

LP2021 : RADIOACTIVITÉ ALPHA ET APPLICATIONS

1^{er} novembre 2021

Juliette Colombier & Nathan Berrit

Oui
NATHAN BERRIT

Niveau : M2 enseignement

Commentaires du jury

Nouvelle leçon tombée en 2021 : pas de commentaires spécifiques

Bibliographie

- ✎ *PC*, **DUNOD** → Formules pas fiables.
- ✎ *Manuel de radioactivité*, **Jacques Foos** → Bonne ref mais pas super complet
- ✎ *Physique subatomique : noyaux et particules*, **Luc Valentin** → Un peu plus détaillé

Prérequis

- Effet tunnel

Expériences

- ☞ Détecteur de fumée : [Animation détecteur de fumée](#)
- ☞ Animation radioactivité alpha [Animation phet colorado](#)

Table des matières

1	La radioactivité alpha	2
1.1	Noyau et phénomènes radioactifs	2
1.2	Approche expérimentale et historique de la radioactivité alpha	3
2	Modélisation du processus de radioactivité α	4
2.1	Modèle de Gamow (1929)	4
2.2	Estimation du temps de demi-vie associé à la radioactivité alpha	5
3	Application : le détecteur de fumée.	6
3.1	Ionisation par rayonnement α	6
3.2	Fonctionnement du détecteur	6
3.3	Bonus : la datation des roches	7
4	Conclusion	7

Introduction

J'ai surtout voulu situer la leçon pour le jury. Cette leçon de niveau L2 a pour but de présenter la radioactivité α en commençant par réintroduire des notions importantes en physique nucléaires qui ont déjà été abordées au lycée.

Cette leçon s'inscrira bien juste après les cours de physique quantique, puisqu'elle permet de remobiliser les raisonnements et outils théoriques qui ont été appris (comme l'effet tunnel ou la notion de système quantique) dans la modélisation d'un phénomène physique.

Pour introduire la leçon à "la classe", on peut la présenter en expliquant que la radioactivité joue un rôle important dans certains sujets de société (comme source d'énergie par exemple) et que cette leçon fournit une première approche du phénomène.

⚠ Attention, cette leçon peut être dure à structurer : il faut essayer de soigner les transitions entre les parties et de créer au mieux un fil directeur. J'ai placé Rutherford assez tôt mais c'est possible de le mettre plutôt en troisième partie.

1 La radioactivité alpha

1.1 Noyau et phénomènes radioactifs

✍ Le Chapitre 3 du Jacques Foss (page 109) : intro sur le noyau, temps de demi-vie, interaction forte.

- Un noyau (ou nucléide) est constitué de protons et de neutrons. Il est caractérisé par (A, Z) avec A le nombre de nucléons et Z le nombre de protons. On le note A_ZX .
- À un système massique au repos, on peut associer une énergie nommée énergie de masse qui vaut $E = mc^2$. Cette équation est nommée équation d'Einstein, et elle permet de relier la notion de masse et la notion d'énergie.
- Expérimentalement, on constate que la masse d'un noyau est inférieure à la somme des masses de ses constituants. On peut traduire cette relation en terme énergétique grâce à l'équation d'Einstein :

$$M_{\text{atome}}c^2 = Zm_p c^2 + (A - Z)m_n c^2 - E_{\text{liaison}}$$

en faisant apparaître une énergie stabilisatrice que l'on nomme énergie de liaison. Il y a donc des interactions stabilisatrices au sein du noyau, qui ne peuvent pas être expliquées à l'aide de l'interaction coulombienne (répulsive ici). En fait, c'est l'interaction forte qui assure la cohésion du noyau. C'est une interaction de courte portée (10^{-15} m) qui assure la cohésion entre les nucléons.

- Phénomène radioactifs (découvert en 1896 par Curie *Alors attention selon certaines sources c'est Becquerel et confirmé par Pierre et Marie Curie*). Selon moi, le nom à retenir pour les élèves c'est celui de Curie.. Un phénomène radioactif est transition énergétique au sein d'un noyau pour former un système plus stable. 3 grands types : α, β, γ ¹.

Radioactivité α : ${}^A_ZX \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^4_2\text{He}$

⚠ préciser que la particule α est chargée positivement : on va s'en servir.

