



Master 2 PSC PHITEM

DÉTECTION EN PHYSIQUE DES PARTICULES

EXPERIMENTAL TEST OF PARITY CONSERVATION IN BETA DECAY  
C. S. WU, E. AMBLER, R. W. HAYWARD, D. D. HOPPES, R. P. HUDSON  
PHYS. REV. 105 (1957) 1413

Léo REYNAUD<sup>1</sup>

---

1. [leo.reynaud@etu.uiv-grenoble-alpes.fr](mailto:leo.reynaud@etu.uiv-grenoble-alpes.fr)

# 1 Un peu d'histoire

Nous voici remontés dans les années 50, période extraordinaire pour la physique des particules où il ne se passait généralement pas trois mois sans qu'une découverte vienne révolutionner ce domaine. C'est dans ce climat incroyable qu'une équipe américaine de chercheurs dirigée par la physicienne Chien-Shiung Wu mena l'expérience qui mit en évidence une violation de la symétrie de parité par l'interaction faible. L'expérience fut imaginée par les théoriciens Tsung-Dao Lee et Chen-Ning Yang qui, durant l'année 1956 avait remarqué qu'aucune expérience n'avait encore démontré la conservation de la parité pour l'interaction faible. Ils ne vinrent pas à cette réflexion par hasard, en effet, depuis les années 50 et la popularisation des accélérateurs de particules, un grand nombre de ces dernières furent découvertes et étudiées. C'est en se penchant sur le cas du méson K que certains physiciens ont envisagé la possibilité d'une violation de parité par l'interaction faible.

Quand Chien-Shiung Wu pris connaissance de l'article de Tsung-Dao Lee et Chen-Ning Yang, elle comprit l'importance que représenterait cette découverte et alla jusqu'à annuler plusieurs mois de vacances avec son mari pour se lancer dans cette aventure.

Il me semble important de noter que malgré leurs extraordinaires travaux, elle et son équipe furent écartées des distinctions reçues à l'époque pour cette découverte, comme ce fut le cas pour beaucoup de femmes et d'expérimentateurs.



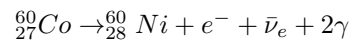
FIGURE 1 – Chien-shiung Wu

L'expérience avait donc pour but de voir

si la parité était conservée pour l'interaction faible. Comme vous le savez, la parité représente la transformation que subit un objet ou un système lorsque ses coordonnées spatiales subissent un changement de signe. On dit qu'un objet est invariant sous parité lorsque sa représentation mathématique est une fonction paire de la position. Dit de manière plus formelle, on dit qu'il est invariant si son opérateur Parité commute avec l'hamiltonien de son système :  $[[P, H] = 0$ . Au contraire, on dit qu'il ne respecte pas la parité si  $[P, H] \neq 0$ . Dans cet article, nous allons donc revenir en détail sur l'expérience qui permit la découverte de la violation de symétrie  $\mathcal{P}$  par l'interaction faible.

## 2 protocole de l'expérience

On veut utiliser des noyaux de cobalt 60 qui est un isotope radioactif pour étudier ses produits de désintégration. Le cobalt se désintégrant par interaction faible, un quark down se transformant en quark up en libérant un boson  $W^-$  qui se désintègre lui-même en électron et anti-neutrinos. Le noyau lui se transforme en un état excité du nickel 60 qui émettra par la suite deux gammas pour revenir à son état fondamental.



On veut donc voir si l'intensité du flux d'électrons est équivalent, dans les deux sens, le long de l'axe du spin. En effet, si les électrons étaient émis de manière isotrope, alors une transformation de parité ne changerait rien et ils émettraient toujours de manière isotrope, par contre s'ils émettent dans une direction privilégiée, par exemple dans la direction du spin, alors sous transformation de parité, ils seraient émis dans un sens opposé au spin. À partir de là, on pourrait voir qu'il y a une asymétrie dans la désintégration bêta et donc une violation de la symétrie  $\mathcal{P}$  par l'interaction faible.

