

SÉMINAIRE L. DE BROGLIE. THÉORIES PHYSIQUES

E. NAHMIAS

La découverte du neutrino aux U.S.A. en 1956

Séminaire L. de Broglie. Théories physiques, tome 26 (1956-1957), exp. n° 7, p. 1-10

<http://www.numdam.org/item?id=SLDB_1956-1957__26__A6_0>

© Séminaire L. de Broglie. Théories physiques
(Secrétariat mathématique, Paris), 1956-1957, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la collection « Séminaire L. de Broglie. Théories physiques » implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (<http://www.numdam.org/conditions>). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM

Article numérisé dans le cadre du programme
Numérisation de documents anciens mathématiques
<http://www.numdam.org/>

-:-:-

Séminaire de THÉORIES PHYSIQUES
(Séminaire Louis de BROGLIE)
Année 1956/57

Exposé n° 7

-:-:-

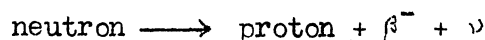
LA DÉCOUVERTE DU NEUTRINO AUX U.S.A. en 1956

(Exposé de E. NAHMIAS, le 29.1.1957)

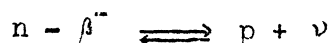
Les expériences entreprises depuis près de 6 ans, par les physiciens de Los Alamos, pour détecter le neutrino, sont arrivées au point où le rapport : "Signal sur bruit de fond" est nettement supérieur aux erreurs expérimentales.

C'est par une réaction β -inverse que Cowan, Reines et leurs collaborateurs ⁽¹⁾ ont mis en évidence l'action directe des neutrinos d'une pile atomique sur les noyaux d'hydrogène.

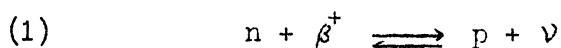
Cette réaction β -inverse peut être calculée par le théorème de réciprocité appliqué à la réaction suivante :



qui peut s'écrire



ou encore



On trouve pour la section de choc de cette réaction :

$$(2) \quad \sigma = \left(\frac{G^2}{2\pi}\right) \left(\frac{\hbar}{mc}\right)^2 \left(\frac{p}{mc}\right)^2 \frac{1}{v/c}$$

où $G^2 = 44 \cdot 10^{-24}$ est la constante de couplage β ; p , m et v sont respectivement la quantité de mouvement, la masse et la vitesse du positon émis lors de la capture du neutrino par le proton. On trouve que pour des neutrinos de 3 MeV, cette section est de l'ordre de 10^{-43} cm^2 : en fait σ varie en fonction de l'énergie des neutrinos suivant l'expression :

$$(3) \quad \sigma = 1 \cdot 10^{-44} \cdot (E-a) \sqrt{(E-a)^2 - 1} \quad ,$$

où $a + 1 = 3,53$ en Unités mc^2 , c'est-à-dire à 1,8 MeV, qui est le

(1) COWAN, REINES, HARRISON, KRUSE et Mc GUIRE - Science 124, 103 (1956).

seuil de la réaction $p + \nu \longrightarrow n + \beta^+$, car $(n-p) = 0,8$ et β^+ exige 1 MeV.

Ce seuil, pour un proton lié à un noyau, est supérieur à 1,8 MeV, d'une quantité égale à la différence d'énergies entre le noyau-cible Z et le noyau final $(Z-1)$ ⁽²⁾.

Cowan, Reines et Harrison avaient déjà essayé ⁽³⁾ de mettre en évidence la production de neutrons et de positons à partir de la capture des neutrinos d'une pile par un liquide riche en hydrogène, et avaient trouvé une différence de comptage, entre pile en marche et pile à l'arrêt, de : $0,4 \pm 0,2$ impulsions par minute.

Le rapport "Signal sur bruit de fond" était cependant encore très faible et de l'ordre de 1/20 ème. Une seconde expérience fut donc entreprise avec des moyens plus importants et notamment avec le flux de neutrinos de la pile de Savannah River. La puissance de cette pile n'est pas dévoilée, probablement pour tenir secrète sa production quotidienne de plutonium, et, comme d'autre part, les auteurs ne donnent pas le coefficient d'efficacité de leur appareil détecteur, il n'est pas possible de soumettre leurs calculs à un examen critique, et nous ne pouvons qu'admettre les chiffres qu'ils publient.