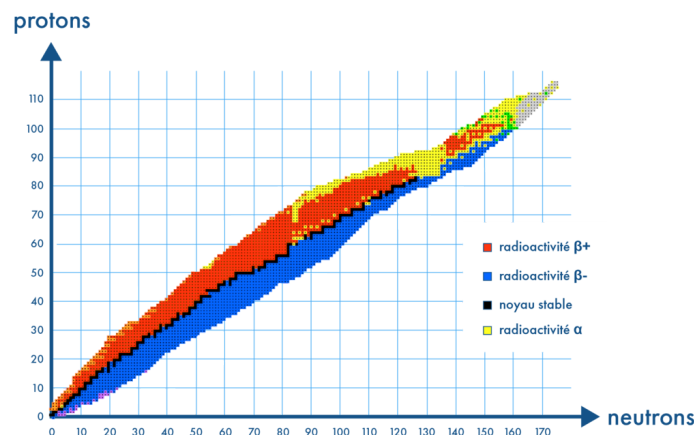


FIGURE 1 – La vallée de la stabilité. On constate que la plupart des noyaux connus sont instables

1. On évoque tous les types de radioactivités, donc faut être prêt à prendre des questions dessus

La plupart des noyaux observés expérimentalement sont instables et se désintègre par radioactivité. On peut regarder le processus de désintégration majoritaire en fonction de (A, Z) et on trace la vallée de stabilité. On constate que la rad. α prend place majoritairement pour les noyaux dits lourds, i.e. avec $A \geq 150$.

- Phénomène d'ordre 1 :

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N = -\frac{1}{\tau} N \quad (1)$$

Avec λ la proba de désintégration par unité de temps et τ le temps de vie d'un noyau. On peut calculer le temps pour consommer la moitié des espèce présentes : temps de demi-vie $\tau_{1/2}$. *Il y a peu de calculs dans la leçon, donc on peut recalculer $\tau_{1/2}$.* Le temps de demi-vie est une propriété intrinsèque au noyau. △préciser que le noyau considéré se désintègre majoritairement via α . Sinon, il faut prendre en compte l'ensemble des processus possibles. △C'est une approche qui est probabiliste : on observe cette dynamique en étudiant une grande population d'émetteurs et en faisant des moyennes.

1.2 Approche expérimentale et historique de la radioactivité alpha

L'expérience de Rutherford (1911)

➤ Le chapitre 1 du Jacques Foss décrit bien l'expérience et le montage. Elle donne des ordg simple, et propose une approche plus détaillée mais abordables en L2/L3 de la diffusion de la particule.

➤ [Un lien](#) qui parle de l'expérience et qui m'a donné l'épaisseur de la feuille d'or :

➤ [L'article wikipédia](#) donne plusieurs montages qui expliquent comment on a pu observer des angles de diffraction supérieurs à 90° .

La radioactivité alpha a trouvé une application expérimentale avant même qu'on puisse en expliquer l'origine, en utilisant les particules alpha issues de ce phénomène. **Rutherford 1911**

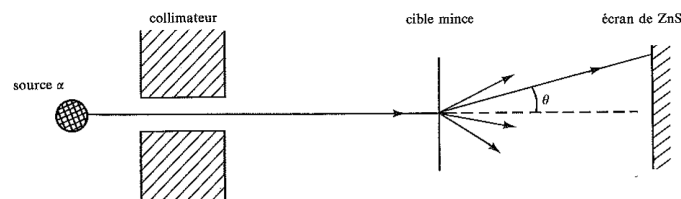


FIGURE 1.1

Les particules diffusent dans tout un domaine angulaire avec des probabilités différentes suivant la valeur de θ .

FIGURE 2 – Schéma du montage

Pour faire cette expérience, Rutherford a utilisé une source de particule alpha (du radium, à vérifier) pour étudier la déviation de ces dernières après avoir traversé une feuille d'or. L'expérience est faite sous vide : le faisceau issu de la source est collimaté, traverse une feuille métallique fine (ici, de l'or avec $e \sim 400$ nm), et un écran de sulfure de zinc crée des flash lumineux à chaque impact de la particule alpha → observation à l'oeil nu de leur angle de déviation.

