Quelques résultats expérimentaux

But de ce chapitre

Donner quelques résultats expérimentaux récents, relatifs aux propriétés statistiques des faisceaux laser, montrant le degré de précision avec lequel les prévisions théoriques basées sur les calculs exposés dans les chapitres précédents ont pu être testées. Peu de transitions de phase ont pu être étudiées en si grand détail.

On n'entre pas ici dans le détail des expériences (le lecteur est renvoyé aux références indiquées après chaque courbe). On indique simplement le but de chaque expérience, la grandeur physique étudiée et les résultats obtenus.

1 Etude de l'intensité du laser en fonction du paramètre de pompage (inversion)

But : Apporter une preuve quantitative de l'analogie entre l'oscillation laser monomode et une transition de phase du 2ème ordre

Grandeur mesurée : Intensité I en fonction du paramètre de pompage P $(\sim S_0 - S_{cr})$

- Au dessus du seuil, I est le carré du paramètre d'ordre $(\sim b)$ la courbe donnant $I^{1/2}$ en fonction de $S_0 - S_{cr}$ est l'équivalent de la "courbe de coexistence".
- Au dessous du seuil, I est proportionnel au carré des fluctuations du champ électrique (analogie avec une "susceptibilité généralisée")
  (Voir terminologie pour les transitions de phase du 2° ordre dans L.P. Kadanoff et al Rev. Mod. Phys. 39, 395 (1967)).

Résultats obtenus (Comparer avec les courbes données plus haut pages VII-10 et IX-8)

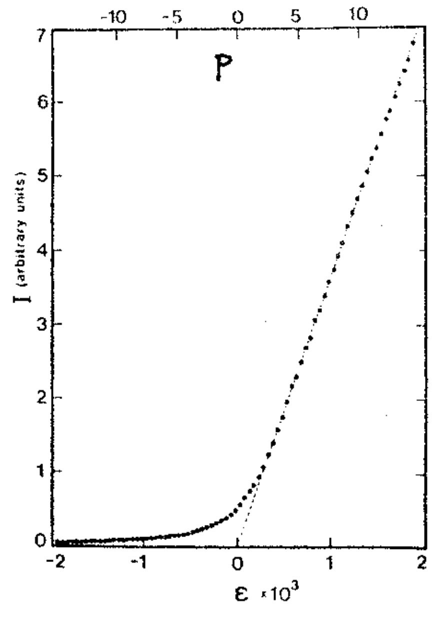


FIG. 1. The average laser intensity as a function of the normalized net gain ϵ (lower scale) and of the pump parameter $\boldsymbol{p}$ (upper scale). Errors are smaller than the dot size. The theoretical curve is not distinguishable from the line interpolating the experimental points.

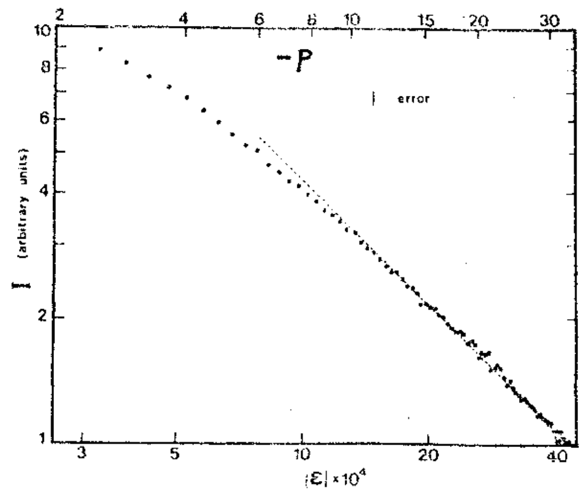


FIG. 2. Logarithmic plot of the average laser intensity below threshold as a function of $|\epsilon|$ and $-p$.

Figures extraites de la référence : M. CORTI and V. DEGIORGIO Phys. Rev. Lett. 36, 1173 (1976)

(2) Structure de la fonction d'autocorrélation $\langle b^+(\tau)\, b(0)\rangle$ du champ laser.

