

Rapport de stage

-

Étude de la structure du proton avec la Diffusion Compton Profondément Virtuelle du "genre temps"

7 juin - 16 juillet 2021

Camille ZINDY

Laboratoire : Département de Physique, Université Virginia Tech,
Blacksburg, VA, Etats-Unis.

Encadrante : Prof. Marie Boër

VIRGINIA TECH®



BOER.PHYS

TABLE DES MATIERES

1	PHOTOPRODUCTION DE PIONS : ETUDE DU BRUIT DE FOND.....	3
2	VARIABLES D'EXCLUSIVITE	4
3	REACTION TCS SUR UN NEUTRON.....	4
4	CONCLUSION	5
	ANNEXES	6
	REFERENCES	9

Du 7 juin au 16 juillet 2021, j'ai effectué un stage avec le département de physique de l'université Virginia Tech (Blacksburg, USA) sous la supervision du professeur Marie Boër ([index](#) | [boer.phys](#) | [Virginia Tech \(vt.edu\)](#)). Ce stage s'inscrit dans la continuité du stage effectué dans le même laboratoire, en janvier, dans le cadre de l'UE LU3PYS05. La situation sanitaire ne s'étant pas améliorée et les frontières étant toujours fermées j'ai réalisé le stage à distance grâce aux ressources du Thomas Jefferson National Accelerator Facility (Newport New, USA).

Il s'agit d'un stage de physique des particules et plus précisément de physique hadronique. Le but de cette physique est d'étudier la structure interne des nucléons (protons et neutrons). Pour ce faire, le laboratoire souhaite effectuer une expérience réalisant la réaction TCS (Timelike Compton Scattering) à l'aide l'accélérateur de particules du Jefferson Lab. La réaction TCS (Figure 1 - gauche) consiste en la diffusion d'une paire de leptons électron/positron après la collision d'un photon réel avec un quark du nucléon. Ce stage poursuivant le travail de janvier, le sujet est introduit plus longuement dans mon précédent rapport [1].

Avant de réaliser cette expérience, un travail de modélisation numérique est nécessaire. J'ai travaillé sur le code modélisant la réaction ainsi que sur l'analyse des données obtenues.

Je tiens à remercier le professeur Marie Boër pour m'avoir proposé de compléter le travail commencé en janvier et pour m'avoir aidée lors de ce stage.

1 Photoproduction de pions : étude du bruit de fond

Le professeur Boër a créé un code informatique permettant de générer des paires leptons électrons/positrons dans les conditions de la réaction TCS. En étudiant les données générées, on étudie donc une modélisation de la réaction TCS. J'ai travaillé sur le code du générateur pour produire non pas des électrons et des positrons mais des paires de pions π^+/π^- ou π^0/π^0 (Figure 1 - droite). Cette autre réaction est considérée comme un bruit de fond car elle se produit en même temps que la réaction TCS et n'est pas complètement réductible. Afin de pouvoir tirer un maximum d'informations de la réaction TCS il faudra minimiser la photoproduction de pions.

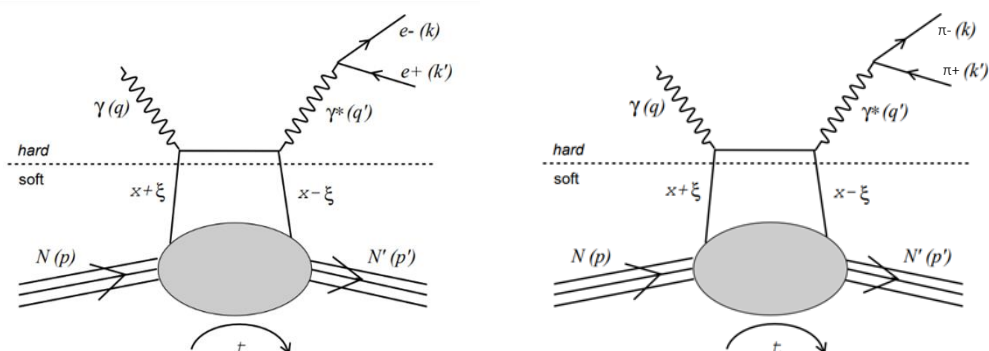


Figure 1 - Diagramme de Feynman de la réaction TCS à gauche et de la photoproduction de pions à droite

