

21.10.03

**Cours 2003 - 2004**

**INTERACTIONS ATOMES - PHOTONS**  
**BILAN ET PERSPECTIVES**

## Buts du cours 2003-2004

Présenter un bilan des développements importants survenus au cours des dernières décennies dans

- la compréhension
- la description
- l'utilisation

des interactions atomes - photons

Analyser l'évolution des idées dans ce domaine et essayer de comprendre la genèse des développements survenus

Discuter les nouvelles perspectives, les nouveaux domaines de recherche qui semblent s'ouvrir à la suite de ces développements

# Introduction générale

## 1 – Essai de classement des divers développements de ce domaine de recherche

Plusieurs motivations apparaissent à la base des travaux portant sur l'étude et l'utilisation de l'émission et de l'absorption de rayonnement par les atomes

Classement basé sur ces motivations

## 2 – Quelques idées directrices pour décrire l'effet des interactions atomes - photons

- Identification des diverses étapes d'une expérience  
Préparation – Évolution – Détection
- Lois de conservation
- Comparaison des diverses échelles de temps

# L'émission et l'absorption de rayonnement par les atomes :

- Une source d'informations sur la structure et la dynamique des atomes
- Une source de perturbations pour ces atomes
- Un *banc d'essai* pour élaborer et tester diverses approches théoriques
- Des systèmes simples pour tester les théories fondamentales
- Un cadre simple pour étudier des effets d'ordre supérieur et des méthodes non perturbatives
- Un outil pour *manipuler* les atomes et pour contrôler leur polarisation, leur position, leur vitesse
- Un moyen commode pour préparer des états quantiques intéressants

# **INTERACTIONS ATOMES - PHOTONS**

**UNE SOURCE D' INFORMATIONS  
SUR LES ATOMES**

# Émission et absorption de photons



$$E_b - E_a = h\nu$$

Conservation de l'énergie

Principe de la spectroscopie : La mesure de  $\nu$  au moyen d'un spectromètre permet de déterminer  $E_b - E_a$

- Identification des constituants d'un milieu
- Sonde des propriétés de ce milieu
- Tests des interactions responsables de ce spectre

# Les progrès de la spectroscopie

## Nouveaux types de signaux

Corrélations temporelles du champ. Spectroscopie de Fourier

$$\overline{E(t)E(t + \tau)} = \text{Transformée de Fourier de } I(\omega)$$

Corrélations d'intensité

$$\overline{I(t)I(t + \tau)} \quad \text{Effet Hanbury-Brown et Twiss}$$

Développements instrumentaux

Réseaux, lames minces, interféromètres Fabry-Pérot...

## Nouveaux domaines de fréquence

- Spectroscopie radio-fréquence et micro-ondes
  - Jets atomiques et moléculaires – Franges de Ramsey
- Les méthodes optiques
  - Double résonance et pompage optique
- Spectroscopie UV et X
  - Rayonnement synchrotron
- La révolution introduite par les sources laser

# L'impact des lasers

- Sources monochromatiques, intenses, accordables
  - La spectroscopie laser
  - Exemple d'étude nouvelle : isotopes radioactifs
- Spectroscopie non linéaire
  - Absorption saturée
  - Transitions à plusieurs photons
  - Effet Raman stimulé
- Optique non linéaire
  - Mélange d'ondes
  - Génération d'harmoniques
- Spectroscopie résolue dans le temps
  - Battements quantiques . Femtosecondes
- Mesure de fréquences optiques
  - Peignes de fréquence
- Les « lasers de table » de très grande puissance

# La barrière de l'effet Doppler surmontée

$$\frac{\Delta \nu}{\nu} = \frac{v}{c} \simeq 10^{-6} \text{ à température ambiante}$$

- Effet Doppler négligeable dans le domaine RF
- Non négligeable dans le domaine micro-ondes
  - Éliminé grâce à l'effet Dicke
- Excitation optique d'un jet atomique à angle droit
- Spectroscopie laser non linéaire
  - Absorption saturée
  - Transitions à 2 photons sans effet Doppler
- Atomes ultrafroids
  - Élimination des effets Doppler du 1<sup>er</sup> et 2<sup>ème</sup> ordres
- Effet Mössbauer – Effet Lamb-Dicke

