



Rapport de stage JANUS

Etude de la décroissance deux protons du ^{18}Ne

LAURENT Adrien et PINIARD Matthieu

2 au 27 Juillet 2012

Maître de stage : François DE OLIVEIRA SANTOS



Remerciements

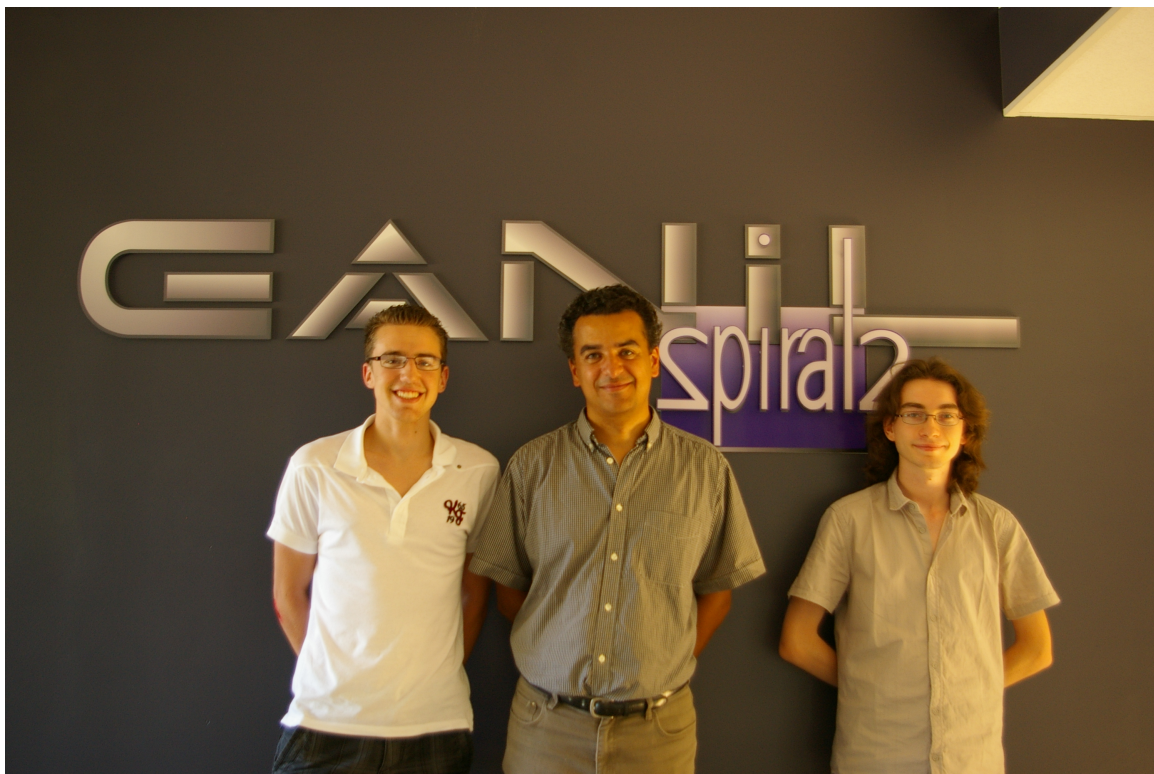
Nous tenons à remercier le GANIL et le LPC d'avoir proposé ce stage très enrichissant et de nous avoir choisi pour y participer.

Merci à tous les conférenciers de l'université d'été et aux ingénieurs qui ont su nous faire comprendre des notions ardues avec pédagogie.

Merci aussi à Michel LION pour sa gentillesse et son aide dans nos recherches, et à Aurore DIJON qui nous a gentiment proposé son aide pour maîtriser Latex.

Nous remercions les autres stagiaires pour l'ambiance du stage, ainsi que Beyhan BASTIN pour son invitation à participer à l'expérience de ses stagiaires.

Enfin, un grand merci à François DE OLIVEIRA SANTOS qui a partagé avec nous sa passion de la recherche en nous faisant participer activement à un de ses projets, et qui nous a donné envie de continuer dans cette voie.



Sommaire

1	Présentation radioactivité deux protons [1]	4
1.1	Historique	4
1.2	Perspectives	4
2	Etude de la décroissance du ^{18}Ne	5
2.1	Expérience et notation	5
2.1.1	Expérience	5
2.1.2	Notations	5
2.2	Calculs	6
2.2.1	Calculs sans Au	6
2.2.2	Calculs avec Au	9
2.3	Résultats	12
	Conclusion	13
A	Code source programme 1	14
B	Code source programme 2 (final)	18
	Bibliographie	25

Chapitre 1

Présentation radioactivité deux protons [1]

1.1 Historique

La radioactivité deux protons (2p) fut prédite, au début des années 1960, par le physicien russe V. I. GOLDANSKII. Il énonça les conditions de cette nouvelle décroissance :

- décroissance depuis un état fondamental (ground state) dont la période (ou demi-vie) est relativement élevée ($T_{1/2} > 10^{-12}s$)
- cet état fondamental interdit la radioactivité un proton (découverte au début des années 1980 au GSI à Darmstadt en Allemagne) car elle est énergétiquement défavorable.

Trois modèles se proposent d'expliquer ce phénomène :

- le modèle « di-proton » (quasi-particule ^2He) : deux protons s'apparient et passent la barrière coulombienne.
- le modèle « à trois corps »
- le modèle « séquentiel »

La radioactivité 2p concerne les noyaux très exotiques, i.e. situés à la drip-line des protons (noyaux riches en protons dont le ou les derniers nucléons ne sont plus liés). Trois de ces noyaux, ^{45}Fe , ^{48}Ni et ^{54}Zn , ont une forte probabilité d'après les modèles théoriques de présenter une radioactivité 2p. Mais, étant très exotiques, ils sont, de ce fait, difficiles à produire en laboratoire et les premiers résultats expérimentaux ont été obtenus au GANIL (Caen) et au GSI (Darmstadt) à la fin des années 1990 et au début des années 2000.

Les premières observations de radioactivité 2p s'effectuèrent avec le ^{45}Fe , en 2000 au Ganil et en 2001 au GSI. D'autres expériences ont été menées en 2004 au GANIL avec les noyaux de ^{48}Ni et ^{54}Zn pour observer cette décroissance 2p.