A l'époque, on voyait l'atome avec le modèle de Thompson (1904), où les électrons (qu'on savait avoir une forme de "petite bille") nageaient dans une soupe de charge positive occupant tout le rayon atomique. On s'attendait donc à ce que les particules α soient peu déviées. Cependant, il a observé qu'une portion du faisceau ($1/20000$ environ) était dévié à des angles $\phi \geq 90^\circ$.²

Pour l'expliquer, Rutherford a considéré que la charge positive de l'atome devait être concentrée dans une faible fraction de son volume ⇒ modèle du noyau.

A l'époque, il avait pu estimer que $r_{\text{noyau}} \leq \frac{r_{\text{atome}}}{10000}$

Rutherford dira de cette observation que "c'était aussi incroyable que de lancer une balle de 30cm sur un mouchoir et de la voir rebondir!".

La Loi de Geiger et Nuttall (1911)

Le but de cette partie est de montrer une loi empirique qui sera en suite bien expliquée par le modèle de Gamov. Mais attention à ne pas faire une approche trop "à suspens" en disant que cette loi est inexplicable, puisque de nos jour on l'explique bien justement. Il vaut mieux dire que ce résultat, surprenant à l'époque, on va bien l'expliquer dans la suite avec la grande sensibilité de l'effet tunnel par rapport à l'énergie d'un quanton.

2. L'article wikipédia montre un montage permettant d'observer des déviations aussi grandes

Durant la même période que l'expérience de Rutherford, plusieurs résultats expérimentaux importants ont été obtenus sur la radioactivité alpha.

Dans un premier temps, on a mesuré l'énergie E_α que possédaient les particules α émises et on a constaté qu'elles étaient toutes dans la même gamme d'énergie : $E_\alpha \sim 4 - 9 \text{ MeV}$ ³.

Plus important, on a fait un constat expérimental surprenant : le temps de demi-vie des noyaux se désintégrant par radioactivité α varie énormément, sur presque 30 ordres de grandeur ! Exemple⁴ : l'Actinium $^{217}_{89}\text{Ac}$ avec $\tau_{1/2} = 7 \cdot 10^{-8} \text{ s}$ et le Thorium $^{232}_{90}\text{Th}$ avec $\tau_{1/2} = 10^{10} \text{ s}$.

Loi empirique de Geiger et Nuttall (1911) :

$$\log(\tau_{1/2}) = a_1 \frac{Z}{\sqrt{E}} + a_2 \quad (2)$$

Avec $\lambda = \frac{\ln 2}{\tau_{1/2}}$ la constante de décroissance radioactive, E l'énergie cinétique totale et a_1 et a_2 des constantes qui dépendent de Z . $a_1 = 3.7 Z$ et $a_2 = -3.7 Z^{\frac{2}{3}} - 49.3$.

↓ *Loi empirique dure à interpréter à l'époque, mais qui finalement s'explique bien à l'aide de l'effet tunnel, et c'est ce qu'on va voir dans la suite en étudiant le modèle de Gamov.*

2 Modélisation du processus de radioactivité α

Le premier modèle théorique du phénomène a été proposé par Gamov en 1929. Idée : la particule alpha préexiste dans le noyau, et peut s'échapper de ce dernier par effet tunnel. On va donc l'étudier comme un quanton, et chercher à modéliser le potentiel qu'elle va rencontrer. Ainsi, le quanton va venir "tapper" régulièrement contre cette barrière, avec une faible proba de la traverser à chaque fois. Dans cette partie, on va évaluer la proba de traverser la barrière, puis en déduire une estimation du temps de demi-vie associé pour l'atome père X .

2.1 Modèle de Gamow (1929)

Hypothèses

- On se place en 1D.
- On considère que la particule alpha est un quanton d'énergie E_α (celle observée expérimentalement).