But – Etude de $G_1(\tau) = \langle b^+(\tau)\, b(0)\rangle$ au voisinage du seuil. Grandeur importante car sa T.F. donne la répartition spectrale de la lumière laser.

– Le calcul de $G_1(\tau)$ à partir de l'équation de Fokker-Planck discutée dans le chapitre précédent montre que $G_1(\tau)$ est une superposition d'exponentielles décroissantes correspondant à divers modes de diffusion.

On a essentiellement discuté plus haut le comportement avec le paramètre de pompage p du taux de relaxation associé au mode fondamental (diffusion de la phase – voir figure 6 page IX-10)

Les modes supérieurs correspondent à la contribution des fluctuations d'amplitude à $G_1(\tau)$ [terme $r(\tau)\, r(0)$ dans VIII-40, remplacé par r_0^2 dans la formule approchée VIII-41]. Comme pour les fluctuations d'intensité, les taux de relaxation de ces modes supérieurs commencent par décroître avec p puis croissent de nouveau au dessus du seuil (comportement analogue à celui de la figure 7 page IX-10). Comme l'amplitude est bien stabilisée au dessus du seuil, le poids des modes supérieurs est beaucoup plus petit que celui du mode fondamental.

– Malgré la difficulté expérimentale, il a été possible très récemment de mesurer directement $G_1(\tau)$, de montrer que $G_1(\tau)$ est formée de plusieurs exponentielles décroissantes, de mesurer les taux de relaxation et les poids de ces exponentielles, ainsi que leur variation avec la puissance de sortie

Test très sévère de l'équation de Fokker-Planck discutée plus haut (chapitre IX)

Grandeur mesurée :

- Il est beaucoup plus difficile de mesurer $G_1(\tau)$ que $G_2(\tau)$ ($G_1(\tau)$ est très sensible aux fluctuations parasites de phase introduites par les vibrations mécaniques, fluctuations thermiques ...)
- La mesure porte directement sur $G_1(\tau)$ et non sur sa T.F. (le poids des modes supérieurs est en effet moins petit sur $G_1(\tau)$ que sur sa T.F.)
- Méthode interférométrique autodyne utilisant des lignes à retard introduisant des différences de chemin de l'ordre du kilomètre ($\tau \sim 10\ \mu s$)
- Diverses astuces pour pouvoir soustraire l'effet des fluctuations parasites.

Référence

A. GUTTNER, H. WELLING, K.H. GERICKE and W. SEIFERT
Phys. Rev A 18, 1157 (1978)

Résultats

La figure 3 tirée de la référence précédente donne pour 3 puissances de sortie différentes ($\frac{I}{I_{seuil}} = 2, 4, 15$), le départ de $G_1(\tau)$ en fonction de τ (échelle supérieure en μs, échelle inférieure en unités sans dimensions introduite page VII-8).

