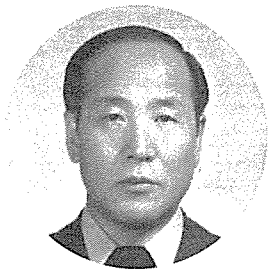


人間에 奉仕하는  
秩序와 精密의  
光學



李 相 洙  
〈韓國科學技術院 教授〉

◇ 光波와 레이저의 역사

熱力學에서, 온도가  $T_1$ ,  $T_2$ 인 두 물체 사이에서  $\delta Q$ 만큼의 열이 이동하였을때, entropy의 변화량  $\delta S = \frac{\delta Q_2}{T_2} + \frac{\delta Q_1}{T_1}$ ,  $\delta Q_2 = -\delta Q_1 > 0$ 가 정의되는데, 열은 뜨거운 물체(온도  $T_2$ )에서 덜 뜨거운 물체(온도  $T_1$ )로 흐르기 마련이기 때문에  $T_2 > T_1$ 이고,  $\delta S > 0$ 이다. 즉 entropy는 증가하고, 열은 쓸모가 덜한 것으로 전환한다. 이 사실을 일반화한 것이 바로 열역학에서 말하는 『entropy 증가의 법칙』이다. 옛날부터 오늘날까지 살아온 인간도 이 열역학의 법칙에서 벗어날 수는 없을 것이나, 선택(selection)을 바탕으로 하는 優生學(eugenics)的 過程과 再生(regeneration)으로 그 쇠퇴의 굴레를 극복하고 있는 것 같다.

그러나, 오늘날 우리들이 가장 중요시하는 物理學의 여러가지 개념이 옛날 사람들이 감히 생각할 수도 없었던 특별한 人間知慧의 발휘라고 속단하는 데에도 나는 찬성할 수 없다. 오히려 過히 知慧롭지 못한 人間이 열심히 찾는 過程에서 새로운 自然의 眞理가 하나씩 깨달아져 가고 있다고 생각한다. 레이저에 관해서도 마찬가지라고 생각한다. 알고 보면 光波의 吸收, 단순한 아인슈타인의 輻射理論, 光學에서 필터로 쓰고 또 分光學에서 波長分析에 줄곧 이용되어 온 Fabry-Perot干涉計理論, 그리고 量子理論의 기초만으로도 레이저를 이해할 수 있다. 우리들에 앞서서 이루어진 先人들의 功勞가 레이저를 발견한 사람들의 功勞보다 더 크다고 볼 수 있는 점들이 많다.

우리들이 알고 있는 많은 素粒子들 가운데서 우리들에게 제일 가까운 것이 光量子이고 光量子가 지니고 있는 波動性의 표현이 光波이다. 인간의 시각에서 알 수 있다시피, 인간은 太初부터 光波와 함께 살아 왔다. 創造主는 인간의 시각에 감응되는 電磁波의 振動數 領域에다 波動性과 粒子性을 함께 共存케 했다. 그러나 우리는 그 粒子性을 알아내는데 장구한 시일을 요했다. 즉 Max Planck의 光量子理論이 나온것

이 서기 1900년이기 때문이다. 그런데 여기에 다른 또 하나의 문제가 미해결로 남아 있었다. 다시 말해서 Planck는 雜音光으로서 실험과 일치하게 黑體輻射를 설명하였고, 빛의 干涉性에는 관심을 두지 않았다. 位相이 整然한 光波動은 존재하기는 하나 原子에서의 電子의 遷位에 관련되어 지속시간이 극히 짧다. 즉 光波는,

1. 雜音光波 (incoherent light wave)
2. 결이 맞아있는 光波 (coherent light wave)

의 두가지 범주로 대별할 수 있다. 레이저란 바로 Coherent light wave를 발생하는 장치를 말한다. 레이저는 LASER로 표현하고, Light amplification by stimulated emission of radiation의 각 단어의 머리글자를 합친것으로 C. Townes가 MASER (microwave amplification by stimulated emission of radiation의 머리글자 들)에 준해서 붙인 이름이다. LASER의 본 뜻은 誘導輻射過程에 의한 光增幅이라는 뜻이겠으나, 이 과정을 일으키는 장치를 뜻하는 낱말이 되었다.

