レーザー解説 2

レーザーと生命現象

櫛 田 孝 司*

(昭和54年 7 月27日 受理)

Analogy between a Laser and Life

Takashi KUSHIDA*

(Received July 27, 1979)

1. はじめに

科学の色々な分野で我々は沢山の同種の要素(サブシステム)より成る集合系を扱うことが多いが、そのマクロな系の性質がサブシステムの作用の単なるランダムな重ね合わせでは説明できない場合が非常にしばしばある。例えば多くのスピンより成る強磁性体, 多くの電気双極子より成るレーザー, 多くの分子より成る化学的集合体, 多くの細胞より成る生体, 多くのニューロンより成る神経網, 多くの木より成る森林, 多くの人より成る社会などなどがそれである。この場合, 各要素はお互いの間の相互作用の結果として協力し合い, 全体として或る種の秩序状態を作っていると考えることができるが, そのような現象は協同現象(co-operative phenomena)と呼ばれる。こう云った現象において, 働いている原理は本質的には共通のものであるとの認識のもとに, それを抽出して総合的な学問とする新しい物理学の分野が最近 H. Haken らにより提唱されており, これを Synergetics と呼ぶ。¹⁻⁴⁾ その語源である synergy は協同作用とか相乗効果とか云った, つまり集合系が要素の作用の単なる合成以上の効果を表わすことを

意味する。各要素の性質の単なる加え合わせでは出て来ない性質が現われるのであるから, これは典型的な非線形現象である。この Synergetics では, レーザーをモデルにして無秩序から秩序が現われて来るメカニズムとか, マクロな秩序性を表わす量の運動の性質など色々な研究が行なわれているが, 本稿ではこれに関連して, レーザーと生命現象の類似性について考えてみることにする。容易に分かるように, この二については熱平衡から大きく離れた系でありながら, マクロな秩序性が自発的に現れると云うことに関して多くの類似点をもっている。

2. 静的秩序性と動的秩序性

まずマクロな秩序性について考えるために, 簡単な例として磁石を取り上げてみよう。その強い磁性の原因が磁性体を形成する原子のもつ磁気モーメント(単にスピンと呼ぶ)が規則正しく配列することにあるのはよく知られている。すなわち, 高い温度ではスピンのランダムな熱運動のために各スピンの方向はでたらめであるが, 臨界温度 T_c (キュリー点) 以下になるといわゆる相転移を起こし, マクロな領域にわたってスピンの方向のそろった秩序状態が実現し

* 大阪大学理学部物理教室 (〒 560 豊中市待兼山)

* Department of Physics, Faculty of Science, Osaka University, (Toyonaka, Osaka 560)

て永久磁石となる。これはスピンの間で働くスピンの方向をそろえようとする力が、低い温度では熱運動によるばらばらにしようとする力に打ち勝つためである。すなわち、交換相互作用のために電子はスピンをそろえた方が系のエネルギー U は低くなるが、熱平衡状態で最小となるのは自由エネルギー

$$F = U - TS$$

(T は絶対温度, S はエントロピー) であるから, T が大きい時には S の大きなランダムな状態が, また T が小さい時には U の小さい秩序状態が安定になる訳である。しかし, 外部磁場がない場合, もしスピンの方向が完全に均等であるならば, 臨界温度以下になってもスピンは一方向にそろえることは無いだろう。すなわち, 氷点以下でも凝固しない過冷却状態に相当する状態が実現すると考えられる。しかし, このような状態は不安定であり, ゆらぎにより均等性が破れ, 或る方向を向いたスピンの数が他の方向より多くなったとすると, 急激に多くのスピンがその方向にそろってしまう。それまで等方的であったものが, 高い対称性が破れて特定の方向性をもつようになるので, これを対称性の破れ(broken symmetry)と呼んでいる。この方向はゆらぎで決まるため, あらかじめどの方向になるかを云うことはできない。

