

LP23 bis : Modèles de l'atome

Niveau : L2

Commentaires du jury

- Leçon donnée pour la première fois il y a deux ans, pas de commentaire.

Prérequis

Expériences

- Mécanique newtonienne, énergie mécanique, notion de puissance
- Moment cinétique, mouvement à force centrale
- Charge, force de Coulomb, champ électromagnétique
- *Bases de mécanique quantique, Inégalité d'Heisenberg (ajouté après passage)*
- * Montrer les raies spectrales de l'hydrogène.

Références

- [1] Francis Beaubois. [BUP 1020 : L'expérience de Rutherford – Une étude de cas](#). 2020.
- [2] Michel Bertin, Jean-Pierre Faroux, and Jacques Renault. *Mécanique. 1. Mécanique classique de systèmes de points et notions de relativité*. COURS DE PHYSIQUE. DUNOD, 1993.
- [3] CCP. Épreuve spécifique : filière pc. *Concours Communs INP*, 2019.
- [4] E. Rutherford F.R.S. Lxxix. the scattering of α and β particles by matter and the structure of the atom. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 21(125) :669–688, 1911.
- [5] J. J. Thomson M.A. F.R.S. Xl. cathode rays. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 44(269) :293–316, 1897.
- [6] J.J. Thomson F.R.S. Xxiv. on the structure of the atom : an investigation of the stability and periods of oscillation of a number of corpuscles arranged at equal intervals around the circumference of a circle ; with application of the results to the theory of atomic structure. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 7(39) :237–265, 1904.
- [7] Jean Perrin. Les hypothèses moléculaires. conférence faite aux étudiants et aux amis de l'université de paris. *Revue scientifique (revue rose), 4ème série*, 15(359) :449–461, 1901.

Table des matières

1 L'expérience de Rutherford

2

1.1	Contexte historique	2
1.2	Expérience	3
1.3	Modélisation classique microscopique	3
1.4	Interprétation des résultats par Rutherford	3
2	Les limites du modèle planétaire	4
3	L'atome de Bohr	6
3.1	Motivations	6
3.2	Postulat	7
3.3	Traitement classique [2]	7
4	Vers un modèle quantique (<i>pas traité, ajouté après commentaires</i>)	8

Introduction

But

Formation du scientifique : concevoir un modèle, percevoir les limites, les hypothèses

Expérience

Référence : TP Spectro

Matériel, description :

- Lampe à hydrogène (Lampe de Balmer à tube capillaire P1.24)
- Fente (P115.2)
- Lentille de projection 10 cm (achromat P111.1)
- Prisme (ou réseau, mais prisme plus lumineux)
- Caméra Ipevo de l'amphi
- Écran blanc (une boîte avec un papier blanc au fond c'est mieux pour éviter les lumières parasites)

NB : Prendre un support boy pour la lampe.

1 L'expérience de Rutherford

1.1 Contexte historique

Avant le XIX^{ème} siècle, l'hypothèse atomique était un problème philosophique auquel l'expérience ne pouvait pas répondre, donc pas vraiment une question de sciences.

Idee d'élément chimique, puis usage de la notion d'atome pour la première fois en physique : hypothèse pratique des thermodynamiciens au XIX^{ème} siècle (évoqué par [7]). Dans le cadre de cette théorie, on a déjà la **taille d'un atome** : $10^{-10} \text{ m} = 1 \text{ Å}$. Les questions restantes portent sur sa **structure**.

1897 : Thomson publie un article sur les **rayons cathodiques** [5] : déviés en présence de champ électrique (déviation n'a lieu que dans le vide, ce qui complète l'expérience de Hertz dans laquelle il ne trouvait pas de déviation). En déduit que ce sont des particules chargées négativement provenant des métaux : **découverte de l'électron**. Calcule leur rapport $\frac{q}{m}$.

