

De la découverte du noyau à la DWBA,
une (brève) histoire des réactions nucléaires,
et des instruments qui ont permis leur étude

Bernard Fernandez

École Joliot-Curie, Maubuisson, septembre 2007

SOMMAIRE

1	Introduction	3
2	La première diffusion élastique d'une particule α	3
2.1	Les premiers instruments de la radioactivité	3
2.2	L'existence du noyau	5
3	Les premières réactions nucléaires	7
3.1	Rutherford observe une réaction nucléaire	7
3.2	D'autres réactions nucléaires	8
3.3	Une polémique entre le <i>Cavendish</i> et l' <i>Institut für Radiumfor-</i> <i>schung</i> de Vienne	9
4	Les nouveaux moyens de détection	10
4.1	Le compteur à pointe de Geiger	10
4.2	Le compteur Geiger-Müller	11
4.3	La chambre à ionisation à amplification électronique	12
5	Une identification difficile : la découverte du neutron	13
6	Les premières réactions nucléaires provoquées par un faisceau de particules accélérées	13
7	La découverte de la radioactivité artificielle et la physique des neutrons	14
7.1	Le congrès Solvay de 1933	14
7.2	La radioactivité artificielle	14
8	Enrico Fermi : la physique des neutrons lents, les résonances	14
8.1	Le début de la physique des neutrons à Rome	14
8.2	Les nouveaux détecteurs de neutrons	15
8.3	Les neutrons lents	16
8.4	La découverte des résonances d'absorption des neutrons lents . . .	16
9	La théorie du noyau composé, première théorie des réactions nucléaires	17
9.1	Niels Bohr	17
9.2	Breit et Wigner	18

10	Après la seconde guerre mondiale, le développement des accélérateurs et de l'instrumentation	19
10.1	Les accélérateurs	19
10.2	Les détecteurs et l'instrumentation	19
11	Diffusion élastique et modèle optique	20
12	Tentatives « optiques »	20
13	Le potentiel optique de Woods et Saxon	21
14	L'ordinateur, instrument décisif	22
15	Les premières réactions directes	23
15.1	À Berkeley, le <i>stripping</i> du deuton, ou comment « déshabiller » le deuton	24
15.2	Birmingham : les distributions angulaires, Stuart Butler	24
15.3	Succès et développement de la théorie de Butler	25
15.4	DWBA et ordinateur, une union indissoluble	27
16	Après les années cinquante	28

1 INTRODUCTION

L'observation et l'interprétation des réactions nucléaires se confond avec la physique nucléaire elle-même. La naissance et le développement des instruments de détection et d'analyse font donc partie intégrante de cette histoire. Nous présentons ici une brève revue des principales réactions qui ont marqué l'évolution de la physique nucléaire, tant du point de vue de l'observation expérimentale que de l'interprétation physique.

2 LA PREMIÈRE DIFFUSION ÉLASTIQUE D'UNE PARTICULE α

2.1 Les premiers instruments de la radioactivité

Le 1^{er} mars 1896, Henri Becquerel découvre qu'un cristal d'uranium émettait des radiations qui impressionnaient une plaque photographique pourtant protégée par un épais papier noir. Il observe ensuite que près d'une substance active, « radioactive », comme la nommera Marie Curie en 1898, l'air devient légèrement conducteur de l'électricité¹. Ernest Rutherford[◇] explique rapidement cette conduction par l'ionisation des molécules d'oxygène et d'azote².

Émulsion photographique, ionisation d'un gaz : ce sont les premiers principes de détection des particules émises par les substances radioactives. Pendant plusieurs années les physiciens utiliseront l'électromètre pour mesurer les très faibles courants provoqués par le rayonnements radioactifs. C'est grâce à un électromètre que Pierre et Marie Curie découvrent le polonium et le radium en 1898, et que Rutherford fait ses expériences cruciales qui lui permettent de montrer que la radioactivité subit une décroissance exponentielle et qu'elle consiste en une transformation d'atomes les uns dans les autres.

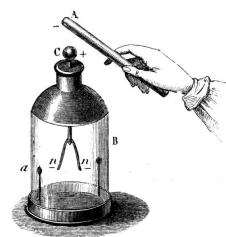


FIG. 1 — Un électroscope à feuilles d'or semblable à celui qu'a utilisé Becquerel

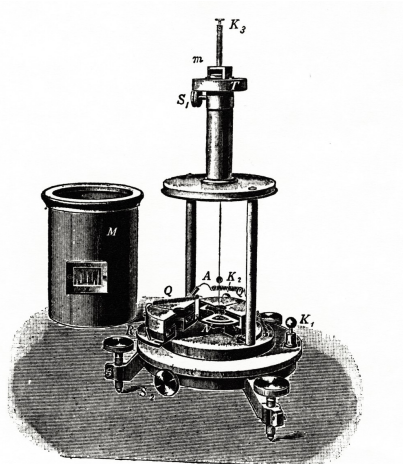


FIG. 7.
Dolezalek electrometer.

FIG. 2 — L'électromètre de Dolezalek utilisé par Rutherford

Un troisième phénomène apparut en 1903. Un peu par hasard, le chimiste anglais William Crookes observa à la loupe une feuille de sulfure de zinc exposée aux rayons α du radium :

If a solid piece of radium nitrate is brought near the screen, and the surface examined with a pocket lens magnifying about 20 diameters, scintillating spots are seen sparsely scattered over the surface. On bringing the radium nearer the

screen the scintillations become more numerous and brighter, until when close together the flashes follow each other so quickly that the surface looks like a turbulent luminous sea.

It seems probable that in these phenomena we are actually witnessing the bombardment of the screen by the positive atoms hurled off by radium with a velocity of the order of that of light³.

Crookes construisit même un petit appareil qu'il nomma *spinthariscopes*, et qui permettait d'observer ces scintillations (fig. 3).



FIG. 3 — Le spinthariscopes de William Crookes

Il n'était cependant pas sûr que chaque particule α provoquât une scintillation et une seule, si bien que les physiciens préférèrent utiliser plutôt l'électromètre pour les mesures quantitatives. C'est avec un électromètre que Pierre et Marie Curie découvrirent le polonium et le radium en 1898, et que Rutherford fit les mesures qui le conduisirent dès 1900 à découvrir la décroissance exponentielle⁴ et à montrer que la radioactivité était une transformation d'atomes les uns dans les autres, une véritable transmutation^{5,6}.

Dans un cours à l'Université de Yale en 1905 sur *Les transformations radioactives*, Rutherford fait le point sur les différentes méthodes de mesure et de détection des rayonnements radioactifs :

Il y a trois propriétés générales des rayonnements des substances radioactives que l'on a utilisées dans le but de faire des mesures, mettant en jeu (1) l'action des rayonnements sur la plaque photographique, (2) la phosphorescence produite dans certaines substances cristallines, (3) l'ionisation produite par les rayonnements dans un gaz⁷.

Son opinion sur la méthode du comptage des scintillations est à cette époque pour le moins prudente :

La propriété des rayons α de provoquer des scintillations sur un écran recouvert de sulfure de zinc est particulièrement intéressante. On a pu détecter par cette méthode des rayons α émis par des substances faiblement radioactives comme l'uranium, le thorium ou la pechblende. On a utilisé des écrans de sulfure de zinc comme une méthode visuelle pour mettre en évidence la présence de l'émanation du radium et de l'actinium. D'une façon générale on peut dire que la méthode de la phosphorescence, tout en étant très intéressante comme moyen visuel pour examiner les rayons, est cependant très limitée dans son application, car elle n'est que grossièrement quantitative⁸.

En 1907, Rutherford, qui est professeur à l'université McGill de Montréal depuis 1899, rentre en Angleterre, et devient professeur à l'université de Manchester. Là, il rencontre un jeune physicien allemand en séjour post-doctoral, Hans Geiger⁹, et lui propose de devenir son assistant, ce que Geiger sera pendant cinq ans. Or Rutherford a une priorité : mesurer la charge de la particule α , et pour cela il faudrait mesurer le nombre de particules émises par seconde par un corps radioactif comme le radium, donc disposer d'un appareil permettant de compter les particules une à une. Or la charge d'une seule particule est trop faible

pour être détectée par le plus sensible des électromètres. Rutherford propose alors à Geiger d'étudier la possibilité de provoquer une multiplication des charges électriques produites par l'ionisation d'un gaz, par un mécanisme semblable aux « avalanches » étudiées peu auparavant par John Townsend[◇], physicien à Oxford, qu'il avait connu au Cavendish. En étudiant le mouvement des électrons dans les gaz raréfiés, Townsend avait montré qu'il y avait multiplication des charges pourvu que le potentiel soit suffisant⁹⁻¹³. Un de ses étudiants, J. P. Kirkby, avait étudié cette multiplication dans une géométrie particulière, avec une cathode cylindrique dont l'anode était l'axe de symétrie central. C'est cette configuration que Rutherford proposa à Geiger d'étudier¹⁴. Un an plus tard, le premier compteur « Geiger » fonctionnait^{15,16}, et permettait à Rutherford de compter ses particules α , confirmant la charge 2 qu'il soupçonnait¹⁷ (Fig. 4).

Ce premier compteur, ancêtre des compteurs « Geiger » dont nous parlerons plus loin, est constitué par un tube métallique de 25 cm de long, d'un diamètre de 17 mm. Un fil métallique isolé est tendu le long de l'axe du cylindre, et on établit une tension de

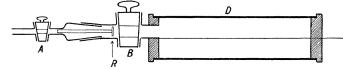


FIG. 4 — Le premier compteur de Rutherford et Geiger

1 200 à 1 300 volts entre ce fil, relié à la borne positive d'une pile (ou plutôt de près d'une centaine de piles mises en série), et la paroi extérieure, reliée à la borne négative. Le cylindre est rempli de gaz (air ou gaz carbonique) à une pression réduite (entre 30 et 50 Torr, ou millimètres de mercure, soit entre 4 et 5% de la pression atmosphérique). La configuration cylindrique fait que le champ électrique augmente beaucoup à mesure que les électrons, libérés par le passage d'une particule α , s'approchent du fil. Ils provoquent alors des ionisations par collision : on assiste à une multiplication des électrons. Dans le premier compteur de Rutherford et Geiger, un électron initial produisait ainsi un millier d'électrons, augmentant d'autant le signal électrique produit sur le fil, et sur l'électromètre relié à ce fil : *le passage d'une seule particule α produisait un mouvement visible de l'électromètre*. Le compteur est d'un maniement délicat. Il faut au moins 20 secondes après la détection d'une particule pour être en mesure d'en détecter une autre, mais c'est tout de même un pas de géant.

Rutherford et Geiger sont alors en mesure de comparer l'observation des scintillations au compteur Geiger. L'accord étant satisfaisant, c'est une validation réciproque. Pendant une vingtaine d'années, Rutherford utilisera surtout la méthode des scintillations observées visuellement, beaucoup plus simple à mettre en œuvre.

2.2 L'existence du noyau

L'atténuation des particules α à la traversée de matière avait été étudiée par Marie Curie qui avait noté¹⁸ en 1900 que, contrairement aux rayonnements connus, c'est-à-dire le rayonnement électromagnétique, les particules α n'étaient pas atténuées dans l'air mais disparaissaient après une trajectoire d'environ 4 cm. Ces expériences furent reprises par William Henry Bragg[◇], professeur de physique à l'Université d'Adelaïde, dans le sud de l'Australie, qui tombe un jour sur l'article de Marie Curie, et commence une série de recherches qui l'amèneront, dans les années 1904-1905, à en confirmer et préciser les résultats :

- les α émis par une substance donnée ont toutes la même énergie
- la densité d'ionisation produite augmente lorsque la vitesse décroît, et culmine peu avant la fin du parcours¹⁹⁻²¹.

Pour Bragg, les particules α se propagent en ligne droite, sans être déviées. Or Rutherford et Geiger ont remarqué une légère diffusion des particules α dans le long tube (4 mètres) que celles-ci devaient franchir avant d'être détectées, diffusion due au gaz résiduel dans le tube. Rutherford suggère alors à Geiger d'entreprendre une mesure systématique de la diffusion des particules α à l'aide du comptage de scintillations puisque la méthode est maintenant validée. Geiger observe que la déviation moyenne est de l'ordre de $0,02^\circ$ par atome traversé,

mais il observe, et c'est beaucoup plus difficile à comprendre, des déviations aussi grandes que 15 degrés^{22,23}. Or Rutherford doit proposer un sujet de recherche à un étudiant de vingt ans qui vient d'arriver de Nouvelle Zélande, Ernst Marsden. Il lui demande de rechercher des déviations très grandes de particules α . L'expérience est entreprise avec l'aide de Geiger, et le résultat l'abasourdit :

Quand des particules β tombent sur une feuille, un fort rayonnement émerge du côté même de la plaque sur lequel les particules sont tombées. [...] Pour les particules α un tel effet n'a pas été observé, et d'ailleurs on ne s'y attend peut-être pas, en raison de la diffusion relativement faible que les particules α subissent en traversant la matière. Les expériences suivantes montrent cependant de façon concluante l'existence d'une réflexion diffuse des particules α . Une petite fraction des particules α tombant sur une feuille de métal subissent un changement de direction tel qu'elles émergent de nouveau du côté de l'incidence²⁴.

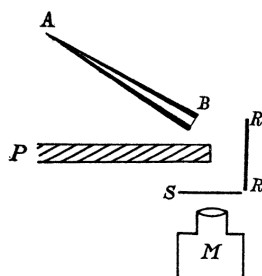


FIG. 5 — Le montage de Geiger et Marsden pour détecter la diffusion des particules α aux angles arrière. Un tube de verre de forme cylindrique contient de l'émanation du radium (^{222}Rn). La cible est placée en RR, S est l'écran scintillant de sulfure de zinc, et les scintillations sont observées visuellement grâce à un microscope de faible puissance M.

Ce résultat ne suscita que peu de commentaires et analyses. Deux ans plus tard cependant, Rutherford pense tenir la seule solution à ce qui est pour lui un vrai casse-tête. Dans une note de deux pages lue devant la *Manchester Literary and Philosophical Society* le 7 mars 1911, Rutherford présente la première ébauche de son modèle de l'atome :

[II] consiste en une charge électrique centrale concentrée en un point et entourée par une distribution sphérique uniforme d'électricité de signe opposé en quantité égale²⁵.

En avril Rutherford a rédigé un article qui paraît dans la livraison de mai de *Philosophical Magazine*. Il note d'emblée :

Étant donné que les particules α et β traversent les atomes, il devrait être possible, à partir d'une étude précise de la nature de la déflexion, de se faire quelque idée de la constitution de l'atome qui produit de tels effets. En fait, la diffusion de particules chargées de grande vitesse par les atomes de matière est une méthode d'attaque de ce problème parmi les plus prometteuses. Le développement du comptage une par une de particules α par la méthode de scintillation présente des avantages peu communs pour cette investigation et les recherches de Hans Geiger par cette méthode ont déjà beaucoup ajouté à notre connaissance de la diffusion de particules α par la matière²⁶.

Il présente ensuite son modèle de l'atome de façon plus détaillée, décrit son calcul des trajectoires des particules, et évalue même la valeur de la charge positive qu'il place en un point au centre de l'atome. Enfin il discute de la taille de la région de l'espace occupée par cette charge. Il montre alors de façon précise qu'on ne peut expliquer les résultats expérimentaux que si les particules α ne traversent pas le domaine occupé par la charge centrale (sinon la déviation serait moindre). Or les particules s'approchent beaucoup du centre de l'atome, donc cette région centrale est à coup sûr très petite. Rutherford fait une estimation

pour un atome dont la charge centrale serait de 100 unités de charge élémentaire, ce qui, pense-t-il, est le cas de l'or (elle a été mesurée peu après, elle est de 79 unités de charge élémentaire). Il trouve que certaines particules s'approchent du centre à 3×10^{-12} cm, une échelle de longueurs inconnues jusque-là.

Rutherford sait bien la difficulté d'un tel modèle (ou du modèle *plum-pudding* de J. J. Thomson) : selon un théorème établi en 1842 par Samuel Earnshaw[◇], il n'existe pas d'équilibre statique possible pour un ensemble de particules qui interagissent entre elles suivant attraction inversement proportionnelle au carré de la distance²⁷. Mais si les électrons tournent, on est immédiatement confronté au rayonnement électromagnétique, et l'atome ne peut pas être stable non plus. Mais Rutherford est sûr de lui, il remet à plus tard la solution de ce problème :

La question de la stabilité de l'atome que nous proposons n'a pas à être considérée à ce stade, car cela dépendra évidemment de la structure précise de l'atome et du mouvement de ses constituants chargés.

Jusque-là Rutherford a parlé de « petite région », de « charge supposée concentrée en un point ». Dans un article daté du 16 août 1912 et paru en octobre, il emploie, pour la première fois, semble-t-il, le mot latin, donc savant, *nucleus*²⁸. Il l'emprunte à la biologie où l'on désigne ainsi le noyau d'une cellule. La physique « nucléaire » est née.

3 LES PREMIÈRES RÉACTIONS NUCLÉAIRES

3.1 Rutherford observe une réaction nucléaire

La guerre éclate à la fin du mois de juillet 1914. Beaucoup de physiciens sont mobilisés et partent au front. À Paris, le laboratoire dont rêvait Pierre Curie et dont Marie Curie a finalement obtenu la construction, l'Institut du Radium, est prêt. Mais la guerre retardera son ouverture jusqu'en 1919. À Manchester, Rutherford est resté pratiquement seul, avec son technicien, le fidèle William Kay. Dès cette époque, il a en tête la possibilité de provoquer la transmutation de certains noyaux, comme il l'écrit dans le journal de vulgarisation scientifique américain *Popular Science Monthly* en août 1915 :

Ce sera une tâche sans aucun doute très difficile de provoquer la transmutation de la matière dans les conditions terrestres ordinaires [...] Il est possible que le noyau d'un atome subisse une altération lors d'une collision directe avec des électrons très rapides, ou bien avec des atomes d'hélium tels que ceux qui sont éjectés par la matière radioactive [...] dans des conditions favorables, ces particules peuvent provoquer une brisure du noyau ou bien se combiner à lui²⁹.

Rutherford reprend des expériences que Marsden avait faites avant de repartir pour la Nouvelle Zélande, l'étude des collisions de particules α avec des noyaux d'hydrogène^{30,31}. Le dispositif expérimental (figure 6) consiste en une chambre rectangulaire de laiton A, de longueur 18 cm, profondeur 6 cm et épaisseur 2 cm ; la chambre est fermée à une extrémité par une plaque de verre dépoli C, et à l'autre par une plaque de laiton E dans laquelle une fente de 1×6 mm est recouverte d'une feuille de métal mince. Deux millimètres plus loin, l'écran de sulfure de zinc, puis le microscope permettant de voir les scintillations. La source radioactive D est placée au centre de la chambre.

