans le laboratoire, ou même dans son voisinage. Les calculs avaient montré que, pour obtenir 1 kg de plutonium par jour, il fallait atteindre une puissance de 500 000 à 1 500 000 kW. Avec 200 W seulement, cette pile aurait dû fonctionner 70 000 années pour donner assez de plutonium pour confectionner une seule bombe atomique.

Une pile à eau lourde, technique qui ne paraît pas avoir été suivie par la suite aux États-Unis, fut montée dans un laboratoire voisin de Chicago, à Argonne. Remarquable par ses faibles dimensions comparative-ment aux piles à graphite, elle fut terminée le 15 mai 1944. Là encore les calculs se sont révélés trop pessimistes, car le démarrage de la réaction s'effectua avec seulement les trois cinquièmes de l'eau lourde prévue. On dut retirer des blocs d'uranium pour diminuer l'activité de la pile. Cette pile développa 190 kW à partir du 4 juillet et 300 kW à partir du 8 août 1944.

(1) Le fonctionnement stable d'une pile met à profit l'existence de neutrons dits « retardés ». On a trouvé expérimentalement que des neutrons étaient émis par l'uranium 235 bombardé par neutrons quelques secondes après arrêt du bombardement. En fait, on a observé que ces émissions de neutrons « retardés » décroissent exponentiellement tout comme la radioactivité. Quatre « périodes neutroniques » ont été jusqu'ici mises en évidence. Elles s'échelonnent de la fraction de seconde à soixante secondes. Cette constatation porte sur un petit nombre de neutrons (près de 1 p. 100 des neutrons émis lors de la rupture). Le nombre de neutrons retardés qui peuvent être interceptés par des absorbants suffit donc à contrôler la pile sans avoir à faire intervenir des appareils automatiques dépourvus de toute inertie.

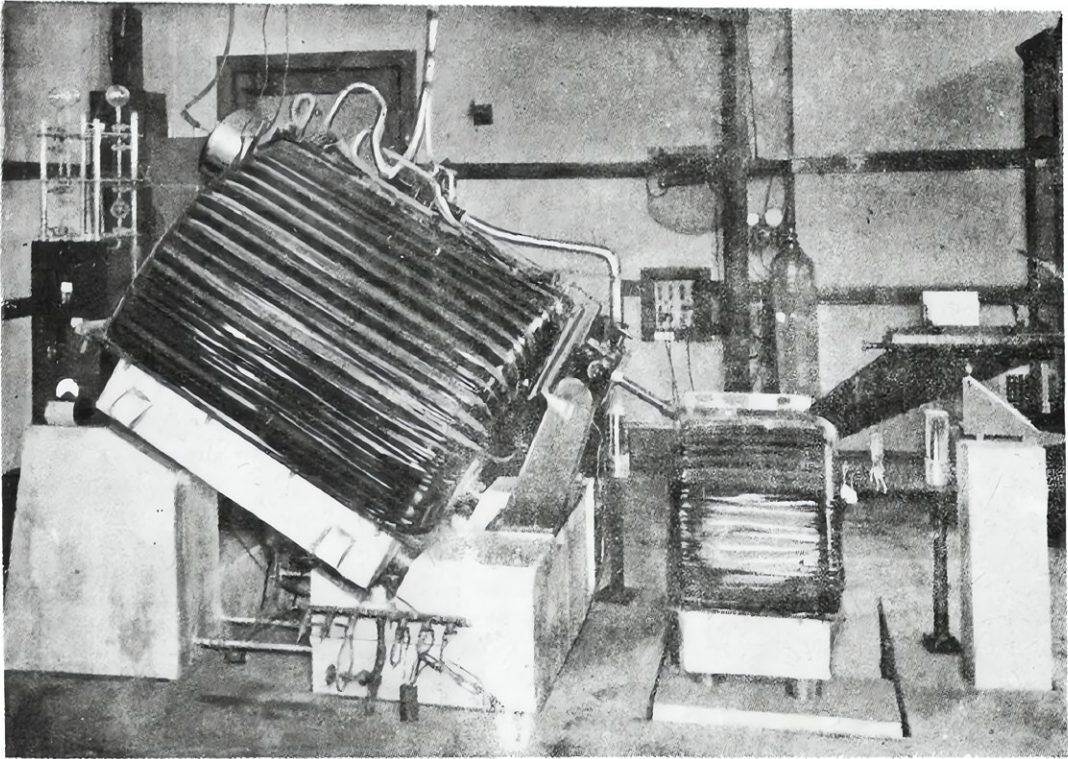


FIG. 121. — LE SPECTROGRAPHE DE MASSE CONSTRUIT PAR LA GENERAL ELECTRIC COMPANY POUR L'UNIVERSITÉ D'ILLINOIS

Les caractéristiques de fonctionnement sont un peu différentes de celles de la pile au graphite. Il lui faut plusieurs heures pour atteindre son équilibre. Elle accuse de petites variations survenues dans la puissance développée, dues sans doute à des bulles dans l'eau lourde. On ne peut l'arrêter complètement ni rapidement à cause de la propriété que possèdent les rayons gamma (émis par l'uranium) de provoquer la libération de neutrons supplémentaires en frappant l'eau lourde.

À la suite des essais de Chicago, une usine pilote pour la production du plutonium fut installée à Clinton et mise en marche le 4 novembre 1943. Elle était destinée à mettre au point tous les dispositifs auxiliaires. Dans un pareil empilement, par exemple, la libération de l'énergie provoque une élévation de la température qu'il faut combattre énergiquement. Cette précaution est indispensable à plusieurs points de vue dont le moins évident est celui du rendement. En effet, à mesure que la température s'élève, l'agitation thermique imprime aux neutrons des vitesses croissantes et ceux-ci

deviennent rapidement incapables de provoquer des ruptures de noyaux. Le choix d'un « refroidisseur » est délicat, car il ne doit pas absorber un nombre prohibitif de neutrons. On a peut-être employé dans ce but en Amérique du bismuth liquide ou un courant d'hélium comprimé. L'eau, à cause de son hydrogène, et l'air, à cause de l'azote, sont à éviter. Les canalisations d'amener du « refroidisseur » ne doivent pas être attaquées par lui et ne doivent pas absorber, elles non plus, trop de neutrons. Enfin, les blocs d'uranium doivent être enfermés dans des boîtes non « corrosives », étanches et vidées d'air, etc.

