

# レ　ー　ザ　ー　概　説

大阪大学工学部 吉 永 弘

## 電 波 と 光

電波も光もいわゆる電磁波といわれるものの一種である。従って共に横波でそれぞれ一定の振動数をもつことは同じであるが、その振動数あるいは波長（振動数 $\nu$ と波長 $\lambda$ との関係は $\nu=c/\lambda$ 、 $c$ は光速）間に大きな相違がある。電波・光、あるいは同じく電磁波であるX線・ $\gamma$ 線等の振動数を図示がれば図1のようになる。

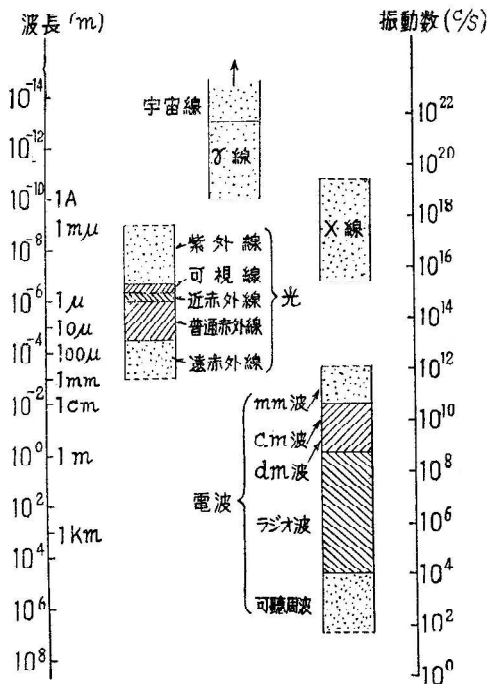


図 1 各種電磁波の波長と振動数

電波は数百mから数 cm までの波長域で、発振検知に高度の技術が発達し、広く活用されている。それは電波が一定の振動数を持ち振動の位相が揃っているいわゆるコヒーレント (coherent) な波動であるということが基礎になっている。電波の技術が発達し電波に対する要求がますます増大するにつれて、高い振動数のすなわち波長の短い電波の必要性が増してきた。これはたとえば通信量の増加あるいは指向性（これがよい程遠方におけるエネルギーの利用率は高い）の点からも振動数に比例してよくなる。近年ミリ波が開拓せられ 6mm 帯はもちろん 3mm 帯が実用の域に達しようとし、さらにサブミリ

波の研究が行われている。しかし電子を電場または磁場の下に適当な運動をさせて電波を発生しようとする長波長域の方法は、短波長の電波を発生するためには電子の運動する空間をますます狭くする必要あり、従って出力を大きくするためにはこの狭い空間に大きなエネルギーを注入しなければならないが、これは原理的に不可能である。また複雑な形の電極の寸法が小さくなるので工作が困難になってくる。このようにして電波をさらに短波長の方に伸展さすには限度があり、発生方法の本質的な改変の必要にせまられていたわけである。

一方光は図1に示すように可視光はもちろん紫外線、赤外線も、その発生検知共に非常に発達している。しかし電波と異なる点は、振動数が図1に示すように大きいことのほかに、光は多くの場合単色光でないすなわち種々の波長の光の混合である。また各波動の位相は全く揃っていない。すなわちいわゆるインコヒーレント (incoherent) な波動である。そのため発生検知共に電波とは全く異った方法がとられ、検知には位相の関係は全く利用できず、たとえば光を一度熱に変えてその温度変化を検出するというような方法がとられているので、検出の効率は電波に比べて一般に低い。もし光の波長領域でコヒーレントな波動が可能となれば、電波の巧妙な手段がそのまま光の領域に導入することができ、振動数が遙かに高いために電波の領域で不可能なことが可能となり、これは電磁波として大革命であることはいうまでもない。

もちろんミリ波あるいはサブミリ波の領域で、コヒーレントな輻射源を得ようとする試みは数多く行われてきた。たとば高圧の電場または強磁場の中で集束した電子群に複雑な運動をさせ出してくる輻射を利用するという試み(この装置を Undulator という)、金属の回折格子の表面に集束した電子群を走らせて電気双極子の振動による輻射 (Smith Purcell 効果という)、あるいは誘電体の中を電子が光速より早く走ると輻射を出すことを利用する方法 (Cerenkov 効果という) 等が試みられているが、極めて大規模な装置で、出してくる輻射は極めて僅少で余り有望な方法ではなく、特に次に述べるレーザー、レーザーの発展にともないこの方面の研究は影薄くなったよ

