

Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire

POURQUOI NI BOTHE NI LES JOLIOT-CURIE
N'ONT DECOUVERT LE NEUTRON

Jules SIX

Soumis pour publication dans la Revue d'Histoire des Sciences

U.E.R.
de
l'Université Paris - Sud



Institut National
de Physique Nucléaire
et
de Physique des Particules

Bâtiment 200 - 91405 ORSAY Cedex

POURQUOI NI BOTHE NI LES JOLIOT-CURIE N'ONT DECOUVERT LE NEUTRON

Jules SIX*

Résumé :

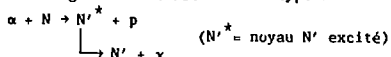
Les écrits sur la découverte du neutron laissent souvent obscures des questions sur les travaux de W. Bothe et de F. Joliot et I. Curie. Une analyse de ces points est présentée. Bothe a réalisé une expérience sensible surtout aux rayons γ et il lui était difficile dans ces conditions de découvrir le neutron. Par contre, on a oublié qu'il fut un pionnier dans la découverte d'un rayonnement γ induit par les transmutations nucléaires. Une analyse soignée du travail des Joliot-Curie conduit à une explication nouvelle du fait qu'ils n'ont pas découvert le neutron. Nous montrons que la raison principale est probablement l'influence des idées contemporaines sur des possibilités de non-conservation de l'énergie dans des processus nucléaires.

La découverte du neutron en 1932 est due à Chadwick. Les rétrospectives historiques mettent bien en évidence en général le rôle capital joué par celui-ci et par l'écol. de Cambridge. Elles signalent aussi que cette découverte expérimentale a été précédée par deux observations importantes, la première par Bothe en Allemagne, la seconde par les Joliot-Curie en France. Pourquoi ni Bothe ni les Joliot-Curie n'ont découvert eux-mêmes le neutron, voilà cependant une question qui n'est pratiquement pas abordée. Ce silence de fait a permis l'élaboration de mauvaises réponses et amené une certaine déformation de la réalité. Cet article est consacré à une analyse critique de ce problème. Nous aborderons successivement le cas de Bothe et celui des Joliot-Curie. Auparavant, nous résumerons les différentes étapes qui ont amené à cette découverte.

* Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire, 91405 Orsay Cedex, et équipe REHSEIS, CNRS

1. LES ETAPES DE LA DECOUVERTE DU NEUTRON

Dans les années 1927-1930, l'étude de l'énergie du proton émis dans des transmutations nucléaires, réalisées avec les rayons α , avait montré que la réaction générale devait être du type :



Restait à mettre en évidence ce rayonnement γ et ce fut le but de l'expérience de Bothe et Becker, qui peut être considérée comme le premier pas vers le neutron. Trois étapes importantes ont marqué cette route :

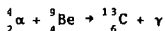
1.1 Bothe et Becker

En octobre 1930, Bothe et son élève Becker mirent en évidence la présence d'un rayonnement neutre émis dans les transmutations [1]. Leur détecteur était un compteur à pointe, l'ancêtre du compteur Geiger-Müller, connu encore de nos jours. Le passage individuel de particules capables d'ioniser le gaz contenu à l'intérieur du compteur était détecté et des comptages automatiques étaient réalisés. Bothe et Becker bombardèrent divers éléments avec des rayons α du polonium, d'énergie 5,2 MeV, de façon à réaliser des transmutations. La fenêtre d'entrée de leur compteur avait été choisie suffisamment épaisse pour arrêter, en plus des rayons α , les rayons H (protons) qu'on savait produits dans les transmutations. Avec ce dispositif, ils détectèrent un rayonnement résiduel, qu'ils supposèrent dû à des rayons γ . Pour évaluer l'énergie de ce rayonnement, ils interposèrent des plaques de plomb d'épaisseur variable et mesurèrent la diminution des enregistrements du compteur.

Deux faits les étonnèrent :

- le rayonnement étudié était au moins aussi énergétique sinon plus que les rayons γ de la radioactivité,
- le rayonnement le plus intense était de loin celui obtenu avec le béryllium, élément connu pour ne pas donner de transmutations avec émission de proton.

A la conférence de Rome d'octobre 1931 [2], Bothe suggéra un nouveau type de transmutation :



Dans un tel processus, l'énergie du γ devait être de l'ordre de 5 MeV, un peu plus élevée que les γ de la radioactivité. A cette même

conférence, il fit part d'une nouvelle expérience dans laquelle il trouvait un rayonnement plus énergétique que dans les premières mesures. Perplexe devant ce résultat, il préféra ne pas apporter de conclusion.

1.2. Les Joliot-Curie

En Janvier 1932 [3], les Joliot-Curie trouvèrent au rayonnement neutre du béryllium, une propriété curieuse : il était capable d'éjecter des noyaux d'atomes d'hydrogène pré-existant dans la matière. Leur détecteur était une chambre à ionisation reliée à un électromètre très sensible. En interposant, sur le passage des rayons, des écrans de substances variées, ils notèrent une augmentation notable du courant fourni par la chambre à ionisation quand les rayons traversaient des matières hydrogénées et seulement dans ce cas.

Pensant avoir affaire à un rayonnement γ , ils supposèrent une diffusion élastique $\gamma p \rightarrow \gamma p$. L'énergie maximum du proton leur permit de déduire celle que devait avoir le γ primaire. Ils trouvèrent dans le cas du béryllium une énergie de 50 MeV. C'était beaucoup plus que ce qu'ils avaient trouvé dans un travail précédent [4], en mesurant l'atténuation du rayonnement par des plaques de plomb.

1.3. Chadwick

En Février 1932, Chadwick publia un court article postulant l'existence du neutron [5]. Ayant répété l'expérience des Joliot-Curie avec une chambre à ionisation, il avait retrouvé leurs résultats. Son détecteur, muni d'un amplificateur de courant, était plus sensible que celui des Joliot-Curie. Il put ainsi se rendre compte que le rayonnement étudié pouvait mettre en mouvement non seulement des noyaux d'hydrogène mais aussi d'autres noyaux. Il signala que ces propriétés s'interprétaient facilement en supposant le rayonnement constitué de neutrons, particules neutres de masse à peu près égale à celle du proton. L'énergie cinétique de ces neutrons devait être de l'ordre de 5 MeV au maximum, énergie raisonnable pour une transmutation nucléaire. Il fit remarquer que l'hypothèse des Joliot-Curie de γ de 50 MeV avait contre elle de violer la loi de la conservation de l'énergie.

