光を考える — 生命の光から宇宙のレーザーまで —

Thinking of Light and Photon

- From Light of Living State to Laser in Universe -

稲場 文男

東北工業大学

Humio Inaba

Tohoku Institute of Technology

宇宙創造は光に始まるといわれているが、それ以来この無窮に近い広大な宇宙には光が広がっている。地球上のわれわれ人類が目で感知することのできる光は、地球の誕生以来降りそそいでいる太陽からの放射エネルギーの極大付近の可視光という電磁波の中のごく狭い領域に限られているが、電磁波は紫外光や赤外光も含んでいて周波数の非常に低い電波から極めて高いX線や γ 線にわたる膨大な範囲を占めている。そこで、本講演では光を概念的に広くとらえて、紫外部から可視域をはさんで赤外部にわたる電磁波を一般的に含むものとする。

このような光の強度は極めて微弱な状態から強大なレベルまで大きな広がりを持っている。しかし、光はよく知られているように粒子性と波動性の二重性(duality)を根元的に備えており、一般に強度が大きい場合には波動性が、一方微弱な状態では粒子性(光子の振舞い)が観測される。

光を古典的な波動として見た場合、位相がよく揃っている、すなわち位相の間の相関が良好なことを、周知のようにコヒーレント(coherent)であるという。理想的なコヒーレント光に近い光を発生できる光源はレーザー以外にはなく、換言すればコヒーレント光を物理的に生じることの可能な方法の総称がレーザーということになる。これに対して、レーザー以外の普通の人工光源からの光や自然光はさまざまな波長が無秩序に重なり合っていて、位相や振幅が絶えず不規則に変化している光の集まりからなるインコヒーレント光である。

一方、粒子性の観点に基づく量子光学によりこれらの概念を光子統計的に解析すると、コヒーレント状態にある光子の存在確率はポアソン分布を示すことが知られており、このことは光子がランダムに到来することを意味している。これとは別に、インコヒーレント光は一般にバンチング(bunching)効果を呈していて、光子がところどころかたまり状になって分布していることが示されている。近年こうした研究に基づいて、コヒーレント光であるレーザー光よりも雑音を相補的に低減できるサブポアソン分布を有する非古典的なスクイズド光、あるいは光子数確定状態の光が注目されるようになり、量子光通信や量子暗号伝送などの新しい光エレクトロニクスの分野が開拓されつつある。

上記の引例はまもなく21世紀を迎えようとするこの時点で、改めて「光を考える」、それに基づいてよりよく「光を生かし、応用する」ということの意義と大切さを示す一端と考えられるが、今世紀におけるレーザーの誕生以来約40年にわたるこうした光の本質に関連する基礎的な研究やそれらがもたらした応用分野の開発、実用化は誠に目覚ましいものがある。それはこれまでの数世紀にわたる長い歴史と伝統をもつ光学という学問、技術が営々として生み出した知識や所産を質、量ともに凌駕するくらいのブレークスルーであるといっても過言でないと思う。しかし、それらをじっくりと見つめ、考えると、宇宙と共に生まれ地球上にゆきわたっている光というものは、まだまだ未知の物性やベールに包まれた役割を秘めていて、奥深く幅広いものとの感を深くする。

本講演では、そうした「光を考える」ための端緒の一つとして、最近の光やレーザーの研究フロンティアの最前線の興味深いいくつかの問題 — 生命の光といえる生物フォトン、しきい値のないレーザー、常識を超える光共振器のいらないレーザー、宇宙空間に存在するレーザーなど、以下に列挙したような概要のテーマを取り上げて紹介することにしたい。これらの拙話が次の世紀に向けて光とは何かをさらに考え、探究するための一助ともなれば幸いである。

[概 要]

1. 光の基本的特性

コヒーレント光とインコヒーレント光

自然放出と誘導放出

レーザーとは

光子統計と非古典的スクイズド光

2. 生体光情報をもたらす生物フォトン

極微弱光の極限的計測

極微弱な生物フォトンの概念と特徴

生体光情報としての生物フォトン計測

生物フォトンの光子統計

3. 常識を超える異色のレーザー

微小光共振器としきい値のないレーザー

光多重散乱媒質と光子局在性

光共振器のいないレーザー (Amplified spontaneous emission とは

異なるしきい値のあるレーザー)

色素を取り込んだ紙、米、麦、野菜などのレーザー発振

生体組織のレーザー作用はあるか

4. 宇宙のレーザー、メーザー

星周辺空間の原子、分子の励起と発光

宇宙空間内の多重散乱効果

星周辺空間や銀河系で動作するレーザー、メーザー

図1 コヒーレント光を発生するレーザー発振器とインコヒーレント光源の特性比較

図2 20世紀におけるコヒーレントな電磁波の周波数開拓の年代的推移

(a) 帰還増幅器

(b) 光共振器を用いるレーザー発振器

図3 帰還増幅器とレーザー発振器の基本的構成

図4 高散乱微粒子を混入したレーザー活性媒質中の光多重散乱による光の増幅、発振の過程を示す概念図

MWC 349

図5 白鳥座MWC 349星の周辺の円盤状水素ガスによるレーザー作用 (169 μ m)

図6 極微弱生物フォトン発光現象と生物発光の強度範囲の比較と各種の極微弱光検出法の動作域の概要