Voici en quoi consiste l'expérience : le neutrino capturé par un proton, qui se change en un neutron, provoque l'émission d'un positon. Ce positon est vite capturé par un électron et de cette annihilation résultent deux quanta γ de 0,51 MeV émis à 180° l'un de l'autre. Le neutron de son côté diffuse dans le milieu hydrogéné qui est additionné d'un sel de cadmium et au bout de quelques microsecondes, il est capturé par un atome de cadmium donnant des rayons γ de capture d'une énergie totale de 9 MeV (Fig. 1).

En disposant donc de détecteurs γ de grande efficacité, on peut espérer observer des coïncidences entre les γ d'annihilation et les γ de capture. Dans la recherche de la meilleure géométrie, il faut tenir compte de l'absorption des photons d'annihilation, relativement mous, par le milieu hydrogéné. On trouve ainsi que l'épaisseur d'eau optimum est de 7,5 cm. Pour obtenir un effet de quelques impulsions par heure, avec le flux de neutrinos

⁽²⁾ Ainsi pour le proton lié au deutérium, le seuil est de $1,8 + 2,2 = 4$ MeV.

⁽³⁾ Phys. Rev., 96, 1954, p. 1294.

non dévoilé de la pile de Savannah River, les auteurs trouvent que le volume à irradier par ces neutrinos devrait être de l'ordre de 200 litres. Ils emploient par conséquent 2 réservoirs de 190 cm x 130 cm x 7 cm. Ces deux réservoirs sont mis en sandwich comme l'indique la figure 2 avec trois réservoirs de 61 cm de profondeur, contenant le détecteur constitué par un liquide scintillateur. Ce scintillateur liquide contenait du triéthylebenzène, terphényl et un déviateur de longueur d'ondes dénommé "Popop". Ce scintillateur réparti en trois réservoirs était "vu" par 110 photomultiplicateurs Dumont de 12,5 cm de diamètre. L'ensemble de ces 5 réservoirs et des photomultiplicateurs était protégé par un écran de plomb et de paraffine et placé très profondément en terre près des réacteurs de Savannah River Plant. Les signaux donnés par les photomultiplicateurs étaient transmis par des cables coaxiaux à un ensemble électronique placé dans un camion et se trouvant loin du réacteur. Ces impulsions étaient analysées en amplitude et par des circuits de coïncidences retardées.

Lorsque cette sélection donnait un phénomène acceptable, les impulsions oscilloscopiques étaient enregistrées photographiquement comme l'indique la figure 3.

Le système était étalonné avec une source de neutrons fournis par un mélange Beryllium + Plutonium et par un émetteur positonique, le cuivre 64, dissout dans les deux réservoirs-cibles. L'expérience dura 1371 heures, comprenant le réacteur en marche ou à l'arrêt, et les résultats suivants furent obtenus :

- 1) Un signal fonction de la puissance du réacteur de :
 $2,88 \pm 0,22$ impulsions par heure.

Le rapport de ce signal au bruit de fond indépendant de la marche du réacteur était de 3/1, tandis que le rapport du signal au bruit de fond lié au fonctionnement du réacteur était supérieur à 20/1. En prenant le spectre des neutrinos dûs aux fragments de fission (Fig. 4) et en portant les valeurs les plus probables dans l'expression (3) on trouve : $\sigma = 6.10^{-44} \text{ cm}^2$.

La différence entre les signaux de pile en marche et pile à l'arrêt, de $2,88 \pm 0,22$ impulsions par heure, se trouve en accord avec ce σ .

- 2) En diluant l'eau des réservoirs-cibles avec de l'eau lourde, on réduit la densité protonique et le signal observé diminue proportionnellement d'autant.

3) Les impulsions en coïncidences par paire ont été analysées et leur énergie a été mesurée. On a trouvé une valeur de 0,5 MeV analogue à celle de la radiation d'annihilation de l'émetteur positonique Cu 64 .