Au bout d'un certain temps de fonctionnement de la pile, les blocs d'uranium doivent en être enlevés en vue de l'extraction du plutonium. Il s'établit, en effet, dans la masse une sorte d'équilibre. Les atomes d'uranium 235 disparaissent progressivement. Les atomes de plutonium formés sont eux-mêmes frappés par des neutrons thermiques ou très rapides et se scindent avec des probabilités diverses, celle par neutrons thermiques étant de beaucoup la plus grande. Ces ruptures en-

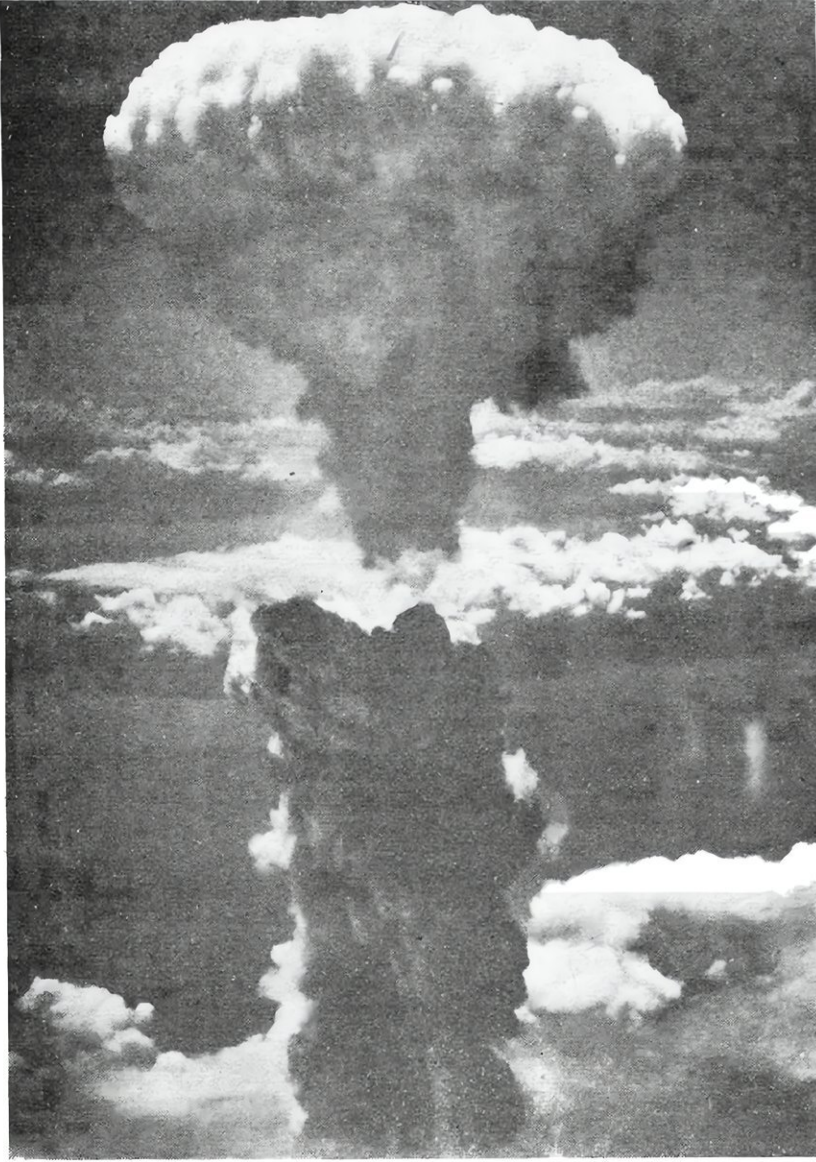


FIG. 122. — LA BOMBE ATOMIQUE LANCÉE SUR NAGASAKI VIENT DE FAIRE EXPLOSION

gendrent des neutrons et servent à maintenir la « chaîne » en compensant en quelque sorte la décroissance du nombre d'atomes d'uranium 235. Mais on doit envisager l'absorption de plus en plus grande des neutrons par suite de l'accumulation dans la pile des produits des ruptures, qui tend à diminuer le facteur de multiplication. Il faut donc à un certain moment extraire le plutonium des blocs d'uranium de la pile, récupérer les produits radioactifs des ruptures et réutiliser le restant du précieux uranium 235 dans

un nouveau cycle de « pile ». Les blocs d'uranium deviennent extrêmement radioactifs par suite de la présence dans leur masse des produits des ruptures qui s'y sont accumulés; on ne peut en approcher et ils doivent pouvoir être déchargés de la pile et manutentionnés à distance. Il semble utile, avant d'entreprendre l'extraction du plutonium, d'observer un certain délai, de l'ordre de quelques jours (repos des blocs d'uranium), afin que disparaissent ceux des résidus radioactifs qui ont la vie la plus courte et que l'évolution de l'uranium 239 en neptunium, puis plutonium, soit à peu près complète.

Le plutonium demeure pratiquement inchangé à cause de sa très longue « vie », plus d'un million d'années.

La pile pilote de Clinton consiste en un cube de graphite avec des conduits horizontaux où viennent se placer les blocs cylindriques d'uranium dans leur enveloppe d'aluminium. Ces cylindres peuvent être mis en place et évacués sans qu'il soit nécessaire d'interrompre l'activité de la pile. D'autres cavités permettent le passage des bandes absorbantes de contrôle. La simplicité de fonctionnement est très grande, les opérateurs n'ayant la plupart du temps qu'à lire les indications de divers instruments. Toutes les opérations se

font à distance derrière d'épais écrans.

Quelques jours après sa mise en marche, la pile atteignit 500 kW puissance qui fut portée peu après à 800 kW. La température à la surface des blocs d'uranium atteignait alors 150°. En juin 1944, après avoir modifié la distribution de l'uranium dans la masse, on passa à 1 800 kW, puis plus tard à un chiffre qui n'a pas été précisé.