1.2 Perspectives

A l'instar de la radioactivité un proton qui a permis de mieux connaître la structure des noyaux très exotiques (hors de la vallée de la stabilité, i.e. noyaux riches en protons concernant les radioactivités 1 et 2 protons), la radioactivité deux protons pourra se révéler un formidable outil d'étude de la structure de noyaux encore plus exotiques lorsque les chercheurs auront développé des modèles incluant la structure nucléaire et auront une compréhension suffisante du processus. Pour cela, outre les recherches sur les noyaux cités précédemment, de nouvelles études pourront être lancées sur le ^{59}Ge , le ^{63}Se et le ^{67}Kr .

Chapitre 2

Etude de la décroissance du ^{18}Ne

2.1 Expérience et notation

2.1.1 Expérience

V. I. GOLDANSKII a énoncé le cadre théorique de la radioactivité deux protons. Mais cette radioactivité a été observée avec des noyaux possédant un nombre de masse A petit comparé aux noyaux précédents(exemples ^{19}Mg , ^{18}Ne ,etc.). Ces noyaux présentent une décroissance $2p$ à partir de certains de leurs états excités. Dans ce cadre, nous avons étudié la décroissance du $^{18}\text{Ne}^*$ dans un état excité à 6.15 MeV vers l'état fondamental du ^{16}O [2].

Le but de cette expérience est de mesurer le temps séparant l'émission des deux protons afin de définir le processus de décroissance mis en jeu.

Pour cela nous allons étudier la cinématique de la collision entre un proton et un noyau de ^{18}Ne . Cette collision permettra d'atteindre l'état excité du $^{18}\text{Ne}^*$, à 6.15 MeV, nécessaire à la décroissance deux protons.

2.1.2 Notations

	^{18}Ne	p_1	p_2	p_3	$^{18}\text{Ne}^*$	^{17}F	^{16}O
Masse de la particule	m_{Ne}	m_p	m_p	m_p	m_{Ne}	m_F	m_O
Energie de la particule	E_0	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6
Vitesse de la particule dans le laboratoire	v_0	v_1	v_2	v_3	v_4	$v_5=V_{CM_3}$	v_6
Vitesse de la particule dans le centre de masse 1	$V_0=v_0-V_{CM_1}$ ¹	$V_1=V_{CM_1}$ ¹	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6
Vitesse de la particule dans le centre de masse 2	V_{0_2}	V_{1_2}	V_{2_2}	V_{3_2}	$V_{4_2}=V_{CM_2}$	V_{5_2}	V_{6_2}

¹Par conservation de l'énergie : $\frac{1}{2} * m_{Ne} * (v_0 - v_{CM}) + \frac{1}{2} * m_p * v_{CM} = \frac{1}{2} * m_{Ne} * V_0 + \frac{1}{2} * m_p * V_1$. Puis on identifie.

2.2 Calculs

2.2.1 Calculs sans Au

Conditions initiales :

- référentiel du laboratoire considéré comme galiléen
- le noyau de ^{18}Ne a une vitesse initiale, dans le laboratoire, v_0
- le proton p_1 est immobile

On calcule dans un premier temps l'énergie du proton p_1 , E_1 , dans le centre de masse 1.

On pose V_{CM_1} la vitesse du centre de masse 1.

Par conservation de la quantité de mouvement (définition du centre de masse) :

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{0}$$

On a donc :

$$m_{Ne} * (v_0 - v_{CM_1}) = m_p * v_{CM_1}$$

$$v_{CM_1} = \frac{m_{Ne} * v_0}{m_{Ne} + m_p}$$

$$E_1 = \frac{1}{2} * m_p * v_1^2$$

On projette pour revenir dans le référentiel du laboratoire :

$$E_1 = \frac{1}{2} * m_p * \sqrt{(V_{CM_1} * \cos(\theta_1) + V_{CM_1})^2 + (V_{CM_1} * \sin(\theta_1))^2}^2$$

$$E_1 = \frac{1}{2} * m_p * V_{CM_1}^2 * (2 + 2 * \cos(\theta_1))$$

$$E_1 = m_p * V_{CM_1}^2 * (1 + \cos(\theta_1))$$

$$E_1 = m_p * \frac{m_{Ne}^2 * v_0^2}{(m_{Ne} + m_p)^2} * (1 + \cos(\theta_1))$$

$$E_1 = \frac{m_p * m_{Ne}}{(m_{Ne} + m_p)^2} * (1 + \cos(\theta_1)) * 2 * \frac{1}{2} * m_{Ne} * v_0^2$$

$$E_1 = 2 * \mu * \frac{E_0}{(m_{Ne} + m_p)} * (1 + \cos(\theta_1))$$

Avec $\mu = \frac{m_{Ne} * m_p}{m_{Ne} + m_p}$

Nous allons, de nouveau, calculer l'énergie E_1 du proton p_1 mais en prenant en compte l'énergie d'excitation du ^{18}Ne après la collision.

On calcule dans un premier temps la vitesse de p_1 dans le centre de masse 1.
La conservation de l'énergie donne :

$$\frac{1}{2} * m_{Ne} * (v_0 - V_{CM_1})^2 + \frac{1}{2} * m_p * V_{CM_1}^2 = \frac{1}{2} * m_{Ne} * V_4^2 + \frac{1}{2} * m_p * V_1^2 + E_{x_4}(1)$$

Or :

$$\begin{aligned} v_0 &= \sqrt{\frac{2 * E_0}{m_{Ne}}} \\ v_0 &= \frac{\sqrt{2 * m_{Ne} * E_0}}{m_{Ne}} \\ V_{CM_1} &= \frac{m_{Ne} * \sqrt{2 * m_{Ne} * E_0}}{m_{Ne} * (m_{Ne} + m - p)} \\ V_{CM_1} &= \frac{\sqrt{2 * m_{Ne} * E_0}}{(m_{Ne} + m - p)} \\ v_0 - V_{CM_1} &= \frac{\sqrt{2 * m_{Ne} * E_0} * (m_{Ne} + m_p - m_{Ne})}{m_{Ne} * (m_{Ne} + m_p)} \\ v_0 - V_{CM_1} &= \frac{m_p * \sqrt{2 * m_{Ne} * E_0}}{m_{Ne} * (m_{Ne} + m_p)} \\ (v_0 - V_{CM_1})^2 &= \frac{2 * m_p^2 * E_0}{m_{Ne} * (m_{Ne} + m_p)^2} \end{aligned}$$

