



Département de Physique

N° :

Faculté des Sciences, Université M'hamed Bougara de Boumerdès

Mémoire

Pour obtenir le diplôme de : **Master**

Master en Physique

Spécialité : **Physique des Rayonnements**

Présenté par :

Deriche Ferial

Intitulé :

Mesure des sections efficaces des raies gamma induites par interaction nucléaire des particules énergétiques avec les éléments les plus abondants dans l'univers

Déposé le 19/ 11 / 2020

le jury composé de :

Ami Ismahane

MCA UMBB

Président

Garidi Safia

MAA UMBB

Examineur

Benhabiles Hinda

MCB IGEE

Encadreur

Département de Physique, Faculté des Sciences, Université de Boumerdès 1, Avenue de l'indépendance 35000 Boumerdès
Tel : +213 (0) 24 81 62 49 / Fax : +213 (0) 24 81 62

Je dédie ce mémoire à ...

A mes très chers parents

Je mets entre vos mains, le fruit de longues années d'études.

En témoignage de ma reconnaissance pour votre patience, votre soutien et vos sacrifices tout au long de mes études.

Puisse Dieu, le tout puissant, vous préserver et vous accorder santé, longue

Vie et bonheur.

A mes très chers frères "wial" et "ayoub"

Je vous souhaite un avenir plein de joie, de bonheur et de réussite.

A mon grand père "Allah yarahmo"

Que ton âme repose en paix.

A tous les membres de ma famille, petits et grands

A mes meilleurs copines "Assia" et "Wafaa"

A tous mes amis

Remerciements.

*En tout premier lieu, je remercie le **Dieu**, tout puissant, de m'avoir donné la volonté d'avancer, ainsi que la force pour dépasser toutes les difficultés.*

*J'adresse ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à ma directrice de mémoire **M^{me} Hinda Benhabiles-Mezhoud** maître de conférences B à IGEE, université de boumerdès, qui m'avez honoré de guider ce travail. Je la remercie énormément pour sa disponibilité, son soutien, ses orientations et surtout ses judicieux conseils.*

Je tiens également à exprimer une reconnaissance aux membres de jury :

- **M^{me} Ismahane Ami** maître de Conférences A d'avoir accepté de présider le jury.*
- **M^{me} Safia Garid** maître assistant A d'avoir accepté d'examiner le contenu du présent travail.*

Enfin, Je remercie toute l'équipe pédagogique de département de physique de l'université de M'Hamed bougara et notamment les intervenants professionnels responsables de ma formation.

Sommaire

Introduction.	3
Chapitre 1 : Contexte astrophysique.	
1. Introduction.	5
2. Rayonnement cosmique.	5
3. L'astronomie gamma.	7
4. Emission gamma galactique.	8
5. Emission gamma solaire – Eruption solaire.	10
6. Conclusion.	12
Références du chapitre 1.	13
Chapitre 2 : Dispositif expérimental et simulation du dispositif.	
1. Introduction.	14
2. Dispositif expérimental.	14
2.1- L'accélérateur.	14
2.2- Les faisceaux.	15
2.3- Chambre à réaction.	16
2.4- Les détecteurs.	17
3. Calibration en énergie et en efficacité.	19
3.1- Calibration en énergie.	19
3.2- Calibration en efficacité.	20
3.3- Simulation GEANT du dispositif expérimental.	20
3.4- Résultats des mesures d'efficacités.	22
Références du chapitre 2.	24
Chapitre 3 : Données et résultats expérimentaux.	
1. Introduction.	25
2. Les mesures.	25
3. Méthodologie.	26
3.1- Acquisition.	26
3.2- Soustraction du bruit de fond.	26
3.3- Calcul de l'aire sous le pic.	28
3.4- Calcul des incertitudes sur les surfaces.	30
3.5- Sections efficaces différentielles.	31
3.6- Distributions angulaires.	31
3.7- Les sections efficaces totales.	33
3.8- Calcul des incertitudes sur les sections efficaces différentielles.	33

4. Présentation des résultats.	34
4.1- Caractéristiques des raies.	34
4.2- Discussion.	36
4.3- Sections efficaces totales.	40
5. Conclusion.	43
Références du chapitre 3.	44
Conclusion générale.	45

Introduction :

Introduction

Les rayons gamma sont des rayonnements électromagnétiques de hautes énergies, produites par une large variété de processus physique et notamment lors de la désexcitation des noyaux atomiques. Dans l'espace, ces radiations sont émises par diverses sources qui produisent et libèrent une quantité importante d'énergie. Les plus violentes sont l'explosion de novæ, de supernovæ, les sursauts gamma,...

Les éruptions solaires et les interactions du rayonnement cosmique avec le milieu interstellaire à travers différents mécanismes, sont également considérées parmi les sources les plus importantes de production des rayons gamma. L'étude du spectre d'émission gamma fournit des informations inestimables sur les caractéristiques des milieux interstellaires et des rayonnements cosmiques et permet ainsi la compréhension des mécanismes de productions et d'accélération des particules produites dans les différents sites astrophysiques.

Le but de notre travail est de contribuer à améliorer notre compréhension quant au flux de ces rayonnements produits dans différents sites dans l'univers et plus particulièrement dans l'interaction du rayonnement cosmique avec le milieu interstellaire et pendant les éruptions solaires. L'émission de ces rayonnements gamma repose sur un point important à savoir la mesure des sections efficaces totales de production de ce rayonnement. De nombreuses mesures des sections efficaces pour des gammes d'énergies différentes existent déjà, obtenues lors des expériences dans divers laboratoires. Cependant, les sections efficaces pour plusieurs raies importantes, issues de la désexcitation de différents noyaux, n'ont toujours pas été mesurées expérimentalement. De plus, les gammes d'énergies pour lesquelles certaines productions de raies ont été étudiées, sont limitées.

Une expérience a été réalisée par H. Benhabiles-Mezhoud auprès de l'accélérateur de Tandem de l'Institut de Physique Nucléaire d'Orsay (INPO) dans le but de mesurer les sections efficaces des raies gamma produites lors de l'interaction de deux faisceaux différents constitués de protons et de particules alpha avec des cibles d'azote (N), de néon (Ne) et de silicium (Si). Ces faisceaux constituent l'essentiel de la composition du rayonnement cosmique et les trois éléments l'Azote (N), le Néon (Ne) et le silicium (Si) sont parmi les éléments les plus abondants du milieu interstellaire et de l'atmosphère solaire.

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'analyse des données expérimentales issues de l'interaction des protons avec le Néon pour mesurer les sections efficaces des raies gamma produites. L'analyse des raies gamma plus

intenses induites par cette interaction nucléaire nous a permis de déterminer les sections efficaces différentielles, totales ainsi que les fonctions d'excitations pour une large gamme d'énergie incidente. Enfin, Les résultats que nous avons obtenus à partir de nos mesures ont été comparés à ceux disponibles dans les travaux antérieurs.

Le manuscrit se compose de trois chapitres. Le premier chapitre est consacré à une introduction brève à l'astronomie et l'astrophysique gamma, il y a aussi une description des processus et des sites d'observation pour l'émission de rayons gamma. On parlera également de certains concepts sur les rayonnements cosmiques. Dans le deuxième chapitre, nous présenterons le dispositif expérimental de l'expérience menée au niveau de l'accélérateur Tandem de l'Institut de Physique Nucléaire d'Orsay. Le dernier chapitre est dédié à la présentation des mesures, la discussion des résultats obtenus et à une description générale de notre méthodologie de travail. Enfin, une conclusion générale résume l'ensemble des résultats importants.

Chapitre 1 :

Contexte astrophysique

1. Introduction

L'étude et la mesure des raies gamma produites par des réactions nucléaires existant dans l'univers nous fournissent des informations inestimables sur les problèmes astrophysiques de hautes énergies comme l'accélération de particules, l'origine des rayonnements cosmique, la physique des objets compacts (trous noirs, quasars...) ou encore la nucléosynthèse.

L'émission gamma causée par l'interaction des particules du rayonnement cosmique avec le milieu interstellaire est d'intérêt majeur. Actuellement, une des questions ouvertes est la composante du rayonnement cosmique à basse énergie qui reste mal connue en raison de la difficulté d'effectuer des observations dans ces gammes d'énergies. En effet, les champs magnétiques régnant dans le système galactique et solaire ainsi que le vent solaire tendent à dévier et à freiner ce rayonnement qui devient difficile à détecter depuis la terre à cause de l'atténuation importante de son flux.

D'autre part, au cours des éruptions solaires, des raies gamma nucléaires sont émises et des particules sont accélérées à des énergies relativistes, engendrant avec le vent solaire une bonne partie du rayonnement mesuré en dehors de l'atmosphère terrestre. Plusieurs missions de surveillance ont été effectuées par des satellites qui, grâce à des détecteurs embarqués ont pu suivre et enregistrer des rayonnements gamma émis lors des éruptions solaires. L'un des satellites les plus récents : le satellite européen INTEGRAL et le satellite RHESSI.

Ce premier chapitre sera consacré à une introduction rapide à l'astronomie et l'astrophysique gamma et une description assez brève des processus et des sites d'observations de l'émission du rayonnement gamma. Nous décrirons aussi les caractéristiques du rayonnement cosmique sachant qu'une partie de notre travail sera porter sur le calcul du spectre total de l'émission gamma induite lors de son interaction avec le milieu interstellaire.

2. Le rayonnement cosmique

Le rayonnement cosmique est principalement constitué de particules énergétiques chargées qui se propagent dans la Galaxie. Historiquement, les premières observations du rayonnement cosmique ont été réalisées au début du

20^{ème} siècle, à bord de ballons atmosphériques, à des altitudes de plusieurs centaines de mètres [1].

L'atmosphère terrestre absorbe l'essentiel du rayonnement ce qui rend sa détection problématique sur terre. Le rayonnement cosmique primaire ne peut être mesuré que depuis l'espace ou depuis des ballons atmosphériques (avant qu'il n'interagisse avec l'atmosphère). Les particules de haute énergie détectées au voisinage de la terre sont principalement issues de la galaxie et du soleil lors des éruptions solaires responsables de l'émission d'une grande partie du flux de particules chargées et des neutrons. L'une des manifestations de ces particules solaires est l'apparition des aurores boréales.

L'étude du rayonnement cosmique galactique (issues de la galaxie) est difficile car son origine ne peut être déterminée. En effet, une fois que les particules chargées du rayonnement cosmique se sont propagées dans la galaxie, elles sont soumises au champ magnétique et sont donc déviées de leur trajectoire initiale, sa détection nécessite le suivi des signes laissés par leur propagation ou leur interaction avec le milieu interstellaire comme par exemple le cas des protons, leur propagation dans le milieu interstellaire provoquent des collisions avec les atomes du milieu qui produisent des pions neutres π^0 qui se désintègrent en émettant deux photons gamma. La détection de ces photons permet donc une certaine traçabilité sur l'origine et le parcours du rayonnement cosmique.

Sur terre, l'étude du rayonnement cosmique se fait au travers de ses interactions avec l'atmosphère qui produisent une cascade de particules secondaires. L'analyse de ces particules nous permet de remonter aux caractéristiques physiques des particules primaires.

Plusieurs mesures ont été réalisées depuis les années 1960 à l'aide des satellites afin d'obtenir le spectre de rayonnement cosmique. Les extrapolations du spectre du rayonnement cosmique à basse énergie, à partir d'observations des produits de leurs interactions et de mesures à haute énergie sont possibles. Ces extrapolations sont directement reliées à certains paramètres physiques comme les sections efficaces de réaction produites par les particules constituant ce rayonnement, les abondances des différents éléments chimiques dans les sites interstellaires et les flux de particules.

La composante du rayonnement cosmique à basse énergie est pourtant très importante. Elle est responsable de divers mécanismes physiques comme

l'ionisation, la nucléosynthèse non thermique et notamment la production des éléments Li, Be et B, entièrement due au rayonnement cosmique galactique. En effet, il est maintenant largement admis que l'origine de la plus grande partie de ces éléments dans la galaxie est due aux réactions de spallation induites par les protons et les particules α du rayonnement cosmique avec des noyaux plus lourds du milieu interstellaire. Ces mécanismes jouent donc un rôle important dans l'évolution chimique du milieu interstellaire, notamment dans les nuages moléculaires.

3. L'astronomie gamma

L'astronomie gamma est un domaine centré sur l'observation du ciel dans la gamme de longueurs d'onde du rayonnement gamma, elle étudie qualitativement et quantitativement l'émission gamma.

La détermination de la quantité totale de gamma produite dans l'univers au sein des différents sites stellaires et interstellaires informe sur la nature des éléments, leurs abondances et les divers mécanismes nucléaires intervenant dans leur production. Cela nous permet de comprendre le contenu de notre univers.

L'absorption du rayonnement gamma par l'atmosphère terrestre empêche sa détection, mais le développement des satellites d'observation (INTEGRAL, FERMI,...) a permis de surmonter ces difficultés et de rendre leur détection possible. Les rayons gamma d'énergie supérieure à quelque dizaine de (GeV) peuvent aussi être détectés sur terre, leur détection consiste à utiliser des détecteurs stéréoscopiques de la lumière Cherenkov produite par les rayons gamma lors de leurs interactions avec l'atmosphère terrestre.