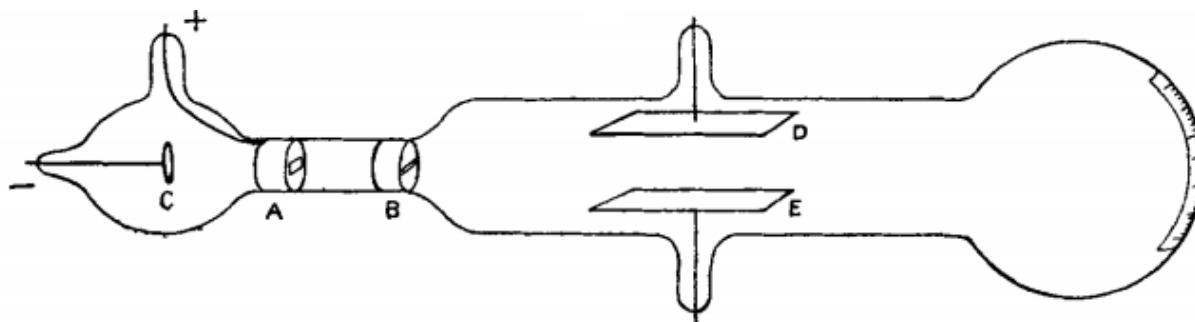


FIGURE 1 – figure originale de l'expérience de Thomson [5]. Des électrons sont arrachés de la cathode C par la fente anode A, ceux-ci sont ensuite filtrés en direction par la fente B et déviés par le champ électrique entre les plaques D et E. L'enceinte de l'ampoule est sous un vide fort pour l'époque et est tapissée par un matériau phosphorescent. Les plaques font 5 par 2 cm et sont séparées de 1.5 cm.

Son modèle de l'atome : article 1904 [6]. Doit vérifier deux contraintes : être un ensemble électriquement neutre, et contenir des électrons. **Matrice chargée positivement dans laquelle les électrons sont libres de se mouvoir.**

Remarque

Il aurait été intéressant ici de développer le modèle de l'électron élastiquement lié, en utilisant le théorème de Gauss.

Transition

Pas le seul à calculer le rapport $\frac{q}{m}$ de particules composantes de rayons : Rutherford aussi lorsqu'il travaille sur la radioactivité α .

1.2 Expérience

Radioactivité α : émise par désintégration du radium, ions He^{2+} . Expériences sur ces rayons début du XXème avec Hans Geiger (celui du compteur) et Ernest Marsden : gênés par la diffusion (*scattering*) des rayons par la matière.

Expérience de caractérisation de cette diffusion en 1907 :

- source de particules α
- feuille d'or 600 nm juste derrière
- comptent combien en arrivent à chaque angle

Résultats : dans le vide, sans feuille, on observe l'image géométrique de la fente. Avec feuille, il y a de la diffusion aux faibles angles et grands angles ($> 90^\circ$).

1.3 Modélisation classique microscopique

Mouvement à force centrale exercé par le noyau des atomes d'or sur une particule alpha incidente : donne un exercice qui permet de déterminer une borne supérieure au rayon du noyau. Un peu long, demande d'introduire la section efficace (cf [3] et [2], Appendice 1).

1.4 Interprétation des résultats par Rutherford

Hypothèse nucléaire : il existe un noyau qui concentre la charge et crée un fort champ électrique au sein de l'atome [4].

