

Une énigme de la radioactivité

Dans son livre « Il était sept fois la révolution, Albert Einstein et les autres » : Etienne KLEIN, Physicien au Commissariat à l'Energie Atomique (CEA), professeur à l'école centrale et docteur en philosophie des sciences, consacre le cinquième chapitre à Wolfgang Pauli :

« Wolfgang Pauli aimait les sucreries et les pâtisseries. Notoirement, à la folie même.[...]

Amoureux des situations compliquées, friands d'énigmes tenaces qui désespèrent ses collègues, il en vient à se passionner pour l'épineux problème que constitue l'un des trois types de radioactivité, celle dite « bêta » : lorsqu'un noyau contient trop de neutrons pour être stable, il se transforme en un autre noyau en émettant un électron. Au cours de l'année 1930, cette transformation nucléaire semble encore très mystérieuse :

les mesures indiquent que l'énergie de l'électron n'est pas chaque fois la même ; elle peut prendre une valeur quelconque, tantôt grande,

tantôt petite, alors qu'on s'attendait à une valeur précise, toujours la même, qui correspond justement à la différence d'énergie entre le noyau initial et le noyau final. Ces résultats semblent donc violer la loi de conservation de l'énergie, qui dans une telle situation, indique que l'énergie de l'électron doit être parfaitement déterminée. »



Wolfgang Pauli (1900-1958), prix Nobel de physique 1945. © AIP Emilio Segre Visual Archive

A l'aide des connaissances que vous avez acquises tout au long de cette partie du programme « COMPRENDRE, Lois et modèles », vous allez, à partir des différents documents et consignes donnés, suivre pas à pas le long cheminement qui conduira à la résolution de ce « problème épineux ».

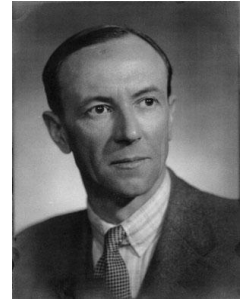
Les questions auxquelles vous allez devoir répondre sont les suivantes :

- Quelles hypothèses initiales peut-on poser relativement au phénomène de la désintégration « bêta - » ?
- Quel est ce « problème épineux » ?
- Quelle est la solution élaborée par la communauté scientifique ?

A/ L'histoire commence en 1914

En 1914, James Chadwick, suite à l'analyse d'un très grand nombre de désintégrations bêta moins, parvient à tracer la courbe du nombre de particules émises en fonction de l'énergie cinétique de ces particules. Cette courbe est un spectre d'émission.

Les connaissances de l'époque sur la structure de la matière sont que l'atome est constitué de protons et d'électrons.



James Chadwick (1891-1974), prix Nobel de physique 1935. © AIP ; Emilio Segre Visual Archives

Questions :

A.1/ Le noyau de phosphore $^{32}_{15}\text{P}$ est un émetteur bêta moins. Déterminer, à partir des données qui suivent, l'énergie libérée lors de la désintégration d'un noyau de phosphore 32 au repos. Sous quelle forme cette énergie est-elle libérée ?

Données :

- masses de quelques noyaux et particules :

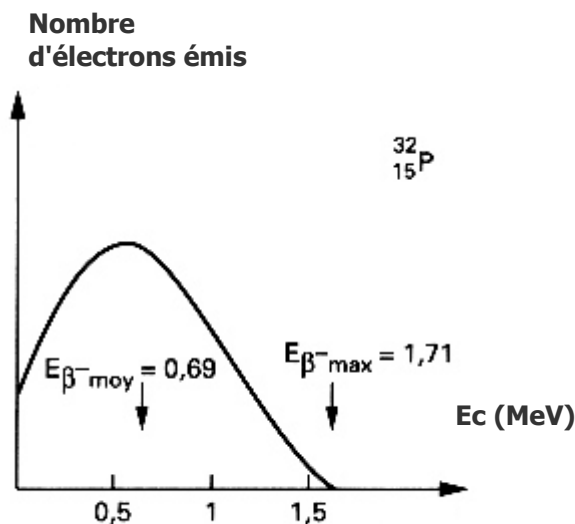
$$m(^{32}_{15}\text{P}) = 5,30803 \cdot 10^{-26} \text{ kg}; \quad m(^{32}_{16}\text{S}) = 5,30763 \cdot 10^{-26} \text{ kg}; \quad m(^{32}_{14}\text{Si}) = 4,66370 \cdot 10^{-26} \text{ kg}, \quad m(e^-) = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg};$$