Les blocs d'uranium sortant de la pile sont amenés — parfois sous l'eau — à l'usine d'extraction chimique du plutonium où ils sont immédiatement dissous dans un liquide approprié, le reste des manutentions s'effectuant à l'aide de pompes. Les chambres de réaction sont protégées par d'épais murs de ciment et enterrées aux deux tiers dans le sol. Le procédé de séparation du plutonium met à profit le fait qu'il s'agit d'un élément différent chimiquement de l'uranium et que ses propriétés rapprochent de l'osmium. Il porte à Clinton sur plusieurs centaines de kilogrammes par jour de matière « première », si on peut donner ce nom au métal qui sort de la pile, et à Hanford sur plusieurs tonnes, alors qu'il a été mis au point à l'aide d'essais de laboratoires partant sur quelques microgrammes.

Les premiers blocs entrèrent à l'usine le 20 décembre 1943 et, en mars 1944, plusieurs grammes de plutonium avaient été isolés. Le taux d'extraction du plutonium ne dépassait pas 50 % au début. Des perfectionnements techniques permirent d'atteindre 90 % en juin 1944.

Mais l'usine principale pour la fabrication du plutonium est installée à Hanford, au nord de Pasco, au centre de l'État de Washington. On a dit que le camp des travailleurs rassembla jusqu'à 60 000 personnes lorsque les travaux de construction de l'usine traversèrent leur phase de plus grande activité. Ce camp est maintenant désert et un petit nombre de techniciens suffit à faire fonctionner l'usine. La première pile industrielle fut mise en service en septembre 1944.

Le ministère de la Guerre américain laisse entendre qu'il existe à Hanford trois piles industrielles à grande production sur les cinq qui étaient prévues. Elles sont très espacées, à plusieurs kilomètres les unes des autres, et très éloignées aussi de l'usine de séparation du plutonium.

Précautions nécessaires

Nous dirons ici un mot, d'après le rapport du P^r H.-D. Smyth, des précautions sanitaires prises pour mettre le personnel à l'abri de tout danger au cours de ces fabrications. Elles étaient d'ailleurs généralisées et appliquées aussi bien dans les usines d'isolement de l'uranium 235 et les laboratoires que dans les centres de production du plutonium.

Uranium et plutonium sont, en effet, des éléments toxiques. Ils émettent des rayons alpha et ils ont des périodes très longues, ce qui constitue le plus grand danger pour un organisme qui en absorbe une quantité infinitésimale. Mais c'est surtout l'abondance des rayonnements de toute nature émis par les corps entrant en réaction, qui exigeaient que de minutieuses consignes fussent sévèrement appliquées.

Périodiquement, tout le personnel doit se soumettre à la prise de sang en vue de la numération sanguine. Ainsi peut être mise en évidence une exposition dangereuse aux radiations.

Des « compteurs » de poche ont été réalisés afin de chiffrer les risques courus dans les différents postes. Le premier est un simple électroscope de la dimension d'un stylographe. On le charge au début de la journée et on lit sa décharge à la sortie. On en déduit la quantité totale de radiation ionisante qui a agi sur l'individu qui l'a porté dans le cours de la journée.

Un autre procédé consiste à fixer à la plaque d'identité du travailleur des fragments de film photographique développés périodiquement et dont le degré de noircissement est mesuré avec soin.

Il semble, d'après les rapports, que ce soient là des vérifications superflues, car la protection due aux écrans de ciment et autres est suffisante et sûre, ainsi que le prouvent les nombreux appareils de contrôle tant fixes que mobiles qui détecteraient immédiatement toute ionisation suspecte.

En outre, de nombreux instruments spéciaux permettent de mesurer la concentration des poussières radioactives dans l'air, la contamination des tables de laboratoire, celle des vêtements du personnel, etc. A la porte de certains laboratoires, des compteurs cachés donnent un signal d'alarme lorsqu'une personne la

franchit dont les vêtements, la peau ou les cheveux sont contaminés par les produits radioactifs.

La séparation des isotopes

La fabrication du plutonium, dont nous venons d'esquisser les grandes lignes, apparaît, dans l'état actuel de la technique, comme une tâche gigantesque. La séparation de l'uranium 235 du mélange d'isotopes fourni par la nature peut-elle conduire à des installations plus simples et plus économiques ? Elle offre, malheureusement, elle aussi, des difficultés énormes. Ces difficultés sont dues au fait que les atomes d'uranium 235 et d'uranium 238 ont des *propriétés chimiques* pratiquement identiques et que l'on ne pourra, pour les séparer, faire appel théoriquement qu'à celles de leurs propriétés qui résultent de leur *masse*.

C'est Washburn, aux États-Unis, qui le premier a mis en œuvre une méthode de séparation des isotopes stables, et les isotopes de l'uranium peuvent être considérés comme naturellement stables, puisque les périodes de leur radioactivité naturelle sont de l'ordre de plusieurs milliards d'années. Il arriva à séparer par électrolyse les deux isotopes de l'hydrogène.

L'eau ordinaire contient une infime quantité de molécules où l'hydrogène de masse 2 (ou deutérium) remplace l'hydrogène de masse 1. Lorsqu'on électrolyse de l'eau, les molécules à hydrogène léger sont dissociées en hydrogène et oxygène à une cadence beaucoup plus grande que celles qui contiennent de l'hydrogène lourd, de telle sorte qu'un bac d'électrolyse s'enrichit continuellement en eau lourde. On arrive ainsi à obtenir de l'eau lourde, ou oxyde de deutérium, à plus de 99 p. 100. Son prix dépasse le million de francs le litre. Avant la guerre, toute la production mondiale d'hydrogène lourd était fondée sur cette méthode, et la plus grande partie était fournie par la Norvège.

D'autres procédés ont été proposés et appliqués, depuis, aux États-Unis : ce sont, d'une part, la distillation fractionnée mettant à profit la faible différence (1,4° C) dans la température d'ébullition de l'eau légère et de l'eau lourde, d'autre part, l'échange catalytique entre gaz hydrogène et eau, en phase vapeur, la concentration du deutérium devenant,

en présence de catalyseurs convenables, trois fois plus grande dans l'eau que dans le gaz. Nous ne pouvons nous étendre ici sur cette méthode, d'ailleurs inapplicable à la séparation des isotopes de l'uranium, car l'effet de séparation décroît avec le poids moléculaire.