4) Les impulsions attribuées à la capture des neutrons par le cadmium disparaissaient bien lorsqu'on enlevait des réservoirs-cibles le cadmium sous forme de sel qui y était dissout.

5) Les neutrons et les rayons γ émis par le réacteur n'étaient pas responsables du signal observé ; en effet une forte source de neutrons placée à l'extérieur de l'ensemble expérimental ne donnait aucune coïncidence retardée analogue à celles observées avec le réacteur en marche ; de plus la mise en place d'un absorbant entre l'ensemble expérimental et le réacteur, et capable de diminuer d'un facteur 10 les neutrons et les γ du réacteur, ne changeait en rien le signal observé.

Cet ensemble de vérifications semble prouver la réalité de la réaction β -inverse et par conséquent celle du neutrino. Cowan et Reines vont maintenant essayer de prouver chimiquement, et non plus électroniquement, l'existence du neutrino.

En effet, on peut envisager d'irradier un élément de charge Z par un flux intégré très important de neutrinos fournis par une pile et d'accumuler ainsi dans le réservoir contenant la cible les atomes de l'élément $(Z-1)$.

Voici les éléments favorables à cette tentative :

Elément initial	Pourcentage isotopique naturel	Elément final radioactif	Période
$^{17}_{17}\text{Cl } 35$	75 %	$^{16}_{16}\text{S } 35$	87 jours
$^{21}_{21}\text{Sc } 45$	100 %	$^{20}_{20}\text{Ca } 45$	152 jours
$^{27}_{27}\text{Co } 59$	100 %	$^{26}_{26}\text{Fe } 59$	45 jours
$^{35}_{35}\text{Br } 79$	50 %	$^{34}_{34}\text{Se } 79$	$6 \cdot 10^4$ années
$^{44}_{44}\text{Ru } 99$	13 %	$^{43}_{43}\text{Tc } 99$	$2 \cdot 10^5$ années
$^{55}_{55}\text{Cs } 133$	100 %	$^{54}_{54}\text{Xe } 133$	5,2 jours
$^{62}_{62}\text{Sm } 147$	15 %	$^{61}_{61}\text{Pm } 147$	2,6 années
$^{63}_{63}\text{Eu } 151$	48 %	$^{62}_{62}\text{Sm } 151$	73 années
$^{74}_{74}\text{W } 182$	26 %	$^{73}_{73}\text{Ta } 182$	111 jours
$^{75}_{75}\text{Re } 185$	37 %	$^{74}_{74}\text{W } 185$	73 jours

Parmi tous ces éléments il semblerait que l'irradiation du césium, qui n'a qu'un seul isotope le Cs 133, pourrait engendrer du Xénon 133 de période 5,2 jours émettant des β^- de 0,34 MeV et des γ de 0,81 MeV. Ce gaz radioactif peut être entraîné hors du réservoir-cible par un courant gazeux d'hélium par exemple, et mesuré dans un compteur de Geiger ou dans un scintillateur liquide. La condition essentielle étant bien entendu de disposer d'un flux suffisamment important de neutrinos.

L'ANTI-NEUTRINO ET LES DÉSINTEGRATIONS β DOUBLES.

Cd 106, 116.— Avant d'exposer les expériences faites par Cowan, Harrison, Langer et Reines à Los Alamos sur le Néodyme 150, je vais uniquement rappeler les résultats négatifs obtenus en 1955 par Detoeuf et Moch en recherchant la radioactivité β^- double du Cadmium 116.

En effet, d'après la théorie de Majorana-Furry sur l'identité du neutrino et de l'antineutrino, la période double du Cd 116 devrait être inférieure à $2 \cdot 10^{16}$ années. Detoeuf et Moch ⁽⁴⁾ trouvent au contraire que cette période est certainement supérieure à $6 \cdot 10^{16}$ années.

