Résumé du cours 1975 - 76

Le cours de cette année a été consacré à une étude comparative de divers traitements théoriques du processus d'émission spontanée. Il s'agissait de présenter, à propos de cet exemple simple, diverses descriptions possibles du comportement irréversible d'un petit système (ici l'atome) couplé à un grand réservoir (ici le champ de rayonnement).

1) On a commencé par considérer le modèle le plus simple possible où le problème de l'émission spontanée est ramené à celui de l'évolution d'un état discret unique couplé à un continuum unique. L'intérêt d'un tel modèle est qu'il est suffisamment simple pour qu'on puisse mener les calculs jusqu'au bout. On peut alors avoir une idée précise des déviations par rapport au comportement exponentiel prévu par les méthodes approchées et comprendre le rôle des différents paramètres physiques (largeur du continuum, intensité du couplage...).

Après un bref rappel des méthodes perturbatives et du traitement de Weisskopf-Wigner qui permet d'introduire simplement les notions de durée de vie, "Lamb-shift"..., on montre tout l'intérêt qu'il y a à passer de l'espace des temps à l'espace des fréquences. L'équation integrodifférentielle à laquelle conduit l'équation de Schrödinger se transforme en effet en une équation algébrique, beaucoup plus commode à étudier. Une méthode simple de résolution de cette équation, basée sur une construction graphique, est alors présentée. Elle permet de suivre le comportement du système lorsque, partant d'un continuum très large et d'un couplage très faible, on diminue progressivement la largeur du continuum en augmentant l'intensité du couplage. On retrouve bien sur au début les résultats de la théorie de Weisskopf-Wigner, mais avec des corrections au comportement exponentiel aux temps courts (la probabilité de transition varie en t^2 et non en t) et surtout aux temps longs (la décroissance est en $1/t^n$ et non exponentielle). Puis, lorsque la largeur du continuum décroit et que l'intensité du couplage croit, on voit apparaitre des oscillations amorties dont l'amplitude croit progressivement pour devenir prépondérante à la limite d'un couplage très intense avec un continuum très étroit. On retrouve ainsi, dans cette autre limite, le résultat bien connu de la précession de Rabi entre 2 états discrets couplés par une perturbation.

Le traitement présenté dans cette 1ère partie permet ainsi de comprendre comment on passe continûment de la précession de Rabi à la décroissance exponentielle de Weisskopf-Wigner.

2) Le problème de la préparation de l'état initial, à savoir l'état propre discret de H_o, est ensuite abordé dans le cadre de l'étude de la diffusion résonnante. L'une des façons les plus simples de préparer un état atomique excité consiste en effet à envoyer sur un atome dans l'état fondamental une impulsion lumineuse résonnante aussi brève que possible.

L'amplitude de diffusion est calculée (sans approximations) dans le cadre du modèle simple précédent et l'existence d'une résonance étroite dans la section efficace de diffusion est mise en évidence. La connaissance de l'amplitude de diffusion pour chaque valeur de l'énergie permet également d'étudier la diffusion d'un paquet d'ondes au voisinage immédiat de la résonance. Les résultats obtenus sont appliqués à l'interprétation de diverses expériences récentes (diffusion légèrement hors-résonance, battements quantiques apparaissant lorsque l'état excité a une structure...). On montre également que, même avec les impulsions lumineuses les plus brèves que l'on sache réaliser actuellement, l'observation de décroissances non-exponentielles en physique atomique reste un problème très difficile.

3) Afin d'améliorer le modèle simple précédent et de pouvoir tenir compte éventuellement de l'existence de plusieurs niveaux discrets et de plusieurs continuums, on introduit alors la méthode des opérateurs de projections qui permet de concentrer le calcul sur les éléments de matrice intéressants de l'opérateur d'évolution.

Diverses expressions algébriques sont établies et appliquées à quelques problèmes physiques : établissement de l'hamiltonien effectif (non nécessairement hermitique) décrivant l'évolution de plusieurs états discrets, proches les uns des autres et couplés à un même continuum, effet des dégénérescences Zeeman sur l'émission spontanée. Le problème des cascades radiatives, qui fait intervenir plusieurs continuums couplés les uns aux autres, reçoit une attention particulière. On montre comment l'interférence entre des cascades différant par l'ordre des photons émis peut modifier la répartition spectrale du rayonnement émis. Le cas de l'oscillateur harmonique, ou ces interférences jouent un rôle particulièrement important par suite de l'équidistance entre les niveaux d'énergie, est étudié en détail.

4) Lorsqu'on veut étudier l'émission spontanée d'un système de plusieurs atomes, ou, plus généralement, lorsqu'on s'intéresse à l'évolution d'un système S, plus compliqué qu'un seul atome, couplé à un grand réservoir, les méthodes précédentes conduisent à des calculs trop compliqués parce que donnant trop d'informations (états de S et de R, corrélations entre S et R...). Il peut être plus avantageux de concentrer les efforts sur le calcul de l'évolution de la matrice densité réduite décrivant le comportement du système S. Une telle équation d'évolution porte le nom "d'équation pilote" et c'est à l'étude détaillée d'une telle équation qu'est consacrée la dernière partie du cours.

