

解説

光子統計・光子相関法によるコヒーレント相互作用の測定

上西 克二

東北大学科学計測研究所 〒980 仙台市片平 2-1-1

(1983年3月11日受理)

Measurements of Coherent Interactions by Photon Statistics and Correlation Techniques

Katsuji KAMINISHI

Research Institute for Scientific Measurements, Tohoku University,
2-1-1, Katahira, Sendai 980, Japan

1. はじめに

光の生成または消滅が起こっている系では、そのエネルギーと運動量を放出または吸収する物質が存在し、光と物質の相互作用が深く関与している。たとえば、熱輻射の場合には黒体であり、レーザーでは光と原子のコヒーレント相互作用および熱浴 (reservoir) とのランダムな相互作用である¹⁻⁵⁾。したがって、発生した光の場または散乱光は、光と物質の相互作用を直接反映したコヒーレンスをもつことになる。光の場を量子力学的に取り扱うコヒーレンス理論は、異なる種々の光の場のコヒーレンスの表式を与え、場のコヒーレンスが光のゆらぎや相関関数等の統計的性質にいかに関わるかを示すとともに、これらが観測可能な量であることを明らかにしている^{3,4,6-10)}。ゆえに、光検出器に入射する個々の光子を区別して検出し、光子統計・光子相関を測定すれば、入射光のコヒーレンスそのものを知ることができるし、結果的には相互作用を調べることが可能であることを意味する。これを利用して、現在、光子統計・光子相関法は光通信、計測、分光など多くの分野に適用され、その基礎および応用についての研究が活発に行なわれている¹¹⁾がここでは触れない。

以下では、光と原子のコヒーレント相互作用を研究するうえで、光子統計・光子相関測定以外では困難または不可能であったと思われるいくつかの実験結果を示す。あわせて得られた物理的内容を解説することによって、光子統計・光子相関法がコヒーレント相互作用のなかで

も量子力学特有の現象を調べる有力な手段であることを示す。

2. 基本的な統計関数とその性質

この節では以下で必要となる統計関数について、コヒーレンス理論^{3,4,6-10)}で得られた結果を簡単に述べる。

時空を表わす4次元変数を x として、光の場を表わす演算子 $\hat{V}(x_i)$ (光強度 $\hat{I} = \hat{V}^\dagger \hat{V}$) と場の状態を記述する密度演算子 $\hat{\rho}$ を使って、 $2n$ 次の相関関数は、

$$G^{(2n)}(x_1, x_2, \dots, x_n) \equiv \text{Tr} \left\{ \hat{\rho} \prod_{i=1}^n \hat{V}^\dagger(x_i) \prod_{j=n}^1 \hat{V}(x_j) \right\} \\ \equiv \left\langle \prod_{i=1}^n \hat{V}^\dagger(x_i) \prod_{j=n}^1 \hat{V}(x_j) \right\rangle \quad (1)$$

と定義される。ただし、 $\hat{\cdot}$ はヒルベルト空間の演算子、 \dagger はエルミート共役、 $\langle \cdot \rangle$ は期待値を表わす。2次の相関からは観測される光強度が導け、4次の相関からは時刻 t と $t+\tau$ に同時に光を観測する確率分布関数、すなわち光強度の2次相関関数

$$P_2(t, t+\tau) = \alpha^2 \langle \mathcal{T} : \hat{I}(t) \hat{I}(t+\tau) : \rangle \\ \equiv \alpha^2 \langle \hat{I}(t) \rangle \langle \hat{I}(t+\tau) \rangle [1 + \lambda(\tau)] \quad (2)$$

が導ける。ここで $\mathcal{T}, ::$ は time order および normal order operator で、 α は光の検出効率を表わす量である。定義された関数 $\lambda(\tau)$ は、 $\Delta \hat{I} = \hat{I} - \langle \hat{I} \rangle$ を使って

$$\lambda(\tau) = \langle \mathcal{T} : \Delta \hat{I}(t) \Delta \hat{I}(t+\tau) : \rangle / \langle \hat{I}(t) \rangle \langle \hat{I}(t+\tau) \rangle \quad (3)$$

と書き換えられ、定常場の相対的ゆらぎを特徴づける量である。

いま、 \hat{V} 中の消滅演算子群 $\{a\}$ が固有値 $\{v\}$ をとる固有状態、すなわちコヒーレント状態 $|\{v\}\rangle$ 表示を用いると、場の密度演算子 $\hat{\rho}$ は次の対角形式で書き表わせる。

$$\hat{\rho} = \int \phi(\{v\}) |\{v\}\rangle \langle \{v\}| d\{v\} \quad (4)$$

ここで $\phi(\{v\})$ は、 P 表示とも呼ばれるもので、規格化されており実数である。(4)式を使うと normal order の演算子の期待値を計算する場合、 c 数の平均の形に最くことができ、 ϕ はそのときの重み関数としての役割を果たす。量子力学でも半古典論によっても同じ結論に到達するような場合には古典的な確率密度関数としての意味をもつ (たとえば熱的な場では Gauss 関数であり、コヒーレント状態では δ 関数) が、量子電気力学的効果を含む系では、 ϕ は observable でないうえに常に正とは限らないので確率密度関数とはいえない。 $\lambda(0)$ は、Gauss 場では 1, コヒーレント状態では 0 で、後述する (8)式から解釈すれば古典的には非負であるが、この場合、負の可能性があってこれは完全に量子力学効果である。 $\lambda(0)$ が正の場合には光子 bunching 効果¹²⁻¹⁶⁾を表わしており、負の場合には逆に光子 anti-bunching 効果¹⁷⁻²²⁾となる。

