Chapitre I

Introductions aux phénomènes quantiques

I: Introduction:

Avec le développement de la science et la technologie, des nouveaux phénomèmes et des nouvelles experiences s'imposent. Par suite nous devons constament verifier, si les lois physique qui existent sont valable pour interpreter les nouveaux resultats et expliquer les nouvelles observations.

Dans ce chapitre nous allons montrer par les experiences la limitation de la physique classique est introduire les idées de bases de la mécanique quantiques.

A la fin du 19ieme siecle 4 domaine de la physique existaient

- Mécanique classique de Newton
- Thermodynamique
- Electromagnetique de Maxwell
- Mécanique statistique

Et dans l'univers on distingait entre deux types d'entités; particules (matière) et ondes.

1: Particules: sont localisées, leurs mouvement est entièrement décrit par la mécanique de Newton. L'état est défini à toute instant, par trois cordonnées generalisées (q_1, q_2, q_3) et trois vitesse généralisées $(\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dot{q}_3)$. Ces parametre évoluent dans le temps selon des équations de mouvement. En donnant les valeurs initiales $q(t_i)$ et $\dot{q}(t_i)$ à un instant t_i nous pouvons deduire la trajectoire $q(t)$ à n'importe qu'elle moment.

$\Rightarrow$ La mécanique classique est déterministe.

2 - Ondes : une onde est une propagation d'une perturbation dans l'espace qui est decrite par la fonction d'onde $\Psi(\vec{r}, t)$ caracterisant la perturbation au point $\vec{r}$ à l'instant t.
Pour les ondes sonneur Ψ represente la pression d'air exercée sur la normale. Pour une onde electromagnetique Ψ peut etre n'impote qu'elle composante du champ électrique $\vec{E}$. $\Psi(\vec{r}, t)$ obeit à l'equation d'onde dépendant du temps au second ordre à chaque point $\vec{r}$

$$\vec{\nabla}^2 \Psi = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2}$$

Cette equation décrit la propagation des ondes à la vitesse $\vec{v}$.
Connaissons $\Psi(\vec{r}, 0)$ et $\dot{\Psi}(\vec{r}, 0)$ on peut avoir la fonction d'onde $\Psi(\vec{r}, t)$ à n'impote qu'elle moment en resolvant l'équation d'onde.

Au début du 20^{ième} siecle plusieurs types d'observations ont montré que l'application de la théorie classique aux phenomène ~~se~~ heurtait à des échecs, parmis ces observations.

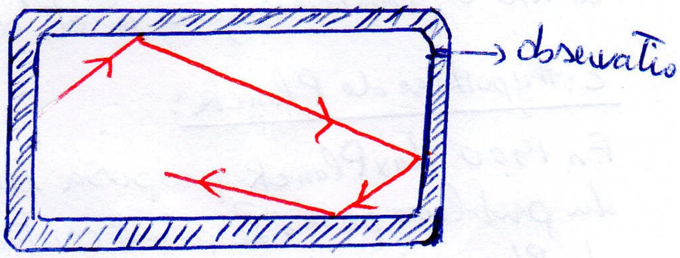
- Rayonnement du corps noir
- Effet photoelectrique
- Effet Compton

II : Phénomènes en desacord avec la physique classique.

1. Le rayonnement du corps noir et l'hypothèse de Planck.

a. Définition : Un corps noir est un objet non reflechissant qui émet de la lumière lorsqu'il est chauffé. On peut representer le "corps noir" par un four, maintenu à température constante et isolé de l'exterieur. Le rayonnement émis par les parois du fours (à l'interieur) est completement absorbé c'est l'equilibre thermique : l'ensemble constitue donc bien un système fermé (fig 1)

Toutefois, si on veut observer le phénomènes on peut percer un petit trou dans la paroi de taille suffisamment réduite pour que la perte d'énergie soit négligeable.