On commence par introduire les propriétés essentielles de l'espace de Liouville d'un système quantique (espace des opérateurs de ce système). L'équation d'évolution de la matrice densité du système global S+R a, dans cet espace, une forme très simple, de même que l'opération de trace partielle par rapport à R, à laquelle est associé un opérateur de projection. On montre que les résultats obtenus plus haut concernant le passage de l'espace des temps à l'espace des fréquences et les opérateurs de projection peuvent être aisément généralisés à l'espace de Liouville et conduisent à des équations exactes compactes décrivant l'évolution au cours du temps de la matrice densité réduite de S. L'intérêt de ces expressions est qu'elles se prêtent particulièrement bien à des approximations dont les conditions de validité apparaissent clairement : développement en puissances du couplage entre S et R qui converge si le temps de corrélation τ_c de l'interaction entre A et R est suffisamment court ; approximation de mémoire courte (τ_c court devant le temps de relaxation T) qui permet de remplacer l'équation integrodifférentielle à laquelle se réduit l'équation pilote par une équation différentielle.

Afin d'analyser le contenu physique de l'équation pilote, l'équation d'évolution de chaque élément de la matrice densité de S est écrite explicitement dans un cas simple (spectre discret non-dégénéré pour S). Des méthodes diagrammatiques sont introduites pour calculer rapidement les différents coefficients de l'équation pilote. Les taux de transfert entre les différents niveaux de S sont déterminés et interprétés physiquement. On montre comment S atteint l'équilibre thermodynamique en interagissant avec un réservoir R lui-même en équilibre. Le déplacement et l'élargissement des diverses transitions de S sous l'effet du couplage avec R sont également analysés.

Une étude détaillée de l'effet des corrélations apparaissant entre S et R est finalement présentée. On montre que ces corrélations jouent un rôle essentiel pour faire évoluer S mais qu'elles ne durent qu'un temps très court de l'ordre de τ_c. Dans le même ordre d'idées, une formule compacte est établie pour les fonctions de corrélation de S qui permet de comprendre clairement les approximations utilisées dans l'établissement du "théorème de régression quantique".

5) Le formalisme de l'équation pilote, ainsi développé, est alors appliqué à un premier problème concret : celui de l'oscillateur harmonique amorti. S est un oscillateur harmonique, R un grand ensemble d'oscillateurs, de toutes fréquences, en équilibre thermodynamique.

L'équation pilote de S est établie et permet d'étudier en détail l'amortissement de l'énergie et de l'amplitude d'oscillation de S. La projection de l'équation pilote sur la base des états cohérents de l'oscillateur harmonique, introduits et étudiés en détail dans le cours de l'année antérieure, permet de faire le lien avec la mécanique statistique classique. L'opérateur densité est représenté dans cette base par une "densité de quasi-probabilité" $P(\alpha)$ qui obéit à une équation de Fokker-Planck, décrivant la manière dont $P(\alpha)$ évolue et diffuse dans le plan complexe sous l'effet du couplage avec R.

6) Une deuxième application du formalisme de l'équation pilote à l'étude de l'émission spontanée d'un grand moment cinétique est alors présentée. La motivation d'une telle étude est que le problème de l'émission spontanée de rayonnement par un ensemble de 2N atomes à 2 niveaux initialement tous excités dans le niveau supérieur (supperradiance) peut être ramené, dans certaines conditions, à celui de l'émission spontanée de rayonnement par un moment cinétique $J = N$, préparé initialement dans l'état $|J,J\rangle$. Après une discussion qualitative du lien entre le problème étudié et celui de la superradiance, l'équation d'évolution de $\langle J_z \rangle$ (énergie moyenne du moment cinétique) est établie et résolue de manière approchée. On montre que l'énergie émise par unité de temps (proportionnelle à $-\frac{d}{dt}\langle J_z \rangle$ par suite de la conservation de l'énergie) a la forme d'une impulsion. La dépendance en J de la hauteur, de l'abcisse et de la largeur de cette impulsion est établie, ce qui permet de comprendre la dépendance en N de l'énergie, du délai et de la largeur d'une impulsion supperradiante.

Thème général du cours 1976-77

Interactions résonnantes ou quasi-résonnantes d'un atome ou d'une molécule avec une ou plusieurs ondes électromagnétiques intenses et monochromatique.

Motivations d'un tel choix

① Introduire et discuter à propos de ce problème particulier un certain nombre de problèmes plus généraux

a) Problème d'un petit système (ici l'atome ou la molécule) couplé à un grand système (ici l'onde électromagnétique intense incidente) qui, à la différence des "thermostats" à mémoire très courte étudiés l'an dernier, a une mémoire très longue (l'onde, quasimonochromatique, est supposée avoir un temps de cohérence très long).