Winter a également, en 1955, étudié ⁽⁵⁾ la désintégration double β^- du Cd 116 et celle β^+ double du Cd 106; il trouve pour la première une période supérieure à 10^{17} années et pour la seconde une période supérieure à $6 \cdot 10^{18}$ années, toutes les deux donc nettement supérieures à celle prévue par la théorie de la non existence de l'anti-neutrino.

Zr 96, Ca 48.— Awaschalom a confirmé (Physical Review, 101, 1956, p. 1041) que les périodes des radioactivités doubles du Zirconium 96 et du calcium 48 sont supérieures à 10^{18} années en contradiction avec les résultats antérieurs de Mc Carthy qui avait trouvé non seulement des périodes favorables à la théorie de Majorana, mais également une raie β , dont l'énergie était égale à l'énergie disponible dans la transition double, ce qui est en faveur de l'émission, lors de cette double transition, de deux particules β , sans neutrino, le premier neutrino émis étant absorbé lors du second processus β .

(4) J. de Phys. et Rad., 16, 1955, p. 897.

(5) Phys. Rev., 100, 1955, p. 142.

Nd 150. - Finalement l'expérience la plus récente et la plus laborieuse effectuée à Los Alamos (Il nuovo Cimento, Mars 1956, p. 649) est également en faveur de l'existence d'un anti-neutrino. Cowan et ses collaborateurs ont utilisé un échantillon de Néodyme enrichi à 88,23 % en Néodyme 150. Cet échantillon, soigneusement protégé, fut immergé dans un scintillateur liquide et exploré à une distance de 8 cm par plusieurs photomultiplicateurs du type Dumont 6364 de 12,5 cm de diamètre. Un autre échantillon de Néodyme pratiquement dépourvu de l'isotope 150 était monté de façon similaire et pouvait être mesuré dans le même dispositif, ce qui permettait d'éliminer le fond continu.

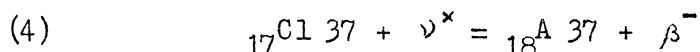
Le scintillateur liquide était constitué par un réservoir de 600 litres et était entouré par du plomb et du bismuth et par plusieurs photomultiplicateurs en anti-coïncidences (anneau de protection), ce qui permettait de diminuer énormément le mouvement propre. Les impulsions étaient enregistrées lorsqu'elles provenaient d'une paire de photomultiplicateurs opposés et lorsqu'elles n'étaient pas en coïncidence avec les scintillateurs formant l'anneau de protection. Une autre condition pour l'enregistrement des impulsions était imposée par le fait que chaque composante de la paire des particules β détectées devait avoir une énergie comprise entre 0,35 et 8 MeV. L'énergie disponible dans la transition β double étant évaluée à 4 MeV, à partir des différences des masses entre le $^{60}\text{Néodyme 150}$ et le $^{62}\text{Samarium 150}$. De plus ces deux impulsions devaient être en coïncidence dans moins de 0,5 microsecondes.

Les énergies de ces paires d'impulsions étaient additionnées électroniquement et analysées par un sélecteur à 100 canaux. Une expérience de contrôle, pour analyser le spectre des impulsions du fond continu, dû principalement aux neutrons du rayonnement cosmique, fut effectuée au moyen d'une source de neutrons placée à l'extérieur du dispositif décrit plus haut. Les auteurs obtiennent ainsi une courbe d'impulsions avec un maximum à 5,6 MeV qu'ils attribuent à une diffusion double Compton à partir du rayonnement γ de capture des neutrons par le fer et dont l'énergie est de 7,6 MeV. Il semblerait que les raies observées par Mc Carthy ⁽⁶⁾ et par d'autres auteurs

⁽⁶⁾ Phys. Rev., 97, 1955, p. 1234.

soient dûes à un phénomène analogue. Avec cet équipement, un taux de comptage de une impulsion par 10 heures correspondrait à une vie moyenne du Néodyme 150, de $2,2 \cdot 10^{18}$ années. Les auteurs trouvent pourtant moins de 0,48 impulsions par 10 heures, ce qui indique une vie bien supérieure à $3 \cdot 10^{18}$ années, en contradiction avec l'hypothèse de Majorana-Furry, et laisse par conséquent plausible l'hypothèse de l'existence d'un anti-neutrino.