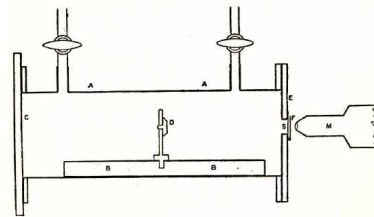


FIG. 6 — Le montage de Rutherford pour détecter la première réaction nucléaire. C'est une boîte parallélépipédique de $18 \times 6 \times 2$ cm. La source radioactive est au centre. La fenêtre de sortie est une feuille de métal mince. L'écran de sulfure de zinc est placé à 1 ou 2 mm à l'extérieur, et les scintillations sont observées par un microscope. La chambre peut être remplie de différents gaz à une pression variable.

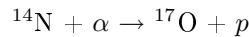
Sur l'hydrogène, Rutherford note que la distribution angulaire des protons, qu'il appelle encore « rayons H », est différente de la distribution calculée par Darwin³², le théoricien du *Cavendish*. Les protons sont beaucoup plus concentrés aux petits angles, ce que Rutherford attribue à l'interaction entre la particule α et le noyau d'hydrogène, qui ne suit probablement plus la loi coulombienne aux très courtes distances^{33,34}. Sur l'oxygène Rutherford n'observe rien de particulier³⁵. Mais sur l'azote un phénomène nouveau apparaît. L'écran de sulfure de zinc est placé bien au-delà du parcours des particules α , si bien qu'il ne peut observer que des protons. Ces protons peuvent provenir soit de la source, soit de collisions des α avec des hydrogènes des molécules d'eau. Mais elles subsistent lorsque Rutherford emploie de l'air très sec. Et elles ne proviennent pas de l'oxygène, car il n'observe rien de semblable avec du dioxyde de carbone. Ces particules proviennent bien de collisions des α avec des noyaux d'azote, et leur parcours dans l'air est d'environ 19 cm, celui de protons de vitesse semblable à celle des α . Pour en être sûr, Rutherford tente une déviation grossière avec un champ magnétique. Conclusion de Rutherford, après une discussion serrée :

Compte tenu des résultats obtenus, il est difficile d'éviter de conclure que les atomes de long parcours issus de la collision d'une particule α avec l'azote ne sont pas des atomes d'azote mais probablement des atomes d'hydrogène ou des atomes de masse 2. Si tel est le cas, nous sommes amenés à conclure que l'atome d'azote s'est désintégré sous l'action des forces intenses produites dans des collisions rapprochées avec des particules α rapides, et que l'atome d'hydrogène qui est libéré fait partie des constituants du noyau d'azote.

[...]

D'une manière générale les résultats suggèrent que si nous disposions pour nos expériences de particules α — ou de projectiles semblables — d'une énergie encore plus grande, nous pourrions espérer briser la structure du noyau de nombreux d'éléments légers.

Rutherford a observé la réaction



C'est la première réaction nucléaire.

3.2 D'autres réactions nucléaires

Après la fin de la guerre, les travaux reprennent et l'observation de la première réaction nucléaire sera bientôt suivie par d'autres, en particulier au *Cavendish*, dont Rutherford est devenu le directeur. James Chadwick, un jeune étudiant, qui avait été retenu en Allemagne pendant la durée de la guerre, est revenu de captivité[◇]. Il reprend et améliore le dispositif expérimental et observe avec Rutherford, de nouvelles « désintégrations spontanées », qu'ils décrivent dans des publications successives envoyées à *Nature*³⁶ et *Philosophical Magazine*^{37,38}.

Les particules produites dans la collision sont observées après la traversée d'une feuille d'aluminium qui aurait arrêté les particules α ou les noyaux plus lourds. Il est donc très probable que ce sont bien des *rayons H*, autrement dit des protons. Ces protons ont une vitesse plus grande que ceux qui pourraient provenir de collision frontale d'une particule α et d'un noyau d'hydrogène résiduel (car il peut toujours rester un peu de vapeur d'eau, donc de noyaux d'hydrogène). Rutherford et Chadwick observent que les noyaux des atomes de bore, azote, fluor, sodium, aluminium et phosphore peuvent être désintégrés par la collision d'une particule α . Par contre ils n'observent rien sur le carbone, l'oxygène ni le soufre.

Rutherford et Chadwick tentent de montrer qu'il s'agit bien de protons, grâce à une déviation magnétique améliorée, et concluent, tout en nuance :

Ces expériences montrent donc que les particules issues de l'aluminium sont porteuses d'une charge positive et sont déviées par un champ magnétique comme

des noyaux d'hydrogène [...] S'il y a très peu de raison de douter que ces particules soient des noyaux d'hydrogène, il est cependant très difficile de démontrer cela de façon indiscutable [...]. D'un autre côté, si nous supposons, comme cela semble probable *a priori*, que les particules expulsées sont des noyaux d'atomes, on peut montrer avec quelque confiance que seule une particule de masse 1 et de charge 1 est en accord avec les résultats³⁸.

Une nouvelle amélioration de leur dispositif leur permet enfin d'augmenter la sensibilité. Ils ont en effet observé que les protons semblent être émis dans toutes les directions avec la même probabilité. Ils décident de les détecter à 90°, ce qui leur permet d'observer des réactions sur le néon, le magnésium, le silicium, le soufre, le chlore, l'argon et le potassium. Aucun effet sur les éléments plus lourds : calcium, nickel, cuivre, zinc, sélénium, krypton, molybdène, palladium, argent, étain, xénon, or, uranium. Ils attribuent cela à la trop forte répulsion coulombienne entre la particule α et le noyau³⁹.

3.3 Une polémique entre le Cavendish et l'Institut für Radiumforschung de Vienne

Au cours de l'été 1923 commencent à paraître des publications provenant de l'*Institut für Radiumforschung* de Vienne, dirigé par Stefan Meyer, un vieil ami de Rutherford, son cadet d'un an. Or les résultats de Vienne contredisaient ceux que Rutherford et Chadwick avaient obtenus au *Cavendish*. Ces publications étaient signées par deux jeunes physiciens, Hans Pettersson, un Suédois, et Gerhard Kirsch, qui prétendaient avoir observé la désintégration du silicium par bombardement de particules α , que n'avait pas observée Rutherford, et ils s'approprièrent dans la foulée à tenter de faire de même avec d'autres éléments. Les Viennois employaient la méthode de détection que Rutherford lui-même employait depuis près de quinze ans, le comptage visuel, au microscope, des minuscules éclairs provoqués dans un écran de sulfure de zinc par le passage d'une particule. Une polémique naquit bientôt, car d'autres résultats de plus en plus surprenants pour les physiciens de Cambridge venaient de Vienne^{40, 41}. L'attitude quelque peu agressive et arrogante des jeunes Viennois ne fait rien pour simplifier les choses. Rutherford et Chadwick reprennent des expériences sur plusieurs éléments, avec leur nouvelle méthode de détection à 90°, ce qui leur permettait d'observer des *rayons H* de vitesse assez faible (ils parcouraient environ 7 cm dans l'air avant de s'arrêter, ce qu'on mesurait facilement en éloignant progressivement l'écran de sulfure de zinc permettant de les détecter)⁴². Mais ces résultats sont une fois de plus contredits par les Viennois, qui observent des effets sur un grand nombre de noyaux sur lesquels aucun effet n'a été vu au *Cavendish* (en particulier des éléments assez lourds comme le titane, le vanadium, le chrome, le fer, le cuivre, le sélénium, le brome, le zirconium, etc.). Jusque-là Rutherford et Chadwick ont poliment mentionné les résultats de Pettersson et Kirsch sans les mettre directement en doute. Dans une nouvelle publication, ils sont plus directs :

Kirsch et Pettersson ont étudié la désintégration d'un certain nombre d'éléments légers par notre méthode précédente, en prenant des précautions spéciales pour éviter une contamination par l'hydrogène à la fois dans la source et dans les substances soumises au bombardement. Ils ont trouvé que le béryllium, le magnésium et le silicium donnent de grands effets, trois ou quatre fois plus grands que ceux de l'aluminium, tandis que le soufre et le chlore donnaient peu ou pas d'effet. Les particules provenant du béryllium avaient un parcours de 18 cm environ, et celles provenant du magnésium environ 12 cm.

Ces résultats ne sont pas compatibles avec les nôtres. L'explication la plus probable, eu égard au nombre de particules et à leur parcours, est que les particules qu'ils ont observées étaient des particules α de long parcours émises par la source³⁹.

La controverse s'enfle peu à peu, chacun campant sur ses positions, et devenant plus explicite, écrivant de plus en plus ouvertement que l'autre s'était

trompé. Mais Rutherford et Stefan Meyer continuent à correspondre courtoisement. Pour tenter de résoudre le conflit, Meyer invite alors Rutherford à visiter son Institut, à quoi Rutherford répond en proposant que ce soit son assistant Chadwick qui aille à Vienne⁴³. Chadwick fit le voyage en décembre 1927. Dès son arrivée, l'ambiance est très amicale avec Meyer mais assez tendue avec Pettersson. Chadwick s'aperçoit vite que les méthodes de mesures des deux laboratoires sont différentes, et a du mal à obtenir de Pettersson un protocole expérimental qui le satisfasse. Le lundi 12 décembre il écrit à Rutherford :

[...] pas un seul des hommes ne fait de comptage. Le comptage est fait entièrement par 3 jeunes femmes. Pettersson dit que les hommes s'ennuient beaucoup trop à faire ce travail de routine, et ne voient plus rien au bout d'un certain temps, tandis que les femmes peuvent travailler sans limite⁴⁴.

Et ce jour-là, Pettersson est absent une bonne partie de la journée, car il reçoit des membres de sa famille venus de Suède. Chadwick peut ainsi procéder à l'expérience qui va donner la clé du mystère. Il poursuit sa lettre :

Aujourd'hui je me suis donc arrangé pour que les filles comptent et que ce soit moi qui détermine l'ordre des comptages. Je n'ai rien changé à l'appareillage, mais je leur ait fait monter et descendre les gammes comme un chat sur un piano, mais pas plus que je ne l'aurais fait dans nos propres expériences si j'avais suspecté une erreur systématique. Le résultat est qu'il n'y avait pas de trace de particules H [provenant du carbone][...] Les résultats ne prouvent pas qu'il n'y a rien sur le carbone, mais je pense qu'ils permettent de douter qu'il y ait grand-chose.

La raison des désaccords était toute simple : les jeunes femmes qui compaient *savaient* ce que leurs patrons espéraient qu'elles allaient voir, donc elles le voyaient ! Cela sans doute sans tricherie, d'une façon inconsciente, tout à fait innocemment. La seule chose qu'a faite Chadwick était de brouiller les cartes, afin qu'elles ne sachent pas à l'avance le résultat attendu.

Chadwick tira la leçon de cette aventure désagréable : le comptage visuel des scintillations était trop peu sûr, il dépendait de trop de facteurs humains difficilement maîtrisables. Cet épisode sonnait la fin de la technique des scintillations, peu à peu remplacée par des compteurs électriques dérivés du premier compteur Geiger.

4 LES NOUVEAUX MOYENS DE DÉTECTION

4.1 Le compteur à pointe de Geiger

Dans le premier compteur de Geiger et Rutherford, l'impulsion électrique créée par le passage d'une particule α était détectée, après son amplification, par le déplacement d'une aiguille métallique dans un électromètre à quadrants. En 1912 Rutherford et Geiger le remplacèrent par un électromètre à fil, d'inertie beaucoup plus faible, qui permettait des comptages pouvant atteindre 1 000 particules par minute⁴⁵. Puis ils remplacèrent le fil central par une anode constituée d'une petite sphère, au centre d'une sphère constituant la cathode. De plus le déplacement du fil de l'électromètre était enregistré sur un film photographique qui défilait régulièrement.

Après son retour en Allemagne en 1912 Geiger construit un nouveau compteur. Il consiste en un tube de métal court (environ 4 cm de long, et 2 cm de diamètre), il n'y a plus de fil central, remplacé par une fine pointe, dont l'extrémité est à 0,8 mm environ du disque qui ferme le tube. Un trou circulaire de 2 mm de diamètre environ, percé dans ce disque, laisse entrer les particules (qui doivent cependant traverser une mince feuille de mica*). C'est le *compteur*

*Le mica est un silico-aluminate complexe contenant presque toujours du potassium et, en proportions variables, du fer, du magnésium et d'autres éléments, brillant, coloré ou non, très facilement clivable en lamelles fines, transparentes, flexibles, élastiques, résistantes à la chaleur et isolantes, présent dans les roches éruptives, métamorphiques et sédimentaires. C'était le meilleur matériau disponible pour fabriquer des fenêtres minces, transparentes et résistantes.

à pointe⁴⁶⁻⁴⁸, qui connaîtra plusieurs variantes.

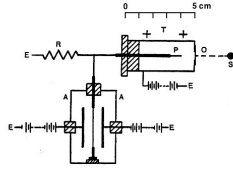


FIG. 7 — Le compteur à pointe de Geiger, 1913. À droite, le schéma de montage, avec un électromètre à fil.

dans la paroi qui lui fait face. C'était un appareil délicat, et même capricieux. Selon Geiger :

La valeur d'un [tel] appareil dépend essentiellement de la qualité de la pointe [...]]

On ne peut pas donner de règle pour préparer une bonne pointe⁴⁸.

C'est dire que la fabrication d'une bonne pointe relève du tour de main, du savoir-faire, bref de l'art. Ce compteur est tellement sensible qu'il est déclenché par le passage d'un électron, ce qui permet aussi de détecter les photons X ou γ . Mais la contrepartie de cette sensibilité est l'apparition de déclenchements parasites, rendant difficiles les mesures quantitatives.

Normalement le compteur à pointe fonctionnait par tout ou rien, car le nombre d'électrons produit ne dépend pas du nombre d'électrons produits initialement dans le gaz par le passage de la particule. Geiger montra cependant que si la pointe n'est pas trop fine, (0,08 mm à 2 mm de diamètre), et si l'on ajuste bien la tension électrique, le signal électrique est proportionnel au nombre d'électrons créés initialement, donc à l'énergie qu'a perdue la particule en traversant le compteur. Cela en faisait un compteur « proportionnel »⁴⁹. Mais répétons-le, ce compteur était particulièrement délicat, et difficile à utiliser.

4.2 Le compteur Geiger-Müller

En 1925, Hans Geiger est nommé professeur à Kiel. C'est là qu'il va développer, avec l'un de ses étudiants, Walter Müller[◇], un homme inventif et très versé dans les nouvelles techniques, la dernière version de son compteur. Il reprend le vieux compteur de 1908, pour lui apporter quelques modifications qui peuvent paraître mineures, mais vont tout changer. Il réussit à augmenter la tension aux abords du fil (qui est plus fin) grâce à une préparation spéciale :

Un fil fin est tendu selon l'axe d'un tube de métal ; le fil est recouvert d'une fine couche peu conductrice, d'épaisseur uniforme. En raison de l'effet d'isolation de cette couche, on peut élever le potentiel entre le fil et le tube au-dessus du potentiel de claquage. Si quelque part à l'intérieur du tube un petit nombre d'ions sont créés, la multiplication par collision produit une quantité d'électricité considérable qui s'écoule vers le fil. Avec un fil nu une telle impulsion électrique déclencherait une décharge permanente ; avec le fil préparé une charge est créée pendant un court instant sur la surface de la couche, qui interrompt le champ électrique et coupe le courant⁵⁰.

Grâce à cette préparation, Geiger et Müller peuvent utiliser des fils de 0,1 mm de diamètre, alors que celui du compteur Rutherford-Geiger de 1908 avait un diamètre de 0,45 mm.

L'avantage est aussi que la valeur précise du potentiel n'est pas critique (elle est généralement de l'ordre de 1 200 à 1 300 volts), si bien que le compteur Geiger-Müller est beaucoup plus stable que l'ancien compteur Rutherford-Geiger ou que le compteur à pointe. Autre changement : dans l'ancien compteur, le nombre d'électrons qui arrivaient sur le fil central et qui étaient donc détectés était *grosso modo* proportionnel au nombre d'électrons créés par le passage de

la particule, donc à l'énergie qu'elle y avait perdue; dans le compteur Geiger-Müller au contraire, il n'y a aucun lien entre le nombre d'électrons créés par le passage de la particule et le nombre d'électrons qui arrivent sur le fil. Le compteur Geiger-Müller ressemble sous cet aspect au compteur à pointe : un *simple compteur*, fonctionnant par tout ou rien. Il est très sensible (il peut détecter tout rayonnement), très stable et facile d'emploi, si bien qu'il va s'imposer de façon définitive, comme le compteur universel.

4.3 La chambre à ionisation à amplification électronique

En 1924, Heinrich Greinacher, professeur de physique et directeur de l'Institut de Physique de l'Université de Berne[◇] a l'idée d'amplifier le signal d'un compteur à pointe en utilisant une lampe triode, très en vogue à cette époque dans les postes de T. S. F.⁵¹. Puis il a l'idée de remplacer l'amplification obtenue dans le compteur à pointe par une amplification électronique⁵². Il peut alors utiliser le faible signal d'une chambre à ionisation, et l'amplification permet soit d'actionner un haut-parleur, soit d'être visualisé dans un galvanomètre. Enfin il enregistre sur un film photographique les impulsions d'un oscilloscope particulier⁵³.

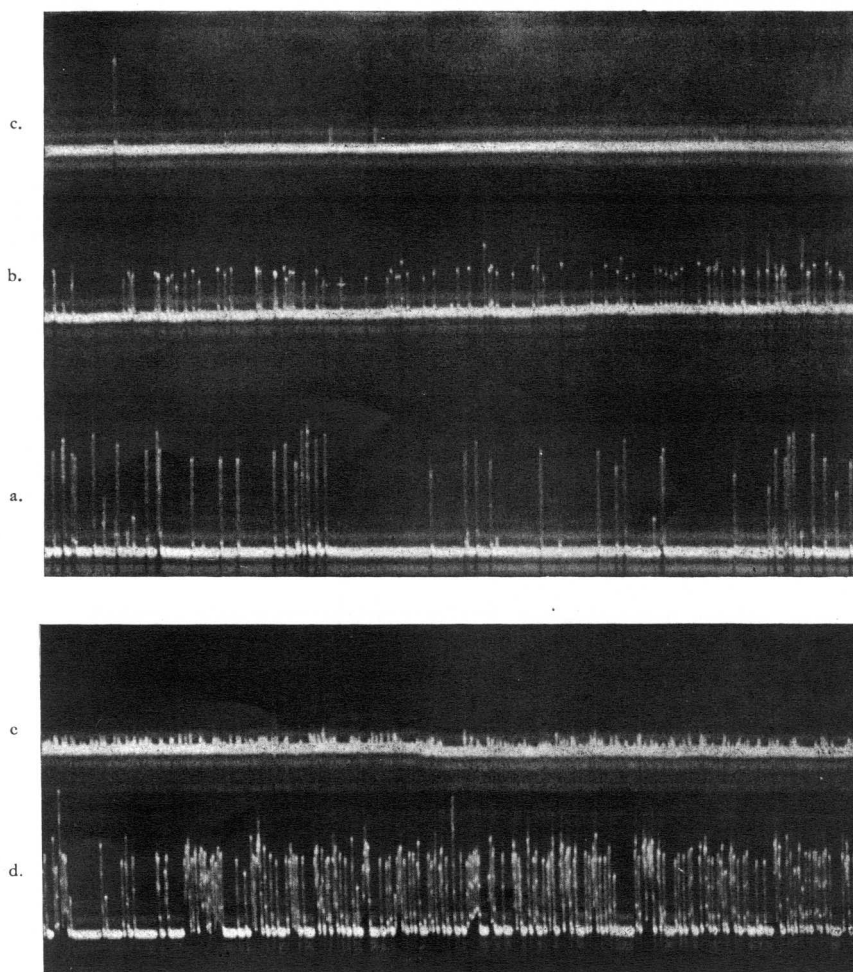


Fig. 2.