Une fois le code implémenté et les données générées, j'ai dû vérifier avoir bien produit des pions. Pour cela, nous pouvons calculer la masse des particules produites et vérifier qu'elle est correcte. Dans le cas des pions π^+ ou π^- , on doit trouver :

$$m = \sqrt{E^2 - p_x^2 - p_y^2 - p_z^2} \sim 0,139 \text{ GeV}/c^2$$

avec m la masse de la particule, E son énergie et p_i son impulsion suivant i .

Il faudra ensuite pondérer ces données par la section efficace de la réaction et les comparer aux données de la réaction TCS afin de déterminer comment réduire ce bruit de fond sans couper trop de données TCS. Pour cela, j'ai cherché la section efficace de la réaction par un travail bibliographique, en regardant notamment les publications du Hall B du Jefferson Lab [2] [3]. Néanmoins nous n'avons pas trouvé d'articles publiés correspondant aux critères de notre réaction.

2 Variables d'exclusivité

Lors de la réaction TCS, la masse totale est conservée, ainsi que l'énergie totale et l'impulsion totale. En calculant, la différence entre l'énergie finale et l'énergie initiale on trouve l'énergie manquante. Cette énergie correspond à l'énergie des particules qui n'ont pas été détectées par les détecteurs.

$$E_{miss} = E_{e^+} + E_{e^-} + E_{p'} - E_p - E_\gamma$$

avec E_{e^+} et E_{e^-} respectivement les énergies du positron et celle de l'électron. $E_{p'}$ est l'énergie du proton après la réaction et E_p l'énergie avant la réaction. E_γ est l'énergie du photon réel.

On peut faire de même pour les variables P_x , P_y et P_z et en déduire la masse manquante. Cette dernière sert à déterminer quelles particules n'ont pas été détectées dans le spectromètre :

$$M_{miss}^2 c^4 = E_{miss}^2 - P_{miss}^2 c^2$$

J'ai modifié les codes d'analyse afin de mesurer les variables d'exclusivités (E_{miss} , M_{miss}^2 , PT_{miss} : polarisation transverse) de la réaction TCS. L'études de ces variables peut permettre de comprendre comment réduire les bruits de fonds tels que la photoproduction de pions. (Exemple d'histogrammes obtenus pour PT_{miss} : *Figure 2* en annexe)

3 Réaction TCS sur un neutron

Etudier la structure du proton est plus simple que celle du neutron car il existe des molécules composées seulement de protons (H_2 liquide). Lors de la réalisation de la réaction TCS sur une molécule composée de protons et de neutrons (D_2 liquide), il sera difficile, voir impossible, de savoir quand celle-ci aura eu lieu seulement sur les neutrons. Ainsi, avant d'essayer de construire des détecteurs à neutrons, il faut savoir si cela en vaut la peine, c'est-à-dire si les sections efficaces sont assez grandes sur les neutrons.

Tout d'abord, il a fallu modifier le générateur et analyser les données comme étant des neutrons. Les principales différences entre les réactions sur des protons et des neutrons sont leur masse et la section efficace. En comparant les données générées normalisées du proton et du neutron (Figure 3 en annexe), on remarque que les taux de comptage sont quatre fois plus faible sur le neutron.

On a ensuite reconstruit les données, c'est-à-dire qu'elles ont été passées dans une simulation des détecteurs pour 30 jours d'expériences, simulation écrite par le principal collaborateur du professeur Boër, le Dr. Vardan Tadevosyan. Cette fois ci, il y a une différence d'un facteur 6 entre les données du proton et du neutron (Figure 4 en annexe). Les calculs effectués par le professeur Boër estimaient que la différence allait être de l'ordre d'un facteur 4 à 8. Ces résultats sont très bon signe car même après la reconstruction des données, on peut mesurer un nombre conséquent de paires de leptons. Réaliser l'expérience sur des neutrons est donc envisageable. Il faudra néanmoins trouver un moyen de détecter les neutrons pour discriminer les réactions ayant sur des neutrons ou des protons.