La différence de masses des atomes 238 et 239 suggère de les séparer par centrifugation. C'est ainsi qu'aux États-Unis H. C. Urey a proposé l'emploi de grands centrifugeurs cylindriques dans lesquels un jet de gaz suivrait un mouvement ascendant au centre et descendant à la périphérie. Entre les deux courants, il s'effectue une constante diffusion des particules, mais la force centrifuge radiale agit de préférence sur les molécules lourdes dont la concentration augmente ainsi à la périphérie. On a calculé que, pour produire 1 kg d'uranium 235 par jour, il aurait fallu 22 000 ultracentrifugeuses de 1 m de long.

La diffusion

Deux autres méthodes de séparation des isotopes lourds, qui furent, selon toute vraisemblance, mises en œuvre toutes deux aux États-Unis pour la fabrication des bombes, font appel à la diffusion : diffusion thermique et diffusion à travers une matière poreuse.

La méthode de diffusion thermique repose sur le fait, prévisible en application de la théorie cinétique des gaz, que, si on maintient dans un mélange une différence de température, un type de molécules aura tendance à se concentrer dans la région froide et l'autre dans la région chaude. Ainsi, en 1938, Clusius et Dickel employèrent un tube vertical contenant un fil chauffé tendu suivant l'axe et porté à 600°. Les isotopes lourds des éléments à séparer se concentraient près de la périphérie froide du tube. De multiples passages sont nécessaires pour obtenir un haut degré d'enrichissement.

La méthode de diffusion à travers une paroi poreuse repose sur une expérience ancienne de Lord Rayleigh qui a montré, en 1896, qu'un mélange de deux gaz de différents poids atomiques pouvait être partiellement séparé en ses constituants en lui permettant de diffuser à travers une paroi poreuse. On sait, en effet, que les molécules d'un gaz (ou d'un liquide) sont en mouvement continu et que leur *énergie cinétique* ne dépend que de la température et non

des propriétés des molécules. Elle ne dépend pas en particulier du poids, de sorte que plus la molécule est légère et plus sa *vitesse* moyenne est grande. A cause de cette grande vitesse, les molécules d'un gaz léger passent plus facilement à travers les pores d'une paroi que les molécules lourdes. Les vitesses de diffusion des deux gaz sont inversement proportionnelles aux racines carrées des poids moléculaires.

Les méthodes de diffusion exigent que l'on opère sur des gaz. Or le seul composé gazeux connu en 1940 (on en a peut-être découvert d'autres depuis) était l'hexafluorure d'uranium. Les hexafluorures obtenus avec les deux isotopes à séparer ont respectivement pour poids moléculaires 349 et 352, écart très faible et qui exige plusieurs centaines de passages pour arriver à une concentration acceptable.

Il faut noter également que, lorsque nous avons parlé de différences de vitesse entre les molécules, il s'agissait de *vitesses moyennes*. En réalité, il y a un chevauchement considérable dans la répartition des vitesses. Dans le cas de l'hexafluorure d'uranium, plus de 49 p. 100 des molécules légères ont des vitesses aussi faibles que 50 p. 100 des molécules lourdes. A la pression atmosphérique, le libre parcours moyen d'une molécule est de l'ordre du dix-millième de millimètre. Pour obtenir une bonne diffusion, le diamètre des trous de

la paroi poreuse doit être de moins du dixième de ce libre parcours, donc de moins d'un centième de micron. Ces milliards de trous ne doivent pas s'élargir, ni se boucher, et la paroi doit pouvoir supporter une différence de pression de une atmosphère. Il semble que l'on ait opéré, au moins au début, avec des parois poreuses constituée par des feuilles d'alliages zinc-argent attaquées par de l'acide chlorhydrique. Des milliers de pompes absolument étanches sont nécessaires pour assurer la circulation de ces gaz qui, il ne faut pas l'oublier, sont à la fois toxiques et corrosifs.

Les spectrographes de masse

Enfin, une autre méthode d'isolement des isotopes fait appel aux spectrographes de masse (1). La presse a annoncé que Bainbridge, professeur de physique à l'Université Harvard, était aux leviers de commande lors du premier essai de la bombe atomique, le 16 juillet 1945, au Nouveau-Mexique. Or ce physicien est un grand spécialiste des spectrographes de masse, et il est permis de penser que ces appareils ont joué un rôle non négligeable

(1) D'autres méthodes électromagnétiques ont été proposées et expérimentées. Telle est celle du *centrifugeur ionique*, dérivé du magnétron et celle de l'*isotron* (nom sans signification particulière). Ce dernier appareil, suggéré par R.-R. Wilson, utilise une source d'ions très intense. Ces ions sont d'abord accélérés dans un tube rectiligne par un champ