# **INTERACTIONS ATOMES - PHOTONS**

## **UNE SOURCE DE PERTURBATIONS POUR LES ATOMES**

# Perturbations des niveaux d'énergie atomiques

## Élargissement et déplacement des niveaux d'énergie atomiques par la lumière

2 effets qui sont le pendant pour l'atome des effets bien connus d'absorption et de dispersion pour le photon

Effets perturbateurs dont il faut tenir compte en spectroscopie de haute résolution

Peuvent être transformés en un avantage pour la manipulation des atomes

- Pièges laser dans des gradients spatiaux de déplacements lumineux
- Miroirs pour atomes avec les déplacements lumineux associés à une onde évanescente
- Réseaux optiques

# Effets stimulés et effets spontanés

Comparaison entre les effets perturbateurs d'une excitation optique ou radio-fréquence

- Déplacements lumineux
- Modification du facteur  $g$  d'un atome

et les corrections radiatives dans le vide de photons

- Déplacements de Lamb
  - Anomalie  $g-2$  du spin de l'électron
- 
- Peut-on comprendre ces corrections radiatives comme étant dues aux fluctuations du vide?
  - Faut-il faire aussi intervenir la réaction de rayonnement?
  - Quels sont les effets véritablement quantiques?

# **INTERACTIONS ATOMES - PHOTONS**

**UN BANC D' ESSAI POUR ÉLABORER ET TESTER  
DIVERSES APPROCHES THÉORIQUES**

## Méthodes perturbatives

- Termes d'ordre le plus bas
- Opérateurs de projection. Résolvante

## Équation pilote pour l'opérateur densité

Équations de Bloch optiques

## Équations de Heisenberg-Langevin

Calcul des fonctions de corrélation

## L'atome habillé

L'atome et les photons RF ou optiques interagissant avec lui considérés comme un système global décrit par un Hamiltonien indépendant du temps

## Fonctions d'onde stochastiques

Description de l'évolution d'un système quantique soumis à des processus dissipatifs comme une suite de périodes d'évolution cohérente séparées par des sauts quantiques

**INTERACTIONS ATOMES - PHOTONS**

**DES SYSTÈMES SIMPLES POUR TESTER**

**LES THÉORIES FONDAMENTALES**

# Corrections radiatives

- Découverte de déviations par rapport aux prédictions de l'équation de Dirac
  - Déplacement de Lamb. Anomalie g-2
- Développement de l'électrodynamique quantique
  - La renaissance de la physique atomique après la seconde guerre mondiale
- Mesures de plus en plus précises de ces corrections
  - Electron unique piégé
  - Spectroscopie laser
- Étude de systèmes "exotiques"
  - Positronium, Muonium, Ions multichargés
  - Sensibilité aux autres interactions
- Mesure des constantes fondamentales
  - Constante de Rydberg, de structure fine

# Non conservation de la parité en physique atomique

- Unification des interactions électromagnétiques et faibles  
Le noyau et les électrons d'un atome peuvent échanger, non seulement un photon, mais aussi un boson vectoriel neutre  $Z_0$ . L'interférence entre les 2 amplitudes correspondantes conduit à une violation de la symétrie droite gauche dans les atomes.
- Suggestion de la possibilité de détecter optiquement un tel effet sur des transitions interdites d'atomes lourds  
**Marie-Anne et Claude Bouchiat, 1974**
- Observation expérimentale de la violation de parité sur Cs  
Première observation: ENS, Paris 1982  
Amélioration de la précision: JILA, Boulder 1997
- Étude d'autres atomes lourds

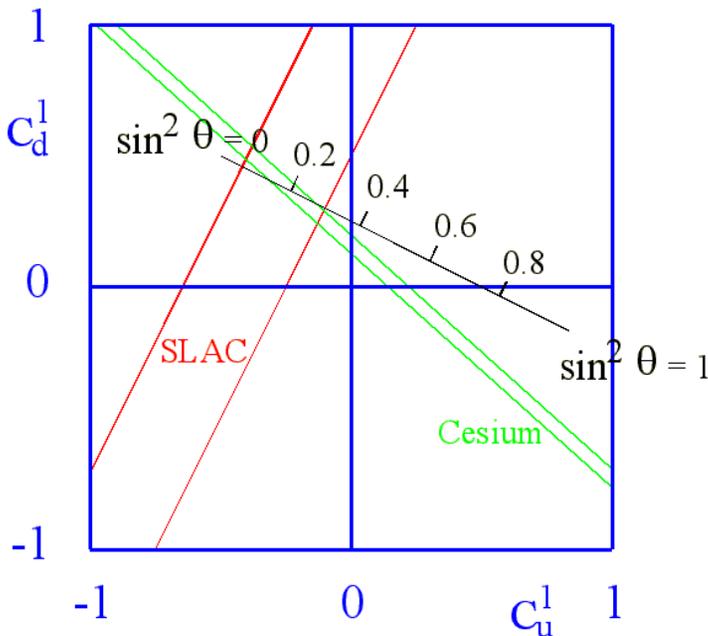
# Autres tests des interactions fondamentales