4 Conclusion

Lors de ce stage, j'ai eu l'opportunité d'explorer différents aspects de la préparation d'une expérience, en vue de sa proposition en 2022 au « Program Advisor Committee » du Jefferson Lab. J'ai pu donner suite à mon travail de janvier qui avait contribué à démontrer qu'une expérience de TCS non polarisé sur une cible d'hydrogène liquide sera possible. J'ai travaillé sur un générateur de particules servant à modéliser une expérience et j'ai modélisé une nouvelle réaction ($\gamma N \rightarrow \pi^+ \pi^- N'$) considérée comme un bruit de fond lors de l'étude de la réaction TCS. La réaction TCS permettant d'étudier la structure interne des nucléons.

J'ai aussi modifié les codes d'analyses de la réaction afin d'étudier de nouvelles variables dites d'exclusivité utiles lors de la réduction des bruits de fond. Après comparaison de l'exclusivité pour le signal (TCS) et le bruit de fond, j'en ai déduit qu'on pouvait partiellement exclure certaines paires de pions mais qu'en revanche nous devons utiliser un modèle pour réduire le reste du bruit de fond et interpréter les signal TCS.

Enfin, le professeur Boër m'a proposé de faire une étude préliminaire portant sur la possibilité de réaliser la réaction TCS non polarisée sur un neutron. Ceci n'avait jamais été exploré en dehors d'une publication théorique dont elle était co-auteure en 2016. Une fois les données du neutron générées et analysées, on a pu vérifier que cette réaction produirait suffisamment de résultats pour que ceux-ci soit physiquement exploitables.

J'ai pu présenté ce travail aux membres de la collaborations CPS (Compact photon source) du Hall C de Jefferson Lab. Ceux-ci se sont montrés enthousiastes sur la pertinence de poursuivre ce travail pour aboutir à deux propositions d'expériences (pour le proton et pour le neutron avec différents détecteurs) tout autant au vu de mes résultats que de l'intérêt scientifiques de ces études. Mon encadrante à l'intention de poursuivre ce travail qui devrait aboutir sur deux expériences novatrices de mesure du TCS à Jefferson Lab aux alentours de 2025-2028. Elles contribueraient grandement à l'étude de la structure multi-dimensionnelle en quarks du proton, et amèneraient des preuves expérimentales que les fonctions GPDs sont universelles ce qui serait un résultat majeur pour la physique hadronique.