Cl 37 + $\bar{\nu}$.- Les résultats négatifs des expériences de Davis sur le processus β inverse :



sont également en faveur de l'existence de l'antineutrino.

En effet cette réaction ⁽⁷⁾ n'est possible qu'avec des anti-neutrinos que nous attachons arbitrairement à l'émission positonique et aux captures électroniques et qui, par conséquent, ne sont pas émis avec les produits de fission β^- des piles. On a pour la radioactivité positonique :

$$p = n + \beta^+ + \nu^* \quad \text{qui peut s'écrire :}$$

$$p - \beta^+ \rightleftharpoons n + \nu^* \quad \text{ou encore :}$$

$$p + \beta^- \rightleftharpoons n + \nu^* \quad \text{qui est la capture électronique et}$$

sa réaction réciproque, ou réaction β inverse du type :

$Z + \nu^* \longrightarrow (Z + 1) + \beta^-$ qui dans le cas des ν de Majorana peut aussi s'écrire : $(Z) + \nu \longrightarrow (Z + 1) + \beta^-$ et devrait pouvoir se produire avec les ν des piles. Le flux de ν d'une pile de puissance P (en unités de 10^5 kw) à une distance R en mètres est donnée par :

$$\Phi = \frac{1,97 \times 10^{19} P}{4 \pi R^2} \quad \text{par seconde et par cm}^2.$$

La section σ augmente avec le carré de l'énergie des ν (voir fig. 4 et 5), le seuil de la réaction (4) est de 0,65 MeV .

Davis a repris en 1956 ses expériences d'accumulation d'Argon 37 en irradiant des tonnes de tétrachlorure de Carbone avec les neutrinos des piles.

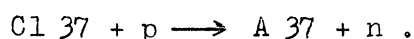
(7) L. ALVAREZ, U.C.R.L., n° 328.

Tout l'argon 37, déduction faite de celui formé par d'autres réaction ⁽⁸⁾, qu'il a pu extraire de son réservoir-cible est certainement trois fois moindre comme limite supérieure que celui prévu par la théorie et à condition que le neutrino et l'anti-neutrino soient identiques.

Fermions.— En conclusion, il semble que toutes les particules fondamentales de Dirac à spin 1/2 ou fermions, comme l'électron, le proton, le neutron et le neutrino sont maintenant pourvues d'une anti-particule : le positon, le proton négatif, l'anti-neutron et l'anti-neutrino. Si on ajoute les hyperons $\pm$ et les mésons $\mu^\pm$, tous deux de spin 1/2, la série est complète.

Par ailleurs, maintenant que l'existence du ν semble bien établie, on peut se poser sérieusement la question suivante : que deviennent tous les neutrinos émis dans l'Univers, soit à la suite des processus β , soit à la suite des désintégrations des mésons π et μ et des particules κ ? Si l'énergie interne des étoiles est bien due à des processus radioactifs, près de 10 % de cette énergie se trouverait déjà répandue dans l'Univers sous forme de neutrinos. Cette énergie se transforme-t-elle finalement en photons, participe-t-elle à des réactions β -inverses ou à tout autre processus encore inconnu ? ou s'accumule-t-elle dans l'Univers sous forme de neutrinos libres ?

⁽⁸⁾ Comme par exemple avec les protons du rayonnement cosmique :