時刻 t から $t+T$ の間に n 個の光子を計数する確率は、

$$p(n, t, t+T) = \langle \mathcal{I} : \frac{\hat{W}^n e^{-\hat{W}}}{n!} : \rangle \quad (5)$$

で与えられ、 $\hat{W} = \alpha \int_t^{t+T} \hat{I}(t') dt'$ である^{23, 24)}。 $T \ll T_c$ 。

(コヒーレンス時間) の場合には強度 I の分布関数 $\mathcal{P}(I)$ を使って

$$p(n, t, t+T) = \frac{1}{n!} \int_0^\infty dI \mathcal{P}(I) (\alpha IT)^n e^{-\alpha IT} \quad (6)$$

と書ける。実際の分布関数としては、純コヒーレント状態や単一モードレーザーに対しては Poisson 分布になり、熱的な光に対しては、 $T \ll T_c$ で Bose-Einstein 分布、 $T \gg T_c$ で Poisson 分布となる。(6)式から平均計数値 $\langle n \rangle$ および r 次のモーメント $\langle n^{(r)} \rangle$ を計算すると次式が得られる。

$$\langle n \rangle = \alpha \langle I \rangle T, \quad \langle n^{(r)} \rangle = (\alpha T)^r \langle I^r \rangle \quad (7)$$

とくに、相対的ゆらぎ $\lambda(0)$ は次式で与えられる。

$$\lambda(0) = \langle n(n-1) \rangle / \langle n \rangle^2 - 1 = \langle (\Delta I)^2 \rangle / \langle I \rangle^2 \quad (8)$$

3. レーザーの統計的性質

3.1 単一モード He-Ne レーザー

6,328 Å の単一モード He-Ne レーザーは、光と原子の非線形相互作用の典型的研究対象であり、とくに threshold 近傍の振舞いは量子力学的理論が必要となる¹⁻⁵⁾。理論的には、二準位原子がレーザー場と非線形相互作用をし、これらが励起源と熱浴に接していると見なして、Langevin 力を付加した回転波近似の van der Pol の方程式で書けるといのが基本的なモデルである。具体的取扱いは種々異なるが、この方程式から出発した解析結果が正しいことは以下に示す実験結果が証明している。

threshold でゼロ、それ以下で負、それ以上で正の値をとる反転分布の大きさを表わす pump parameter a と、threshold での強度 $\langle I_0 \rangle$ を使って、定常状態のレーザー中の強度分布関数 $\mathcal{P}(I)$ は次のように与えられる^{1-5, 25)}。

$$\mathcal{P}(I, a) = \frac{2}{\pi \langle I_0 \rangle} \frac{\exp(-a^2/4)}{1 + \text{erf}(a/2)} \exp\left(-\frac{I^2}{\pi \langle I_0 \rangle^2} + \frac{Ia}{\sqrt{\pi} \langle I_0 \rangle}\right) \quad (9)$$

ここで $\text{erf}(x)$ は誤差関数である。(8), (9)式から $\lambda(0, a)$ の一般解が求まり、threshold では、

$$\lambda(0, 0) = \langle n^{(2)} \rangle_{a=0} / \langle n \rangle_{a=0}^2 - 1 = \frac{\pi}{2} - 1 \quad (10)$$

となる。逆に、 $\lambda(0, a)$ を測定すれば (9), (10)式から $\langle I_0 \rangle$ が求まり $\mathcal{P}(I, a)$ を決定できる。実際、 $p(n, t, t+T)$, 2次のモーメント、高次の累積率の測定から (9)式の正しさが証明された²⁵⁻³⁰⁾。とくに、高次の累積率の測定結果³⁰⁾では、同じ a の値に対して高次は早く減衰し、レーザー発振が強くなるにつれて多光子の bunching から急激に減少してコヒーレンスが増すことを具体的に示した。 $T \sim T_c$ のときの $p(n, t, t+T)$ の変化は、Lax ら³¹⁾の理論計算を Meltzer ら³²⁾が検証した。

Arecchi ら³³⁾と Davidson ら³⁴⁾は強度相関の測定を行ない、その関数形は一つの時定数 T_c で減衰する指数関数ではほぼ近似でき、 T_c は threshold 近くで最大値をとって理論計算値³⁵⁻³⁸⁾とよく一致することを示した。Chopra ら³⁹⁾は詳細な測定を行ない、相関関数は厳密には時定数の異なる二つの指数関数の和で表わされること、それらの振幅 M_1, M_2 の a 依存性は理論の予測値³⁵⁻³⁷⁾とよく一致することを検証した。3次の強度相関関数は多くの場合複雑な曲線で表わされ、一つの指数関