このような問題を扱うとき, 莫大な数の個々のスピンを考えるのではなく, 系全体に関係する量を扱うのが有効である。例えば磁石の場合には, 各スピンによる平均の場合, すなわち, 個々の原子磁気モーメントによってできた仮想的な分子磁場を考える。マクロな秩序性のないときこの量はゼロであり, 秩序性が増すにしたがってその値も大きくなるから, これは秩序の良きの目安を与える。さらにこれが各スピンに作用して全体をその方向にそろえる働きをするから, この量が全体の秩序のあり方, つまり何かどの方向にそろおうと云った指示を与えるものであると考えることができる。このような量を秩序パラメーターと呼ぶ。サブシステムの変化の時

定数は通常, 秩序パラメーターのそれよりもずっと短いので, サブシステムは秩序パラメーターの変化にただちに応答するうえ, 一般に秩序パラメーターは簡単な方程式に従う。それゆえ, これに注目することにより問題の扱いが極めて容易になる。

ところで既に述べたように, 磁石にマクロな秩序性が現れるのは熱平衡状態で起こることとして説明される。それに対してレーザーとか生体とか云ったものは熱平衡状態には無く, まわりとエネルギーや物質などをやりとりしている, いわゆる開放系である。この場合になぜマクロな秩序性が現れるかの説明は前者の場合ほど簡単ではない。そこで両者を区別するために, 前者のようなものを静的秩序性, 後者を動的秩序性と呼ぶ。Synergeticsでしばしばレーザーがモデルとして使われるのは, レーザーが動的な秩序性の現れる典型的な系であると同時にその振舞いが量子力学から出発して物理的に十分良く理解されている系だからである。動的秩序性を扱う場合にも, 秩序パラメーターの考え方は大変に有効である。

3. レーザーとコヒーレンス

レーザーから放出される光は, ポンピングがしきい値を越えると, スペクトル幅が狭く指向性の優れた秩序性をもったものとなる。このレーザーを磁石と比べると極めて似かよった関係にあることが分かる。すなわち, レーザーで秩序性が現れるには負温度状態と云う頭でっかちの不安定な状態が必要であるし, またしきい値を越すと急激に変化が起こり, 熱平衡での二次の相転移の様相を示す。この場合, ポンピングは丁度, 磁石の場合の $1/T$ の役割をしていると云える。さらに, 自然放出と云うゆらぎが基になって増幅されると云うメカニズムも磁石の場合と酷似している。では対称性の破れは, いままで四方八方に出ていた光が, しきい値を越すと殆ど一方向に出ると云うことに対応するのだろうか。そうではない。この方向はゆらぎ

によるものではなく、あらかじめどの方向と云うことができる。これは単に沢山ある共振器のモードの中から一つを選択したに過ぎない。この一つのモードだけに注目した場合、光の振動に比べて十分ゆっくり変化する振幅を $A(\mathbf{r}, t)$ として、光の場を

$$A(\mathbf{r}, t) \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + \phi)$$

と表わすことができる。しきい値以下では干渉実験の観測時間の程度、例えば 10^{-6} 秒程度の時間スケールで見ると、位相因子 ϕ は $0 \sim 2\pi$ の間で殆ど均等に分布している。したがって、この場の期待値はゼロになってしまう。これは各原子から放出される光の位相が互いにランダムだからである。ところが、しきい値を越えると ϕ は一定値 ϕ_0 にほぼ固定され、場の期待値はゼロにならない。 ϕ_0 がどう云う値になるかはゆらぎで決まる。これがまさに対称性の破れに相当し、光の場のマクロな平均、すなわち期待値が秩序パラメーターとなる。この場の期待値がゼロであるかないかと云うことと、この光を重ねた場合に干渉効果が観測されるか否かと云うことは同じことであり、結局、レーザーにおいて現われるマクロな秩序性とはコヒーレンスであると云うことになる。