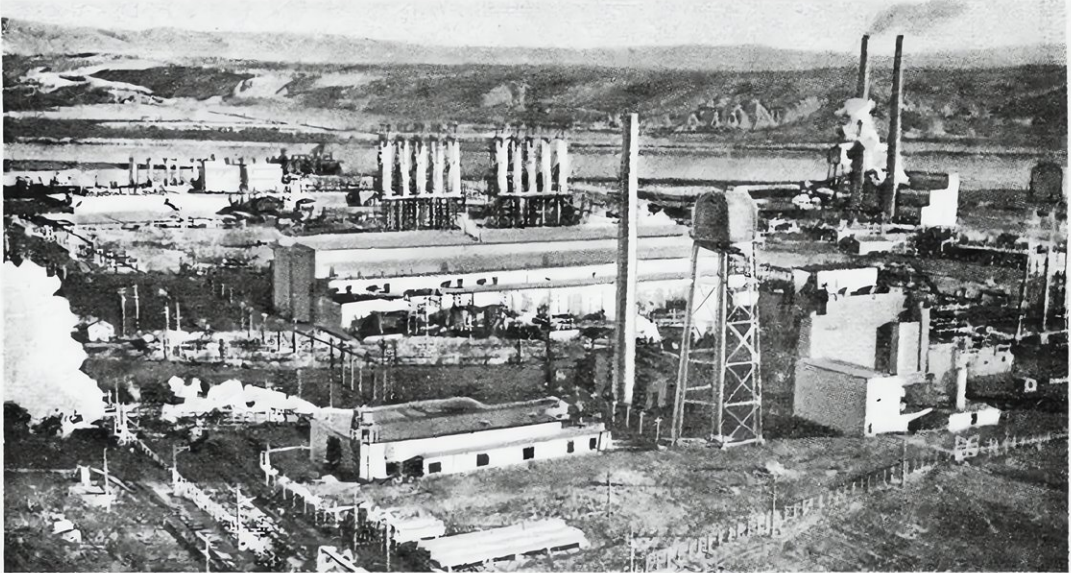


FIG. 123. — L'USINE HANFORD, A RICHLAND, PRÈS DE PASCO, DANS L'ÉTAT DE WASHINGTON, AU CENTRE D'UNE ZONE ISOLÉE COUVRANT 2 000 KM²

dans la purification de l'uranium 235.

Dans un spectrographe de masse, comme celui schématisé sur la figure 119, on volatilise le produit dans une petite chambre à arc. Les molécules sont ensuite ionisées et entraînées vers un canalisateur. A la sortie de celui-ci, on trouve deux électrodes portées à des potentiels convenables qui accélèrent et dévient les ions vers une région où règne un fort champ magnétique. L'action de ce champ sur les ions dépend de leur masse. On dispose donc théoriquement ainsi d'un séparateur de masse. Chaque catégorie d'atome présente dans le faisceau accéléré et dévié ira frapper l'écran opposé en un point différent et s'y accumulera à la longue. Mais les quantités ainsi isolées par un seul appareil du type laboratoire sont infimes. Comme nous l'avons dit plus haut, A. O. Nier a séparé des isotopes de l'uranium avec un spectrographe de masse, en utilisant de la vapeur de brome d'uranium, mais avec un rendement très faible, 1 millionième de gramme en seize heures. Il faut disposer de nombreux appareils de type industriel pour arriver à des résultats pratiques admissibles. L'isolement en quantités importantes de l'uranium 235 est une tâche gigantesque. Les électroaimants des cyclotrons existants, utilisés chacun avec plusieurs sources ioniques simultanées, rendirent le problème un peu moins scabreux et l'utilisation de composés de l'uranium, tenus encore secrets, déjà enrichis en uranium 235 dans plusieurs stages préliminaires (thermiques et autres), permirent à ces spectrographes de masse de faire du bon travail.

Fin décembre 1941, le professeur Lawrence pouvait faire déposer 1 microgramme d'uranium 235 par heure avec un *calutron* (nom dérivé de *California University Cyclotron*).

électrique constant puis par un champ faible variable à haute fréquence. Le premier communique aux ions une énergie cinétique uniforme, donc des vitesses inversement proportionnelles à la racine carrée de leur masse. Le second produit des variations périodiques de la vitesse de ces ions, d'où des accumulations de ces ions en « paquets » (comme dans la modulation en vitesse dans les « klystrons »). Ces paquets se propagent avec des vitesses différentes, se séparent les uns des autres, et il suffit d'appliquer un troisième champ déflecteur synchronisé avec le deuxième pour que seuls les atomes de l'uranium 235 poursuivent leur chemin, tandis que ceux d'uranium 238 sont déviés. Un isotron expérimental a été mis en opération en janvier 1942 par H. D. Smyth de l'Université de Princeton.

Les spectrographes de masse usuels ont un rendement très faible dû : à la difficulté de produire des ions, à la fraction minime de ces ions effectivement utilisés et à des effets de charge spatiale. A Berkeley, on a pu mettre en service six *calutrons*, y compris celui utilisant le gros électroaimant de 5 m de diamètre qui était destiné au cyclotron géant inachevé. Pour donner une idée des perfectionnements apportés à cette technique, disons qu'à Berkeley on a utilisé 71 différentes sources ioniques et 115 différents types de collecteurs. Alors qu'un *calutron* utilisant de l'uranium à teneurs isotopiques normales produit 1 g par jour d'uranium 235 à 40 p. 100, il peut atteindre 2 g par jour d'uranium 235 à 80 p. 100 si la concentration de l'uranium 235 initial est le double de la concentration naturelle. Il y a donc intérêt à grouper deux ou plusieurs méthodes de séparation. L'essentiel aussi est de disposer d'un personnel scientifique et technique important. Il faut surtout être en liaison constante et rapide avec de nombreuses industries.

La bombe atomique

Dans la construction d'une « pile », on s'efforce de modérer les réactions en chaîne, par l'emploi de masses absorbantes, de ralentisseurs de neutrons, etc. Dans le cas d'une bombe, le problème se pose différemment. Il s'agit de libérer dans le minimum de temps une quantité d'énergie aussi grande que possible. Ceci élimine l'emploi de neutrons thermiques, qui sont relativement lents. On se contentera des probabilités plus modestes de ruptures nucléaires offertes par les neutrons rapides. Cette solution entraîne une diminution du poids de la bombe par la suppression des « modérateurs », et d'ailleurs il ne saurait être question d'assembler une « pile » au-dessus du territoire ennemi, ni de la transporter par avion. On opérera donc avec de l'uranium 235 ou du plutonium presque pur.

