

COLLÈGE DE FRANCE

COURS DE PHYSIQUE

ATOMIQUE ET MOLÉCULAIRE

Claude COHEN-TANNOUJJI

ANNÉE SCOLAIRE : 1995 - 1996

TABLES DES MATIÈRES

INTRODUCTION GÉNÉRALE	I-1
Résumé du cours 1993-1994 (le cours 94-95 n'a pas eu lieu)	I-1
Introduction au cours 1995-1996	I-5
1 - Etat actuel du refroidissement laser	I-5
a) Quelques repères importants sur l'échelle des vitesses	I-5
b) Le refroidissement subrecul.....	I-5
c) Les problèmes posés par le refroidissement subrecul.....	I-6
2 - Etat actuel du piégeage d'atomes neutres	I-7
a) Pourquoi est-il important de piéger des atomes neutres ?	I-7
b) Pourquoi faut-il au préalable refroidir les atomes ?	I-7
c) Pièges dissipatifs et pièges non dissipatifs	I-7
d) Problèmes posés par les pièges.....	I-8
3 - Quelques tendances d'évolution du domaine de recherche	I-9
a) Développement des domaines d'application des atomes ultrafroids.....	I-9
b) Des points de contact fructueux avec d'autres disciplines ou d'autres domaines de recherche.....	I-9
c) Vers de nouveaux états de la matière.....	I-10
4 - Buts du cours 1995-1996	I-10
 ETUDE D'UN MODÈLE SIMPLE COMBINANT EFFET SISYPHE ET REFROIDISSEMENT SUBRECU	 II-1
1 - Introduction	II-1
1.1 - Revue de quelques types d'effet Sisyphe déjà connus	II-1
1.2 - Buts de ce cours.....	II-2
 1ÈRE PARTIE : TRAITEMENT SEMI-CLASSIQUE	 II-3
2 - Le modèle	II-3
2.1 - Transition atomique et configuration laser	II-3
2.2 - Approximations	II-3
2.3 - Les paramètres physiques importants.....	II-4
2.4 - Présentation qualitative du mécanisme de refroidissement.....	II-5
3 - Les grandes lignes du calcul semi-classique	II-6
3.1 - Evolution de la matrice densité d'un atome immobile	II-6
3.2 - Effet du mouvement - Hamiltonien motionnel.....	II-7
3.3 - Equations de Bloch optiques	II-8
3.4 - Expression semi-classique de la force moyenne	II-8

3.5 - Elimination adiabatique de l'état excité	II-9
3.6 - Méthodes de résolution des équations de Bloch optiques.....	II-10
2ÈME PARTIE : UN NOUVEAU TYPE D'EFFET SISYPHE	III-1
4 - Transfert induit par le mouvement entre $ \psi_{NC}\rangle$ et $ \psi_C\rangle$	III-1
4.1 - Origine physique du transfert.....	III-1
4.2 - Calcul simple du taux de transfert.....	III-3
4.3 - Population stationnaire de l'état couplé aux très faibles vitesses	III-4
5 - Force de friction moyenne - Discussion physique	III-5
5.1 - Calcul simple aux très faibles vitesses	III-5
5.2 - Bilan des divers échanges d'énergie	III-7
5.3 - Etude qualitative d'autres régimes de vitesse.....	III-8
6 - Diffusion en impulsion	III-9
6.1 - Ordre de grandeur du coefficient de diffusion D	III-9
6.2 - Température de quasi-équilibre	III-10
6.3 - Dépendances spatiales.....	III-10
Appendice A	III-11
3ÈME PARTIE : LE RÉGIME QUANTIQUE.....	IV-1
7 - Insuffisances du traitement semiclassique.....	IV-1
8 - Les ingrédients essentiels du refroidissement subrecul (par VSCPT)	IV-1
8.1 - Existence d'états non couplés au champ laser (pour une transition $1\leftrightarrow 1$)	IV-1
8.2 - Etude de l'état non couplé en représentation p	IV-3
8.3 - Existence d'un état noir	IV-4
8.4 - Durée de vie des états quasi-noirs.....	IV-5
9 - Revue de quelques approches quantitatives.....	IV-6
9.1 - Equations de Bloch optiques généralisées.....	IV-6
9.2 - Approches utilisant la théorie des bandes.....	IV-6
9.3 - Simulations Monte-Carlo	IV-8
UNE NOUVELLE DESCRIPTION DU REFROIDISSEMENT SUBRECU :	
PIÉGEAGE ET RECYCLAGE	V-1
1 - Introduction	V-1
2 - Modélisation du refroidissement subrecul par une marche aléatoire.....	V-1
3 - Piégeage et recyclage.....	V-3
4 - Distribution $P(\tau)$ des temps de piégeage	V-4
4.1 - Hypothèses sur le piège.....	V-4
4.2 - Calcul simple de $P(\tau)$ à une dimension.....	V-4