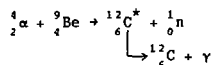
Cette date de février 1932 peut être considérée comme celle de la découverte du neutron, bien que l'article final de Chadwick décrivant l'ensemble de ses tests expérimentaux ne parût qu'en juillet [6].

1.4. Que s'était-il passé entre-temps du côté français et allemand ?

Avant la connaissance du contenu de la lettre de Chadwick de février 1932, les Joliot-Curie publièrent une nouvelle note [7]. Ils avaient réussi à photographier des reculs de proton avec une chambre de Wilson. Ils signalèrent cependant une difficulté pour leur hypothèse d'un processus $\gamma p \rightarrow \gamma p$. Sa probabilité d'apparition était 10^5 fois trop grande si on la comparait à celle calculée à partir du processus connu $\gamma e^- \rightarrow \gamma e^-$. La conclusion qu'ils en tirèrent fut d'avoir découvert un nouveau type d'interaction pour les γ ...

De son côté, Bothe avait monté une nouvelle expérience pour mesurer l'énergie des γ [8]. Le dispositif expérimental comprenait dans l'ordre : un premier absorbeur, un premier compteur Geiger-Müller, un deuxième absorbeur, un deuxième compteur Geiger-Müller. En comptant les coïncidences entre les deux compteurs et en faisant varier l'épaisseur du deuxième absorbeur, Bothe mesura l'énergie des électrons qui avaient été générés dans le premier absorbeur. Il obtint ainsi pour la radiation du béryllium une énergie de 5 MeV, compatible avec celle du rayonnement γ attendu. Son dispositif avait, à son insu, éliminé le comptage des neutrons...

IL devait s'avérer plus tard que cette mesure de Bothe était correcte et que l'une des réactions étudiées était la suivante :



La complexité du phénomène étudié laisse entrevoir les difficultés qu'ont rencontré Bothe et les Joliot-Curie et que nous allons étudier de plus près.

2. ETUDE DU CAS DE BOTHE

Le signal de Bothe était dix fois plus intense avec le béryllium qui n'émettait pas de protons qu'avec le bore qui, lui, en donnait. A première vue on pourrait penser que c'était là le signe de la présence du neutron et beaucoup de commentateurs postérieurs aux événements l'ont cru. Il faut pourtant se poser une première question :

2.1 L'expérience de Bothe et Becker était-elle sensible aux neutrons ?

Remarquons d'abord que le compteur à pointe de Bothe et Becker était un appareil de détection des particules électrisées individuelles. Un électron ou un proton (signes d'un γ ou d'un neutron) déclenchaient tous les deux le système de comptage sans distinction (aux effets d'efficacité près qui peuvent être légèrement différents).

La chambre à ionisation, utilisée par les Joliot-Curie et par Chadwick, a au contraire un comportement très différent car elle mesure la charge produite par les particules qui traversent le gaz du détecteur et l'ionisent. Comme les protons sont environ mille fois plus ionisants que les électrons dans le domaine d'énergie étudié ici, elle est beaucoup plus sensible aux protons qu'aux électrons.

Remarquons le trait saillant de l'expérience des Joliot-Curie : l'interposition d'un écran faisait doubler le courant d'ionisation quand il contenait une matière hydrogénée. Ce fait était dû aux protons et à leur effet hautement ionisant. Dans les mêmes conditions d'expérience, un compteur à pointe, non sensible à cet effet multiplicateur, n'aurait pas mis en évidence un tel changement quantitatif.

C'est d'ailleurs ce que Bothe et Becker entreprirent de montrer après la découverte du neutron. En entourant un compteur à pointe avec de la paraffine ils simulèrent l'expérience des Joliot-Curie. Dans le rayonnement enregistré, ils trouvèrent que la part revenant aux neutrons n'était qu'environ 5 % du total des comptages [9].

A vrai dire, il faut examiner un résultat qui a intrigué les physiciens de l'époque et qui peut faire douter le lecteur. En effet les mesures des Joliot-Curie d'absorption dans le plomb étaient en accord avec la deuxième mesure rapportée par Bothe à Rome. Comment croire que Bothe et Becker et les Joliot-Curie ne détectaient pas le même rayonnement ? Ne s'agissait-il pas de la même radiation pénétrante dans les deux cas ?

Un des élèves de Bothe, Fleischmann, a examiné cette objection et a trouvé l'explication dans le phénomène suivant [10] : les neutrons lents peuvent être absorbés dans la matière suivant une réaction du type $n + p \rightarrow d + \gamma$. Comme ils sont produits à l'intérieur même de la matière, ces γ sont moins absorbés que s'ils l'avaient traversée dans sa totalité. Ce processus avait pu simuler ainsi des γ énergiques dont la source n'était pas comprise à l'époque. Il est probable que ce processus était responsable aussi de l'intensité du phénomène rencontré avec le béryllium. Bien entendu cette explication est postérieure à 1932.

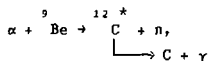
Nous avons cependant remarqué que l'expérience de Bothe et Becker avait des côtés étranges. Il nous faut donc examiner une deuxième question :

2.2. Bothe et Becker auraient-ils pu interpréter leurs expériences en suggérant l'existence du neutron ?

Les réactions $\alpha + \text{Be}$ donnaient des résultats très étonnants : pas de production de proton mais émission d'un rayonnement pénétrant et relativement intense. L'explication de Bothe consistait à supposer un processus d'aggrégation $\alpha + {}^9\text{Be} + {}^{13}\text{C} + \gamma$.