- Recherche de moments dipolaires électriques sur des atomes
  - Test de la symétrie du renversement du sens du temps
  - Tests des théories au delà du modèle standard
- Tests de la symétrie matière antimatière
  - Comparaison des propriétés de  $e^-$  et  $e^+$ , de  $p^-$  et  $p^+$
  - Récente production d'anti-Hydrogène
- Tests de la relativité restreinte et générale
  - Projets d'expériences spatiales (ACES, HYPER) utilisant des horloges et interféromètres à atomes froids
  - Déplacement vers le rouge, effet Lens Thirring
- Recherche d'une dérive éventuelle des constantes fondamentales
  - Comparaison des fréquences de 2 horloges à Cs et Rb

# Intérêt des tests de physique atomique

(par rapport aux expériences de haute énergie)

- La faiblesse des énergies compensée par la très grande précision des mesures
- Systèmes simples (par exemple atome H,  $e^+e^-$ ) entièrement calculables
- Informations obtenues dans d'autres domaines d'énergie et de transfert d'impulsion



## Exemple

Différentes combinaisons linéaires des constantes de couplages des quarks u et d sont détectées dans l'expérience de hautes énergies du SLAC et dans l'expérience de violation de parité sur le Césium

# Tests de la mécanique quantique

## Violation des inégalités de Bell

Élimination des théories à variables cachées locales

Corrélations entre les polarisations d'une paire de photons émis dans une cascade radiative ou dans une conversion paramétrique

## Caractère quantique du rayonnement

- Dégrouperement de photons
- Détection sur les oscillations de Rabi dans une cavité du caractère discret du nombre de photons

## Fluctuations quantiques

- Meilleure compréhension de leur origine et des limites qu'elles imposent à la sensibilité des mesures
- Possibilité de contourner ces limites  
Exemple des états comprimés

# **INTERACTIONS ATOMES - PHOTONS**

**UN CADRE SIMPLE POUR ÉTUDIER  
DES EFFETS D'ORDRE SUPÉRIEUR**

# Processus multiphotoniques

## Dans le domaine des radio-fréquences

- Premières observations de ces effets
- Interprétation physique en termes de lois de conservation
- Diverses approches théoriques pour les analyser

Opérateurs de projection

Atome habillé

## Dans le domaine optique

- Entre états discrets
- Ionisation multiphotonique
- Ionisation au dessus du seuil
- Génération d'harmoniques
- Lasers petawatt ( $10^{15}$  w)
- Optique non linéaire

# Processus impliquant 2 photons

## Absorption saturée

- Diagrammes énergie - impulsion
- Doublet de recul

## Absorption de 2 photons

Conservation de l'impulsion globale et élimination de l'effet Doppler et du recul

## Conversion paramétrique

Génération de paires de photons corrélés

## Effet Raman stimulé

Très nombreuses applications

# **INTERACTIONS ATOMES - PHOTONS**

**UN OUTIL POUR MANIPULER LES ATOMES**

## Contrôle de la polarisation des atomes

Transfert de moment cinétique de photons polarisés vers des atomes.

Pompage optique

## Contrôle de l'impulsion des atomes

Transfert de quantité de mouvement de photons vers des atomes.

- dans des cycles absorption - émission spontanée

Force de pression de radiation

- dans des cycles absorption - émission induite

Force dipolaire

Redistribution de photons

# Ralentissement et refroidissement des atomes

## Ralentisseur Zeeman

## Refroidissement laser Doppler

Déséquilibre dépendant de la vitesse (à cause de l'effet Doppler) entre 2 forces de pression de radiation opposées

## Refroidissement Sisyphé

Déplacements lumineux et taux de pompage optique modulés spatialement et corrélés de manière que l'atome en mouvement gravisse sans cesse des collines de potentiel

