

# « La science quantique : une vision singulière » :

Spring 2025, 3 ECTS, BA6 et MA2 pour SMT (en français).

## 1) Photons

- ondes et interférences, équation d'onde (Maxwell)
- effet photoélectrique, détection de photons singuliers
- fentes de Young , nombres aléatoires, polarisation
- dualité onde/particule
  - Planck ; De Broglie ; effet compton, tweeser optique, cooling of atoms
  - Paquet d'ondes, propagation,
  - Incertitudes de Fourier pour ( $k \cdot x$ ) et pour ( $w \cdot t$ )
  - Amplitude et intensité, lumière cohérente, incohérente

## 2) Électrons :

- Fentes de Young pour les électrons singuliers: onde/particule
- Fonction d'onde, opérateurs,  $X$ ,  $P$
- Equation de Schrödinger et Hamiltoniens
- Solutions de l'équation de Schrödinger : propagateurs, modes propres
- Paquet d'onde dans le vide (microscope elect.)
- Interférences : effet Bohm-Aharonov, phase de Berry
- Opérateurs
- Mesures singulières
- Moyennes, Variances et incertitudes(par intégrales sur des fonctions)

## 3) Formalisme A:

- Bra- Ket,
- Etats propres, états superposés, états mixtes
- produit scalaire, probabilités et intensité, probabilités normées
- mesures singulières
- produit externe, projecteurs,  
moyennes et opérateurs de mesure moyenne,
- exemples : polarisation et matrices de Pauli,  
Niveaux atomiques, pendules couplés
- variances et incertitudes par matrices et Bra-Kets

## 4) Propagation et trous de potentiel:

- Réflexion
- Tunnel
- Trou de potentiel : rectangulaire, atome de Bohr
- Oscillateur harmonique : potentiel quadratique
- Potentiels couplés (par diagonalisation)
- Molécules

## 5) Formation de bandes et hétérostructures:

- Double trou de potentiels couplés
- potentiel périodique (cristal) et formation de bandes
- métal / oxyde / semiconducteur, graphène
- homostructures

- hétérostructures : schémas de bandes
- hétérostructures : matériels
- PIN photodiodes, guide d'onde et lasers
- quantum well, quantum wires, quantum dots, QLED
- HBT, HEMT,
- quantum cascade lasers, QWIP

6) **Densité d'états, statistiques et applications :**

- densité d'état 3D pour les électrons et pour les photons
- densité d'état 2D, 1D, 0D pour les électrons et les photons
- Binomiale/ Poisson
- Boltzmann
- Bose-Einstein
- Fermi-Dirac
- Semiconducteurs : Concentration n et p
- Photons : Corps noir : Planck, Steffen-Boltzmann
- Quantum point contact

7) **Formalisme B**

- commutateurs
- théorème d'Ehrenfest (évolution des moyennes), lois de conservation
- Cauchy, incertitudes généralisées
- Base commune de deux opérateurs
- density matrix,
- Trace et moyenne d'un opérateur
- propagateurs

8) **Oscillateur harmonique**

- Oscillateur mécanique : écriture normalisée
- Evolution des moyennes par le théorème d'Ehrenfest
- Opérateurs de création et d'annihilation
- Hamiltoniens
- Résonateurs LC
- Résonateurs électro-magnétique (E,B)
- Modes cohérents.

9) **« Qubits »**

- Systèmes à deux états et matrices de Pauli
- Sphère de Bloch
- Hamiltonien : solution par matrices de Pauli
- Fréquence de Larmor
- Référentiel tournant et fréquence de Rabi
- Paire de qubits
- produit tensoriel de vecteur (vecteurs Alice/Bob), états produit, états intriqués,
- Produit tensoriel de matrices (Opérateurs Alice-Bob), corrélations.

10) **Qubits optiques A:**

- single qubits optiques et sphère de Bloch, émission et détection
- mesures par polariseurs
- manipulations par lames biréfringentes, Hadamard
- lumière incohérente, intérieur de la sphère de Bloch
- Beam splitters et effet HOM

11) **Qubits optiques B :**

- paire de qubits optiques, intrication, CNOT
- génération et décomposition des états de Bell
- paradoxe EPR, Bell inégalité
- crypto, téléportation

12) **Coupleurs**

- Coupleurs 2x2, symétriques, asymétriques, couplage AC
- Jonction de Josephson
- Formation de bandes
- Couplage qubit/qubit résonnant
- Couplage résonateur/qubit résonant et non-résonant
- Interaction lumière-matière

13) **Qubits supraconducteurs**

- Résonateurs LC
- SQUIDS
- qubits supraconducteurs,
- mesures en résonance
- Mesures en régime dispersif (mesures quantum non demolition)
- contrôle d'un single transmon  $\sigma_z$
- Contrôle d'un single transmon  $\sigma_{x,y}$
- paire de transmons
- setup de mesure : fréquence de Rabi, relaxation, décohérence

14) **Spin :**

- résonance magnétique (MR)
- spectromètre MR, Free Induction Decay (FID)
- Relaxation et décohérence, spin-écho
- spin qubits électroniques
- Quantum Point Contact et mesure de spin Qubits
- spin qubits : initier, manipuler et détecter
- paire de spin qubits

**Résumé : Quantisations**

- Atome de Bohr : quantisation des niveaux, du moment cinétique, magnéton de Bohr
- Formation de bandes
- oscillateurs harmoniques : phonon, LC et EB
- Qubits : optiques, transmons, spin qubits,

- Squids (quantum de flux magnétique)
- conductance quantique