ではレーザーの場合、かなりの高温にあり、原子はランダムな熱運動をしているにもかかわらず、なぜコヒーレンスが現われるのだろうか。それは通常、誘導放出によりコヒーレントに光の増幅が起こるからだとして説明される。つまり誘導放出を起こすのは誘起双極子であるが、この双極子の振動はこれを誘起する光の電場によって決まり、個々の原子の状態を表わす波動関数の位相には関係しない。したがって、レーザー中の沢山の原子によって作られた光の平均電場を考えると、平均としてこれにそろった双極子が誘起され、さらにその誘起双極子により光の場が作り出されると云う風にして、マクロな秩序が形成されると云う訳である。しかし、実はこれでは説明は十分ではない。なぜなら、無秩序な光を単にいくら位相を保つように増幅

しても、無秩序な光であることには変りはないからである。秩序性が現われるためには、何らかの非線形性が必要である。これは上の説明では暗黙の中に仮定されており、また発振と云うときに必然的に含まれているものである。すなわち、増幅が限りなく続き、光の強度が無限大になると云うことはないから、光が強くなると必ず飽和効果が現われ、増幅利得は下がる。この非線形性がある初めて秩序の形成が行なわれる訳である。この事は、例えばレーザー共振器中に可飽和吸収体を挿入するなどして、モード間に位相の秩序関係を作る、つまりモード同期を行なわせる場合でも全く同じである。

次に熱力学の観点からレーザーを眺めてみよう。レーザーの光は秩序だっているからエントロピーは殆どゼロであり、ポンピングに使うインコヒーレントな光、例えばフラッシュランプの光はエントロピーをもつ。したがってレーザーは光のエントロピーを下げる働きをしていると云うことができる。これは熱力学の第二法則に反するのではないだろうか。それは物質系のエントロピーの増大があるから大丈夫である。すなわち、負温度状態を作るには分布を反転させるべき二準位間のエネルギー差よりも平均として大きな光子エネルギーをもつ光を励起に用いる必要があり、この余分のエネルギーによる物質系のエントロピーの増加分が光のエントロピーの減少分を上まわるからである。この増加分は熱として外へ捨てられることになる。Wienのずれの法則から分かるように、平均光子エネルギーが大きい光源とは高温の光源のことである。こう考えると、レーザーとは高温の熱源からエネルギーをもらい、その一部を低温の周囲に渡しながらか光のエントロピーを下げると云う仕事をする熱機関だとみなせることが分かる。同じ熱量を出し入れする際に、高温の熱源とやりとりするほどエントロピーの出し入れは少ない。したがって上で述べたことは、小さなエントロピーを高温の熱源から貰い、大きなエントロピーを低温の熱源に渡すと云う動作に匹適し、その差の範囲内で秩序形成が行なわれても第二

法則に矛盾することにはならない。

ところで、既に述べたように、レーザーの光はエネルギーは運ぶがエントロピーは運ばない。これはレーザーが極めて高温の光源に相当すると云うのと同じことである。したがってこれを物質に当てた場合、吸われたエネルギーが熱に変換されるとすると物質の温度は極めて高温にまで上がりうることになる。これがレーザーがダイヤモンドの孔あけや核融合などに使うことができる理由である。一方、このような光を吸った物質が、これを熱に変えるのではなく再び光として放出する場合を考え、放出光が蛍光のようにコヒーレンスが悪くエントロピーを運ぶとすると、差し引きとして光のエントロピーは増えることになる。したがって、その分だけ物質のエントロピーが減少し温度が下ったとしても熱力学の第二法則に矛盾しない。このような原理によって物質の温度を下げることを光冷却と呼ぶ。これは高温の熱源から熱量をもらい低温の周囲に捨てながら温度を下げると云う仕事をする冷却機関に相当するが、これについては既に他で詳しく述べた^{5,6}。

