Lecture One:

Things you need to know:

Before studying about lasers, you must be familiar with **basic terms** used to describe electromagnetic waves:

- **Wavelength (λ)**
- **Frequency (ν)**
- **Period (T)**
- **Velocity of light (c)**
- **Index of refraction (n)**

We will **briefly review** these terms, but it is much better if the reader will be familiar with:

- Some terms from **geometric optics** such as: refraction, reflection, thin lenses etc.
- Some terms from "**Modern Physics"** such as photons, Models of atoms, etc.

Electromagnetic Radiation in vacuum Electromagnetic Radiation is a **transverse wave**, advancing in vacuum at a constant speed which is called: **velocity of light**. All electromagnetic waves have the same velocity in vacuum, and its value is approximately:

c = 300,000 [km/sec] = $3*10^8$ [m/sec] = 186,000 [miles/sec]

One of the most important parameters of a wave is its **wavelength**.

Wavelength (λ) is the distance between two adjacent points on the wave, which have the same **phase**. As an example (see figure 1.1 below) the distance between two adjacent peaks of the wave.

In a parallel way it is possible to define a wave by its **frequency.**

Frequency (ν) is defined by the **number of times that the wave oscillates per second** (The number of periods of oscillations per second).

Between these two parameters the relation is: **$c = \lambda * \nu$**

From the physics point of view, **all electromagnetic waves are equal (have the same properties) except for their wavelength (or frequency)**. **As an example**: the speed of light is the same for visible light, radio waves, or x-rays.

Wave Description

A wave can be described in two standard forms:

1. Displacement as a function of space when time is held constant.
2. Displacement as a function of time at a specific place in space.

1. Displacement as a function of space, when time is "frozen" (held constant), as described in figure 1.1. In this description, the minimum distance between two adjacent points with the same phase is wavelength (λ). Note that the horizontal (x) axis is space coordinate.

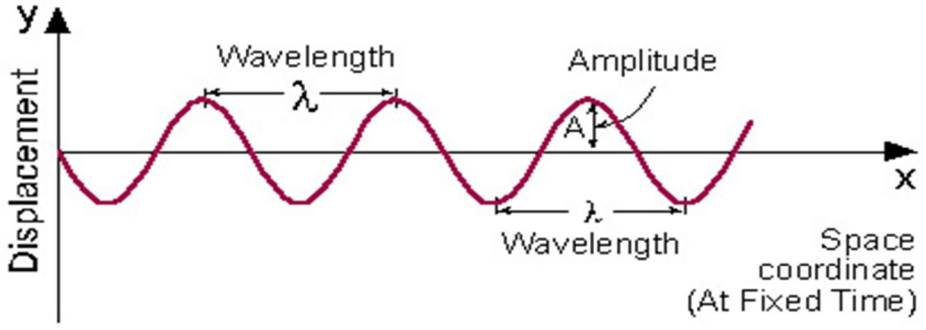


Fig 1.1: Displacement as a function of space coordinate (at fixed time)

A = Amplitude = Maximum displacement from equilibrium.

2. Displacement as a function of time, in a specific place in space, as described in figure 1.2. In this description, the minimum distance between two adjacent points with the same phase is period (T). Note that the horizontal (x) axis is time coordinate .

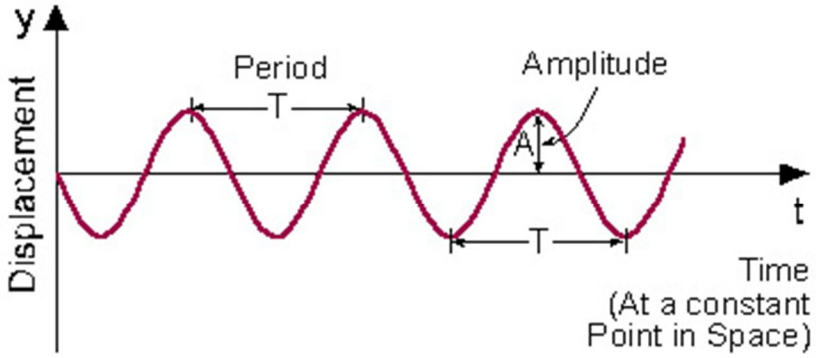


Figure 1.2: Displacement as a function of time (at a fixed point in space)

Wavelengths Comparison

Figure 1.3 describes how two different waves (with different wavelengths) look at a specific moment in time. Each of these waves can be uniquely described by its wavelength. For electromagnetic waves, this wavelength is related to the type of radiation of the wave.

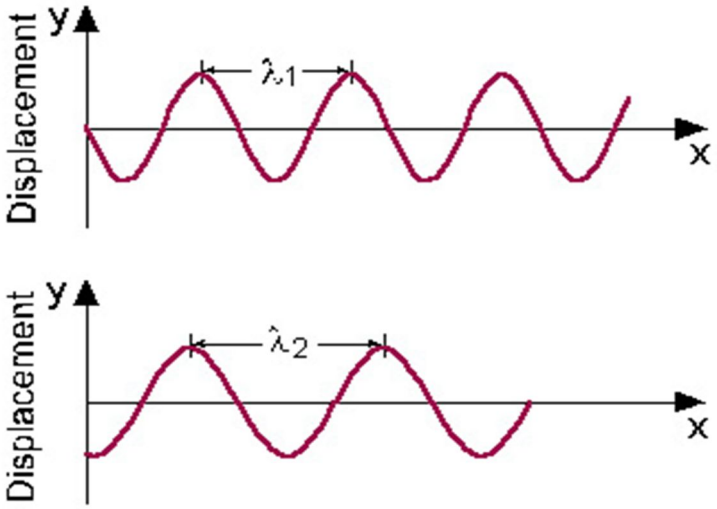


Figure 1.3: Short wavelength (λ_1) compared to longer wavelength (λ_2)

The electromagnetic spectrum

Figure 1.4 describes the **electromagnetic spectrum**. Each part of the spectrum has a **common name**, and its range of wavelengths, frequencies and energies. The borders between the ranges are not sharp and clear, but are defined according to the applications of radiation in that portion of the spectrum.

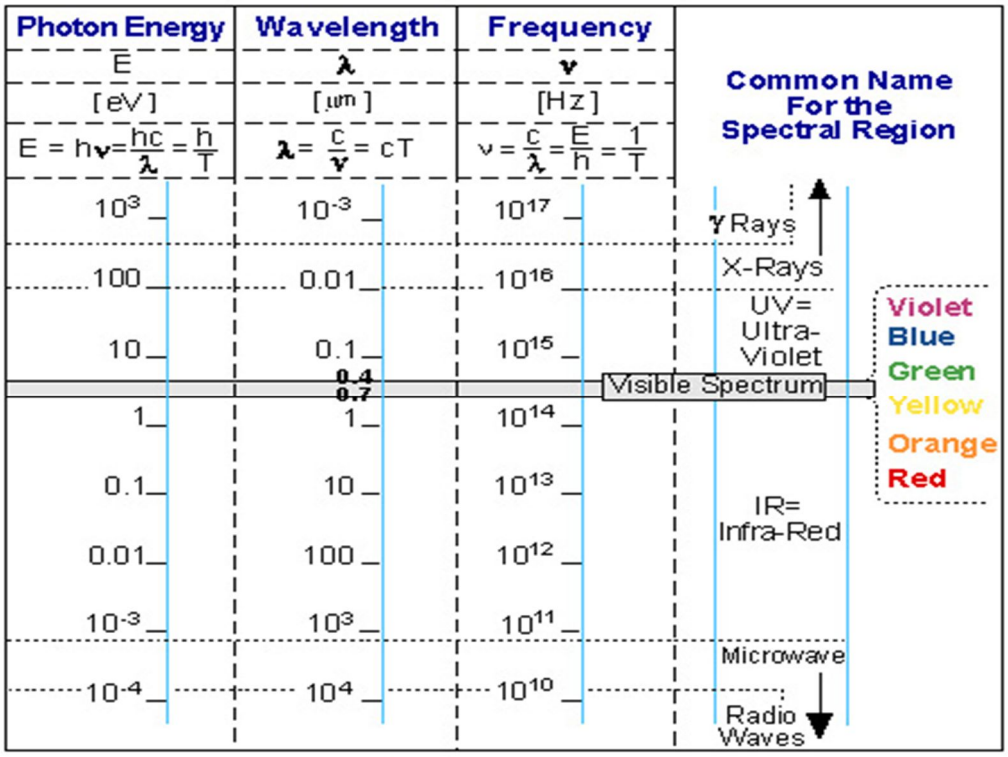


Figure 1.4: The Electromagnetic Spectrum

The most important ideas summarized in figure 1.4 are:

1. Electromagnetic waves span over many orders of magnitude in wavelength (or frequency).
2. **The frequency of the electromagnetic radiation is inversely proportional to the wavelength**.
3. The visible spectrum is a very small part of the electromagnetic spectrum.
4. **Photon energy** increases as the wavelength decreases. The shorter the wavelength, the more energetic are its photons.

Examples for electromagnetic waves are:

1- Radio-waves which have wavelength of the order of meters, so they need big antennas (The dimensions of an antenna are of the same order of magnitude as the wave).

2- Microwaves which have wavelength of the order of centimeters. As an example: in a microwave oven, these wavelengths cannot be transmitted through the protecting metal grid in the door, while the visible spectrum which have much shorter wavelength allow us to see what is cooking inside the microwave oven through the protecting grid.

3- x-Rays which are used in medicine for taking pictures of the bone structure inside the body.

4- Gamma Rays which are so energetic, that they cause ionization, and are classified as ionizing radiation.

The theoretical analysis of electromagnetic waves was the work of James Clerk Maxwell (1831-1879), and it is summarized in 4 equations (which are beyond our scope) bearing his name. The discrete aspects of electromagnetic radiation is the result of Einstein's work at the beginning of the 20th century.

Electromagnetic Radiation in Matter

Light Velocity in Matter when electromagnetic radiation passes through matter with index of refraction n, its velocity (v) is less than the velocity of light in vacuum (c), and given by the equation:

$v = c / n$

This equation is used as a definition of the index of refraction (n):

n = (speed of light in vacuum)/(speed of light in matter) = c/v

Gases, including air, are usually considered as having index of refraction equal to vacuum $n_0=1$.

The values of the index of refraction of most materials transparent in the visible spectrum is between 1.4-1.8, while those of materials transparent in the Infra-Red (IR) spectrum are higher, and are 2.0-4.0.

Wavelength in Matter: We saw that the velocity of light in matter is slower than in vacuum. This slower velocity is associated with reduced wavelength: $\lambda = \lambda_0/n$, while the frequency remains the same (see figure 1.5).

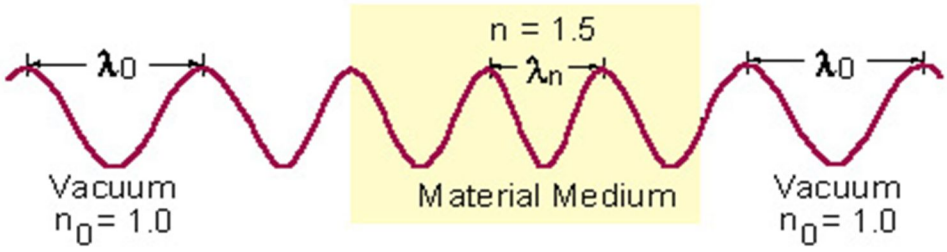


Figure 1.5: Change of wavelength in matter

Refraction of Light Beam - Snell Law:

Reducing the velocity of light in matter, and reducing its wavelength, causes refraction of the beam of light. While crossing the border between two different materials, the light changes its direction of propagation according to the Snell Equation:

$$n_1 \cdot \sin(\Theta_1) = n_2 \cdot \sin(\Theta_2)$$

Example: Wavelength in Matter The velocity of Red light (l0= 0.6 [mm]) in a certain medium is 1.5*108[m/s]. What is the wavelength of this light in this material?

Solution : First find the index of refraction:

$$n = \frac{c}{v} = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot \frac{m}{s}}{1.5 \cdot 10^8 \cdot \frac{m}{s}} = 2.0$$

Using n, calculate the wavelength in the material:

$$\lambda_n = \frac{\lambda_0}{n} = \frac{0.6 \cdot \mu m}{2.0} = 0.3 \cdot \mu m$$

Conclusion: The wavelength of Red light in a material with an index of refraction of 2.0, is 0.3 [mm] .

Bohr model of the atom.

Lasing action is a process that occurs in matter. Since matter is composed of atoms, we need to understand (a little) about the structure of the atom, and its energy states . We shall start with the semi-classical model, as suggested in 1913 by Niels Bohr, and called: The Bohr model of the atom. According to this model, every atom is composed of a very massive nucleus with a positive electric charge (Ze), around it electrons are moving in specific paths.

Z = Number of protons in the nucleus,

e = Elementary charge of the electrons: $e = 1.6*10^{-19}$ [Coulomb].

Figure 2.1 illustrates a simple, but adequate, picture of the atom, the Bohr model:

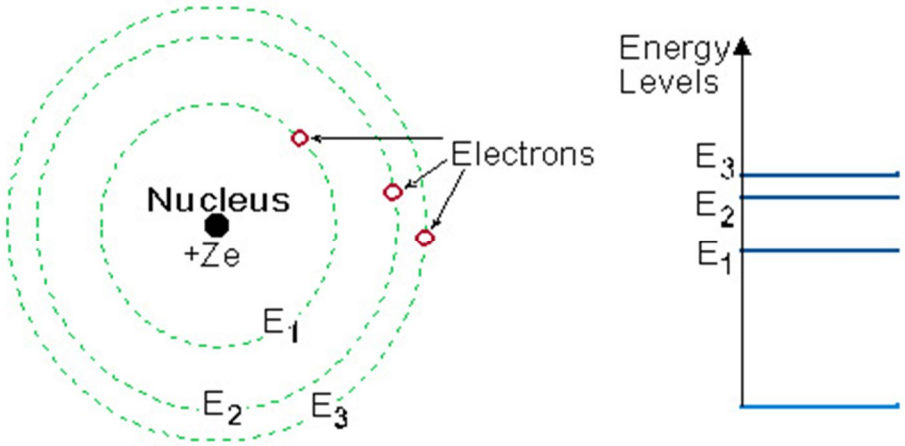


Fig 2-1:Bohr picture of the Atom

Every "allowed orbit" of the electron around the nucleus, is connected to a specific energy level. The energy level is higher as the distance of the "orbit" from the nucleus increases. Since for each atom there are only certain "allowed orbits", only certain discrete energy levels exist, and are named: E_1, E_2, E_3, etc.

Energy States (Levels)

Every atom or molecule in nature has a specific structure for its energy levels. The lowest energy level is called the ground state, which is the naturally preferred energy state. As long as no energy is added to the atom, the electron will remain in the ground state. When the atom receives energy (electrical energy, optical energy, or any form of energy), this energy is transferred to the electron, and raises it to a higher energy level (in our model further away from the nucleus). The atom is then considered to be in an excited state. The electron can stay only at the specific energy states (levels) which are unique for each specific atom. The electron cannot

be in between these "allowed energy states", but it can "jump" from one energy level to another, while receiving or emitting specific amounts of energy. These specific amounts of energy are equal to the difference between energy levels within the atom. Each amount of energy is called a "Quantum" of energy (The name "Quantum Theory" comes from these discrete amounts of energy).

Energy transfer to and from the atom

Energy transfer to and from the atom can be performed in two different ways:

1. Collisions with other atoms, and the transfer of kinetic energy as a result of the collision. This kinetic energy is transferred into internal energy of the atom.
2. Absorption and emission of electromagnetic radiation.