## Refroidissement sub-recul

Piège dans l'espace des vitesses au voisinage de la vitesse nulle dans lequel les atomes viennent s'accumuler au cours de leur marche au hasard

Obtention de températures de l'ordre de  $10^{-6}$  K, voire de  $10^{-9}$  K

# Piégeage de particules chargées

## Piégeage et détection d'un seul électron, d'un seul ion

- Pièges de Penning et de Paul
- Refroidissement par bandes latérales et préparation de l'ion dans l'état fondamental du piège

## Applications

- Mesures ultra-précises, par exemple de  $q/m$  et de  $g-2$
- Observation de sauts quantiques sur le comportement du système

## Une grande stimulation pour le développement de nouvelles approches théoriques

- Fonction délai
- Fonction d'onde Monte Carlo
- Fonctions d'onde stochastiques

# Piégeage des atomes neutres

## Pièges laser – Réseaux optiques

Puits de potentiel créés par des déplacements lumineux produits par des gradients d'intensité laser

## Pièges magnéto-optiques

Déséquilibre dépendant de la position (à cause d'un gradient spatial d'effet Zeeman) entre forces de pression de radiation opposées

## Pièges magnétiques

Puits de potentiel créés par des gradients spatiaux de champ magnétique.

Les atomes ne peuvent être piégés dans ces puits peu profonds que s'ils ont été préalablement refroidis

# **INTERACTIONS ATOMES - PHOTONS**

**UN MOYEN SIMPLE POUR PRÉPARER  
DES ÉTATS QUANTIQUES INTÉRESSANTS**

# Superpositions linéaires d'états

Insuffisance d'une description en termes des seules populations des niveaux d'énergie

Importance des éléments non diagonaux de l'opérateur densité (« cohérences »)

## Préparation et détection optiques de ces superpositions d'états

- Effet Hanle. Résonances de croisement de niveaux
- Battements quantiques
- Modulation de la fluorescence
- Excitation en lumière modulée
- Transferts de cohérence
- Piégeage cohérent de populations
- Cohérences spatiales

# Superpositions linéaires d'états de 2 systèmes différents

Préparation d'états « intriqués »

- de deux photons
- d'un photon et d'un atome
- de deux atomes

Décohérence

# Applications des effets d'interférence quantique

- Magnétométrie
- Battements quantiques. Spectroscopie résolue dans le temps
- Interférométrie atomique
- Refroidissement sub-recul
- Contrôle cohérent
- Information quantique

# Fluides quantiques

## Gaz quantiques dégénérés

- Condensation de Bose-Einstein
- Ondes de matière
- Lasers à atomes
- Condensats moléculaires?
- Gaz de Fermi dégénérés. Transition BCS?

Observation sur des systèmes dilués d'effets habituellement observés en phase liquide ou solide

L'effet des interactions entre atomes peut être analysé de manière beaucoup plus précise

## Des contacts fructueux avec la physique de la matière condensée

- Superfluidité
- Transition superfluide - isolant de Mott dans un réseau

**QUELQUES IDÉES DIRECTRICES  
POUR DÉCRIRE L'EFFET DES  
INTERACTIONS ATOMES - PHOTONS**

# Déroulement temporel d'une expérience

Le plus souvent, on peut distinguer 3 phases



- L'expérience étudiée entre-t-elle dans ce cadre idéal?
- Les 3 étapes sont-elles vraiment indépendantes?
- Le système interagit-il avec des réservoirs?
  - Phénomènes dissipatifs?
  - Évolution réversible ou irréversible?
- Échelles de temps associées aux divers processus?
- Plusieurs chemins conduisant de l'état initial à l'état final?
  - Interférences quantiques?

# Préparation - Excitation

## Sélection magnétique ou électrique d'états atomiques

Exemple : effet Stern-Gerlach

Jets atomiques et moléculaires (I. Rabi)