らに見られる。

## メーザーとレーザー

1955年レーザー (maser) が始めて Townes によって実現された。これは Microwave Amplification of Stimulated Emission of Radiation の頭文字をとったもので1960年 Maiman により光の領域でも同様のことが固体 Ruby を使って、また1961年 Javan 等により He と Ne の混合気体を使って、メーザー発振に成功したので Microwave という言葉の代りに Light を使ってこれらをレーザー (Laser) と呼ぶ。これらの詳細については本誌の各論に幾つかの記述があるはずであるから、ここではメーザーあるいはレーザーの何故にコヒーレントな波動が特に光の領域でも可能になるかを定性的に説明したい。

**エネルギー準位：**原子(分子あるいはイオン)は図2に示すように幾つかの隔離したエネルギー準位があり、

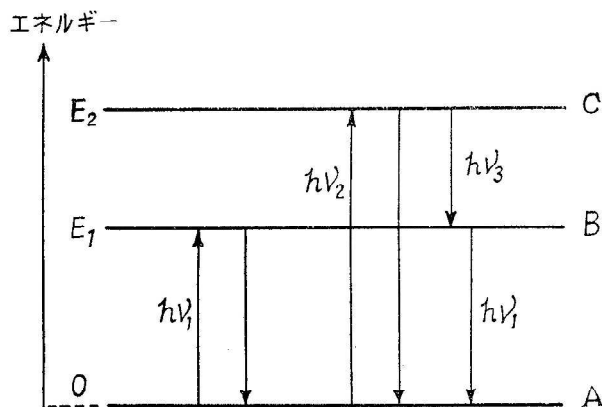


図2 原子のエネルギー準位

通常原子はエネルギーの一番小さい安定準位Aにいる。これがたとえば  $E_1$  なるエネルギーを得たとすると、励起準位Bに励起せられる。この状態は不安定で、 $10^{-8}$ 秒程度の寿命で再びAに  $E_1 = h\nu_1$  ( $h$ は Planck の 常数) という振動数  $\nu_1$  の電磁波を出して安定準位にもどる。これを自然発起の転位という。また  $E_2$  なるエネルギーを得たとすると励起準位Cに励起せられ、同様に  $E_2 = h\nu_2$  を出してAに直接戻るか、あるいは  $E_2 - E_1 = h\nu_3$  を出して一度Bにゆき、さらに  $h\nu_1$  を出してAにもどる。原子はその励起の程度に応じてこれらの安定準位と励起準位に分布される。たとえば熱的平衡状態にある時には、いわゆる Boltzmann 分布すなわち  $N = N_0 (g/g_0) e^{-E/kT}$  が成立する。ここに  $N_0$ ,  $N$  はそれぞれ安定準位及び励起準位の原子の数、 $g_0$ ,  $g$  は同じく両準位の統計的重値、 $k$  は Boltzmann 常数、 $T$  はその系の温度である。 $T$  はもちろん正であるからこの式からわかるように通常  $E$  が大きくなる程  $N$  の数は減少する。

**負温度：**今たとえば B 準位に自然発起の回数よりも多くの原子が何等かの方法で励起されたとするついでに  $N_1 > N_0$  が実現する。この場合にはもし Boltzmann 分布の関係が成立するとすれば、 $T < 0$  となる。このような状態を負温度の状態という。

**誘導発起：**励起準位に励起せられるには、たとえば A 準位に対して  $h\nu_1$  という波動が外部から入射して A 準位の原子がこれを吸収してもよい。しかし B 準位にある原子が自然発起を起す前に  $h\nu_1$  という波動が来ると、これに誘導されて A 準位への転位が起り、これを誘導発起というが、これらの転位の起りやすいかどうかを転位確率で示す。これは量子力学的に求められた量であるが、誘導発起の確率は吸収の転位確率に等しく、自然発起の転位確率は前者の  $\rho$  倍になる。従ってマイクロ波領域では  $\rho$  は小さいから自然発起の転位確率は小さく、その準位に長く留まっているので負温度の状態が作りやすい。紫外線域になってくると  $\rho$  が極めて大きくなるので、負温度の状態が困難となる。これはメーザー、レーザー発振の難易に直接関係することである。

**発振：**メーザーまたはレーザーの発振は次のようにして起る。気体または固体(主として結晶またはガラス中にイオンが分散しており、気体の原子または分子と同じようなエネルギー準位をもっている)中の原子(分子、イオン)がたとえば図2のようなエネルギー準位をもっていると、多数の原子が B 準位に励起せられて負温度になっているとする。自然発起が一つ起って  $h\nu_1$  という波動がその系のどこかで起るとこれが周囲の B 準位にある原子を誘導して、これらが誘導発起を出す。これらはちようどなだれのようなものである。このようにして出てくる波動は自然発起の波動のように個々に勝手に転位するのではないから、その位相は揃っている。