4. 生命現象と秩序性

生命の本質を深く追求するならば、その根底にあるものが秩序性の問題であることに思い至るであろう。波動力学で有名な Schrödinger の著書「生命とは何か」⁷は、生命現象が物理学の対象となると云うことを決定的にし、多くの人々を遺伝子の構造解明に向かわせることにより Watson と Crick の仕事に代表される分子生物学の時代の幕明けに導びいたことで知られる。この中で彼が考察したのは、まさに生命の本質の背後にある秩序性の問題であった。

まず彼は、物質を分類する場合に、気体・液体・無定形固体のグループと結晶ならびに生体物質のグループと云う風に分けるべきであると述べ、生体の最も本質的な部分は非周期性の結晶と呼ぶべきものであると結論している。この物質の分類の仕方が、秩序性に基いたものであることは明らかであろう。非周期性の結晶と云

う表現は、生体物質は周期的な構造こそ持たないにしてもランダムではない一定の構造をもち、そのマクロな構造を与えているものは結晶構造の原因となっている原子間のミクロな相互作用と全く同じ性質のものであると云うことを表わしたものである。しかし、この表現はそれ以上に現在明らかにされている生体物質の構造そのものをもびったりと表わしている。

Schrödinger は次に熱力学的な考察から生物は負のエントロピーを食べて生きていと述べ、さらに生体はマクロな系で、その一部の自由度に関してはあたかも 0°K であるかのような秩序性を示すとも云っている。 0°K のような秩序性とはエントロピーゼロ、つまり完全な秩序状態を意味しているが、この表現は極低温でみられる超伝導、超流動などの現象を連想させる。これらの現象では、前に述べた磁石と同じように、 U を最小にすべくマクロな秩序性が現われる。つまり、マクロな数のクーパーペアとか ^4He などのボース粒子が、エネルギー最低の量子状態に落ちこみ、同一の量子力学的運動をするボース凝縮状態が実現する。そしてその場合には、物質波の位相にマクロな距離にわたる秩序性、つまりコヒーレンスが現われる。これはコヒーレントなレーザー光において、ボース粒子である光子が一つの自由度にマクロな数存在する状態に対比される。実際に超伝導、超流動におけるボース凝縮と単一モードのレーザー発振とは密接に関係している。しかし、超伝導、超流動の場合に現われる秩序性が静的秩序性であるのに対して、熱平衡状態にない生体の場合に現われるのは動的秩序性であるから、生命現象はむしろ物理的にはレーザー現象に極めて近いと考えることができる。

5. 生命に隠されたコヒーレントな電気振動

「誘電体」と云う著書や超伝導の理論などで知られる Fröhlich は、1967年にヴェルサイユで行なわれた理論物理学と生物学に関するコンファレンスで、「生物学における量子力学の概念」と題する冒頭講演を行ない、超伝導、超流動と

同じようなコヒーレンスの概念が生命現象の説明にも適用できるのではないかと云うことを指摘した⁸⁾。彼はその後この考えを発展させて十編余りの論文を発表しているが、それを要約すると、生体系には縦型の電気振動のブランチがあり、代謝によりこれにエネルギーが供給されているが、それが或るしきい値を越すとボース凝縮的な転移が起こり、単一モードのみが強く励起されたコヒーレントな振動状態が実現して長距離の位相相関を引き起こす。これが生体系の驚くべき秩序性や効率の良さを説明するものではないかと云うものである。例えば、細胞において準備がととのうと細胞内の多くの分子が互いに連絡を取り合っているかのように、整然と細胞分裂が起こる。各種の生命現象には、随所にこのような協同的な振舞いが見られるが、それはコヒーレントな電気振動がこれを支配しているからだと云う訳である。