- célérité de la lumière dans le vide : $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;

- électron-volt : $1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

A.2/ L'énergie cinétique E_c des électrons émis au cours de l'ensemble des désintégrations du phosphore 32 a été mesurée.

Les résultats donnés dans le diagramme ci-dessous sont-ils compatibles avec le résultat obtenu ? Quelles hypothèses peut-on formuler ?



Source : <http://biuintra.univ-bpclermont.fr/spipPortail2/IMG/pdf/Rosnet.pdf>

B / De nouvelles idées pour sauver la conservation de l'énergie

La contradiction entre la loi de conservation de l'énergie et le spectre continu de la désintégration bêta resta incomprise et mystérieuse pendant plus de 20 ans.

Étienne Klein poursuit ainsi dans son livre :

« Pour sauver cette loi essentielle de la physique (que Niels Bohr était prêt à réduire à une loi valable seulement de façon statique dans le monde microscopique, c'est à dire non vraie pour chaque événement particulier mais seulement en moyenne), Wolfgang Pauli, taraudé par ce nombre 3, fait une hypothèse audacieuse : contrairement aux apparences, le noyau ne se désintègre pas en deux corps mais en trois. Une troisième particule, pense-t-il, est émise simultanément, qui emporte l'énergie manquante.

Pauli fait connaître son idée d'une façon assez originale. Il sait qu'un colloque va réunir les physiciens allemands à Tübingen, le 6 décembre 1930, en présence de Lise Meitner, une spécialiste de la radioactivité bêta mais il hésite à s'y rendre car, son divorce vient tout juste d'être prononcé et pour l'heure, il éprouve le besoin de noyer son mal-être, s'étourdir, fréquenter les fêtes et les bals. Il choisit d'envoyer l'un de ses amis à la conférence avec pour mission d'y lire une communication, dont un extrait est donné ci-après.

Le ton désinvolte de la lettre (écrite en état d'ébriété?) , ajouté à la description plutôt confuse de cette nouvelle particule neutre, explique peut-être pourquoi la thèse de Pauli n'est guère prise au sérieux par les participants.

[...]Une fois son épaule remise, Pauli peut se rendre à Rome où se tient en octobre 1932 un colloque sur la physique nucléaire organisé par Enrico Fermi. Sur place une réception officielle le contraint à serrer la main à Mussolini. Il en conçoit une honte tenace. Mais il a le loisir d'exposer longuement son idée à Fermi, en privé, lequel saisit aussitôt toute la portée de l'hypothèse. »

Voici un extrait de la lettre de Pauli :

Zürich, 4 December 1930

Dear Radioactive Ladies and Gentlemen,

As the bearer of these lines, to whom I graciously ask you to listen, will explain to you in more detail, how because of [...] the continuous β -spectrum, I have hit upon a desperate remedy to save [...] the law of conservation of energy. Namely, the possibility that there could exist in the nuclei electrically neutral particles, that I wish to call neutrons[...] The mass of the neutrons should be of the same order of magnitude as the electron mass and in any event not larger than 0.01 proton masses. The continuous β -spectrum would then become understandable by the assumption that in β -decay, a neutron is emitted in addition to the electron such that the sum of the energies of the neutron and electron is constant. [...]
Unfortunately I cannot appear in Tübingen personally, since I am indispensable here in Zürich because of a ball on the night of 6-7 December.