Une des difficultés, surtout à l'époque, était d'aligner tous les atomes de cobalt avec le champ magnétique et de faire en sorte que leurs alignements ne soient pas détruits via des fluctuations thermiques, en effet si les atomes n'étaient pas tous alignés entre eux, ils auraient émis des électrons dans toutes les directions, qu'ils violent la parité ou non.

Pour mener à bien cette expérience, il fallait donc pouvoir aligner sur un champ magnétique des atomes de  ${}^{60}_{27}\text{Co}$  et garder le tout proche du zéro Kelvin. Pour cela, le  ${}^{60}_{27}\text{Co}$  a été déposé en fine couche sur un cristal de nitrate de cérium-magnésium, placé dans une chambre à vide qui elle-même était placée dans un dewar rempli d'hélium liquide. L'échantillon fût en-

suite refroidi par démagnétisation adiabatique dont le principe est de chauffer artificiellement notre échantillon via un champ magnétique, la chaleur ainsi créée est évacuée grâce à l'hélium liquide et lorsque le champ est enlevé l'échantillon transfère de nouveau de la chaleur à un montant équivalent à celui créé par le champ magnétique <sup>1</sup>. Une fois cela fait, un champ magnétique fut créé par un solénoïde enroulé autour de la partie inférieure du cryostat. L'échantillon de cobalt fut ainsi polarisé en utilisant la méthode de Rose-Gorte <sup>2</sup> pour que l'augmentation de la température due à la magnétisation soit négligeable.

Pour la détection des bêta, un cristal d'anthracène a été déposé 2 cm au-dessus de la source de cobalt, l'anthracène étant un des plus lumineux parmi les scintillateurs organiques, il devait permettre un comptage fiable malgré des bêtas peu énergétiques. Les scintillations produites par le cristal étaient ensuite conduites à l'aide d'un tube en lucite à un photomultiplicateur placé sur la tête du cryostat. Il y a aussi deux détecteurs NaI pour les gammas, placés de manière telle que la légère différence de comptage entre les deux pouvait être directement reliée au taux de polarisation de l'échantillon. De plus, les gammas étant invariant sous parité, ils pouvaient servir de sujets tests. En effet, si le flux de bêta était, lui aussi, invariant sous parité, il serait distribué de la même façon que les gammas.

Une fois l'équipement préparée, l'expérience fut lancée et se déroula comme suit : Refroidissement par démagnétisation adiabatique, polarisation de l'échantillon et enregistrement des données sur une durée d'environ 15min. Pour l'enregistrement des données, ils font un comptage d'une minute puis prennent 40 secondes pour enregistrer l'information. Au premier abord, cela peut sembler curieux qu'ils n'aient pas enregistré en continu, mais l'équipement technologique n'étant pas le même qu'aujourd'hui, c'était déjà une belle performance pour l'époque. L'expérience fut ensuite répétée une deuxième fois avec un champ magnétique inversé.

### 3 Détecteur en Anthracène

Nous allons maintenant nous intéresser aux caractéristiques des détecteurs en eux-mêmes en essayant notamment de démontrer leurs efficacités et nous commencerons pour cela par le cristal d'anthracène. Les cristaux d'anthracène en tant que scintillateur étaient beaucoup utilisés il y a quelques décennies. Leur haut rendement en scintillation en faisait un matériel de choix, cependant dû à certains paramètres comme leurs toxicités, leurs fragilités au contact de l'air (oxydation) et le peu de mal-