La figure (1 - 1) représente une image du ciel gamma observé par le télescope spatial FERMI [2] dans la gamme d'énergie de 30 MeV à 300 GeV . Cette figure montre que la plus part du rayonnement gamma observé est issu du plan galactique.

Ce qui précède montre bien qu'il existe différentes sources de rayonnement gamma et les mécanismes de production de ce rayonnement que nous détectons à partir de la terre sont énumérés ci-dessous.

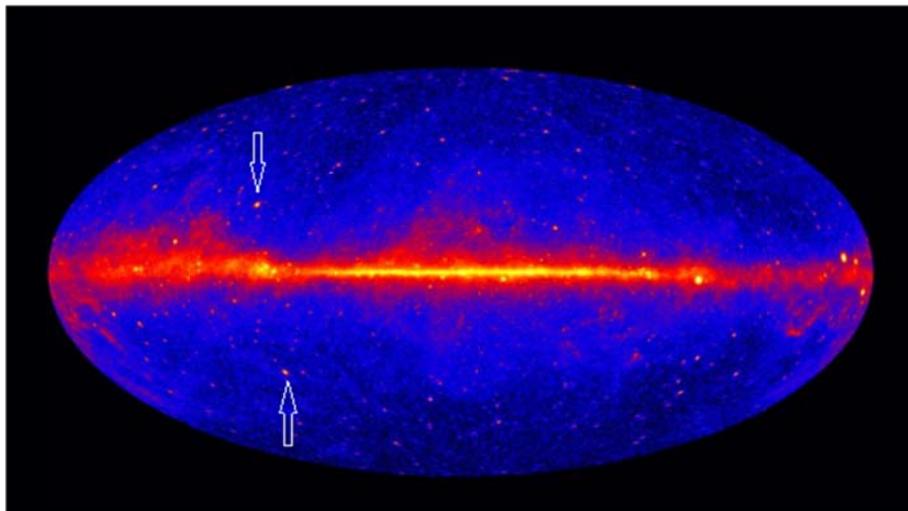


Fig. 1 – 1 : Image du ciel dans le domaine des rayonnements gamma d'énergie comprise entre 30 MeV et 300 GeV. La couleur jaune correspond à la plus forte intensité. On observe sur cette image de rares sources ponctuelles (les flèches indiquent 2 sources particulières). Image du télescope FERMI [2].

4. Emission gamma galactique

Cette émission est due essentiellement à l'interaction des différentes particules du rayonnement cosmique (l'électron, positron, les particules chargées) avec les éléments du milieu interstellaire par divers mécanismes. La contribution de ces mécanismes dépend de la distribution spatiale des différentes composantes de la matière interstellaire, des différents champs de rayonnement, de l'intensité et de la distribution en énergie des rayons cosmiques [3].

On peut distinguer trois mécanismes de production de ce rayonnement selon la longueur d'onde du rayonnement :

- Pour $E_\gamma < 10 \text{ MeV}$ (à très basse énergie), le mécanisme dominant est l'effet Compton inverse provoqué par la collision des électrons de hautes énergies ($>100 \text{ MeV}$) du rayonnement cosmique avec les photons des rayonnements visible, infrarouge et fossile [4,5].
- Pour $E_\gamma < 100 \text{ MeV}$, dans cette gamme d'énergie la production de rayonnement gamma se fait par freinage des électrons (Bremsstrahlung) du rayonnement cosmique sur les atomes et les ions de milieu interstellaire [3,4].

- Pour $E_\gamma > 100 \text{ MeV}$, dans cette gamme, l'émission gamma est essentiellement induite par l'interaction hadronique entre le rayonnement cosmique galactique et le milieu interstellaire à travers la production des particules π^0 dans les interactions $p-p$, $p-\alpha$ et $\alpha-p$ et leur désintégration par émission gamma [3,6].

Un autre mécanisme pourrait donner la production de rayonnement gamma est l'annihilation électron-positron et qui correspond à la raie 511 KeV dans le spectre de gamma galactique. En effet, les positrons interagissant avec les électrons liés ou non du milieu interstellaire peuvent former un état métastable appelé positronium. L'annihilation au repos qui en résulte conduit à l'émission de deux ou trois photons gamma.

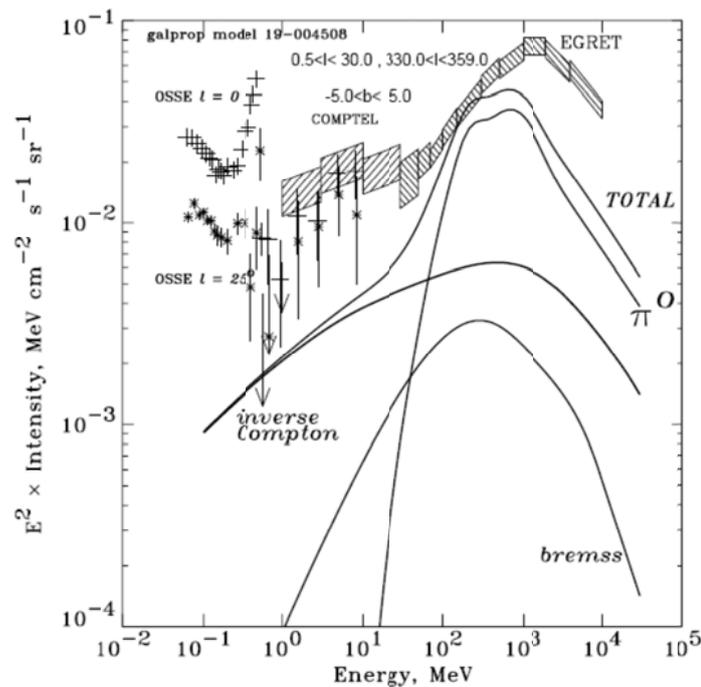


Fig. 1 – 2 : Spectre de l'émission gamma diffuse des régions internes de notre galaxie. Cette figure illustre les différentes contributions au spectre de l'émission gamma galactique [5].

Outre les émissions mentionnées plus haut, nous ajoutons d'autres émissions qui contribuent au spectre électromagnétique galactique telles que l'émission gamma nucléaire résultant de l'interaction des protons et des particules alpha α avec les éléments du milieu interstellaire. Ainsi que le rayonnement synchrotron émis par les électrons lors de leur propagation dans les champs magnétiques galactiques. Les

réactions de spallation sont également susceptibles de produire certaines raies observables dans le spectre gamma.

La somme de toutes les contributions illustré sur la figure (1 - 2) permet de déterminer le spectre total d'émission des raies gamma galactique. Ce spectre est constitué d'un ensemble de raies intenses et étroites correspondront à la désexcitation des noyaux à partir des premiers niveaux excités. L'émission gamma galactique est utile pour étudier le rayonnement cosmique et la structure du milieu interstellaire [1].

5. Emission gamma solaire - Eruption solaire

L'émission gamma solaire est provoquée par des particules chargées accélérées dans la couronne lors des éruptions solaires (figure (1 - 3)).

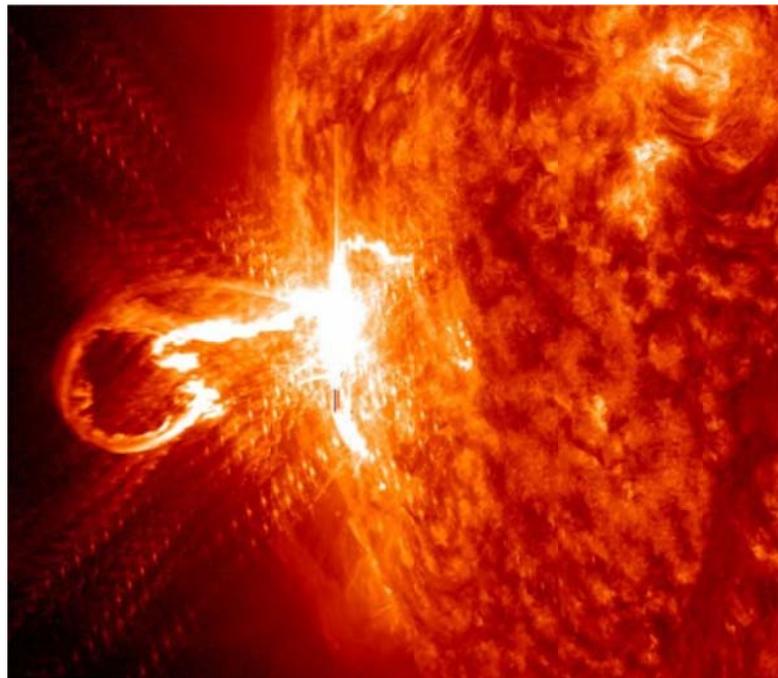


Fig. 1 – 3 : Image de l'éruption solaire du 25 février 2014 observée par l'observatoire spatial solaire SDO (NASA). L'une des éruptions solaires les plus fortes et violentes de l'année 2014.

Les éruptions solaires sont provoquées par la reconnexion des lignes du champ magnétique d'orientations opposées qui libère une énorme quantité d'énergie sous forme de particules fortement accélérées (électrons, protons, neutrons). Ces particules sont injectées dans les boucles du champ magnétique (voir figure (1 - 4)) et

sont transportées vers le pied de la boucle qui se situe dans la chromosphère et la photosphère, par la suite elles perdent leur énergie dans les collisions qu'elles subissent avec les électrons et les ions ambiants induisant à l'émission de rayonnements gamma.

En interagissant avec les constituants de l'atmosphère solaire, les particules rapides piégées dans les boucles magnétiques peuvent générer à la surface du soleil une émission électromagnétique à large spectre allant des ondes radio jusqu'aux rayons gamma. En particulier, l'interaction des particules accélérées avec les noyaux de chromosphère et photosphère rend certains noyaux dans des états excités, qui en retournant à leur état fondamental, émettent des raies gamma d'énergie comprise entre quelques dizaines de keV et environ $10 MeV$.

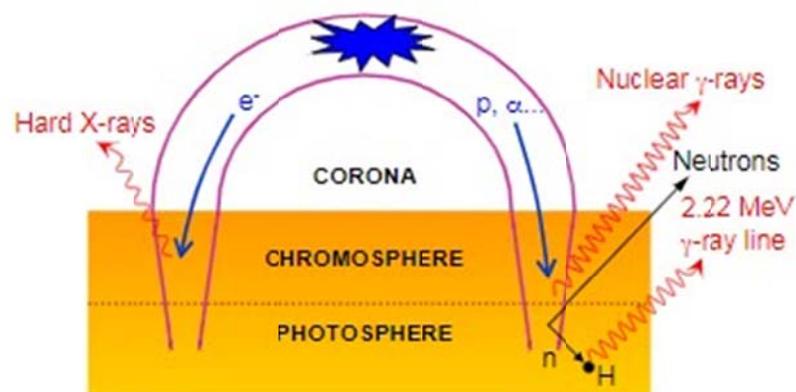


Fig. 1 – 4 : Représentation schématique de la production du rayonnement gamma par interaction de particules accélérées dans la chromosphère et la photosphère lors des éruptions solaires [7].

L'émission gamma solaire est principalement composée des raies gamma nucléaires induites par les collisions des ions accélérés avec les noyaux atomiques et du rayonnement de freinage (Bremsstrahlung) qui se traduit par une émission continue de photons dont l'énergie s'étend du domaine des rayons X jusqu'à une valeur limite correspondant à l'énergie maximale du projectile incident. Au-delà de cette énergie et jusqu'à environ plusieurs MeV , l'émission de raies gamma générée par collision nucléaire des ions accélérés peut dominer. A plus haute énergie, on observe dans certaines éruptions une émission gamma caractéristique d'une production de particule secondaire comme les pions, les neutrons, produits lors des collisions nucléaires.

L'analyse spectrale de cette émission de raies de désexcitation nucléaire permet d'étudier les propriétés des particules accélérées (composition, l'origine, distribution en énergie et notamment le transport des noyaux accélérés), nous fournit également des informations uniques sur certaines propriétés physiques de l'atmosphère solaire, comme sa composition isotopique. Les deux raies gamma les plus intenses sont généralement celle à 511 keV d'annihilation de paire ($e^+ - e^-$) et celle à 2,223 MeV de capture radiative de neutrons par le noyau d'hydrogène de l'atmosphère solaire.

Il existe une grande variété de satellites dédiés à la surveillance de l'activité solaire dans les différentes gammes d'énergie comme SOHO, INTEGRAL

De nombreux autres phénomènes astronomiques sont capables de produire des rayons gamma comme l'explosion de supernova, de novae, l'émission gamma par pulsars. On observe également les sursauts γ appelés GRB (Gamma-Ray Burst) qui sont de brèves émissions de rayons γ , avec une durée comprise entre quelques millisecondes et quelques minutes. Ces phénomènes sont les plus violents observés dans l'univers.