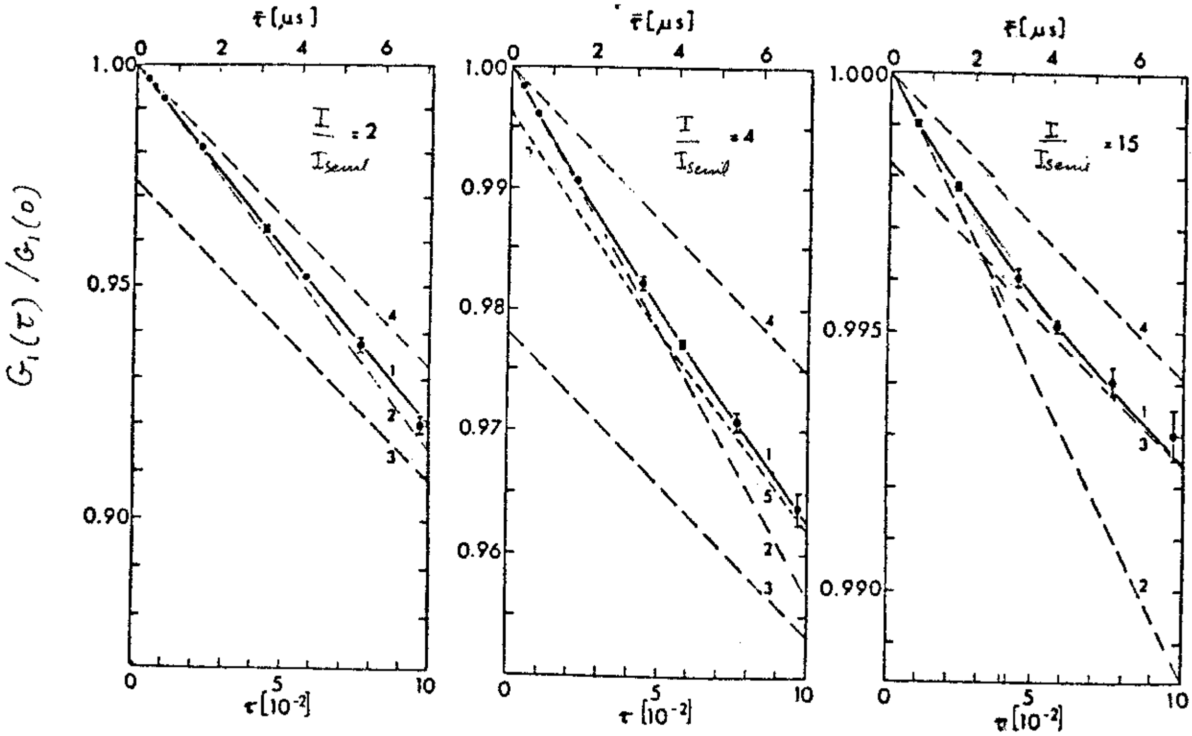


Fig. 3

Courbe 1 : courbe théorique (passant bien par les points expérimentaux)
Courbe 2 : tangente en $\tau = 0$ Courbe 3 : asymptote
Courbe 4 : ce que serait $G_1(\tau)/G_1(0)$ si seul le mode fondamental était présent
Courbe 5 (pour $\frac{I}{I_{seuil}} = 4$) : somme des 2 premiers modes (ce qui montre qu'on peut détecter les modes encore supérieurs)