(fig 1)

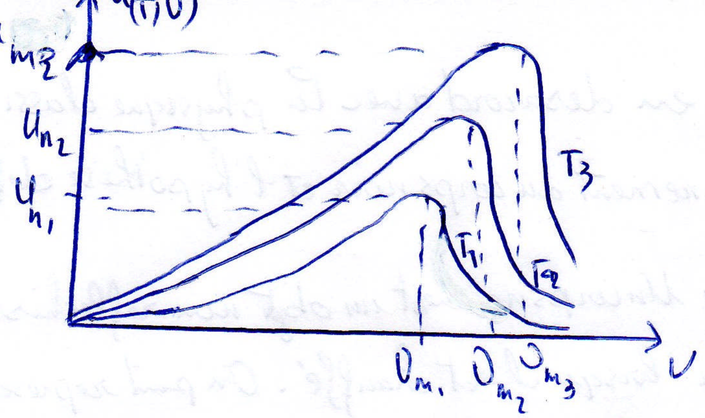
b : Rayonnement du corps noir :
plusieurs physiciens ont cherché des «lois» reliant l'intensité (densité d'energie) fréquence ν et temperature T en se basant sur la théorie classique, le fait que l'échange d'energie entre rayonnement et la matière se fait d'une façon continue.

En 1870, Stefan en interpretant des resultats experimentaux décrit empiriquement la variation de densité d'energie pour toute les frequences par une loi qui porte son nom

$$u(T) = aT^4$$

Après Wien a montré que $\frac{\nu_{max}}{T} = cste$ appelée loi de déplacement du maximum du rayonnement (fréquence) de Wien

1895 : Lummer et Wien ont pu tracer des courbes experimentaux de repartition spectrale de la densité d'energie pour différente valeurs de la temperature (fig 2)



1895 : Rayleigh et Jeans ont trouvé après un travail théorique poussé, que la densité d'energie rayonnée pour une fréquence donnée :

$$\mu(T,\nu) = \nu^3 \left(\frac{8\pi K}{c^3} \cdot \frac{T}{\nu} \right)$$

c : vitesse de la lu
K : cste de Boltzman.

Cette loi traduit bien les variations à basse fréquence, mais diverge comm ν^2. Cette divergence à été connue par « catastrophe ultraviolette »

c : Hypothèse de Planck :

En 1900 Max Planck proposa une hypothèse qui a permet la resolution du problème posé. Le point central de la solution est que l'echange de l'energie entre le rayonnement et la cavité est discontinu. La plus petite quantité d'energie ε (le quantum d'energie) échangé par un rayonnement de fréquence ν est liée à cette frequence par la relation $\varepsilon = h\nu = h\frac{c}{\lambda}$

Après cette quantification d'energie on obtient pour la densité d'energie rayonnée la formule suivante.

$$\mu(T,\nu) = \frac{8\pi}{c^3} \nu^3 \left(\frac{h}{e^{\frac{h\nu}{KT}} - 1} \right)$$

$$= \nu^3 \frac{8\pi h}{c^3} \left(\frac{1}{e^{\frac{h\nu}{KT}} - 1} \right)$$

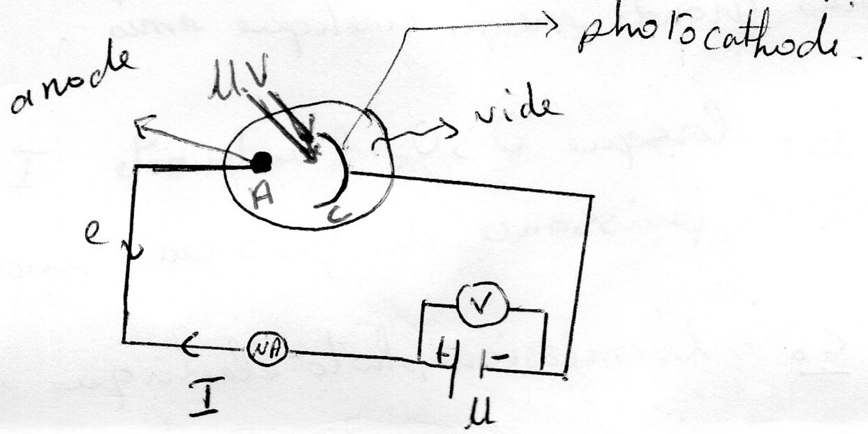
La constante h fut proposé comme nouvelle constante universelle sa dimension est celle d'une action (energie x temps). Les determinations ultérieures de h conduisent à la valeur $h = 6,6253\ 10^{-34}$ J.s nommé par la constante de planck.