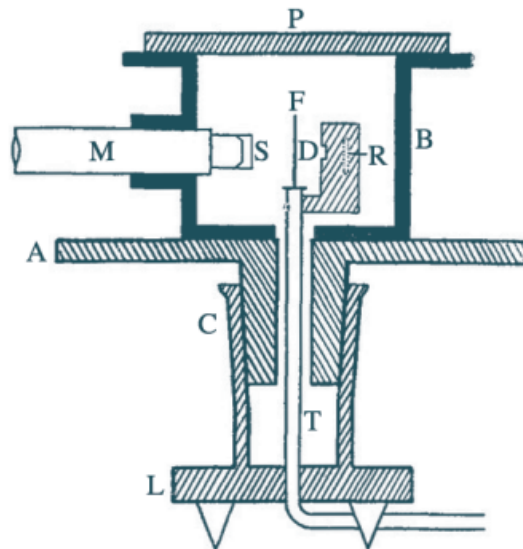


Figure 6 - Dispositif expérimental de Geiger et Marsden. Il est constitué d'une boîte métallique cylindrique B fermée par un couvercle en verre dépoli P . Cette boîte contient la source R de particules α munie d'un diaphragme D , d'une feuille métallique diffusante F et d'un microscope M auquel est rigidement fixé un écran de sulfure de zinc S . La boîte est fixée sur un support circulaire gradué A , pouvant être tourné au moyen d'un joint conique hermétique C . La boîte B et le microscope M étant solidaires du support A , tous deux peuvent tourner tandis que la feuille métallique et la source de radiation restent dans la même position, fixés à l'armature du dispositif par sa base L . Le vide est effectué par l'intermédiaire du tube T (Source : [19], p. 607).

FIGURE 2 – d'après [1]. À simplifier lors de la présentation.

Attention

Les résultats de l'expérience ne prédisent pas la charge du noyau. C'est une *hypothèse de travail* pour Rutherford de le considérer positif.

Prédictions par le modèle de Thomson : diffusion d'angles $< 0,02^\circ$.

Transition

Le modèle de Thomson est dépassé, on lui préfère désormais un modèle planétaire où les électrons gravitent autour d'un noyau positivement chargé.

2 Les limites du modèle planétaire

Les premiers modèles planétaires de l'atome se font à un moment où il est déjà connu que l'électron est bien plus léger que l'atome lui-même, et nous savons qu'il y a un rapport de l'ordre de 10^3 entre les masses du noyau de l'atome d'hydrogène et de l'électron. On peut réduire le problème sans perte de généralité à un noyau immobile.

Hypothèse majeure : Pour l'électron, la vitesse radiale est bien plus faible que la vitesse orthora-

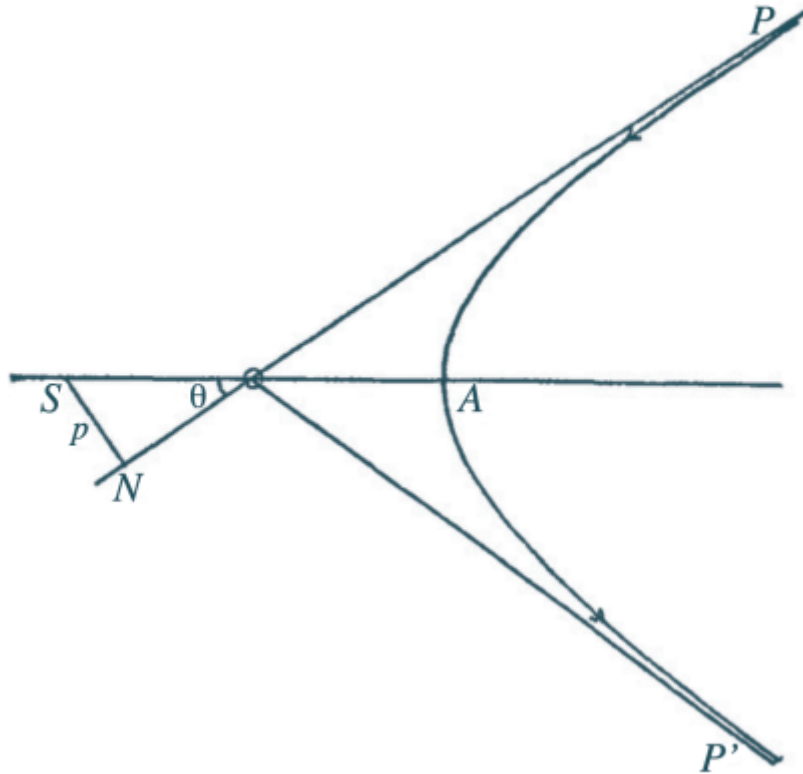


FIGURE 3 – Schéma montrant la déviation d'une particule en s'approchant de la charge centrale d'un atome situé en S. p est le paramètre d'impact et SA est la distance minimale d'approche. D'après [4].