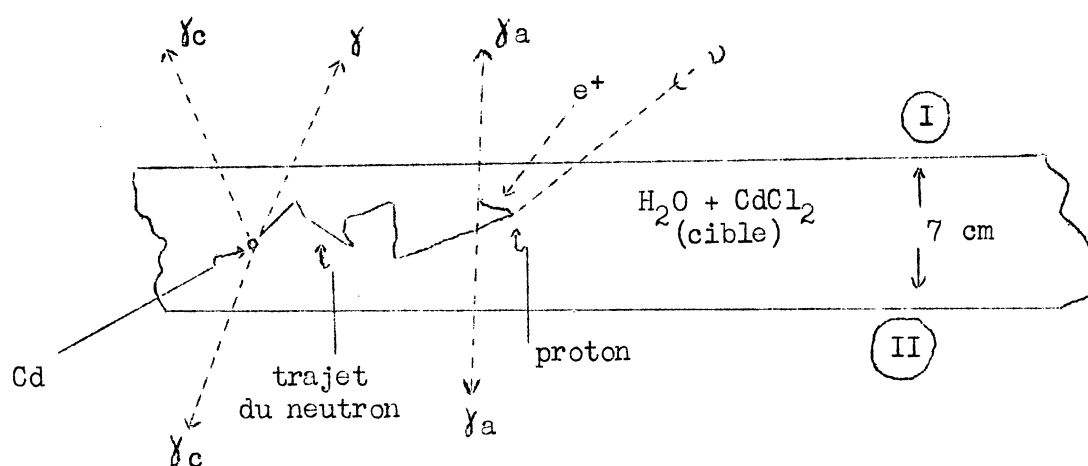


Fig. 1 : γ_a : gamma d'annihilation ; I : Scintillateur liquide 1
 γ_c : gamma de capture ; II : Scintillateur liquide 2

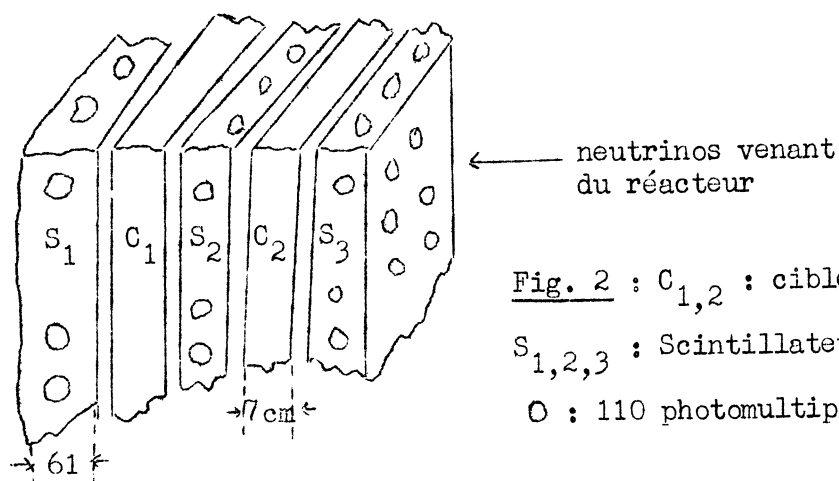


Fig. 2 : $C_{1,2}$: cibles $H_2O + CdCl_2$
 $S_{1,2,3}$: Scintillateurs liquides
 O : 110 photomultiplicateurs Dumont.