La relation était en bonne accord avec les resultats experiment.

2 - <u>Effet photo-électrique</u> : decouverte en 1887 par Hertz

• On appelle effet photo électrique, l'extraction d'electrons de la matière sous l'action d'un rayonnement E.M

• Experience



- La cathode metallique C peut émetre des é par effet photo-électrique lorsqu'elle st éclairreé par un faisceau de lumière de longueurs d'onde convenables

→ l'Application d'une tension variabl entre l'anode A et la cathode C permèt d'accélère les é émis.

- le μA mesure l'intensité I du courant qui traverse le circuit I st proportionnelle au nbre d'électrons qui atteignent l'anode.

- λ est la longueur d'onde dans le vide de la radiation incidente.

. Remarques

<u>a.</u> L'effet photo-électique n'apparait que pour $\lambda \leq \lambda_0$ $(\nu > \nu_0)$ où λ_0 st une caracteristique du métale de C indépendante de la puissance lumineuse reçu par la cathode

on appelle λ_0 : longueur d'onde seuil

ν_0 : fréquence seuil

L'energie cinétique E_c des e' émis et α à la fréquence ν de la radiation incidente mais independante de la puissance de cette radiation incidente. Ça ne peut être expliqué par la théorie ondulatoire classique du rayonnement qui admet que son energie est uniforme (transportée de manière continue) c.à.d qu'une radiation intense devrait communiqué un plus grande énergie cinétique émis.

<u>b.</u> lorsque $\nu > \nu_0$ l'intensité I du courant est proportionnelle à la puissance du faisceau incident.

<u>c.</u> L'emission photo-électrique est instantanee

Supposons qu'on éclaire une surface métalique par une radiation de longueur d'onde $\lambda = 0,4\ \mu m$ (bleu)

Calculons le temps nécessaire t_0 pour éjecter un e' de la surface en utilisant la théorie classique.

Hypothèses:
- Puissance transportée par la radiation $P = 10^{-10}\ w\ cm^2$
- travail de sortie d'1 e' du metal $w_0 = 2\ eV$

  $w_0 = 2 . 1,6 . 10^{-19}\ J.$
- densité surfacique d'atomes $N = 10^{15}\ at/cm^2$

$\boxed{\lambda_0 = 0,62\ \mu m}$

la puissance fournie par atome: $P_a = \frac{P}{N} = \frac{10^{-10}}{10^{15}} = 10^{-25}\ w/at$

$\Rightarrow t_0 = \frac{w_0}{P_a} = \frac{3,2\ 10^{-19}}{10^{-25}} = 3,2\ 10^6 = \frac{3,2 . 10^6}{3600 . 24} = 37$ Jours

donc pour observer l'emission d'un photo-e' il faut 37 jours !! $\Rightarrow$ d'après la théorie classique

Conclusion

La théorie classique est incapable d'expliquer les pts a) et c)

nterprétation d'Einstein 1905

. Postulats.

- Le rayonnement est constitué de particules indivisible de masse nulle appelés - photon - (grain d'énergie)
- Chaque photon correspond à une radiation monochromatique de fréquence ν et possède l'énergie $E = h\nu$

  h est la constante de planck $h = 6,62.10^{-34}$ Js

- Un photon interagit avec un é du metal
- Pour extraire un électron du métal il faut lui fournir une énergie minimale W_0 appellé travail d'extraction. Cette energie minimale peut être fournie ~~par~~ à l'é par un photon de fréquence ν_0 tel que $W_0 = h\nu_0$.
- l'effet photoélectrique ne peut se produire que si le photon incident a l'énergie $h\nu > W_0$. Dans ce cas l'énergie cinétique E_c de l'é émis :