Since we are now interested in the lasing process, we shall concentrate on the second mechanism of energy transfer to and from the atom (The first excitation mechanism is used in certain lasers, like Helium-Neon, as a way to put energy into the laser, and will be discussed in chapter 6 about the different kinds of lasers).

Photons and the energy diagrams

Electromagnetic radiation has, in addition to its wave nature, some aspects of "particle like behavior". In certain cases, the electromagnetic radiation behaves as an ensemble of discrete units of energy that have momentum. These discrete units (quanta) of electromagnetic radiation are called "Photons". The relation between the amount of energy (E) carried by the photon, and its frequency (n), is determined by the formula (first given by Einstein):

$$E = h\nu \text{ .....(1)}$$

The proportionality constant in this formula is Planck's constant (h):

$h = 6.626*10^{-34}$ [Joule-sec]

Sometimes angular frequency (w) is used instead of frequency (ν), so a corrected constant h(bar) is used:

$\hbar = h/2\pi = 1.054*10^{-34}$ [Joule-sec]

The energy is given by: $E = h\nu = \hbar w$ .....(2)

This formula shows that the frequency of the radiation (n), uniquely determines the energy of each photon in this radiation. This formula can be expressed in different form, by using the relation between the frequency (n) and the wavelength: $c = \lambda*\nu$ to get: $E = h * c/\lambda$

This formula shows that the energy of each photon is inversely proportional to its wavelength. This means that each photon of shorter wavelength (such as violet light) carries more energy than a photon of longer wavelength (such as red light). Since h and c are universal constants, so either wavelength or frequency is enough to fully describe the photon.

Lecture Two

Introduction to Laser

تعتبر تكنولوجيا الليزر من العلوم المتطورة التي تدخل في العديد من التطبيقات مثل استخدام الليزر في التطبيقات الطبية والاتصالات والأبحاث العلمية والهندسية والعسكرية. وأي مستخدم لليزر مهما اختلف تخصصه فهو بحاجة إلى فهم مبدأ عمل الليزر أي ما يعرف بفيزياء الليزر.

إن الليزر هو عبارة عن جهاز يحول الطاقة من مصادر مختلفة إلى صورة إشعاع كهرومغناطيسي. وهذا تعريف بسيط للبدأ في الموضوع وتوضيح فكرة عمل الليزر حيث أننا نحصل في النهاية على شعاع كهرومغناطيسي (ضوء) يمتلك العديد من الخواص التي تميزه عن أي مصدر ضوئي. وقد جاءت تسمية كلمة ليزر من الأحرف الأولي لفكرة عمل الليزر أي أن:

The word LASER is an acronym for:

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.

وتعني تكبير الضوء بواسطة الانبعاث المحفز للإشعاع الكهرومغناطيسي. وقد تنبأ بوجود الليزر العالم البرت اينشتاين عام 1917 ، حيث وضع الأساس النظري لعملية الانبعاث المحفز، بعدها تم تصميم أول جهاز ليزر في عام 1960 ، من قبل العالم ميمان (T.H. Maiman)، باستخدام بلورة الياقوت ويعرف بليزر الياقوت (Ruby Laser) .

Light: All light is a form of electromagnetic radiation that is visible to the human eye.

Amplification: This is simply the process of making something bigger or more powerful. When you turn up the volume on a radio, you are amplifying the sound; but with lasers, amplification makes the light brighter.

Stimulated: To stimulate means to stir to action. Laser light is created when a burst of light (electricity) excites the atoms in the laser to emit photons. These photons

then stimulate the creation of additional identical photons to produce the bright laser light.

Emission: The word "emission" refers to something that is sent out or given off. Stimulated laser emission consists of large numbers of photons that create the intense laser light.

Radiation: The laser light is a form of energy that radiates, or moves out, from the laser source.

تاريخ تطور الليزر

- **1864 - 1940 :** History of Astronomical Spectroscopy
- **1917 :** Einstein postulates photons and stimulated emission
- **1954 :** First microwave laser
- **1960 :** First optical laser
- **1965 :** Microwave laser discovered in the Orion nebula
- **1965 :** Discovery of cosmic background radiation using microwave laser
- **1966 :** First gas dynamic laser
- **1970 :** First postulate of laser action in stars
- **1973 :** Discovery of laser action in quasars
- **1979 :** Near Infrared laser star found in Orion nebula
- **1981 :** Carbon dioxide laser discovered in atmosphere of mars and venus
- **1984 :** First x-ray laser
- **1993 :** Gas contact plasma laser
- **1994 :** Artificial laser guide stars
- **1995 :** Far infrared laser star discovered by Kuiper Airborne Observatory

- **1996 :** Ultraviolet laser star discovered by Hubble Space Telescope
- **2000 :** Survey of the world's most powerful research and military lasers

---

لفهم مبدأ عمل الليزر نحتاج إلى توضيح مفهوم كل مصطلح من مصطلحات الواردة في التعريف وهي:

Light Amplification Stimulated Emission Radiation

خصائص شعاع الليزر

شعاع الليزر يمتلك خصائص تميزه عن أية مصدر من مصادر الإشعاع الكهرومغناطيسي وهذه الخصائص هي التي جعلت لشعاع الليزر العديد من التطبيقات في كافة المجالات:

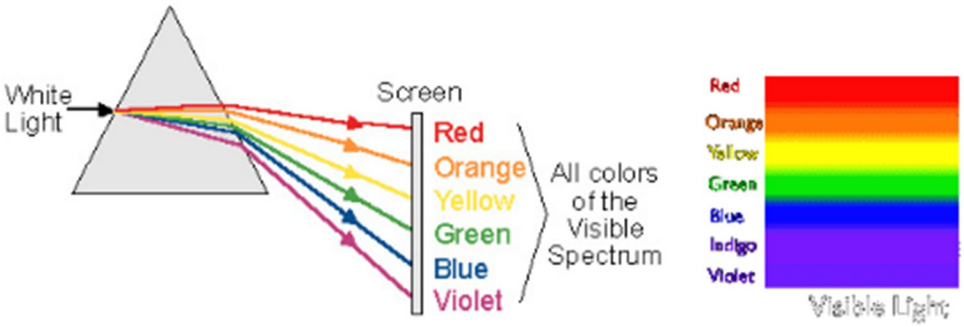
1-Monochromaticity.

2-Directionality.

3-Coherence..

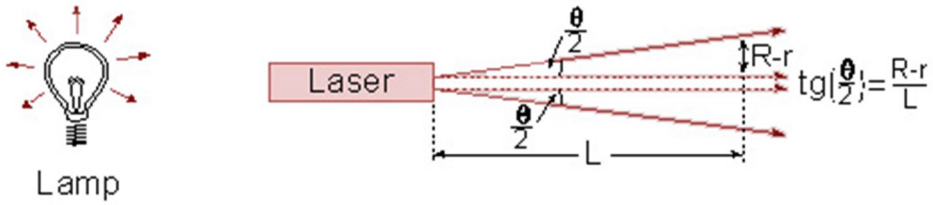
1- أحادية اللون Monochromaticity

تعني أن الليزر أحادي اللون وهذا ما يميزه عن الضوء العادي حيث أن بتحليل الضوء الأبيض الصادر من الشمس أو من مصباح ضوئي فإنه يحتوي على العديد من الأطوال الموجية، كما هو واضح عند تحليل الضوء باستخدام المنشور Prism



2- الاتجاهية Directionality

الضوء الصادر عن الليزر له اتجاه واحد بحيود مهمل بالمقارنة بالضوء الصادر من مصباح كهربي حيث أن الضوء ينبعث في كافة الاتجاهات وبحيود كبير كما في الشكل التالي.



3- التشاكه Coherence

حيث أن الشعاع الكهرومغناطيسي يمتلك خاصية موجية يمكن وصفها بالمعادلة التالية:

$$y = A\cos(wt+f)$$

A = **Amplitude.**

w = **Angular Frequency.**

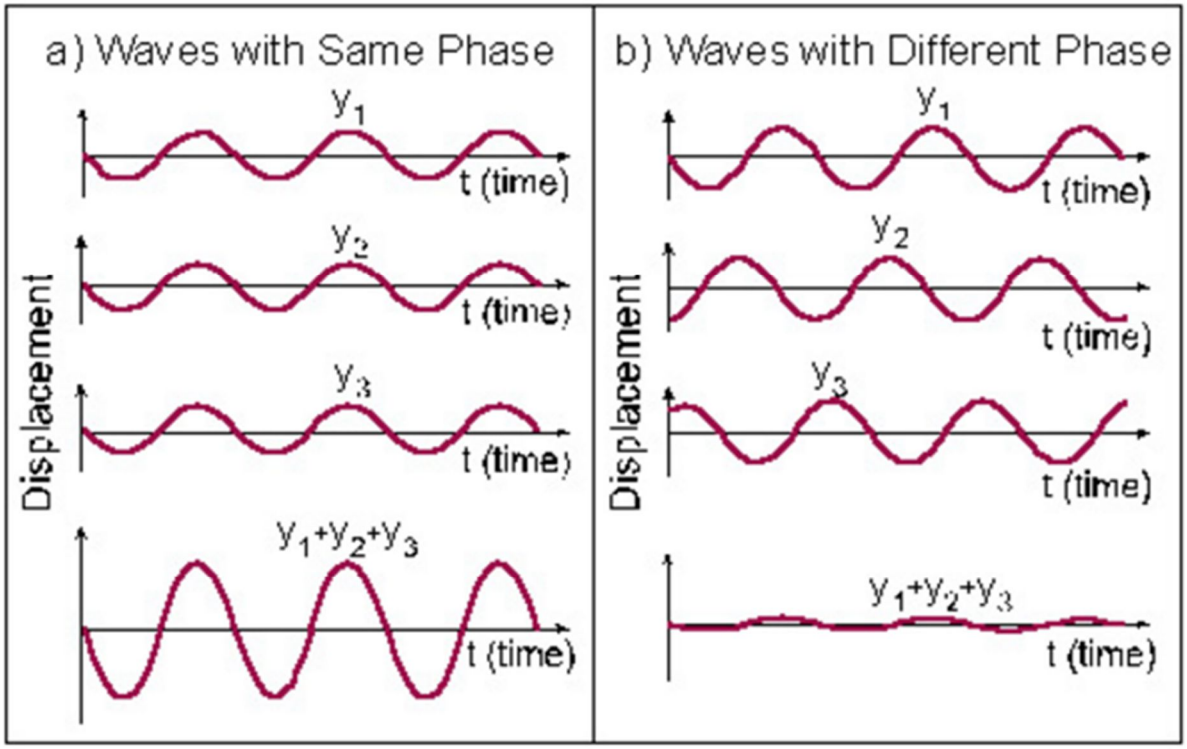
f = **Initial Phase** of the wave (Describe the starting point in time of the oscillation).

(wt+f) = **Phase** of the wave.

الخاصية الفيزيائية **Coherent** تعني أن هنالك علاقة ثابتة في فرق الطور بين الأمواج المتداخلة مما تسبب في ظاهرة التراكب البناء.

Coherent waves are waves that maintain the relative phase between them.

الشكل التالي يوضح كيف أن ثلاث موجات لها نفس الطور **Phase** تعطي تراكب بناء **Constructive** بينما تلك التي تخلف في الطور تكون المحصلة هي تلاشي الموجة **Destructive**.



Superposition of waves

In Summary: Laser Radiation Properties

1. **Very small divergence of the beam.** The beam is almost a **parallel beam** and move in **one direction in space - Directionality**.
2. High degree of **monochromaticity**. The radiation is almost one wavelength, as can be measured by the **very narrow spectral width**.
3. **Coherence**. The combination of these properties gives the laser radiation many advantages, like achieving **very high power densities**, not available from other sources.

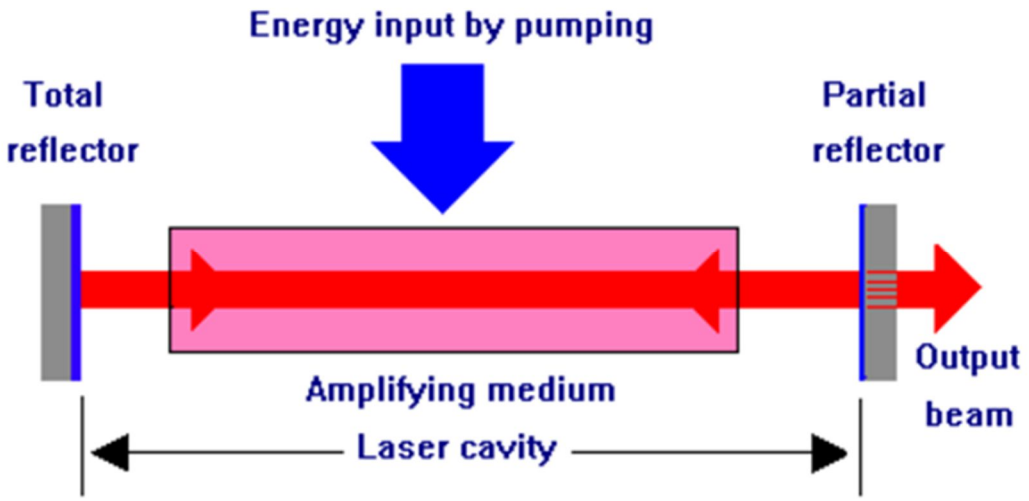
المكونات الاساسية لجهاز الليزر

In order for most laser to operate, three basic conditions must be satisfied

(1) **The active medium:** Collections of atoms, molecules or ions in the form of solid or liquid or gas.

(2) **population inversion**

(3) **Optical feed back**



The Interaction of Electromagnetic Radiation with Matter

(Emission and Absorption of Radiation)

نعلم أن الذرة تكتسب طاقة وتفقدها بصورة مستمرة وإن انتقال الطاقة إلى الذرة يتم بواسطة طريقتين هما:

1. **Collisions with other atoms**, and the transfer of kinetic energy as a result of the collision. This kinetic energy is transferred into internal energy of the atom.
2. **Absorption and emission of electromagnetic radiation.**

وحيث أن عملية الليزر تعتمد على انتقال الطاقة من خلال امتصاص الاشعاع الكهرومغناطيسي ثم تكبيره وانبعاثه على شكل شعاع ليزر، لذا سندرس ظاهرة الامتصاص والانبعاث.

The Interaction of Electromagnetic Radiation with Matter

The interactions between electromagnetic radiation and matter cause changes in the energy states of the electrons in matter.

Electrons can be transferred from one energy level to another, while absorbing or emitting a certain amount of energy. This amount of energy is equal to the energy difference between these two energy levels (E_2-E_1).

When this energy is absorbed or emitted in a form of electromagnetic radiation, the energy difference between these two energy levels (E_2-E_1) determines uniquely the frequency (n) of the electromagnetic radiation:

$(\Delta E) = E_2 - E_1 = h\nu$

Example

The visible spectrum wavelength range is: 0.4 - 0.7 [μm] (400-700 [nm]).
The **wavelength of the violet light is the shortest**, and **the wavelength of the red light is the longest**. Calculate:

a) What is the **frequency range of the visible spectrum**.

b) What is the amount of the photon's energy associated with the violet light, compared to the photon energy of the red light.