4.3 - Extension à un nombre quelconque de dimensions.....	V-5
4.4 - Extension à d'autres formes de pièges.....	V-6
4.5 - Discussion physique.....	V-6
5 - Distribution $\hat{P}(\hat{\tau})$ des temps de premier retour - Etude de quelques cas simples.....	V-7
5.1 - Mouvement brownien usuel à 1 dimension.....	V-7
5.2 - Mouvement brownien à 1 dimension avec effet Doppler.....	V-9
5.3 - Temps moyen de retour dans le piège en présence de friction.....	V-10
Appendice B.....	V-11
DISTRIBUTIONS LARGES - LOIS DE LÉVY.....	VI-1
1 - Introduction - Buts de ce chapitre.....	VI-1
2 - Théorème de la limite centrale généralisé.....	VI-1
2.1 - Hypothèses sur la distribution de probabilité $P(\tau)$	VI-1
2.2 - Sommes de Lévy - Problème posé.....	VI-2
2.3 - Changement de variables $T_N \rightarrow u_N$	VI-2
2.4 - Distribution de probabilité de u_N à la limite $N \rightarrow \infty$ - Lois de Lévy.....	VI-2
2.5 - Allure des lois de Lévy.....	VI-3
3 - Propriétés importantes des sommes de Lévy pour $0 < \mu < 1$	VI-4
3.1 - Dépendance en N d'une somme de Lévy T_N	VI-4
3.2 - Ordre de grandeur du terme le plus grand dans une somme de Lévy.....	VI-5
3.3 - Importance des événements rares - Vols de Lévy.....	VI-7
3.4 - Importance des fluctuations.....	VI-8
4 - Processus ponctuel associé à la distribution $P(\tau)$. Loi d'arrosage.....	VI-9
4.1 - Position du problème.....	VI-9
4.2 - Cas d'une distribution $P(\tau)$ étroite.....	VI-9
4.3 - Cas d'une distribution large en $\tau^{-(1+\mu)}$ avec $0 < \mu < 1$	VI-10
PROPRIÉTÉS ASYMPTOTIQUES DU REFROIDISSEMENT SUBRECOL.....	VII-1
1 - Introduction.....	VII-1
2 - Compétition entre piégeage et diffusion hors du piège.....	VII-1
2.1 - Importance des exposants μ et $\hat{\mu}$	VII-1
2.2 - Moyenne temporelle et moyenne d'ensemble.....	VII-2
2.3 - Expression exacte de la proportion f d'atomes piégés.....	VII-3
3 - Probabilité par unité de temps d'entrer dans le piège.....	VII-3
3.1 - Processus ponctuel associé aux distributions $P(\tau)$ et $\hat{P}(\hat{\tau})$	VII-3
3.2 - Cas où $\langle \tau \rangle$ et $\langle \hat{\tau} \rangle$ sont finis ($\mu > 1$ et $\hat{\mu} > 1$).....	VII-4
3.3 - Cas où $\langle \hat{\tau} \rangle$ est fini et $\langle \tau \rangle$ infini ($\mu < 1$ et $\hat{\mu} > 1$).....	VII-4
3.4 - Cas où $\langle \tau \rangle$ et $\langle \hat{\tau} \rangle$ sont infinis ($\mu < 1$ et $\hat{\mu} < 1$).....	VII-4
4 - Etude quantitative de l'efficacité du refroidissement.....	VII-5

4.1 - Autres expressions équivalentes de la proportion d'atomes piégés $f(\theta)$	VII-5
4.2 - Cas où $\langle \tau \rangle$ et $\langle \hat{\tau} \rangle$ sont finis ($\mu > 1$ et $\hat{\mu} > 1$)	VII-6
4.3 - Cas où $\langle \hat{\tau} \rangle$ est fini et $\langle \tau \rangle$ infini ($\mu < 1$ et $\hat{\mu} > 1$)	VII-6
4.4 - Cas où $\langle \tau \rangle$ et $\langle \hat{\tau} \rangle$ sont infinis ($\mu < 1$ et $\hat{\mu} < 1$)	VII-8
4.5 - Comparaison de ces prédictions avec les résultats de simulations Monte Carlo du refroidissement VSCPT à 1 dimension.....	VII-9
5 - Etude quantitative de la distribution d'impulsion $P(p)$ des atomes piégés	VIII-1
5.1 - Rappel des arguments qualitatifs utilisés dans les premières descriptions du refroidissement subrecul	VIII-1
5.2 - Etablissement de l'expression donnant $P(p)$	VIII-2
5.3 - Etude du cas où $\langle \tau \rangle$ est infini et $\langle \hat{\tau} \rangle$ fini : $\mu < 1$ $\hat{\mu} > 1$	VIII-4
5.4 - Etude du cas où $\langle \tau \rangle$ et $\langle \hat{\tau} \rangle$ sont finis (μ et $\hat{\mu} > 1$).....	VIII-8
5.5 - Conclusion - Importance des statistiques de Lévy.....	VIII-10
OPTIMISATION DU REFROIDISSEMENT SUBRECUL.....	IX-1
1 - Introduction	IX-1
2 - Brefs rappels sur le refroidissement Raman 1D	IX-1
3 - Refroidissement Raman 1D avec des impulsions carrées	IX-4
3.1 - Pourquoi est-il intéressant de changer la forme des impulsions ?	IX-4
3.2 - Valeur optimale de l'exposant α	IX-4
3.3 - Vérification expérimentale des idées précédentes.....	IX-5
4 - Optimisation du refroidissement Raman 1D (avec des impulsions carrées).....	IX-8
4.1 - Lien entre la largeur du trou Raman et la durée de l'impulsion carrée.....	IX-8
4.2 - Choix de la séquence d'impulsions.....	IX-8
4.3 - Lien entre la largeur p_0 du trou Raman et le taux d'excitation $1/\tau_0$ en dehors du trou Raman	IX-9
4.4 - Choix de la grandeur physique à optimiser.....	IX-9
4.5 - Calcul de la valeur optimale de la largeur p_0 du trou Raman.....	IX-10
4.6 - Discussion physique	IX-11
RÉCAPITULATION GÉNÉRALE	X-1
Filtrage et Recyclage.....	X-1
Importance de l'exposant $\mu = D/\alpha$	X-1
Forme des distributions d'impulsion (le long d'un axe).....	X-2
Appendice C - Lois de Lévy tronquées.....	X-3
Problème physique	X-3
Distribution stationnaire d'impulsion (le long d'une axe).....	X-3
Transition entre le régime des lois de Lévy et celui de la loi normale.....	X-4