Annexes

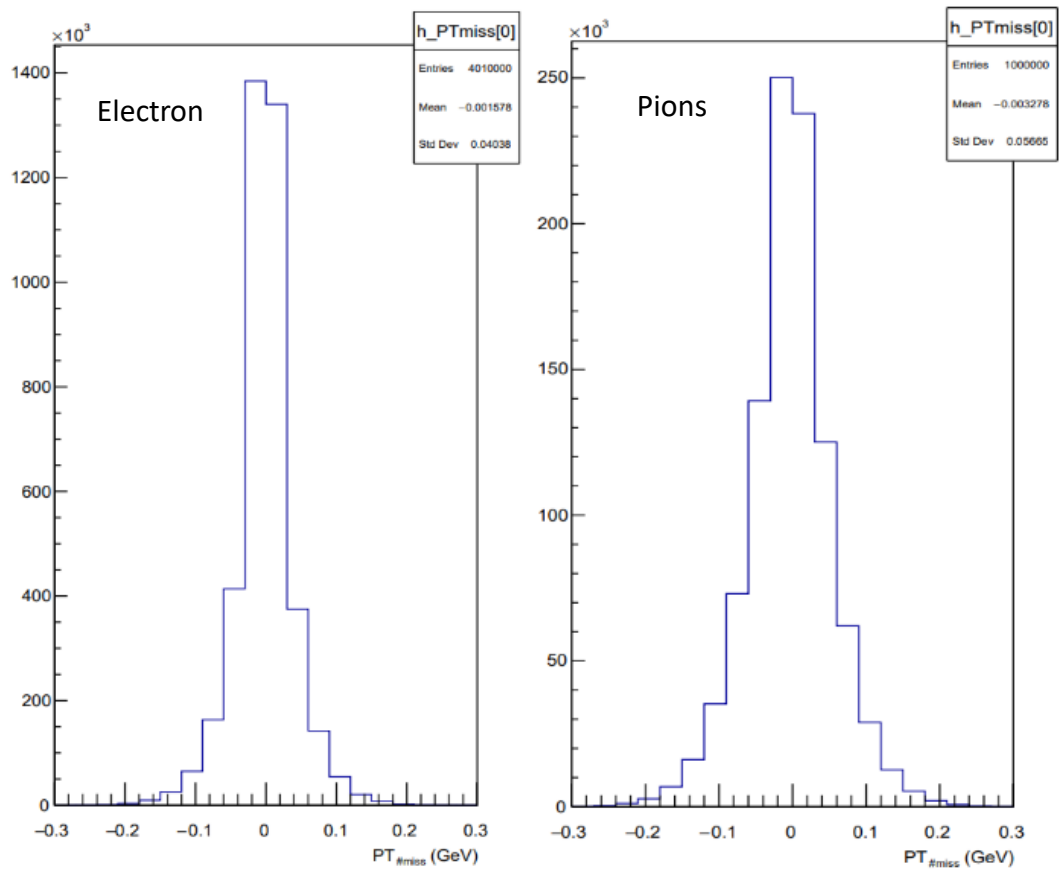


Figure 22 - Nombre d'événements mesuré en fonction PT_{miss} (la polarisation transverse) lors de la production d'électrons et de pions

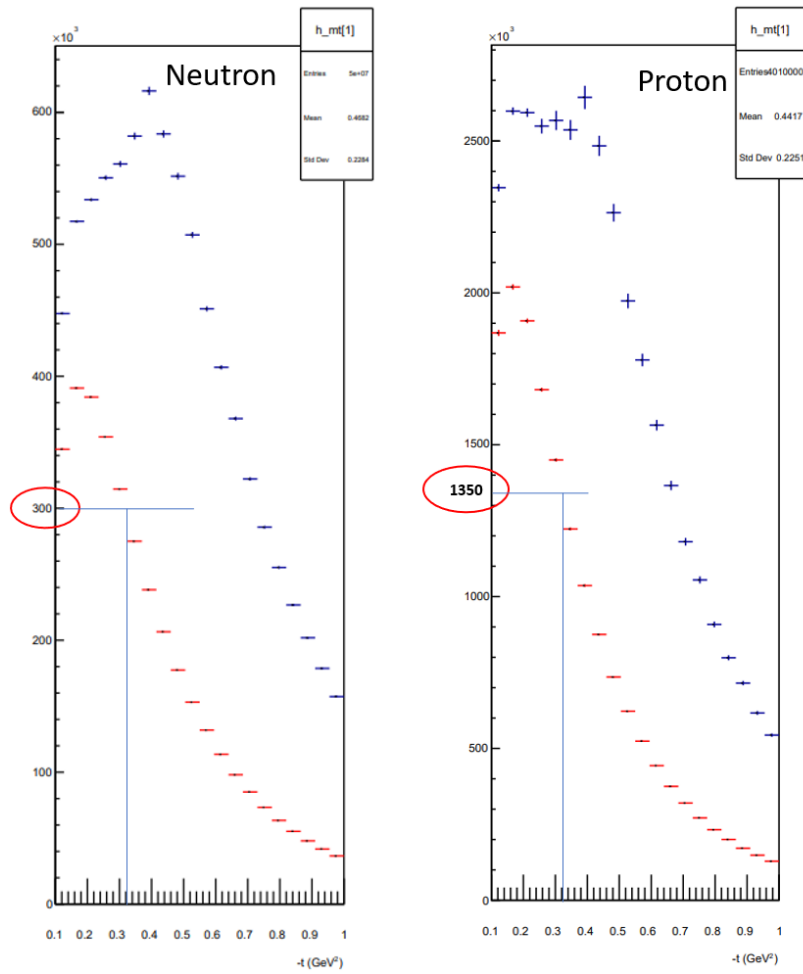


Figure 3 - Nombre d'événements générés pondéré par la section efficace en fonction de $-t$ lors de la réaction TCS sur un neutron (à gauche) et sur un proton (à droite)