Fröhlich は、一般に多くの荷電粒子を含む系が熱溜と非線形に結合している場合、ポンピングが大きくなると室温のような高温でもコヒーレントな電気振動が現われることを理論的に示した^{9,10)}。このような系は多くの長波長の電気振動モードをもつが、その振動数には下限($\omega_1/2\pi$ とする)がある。i 番目のモードにある量子 $\hbar\omega_i$ の個数を n_i とすると、温度 T の熱溜との線形な結合のほか、非線形な結合としてモード間で量子のやり取りをするようなものを考慮することにより、次の速度方程式を得る。

$$\frac{dn_i}{dt} = S_i + \phi \{ (n_i + 1) - n_i \exp(\hbar\omega_i/kT) \} \\ + \chi \sum_j \{ n_j(n_i + 1) \exp(\hbar\omega_j/kT) - n_i(n_j + 1) \exp(\hbar\omega_j/kT) \}$$

ここで S_i はモード i に対するポンピングを表わし、 ϕ と χ は比例定数で温度依存性をもっている。定常状態でこれを解くと

$$n_i = \left[1 + \frac{\phi S_i}{\chi \sum_j S_j} \{ 1 - \exp(-\mu/kT) \} \right] \\ \times \frac{1}{\exp(\frac{\hbar\omega_i - \mu}{kT}) - 1}$$

が得られるが、これはボース統計に従う分布と同じ形をしている。ただし、

$$\exp\left(\frac{-\mu}{kT}\right) = \frac{\phi + \chi \sum_j (1 + n_j)}{\phi + \chi \sum_j n_j \exp\left(\frac{\hbar\omega_j}{kT}\right)}$$

であり、 $n_i \geq 0$ より $\hbar\omega_1 > \mu \geq 0$ である。全ポンピング量 $\sum S_i$ が十分大きくなると、 $\sum n_i$ は $\sum S_i$ に比例して増すことになるが、そのためには μ は $\hbar\omega_1$ に極めて近くななければならない。そしてその場合には、 n_i は他の n_j に比べてずっと大きな値を取り、マクロな数の量子が同一の状態に落ち込むことになる。一度このようなコヒーレントな振動状態が実現されると、種々の弾性変形によりこの状態は安定化され、ポンピングにより供給されるエネルギーは熱的な形ではなく、エントロピーゼロの形で系に蓄えられることになる。このようなコヒーレントな電気振動が細胞分裂のトリガーとなり、弾性変形の際の張力が分裂の基になっている可能性も考えられるし、また生命現象に見られる驚くべき効率の良さは、エネルギーがコヒーレントな形で蓄えられると云うことから来るのかも知れない。Fröhlich はさらに、このようなコヒーレントな振動の励起に伴ない、近い振動数をもつ巨大分子の間に長距離の引力が働くことも理論的に示した¹¹⁾。酵素反応は極めて特異性があるばかりでなく、触媒を使った場合に比べて 10^{11} 倍と云ったような驚異的な効率の良さを示す点で普通の化学反応と異なる。これは、上で述べたような反応するもの同志を引きつける選択的な引力が存在すること、コヒーレントな振動が他の同じ酵素の振動をもコヒーレントに励起すること、コヒーレントな振動により生じた電場が反応の活性化エネルギーを下げる働きをすること、などにより説明できるのではないかと彼は述べている。さらに光合成の問題とか脳波との関係、また発生やがんの機構の問題など、このコヒーレントな電気振動は生命現象の多くの面と深くかかわっている可能性もある¹²⁾。

電気振動には縦型のものと横型のものとがあ

るが、横型振動は電磁波と結合するためにエネルギーの損失があり、ボース凝縮的な転移は起こり難い。そこで上のモデルでは縦型振動を考え、このような損失は無視してある。上に述べたモデルで $\chi = 0$ とするとボース凝縮のようなことは起こらず、コヒーレンスは現われて来ないことが分かる。すなわち秩序形成には非線形性が重要な働きをしている訳で、この点もレーザーの場合と大変似かよっている。生体の細胞膜には 10^5 V/cm もの電界が掛かっており、また生体では Na^+ や K^+ などの荷電粒子が重要な役割りをしている。さらに生体物質は極めて非線形性が強いことも知られており、上のモデルは恐らく生体系に適用することができるように思われる。ではそのような事を示す実験的な事実はあるだろうか。