6. Conclusion

De ce que nous avons vu dans ce chapitre, nous pouvons réaliser l'importance d'étudier le rayonnement gamma pour comprendre les milieux interstellaires et le rayonnement cosmique ainsi que pour développer notre connaissance sur l'univers. Néanmoins, il faut retenir que de nombreuses questions restent posées d'une part sur l'origine et les mécanismes d'accélération de particules du rayonnement cosmique et d'autre part sur le spectre du rayonnement cosmique à base énergie qui reste méconnu.

Notre travail vise à évaluer le flux total de l'émission de raies gamma nucléaires produite par l'interaction des particules du rayonnement cosmique avec le milieu interstellaire. Pour cela, dans les chapitres suivants on va étudier les raies gamma produites par l'interaction des protons avec un élément abondant dans l'univers qui est le néon (Ne). Cette étude a permis de calculer les sections efficaces ce qui va nous conduire à remonter au calcul du spectre total des raies gamma galactiques.

Références bibliographiques

- [1] : Rayonnement cosmique, Ecole de Goutelas 2003, Observatoire astronomique et astrophysique de Strasbourg, Société Française d'astronomie.
- [2] : <http://fermi.gsfc.nasa.gov/>.
- [3] : V. Tatischeff, Rayonnement cosmique, Ecole de Goutelas 2003, Observatoire astronomique et astrophysique de Strasbourg, Société française d'astronomie.
- [4] : T.A. Porter, ApJ **682** (2008) 400.
- [5] : A.W. Strong, I.V. Moskalenko & O. Reimer, ApJ **537** (2000) 763.
- [6] : C.D. Dermer, Astron. Astrophys. **157** (1986) 223.
- [7] : V. Tatischeff, quelques perspectives en astrophysique nucléaire des phénomènes non thermiques, Habilitation à diriger des recherches, Université Paris sud, 2012.

Chapitre 2 :

*Dispositif expérimental et simulation
du dispositif*

1. Introduction

Ce chapitre est dédié à la présentation du dispositif expérimental et à l'expérience qui a été réalisée auprès de l'accélérateur du Tandem Van-de-Graaf de 14-MV de l'institut de physique nucléaire d'Orsay (IPN). Cet accélérateur permet un réglage précis et relativement rapide des faisceaux aux énergies désirées ce qui fournit des faisceaux stables d'ions avec des énergies maximales de 28 MeV pour les protons et de 42 MeV pour les particules alpha. Le but de cette expérience est de mesurer les sections efficaces différentielles et totales et ainsi que les fonctions d'excitations des raies gamma produites par interactions nucléaires de protons et de particules alpha avec les éléments les plus abondants dans l'univers (*Ne, N, Si, O, ...*).

Dans ce travail, nous nous intéressons aux faisceaux de protons de différentes énergies 26.2, 22.5, 20, 15, 9.78, 7.84 MeV. Ces faisceaux ont été envoyés sur une cible gazeuse de néon ^{20}Ne .

Ce travail consiste à analyser les raies gamma les plus intenses produites par l'interaction de protons avec la cible de ^{20}Ne , puis à déterminer leurs sections efficaces. Parmi ces raies sont, la raie 1634, 2614, 3332 KeV.

Ce chapitre se compose de deux parties : la première est une description détaillée des éléments du dispositif expérimental (l'accélérateur, faisceau, la chambre à réaction, les détecteurs). La deuxième partie est consacrée à l'étalonnage en énergie et en efficacité des détecteurs, la simulation du dispositif expérimental.

2. Dispositif expérimental

2.1 - L'accélérateur

L'accélérateur "TANDEM" d'Orsay est une machine de 14 M-Volts utilisée pour accélérer les ions. Il est de type "Van-de-Graaf" électrostatique et fournit des faisceaux stables de protons avec des énergies maximales de 28 MeV et d'intensité maximale du courant est de l'ordre 2.5 μA . La phase de l'accélérateur est double : les atomes sélectionnés sont dans un premier temps transformés en ions négatifs, par la suite, ils sont injectés à l'une des extrémités de l'accélérateur. Les ions étant négatifs, ils sont accélérés vers le centre de l'accélérateur par une tension positive. Au Centre, ils traversent une couche mince de gaz ou de carbone, de cette manière, Ils sont épluchés d'une partie ou de la totalité de leurs électrons et deviennent des ions

positifs. Le changement de polarité permet une deuxième phase d'accélération jusqu'au bout de l'accélérateur.

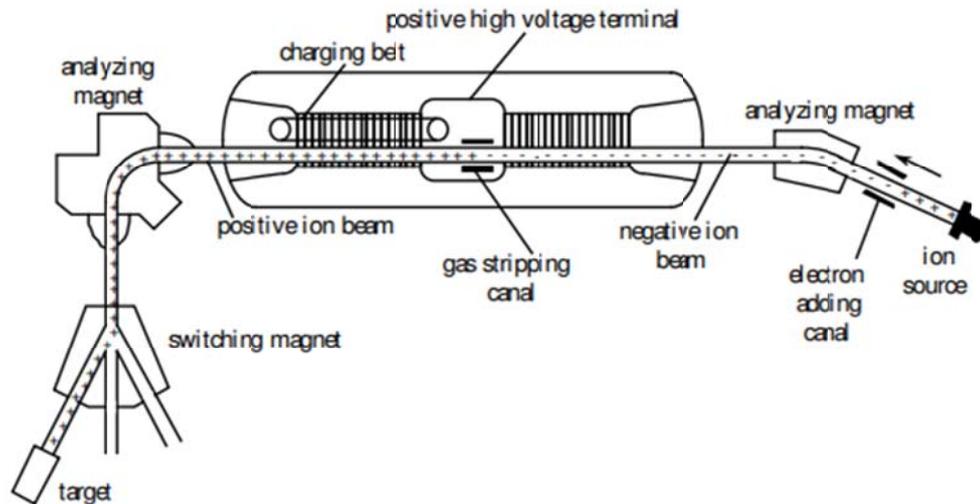


Figure 2 - 1 : Schéma représentatif de l'accélérateur du TANDEM « Van-de-Graaf ».

2.2 - Les faisceaux

Les faisceaux de protons qui ont été produits par l'accélérateur "TANDEM" ont des intensités qui varient de 1 à 4 nA et ont été transportés sous le vide poussé avec une pression ($P < 10^{-6}$ torr).

Dans cette expérience, il était nécessaire de vérifier pour chaque prise de données (run) que le faisceau est bien focalisé sur la chambre à réaction et passe par ses deux orifices de diamètres 1.2 cm en amont et 2 cm en aval et séparés par une distance de 18.7 cm, en évitant de toucher les bords de la cible. Ceci mène à minimiser le nombre de coups gamma parasites provoqué par un éventuel halo du faisceau dans la cible gazeuse.

2.3 - La chambre à réaction

La chambre à réaction de cette expérience était constituée d'une cible gazeuse ayant la forme d'une petite cellule de tube en T standard pour le vide. Le tube était en aluminium, avec une longueur de 13 cm, un diamètre de 3.8 cm, et une épaisseur des parois de 3.5 mm. Trois bouteilles de gaz étaient connectées à la cellule et elles étaient également reliées à des vannes de réglage fin pour faciliter le remplissage et le vidage du gaz.

Aux extrémités du la cellule en T et à l'aide de pièces mécaniques en aluminium, des feuilles de Mylar de composition chimique $C_{10}H_8O_4$ et d'épaisseur de 6 μm ont été placées pour confiner le gaz à des pressions élevées ce qui a conduit à une rallonge supplémentaire de la zone d'interaction à 18.5 cm. Les cibles utilisées dans cette expérience étaient des cibles suffisamment épaisses afin de perfectionner le nombre de coups enregistrés ainsi que de réduire la perte d'énergie de proton dans la cible, d'où l'utilisation des pressions de gaz assez grandes, de l'ordre de quelques centaines de mbar. Pour des pressions allant de 30 à 500 mbar, l'épaisseur des cibles est de $1.3 \cdot 10^{19}$ et de $2.3 \cdot 10^{20}$ *atome/cm²* respectivement. Comme exemple dans ces conditions la perte d'énergie des protons dans la cible de Ne atteint la valeur de 370 *KeV* pour des protons de 7 *MeV*.

La cible était reliée d'un côté au tube du faisceau et de l'autre à une cage de Faraday par des colliers métalliques qui sont positionnés avec précision. Cette cage permet de mesurer la charge déposée pendant chaque run, elle se compose d'un tube à vide de 1.5 m de long en acier inoxydable, électriquement isolée de la chambre contenant la cible gazeuse et équipée d'un disque épais de cuivre dans lequel les protons étaient arrêtés.

Un blindage de 25 cm d'épaisseur environ, constitué par un mur de plomb consiste à atténuer fortement l'effet de rayons gamma produits par les faisceaux arrêtés dans la cage de Faraday sur les détecteurs. En effet, la production des raies gamma est plus élevée dans la cage de Faraday que dans la cible, ce qui, sans la protection du mur de plomb, aurait causé l'empilement d'un signal supplémentaire très important et indésirable contaminant les spectres et rendant l'analyse des données plus difficile.

Une jauge et un thermomètre pour mesurer la pression et la température de la cible gazeuse avec précision au début et à la fin de chaque run, ont été placés en

contact avec la surface de la chambre à réaction. Cela permet de déterminer avec précision l'épaisseur de la cible.

2.4 - Détecteurs

La détection des raies gamma produites a été faite par un ensemble de treize détecteurs au germanium de haute pureté faisant partie d'un groupe de quatre ensembles de détecteurs couplés de gros volumes placés à des angles différents et comprenant chacun plusieurs diodes.

Les détecteurs de grande taille VEGA-I et VEGA-II [1] et celui de taille moyenne nommé GUIT-78 [2] étaient constitués d'un arrangement de quatre cristaux compacts montés dans un cryostat unique de forme rectangulaire comme illustré dans (la figure 2-2), ces détecteurs sont appelés Clover et se caractérisent par une grande efficacité d'absorption, cela nous ramène donc à 12 détecteurs. Le dernier détecteur est un détecteur coaxial GFIC-38 [3] qui était constitué d'un seul cristal. Les quatre détecteurs étaient entourés d'un scintillateur inorganique de grande densité le BGO (Germanate de Bismuth) pour la suppression des événements Compton indésirables. Ces treize cristaux considérée comme des détecteurs individuels, chacun d'eux mesure les distributions angulaires des raies gamma produites. Ces distributions sont ajustées par une fonction résultat d'une combinaison linéaire de polynôme de Legendre, après cet ajustement, les sections efficaces totales sont extraites.

Afin d'améliorer l'angle solide d'ouverture, la distance séparant les bords taillés des cristaux de l'extérieur du cryostat est réduite à 3.5 mm. Ceci permet de minimiser l'élargissement des raies gamma par l'effet Doppler.

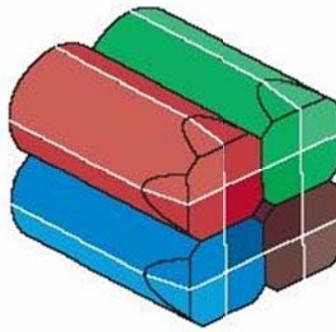


Figure 2 - 2 : Le détecteur CLOVER (Strasbourg) avec son cryostat (à gauche) et la configuration des 4 cristaux d'un détecteur CLOVER (à droite).

Ces détecteurs fonctionnent en mode "add-back" ou "sommation" où les signaux émanant des différentes diodes germanium sont collectés pour retrouver l'énergie totale d'un photon ayant diffusé par l'effet Compton hors d'un cristal.

Les détecteurs VEGA-I et VEGA-II ont été positionnés par rapport à la direction du faisceau, aux angles 120° et 135° respectivement et à une distance de 40 cm du centre de la chambre à réaction. Ces deux détecteurs possèdent une longueur de 14 cm et un diamètre de 7 cm. Pour le GUIT-78 et le GFIC-38 quant à eux, ils étaient situés à une distance de 17.5 cm du centre de la chambre à réaction et aux angles de 90° et 30° respectivement. Le détecteur GUIT-78 avait une longueur de 7 cm et une surface de 36 cm^2 , par contre le GFIC-38 avait une surface de 25 cm^2 et une longueur de 7 cm. Le centre de chacun de ces détecteurs était placé dans le plan horizontal incluant la direction du faisceau.

L'utilisation de ce type de détecteurs offre une très bonne résolution en énergie et une bonne efficacité pour le pic de pleine énergie obtenu soit par l'effet photoélectrique ou par l'effet Compton.

Le rapport pic sur total représente la probabilité d'observer un pic de pleine énergie et il définit comme suit :

$$P/T = \frac{N_{pic}}{N_{detect}} \quad (2 - 1)$$

Avec :

N_{pic} : Représente le nombre de coups sous le pic.

N_{detect} : Représente le nombre de coups détectés.