*With my best regards to you, and also to Mr Back,
Your humble servant*

W. Pauli



Wolfgang Pauli (1900-1958),
prix Nobel de physique
1945. © AIP Emilio Segre
Visual Archive



Enrico Fermi (1901-1954)
prix Nobel de physique
1938, □ © AIP Emilio Segre
Visual Archive

Questions :

B.1/ Que propose Pauli pour expliquer les propriétés de la désintégration bêta ?

B.2/ Comment Pauli baptise-t-il sa nouvelle particule ?

B.3/ En 1932, James Chadwick découvre une particule neutre dans le noyau atomique dont la masse est légèrement supérieure à celle du proton ($m(\text{neutron}) = 1,00866 \text{ u}$).

Pourquoi la particule découverte par James Chadwick ne peut pas être celle que propose Pauli pour expliquer les propriétés de la désintégration bêta ?

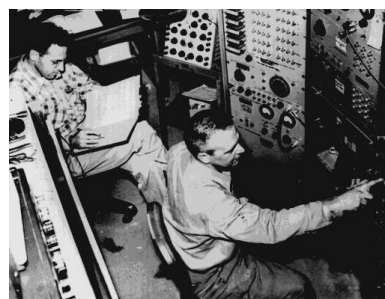
C. Conclusion ? Ou l'histoire continue-t-elle ?

C'est E. Fermi qui attribuera le nom de « neutrino » (petit neutre, par opposition au « neutron », le gros neutre) à la particule introduite par Pauli. Une mise au point générale s'opère au [congrès Solvay](#) de Bruxelles en 1933, où on fait la distinction entre neutron (du noyau) et neutrino (de la désintégration bêta). Les réticences de Pauli s'effacent et il signe l'acte de naissance du neutrino dans une communication officielle à ce même congrès.

La mise en évidence expérimentale des neutrinos s'est avérée particulièrement difficile. En effet, la théorie de Fermi permet de calculer la probabilité d'interaction entre les neutrinos et la matière. Cette particule interagit si peu qu'elle peut traverser la Terre entière sans subir le moindre choc.

Jusqu'à la fin des années 40 aucune détection des neutrinos n'est possible faute de source abondante et de détecteur suffisamment sensible.

Il faudra attendre **1956** pour que Reines et Cowan mettent en évidence les (anti) neutrinos produits par le réacteur de Savannah River (USA).



Fred Reines and Clyde Cowan (1953)

Questions :










C.1/ Quelle durée s'est écoulée entre la formulation de l'hypothèse des neutrinos et leur mise en évidence expérimentale ?

C.2/ Pour quelles raisons a-t-il fallu attendre si longtemps pour mettre en évidence expérimentalement les neutrinos ?

C.3/ Rechercher pourquoi ces neutrinos sont des particules encore mystérieuses aujourd'hui ?

✓ Les compétences travaillées

La grille proposée est directement inspirée du préambule du programme de l'enseignement commun de la classe de première.

La démarche scientifique			
↗ Rechercher, extraire et organiser l'information utile.			
↗ Mettre en œuvre un raisonnement (identifier un problème, formuler des hypothèses, les confronter aux constats expérimentaux et exercer son esprit critique).			
↗ Mobiliser des connaissances.			
↗ Travailler en équipe.			
↗ Présenter la démarche suivie et les résultats obtenus, communiquer à l'écrit et à l'oral.			
Mise en perspective historique			
↗ Connaître l'histoire de la construction de la connaissance scientifique.			
↗ Exercer sa liberté intellectuelle, son esprit critique.			
↗ Manifester sa volonté de persévérer, développer l'humilité et la patience.			
Lien avec les autres disciplines			
↗ Liaison avec l'histoire			

UNE ENIGME DE LA RADIOACTIVITE

- ✓ **La classe : première S**
- ✓ **La durée : 1h30**
- ✓ **Dans le programme de la classe visée**