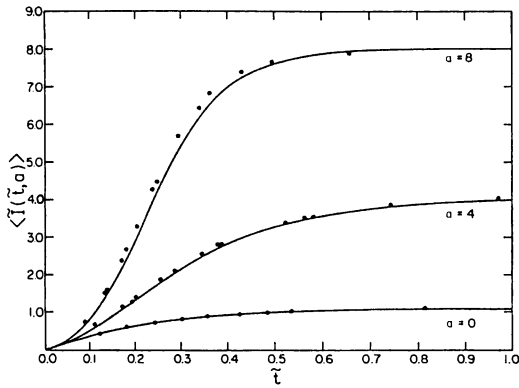


Fig. 1 Qスイッチレーザー出力強度の過渡応答 (文献 44) より転載

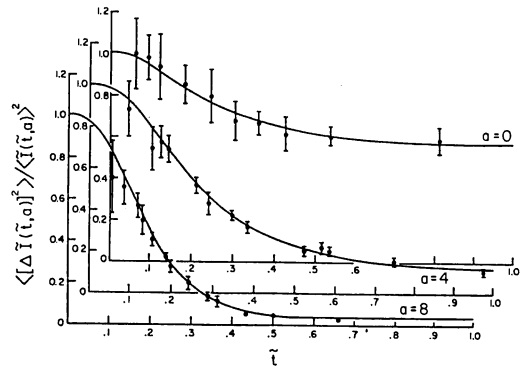


Fig. 2 Qスイッチレーザーの光強度の相対的ゆらぎの過渡応答 (文献 44) より転載

数では表わせないという理論計算⁴⁰⁾に対して、Chopraら⁴¹⁾は真の3次相関関数の測定結果が、誤差範囲内でこの計算値と一致することを示した。

定常状態にあるレーザーの特性に加えて動力学的特性⁴²⁻⁴⁶⁾も興味深い。Meltzerら^{44, 45)}は、He-Ne Qスイッチレーザーの動特性を threshold 付近でしかも光子計数法で測定した。Fig. 1, 2 は実験結果と Riskenら⁴⁶⁾の理論曲線(実線)であり、光強度、相対的ゆらぎともよく一致している。Fig. 1 には図示していないが規格時間 $\tilde{t}(=0.171t/T_c)$ が 0.1 以下の時の光強度の精密測定の結果はさらによい一致を得た。Fig. 2 に見られるように、すべて熱的状态 ($\lambda(0)=1$) から出発し、定常状態の値 (たとえば (10) から $a=0$ で 0.571) まで急速に減衰する様子がわかる。

最近の研究としては、共振器長のレーザーの統計的性質に及ぼす影響を調べた研究^{47, 48)}、発振周波数が原子スペクトルの中心からずれたときの detuning 効果を調べた研究⁴⁹⁻⁵¹⁾がある。後者で注目すべきことは、detuning が増すとゆらぎが大きくなり、同時に T_c も大きくなるという結果である⁵⁰⁾。スペクトル中心で発振しているときの T_c の a 依存性が従来の理論³⁵⁻³⁷⁾と一致することから考えると、大部分の実験では単一モードの周波数とスペクトル中心の関係は述べていないので、古い実験と理論的解析とを比較するとき注意を要する。

3.2 2モード He-Ne レーザー

threshold 近傍での2モードレーザーの量子論⁵²⁻⁵⁹⁾は単一モードに比べ解析が複雑になるためグラフ解が多くなる一方で、実験もそれほど多くはなく⁶⁰⁻⁶²⁾、まだ十分に研究されたとはいえない。He-Ne リングレーザーの場合には、周波数が同じで時計回りと反時計回りの二つのモードが立ち、しかもそれらの結合係数 ξ は共鳴源の

中心からの detuning 量によって変化する⁶³⁾。

Fig. 3, 4 はモード間に $\Delta a = a_1 - a_2 = 0.8$ だけ pump parameter に差がある場合についての M-Tehraniら⁶¹⁾の測定結果で、 a に対する光強度、相対的ゆらぎ、および規格化されたゆらぎの相互相関の依存性を示す。スペクトル中心、すなわち $\xi=1$ では、 a の増大につれてモード1の強度は単調に増大し、ゆらぎは小さくなってコヒーレンスは増す。一方、モード2では強度は飽和し $a \gg 0$ でも熱的光源と同じゆらぎをもつ。また、モード1, 2間のゆらぎは負の大きな相関をもっている。 $\xi=0.61$ と結合が弱まったときには、モード1, 2とも a の増大とともにコヒーレンスが増大し、レーザー発振を強める。すべての実験点と実線の理論曲線⁵⁶⁾とはよく一致していることがわかる。

相関関数の測定⁶²⁾から $\Delta a=0$ のときの T_c を求めた実験では、 T_c は a の増大とともに単調に増大していることが見いだされた。ともに単一モードレーザーの特性とは大きく異なっている。

3.3 色素レーザー

He-Ne レーザーの増幅媒質のスペクトル幅は不均一拡がりによるのに対し、色素レーザーでは均一拡がりによる。また、色素にはレーザー発振に関与する一重項単位のほかに三重項単位が存在し、しかも三重項単位間のエネルギーがレーザー周波数とほぼ一致している。したがってレーザーの特性には多くのパラメータが関係するが、その値も実際のレーザー装置で決まる量で、ときにはオーダーが変わる場合もある⁶⁴⁾。このような事情から、単一モード・他モードを問わず種々のモデルが考え出され、多様な結果が提示されている⁶⁵⁾。