3. Calibration en énergie et en efficacité

3.1 - Calibration en énergie

Dans cette expérience, la calibration en énergie a été effectuée à partir de spectres de sources radioactives γ étalons (Cobalt ^{60}Co , Europium ^{152}Eu et Césium ^{137}Cs) à basse énergies (de 122 KeV à 1408 KeV) obtenus lors de prises de données hors faisceaux. Pour la partie haute énergie, la calibration a été faite en utilisant les raies à 6129 keV pleine énergie, -511 et 1022 keV, de ^{16}O produites par l'interaction des protons avec les feuilles de Mylar à l'entrée et la sortie de la cible gazeuse sans gaz.

Les valeurs des centroïdes des pics pleine énergie des raies gamma ont été obtenues avec le programme de déconvolution et d'alignement de raies appelé GF3 développé par D.C. Radford [4]. Le GF3 est un programme d'ajustement de pics par minimisation de moindres carrés où l'ajustement de chaque groupe de pics est obtenu séparément grâce à des formes gaussiennes. Les paramètres libres de l'ajustement sont les positions des centroïdes, l'amplitude de la composante gaussienne la plus intense et sa largeur. Les valeurs des centroïdes ont été utilisées pour déterminer la calibration quadratique en énergie aux différentes données. Les valeurs de χ^2 obtenues pour les meilleurs paramètres estimés ont mené à une incertitude de l'ordre du keV sur l'énergie aux 13 angles. Cette précision était largement suffisante pour identifier correctement les pics.

3.2 - Calibration en efficacité

L'efficacité des treize détecteurs utilisés dans cette expérience, doit être très précise que possible pour pouvoir détecter les raies gamma dont l'énergie allant de quelques centaines de *keV* à *8 MeV*. Comme nous avons déjà indiqué plus haut, à basse énergie la calibration a été faite par des sources radioactives, mais ces sources ne couvrent que la gamme d'énergie qui s'étend jusqu'à *1.4 MeV*, pour cela, il a été nécessaire de recourir à la simulation GEANT pour les hautes énergies.

Une simulation GEANT très complète à la basse et haute énergie a été effectuée tenant compte notamment de la grande étendue de la source gazeuse et donc des absorptions différentes des rayonnements gamma selon leur point d'émission.

Pour la calibration de la simulation, les sources ont été placées à différents endroits (centre et extrémités) le long de la cible, afin de déterminer un coefficient de la calibration de la simulation tenant compte correctement des effets de longueur de la cible.

3.3 - Simulation GEANT du dispositif expérimental (Détecteurs et Chambre à réaction)

La simulation GEANT est une simulation qui prend en compte toutes les informations sur les caractéristiques des détecteurs et de la chambre à réaction. Cette partie a été déjà faite en amont par H. Benhabiles-Mezhoud [5]. Il est utilisé dans plusieurs domaines comme la physique de hautes énergies, la médecine nucléaire, l'astrophysique ... etc. L'une de ses applications principales dans la physique des hautes énergies est la simulation de la réponse des détecteurs aux particules et rayonnements électromagnétiques à travers la représentation des dispositifs expérimentaux et des trajectoires des particules. Parmi les différentes interactions traitées est l'effet Compton, l'effet photoélectrique, la création des paires ($e^+ - e^-$) et l'effet Rayleigh. La version GEANT qui a été utilisé se nomme G0-GEANT (version GEANT 3.21) développée par le CERN.

Dans cette expérience, la simulation a été faite pour les détecteurs ainsi que la chambre à réaction et les interactions sont présent en compte soit dans le détecteur (zone active) soit dans les matériaux environnants.

Les géométries, dimensions et positions des différents détecteurs utilisés dans cette expérience sont connus avec précision ce qui a permis leur reproduction avec la simulation GEANT. Les efficacités de détection dépendent fortement de ces caractéristiques, ce qui a mené à prendre en compte tous les détails de la conception des détecteurs tel que la taille du cristal, de celle du capot de l'aluminium qui entoure le cristal et son épaisseur ainsi que la distance entre le cristal et le capot, en plus les dimensions de BGO qui entourent les détecteurs.

Une fois que l'ensemble des détecteurs simulés, ils sont placés autour de la chambre à réaction à différentes distances et angles mesurés dans l'expérience, en respectant la distance entre le centre de la chambre et le centre des détecteurs voir figure (2 - 3). Cette simulation permet de reproduire complètement les détecteurs et donne des nouveaux détecteurs avec une bonne efficacité.

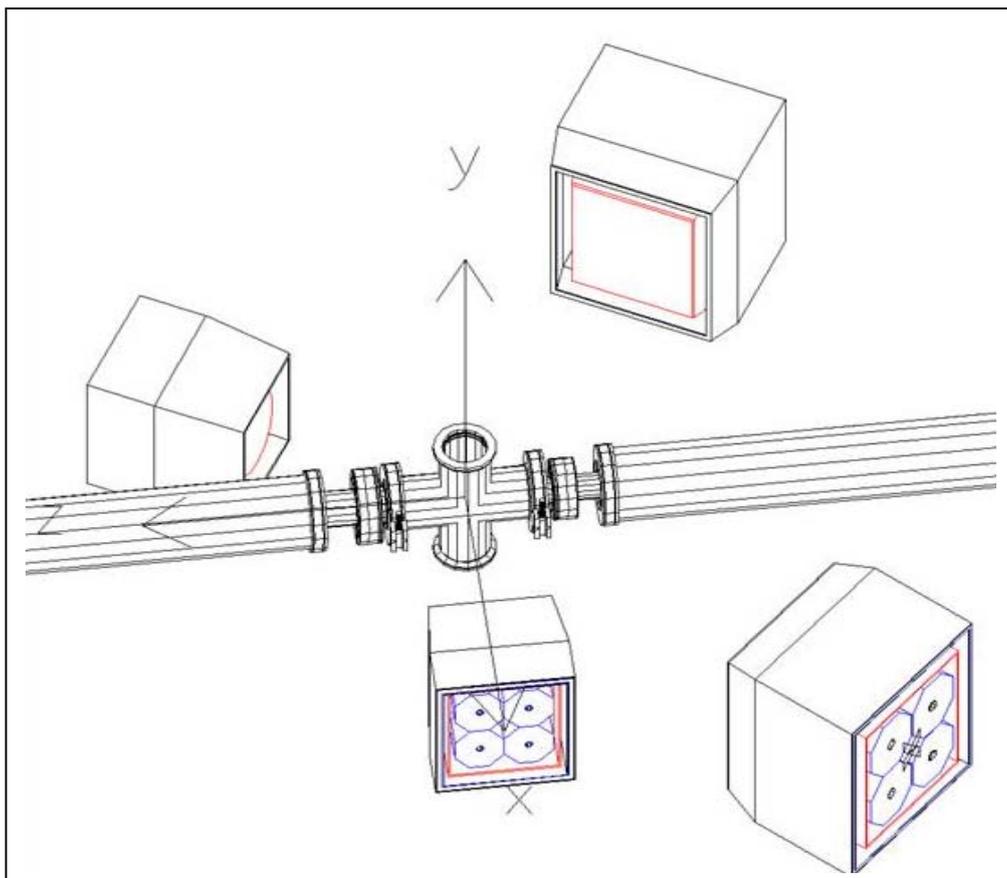


Figure 2 - 3 : Dispositif expérimental simulé et dessiné par GEANT. Au centre, la chambre à réaction. On observe les quatre ensembles de détecteurs. Le faisceau est envoyé suivant l'axe Z (fait par H. Benhabiles-Mezhoud [5]).

La chambre à réaction a été également simulée à cause de sa forme particulière (tube en T) et sa longueur de 18.7 cm qui implique une grande dispersion dans les points d'émission des raies gamma et dans les points d'entrée de ces rayonnements dans les détecteurs. Toutes les différentes pièces du montage mécaniques qui relie les différents éléments du dispositif expérimental à la chambre à réaction en tenant compte de leurs positions, dimensions et aussi de matériau qui les compose ont été simulés en détails.

La simulation a aussi pris en compte (simulé) un faisceau parallèle et centré sur l'axe de la chambre à réaction dont le diamètre était de l'ordre de 0.3 mm et la gamme d'énergie des rayonnements gamma s'étendait entre 244 et 8000 keV avec un pas de 500 keV.

3.4 - Résultats des mesures d'efficacités

La simulation GEANT normalisés aux données expérimentales en sources a permis de déterminer les efficacités des treize détecteurs utilisés. Pour les efficacités expérimentales qui dépendent de l'activité de la source au moment de calibration, la durée des runs de calibration, les rapports d'embranchements de chaque pics, le temps mort de détection et le nombre de coups totale dans chaque pic, il est possible de calculer l'efficacité totale de chaque détecteurs en fonction de l'énergie selon la formule (2 - 2). Dans ce travail nous nous intéressons à l'efficacité "photopic" (pic plein énergie).

$$\varepsilon_{ph} = \frac{N_{pic}}{N_{mis}} \quad (2 - 2)$$

Où N_{pic} est le nombre de photons détectés dans le pic de pleine énergie par unité de temps, N_{mis} est le nombre total de photons par unité de temps émis par la source dans 4π .

L'efficacité totale absolue du détecteur individuel quant à elle, est définie sous la forme :

$$\varepsilon_{abs} = \frac{N_{dt}}{N_{mis}} \quad (2 - 3)$$

Où N_{dt} est le nombre d'évènements détectés par unité de temps.

Cette simulation a permis de définir les expressions analytiques pour calculer les efficacités pour chaque cristal du germanium en fonction de l'énergie gamma voir la thèse de doctorat de H. Benhabiles-Mezhoud [5]. Ces expressions résultent de l'ajustement quadratique en moindres carrées des calculs GEANT incluant un terme tenant compte de la différence entre simulation GEANT et calculée pour des émissions gamma sur la longueur de la cible et simulation GEANT pour une émission au centre de la cible, cette différence est exprimé au moyen d'un coefficient ajusté. Pour les détecteurs vers l'avant il existe une différence de 40% entre l'efficacité au centre et à l'extrémité de la chambre à réaction : par exemple pour l'énergie de 662 keV, l'efficacité du GFIC au centre de la cible est de l'ordre de $7.7 \cdot 10^{-4}$ alors qu'à l'extrémité amont elle est égale à $3.2 \cdot 10^{-4}$, ceci conduisant à une différence de l'ordre de 10 – 15 % entre émission gamma sur toute la longueur de la cible et émission au centre.

La simulation avec GEANT a conduit à une bonne statistique sur les mesures des événements gamma où les valeurs de l'efficacité obtenues sont de l'ordre de 10^{-4} aux énergies plus élevées ceci a permis d'avoir des temps de mesure moyens de l'ordre de 20 mm par point.

En ce qui concerne les incertitudes sur l'efficacité, il prend en compte l'erreur statistique due au tirage qui est de l'ordre de 1% à 2%, outre à cette incertitude celle due à l'extrapolation des efficacités à haute énergie estimée à 5%. En plus l'incertitude due à la normalisation aux sources calibrées qui est estimée à 3%.

Références bibliographiques

- [1] : J. Gerl et *al.*, Proceedings of the Conference on Physics from Large γ ray Detector Arrays, Berkley, USA, 1994 (LBL 35687, UC 413, 1994) 159.
- [2] : J. Simpson et *al.*, Acta Physica Hungaria, New Series, Heavy Ion Physics 11 (2000) 159.
- [3] : P. J. Nolan, F. A. Beck and D. B. Fossan, Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 44 (1994) 561.
- [4] : D. C. Radford, Nucl. Instr. Meth A **361** (1995) 297.
- [5] : H. Benhabiles-Mezhoud, thèse de doctorat, Université Paris 11, France. 2010.

Chapitre 3:

Données et résultats expérimentaux

1. Introduction

Ce travail est consacré à mesurer les sections efficaces différentielles et totales des raies gamma issues de l'interaction nucléaire du néon avec les protons.

Les spectres de raies gamma enregistrés durant l'expérience, ont été obtenus avec six valeurs d'énergie différentes du faisceau de proton, envoyés sur une cible gazeuse du Néon. L'analyse d'un nombre important de ces spectres permet une bonne mesure de raies gamma produites. En effet, il est difficile a priori, de vérifier la cohérence des mesures, d'où l'intérêt particulier que nous porterons aux distributions angulaires isotropes et celles pour lesquelles des mesures antérieures existent. Nos mesures seront alors comparées à celles disponibles dans les compilations existantes comme celles de Kozlovsky et *al* [1] et les travaux de Dyer et *al* [2], pour certaines raies, il n'existe pas de mesures et donc elles ont été étudiées pour la première fois dans ce travail. Les raies qui nous intéressent sont les plus intenses du noyau ^{20}Ne à savoir ; les raies à 1634 KeV, 2614 KeV et 3332 KeV.

Pour l'analyse des données et donc la détermination des sections efficaces totales, nous commençons d'abord par mesurer le nombre d'évènements $N(\theta, E)$ (les surfaces sous les pics plein énergie de la raie gamma) mesurés par les différents cristaux constituant les détecteurs à des angles entre 30° et 135° et pour différentes énergies incidentes. Celles-ci sont utilisées pour le calcul des sections efficaces différentielles. Ensuite, à partir de ces dernières nous déterminons les distributions angulaires correspondant à les transitions gamma ainsi que les sections efficaces totales. Enfin, nos mesures seront comparées à celles disponibles dans les travaux antérieurs et une synthèse de l'ensemble des résultats sera présentée à la fin du chapitre.