레이저에서

1. 光增幅이 일어나고,
2. 共振器 (resonator) 안에서 共鳴 (소리 굽쇠 밑에 붙어있는 共鳴箱의 작용과 동일함)이 일어나야 한다.

光增幅만을 실시한다면 비교적 쉬운 일이 되겠다. 그러나 레이저는 반드시 共振器 안에서 光 피드백 (optical feed-back) 아래에서 동작되어야 한다. 光增幅 과정은 흔히 Beer's Law 또는 Lambert-Bouguer's Law로 불리우는 光波의 흡수를 살펴보면 알 수 있게 되고, 共振器의 동작은 Fabry-Perot 干涉計속에 레이저媒質 (예; ruby laser에서 ruby막대)을 넣고 反射面위에서 光波 (電磁波)에 대한 境界條件을 세움으로써 이해할 수 있다. 레이저 光波가 결이 맞아 있다 (coherent)는 원인이 共振器에 있다는 사실에 注目해야 한다.

共振器가 없고, 光增幅만 되는 것도 레이저로 통칭한다. 예로 窒素레이저는 光增幅만되고, 共振器는 없다. 그래서 이 레이저의 出力은 따로 superfluorescence (超螢光)이라고 부른다. Free electron Laser (FEL)는 가속장치안에 있는 電子束의 軌道가 가까이 작은 磁石은 S-N가 교대가 되게 나열한 것으로 과거 Purcell이 光學 grating에 평행해서 電子束을 보냄으로써 電磁波를 발생시켰던 것과 이론이 동일하다. Plasma 매질에서 X-線 레이저 出力을 일으키는 것도 superfluorescence이고, 또 오늘날 氣體分子에다 二酸化炭素레이저 出力을 照射시킴으로써 分子廻轉準位 사이에서 長波長의 出力을 얻는 Far-infrared laser (FIR)도 superfluorescence이다.

Synchrotron radiation은 bremsstrahlung (制動輻射)이지 레이저出力은 아니다. 다만 synchrotron orbit를 도는 荷電粒子의 速力이 매우 一定하기 때문에 bremsstrahlung이 상당히 고른 波面을 지니고 있을 따름이다.

市場터에 雲集한 사람들과 汝矣島廣場에 정렬한 軍人들을 생각하자. 前者의 예에서 사람들이 혼잡하게 움직인다. 後者の 예에서 軍人들이 줄맞추어서 앞으로 나간다. 前者가 incoherent light wave이고, 後者가 laser wave 또는 coherent light wave이다. 이 波動은 결이 맞아있으니 정보를 실어서 통신에 쓸 수 있고, 또 렌즈의 초점에 같은 位相으로 모이게 함으로써 큰 에너지密度 (Joule/cm<sup>2</sup>) 또는 出力密度 (Joule/cm<sup>2</sup>·sec)를 얻을 수 있다. 레이저 出力은 높은 單色性을 지니게 할 수 있기 때문에 物理, 化學分野의 分光學에서 前代未聞의 精密度를 이루게 하고 있다.

### ◇ 레이저 動力學

〈그림-1〉에 있는 2준위原子 (two level atom)의 集團에서 原子사이의 상호작용을 무시하고, 基底狀態에 N<sub>1</sub>개 (cm<sup>-3</sup>), 勵起狀態에 N<sub>2</sub>개 (cm<sup>-3</sup>)가 있다 하자.

이 集團으로 光波 ρ (光量子的 數/cm<sup>3</sup>)가 入射

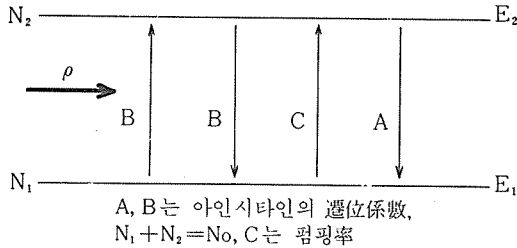
하면, 아인슈타인의 輻射理論에 의하여,

$$\frac{dN_2}{dt} = -\rho B(N_2 - N_1) - AN_2 + CN_1$$

$$\frac{dN_1}{dt} = \rho B(N_2 - N_1) + AN_2 - CN_1$$

가 됨을 알 수 있다.