Bien que les théoriciens fussent sceptiques sur cette explication, il était naturel d'avancer cette hypothèse et d'essayer de déterminer l'énergie de ces γ . Bothe y réussit en mesurant l'énergie des électrons produits. Il trouva un résultat acceptable pour le processus supposé. Il ne faut pas croire que Bothe était alors complètement satisfait. Un autre test de son hypothèse consistait à mesurer l'énergie du γ en fonction de celle du rayon α incident. Il avait été surpris de trouver que le coefficient d'absorption ne variait pas et donc que l'énergie du γ était indépendante de celle du rayon α .

Ce fait trouve une explication dans le fait que la réaction réelle était

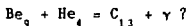


réaction dans laquelle C^* , étant émis presque au repos donnait un γ d'énergie pratiquement toujours constante.

Il est possible de supposer que, si Bothe avait disposé d'un peu plus de temps, une telle idée aurait fini par émerger. Il est difficile cependant d'en dire davantage car, même d'après ceux qui l'ont connu, Bothe n'aimait pas parler de cette découverte du neutron [11]. Des notes de conférence données par lui l'été 1932 [12] se terminent de la façon suivante à propos de la radiation du béryllium :

"Extraordinairement pénétrante, donc α est capturé.

Le plus raisonnable :



La conséquence serait : plus ϵ_α est grand, plus grand est ϵ_γ . Ceci n'a pas été vérifié expérimentalement. Au moins pas comme prévu. Un autre

rayonnement devait être là. Nous étions juste devant ce puzzle, quand il a été résolu par d'autres dans une voie surprenante".

En conclusion rien n'indique dans ses articles ou ses notes de cours que Bothe ait pensé au neutron. Son but était de mettre en évidence un rayonnement γ et il lui fallait sans doute encore du temps pour réaliser qu'il était face à un phénomène nouveau et peut-être à ce neutron dont il avait sans doute entendu parler, sans y porter beaucoup d'attention. Hélas la recherche avait fait ailleurs des progrès et il était passé à côté d'une découverte majeure.

Le lecteur peut se poser alors une dernière question :

2.3. Quel a été l'apport réel de Bothe dans cette histoire tourmentée ?

Bien entendu, son expérience montrant la présence d'une radiation neutre pénétrante a été au point de départ de la découverte du neutron. Limiter là son rôle serait cependant injuste. Il a été celui qui a probablement apporté le plus à la mise en évidence progressive du rayonnement γ induit dans les transmutations nucléaires.

Rappelons que Bothe joua dès 1928 un rôle de pionnier en mesurant le spectre d'énergie des protons émis dans des transmutations nucléaires [13]. L'existence de groupes dans la répartition des énergies le persuada que plusieurs réactions devaient coexister entraînant probablement la production de noyaux excités. Il supposa une désexcitation de ces noyaux par émission d'un rayonnement γ et c'est pour tester cette hypothèse qu'il monta l'expérience de 1930. Rappelons que si les transmutations étudiées produisaient des neutrons, ce que Bothe ne vit pas, elles donnaient aussi un rayonnement γ induit dont il mesura correctement l'énergie [14]. Plus tard, en 1935, il montra qu'il y avait effectivement dans le cas du bore coexistence de l'émission du proton et du γ [15]. Que l'histoire ait oublié cette mise en évidence progressive de l'émission γ induite, il y a à cela plusieurs raisons :

- Ce travail a été occulté par la découverte contemporaine du neutron puis un peu plus tard par celle de la radioactivité β induite des Joliot-Curie. Ces deux découvertes eurent à la fois un caractère plus spectaculaire et des conséquences pratiques plus importantes.

- Il s'agit bien moins d'une réelle découverte que de la confirmation d'un phénomène attendu. Bothe a finalement démontré ce qui était suspecté par lui-même et par d'autres.

- L'effet trouvé dans les transmutations s'apparente au rayonnement γ de la radioactivité naturelle, tel celui mis en évidence en 1929 par Rosenblum dans la radioactivité α [16].

- Une émission γ induite avait été indiquée dès 1921 par Slater [17]. Même si Bothe avait montré en 1930 que ces résultats étaient erronés, cette émission γ induite avait probablement dans l'esprit collectif un air de déjà connu, sinon de déjà découvert.

Bothe a joué en quelque sorte de malchance : sa mise en évidence de l'émission γ induite dans les transmutations n'a pas été appréciée à sa juste valeur. Pire, la complexité du phénomène avec production simultanée du γ et du neutron a pu laisser croire à la postérité que, tout compte fait, il n'avait peut-être pas su interpréter ses expériences. Fleischmann [18] s'est demandé comment cette dérive a-t-elle pu s'amorcer alors que les physiciens nucléaires de l'époque ne commentaient pas cette erreur. Il en voit le départ dans le discours même de réception du prix Nobel 1935 décerné à Chadwick [19]. Une formulation ambiguë a pu induire en erreur les commentateurs ultérieurs, qui n'étaient pas tous des spécialistes de physique nucléaire.

3. ETUDE DU CAS DES JOLIOU-CURIE

Nous venons de voir que, somme toute, il était normal que Bothe ne découvre pas l'existence du neutron. Plus difficile à comprendre est la méprise des Joliot-Curie, après leur brillante découverte de l'aptitude de la radiation neutre pénétrante à éjecter des protons de la matière. Comment ont-ils pu avancer une interprétation qui se heurtait à l'objection de la non-conservation de l'énergie ?

3.1. Commentaires sur les publications

Il nous faut d'abord résumer à travers leurs écrits quelle a été leur position vis-à-vis de cet argument et établir quelle était la portée réelle de l'objection. Par simplicité, il nous suffit de considérer le cas de la radiation pénétrante obtenue avec le béryllium.

Dans sa note du 28 décembre 1931 [20], supposant avoir affaire à un rayonnement γ , Irène Curie déduisait d'une mesure par méthode d'absorption "une énergie de 15 ou 20 millions d'électron-volts". A la fin de son article, elle présentait l'interprétation de Bothe du processus d'aggrégation : pour le béryllium, la réaction devait s'écrire $\alpha + {}^9\text{Be} \rightarrow {}^{13}\text{C} + \gamma$. Elle faisait alors le commentaire suivant :

"Dans le cas du Be_9 , on aurait un noyau C_{13} , dont l'énergie de liaison est probablement de l'ordre de 11 millions de volts ; celle de Be_9 , n'est pas connue, mais on peut la présumer égale à quelques millions de volts ; en tenant compte de l'énergie de la particule α , on arrive au total d'une dizaine de millions de volts, énergie quantique qui paraît inférieure à celle qui est réellement émise".