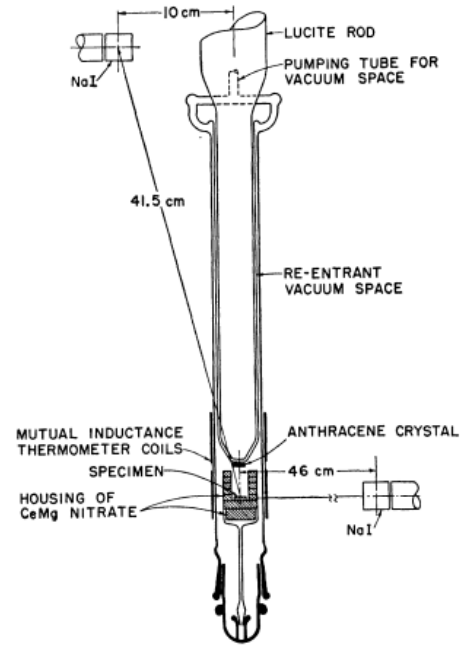


FIG. 1. Schematic drawing of the lower part of the cryostat.

léabilité qu'ils offrent, ils ont été remplacés par d'autres détecteurs moins contraignants. Dans le cadre de cette expérience, nous allons regarder si ce détecteur est pertinent en regardant notamment si son taux de comptage est adapté au flux qu'il reçoit puis nous analyserons quelques aspects énergétiques.

L'échantillon de cobalt a une activité de quelque micro-curie, équivalent de nos jours à environ  $10^{-5}$  Becquerel. Connaissant la distance entre l'échantillon et le détecteur, nous pouvons estimer le flux qui arrivera sur le détecteur en calculant l'angle solide (Voir annexe A) et ainsi remonter à un flux arrivant sur notre détecteur de 5530 /sec

Nous savons que le cristal d'anthracène émet de la lumière en grande partie par fluorescence avec une période de décroissance de  $1,3 \cdot 10^{-8}$  sec <sup>3</sup> on peut en conclure que le détecteur aurait une résolution en temps suffisante pour détecter tous les électrons.

Nous pouvons ensuite calculer la quantité d'énergie libérée par la désintégration du cobalt 60 pour pouvoir en déduire l'énergie des électrons détectés :

$$E = M(^{60}_{27}\text{Co}) - M(^{60}_{28}\text{Ni}) - M(e^-) \\ = 2.313 \text{ Mev}$$

Le nickel résultant de la désintégration sera dans un état excité et émettra deux gammas d'énergie 1,172 Mev et 1,333 Mev dans 99.98% des cas. L'énergie restante, 0.319 Mev, est distribuée de manière continue entre l'énergie cinétique du bêta et de l'anti-neutrino. Pour le reste du compte rendu, nous considérerons donc

que l'électron émis aura une valeur comprise entre 0 et 0.313 MeV. Le pouvoir d'arrêt de l'anthracène pour des électrons de 0.3 MeV étant de 2.8 Mev/cm (Voir annexe B) il faut donc parcourir un peu plus de 1mm à un électron de cette énergie pour s'arrêter. Les électrons de plus basse énergie auraient une distance parcourue plus faible, nous parlerons surtout du cas à 0.3MeV. Sachant que le cristal fait 0.0625 cm d'épaisseur, nous pouvons voir que dans certain cas l'épaisseur du cristal ne sera pas assez grand pour totalement stopper l'électron. Cependant, nous cherchons ici seulement à compter le nombre d'électrons, il n'est donc pas forcément nécessaire qu'il dépose toute son énergie dans le détecteur. De plus, nous pouvons noter que pour des bêta de cette énergie, un détecteur constitué d'éléments possédant un petit Z comme c'est le cas ici (Hydrogène et Carbone) est préférable pour limiter au mieux la rétrodiffusion qui croît rapidement avec Z et ainsi éviter que notre électron soit éjecté à l'entrée de notre détecteur.