COMPRENDRE Lois et modèles	
<i>Quelles sont les causes physiques à l'œuvre dans l'Univers ? Quelles interactions expliquent à la fois les stabilités et les évolutions physiques et chimiques de la matière ? Quels modèles utilise-t-on pour les décrire ? Quelles énergies leur sont associées ?</i>	
Notions et contenus	Compétences attendues
Cohésion et transformations de la matière	
particules élémentaires : électrons, neutrons, protons. Lois de conservation dans les réactions nucléaires.	Connaître l'ordre de grandeur des valeurs des masses d'un nucléon et de l'électron Utiliser les lois de conservation pour écrire l'équation d'une réaction nucléaire Utiliser la relation $E_{\text{libérée}} = \Delta mc^2$ Recueillir et exploiter des informations sur les réactions nucléaires
Formes et principe de conservation de l'énergie	
Principe de conservation de l'énergie. Application à la découverte du neutrino dans la désintégration bêta.	Connaître diverses formes d'énergie Exploiter le principe de conservation de l'énergie dans des situations mettant en jeu différentes formes d'énergie.

✓ **Remarques et conseils**

⤴ **A propos de la question A1:**

On trouve $\Delta E = 1,71$ MeV

⤴ **A propos de la question A2:**

Parmi les hypothèses que peuvent émettre les élèves :

- les chocs des électrons : ils ne peuvent pas expliquer la continuité du diagramme car les collisions entre électrons sont hautement improbables.
- La désexcitation gamma : elle conduirait à une répartition discrète de l'énergie. Voir exemple du césium détaillé ci-après.

La source de ^{137}Cs émet un photon d'énergie 0,662 MeV, celui-ci peut arracher un électron des couches orbitales, c'est ce que l'on appelle la conversion interne. L'électron émis aura alors une énergie égale à l'énergie du photon moins l'énergie de liaison de la couche sur laquelle il se trouve. Les énergies de liaison des couches K, L et M sont de l'ordre de 36 keV ce qui donne une série de pics autour de 0,626 MeV. Étant donné la résolution de l'appareillage, seuls quelques pics sont visibles.

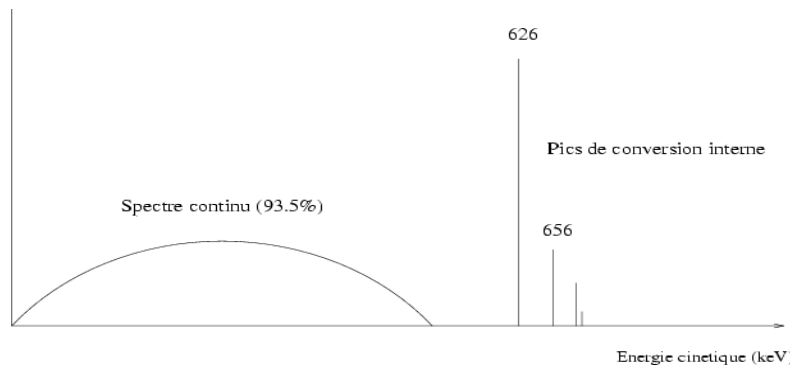
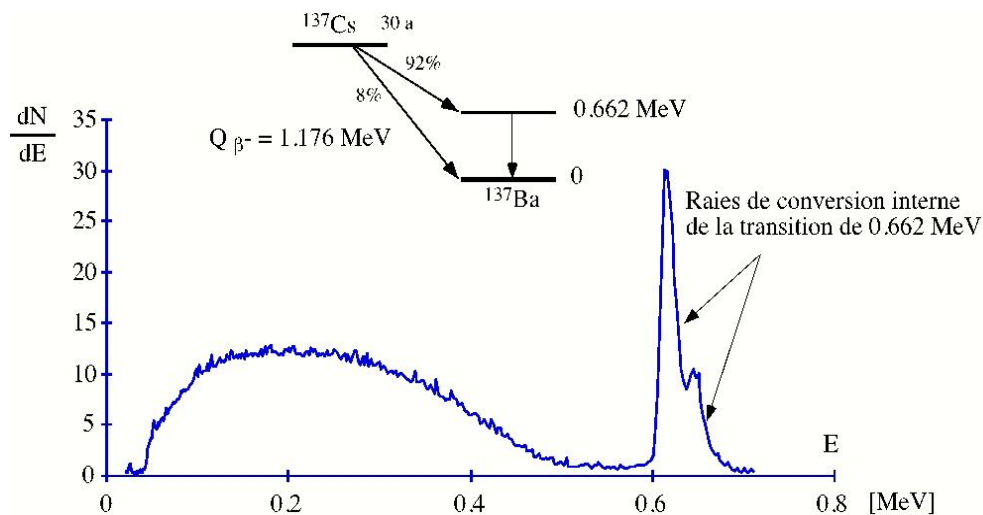