Il y a deux portions à modéliser pour le potentiel :

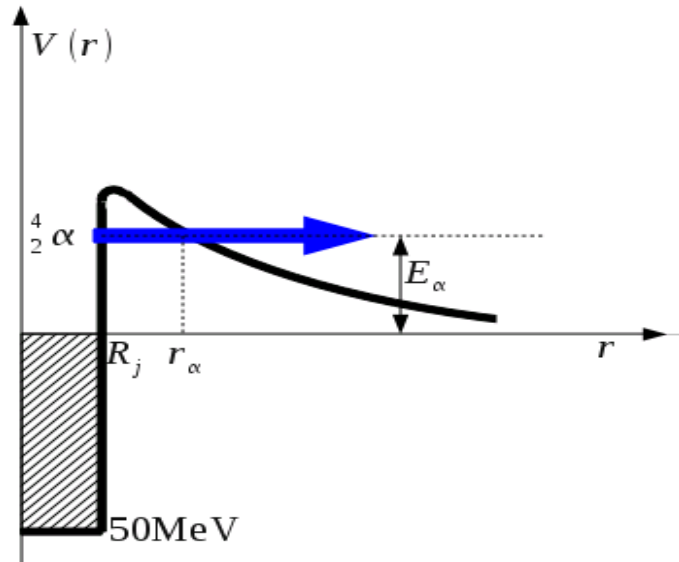
- $r < R_y$: Hors du noyau, la particule ressent le potentiel Coulombien créé par Y ⁵.
- $r > R_y$: Dans le noyau, elle ressent le potentiel créé par l'interaction forte. On a vu que c'était une interaction à faible portée et stabilisatrice (on est + stable dans le noyau qu'à l'infini) : le potentiel dépend donc des nucléons proches du quanton. On va supposer que l'environnement proche est homogène et prendre une valeur négative et constante pour le potentiel⁶.

3. Un résultat qui tombe un peu sans contexte, ça peut être bien de le commenter et de montrer qu'il est très grand devant les énergies d'ionisation par ex

4. Utiliser les valeurs du Jacques Foss si on veut avoir des comparaisons ok avec les valeurs qu'on calculera plus tard avec le modèle de Gamov

5. $V_{\max} \sim 30 \text{ MeV}$

6. $V_0 \sim 40 \text{ MeV}$

FIGURE 3 – Schéma du potentiel. dans le rapport j'ai noté R_y le rayon du noyau Y.

On a modélisé le potentiel. On constate que même si son énergie ne devrait classiquement pas le permettre, elle peut sortir du noyau par effet tunnel. On peut maintenant essayer de calculer le coeff de transmission C_T associé.

△ On va devoir balancer un résultat sans pouvoir le calculer. Pour y aller en douceur, je conseil ce premier petit calcul qui se ramène à ce qu'on a pu voir en cours et qui va introduire l'expression plus moche qui va arriver ensuite.

Idée : on approxime le potentiel par une simple barrière rectangulaire d'épaisseur $(r_\alpha - R_y)$ et de hauteur V_m . on obtient $C_t \sim e^{-2K(r_\alpha - R_y)}$ avec $K = \sqrt{\frac{2m_\alpha(V_m - E_\alpha)}{\hbar^2}}$ 7

On obtient un premier résultat, mais qui n'est pas assez bon. En fait, on est obligé de faire un calcul plus complexe qui donne le résultat :

$$C_t = \exp\left(-2 \int_{R_y}^{r_\alpha} \sqrt{\frac{2m_\alpha(V(r) - E_\alpha)}{\hbar^2}}\right) \quad (3)$$

Résultat qui sort un peu de nulle part mais qu'on peut interpréter : ça ressemble à un produit continu de coefficients de transmissions associé à des barrières rectangulaires infinitésimales qui suivent le profil $V(r)$.

Avec la dernière approximation ($r_\alpha \ll R_y$), on obtient finalement le coefficient de transmission :

$$\ln(C_T) = \frac{4\pi V_m R_y}{\hbar} \sqrt{\frac{m_\alpha}{2E_\alpha}} - \frac{8R_y}{\hbar} \sqrt{V_m m_\alpha} \quad (4)$$

Expression moche qu'il faut discuter et analyser (on retrouve une variation avec E_α similaire à celle observée pour la loi de Geiger et Nuttel.

↓ Maintenant qu'on a évalué le coefficient de transmission, on peut maintenant en déduire le temps de demi-vie associé.

2.2 Estimation du temps de demi-vie associé à la radioactivité alpha

Ici, on adopte une vision plus classique de la particule alpha. Tant qu'elle n'est pas sortie, on considère qu'elle se déplace dans le noyau avec une vitesse $v_\alpha = \sqrt{\frac{2E_\alpha}{m_\alpha}}$ et vient percuter la barrière de potentiel avec la fréquence $f = \frac{v_\alpha}{2R_y}$.