2. Les mesures

Afin de soustraire des spectres les impuretés dues à l'interaction du faisceau avec les feuilles de mylar, nous avons effectué des mesures à vide (sans l'élément cible) pour chacune des énergies des protons.

La cible gazeuse de Ne utilisée dans cette expérience est impure isotopiquement, son épaisseur varie en fonction de l'énergie de projectile et elle a été

calculé pour chaque run (donnée) en utilisant la relation (3 - 3). Celle-ci obtenue en partant de l'équation d'état d'un gaz parfait :

$$PV = nRT \quad (3 - 1)$$

L'introduction des dimensions de la cible (sa longueur L et sa section S) permet de réécrire la relation précédente sous la forme :

$$\frac{n}{S} = \frac{PL}{RT} \quad (3 - 2)$$

Et qui conduit finalement à :

$$N_a(\text{molécule} / \text{cm}^2) = 7.24 \times 10^{18} \frac{LP}{T} \quad (3 - 3)$$

Où L, P et T représentent la longueur de la chambre à réaction exprimée en cm, la pression exprimée en mbar et la température en °K, respectivement.

3. Méthodologie

Dans cette section, nous décrivons les différentes étapes qui mènent aux sections efficaces totales à partir des données recueillies par l'ensemble des détecteurs.

3.1 - Acquisition

Les données brutes collectées par les différents détecteurs durant notre expérience sont restituées par le logiciel d'acquisition NARVAL sous forme de fichiers correspondant chacun aux événements produits par un projectile donné aux différentes énergies incidentes. Les spectres issus de ces fichiers se présentent sous la forme de l'ensemble des nombres de coups enregistrés pour chaque canal (intervalle d'énergie). La calibration en énergie (voire le chapitre2) permet d'avoir des spectres donnant le nombre de coups relatifs à chaque énergie.

3.2 - Soustraction du bruit de fond

L'une des sources du bruit de fond dans un spectre est l'interaction éventuelle de faisceau de proton avec le matériau constituant les parois de la chambre à

réaction, qui est l'aluminium dans cette expérience. En effet à cause d'un certain éclatement du faisceau lors de la traversée de la feuille de mylar de l'entrée de la cible, nous observons des raies gamma dues à l'aluminium sur les spectres comme les raies à 844 et à 1014 KeV.

De même, l'utilisation des feuilles de mylar de composition chimique ($C_{10}H_8O_4$) provoque des interactions supplémentaires de faisceaux de protons avec leurs composants (carbone, hydrogène et l'oxygène) ce qui conduit à une superposition des raies gamma produites. Parmi lesquelles les plus intenses à l'énergie 4438 KeV du ^{12}C (voir figure (3 - 1)) et aux énergies 6130, 6920 et 7120 KeV de ^{16}O . Ceux-ci a nécessité de faire une soustraction de la composante du bruit de fond, en effectuant des mesures à vide (sans cible) puis avec la cible pour chacune des six énergies des protons incidents à savoir 7.84, 9.78, 15, 20, 22.5 et 26.2 MeV. La soustraction se fait à partir du calcul des rapports des charges collectées par la cage de Faraday.

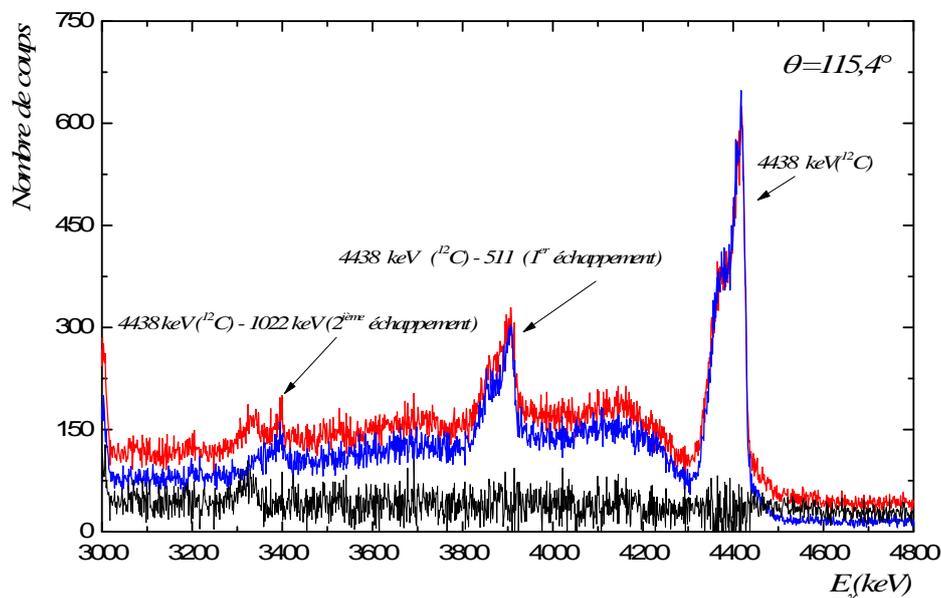


Fig. 3 - 1 : Spectre des raies gamma observé par le détecteur Ge à $\theta_{lab} = 115.4^\circ$ pour des protons à $E_p = 26.2$ MeV sur la cible gazeuse du Néon (Ne), montrant la soustraction du bruit de fond à partir du calcul des rapports de charges collectées par la cage de Faraday. En rouge : le spectre correspondant à la cible de Ne; en bleu : le spectre obtenu à vide; en noir : le spectre final obtenu après soustraction.

3.3 - Calcul de l'aire sous le pic

En plus de la soustraction du bruit de fond qui nous avons vu plus haut, nous ajoutons une soustraction du fond dû essentiellement à la contribution "Compton" de la détection des rayonnements gamma qui induit une composante continue dans les spectres γ . L'estimation de ce bruit de fond se fait en déterminant le fond moyen sur plusieurs canaux au dessus et en dessous de l'énergie de la raie. Un exemple de spectre après calibration en énergie et soustraction du bruit de fond est présenté dans la figure (3 - 2).

D'autre part, à cause de l'élargissement Doppler lié aux effets des distributions angulaires et des corrélations liées aux noyaux de recul (effet important \approx quelques dizaines de KeV). En effet, dû au fait que le noyau cible utilisé est léger et de nature gazeuse, les raies gamma observées sur les spectres n'ont pas une forme gaussienne, la détermination de l'aire sous leurs pics nécessite donc une délimitation manuelle des contours de la surface à calculer. Le niveau du bruit de fond est estimé empiriquement selon une approximation linéaire voir figure (3 - 3).

Après toutes ces soustractions, nous procédons au calcul de l'aire sous le pic à travers le logiciel Origin (OriginPro 8.5.1).

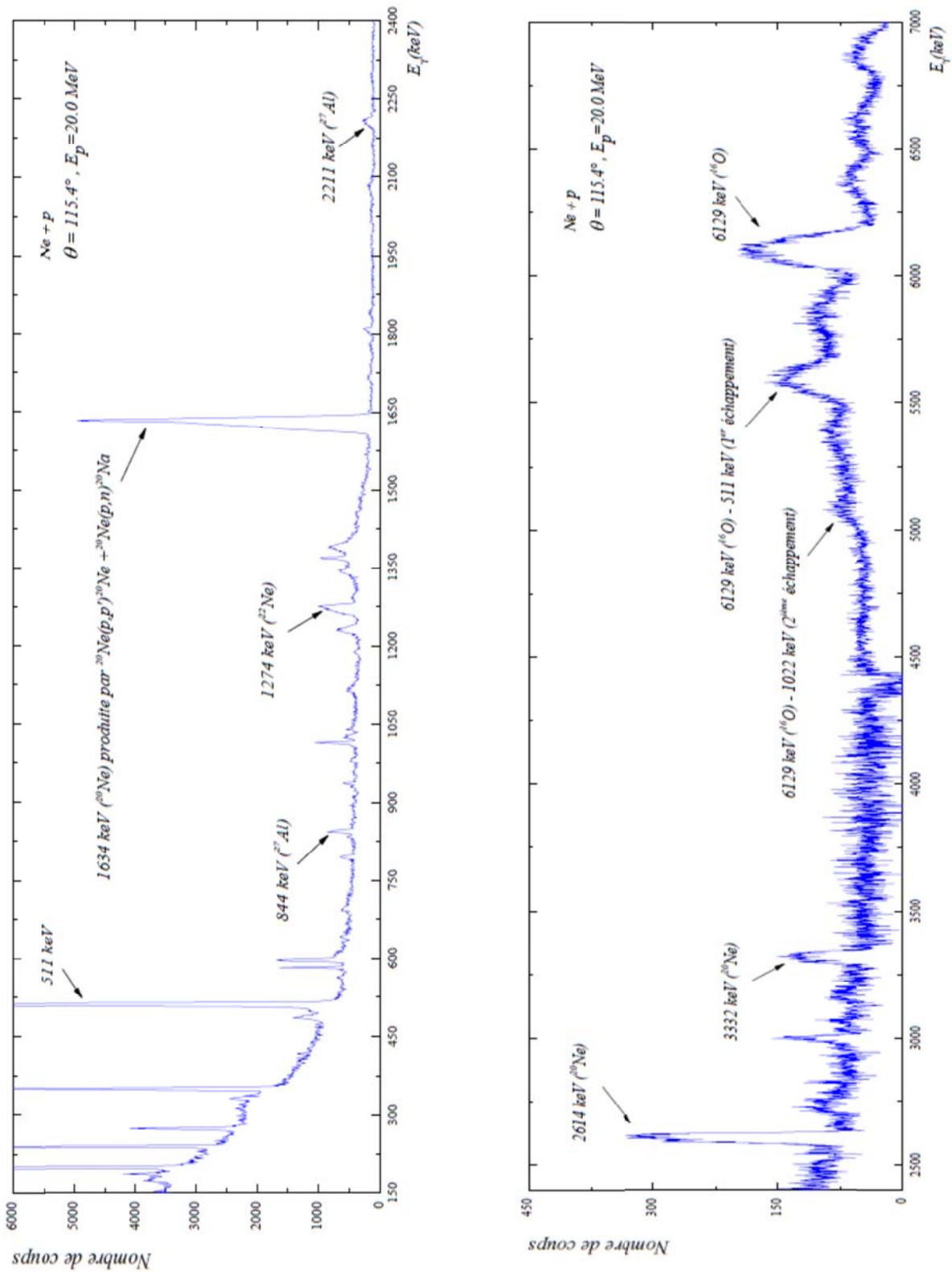


Fig 3 – 2 : Spectre typique du néon Ne bombardé par des proton de 20.0 MeV à $\theta = 115.4^\circ$, obtenu après soustraction du spectre dû au mylar. L'identification des raies intéressantes pour notre étude est indiquée. Pour une meilleure lecture du spectre, le domaine de l'énergie des gammas a été découpé en deux zones (haut et bas de la figure).

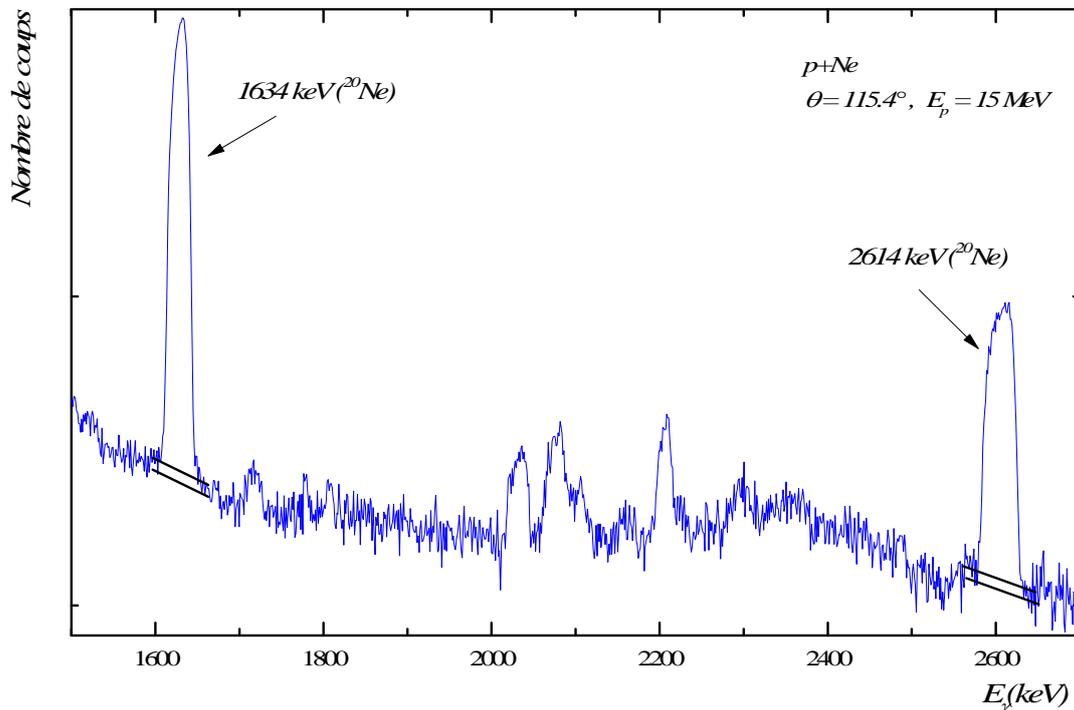


Fig 3 – 3 : Cette figure montre la manière avec laquelle la surface sous le pic et son incertitude sont évaluées en utilisant le logiciel Origin. Les limites en noir correspondent aux valeurs max et min du fond Compton estimées par le manipulateur. Le projectile, la cible et l'angle de détection sont indiqués sur la figure.