Le lecteur peut lire attentivement les deux notes des Joliot-Curie des 18 janvier et 22 février 1932 [21], où l'énergie du présumé rayon γ est maintenant devenue 50 MeV. Nulle part ils ne verront une discussion du type que nous venons de citer. La référence à cette note de fin décembre 1931 signale seulement que la mesure correspondante était peut-être erronée. Le processus imaginé par Bothe a-t-il été abandonné et si oui, comment les Joliot-Curie expliquent-ils maintenant la production de ces rayons γ très énergiques ? A cette question, nulle réponse !

Dans sa note du 17 février, Chadwick ne faisait que reprendre en quelque sorte l'argumentation d'Irène Curie elle-même ! Un rayon γ émis dans la réaction $\alpha + {}^9\text{Be} + {}^{13}\text{C} + \gamma$ ne peut pas avoir une énergie supérieure à 14 MeV. Dans son article final, il précise les conditions de cette limite. La masse de ${}^{13}\text{C}$ était connue et si celle de ${}^9\text{Be}$ ne l'était pas, une limite maximum de l'énergie du rayon γ pouvait être obtenue en supposant ce noyau constitué de $2\alpha + 1p + 1e^-$ et en prenant l'énergie de liaison entre ces constituants minimum, c'est-à-dire nulle. Chadwick ajouta cependant :

"Jusqu'ici, pour les noyaux légers, cette hypothèse est appuyée par les indications expérimentales sur les désintégrations artificielles, mais il n'y a pas cependant de preuve générale".

La signification de cette phrase est facile à comprendre et claire aussi est la raison pour laquelle Chadwick ne s'étendit pas sur cette restriction. En effet, supposons que le noyau ${}^9\text{Be}$ soit formé non de $2\alpha + 1p + 1e^-$, mais de $9p + 5e^-$. Un simple calcul montre alors que le rayon γ émis pourrait avoir une énergie allant jusqu'à 70 MeV. Il resterait cependant à expliquer pourquoi à l'intérieur du noyau, les protons et électrons ne se groupaient pas pour former une sous-structure α stable. Cette sous-structure, avec une énergie de liaison

importante, était plus probable que la présence des constituants libres. Aucun physicien n'avait d'ailleurs jamais émis une telle idée et tous s'accordaient sur la définition du "défaut de masse" pour un noyau en le supposant constitué du nombre maximum de α . Cette définition du défaut de masse est même rappelée dans l'article de Joliot de décembre 1931 [22].

Le noyau ^{13}C n'étant pas détecté, une production de plusieurs noyaux pouvait être envisagée mais ce processus aurait été nouveau. De plus aucune combinaison de noyaux connus ne pouvait donner pour les rayons γ une énergie aussi grande que 50 MeV. Supposer la production de nouveaux noyaux à énergie de liaison très importante signifiait des noyaux très stables non encore rencontrés et on pouvait se poser la question embarrassante de leur non-existence à l'état naturel. L'hypothèse de Bothe du processus d'aggrégation semblait encore la meilleure.

La dernière possibilité qui restait aux Joliot-Curie était celle de la non-conservation de l'énergie. Ils n'ont cependant soufflé mot de ces problèmes et plus tard ils ne se sont pas expliqués sur les raisons de leur omission qui, semble-t-il, n'a pu qu'être délibérée. Nous en sommes réduits à émettre des hypothèses.

3.2. Commentaires divers

En relisant les différents documents, en consultant les archives Curie, en interrogeant différents témoins souvent hélas indirects, nous pouvons donner plusieurs éléments d'appréciation qui permettent de cerner le problème.

1) Entre la découverte des recul γ de proton et la publication du 18 janvier, les discussions sur ce sujet semblent avoir eu lieu seulement entre les Joliot-Curie eux-mêmes et avec Marie Curie. Celle-ci ne permettait à personne de son laboratoire de publier sans son autorisation expresse. Les chercheurs du laboratoire, eux, travaillaient de façon relativement isolée et il n'y avait pas beaucoup de conversations de couloir. Il s'est de plus écoulé peu de temps entre la découverte de l'effet et sa publication. Rappelons que la précédente note n'était vieille que d'une quinzaine de jours. Tout a dû se passer très vite dans une atmosphère fiévreuse d'activité intense. Un physicien théoricien de l'époque, Beck, alors à Leipzig, se souvient [23] avoir entendu plus tard Rosenblum, aujourd'hui décédé, dire que l'idée du processus Compton avait été suggérée par Marie Curie elle-même.

2) Une note en bas de page du papier du 18 janvier 1932 attire l'attention :

"Dans une conférence faite récemment à Paris, Millikan a annoncé que, sur des photographies de rayons cosmiques obtenues par la méthode de Wilson, dans un champ magnétique intense, on voit apparaître parfois les trajectoires d'un proton et d'un électron issus d'un même point. Nous n'avons pas encore de renseignements plus détaillés sur ce phénomène".

Millikan a effectivement donné en novembre 1931 une conférence à l'institut Henri Poincaré proche du laboratoire Curie. Il y avait montré des premiers clichés de rayons cosmiques obtenus avec une chambre de Wilson. A cette époque Millikan croyait que les rayons cosmiques étaient des γ de grande énergie capables d'éjecter des protons de la matière. C'était un homme persuasif, sachant communiquer ses convictions. En avril 1932, donc après la lettre de Chadwick, voici comment il s'exprime sur l'interprétation de ses clichés [24] :

"Le fait que les rayons incidents puissent donner des traces qui viennent des noyaux est une propriété définitive des photons. Ces propriétés peuvent être aussi celles du neutron, récemment suggérées par Chadwick pour tenir compte de certains effets observés avec les rayons hautement pénétrants produits par l'impact des rayons α sur le béryllium, mais ce serait une hypothèse ad hoc et également déraisonnable".