On en déduit directement le taux de désintégration par unité de temps :

$$\lambda = f C_t \quad (5)$$

On note que le facteur f varie peu numériquement avec E_α . Finalement, on retrouve bien la loi de Geiger et Nuttal sur le temps de demi-vie. Ici, on peut faire quelques applications numériques⁸. On retrouve en odg les valeurs expérimentales. On peut aussi montrer [cette simulation](#) pour bien rendre compte de la sensibilité du temps de demi vie avec l'énergie.

7. Il est usuel de prendre le préfacteur de la barrière épaisse alpha égal à 1 dans cette étude.

8. prendre celles du Jacques Foss, parce que en fait les AN marchent pas très bien en général...

Maintenant qu'on a vu le modèle de Gamov, expliquant le principe de la radioactivité α , on peut s'intéresser aux applications qu'offre ce phénomène, en plus de ce qu'on a déjà vu avec l'expérience de Rutherford. Ici, on va en particulier étudier le détecteur de fumée utilisant des émetteurs α .

3 Application : le détecteur de fumée.

✎ Cette partie peut utiliser [cette simulation](#) comme fil directeur.

D'abord, on montre le fonctionnement de principe du détecteur de fumée à l'aide de la 1ère étape de la simulation, sans l'expliquer dans le détail :

- Il y a une petit circuit électrique comportant deux électrodes séparées par une petite chambre.
- Dans cette chambre l'air circule librement et laisser et il y a un émetteur radioactif de particule α .
- en temps normal, on mesure un courant non nul parcourant le circuit.

Pour expliquer le fonctionnement de ce système, on doit parler du pouvoir ionisant des particules alpha.

3.1 Ionisation par rayonnement α

Comme on l'a vu plus tôt, une particule α est émise avec une énergie de l'ordre du MeV. Ce rayonnement est très énergétique, en particulier quand on le compare aux [énergies d'ionisation](#) du dioxygène de du diazote dans l'air (~ 12 eV pour le dioxygène).

Lors de sa propagation, la particule α va percuter un grand nombre de molécule d'O₂ et de N₂, leur arrachant des électrons et créant des ions. C'est ce processus d'ionisation qui est à l'origine du courant mesuré entre les électrodes.

A travers ces impacts, la particule perd très vite de la vitesse, et le rayonnement α est connu pour être peu pénétrant. Pour la quantifier, on peut introduire son libre parcours moyen l. On a alors $l_{air} \sim 5\text{cm}$ et $l_{eau} \sim 5\mu\text{m}$.

On peut maintenant mieux comprendre le fonctionnement du détecteur

3.2 Fonctionnement du détecteur

Faire cette partie en suivant la simulation donnée plus tôt :

- Comme on l'a vu, les particules α émises ionisent l'air, créant un courant électrique.
- quand de la fumée rentre dans le compartiment, elle vient freiner les particules sans pour autant s'ioniser comme l'air. Le courant mesuré diminue alors et déclenche l'alarme quand il passe en dessous d'un certain seuil

Pour aller plus loin, on peut faire un petit calcul pour évaluer la durée de vie des émetteurs utilisés. Ici, on utilise de l'americium 241, qui a une demi vie de 400 ans environ. Ainsi, après 20 ans, il rest encore 97% de la quantité initialement introduite dans le détecteur : on voit bien que cet émetteur a une durée de vie très longue devant la durée des autres composants du détecteur de fumée (batterie...).

3.3 Bonus : la datation des roches

Je comptais plutôt utiliser cette partie comme ouverture en conclusion, mais elle peut servir pour adapter la durée de la leçon si on se retrouve court en temps.

Le principe de datation des roches par radioactivité α est simple :

- On connaît la proportion initial en un émetteur alpha (Uranium par exemple) dans les roches lors de leur formation.
- On connaît la demi vie de cet émetteur.
- On mesure expérimentalement sa concentration à l'heure actuelle
- On en déduit précisément le temps écoulé depuis la formation de la roche.