3.4 - Calcul des incertitudes sur les surfaces

Nous avons estimé les incertitudes sur le nombre de coups en considérant une aire minimale et une autre maximale pour déterminer l'intervalle de valeurs possibles. En effet, les estimations de surfaces reposent sur notre propre appréciation et avec la multiplication des mesures pour chaque raie nous assurons une bonne estimation des surfaces.

En plus de ce que nous venons de mentionner, nous additionnons quadratiquement les incertitudes statistiques, sachant que ces incertitudes sont généralement négligeables devant celle que nous déterminions ailleurs.

3.5 - Sections efficaces différentielles

Les résultats du calcul des surfaces sous les pics correspondant aux raies gamma représentent le nombre gammas détectés et sont utilisés pour calculer les sections efficaces différentielles par un programme en utilisant la relation suivante:

$$\frac{d\sigma(E, \theta)}{d\Omega} = \frac{N(E, \theta)}{\varepsilon(E) N_c \Phi} 10^{24} \text{ (b / sr)} \quad (3 - 4)$$

On définit :

- $N(E, \theta)$: Nombre de gammas détectés avec une énergie E et à un angle θ .
- $\varepsilon(E)$: L'efficacité absolue de détection du dispositif expérimental.
Implicitement, cette efficacité contient l'angle solide $d\Omega$.
- N_c : Nombre de noyaux cibles par cm^2 .
- Φ : Nombre de projectiles incidents sur la cible.

Rappelons que les valeurs des efficacités des détecteurs sont prédéterminées dans la simulation GEANT et avec des mesures utilisant les sources radioactives (chapitre2).

3.6 - Distributions angulaires

A partir de la variation des sections efficaces différentielles en fonction de l'angle de détection θ pour une énergie donnée on détermine les distributions angulaires correspondant à certaines transitions gamma. À partir de cette définition, il est clair que l'utilisation de treize détecteurs dans cette expérience positionnés à des angles allant de 30° à 135° (ce qui permet la multiplication du nombre d'angles) facilite leur étude. Les trois détecteurs (clover) contenant quatre cristaux chacun, fournissent au total 6 points à cause du fait que ces cristaux sont positionnés au même angle deux à deux de sorte que chaque détecteur fournit deux points au lieu de quatre. Ajoutant à ça, le dernier détecteur qui ne contient qu'un seul cristal, le total des points fournis par l'ensemble de détection est de 7 points dans les courbes représentant ces distributions angulaires.

Théoriquement, on peut schématiser une réaction conduisant à l'émission d'un photon gamma comme décrit par la figure (3 - 4). ℓ_1 et ℓ_2 sont les moments angulaires orbitaux de la particule incidente et la particule sortante, respectivement. L_3 représente la multipolarité du gamma observé.

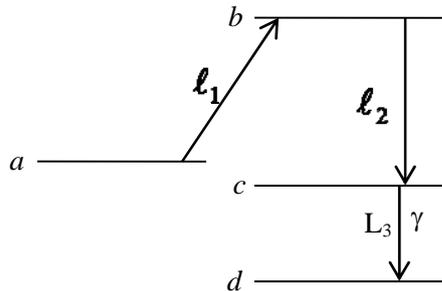


Fig. 3 - 4 : Diagramme des niveaux d'énergie lors d'une réaction nucléaire ($pp'\gamma$).

a , b et c sont les spins des états initial, intermédiaire et final. Dans notre cas, b ne représente pas un seul état J^π donné, mais plutôt un mélange d'états intermédiaires. Ceci implique une multitude de valeurs pour ℓ_1 et ℓ_2 et seul un calcul de nature statistique peut estimer les contributions des ℓ_1 et ℓ_2 à la population des sous-états magnétiques de l'état c et donc à la distribution angulaire des raies gamma.

Finalement, les distributions angulaires des raies gamma peuvent être exprimées comme [3] :

$$W(\theta) = \sum_{k=0}^{k_{\max}} a_k Q_k P_k(\cos(\theta)) \quad (3-5)$$

Où k est un entier pair et k_{\max} un nombre dépendant de la multipolarité de la raie gamma : $k_{\max} = 6$ pour $L_3 = 3$, $k_{\max} = 4$ pour $L_3 = 2$ et $k_{\max} = 2$ pour $L_3 = 1$.

Les valeurs des coefficients a_k sont mesurées à partir d'un ajustement en moindres carrés des paramètres a_k de l'expression (3 - 5) aux valeurs expérimentales $\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_i$ aux différents angles(i). Ceci nous a donc permis la détermination des distributions angulaires correspondant aux interactions étudiées.

En pratique, on utilise des compteurs occupant un volume fini dans l'espace, donc loin d'être parfait du point de vue de la formulation de $W(\theta)$. Cet aspect est exprimé par le facteur d'atténuation qui s'écrit en fonction de l'angle de détection et de la multipolarité comme suit [3] :

$$Q_k = \frac{\int_0^\pi \varepsilon(\theta) P_k(\cos \theta) d(\cos \theta)}{\int_0^\pi \varepsilon(\theta) P_0(\cos \theta) d(\cos \theta)} \quad (3-6)$$

Avec $\varepsilon(\theta)$ est l'efficacité du détecteur en fonction de l'angle θ .

Ces facteurs d'atténuation ont été calculés grâce à des simulations GEANT faite par Mme Benhabiles-Mezhoud, pour chaque multipolarité et chaque angle de cristal du détecteur pour deux valeurs de l'énergie E_γ , voir H. Benhabiles [4].

3.7 - Les sections efficaces totales

Par définition, les sections efficaces totales de production des raies gamma sont obtenues à travers l'intégration sur toute la gamme angulaire des sections efficaces différentielles. Plus précisément, elles sont données par le terme d'ordre zéro dans la relation (3 - 5) à savoir :

$$\sigma = 4\pi a_0 \quad (3-7)$$

Les résultats obtenus des sections efficaces totales seront donné sous forme de figures représentant les fonctions d'excitation, c'est-à-dire les sections efficaces totales en fonction de l'énergie de bombardement. Nos résultats seront comparés lorsque cela est possible, avec ceux déjà existants.

3.8 - Calcul des incertitudes sur les sections efficaces différentielles

L'estimation des barres d'erreurs sur les sections efficaces différentielles mesurées est importante vu son influence sur les résultats de l'ajustement en moindres carrées conduisant aux valeurs des coefficients a_k de la relation (3 - 5).

Dans nos calculs, nous avons considéré deux types d'incertitudes: statistiques et systématiques. Les erreurs statistiques sont utilisées seules pour effectuer l'ajustement qui fournit les valeurs des a_k et leurs barres d'erreurs associées. Les

erreurs systématiques sont ensuite ajoutées quadratiquement à la barre d'erreur du terme a_0 pour fournir la valeur finale de l'incertitude sur la section efficace totale.

Plusieurs erreurs statistiques ou systématiques ont été prises en compte dans le calcul de sections efficaces différentielles. Nous avons considéré comme erreur statistique l'erreur sur les mesures des surfaces des pics des raies gamma, l'erreur sur l'efficacité correspondant à l'extrapolation avec GEANT au-delà des énergies des sources radioactives utilisées. Cette dernière a été estimée à 5%. En plus, l'incertitude due au temps mort électronique, mesuré pour chaque détecteur, qui est de l'ordre de 3%.

En revanche, concernant les erreurs systématiques (c'est-à-dire, se répercutant de la même façon sur les différents angles de mesure), nous avons pris en compte l'erreur sur la charge accumulée estimée à 9%, les erreurs sur les épaisseurs de cibles, estimées à 2%, ainsi que l'erreur sur l'activité de chaque source évaluée à 3%.

4. Présentation des résultats

Dans ce qui suit, nous donnerons les résultats de la mesure des distributions angulaires et des sections efficaces totales obtenues, sous forme des figures représentatives avec nos commentaires et nos discussions sur l'ensemble de résultats.

4.1 - Caractéristiques des raies

D'abord, nous présentons les caractéristiques de l'analyse des raies gamma produites. Sachant que dans notre travail nous nous sommes intéressés à trois raies les plus intenses d'énergie à 1634, 2614 et 3332 keV, correspondant à des transitions dans le noyau de ^{20}Ne . Le schéma des niveaux du ^{20}Ne avec les énergies des raies gamma observées lors des transitions entre ces niveaux est montré dans la figure (3 - 5). Notons que dans ce noyau, la décroissance par émission de particule alpha devient le plus souvent majoritaire à partir du quatrième niveau excité (voir la figure (3 - 5) représentant le schéma des niveaux du ^{20}Ne). Les différentes raies sont discutées individuellement dans ce qui suit:

Raie à 1634 KeV: Cette raie est la plus intense parmi celles émises par le ^{20}Ne , issue de la désexcitation du premier niveau excité de néon vers son niveau fondamental ($2^+ \rightarrow 0^+$). Elle a été déjà étudiée dans le passé [5 - 6].

Pour des énergies de protons $E_p \geq 15$, les raies gamma sont produites dans les deux réactions suivantes : $^{20}\text{Ne}(p, p') ^{20}\text{Ne}$ et $^{20}\text{Ne}(p, n) ^{20}\text{Na}$. La contribution provenant de la voie $^{20}\text{Ne}(p, n) ^{20}\text{Na}$ est importante du fait que le noyau de ^{20}Na est radioactive avec une durée de vie de $\approx 448\text{ms}$ et qu'il décroît avec une probabilité de 79.3% vers le premier état excité du ^{20}Ne et contribue pour quelques pour cents au nombre total des gammas observés [7]. La séparation des deux mécanismes a été impossible et nous a conduits à les prendre en compte de manière conjointe dans nos calculs.

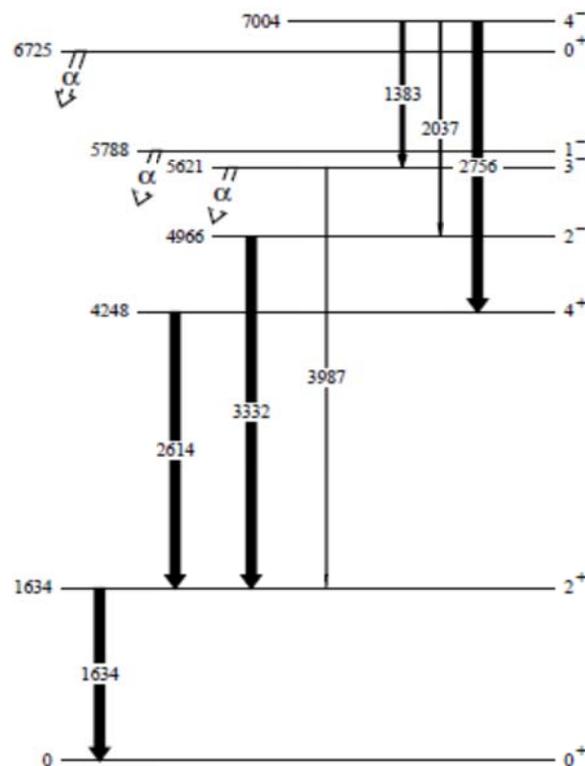


Fig. 3 – 5 : Schéma des niveaux du ^{20}Ne , montrant les différentes décroissances par émission de raies gamma que nous avons étudiées dans ce travail ainsi que la décroissance en particule α à partir du 4^{ème} état excité. Les épaisseurs des raies sont proportionnelles à l'intensité de chaque raie (rapport d'embranchement).

Raie à 2614 et à 3332 KeV : Elles sont produites lors de la désexcitation de ^{20}Ne , des deuxième (4^+) et troisième (2^-) états excités vers le premier état excité (2^+), respectivement. Ces raies sont bien isolées et bien visibles (voir la figure (3 - 5)), ce qui a permis des mesures plus simples.

Vu que la cible utilisée est naturelle, nous avons observé les raies à 1274 et à 2082 *KeV*, produites par l'isotope de ^{22}Ne lorsqu'il se désexcite de son premier état excité vers le niveau fondamental ($2^+ \rightarrow 0^+$) et de deuxième état excité vers le premier état excité ($4^+ \rightarrow 2^+$), respectivement. Ces raies sont isolées et ont déjà été étudiées auparavant.