6. 生体細胞におけるコヒーレントな振動に関する実験

強い電気分極を示す系が長波長の弾性振動をすれば、同じ振動数の電気分極の振動が起こることから、Fröhlichは細胞膜の厚さと音速の値を用い、このような縦型電気振動の振動数として $10^{11} \sim 10^{12} \text{ Hz}$ と云う値を推定した。¹⁰⁾これは電磁波で云えば遠赤外からミリ波の領域になるが、この領域の電磁波の生体への影響には、熱的なものとは思われない非常に変わった効果があることが次第に明らかにされている。例えばFig 1, 2は、ソ連で行なわれたコリシンと云う物質を合成する *E. coli* バクテリア (大腸菌) の活性に対するミリ波の効果を示したものである。¹³⁾ここでKは一時間程度ミリ波を照射した場合、照射しなかったものに比べてコリシンを合成する細胞の数が何倍になったか云う係数である。Kは波長に大きく依存し、共鳴振動数の幅は100 MHz程度と狭いことが分かる。Fig. 1のスペクトルは水の吸収スペクトルとは全く合わないばかりでなく、Fig. 2のミリ波強度に対する依存性も、或るしきい値があって、それ以上ではさらに電波を強くしても余り変化がないと云う結果である。したがって、これは熱的な効果によ

Fig. 1 Frequency dependence of relative number K of *E. coli* bacteria synthesizing colicin after microwave irradiation (K=1 for unirradiated control).

Fig. 2 Dependence of K on the irradiating microwave intensity at the vacuum wavelength of 6.50 mm.

Fig. 3 Dependence of exponential growth rate of yeast culture on irradiating microwave frequency.

るものであるとは考えられない。しかも、しきい値は数 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ と著しく低く、また3倍以上と云うのは非常に大きな変化であると云える。Max-Planck 固体物理研究所の Keilmann らはイースト菌の成長速度に対する mW/cm^2 程度の強度のミリ波の影響を調べた。^{14, 15)} Fig. 3 に示すように、成長速度は7.2mm付近でミリ波の波長に強く依存して増えたり減ったりし、そのスペクトル構造の幅は、10MHz 程度の測定分解能で決まる位に狭い。彼らは波長毎に試料の温度を測定し、これが熱的な原因によるものでないことを確めた。このように強い波長依存性を示し、しかも或るしきい値をもつようなミリ波の効果は、この他にもいくつか報告されているが、これらは Fröhlich のモデルによってうまく説明することができる。すなわち、例えば細胞分裂の速度を決めている酵素反応に関する電気振動が、マイクロ波の照射によりコヒーレントに励起されると細胞分裂は促進され、逆に無関係な反応に関する電気振動が励起されると、そちらに代謝によるエネルギーが行ってしまうため細胞分裂は阻害される、と考えればよい訳である。また共鳴の幅が極めて狭いことは、この振動がコヒーレントであることの証拠と見る

ことができる。

上の実験は細胞を水の中に置いて生かした状態で測定するものであるが、ミリ波は水に強く吸収され、例えば波長7.2mmでは電波は200 μm 程度の深さまでしか入らない。さらに Fröhlich の云うような縦型の電気振動であれば、波長が試料の大きさに比べて十分大きいので全く結合しない訳ではないが、一光子遷移は禁制である。そこで水の吸収の無い波長でのラマン散乱が注目されることになる。Webb と Stoneham¹⁶⁾ は *B. megaterium* ならびに *E. coli* と云うバクテリアについてラマン散乱の実験を行ない、 $7 \times 10^{10} \sim 5 \times 10^{12} \text{ Hz}$ の間にそれらしき数本の散乱線を見出したと報告している。Fig. 4 は *B. megaterium* の場合で、明らかに細胞分裂に関係すると思われるラマン線があり、その振動数が Fröhlich の予言した領域に一致する点が注目される。さらに *E. coli* の場合、低周波の散乱線の振動数 $7.5 \times 10^{10} \text{ Hz}$ と $1.36 \times 10^{11} \text{ Hz}$ は、細胞分裂の速度に影響を与えるマイクロ波の振動数として既に報告されているものに一致している。¹⁷⁻¹⁹⁾ このような結果は Fröhlich モデルを使って、細胞分裂時にはコヒーレントな電気振動が起こっており、その振動状態にある量子の平均数 n が