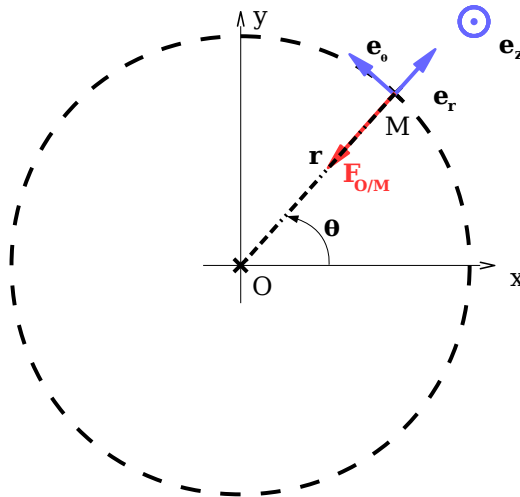


FIGURE 4 – Modèle planétaire pour une orbite circulaire, on considère l'électron en M et le proton en O.

diale : $\dot{r} \ll r\dot{\theta}$. En mécanique quantique, on trouve un moment cinétique minimal pour l'électron autour de l'atome de l'ordre de $\hbar$ et un rayon de l'ordre de l'Å dont on déduit une vitesse de $2.4 \times 10^6 \text{ m s}^{-1}$, donc l'approximation est raisonnable. De plus, on peut bien se placer en mécanique non relativiste.

Quelques résultats pour ce modèle dans le cas de l'hydrogène :

- Noyau fixe, ponctuel en O dans le référentiel du laboratoire.
- Electron de masse m_e
- Force de Coulomb : $\mathbf{F} = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = -\frac{K}{r^2}$ où ϵ_0 est la permittivité diélectrique du vide.

- $E_p = -\frac{K}{r}$
- $\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \dot{r}\mathbf{e}_r + r\dot{\theta}\mathbf{e}_\theta$
- PFD : $m_e \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\frac{K}{r^2}\mathbf{e}_r$
- En projetant selon $\mathbf{e}_\theta$: $v = \sqrt{\frac{K}{m_e r}}$
- $E_M = E_p + E_c = -\frac{K}{2r}$

Problème : Charge accélérée émet une **puissance**. Formule de Larmor :

$$P(r) = \frac{e^2 a^2}{6\pi\epsilon_0 c^3} = \dots = \frac{e^6}{3(4\pi\epsilon_0)^3 m_e^2 c^3 r^4} = \frac{P_0}{r^4}$$

où c est la vitesse de la lumière, si on commence par supposer un mouvement uniforme circulaire, on a $a = r\dot{\theta}^2$.

Energie perdue par l'électron :

$$\frac{dE_M}{dt} = -P(r) \leq 0$$

et si on suppose r et E_M lentement variables :

$$\frac{\partial r}{\partial E_M} = \frac{K}{2E_M^2} \geq 0$$

Alors :

$$r^2 \frac{\partial r}{\partial E_M} = -\frac{2P_0}{K}$$

En intégrant l'expression, on obtient un temps de vie de l'électron depuis un rayon de $1 \text{ \AA}$ de $T = 2.1 \times 10^{-10} \text{ s}$, un temps absurde court.

Remarque

Ce temps de chute implique néanmoins une vitesse radiale de l'ordre d' 1 ms^{-1} en moyenne, qui reste bien inférieure à la vitesse de rotation de l'électron précédemment donnée.

Transition

Dans ce modèle, le dernier résultat n'est pas forcément aberrant par rapport aux hypothèses de départ mais impliquerait une durée de vie très courte pour l'atome d'hydrogène.

3 L'atome de Bohr

3.1 Motivations

On observe pour le spectre d'émission d'un élément des raies discrètes et non un spectre continu. On a donc une émission à des énergies discrètes, donc des niveaux d'énergie pour l'électron lié au noyau, et des des niveaux d'énergie atomiques.

Dans la lampe à hydrogène, on fournit un courant qui excite les électrons ; en se désexcitant, ils retombent à un niveau d'énergie plus bas pour revenir dans leur état fondamental, et émettent donc des ondes électromagnétiques d'énergie quantifiées par les écarts entre niveaux.