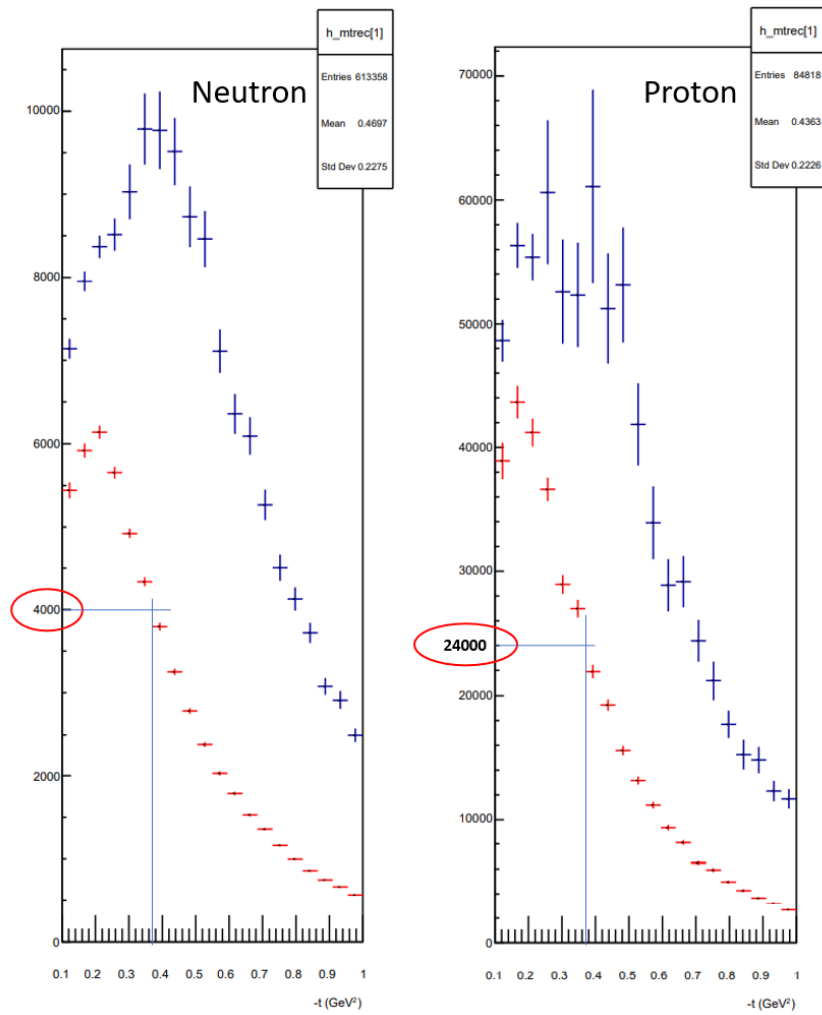


Figure 4 - Nombre d'événements mesurés pour 30 jours d'expériences pondéré par la section efficace en fonction de $-t$ lors de la réaction TCS sur un neutron (à gauche) et sur un proton (à droite)

Références

- [1] C. Zindy, Rapport de stage, *Étude de la structure du proton avec la Diffusion Compton Profondément Virtuelle du "genre temps"*, (janvier 2021)
- [2] CLAS Physics Publication Summaries, <https://www.jlab.org/Hall-B/1page/>
- [3] E. Golovatch *et al.* (CLAS Collaboration), "First Results on Nucleon Resonance Photocouplings from $\gamma p \rightarrow \pi^+\pi^+p$ Cross Sections", Phys. Lett. B 788, 371 (2019).
- [4] M. Boër, Colloque de l'Université du New Hampshire, *Tomographic views of the nucleon using relativistic light particles*, (février 2020)
- [5] R. Katz, *An Introduction to the Special Theory of Relativity*, (1964), Robert Katz Publications. Paper 49.