## Échantillon en équilibre thermodynamique

L'interaction avec un réservoir conduit à des populations d'équilibre  $p_a, p_b, \dots$  des niveaux du système étudié

$$\frac{p_b}{p_a} \propto \exp[-(E_b - E_a) / k_B T]$$

Cas usuel des expériences sur des échantillons de matière condensée

## Excitation par un champ électromagnétique

Cas étudié plus en détail dans ce cours

# Lois de conservation

Hamiltonien d'interaction atomes - rayonnement invariant par

- translation dans le temps
- translation dans l'espace
- rotation

En découle l'existence de constantes du mouvement

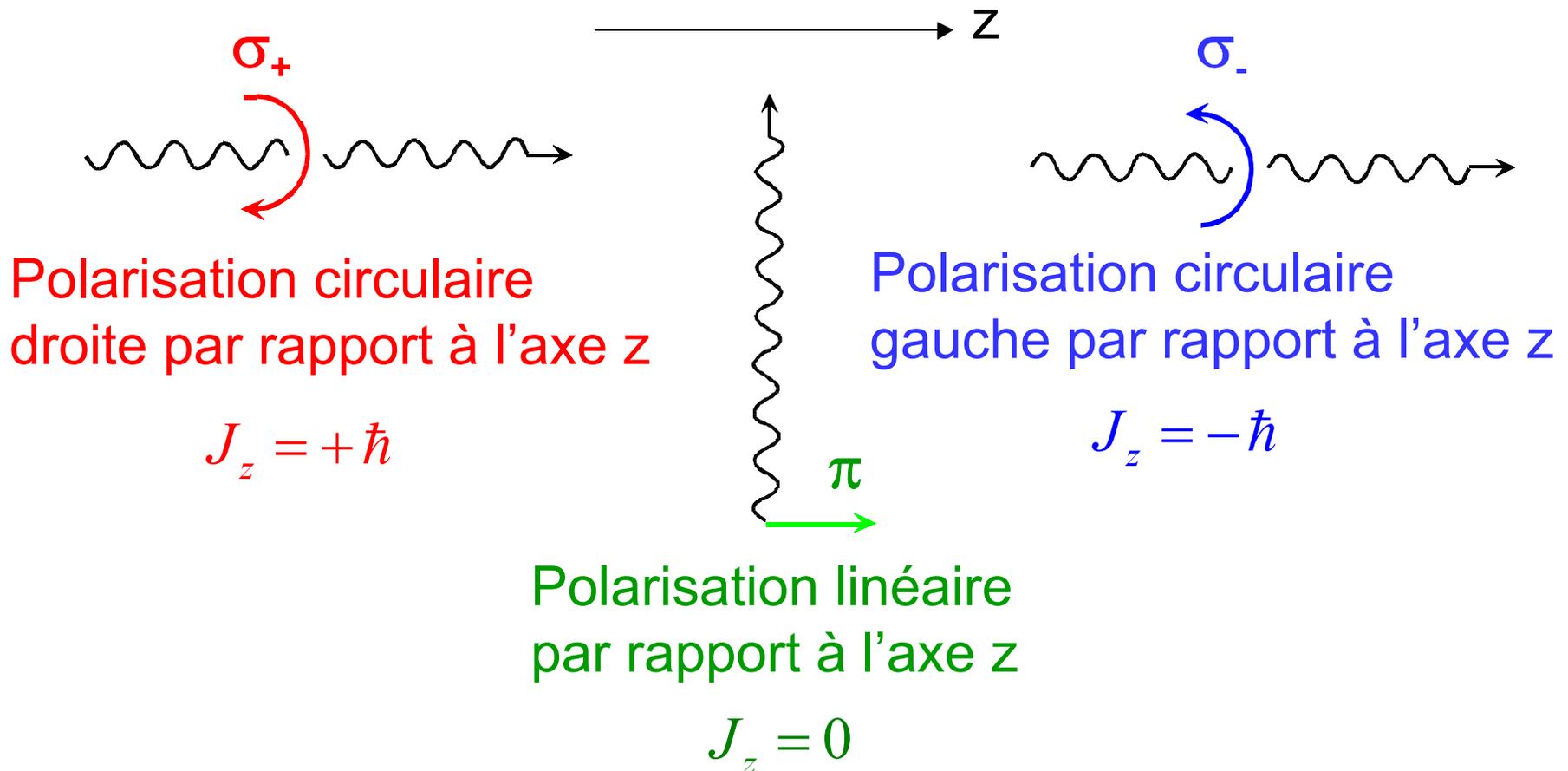
- énergie totale
- impulsion totale
- moment cinétique total