FIG. 8 – Les premiers enregistrements photographiques de Greinacher

Au départ, Greinacher cherchait surtout un moyen de s'affranchir des déclenchements parasites des compteurs à pointe. Puis il constate que la hauteur des impulsions est proportionnelle à l'énergie perdue par ionisation, ce qui donne un renseignement de première importance sur la particule détectée. L'amplification

électronique se répandra en quelques années dans toute l'Europe.

5 UNE IDENTIFICATION DIFFICILE : LA DÉCOUVERTE DU NEUTRON

En 1930, le physicien allemand Walther Bothe[◇] observe un rayonnement neutre, semblable à des γ , très pénétrant en bombardant du béryllium avec une source de particules α de polonium. À l'Institut du Radium, Frédéric Joliot[◇] et Irène Curie[◇] observent que ce rayonnement peut communiquer une grande vitesse à des protons, ou d'autres noyaux légers. Pour cela ils ont interposé diverses substances hydrogénées entre la source de polonium-béryllium et une chambre à ionisation dont ils mesurent le courant par un électromètre⁵⁴. Ils tentent d'interpréter ce rayonnement comme un rayonnement γ , bien que cela donne des résultats surprenants.

James Chadwick cherche depuis des années à identifier une particule imaginée par Rutherford : un neutron, qui serait constitué par l'union très intime d'un proton et d'un électron. En voyant les résultats des Joliot-Curie, il pense immédiatement que le rayonnement en question est probablement constitué par des neutrons. Il dispose, au *Cavendish*, contrairement aux Joliot-Curie, d'une chambre à ionisation à amplification électronique, et il montre que différents noyaux sont projetés par le rayonnement neutre (hélium, lithium, béryllium, air et argon) il évalue leur parcours dans l'air de façon assez grossière mais très suffisante pour montrer qu'il ne peut pas s'agir d'un γ mais que tout est compatible avec une particule neutre de masse 1. C'est la découverte du neutron^{55,56}, qui sera couronnée par le prix Nobel de physique en 1935.

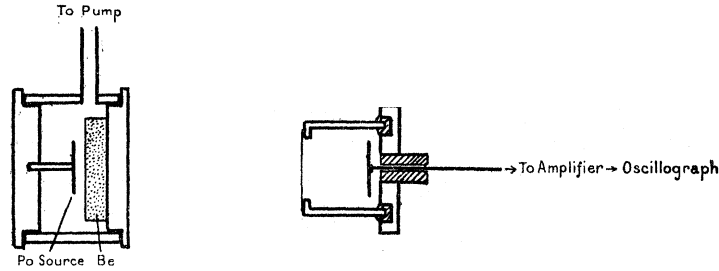


FIG. 9 — Le montage de Chadwick pour identifier le neutron. Lorsque la source de neutrons était placée à 3 mm de la chambre d'ionisation il observait des événements dus au recul des noyaux d'azote. Et lorsqu'il interposait une cible de paraffine de 2 mm d'épaisseur il augmentait beaucoup le nombre d'événements, qu'il attribua aux protons de recul⁵⁶.

6 LES REMIÈRES RÉACTIONS NUCLÉAIRES PROVOQUÉES PAR UN FAISCEAU DE PARTICULES ACCÉLÉRÉES

L'année 1932 voit l'aboutissement des efforts de plusieurs physiciens pour construire des appareils pouvant accélérer des particules à des énergies suffisantes pour être utilisées dans des études de structure nucléaire. Le premier accélérateur à fonctionner est le cyclotron de Berkeley, construit sous la direction de Ernest O. Lawrence. Presque au même moment deux physiciens du *Cavendish*, John Cockcroft[◇] et Ernest Walton[◇], parviennent à accélérer des protons, grâce à un accélérateur électrostatique, à quelques centaines de keV. Ils bombardent une cible de lithium et observent la réaction⁵⁷ :

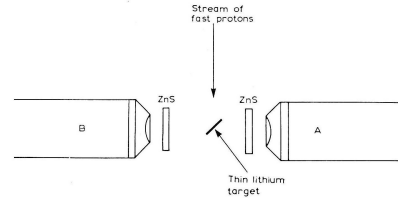
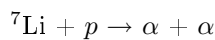


FIG. 10 — Le dispositif de Cockcroft et Walton pour observer les deux α en coïncidence.

Pour confirmer leur interprétation, ils décident de détecter les deux α *en coïncidence*, au moyen de scintillations observées visuellement (voir la fig. 10). De part et d'autre d'une cible mince de lithium, deux écrans de sulfure de zinc, observés au microscope par deux physiciens qui notent sur un papier qui défile les éclats. Ils ont une résolution en temps de l'ordre de 0,1 s, ce qui leur suffit pour affirmer que c'est bien la réaction ci-dessus qui a lieu.

7 LA DÉCOUVERTE DE LA RADIOACTIVITÉ ARTIFICIELLE ET LA PHYSIQUE DES NEUTRONS

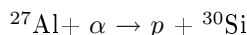
7.1 *Le congrès Solvay de 1933*

L'industriel belge Ernest Solvay avait bâti sa fortune en inventant un nouveau procédé de fabrication de la soude. C'était un homme qui se disait progressiste, et surtout scientifique : il pensait que les progrès de la Science permettraient d'apaiser toutes les tensions sociales. En 1910 il décida de convoquer un congrès, en invitant les grands savants de son époque, par l'intermédiaire de Walther Nernst[◇]. Le premier congrès Solvay se tint du 29 octobre au 4 novembre 1911 à Bruxelles, sous la présidence de Hendrick Lorentz[◇].

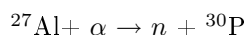
Des congrès Solvay se tinrent ensuite en 1913, 1924, 1927, 1933 et après la guerre. Ils rassemblaient chaque fois les plus grands physiciens de l'époque, et eurent de ce fait une grande célébrité. En 1933, le sujet choisi fut « Structure et propriétés des noyaux atomiques »⁵⁸. Tous les grands noms de la physique nucléaire naissante y participaient.

7.2 *La radioactivité artificielle*

Dans ce congrès, Frédéric et Irène Joliot-Curie discutent d'un problème épineux : la réaction $\alpha + \text{Al}$. Ils avaient observé un rayonnement neutre qu'ils pensaient être des neutrons. Or on connaissait à l'époque la réaction



Tout était clair dans ce cas, le ^{30}Si étant un isotope connu du silicium. Mais si les Joliot-Curie avaient raison, on devait avoir la réaction :



Or le ^{30}P n'avait jamais été observé, il n'existait pas ! Mais les Joliot-Curie ont également observé des positons. D'où leur idée : au lieu du proton, un neutron et un positon seraient émis simultanément. Mais Lise Meitner intervient pour dire qu'elle a bien observé des positons, mais pas assez de neutrons. La proposition des Joliot-Curie rencontre le scepticisme général.

Rentrés à Paris, ils reprennent l'expérience en tentant de faire un lien entre le neutron et le positon. Impossible de faire une mesure en coïncidence. Ils décident de mesurer le seuil d'émission des protons et des positons, pour vérifier que c'est bien le même. En augmentant l'énergie des α puis en la diminuant au-dessous du seuil, ils découvrent que l'émission de positons continue après l'irradiation par les particules α . Ils ont bien formé du ^{30}P , qui est radioactif, avec une période de trois minutes environ⁵⁹⁻⁶¹.

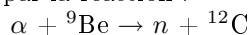
La découverte de la radioactivité artificielle aura un énorme impact. On découvrirait soudainement qu'il existait des dizaines ou des centaines d'isotopes radioactifs, et on se mit immédiatement à les rechercher.

8 ENRICO FERMI : LA PHYSIQUE DES NEUTRONS LENTS, LES RÉSONANCES

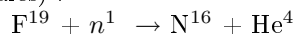
8.1 *Le début de la physique des neutrons à Rome*

À Rome, le jeune Enrico Fermi[◇] est nommé, à 26 ans, titulaire de la première chaire de physique théorique en Italie. Il constitue en quelques années

une brillante équipe de physiciens : Franco Rasetti[◇], Edoardo Amaldi[◇], Emilio Segrè[◇], Bruno Pontecorvo[◇], Ettore Majorana[◇] et Oscar D'Agostino^{◇*}. Dès que la découverte de la radioactivité artificielle fut connue à Rome, Fermi comprit qu'il y avait là un sujet plein de promesses, et qu'il avait bien fait d'inciter son équipe à se lancer dans le domaine tout nouveau de la physique nucléaire. Fermi ne disposait pas, comme les Joliot-Curie, de source de particules α très intense, mais ceux-ci avaient noté dans leur publication de *Nature* du 10 février⁶¹ qu'on pourrait sans doute produire des radioéléments par bombardement avec des protons, deutons ou neutrons. Aux yeux de Fermi, les neutrons ont un gros avantage : dépourvus de charge électrique, ils doivent pouvoir pénétrer dans les noyaux, et permettre de produire de nombreux radioéléments. Or un professeur du *Laboratorio delle Sanità Pubblica*, situé dans le même bâtiment que l'institut de physique, Giulio, possédait plus d'un gramme de radium, et l'appareillage nécessaire pour extraire l'émanation du radium, c'est-à-dire l'isotope 222 du radon, dont la période radioactive est de 3,8 jours. Il suffit de remplir de ce gaz une ampoule de verre dans laquelle se trouve du béryllium pulvérisé : les neutrons sont alors produits par la réaction :



Avec les moyens du bord, Fermi fabrique un compteur Geiger-Müller en utilisant un simple tube de médicaments métallique comme tube extérieur, et il commence immédiatement les mesures. Il décide d'exposer au bombardement des neutrons tous les éléments sur lesquels il peut mettre la main, par ordre de masse : hydrogène, lithium, béryllium, bore, carbone, azote, oxygène, sans succès. Mais le 25 mars il bombarde le fluor, et le crépitement tant attendu est au rendez-vous ! Il envoie le même jour un article à la revue italienne *La Ricerca Scientifica*⁶², et propose une interprétation de ses résultats par la réaction nucléaire (notations originales) :



Les publications vont suivre à un rythme soutenu. Dans un deuxième article, Fermi fait état de la création de 13 nouveaux isotopes radioactifs, qu'il a obtenus en bombardant le fer, le silicium, le phosphore, le chlore, le vanadium, l'aluminium, le cuivre, l'arsenic, l'argent, le tellure, l'iode, le chrome et le baryum⁶³. Tous ces résultats sont repris dans un court article expédié le 10 avril à *Nature*⁶⁴. Afin de poursuivre ses expériences, et d'identifier avec plus de certitude les éléments radioactifs produits, Fermi avait besoin de faire, comme les Joliot-Curie, une analyse chimique. Or un jeune chimiste du *Laboratorio delle Sanità Pubblica*, Oscar D'Agostino, bénéficiait d'une bourse et travaillait à ce moment à l'Institut du Radium, auprès de Marie Curie, afin d'apprendre les techniques de la chimie nucléaire. Lorsqu'il revient en Italie pour les vacances de Pâques, il se fait immédiatement embaucher par Fermi. En fait il ne retournera pas à Paris. Toute l'équipe se met alors au travail, et les publications se succèdent à un rythme rapide jusqu'à l'été. Les résultats sont repris dans un article envoyé à la Royal Society par l'intermédiaire de Rutherford⁶⁵ : plus de quarante radioéléments, dont les périodes de désintégration vont de moins d'une minute à deux jours.

8.2 Les nouveaux détecteurs de neutrons

Jusque-là, la seule façon connue de détecter les neutrons était de détecter les protons de recul d'une substance hydrogénée. Mais en fabricant des radioéléments à la pelle, Fermi se rendit compte qu'il pouvait utiliser comme détecteur de neutrons certaines substances : on les expose à un flux de neutrons, et on mesure l'activité β^- après coup. Deux exemples de tels détecteurs, dont l'emploi se généralisa très vite :

- le rhodium, dans lequel Fermi détecte deux activités de 44 s et 3,9 min.

Comme le ${}^{103}_{45}\text{Rh}$ est monoisotopique, il devient du ${}^{104}_{45}\text{Rh}$, avec un état

*Équipe très importante pour l'époque, la plupart des articles étaient alors signés par un ou deux physiciens, exceptionnellement trois.

excité 5^+ , état isomérique ($\tau = 4,23$ min) qui décroît à 98% vers le fondamental par γ et à 2% par β^- et le fondamental qui décroît par β^- ($\tau = 42,3$ s).

- l'argent, dans lequel l'équipe de Fermi détecte deux périodes β^- de 22 secondes et 2,3 minutes, et il montre par radiochimie qu'il s'agit d'isotopes de l'argent. Dans ce cas c'est compliqué par le fait que l'argent naturel est composé de deux isotopes en parts comparables : ^{107}Ag (51,84%) et ^{109}Ag (48,16%). Les émetteurs β sont le ^{108}Ag ($\tau = 2,37$ m) et le ^{110}Ag ($\tau = 24,6$ s).

8.3 Les neutrons lents

Pendant l'été 1934 Fermi confie à Edoardo Amaldi et au jeune étudiant Bruno Pontecorvo la tâche de préciser de façon quantitative l'activation que l'équipe a observée sur différents éléments. Ils font un montage simple : un cylindre creux du corps à étudier, dans lequel on place la source de neutrons (il s'agit de l'ampoule de verre remplie d'émanation du radium et de béryllium en poudre). Le tout est placé dans une boîte de plomb. Après un temps d'irradiation, on remplace la source de neutrons par un compteur Geiger-Müller qui détecte la radioactivité artificiellement créée par les neutrons dans le cylindre. Or un jour d'octobre, alors qu'ils étudient l'argent, Pontecorvo remarque des anomalies : la radioactivité produite n'est pas reproductible, elle semble dépendre de l'emplacement du cylindre dans la boîte de plomb. Puis ils se rendent compte que cette activité dépend de l'environnement : elle est plus forte lorsque l'appareillage est posé sur une table de bois plutôt que sur une table de marbre ! Au début cela suscite l'incrédulité et même quelques sarcasmes dans le laboratoire. Ils finissent par en parler à Fermi, et décident de placer entre la source de neutrons et l'argent du plomb, pour voir quelle action il peut avoir. Nous sommes dans la matinée du 20 octobre. Fermi propose alors d'essayer plutôt la paraffine. À la grande surprise de toute l'équipe, l'activité est alors *cent fois plus forte* ! Fermi en donne bientôt une interprétation : les neutrons sont ralentis par collisions multiples contre des protons de substances hydrogénées. Donc *la section efficace d'absorption peut être beaucoup plus grande pour des neutrons très lents, des neutrons thermiques*.

Fermi et Bethe propose une première explication à cette très grande augmentation de la section efficace pour les neutrons thermiques : la section efficace serait en gros proportionnelle à la longueur d'onde de de Broglie, donc inversement proportionnelle à la vitesse. Mais certains résultats expérimentaux contredisaient cette prédiction^{66,67}. De plus, la diffusion élastique aurait dû augmenter dans les mêmes proportions, ce qui n'était pas le cas.

8.4 La découverte des résonances d'absorption des neutrons lents

Un autre phénomène fut alors observé par plusieurs physiciens : les résultats dépendaient du détecteur choisi. C'est ainsi que Moon et Tillman observent que l'absorption des neutrons lents par un bloc d'iode est apparemment plus grande si l'on utilise un détecteur d'iode plutôt qu'un détecteur d'argent ou de rhodium^{66,68}. Ils suggèrent que l'absorption dépend beaucoup de l'énergie des neutrons. T. Bierge et C. T. Westcott obtiennent des résultats similaires⁶⁹.

À l'automne 1935, Fermi et Amaldi se retrouvent seuls à Rome. Rasetti, très hostile au régime fasciste de Mussolini, est parti aux États-Unis au moins pour un an, Pontecorvo rejoint les Joliot-Curie à Paris, grâce à une bourse du ministère de l'Éducation Nationale. D'Agostino a obtenu un poste à l'*Istituto di Chimica del Consiglio Nazionale delle Ricerche*. Quant à Segrè, après trois mois passés aux États-Unis, il a été nommé professeur à Palerme. Fermi et Amaldi s'attaquent au problème des incohérences dans l'absorption des neutrons.

Début novembre, après avoir examiné de façon détaillée l'absorption de onze éléments différents, dans toutes les combinaisons possibles avec sept détecteurs, ils confirment que l'absorption des neutrons ne suit pas la simple loi énoncée

par Fermi. Entre temps d'autres publications ont paru, venant de différents laboratoires. À Oxford, Leo Szilard a observé, tout à fait indépendamment, que les neutrons qui traversent une feuille de cadmium épaisse de 1,6 mm ne sont pas, ou sont à peine absorbés par une seconde feuille de cadmium, alors qu'ils sont fortement absorbés par de l'indium. On dirait que la première feuille a absorbé pratiquement tous les neutrons absorbables par le cadmium, et reste transparente pour les autres. Pour Szilard une explication paraît évidente : le cadmium n'absorberait que les neutrons dont la vitesse serait comprise dans des limites très étroites, et laisserait passer les autres⁷⁰. Pendant leur séjour à l'université *Columbia*, Rasetti et Segrè ont, en collaboration avec trois physiciens américains, George Pegram, John Dunning et George Fink, mesuré directement comment varie l'absorption lorsque varie la vitesse des neutrons*. La loi semble s'appliquer à l'argent, mais pas au cadmium⁷¹.