〈그림-1〉



A, B는 아인슈타인의 遷位係數이고,  $\rho BN_2$ 가 勵起상태에서 誘導放出으로서 光量子를 내면서 基底狀態로 떨어지는 原子의 數密度이고,  $\rho BN_2$ 은 誘導吸收로서 光量子를 소멸시키는 대신 原子가  $E_1$ 준위에서  $E_2$ 준위로 勵起되는 原子의 個數密度이다.  $AN_2$ 은 自然遷位로  $N_2$ 가 1초당 줄어드는 量을 나타낸다. Laser가 동작할 때,  $AN_2$  값이  $B\rho N_2$ 보다 훨씬 작기 때문에 무시할 수 있다. C는 pumping rate의 係數로서  $CN_1$ 개가 추가로 每秒  $E_1$ 에서  $E_2$ 로 여기된다. 따라서

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt}(N_2 - N_1) &= -2\rho B(N_2 - N_1) + 2CN_1 \\ \text{또는 } \frac{d}{dt}\Delta N &= 2\rho B\Delta N + 2CN_1 \end{aligned} \right\} \dots\dots(1)$$

단,  $\Delta N$  = 密度反轉 (population inversion)  
 $= N_2 - N_1$

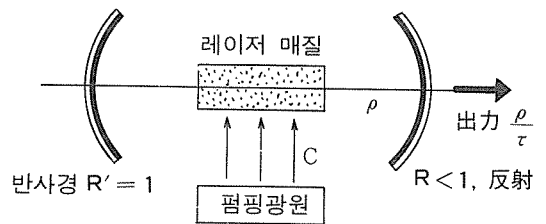
로 표현되기도 한다.

앞에서 말한바와 같이, 레이저는 optical feedback을 가능케 하는 共振器를 갖고 있어야 한다. (1)式의 密度反轉動力學 (population inversion kinetics)이 共振器안에 들어 있는 레이저媒質에서 일어난다. 共振器안에 있는  $\rho$ 는 1초당 出力으로  $\frac{\rho}{\tau}$ 만큼씩 줄어들고,  $B\rho(N_2 - N_1)$ 만큼 늘어난다.

$$\begin{aligned} \text{즉, } \frac{d\rho}{dt} &= -\frac{\rho}{\tau} + B\rho(N_2 - N_1) \\ &= -\frac{\rho}{\tau} + B\rho\Delta N \end{aligned} \dots\dots(2)$$

가 성립한다. (1)式과 (2)式이 바로 레이저동작을 記述하는 動力學 (Kinetics)式이다.  $\tau$ 는 光量子 減衰常數 (photon decay constant)라고 부르며, 共振器안에 있는  $\rho$ 가 指數函数的으로 減衰한다는 사실을 나타내고 있다.

〈그림-2〉 레이저共振器 : (거리,  $\nu$ )



〈그림-2〉에서 光線이 共振器안에서 한번 왕복하면, 이에 소요되는 시간은  $\frac{2l}{c}$ , C는 光速度, 光波의 세기는  $|E_{ct}^2|$ 가 되고, 이것이 곧 共振器의 出力거울의 反射率 ( $R'$ 는 1로 가정)과 같아야 한다.

$$\begin{aligned} \text{즉, } \log R &= -\frac{4l}{C\tau} \\ \text{따라서 } \tau &= -\frac{4l}{C \log R} \\ &= \frac{4l}{C\epsilon} \end{aligned} \dots\dots(3)$$

但,  $R = 1 - \epsilon$ ,  $\epsilon$ 는 작음.

(1), (2)式은 聯立非線型微分方程式으로서 최초로 레이저가 나왔을 때 (1960年代 초)에는 이 方程式의 數值解를 求하는 일조차 큰일이었으나, 오늘날 이 작업은 電算機의 도움으로 매우 쉬운 일이 되어 버렸다. (1), (2)式은 rate equation로서 아인슈타인이 그의 輻射理論에서 쓰기 시작했다. 레이저동작을 설명하는데, Van der Pol 微分方程式, 位相轉位方程式 또는 量子力學의 取扱方法 등이 있으나, rate equation으로 다루는 것이 가장 큰 有用性이다.