2モードリング色素レーザーの実験⁶⁶⁻⁶⁸⁾では、均一拡がりによる効果 ($\xi=2$ と強結合) が影響して双安定性が

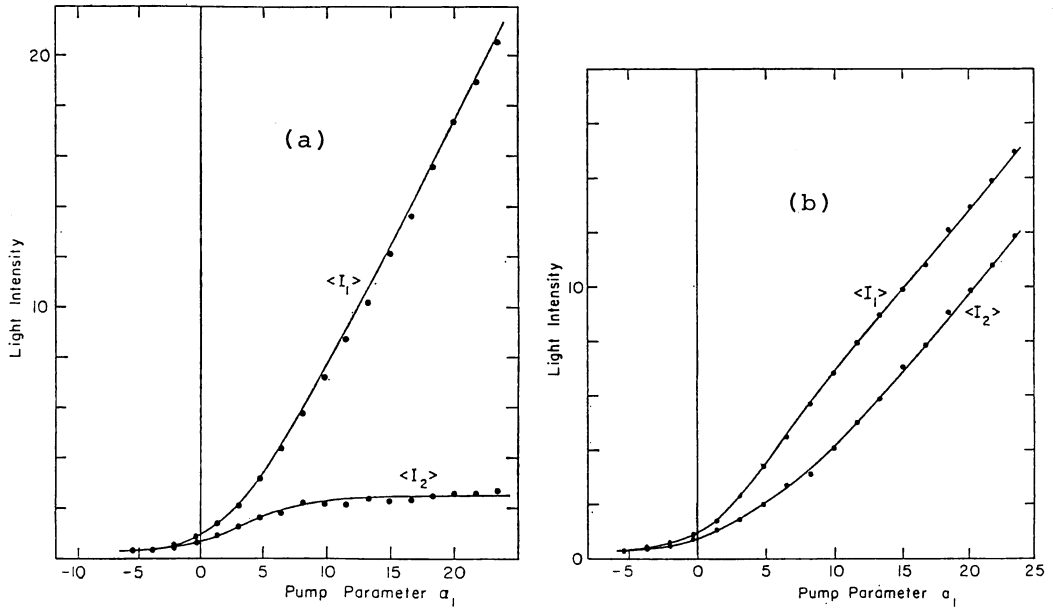


Fig. 3 pump parameter a_1 に対する 2 モードリングレーザーの平均強度特性 (文献 61) より転載
 (a) $\xi=1.0$, (b) $\xi=0.61$

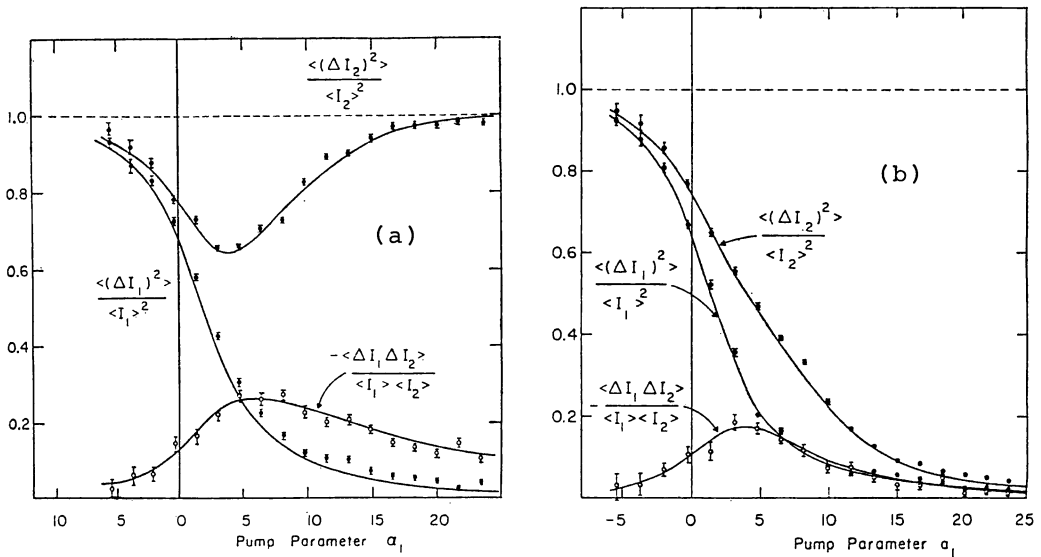


Fig. 4 2 モードの相対的ゆらぎと規格化されたゆらぎの相互相関の特性 (文献 61) より転載
 (a) $\xi=1.0$, (b) $\xi=0.61$

生じ、 $p(n, t, t+T)$ が二つのピークをもった形になること⁶⁶⁾、モード競合の結果強度は on/off 的变化を示し、その switch 時間の分布特性および平均時間は a に対して単調に増大すること⁶⁸⁾ が得られ、2 モード間の結合の基本特性については理論的解析⁶⁹⁾ とほぼ一致する。しかし、三重項の影響については明確にはつかめていない。単一モード色素レーザーのいくつかの実験⁷⁰⁻⁷³⁾ のな

から Kaminishi ら⁷³⁾ の Ar^+ レーザー (5,145 Å) 励起 Rh-6G CW レーザーの結果を **Fig. 5, 6** に示す。ここには図示しなかった $p(n, t, t+T)$ の測定結果およびそれから導いた $\mathcal{P}(I)$ は、 n と $\langle I \rangle$ が 0 のところで鋭いピークをもち、かつ長い尾を引く拡がった分布関数であった。二重ピーク構造は見いだしていない。Fig. 5 の相対的強度ゆらぎは、平均強度 $\langle n \rangle$ が小さくなるにつ

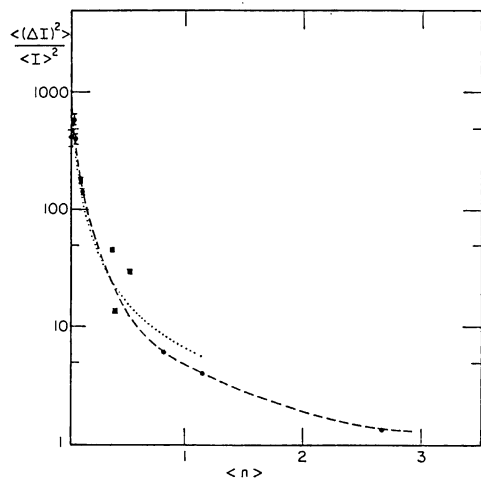


Fig. 5 色素レーザーの平均強度 $\langle n \rangle$ に対する相対的ゆらぎ特性 (文献 73) より転載

れてレーザー発振がスイッチ的になることから単調に増大し、数百という他のレーザーでは見られない値をとる。破線は結果の傾向を示し、点線は a 自身が Gauss ゆらぎをもつと仮定したときの現象論的解析結果である。一方、相関関数は時定数が大きく異なる ($\tau_3 \sim$ 数 μs , $\tau_2 \sim 10 \mu\text{s}$, $\tau_1 \sim 100 \mu\text{s}$) 三つの指数減衰関数の和として表わされた。Fig. 6 からわかるように、振幅係数 c_i は互いに同程度の大きさであり、その大小関係も発振波長 (三重項の吸収断面積が異なる) や平均強度に強く依存する結果が得られた。以上の結果の一部は定性的に説明つくものの、多くは理論的予測⁶⁵⁾からは説明できない。