Amaldi et Fermi reprennent l'ensemble de leurs résultats et de leurs conclusions sur le sujet dans un article général envoyé le 29 mai 1936 à *La Ricerca scientifica*⁷². Le point de départ, contenu dans leur deuxième publication⁷³, qui date du 14 décembre 1935, est une nomenclature qui peut paraître toute simple : ils constatent que les neutrons lents émis par leur source se divisent en plusieurs groupes, les neutrons de chaque groupe étant absorbés de façon très sélective par un certain corps. Ces groupes sont désignés par des lettres : C pour les neutrons absorbés par le cadmium, A pour le groupe absorbé par l'argent, D pour le groupe absorbé par le rhodium.

L'idée qui vient à l'esprit est naturellement que ces différents groupes correspondent à des neutrons de vitesses, donc d'énergies, différentes. Mais il n'existe pas à l'époque de méthode pour mesurer directement l'énergie de ces neutrons. Pas à pas ils vont pourtant réussir à montrer que le groupe C correspond à des neutrons *thermiques*[†]. Ils montrent ensuite que les autres groupes ont des énergies plus élevées, et parviennent à établir l'échelle de ces énergies, et même la *largeur* de chaque groupe. Pendant l'été Fermi est invité à l'université *Columbia*, ainsi qu'Amaldi. Celui-ci traduit en anglais pour *Physical Review* leur article⁷², qui devient rapidement un classique. Leur tour de force est d'avoir démontré qu'il existe des résonances très étroites dans l'absorption des neutrons, et même de déterminer leur largeur approximative.

9 LA THÉORIE DU NOYAU COMPOSÉ, PREMIÈRE THÉORIE DES RÉACTIONS NUCLÉAIRES

9.1 Niels Bohr

L'interaction des neutrons avec les noyaux ne pouvait donc se représenter par un simple potentiel moyen agissant sur le neutron. Coup sur coup vont paraître deux articles qui vont avoir une influence déterminante sur la suite de la théorie des réactions nucléaires.

Le 27 janvier 1936 Niels Bohr expose une nouvelle théorie devant l'Académie Royale des Sciences Danoise. Son exposé paraît ensuite dans *Nature* et a pour titre « Neutron capture and nuclear constitution ». Dans cet article de cinq pages sans une seule formule mathématique, comme très souvent dans ses articles, Niels Bohr jette les bases de la première théorie des réactions nucléaires, que nous appelons aujourd'hui théorie du noyau composé.

Bohr commence par remarquer que la grande étroitesse des résonances montre qu'il s'agit d'états dont la durée de vie est beaucoup plus longue que le simple passage du neutron à travers le noyau, qui est de l'ordre de 10^{-21} s. Il poursuit :

The phenomena of neutron capture thus force us to assume that a collision between a high-speed neutron and a heavy nucleus will in the first place result

* La méthode employée consistait à fixer l'échantillon et le détecteur sur un disque tournant à grande vitesse, à proximité d'un bloc de paraffine immobile. La vitesse *relative* d'approche du neutron et du noyau peut ainsi varier dans certaines limites.

[†] Les vitesses des neutrons thermiques sont de l'ordre de 1 000 à 4 000 mètres par seconde, la moyenne se situant autour de 2 200 m/s à 20°C.

in the formation of a compound system of remarkable stability. The possible later breaking up of this intermediate system by the ejection of a material particle, or its passing with of emission of radiation to a final stable state, must in fact be considered as separate competing processes which have no immediate connexion with the first stage of the encounter.

La théorie du noyau composé (expression qui n'est pas employée par Bohr dans son article) est née. Bohr fait en 1937 plusieurs conférences dans des universités américaines, dont il publie le contenu dans la revue américaine *Science*⁷⁴. Dans ces conférences il fait appel à un modèle mécanique simple pour illustrer sa façon de voir une réaction nucléaire, qui est représenté dans la figure 11 :

A simple mechanical model which illustrates these features of nuclear collisions is reproduced in [fig. 11], which shows a shallow basin with a number of billiard balls in it. If the bowl were empty, the a ball which was sent in would go down one slope and pass out on the opposite side with its original energy. When, however, there are other balls in the bowl, then the incident one will not be able to pass through freely but will divide its energy first with one of the balls, these two will share their energy with others, and so on until the original kinetic energy is divided among all the balls. If the bowl and the balls could be regarded as perfectly smooth and elastic, the collisions would continue until a sufficiently large part of the kinetic energy happened again to be concentrated upon a ball close to the edge. This ball would the escape from the basin, and tif the energy of the incident ball were not very large, the remainder of the balls would be left with insufficient total energy for any of them to climb the slope.

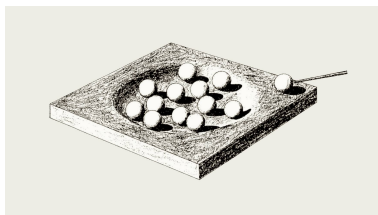


FIG. 11 – L'image d'une réaction nucléaire selon Niels Bohr⁷⁴.

9.2 Breit et Wigner

Gregory Breit[◇] et Eugene P. Wigner[◇] envoient le 15 février 1936 à *Physical Review* un article qui paraît le 1^{er} avril. Ils exposent dès l'introduction leur idée :

On supposera qu'il existe des niveaux d'énergie quasi-stationnaires (virtuels) du système noyau + neutron, qui se trouvent dans la région des énergies thermiques ou quelque peu au-dessus. On supposera que le neutron incident passe de son état incident à un niveau quasi-stationnaire. Le système excité formé par le noyau et le neutron sautera alors vers un niveau plus bas en émettant un rayonnement γ ou peut-être quelquefois d'une autre façon.

Ils considèrent un système simplifié dans lequel un neutron libre dans un état a_s fait une transition vers un état c du système « noyau + neutron », qui lui-même peut se désintégrer par émission de γ vers un état b , et ils parviennent à la section efficace de capture σ :

$$\sigma = \frac{\Gamma^2}{\pi} S \frac{\Gamma_s \Gamma}{(\nu - \nu_0)^2 + \Gamma^2}$$

où Λ est la longueur d'onde de de Broglie du neutron, S est un facteur statistique, Γ est la largeur totale de la résonance définie par

$$\Gamma = (4\pi\tau)^{-1}$$

τ étant la vie moyenne de l'état considéré, ν_0 est la fréquence de l'état résonnant, ν la fréquence correspondant à l'énergie du neutron, et Γ_s est la largeur correspondant aux autres voies de décroissance du système.

Un an plus tard, Hans Bethe[◇] et George Placzek[◇] publient un article important⁷⁵ dans *Physical Review*. Ils reprennent la théorie de Breit et Wigner et la généralisent de deux façons :

- (1) ils tiennent compte du spin 1/2 du neutron, et introduisent un facteur statistique qui prend en compte sa composition avec le spin du noyau et avec le moment angulaire orbital, et ils traitent le cas de plusieurs résonances proches,
- (2) la théorie est étendue à un nombre quelconque de niveaux du noyau composé

10 APRÈS LA SECONDE GUERRE MONDIALE, LE DÉVELOPPEMENT DES ACCÉLÉRATEURS ET DE L'INSTRUMENTATION

10.1 Les accélérateurs

Le premier cyclotron a vu le jour en 1932 à Berkeley, tout comme le premier accélérateur électrostatique « Cockcroft-Walton », construit à Cambridge. À Berkeley, Ernest Lawrence[◇] a lancé la construction de cyclotrons de plus en plus grands. Le *60-inch* est entré en fonctionnement en 1939, mais déjà Lawrence a lancé un énorme cyclotron de 184 pouces, dont l'aimant fut utilisé pendant la guerre pour la séparation de l'uranium 235. En 1945, on se rendit compte que les effets relativistes qu'on avait ignorés jusque-là empêchaient le fonctionnement d'un cyclotron classique au-delà de 10 MeV par nucléon environ. La solution trouvée fut la variation de la fréquence du cyclotron au cours d'un cycle d'accélération, ce qui fut possible grâce au principe de stabilité de phase découverte par Vladimir Veksler⁷⁶ et Edwin McMillan⁷⁷, qui nomma *synchro-cyclotron* ce nouvel accélérateur. Puis vinrent les *synchrotrons* dont le principe est le même, mais où les particules sont guidées par une suite d'aimants et non plus par un seul gros aimant.

Du côté des accélérateurs électrostatiques, c'est l'accélérateur de Robert Van de Graaff[◇] qui eut la suprématie après la guerre. C'est bien Van de Graaff qui avait obtenu une accélération de 1 MeV. Il obtint ensuite 7 MV en 1933, mais sans pouvoir accélérer de particules. Le premier Van de Graaff entrera effectivement en service en 1940, avec une tension de 2,75 MV. Puis cette tension sera progressivement portée à 8-9 MV, et l'apparition du « tandem » permettra de doubler l'accélération des protons. Les accélérateurs Van de Graaff seront un outil essentiel de la spectroscopie nucléaire dans les années 1960.

10.2 Les détecteurs et l'instrumentation

Le comptage des scintillations avait été abandonné au profit des détecteurs « électriques », comme le compteur Geiger-Müller au milieu des années vingt. Après la guerre il renaît de ses cendres, grâce à l'utilisation, non pas de l'œil humain, mais d'une photocathode couplée à un multiplicateur d'électrons, un *photomultiplicateur*. L'idée d'utiliser une cellule photoélectrique avait été lancée en 1941 par le physicien hongrois Zoltán Bay^{78,79}, mais les éclairs lumineux étaient très faibles. C'est l'utilisation d'un multiplicateur d'électrons, breveté en 1923 par Joseph Slepian[◇] et perfectionné par Vladimir Zworykin[◇], qui fit le succès du procédé, toujours en usage de nos jours^{80,81}.

Un détecteur à jonction de semi-conducteurs fut utilisé pour la première fois⁸² en 1959, puis l'utilisation des « jonctions » se développa rapidement. Il faut dire qu'elles présentaient de nombreux avantages : compacité, résolution élevée, facilité d'utilisation. Elles se sont considérablement développées et diversifiées depuis cette époque.

Mentionnons encore les émulsions photographiques, qui furent utilisées jusque dans les années soixante, principalement dans l'étude des rayons cosmiques

(ballons-sondes envoyés en altitude) et en physique nucléaire pour enregistrer des spectres de particules dans des spectromètres magnétiques.

11 DIFFUSION ÉLASTIQUE ET MODÈLE OPTIQUE

En 1947, une équipe de Berkeley mesura l'absorption des neutrons de 90 MeV dans une quinzaine de substances, allant de l'hydrogène à l'uranium⁸³. Les neutrons étaient produits par le faisceau de 190 MeV du synchro-cyclotron de Berkeley qui frappait une cible de béryllium, ce qui donnait un spectre de neutrons assez large (27 MeV) autour de 90 MeV. La détection était faite par un disque de carbone d'un diamètre de 35 mm et de 3 mm d'épaisseur : la réaction $(n, 2n)$ produit du C^{11} dont on compte après coup les désintégrations β , avec un compteur Geiger-Müller.

Le théoricien du laboratoire Robert Serber[◇] montra qu'on pouvait interpréter leurs résultats en admettant que le libre parcours moyen d'un neutron est assez grand, de l'ordre du rayon des noyaux⁸⁴. Ce résultat fit sensation, car depuis l'article de Bohr de 1936, on considérait que le libre parcours moyen d'un nucléon dans le noyau était au contraire très faible. Serber décrit plus en détail deux ans plus tard, en collaboration avec deux étudiants de Berkeley, la collision entre un neutron et un noyau⁸⁵. L'interaction du noyau et du neutron est décrite par un puits de potentiel carré avec une certaine absorption du neutron. Cela s'apparente à la traversée d'une sphère semi-transparente (ou semi-opaque, comme on voudra) par une onde lumineuse qui est réfractée et partiellement absorbée. Le calcul de Serber, Fernbach et Taylor explique globalement les données de diffusion et d'absorption de neutrons. La semi-transparence des noyaux aux neutrons paraît donc découler tout naturellement des données expérimentales. On a parlé pour ce modèle de « boule de cristal semi-opaque » (*cloudy crystal ball*) ou plus simplement de « modèle optique », en raison de l'analogie soulignée par Bethe.

12 TENTATIVES « OPTIQUES »

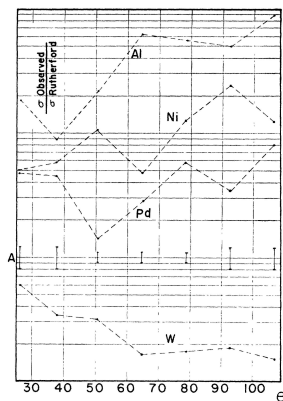


FIG. 12 — Premières distributions angulaires de la diffusion élastique de Burking et Wright.

Richardson, Ball, Leith et Moyer⁸⁷, analysées à l'aide du modèle optique, avec un puits carré. Pour la première fois on voit bien la structure de diffraction, qui est comparée au calcul du modèle de Serber, mais l'accord n'est que qualitatif⁸⁸. Puis vinrent des mesures faites à Princeton par Piet Gugelot[◇] avec des protons de 18 MeV⁸⁹, une véritable distribution angulaire, bien qu'elle ne fût mesurée que de 30 en 30 degrés. L'analyse par un théoricien de l'université de Californie à Los Angeles, David Saxon, et son étudiant Robert Le Levier, semble cette fois donner un résultat encourageant, même s'il n'est, encore une fois, que qualitatif⁹⁰. Le Levier et Saxon ont utilisé pour leurs calculs un modèle optique semblable à

Jusque-là, et pendant quelque temps encore, on ne va mesurer que de la « diffusion élastique ». On n'a pas encore de distribution angulaire, tout juste de grossières indications, comme les résultats de Jack Burking et Byron Wright⁸⁶ obtenus avec des protons de 18,6 MeV sur des noyaux allant de l'aluminium au tungstène. On en avait tiré des renseignements intéressants, comme le fait que les noyaux étaient partiellement transparents aux neutrons, mais il était difficile d'aller plus loin sans mesures nouvelles.

Peu à peu les physiciens allaient affiner leurs méthodes expérimentales et tenter la mesure de distributions angulaires. Notons les mesures de diffusion élastique de protons de 340 MeV faites à Berkeley par Richardson,

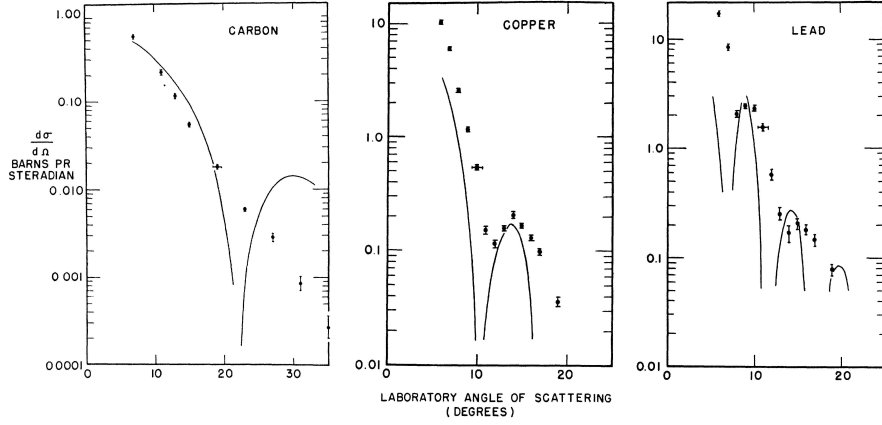


FIG. 13 — Distributions angulaires de la diffusion élastique de protons de 340 MeV, par Richardson, Ball, Leith et Moyer⁸⁷ sur le carbone, le cuivre et le plomb.

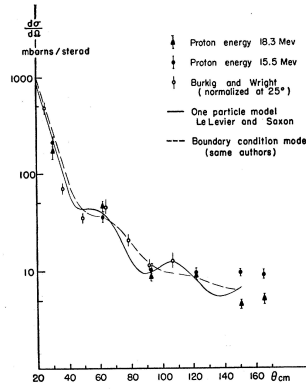


FIG. 1. Differential cross section for the elastic scattering of protons by Al

FIG. 14 — Distributions angulaires de protons sur l'aluminium par Gugelot⁸⁹.

celui de Serber.

Des mesures beaucoup plus précises de la diffusion élastique de protons d'une vingtaine de MeV sont ensuite publiées coup sur coup par Bernard Cohen[◇] et Rodger Neidigh à Oak Ridge*, et Irving Dayton à Princeton^{91, 92}. Il était évident alors que les calculs de Le Levier et Saxon ne donnaient pas de résultats satisfaisants, pas plus que ceux de deux physiciens de Princeton, David Chase et Fritz Rohrlich, qui avaient tenu compte de la répulsion coulombienne subie par les protons⁹³.

13 LE POTENTIEL OPTIQUE DE WOODS ET SAXON

Le 15 juillet 1954 paraît dans *Physical Review* une lettre à l'éditeur signée de deux physiciens de Los Angeles, Roger Woods (dont c'est le travail de thèse) et David Saxon, une lettre qui va tout changer⁹⁴. L'idée est pourtant simple, et même pas très originale : Woods et Saxon représentent le champ de force subi par le proton par un puits de potentiel à *bord diffus*. C'est un vrai potentiel « optique », obéissant aux prescriptions de Bethe⁹⁵, comprenant une absorption, elle aussi progressive, représentée par un terme imaginaire. Pour modéliser cette progressivité, Woods et Saxon prennent une formule simple, la plus simple possible :

$$V(r) = \frac{V + iW}{1 + e^{\frac{r-r_0}{a}}}$$

*Le laboratoire national d'Oak Ridge, dans le Tennessee, avait été créé pendant la guerre pour faire la séparation de l'uranium 235, nécessaire pour la bombe atomique.

Pourquoi Woods et Saxon sont-ils les premiers à faire un tel calcul ? C'est parce qu'*ils sont les premiers à utiliser un ordinateur*, la programmation ayant été faite par Roger Woods. Jusque-là en effet, tous les calculs se faisaient à la

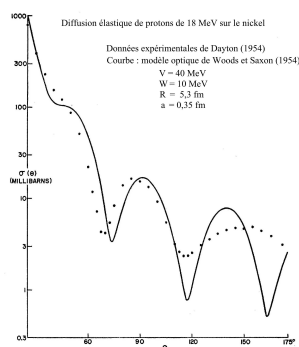


FIG. 15 — Diffusion élastique de protons de 18 MeV par le nickel. Les points expérimentaux sont ceux de Dayton⁹². La courbe théorique a été calculée par Saxon et Woods avec $V = 40$ MeV, $W = 10$ MeV, $r_0 = 5,3 \times 10^{-13}$ cm et $a = 0,35 \times 10^{-13}$ cm.

d'une formule mathématique dans laquelle on peut étudier le rôle des différents paramètres. Dans le cas où on résout le problème de façon purement numérique, on le fait pour un jeu de paramètres, et si l'on veut étudier le rôle de chaque paramètre, ce n'est donc pas un calcul qu'il faut faire, mais au bas mot des dizaines. Woods et Saxon précisent qu'il fallait entre 15 et 20 minutes à l'ordinateur qu'ils ont utilisé pour calculer une distribution angulaire, avec un jeu de paramètres. Cela peut paraître long, au regard de la fraction de seconde que prennent les ordinateurs actuels, mais c'était un progrès considérable en comparaison de calculs à la main.