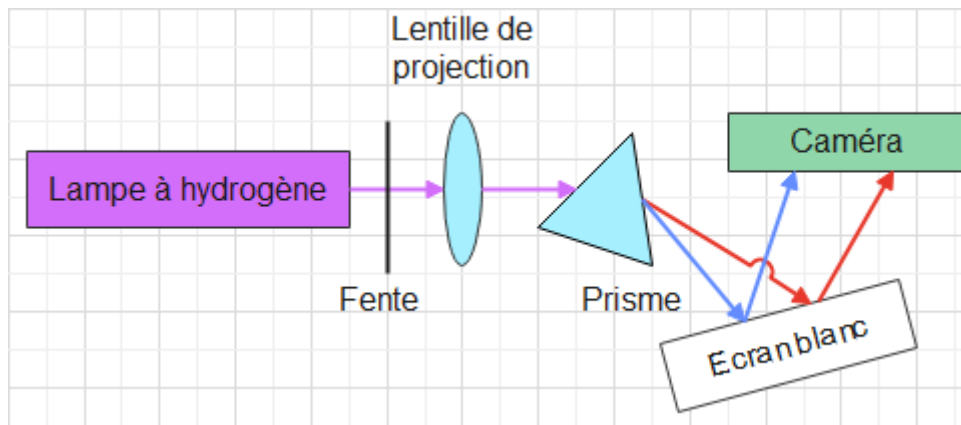


FIGURE 5 – Schéma de l'expérience permettant de visualiser deux des raies d'émission de l'hydrogène.

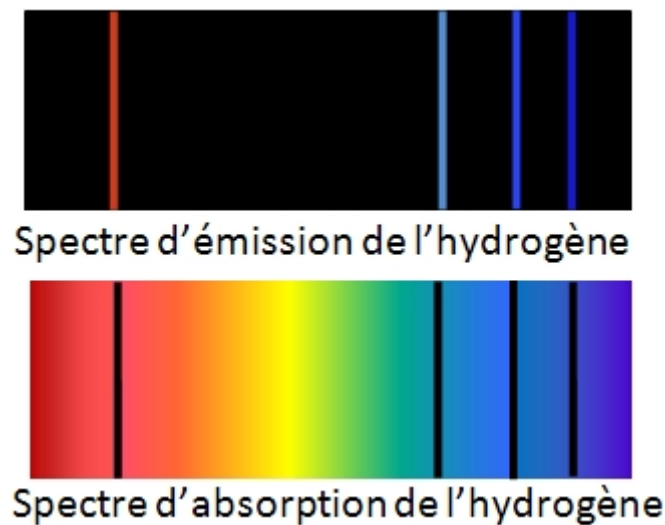


FIGURE 6 – Spectre visible de l'hydrogène. Dans notre expérience, nous n'arrivons à observer que les deux raies de gauche du spectre d'émission.

3.2 Postulat

Etudié principalement entre 1913 et 1925, développé par Bohr en utilisant des postulats de mécanique quantique s'appuyant notamment sur des observations.

Intermédiaire semi-classique.

- i) Il existe des orbites circulaires stables sur lesquelles les électrons ne rayonnent pas
- ii) Un électron peut passer d'une orbite à une autre par l'absorption ou l'émission d'un photon, quanta d'énergie électromagnétique.
- iii) La norme du moment cinétique de l'électron $\mathbf{L}$, est quantifiée par $L = n\hbar, n \in \mathbb{N}^*$

3.3 Traitement classique [2]

En reprenant les résultats précédents, on a pour les orbites stables un rayon possible quantifié par :

$$r_n = a_0 n^2 \quad \text{où } a_0 = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{m_e e^2} \text{ est le rayon de Bohr} \quad (1)$$

$$E_n = -\frac{K}{2r_n} = -\frac{E_0}{n^2} \quad \text{où } E_0 \text{ est l'énergie de l'état fondamental de l'électron.} \quad (2)$$

A.N. : $a_0 = 53 \text{ pm}$ donc un diamètre de $1 \text{ \AA}$

$E_0 = 13.5 \text{ eV}$ qu'on retrouve bien comme état fondamental de l'électron dans l'atome d'hydrogène.