On reporte dans (1) :

$$\begin{aligned} \frac{m_p * (m_{Ne} + m - p) * E_0}{(m_{Ne} + m - p)^2} - E_{x_5} &= \frac{1}{2} * m_{Ne} * V_0^2 + \frac{1}{2} * m_p * V_1^2 \\ \frac{m_p * E_0}{(m_{Ne} + m - p)} - E_{x_4} &= \frac{1}{2} * m_{Ne} * V_0^2 + \frac{1}{2} * m_p * V_1^2(2) \end{aligned}$$

Conservation de la quantité de mouvement :

$$\begin{aligned} m_{Ne} * V_4 &= m_p * V_1 \\ V_4 &= \frac{m_p * V_1}{m_{Ne}} \end{aligned}$$

On reporte dans (2) :

$$\begin{aligned} \frac{m_p * E_0}{(m_{Ne} + m_p)} - E_{x_4} &= \frac{1}{2} * m_{Ne} * \frac{m_p^2 * V_1^2}{m_{Ne}^2} + \frac{1}{2} * m_p * V_1^2 \\ \frac{m_p * E_0}{(m_{Ne} + m_p)} - E_{x_4} &= \frac{m_p^2 * V_1^2}{m_{Ne}} + \frac{1}{2} * m_p * V_1^2 \\ \frac{m_p * E_0}{(m_{Ne} + m_p)} - E_{x_4} &= V_1^2 * \left(\frac{1}{2} * \frac{m_p}{m_{Ne}} * (m_p + m_{Ne}) \right) \\ V_1^2 &= \frac{2 * m_{Ne} * E_0}{(m_{Ne} + m_p)^2} - \frac{2 * m_{Ne} * E_{x_4}}{m_p * (m_{Ne} + m_p)} \\ V_1 &= \sqrt{\frac{2 * m_{Ne} * E_0}{(m_{Ne} + m_p)^2} - \frac{2 * m_{Ne} * E_{x_4}}{m_p * (m_{Ne} + m_p)}} \end{aligned}$$

Dans le référentiel du laboratoire :

$$E_1 = \frac{1}{2} * m_p * v_1^2$$

$$E_1 = \frac{1}{2} * m_p * ((V_1 * \cos(\theta_1) + V_{CM})^2 + (V_1 * \sin(\theta_1))^2)$$

Calcul de l'énergie E_4 :

$$E_4 = \frac{1}{2} * m_{Ne} * v_4^2$$

$$E_4 = \frac{1}{2} * m_{Ne} * ((V_{CM} - V_4 * \cos(\theta_1))^2 + (-V_4 * \sin(\theta_1))^2)$$

Or, par conservation de la quantité de mouvement :

$$m_{Ne} * V_4 = m_p * V_1$$

$$V_4 = \frac{m_p}{m_{Ne}} * V_1$$

On projette pour revenir dans le référentiel du laboratoire :

$$E_4 = \frac{1}{2} * m_{Ne} * ((V_{CM} - \frac{m_p}{m_{Ne}} * V_1 * \cos(\theta_1))^2 + (-\frac{m_p}{m_{Ne}} * V_1 * \sin(\theta_1))^2)$$

Calcul de l'énergie du proton émis par $^{18}\text{Ne}^*$:

Dans le centre de masse du $^{18}\text{Ne}^*$ (centre de masse 2, avec $V_{CM_2} = V_4$) :

- par conservation de la quantité de mouvement :

$$m_F * V_{5_2} = m_p * V_{2_2}$$

$$V_{5_2} = \frac{m_p * V_{2_2}}{m_F}$$

- par conservation de l'énergie :

$$Ex_4 - 3.92 = \frac{1}{2} * m_p * V_{2_2}^2 + \frac{1}{2} * m_F * V_{5_2}^2 + Ex_5$$

$$Ex_4 - Ex_5 - 3.92 = \frac{1}{2} * V_{2_2}^2 * (m_p + \frac{m_p^2}{m_F})$$

$$V_{2_2}^2 = \frac{2 * m_F * (Ex_4 - Ex_5 - 3.92)}{m_p * (m_p + m_F)}$$

On projette :

$$V_2^2 = V_{2_2}^2 + 2 * V_{2_2} * V_{CM_2} * \cos(\theta_2) + V_{CM_2}^2$$

Dans le référentiel du laboratoire :

$$E_2 = \frac{1}{2} * m_p * v_2^2$$

$$E_2 = \frac{1}{2} * m_p * ((V_2 * \cos(\theta_1) + V_{CM_1})^2 + (V_2 * \sin(\theta_1))^2)$$

2.2.2 Calculs avec Au

Pourquoi rajouter de l'or ?

En rajoutant de l'or, le neon va freiner puis émettre un proton d'une certaine énergie, intrinsèquement liée à l'énergie du néon au moment de la désintégration. Le proton freine dans la cible et sort pour toucher les détecteurs. Ainsi on peut remonter facilement à l'énergie du proton à la désintégration, puis à l'énergie qu'avait le néon quand il l'a émis et enfin au temps où a été émis ce proton. On peut donc mesurer la demi-vie du néon, la moyenne des temps pour lesquels il émet un (ou deux) protons.

Pourquoi de l'or et pas un autre élément ?

Le but est que le freinage soit assez efficace pour qu'il en ressorte des temps mesurables et précis. Ainsi l'or est un matériau idéal car il est dense. Mais on aurait pu prendre un matériau aussi dense, comme le plomb.

Approximation

Dans le vide, l'énergie des particules était conservée ; maintenant elles "freinent". On a donc, avec l'aide des tables de SRIM, approximé une constante de freinage pour les protons, le néon et le fluor. Nous avons fait une moyenne de toutes les énergies perdues par micromètre en fonction de l'énergie incidente. On a donc trois constantes :

$$Kp = 0.022 MeV.\mu m^{-1}$$

$$Kn = 4.3 MeV.\mu m^{-1}$$

$$Kf = 3 MeV.\mu m^{-1}$$

Changement de notation

Auparavant, on avait défini θ_2 comme l'angle entre le proton et la direction du néon dans le deuxième centre de masse, lui-même inclu dans le premier. Cela n'est plus possible à cause de notre approximation : le centre de masse 1 n'existe que pendant la collision. Juste après les relations ne marchent plus car les vitesses ne varient pas de la même manière. Ainsi, on définit θ_2 comme l'angle dans le deuxième centre de masse (non inclus dans le premier) entre le proton et la direction du néon. De même, on définit θ_3 pour la deuxième désintégration comme l'angle dans le troisième centre de masse entre le proton et la direction du fluor, comme on peut le voir sur la figure 2.1.