Quant aux résultats, ils sont impressionnants : les calculs sont en très bon accord avec les données connues. Woods et Saxon montrent que l'ingrédient essentiel qui manquait jusque-là est bien le fait que le potentiel prend sa valeur progressivement, que sa surface est *diffuse*.

14 L'ORDINATEUR, INSTRUMENT DÉCISIF

L'ordinateur utilisé par Woods et Saxon portait le nom de SWAC, acronyme de *Standards West Automatic Computer*. C'était le premier ordinateur construit sur la côte ouest des États-Unis à l'*Institute for Numerical Analysis* de Los Angeles, un institut qui dépendait du *National Bureau of Standards**. La conception du premier ordinateur est due au mathématicien John von Neumann et à deux physiciens américains, John Presper Eckert et John Mauchly, qui analysèrent en 1945 les limitations du premier *calculateur* électronique, l'ENIAC (*Automatic Numerator, Analyser and Computer*) dont la construction avait été lancée secrètement pendant la guerre à la *Moore School of Electrical Engineering*, de l'université de Pennsylvanie⁹⁶. À la suite de discussions avec Eckert et Mauchly, von Neumann proposa dans un texte célèbre, *First Draft of a Report on the EDVAC*, qui date du 30 juin 1945, la construction du premier véritable *ordinateur*, l'*Electronic Discrete Variable Computer* (EDVAC). L'EDVAC entra en service en 1952, mais von Neumann avait quitté la *Moore School*, ainsi que Eckert et Mauchly qui avaient de leur côté fondé leur propre entreprise car ils croyaient à l'avenir commercial des ordinateurs. Après quelques vicissitudes, ils créèrent ainsi le premier ordinateur commercial, l'UNIVAC (*Universal Automa-*

*Le *National Bureau of Standards* est une agence gouvernementale qui dépend du Département du Commerce, et qui est chargée, depuis sa fondation en 1901, de « travailler avec l'industrie afin de développer et d'appliquer la technologie, les mesures et les standards » dans l'intérêt national. Depuis 1988 il est devenu le *National Institute of Standards and Technology* (NIST).

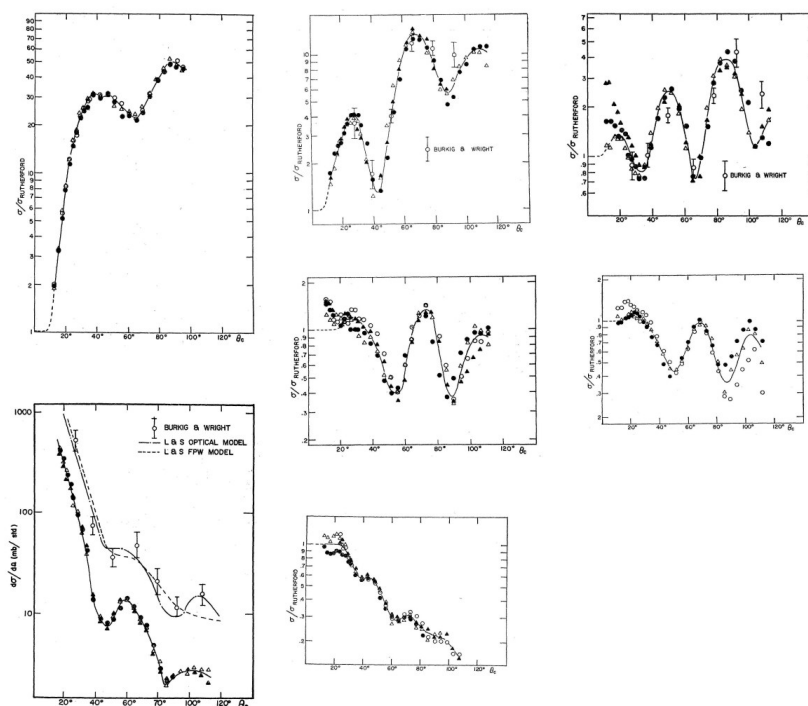


FIG. 16 — Distributions angulaires de la diffusion élastique de protons de 22 MeV sur divers éléments⁹¹.

tic Computer), mis sur le marché en 1951. De son côté von Neumann poursuivait son idée à l'*Institute for Advanced Study* de Princeton. Notons enfin que des travaux importants eurent lieu parallèlement en Grande-Bretagne, sous l'impulsion d'Alan Turing, le mathématicien qui avait réussi à déchiffrer pendant la guerre les messages allemands codés avec la fameuse machine *Enigma*.

Le SWAC appartient donc à la première génération de véritables ordinateurs, et sa mise en service le 17 août 1950 en fait l'un des tout premiers. Un mot sur ce que nous appelons « véritable ordinateur » : dans un *calculateur*, fût-il aussi puissant que l'ENIAC, on entre les données à analyser, puis les instructions sur les opérations à faire. Pour recommencer avec d'autres données, il faut entrer les nouvelles données puis les instructions. Même si le calcul est beaucoup plus rapide que sur une machine à additionner mécanique de bureau, on voit que la limitation est l'intervention humaine nécessaire à chaque étape. L'idée de von Neumann est d'enregistrer la suite des opérations dans la mémoire de l'ordinateur, et de le doter d'un système de commande interne qui provoque l'exécution des opérations, du *programme*, en recommençant un nombre de fois quelconque avec de nouvelles données. Le mot français *ordinateur* est ici particulièrement heureux : il s'agit bien d'ordonner la suite des opérations.

15 LES PREMIÈRES RÉACTIONS DIRECTES

Depuis l'observation de la première réaction nucléaire, provoquée par Rutherford en 1919, les physiciens ont tenté d'apprendre quelque chose sur le noyau en le bombardant avec tous les projectiles disponibles et en observant les réactions nucléaires ainsi provoquées. C'est de cette façon que Rutherford a démontré l'existence d'un noyau au centre de l'atome, que Frédéric et Irène Joliot-Curie ont découvert la radioactivité artificielle, que Fermi a découvert l'action des neutrons lents et que Hahn et Strassmann ont découvert la fission. Encore fallait-il comprendre le processus même de la réaction nucléaire. La description de ces réactions proposée par Niels Bohr avait tout de suite été adoptée, et pendant quelque dix ans on a cru pouvoir décrire de cette façon toutes les réactions

nucléaires, appelées un temps « réactions de transmutation ».

Dès 1939 Niels Bohr, dans un article écrit en collaboration avec Hans Bethe et George Placzek, avait toutefois évoqué une autre possibilité, dans le cas de particules de grande vitesse entrant en collision avec un noyau :

if a large system be hit by a fast particle, the energy of excitation may be localized in the neighbourhood of the point of impact, and the escape of fast particles from this neighbourhood may be more probable than in statistical equilibrium.⁹⁷

De nouvelles mesures expérimentales allaient bientôt donner corps à cette intuition. Elles allaient confirmer l'existence, dans certains cas, de réactions nucléaires dans lesquelles le noyau est peu perturbé, et où on peut déposer à sa surface un proton ou un neutron supplémentaire (par exemple), formant ainsi un noyau voisin.

15.1 À Berkeley, le stripping du deuton, ou comment « déshabiller » le deuton

Une équipe du laboratoire de Berkeley mesure en 1947 les neutrons émis lorsqu'elle bombarde huit éléments, allant du béryllium à l'uranium, avec des deutons de 190 MeV⁹⁸. Rappelons qu'un deuton est constitué par un proton et un neutron liés assez lâchement l'un à l'autre. Résultat inattendu : les neutrons sont détectés principalement dans la direction des deutons incidents ou à des angles assez faibles. Pour les auteurs ce résultat suggère que la réaction ne peut être décrite par la théorie du noyau composé de Bohr, selon laquelle les neutrons auraient dû au contraire partir dans toutes les directions. Il semble bien que, lors du passage près du noyau, le deuton se brise : le proton serait capturé, tandis que le neutron poursuivrait sa trajectoire en étant peu affecté par l'arrachage du proton auquel il n'est lié que par 2 MeV environ. Dans la même livraison de *Physical Review* Robert Serber interprète théoriquement ces résultats et appelle *stripping* ce type de réaction nucléaire dans laquelle une particule (ici un proton) est subtilisée à la particule incidente (le deuton dans notre cas)⁹⁹. Le verbe anglais *to strip* signifie *enlever*, *arracher* ou encore *déshabiller*, *effeuiller*. L'image est celle du deuton se retrouvant soudain tout nu, privé brutalement de sa robe de proton, devenu en fait un simple neutron. Le calcul de Serber permet de comprendre à la fois la valeur de la section efficace et aussi le fait que les neutrons soient émis préférentiellement dans la direction des deutons incidents. L'idée de Serber est simple : la vitesse du deuton est beaucoup plus grande que celles du proton et du neutron à l'intérieur du deuton, si bien que lorsque celui-ci passe près d'un noyau, le proton peut être capturé sans que le neutron ait le temps de réagir. Le neutron continue donc sa course et *dans ce cas il n'y a pas de formation de noyau composé*, le transfert du proton se faisant *directement*. Le deuton a tout de même subi une petite déviation dans la phase d'approche, ce qui se répercutera sur la trajectoire du neutron après la réaction.

Le calcul de Serber n'était justifié que pour des deutons de grande vitesse, mais il allait être adapté avec succès à des énergies plus faibles par un doctorant de Weisskopf au MIT, David Peaslee¹⁰⁰. Cependant tous ces calculs et toutes ces expériences ne concernaient que les nombres de neutrons globaux, émis à tous les angles, et possédant toutes sortes d'énergies.

15.2 Birmingham : les distributions angulaires, Stuart Butler

À Liverpool, le cyclotron construit par James Chadwick fournit des deutons de 8 MeV que trois physiciens (dont une physicienne), Hannah Burrows, William Gibson et Josef Rotblat, utilisent pour faire des mesures plus précises en bombardant de l'oxygène et en détectant des protons¹⁰¹. C'est ici un neutron qui a été capturé par le noyau d'oxygène 16, qui devient ainsi de l'oxygène 17. Pour mesurer la distribution angulaire des protons aussi bien que leurs énergies, c'est

la technique de l'émulsion photographique qui est utilisée*. Les résultats sont surprenants : la distribution angulaire n'est pas la même suivant qu'il s'agit des protons correspondant à l'état fondamental de l'oxygène 17 ou d'un état excité. Par ailleurs ces distributions angulaires ont un aspect oscillant : dans le cas de l'état fondamental, on trouve un maximum de protons déviés vers 34° , puis un minimum vers 85° , puis un nouveau maximum, moins élevé, vers 120° , etc.

C'est un jeune physicien australien qui va faire la théorie du *stripping* du deuton par arrachage d'un neutron, et surtout le premier calcul de cette fameuse distribution angulaire des protons¹⁰². Né en 1926, brillant étudiant, Stuart Butler a obtenu une bourse pour faire une thèse de physique théorique à Birmingham sous la direction de Rudolf Peierls. Il prend un modèle très schématique : négligeant l'interaction entre le proton et le neutron du deuton, il égale la fonction d'onde entrante du neutron avec celle d'un neutron sur une orbite dans le noyau. Butler découvre une chose importante : la forme de la distribution angulaire *caractérise le moment angulaire du noyau d'oxygène 17 formé*.

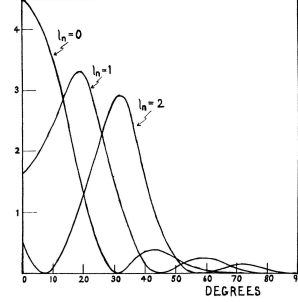


FIG. 18 — Les distributions angulaires de stripping calculées par Butler dans son premier calcul¹⁰²

Butler applique immédiatement cette théorie aux résultats expérimentaux de Hannah Burrows, Gibson et Rotblat que nous venons de mentionner, ainsi qu'à ceux de deux autres physiciens britanniques, J. R. Holt et C. T. Young, qui avaient mesuré peu de temps auparavant la distribution angulaire des protons libérés dans le bombardement de l'aluminium par des deutons¹⁰³.

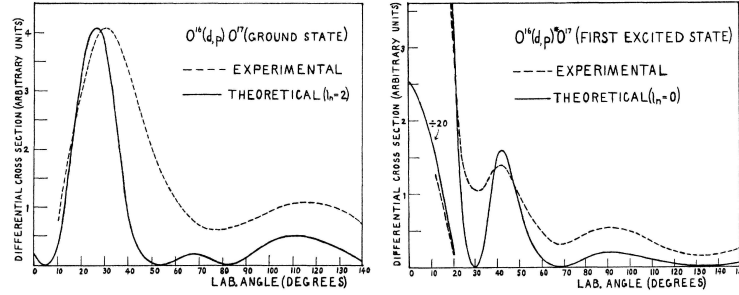


FIG. 19 — Comparaison entre les distributions angulaires expérimentales et les calculs de Butler.

Ce phénomène a une portée considérable : en bombardant un noyau *pair-pair*, on peut déterminer les nombres quantiques qui caractérisent son voisin, l'isotope possédant un neutron de plus. Butler précisera peu après son calcul dans un article plus détaillé¹⁰⁴. Comme presque toujours en physique, son calcul comporte des approximations qui le rendent possible :

- Butler a négligé l'interaction coulombienne entre le deuton (puis le proton) et le noyau.
- les deutons ainsi que les protons sont traités comme des ondes planes.
- Il suppose de plus qu'on passe sans aucune étape, de façon soudaine, du système (deuteron + noyau) au système (proton + noyau ayant capturé un neutron).

15.3 Succès et développement de la théorie de Butler

Déterminer de façon assez simple et rapide les propriétés des états formés lors d'une réaction nucléaire de *stripping*, en premier lieu le spin, voilà ce que

*La trace laissée par la particule dans l'émulsion permet tout à la fois de confirmer qu'il s'agit d'un proton (par son épaisseur), de déterminer son énergie (par sa longueur) et enfin de déterminer l'angle de diffusion).

promettait la théorie de Butler. Elle arrivait en même temps que la théorie du modèle des couches du noyau, de Maria Goeppert-Mayer et Hans Jensen. Les réactions de stripping du deuton laissaient entrevoir une véritable spectroscopie nucléaire. Joseph Rotblat par exemple détermine de cette façon les caractéristiques de deux états du carbone ^{13}C ¹⁰⁵.

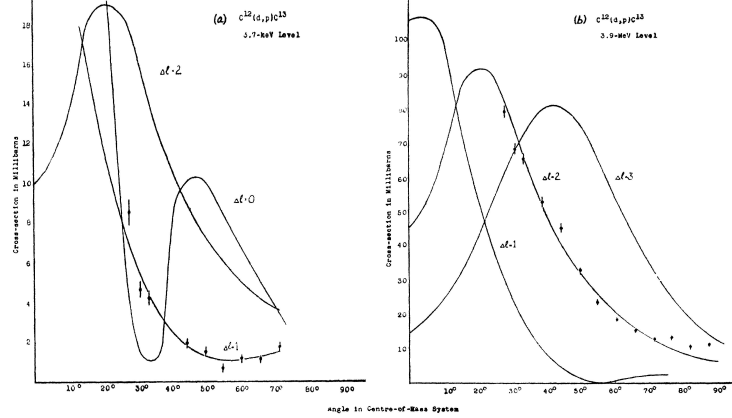


FIG. 20 — Distributions angulaires de la réaction $^{12}\text{C}(d,p)^{13}\text{C}$ montrant les attributions de spins pour deux états du carbone 13, mesurées par Rotblat¹⁰⁵.

Parallèlement plusieurs travaux théoriques sont consacrés aux approximations faites par Butler, avec l'espoir d'améliorer les résultats. Ce sont tout d'abord deux physiciens américains, Paul Daitch et Bruce French qui montrent que l'approximation de Butler est équivalente à l'approximation que Max Born avait introduite dans un fameux article sur la collision d'un électron et d'un noyau : il considérait des trajectoires rectilignes pour la particule entrante, traitant l'interaction avec le noyau comme une petite perturbation^{106,107}. C'est ce qu'on appelle depuis *l'approximation de Born*.

Deux jeunes physiciens français, Jules Horowitz et Albert Messiah, s'attaquent alors au problème et montrent qu'on améliore les choses en prenant non pas des trajectoires rectilignes mais en tenant compte de la courbure des trajectoires dues à l'action du noyau. En langage quantique (car leur calcul est quantique, cela va sans dire), on dit que la fonction d'onde des deutons et protons avant et après collision n'est pas une onde plane, mais une onde quelque peu déformée par le champ de force du noyau. Ils considèrent que l'intérieur du noyau est inaccessible au deuton. Pour des raisons de commodité, Horowitz et Messiah négligent eux aussi l'interaction coulombienne due à la répulsion électrique¹⁰⁸. L'intérêt de leur approche est d'être un calcul plus rigoureux, où les approximations sont bien identifiées, si bien que les améliorations apparaissent d'elles-mêmes, si l'on peut dire. Nous verrons bientôt comment elles seront exploitées.

Deux physiciens américains, Norman Francis et Kenneth Watson sont arrivés de leur côté à un résultat assez proche : on peut généraliser l'approximation de Born en ne prenant plus de trajectoires rectilignes, des ondes planes en langage quantique, mais les ondes telles qu'on peut les calculer avec un *modèle optique*, l'intérieur du noyau étant dans ce cas rendu complètement absorbant. D'ailleurs Francis et Watson proposent d'appeler leur théorie « le modèle optique des réactions de *stripping* »¹⁰⁹. Mais pas plus que Horowitz et Messiah ils ne font de calcul numérique, impossible sans ordinateur. L'idée d'Horowitz et Messiah est reprise ensuite par un physicien américain, William Tobocman, qui propose de modifier l'approximation de Born, en tenant compte de l'interaction coulombienne aussi bien que nucléaire avec le noyau, et en éliminant l'intérieur du noyau grâce à un traitement mathématique un peu différent¹¹⁰. Tobocman précise que le calcul demandera l'usage d'un ordinateur. Il entreprend alors ce calcul en collaboration avec Malvin Kalos¹¹¹.