Fig. 4 Raman spectra of (a) the nutrient solution, (b) resting cells, and (c) active synchronized cells of *B. megaterium*. The Rayleigh wings were subtracted from the spectra (b) and (c) using the dotted line in (b). The results are shown in (d).

1 に比べて十分に大きい、と考えることによりうまく説明することができる。すなわち、この量子はボース粒子であり、この量子を発生させるようなストークス側の光散乱の確率は $(n+1)$ に比例する。細胞分裂の準備ができるまではコヒーレントな振動は起こらず、 n は熱的な分布の値である 1 ~ 100 程度の大きさにすぎないが、

細胞分裂を起こす時にはずっと大きくなると考えればよい訳である。Webb らは Fröhlich と一緒にこれを証明するために、ストークス側とアンチストークス側の散乱光の強度を比較した。²⁰⁾ Fig. 5 は *E. coli* についての結果の一例である。120 cm^{-1} 付近の散乱光について、ストークス光とアンチストークス光の強度比はほぼ 1 であるが、これは熱的な分布に対して期待される値 $\exp(-\hbar\omega/kT) \approx 0.55$ とは大きく離れている。この比が $(n+1)/n$ で与えられることより $n \gg 1$ が得られるから、この実験結果は Fröhlich モデルを強く支持するものである。

7. 生命から宇宙へ

生体は高い秩序を保つばかりでなく、例えば受精卵が一人前に成長すると云った具合に新たに秩序を作り出して行く。エントロピーを下げる働きをしている訳であるから、やはりこれは熱力学の第二法則に矛盾するのではないかとの疑問が沸く。しかし、生体は孤立した系ではなく、外部とエネルギーや物質などのやり取りをしている系であって、その際に排泄するエントロピーの方が取り入れるエントロピーよりも大きいならば、秩序性が作り出されても第二法則に矛盾することはない。これは光冷却が第二法

Fig. 5 Raman spectrum of *E. coli* B taken 50 minutes after begin of incubation.

則に反しないのと同じことである。これがSc-hrödingerの云う、生体は負のエントロピーを食べて生きていくと云う意味である。ではこれを可能にしているものは何であろうか。それをどどんたどって行けば、太陽の存在に行きつくであろう。つまり、生体系は6000°Kの太陽から熱をもらい、300°Kのまわりにその一部を捨てつつ高い秩序を作ると云う仕事をしている熱機関と見ることができる。この点でもレーザーとの類似は明らかであろう。生物の進化は、単純なものから複雑なものへと、熱平衡からずれる方向へ向かって進んで行く。これを可能にしているものをたどって行けば、恐らくは、地球自身が6000°Kの太陽と3°Kの宇宙空間との間で働く熱機関にたとえることができると云う点に行くつくのではないだろうか。