最近、Graham ら^{74,75)}は方程式に Langevin 力を加法的に導入するかわりに、pump parameter に random ゆらぎを入れるという単純なモデルに基づいた解析を行ない、Kaminishi らの $p(n, t, t+T)$, $\langle \langle \Delta I \rangle^2 \rangle / \langle I \rangle^2$, $\lambda(\tau)$ の観測結果の統一的な説明を試みた。異なる実験条件の結果に対して同じパラメータ値を使ったこと、従来のレーザー理論で認められている Langevin 力を無視している点で問題はあるものの、ただ二つのパラメータだけでまったく性質の異なる三つの実験曲線を第一近似で説明できた。 a のゆらぎ効果を指摘した他の研究⁶⁶⁾も併せて考えると、Graham らのモデルは色素レーザーの本質に迫るきっかけとなる。より精密な実験と理論が待たれる。

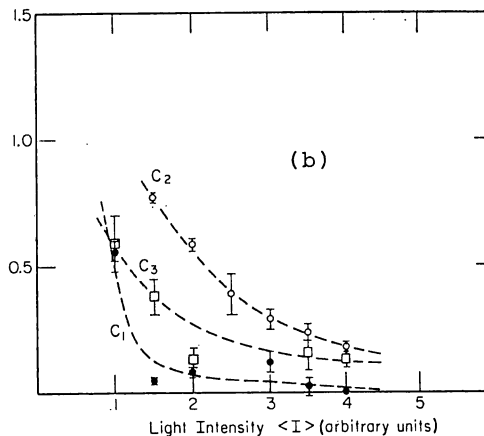
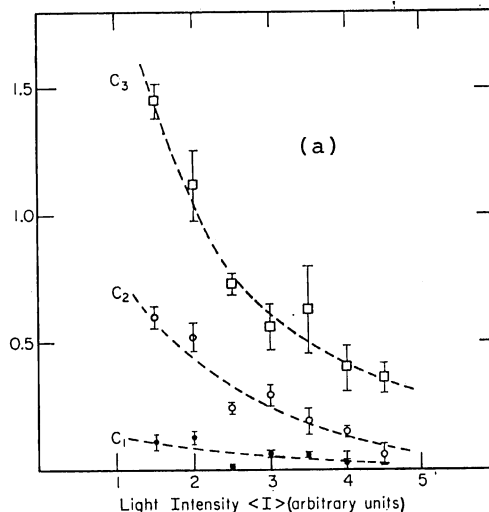


Fig. 6 相関測定から得られた指数関数の係数 c_1, c_2, c_3 の平均強度 $\langle I \rangle$ 依存性 (文献 73) より転載

(a) 発振波長 5, 627 Å

(b) 発振波長 5, 999 Å

4. 単一モードレーザー光中の原子からの蛍光の性質

4.1 蛍光スペクトルの三重項構造

単一モードレーザー光中の孤立した二単位原子からの共鳴蛍光の量子電気力学理論では、いくつかの興味ある量子現象を予測した^{8,76-79)}。その一つは、強いレーザー光の場合、AC Stark 効果が作用して蛍光スペクトルは三重項構造をもつことである。中心スペクトルはレーザー一周波数と同じで、 δ 関数の Rayleigh 散乱光が重なること (off-resonance で顕著)、三重項のおのおののスペクトル幅はレーザー強度によらず自然幅またはその 1.5 倍

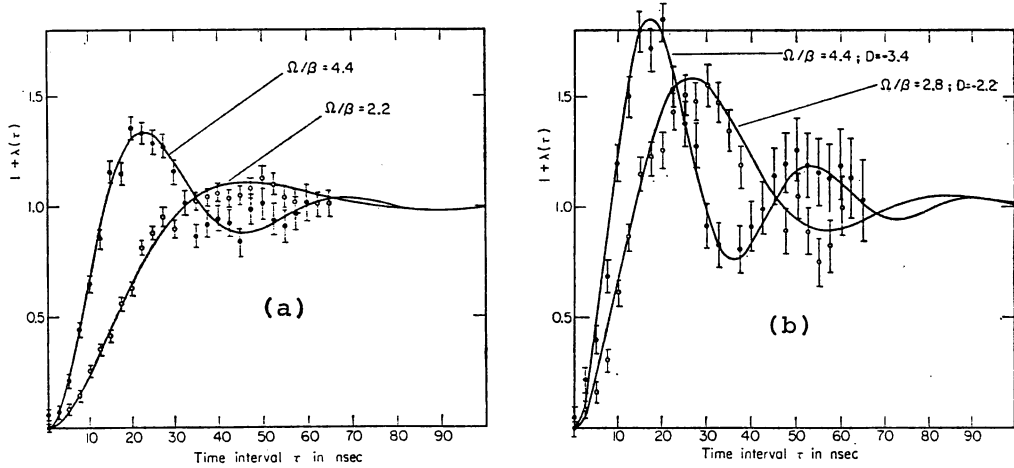


Fig. 7 蛍光の $1 + \lambda(\tau)$ の測定値と理論計算値との比較 (文献 22) より転載
 (a) detuning なし, (b) detuning あり