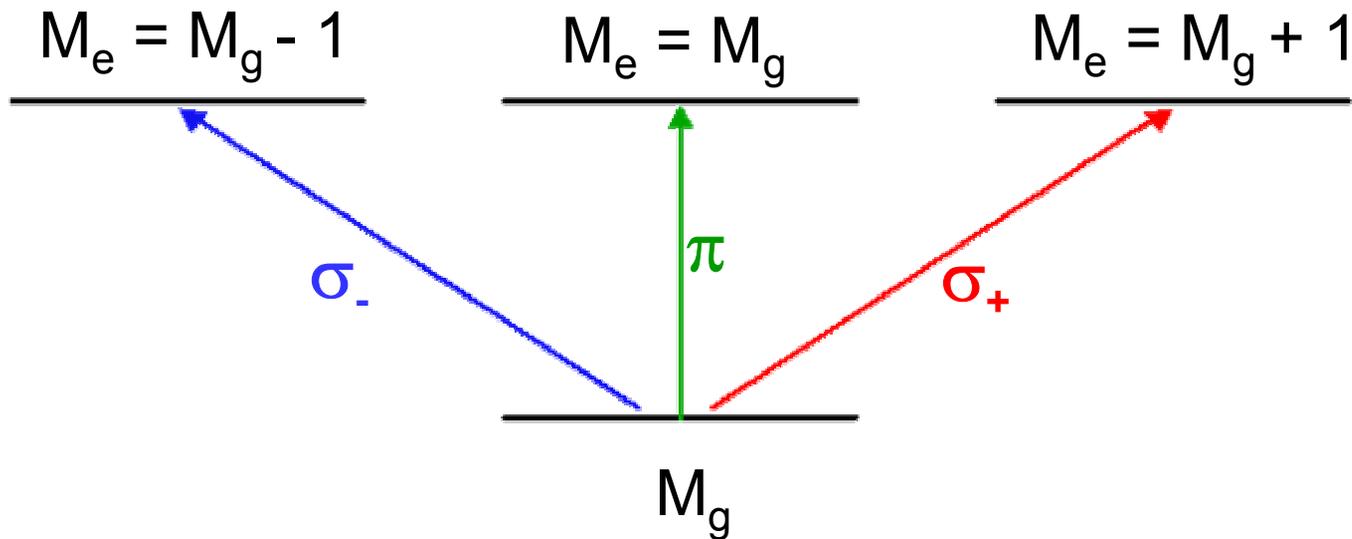
Conséquence : règles de sélection pour les phases  
d'excitation et de détection

# Exemple d'application des lois de conservation

## Règles de sélection de la polarisation

Les photons ont un moment cinétique qui dépend de leur polarisation





Quand l'atome absorbe un photon, il gagne le moment cinétique du photon. Le changement du nombre quantique magnétique est donc relié à la polarisation du photon absorbé

$$\sigma_+ : \Delta M = +1$$

$$\sigma_- : \Delta M = -1$$

$$\pi : \Delta M = 0$$

**A. Rubinowicz**

# Excitation électromagnétique

## Influence de la largeur de raie $\Delta\nu$

### Excitation continue en raie large

Durée du processus élémentaire du processus d'excitation

Temps de corrélation des fluctuations  
du champ exciteur

$$\tau_c = 1 / \Delta\nu$$

$1 / \Delta\nu$  est aussi le temps de passage sur l'atome des paquets d'onde formant le faisceau incident et uniformément répartis dans le temps

$1 / \Delta\nu$  apparaît comme la durée d'un processus élémentaire d'excitation, à ne pas confondre avec le temps moyen au bout duquel un tel processus se produit

Temps de relaxation » Temps de corrélation

## Excitation continue en raie large (suite)

Si la durée d'excitation  $1 / \Delta\nu$  est suffisamment courte devant les temps caractéristiques de l'état intermédiaire (période de Larmor, durée de vie radiative, ...), l'excitation peut être considérée comme instantanée.

- Possibilité de séparer la phase d'excitation des 2 autres
- Description de l'excitation en termes de taux de transition
- En général, préparation de l'atome dans une superposition linéaire de plusieurs sous-niveaux d'énergie différents. La largeur spectrale  $\Delta\nu$  est suffisamment grande pour que l'excitation soit résonnante pour plusieurs sous-niveaux excités

## Excitation en impulsion en raie large

Le système est excité en un temps très bref  $1 / \Delta\nu$  à un instant bien déterminé

## Excitation en raie étroite

La durée  $1 / \Delta\nu$  d'un processus d'excitation est longue. Elle prépare en général l'atome dans un état d'énergie bien défini que l'on peut choisir en ajustant la fréquence de l'excitation

Les 3 phases, excitation, évolution, détection ne sont plus alors bien séparées.