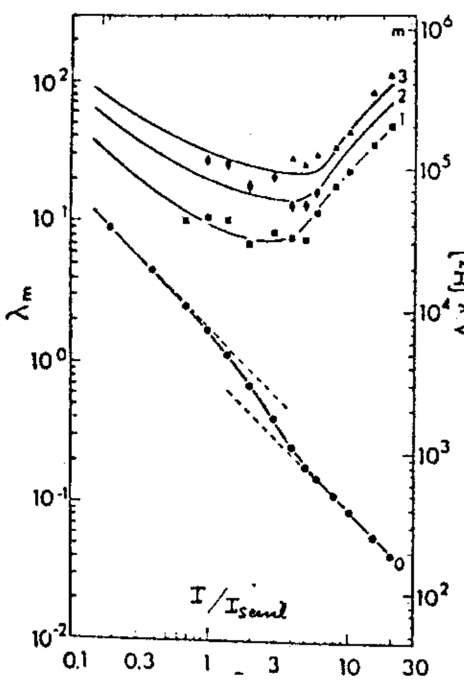


Fig. 4

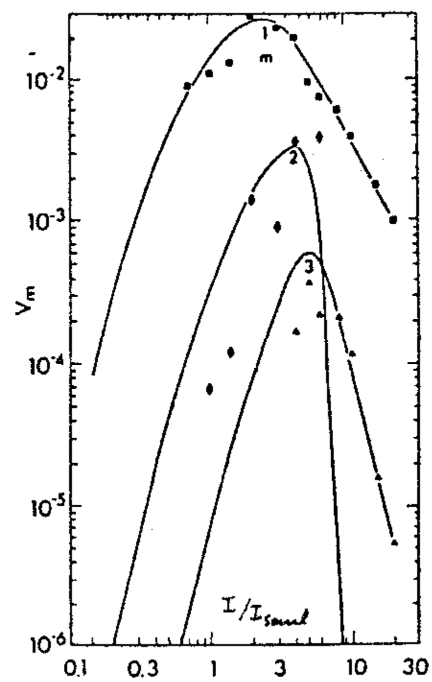


Fig. 5

La figure 4 donne les variations avec la puissance de sortie des taux de relaxation λ_m (ou des largeurs $\Delta\nu_m$) des 4 premiers modes. Courbes théoriques et points expérimentaux. On vérifie bien que λ_0 varie comme $2/\langle b^+b\rangle$ au dessous du seuil, comme $1/\langle b^+b\rangle$ au dessus (voir figure 6 page IX-10). Alors que λ_0 est toujours décroissant, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ passent par un minimum.

La figure 5 donne les poids des modes 1, 2, 3 (qui sont au moins de l'ordre de quelques %). Courbes théoriques et points expérimentaux.

(3) Etude de la fonction de corrélation de l'intensité

Grandeur mesurée : $G_2(\tau) = \langle b^+(0)\, b^+(\tau)\, b(\tau)\, b(0) \rangle$

Buts : – Vérifier la variation avec le taux de pompage p des taux de relaxation de $G_2(\tau)$ [voir figure 7 page IX-10]
– Mettre en évidence la structure fine de $G_2(\tau)$ et l'existence de plusieurs modes de relaxation

Références : les figures 6 et 7 données plus bas sont extraites de M. CORTI, V. DEGIORGIO, F.T. ARECCHI Opt. Commun. 8, 329 (1973)

voir aussi
S. CHOPRA and L. MANDEL Coherence and Quantum Optics (ed by L. Mandel and E. Wolf Plenum Press 1973) p. 805.

Résultats

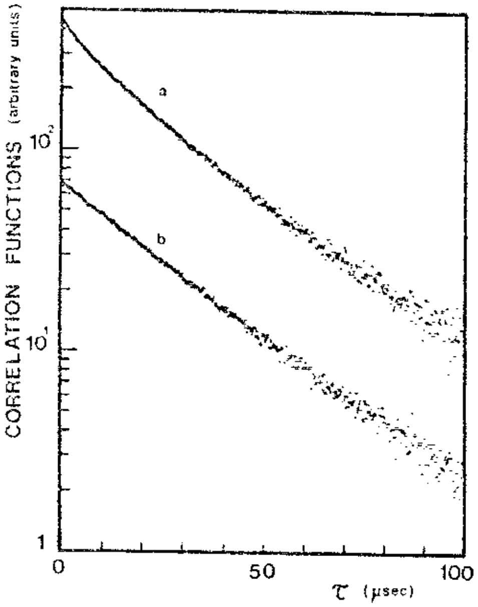
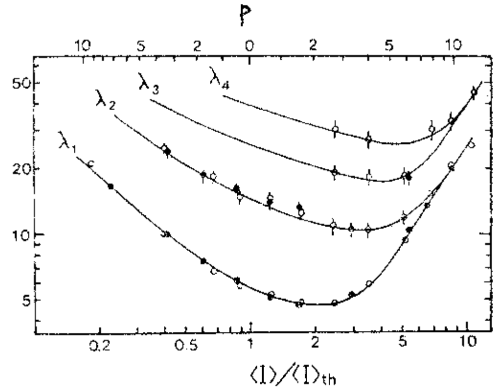


Fig. 6



. Plots of the relaxation rates of the laser intensity fluctuations. The full curves represent the theoretically predicted results. The standard deviations for the experimental points are reported only when they exceed the dot size.