J'ai été assez surpris lors de mes recherches sur les caractéristiques des cristaux d'anthracènes de voir que pour certains paramètres leur valeur passée du simple au triple selon les articles. Par exemple, en voulant calculer la loi de Bricks, j'ai trouvé trois valeurs pour la constante kB, une de 0.05mm/Mev<sup>4</sup>, une autre de 0.715mm/Mev<sup>5</sup>, alors que notre cours nous indique des valeurs pour kB généralement comprises entre 0.1 et 0.2 mm/Mev. Je n'ai pas non plus réussi à trouver de récents articles dessus car l'anthracène est un matériau qui n'est quasiment plus utilisé de nos jours. Cela me semblait intéressant de le mentionner car sûrement typique des recherches sur des expériences historiques comme c'est le cas ici.

Nous pouvons tout de même calculer le nombre de photons émis par électronvolt déposé. L'efficacité absolue de scintillation d'un cristal d'anthracène est d'environ 0.062<sup>6</sup>, il nous faut aussi prendre en compte l'efficacité quantique qui est de 0.8 à 0.9 due à la non-transparence du cristal avec ses propres émissions. Avec cet ajout, nous obtenons une efficacité absolue d'environ 0.05. De plus, nous savons que l'anthracène émet dans le bleu avec une longueur d'onde d'approximativement 450 nm<sup>7</sup> ce qui nous donne des photons d'énergies  $h\nu = 2.7\text{eV}$ . Nous pouvons maintenant calculer le nombre de photons créés par électronvolt déposé, ce qui nous donne  $\frac{0.05}{2.7} = 1.8 \cdot 10^{-2}$  photon/ev. Pour un bêta de 0.3 MeV le cristal produirait donc environ 5400 photons de 2,7eV

Nous pouvons aussi ajouter quelques mots sur le fait qu'ils n'aient pas parlé de réduction du bruit dans cette expérience. On peut supposer que comme la cadence de comptage de l'anthracène est élevée, le bruit n'a pas dû po-

ser beaucoup de problème, de plus il serait le même pour les deux expériences donc ne fausserait pas un calcul d'asymétrie. Dans un souci de rigueur, il est quand même possible qu'ils aient fait un enregistrement sans source dans un premier temps pour caractériser le bruit et le soustraire au résultat final.

## 4 Photomultiplicateur

Concernant le photomultiplicateur relié au cristal d'anthracène je n'ai malheureusement trouvé que très peu d'information, je sais qu'il possède 10 dynodes et que selon la tension appliquée le photomultiplicateur peut réaliser un gain de  $10^4$  à  $10^7$  mais c'est à peu près tout donc rien d'exploitable ici. On peut tout de même noter que la résolution à l'entrée du photomultiplicateur est de 17% ce qui semble être une bonne résolution pour les normes de l'époque.

## 5 Rayon gamma

En ce qui concerne les rayons gammas émis, les détecteurs NaI ne sont, eux aussi, presque pas abordés dans l'article. Il est cependant dit qu'ils sont biaisés de manière à ne pas détecter les photons produit par effet Compton, je pense que pour faire cela ils ont dû ouvrir de petites fenêtres d'énergie autour des valeurs des deux gammas émis par le  $^{60}_{27}\text{Co}$ . Leurs tailles ne sont pas non plus indiquées, il est donc difficile de calculer le flux qu'ils reçoivent. Cependant, la distance par rapport à la source est beaucoup plus grande que pour le cristal d'anthracène, ce qui laisse supposer qu'il n'y aura pas de problème de saturation malgré une période de décroissance moins bonne. (environ  $1.10^{-6}$ ).

On peut aussi se demander à quel point les photons interagissent et créeront une interférence avec le cristal d'anthracène. A cette énergie, de l'ordre du Mev, les interactions possibles pour un photon sont l'effet photoélectrique, la diffusion Compton et la création de paires. On peut tout de suite négliger la création de paires car cette interaction est favorisée pour des énergies un peu plus hautes. De même pour l'effet photoélectrique qui dans le cas d'atomes légers est généralement privilégié pour des énergies en dessous de 500keV. Il nous reste donc la diffusion Compton. Cette interaction est linéairement dépendante en Z donc comme notre cristal est fait d'atomes légers, nous pouvons pressentir qu'elle ne jouera pas un grand rôle. Nous pouvons tout de même le vérifier et pour cela nous utiliserons une valeur de la section efficace de  $6.37 \cdot 10^{-2}\text{b/atome}$ <sup>8</sup> pour des gamma de 1MeV dans du carbone. Nous ferons comme si le cristal n'était qu'en carbone pour avoir une limite haute de notre