Un problème se pose : la direction des protons et autres particules n'est pas forcément selon l'axe des abscisses, ainsi on ne peut pas se contenter de leur enlever une fois la constante de freinage pour chaque micromètre parcouru sur l'axe des abscisses. Il y a nécessité de définir les angles θ_{lab} 1, 2 et 3. La fonction « atan » est alors particulièrement utile car elle s'étend sur tout \mathbb{R} . On a donc des formules de ce type pour revenir dans le laboratoire :

$$\theta_{lab_1} = atan\left(\frac{V1 * \sin(\theta_1)}{V1 * \cos(\theta_1) + V_{cm1}}\right)$$

Après il suffit de sommer les angles pour les orienter par rapport à l'axe des abscisses.

Par exemple :

$$\theta_{lab_2} = \theta_{lab_1} + atan\frac{V2 * \sin(\theta_2)}{V2 * \cos(\theta_2) + V_{cm2}}$$

On suppose en effet que la trajectoire de chaque particule est rectiligne, étant donné son énergie. Ainsi on peut calculer de bonnes approximations.

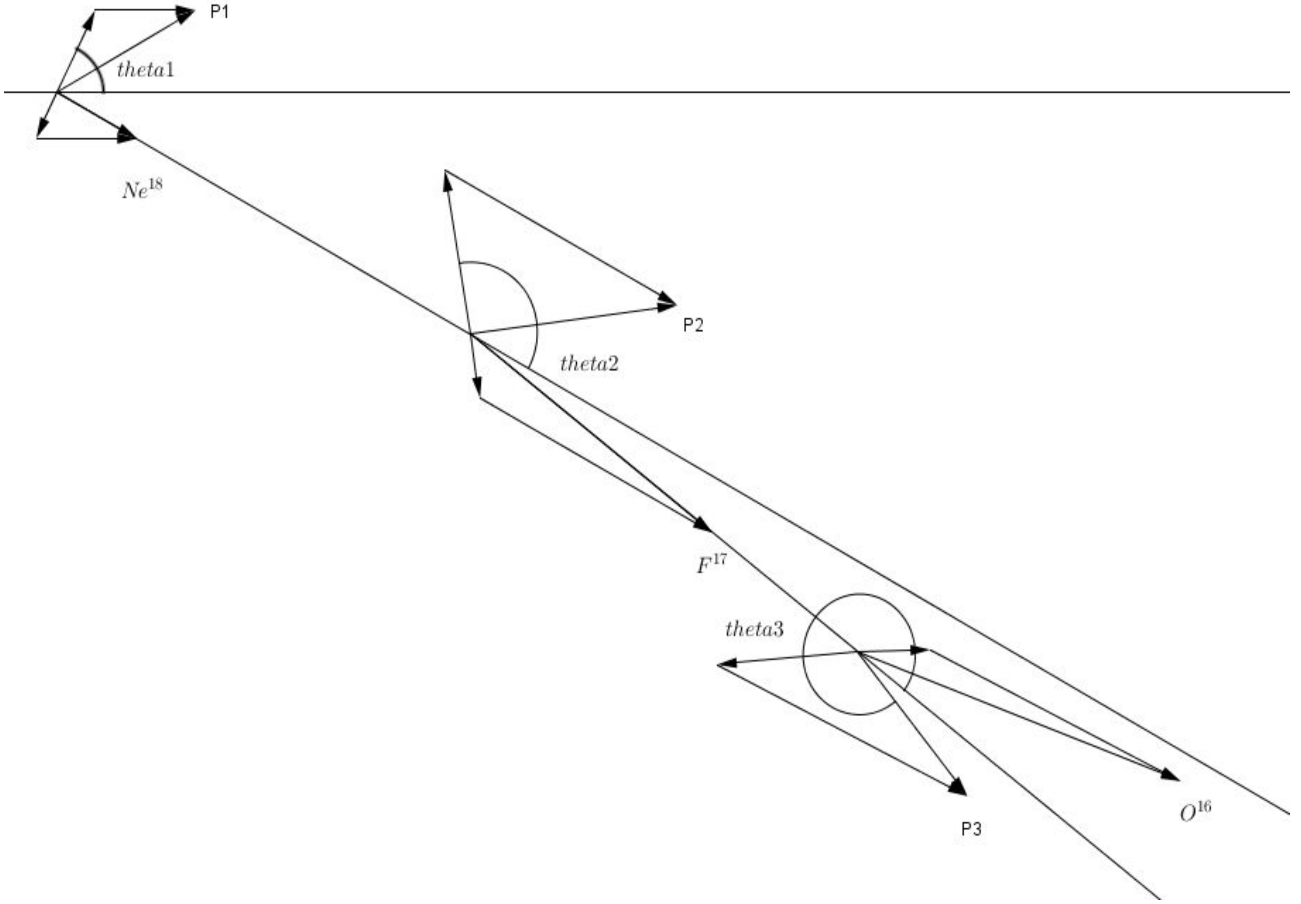


FIGURE 2.1 – Schéma de l'expérience

Des conditions

Au début, on précise quelques conditions sur les énergies. Pour V1 on a :

$$V1 = \sqrt{\frac{\frac{m_{Ne}^2 * (v0 - V_{CM1})^2}{m_p} + m_{Ne} * V_{CM1}^2 - 2 * \frac{m_{Ne} * Ex4}{m_p}}{m_{Ne} + m_p}}$$

ce qui implique

$$Ex4 \leq \frac{m_p * E0}{m_p + m_n}.$$

Ensuite on a

$$Ex5 \leq Ex4 - 3.92$$

et

$$Ex6 \leq Ex5 - 0.6$$

qui permettent que les calculs de V2 et V3 ne renvoient pas d'erreurs.

Du vide

Il y a une certaine épaisseur de vide entre le plastique et l'or. Elle permet de moduler la gamme de détection de temps des protons. Cependant, la désintégration peut avoir lieu dans le vide.