の範囲にあるという結果は注目すべきことである⁷⁶⁻⁷⁸⁾。これは Schuda ら⁸⁰⁾によって初めて実験的に確認され、Grove ら^{81,82)}が精密な実験を行なって理論との一致を検証した。一方、レーザー分光^{83,84)}で多く適用されるように、レーザー周波数を掃引し、蛍光は分光せず全強度を検出する場合のスペクトル幅の power 拡りと蛍光強度の飽和特性については、Citron らの実験によって理論との一致が確認された⁸⁵⁾。以上の実験は Ω (Rabi 周波数) $\gg \beta$ (Einstein の A 係数の 1/2) が成立するとき十分な精度をもっているの、強いレーザー場について量子電気力学の正しさが検証されたといえる。

4.2 光子 anti-bunching

レーザー強度が弱く $\Omega \sim \beta$ の場合の量子電気力学の検証は、光子 anti-bunching 効果^{17,18)}の測定で行なわれた。逆に、光子 anti-bunching 効果が確認されている唯一の例が単一原子からの蛍光においてであって、Camichel ら¹⁹⁾による理論的予測があり、Kimble ら²⁰⁾によって初めて観測された。Na 原子を Abate⁸⁶⁾の提唱した光ポンピング技法^{87,88)}によって実質的に二準位原子と見なせる実験条件を作り、 $3^2S_{1/2}(F=2, m_F=2) - 3^2P_{3/2}(F'=3, m_F=3)$ の遷移で測定した Dagenais ら²²⁾の精密実験の結果を Fig. 7 に示す。図の測定点は、実験データから原子ビーム中の原子数のゆらぎの効果²¹⁾と dark count の効果を除いて示してある。量子電気力学に基づく計算結果によると、二光子相関関数は、

$$\langle \mathcal{I} : \hat{I}(t) \hat{I}(t+\tau) : \rangle = \langle \hat{I}(t) \rangle \langle \hat{I}(t+\tau) \rangle_G \quad (11)$$

で与えられる^{19,78)}。ここで $\langle \hat{I}(t) \rangle_G$ は、 $\tau=0$ で基底状態にあった原子がレーザー場に入った後、時刻 τ で発光する強度である。図中に示したパラメータ値に対し具体

的に $\langle \hat{I}(t) \rangle_G$ を計算して求めた値を実線で示した。基底状態にある原子は光を放出できないことから $\lambda(0) = -1$ が必ず成立し、完全な anti-bunching を示している。 Ω が大きくなると $\lambda(\tau)$ の立ち上がりが早く振動も大きくなるほか、detuning D が大となっても同様の特性を示し、磁気共鳴の章動と類似している。また、パラメータ値によっては、 $\lambda(\tau)$ の値が 1 以上の場合もあることを例証した。

光子 anti-bunching のある系 ($\lambda(0) < 0$) では、光子が時間的に等間隔に並ぶ傾向にあってゆらぎの小さい系であることから、Poisson 分布 ($\lambda(0) = 0$) より狭い光子計数分布が期待され、Mandel⁸⁹⁾によって近似解が与えられた。最近、Cook⁹⁰⁾と Lenstra⁹¹⁾は互いに異なった方法を用いて厳密な分布関数を求めたが、それを検証した実験は発表されていない。

4.3 蛍光三重項スペクトルの相関

前節では、原子からの蛍光全てを検出器で受けたときの強度相関を扱った。蛍光三重項のスペクトル間の相関については、Cohen-Tannoudji らが理論的に検討して次の結果を得た⁹²⁾。(A) ω_L (レーザー周波数) $= \omega_0$ (原子スペクトルの中心周波数) で $\Omega \gg \beta$ の場合、両 side band (ω_A, ω_B) のおのおの自己相関は anti-bunching であるが、 ω_A と ω_B との相互相関は bunching を示すこと、(B) $\Omega \gg \beta$ で $\omega_B = \omega_0$ の大きな detuning がある場合には、中心スペクトルの Rayleigh 散乱光の自己相関は τ に依らず一定であるが、 ω_A と ω_B の光の発生には二次の非線形散乱過程がきくので、相互相関は $\tau=0$ で突然ある一定値に達し、それが時間とともに上位準位の寿命で決まる時定数で減衰する指数関数となること、などであ

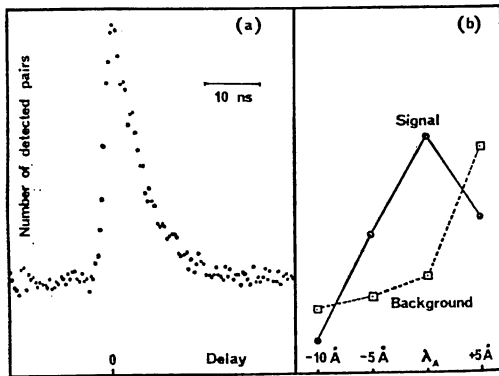


Fig. 8 蛍光三重項の両 side band (ω_A, ω_B) の相互相関の実測値 (a), λ_A を変えたときの信号振幅と background の大きさの変化 (b) (文献 93) より転載)

る。

Aspect ら⁹³⁾ は, Sr 原子の $^1S_0 - ^1P_1$ ($\lambda_0 = 4,607 \text{ \AA}$) 遷移と Ar⁺ レーザー ($4,579 \text{ \AA}$) を使い, 28 \AA ずれた side band ω_B を得るようにレーザー強度を調節して (B) の相関測定を行なった。Fig. 8(a) の測定値は, background があるものの予測どおりの特性曲線を示している。Fig. 8(b) は $\lambda_A = 4,551 \text{ \AA}$ の周辺で測定波長を変えたときの信号の大きさの変化を調べたもので, + 側は Rayleigh 散乱光があるため background が大きくなっているが, λ_A で最大信号を得た。これは特殊条件下での三重項の相関であるが, 連続波レーザー光で原子を励起しても減衰曲線そのものが得られることは興味深い。