interférence. Le nombre d'atomes/cm<sup>2</sup> pour le carbone est d'environ  $1,1 \cdot 10^{-23}$  et la distance à traverser est de 0.0625 cm ce qui nous donne une probabilité d'interaction  $P = 1 - e^{-\mu x} = 2 \cdot 10^{-4}$ . Nous pouvons donc en conclure que le cristal d'anthracène est quasiment transparent pour les gamma émis lors de la désintégration bêta et gêne peu l'expérience. Nous aurions aussi pu passer par la longueur d'absorption d'un photon d'1Mev dans du carbone (annexe B) pour arriver au même résultat.

## 6 Résultat de l'expérience

Les résultats de l'expérience furent explicites, comme nous pouvons le voir sur les schémas, les gamma ont un comportement anisotrope alors que les bêtas semblent bien suivre un mouvement asymétrique lorsque le champ magnétique est inversé. Les résultats nous permettent aussi de constater que le temps que met le système à se réchauffer et donc à perdre sa polarisation est d'environ 6 minutes, passé ce délai le flux de gamma et de bêta devient totalement isotrope.

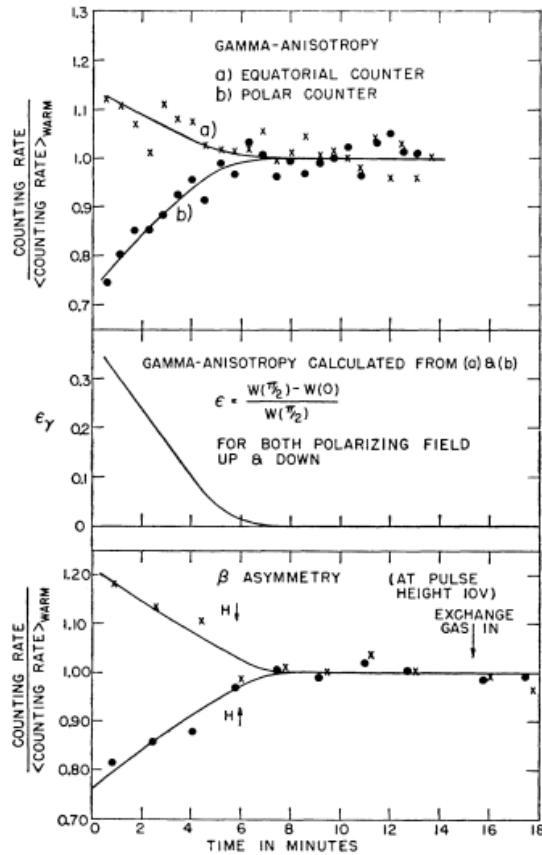


FIG. 2. Gamma anisotropy and beta asymmetry for polarizing field pointing up and pointing down.

Même si le but de l'expérience était de montrer cette asymétrie et non de calculer avec finesse les différents paramètres caractérisant cette violation de symétrie, elle fut tout de même

assez précise pour en estimer certaines valeurs.

Une des paramètres qui a pu ainsi être estimée est le coefficient d'asymétrie noté  $\alpha$ , c'est la proportion d'asymétrie observée par le flux d'électron. Ce paramètre est négatif nous indiquant que la direction privilégiée est opposée au spin des particules et sa valeur est de 0.4. En plus de ce paramètre, il a été possible grâce au calcul d'anisotropie des gamma de connaître la valeur de  $\langle I_z \rangle / I$ . Sachant que  $\alpha$  dépend donc de la proportion de spin aligné, on peut en déduire une valeur pour un paramètre d'asymétrie  $\beta$  tel que  $\alpha = \beta \langle I_z \rangle / I$  et ils trouvèrent comme valeurs  $\beta = 0.7$ .  $\alpha$  est donc le coefficient d'asymétrie total et  $\beta$  peut être vu comme l'intensité dont l'asymétrie dépend du spin.