Structure

Soient i l'épaisseur parcourue jusqu'à la première désintégration, et j l'épaisseur parcourue entre la première et la deuxième désintégration (initialisées à 0), et soient epaisseur_vide et epaisseur_or les épaisseurs respectives du vide et de l'or. Les calculs restent les mêmes que précédemment sauf que le second centre de masse n'est plus inclus dans le premier, ce qui enlève juste une projection.

```
Si Ex4>=3.92
  Tant que (i<=epaisseur_vide)
    Faire les calculs et afficher résultats
    Si Ex5>=0.6
      j=0
      Tant que (j+i<=epaisseur_vide)
        Faire les calculs et afficher résultats
        j=j+1
      Fin Tant que
      Tant que (j+i<=epaisseur_or+epaisseur_vide ET
        E5-Kf*(i+j-epaisseur_vide)/cos(thetalab5)-Ex5>=0)
        Faire les calculs et afficher résultats
        j=j+1
      Fin Tant que
    Fin Si
    i=i+1
  Fin Tant que
  Tant que (i<=epaisseur_or+epaisseur_vide ET
    E4-Kn*(i-epaisseur_vide)/cos(thetalab4)-Ex4>=0)
    Faire les calculs et afficher résultats
    Si Ex5>=0.6
      j=0
      Tant que (j+i<=epaisseur_or+epaisseur_vide ET
        E5-Kf*j/cos(thetalab5)-Ex5>=0)
        Faire les calculs et afficher résultats
        j=j+1
      Fin Tant que
    Fin Si
    i=i+1
  Fin Tant que
Sinon
  Tant que (i<=epaisseur_vide)
    Faire les calculs et afficher résultats
    i=i+1
  Fin Tant que
  i=1
  Tant que (i<=epaisseur_or ET E4-Kn*i/cos(thetalab4)-Ex4>=0)
    Faire les calculs et afficher résultats
    i=i+1
  Fin Tant que
Fin Si
```

2.3 Résultats

Nous avons simulé grâce à notre programme les énergies des protons 2 et 3 à la sortie de l'or. Les valeurs entrées sont :

- $E_0=180$ MeV
- $E_{x4}=6.15$ MeV
- $E_{x5}=1$ MeV et $E_{x6}=0$ MeV (courbes bleues)
- $E_{x5}=0$ MeV (courbe orange)
- $\theta_1=\theta_2=\theta_3=0$
- épaisseur vide= $10\text{ }\mu\text{m}$
- épaisseur or= $50\text{ }\mu\text{m}$

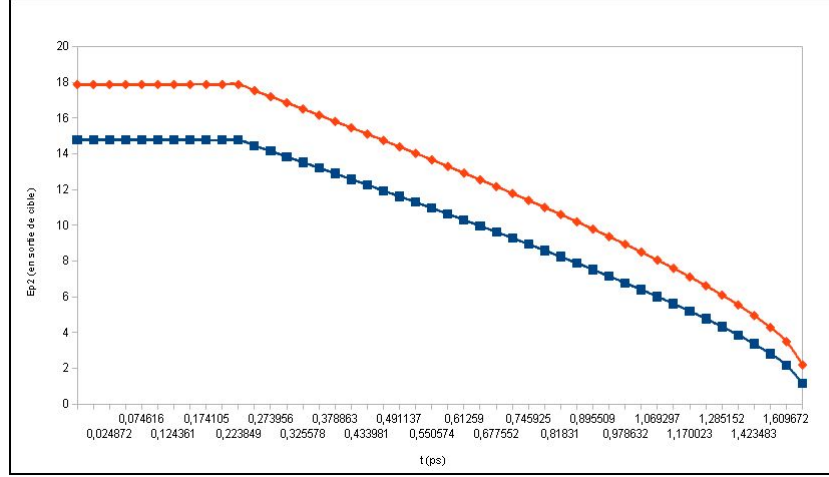


FIGURE 2.2 – Simulation de l'énergie du proton 2 en sortie d'Au en fonction de son temps d'émission

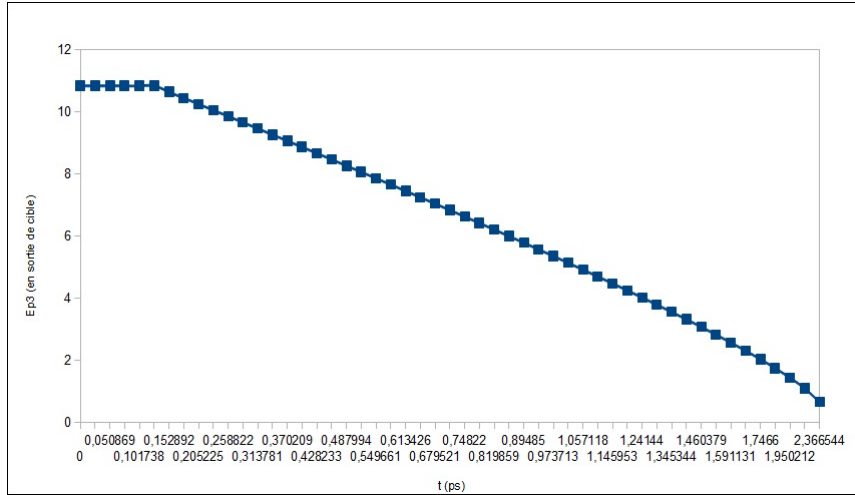


FIGURE 2.3 – Simulation de l'énergie du proton 3 en sortie d'Au en fonction de son temps d'émission

Ainsi, pour des données entrées fixes, on peut associer à chaque énergie de proton, un et un seul temps. Celui-ci est de l'ordre de la picoseconde. Dans le cadre d'une expérience, on pourra identifier un temps avec une énergie et voir l'écart de temps entre l'émission des protons.

Conclusion

L'étude de la cinématique de la collision, entre un noyau de ^{18}Ne et un proton, nous a permis de donner, grâce à notre programme, une gamme des énergies des protons en sortie de cible. Nous en déduisons un ordre de grandeur (picoseconde) des temps auxquels les deux protons sont émis. Une expérience future mesurera, très précisément, ces énergies pour remonter aux temps d'émission. Ces résultats pourront, dans un premier temps, valider la décroissance des deux protons du ^{18}Ne à partir d'un état excité par un ou des processus d'émission. C'est à dire :

- émission d'une quasi-particule (diproton), ^2He
- émission de deux protons successivement (émission séquentielle)
- émission simultanée de deux protons indépendants

Cependant, si on détecte l'émission d'un seul proton alors cela pourrait révéler l'existence d'un second proton piégé qui ne peut pas passer la barrière coulombienne. Dans un dernier temps, l'étude de la radioactivité du $^{18}\text{Ne}^*$ pourrait infirmer la loi de décroissance exponentielle.