5. おわりに

以上簡単に光子統計・光子相関の測定が光と原子のコヒーレント相互作用を調べるうえで有効な手段であることを示した。量子電気力学による解析が不可欠な物理系では, 光の場は必然的に光子の生成と消滅として記述しなければならず, 光子統計・光子相関が物理の本質に迫る基本的な測定対象であることは明白である。この意味から, いままで同様, コヒーレント相互作用の研究手段として, 光子統計・光子相関法は重要な役割を持ち続けるであろう。光子統計の測定では, T は通常 $1 \mu\text{s}$ 前後が多いが, 最近 ns オーダーのパルスの光子統計を測定した研究が発表された⁹⁴⁾。光子統計・光子相関法を広範囲の対象に適用するには, ns またはそれ以下で測定することもますます重要となろう。

以上, 筆者の興味に偏った解説となってしまったが, 分光等への応用が考えられる現象もいくつか見られる。

読者の参考になれば幸いである。

文 献

- 1) H. Risken: *Progress in Optics*, Vol. VIII, ed. E. Wolf (North-Holland, Amsterdam, 1970) p. 239.
- 2) H. Haken: *Handbuch der Physik*, Vol. XXV/2c (Springer, Berlin, 1970).
- 3) 霜田光一, 矢島達夫編著: 量子エレクトロニクス(上) (裳華房, 1972).
- 4) W. H. Louisell: *Quantum Optical Properties of Radiation* (Wiley, New York, 1973).
- 5) M. Sergent, III, M. O. Scully and W. E. Lamb, Jr.: *Laser Physics* (Wesley, London, 1974).
- 6) R. J. Glauber: *Phys. Rev.*, **130** (1963) 2529; **130** (1963) 2766.
- 7) L. Mandel and E. Wolf: *Rev. Mod. Phys.*, **37** (1965) 231.
- 8) J. H. エバリー, L. アレン, 高辻正基: 量子光学入門 (東京図書, 1974). 多少内容が異なるが大部分は同じもの L. Allen and J. H. Eberly: *Optical Resonance and Two-level Atoms* (Wiley, New York, 1975).
- 9) 加野 泰: コヒーレンス理論とその応用 (岩波書店, 1976).
- 10) 高辻正基, 江沢 洋: 量子物理学の展望 (上), 江沢洋, 恒藤敏彦編 (岩波書店, 1977) p. 213.
- 11) B. Saleh: *Photoelectron Statistics* (Springer, Berlin, 1978).
- 12) R. Hanbury Brown and R. Q. Twiss: *Nature*, **177** (1956) 27.
- 13) B. L. Morgan and L. Mandel: *Phys. Rev. Lett.*, **16** (1966) 1012.
- 14) D. T. Phillips, H. Kleiman and S. P. Davis: *Phys. Rev.*, **153** (1967) 113.
- 15) C. A. Kocher and E. D. Commis: *Phys. Rev. Lett.*, **18** (1967) 575.
- 16) D. Y. Al-Salamek and D. Scarl: *Phys. Rev. A*, **26** (1982) 3423.
- 17) D. F. Walls: *Nature*, **280** (1979) 451.
- 18) H. Paul: *Rev. Mod. Phys.*, **54** (1982) 1061.
- 19) H. J. Camichael and D. F. Walls: *J. Phys. B: At. Mol. Phys.*, **9** (1976) L 43.
- 20) H. J. Kimble, M. Degenais and L. Mandel: *Phys. Rev. Lett.*, **39** (1977) 691.
- 21) H. J. Kimble, M. Degenais and L. Mandel: *Phys. Rev. A*, **18** (1978) 201.
- 22) M. Degenais and L. Mandel: *Phys. Rev. A*, **18** (1978) 2217.
- 23) L. Mandel: *Proc. Phys. Soc.*, **72** (1958) 1037; **74** (1959) 233.
- 24) P. L. Kelley and W. H. Kleiner: *Phys. Rev.*, **136** (1964) A316.
- 25) A. W. Smith and J. A. Armstrong: *Phys. Rev. Lett.*, **16** (1966) 1169.
- 26) C. Freed and H. A. Haus: *Phys. Rev. Lett.*, **15** (1965) 943.
- 27) F. T. Arecchi: *Phys. Rev. Lett.*, **15** (1965) 912.
- 28) A. W. Smith and J. A. Armstrong: *Phys. Lett.*, **19** (1966) 650.
- 29) F. T. Arecchi, G. S. Rodari and A. Sona: *Phys. Lett.*, **25 A** (1967) 59.
- 30) R. F. Chang, V. Korenman, C. O. Alley and R. W. Detembeck: *Phys. Rev.*, **178** (1969) 612.
- 31) M. Lax and M. Zwanziger: *Phys. Rev. Lett.*, **24**