La fin de l'article nous parle d'une vérification concernant le champ magnétique produit par le nitrate de cérium-magnésium, l'équipe nous fait savoir qu'ils ont vérifiés s'il n'est pas la cause de l'asymétrie du flux bêta et que cela semble être le cas.

## 7 Petite conclusion

Cette expérience qui peut nous sembler assez "archaïque" face aux normes actuelles étaient pourtant à la pointe de la technologie il y a 60 ans. On peut remarquer que certains phénomènes qui sont devenus des codes aujourd'hui ne l'étaient pas à cette époque. C'est pour cette raison qu'il m'est difficile de critiquer objectivement l'expérience et ces résultats sans avoir l'impression de "tirer sur une ambulance". Je pense que parmi les choses qui m'ont le plus sauté aux yeux, le manque de rigueur apparent prend la première place. Je ne dis pas que la réalisation de l'expérience manque de rigueur, loin de là, mais c'est ce qu'on pourrait facilement ressentir en lisant cet article, ainsi que les autres de la même époque traitant de ce sujet. Il n'y a en effet aucune incertitude ou barre d'erreur dans les résultats de l'expérience, ils n'évoquent pas le fait qu'ils aient pu la reproduire plusieurs fois pour voir s'ils retrouvaient les mêmes résultats etc. Encore une fois il n'y a aucun doute sur le sérieux des scientifiques et de l'expérience et c'est le contraste avec les normes actuelles qui font ressentir ça. Une autre chose assez amusante était de voir que quelques noms reviennent absolument tout le temps et on sent qu'à l'époque ce domaine était très influencé par quelques pontes, ce qui je pense est beaucoup moins le cas aujourd'hui même si les communautés très spécialisées restent petites.

P.S. Pour ne pas faire doublons et rallonger plus que de raison cette page, je n'ai pas mis dans la bibliographie les textes déjà présents dans la section remarque, même si c'est comme ça que les choses sont faites dans les documents officiels.

## Remarques

1. démagnétisation adiabatique : [https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic\\_refrigeration](https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_refrigeration)
2. Plus d'information sur la méthode Rose-Gorte en page 8,  
<https://biblio.neel.cnrs.fr/ajax.php?module=cmscateg=documentaction=renderid=267>
3. Propriétés caractéristiques des cristaux, mise en évidence par Christiane LESUEUR, page 2  
<https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/20466432>
4.  $1/\text{kB}=190 \text{ MeV/cm}$  Page 38 dans l'étude de la réponse lumineuse des scintillateurs liquides à des électrons mono-énergétiques par Marie Noël [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_public/44/067/44067356.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_public/44/067/44067356.pdf)
5.  $\text{kB}=7.15 \text{ cm/MeV}$  Page 876 dans Scintillations from Organic Crystals : Specific Fluorescence and Relative Response to Different Radiations par J.B BIRKS [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_public/44/067/44067356.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_public/44/067/44067356.pdf)
6.  $\text{kB}=7.15 \text{ cm/MeV}$  Page 932 dans Absolute Scintillation Efficiency of Anthracene Crystals par G.T WRIGHT <https://iopscience.iop.org/sid2nomade-2.grenet.fr/article/10.1088/0370-1301/68/11/317/pdf>
7.  $\text{kB}=7.15 \text{ cm/MeV}$  Page 575 "La détection des particules par scintillations. II. Scintillateurs" par Jean-François Detœuf, Daniel Blanc, Paul Maignan <https://hal.archives-ouvertes.fr/jpa-00234650/document>
8. tabulation Page 10 "Photon cross sections, attenuation coefficients, and energy absorption coefficients from 10 keV to 100 GeV" par J.H Hubbell <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/NSRDS/nbsnsrds29.pdf>