Solution:
The frequency of violet light:

$$\nu_1 = \frac{c}{\lambda_1} = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot \frac{m}{sec}}{0.4 \cdot 10^{-6} \cdot m} = 7.5 \cdot 10^{14} \cdot \frac{1}{sec}$$

The frequency of red light:

$$\nu_2 = \frac{c}{\lambda_2} = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot \frac{m}{sec}}{0.7 \cdot 10^{-6} \cdot m} = 4.3 \cdot 10^{14} \cdot \frac{1}{sec}$$

The difference in frequencies:

$$\Delta\nu = \nu_1 - \nu_2 = 7.5 \cdot 10^{14} - 4.3 \cdot 10^{14} = 3.2 \cdot 10^{14} \cdot \frac{1}{sec}$$

The **energy of a violet photon:**

$$E_1 = h \cdot \nu_1 = (6.626 \cdot 10^{-34} \cdot J \cdot sec) \cdot \left(7.5 \cdot 10^{14} \cdot \frac{1}{sec}\right)$$

$$E_1 = 5 \cdot 10^{-19} \cdot Joule$$

The **energy of a red photon:**

$$E_2 = h \cdot \nu_2 = (6.626 \cdot 10^{-34} \cdot J \cdot sec) \cdot \left(4.3 \cdot 10^{14} \cdot \frac{1}{sec}\right)$$

$$E_2 = 2.85 \cdot 10^{-19} \cdot Joule$$

The difference in energies between the violet photon and the red photon is:

$$2.15*10^{-19}\ [J]$$

This example shows how **much more energy the violet photon have compared to the red photon**.

Question:

Calculate in units of **Nanometer**, the wavelength of light emitted by the transition from energy level E_3 to energy level E_2 in which:

$$E_1 = 0\ [eV]$$
$$E_2 = 1.1\ [eV]$$
$$E_3 = 3.5\ [eV]$$

Lecture Three

Emission and Absorption of Radiation

Every system in nature "prefers" to be in the lowest energy state. This state is called the Ground state.

When energy is applied to a system, The atoms in the material are excited, and raised to a higher energy level.

(The terms "excited atoms", "excited states", and "excited electrons" are used here with no distinction)

These electrons will remain in the excited state for a certain period of time, and then will return to lower energy states while emitting energy in the exact amount of the difference between the energy levels (ΔE).

If this energy is transmitted as electromagnetic energy, it is called **photon**.

The emission of the individual photon is random, being done individually by each excited atom, with no relation to photons emitted by other atoms.

When photons are randomly emitted from different atoms at different times, the process is called **Spontaneous Emission**. Since this emission is independent of external influence, there is **no preferred direction for different photons, and there is no phase relation between photons emitted by different atoms.**

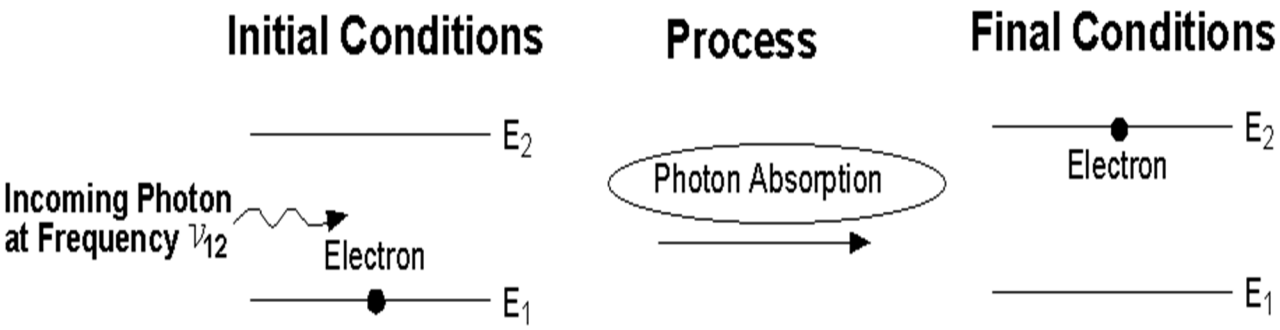
Spontaneous emission is one of a family of processes, called **relaxation processes**, by which the **excited atoms return to equilibrium (ground state)**.

This "classic" explanation assumes that the specific frequencies emitted by an excited atom are the same as the characteristic frequencies of the atom, which means that **the emission spectrum is identical to the absorption spectrum**.

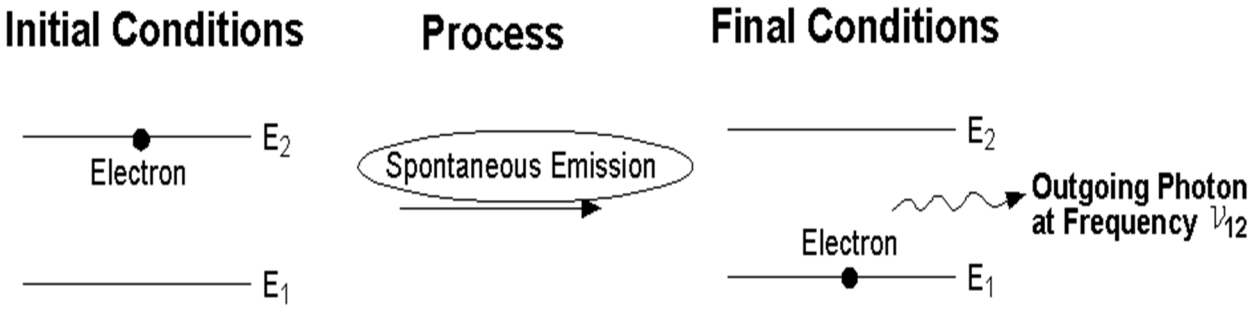
Possible Processes Between Photons and Atoms

Three possible processes between photons and atoms: absorption, spontaneous emission, and stimulated emission.

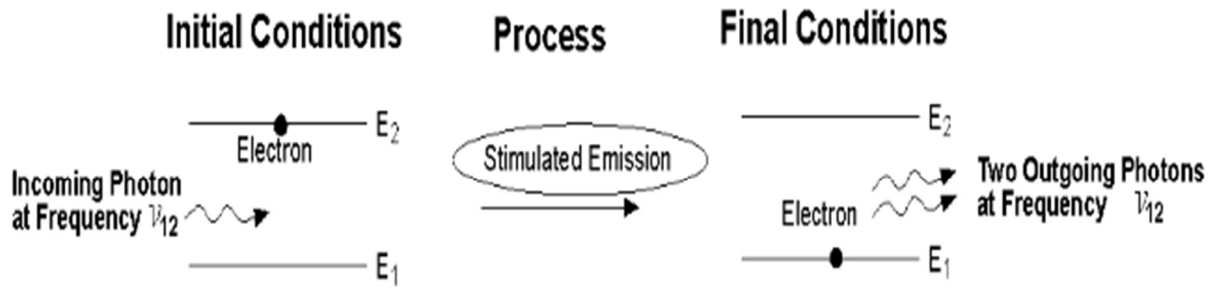
Photon Absorption: A photon with frequency n_{12} hits an atom at rest (left), and excites it to higher energy level (E_2) while the photon is absorbed.



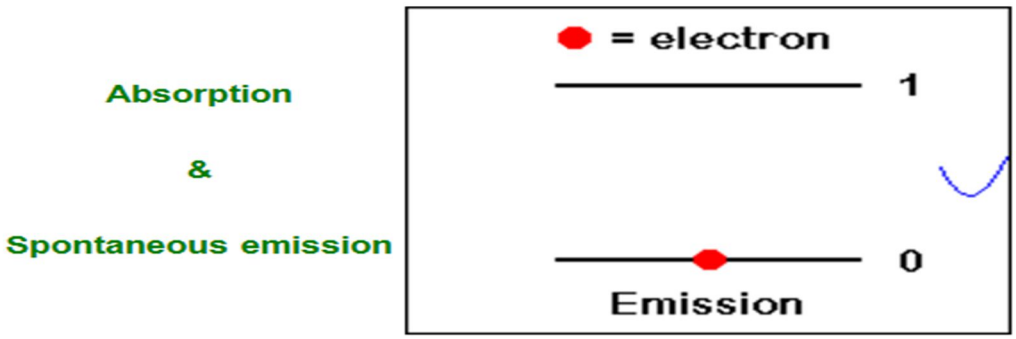
Spontaneous emission of a photon: An atom in an excited state (left) emits a photon with frequency ν_{12} and goes to a lower energy level (E_1).



Stimulated emission of a photon: A photon with frequency ν_{12} hit an excited atom (left), and cause emission of two photons with frequency ν_{12}while the atom goes to a lower energy level (E_1).

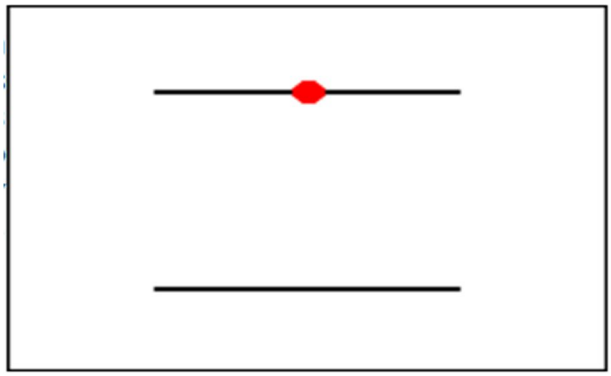


We saw that the process of **photon absorption** by the atom is a process of raising the atom (electron) from a lower energy level into a higher energy level (excited state), by an amount of energy which is equivalent to the energy of the absorbed photon.



Stimulated Emission

The incoming photon is an **electromagnetic field** which is oscillating in time and space. This field forces the excited atom to oscillate with the same frequency and phase as the applied force, which means that the atom cannot oscillate freely, but is **forced to oscillate coherently with the incoming photon.**



Remember that **two photons with the same wavelength (frequency) have the same energy:** $E = h\nu = hc/\lambda$

The incoming photon does not change at all as a result of the stimulated emission process.

As a result of the stimulated emission process, we have **two identical photons created from one photon** and one excited state. Thus we have amplification in the sense that the number of photons has increased.

This is the process that was explained in the introduction:

Light Amplification by Stimulated emission of Radiation = LASER

Average Lifetime

Atoms stay in an excited level only for a short time (about 10^{-8}[sec]), and then they return to a lower energy level by spontaneous emission.

Every energy level has a characteristic average lifetime, which is the the average time the electron exists in the excited state before making a spontaneous transition. Thus, this is the time in which the excited atoms returned to a lower energy level.

According to the quantum theory, **the transition from one energy level to another is described by statistical probability**. **The probability of transition from higher energy level to a lower one is inversely proportional to the lifetime of the higher energy level.** In reality, the probability for different transitions is a characteristic of each transition, according to selection rules.

When the transition probability is low for a specific transition, the lifetime of this energy level is longer (about 10^{-3} [sec]), and this level becomes a "**meta-stable**" level. In this meta-stable level a large population of atoms can assembled. As we shall see, this level can be a candidate for lasing process.

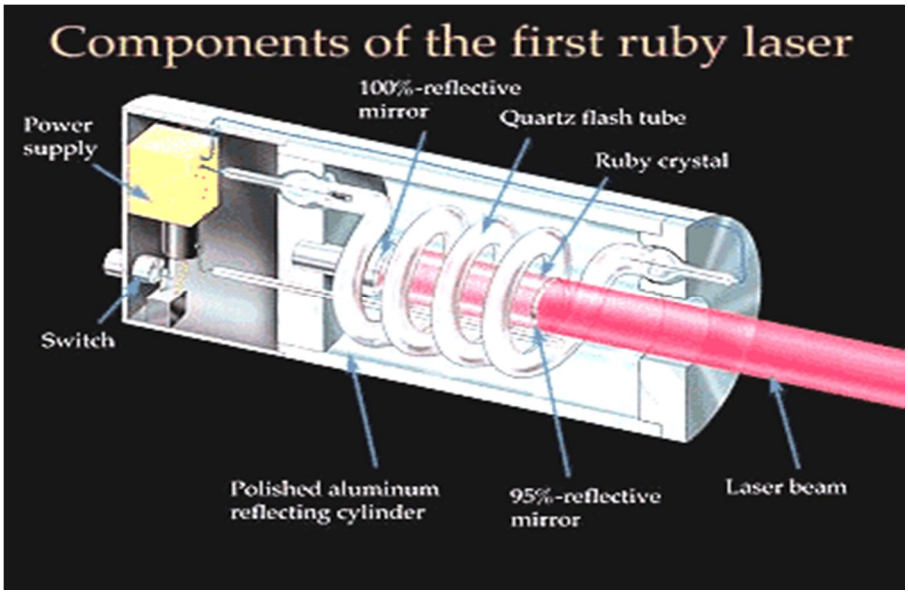
When the population number of a higher energy level is bigger than the population number of a lower energy level, a condition of "**population inversion**" is established.

If a population inversion exists between two energy levels, the probability is high that an incoming photon will **stimulate** an excited atom to return to a lower state, while emitting another photon of light. The probability for this process depend on

the match between the energy of the incoming photon and the energy difference between these two levels.

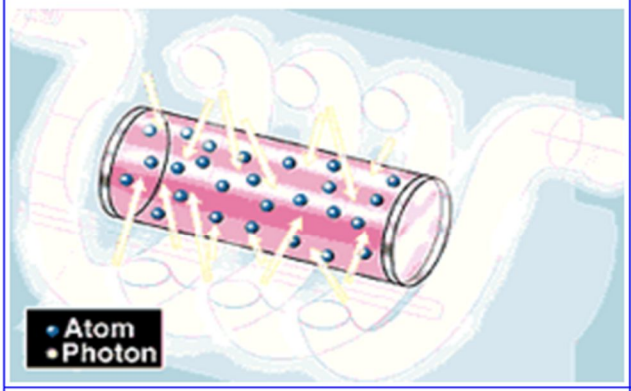
How the First Ruby Laser Works

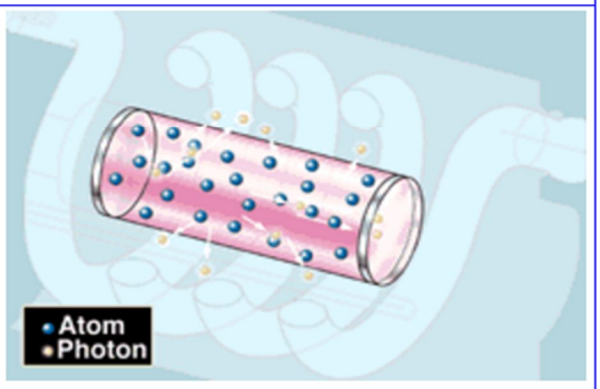
سنعرض فكرة عمل أول ليزر تم اكتشافه وهو Ruby Laser لتوضيح العناصر الأساسية لمبدأ عمل الليزر قبل الشروع في دراسة تأثير كل عنصر على حدى. في الشكل التالي نلاحظ ساق بلورة الياقوت محاطاً بأنبوب الفلاش الحلزوني وهو مصدر الطاقة التي ستعمل على إثارة الذرات. كما نلاحظ شعاع الليزر الأحمر.



في الشكل التوضيحي التالي نوجز مراحل توليد اشعة الليزر في 4 خطوات على النحو التالي:

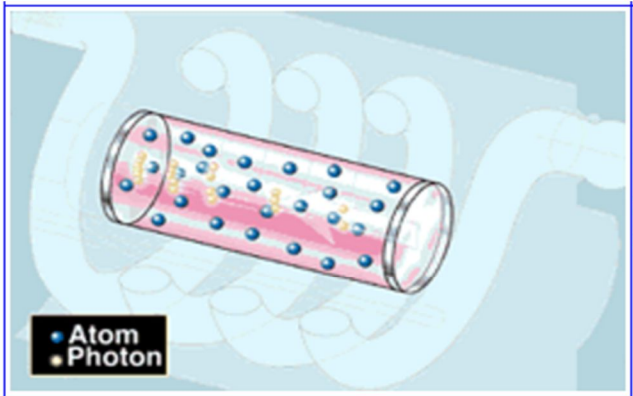
فرق جهد عالي يعمل على تزويد الفلاش بالطاقة الكافية لتوليد ضوء ذو شدة عالية ولفترة زمنية قصيرة. هذا الضوء يعمل على اثارة الذرات في بلورة الياقوت إلى مستويات الطاقة الأعلى.