Annexe A

Code source programme 1

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>

double Energieproton1(double E0, double Ex4, double theta1)
{
    double mNe=18,mp=1.007276,E1,V1,Vcm,pi=3.14159265;

    V1=sqrt(2*mNe*E0/(pow(mNe+mp,2))-2*mNe*Ex4/(mp*(mNe+mp)));

    Vcm= sqrt(2*mNe*E0)/(mNe+mp);

    E1=0.5*mp*(pow(V1*cos(theta1*pi/180)+Vcm,2)+pow(V1*sin(theta1*pi/180),2));

    return E1;
}

double Energieproton2(double E0, double Ex4,double Ex5, double theta1, double theta2)
{
    double mNe=18,mF=17,mp=1.007276,E2,v0,v2,V1,V2,V2_2,Vcm,Vcm2,vNe,pi=3.14159265;

    v0=sqrt(2*E0/mNe); /* vitesse initiale du Ne dans le LAB */
```

```

/* vitesse du proton 1 dans le centre de masse 1 */
V1=sqrt(2*mNe*E0/pow(mNe+mp,2)-2*mNe*Ex4/(mp*(mNe+mp)));

Vcm=(sqrt(2*mNe*E0)/(mNe+mp)); /* vitesse du centre de masse 1 */

/* vitesse nu noyau incident après collision dans le LAB*/
vNe=sqrt((mp/(mp+mNe))*(pow(v0-Vcm,2)-2*Ex4/mNe+mp*pow(Vcm,2)/mNe));

Vcm2=vNe; /*vitesse du centre de masse 2*/

/* vitesse du proton 2 dans le centre de masse 2 */
V2_2=sqrt((2*(Ex4-Ex5-3.92)*mF)/(mp*(mF+mp)));

/* vitesse du proton 2 dans le centre de masse 1 */
V2=sqrt(pow(V2_2,2)-2*Vcm2*V2_2*cos(theta2*pi/180)+pow(Vcm2,2));

E2=0.5*mp*(pow(V2*cos(theta1*pi/180)+Vcm,2)+pow(V2*sin(theta1*pi/180),2)); /* énergie du proton 2 */

return E2;
}

double Energienoyauprescollision(double E0, double Ex4, double theta1)
{
double mNe=18,mp=1.007276,E4,v0,vNe,V1,Vcm,pi=3.14159265;

v0=sqrt(2*E0/mNe); /* vitesse initiale du Ne dans le LAB */

Vcm= sqrt(2*mNe*E0)/(mNe+mp);

/* vitesse nu noyau incident après collision dans le LAB*/
vNe=sqrt((mp/(mp+mNe))*(pow(v0-Vcm,2)-2*Ex4/mNe+mp*pow(Vcm,2)/mNe));

E4=0.5*mNe*(pow(Vcm-vNe*cos(theta1*pi/180),2)+pow(-vNe*sin(theta1*pi/180),2))+Ex4;

```

```

return E4;
}

double Angleverif(double E0, double Ex4, double theta1 )
{
double mNe=18,mp=1.007276,Angle,V1,Vcm,pi=3.14159265;

/* vistesse du proton 1 dans le centre de masse 1*/
V1=sqrt(2*mNe*E0/pow(mNe+mp,2)-2*mNe*Ex4/(mp*(mNe+mp)));
Vcm=(sqrt(2*mNe*E0)/(mNe+mp)); /* vistesse du centre de masse 1 */

Angle=(180/pi)*atan(V1*sin(theta1*pi/180)/(V1*cos(theta1*pi/180)+Vcm));

return Angle;
}

int main()
{
int recommencer=1;
double E0, Ex4,Ex5, theta1, theta2;
while(recommencer==1)
{
printf("Entrez l'energie initiale du noyau de 18Ne (en MeV):\n E0=");
scanf("%lf", &E0);

printf("Entrez l'energie de l'etat excite de 18Ne (en MeV):\n Ex4=");
scanf("%lf", &Ex4);

printf("Entrez l'energie de l'etat excite de 17F (en MeV) :\n Ex5=");
scanf("%lf", &Ex5);

printf("Entrez l'angle dans le centre de masse (en degre):\n theta1= ");
scanf("%lf", &theta1);
}
}

```



```

printf("Entrez l'angle dans le centre de masse 2 (en degre):\n theta2= ");
scanf("%lf", &theta2);

printf("L'Energie du proton 1 est : E1=%f MeV \n", Energieproton1(E0, Ex4, theta1));

printf("L'Energie du proton 2 est : E2=%f MeV \n", Energieproton2(E0, Ex4, Ex5, theta1, theta2));

printf("L'Energie du noyau de 18Ne apres collision est : E3=%f MeV \n", Energienoyauaprescollision(E0, Ex4, theta1));

printf("L'Energie du noyau de 17F est : E5=%f MeV \n",Energienoyauaprescollision(E0, Ex4, theta1)
-Energieproton2(E0, Ex4, Ex5, theta1, theta2)-3.92);
/* défaut d'énergie de 3.92 */
printf("Angle pour verification avec LISE++: %f\n", Angleverif(E0, Ex4, theta1));