## 8 Bibliography

### Références

- [1] Paul Forman (1982), The Reversal of Parity Law in Nuclear Physics <https://www.nist.gov/pml/fall-parity/reversal-parity-law-nuclear-physics>
- [2] Wikipedia, Wu experiment [https://en.wikipedia.org/wiki/Wu\\_experiment](https://en.wikipedia.org/wiki/Wu_experiment)
- [3] Mécanique quantique Parité : symétrie P, <http://www.vetopsy.fr/mecanique-quantique/symetrie-p-parite.php>
- [4] K. Iguchi (1963), Processus excitoniques dans les cristaux moléculaires. <https://hal.archives-ouvertes.fr/jpa-00205451/document>
- [5] Jean-François Detœuf, Daniel Blanc, Paul Maignan (1952), La détection des particules par scintillations. II. Scintillateurs <https://hal.archives-ouvertes.fr/jpa-00234650/document>
- [6] Eric Brannen and Garth L. Olde (1962), The Response of Organic Scintillators to Electron Energy Deposited in Them [https://www.jstor.org/sid2nomade-2.grenet.fr/stable/pdf/3571123.pdf?refreqid=excelsior%3Ab40cfe49f1bbd585349fcafe8c3761&ab\\_segments=&origin=&acceptTC=1](https://www.jstor.org/sid2nomade-2.grenet.fr/stable/pdf/3571123.pdf?refreqid=excelsior%3Ab40cfe49f1bbd585349fcafe8c3761&ab_segments=&origin=&acceptTC=1)
- [7] Détecteur à scintillation [https://www.physique.unicaen.fr/lib/exe/fetch.php?media=wiki:users:evient:instrument:instrumentation\\_2017-chap\\_iv.pdf](https://www.physique.unicaen.fr/lib/exe/fetch.php?media=wiki:users:evient:instrument:instrumentation_2017-chap_iv.pdf)

## 9 Annexe

### A

Calcul de l'angle solide, pour cela il nous faut la distance à la source  $r = 2\text{cm}$  et  $\alpha$  la taille angulaire du détecteur. Ça nous donne :

$$\begin{aligned}\tan \alpha &= \frac{0.95}{2} \implies \alpha = 0.475\text{rad} \\ \implies \Omega &= \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^\alpha \sin \theta d\theta \\ &= 2\pi [-\cos \theta]_0^\alpha \\ &= 0.695\text{str}\end{aligned}$$

Ce qui nous donne comme flux arrivant sur le détecteur :