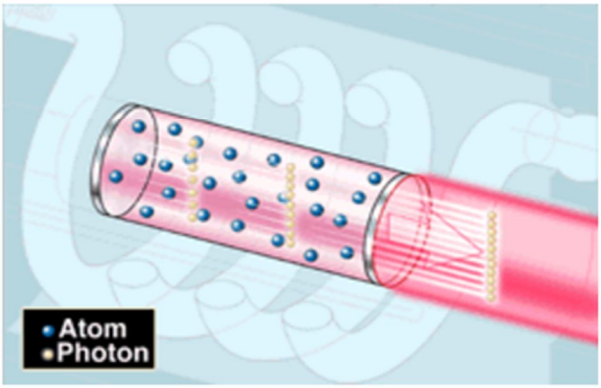




عند بعض من مستويات الطاقة تقوم بعض الذرات باطلاق فوتونات عند انتقالها إلى مستويات طاقة ادنى. هذه الفوتونات تنبعث في البداية في كافة الاتجاهات. ولكن فوتونات من بعض الذرات تقوم بعملية stimulate emission لفوتونات من ذرات أخرى وعندها يبدأ تكبير الضوء.

تقوم مرأتين علىطرفي ساق بلورة الياقوت بعمل المكبر حيث ينعكس عندها الفوتونات إلى داخل ساق بلورة الياقوت لتعمل المزيد من stimulate emission وتستمر عملية التكبير للضوء.





يتم تصميم احدى هاتين المرأتين بحيث تعكس 98% من الضوء والباقي ينفذ وهو شعاع الليزر.

Lecture Nine

التأهيل العكسي وشرط العتبة

ترجع الخسارة الكلية في جهاز الليزر الى عوامل مختلفة واهمها:

1- النفوذ عند المرايا للمرنان ولذلك تصنع المرايا بشكل يحقق لها قدرة انعكاسية مثالية الا ان الخسارة في مثل هذه المرايا تأتي ايضا من الامتصاص والتطاير اضافة الى خسائر الحيود.

2- الخسارة في الوسط الفعال لليزر بسبب حدوث انتقالات اخرى لا علاقة لها بانتقال الليزر وهو يحدث نتيجة امتصاص الوسط لنطاق عريض من طاقة الضخ، اضافة الى الخسارة المتسببة عن التطاير بسبب فقدان الوسط الفعال للتجانس البصري، وهذه الخسارة تتواجد بشكل خاص في **ليزر الحالة الصلبة**، ولتسهيل الحسابات دعنا ندمج جميع عوامل الخسارة عدا تلك المتسببة عن النفوذ في المرايا بمعامل خسارة واحد يكافئ المقدار (γ). هذا سيعمل على تقليص معامل الكسب (G) المتمثل بالمعادلة ($I = I_o e^{GL}$) الى ($I = I_o e^{(G-\gamma)L}$).

لحساب الربح عند العتبة سيتم حساب مقدار التغير في شدة الاشعاع نتيجة رحلة (دورة) كاملة واحدة له داخل المرنان، فلو فرضنا بان هذا الوسط يملا الفسحة ما بين المرآتين (M_1, M_2) واللتين لهما قدرة انعكاسية (R_1, R_2) على التوالي وان المسافة (L) بينهما، وان هذه الشدة بعد انعكاسها عن المرآة (M_2) ستصبح ($R_2 I_o e^{(G-\gamma)L}$) وبعد رحلة كاملة فان مقدار الربح (Γ) يعبر عنه بالنسبة بين الشدة النهائية الى الشدة الابتدائية، اي ان:

$$\Gamma = \frac{I}{I_o} = R_1 R_2 e^{2L(G-\gamma)} \qquad .....(1)$$

فأذا كان الربح اكبر من واحد عند التردد المطلوب فأن التضخيم ينمو وكذلك التذبذب، اما في حالة كون الربح اقل من واحد فان التذبذب يتلاشى، لذا يمكن كتابة شرط العتبة على النحو التالي:

$$R_1 R_2 e^{2L(G_{th}-\gamma)} = 1 \qquad .....(2)$$

$$e^{2L(G_{th}-\gamma)} = \frac{1}{R_1 R_2} \qquad .....(3)$$

وتمثل (G_{th}) **معامل كسب (ربح) العتبة**، والذي يأخذ الشكل التالي:

$$G_{th} = \gamma + \frac{1}{2L} ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right) \quad .....(4)$$

يمثل الحد الاول (γ) في معادلة (4) الخسارة في الوسط الفعال (خسارة الحجم) ويمثل الحد الثاني الخسارة في تصميم المرنان وهذه الخسارة تتضمن التسرب النافع لنتاج الليزر.

مثال: احسب قيمة التأهيل العكسي اللازم للحصول على معامل كسب ($1m^{-1}$) لليزر النيوديميوم- ياك عندما يكون زمن عمر المستوى الاعلى ($230\mu s$) وطول الموجة ($1.06\mu m$) وان ($\Delta v = 3\times10^{13}\,Hz$) ومعامل انكسار الوسط (1.82)؟

Solution:

$$\because\ N = \frac{Gc}{Bhvng(\Delta v)}$$

$$\because\ g(\Delta v) = \frac{1}{\Delta v}, A = \frac{1}{\tau}, \frac{A}{B} = \frac{8\pi hv^3}{c^3}, v = \frac{c}{\lambda}$$

$$N = \frac{8\pi\Delta v G\tau}{n\lambda^2} = \frac{8\pi\times3\times10^{13}\times1\times230\times10^{-6}}{1.82\times\left(1.06\times10^{-6}\right)^2} = 8.48\times10^{22}\,m^{-3}$$

مثال: احسب معامل الكسب عند العتبة من المعلومات التالية لليزر الياقوت: مقدار التأهيل العكسي الحرج ($5\times10^{22}\,m^{-3}$)، معامل انكسار الوسط (1.5) وعرض خط انتقال ($7\times10^{11}\,Hz$) ومعامل A-اينشتاين ($300s^{-1}$) لطول موجة تساوي ($694.3nm$)؟

خطط الضخ

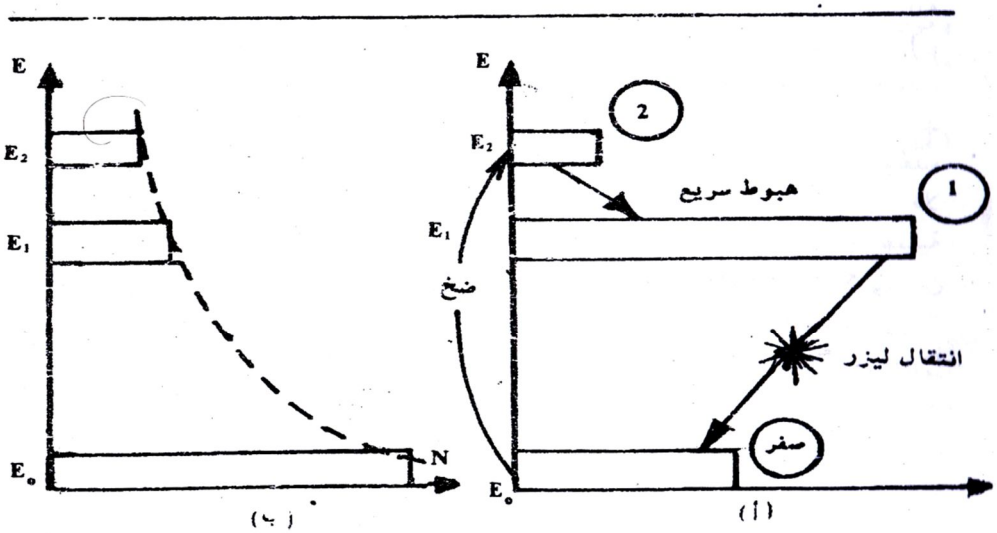
يتضمن هذا البند دراسة المخطط الذي يتم بواسطته تحقيق التأهيل العكسي لوسط الليزر، اي دراسة كيفية ضخ الوسط الفعال بطاقة من مصدر ما بحيث يتسبب عن هذه العملية خلق وضعية غير طبيعية لتأهيل مستويات الطاقة ذات العلاقة بانبعاث طيفي معين. ان تحقيق التأهيل العكسي بمقدار يتجاوز القيمة الحرجة لمستويين ضمن هذا المخطط يؤدي الى اشعاع يتضخم عن طريق الانبعاث المحفز.

- **خطة الضخ في ليزر ذي الثلاث المستويات**: في خطة الضخ ذي الثلاث المستويات والمقترح من قبل (بلومبركن) في جامعة هارفرد عام 1956، وكما يلي:

1- ترفع الذرات بالضخ بطريقة ما من المستوى الارضي (E_o) الى المستوى (E_2).

2- اذا انتخب الوسط بحيث عند وصول الذرات الى المستوى (E_2) فأنها تهبط بسرعة الى المستوى (E_1)، اي يكون متوسط زمن العمر للمستوى (E_2) قصير جدا في حين يكون متوسط زمن العمر للمستوى (E_1) طويل جدا.

3- عند تحقق هذين الشرطين يمكن تعبئة المستوى (E_1) بالضخ من المستوى الارضي (E_o) وعبر المستوى (E_2) فيولد عندئذ الانتقال من المستوى (E_1) الى المستوى الارضي (E_o) اشعاع الليزر المطلوب، لاحظ الشكل ادناه. ان ليزر الياقوت يعمل وفق هذه الخطة، وكما موضح بالشكل.



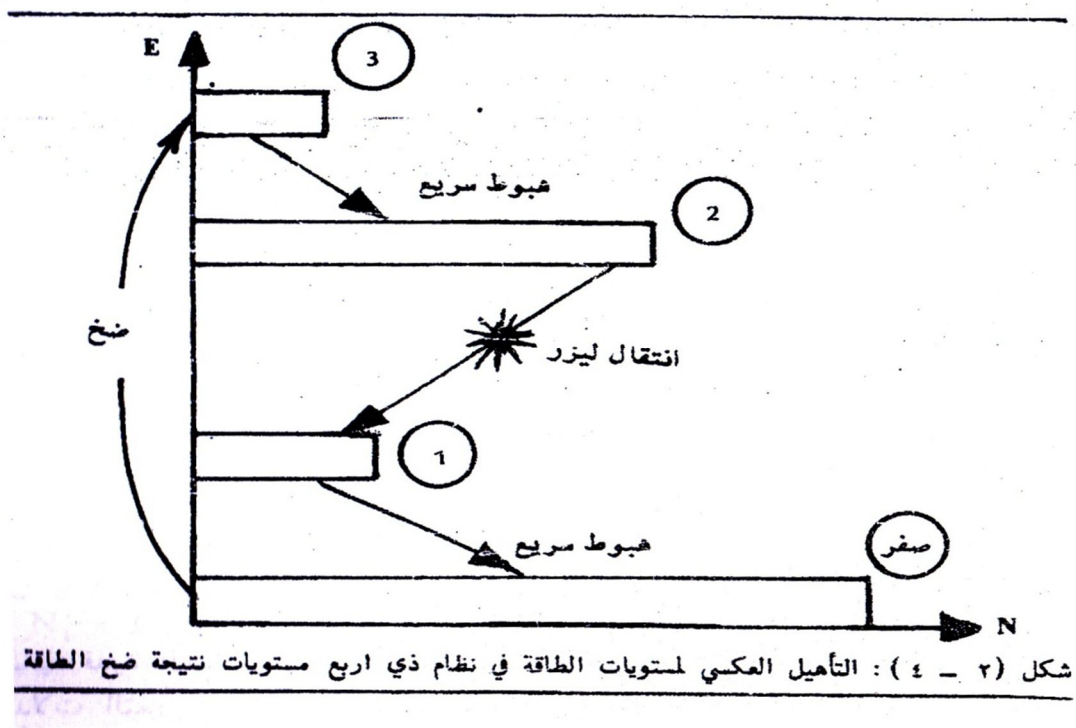
شكل (٢ ـ ٣): تأهيل مستويات الطاقة لنظام ذي ثلاث مستويات
أ) التأهيل العكسي نتيجة ضخ الطاقة ـ توزيع غير متوازن يؤدي الى انتقال الليزر . ب) التأهيل حسب توزيع بولتزمان من دون ضخ .

• خطة الضخ في ليزر ذي الاربعة مستويات: في خطة الضخ ذي الاربع مستويات.

1- ترفع الذرات بالضخ بطريقة ما من المستوى الارضي (E_o) الى المستوى (E_3).

2- اذا انتخب الوسط بشكل يوفر هبوطا سريعا من المستوى (E_3) الى المستوى (E_2) وكذلك هبوطا سريعا من المستوى (E_1) الى المستوى (E_o) فان تأهيلا عكسيا سيتوفر بين المستوى (E_2) كمستوى اعلى والمستوى (E_1) كمستوى أوطأ .

3- يولد الانتقال بين هذين المستويين اشعاع الليزر المطلوب، لاحظ الشكل ادناه. ان ليزر النديميوم يعمل وفق هذه الخطة.



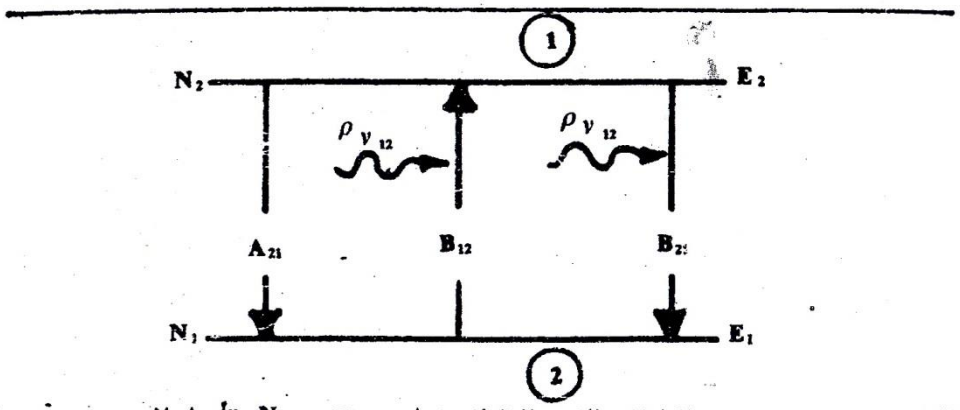
شكل (٢ ـ ٤) : التأهيل العكسي لمستويات الطاقة في نظام ذي اربع مستويات نتيجة ضخ الطاقة

والسؤال المطروح الان ايهما افضل خطة للضخ هل ليزر ذي الثلاث المستويات ام نظام ذي الاربعة المستويات؟ للإجابة عن هذا التساؤل فأن نظام الليزر ذي الاربعة المستويات يكون افضل، وذلك لأن التأهيل العكسي في خطة الضخ ذي الاربعة مستويات ينفذ بسهولة اكثر من استخدام خطة الضخ ذي الثلاثة مستويات اذ تكون قدرة الضخ اللازمة في الحالة الاولى اقل. فحسب توزيع بولتزمان تكون جميع الذرات تقريبا قبل الضخ في الحالة الارضية. وعند استخدام خطة ضخ ذي ثلاثة مستويات، نبدأ برفع الذرات من المستوى (E_o) الى المستوى (E_2) بعدها تهبط هذه الذرات بسرعة الى المستوى (E_1)، لذلك يبقى المستوى (E_2)

فارغا تقريبا. في هذه الحالة يتحتم علينا رفع نصف عدد الذرات من المستوى (E_o) الى المستوى (E_1) عبر المستوى (E_2) لكي نساوي تأهيله اولا مع المستوى الارضي (E_o) بعد هذا يكون وصول اية ذرة اضافية الى المستوى (E_1) اشارة الى تحقيق التأهيل العكسي. اما عند استخدام خطة الضخ ذي الاربعة مستويات وما دام المستوى (E_1) فارغا في البداية فان اية ذرة تصعد الى المستوى (E_2) عن طريق المستوى (E_3) ستحقق تأهيلا عكسيا.