printf("Voulez-vous recommencez? oui:1 non:0 :\n");
scanf("%d", &recommencer);
}
return 0;
}

```

Annexe B

Code source programme 2 (final)

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>

int main()
{
    int epaisseur_vide=0, epaisseur_or=0, i=0, j=0;
    double E0=0, E1=0, E2=0, E3=0, E4=0, E5=0, E6=0, Ex4=0, Ex5=0, Ex6=0,
        /*énergies initiale, du proton 1, du proton 2, du neon, du fluor et leurs energies d'excitation*/
        mn=18.0057, mp=1.0078, mf=17.0021, mo=15.995,
        /*masses du neon, du proton, du fluor et de l'oxygene (en uma)*/
        theta1=0, theta2=0, theta3=0, theta1_rad=0, theta2_rad=0, theta3_rad,
        /*angles dans le centre de masse 1 et 2*/
        v0=0, v1=0, v2=0, v3=0, Vcm1=0, Vcm2=0, Vcm3=0, pi=3.141592654, V1=0, V2=0, V3=0, V4=0, V5=0, V6=0, t4=0, t5=0,
        thetalab1=0, thetalab2=0, thetalab3=0, thetalab4=0, thetalab5=0, thetalab6=0,
        /*angles pris par les particules dans le laboratoire*/
        Kn=4.3, Kf=3, Kp=0.022;
        /*constantes de "freinage" de l'énergie par micron*/

    FILE* fichier = NULL;

    fichier = fopen("Resultats.txt", "w+");
```

```

printf(" ==Calcul des energies de protons suite a une collision avec un ion de neon==\n
==puis a deux desintegrations successives de ce neon==\n");
fprintf(fichier, " ==Calcul des energies de protons suite a une collision avec un ion de neon==\n
==puis a deux desintegrations successives de ce neon==\n\n");
fprintf(fichier, "donnees :\n\n");
printf("\nEntrez l'energie initiale du neon (en Mev)\n E0=");
scanf("%lf",&E0);
fprintf(fichier, "energie initiale du neon (en Mev) : %f\n", E0);
printf("\nEntrez l'energie d'excitation du neon apres la collision\nAttention : il faut que Ex4 <= %f\n
(superieure a 3.92 pour une desintegration)\n Ex4=", mp/(mp+mn)*E0);
scanf("%lf",&Ex4);
fprintf(fichier, "energie d'excitation du neon (en Mev) : %f\n", Ex4);
printf("\nEntrez l'angle dans le premier centre de masse que prendra le proton\n
apres la collision (entre -180 et 180 degres)\n theta1=");
scanf("%lf",&theta1);
fprintf(fichier, "theta1 : %f\n", theta1);

if (Ex4>3.92)
{printf("\nEntrez l'energie d'excitation du fluor a sa creation\nAttention : il faut que Ex5 <= %f\n
(superieure a 0.6 pour une desintegration)\n Ex5=", Ex4-3.92);
scanf("%lf",&Ex5);
fprintf(fichier, "energie d'excitation du fluor (en Mev) : %f\n", Ex5);

printf("\nEntrez l'angle dans le deuxieme centre de masse que prendra le proton par\n
rapport a la direction du neon (apres la collision) (entre -180 et 180 degres)\n theta2=");
scanf("%lf",&theta2);
fprintf(fichier, "theta2 : %f\n", theta2);

if (Ex5>0.6)
{printf("\nEntrez l'energie d'excitation de l'oxygene a sa creation\n
Attention : il faut que Ex6 <= %f\n Ex6=", Ex5-0.6);
scanf("%lf",&Ex6);
fprintf(fichier, "energie d'excitation de l'oxygene (en Mev) : %f\n", Ex6);

```

```

printf("\nEntrez l'angle dans le troisieme centre de masse que prendra le proton par\n
rapport a la direction du fluor (entre -180 et 180 degres)\n theta3=");
scanf("%lf",&theta3);
fprintf(fichier, "theta3 : %f\n", theta3);
}
}

printf("\nEntrez l'epaisseur de vide (en microns) : ");
scanf("%d",&epaisseur_vide);
fprintf(fichier, "epaisseur de vide (en microns) : %d\n", epaisseur_vide);

printf("\nEntrez l'epaisseur d'or (en microns) : ");
scanf("%d",&epaisseur_or);
fprintf(fichier, "epaisseur d'or (en microns) : %d\n", epaisseur_or);

theta1_rad=theta1*pi/180;
theta2_rad=theta2*pi/180;
theta3_rad=theta3*pi/180;

v0=sqrt(2*E0/mn);
Vcm1=mn*v0/(mp+mn);
V1=sqrt(1/(mn+mp)*(mn*mn/mp*pow(v0-Vcm1,2)+mn*pow(Vcm1,2)-2*mn/mp*Ex4));
V4=mp/mn*V1;
v1=sqrt(pow(V1*cos(theta1_rad)+Vcm1,2)+pow(V1*sin(theta1_rad),2));
E1=0.5*mp*pow(v1,2);
E4=E0-E1;
fprintf(fichier, "\n\nJuste apres la collision, on a : \nenergie du proton 1 = %f Mev,\n", E1);
fprintf(fichier, "energie du neon = %f Mev,\n", E4);

thetalab1=atan(V1*sin(theta1_rad)/(V1*cos(theta1_rad)+Vcm1));
fprintf(fichier, "angle lab 1 : %f,\n", 180/pi*thetalab1);
thetalab4=atan(-V4*sin(theta1_rad)/(-V4*cos(theta1_rad)+Vcm1));
fprintf(fichier, "angle lab 4 : %f,\n", 180/pi*thetalab4);

```

```

if(E1-Kp*epaisseur_or/cos(thetalab1)<0)
{fprintf(fichier, "Le proton 1 s'arrete a l'epaisseur de %f microns.\n\n", E1/Kp*cos(thetalab1)+epaisseur_vide);}
else {fprintf(fichier, "energie du proton 1 en sortie : %f.\n\n", E1-Kp*epaisseur_or/cos(thetalab1));}

if (Ex4<3.92)
{
    fprintf(fichier, "Epaisseur | temps (ps) | Energie neon\n");
    Vcm2=sqrt(2*(E4-Ex4)/mn);
    while (i<=epaisseur_vide)
    {
        t4=i/cos(thetalab4)/Vcm2*0.101805;
        fprintf(fichier, "%d | %f | %f\n", i, t4, E4);
        i=i+1;
    }
    i=1;
    while (i<=epaisseur_or && (E4-Kn*i/cos(thetalab4)-Ex4)>=0)
    {
        Vcm2=sqrt(2*(E4-Kn*i/cos(thetalab4)-Ex4)/mn);
        t4=1/cos(thetalab4)/Vcm2*0.101805+t4;
        fprintf(fichier, "%d | %f | %f\n", i+epaisseur_vide, t4, E4-Kn*i/cos(thetalab4));
        i=i+1;
    }
    if (i>epaisseur_or)
    {fprintf(fichier, "\n=> Le neon peut sortir de la cible!\n\n");}
}
else
{
    fprintf(fichier, "Epaisseur ou la desintegration 1 a lieu | angle lab 2 | angle lab 5 | temps (ps)\n
    | Energie fluor a la desintegration | Energie proton 2\|na la desintegration | Energie proton 2 en sortie\n\n");
    Vcm2=sqrt(2*(E4-Kn*i/cos(thetalab4)-Ex4)/mn);
    V2=sqrt(2*mf/(mp*(mp+mf))*(Ex4-Ex5-3.92));
    v2=sqrt(pow(V2*cos(theta2_rad)+Vcm2,2)+pow(V2*sin(theta2_rad),2));
    E2=0.5*mp*pow(v2,2);
    thetalab2=thetalab4+atan(V2*sin(theta2_rad)/(V2*cos(theta2_rad)+Vcm2));
    V5=mp/mf*V2;
}