다음 문제는 共振器内の  $\rho$ 의 空間的 分布가

어떻게 되어 있는가를 알아내는 일이다.  $\rho h\nu C$  가 光波場-진폭  $\Psi$ -의 絶對直自等이니 결국  $\Psi$  를 유도하는 문제로 귀착한다.  $\Psi$ 를 주는 이론에는 다음의 세가지가 있다. 즉,

1. Schawlow-Townes 이론
2. Fox-Li 이론
3. Kogelnik-Li 이론

Schawlow-Townes 이론은 縱모드(longitudinal mode)를 제시하나, 橫모드(transverse mode)를 제시하지 못하고, Fox-Li 이론은 廻折理論을 바탕으로 해서 積分方程式을 세워서, Gaussian transverse mode는 유도 했으나, 振動數 領域에서의 共鳴條件이 애매하다. 가장 洗練된 것이 Kogelnik-Li 이론이다. 오늘날 이 이론이 가장 많이 이용되고 있으며, mode pattern에 관한 실험 결과와 일치한다.

### ◇ 레이저光波의

#### 高次相互作用 - 非線型光學

레이저光波는 강력하기 때문에 과거에는 관심을 끌지 않았던 여러가지 非線型光學 現象을 유발한다. 電場의 세기를 E, 電氣變位를 D로 표현하면, 分極 P는 다음과 같이 표현된다.

$$P = D - E \\ = (\delta - 1)E$$

그러나, P는  $E^1$ (線型光學) 외에  $E^2, E^3 \dots$ 의 高次相互作用項을 가질 수 있다. 따라서 일반적인 표현으로서,

$$P = X_1 E^1 + X_2 E^2 + X_3 E^3 + \dots$$

로 쓸 수 있으며,  $E^2, E^3$  등에 해당하는 현상들이 바로 非線型光學 現象이다. Pockels 효과, Kerr 효과, parametric oscillation (frequency down-conversion과 frequency up-conversion), 第2次高調波發生, Raman散亂 등 우리들이 이미 많이 들고 있던 現象外에도 새로운 非線型光學 現象들이 많이 발견되고 연구되었다.

誘導 Brillouin散亂, 誘導 Raman散亂, 誘導 Raleyleigh散亂, self-focusing, self-defocusing beam

trapping; 位相光轉波發生 (generation of phase conjugate wave), 第3次以上の 高次の 調波發生 등이 있다.

또한 레이저光束은 강력하기 때문에 粒子의 空中浮遊 (particle levitation), particle spinning 과 particle rotation 등 역학적인 particle manipulation 에도 이용된다. 이때 큰 輻射壓을 이용하는 것이다. 醫學, 生物學的 이용도 기대되고, 또 分子分離와 同位元素分離에도 그 이용이 기대되고 있다.

### ◇ 레이저의 現況과 將來

새로운 레이저로서 X-ray 또는 紫外線레이저의 개발이 많이 진행되고 있고, 또 FIR (far-infrared laser)의 개발도 중요시 되고 있다. 현재, 이들은 superfluorescence의 出力을 내고 있으나, 멀지 않아서 共振器 안에서의 發振에 성공할 것으로 생각한다. X-ray laser ( $\approx 100\text{\AA}$ )用 반사경을 Mo, W, Pb 등으로 만드는 연구가 부분적으로 성공되고 있고 레이저媒質로서 Se나 Yt 금속의 plasma가 이용된다. FIR이 결국 極超短波 (micro wave)와 레이저光波를 접속시킬 것이다. 出力으로서  $1000\mu$ , 즉 1mm 波長을 갖고 있는 FIR가 이미 여러가지 分子에서 성공되고 있다.

FEL이 계속 개발될 것이다. 현재 이미 小型 Van de Graaf 장치에서 FEL에 성공하고 있다.

Laser의 이용中에서 家電製品으로 CD (compact disc), VLD (video laser disc)에 이어서 stereo TV와 光메모리 (optical memory)가 나올 것이고, material processing에 이용되고 醫學, 生物學에서 수술과 gene-transfusion 기술 등에 이용될 것이다. 가장 뜻있는 것 중의 하나로 polarization fiber에서 phase conjugate wave를 이용하는 2次元像의 送受信이 이루어질 것이 기대되고, 또 optical computing (光計算)을 위해서 많은 연구개발이 전개될 것으로 보인다. 物理, 化學에서는 여러가지精巧한 spectroscopy에다 tuning과 scanning이 가능한 stabilized single mode laser가 많이 이용될 것이다.