Il est permis de penser que le ton assuré de Millikan ait pu jouer un certain rôle dans l'élaboration de l'interprétation des Joliot-Curie.

3) L'idée d'un processus Compton pour des γ énergiques ne devait pas paraître invraisemblable aux Joliot-Curie. Il y avait ces convictions de Millikan, il y avait leurs premières mesures d'absorption de décembre 1931 qui les avaient persuadés que la radiation de Bothe était réellement très pénétrante. Il y avait des indices expérimentaux de la radioactivité qui indiquaient une absorption anormale [25] des γ énergiques de la radioactivité et qui étaient considérés comme dus à des effets nucléaires inconnus. Les Joliot-Curie avaient eu le temps de

s'accoutumer à attendre du neuf avec ces γ énergiques. Quoi de plus naturel que d'avoir pensé dans un premier temps avoir découvert un nouvel effet de processus Compton avec des protons ?

Dans l'article récapitulatif de 1933 [26], les Joliot-Curie décrivent comment, avec une chambre de Wilson, ils mirent en évidence des reculs de protons, dont ils avaient déduit la présence dans leur première expérience avec une chambre à ionisation. Ils observèrent aussi des photos avec des électrons dont certains avaient une énergie supérieure à 10 MeV. Ils ajoutèrent alors :

"La présence de ces électrons secondaires, dont certains ont une très grande énergie, nous fit d'abord supposer que le rayonnement nucléaire des corps légers était de nature électromagnétique et que la projection des noyaux des atomes était due à un mécanisme analogue à celui de l'effet Compton pour les électrons".

Il est clair que l'article du 18 janvier ne fait pas mention de ces expériences avec chambre de Wilson ; la présence d'électrons n'est signalée que dans la note du 22 février. Il est non moins clair que les Joliot-Curie ont dû mener très vite des expériences avec chambre de Wilson, au moins avant le 23 janvier, date d'une lettre [27] adressée à G. Beck, déjà cité, lettre dans laquelle F. Joliot y fait allusion. Il est difficilement compréhensible que, dans leur première note, il ne soit pas fait mention de ces expériences si elles avaient déjà été réalisées. Il est par contre possible qu'elles aient été conduites après la rédaction de la note du 18 janvier mais avant le dépôt réel de cette note à l'Académie des Sciences...

4) La question de la non-conservation d'énergie dans l'interprétation proposée reste entière. Deux lettres de Guido Beck adressées à Frédéric Joliot [28] peuvent ici nous apporter quelques lumières. Dans la première, datée du 20 janvier 1932, Beck se déclare très intéressé par les notes des Joliot-Curie du 28 décembre 1931 qu'il vient de lire. Il signale qu'il faut s'attendre à des énergies de γ plus élevées que celles données par la formule de Klein-Nishina, à cause d'une absorption supplémentaire due probablement à des effets nucléaires. Jusqu'à maintenant, souligne-t-il, les résultats de Bothe ne sont pas expliqués par la théorie. Joliot lui répond le 23 janvier [29] et lui signale les résultats de nouvelles expériences (ceux du 18 janvier) qui montrent que les γ capables d'éjecter des rayons R ont une énergie

supérieure à celle estimée en fin décembre. Beck répond à cette lettre le 3 février. D'après lui ce rayonnement γ doit être dû aux électrons nucléaires. Il indique qu'il vient de soumettre pour publication un article théorique prévoyant des γ de 40 MeV dans le cas de la réaction $\alpha + \text{Be}$ [30]. Il ne signale d'ailleurs pas dans cette lettre que son modèle doit violer la conservation d'énergie.

Cette correspondance n'interfère pas bien entendu avec la note du 18 janvier. Par contre elle peut aider à comprendre que les Joliot-Curie se soient sentis rassurés dans leur explication et qu'ils déclarent donc le 22 février avoir découvert un nouvel effet des rayons γ . Ils ont en quelque sorte la caution d'un physicien théoricien pour des énergies élevées de γ dans les transmutations nucléaires.

5) Le cas de Beck est instructif. Spécialisé dans les problèmes de structure nucléaire, il publia entre 1928 et 1932 au moins dix articles théoriques sur ce sujet. Adeptes des idées de Bohr sur la non-conservation de l'énergie dans la radioactivité β , il le resta au moins jusqu'en 1934, en publiant alors une théorie des désintégrations β concurrente de celle de Fermi, basée sur cette idée de non-conservation [31]. Il faut rappeler ici que la thèse de Bohr avait la faveur de théoriciens renommés. Outre Beck il y avait, entre autres Gamow et Heisenberg.

Au congrès de Rome, Marie Curie avait écouté le rapport de Bohr donnant son opinion [32]. Dans leur ensemble, les physiciens expérimentateurs étaient circonspects. Tous continuaient en tout cas à appliquer les équations de conservation de l'énergie dans les transmutations nucléaires. Les Joliot-Curie en tenaient compte aussi en fin décembre 1931, comme nous l'avons vu. Y avaient-ils renoncé en janvier 1932, sans le mentionner explicitement ?

6) A la décharge des Joliot-Curie, il faut remarquer que l'idée du neutron ne leur était pas familière, comme elle l'était à Cambridge. En effet, en 1920, peu après la découverte de la première transmutation nucléaire permettant d'extraire du noyau d'azote un proton, Rutherford avait fait une conférence sur ce sujet [33]. Il avait abordé la question de la structure du noyau et émis l'hypothèse que pouvait y exister des états liés pe^- . La recherche de ces états liés pe^- avait été un constant souci à Cambridge depuis cette date mais avait toujours été négative.

Sans être aussi familière qu'à Cambridge, cette idée d'un état neutre à l'intérieur du noyau n'était cependant pas inconnue au

laboratoire Curie : un des physiciens du laboratoire, Georges Fournier, avait par exemple publié en 1930 un article sur la structure nucléaire, où il faisait intervenir le neutron [34]. Ce qui est probable c'est que cette idée avait été reçue à l'époque comme une simple spéculation à laquelle il n'y avait pas de raison de prêter attention...