Fig. 7

La figure 6 donne un exemple de courbe expérimentale donnant $G_2(\tau)$. Les courbes a et b correspondent à 2 distorsions différentes introduites volontairement dans le corrélateur digital. Pour la courbe a le poids des modes supérieurs est augmenté par la distorsion, ce qui fait apparaître clairement l'existence de plusieurs exponentielles dans $G_2(\tau)$.

La figure 7 donne en fonction du paramètre de pompage p (échelle supérieure) ou de I/I_{seuil} (échelle inférieure) les taux de relaxation des 4 premiers modes apparaissant dans $G_2(\tau)$

(4) Etude des fonctions de corrélation d'ordre 3 de l'intensité

Grandeur mesurée
$$\lambda^{(3)}(\tau,\tau') = \frac{\langle \Delta I(t)\, \Delta I(t+\tau)\, \Delta I(t+\tau') \rangle}{\langle I \rangle^3}$$
où $\Delta I(t) = I(t) - \langle I \rangle$

But Tester des fonctions de corrélation d'ordre supérieur à 1 et 2. (Moyennes à 3 temps)

Références

les courbes données dans la fig 8 ci-dessous sont extraites de
S. CHOPRA and L. MANDEL Phys. Rev. Lett 30, 60 (1973)
Voir aussi M. CORTI and V. DEGIORGIO Optics Comm. 11, 1 (1974)
les courbes théoriques de la figure 8 sont calculées par
C.D. CANTRELL, M. LAX and W.A. SMITH Phys Rev A7, 175 (1973)

Résultats

Pour plusieurs valeurs du paramètre de pompage p ($p = -1, 0 \dots$) et plusieurs valeurs de τ, on étudie les variations de $\lambda^{(3)}(\tau, \tau+\tau'')$ avec τ'' (courbes théorique - Points expérimentaux)

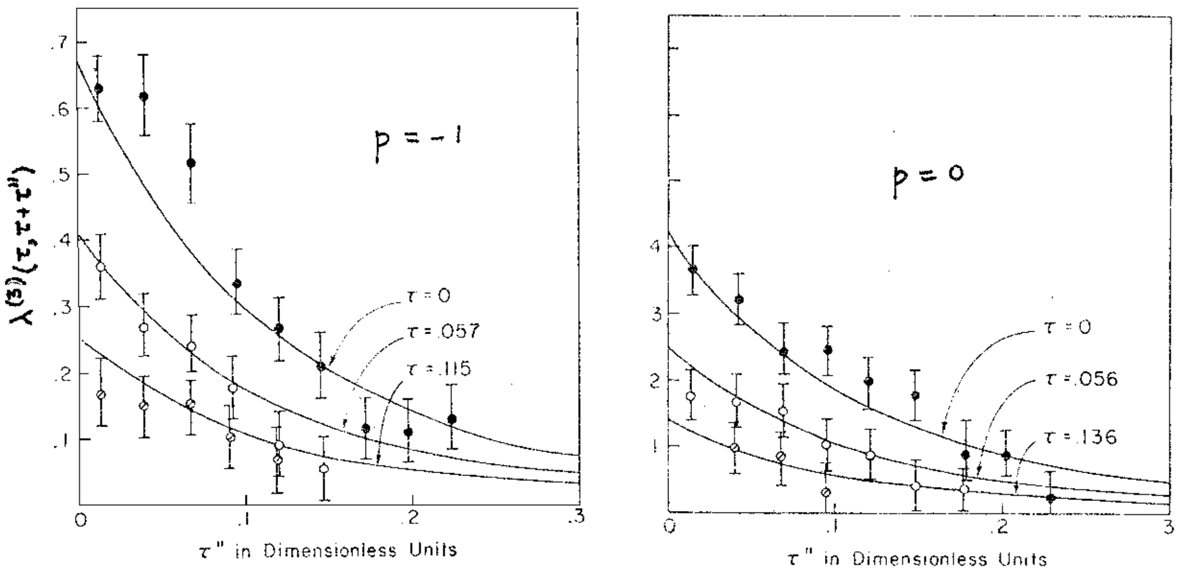


Fig. 8

(5) Comptage de photons

Grandeur mesurée $\qquad p(m, T)$

$p(m,T)$ est la probabilité de détecter m photons pendant le temps T. T est fixé et on étudie les variations avec m de $p(m,T)$.