Dans ces conditions, lorsqu'on a réuni une masse suffisante correspondant à la valeur critique, la chaîne explosive s'établit avec une telle rapidité que la masse se dilate et explose avec une violence inouïe avant que tous les noyaux présents aient pu participer à la réaction. On admet que 10 p. 100 seulement de l'énergie totale est libérée explosivement, et on peut calculer que, dans ces conditions, 1 kg d'ura-

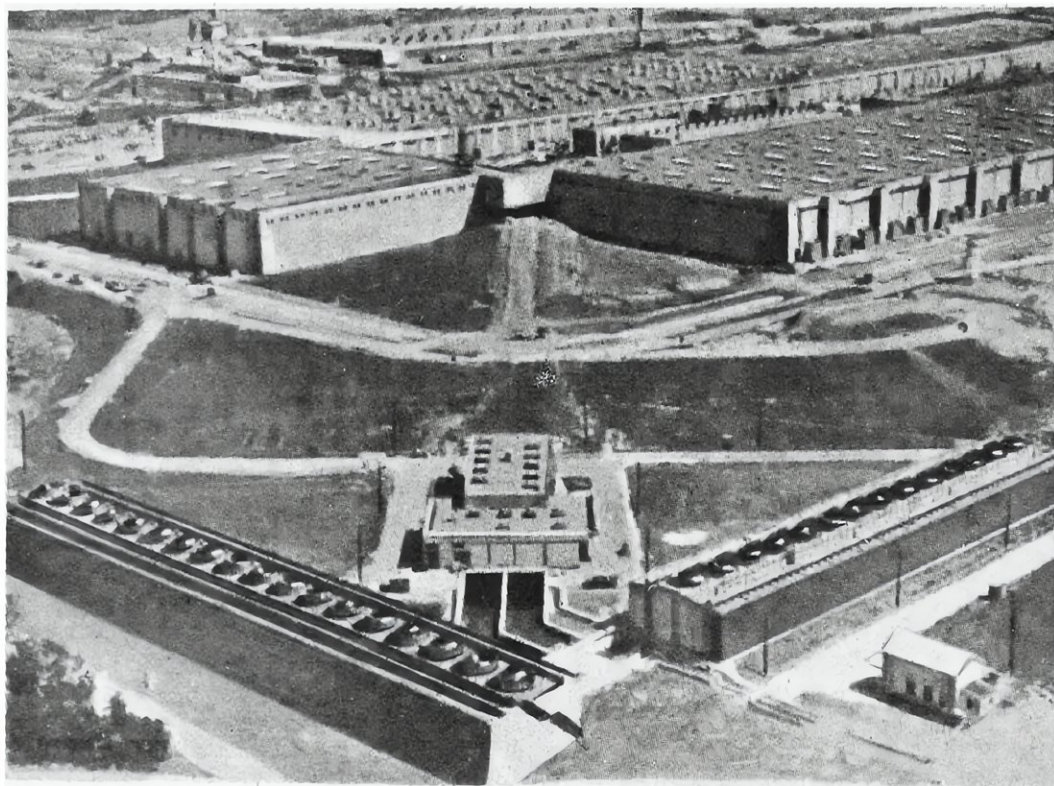


FIG. 124. — LES USINES CLINTON, A OAK RIDGE, PRÈS DE KNOXVILLE, DANS L'ÉTAT DE TENNESSEE, ISOLÉES DANS UNE ZONE INTERDITE DE 240 KM²

mium 235 ou de plutonium équivaut à 2 000 t de trinitoluène.

Si l'on entoure la bombe d'une enveloppe réfléchissante pour les neutrons, comme nous l'avons vu plus haut, la valeur de la masse critique se trouve diminuée, et de plus cette enveloppe agira par son inertie, s'opposant à une trop rapide dilatation de la masse et augmentant ainsi le nombre de noyaux désintégrés dans l'explosion, donc le rendement. La violence accrue de la déflagration assurera la fragmentation complète de la masse non désintégrée, diminuant les chances de fournir à l'ennemi des tronçons précieux du nouvel explosif encore intact.

Comment peut-on concevoir une telle bombe ? Puisque l'explosif utilisé est pratiquement pur et que, étant radioactif, il émet spontanément des rayons alpha, il s'ensuit qu'une source de tels rayons n'est pas nécessaire pour donner les quelques neutrons qui amorceront la chaîne explosive. Il y a, en effet, assez d'impuretés dans un mélange pareil pour que l'action des rayons alpha y provoque l'émission de quelques neutrons. Ceux-ci a-

joutent d'ailleurs aux neutrons cosmiques et suffisent à déclencher la catastrophe.

Comment donc réaliser la bombe ? Deux solutions, au moins, apparaissent possibles : 1° amener brusquement en présence deux ou plusieurs tronçons d'uranium 235 ou de plutonium de façon à constituer instantanément une masse proche de la masse critique ; 2° entourer deux ou plusieurs tronçons en « cartouches » de cet explosif avec du cadmium et surprimer brusquement ces écrans absorbant les neutrons.

De telles dispositions sont possibles et les trois expériences aussi dramatiques que réussies le prouvent. La première de ces tentatives a eu lieu, comme nous l'avons dit à l'aube du 16 juillet 1945 à Alamogordo, sur un petit plateau du « désert mexicain ». Le laboratoire de mise au point était lui-même situé à Los Alamos, à 30 km de Santa Fé. Il groupait sur une superficie très restreinte une pléiade de savants de tout premier plan et une richesse de matériel incroyable. Le rendement de ce centre dirigé par J.-R. Oppenheimer, de l'Université de Californie,

était tel qu'un cyclotron y fut installé et fonctionna trois mois après la pose du premier tronçon de l'électroaimant (1).

On sait qu'à Alamogordo l'engin fut installé au sommet d'une tour d'acier et que les observateurs les plus proches se placèrent dans un abri à 10 km du lieu de l'explosion, amorcée d'abord par le P^r K.-T. Bainbridge, du Massachusetts Institute of Technology, et par un « robot » quelques secondes avant l'instant choisi. Les témoins oculaires rapportèrent que la lueur de l'explosion éclaira comme en plein jour les montagnes à 15 km de là, que le souffle renversa les personnes qui n'avaient pas pris la précaution de se coucher sur le sol à 16 km du lieu de l'explosion. Un nuage multicolore s'éleva à 12 km de hauteur où il fut dispersé lentement par les vents stratosphériques. Ces observations sont à rapprocher de celles qui furent faites à Hiroshima et à Nagasaki et qui furent rapportées par toute la presse (voir fig. 122 et 125).

La tour d'acier s'était volatilisée et à sa place s'était creusé un petit cratère. L'emplacement fut examiné par les savants présents, dont le professeur Fermi, amenés par des chars spécialement équipés.

La description des événements qui précédèrent l'explosion, l'attente anxieuse des résultats de l'expérience qui avait coûté 2 milliards de dollars et tant d'efforts, l'explosion enfin et la scène apocalyptique, puis la détente, la satisfaction et l'enthousiasme des chercheurs, des techniciens et des experts militaires qui avaient assisté à cette scène historique, rempliraient un volume d'une prose à peine capable de faire saisir au lecteur la grandeur du moment et le monde de promesses qui s'ouvrait pour le nouvel Age Atomique.