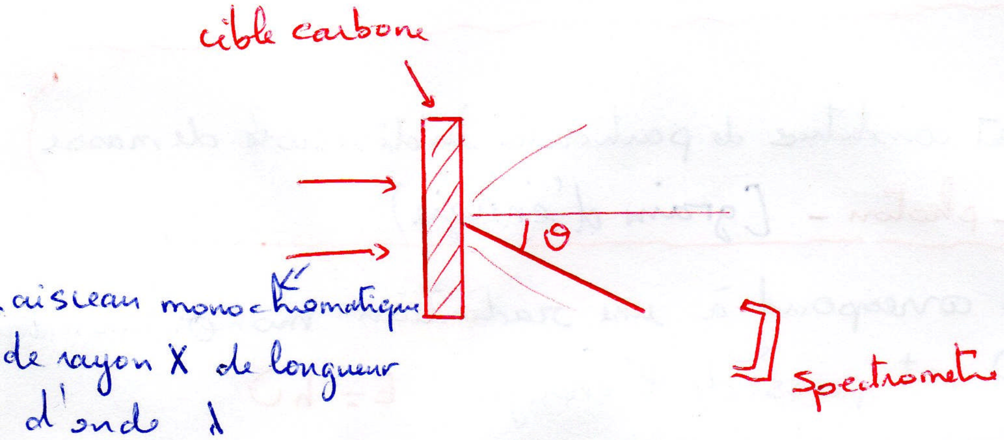
$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 = h\nu - W_0 = h(\nu - \nu_0)$$

Plusieur photon d'energie $h\nu' < h\nu_0$ cumulant leurs energies ne peuvent realiser l'extraction alors qu'un photon d'energie $h\nu \geq h\nu_0$ en est capable.

- le phénomène est instantané

chant...

3 : Effet compton (1923)



Analyse à l'aide du spectromètre de la radiation diffusées dans la direction θ

compton a observé :

* Présence d'un rayonnement de longueur d'onde λ (celle du faisceau incident)
* Présence d'un rayonnement de longueur d'onde λ' avec λ' > λ
* La différence $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$ → dépend de l'angle θ de diffusion
  → ne dépend pas de λ.

* La théorie ondulatoire : du rayonnement est incapable d'expliquer la présence de la radiation λ' :

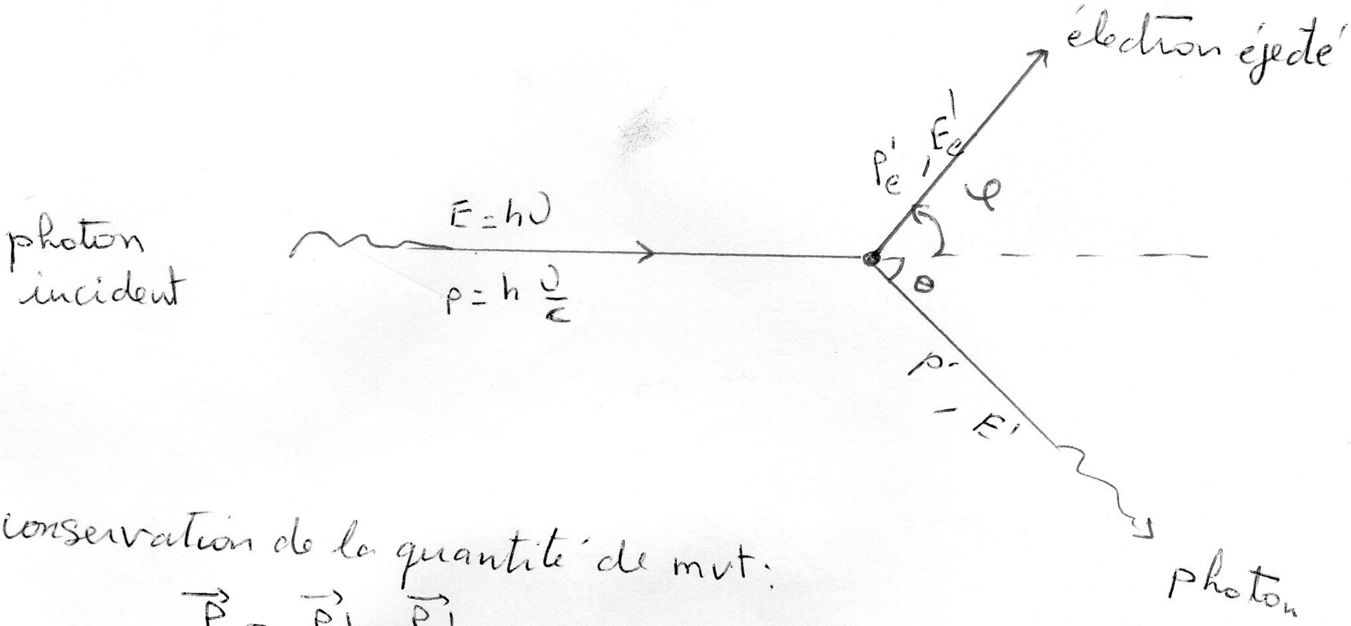
* En terme corpusculaire : le faisceau incident transporte des photons d'energie $E = h\nu = h\frac{c}{\lambda}$