$$10^5 \times \frac{0.695}{4\pi} = 5530\text{s}^{-1}$$

### B

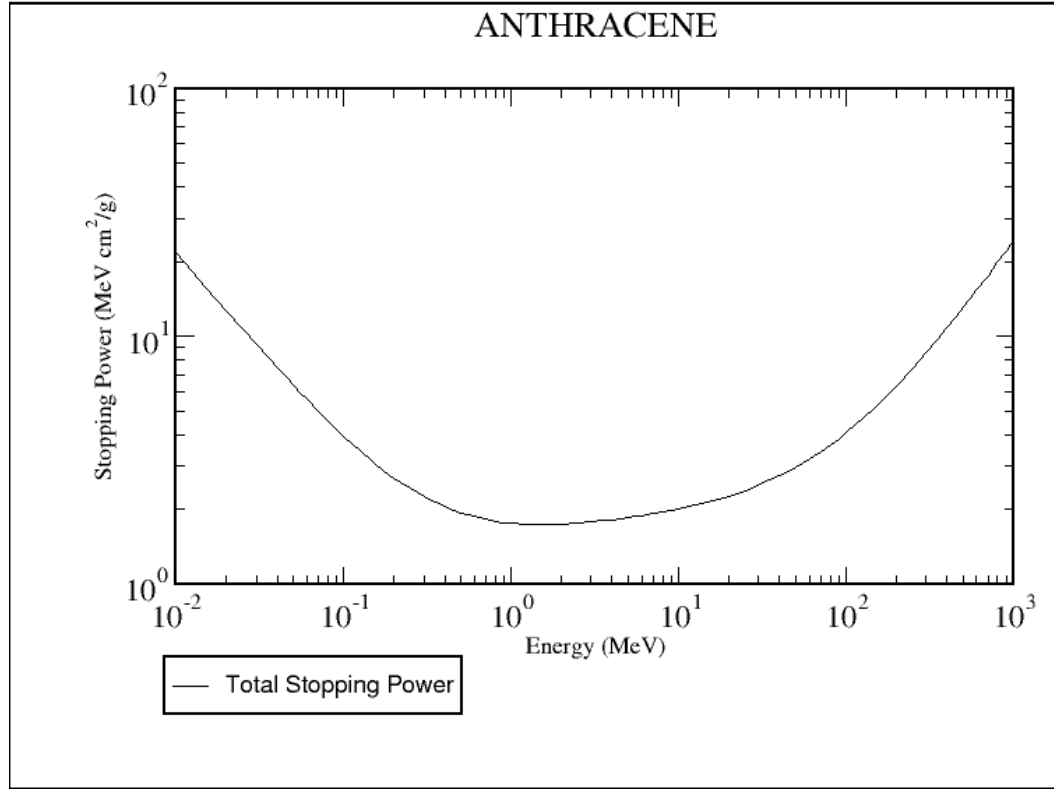


FIGURE 2 – ESTAR : Stopping Power and Range Tables for Electrons

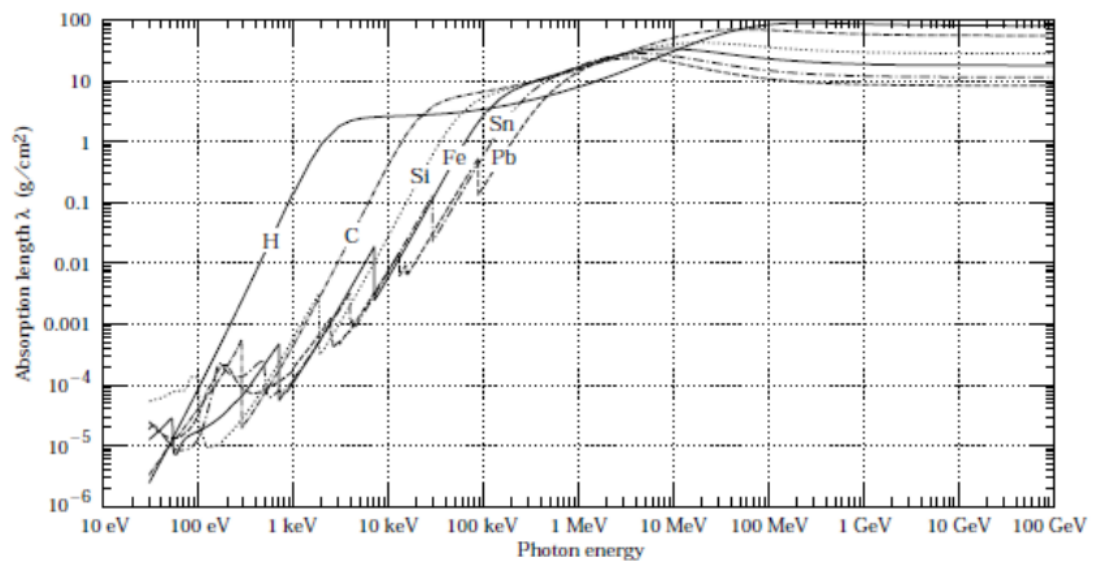


FIGURE 3 – Photon absorption lenght from physics.nist..gov