- (1970) 937.
- 32) D. Meltzer, W. Davis and L. Mandel: Appl. Phys. Lett., **17** (1970) 242.
- 33) F. T. Arecchi, M. Giglio and A. Sona: Phys. Lett., **25 A** (1967) 340.
- 34) F. Davidson and L. Mandel: Phys. Lett., **25 A** (1967) 700.
- 35) M. Lax and W. H. Louisell: IEEE J. Quantum Electron., **QE-3** (1967) 47.
- 36) R. D. Hemstead and M. Lax: Phys. Rev., **161** (1967) 350.
- 37) H. Risken and H. D. Vollmer: Z. Phys., **201** (1967) 323.
- 38) M. O. Scully and W. E. Lamb, Jr.: Phys. Rev., **159** (1967) 208.
- 39) S. Chopra and L. Mandel: IEEE J. Quantum Electron., **QE-8** (1972) 324.
- 40) C. D. Cantrell, M. Lax and W. A. Smith: Phys. Rev. A, **7** (1973) 175.
- 41) S. Chopra and L. Mandel: Phys. Rev. Lett., **30** (1973) 60.
- 42) F. T. Arecchi, V. Degiorgio and B. Querzola: Phys. Rev. Lett., **19** (1967) 1168.
- 43) F. T. Arecchi and V. Degiorgio: Phys. Rev. A, **3** (1971) 1108.
- 44) D. Meltzer and L. Mandel: Phys. Rev. Lett., **25** (1970) 1151.
- 45) D. Meltzer and L. Mandel: Phys. Rev. A, **3** (1971) 1763.
- 46) H. Risken and H. D. Vollmer: Z. Phys., **204** (1967) 240.
- 47) C.-Y. Huang and L. Mandel: Phys. Rev. A, **18** (1978) 644.
- 48) C.-Y. Huang and L. Mandel: Opt. Commun., **32** (1980) 345.
- 49) S. Singh, S. Friberg and L. Mandel: Opt. Lett., **7** (1982) 99.
- 50) S. Singh, S. Friberg and L. Mandel: Phys. Rev. A, **27** (1983) 381.
- 51) S. Singh and L. Mandel: J. Opt. Soc. Am., **72** (1982) 304.
- 52) S. Grossmann and P. H. Richter: Z. Phys., **249** (1971) 43.
- 53) P. H. Richter and S. Grossmann: Z. Phys., **255** (1972) 59.
- 54) R. Graham and W. A. Smith: Opt. Commun., **7** (1973) 289.
- 55) F. T. Arecchi and A. M. Ricca: Phys. Rev. A, **15** (1977) 308.
- 56) M. M-Tehrani and L. Mandel: Phys. Rev. A, **17** (1978) 677.
- 57) F. T. Hioe, S. Singh and L. Mandel: Phys. Rev. A, **19** (1979) 2036.
- 58) S. Singh and L. Mandel: Phys. Rev. A, **20** (1979) 2459.
- 59) S. Singh: Phys. Rev. A, **23** (1981) 837.
- 60) M. M-Tehrani and L. Mandel: Opt. Lett., **1** (1977) 196.
- 61) M. M-Tehrani and L. Mandel: Phys. Rev. A, **17** (1978) 694.
- 62) S. Singh and L. Mandel: Opt. Commun., **40** (1981) 139.
- 63) M. M-Tehrani and L. Mandel: Opt. Commun., **16** (1976) 16.
- 64) F. P. Schäfer ed.: *Dye Lasers* (Springer, Berlin, 1977).
- 65) K. Kaminishi, R. Roy, R. Short and L. Mandel: Phys. Rev. A, **24** (1981) 370 の文献参照.
- 66) R. Roy and L. Mandel: Opt. Commun., **34** (1980) 133.
- 67) R. Roy and L. Mandel: Opt. Commun., **35** (1980) 247.
- 68) R. Roy, R. Short, J. Durnin and L. Mandel: Phys. Rev. Lett., **45** (1980) 1486.
- 69) S. Singh and L. Mandel: Phys. Rev. A, **20** (1979) 2459.
- 70) F. Davidson: IEEE J. Quantum Electron., **QE-10** (1974) 429.
- 71) J. A. Abate, H. J. Kimble and L. Mandel: Phys. Rev. A, **14** (1976) 788.
- 72) R. Short, R. Roy and L. Mandel: Appl. Phys. Lett., **37** (1980) 973.
- 73) K. Kaminishi, R. Roy, R. Short and L. Mandel: Phys. Rev. A, **24** (1981) 370.
- 74) R. Graham, M. Honerbach and A. Schenzle: Phys. Rev. Lett., **48** (1982) 1396.
- 75) R. Graham, M. Honerbach and A. Schenzle: Phys. Rev. Lett., **49** (1982) 422.
- 76) B. R. Mollow: Phys. Rev., **188** (1969) 1969.
- 77) B. R. Mollow: Phys. Rev. A, **12** (1975) 1919.
- 78) H. J. Kimble and L. Mandel: Phys. Rev. A, **13** (1976) 2123.
- 79) H. J. Kimble and L. Mandel: Phys. Rev. A, **15** (1977) 691.
- 80) F. Schuda, C. R. Stroud, Jr. and M. Hercher: J. Phys. B: At. Mol. Phys., **7** (1974) L198.
- 81) F. Y. Wu, R. E. Grove and S. Ezekiel: Phys. Rev. Lett., **24** (1975) 1426.
- 82) R. E. Grove, F. Y. Wu and S. Ezekiel: Phys. Rev. A, **15** (1977) 227.
- 83) K. Shimoda ed.: *High Resolution Laser Spectroscopy* (Springer, Berlin, 1976).
- 84) W. Demtröder: *Laser Spectroscopy* (Springer, Berlin, 1981).
- 85) M. L. Citron, H. R. Gray, C. W. Gabel and C. R. Stroud, Jr.: Phys. Rev. A, **16** (1977) 1507.
- 86) J. A. Abate: Opt. Commun., **10** (1974) 269.
- 87) W. Happer: Rev. Mod. Phys., **44** (1972) 169.
- 88) 藤崎 努, 小川 徹: 応用物理, **46** (1977) 856.
- 89) L. Mandel: Opt. Lett., **4** (1979) 205.
- 90) R. J. Cook: Phys. Rev. A, **23** (1981) 1243.
- 91) D. Lenstra: Phys. Rev. A, **26** (1982) 3369.
- 92) C. Cohen-Tannoudji and S. Reynaud: Philos. Trans. R. Soc. London A, **293** (1979) 223.
- 93) A. Aspect, G. Roger, S. Reynaud and C. Cohen-Tannoudji: Phys. Rev. Lett., **45** (1980) 617.
- 94) R. S. Bondrant, P. Kumar, J. H. Shapiro and M. M. Salour: Opt. Lett., **7** (1982) 523.