حسابات اينشتاين لمعاملات الاحتمالية

لو نظرنا الى الشكل ادناه وفرضنا بأن (N_2, N_1) ذرة خلال المتر المكعب هما على التوالي تأهيل هذين المستويين في حالة التوازن وأن (ρ_v) تمثل الكثافة الطيفية، لذلك فهناك احتمالية لحدوث العمليات الثلاث الاتية الا وهي: الانبعاث التلقائي، الانبعاث المحفز والامتصاص.



شكل (١ ـ ١٢) : توضيح المعاملات الاحتمالية لاينشتاين ، N_1 و N_2 تأهيل المستويين E_1 و E_2 على التوالي اما التردد ν_{12} فيعطى بالعلاقة : $h\nu_{12}=(E_2-E_1)$

1- الانبعاث التلقائي (الذاتي): يحصل من المستوى (2) الى المستوى (1) باحتمالية مقدارها (A_{21}) ذرة لكل ثانية وان عدد مثل هذه الانتقالات في الثانية الواحدة وفي المتر المكعب يساوي ($A_{21}N_2$).

$$r_{sp} = A_{21}N_2 \quad .....(1)$$

2- الامتصاص: يحصل عند وجود المادة في وسط اشعاع كهرومغناطيسي وبكثافة (ρ_{v12}) فأن ذرة المادة التي في المستوى (1) قد تمتص هذا الاشعاع وتقفز الى المستوى (2) باحتمالية ($W_{12} = B_{12}\rho_{v12}$) ذرة لكل ثانية، حيث ان المقدار (B_{12}) ثابت ويدعى بمعامل B-اينشتاين. اما عدد مثل هذه الانتقالات من المستوى الاسفل باتجاه الاعلى في الثانية الواحدة وللمتر المكعب من المادة يساوي ($W_{12}N_1$) او يساوي ($B_{12}N_1\rho_{v12}$).

$$r_{ab} = B_{12}N_1\rho_{v12} \quad .....(2)$$

3- الانبعاث المحفز: يحصل أذا كانت المادة تحت تأثير الاشعاع الكهرومغناطيسي ايضا ذو الكثافة الطيفية (ρ_{v12}). فالذرة التي هي في المستوى الاعلى تتحفز بسبب هذا الاشعاع وتنتقل الى المستوى الأوطأ وباحتمالية تساوي ($W_{21} = B_{21}\rho_{v12}$) ذرة لكل ثانية، حيث ان المقدار (B_{12}) ثابت ويدعى بمعامل B-اينشتاين. اما عدد مثل هذه الانتقالات من المستوى الاعلى باتجاه نحو الاسفل في الثانية الواحدة وللمتر المكعب من المادة يساوي ($W_{21}N_2$) او يساوي ($B_{21}N_2\rho_{v12}$).

$$r_{st} = B_{21}N_2\rho_{v12} \quad .....(3)$$

ولما كانت المادة في حالة توازن ثرموداينميكي، فأن عدد الانتقالات نحو الاسفل يجب ان تعادل عدد الانتقالات نحو الاعلى، اي ان ($r_{ab} = r_{sp} + r_{st}$):

$$B_{12}N_1\rho_{v12} = A_{21}N_2 + B_{21}N_2\rho_{v12} \quad .....(4)$$

$$B_{12}N_1\rho_{v12} - B_{21}N_2\rho_{v12} = A_{21}N_2$$

وبترتيب الحدود يمكن ان نحصل على المعادلة الاتية:

$$\rho_{v12} = \frac{A_{21}N_2}{B_{12}N_1 - B_{21}N_2} \quad .....(5)$$

وبقسمة البسط والمقام في معادلة (5) على (N_2)، نحصل على:

$$\rho_{v12} = \frac{A_{21}}{B_{12}\left(\frac{N_1}{N_2}\right) - B_{21}} \quad .....(6)$$

وباستخدام احصاء بولتزمان لحالة التوازن الثرموداينميكي ولتوزيع ذرات المادة على مستويات الطاقة لها، اي ان:

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\frac{h\nu}{KT}} \quad .....(7)$$

وبتعويض معادلة (7) في معادلة (6) نحصل على:

$$\rho_v = \frac{A_{21}}{B_{12}e^{\frac{h\nu}{KT}} - B_{21}} \quad .....(8)$$

وبمقارنة هذه المعادلة بمعادلة بلانك لإشعاع الجسم الاسود والتي هي:

$$\rho_v = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3\left(e^{h\nu/KT} - 1\right)} \quad .....(9)$$

ينتج ان: $B_{12} = B_{21} = B$ وعليه وبمساواة معادلة (8) مع معادلة (9) نحصل على:

$$\frac{A}{B\left(e^{h\nu/KT} - 1\right)} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3\left(e^{h\nu/KT} - 1\right)}$$

$$\therefore \frac{A}{B} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \quad .....(10)$$

تشير المعادلة (10) الى ان احتمالية حدوث عملية امتصاص المادة للإشعاع مكافئة تماما لاحتمالية حدوث عملية الانبعاث المحفز.

ملاحظة: من معادلة اينشتاين اي معادلة (8) فان:

$$\rho_v = \frac{A}{B\left(e^{h\nu / KT} - 1\right)}$$

$$\rho_v = \frac{A}{BR} \quad \Rightarrow \quad R_o = \frac{A}{\rho_v B}$$

نجد ان: $(R_o = e^{h\nu / KT} - 1)$، حيث ان (R_o) تسمى بالنسبة بين معدل الانبعاث الذاتي ومعدل الانبعاث المحفز لزوج من مستويات الطاقة.

مثال: احسب النسبة بين معدل الانبعاث الذاتي الى معدل الانبعاث المحفز لمصباح تنكستن بدرجة حرارة $(2000K^o)$، اذا كان معدل تردد الانبعاث مساويا $(5\times10^{14}Hz)$، ثم جد النسبة بين تأهيل مستويي الطاقة المناظرين لهذا الانتقال؟

Solution:

$$R_o = e^{h\nu / KT} - 1$$

$$R_o = e^{\frac{6.6\times10^{-34}\times5\times10^{14}}{1.38\times10^{-23}\times2000}} - 1 \approx e^{12} - 1 = 1.5\times10^{5}$$

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\frac{h\nu}{KT}} \approx e^{-12} = 6.14\times10^{-6}$$

مثال: احسب النسبة بين معدل الانبعاث الذاتي الى معدل الانبعاث المحفز لطول موجة الضوء الاصفر اي لطول موجة $(590nm)$ بدرجة حرارة الغرفة $(300K^o)$، ثم جد:

1- النسبة بين تأهيل مستويي الطاقة المناظرين لهذا الانتقال؟

2- عند اي درجة حرارة يكون معدل الانبعاث المحفز مساويا الى معدل الانبعاث الذاتي؟

3- ما طول الموجة التي يكون لها $(R_o = 1)$ بدرجة حرارة الغرفة؟

مثال: في التوزيع الطيفي للجسم الاسود فان (λ_m) هي قمة طول الموجة التي تعطي النهاية العظمى للدالة التي تمثل هذا الاشعاع في قانون فين، فاذا علمت ان ثابت فين هو ($2.9\times10^{-3} m.K^o$) فأحسب مقدار (λ_m) في درجة حرارة ($6000K^o$) وما هو اللون المناظر لطول الموجة هذه؟

مثال: اثبت ان معامل الكسب (G) يعطى بالصيغة:

$$G=(N_2-N_1)\frac{Bnhvg(\Delta v)}{c}$$

حيث ان (B) يمثل معامل B- اينشتاين، (n) هو معامل انكسار الوسط، (h) هو ثابت بلانك، (v) هو تردد الاشعاع، $g(\Delta v)$ هي دالة شكل الخط الطيفي وان (c) هي سرعة الضوء بالفراغ؟

Solution:

ان مقطع الانتقال يعطى بالمعادلة:

$$\sigma=\frac{W}{F} \quad .....(1)$$

حيث ان (W) تمثل احتمالية الانتقال و(F) هو التدفق الفوتوني والذي يعطى بالمعادلة الاتية:

$$F=\frac{I}{h\nu} \quad .....(2)$$

وعند تعويض معادلة (2) في معادلة (1) نحصل على:

$$\sigma=\frac{W}{I}h\nu \quad .....(3)$$

وبما ان احتمالية الانتقال تعطى ($W=B\rho_\nu=B\rho g(\Delta v)$) وعند تعويضها في معادلة (3) نحصل على:

$$\sigma=\frac{\rho Bhvg(\Delta v)}{I} \quad .....(4)$$

ولكن شدة الاشعاع تعطى ($I=\rho c/n$) وعند تعويض قيمتها في معادلة (4) نحصل على:

$$\sigma=\frac{Bnhvg(\Delta v)}{c} \quad .....(5)$$

وبما ان معامل الامتصاص ( ) يعطى :

$$\alpha=(N_1-N_2)\sigma$$

$$\alpha=(N_1-N_2)\frac{Bnhvg(\Delta v)}{c} \quad .....(6)$$

وبما ان معامل الكسب هو ($G = -\alpha$) وعليه يكون:

$$G = (N_2 - N_1)\frac{Bnhvg(\Delta v)}{c} \quad .....(7)$$

مثال: أ) اذا تضاعفت شدة الضوء المارة مرة واحدة خلال وسط ليزري الذي طوله ($0.5m$)، احسب معامل الكسب على اعتبار ان الجهاز لا يتضمن خسارة. ب) اذا كانت الزيادة في شدة الاشعاع بمقدار (5%) فقط لنفس المسار فكم يكون معامل الكسب؟

Solution:

a) $I = I_o e^{GL}$

$2 = e^{0.5G}$

$ln\,2 = 0.5G$

$G = 1.39m^{-1}$

b) $I = I_o + 0.05I_o = 1.05I_o$

$1.05I_o = I_o e^{0.5G}$

$$G = \frac{ln 1.05}{0.5} = 0.098m^{-1}$$

مثال: اذا تضاعفت شدة الضوء المار خلال وسط ليزري طوله ($1m$)، احسب: 1- معامل الكسب على فرض ان الجهاز لا يتضمن خسارة. 2- اذا كانت الزيادة في شدة الاشعاع بمقدار (6%) فقط ولنفس الطول فكم يكون مقدار معامل الكسب؟

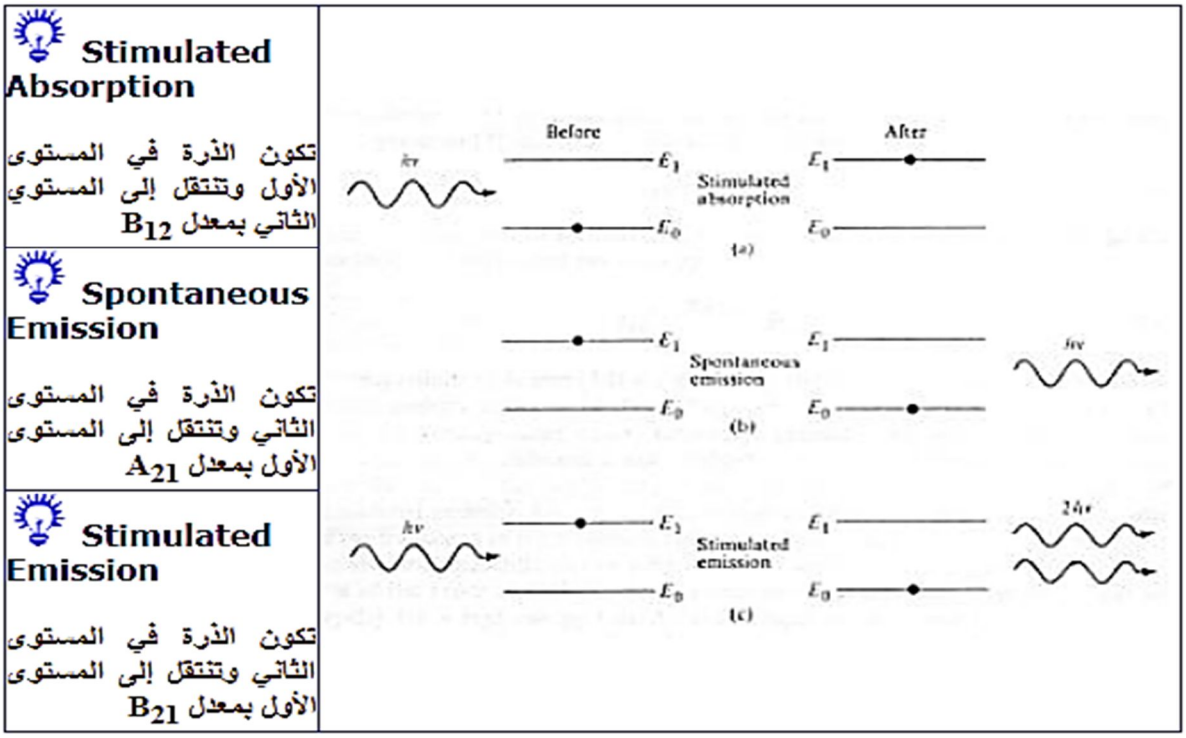
Lecture Four

The Einstein Relation

ذكرنا سابقاً أن العلم اينشتاين في عام 1917 وضع الاساس النظري لعمل الليزر من خلال دراسة تفاعل الطاقة الكهرومغناطيسية Electromagnetic Radiation مع المادة Matter وذلك من خلال العمليات الانتقالية الثلاثة التالية:

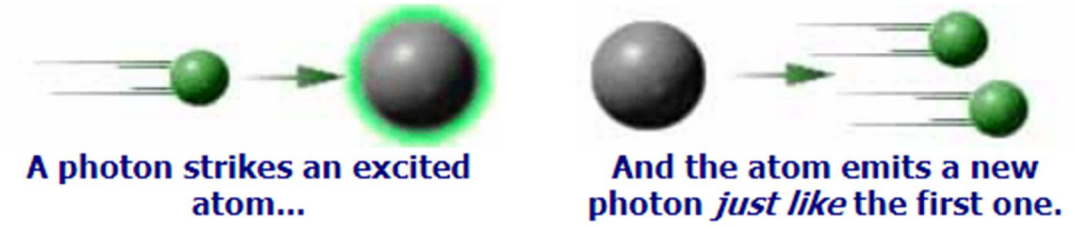
1- Absorption process 2- Spontaneous Emission 3- Stimulated Emission

حيث أفترض اينشتاين أن الذرات المكونة للمادة موزعة على مستويين للطاقة هما E_0 , E_1 حيث أن مستوى الطاقةE_0 يعرف بإسم Ground State أما مستوى الطاقة E_1 فيعرف بـ Excited State. الانتقالات الثلاثة السابقة تحدث في المادة بين مستويي الطاقة عند أي درجة حرارة وهذا ما يعرف بالاتزان الحراري Thermal Equilibrium . الشكل التالي يوضح مستويي الطاقة وتأثير كل عملية انتقال على الذرة والاشعاع الكهرومغناطيسي.