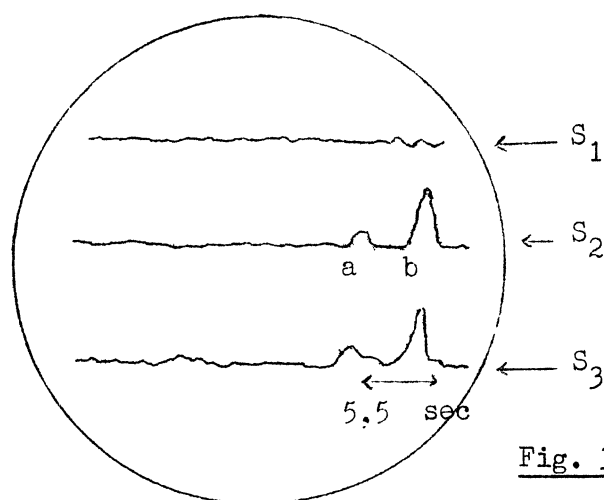


Fig. 3 : a : traces des γ d'annihilation
 b : traces des γ de capture

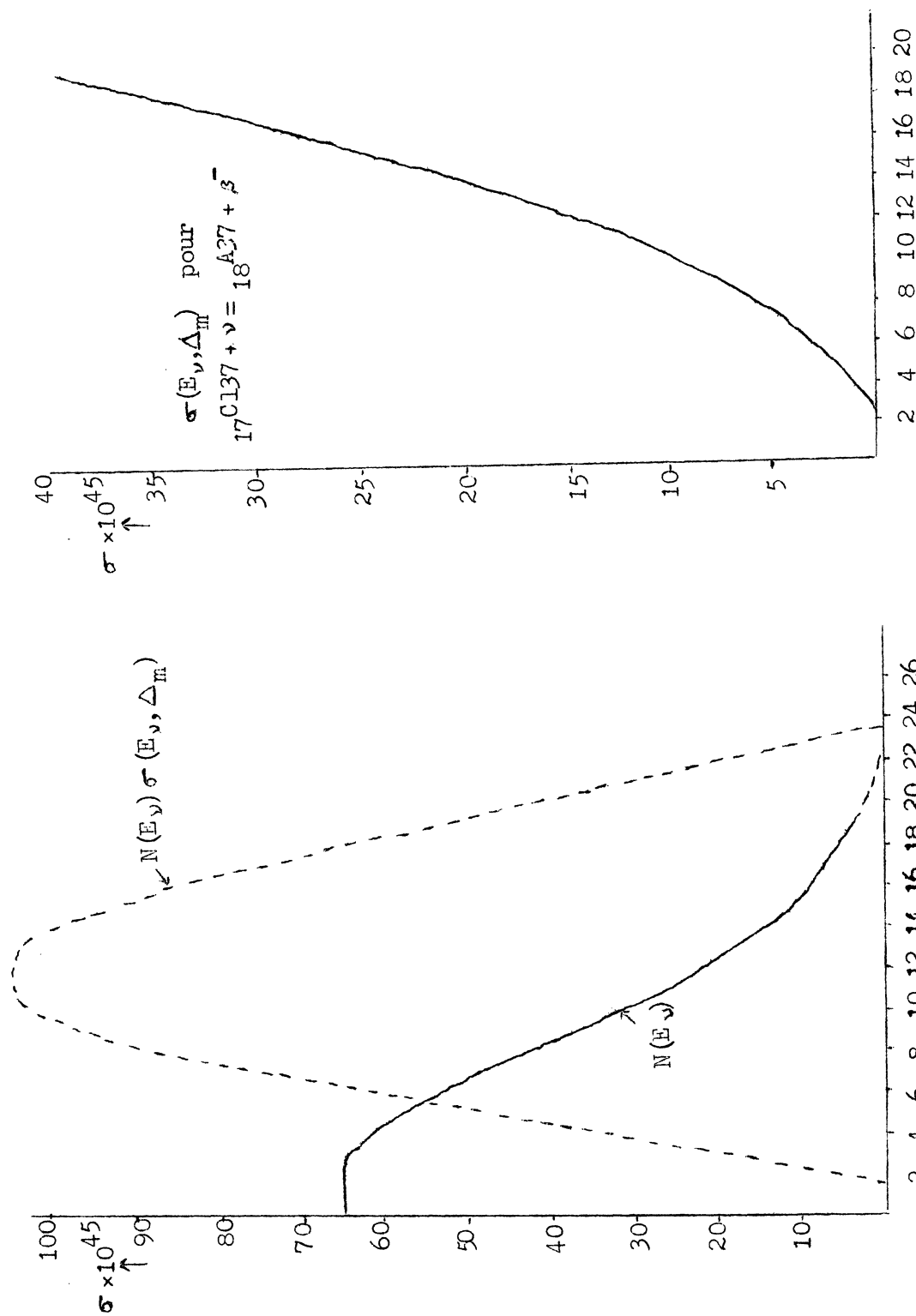


Fig. 5 : Distribution des neutrinos d'une pile atomique et courbe de rendement de la réaction $\text{Cl } 37 + \nu = \text{A } 37 + \beta^-$ avec cette distribution.

Fig. 4 : Variation de la section efficace de la réaction $\text{Cl } 37 + \nu = \text{A } 37 + \beta^-$ en fonction de l'énergie des neutrinos.