le faisceau diffusé transporte des photons de m̂ energie et des photons d'energie inferieur

$$E' = h\nu' = h\frac{c}{\lambda'}$$

• La diffusion de photons avec perte d'energie constitue l'effet compton.

- Interprétation : Compton a interprété ce phénomène comme une collision d'un photon incident et d'un e^- d'un atome de la cible.



- conservation de la quantité de mvt :

$$\vec{P} = \vec{P'} + \vec{P'_e}$$

($P_e = 0$ car l'e^- est immobile avant la collision)

par projection

$$\begin{cases} \frac{h\nu}{c} = \frac{h\nu'}{c}\cos\theta + P'_e\cos\varphi \quad \ldots (1) \\ 0 = P'_e\sin\varphi - \frac{h\nu'}{c}\sin\theta \quad \ldots (2) \end{cases}$$

pour une particule relativiste la relation entre énergie et quantité de mvt est

$$E^2 = p^2c^2 + m_0^2c^4$$

pour ce qui concerne le photon il se déplace avec ~~la~~ vitesse de la lumière c, cela n'a pas de sens de parler de masse au repos de photon (si le photon avait une masse au repos m_0, et puisque sa vitesse est $= c$, sa masse m devrait être infinie donc : $m_0 = 0$

donc : $p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c}$

- conservation de l'énergie

$$E + E_e = E' + E'_e$$

$$\underbrace{\frac{hc}{\lambda} + m_0c^2}_{} = \frac{hc}{\lambda'} + \sqrt{m_e^2c^4 + p_e'^2c^2} \ldots (3)$$

↳ énergie de masse de l'e^-

$$h\nu + m_e c^2 = h\nu' + \sqrt{m_e^2c^4 + p_e'^2c^2} \ldots (3)$$

revenant avec équations (1) et (2)

$$(1) \Rightarrow p'_e\cos\varphi = \frac{h\nu}{c} - \frac{h\nu'}{c}\cos\theta$$

$$(2) \Rightarrow p'_e\sin\varphi = \frac{h\nu'}{c}\sin\theta$$

$$(1)^2 + (2)^2 \Rightarrow p_e'^2 = \left(\frac{h\nu}{c}\right)^2 + \left(\frac{h\nu'}{c}\right)^2 - \frac{2h^2}{c^2}\nu\nu'\cos\theta$$

$$= \frac{h^2}{c^2}\left(\nu^2 + \nu'^2 - 2\nu\nu'\cos\theta\right) \ldots (4)$$

on écrit alors :

$$\nu^2 + \nu'^2 = (\nu - \nu')^2 + 2\nu\nu' \quad \ldots (5)$$

en substituant dans (4) nous aurons

$$\left(\frac{h}{c}\right)^2 \left[(\nu - \nu')^2 + 2\nu\nu'(1 - \cos\theta)\right] = P_e'^2 \quad \ldots (6)$$