Note: (The terms "excited atoms", "excited states", and "excited electrons" are used here with no distinction)

لاحظ أنه عندما يكون انبعاث الفوتونات قليل فإن الانبعاث يكون عشوائي وبزيادة معدل الفوتونات ننتقل إلى حالة الانبعاث الاستحثاثي



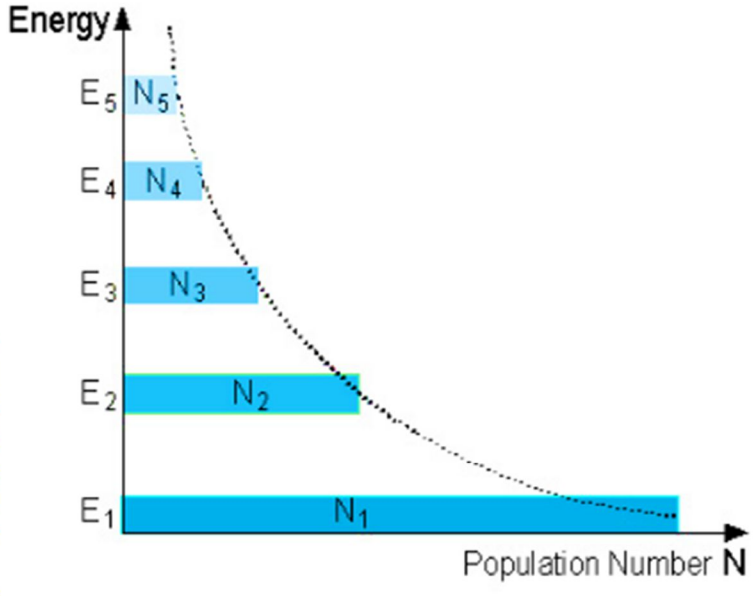
تعرف المعاملات A_{12} & B_{12} & B_{21} بمعاملات اينشتاين Einstein Coefficients وهي التي تعطينا فكرة جيدة عن احتمالية حدوث انتقال بين مستويات الطاقة. سنقوم بإيجاد العلاقات التي تربط هذه المعاملات بعضها ببعض حيث أن الانتقالات الثلاثة تحصل في المادة بصورة مستمرة وبمعدل ثابت لكل منها عند ثبوت درجة الحرارة أي في حالة الاتزان الحراري، وبمعرفة معامل من المعاملات الثلاثة يمكن حساب المعاملات الأخرى.

Population at thermal equilibrium

إن العلاقة بين تعداد الذرات في مستويات الطاقة عند الاتزان الحراري توصف بمعادلة ماكسويل بولتزمان للتوزيع الاحصائي Maxwell-Boltzmann Law .

$$N_1 = \frac{g_1}{g_0} N_0 \; e^{-\frac{h\upsilon}{KT}}$$

Where T is the temperature in Kelvin and there is a thermal equilibrium at T, g is the statistical weight which represent the different ways of distribution of atoms all have the same energy (degeneracy).



Population Numbers at "Normal Population"

Example:

Calculate the ratio of the population numbers (N_1, N_2) for the two energy levels $E_2$and E_1 when the material is at room temperature (300^0K), and the difference between the energy levels is 0.5 [eV]. What is the wavelength (l) of a photon which will be emitted in the transition from E_2 to E_1?

Solution:

When substituting the numbers in the equation, we get:

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{k_B \cdot T}\right) = \exp\left[-\frac{(0.5 \cdot eV) \cdot \left(1.6 \cdot 10^{-19} \cdot \frac{J}{eV}\right)}{\left(1.38 \cdot 10^{-23} \cdot \frac{J}{K}\right) \cdot (300K)}\right] = 4 * 10^{-9}$$

This means that at room temperature, for every 1,000,000,000 atoms at the ground level (E_1), there are 4 atoms in the excited state (E_2) .

To calculate the wavelength:

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{\Delta E} = \frac{(6.626 \cdot 10^{-34} \cdot J \cdot sec) \cdot \left(3.10^8 \cdot \frac{m}{sec}\right)}{(0.5 \cdot eV) \cdot \left(1.6 \cdot 10^{-19} \cdot \frac{J}{eV}\right)} = 2.48 \cdot \mu m$$

This wavelength is in the Near Infra-Red (NIR) spectrum.

The Rate Equations for the Absorption, Spontaneous Emission and Stimulated Emission

سنقوم في هذه المرحلة بدراسة تأثير كل عملية من العمليات الانتقالية الثلاث على معدل تغير تعداد الذرات N_1 في مستوي الطاقة المثار E_1 وذلك في حالة الاتزان الحراري dN_1/dt ، لذا سنفترض مجموعة من الذرات موزعة على مستويين للطاقة E_0 , E_1

الانبعاث التلقائي Spontaneous Emission

تعتمد عملية الانبعاث التلقائي على تعداد المستوي E_1 أي كلما ازداد N_1 كلما زادت عملية الانبعاث التلقائي، وكذلك يعتمد هذا الانتقال على المعامل A_{10} الذي يعبر على احتمالية حدوث الانبعاث التلقائي. يكون معدل التغير في تعداد المستوى E_1 بالنسبة للزمن بالسالب لأن كلما زاد معدل التغير كلما نقصت N_1. ويمكن التعبير عن ذلك بالمعادلة التالية:

$$dN_1/dt = - A_{10} N_1 \qquad (1)$$

الامتصاص Stimulated Absorption

تعتمد عملية الامتصاص على تعداد المستوي E_o أي كلما ازداد N_o كلما زادت عملية الامتصاص ، وكذلك يعتمد هذا الانتقال على المعامل B_{01} الذي يعبر على احتمالية حدوث عملية الامتصاص . يكون معدل التغير في تعداد المستوى E_1 بالنسبة للزمن بالموجب لأن كلما زاد معدل التغير كلما زاد N_1. وحيث أن عملية الامتصاص تحدث اذا توفر Photon ذو طاقة تساوي فرق الطاقة بين المستويين E_1 و E_0 أي أن :

$$h\nu = (\Delta E) = E_2 - E_1$$

وللتعبير عن مدى تحقق المعادلة السابقة في عملية الامتصاص فإننا نعبر عنها بكثافة الاشعاع بالدالة ρ كدالة للتردد Energy density of radiation والتي تعطي مدى احتمالية وجود فوتونات عند تردد ν ، ويمكن التعبير تأثير عملية الامتصاص على تغير تعداد المستوى E_1 بالمعادلة التالية:

$$dN_1/dt = + B_{01} N_0 \rho(\nu) \qquad (2)$$

الانبعاث المستحث Stimulated Emission

تعتمد عملية الانبعاث المستحث على تعداد المستوي E_1 أي كلما ازداد N_1 كلما زادت عملية الانبعاث المستحث ، وكذلك يعتمد هذا الانتقال على المعامل B_{10} الذي يعبر على احتمالية حدوث عملية الانبعاث المستحث. يكون معدل التغير في تعداد المستوى E_1 بالنسبة للزمن بالسالب لأن كلما زاد معدل التغير كلما قل N_1 وحيث أن عملية الانبعاث المستحث تحدث اذا توفر Photon ذو طاقة تساوي فرق الطاقة بين المستويين E_1 و E_0 أي أن :

$$h\nu = (\Delta E) = E_2 - E_1$$

وللتعبير عن مدى تحقق المعادلة السابقة في عملية الانبعاث المستحث فإننا نعبر عنها بكثافة الاشعاع بالدالة ρ كدالة للتردد Energy density of radiation والتي تعطي مدى احتمالية وجود فوتونات عند تردد ν، ويمكن التعبير تأثير عملية الانبعاث المستحث على تغير تعداد المستوى E_1 بالمعادلة التالية:

$$dN_1/dt = - B_{10} N_1 \rho(\nu) \qquad (3)$$

أن المعادلات الثلاثة السابقة تمثل الحالات المختلفة التي يمكن من خلالها أن يتفاعل الاشعاع الكهرومغناطيسي مع ذرات المادة، وفي حالة الاتزان الحراري عند درجة حرارة T فإن عدد الذرات N_1 في مستوى الطاقة E_1 يكون ثابت أي أن:

$$N_1 = \text{Constant} \quad \& \quad dN_1/dt = \text{zero}$$

Therefore

$$dN_1/dt = - A_{10} N_1 + B_{01} N_0 \rho(\nu) - B_{10} N_1 \rho(\nu) = 0$$

Hence

$$N_1 (- A_{10} - B_{10} \rho(\nu)) + B_{01} N_0 \rho(\nu) = 0$$

$$N_1 (A_{10} + B_{10} \rho(\nu)) = B_{01} N_0 \rho(\nu)$$

we get

$$\frac{N_1}{N_0} = \frac{B_{01}\rho(\upsilon)}{A_{10} + B_{10}\rho(\upsilon)} \qquad (4)$$

وحيث أن المعادلات الثلاثة الأخيرة تم اشتقاقها تحت شرط الاتزان الحراري ولهذا فإن معادلة ماكسويل بولتزمان متحققة.

$$\frac{N_1}{N_0} = \frac{g_1}{g_0}\ e^{-\frac{h\upsilon}{KT}} \qquad (5)$$

وبمقارنة المعادلة (4) بالمعادلة (5) نحصل على المعادلة التالية:

$$\frac{g_1}{g_0}\ e^{-\frac{h\upsilon}{KT}} = \frac{B_{01}\rho(\upsilon)}{A_{10} + B_{10}\rho(\upsilon)} \qquad (5^*)$$

عند درجات الحرارة العالية فإن كثافة الاشعاع تكون كبيرة وهنا يمكن اهمال تأثير عملية الانبعاث التلقائي حيث انها لا تتأثر بتغير درجة الحرارة

when KT >> hν we get $g_1/g_0 = N_1/N_0$

hence

$$\frac{B_{01}}{B_{10}} = \frac{g_1}{g_0} \qquad (6)$$

From equation (5) we get

$$\frac{g_1}{g_0} e^{-\frac{h\upsilon}{KT}} A_{10} + \frac{g_1}{g_0} e^{-\frac{h\upsilon}{KT}} B_{10} \rho(\upsilon) = B_{01} \rho(\upsilon)$$

But $$\frac{B_{01}}{B_{10}} = \frac{g_1}{g_0}$$

$$\frac{g_1}{g_0} e^{-\frac{h\upsilon}{KT}} A_{10} + \frac{g_1}{g_0} e^{-\frac{h\upsilon}{KT}} B_{10} \rho(\upsilon) = \frac{g_1}{g_0} B_{10} \rho(\upsilon)$$

we get

$$e^{-\frac{h\upsilon}{KT}} A_{10} = B_{10} \rho(\upsilon) \left[1 - e^{-\frac{h\upsilon}{KT}} \right]$$

$$\frac{A_{10}}{B_{10}} = \frac{\rho(\upsilon) \left[1 - e^{-\frac{h\upsilon}{KT}} \right]}{e^{-\frac{h\upsilon}{KT}}}$$

$$\frac{A_{10}}{B_{10}} = \rho(\upsilon) \left(e^{\frac{h\upsilon}{KT}} - 1 \right)$$

$$\rho(\upsilon) = \frac{A_{10}}{B_{10}} \frac{1}{\left(e^{\frac{h\upsilon}{KT}} - 1 \right)} \qquad (7)$$

Equation (7) called Einstein equation for black body radiation . From the Bank equation of black body radiation:

$$\rho(\upsilon) = \frac{8\pi h \upsilon^3}{c^3} \frac{1}{\left(e^{\frac{h\upsilon}{KT}} - 1 \right)} \quad (8)$$

we get

$$\frac{A_{10}}{B_{10}} = \frac{8\pi h \upsilon^3}{c^3} \quad (9)$$

The equation (6) and (9) are called Einstein relations. The second relation enables us to evaluate the ratio of the rate of spontaneous emission to the rate of stimulated emission for a given pair of energy levels.

From equation (8)

$$\rho(\upsilon) = \frac{8\pi h \upsilon^3}{c^3} \frac{1}{\left(e^{\frac{h\upsilon}{KT}} - 1 \right)}$$

To evaluate the ratio between the spontaneous emission and the stimulated emission

Let $\mathbf{R} = \left(e^{\frac{h\upsilon}{KT}} - 1 \right)$

therefore

$$\rho(\upsilon) = \frac{A_{10}}{B_{10}} \frac{1}{R}$$

The ratio for the spontaneous emission to the stimulated emission can be written as

$$R = \frac{A_{10}}{B_{10}} \frac{1}{\rho(\upsilon)}$$

Example

Calculate the ratio of spontaneous emission to stimulated emission for a tungsten filament operating at a temperature of 2000K taking the average frequency to be $5x10^{14}$Hz.

Solution

The ratio $R = \exp[(6.6x10^{-34}*4x10^{14})/(1.38x10^{-23}*2000)]$

تم اهمال كثافة الإشعاع

$$R = 1.5x10^{5}$$

This confirms that under normal condition of thermal equilibrium stimulated emission is not an important process.

مما سبق نستنتج أن عملية **stimulated emission** تنافس عمليتي **spontaneous emission** و **absorption** وحتى نكبر شعاع ضوئي بواسطة **stimulated emission** فإنه يجب أن نزيد معدل هذه العملية بالنسبة للعمليتين الاخرتيين. وحتى يتحقق ذلك فإنه يجب زيادة كثافة الاشعاع وتعداد المستوى E_1 وهذا مايعرف بـ **Population Inversion**.

اسس عمل الليزر

نظرة تاريخية:

كلمة الميزر (MASER) جاءت من الحروف الاولى للنص الوارد في اللغة الانكليزية الذي يتكون من الكلمات: Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation والذي يعني تضخيم الموجات المايكروية بواسطة الانبعاث المحفز للاشعاع.

ان فكرة تضخيم الاشعة الكهرومغناطيسية بواسطة الانبعاث المحفز قد شغلت عقول كثير من الباحثين وخصوصا بعد الحرب العالمية الثانية وكان اول مشروع ناجح لهذه العملية كان من قبل العالم تاونس وطلابه في جامعة كولومبيا عام 1954. حيث اول ميزر وكان يعمل عند الطول الموجي ($1.25cm$) وكان هذا الطول الموجي يستخدم في الرادار. فلغرض تكبير هذه الموجة والتي ترددها ($28.87GHz$) وللحصول على التوزيع العكسي قام هذا العالم بفصل جزيئات الامونيا ذات الطاقة العالية المتواجدة في المستوى الاعلى بالحركة باتجاه معين يخالف حركة الجزيئات المتواجدة في المستوى الاوطا باستخدام مجال كهربائي غير متجانس من خلال ترتيب معين لاقطاب المجال.

ان جزيئة غاز الامونيا تعد مصدرا مناسبا لتضخيم الموجات الدقيقة (المايكروية) بالانبعاث المحفز. حيث تستطيع هذه الجزيئة (NH_3) ان تاخذ طاقتين مختلفتين اعتمادا على موقع اهتزاز ذرة النتروجين بشكل عمودي على مستوي ذرات الهيدروجين الثلاث كما في الشكل ادناه:

فعند وجود جزيئات الامونيا بمستويين مختلفين في الطاقة داخل خزان معين وعند سقوط فوتون واحد ذا طاقة مساوية لفرق الطاقة بين المستويين المختلفين لجزيئات الامونيا فانه قد يسبب تفاعلا متسلسلا كما في الشكل ادناه بحيث يتغلب الانبعاث المحفز على عملية الامتصاص وبذلك تتكون موجة كهرومغناطيسية واقفة ضمن مدى الموجات الدقيقة ومكبرة بواسطة الانبعاث المحفز المتسلسل.