4.2 - Discussion

Les distributions angulaires décrites ci-dessous représentent les ajustements en termes de polynômes de Legendre relatifs aux trois raies que nous avons étudiées dans ce travail. Nous commençons par considérer les distributions angulaires isotropes qui fournissent un test sur la cohérence des mesures. La figure (3 - 6) représente les distributions angulaires de la raie gamma à 1634 *keV* produite par l'isotope ^{20}Ne . Le bon ajustement des coefficients des polynômes de Legendre aux points représentant les sections efficaces différentielles mesurées est bien justifié par les valeurs de χ^2 comprise entre 0.3 et 0.86. Sur la figure (3 - 7) nous représentons les distributions angulaires de la raie à 2614 *keV*. Comme on peut le voir les sections efficaces sont bien ajustées et le χ^2 varie entre 0.1 et 0.7. Pour la raie à 3332 *keV*, les distributions angulaires sont sur la figure (3 - 8), les valeurs de χ^2 correspondantes sont entre 0.08 et 0.62.

On remarque bien qu'à travers les valeurs de χ^2 , qui y sont indiquées que la qualité de notre estimation des incertitudes pour des barres d'erreurs est correcte. Cette constatation est valable pour toutes les énergies incidentes des protons étudiées dans ce travail.

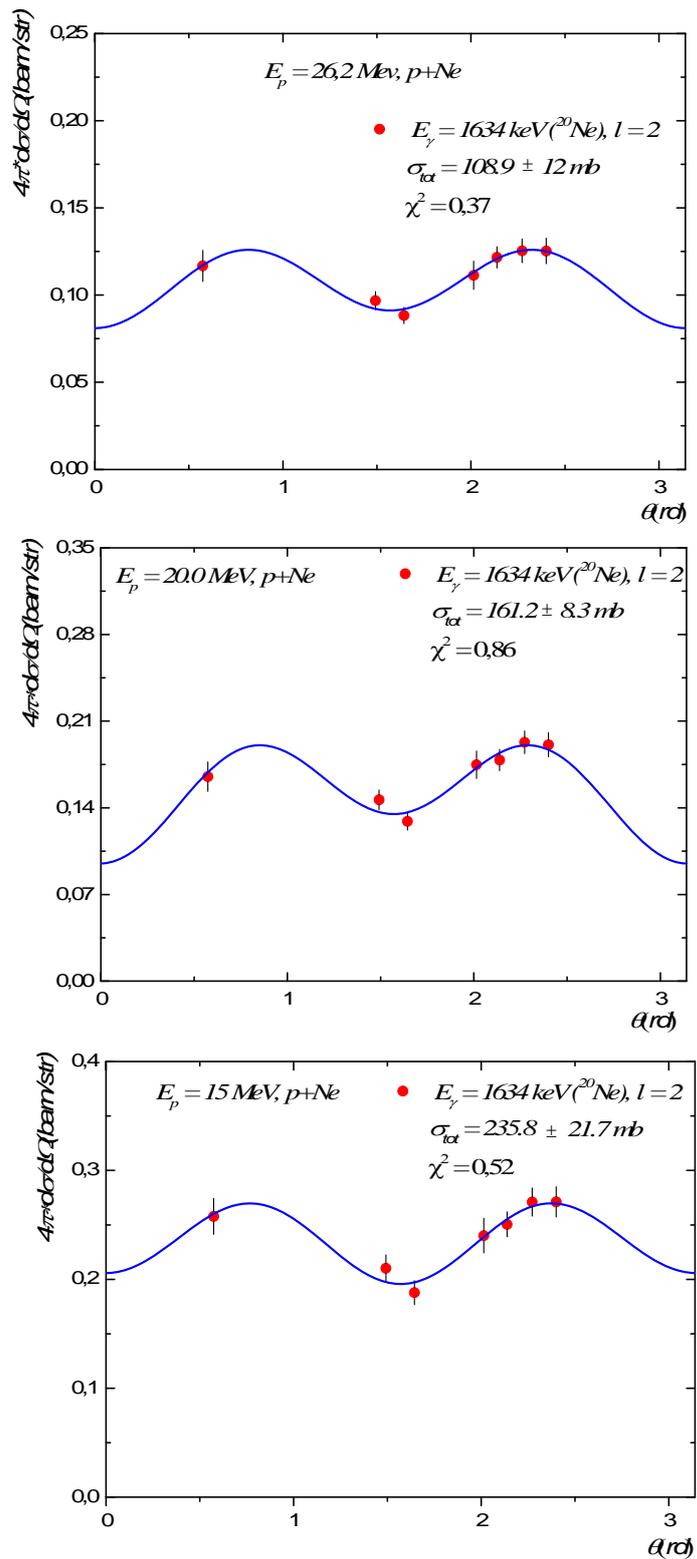


Fig. 3 – 6 : Distributions angulaires de la raie à 1634 keV, obtenues dans le cas du Néon avec le faisceau de protons pour les 3 énergies $E_p = 26.2$, 20 et 15 MeV.

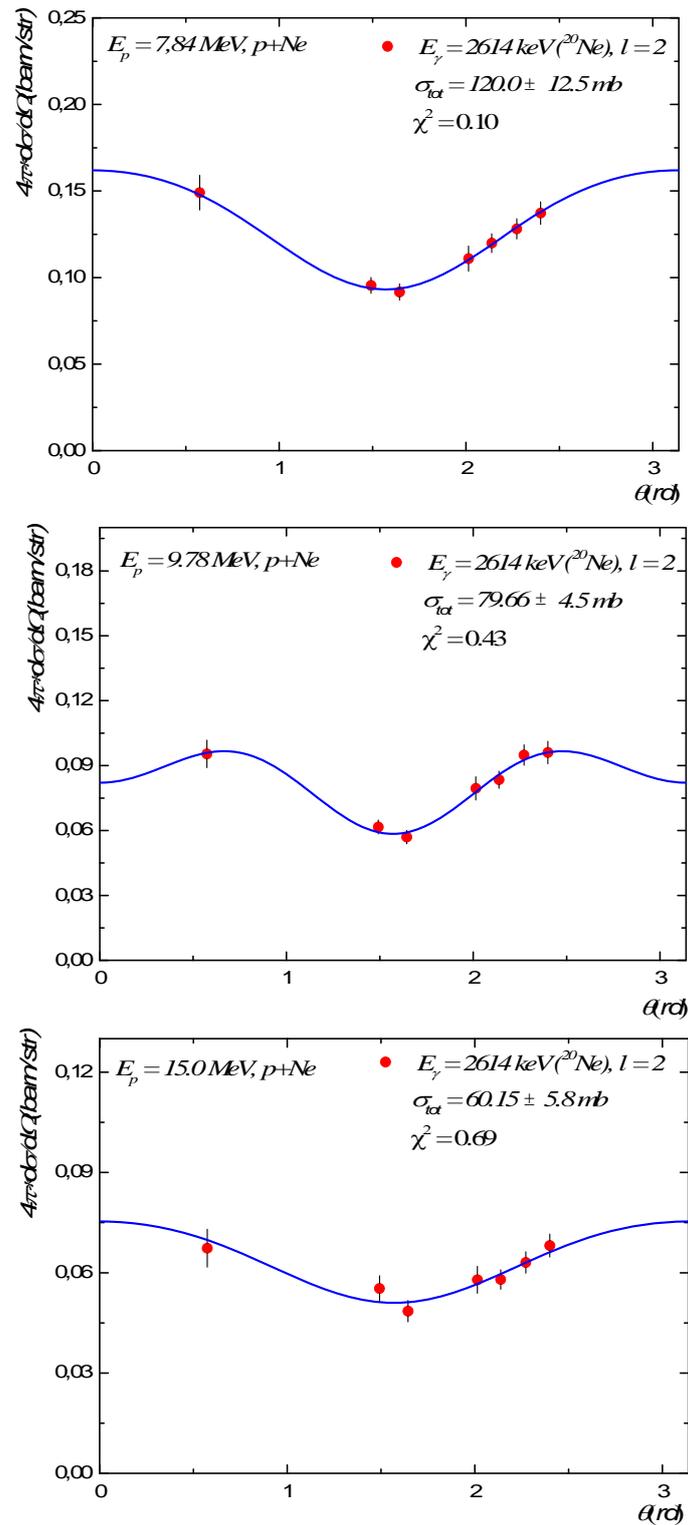


Fig. 3 – 7 : Distributions angulaires de la raie à 2614 keV, obtenues dans le cas du Néon avec le faisceau de protons pour les 3 énergies $E_p = 7.84, 9.78$ et 15 MeV .

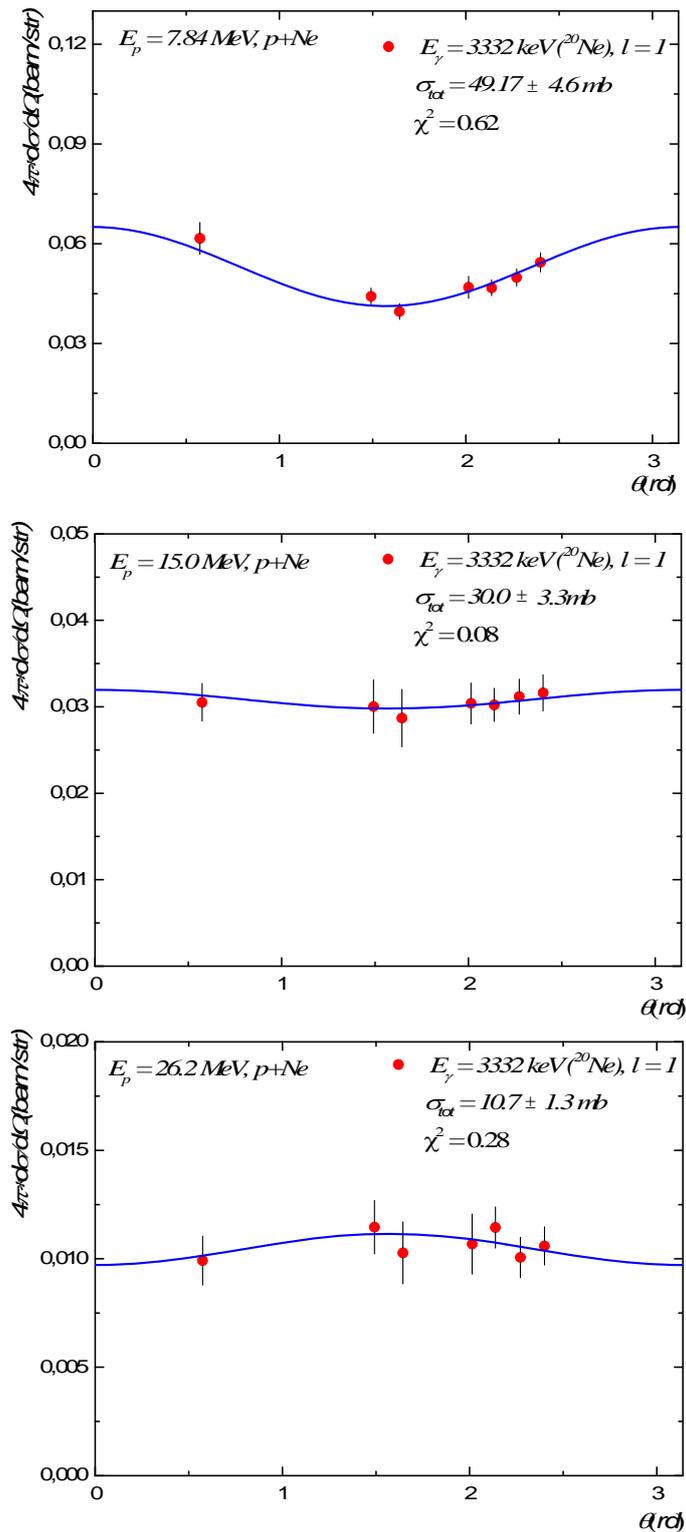


Fig. 3 – 8 : Distributions angulaires de la raie à 3332 keV, obtenues dans le cas du Néon avec le faisceau de protons pour les 3 énergies $E_p = 7.84$, 15.0 et 26.2 MeV.

4.3 - Sections efficaces totales

A partir des différentes distributions angulaires mesurées, nous avons calculé les sections efficaces totales en considérant la relation (3 - 7). Nous présentons ensuite les résultats obtenus sous forme de figures représentant les fonctions d'excitation, c'est-à-dire les sections efficaces totales en fonction de l'énergie de bombardement.

Nos sections efficaces sont par la suite comparées avec celles disponibles dans les travaux de Dyer et al [2] ainsi que par les résultats obtenus par le code de calcul (code de simulation) Talys [8] fait par H. Benhabiles-Mezhoud [4].

Dans un travail de référence Kozlovsky et al [1], ont rassemblé et évalué en 2002 l'ensemble des mesures des sections efficaces de production de raies gamma de différentes énergies obtenues dans les travaux expérimentaux précédents et concernant un certain nombre de noyaux. Ces mesures sont disponibles dans certaines gammes d'énergies et les auteurs ont effectué des extrapolations à plus hautes énergies en faisant l'hypothèse, faute de données expérimentales à l'époque, que les rapports entre les sections efficaces de production des raies gamma produites par le même noyau, sont indépendants de l'énergie. En d'autres termes, ces rapports sont identiques à basses et à hautes énergies, ce qui permet la détermination des sections efficaces à hautes énergies correspondant à une raie donnée lorsqu'il existe des mesures relatives à une autre raie dans les mêmes gammes d'énergies. Prenons l'exemple de la raie 2614 KeV [1] produite par le ^{20}Ne lors de la réaction inélastique $^{20}\text{Ne}(p, p'\gamma_{2614\text{keV}})^{20}\text{Ne}$.