But

2 cas sont à distinguer suivant que T est grand ou petit devant le temps d'évolution caractéristique T_c du champ

a) $T \ll T_c$

le champ n'évolue pratiquement pas pendant T. La mesure de $p(m,T)$ [et des moments de $p(m,T)$] donne des informations sur la distribution de probabilité stationnaire $P(\alpha)$ du champ.

Rappelons que pour un rayonnement thermique $p(m,T)$ est (comme la distribution du nombre de photons dans le mode) une loi de Bose, alors que pour un état cohérent (vers lequel tend le mode laser très au dessus du seuil), on doit avoir une loi de Poisson

On peut donc suivre en fonction de l'inversion, l'évolution de la statistique du champ. On peut aussi étudier l'évolution en régime transitoire de $p(m,T)$, pourvu que T soit court devant le temps de relaxation de ce régime transitoire (voir figure 9 ci-dessous), et observer comment le rayonnement laser s'établit à partir du rayonnement thermique quand on "met en marche" brusquement le laser ("Q-switch")

b) $T \gtrsim T_c$.
Le champ a alors le temps d'évoluer pendant la mesure. On peut montrer que $p(m,T)$ est alors sensible à toutes les fonctions de corrélation du champ (de tous les ordres). Test particulièrement sévère de la théorie

Références

- Théorie M. Lax and M. Zwanziger Phys Rev A7, 750 (1973) et références in (en particulier aux travaux de Glauber, Kelley et Kleiner)

- Expériences

Fig 9 tirée de F.T. ARECCHI, V. DEGIORGIO and B. QUERZOLA Phys Rev Lett 19, 1168 (1967)

Fig 10 tirée de D. MELTZER, W. DAVIS, L. MANDEL Appl. Phys. Lett. 17, 242 (1970)

Fig 11 tiré de E. JAKEMAN, C.J. OLIVER, E.R. PIKE, M. LAX and M. ZWANZIGER J. Phys. A3, L52 (1970)

Quelques résultats expérimentaux

a) Cas $T \ll T_c$

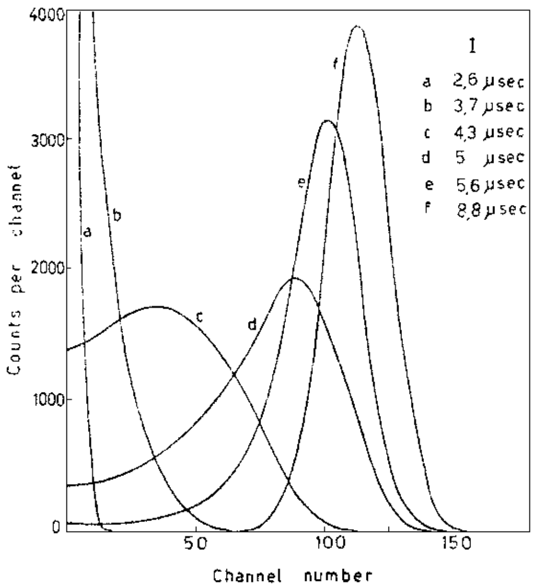


FIG. 9. Experimental statistical distributions with different time delays obtained on a laser transient. The solid lines connect the experimental points which are not shown to make the figure clearer. All distributions are normalized to the same area.

Etude de l'évolution transitoire de la statistique du mode laser après un "Q-switch" $T = 50$ n sec est très court devant le temps d'évolution, de l'ordre de 10 µ sec.