C'est le premier calcul complet d'une réaction de *stripping* utilisant

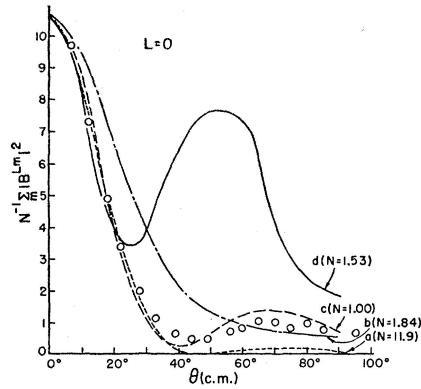


FIG. 21 — Comparaison des résultats expérimentaux de la réaction $^{19}\text{F}(d, p)$ pour $L = 0$: (a) théorie de Butler simple, (b) théorie de Butler en tenant compte de l'interaction coulombienne ; (c) calcul de Tobocman et Kalos avec absorption des protons et (d) avec réflexion des protons¹¹¹.

première théorie de Butler. Tobocman et Kalos utilisent le tout premier ordinateur construit par IBM pour le centre de calcul de l'université de Cornell. C'est le *card-programmed calculator*, ou CPC, un appareil où les données et instructions de calcul sont perforées dans des cartes de bristol.

Sous le nom de *distorted-wave Born approximation*, ou approximation de Born avec des ondes déformées, en abrégé DWBA, employé pour la première fois par R. G. Thomas^{112, 113}, cette méthode va se répandre rapidement, pour devenir la référence.

15.4 DWBA et ordinateur, une union indissoluble

Pourquoi a-t-il fallu attendre 1954 pour faire un tel calcul ? L'idée à la base de cette méthode datait en fait des années trente, pour décrire la collision entre un électron et un atome, son ionisation par exemple (arrachage d'un de ses électrons). Dans ce cas, l'approximation de Born originale, avec des trajectoires rectilignes (des ondes planes, en langage quantique) donnait de moins bons résultats que la méthode « des fonctions d'onde déformées », qui tenait compte de la déviation des électrons par l'action de l'atome¹¹⁴.

Il est vrai que Bethe avait écrit, dans le deuxième des fameux articles de 1936-1937 :

Dans le cas des atomes, cette méthode est bien meilleure que l'approximation de Born, qui néglige l'interaction entre l'atome et l'électron incident.

Par contre, la méthode des fonctions d'onde déformées n'est pas du tout applicable à la physique nucléaire¹¹⁵.

Bethe avançait deux arguments contre cette méthode :

- l'argument de Bohr contre l'idée d'un champ de force moyen : une particule entrant dans le noyau subit de très nombreuses collisions, sa trajectoire est chaotique ;
- la faible énergie des particules, ce qui interdisait de considérer l'interaction entre le noyau et la particule comme une petite perturbation de sa trajectoire.

Le premier argument avait beaucoup perdu de sa force avec le surprenant succès du modèle des couches, qui décrivait le noyau par une organisation des nucléons en couches successives, chacun ayant un mouvement à l'intérieur du noyau quasi-indépendant des autres. Quant au second, il était beaucoup moins pertinent en 1950 qu'en 1937, car les nouveaux accélérateurs fournissaient désormais des particules, des deutons par exemple, d'énergie beaucoup plus grande.

l'approximation de Born modifiée. Les particules incidentes et émergentes sont représentées non par des ondes planes, mais par des ondes que l'interaction entre le deuton ou le proton avec le noyau ont déformées, ce qui équivaldrait classiquement à remplacer des trajectoires rectilignes par des trajectoires déviées par l'influence du noyau. La réussite de la méthode est éclatante pour le calcul des distributions angulaires de *stripping*, dont les résultats sont très proches des valeurs expérimentales, et non plus seulement qualitativement comme dans la

Mais le fait qui semble vraiment décisif dans l'emploi et le succès de la DWBA est sans nul doute *la possibilité de faire le calcul*, grâce aux premiers ordinateurs. Le but de la théorie en physique est de proposer, pour décrire les phénomènes, des équations permettant de calculer telle ou telle grandeur, comme la position d'une planète à un instant déterminé. La théorie comprend donc à la fois les grands principes et les moyens de calculs adéquats : une équation tout à fait insoluble n'est pas d'un grand secours. Devant une équation difficile ou impossible à résoudre exactement, l'art du physicien consiste à trouver la bonne approximation. Jusqu'au début des années cinquante, on recherchait des méthodes permettant de faire les calculs à la main, avec comme seuls outils du papier, un crayon et des tables de fonctions mathématiques courantes (logarithmes, sinus, cosinus, exponentielle, etc.). L'avènement de l'ordinateur a permis soudain de faire des calculs beaucoup plus longs en un temps raisonnable. La DWBA est, avec le modèle optique dont elle est sœur, le premier exemple d'une théorie qui ne pouvait pas exister sans lui.

16 APRÈS LES ANNÉES CINQUANTE

Les idées de base sont désormais en place, mais des développements considérables, tout à la fois expérimentaux et théoriques, sont encore à venir. Le développement de l'informatique dont on vient d'assister aux premiers pas sera l'un des éléments cruciaux de l'époque. Mais l'histoire n'est pas finie. Malgré les progrès considérables qui ont été réalisés depuis cinquante ans, les physiciens se battent encore pour améliorer la description des réactions nucléaires afin de mieux comprendre la structure nucléaire.

RÉFÉRENCES

1. A. Henri BECQUEREL, Sur quelques propriétés nouvelles des radiations invisibles émises par divers corps phosphorescents. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 122:559–64, séance du 9 mars 1896.
2. Ernest RUTHERFORD, Uranium radiation and the electrical conduction produced by it. *Philosophical Magazine*, 47:109–163, janvier 1899.
3. William CROOKES, Certain properties of the emanations of radium. *Chemical News*, 87:241, 22 mai 1903.
4. Ernest RUTHERFORD, A radio-active substance emitted from thorium compounds. *Philosophical Magazine*, 49:1–14, janvier 1900.
5. Ernest RUTHERFORD et Frederick SODDY, The Cause and Nature of Radioactivity. Part I. *Philosophical Magazine*, 4:376–396, septembre 1902.
6. Ernest RUTHERFORD et Frederick SODDY, The Cause and Nature of Radioactivity. Part II. *Philosophical Magazine*, 4:569–585, novembre 1902.
7. Ernest RUTHERFORD, *Radioactive transformations*. Charles Scribner's Sons, New York, 1906.
8. Ernest RUTHERFORD, Some properties of the α rays from radium. *Philosophical Magazine*, 11:166–76, janvier 1906.
9. John Sealy TOWNSEND, The conductivity of gases by the motion of negatively charged ions. *Philosophical Magazine*, 1:198–227, février 1901.
10. John S. TOWNSEND et P. J. KIRKBY, Conductivity produced in hydrogen an carbonic acid gas by the motion of negatively charged ions. *Philosophical Magazine*, 1:630–42, juin 1901.
11. John S. TOWNSEND, The conductivity produced in gases by the aid of ultra-violet light. *Philosophical Magazine*, 3:557–76, juin 1902.
12. John S. TOWNSEND, The conductivity produced in gases by the aid of ultra-violet light. *Philosophical Magazine*, 5:389–98, avril 1903.

13. John S. TOWNSEND, The genesis of ions by the motion of positive ions in a gas and a theory of the sparking potential. *Philosophical Magazine*, 6:598–618, novembre 1903.
14. P. J. KIRKBY, On the electrical conductivities produced in air by the motion of negative ions. *Philosophical Magazine*, 3:212–25, février 1902.
15. Ernest RUTHERFORD et Hans GEIGER, A method of counting the number of α -particles from radio-active matter. *Memoirs of the Manchester Literary and Philosophical Society*, 52:1–3, 1908.
16. Ernest RUTHERFORD, Recent advances in radio-activity. *Nature*, 77:422–6, 5 mars 1908.
17. Ernest RUTHERFORD et Hans GEIGER, The charge and nature of the α -particle. *Proceedings of the Royal Society, London*, A81:162–173, 18 juin 1908.
18. Mme SKŁODOWSKA-CURIE, Sur la pénétration des rayons de Becquerel non déviés par le champ magnétique. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 130:76–79, séance du 8 janvier 1900.
19. William Henry BRAGG, On the absorption of α rays, and on the classification of the α rays from radium. *Philosophical Magazine*, 8:719–25, décembre 1904.
20. William Henry BRAGG et Richard Daniel KLEEMAN, On the ionization curves of radium. *Philosophical Magazine*, 8:726–39, décembre 1904.
21. William Henry BRAGG et Richard Daniel KLEEMAN, On the α particles of radium, and their loss of range in passing through various atoms and molecules. *Philosophical Magazine*, 10:318–40, septembre 1905.
22. Hans GEIGER, On the scattering of α particles by matter. *Proceedings of the Royal Society, London*, A81:174–77, août 1908.
23. Hans GEIGER, The Scattering of the α -Particle by Matter. *Proceedings of the Royal Society, London*, A83:492–504, 17 février 1910.
24. Hans GEIGER et Ernest MARSDEN, On a diffuse reflection of the α -particles. *Proceedings of the Royal Society, London*, A82:495–500, 1909.
25. Ernest RUTHERFORD, The scattering of α and β particles by matter and the structure of the atom. *Proceedings of the Manchester Literary and Philosophical Society*, IV, 55:18–20, 1911.
26. Ernest RUTHERFORD, The scattering of α and β particles by matter and the structure of the atom. *Philosophical Magazine*, 21:669–98, mai 1911.
27. Samuel EARNSHAW, On the nature of the molecular forces which regulate the constitution of the luminiferous ether. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, 7:97, 1842.
28. Ernest RUTHERFORD, The origin of β and γ rays from radioactive substances. *Philosophical Magazine*, 24:453–62, octobre 1912.
29. Ernest RUTHERFORD, *Popular Science Monthly*, août 1915, cité par N. Feather, *Lord Rutherford*, Londres, Priory Press, 1975, p 144.
30. Ernest MARSDEN, The Passage of α -particles through Hydrogen. *Philosophical Magazine*, 27:824–30, mai 1914.
31. Ernest MARSDEN et W. C. LANTSBERRY, The Passage of α particles through Hydrogen. II. *Philosophical Magazine*, 30:240–43, août 1915.
32. Charles DARWIN, Collisions of α particles with light atoms. *Philosophical Magazine*, 27:499–507, 1914.
33. Ernest RUTHERFORD, Collision of α -Particles with Light Atoms. I. Hydrogen. *Philosophical Magazine*, 37:537–61, juin 1919.
34. Ernest RUTHERFORD, Collision of α -Particles with Light Atoms. II. Velocity of the Hydrogen Ions. *Philosophical Magazine*, 37:562–71, juin 1919.

35. Ernest RUTHERFORD, Collision of α particles with light atoms. III. Nitrogen and Oxygen Atoms. *Philosophical Magazine*, 37:571–80, juin 1919.
36. Ernest RUTHERFORD et James CHADWICK, The disintegration of elements by α -particles. *Nature*, 107:41, 10 mars 1921.
37. Ernest RUTHERFORD et James CHADWICK, The artificial disintegration of light elements. *Philosophical Magazine*, 42:809–825, novembre 1921.
38. Ernest RUTHERFORD et James CHADWICK, The disintegration of elements by α particles. *Philosophical Magazine*, 44:417–432, septembre 1922.
39. Ernest RUTHERFORD et James CHADWICK, Further experiments on the artificial disintegration of elements. *Proceedings of the Physical Society*, 36:417–422, août 1924.
40. Gerhard KIRSCH et Hans PETTERSSON, Experiments on the artificial disintegration of atoms. *Philosophical Magazine*, 47:500–12, mars 1924.
41. Gerhard KIRSCH et Hans PETTERSSON, The artificial disintegration of atoms. *Nature*, page 603, 26 avril 1924.
42. Ernest RUTHERFORD et James CHADWICK, The bombardment of elements by α -particles. *Nature*, 113:457, 29 mars 1924.
43. Ernest RUTHERFORD, *Lettre à Stefan Meyer* datée du 23 décembre 1926, dans A. Brown, *The Neutron and the Bomb. A biography of Sir James Chadwick*, Oxford University Press, 1997, p. 84.
44. James CHADWICK, *Lettre de Chadwick à Rutherford*, datée du 12 décembre 1927, dans A. Brown, *The Neutron and the Bomb. A biography of Sir James Chadwick*, Oxford University Press, 1997 p. 84.
45. Hans GEIGER et Ernest RUTHERFORD, Photographic registration of α particles. *Philosophical Magazine*, 24:618–23, octobre 1912.
46. Hans GEIGER, Über eine einfache Methode zur Zählung von α und β -Strahlen. *Verhandlungen der deutschen physikalischen Gesellschaft*, 15:534–539, séance du 27 juillet 1913.
47. Hans GEIGER, Demonstration einer einfachen Methode zur Zählung von α - und β -Strahlen. *Physikalische Zeitschrift*, 14:1129, 15 novembre 1913.
48. Hans GEIGER, Sur une méthode simple de numération des rayons α et β . *Le Radium*, 10:316–18, 1913.
49. Hans GEIGER et Otto KLEMPERER, Beitrag zur Wirkungsweise des Spitzenzähler. *Zeitschrift für Physik*, 49:753–60, 1928.
50. Hans GEIGER et Walter MÜLLER, Das Elektronen-zählrohr. *Physikalische Zeitschrift*, 29:839–41, 15 novembre 1928.
51. Hermann GREINACHER, Über die akustische Beobachtung und galvanometrische Registrierung von Elementarstrahlen und Einzelionen. *Zeitschrift für Physik*, 23:361–78, 1924.
52. Hermann GREINACHER, Eine neue Methode zur Messung der Elementarstrahlen. *Zeitschrift für Physik*, 36:364–73, 1926.
53. Hermann GREINACHER, Über die Registrierung von α - und H-Strahlen nach der neuen elektrischen Zählmethode. *Zeitschrift für Physik*, 44:319–25, 1927.
54. Irène CURIE et Frédéric JOLIOT, Émission de protons de grande vitesse par les substances hydrogénées sous l'influence des rayons γ très pénétrants. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 194:273–275, séance du 18 janvier 1932.
55. James CHADWICK, Possible existence of a neutron. *Nature*, 129:312, 27 février 1932.
56. James CHADWICK, The existence of a neutron. *Proceedings of the Royal Society, London*, A136:692–708, 1932.

57. John Douglas COCKCROFT et Ernest Thomas Sinton WALTON, Disintegration of lithium by swift protons. *Nature*, 129:649, 30 avril 1932.
58. Institut International de Physique SOLVAY, éditeur. *Structure et propriétés des noyaux atomiques, rapports et discussions du septième Conseil de Physique, Bruxelles, 22 au 29 octobre 1933*. Gauthier-Villars, Paris, 1934.
59. Irène CURIE et Frédéric JOLIOT, Un nouveau type de radioactivité. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 198:254–56, séance du 15 janvier 1934.
60. Irène CURIE et Frédéric JOLIOT, Séparation chimique des nouveaux radioéléments émetteurs d'électrons positifs. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 198:559–61, 29 janvier 1934.
61. Irène CURIE et Frédéric JOLIOT, Artificial production of a new kind of radio-elements. *Nature*, 133:201–2, 10 février 1934.
62. Enrico FERMI, Radioattività indotta da bombardamento di neutroni. — I. *Ricerca Scientifica*, 5:283, 1934.
63. Enrico FERMI, Radioattività provocata da bombardamento di neutroni.— II. *Ricerca Scientifica*, 5:330–31, 1934.
64. Enrico FERMI, Radioactivity induced by neutron bombardment. *Nature*, 133:757 (L), 19 mai 1934.
65. Enrico FERMI, Edoardo AMALDI, Oscar D'AGOSTINO, Franco RASETTI et Emilio SEGRÈ, Artificial radioactivity produced by neutron bombardment. *Proceedings of the Royal Society, London*, A146:483–500, 1934.
66. P. B. MOON et J. R. TILLMAN, Evidence on the Velocity of 'Slow' Neutrons. *Nature*, 135:904, 12 avril 1935.
67. Léon ARSIMOVITCH, Igor KOURTSCHATOV, Léon MIÇOVSKIĭ et Pierre PALIBIN, Au sujet de la capture des neutrons lents par un noyau. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 200:2159–2162, séance du 24 juin 1935.
68. J. R. TILLMAN et P. B. MOON, Selective absorption of slow neutrons. *Nature*, 136:66–67, 13 juillet 1935.
69. T. BJERGE et C. H. WESTCOTT, On the slowing down of neutrons in various substances containing hydrogen. *Proceedings of the Royal Society, London*, A150:709, 1^{er} mai 1935.
70. Leo SZILARD, Absorption of residual neutrons. *Nature*, 136:950–951, 14 décembre 1935.
71. Franco RASETTI, Emilio SEGRÈ, G.A. FINK, J. R. DUNNING et G. B. PEGRAM, On the absorption law for slow neutrons. *Physical Review*, 49:104 (L), 1^{er} janvier 1936.
72. Edoardo AMALDI et Enrico FERMI, Sopra l'assorbimento e la diffusione dei neutroni lenti. *Ricerca Scientifica*, 7:454–503, 1936.
73. Enrico FERMI et Edoardo AMALDI, Sull'assorbimento dei neutroni lenti. — II. *Ricerca Scientifica*, 6:443–437, 1935.
74. Niels BOHR, Transmutations of atomic nuclei. *Science*, 86:161–165, 20 août 1937.
75. Hans Albrecht BETHE et George PLACZEK, Resonance Effects in Nuclear Processes. *Physical Review*, 51:450–84, 15 mars 1937.
76. V. I. VEKSLER, A new method for acceleration of relativistic particles. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de l'URSS*, 43:329–331, 1944.
77. Edwin McMILLAN, The synchrotron—a proposed high energy particle accelerator. *Physical Review*, 68:143–144 (L), 1^{er} septembre 1945.
78. Z. BAY, Electron Multiplier as an Electron Counting Device. *Review of Scientific Instruments*, 12:127–133, mars 1941.

