Résumé du cours d'Introduction à la Physique Quantique.

Quantification, notion de photon :

Différentes observations expérimentales ont conduit à un modèle corpusculaire de la lumière qui avait été proposé par Max Planck dès 1900 dans le cadre de la théorie du corps noir : la lumière est vue comme constituée de particules élémentaires, les photons, transportant l'énergie de façon quantifiée.

Chaque photon transporte une énergie individuelle $E = h.\upsilon$ proportionnelle à la fréquence υ du rayonnement associé, avec pour constante de Planck : $h = 6{,}6262.10^{-34}$ J.s. (Relation de Planck).

Soit une énergie $E = h.c/\lambda$ où $c = 2{,}998.10^{8}$ m.s^{-1} est la vitesse de la lumière dans le vide et λ la longueur d'onde.

Ces photons sont sans masse (m = 0) mais possède une quantité de mouvement quantifiée de module $p = E/c = h/\lambda$. Le vecteur quantité de mouvement a pour direction la direction de propagation de l'onde associée à la particule.

Ce modèle corpusculaire permet est nécessaire pour interpréter certains phénomènes (effet photoélectrique, diffusion de Compton…) où l'on doit envisager une interaction individuelle photon-électron.

Diffraction et interférences pour des particules quantiques.

Des expériences conduites avec des particules matérielles (électrons pour la diffusion par un cristal métallique dans l'expérience de Davisson et Germeer…) montrent des situations de diffraction et, plus récemment, d'interférences. En 1924, De Broglie propose d'associer à une particule matérielle de masse m et quantité de mouvement p une onde de probabilité de longueur d'onde $\lambda = h/p$.

Des expériences conduites à la fin du 20° siècle montrent l'existence de phénomènes d'interférence pour la lumière (photons) mais aussi pour des particules matérielles (électrons, atomes, molécules…), dans des situations à particules uniques : les particules traversent individuellement le système interférentiel.

En associant à la particule une onde de probabilité, représentée mathématiquement par la fonction d'onde $\psi(M,t)$. Cette fonction, à valeurs complexes, donne accès à la densité de probabilité de présence de la particule au point M et à l'instant t : $p(M,t) = dP/d\tau = |\psi(M,t)|^2 = \psi(M,t).\psi^*(M,t)$

Ψ^* est le conjugué de ψ.

Le déplacement de la particule se traduit par la propagation de cette onde de probabilité. En tant qu'onde, celle-ci peut subir des phénomènes de diffraction ou d'interférences.

C'est uniquement lors de l'interaction avec un capteur que la particule est identifiée et localisée, avec une probabilité de détection qui est décrite par le biais de la fonction d'onde $\psi(M,t)$.

Indétermination quantique.

L'aspect probabiliste des particules quantiques se traduit par une indétermination quantique sur l'état de la particule, en particulier sur sa position et sa quantité de mouvement.

Pour une grandeur X, l'indétermination quantique ΔX est l'écart quadratique moyen défini selon :

$$(\Delta X)^2 = \langle (X - \langle X \rangle)^2 \rangle = \langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2$$

L'inégalité de Heisenberg explicite une relation d'indétermination liant la position x le long d'un axe (Ox) et la composante p_x de la quantité de mouvement sur cette direction :

$$\Delta x.\Delta p_x \geq \frac{h}{4\pi} = \frac{\hbar}{2}$$

La quantité « h barre » ħ = h/2π vaut pratiquement 1.10^{-34} J.s.

Remarque : une autre relation d'indétermination, hors programme, lie l'énergie E de la particule et l'instant t de sa mesure par :

$$\Delta E.\Delta t \geq \hbar$$

Cette indétermination quantique ne sera observable que dans des situations expérimentales où l'incertitude de mesure U(X) sur la variable X est inférieure à l'indétermination quantique ΔX. C'est par exemple le cas dans les expériences d'interférence à photon ou à particule unique, où la figure d'interférences est constituée des impacts successifs enregistrés sur le capteur, et qui se répartissent sur l'ensemble de la surface du capteur.

Particules quantiques confinées, oscillateur quantique.

Les résultats précédents amènent à montrer qu'une particule quantique confinée dans un espace restreint présentera une énergie cinétique minimale. Pour une particule confinée sur un intervalle de position de largeur L, l'énergie cinétique minimale sera $E_{cmin} = \hbar^2/(2mL^2)$.

De même, la relation d'indétermination de Heisenberg permet d'établir un minimum pour l'énergie d'un oscillateur quantique placé dans un puits de potentiel parabolique ($E_p = kx^2/2 = m\omega_o^2x^2/2$, où ω_o est la pulsation propre de l'oscillateur). Le calcul de l'énergie mécanique, constante, de ce modèle amène une énergie supérieure à $E_{min} = \hbar\omega_o/2$.

Particules quantiques confinées dans un puits infini.

On envisage le cas d'une particule quantique astreinte à rester cantonnée dans un intervalle de positions de largeur L, soumise à une énergie potentielle nulle dans cet intervalle et devenant infini au-delà (puits infini). La fonction d'onde ψ(x,t) étant continue, elle doit s'annuler aux extrémités de cet intervalle.

La recherche de solutions stationnaires pour la fonction d'onde de probabilité ψ(x,t) amène, par analogie à la vibration d'une corde fixée entre deux points (corde de Melde) à ne retenir que des ondes stationnaire dont la longueur d'onde λ répond à L = n.λ/2 où n est un entier naturel non nul.

L'énergie totale de la particule confinée dans le puits se limite à son énergie cinétique $E_c = p^2/2m$, puisque son énergie potentielle y est nulle. L'introduction de la relation de De Broglie λ = h/p amène finalement une expression de son énergie totale :

$$E = \frac{h^2}{8mL^2}.n^2$$

L'énergie apparaît quantifiée par le nombre quantique n.

Des transitions entre ces niveaux quantiques sont envisageables, soit par l'absorption d'un photon d'énergie E = hυ, soit par le don de cette quantité d'énergie amenant l'émission d'un photon.

La variation d'énergie ΔE subie par le système quantique entre les niveaux n_i et n_f répond donc au bilan :

$$\Delta E = \frac{h^2}{8mL^2}.\left(n_f^2 - n_i^2\right) = h\upsilon \left(absorption,\ n_f > n_i\right)$$

$$ou\ \Delta E = \frac{h^2}{8mL^2}.\left(n_f^2 - n_i^2\right) = -h\upsilon\ (émission,\ n_f < n_i)$$