On voit clairement le passage d'une loi de Bose à une loi de Poisson.

b) Cas général

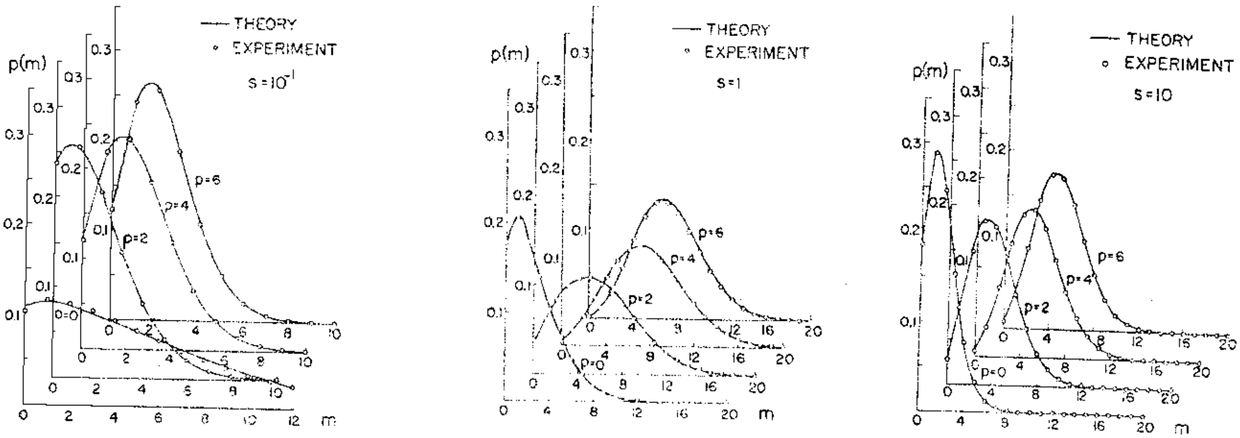


Fig 10 – Etude de $p(m,T)$ pour diverses valeurs du paramètre de pompage ($p = 0, 2, 4, 6$) et diverses valeurs du rapport $s = T/T_c$ ($s = 0.1, 1, 10$)

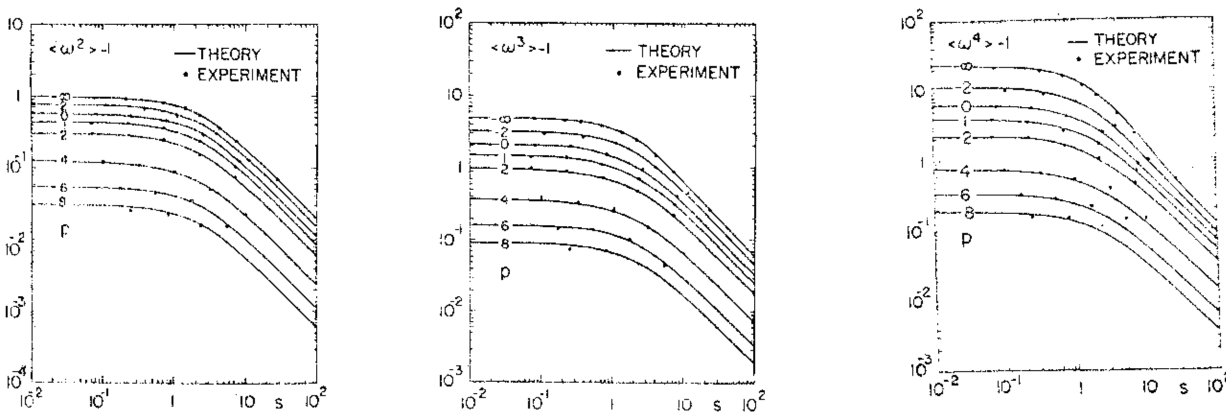


Fig 11 – Etude en fonction de $s = T/T_c$ et pour diverses valeurs du paramètre de pompage p des moments factoriels normalisés $\langle\omega^2\rangle$, $\langle\omega^3\rangle$, $\langle\omega^4\rangle$ de la distribution $p(m,T)$

$$\langle\omega^2\rangle = \frac{\langle m(m-1)\rangle}{\langle m\rangle^2} \qquad \langle\omega^3\rangle = \frac{\langle m(m-1)(m-2)\rangle}{\langle m\rangle^3} \qquad \langle\omega^4\rangle = \frac{\langle m(m-1)(m-2)(m-3)\rangle}{\langle m\rangle^4}$$