Température atteinte par la bombe atomique

Si nous assimilons la bombe atomique à ce que les physiciens appellent un « corps noir », fournissant les meilleures conditions d'émission de rayonnement, et si nous lui supposons un diamètre de 40 cm, soit une surface de près de

5 000 cm², et si enfin nous la chargeons avec 2 350 g d'uranium 235, elle dégagera, par rupture du dixième de ses noyaux, 10¹⁶ ergs par centimètre carré.

La loi de Stefan nous donne une température proportionnelle à la racine quatrième de l'énergie émise. On trouve ainsi une température de l'ordre de 100 000°. Par comparaison citons le soleil, dont la surface est à 6 000° et qui émet constamment 7,5.10⁹ ergs par centimètre carré (1).

On comprend, à la lumière de ces chiffres, la volatilisation de la tour qui supportait la première bombe atomique lors de l'essai du Nouveau-Mexique. On comprend aussi le nombre si élevé de victimes, plus de 100 000 à Hiroshima, le 6 août 1945 (deuxième bombe).

Un certain nombre de ces victimes auraient été faites, comme l'ont prétendu certains, par les produits radioactifs des ruptures de noyaux qui se seraient répandus sur la terre.

La chose mérite d'être étudiée de près, car, si on peut considérer comme légitime l'emploi de la bombe atomique comme arme de guerre, l'uranium 235 et le plutonium n'étant après tout que des explosifs plus puissants que ceux utilisés jusqu'ici, l'accord est actuellement unanime sur l'illicéité de l'emploi des gaz asphyxiants. Or l'effet sur l'organisme humain des radiations émises par les produits de la rupture et leurs descendants radioactifs peut être rapproché de celui de ces gaz. Après le bombardement « atomique » de Hiroshima, le War Department américain a souligné que l'explosion avait eu lieu à une hauteur telle que l'effet de souffle sur les constructions fut maximum, tandis que les produits radioactifs furent disséminés en un nuage de fines poussières. Celles-ci furent entraînées par la colonne ascendante d'air chaud et réparties sur une telle surface qu'elles ne pouvaient plus causer le moindre dommage. On a pu constater, lors de l'explosion du Nouveau-Mexique, bien que la hauteur de l'explosion fût faible, qu'une très petite fraction des produits radioactifs fut retrouvée dans le voisinage immédiat. Des chiffres résultant de mesures précises confirmeraient utilement ces communiqués officiels.

(1) La complexité de la technique du cyclotron n'a pu être exposée que très sommairement dans cet ouvrage. Pour en bien connaître la technique et les applications, le lecteur peut se référer à notre livre sur le cyclotron, qui a été édité par la *Revue d'optique*, 165, rue de Sèvres, Paris (1945).

(1) La loi de Stefan ne s'applique probablement pas à la bombe atomique. Des relations plus compliquées donnent des températures supérieures au million de degrés.



FIG. 125. — LE QUARTIER DE NAGASAKI TOUCHÉ PAR LA BOMBE ATOMIQUE NE MONTRE PLUS QUE DES RUINES
Les baraques, au premier plan, ont été construites après l'explosion.

Dans un avenir plus ou moins lointain, lorsque des kilogrammes d'uranium 235, seront scindés dans des usines thermiques, il restera des kilogrammes de radioéléments artificiels. Il sera alors extrêmement intéressant de les isoler en vue de leurs applications biologiques, médicales et industrielles.

Énergie atomique et énergie nucléaire

Nous avons eu tort, dans tout cet exposé, de suivre l'exemple général et d'employer l'expression « énergie atomique ». C'est « énergie nucléaire » que nous aurions dû dire. C'est ainsi que des vulgarisateurs de mauvais aloi ont cru bon de signaler qu'il existe déjà des brevets sur la propulsion des automobiles par l'utilisation de l'énergie atomique. Ceci est exact *littéralement*, car il s'agit de la maigre énergie de l'hydrogène atomique, et non de l'énergie contenue dans le noyau d'hydrogène.

L'énergie mise en liberté lors de chaque rupture de noyau d'uranium est de l'ordre de 200 millions d'électrons-volts, c'est-à-dire de $3,2 \cdot 10^{-13}$ joules. On a donc pour la rupture complète de tous les atomes (10^{24}) d'une molécule-gramme (235 g), un dégagement d'énergie évalué à 2×10^{13} joules, soit 6 000 000 kWh, c'est-à-dire de quoi porter à l'ébullition presque ins-

stantanée 50 millions de litres d'eau.

Si toute la masse du noyau de l'uranium disparaissait, en d'autres termes s'il de plutonium 239 ou d'autres éléments, n'y avait pas d'éléments chimiques plus légers issus de la rupture, on obtiendrait une libération d'énergie beaucoup plus considérable. L'annihilation totale en énergie rayonnante d'un noyau de masse 1 libère près d'un milliard d'électrons-volts, et celle d'un noyau d'uranium 235 serait donc 235 fois plus grande, soit près de 250 milliards d'électrons-volts au lieu de 200 millions lors de la simple rupture.

La Ville de Paris consomme journellement 2 500 000 kWh et toute la France annuellement 20 000 000 000 kWh. Cette énergie pourrait être extraite de la rupture de près de 750 kg d'uranium 235. Il faudrait pour cela partir d'une masse approximative de 150 t de minéral d'oxyde d'uranium et séparer d'abord l'isotope 235, ce qui représente une grosse dépense. Les prix du kilowatt-heure thermique ou hydraulique étant très voisins et très inférieurs à celui du kilowatt-heure livré au consommateur, l'on arrive à la conclusion que ce n'est pas la matière première, charbon ou eau, qui règle ce prix, mais plutôt la main-d'œuvre, la rémunération du capital investi, etc. Il s'ensuit que le seul remplacement du combustible ou de l'eau par un processus

de rupture ne changera pas grand'chose aux factures d'électricité (1).