では何故我々の宇宙はこのようにうまい具合になっているのであろうか。その大もととは宇宙の膨張にあるように思われる。100億年ほど前には宇宙は非常に高温の塊であり、それが膨張のためにぐんぐん冷えて来た。初めは放射場と物質とは熱平衡にあったが、放射場の温度が体積の立方根に逆比例して下がるのに対して、或る時期からは物質系の温度変化がこれについて行けなくなり、高温のまま取り残されたと考えられる。そして宇宙空間の放射場は3°Kと云う温度になり、同時にずっと高温の星が多数存在すると云うのが現在の宇宙の姿である。宇宙全体のエントロピーは増え続けているに違いない。しかし宇宙の膨張速度はそれを上まわり、単位体積当たりのエントロピーは減少して宇宙空間の放射場の温度は下がって行く。一方、星の方は核エネルギーと云う貯えがあり、さらに重力エネルギーのポンピングを受けて温度が下がるところか逆に上昇したりする。したがって、高温と低温の熱源の間で仕事をする熱機関は天文学的な時間スケールにわたって働くことができる。生命を含めた様々な秩序を形成して行くことができる。生命そして人間こそはそのような秩序性の表現の最たるものと云えよう。

8. おわりに

自然は秩序だったものから無秩序なものへと云う変化をするのが普通であり、これが時間の方向性を決めている。ところが、熱平衡からずれた系では逆に、空間的または時間的な、あるいは機能の点で秩序が自発的に形成されると云うことが起こり得る。このような系では必然的にエネルギーの散逸があり、これに伴って現われる秩序と云うことで1977年度のノーベル賞受賞者であるPrigogineはこれを散逸構造と呼んだ。レーザーのコヒーレンスはまさにこの散逸構造の一種である。レーザーが格好のモデルとなり、生物、宇宙、進化と云った問題に理解をもたらしてくれると云うのはまことに面白いではないか。それどころか、生命の本質がコヒーレンスにあり、その根源的な所をレーザーと同様の機構が支配しているとするならば、これはレーザー研究者の側も真剣に取り組む必要があるのではないだろうか。

文 献

- 1) H. Haken: *Synergetics, An Introduction 2nd Edition* (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1978).
- 2) H. Haken (ed.): *Synergetics, Cooperative Phenomena in Multi-Component Systems* (B. G. Teubner, Stuttgart, 1973).
- 3) H. Haken (ed.): *Cooperative Effects, Progress in Synergetics* (North-Holland/American Elsevier, 1974).
- 4) H. Haken: *Rev. Mod. Phys.* **47** (1975) 67.
- 5) 櫛田孝司: 物性 **11** (1969) 632.
- 6) 櫛田孝司: 日本物理学会誌 **25** (1970) 319.
- 7) E. Schrödinger (岡, 鎮目訳): 生命とは何か (岩波, 1964).
- 8) H. Fröhlich: *Theoretical Physics and Biology*, ed. by M. Marios (North-Holland, 1969) 13.
- 9) H. Fröhlich: *Phys. Letters* **26A** (1968) 402.
- 10) H. Fröhlich: *Int. J. Quantum Chem.* **2** (1968) 641.
- 11) H. Fröhlich: *Phys. Letters* **39A** (1972) 153.
- 12) H. Fröhlich: *Riv. Nuovo Cimento* **7** (1977) 399.
- 13) A. Z. Smolyanskaya and R. L. Vilenskaya: *Soviet Phys. Uspekhi* **16** (1974) 571.
- 14) W. Grundler, F. Keilmann, and H. Fröhlich: *Phys. Letters* **62A** (1977) 463.
- 15) W. Grundler and F. Keilmann: *Z. Naturforsch* **33c** (1978) 15.

- 16) S. J. Webb and M. E. Stoneham : Phys. Letters **60A** (1977) 267.
- 17) S. J. Webb and A. D. Booth : Nature **218** (1968) 374.
- 18) S. J. Webb and A. D. Booth : Nature **222** (1969) 1199.
- 19) A. J. Berteaud, M. Dardalhon, N. Rebeyrotte and D. Averbeck : C. R. Acad. Sci. Paris **281** (1975) D 843.
- 20) S. J. Webb, M. E. Stoneham and H. Fröhlich : Phys. Letters **63A** (1977) 407.