C'est le même principe que la datation au carbone 14, mais ça exploite une autre radioactivité. En fait, tout ce qui compte ici, c'est qu'on exploite des processus avec une cinétique d'ordre 1.

4 Conclusion

Je n'ai pas grand chose à dire pour la conclusion. On peut récapituler ce qui a été fait, et faire une ouverture avec la datation par radioactivité α . On peut aussi faire une ouverture plus générale, rappelant le rôle que jouent les phénomènes radioactifs dans la vie de tout les jours (comme source énergétique, en médecine, etc...).

Conseils

Je n'ai pas pu en parler dans la leçon, mais je pense qu'il y a sur cette leçon des petites choses à préparer en amont (pour changer le plan et la mettre au niveau L3 ou pour se préparer aux questions).

- C'est une leçon sur la physique nucléaire, donc il faut être un minimum au courant sur des choses connues en physique des particules.
- Pour commencer, il faut connaître les 2 autres radioactivité, et surtout le β qui repose sur de l'interaction faible. Il faut savoir que dans les réactions β il y a conservation de la saveur (mais il n'y a pas conservation pour l'interaction faible en générale!).
- Il faut connaître le modèle de la goutte liquide, il y a de grande chance qu'on en parle.
- Le modèle de la goutte liquide permet d'évaluer les énergies de liaison des atomes et de vérifier que la radioactivité α va se déclencher pour des atomes lourds! (IL y a des courbes trouvable sur le net pour ça, et le Jacques Foss en parle)
- Il faut aussi un peu s'y connaître en mécanique relativiste : connaître la forme générale de l'énergie relativiste (dont découle les énergies de masse), la condition de conservation énergie/impulsion dans les phénomènes radioactifs
- On a vu les différents types de boîtes et les contextes dans lesquels on peut les utiliser
- L'inclusion d'image.
- Les choses à mettre dans un poly.

Ouverture : Il y a pleins de choses que je n'ai pas fait qui pourraient être faites pour avoir un meilleur template, notamment, l'insertion d'une librairie pour dessiner les molécules en chimie (mais est-ce bien utile ?)

Questions

- Sur la vallée de stabilité : expliquer le profil de la ligne tracée par les atomes stables. Pourquoi sont-ils stables ? Pourquoi n'est elle pas linéaire pour les atomes lourds ?
- Pourquoi n'y a-t-il pas de noyau stable avec que des neutrons ?
- Sur la cinétique de désintégration : $\frac{d[N]}{dt} = -\lambda[N]$. Le premier temps définit dans la leçon est celui de demi-réaction. Comment tu définir un temps plus tôt, sans passer par là ? Quelle est l'unité de λ ? *Becquerel*

- Dans l'équation de masse d'un atome (montrée dans le diapo), pourquoi ne pas avoir mis la masse des électrons ? *plutôt sur le noyau + masse bcp faible* Odg des masses électrons et protons ?
- Il y a un énorme écart en ordre de grandeur entre l'énergie cinétique d'une particule α et l'énergie d'ionisation : pourquoi ? Plus généralement, pourquoi y-a-t-il un aussi grand écart entre les énergies nucléaires et ioniques ? (plus d'1 million) ?
- Radioactivité β : Pourquoi l'appelle-t-on β ? Qu'est-ce que c'est qu'une pseudo-particule β ? Quelles sont les quantités conservées dans une réaction β ? *neutrino : la saveur est la quantité conservée, il la manquait dans l'équation de réaction*
- Modélisation du potentiel dans le modèle de Gamow ? Commenter les 3 parties de la courbe de potentiel *Force d'interaction forte pour la partie plate* C'est quoi le modèle de la goutte liquide ? : quelles sont ses contributions ?
- Comment tu connais les potentiels ? Pourquoi en $1/r$ le potentiel pour R plus grand que R_y ? Exemple de sphère inhomogène ?
- Tu as beaucoup parlé des approximations faites dans le modèle Gamow, peux-tu les identifier ? Comment corriger le modèle ? Quoi comme modèle pour remplacer dans le noyau ?
- En conclusion tu as évoqué la fission : pourquoi l'uranium se désintègre par alpha plutôt que par fission.
- Est-ce que les particules alpha produites sont relativistes ? *NON*
- Pourquoi il faut corriger l'approximation $E=E_c$ (corriger la vitesse) et comment on le fait ? *Conservation énergie impulsion*
- C'est quoi l'Americium ? ça se trouve où ? Si synthétique, ça fait cher non ? *en fait c'est des déchets nucléaires* Tu peux calculer la quantité de matière nécessaire dans un détecteur de fumée ? 10^{-8} mol
- Ionisation avec la fumée ?
- Réaction nucléaire sont toujours d'ordre 1 ? T'es sûr ? Comment ça ? Autre ordres ? *Analogie avec la chimie*
- Quelles sont les idées que tu veux faire sortir dans cette leçon ? *Ne s'inscrit pas naturellement dans le programme mais intéressant de réinvestir des notions, travaux de modélisation et hypothèses et approximations*