شكل يوضح الانبعاث المحفز المتسلسل بين ثلاث جزيئات امونيا ذات مستوى عال من الطاقة عند قصفها بفوتون واحد.

يتميز ميزر الامونيا بنقاوة طيفية عالية اذ يستخدم مقياسا لمعايرة الترددات ومن جهة اخرى فان لميزر الامونيا مساوئ حددت من استخدامه اذ ان قدرته الخارجة واطئة جدا وفي حدود ($10^{-10}W$) علاوة على صعوبة مؤالفة هذا الميزر للعمل بترددات مختلفة.

الليزر

بينما كانت تقنية الميزر في طريقها الى الرسوخ كانت الرغبة شديدة لتوسيع نطاق تطبيق تقنية الانبعاث المحفز ليشمل طيف الاشعة تحت الحمراء والاشعة المرئية. ان تاونس وبالتعاون مع شافلوف في عام 1958 الصعوبات والمشاكل التي تستجد في تصنيع الميزر البصري والتي تحتاج الى اجراء تغيير في التوضيحات النظرية بالإضافة الى اجراء تحويرات مهمة في التقنية العملية المستخدمة في بناء الليزر. لذلك فان ملخص اهم تلك المشاكل والعقبات والآراء التي وردت في تلك الدراسة هي:

1- تكون الفروق في مستويات الطاقة (ΔE) اللازمة لتوليد اشعة مرئية كبيرة مقارنة بالمقدار (KT) في درجة حرارة الغرفة، بينما تكون فروق الطاقة في حالة الميزر صغيرة بالمقارنة بالكمية ذاتها. ان هذا يؤدي الى ضرورة البحث عن اساليب اخرى لتأهيل المستوى المتهيج للطاقة المطلوب تحفيزه. في هذه الحالة يكون معدل ضخ الطاقة لجهاز الليزر اعلى بكثير مما عليه في الميزر.

2- في حالة تهيج الذرة ولانبعاث واقع في نطاق الاشعاع المرئي، يكون الانبعاث التلقائي هو المهيمن على عملية انبعاث الاشعاع والمطلوب الان هو تقليص هذا النشاط والعمل على انعاش الانبعاث المحفز.

3- في كل من الميزر والليزر، توضع المادة الفعالة في تجويف حيث تتم عملية التكبير وتقوية التذبذب، يدعى هذا التجويف بالمرنان ففي حالة الميزر يمكن بسهولة تصميم تجويف ليناسب طول الموجة المايكروية بحدود ($1.25cm$) وتسمح فقط باحتواء صيغة واحدة للتذبذب. اما في حالة التطبيق في نطاق الطيف المرئي حيث يكون طول الموجة صغير جدا حيث يكون متوسط طول الموجة حوالي ($0.5\times10^{-4}cm$). ان اي تصميم لحجم تجويف يمكن تحقيقه عمليا سيسمح بتواجد عدد كبير من صيغ التذبذب تقع ضمن النطاق الترددي للخط الطيفي قيد الانبعاث. حيث ان الصيغ العديدة للتذبذب تضعف عمل الليزر وتؤثر على استقراريته.

4- في مدى الموجات الميكروية ولعملية الانبعاث المحفز يمكن انجاز الضخ البصري باستخدام اشعة صادرة عن مولدات اشارة يمكن مؤالفة ترددها مع التردد المطلوب بينما لم تكن تتوفر حينذاك مصادر ضوئية تعمل بنفس الطريقة وذات قدرة عالية قبل ظهور مصادر الليزر ذاتها.

لم يتمكن هذين العالمين من انتاج اول ميزر بصري (ليزر) فقد اتيحت الفرصة لغيرهم لصنع اول نتاج لميزر بصري في مختبرات بحوث هيوز في الولايات المتحدة عام 1960 حيث انجز الاختراع من قبل مايمن والذي اعتمد في انجازه على ما نشره تاونس وبعد عدة ايام فقط. استخدم مايمن الياقوت الوردي كوسط فعال لأول ميزر بصري وهي المادة التي استخدمت من قبله في الميزر ولكن بانتقاء خطة ضخ تتضمن ثلاث مستويات لتوليد التأهيل العكسي للمستوى الوسطي مستخدما بذلك مصباح ومضي من الزينون للتشعيع وبهذا اصبح الياقوت مادة فعالة مكبرة عند الطول الموجي ($693.3nm$) اضافة الى الطول الموجي ($1.25cm$) الصادر من الميزر، وبعد ذلك توالت عدة انواع من الليزرات.

تاريخيا تعد بحوث الليزر امتداد لبحوث الميزر حيث اطلق على الليزر في بادئ الامر بالميزر البصري واما تسميته الان بالليزر (LASER) فلقد جاءت وبالتسلسل من الاحرف الاولى للتعبير التالي: (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)، والتي تعني تضخيم الضوء المرئي بواسطة الانبعاث المحفز للإشعاع.

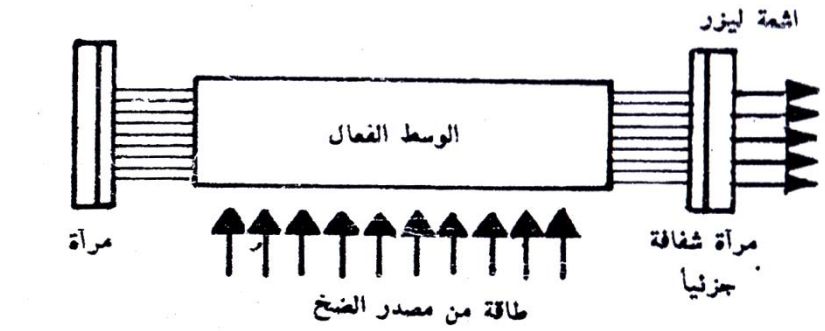
فكرة الليزر

لكي تعمل اجهزة الليزر يجب ان يتوفر لها ثلاثة شروط اساسية وهي:

1- وجود الوسط الفعال: القاعدة الاساس لعمل الليزر وهو نظام ذو عدد كبير من الذرات او الجزيئات او الايونات بحالتها الصلبة او السائلة او الغازية والتي تبعث طيفا يقع جزء منه في المدى المرئي من الاشعاع الكهرومغناطيسي.

2- تحقيق التاهيل العكسي: وهو شرط ضروري لجعل عملية الانبعاث المحفز نشطة وبما ان هذه الشرط لا يتحقق تحت الظروف الاعتيادية لذا تستخدم طرق ضخ معينة تنفذ وفق مخططات خاصة تناسب مستويات الطاقة لذرات الوسط الفعال.

3- التغذية الاسترجاعية: وهو شرط ضروري لكي ياخذ الاشعاع المنبعث تذبذبه الصحيح ويؤدي بالتالي الحصول على حزمة من الاشعة ذات درجة عالية من صفة الاتجاهية وصفة التشاكه بدون هذا الشرط يعمل الليزر كمكبر. يمكن تحقيق هذا الشرط باستخدام تجويف رنيني ذو تصميم مناسب يدعى بالمرنان. اوا تصميم لمرنان ناجح استخدم لاشعة الانبعاث المحفز في المدى المرئي هو مقياس التداخل لفابري-بيرو.



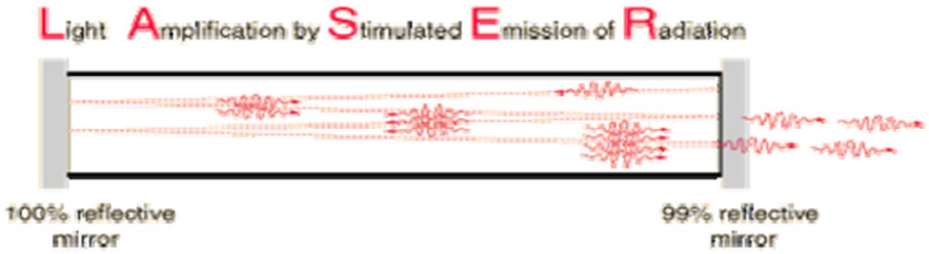
شكل (٢ ـ ٢) : رسم تخطيطي لمذبذب الليزر . الوسط الفعال والمرنان .

ملاحظة: عند تحقيق الشروط الثلاثة اعلاه يبقى هناك شرطا يدور حول الموضوع ككل وهو مهم لعمل كل من الميزر والليزر ويطلق عليه شرط العتبة ولابد من تحقيق متطلبات هذا الشرط لتبدا عملية التضخيم في الوسط الفعال ومن ثم عملية التذبذب في المرنان ويرجع سبب هذا الى كون اجهزة الليزر كأية اجهزة عملية غير مثالية، تتضمن من مسببات الخسارة والتبدد الكثير وهي على العموم اجهزة ذي كفاءة واطئة اذا ما قورنت بالأجهزة العملية الاخرى.

Lecture Four

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.

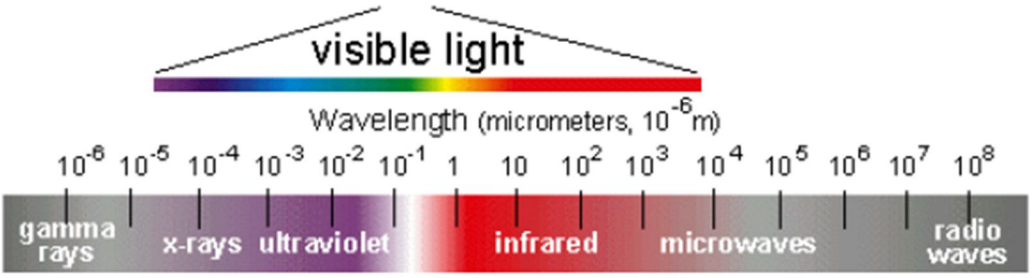
LASER



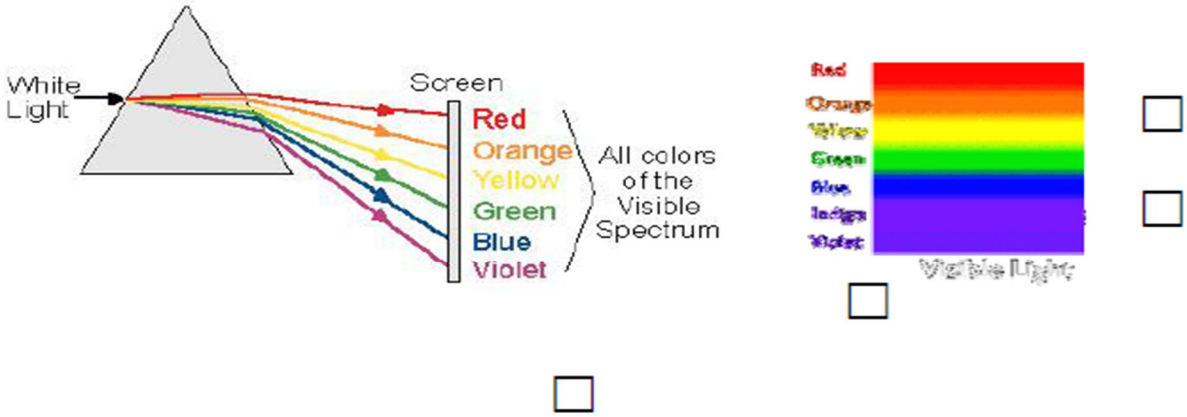
وتعني تضخيم الضوء بإنبعاث الإشعاع المحفز وهو عبارة عن حزمة ضوئية ذات فوتونات تشترك في ترددها وتتطابق موجاتها بحيث تحدث ظاهرة التداخل البناء بين موجاتها لتتحول إلى نبضة ضوئية ذات طاقة عالية . بينما يشع المصدر الضوئي العادي موجات ضوئية مبعثرة غير منتظمة فلا يكون لها قوة الليزر . وباستخدام بلورات لمواد مناسبة(مثل الياقوت الأحمر) عالية النقاوة يمكن تحفيز انتاجها لأشعة ضوئية من لون واحد أي ذو طول موجة واحدة وكذلك في طور موجي واحد ، وعند تطابقها مع بعضها وانعكاسها عدة مرات بين مرآتين داخل بلورة الليزر فتنتظم الموجات وتتداخل وتخرج من الجهاز بالطاقة الكبيرة المرغوب فيها وتستخدم كلمة الليزر للتعبير عن أية منطقة من مناطق الطيف، ولمعرفة الليزر يجب في الواقع التعرف على الطيف الكهرومغناطيسي والذي يبدأ من الموجات الراديو الطويلة إلى الموجات القصيرة لأشعة جاما العالية الطاقة كما هو موضح في شكل رقم ١-١ . وكما هو معروف فإن المنطقة الضيقة من الطيف. والمعروفة لنا بالمرئية أو الضوء الأبيض. تتكون من الألوان الضوئية التالية: أحمر، برتقالي، أصفر، أخضر، أزرق، وبنفسجي كما هو موضح في شكل رقم ١-٢ . كما أن ترددات هذه الإشعاعات وأطوالها الموجبة مختلفة ومضطربة، فهي أشبه بالضوضاء بمقارنتها مع الموجات الصوتية، بينما نجد أن ضوء أشعة الليزر منظم ومركز. وفي الليزر عمل

الاضطراب الطبيعي للموجات على ترابطها Coherence، حيث تتبعث الفوتونات، الوحدات الأساسية لكل الإشعاعات الطيفية على شكل دفعات منتظمة ذات تردد واحد، ونظراً لأن الموجات تترابط فإن الفوتونات تقوي بعضها البعض وتزيد من قدرتها على نقل الطاقة.

أن تقنية الليزر توسعت لتشمل ما وراء منطقة الموجات فوق البنفسجية باتجاه الطاقة العالية للأشعة السينية، وكل طول موجي في هذه المناطق يعطي القدرة والمساعدة للإنسان على ابتكار تطبيقات متنوعة.



شكل رقم ١-١



شكل رقم ١- ٢

والليزر ينتج حزمة ضوئية رفيعة جدًا وقوية. وبعض الأحزمة رفيعة لدرجة أنها قادرة على ثقب مائتي حفرة فوق نقطة في حجم رأس الدبوس . وبسبب إمكانية تركيز أشعة الليزر إلى هذا الحد من الدقة وعلية فإن هذه الأشعة تكون قوية جدًا. فبعض الأحزمة، على سبيل المثال، تستطيع اختراق الماس ، وهو أصلب مادة في الطبيعة، وبعضها تستطيع إحداث

تفاعل نووي صغير . ويمكن أيضًا نقل حزمة الليزر إلى مسافات بعيدة دون أن تفقد قوتها وهذا يقودنا لدراسة خصائص شعاع الليزر، أي كانت مادته أو منطقة طيفه.