```



```

v3=sqrt(pow(V3*cos(theta3_rad)+Vcm3,2)+pow(V3*sin(theta3_rad),2));
E3=0.5*mp*pow(v3,2);
thetalab3=thetalab5+atan(V3*sin(theta3_rad)/(V3*cos(theta3_rad)+Vcm3));
V6=mp/mo*V3;
thetalab6=thetalab5+atan((-V6*sin(theta3_rad)/(-V6*cos(theta3_rad)+Vcm3));
E6=E5-Kf*(i+j-epaisseur_vide)/cos(thetalab5)-E3-0.6;
t5=1/cos(thetalab5)/Vcm3*0.101805+t5;
fprintf(fichier, " %d | %f | %f | %f | %f | ", i+j, 180/pi*thetalab6, t4+t5, E6, E3);
if (E3-Kp*(epaisseur_or+epaisseur_vide-i-j)/cos(thetalab3)<0)
    fprintf(fichier, "proton 3 arrete a %f microns\n", E3/Kp*cos(thetalab3)+i+j);
else {fprintf(fichier, "%f\n", E3-Kp*(epaisseur_or+epaisseur_vide-j-i)/cos(thetalab3));}
    j=j+1;
}
if (j>epaisseur_or-i)
    fprintf(fichier, "\n=> Le fluor peut sortir de la cible!\n\n\n");
else {fprintf(fichier, "\n\n\n");}
}
i=i+1;
}
while (i<=epaisseur_or+epaisseur_vide && E4-Kn*(i-epaisseur_vide)/cos(thetalab4)-Ex4>=0)
{
    Vcm2=sqrt(2*(E4-Kn*(i-epaisseur_vide)/cos(thetalab4)-Ex4)/mn);
    V2=sqrt(2*mf/(mp*(mp+mf))*(Ex4-Ex5-3.92));
    v2=sqrt(pow(V2*cos(theta2_rad)+Vcm2,2)+pow(V2*sin(theta2_rad),2));
    E2=0.5*mp*pow(v2,2);
    t4=1/cos(thetalab4)/Vcm2*0.101805+t4;
    thetalab2=thetalab4+atan(V2*sin(theta2_rad)/(V2*cos(theta2_rad)+Vcm2));
    V5=mp/mf*V2;
    thetalab5=thetalab4+atan((-V5*sin(theta2_rad)/(-V5*cos(theta2_rad)+Vcm2));
    E5=E4-Kn*(i-epaisseur_vide)/cos(thetalab4)-E2-3.92;
    fprintf(fichier, "%d | %f | %f | %f | %f | ", i, 180/pi*thetalab5, t4, E5, E2);
    if (E2-Kp*(epaisseur_or+epaisseur_vide-i)/cos(thetalab2)<0)
        fprintf(fichier, "proton 2 arrete a %f microns\n", E2/Kp*cos(thetalab2)+i);
    else {fprintf(fichier, "%f\n", E2-Kp*(epaisseur_or+epaisseur_vide-i)/cos(thetalab2));}
    if (Ex5>=0.6)

```

```

{
    j=0;
    t5=0;
    fprintf(fichier, "\n    Epaisseur ou la desintegration 2 a lieu | angle lab 3 | temps (ps)\n
    | Energie oxygene a la desintegration | Energie proton 3\n    a la desintegration | Energie proton 3 en sortie\n\n");
    while (j+i<=epaisseur_or+epaisseur_vide && E5-Kf*j/cos(thetalab5)-Ex5>=0)
    {
        Vcm3=sqrt(2*(E5-Kf*j/cos(thetalab5)-Ex5)/mf);
        V3=sqrt(2*mo/(mp*(mp+mo))*(Ex5-Ex6-0.6));
        v3=sqrt(pow(V3*cos(theta3_rad)+Vcm3,2)+pow(V3*sin(theta3_rad),2));
        E3=0.5*mp*pow(v3,2);
        thetalab3=thetalab5+atan(V3*sin(theta3_rad)/(V3*cos(theta3_rad)+Vcm3));
        E6=E5-Kf*j/cos(thetalab5)-E3-0.6;
        V6=mp/mo*V3;
        thetalab6=thetalab5+atan((-V6*sin(theta3_rad)/(-V6*cos(theta3_rad)+Vcm3));
        if(j!=0) {t5=1/cos(thetalab5)/Vcm3*0.101805+t5;}
        fprintf(fichier, "    %d | %f | %f | %f | %f | ", i+j, 180/pi*thetalab3, 180/pi*thetalab6, t4+t5, E6, E3);
        if (E3-Kp*(epaisseur_or+epaisseur_vide-i-j)/cos(thetalab3)<0)
        {fprintf(fichier, "proton 3 arrete a %f microns\n", E3/Kp*cos(thetalab3)+i+j);}
        else {fprintf(fichier, "%f\n", E3-Kp*(epaisseur_or+epaisseur_vide-j-i)/cos(thetalab3));}
        j=j+1;
    }
    if (j>epaisseur_or+epaisseur_vide-i)
    {fprintf(fichier, "\n=> Le fluor peut sortir de la cible!\n\n\n");}
    else {fprintf(fichier, "\n\n\n");}
}
i=i+1;
}
if (i>epaisseur_or+epaisseur_vide)
{fprintf(fichier, "\n=> Le neon peut sortir de la cible!\n\n\n");}
}
fclose(fichier);
return 0;
}

```


Bibliographie

- [1] Pauline Ascher, Laurent Audirac et Bertam Blank, La radioactivité deux protons, *Images de la physique*, (2009)
- [2] Gómez del Campo et al., Decay of a Resonance in ^{18}Ne by the Simultaneous Emission of Two Protons, *Phys. Rev. Lett.* 86,1, (2001)