Important

On retrouve, grâce à des hypothèses judicieuses même si peu justifiées, les grandeurs de base du système d'unités atomiques, avec notamment le rayon de Bohr qui correspond bien à la longueur caractéristique de la densité de probabilité radiale de l'électron dans le modèle de l'atome d'hydrogène.

Transition

On peut faire une transition vers un modèle quantique plus rigoureux en prenant les manques de ce modèle. Par exemple, la téléportation des électrons lors du passage d'une orbite à une autre, ou l'aspect probabiliste de la matière à cette échelle et donc la non localisation des électrons, ou simplement l'absence de justification des postulats.

4 Vers un modèle quantique (*pas traité, ajouté après commentaires*)

Expliquer les bases d'un modèle quantique, notamment que le confinement amène la quantification des énergies (exemple : corde de Melde) et que l'incertitude d'Heisenberg empêche l'électron de s'écraser sur le noyau.

Si on veut pousser les choses, on peut même retrouver les orbitales 1s de l'hydrogène (Question 12).

Conclusion

Tous ces modèles répondent à des observations réalisées à leur époque et permettent d'expliquer des phénomènes que l'on observe toujours, ils ne représentent pas forcément la réalité mais servent toujours à comprendre certains concepts. Le modèle de Bohr est toujours enseigné pour expliquer conceptuellement le magnéton de Bohr sans avoir à passer par la mécanique quantique. Le modèle de Thomson, qui paraît plutôt absurde maintenant que l'hypothèse nucléaire est admise, permettait d'expliquer la périodicité des propriétés de la matière (éléments chimiques) par les modes propres des électrons dans la matrice positive, et justifie aussi le modèle de l'électron élastiquement lié considéré habituellement pour les diélectriques.

Message clé

Ce qu'il faut retenir dans cette leçon est principalement la démarche suivie. On observe un phénomène, on en construit un modèle plus ou moins intuitif et on le confronte aux expériences et on adapte ou change complètement le modèle. La physique est une science qui est constamment en construction.

Compléments

Questions

1. **Comment sont arrachés les électrons de la cathode ?** En imposant une tension de l'ordre du kV entre l'anode et la cathode.
2. **Comment remonter à q depuis le rapport $\frac{q}{m}$:** Expérience de Millikan pour ça : on charge des gouttes d'huile sur une surface peu chargée. En fonction de leur vitesse, on trouve la charge qui est multiple de celle de l'électron. Champ électrique pour compenser le poids réduit (Archimède+pesanteur). Bien expliquée sur [Wikipedia](https://fr.wikipedia.org/wiki/Exp%C3%A9rience_de_Millikan).
3. **Première idée de l'atome ?** Démocrite, le dire dans le leçon pourrait être peut-être mieux même si pas une notion physique au Vème siècle av JC.