Après la publication du 18 janvier, n'y a-t-il donc pas eu quelqu'un à Paris, Georges Fournier par exemple, pour attirer l'attention sur cette possibilité ? Les Joliot-Curie auraient eu alors le temps de mentionner cette éventualité avant Chadwick. Segré [35] et Amaldi [36] attestent qu'à Rome, avant la parution de la lettre de Chadwick, le théoricien italien Majorana avait déjà deviné la présence du neutron dans les résultats des Joliot-Curie.

Dans le mois qui suivit le 18 janvier, les Joliot-Curie ne semblent pas avoir présenté officiellement leurs résultats dans leur laboratoire. La pratique des séminaires internes n'y était pas alors courante. Ils ont du vivre une période d'activité intense, persuadés de l'importance de leurs résultats. De plus, Irène Curie était enceinte et leur fils Pierre Joliot allait naître le 12 mars. Ils ont peut-être craint aussi la concurrence d'autres physiciens, à l'intérieur ou à l'extérieur du laboratoire. Proches du laboratoire Curie étaient par exemple P. Auger et F. Perrin. Pierre Auger qui expérimentait à l'époque avec une chambre de Wilson obtint en tout cas des Joliot-Curie le prêt d'une source radioactive de polonium. Ce n'est que le 7 mars, après la lettre de Chadwick, que furent publiés l'une à la suite de l'autre une note des Joliot-Curie [37] et une de P. Auger [38], à propos de photos en chambre de Wilson montrant des reculs de protons ou des électrons rapides.

7) Un des familiers des Joliot-Curie nous a fait remarquer que, dans nos investigations, il fallait prendre en compte le tempérament et le style propre de Frédéric Joliot. Celui-ci, à partir de résultats expérimentaux, aimait lancer de nouvelles idées sans trop se soucier de leur plausibilité théorique. Aux théoriciens ensuite le soin d'en vérifier le bien-fondé et d'y travailler plus à fond. Que, dans l'élaboration de la thèse de γ trop énergiques, ce trait de caractère ait pu jouer un rôle, cela est possible. Nous avons cependant vu que les deux notes du 18 janvier et du 22 février comportent une interprétation déjà bien élaborée des résultats trouvés. Le problème de la trop grande fréquence des processus Compton avec reculs de proton a été étudié. L'objection immédiate de la non-conservation de l'énergie, elle, n'est pas soulevée.

3.3. Vers une nouvelle interprétation

Parvenu au terme de cette analyse, il nous faut donner l'hypothèse la plus probable pour laquelle les Joliot-Curie sont passés à côté de la bonne interprétation de leurs résultats. Ils n'étaient certainement pas prêts psychologiquement à faire la découverte d'une nouvelle particule, le neutron. Leur monde était celui des noyaux, des rayons α , β et γ et toute leur attention était fixée sur les propriétés que pouvaient avoir les γ produits dans les transmutations. Nous avons vu que l'environnement du laboratoire était propice à l'étude de ce problème.

La situation générale de la physique nucléaire à cette époque se prêtait par ailleurs à des remises en question. Les expériences avaient prouvé une violation, au moins apparente, de la conservation de l'énergie dans la radioactivité β . Le mode d'existence des électrons dans le noyau posait des problèmes non résolus. Bohr était prêt à admettre une non-conservation de l'énergie et à renoncer aux règles de la mécanique quantique au niveau nucléaire.

Quand ils se sont aperçus que leur hypothèse de rayons γ énergiques ne respectait pas la conservation d'énergie, il est possible que les Joliot-Curie aient été influencés par ces idées à la Bohr. Après tout, pourquoi pas ? Et pourquoi donc mentionner ce point puisque d'éminents théoriciens sont prêts à cette éventualité ? Il semble en tout cas invraisemblable qu'ils n'aient pas pensé à cette objection, puisqu'elle est déjà en germe dans leur note de fin décembre 1931.

Ainsi aurait pu commencer à prendre corps cette idée de rayons γ très énergiques. Une fois partis dans cette direction, leur démarche postérieure est plus facile à comprendre. Accaparés par la poursuite de leurs expériences, leurs discussions avec la communauté des physiciens semblent avoir été réduites. De plus deux indices venaient corroborer leur hypothèse : d'une part la présence d'électrons dans la chambre de Wilson, d'autre part, la correspondance avec G. Beck, prédisant des γ de 40 MeV.

En écoutant les réflexions diverses de physiciens qui ont vécu d'assez près ces événements ou en ont entendu parler, nous avons été frappés par les idées qui se sont développées à propos de cette non-découverte du neutron par les Joliot-Curie. Citons des interprétations que nous avons entendues :

- 1) Chadwick avait un appareillage plus performant que celui des Joliot-Curie. Disposant d'un amplificateur, il pouvait isoler les

transmutations une à une. En fait, malgré leur appareillage rudimentaire, les Joliot-Curie ont fait une expérience qui aurait pu leur faire postuler l'existence du neutron.

2) Le rayonnement étudié par les Joliot-Curie était très complexe. Il y avait aussi des γ à côté des neutrons. Les Joliot-Curie ont été gênés par la présence d'électrons qu'ils ont vus avec une chambre de Wilson. Nous venons de voir que cette observation n'a pu raisonnablement prendre place qu'après la rédaction de la note du 18 janvier.

Ces raisons semblent secondaires par rapport à celle qui nous paraît s'imposer comme la plus importante : ils se sont probablement laissés entraîner par les idées de non-conservation d'énergie, alors dans l'air à cette époque.

Cette interprétation malheureuse dont nous avons essayé d'élucider l'origine ne doit pas faire oublier tout l'aspect largement positif du travail des Joliot-Curie. Ils ont réalisé une expérience remarquable qui fut directement à l'origine de la découverte du neutron. Leur travail ultérieur sur les transmutations les a amenés ensuite à montrer qu'il devait y avoir coexistence de l'émission de neutrons et de γ [39], puis à se demander s'il n'y avait pas des réactions donnant à la fois un électron positif et un neutron [40]. Cette dernière recherche devait les mettre sur la voie de la découverte de la radioactivité artificielle [41]. Ce cheminement a été retracé en détail dans le livre "La radioactivité artificielle et son histoire" [42].