BIBLIOGRAPHIE (non exhaustive)

Ouvrages généraux

Laser Physics - M. Sargent III, M.O. Scully, W.E. Lamb Addison Wesley 1974

Quantum Optics - Proc. of the 1967 Varenna Summer School - ed R.J. Glauber Academic Press 1962.
Voir en particulier cours de R.J Glauber, T. Arecchi, M. Scully, H Haken et Weidlich

Quantum Optics ed S.M Mc Kay and A. Maitland (Academic Press New York 1970)
Voir en particulier cours de H. Haken

Laser Theory H. Haken (Handbuch der Phys. ed. by S. Flügge vol XXV/2c Springer 1970)

Synergetics H. Haken Springer Verlag 1977

Quantum statistical properties of radiation W.H. Louisell (John Wiley 1973)

Quantum statistics in Optics and Solid State Physics - Springer tracts in Modern Physics Vol 66 - Springer - Verlag (1973) - Articles de Graham et Haake

Articles de revue

H. Haken "Cooperative phenomena in systems far from thermal equilibrium and in non physical systems" - Rev. Mod Phys. 47, 67 (1975)

R. Graham "The phase transition concept and coherence in Atomic emission" in Progress in Optics Vol XII (ed. E. Wolf) North Holland 1974

H. Risken "Statistical properties of laser light" in Progress in Optics Vol VIII (ed E. Wolf) North Holland 1970

M. Lax "Fluctuation and Coherence Phenomena in Classical and Quantum Physics" in Brandeis University Summer Institute (1966 session) Vol II, ed. M. Chretien, E.P. Gross and S. Deser (Gordon and Breach 1968)

M. Lax "Quantum theory of noise in masers and lasers" in 1966 Tokyo Summer Lectures in Theoretical Physics (ed. by R. Kubo and H. Kamimura (Syokabo and Benjamin 1967)

Articles plus spécialisés

Approche équation pilote (pour la théorie du laser)

M.O. Scully and W.E. Lamb Phys. Rev. 159, 208 (1967)
Phys. Rev 166, 246 (1968)
Phys Rev 179, 179 (1969)

W. Weidlich and F. Haake Z. Phys. 185, 30 (1965)
Z. Phys 186, 203 (1965)

Approche équation de Fokker-Planck (pour la théorie du laser)

H. Risken Z. Phys 186, 85 (1965) et 191, 302 (1966)

R.D. Hempstead and M. Lax Phys. Rev 161, 350 (1967)

M. Lax and W. H. Louisell I.E.E.E. J. of Quantum Electronics 9E 3, 47 (1967)

Les courbes données dans le chapitre IX sont tirées de ces 3 références.

Equations de Langevin quantiques.

J. R. Senitzky Phys. Rev 119, 670 (1960)
" " Phys. Rev 124, 642 (1961)

M. Lax - Phys. Rev 145, 110 (1966)

H. Sauermann Z. Phys 188, 480 (1965)

Théorème de regression quantique

M. Lax Phys Rev 129, 2342 (1963)
M. Lax Phys Rev 172, 350 (1968)

Relations d'Einstein généralisées

· Etablies par une autre méthode basée sur la conservation des relations de commutation

H. Haken and W. Weidlich Z. Phys 189, 1 (1966)

Quasi-densités de probabilité

Cours de R. J. Glauber dans Les Houches 64 Quantum Optics and Electronics

Voir aussi cours Collège de France 1974-75