4. **Pourquoi Thomson rejette l'hypothèse nucléaire de l'atome ?** Théorème d'Earnshaw : il n'existe pas d'extremum local du potentiel électrique dans une région de l'espace vide de charge ; autrement dit, une distribution de charges ponctuelles est instable.
5. **Source de particules α ?** Radium + Collimateur en Pb pour canaliser les rayons.
6. **Expliquer le dispositif utilisé par Geiger et Marsden pour l'expérience de Rutherford :** Rayon de particules alpha envoyées sur une feuille d'or au milieu d'une enceinte, détecteur en ZnS brille dès qu'une particule α entre en contact, on peut donc les compter pour chaque angle en déplaçant le détecteur.
7. **Déviation attendue dans le modèle de Thomson :** On observerait avec les atomes de Thomson une déviation d'environ 10^{-2}° .
8. **Qu'est ce qu'une particule α ?** Un noyau d'Hélium 4, donc chargé $+2e$ et très petit.
9. **Quelle hypothèse fait-on quand on exprime l'énergie mécanique à rayon constant alors que celui-ci diminue ?** On suppose que le rayon varie peu sur les temps caractéristiques du problème, l'hypothèse est finalement montrée caduque après calcul, on voit donc notamment que le rayon doit varier dans ce problème et ne peut rester constant.
10. **D'où vient la perte d'énergie et la puissance rayonnée ?** Formule de Larmor, établie en théorie des champs.
11. **Autre expérience pour observer la quantification du moment cinétique (justification de l'hypothèse de Bohr) ?** Stern et Gerlach (savoir expliquer brièvement)
12. **Qualitativement, avec la mécanique quantique, pourquoi l'électron ne vient-il pas s'écraser sur le noyau ?** Principe d'incertitude d'Heisenberg, détaillé sur [Wikipedia](#)
13. **Modèle du noyau ?** Modèle de la goutte liquide, décrit de manière empirique l'énergie d'un noyau en fonction de son numéro atomique Z et de son nombre de masse A . Permet de décrire la stabilité des noyaux. Fait intervenir :
 - un terme de volume $\propto A$
 - un terme de surface proportionnel $\propto A^{2/3}$
 - un terme coulombien $\propto \frac{Z^2}{A^{1/3}}$
 - deux autres termes qui pénalisent l'asymétrie entre le nombre de neutrons et de protons
 - un autre qui provient de la nature fermionique des nucléons et qui favorise les noyaux avec un nombre pair de protons et un nombre pair de neutrons.
14. **Problème sur modèle de Bohr ?** Si on accepte toutes les hypothèses, il faut tout de même une téléportation de l'électron d'une orbite à l'autre, ce qui est interdit.
15. **Modèle actuel de l'atome ?** Atome d'Hydrogène : en utilisant l'équation de Schrödinger dans potentiel coulombien.
16. **Pourquoi étudier la structure de l'atome ?** Pour connaître les propriétés de la matière. Thomson validait son modèle avec la périodicité des propriétés des atomes dans le tableau périodique et dans son modèle. La théorie des orbitales sert en chimie théorique.
17. **Pourquoi feuille d'or et pas d'un autre matériau ?** Matériau très fin car très malléable et avec forte déviation.
18. **Expérience de Franck et Hertz :** autre expérience qui indique la quantification des niveaux d'énergie.
19. **Explication pour les phénomènes de quantification en physique ?** Le confinement amène une quantification des vecteurs d'onde pour les phénomènes ondulatoires (exemples : corde de Melde, puits infini). En mécanique quantique, cette quantification des vecteurs d'onde implique la quantification de l'énergie car la fonction d'onde doit être normalisée.

Commentaires

- Expérience : bien, permet de donner du contexte.
- Éviter l'écueil de l'histoire des sciences, plutôt construire pas à pas la théorie à l'aide des observations. Il faut introduire de l'intérêt physique dans cette leçon.
- Mécanique quantique : À développer en dernière partie. Permet d'expliquer la stabilité de la matière (cf Basdevant), de développer les hypothèses du modèle de Bohr. Transition : problème posé par la téléportation de l'électron d'une orbite à l'autre.
- Quitte à choisir un calcul, mieux valait développer le modèle de Thomson avec le modèle de l'électron élastiquement lié (forme du potentiel dans densité de charge constante centrée, utiliser le théorème de Gauss) plutôt que la trajectoire circulaire. C'est un problème plus original qui permet de discuter de la notion de perte d'énergie par rayonnement, la force d'amortissement fluide, et de retrouver la force de rappel élastique. Donne un modèle notamment pour une particule dans un diélectrique.
- Modèle planétaire : parler de la réduction du modèle à deux corps (éventuellement la faire, ou au moins la mentionner). Toujours dire "*J'applique la relation fondamentale de la dynamique à tel système dans le référentiel associé à [...].*" Mettre les forces sur le schéma.
- Mettre des slides pour les schémas et résultats importants peut faire gagner du temps et de l'espace sur le tableau.
- Ne pas éteindre la lumière avant d'expliquer le montage d'optique.
- Ne pas lire ses notes pendant un calcul simple au tableau : le jury veut voir qu'on sait le faire.