4. CONCLUSION

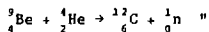
Notre étude, consacrée à des aspects de la non-découverte du neutron par Bothe ou les Joliot-Curie aboutit à des conclusions peu connues. Bothe a fait une expérience sensible surtout aux γ et, dans ces conditions, il lui était très difficile de trouver le neutron. Par contre, il est raisonnable de lui attribuer la mise en évidence du rayonnement γ induit dans les transmutations nucléaires, bien que cette existence n'ait été établie que progressivement. Les Joliot-Curie auraient pu découvrir le neutron si leur attention n'avait pas été trop fixée sur les γ et leur jugement trop influencé par les idées de non-conservation de l'énergie dans des processus nucléaires.

Nous pourrions donner maints exemples de textes qui laissent place à de mauvaises interprétations sur la découverte du neutron: En voici un exemple tiré d'un livre de physique [43] :

"D'abord en 1930, les allemands W. Bothe et H. Becker constatèrent que le bombardement par des particules alpha de cibles de béryllium produisait un rayonnement extrêmement pénétrant qu'ils considérèrent comme formé de rayons gamma de très grande énergie.

Puis en 1932 Frédéric et Irène Joliot-Curie reprenant ces expériences trouvèrent que ce rayonnement est fortement absorbé par des écrans contenant une forte proportion d'hydrogène (des plaques de paraffine par exemple) ; cette absorption s'accompagne de l'émission d'un grand nombre de protons, et ce résultat ne correspondait pas aux propriétés connues des rayonnements électro-magnétiques.

Cette énigme fut résolue peu après par Chadwick qui suggéra que le rayonnement pénétrant obtenu était en réalité constitué par des "neutrons", particules de charge nulle et de masse voisine de celle du proton. Les phénomènes étudiés devenaient explicables et la réaction sur le béryllium s'écrivait :



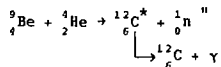
Cette situation laisse clairement entendre que la radiation pénétrante de Bothe et Becker était constituée de neutrons. Par déduction le lecteur doit donc en tirer la conclusion que Bothe et Becker se sont en fait trompés dans leur interprétation. La mauvaise interprétation des Joliot-Curie est très atténuée.

La formulation suivante, de longueur à peu près équivalente, nous semble mieux respecter la réalité des faits :

"D'abord en 1930, les allemands W. Bothe et H. Becker constatèrent que l'interaction provoquée sur le béryllium par des particules α venant du polonium produisait un rayonnement neutre pénétrant qu'ils considérèrent comme formé de rayons γ énergiques. En 1932, en étudiant cette interaction par d'autres moyens, Frédéric et Irène Joliot-Curie découvrirent que leur rayonnement était capable d'éjecter des protons de matières hydrogénées. Ils

crurent à un nouveau type d'interaction de rayons γ très énergiques. Pendant ce temps W. Bothe et H. Becker avaient réussi à isoler dans le rayonnement des γ d'énergie modérée.

Intrigué par l'effet des Joliot-Curie, qui devait violer le principe de la conservation d'énergie s'il était dû à des γ , Chadwich refit des expériences similaires. Il montra que cette radiation pénétrante était capable de projeter, non seulement des protons, mais aussi d'autres noyaux. Cette propriété s'expliquait facilement en admettant l'existence de neutrons, particules de charge nulle et de masse voisine de celle du proton. Plus tard on s'aperçut qu'il y avait souvent émission d'un neutron et d'un γ suivant la réaction :



Cette étude a bénéficié de témoignages de physiciens témoins de l'époque : G. Beck, L. Leprince-Ringuet et F. Perrin. MM. Fleischmann et Maier-Leibnitz élèves de Bothe m'ont apporté de précieux renseignements. Madame H. Langevin, MM. R.J. Walen et L. Goldstein m'ont aidé à reconstituer l'atmosphère du laboratoire Curie. M. U. Schmidt-Rohr m'a grandement facilité l'accès aux archives de Bothe ainsi que Madame M. Bordy pour les archives Curie. M. P. Radvanyi a lu et commenté oralement une première version de ce texte. Que tous soient ici remerciés.

REFERENCES

- 1 - W. Bothe et H. Becker : "Künstliche Erregung Von Kern- γ -Strahlen" Zeits. f. Phys. 66 (1930) 289-306 (article du 23 octobre 1930, publié le 3 décembre).
- 2 - Atti Del Convegno di Fisica Nucleare, Rome 1931 (octobre) : W. Bothe : " α -Strahlen, Künstliche Kernumwandlung und-Änregung, Isotope"
- 3 - Mme Irène Curie et H.F. Joliot : "Emission de protons de grande vitesse par les substances hydrogénées sous l'influence de rayons γ très pénétrants" Comptes Rendus Ac. Sc. (Paris) 194 (1932) 273-275 (note du 18 janvier 1932)
- 4 - . Mme Irène Curie : "Sur le rayonnement γ nucléaire excité dans le glucinium et dans le lithium par les rayons α du polonium" Comptes Rendus Ac. Sc. (Paris) 193 (1931) 1412-1414 (note du 28 décembre 1931).
. M.F. Joliot : "Sur l'excitation des rayons γ nucléaires du bore par les particules α . Energie quantique du rayonnement γ du polonium" Comptes Rendus Ac. Sc. (Paris) 193 (1931) 1415-1417 (note du 28 décembre 1931).
- 5 - J. Chadwick : "Possible Existence of a Neutron" Nature 129 (1932) 312-312 (lettre du 17 février 1932, publiée le 27 février).
- 6 - J. Chadwick : "The existence of a neutron" Proc. Roy. Soc. (London) A 136 (1932) 692-708 (article du 10 mai 1932, publié le 1er juillet).
- 7 - Mme Irène Curie et H.F. Joliot : "Effet d'absorption de rayons γ de très haute fréquence par projection de noyaux légers" Comptes Rendus Ac. Sc. (Paris) 194 (1932) 708-711 (note du 22 février 1932).
- 8 - H. Becker et W. Bothe : "Die in Bor und Beryllium erregten γ - Strahlen" Zeits. f. Phys. 76 (1932) 421-438 (article du 25 avril 1932, publié le 20 juin).
- 9 - H. Becker et W. Bothe : "Kurze Originalmitteilungen" Naturwiss 20 (1932) 757-758 (note du 3 septembre 1932, publiée le 7 octobre).
- 10 - R. Fleischmann : "(n, γ) research in the thirties" 4th international symposium on neutron capture gamma-ray spectroscopy and related subjects, Grenoble 7-11 september-1981).
- 11 - Lettre reçue du professeur Schmidt-Rohr, Heidelberg (13 mai 1985).
- 12 - Notes de conférences sur la transmutation des éléments données par Bothe l'été 1932 et fin 1932. Ces notes manuscrites m'ont été transmises par M. Schmidt-Rohr, traduites en anglais.