(3) nous donne : $h\nu + m_e c^2 = h\nu' + \sqrt{m_e^2 c^4 + p_e'^2 c^2}$

$$h(\nu - \nu') + m_e c^2 = \sqrt{m_e^2 c^4 + p_e'^2 c^2}$$

$$(3)^2 \Leftrightarrow \left[h(\nu - \nu') + m_e c^2\right]^2 = m_e^2 c^4 + p_e'^2 c^2.$$

$$\Leftrightarrow h^2(\nu - \nu')^2 + \cancel{m_e^2 c^4} + 2 m_e c^2 h(\nu - \nu') = \cancel{m_e^2 c^4} + p_e'^2 c^2$$

$$(3)^2 \Leftrightarrow p_e'^2 = \frac{h^2}{c^2}(\nu - \nu')^2 + 2 m_e h(\nu - \nu') \quad \ldots (7)$$

en identifiant (6) à (7) nous aurons

$$\left(\frac{h}{c}\right)^2 \left[\cancel{(\nu - \nu')^2} + 2\nu\nu'(1 - \cos\theta)\right] = \frac{h^2}{c^2}\cancel{(\nu - \nu')^2} + 2 m_0 h(\nu - \nu')$$

$$\cancel{2}\nu\nu' \frac{h^{\cancel{2}}}{c^2}(1 - \cos\theta) = \cancel{2} m_0 \cancel{h}(\nu - \nu')$$

$$\Rightarrow h\nu\nu'(1 - \cos\theta) = m_0 c^2 (\nu - \nu')$$

$$c\frac{(\nu - \nu')}{\nu\nu'} = \frac{h}{m_0 c} \cdot (1 - \cos\theta)$$

$$c\left(\frac{1}{\nu'} - \frac{1}{\nu}\right) = \frac{h}{m_0 c}(1 - \cos\theta)$$

$$\frac{c}{\nu'} - \frac{c}{\nu} = \frac{h}{m_0 c}(1 - \cos\theta)$$

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c}(1 - \cos\theta) \Rightarrow \boxed{\Delta\lambda = \frac{h}{m_0 c}(1 - \cos\theta)}$$

Nous trouvons

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \lambda_c(1-\cos\theta)$$

avec $\lambda_c = \frac{h}{m_e c} = 2{,}43\ 10^{-2}\ A°$

appelée longueur d'onde Compton

L'effet compton confirme l'hypothèse de l'aspect corpusculaire du rayonnement électromagnétique.

4 Conclusion

- La physique classique est incapable d'expliquer certains phénomènes microscopique de nature atomique.
- Mecanique classique reste exacte dans le domaine macroscopique.
- L'explication de ces phénomènes a conduit les physiciens à introduire la notion de quantication de l'énergie E.M.
- L'effet photoelectrique et Compton montre que le rayonnement est un flux de particule, (les photons)

$\Rightarrow$ En fait les deux aspects corpusculaire et ondulatoire sont complementaire.

Cette association onde particule a été généralisées en 1924 par de Broglie pour les particules materielles.

III : Dualité Onde - Particule et l'hypothèse de de Broglie

1 : Relation de lois de Broglie :

- Une onde est caracterisée par
  - Une frequence ν (pulsation ω)
  - Vecteur d'onde $\vec{K}$: direction de $\vec{K}$ ≡ direction de propagation de l'onde $\|\vec{K}\| = \frac{2\pi}{\lambda}$

- Une particule est caractérisée par
  - L'énergie E
  - La quantité de mouvement $\vec{p}$

On a montré que la lumière est un flux de photon.

Pour un photon : $E = \|\vec{p}\| c$ et $E = h\nu = \hbar\omega$

avec $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ $\Rightarrow \|\vec{p}\| = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$

or : $\lambda = \frac{2\pi}{\|\vec{k}\|}$ $\Rightarrow \|\vec{p}\| = \frac{h}{2\pi} \|\vec{k}\| = \hbar \|\vec{k}\|$

donc $\vec{p}$ et $\vec{k}$ ont la même direction.

