

量子統計力学的立場での非平衡協力現象 — レーザー系 —

筑波大・物理 有 光 敏 彦

高 田 裕 司

お茶の水大・理 柴 田 文 明

レーザー発振現象が, 平衡系における2次相転移現象の類似で捕えられることは, よく知られている。^{1,2)} ここでは, 協同現象という基本概念のもとに, 議論がなされる。³⁾ ポンピングパラメータ σ_0 が, 発振のしきい値 σ_{th} 以下では, 各原子からコヒーレンスのない光が, 乱雑に放射される。これは, 強磁性体におけるパラ相に対応する。一方, 発振のしきい値を越えると, 誘導放出により, 位相のそろったコヒーレントなレーザー光が放射される。これは, 強磁性体におけるフェロ相に対応する。

ところで, 以上の対応を議論するときには, 原子双極子が協同的に振舞うことを仮定したうえで, 断熱消去近似によって, 原子系を消去する。そして, 光波の複素振幅 b に対する GL 自由エネルギー

$$\Phi = \frac{1}{2} \alpha |b|^2 + \frac{1}{4} \beta |b|^4, \quad \beta > 0,$$

$$\alpha \propto \sigma_0 - \sigma_{th},$$

を導出し, これに基づいて類似を議論するのである。定常発振レーザー光のコヒーレンスについては, b の位相に対する symmetry breaking field を導入して, 特定の位相を選び出すことによって捕える。これは, 強磁性体におけるフェロ相での自発磁化を求めることと同等である。

さて, レーザー系には, もともと原子双極子間の協同現象を起こし, コヒーレントなレーザー光を発振する機構が内在しているはずである。それを調べるためには, 以上のような断熱消去近似に基づいた議論や, 定常状態による議論ではむづかしい。そこで我々は, 原子系, 光子系及びそれぞれに対する熱浴を含んだ全系を, 量子統計力学的に扱い, symmetry break した初期条件が, ポンピングパラメータ σ_0 に依って, どのように時間発展するかを調べることによって, レーザー系における協同現象及びコヒーレンスを捕えてみることにした。

定式化の手順は, 全系に対するリウヴィユ方程式に, 減衰理論を用いて熱浴を消去し, 2準位原子系の演算子はスピンコヒーレント表示で, また, 光子系の演算子はボゾンコヒーレント

表示で、 c -数空間に写す。その空間での疑似分布関数を、固有関数展開し、展開係数に関する常微分方程式を、ルンゲクッタ法で数値的に解く⁴⁾。

経済的理由から、2つの原子の場合を調べた。その結果、発振しきい値以上では、発振光の位相に、原子双極子の位相が引込まれることがわかった。また、2つの原子双極子の相関の位相が、発振しきい値以上ではそろい、以下では π だけずれることがわかった。つまり、発振しきい値以上では、協同現象が実際に起こり、2つの原子双極子の位相がそろい、対称性の破れた状態が維持され、コヒーレントなレーザー光が放射されるのである。

種々のモーメントの時間発展や、疑似分布関数の時間発展の図は、くわしい解析とともに近く発表する予定なので、そちらを参照していただきたい⁵⁾。

参考文献

- 1) V. DeGiorgio and M. O. Scully: Phys. Rev. A2 (1970) 1170.
- 2) R. Graham and H. Haken: Z. Physik 237 (1970) 31.
- 3) H. Haken: *Synergetics – An Introduction* (Springer-Verlag, Berlin and Heidelberg, 1978).
- 4) T. Arimitsu and F. Shibata: J. Phys. Soc. Japan 52 (1983) 772.
- 5) T. Arimitsu, F. Shibata and Y. Takada: J. Phys. Soc. Japan in preparation.