79. Z. BAY, Elektronenvervielfacher als Elektronen-zähler. *Zeitschrift für Physik*, 117:227–245, 1941.
80. W. K. ZWORYKIN, G. A. MORTON et L. MALTER, The secondary emission multiplier—a new electronic device. *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, 24:351–375, mars 1936.
81. Vladimir Kosma ZWORYKIN et J. A. RAJCHMAN, The electrostatic electron multiplier. *IRE Proceedings*, 27:558–566, septembre 1939.
82. J. M. MCKENZIE et D. A. BROMLEY, Observation of charged-particle reaction products. *Physical Review Letters*, 2:303–305, 1^{er} avril 1959.
83. Leslie G. COOK, Edwin M. MCMILLAN, Jack M. PETERSON et Duane C. SEWELL, Total Cross Sections of Nuclei for 90-Mev Neutrons. *Physical Review*, 72:1264–1265, 15 décembre 1947.
84. Robert SERBER, Nuclear reactions at high energies. *Physical Review*, 72:1114–1115, 1^{er} décembre 1947.
85. S. FERNBACH, Robert SERBER et T. B. TAYLOR, The scattering of high energy neutrons by nuclei. *Physical Review*, 75:1352–1355, 1^{er} mai 1949.
86. Jack W. BURKIG et Byron T. WRIGHT, Survey experiment on elastic scattering. *Physical Review*, 82:451–452, 1^{er} mai 1951.
87. R. E. RICHARDSON, W. P. BALL, C. E. LEITH et B. J. MOYER, Elastic Scattering of 340-Mev Protons. *Physical Review*, 83:859–860 (L), 15 août 1951.
88. Kantilal M. GATHA et R. J. RIDDELL, Jr., An investigation into the nuclear scattering of high energy protons. *Physical Review*, 86:1035–1039, 15 juin 1952.
89. P. C. GUGELOT, Some Data on the Elastic Scattering of 18.3-Mev Protons. *Physical Review*, 87:525–526, 1^{er} août 1952.
90. Robert E. LE LEVIER et David S. SAXON, An optical model for nucleon-nuclei scattering. *Physical Review*, 87:40–41, 1^{er} juillet 1952.
91. Bernard L. COHEN et Rodger V. NEIDIGH, Angular Distributions of 22-Mev Protons Elastically Scattered by Various Elements. *Physical Review*, 93:282–287, 15 janvier 1954.
92. Irving E. DAYTON, The Elastic Scattering of 18-Mev Protons by Al, Fe, Ni, and Cu. *Physical Review*, 95:754–758, 1^{er} août 1954.
93. D. M. CHASE et F. ROHRICH, Elastic scattering of protons by nuclei. *Physical Review*, 94:81–86, 1^{er} avril 1954.
94. Roger D. WOODS et David D. SAXON, Diffuse surface optical model for nucleon-nuclei scattering. *Physical Review*, 95:577–578, 15 juillet 1954.
95. Hans A. BETHE, A continuum theory of the compound nucleus. *Physical Review*, 57:1125–1144, 15 juin 1940.
96. Philippe BRETON, *Une histoire de l'informatique*. Le Seuil, Paris, 1987.
97. Niels BOHR, Rudolf PEIERLS et George PLACZEK, Nuclear reactions in the continuous energy region. *Nature*, 144:200–201, 29 juillet 1939.
98. A. C. HELMHOLZ, Edwin M. MCMILLAN et Duane C. SEWELL, Angular Distribution of Neutrons from Targets Bombarded by 190-Mev Deuterons. *Physical Review*, 72:1003–1007, 1^{er} décembre 1947.
99. Robert SERBER, The production of high energy neutrons by stripping. *Physical Review*, 72:1008–1016, 1^{er} décembre 1947.
100. David C. PEASLEE, Deuteron-induced reactions. *Physical Review*, 74:1001–1013, 1^{er} novembre 1948.
101. Hannah B. BURROWS, William Martin GIBSON et Joseph ROTBLAT, Angular Distributions of Protons from the Reaction $O^{16}(d,p)O^{17}$. *Physical Review*, 80:1095, 15 décembre 1950.
102. Stuart Thomas BUTLER, On angular distributions from (d,p) and (d,n) nuclear reactions. *Physical Review*, 80:1095–1096 (L), 15 décembre 1950.

103. J. R. HOLT et C. T. YOUNG, The Angular Distribution of Protons from the Reaction $^{27}\text{Al}(d,p)^{28}\text{Al}$. *Proceedings of the Physical Society*, 68:833–838, août 1950.
104. Stuart Thomas BUTLER, Angular distributions from (d,p) and (d,n) nuclear reactions. *Proceedings of the Royal Society, London*, A202:559–579, 2 septembre 1951.
105. Joseph ROTBLAT, The Spins and Parities of the 3.7-3.9-Mev Doublet in C^{13} . *Physical Review*, 83:1271–1272, 15 septembre 1951.
106. Max BORN, Zur quantenmechanik der stoßprozesse (vorläufige mitteilung). *Zeitschrift für Physik*, 37:863–867, 1926.
107. Max BORN, Zur quantenmechanik der stoßprozesse. *Zeitschrift für Physik*, 38:807–827, 1926.
108. Jules HOROWITZ et Albert M. L. MESSIAH, The mechanism of stripping reactions. *Physical Review*, 92:1326–1327, 1^{er} décembre 1953.
109. N. C. FRANCIS et Kenneth M. WATSON, The theory of the deuteron stripping reactions. *Physical Review*, 93:313–317, 15 janvier 1954.
110. William TOBOCMAN, Theory of the (d,p) reaction. *Physical Review*, 94:1655–1663, 15 juin 1954.
111. William TOBOCMAN et M. H. KALOS, Numerical calculation of (d, p) angular distributions. *Physical Review*, 97:132–136, 1^{er} janvier 1955.
112. R. G. THOMAS, Collision matrices for the compound nucleus. *Physical Review*, 97:224–237, 1^{er} janvier 1955.
113. R. G. THOMAS, Collision matrix for (n, d) and (p, d) reactions. *Physical Review*, 100:25–32, 1^{er} octobre 1955.
114. Nevill Francis MOTT et Harrie Stewart Wilson MASSEY, *The Theory of atomic collisions*. Clarendon Press, Oxford, 1933. p. 100.
115. Hans Albrecht BETHE, Nuclear Physics. B. Nuclear Dynamics, Theoretical. *Reviews of Modern Physics*, 9:69–244, avril 1937.
116. Hans Albrecht BETHE et Robert F. BACHER, Nuclear Physics. A. Stationary States of Nuclei. *Reviews of Modern Physics*, 8:82–229, avril 1936.
117. M. Stanley LIVINGSTON et Hans A. BETHE, Nuclear Physics. C. Nuclear Dynamics, Experimental. *Reviews of Modern Physics*, 9:245–390, juillet 1937.
118. Ettore MAJORANA, Über die Kerntheorie. *Zeitschrift für Physik*, 82:137–145, 1933.
119. Edoardo AMALDI, George Placzek. *Ricerca Scientifica*, 26:2038–2042, juillet 1956.

QUELQUES NOTICES BIOGRAPHIQUES

Amaldi, Edoardo

Edoardo Amaldi (Carpaneto Piacentino, 5 septembre 1908 – Rome, 5 décembre 1989) a commencé des études d'ingénieur, puis est entré dans la toute jeune équipe que Fermi constituait en 1928. Il a participé aux côtés de Fermi aux travaux sur les neutrons jusqu'en 1938, date à laquelle Fermi quitta l'Italie. Il fut nommé à la chaire de physique expérimentale de l'université de Rome, poste qu'il occupa 41 ans. Il réorganisa par la suite les études de physique en Italie, fut un des créateurs de l'INFN *Laboratorio Europeo per la Fisica delle Particelle*) et co-fondateur du CERN. Outre la physique nucléaire, Amaldi travailla sur la théorie des monopoles magnétiques et des ondes gravitationnelles. Convaincu de la nécessité de supprimer les armes nucléaires, il était membre du mouvement Pugwash.

Bethe, Hans Albrecht

Hans Albrecht Bethe était un physicien américain d'origine allemande. Il est né le 2 juillet 1906 à Strasbourg alors allemande et mort le 6 mars 2005 à Ithaca, dans l'état de New York. Études universitaires à Francfort, puis doctorat à Munich sous la direction de Sommerfeld. Il fit ensuite des séjours post-doctoraux à Cambridge et à Rome auprès de Fermi qui l'impressionna beaucoup. À l'arrivée des nazis au pouvoir en Allemagne il fut chassé de son poste d'enseignement à l'Université de Tübingen, et partit tout d'abord en Grande Bretagne, où il travailla sur la photodésintégration du deuton. Puis en 1935 il obtint un poste de professeur à l'Université Cornell aux États-Unis, où il devait faire toute sa carrière. Il fut très vite reconnu comme l'un des maîtres de la physique nucléaire. Ses trois articles de 1936-37 dans *Review of Modern Physics* ont été longtemps considérés comme la bible des physiciens¹¹⁵⁻¹¹⁷. Pendant la guerre il participa au projet Manhattan, puis eut une attitude très critique vis-à-vis de l'armement nucléaire, et particulièrement de la bombe à hydrogène. Il fut lauréat du prix Nobel de physique en 1967 pour sa contribution à la compréhension de la nucléosynthèse stellaire.

Bothe, Walther

Walther Bothe (8 janvier 1891 - 2 août 1957) est né à Oranienburg, près de Berlin. Il fut élève de Max Planck à l'université de Berlin, et obtint son doctorat en 1913. Il est alors nommé assistant de Hans Geiger au *Physikalisch-technische Reichsanstalt* de Berlin. Au cours de la guerre de 1914-1918, il est fait prisonnier par les Russes et envoyé en Sibérie. Il y étudie les mathématiques et épouse une Russe, Barbara Below. Il revient au *Physikalisch-technische Reichsanstalt* en 1920, et développe des méthodes de comptage électriques avec Hans Geiger avec qui il a des liens d'amitié.

En 1924 il fait avec Geiger la première expérience en coïncidence pour vérifier la conservation de l'impulsion dans l'effet Compton. Ils utilisent pour cela deux compteurs à pointe de Geiger, dont les déclenchements étaient enregistrés photographiquement. Ils estimèrent la résolution en temps de leur montage à 10^{-4} s. En 1929 cette méthode de coïncidences lui permet de montrer, dans une expérience en collaboration avec Walther Kolhörster, que les rayons cosmiques ne sont pas composés uniquement de rayonnement γ , mais de particules « matérielles » de très grande énergie.

En 1930 Bothe invente une méthode électronique pour observer des événements en coïncidence, grâce à un tube électronique à deux grilles.

En 1932 il succède à Philipp Lenard comme directeur de l'Institut de physique de Heidelberg. Une de ses expériences faite en 1930 est à l'origine de la découverte du neutron. Il a été un pionnier des réactions nucléaires produites par rayons γ , et a probablement observé la première résonance géante.

C'est pour avoir développé la méthode des coïncidences qu'il a reçu le prix Nobel de Physique en 1954, qu'il partagea avec Max Born.

Breit, Gregory

Gregory Breit (14 juillet 1899 - 11 septembre 1981). Physicien américain d'origine russe, il fut l'assistant de Paul Ehrenfest à Leiden. Surtout connu par son travail avec Wigner sur les états résonnants, et pour son travail avec Edward Condon sur l'interaction proton-proton. Il reçut la Médaille Franklin en 1984.

Chadwick, James

James Chadwick est né le 20 octobre 1891 dans une famille très modeste. Malgré des conditions de vie difficiles, il se distingue dans ses études, et parvient, grâce à des bourses, à accéder à l'université de Manchester. Il obtient son *Master of Science* en 1912, et Rutherford, qui a remarqué ses qualités, obtient pour Chadwick une bourse qui lui permet d'aller travailler un an en Allemagne auprès de Hans Geiger. Là il montre que le spectre des électrons β est un spectre continu. Mais lorsque la guerre éclate, Chadwick est, avec d'autres Anglais, interné dans un camp près de Berlin. Il rentre en Angleterre, soutient sa thèse, et devient rapidement l'assistant et le confident de Rutherford. En 1932 il identifie comme constitué de neutrons le rayonnement mystérieux découvert par Bothe et étudié par les Joliot-Curie, ce qui lui vaudra le prix Nobel de physique en 1935. De 1935 à 1948 il est professeur à Liverpool, où il fait construire un cyclotron. Pendant la guerre il dirigea la délégation britannique qui participa à Los Alamos à la fabrication de la bombe atomique. Il est mort le 24 juillet 1974.

Biographie publiée : A. Brown, *The Neutron and the Bomb. A biography of Sir James Chadwick*, Oxford University Press, Oxford, 1997.

Cockcroft, John

John Douglas Cockcroft (27 mai 1897 - 18 septembre 1967), après des études à Manchester interrompues par la guerre, commence en 1924 à faire des recherches au *Cavendish*, alors dirigé par Rutherford. Il commence à travailler sur l'accélération des protons en 1928 en collaboration avec Ernest Walton. En 1932 il observe la première réaction nucléaire avec des particules accélérées artificiellement. Pendant la guerre il travaille sur le radar, et en 1944 il devient directeur du laboratoire canadien de Chalk River, et en 1946 directeur de l'*Atomic Energy Research Establishment* à Harwell. Il a partagé avec Ernest Walton le prix Nobel de physique en 1951 « pour leur travail pionnier sur la transmutation des noyaux atomiques au moyen de particules accélérées artificiellement. »

Cohen, Bernard Leonard

Bernard Leonard Cohen est né le 14 juin 1924 à Pittsburgh. Il soutient sa thèse à l'université Carnegie-Mellon en 1950, et entre à Oak Ridge, où il dirige un groupe de recherche autour du cyclotron. En 1958 il est nommé professeur de physique à Pittsburgh.

Dans la période 1950-1965 il a beaucoup travaillé sur les réactions nucléaires ; (p, t) , (p, pn) , $(p; \alpha n)$, (p, n) , (p, n) , $(p, 2n)$, etc., ainsi que sur la diffusion élastique.

Auteur prolifique, il a publié plus de 300 articles et cinq livres. Récemment son intérêt s'est tourné vers l'énergie nucléaire, qu'il considère comme la seule solution viable à la crise de l'énergie, et il a écrit un livre pour défendre ce point de vue, *The Nuclear Energy Option*. Une controverse entre lui et Ralph Nader sur la toxicité du plutonium l'a conduit à proposer d'ingérer devant témoins des doses de plutonium importantes. Voir son article *The Myth of Plutonium Toxicity* disponible sur son site internet <http://russsp.org/BLC-3.html>.

D'Agostino, Oscar

Oscar D'Agostino (1901 à Avellino - 1975 à Rome), chimiste italien. En 1928 il collabore sur des problèmes de chimie appliquée avec N. Parravano, directeur de l'Institut de Chimie de l'Université de Rome. En 1933 il obtient une bourse pour se perfectionner en radiochimie à l'Institut du Radium. En 1934 il commence une collaboration avec l'équipe de la *via Panisperna* dirigée par Enrico Fermi, et participe à la découverte de nombreux radioéléments. En 1936 il devient chercheur à l'Institut national de chimie du CNR. En 1945 il entre à l'Institut supérieur de la santé, où il dirige le laboratoire de physique, puis de radiochimie, et à partir de 1959 le laboratoire de chimie.

Earnshaw, Samuel

Samuel Earnshaw (1^{er} février 1805 - 6 décembre 1888), était un pasteur, physicien et mathématicien. Il a publié des articles concernant la mécanique des fluides et le calcul différentiel dans les *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*. Le plus connu est un article de 1842 qui montre qu'il ne peut exister d'équilibre stable entre un ensemble de corps qui interagissent selon une loi de force en inverse carré.

Fermi, Enrico

Enrico Fermi (29 septembre 1901 - 28 novembre 1954) était né dans une famille modeste. Il montra très tôt des aptitudes exceptionnelles en mathématiques et en physique, entra à l'École Normale Supérieure de Pise en 1917, et y reçut son doctorat en 1922. Après un séjour à Göttingen chez Max Born et à Leyden chez Paul Ehrenfest, il devint maître de conférences à Florence, puis professeur de physique théorique à Rome en 1926, première chaire de ce type en Italie. En 1927 il développe la statistique appelée aujourd'hui « de Fermi-Dirac », indépendamment de Dirac. Il publie en 1934 la théorie de la radioactivité β , puis lance son équipe dans la physique des neutrons qui lui vaudra le prix Nobel en 1938. Il en profitera pour s'échapper d'Italie et trouver asile aux États-Unis. Pendant la guerre, il fut l'un des responsables du projet Manhattan. Après la guerre il fut nommé professeur de physique à l'Université de Chicago. Il mourut en 1954 des suites d'un cancer de l'estomac.

Biographies publiées : Laura Fermi, *Atoms in the family*, The University of Chicago Press, 1954 ; Emilio Segrè, *Enrico Fermi physicist*, The University of Chicago Press, 1970.

Geiger, Hans

Johannes (Hans) Wilhelm Geiger (30 septembre 1882 - 24 septembre 1945), physicien allemand, surtout connu comme co-inventeur du compteur Geiger et du compteur Geiger-Müller, et pour les expériences faites avec Ernst Marsden qui ont conduit Rutherford à la découverte du noyau de l'atome.

Geiger est né à Neustadt-an-der-Haardt. C'était le fils de Wilhelm Ludwig Geiger, professeur de philosophie à l'Université d'Erlangen. Il commença ses études de physique et de mathématiques à l'université d'Erlangen, où il obtint le doctorat en 1906. Il partit en séjour post-doctoral à l'université de Manchester, où il devint en 1907 l'assistant de Rutherford. Ils créèrent ensemble le premier compteur Geiger en 1908. En 1911 il découvrit la relation dite de Geiger-Nuttall entre l'énergie des particules α émises par les noyaux radioactifs naturels et leur période radioactive.

À son retour de Manchester en 1912 il prit la direction du *Physikalische-Technische Reichsanstalt* à Berlin, et mit au point le nouveau compteur à pointe. En 1925 il devint professeur de physique à Kiel, et développa, avec son étudiant Walther Müller, le compteur Geiger-Müller. En 1929 il fut professeur à Tübingen et en 1936 à Berlin. Il mourut à Potsdam peu après la fin de la guerre.

Greinacher, Heinrich

Heinrich Greinacher (31 mai 1880 - 17 avril 1974) a fait ses études de physique à Zurich, Berlin et Heidelberg. Habilitation à Berne en 1907. Professeur ordinaire (c'est-à-dire titulaire) à Berne de 1924 à 1952. Il est surtout connu pour sa méthode d'obtention de tensions élevées.

Gugelot, Piet Cornelis

Piet Cornelis Gugelot est né à Bossum, en Hollande, le 24 février 1918. Il est mort le 2 février 2005 à Charlotteville, aux États-Unis. En 1930 sa famille s'installa à Davos, en Suisse. Il étudia la physique à l'ETH (Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, une université à vocation scientifique et technologique) sous la direction de Paul Scherrer (1890-1969), un des physiciens importants du début du siècle. Il y travailla à la réalisation du cyclotron dont le premier faisceau interne fut produit en 1943. En 1947 il partit pour Princeton où il travailla sur le sujet alors en plein essor des réactions nucléaires. Il participa activement à la reconstruction du cyclotron et à la construction d'une chambre à réaction de grandes dimensions (60 inches, 152 cm) qui permit les premières mesures précises de distributions angulaires.

En 1956 il retourna aux Pays-Bas comme directeur de l'Institut voor Kernfysisch Onderzoek). Il y développa l'étude des réactions nucléaires. En particulier il étudia avec Haruhiko Morinaga l'étude des réactions (α, xn) , et fut un des pionniers de l'étude des grands spins et des bandes de rotation.