- 13 - W. Bothe et H. Fränz : "Atomtrümmer, reflektierte α -Teilchen und durch α -Strahlen erregte Röntgenstrahlen". Zeits. f. Phys. 49 (1928) 1-26.
- 14 - Voir supra réf. 8.
- 15 - W. Bothe et H.J. Von Baeyer : "Koinzidenzuntersuchungen an Kernprozessen" Göttingen Nachr. 1 (1935) 195-197.
- 16 - H.S. Rosenblum : "Structure fine du spectre magnétique des rayons α du thorium C" Comptes Rendus Ac. Sc. (Paris) 188 (1929) 1401-1403.
- 17 - F.P. Slater : "The Excitation of γ Radiation by α Particles from Radium Emanation". Phil. Mag. 42 (1921) 904-923.
- 18 - Voir supra réf. 10.
- 19 - "Nobel Prizes in 1935" P.A. Norstedt Söner (ed) Stockholm, 1937.
- 20 - Voir supra réf. 4.
- 21 - Voir supra réf. 3 et 7.
- 22 - Voir supra réf. 4.
- 23 - Lettre reçue de G. Beck (18 décembre 1985).
- 24 - Robert A. Millikan et Carl D. Anderson : "Cosmic Rays Energies and their Bearing on the Photon and Neutron Hypotheses" Phys. Rev. 40 (1932) 325-328.
- 25 - . C.Y. Chao : "Scattering of Hard γ -Rays" Phys. Rev. 36 (1930) 1519-1522.
 - . G.T.P. Tarrant : "The Nature of the Interaction between Gamma Radiation and Atomic Nuclei". Proc. Roy. Soc. (London) A 128 (1930) 345-359.
 - . Lise Meitner et H.H. Hupfeld : "Über des Absorptionsgesetz für Kutzvellige γ -Strahlung" Zeits. f. Phys. 67 (1931) 147-168.
 - . J.C. Jacobsen : "Über Absorption und Streuung von γ -Strahlen" Zeits. f. Phys. 70 (1931) 147-168.
- 26 - Irène Curie et Frédéric Joliot : "Preuves expérimentales de la découverte du neutron" Journal. Phys. Rad. 4 (1933) 21-39.
- 27 - Lettre de F. Joliot à G. Beck, datée du 23 janvier 1932 (communiquée par G. Beck).
- 28 - Lettres de G. Beck à F. Joliot, datées du 20 janvier et 3 février 1932 (archives Curie).
- 29 - Voir supra réf. 27.
- 30 - G. Beck : "Bemerkung zur Theorie schnell schwingender Ladungen" Zeits. f. Phys. 75 (1932) 211-222.
- 31 - G. Beck et K. Sitte : "Zur theorie der β Zerfalls" Zeits. f. Phys. 86 (1933) 105-119 ; "Bemerkung zur Arbeit von Versuch einer Theorie der β -Strahlen" Zeits. f. Phys. 89 (1934) 259-260.

- 32 - Atti del Convegno di Fisica Nucleare Rome 1931 (Octobre) N. Bohr "Atomic Stability and conservation laws".
- 33 - Sir E. Rutherford : "Nuclear constitution of atoms" Proc. Roy. Soc. (London) A 97 (1920) 374-400.
- 34 - Georges Pournier : "Sur une classification nucléaire des atomes en relation avec leur genèse possible et leur désintégration radioactive" Journal Phys. Rad. 7 (1930) 194-205.
- 35 - E. Segré : "From X rays to quarks. Modern physicists and their discoveries" W.H. Freeman 1980.
- 36 - Edoardo Amaldi : "From the discovery of the neutron to the discovery of nuclear fission" Physics Reports 111 (1984).
- 37 - Mme Irène Curie et M.F. Joliot : "Projection d'atomes par les rayons très pénétrants excités dans les noyaux légers" Comptes Rendus As. Sc. (Paris) 194 (1932) 876-877.
- 38 - Pierre Auger : "Sur la projection de noyaux légers par les rayonnements ultra-pénétrants de radioactivité provoquée. Trajectoires photographiques par la méthode de Wilson" Comptes Rendus Ac. Sc. (Paris) 194 (1932) 877-880.
- 39 - Voir supra réf. 26.
- 40 - M. et Mme Joliot : "Rayonnement pénétrant des atomes sous l'action des rayons α " Compte-rendu du septième conseil de Physique Solvay "Structure et propriétés des noyaux atomiques" tenu à Bruxelles du 22 au 29 octobre 1933 (Paris Gauthier-Villards, 1934).
- 41 - Mme Irène Curie et M.F. Joliot : "Un nouveau type de radioactivité" Comptes Rendus Ac. Sc. (Paris) 198 (1934) 254-266.
- 42 - Pierre Radvanyi et Monique Bordry : "La radioactivité artificielle et son histoire" éd. du Seuil, Paris 1984.
- 43 - Daniel Blanc et Georges Ambrosino : "Eléments de physique nucléaire" (éd. Masson, Paris-1967).