Difficulté qu'il y a à séparer simplement l'évolution du petit système de celle du gros par suite des corrélations qui apparaissent entre eux et de la longueur du temps de mémoire.

Intérêt qu'il y a à considérer le petit système et le gros en interaction comme formant un tout (image de l'atome habillé par des photons). Etude de l'évolution d'un tel système global (diagonalisation de l'hamiltonien global indépendant du temps), ce qui permet ensuite de décrire simplement l'évolution du petit système.

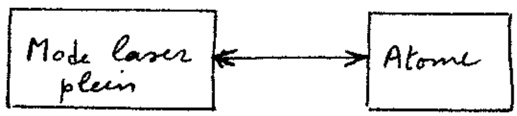

Fig 1

b) Liens avec la théorie des perturbations dépendant du temps dans le cas d'une perturbation sinusoïdale

Interprétation corpusculaire des diverses résonances.

Reinterprétation quantique de certaines methodes de résolution de ce problème (methode de Floquet-Shirley, états quasi-stationnaires, quasi-énergies ...)

Traitement plus commode des processus d'ordre supérieur (déplacements radiatifs, processus multiphotoniques ...)

c) Problème du bruit

Le système introduit sur la figure 1 (atome habillé) n'est en réalité pas isolé du monde extérieur

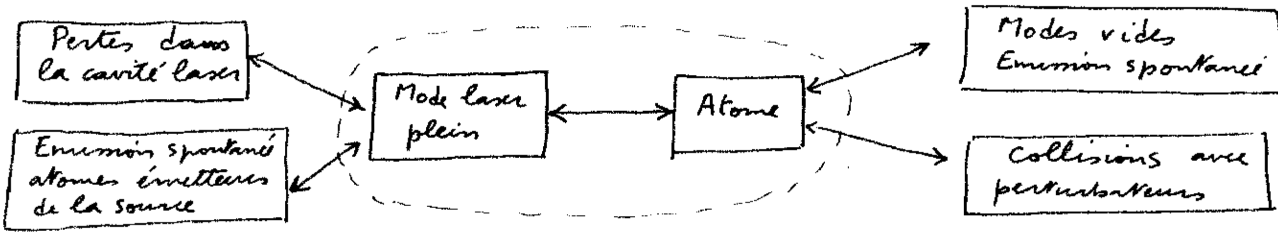

Fig. 2

La plupart des couplages supplémentaires représentés sur la figure 2 ont une mémoire très courte, de sorte que les traitements par équations pilote discutés l'an dernier leur sont applicables.

Une autre méthode qui n'a pu, par faute de temps, être étudiée l'an dernier, sera présentée : équations de Heisenberg et forces de Langevin.

Intérêt essentiel : images physiques simples, calcul simple des fonctions de corrélation

d) Problème des signaux de détection optique.

Que mesure-t-on exactement avec un photomultiplicateur, un appareil interférentiel (comme un Fabry-Pérot), un corrélateur d'intensité ... ?

② <u>Présenter un traitement synthétique et quantitatif des processus d'absorption et d'émission induite de photons par un système atomique.</u>

- Traitement s'appliquant aussi bien à la spectroscopie des radiofréquences qu'à la spectroscopie optique.
- Perturbations liées aux hautes intensités de l'onde incidente

  Déplacement et élargissement des résonances

  Importance pour tirer des résultats expérimentaux des informations atomiques ou moléculaires précises.
- Rôle de l'émission spontanée.

  Négligeable dans le domaine RF, importante dans le domaine optique.

  Nécessité d'un traitement quantitatif (allant plus loin que la règle d'or de Fermi)

  [Les effets radiatifs de QED : g-2, Lamb-shift ... ne seront pas abordés cette année]

- Effets de saturation.

 Etude des phénomènes nouveaux apparaissant lorsqu'on sature une transition atomique.

 Saturation de l'absorption, effet Stark dynamique, Fluorescence en champs intenses ....

- L'effet Doppler.

 Introduction simple de l'effet Doppler dans le formalisme de l'atome habillé

 Etude de diverses méthodes permettant de supprimer l'effet Doppler dans le domaine optique : absorption saturée, transitions multiphotoniques ...

- Aperçu sur les collisions en champs résonnants intenses.

Problèmes non abordés

- Photoionisation et ionisation multiphotoniques

 On se limitera à des transitions entre états discrets

- Description de la source lumineuse

 On négligera la réaction de l'atome sur la source

 On n'entrera pas dans le détail du fonctionnement de la source (couplages de la partie gauche de la figure 2) et on la considérera plutot comme délivrant un champ dans un état quasi-classique (source RF ou laser très au dessus du seuil).

 Point de vue du spectroscopiste plutot que celui du théoricien du laser.

- On se limitera à des jets atomiques ou à des vapeurs très diluées de manière à pouvoir négliger des effets coopératifs (superradiance ...)