Il retourna aux États-Unis en 1966 comme directeur du *Space Radiation Effects Laboratory*, et devint en même temps professeur à l'université de Virginie où il termina sa carrière.

Curie, Irène

Irène Curie est la fille de Pierre et Marie Curie, née le 12 septembre 1897. Elle a reçu une éducation non conventionnelle dans son jeune âge. Pendant la première guerre mondiale elle a secondé sa mère Marie Curie dans l'entreprise des « voitures Curie », contenant un appareil de radiographie mobile, ce qui lui a valu la médaille militaire. Après la guerre elle reprend ses études, soutient sa thèse en 1925, et entame une collaboration avec Frédéric Joliot. Ils découvrent ensemble la radioactivité artificielle en 1934, ce qui leur vaudra le prix Nobel de chimie en 1935. Puis elle travaille sur la physique des neutrons et elle est à l'origine de la découverte de la fission en 1938 par Hahn et Strassmann. Elle continuera à travailler sur la radioactivité jusqu'à sa mort, de leucémie, le 17 mars 1956.

Biographie publiée : N. Lorient, *Irène Joliot-Curie*, Paris, Presses de la Renaissance, 1991.

Joliot, Frédéric

Frédéric Joliot est né le 19 mars 1900 à Paris. Ancien élève de l'École de Physique et Chimie de la Ville de Paris, où il a eu comme professeur Paul Langevin, il entre en 1925 à l'Institut du Radium comme secrétaire de Marie Curie. Il rencontre Irène Curie, et ils se marient en 1926, puis ils entament une collaboration scientifique brillante qui les mènera en 1934 à la découverte de la radioactivité artificielle, qui leur vaut le prix Nobel de chimie en 1935. Frédéric Joliot devient alors professeur au Collège de France, et lance la construction des premiers accélérateurs français. En 1939, il se lance dans l'étude de la fission, dans le but d'obtenir une réaction en chaîne.

Résistant pendant la guerre, il dirige le CNRS entre 1944 et 1945, le réorganise profondément, puis obtient la création du Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) en 1946. La première pile atomique française, ZOÉ, entre en fonctionnement le 15 décembre 1948. Il est démis de ses fonctions en 1950 en raison de ses engagements politiques. Il est mort à Paris le 14 août 1958.

Biographies publiées : P. Biquard, *Frédéric Joliot-Curie et l'énergie atomique*, Paris, Se-ghers, 1961 ; M. Goldsmith, *Frédéric Joliot-Curie, a biography*, Londres, Lawrence and Wi-shart, 1976 ; M. Pinault, *Frédéric Joliot-Curie*, Paris, Odile Jacob, 2000.

Lawrence, Ernest Orlando

Ernest Orlando Lawrence (8 août 1901 à Canton, Dakota du Sud – 27 août 1958 à Palo Alto, en Californie) soutient sa thèse à Yale en 1925. En 1928 il est nommé professeur assistant à l'université de Berkeley, puis titulaire deux ans plus tard. Il construit le premier cyclotron à Berkeley en 1932, ce qui lui vaudra le prix Nobel de physique en 1939 « pour l'invention et le développement du cyclotron et pour les résultats obtenus avec cet instrument, particulièrement dans le domaine des éléments radioactifs artificiels ». Il construira des cyclotrons de plus en plus puissants, et pendant la guerre participera de façon active au projet Manhattan, particulièrement à la séparation de l'uranium 235, grâce à l'aimant du cyclotron de 180 pouces qu'il avait entrepris de construire, et qui sera utilisé pour le premier synchrocyclotron après la guerre.

Lorentz, Hendrik Antoon

Hendrik Antoon Lorentz (18 juillet 1853 à Arnhem, aux Pays-Bas – 4 février 1928 à Haarlem aux Pays-Bas) était un physicien qui reçut en 1902 le prix Nobel de physique et en 1908 la Médaille Rumford. Il fut lauréat de la Médaille Franklin en 1917 pour ses travaux sur la nature de la lumière et la constitution de la matière. Il reçut également la médaille Copley en 1918.

La majorité de ses travaux portèrent sur l'électromagnétisme. Il a laissé son nom aux transformations de Lorentz qui sont à la base de la théorie de la relativité restreinte. Elles ont été présentées par Lorentz dans le but d'expliquer les résultats de l'expérience de Michelson par une contraction des longueurs dans le sens du mouvement. La théorie de Lorentz conservait cependant l'idée d'un référentiel absolu et de l'existence d'un milieu fixe, l'éther, dans lequel les ondes électromagnétiques se propageraient. Elle devait être remplacée par la théorie de la relativité, invariante par la transformation de Lorentz.

Majorana, Ettore

Ettore Majorana est né le 5 août 1906 à Catane, en Sicile. Il commence des études d'ingénieur, comme Segré, et celui-ci le convainc d'aller voir Fermi, qu'il impressionne en recalculant en une nuit le potentiel « universel » de Fermi. Il participe dès lors aux travaux du groupe de la *via Panisperna*, mais à sa façon, taciturne, jamais satisfait de ses résultats. C'est un prodige mathématique, supérieur même à Fermi. Il passe un an auprès de Heisenberg, et publie un article resté fameux sur la théorie naissante du noyau, introduisant la force d'échange dite de Majorana¹¹⁸. En 1937 il est nommé professeur de physique à l'université de Naples. Le 23 mars 1938, il part pour Palerme pour se reposer. Il reprend le bateau le 25 pour Naples, et disparaît à tout jamais. Il avait envoyé de Palerme une lettre à un ami annonçant son intention de se suicider. Il s'est peut-être jeté à la mer, mais son corps n'a jamais été retrouvé.

Müller, Walther

Walther Müller (6 décembre 1905 à Hanovre - 4 décembre 1979 à Walnut Creek, en Californie) a fait ses études à l'université de Kiel et en 1925 il était le premier doctorant du nouveau professeur de physique Hans Geiger, et a développé avec lui le célèbre compteur Geiger-Müller en 1928.

Après le départ de Geiger pour Berlin en 1929, Müller se tourne vers l'industrie (Siemens, Pintsch, Philips). Après la guerre il crée en Australie une société destinée à produire des compteurs Geiger-Müller. En 1958 il entre à la *General Telephone & Electronics Research* à Palo Alto, en Californie, puis il travaillera pour *General Motors* à Santa Barbara.

Nernst, Walther

Walther Nernst (1864–1941), physico-chimiste allemand, pionnier de la thermodynamique chimique. Il a énoncé la troisième loi de la thermodynamique.

Placzek, George

George Placzek (né le 26 septembre 1905 à Brno, en Moravie, et mort à Zurich le 9 octobre 1955) Placzek a été un personnage important de la physique des années trente et quarante. Il fait ses études à Prague et à Vienne, où il soutient sa thèse en 1928. Puis il voyage beaucoup : Utrecht (1928-1931), Leipzig en (1931), Rome (1931-1932), Copenhague (1932-1933), Jérusalem (1933-1934), Kharkov (1935-1936), Paris (1938), New York à partir de 1939. Polyglotte, très cultivé, c'était, selon Edoardo Amaldi, un véritable européen¹¹⁹. Esprit très vif, prompt à percevoir toutes les facettes d'un problème, et aussi les failles, c'était un critique acéré et généreux, un collègue aux conseils irremplaçables. Sa famille fut anéantie par les nazis pendant la guerre. Il mourut en 1955 au cours d'un voyage en Italie.

Pontecorvo, Bruno

Bruno Pontecorvo (Marina di Pisa, 22 août 1913 – Dubna, 25 septembre 1993) entra en 1934 dans le groupe de la *via Panisperna* dirigé par Fermi, et y découvrit l'effet des neutrons lents. En 1936 il partit pour Paris, où il travailla à l'institut du Radium avec Frédéric et Irène Joliot-Curie. Il partit en 1940 pour les États-Unis et travailla sur le projet Manhattan. En 1948 il travaille au centre de recherches nucléaires de Harwell, en Grande Bretagne, et en septembre 1950 il émigre en Union Soviétique. Il travaillera alors au centre de recherches de Dubna sur la physique des muons et des neutrinos.

Rasetti, Franco

Franco Dino Rasetti (10 août 1901 - 5 décembre 2001) est né à Castiglione del Lago, en Italie. Lauréat en physique de l'université de Pise en 1922, il soutient sa thèse en 1923, puis obtient un poste d'assistant à l'université de Florence. En 1926 il obtient la chaire de spectroscopie de l'Université de Rome, et se consacre au début à la recherche spectroscopique, en collaboration avec Enrico Fermi. À partir de 1934, il participe avec Fermi aux recherches sur les neutrons. En 1939 il émigre au Canada, travaille à l'université Laval du Québec. Pendant la seconde guerre mondiale, il refusa de collaborer au projet nucléaire, ce que Fermi lui avait proposé. Il partit en 1947 pour la *John Hopkins University* de Baltimore. Il y conduisit des recherches sur les rayons cosmiques (en particulier il fait la première mesure de la demi-vie du muon) et de spectroscopie nucléaire. Puis il s'éloigne de la physique pour s'intéresser à la géologie, la paléontologie, l'entomologie et la botanique. C'était un expert reconnu des trilobites fossiles et des fleurs sauvages des Alpes. Il s'établit ensuite en Belgique, où il mourut à Waremmes, à l'âge de cent ans.

Biographie publiée : Danielle Ouellet, *Franco Rasetti, physicien et naturaliste*, Montréal, Guérin, 2000.

Rutherford, Ernest

Ernest Rutherford (30 août 1871 - 19 octobre 1937) est né en Nouvelle Zélande, où il a fait ses études scolaires et universitaires et soutenu une thèse de doctorat. Grâce à une bourse il séjourne ensuite trois ans (1895–1898) au laboratoire *Cavendish*, dirigé par J. J. Thomson, puis devient professeur de physique à l'Université McGill à Montréal en 1898. Là il montre que la radioactivité est une transformation d'atomes, et découvre que la décroissance radioactive est exponentielle. Cela lui vaut le prix Nobel de chimie en 1908.

En 1907 il quitte Montréal pour prendre la direction du laboratoire de Manchester. Il interprète les résultats de l'expérience qu'il a suggéré de faire à Gei-

ger et Marsden, en montrant que toute la charge positive et toute la masse de l'atome était concentrée dans une toute petite région qu'il appelle le « noyau » de l'atome.

En 1919 il observe la première réaction nucléaire en bombardant de l'azote avec des particules α , et en 1920 il prévoit l'existence dans les noyaux d'une particule neutre de même masse que le proton. Elle sera identifiée par Chadwick, au *Cavendish*, en 1932.

Il a été anobli en 1914, puis le titre de Baron Rutherford of Nelson a été créé pour lui en 1931. Lord Rutherford est mort d'une septicémie à la suite d'une opération intestinale en 1937. Il est enterré à Westminster près de Newton.

Biographies publiées : A. S. Eve, *Rutherford, being the life and letters of the Rt Hon Lord Rutherford O.M.*, Cambridge, The University Press, 1939 ; E. N. da C. Andrade, *Rutherford and the nature of the atom*, Garden City, N.Y., Doubleday, 1964 ; N. Feather, *Lord Rutherford*, London, Priory Press, 1973 ; W. David, *Rutherford, simple genius*, Cambridge, MIT Press, 1983 ; J. L. Heilbron, *Ernest Rutherford and the explosion of atoms*, New York, Oxford University Press, 2003.

Saxon, David

David Saxon est né en 1920 à St Paul, dans le Minnesota. Après sa thèse soutenue au MIT en 1944, il entre à l'Université de Californie à Los Angeles (UCLA) en 1947. En 1950 il est démis de ses fonctions, au début de la période McCarthy (qui allait s'étendre jusqu'en 1956) parce qu'il refuse de signer une « déclaration de loyauté », dans laquelle il aurait dû déclarer qu'il n'appartenait pas au parti communiste. Il revint à l'Université en 1952 après la décision de la Cour suprême qui jugea inconstitutionnelle cette déclaration de loyauté. Il fut président de UCLA de 1975 à 1983, puis rejoignit le MIT dont il devint président en 1983. Il est mort le 6 décembre 2005.

Segrè, Emilio

Emilio Segrè est né le 1^{er} février 1905 à Tivoli. Il entre en 1922 à l'Université de Rome pour faire des études d'ingénieur, mais en 1927 il décide de faire de la physique dans le groupe que Fermi était en train de constituer, et soutient sa thèse en 1928 (premier thésard de Fermi). Après son service militaire en 1928 et 1929 il entre comme assistant à l'université et travaille dans le groupe de Fermi. En 1930 il travaille avec Otto Stern à Hambourg, puis Pieter Zeeman à Amsterdam, et retourne à Rome en 1932. Il participe ainsi à la découverte de la physique des neutrons lents. En 1936 il est professeur de physique à l'université de Palerme, mais en 1938, en raison des lois anti-juives de Mussolini, il émigre aux États-Unis dont il deviendra citoyen en 1944. Il est assistant, puis professeur à Berkeley, où il travaille en radiochimie, découvre le technetium et l'astate et participe à la découverte du plutonium. En 1955 il observe l'antiproton en collaboration avec Chamberlain, Wieland et Ypsilantis. Il obtient le prix Nobel en 1959 pour cette découverte (partagé avec Chamberlain). Il est mort le 22 avril 1989 à Lafayette, en Californie.

Serber, Robert

Robert Serber (1909–1997), après avoir fait ses études dans le Wisconsin, avait été élève, puis ami de Robert Oppenheimer, qui lui avait confié des travaux importants dans le projet Manhattan pour la construction de la bombe atomique. Nommé professeur à Berkeley à la fin de la guerre, Serber était un théoricien respecté et réputé pour sa capacité à établir des liens avec les expérimentateurs dont il suivait de près les travaux.

Slepian, Joseph

Joseph Slepian, né à Boston le 11 février 1891 de parents immigrés russes, commença une carrière de mathématicien qui le mena, après sa thèse soutenue

en 1913, à Göttingen et à Paris. Il entra ensuite à Westinghouse, où il fut un inventeur très prolifique, déposant 204 brevets au cours de sa carrière. Membre de l'Académie des Sciences des États-Unis depuis 1941, il est mort le 19 décembre 1969.

Townsend, John Sealy

Sir John Sealy Edward Townsend (né à Galway (Irlande) le 7 juin 1868, mort à Oxford le 16 février 1957) fit ses études à Dublin, puis fit un séjour *Cavendish*, sous la direction de J. J. Thomson, et y rencontra Ernest Rutherford. Il fit des travaux importants sur la conductivité électrique des gaz, et découvrit en 1897 le phénomène de multiplication des électrons dans les gaz raréfiés sous l'influence d'une haute tension. En 1901 il fut nommé professeur à Oxford, et poursuivit ses travaux, en particulier sur l'ionisation des gaz par des collisions d'ions et sur les collisions d'atomes avec des électrons de faible énergie (effet Ramsauer-Townsend). Il obtint la médaille Hughes en 1941 et fut anobli en 1941.

Van de Graaff, Robert Jemison

Robert Jemison Van de Graaff est né le 20 décembre 1901 à Toscaloosa, en Alabama. Après ses études d'ingénieur à l'Université d'Alabama, Van de Graaff était parti pour l'Europe. En 1924-25, il prend goût à la physique nucléaire en suivant à la Sorbonne les cours de Marie Curie. Il séjourne ensuite à Oxford, où il se rend compte de l'importance des expériences de Rutherford et de l'intérêt qu'il y aurait à produire des particules de grande énergie. De retour aux États-Unis en 1929, il entre au *Palmer Physics Laboratory*, à l'Université de Princeton, et c'est là qu'il construit, dès l'automne 1929, le premier prototype de son accélérateur électrostatique, qui atteint une tension de 80 000 volts. Il s'efforce ensuite d'améliorer son appareil, dont il fait une démonstration en 1931, lors du dîner inaugural de l'*American Institute of Physics*. Il est capable à ce moment de produire une tension d'un million de volts.

Van de Graaff entre ensuite au MIT, et entreprend la construction d'un accélérateur de 7 MV, qui fournira effectivement cette tension en 1933, mais sans jamais être capable de fournir un faisceau utilisable pour la physique. L'accélérateur sera ensuite installé au MIT en 1937.

En 1946 il fonde la société *High Voltage Engineering Corporation* (HVEC) qui allait vendre des accélérateurs « Van de Graaff » dans le monde entier pendant des décennies.

À l'époque de sa mort, survenue le 16 janvier 1967, plus de 500 accélérateurs Van de Graaff étaient en service dans le monde.

Veksler, Vladimir

Vladimir Veksler, physicien russe, est né le 3 mars 1907 à Zhytomyr, en Ukraine. Sa famille s'installa à Moscou en 1915. En 1931 il est ingénieur et il entre à l'institut Lebedev en 1969.

Il travaille particulièrement sur les rayons cosmiques. À partir de 1944 il travaille sur les accélérateurs et formule le principe de stabilité de phase qui rend possible le fonctionnement des synchrocyclotrons. En 1956 il est le premier directeur du *Joint Institute for Nuclear Research* à Dubna. Les accélérateurs circulaires de protons de Dubna et Protvino furent construits sous sa direction. Il est mort le 22 septembre 1966 à Moscou.

Walton, Ernest Thomas Sinton

Ernest Thomas Sinton Walton, 6 octobre 1903 - 25 juin 1995) était un Irlandais. Il fait ses études à Belfast, puis *Trinity College*, et soutient sa thèse en 1931. Il observe, en collaboration avec John Cockcroft, la première réaction nucléaire induite par des protons accélérés artificiellement. En 1946 il rentre en Irlande, où il meurt en 1995.

Wigner, Eugene Paul

Eugene Paul Wigner, né (Pál Jenő) à Budapest le 17 décembre 1902, mort le 1^{er} janvier 1995. Études secondaires à Budapest, études supérieures d'ingénieur chimiste à la *Technische Hochschule in Berlin*. Doctorat au *Keiser Wilhelm Institut*. Parmi ses contributions les plus marquantes, on doit citer son rôle pionnier dans l'application à la théorie atomique, puis nucléaire, de la théorie des groupes. En mécanique quantique on lui doit le théorème de Wigner-Eckart. En 1930 il est professeur à Princeton, puis brièvement à l'université de Wisconsin-Madison en 1936, et revient à Princeton en 1937. Naturalisé en 1937, il jouera un grand rôle dans le projet Manhattan. Prix Nobel de physique en 1963 pour sa formulation de la loi de conservation de la parité.

Zworykin, Vladimir Kosma

Vladimir Kosma Zworykin est né le 30 juillet 1889 à Mourom, en Russie, qu'il quitta après la révolution russe pour devenir citoyen des États-Unis en 1919. Il construisit son premier téléviseur en 1929, et réalisa en 1936 les premiers tubes multiplicateurs d'électrons. Il est mort le 29 juillet 1982 à Princeton.