Des mesures ont été faites par Dyer et al [2] sur cette raie à une énergie de protons de 17 MeV et sur la raie à 1634 keV du ^{20}Ne dans une large gamme d'énergie de protons allant de 2 à 24 MeV. Connaissant le rapport des sections efficaces pour ces deux raies à 17 MeV, l'extrapolation des sections efficaces de production de la raie à 2614 keV aux plus hautes énergies devient possible moyennant l'hypothèse précédente. Nous discuterons de ce point dans la suite de notre exposé.

Généralement, nos résultats concordent bien avec les résultats expérimentaux de Dyer et al [2] pour la raie à 1634 KeV, il y a aussi un bon accord avec les calculs fait par le code de réaction nucléaire Talys (travail fait par Mme H .Benhabiles-Mezhoud). Pour les raies à 2614 keV et 3332 keV, il n'y a aucune donnée avec laquelle on peut comparer nos résultats expérimentaux sauf avec les calculs Talys. Ceci étant

une nouvelle mesure et résultat ce qui est très important puisque cela fournit des valeurs supplémentaires qui permettent des extrapolations de productions des raies gamma dans les différents sites astrophysiques. Une différence notable apparaisse dans le cas de la raie à 3332 KeV où nos mesures sont éloignées de celles obtenues par Talys.

La figure (3 - 9) représente les fonctions d'excitation de la raie à 1634 keV. Sur cette figure nous représentons nos mesures et celles de obtenues par Dyer et al [2] dans une large gamme d'énergie allant de 3 à 23 MeV et à celles obtenues lors de la simulation avec le code Talys. Le bon accord entre nos mesures et ceux de Dyer et Talys est clairement observé.

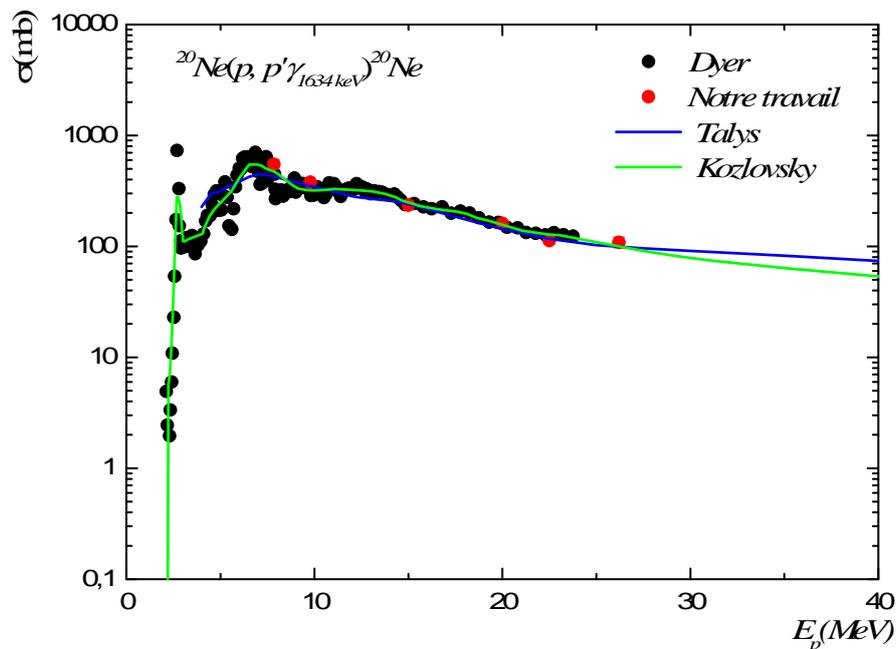


Fig 3 – 9 : Fonctions d'excitation relatives à la raie de 1634 keV émise lors de l'interaction des protons avec le ^{20}Ne . Nous y avons également représenté les points de Dyer et al [2], les calculs Talys et les extrapolations de Kozlovsky et al [1].

Les sections efficaces totales de production correspondant à la raie à 2614 KeV et celle de la raie à 3332 KeV obtenues avec le faisceau de protons sont également données sur la figure (3 - 10), les calculs Talys s'y trouvent aussi sur ces deux figures. Les rapports des sections efficaces de ces deux raies par rapport à celle de la raie 1634 KeV ont été estimés par Kozlovsky et al [1] à 25% et 10%, respectivement, à l'énergie

de protons incidents de 17 MeV. Ils supposent toujours que ces rapports restent constants aux énergies supérieures à 12 MeV. Les rapports obtenus à partir de nos sections efficaces obtenues dans la gamme d'énergie 7.84 - 26.2 MeV, valent 22% et 11% et sont ainsi en accord avec ceux de Kozlovsky et al [1]. Nos résultats montrent que même en deçà de 12 MeV (limite inférieure donnée par Kozlovsky et al), ces rapports restent sensiblement constants.

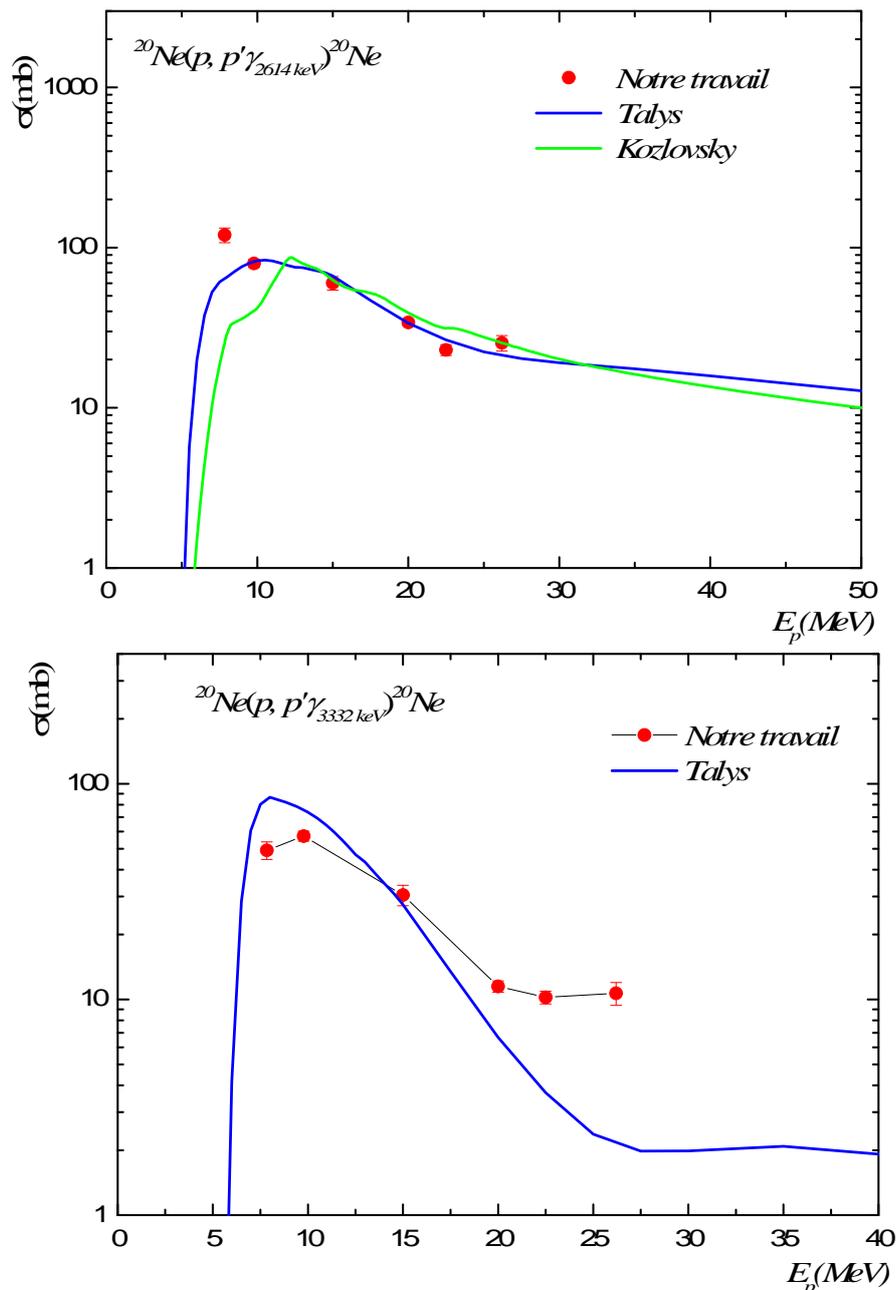


Fig 3 – 10 : Fonctions d'excitation relatives aux raies à 2614 keV et à 3332 émise lors de l'interaction des protons avec le ^{20}Ne . Nos résultats sont comparés à ceux obtenus lors de la simulation avec le code Talys [8] et aux extrapolations de Kozlovsky et al [1].

5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons évalué et présenter les sections efficaces totales de raies gamma produites lors de l'interaction nucléaire de protons avec l'élément abondant dans l'univers qui est le néon (Ne). Ensuite, nous avons comparé nos résultats avec celles disponibles dans la littérature. Les points importants qu'il faudra retenir dans ce qui vient d'être exposé sont en premier lieu l'excellent accord entre les valeurs des sections efficaces déterminées expérimentalement dans notre travail et celles disponibles dans les travaux de Dyer et *al* [2] et le calcul de Kozlovsky [1]. Le second point réside dans la détermination des fonctions d'excitation relatives à des raies, à notre connaissance non étudiées auparavant. Tous ces résultats peuvent être intégrés dans les études théoriques des différents processus de réactions nucléaires menant à la production de raies gamma et permettre ainsi une meilleure estimation théorique dans les zones où les mesures manquent encore.

Le calcul de ces sections efficaces a pour but de trouver des valeurs qui permettent une meilleure détermination de la quantité totale de raies gamma produites à hautes énergies dans les différents sites astrophysiques (comme les éruptions solaires, supernova, milieu interstellaire...) notamment, le flux total de l'émission gamma galactique. Cela permet de remonter aux caractéristiques physiques de ces sites et d'améliorer ainsi notre connaissance de l'univers.

Références bibliographiques

- [1] : B. Kozlovsky, R. J. Murphy and R. Ramaty, *The Astrophysical Journal supplement Series*, **141** (2002) 523.
- [2] : P. Dyer et al, *Phys. Rev. C* **23** (1981) 1865 ; *Phys. Rev. C* **32** (1985) 1873.
- [3] : A.j. Ferguson, '*Angular correlation methods in gamma-ray spectroscopy*', North-holland Publishing company- Amsterdam (1965).
- [4] : H. Benhabiles-Mezhoud, thèse de doctorat, Université Paris 11, France. 2010.
- [5] : A.G. Seamster, A.G. Norman, D.D. Leach & D. Bodansky, *Phys. Rev. C* **29** (1984) 394.
- [6] : H. Rebel et al, *Nucl. Phys. A* **182** (1972) 145.
- [7] : R. Ramaty, B. Kozlovsky & R.E. Lingenfelter, *The Astrophysical Journal Supplement series* **40** (1979) 487.
- [8] : A.J. Koning, S. Hilaire and M. Duijvestijn, *TALYS 1.0 A nuclear reaction program*, 2007.

Conclusion Générale:

Conclusion générale.

Une des questions d'actualité en astrophysique est la détermination du spectre total du rayonnement cosmique à basse énergie. Un moyen d'étude du rayonnement cosmique de basse énergie peut être fourni par la détermination du flux du rayonnement gamma produit lors de l'interaction du rayonnement cosmique avec le milieu interstellaire. Cette détermination passe par une connaissance des sections efficaces totales de production des raies gamma de tous les éléments chimiques qui composent le milieu interstellaire.

Une expérience a été effectuée auprès de l'accélérateur Tandem (INP) d'Orsay afin de mesurer les sections efficaces différentielles et totales de production des raies gamma ainsi que les fonctions d'excitations pour une large gamme d'énergie. Ces raies gamma sont induites par interactions nucléaires de protons avec l'élément *Ne*.

A partir des spectres mesurés, nous avons pu déterminer les sections efficaces différentielles et totales des raies gamma produites par la réaction citée plus haut. Parmi les raies étudiées sont les raies à 1634, 2614 et à 3332 KeV émises par l'isotope ^{20}Ne . Les résultats obtenus ont été comparés à des mesures antérieures ainsi au code de calcul nucléaire Talys. Un bon accord avec ces mesures a été observé, ceci valide nos propres mesures.

Cette étude a permis d'élargir la gamme des énergies étudiées, étendant ainsi les gammes d'extrapolation à plus hautes ou plus basses énergies. Cela conduit au calcul du spectre total de l'émission des raies gamma nucléaires du rayonnement cosmique de basse énergie.