Exemple d'un dipôle atomique mis en oscillation forcée par une onde monochromatique et émettant un rayonnement à la même fréquence (diffusion Rayleigh)

Une description de l'excitation en termes de taux de transition n'est en général plus possible. Nécessité d'utiliser des équations de Bloch optiques où apparaissent des « cohérences optiques »  $\sigma_{ef}$

## Excitation en raie étroite (suite)

L'excitation en raie étroite peut conduire à un comportement irréversible (description en termes de taux de transition) si l'état auquel conduit l'excitation a une largeur  $\Gamma$ . Tout dépend alors des valeurs respectives de  $\Gamma$  et de la fréquence de Rabi  $\Omega$  caractérisant l'excitation

$\Omega \ll \Gamma$  L'état auquel conduit l'excitation apparaît comme un continuum et est atteint avec un taux de transition  $\gamma = \Omega^2 / \Gamma$  (règle d'or de Fermi)

$\Omega \gg \Gamma$  La précession de Rabi a le temps de se produire avant d'être amortie avec un taux  $\Gamma$

Distinction entre les régimes de couplage faible et fort en électrodynamique quantique en cavité

# Phase de détection

Mêmes remarques que pour la phase d'excitation

## Détection à bande large

Observation de la fluorescence avec un détecteur rapide à bande large.

Détection au moyen d'un faisceau sonde à large bande, éventuellement appliqué en impulsions ultra-brèves

## Détection à bande étroite

Observation de la fluorescence à travers un filtre de fréquence très étroit

Utilisation d'un faisceau sonde monochromatique dont on balaie la fréquence

# Évolution temporelle intermédiaire

## Évolution libre

Sous l'effet d'un champ magnétique statique, d'un couplage interne (couplage spin-orbite, hyperfin,...)

## Action d'un champ électromagnétique

- Transitions de radiofréquence ou micro-ondes
- Action d'un champ laser

## Processus de relaxation

- Relaxation radiative par émission spontanée
- Collisions avec d'autres atomes

Les vitesses de variation associées à ces divers processus peuvent-elles être ajoutées de manière indépendante?

# Relaxation en présence d'interaction avec un champ monochromatique

## Les temps caractéristiques

$\tau_c$  : Temps de corrélation des mécanismes de relaxation

$T_R$  : Temps de relaxation. En général,  $T_R \gg \tau_c$

$1/\Omega$  : Période de Rabi associée à l'interaction atome-laser

## Régime $\tau_c \ll 1 / \Omega$

Pendant le temps  $\tau_c$  d'un processus élémentaire de relaxation, l'interaction atome - laser n'a pas le temps de s'établir.

Les taux de relaxation calculés dans la base de l'atome libre sont valables.

## Régime $\tau_c \gg 1 / \Omega$

Le couplage atome - laser est efficace durant le temps  $\tau_c$

L'effet de la relaxation doit être calculé dans la base de l'atome habillé

## **Site WEB**

où peuvent être trouvées les notes de cours des années précédentes de la chaire de physique atomique et moléculaire (à partir de 1973) et où sera déposé le cours de cette année.

<http://www.phys.ens.fr/cours/college-de-france/>

## **Ouvrage**

regroupant les diverses approches théoriques possibles pour décrire l'effet des interactions atomes - photons

C. Cohen-Tannoudji, J. Dupont-Roc, G. Grynberg,  
Processus d'interaction entre photons et atomes,  
InterÉditions/ Éditions du CNRS (1988)

Référence désignée par P.I. dans la suite de ce cours

# Plan général

## 21/10/03

- Introduction générale
- Les méthodes optiques

## 28/10/03

- Perturbation des atomes par le rayonnement  
Utilisations récentes de ces perturbations
- Un nouvel éclairage sur les corrections radiatives

## 04/11/03

- Les processus multiphotoniques dans le domaine RF
- Dans le domaine optique

## 18/11/03

- Superpositions linéaires d'états. Interférences quantiques
- États intriqués

## Plan général (suite)

25/11/03

- Manipulation du mouvement atomique par la lumière
- Refroidissement et piégeage des atomes
- Les premières applications des atomes ultrafroids

02/12/03

- Gaz quantiques dégénérés. Bosons et fermions
- Quelques perspectives

## Symposium

16/01/04

« Manipulation d'atomes et de photons »

Symposium dédié à la mémoire de Jean Brossel, organisé en commun avec Serge Haroche (chaire de physique quantique)