Cette solution ne paraît à envisager que sion met au point des turbines à réaction utilisant les ruptures atomiques et dont l'installation et l'entretien concurrenceraient avantagusement les turbines actuelles.

Dans certains cas où le côté financier n'entre pas en ligne de compte, comme par exemple dans celui des avions à réaction, dont l'autonomie de vol est actuellement limitée par l'énormité du volume de combustible, l'énergie atomique, sous sa forme compacte, présente des avantages considérables sur toute autre source d'énergie. Il reste à la mettre à notre portée. Par ailleurs, le problème serait résolu si on trouvait un élément « fissionable », c'est-à-dire capable de se fragmenter comme l'uranium, mais abondant et bon marché.

La défense contre la bombe atomique

On a prétendu, un mois à peine après le bombardement de Hiroshima que la défense contre la bombe atomique pouvait être envisagée comme très possible déjà actuellement. Sur quoi se basent ces reconfortantes perspectives et que valent-elles ?

Tout d'abord, comme il fallait s'y attendre, le « radar » arme merveilleuse, devait et pouvait nous délivrer de cette angoissante vision de la guerre de demain. La solution du problème ne consiste-t-elle

(1) L'énergie fournie par les « piles » est d'ailleurs de mauvaise qualité, la température ne devant guère s'élever, au sein de la masse en réaction, au-dessus de 150 à 200° C.

pas à éviter à tout prix le survol du territoire par des avions ennemis ? Il suffirait donc de multiplier le nombre de stations de radar et d'avions de chasse avec ou sans radar, pour rendre inviolable l'espace « vital » aérien. Cette défense s'écroule devant les V-2. Un tel engin lancé presque dans la stratosphère, tombant sur une agglomération avec une vitesse de quelque 1 000 km à l'heure et muni d'une bombe atomique met toutes les défenses en défaut et son rayon d'action compense amplement l'imprécision du tir.

Il reste comme moyens de protection, les villes souterraines, les abris individuels, pratiquement dérisoires pour soutenir une lutte. Il y a enfin et surtout la mort définitive de la guerre, relèvement général du standard de vie, et une meilleure compréhension universelle.

Le « secret » de la bombe atomique, ou plutôt ses innombrables « secrets » de fabrication ne pourront être gardés longtemps. La France, la Grande-Bretagne, pourront, dans un délai raisonnable, fabriquer des bombes; bientôt l'U. R. S. S., avec tous les « secrets » qu'elle a pu glaner dans l'île de Bornholm où les Allemands avaient pu concentrer une grande partie de leurs recherches, sera en mesure d'en faire autant. Ne vient-on pas de décider la création d'Atomograd, ville de 400 000 habitants, où Kapitza, le grand physicien russe, sera le maître, au sein même des riches régions industrialisées de l'Oural, et où un plan atomique quinquennal vient d'être inauguré ?

A cette nouvelle course aux armements scientifiques, un seul remède : la fin des guerres par la terreur totale.

Offrez à vos amis, à vos enfants un ABONNEMENT à « SCIENCE ET VIE »

Un an : 200 fr. — Étranger : 350 fr.
5, rue de La Baume, Paris (VIII^e). — Compte de chèques postaux : 91-07 Paris.

Science et Vie, magazine mensuel des sciences et de leurs applications à la vie moderne. Rédaction, Administration : 5, rue de La Baume, Paris (VIII^e). Publicité : 24, rue Chauchat, Paris (IX^e). Chèque postal : 91-07 Paris.

Tous droits de reproduction, de traduction et d'adaptation réservés pour tous pays. Copyright by « Science et Vie », décembre mil neuf cent quarante-cinq. Registre du Commerce : Toulouse 3235 B.

ETABLISSEMENTS

S^T CHAMOND-GRANAT

12, Rue de La Rochefoucauld
PARIS (9^e) - Tél. : TRInité 81.50

TRANSMETTEURS D'ORDRES SIGNALISATION

Marine - Mines - Centrales - Chemins de fer - Usines métallurgiques.

TÉLÉCOMMANDES

Télécommandes synchrones d'appareils de toute puissance.

Télécommandes électriques asservies.

CONTROLE et RÉGULATION

Équipements de contrôle et de régulation automatique des centrales hydro-électriques.

Enregistrement du niveau des plans d'eau des retenues.

Télécommandes de vannes.

Réglage de l'admission des turbines.

Réglage automatique de la chauffe des centrales thermiques.

LES PROCÉDÉS OZONAIR

SPÉCIALISTES DES PROBLÈMES DE LA TECHNIQUE MODERNE

CONDITIONNEMENT D'AIR

OZONISATION

GÉNÉRATEURS
D'OZONE

DOMESTIQUES
INDUSTRIELS
MÉDICAUX

ASSAINISSEMENT
DE L'AIR ET
TOUS TRAITEMENTS

VENTILATION

RÉFRIGÉRATION



CHAMBRES A TEMPÉRATURE
CONSTANTE

AU 1/10^e DE DEGRÉ



CHAMBRES TOUS CLIMATS
POUR ESSAIS

FILTRAGE

FILTRES A AIR

" VENTEX "

à fixation des poussières
par pellicule d'huile



DÉPOUSSIÉRAGE
PAR LAVEURS
(sable, gaz, fumées)

LES PLUS HAUTES RÉFÉRENCES

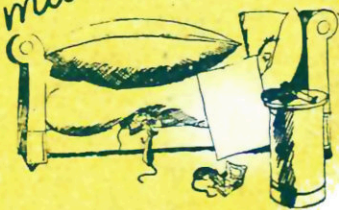
63, rue de Lancry, PARIS (X^e) - Botzaris 24.10 & 24.11

MORT A L'ÉPARGNE "morte!"

la bonne cachette



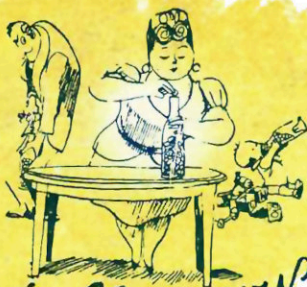
le matelas de billets



le bas de laine



la bouteille à sous



le coffre fort



MAIS POUR UNE "ÉPARGNE VIVANTE"
Souscrivez des
BONS DE LA LIBÉRATION
à intérêt progressif