Commentaires

- Forme : T'es à l'aise à l'oral et posé mais mauvaise gestion du tableau (pas droit, pas hiérarchisé et organisé, couleurs, ...)
- Transitions brutales. Si tu présentes des graphes ou des animations, il faut les décrire sinon ça ne sert à rien.
- Plutôt faire moins de chose mais mieux notamment les schéma.
- Beaucoup d'imprécisions dans la sémantique mais c'est normal ça viendra avec la bouteille.
- Approche historique de MQ comme les gens qui comprenaient pas : on comprend pas non plus - pas facile à faire plutôt à la fin pour ne pas embrouiller les élèves.
- Approche à suspens : décris ce que tu fais, où tu vas!! C'est perturbant
- Il faut plus de connections logiques entre les parties.
- Analyser les différents termes physiques.
- Maintenant sur le fond : idée essentielles temps de demi vie sur des grands ordres de grandeur : la ligne directrice c'est qu'il faut le relier à l'effet tunnel, et annoncer que c'est du à l'effet tunnel dès que tu en parles .
- Une approche probabiliste peut être intéressante à faire
- Notion de modèle fondamental
- Expliquer les odg c'est fondamental aussi!!
- Applications : c'est vrai pas évident c'était pas mal mais Rutherford un peu bizarre.
- Maintenant on reprend de façon linéaire la leçon (enfin ce qui ne va pas) :

- X,A,Z,Em (préciser au repos!!) tu confonds atomes et noyau, au début c'est bien d'avoir les électrons parce que expérimentalement tu as accès aux atomes et pas au noyau! Ne pas oublier le neutrino! Il faut connaître neutrino sur au moins les trucs importants
- "Le noyau est édifice stable" : non tu parles de radioactivité il faut pas dire ça c'est faux.
- Faire le lien avec l'énergie de liaison : dans quel sens c'est stable : énergétiquement plus favorable.
- Attention aux questions sur la radioactivité beta : en en parlant tu ouvres les questions.
- C'est dommage que tu parles pas de la charge d'alpha alors qu'après tu parles d'ionisation.
- Fais passer le message que tu es précis et propre.
- cinétique : qu'est ce que ça avoir avec alpha : moyennage
- temps de réaction associé à un noyau : c'est faux à une réaction : tu peux en imaginer plusieurs différents
- Il faut que tu priorises.
- Approche historique de Thomson : on se dit envoi du alpha confusion modèle de l'atome modèle du noyau. Est-ce que c'est une bonne idée de faire ça ?
- Pourquoi des MeV? justifier! $e=p^2/2m$ donc heisenberg et odg. Dès qu'on parle de confinement, il faut utiliser ça en MQ (c'est fait dans le bouquin de l'X - Dalibard pour beaucoup de cas)
- Valeur moyenne du potentiel sur le noyau pour la droite - sinon potentiel de l'interaction forte (potentiel de Wood Saxon)
- la question sur la répartition dans le noyau : théorème de Gauss et on ne peut pas avoir du $1/r$ selon la forme genre ellipsoïde ou cacahuète. (analogie avec la gravitation : étoile - galaxie) Présente le modèle quand tu le sens mais attention aux questions sur la modélisation.
- Correction modèle de gamow : masse réduite.
- quand tu as découpé le potentiel pour dire que après ça marchait pas et du coup est-ce que c'est utile? Je trouve que ta réponse est cohérente. Approx WKB
- question sur la mathématisation de la résolution Gamow inévitable.