**Pumping：**このような発振を起さすにはまず負温度の状態をつくり出す必要がある。これは pumping という言葉で呼ばれているが、それぞれのレーザー物質に適合した方法をとる。たとえば固体レーザーではクセノン放電灯をフラッシュさせて非常に強い光を出し、これで pumping を行う。He-Ne ガスレーザーでは必要な準位に励起原子が蓄積するように、He と Ne のガスを混合してこれに高周波放電を行うと、He 原子が励起せられそのエネルギーを Ne 原子に伝え、Ne 原子が励起準位に蓄積される。半導体を使ったレーザーではパルス電流を流して pumping を行うようなことも行われている。

現在のレーザーではこの pumping の効率は相当低いもので、従ってレーザー出力の pumping 入力に対する

効率は 0.03~4%, これがレーザーの今後の一つの研究問題である。

**共振器**：次に誘導発起を起させるといったが、これには適当な共振器をつけて共振させる必要がある。通常使われている共振器は Fabry—Perot 型のもので、二つの平行平面反射鏡あるいは共焦点の二枚の球面鏡を使う。たとえばルビーレーザーではルビー棒の両端面をよい反射鏡になるよう coating を行う。もちろん光の波長域に対してはこれらの共振器の Q はそれ程高くならず、多種の振動のモードが共存することは止むを得ない。

**Threshold**：なお発振が持続するためには pumping によって注入されるエネルギーが共振器中で失われるエネルギーより大きいことが必要で、pumping の条件によって変わるわけであるが、pumping に必要な最小限度があり、これを threshold という。

**レーザー光**：気体レーザーでは pumping が定常的に行われ発振も完全に連続で、従ってレーザー光も 図 3 に示すように連続である。ルビーレーザーでは Xe フラッシュランプによる pumping により励起単位へイオンがある程度蓄積してはじめて誘導発起が起るが、蓄積が減少すると負温度が解消し発振が止る。次に一定時間たつと再び蓄積が起り誘導発起がはじまる。従って 図 3 (b) に示すように 2~3  $\mu$ sec 巾の spike 状のレーザー光が、数  $\mu$ sec 間隔で出てきて、Xe フラッシュランプの一回の放電時間に応じて通常 spike が 2~3m sec 間続くことになる。

電管・光電子増倍管あるいは写真による測光が行われ、赤外の光に対しては pbS・pbSe 等の半導体検知器が通常使われる。レーザー光の出力は固体レーザーでは小さいもので数 m joule の程度から、大きいものでは数 joule から数百 joule 以上のものも出来ている。気体レーザーは連続光であるが、数 mW 程度である。従って固体レーザーの出力は気体レーザーより非常に強い。

**レーザーの特徴**：レーザーの特徴は次のようである。

(1) 非常に平行度のよい平行光線として出てくる。従って適当な光学系を使用すれば光束の拡散が極めて小さく、遠方にレーザー光を送ることができる。また平行光束はよい光学系を使えば極めて小面積にエネルギーを集中することができて、その場所に高温度あるいは高電圧を発生させることができる。

(2) レーザー光は極めて波長巾の狭い単光色である。これは自然発起による通常のスペクトル線よりも遙かに波長巾が狭く、可干渉距離が極めて長くなる。

(3) 固体レーザーの場合には大体等間隔に刻んだパルス光であって、このように短いパルス光を継続して得ることは他の方法では容易ではない。これらのレーザーの特徴を利用して、レーザーには画期的な広い応用が考えられる。

以上はレーザーの概要を定性的に述べたが、固体レーザー、気体レーザー、半導体レーザーおよびレーザーの応用についての詳細は本誌の各論で詳細に説明されることになっている。

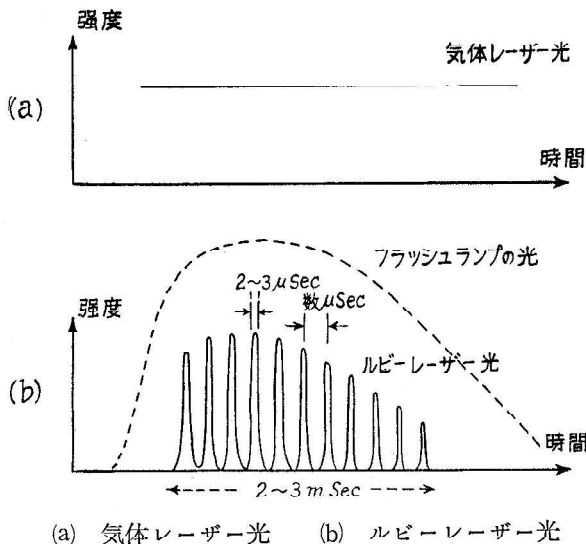


図 3

以上のようなレーザー光は、たとえばルビーレーザーでは 6943A で可視域(赤)にあり、He—Ne レーザーでは 1.1523  $\mu$  および 6328A 等種々の波長の光が出てくる。レーザー光の検出には、可視域の光に対しては光