Figure: Allure du spectre beta attendu pour une source de ^{137}Cs (n'est pas représentée la contribution du bêta de 1,176 MeV (6.5%))



Spectre d'énergie des bêta mesuré à l'IPHE

Source : http://lphe.epfl.ch/mtran/spectre_beta.JPG

▲ **A propos de la question B.1 :**

- Le texte peut être travaillé avec le collègue d'anglais.

- Une version plus courte peut être proposée :

«Dear Radioactive Ladies and Gentlemen,

[...] I have hit upon a desperate remedy to save the law of conservation of energy [...] The mass of the neutrons should be of the same order of magnitude as the electron mass [...] The continuous beta spectrum would then become understandable by the assumption that in beta decay a neutron is emitted in addition to the electron such that the sum of the energies of the neutron and the electron is constant[...] »

- Un exemple de traduction

Chers Mesdames et Messieurs radioactifs,

Comme le porteur de ces lignes, que je vous prie d'écouter avec beaucoup de bienveillance, vous l'expliquera plus en détails, en raison de la [...] continuité du spectre bêta, j'ai trouvé une solution désespérée pour sauver [...] la loi de conservation de l'énergie. A savoir, la possibilité qu'il puisse exister dans le noyau des particules électriquement neutres, que je pourrais appeler neutrons [...] La masse des neutrons devrait être du même ordre de grandeur que la masse de l'électron et en tout cas pas plus grande que 0,01 masse du proton. Le spectre bêta continu serait alors compréhensible si, dans l'hypothèse de la désintégration bêta, un neutron est émis en plus de l'électron tel que la somme des énergies du neutron et l'électron est constante. [...]

Malheureusement, je ne peux pas paraître personnellement à Tübingen, puisque je suis indispensable ici, à Zürich en raison d'un bal dans la nuit du 6-7 Décembre.

Avec mes meilleures salutations à vous, et aussi à M. Back,

Votre humble serviteur

▲ **Sources d'informations :**

<http://www.savoirs.essonne.fr/dossiers/la-matiere/physique/dou-viennent-les-neutrinos/pourquoi-a-t-on-eu-besoin-des-neutrinos/>

<http://membres.multimania.fr/neutrino/neutrinos.htm>

<http://physique.coursgratuits.net/physique-nucleaire/desintegration-beta.php>

<http://biuintra.univ-bpclermont.fr/spipPortail2/IMG/pdf/Rosnet.pdf>

<http://lphe.epfl.ch/enseigne/tp4/spectrob/node3.html>

<http://lphe.epfl.ch/enseigne/tp4/spectrob/node4.html>

<http://lphe.epfl.ch/enseigne/tp4/spectrob/node5.html>

▲ **Scénario pédagogique possible :**

Faire travailler les élèves par groupe. Tous les groupes doivent répondre à toutes les questions, puis, étape par étape le rôle de chaque groupe est donné :

- Quelles sont les connaissances dont on dispose au départ sur la désintégration ? un groupe communiquera ces hypothèses de bases à l'ensemble de la classe en s'aidant du cours et du premier document (les autres documents sont distribués après)

- Identifier la problématique avec un calcul, et des éléments expérimentaux avec les supports de travail p2 et 3. (un autre groupe peut être chargé de la communication)

- La solution retenue par les scientifiques, pourquoi elle est plausible? p5 et 6 (autre groupe)

- Les éléments de recherche actuels avec internet (dernier groupe , le plus rapide lorsqu'il aura fini)