En 1923 Luis de de Broglie eut l'idée

2. Hypothèse de de Broglie :

A toute particule, d'énergie E et de quantité de mouvement $\vec{p}$, il est possible d'associer une onde dont la pulsation ω et le vecteur d'onde $\vec{k}$ sont donnés par $\begin{cases} E = \hbar\omega \\ \vec{p} = \hbar\vec{k} \end{cases}$

$\Rightarrow$ longueur d'onde associée à la particule de quantité

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi\hbar}{p} \Rightarrow \boxed{\lambda = \frac{h}{p}}$$

3. Exemples de calcul de longueur d'onde associées :

- Personne de masse 80 kg et vitesse $v = 20\,km/h$

$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$; $\lambda = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3600}{80 \cdot 20 \cdot 10^{3}}$

$\lambda = 14,9\ 10^{-37}$ $\ll$ dimension de la personne $\Rightarrow$ aspect ondulatoire est strictement negligeable.

$\Rightarrow$ le mouvement d'une personne est très bien décrit par la mecanique classique.

• Pour un grain de sable de masse $m = 10^{-15}$ kg et vitesse $V = 1$ mm/s

$$\lambda = \frac{h}{mV} = \frac{6,62\,10^{-34}}{10^{-15} \cdot 10^{-3}} \Rightarrow \lambda = 6,62\,10^{-16}\,m = 6,62\,10^{-10}\,\mu m$$

une valeur impossible à mètre en évidence expérimentalement
⇒ L'aspect ondulatoire negligeable devant l'aspect corpusculaire pour une particule macroscopique évolue dans un espace macroscopique.

• Pour un e^- de masse $9,1\,10^{-31}$ accéléré par une D.D.P $U = 400V$
énergie cinétique $E = eV = \frac{p^2}{2m}$ (e^- non relativiste)

$E_c = 400\,eV \Rightarrow p = \sqrt{2mE_c}$ et $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2mE_c}}$

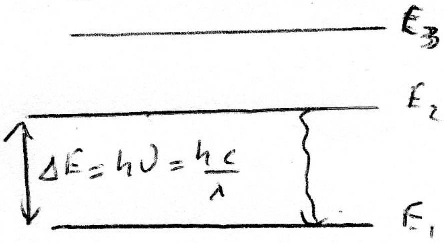
on trouve $\lambda = 0,6\,A°$.
Cette longueur d'onde est comparable aux dimension de l'atome et à celle des rayon X.

IV : Expérience de Franck et Hertz : 19 4 :

Dans cette expérience on bombarde des atomes de Mercure Hg avec des e^- possédant une énergie cinétique T bien définie.
On observe un effet seuil ! si T est au dessous d'une certaine valeur ΔE les électrons entre e^- et atome sont toutes élastiq. si $T > \Delta E$ certaines collisions sont inelastique. avec une perte d'énergie cinétique totale exactement égale $\Delta E = 4,9\,eV$
L'interprétation en terme de niveaux d'énergie atomique est très claire : $\Delta E = E_2 - E_1$ est la différence d'énergie entre le niveau fondamental E_1 de l'atome et le premier niveau accessible E_2. Au départ les atomes ne sont pas excités, il sont dans leurs niveau d'énergie fondamental E_1

si $T < E_2 - E_1$, l'energie cinetique de l'election est insuffisante pour faire passer l'atome à son premier état excité et il n'y a aucun transfert de l'energie cinetique de l'e' vers l'atome. Des que $T \geq E_2 - E_1$ un tel transfert est possible.

si T devient très grande d'autre transition sont permises



. Les atomes de mercure emettent un rayonnement ultraviolet de longueur d'onde $\lambda = 253,7\,nm$

si l'energie $T > 4,9\,eV$

Cette longueur d'onde satisfait $h\nu = 4,9\,eV$, et elle est connue depuis longtemps dans la spectroscopie comme raie de mercure. (confirmation des idées de Bohr)

L'experience est la première demonstration experimentale de la quantification d'energie dans les atomes. Elle valut à ses auteurs James Franck et Gustav Hertz le prix Nobel en 1925.