١ - ٢ خصائص شعاع الليزر

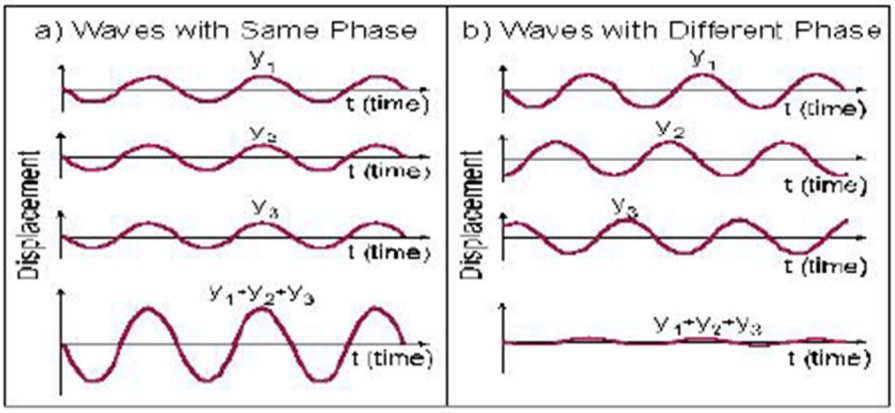
- أحادي اللون Monochromatic وتعني أن له عرض طيفي ضيق ينتج عنه تردد مفرد نقي، وهذه الصفة الموجبة كانت تتميز بها الأشعة الراديو دون سواها
- توازي الحزم الضوئية Collimation هذا يعني أن التشتت أو التفريق في الحزمة يكون معدوماً، كما أنها بطبيعتها مركزة دون حاجة لاستخدام عدسات، وقطرها قد يصل إلى أقل من قطر الدبوس، ويمكنها أن تنتقل إلى مسافات طويلة بفقد قليل في الطاقة خصوصاً إذا انعدم وجود مواد ممتصة في مسارها .

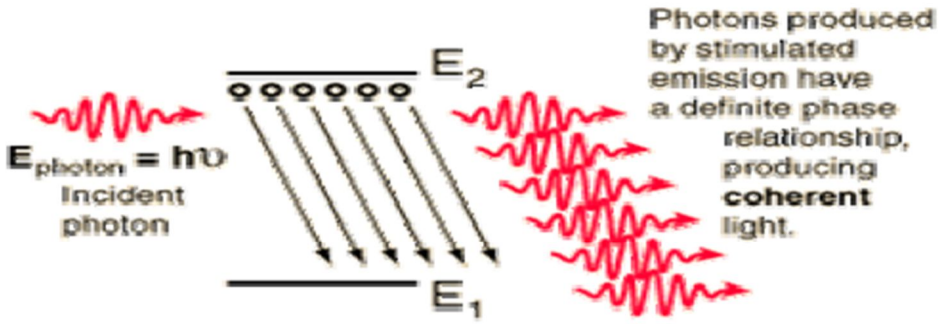
.توازي الحزم الضوئية COLLIMATION او الاتجاهيةDIRECTIONALITY

الضوء العادي نرى نجد انه منفرج ويزاد الانفراج لذلك الضوء بالابتعاد عن مصدر ذلك الضوء. حيث ان جميع المصادر التقليديه عبارة ضوء ينبعث في جميع الاتجاهات (مثل الضوء المنبعثة من ضوء اللمبة). "الاتجاهية" هي سمة من سمات ضوء الليزر التي تسبب له الانتقال في اتجاه واحد ضمن نطاق ضيق مخروط الاختلاف. جميع أنواع الضوء تنتشر بحزم في نهاية المطاف) تتباعد) حيث انها تتحرك عبر الفضاء. ولكن ضوء الليزر هو أكثر بكثير مما كان اتجاهي ضوء تقليدية من اي مصدر ، وبالتالي أقل المتباينه. أي يكاد التشتت أو التفريق في الحزمة يكون معدوم

- الترابط Coherence الترابط بين موجات الحزمة الواحدة عالي جدا ومتزامن وهذا يساعد الموجات الضوئية أو الفوتونات في تقوية بعضها البعض لتعطي طاقة وقدرة عالية للحزمة الواحدة وهذا الترابط اما ان يكون الترابط بناء وفيه فرق الطور (Phase) بين الموجات يساوي صفر و اما ان يكون الترابط هدام وفيه يكون هنالك فرق في الطور بين الموجات كما موضح في شكل (١-٣أ-١-٣ب) والترابط هو ما يميز ضوء الليزر ويبرز هذا لترابط عند حدوث الانبعاث الحثي الذي يعد عامل

اساسيا في التكبير لضوء بحيث ان الفوتونات المنبعثه لها فرق طور محدد ومتوافق مع بعضها كما هو موضح في شكل ١-٤ . هذا الترابط يوصف علي انه ترابط زمني وترابط فضائي وكلاهما مهم في انتاج التداخل والذي يسخدم في رسم الضوء العاي الغير مترابط وذلك بسبب انه قادم من ذراه مستقله والتي تبعث فوتونات برمن وقدره 10^{8}sec .





شكل ١-٤ ترابط الفوتونات المكونة لشعاع الليزر

- الشدة الضوئية Light Intensity شدة الشعاع عالية ومركزة في حزمة ذات قطر ضيق لا يتجاوز الواحد مليمتر، وعند استخدام البصريات الملائمة يمكن تعريضها وفق الحاجة، بالإضافة إلى أننا نستطيع تركيزها في بقعة صغيرة تملك قدرة كثافية Power density، هائلة (وهي القدرة في وحدة المساحة).

١-٢-١:- مميزات شعاع الليزر:

- الحزمة الضوئية لشعاع الليزر لا تملك كتلة. نظراً لأن كتلة الفوتونات المكونة لهذا الشعاع الليزري تساوي صفراً.
- يمكن أن تكون الحزمة الضوئية مستمرة التدفق ***Continuous wave (C.W)***، أو نبضة ***pulse***، وتتخذ هذه النبضات أشكالاً متعددة ومعدلات إعادة مختلفة، تبدأ من نبضة في الثانية الواحدة أو أجزائها إلى ملايين النبضات في الثانية.
- سهولة السيطرة على حزمة الليزر خصوصاً ذات الترددات الضوئية المرئية للعين المجردة.
- سهولة إدارة وإدامة الليزر إذا ما قورنت بالإشعاعات الذرية والنووية الأخرى.

١-٣-١ عيوب استخدام الليزر:

* حزمة خطرة وخصوصاً عند تعرضها لحاسة البصر.

- تحتاج إلى قدرة عالية للتشغيل، وحيث أن طرق البحث يمكن أن تأخذ أشكالاً متنوعة، وهي في مجملها تحويل الطاقات المختلفة إلى طاقة ضوئية.
- تحتاج إلى دقة متناهية في تطابق المستويات البصرية لبدء الانبعاث الليزري.

١-٣: العناصر الأساسية لليزر:

إن العنصر الليزري يحمل في طياته القدرة على النفاذ في أغوار المواد سواء كانت غازية، أو صلبة، أو سائلة لتسخين ذراتها وجزيئاتها وحث كل منهما أو (تحفيزهما) لإنتاج وبعث شعاع فريد في صفاته الفيزيائية، وحيد في مميزاته التطبيقية، فائق الجودة في خواصه، يتألف من دقائق ضوئية (تسمى بالفوتونات)، ذات ترددات أو أطوال موجبة معتمدة على نوع المادة المستحثة (المثارة)، والطريقة المستخدمة في الحث (الإثارة). هذا الشعاع قد يكون مرئياً للإنسان أو غير مرئي، مستمر التدفق أو متقطع (نبضي).

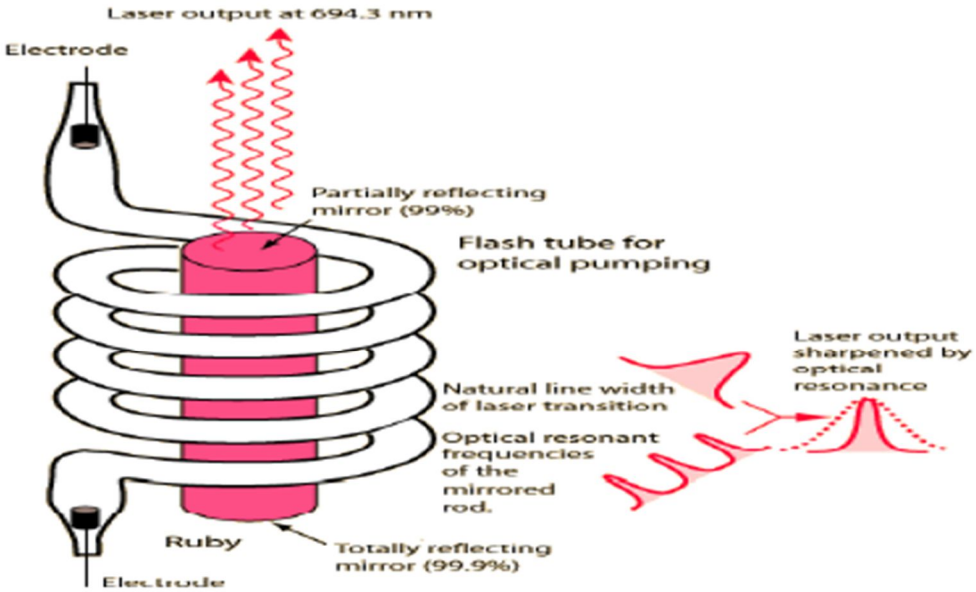
من المعروف في علم المواد، أن المواد المختلفة تتكون من ذرات عنصر أو أكثر من عناصر الجدول الدوري والتي لا يتجاوز عددها (١٠٤) تتحد ذرات هذه العناصر بصورة متنوعة لتؤلف عدداً لا يحصى من الجزئيات التي بدورها تكون المركبات المختلفة، معطية الصفات المعروفة للمواد. ومن الممكن نظرياً بعث شعاع الليزر من كل هذه العناصر أو مركباتها، وعملياً تستوجب هذه العملية إيجاد طرق الحث المناسبة. وقد تم فعلاً التوصل خلال الأعوام القليلة الماضية إلى تكوين شعاع الليزر من عدد كبير من الذرات والجزيئات سواء كانت على شكل مركبات غازية، أو صلبة، أو سائلة. ومن هذه الأجهزة ما يباع تجارياً، ومنها ما هو قيد التجربة والبحث. وتمتاز هذه الأجهزة بأشكالها وأحجامها وطاقاتها المختلفة، إلا أن أساسيات تصميمها واحدة وهي توافر ثلاثة عناصر رئيسية مشتركة : " الوسط المادي، مصدر الطاقة، والمرنن ".

١ ـ الوسط المادي: Material Medium

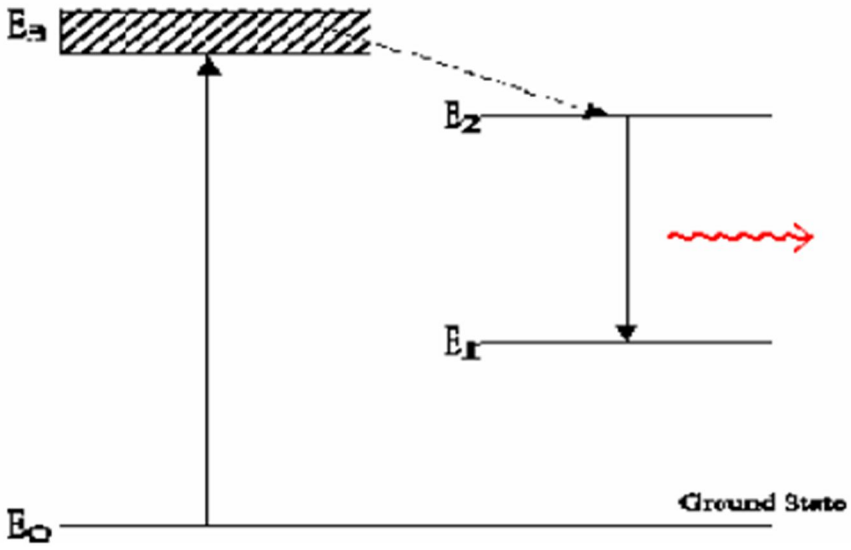
المادة الفعالة الشائعة الاستعمال حالياً لإنتاج أشعة الليزر هي علي النحو التالي:

- *البلورات الصلبة Crystalline solid*، مثل الياقوت الصناعي Ruby وعقيق الألمنيوم والزجاج المسمى بالياج Nd: YAG... فعلي سبيل المثال الوسط الفعال لجهاز الروبي هو عبارة عن بلورة اكسيد الالمنيوم مطعمة بذرات الكروميم التي تتميز بأنها المسولة عن خصائص الوسط الفعال بجهاز الروبي ليزر لإنتاج ألون الأحمر من أشعة الليزر بحيث تقوم ذرات الكروم بامتصاص الضوء ذي ألون الزرق والخضر وتعكس فقط اللون الأحمر . أن الوسط الفعال هنا له شكل اسطواني يوجد في احد نهايتي هذه الاسطوانة مراءاة عاكسة تماما للأشعة والطرف الثاني به مراءاة عاكسة جزئيا للأشعة يحاط بهذه الاسطوانة لبه ضوئية عالية الشدة تعمل علي تمرير الضوء الأبيض بداخل الوسط الفعال ومن المعروف أن طيف الضوء الأبيض الكهرومغناطيسي يتكون من ألوان متعددة بالتالي فان دور ذرات الكروم هو امتصاص اللون الأزرق والأخضر لهذا الضوء مما يؤدي إكساب الكترونات الذرات الكروم طاقه تمكنه من الانتقال من المستوي الطاقة الأرضي إلي مستوي طاقة اعلي وأثناء عودة هذه الالكترونات إلي

مستوي الطاقة الأرضي نبعث ضوء احمر عند انبعاث هذه الضوء الأحمر تقوم المرايا العاكسة لضوء (جزئي وكلي) بعكس هذه الضوء مرة أخري وإرجاعه إلي الوسط الفعال مما ينتج عنه إثارة ذرات الوسط أي انتقال الالكترونات الي المستويات الاعلي وتتكرر عملية إنتاج الضوء الأحمر (الليزر) حتي يصبح لهذا الضوء قدرة عالية وتستنفذ البلورة طاقها عندها يمكننا ضخ ضوء الليزر كما هو موضح في شكل ١ـ٥ وشكل ١ـ٦ يمثل مستويات الطاقة لهذا النوع من الوسط الفعال التالي



شكل ١-٥ مكونات جهاز الروبي ليزر



شكل ١-٦ مستويات الطاقة لذرات الكروم

- ***المواد الغازية Gas***، مثل خليط غاز الهليوم والنيون He- Ne وخليط غاز الهليوم والكادميوم He- Cd وبخار الماء H_2O . فلو أخذنا الوسط الفعال الهليوم نيون وهو يعتبر من أشهر مواد الوسط الفعال لليزرات الغازية وغير مكلف ماديا يعمل هذا النوع من الليزر عند الطول الموجي 632nm في منطقة اللون الأحمر في الطيف الكهرومغناطيسي وكذلك عند الطول الموجي 543.5nm في منطقة اللون الأخضر من الطيف الكهرومغناطيسي وفي المنطقة تحت الحمراء عتد الطول الموجي 1523nm. ان قرب مستوي الطاقة (20.60ev) لذرات الهيليوم من مستوي الطاقة (20.66ev) لذرت النيون الموضح في الشكل ١-٨ قد يتسبب في حدوث تصادمات للذرات في المستويين ويحدث انتقال للطاقة لذرات النيون وبالتالي تنتقل هذه الذرات الي مستويات اعلي مما ينجم عنه انبعاث متستمر للفوتونات باتجاهات عشوئية وباطوار مختلفه ولكن يوجد طول موجي واحد منها مطلوب ومن المهم هنا معرفة تركيب الجهاز وكيفية عمله فجهاز الهليوم نيون ليزر هو عبارة عن الوسط الفعال (خليط من غاز الهليوم وغاز النوين) بداخل انبوب زجاجي تحت ضغط منخفض ومصدر الطاقة عبارة عن تفريغ كهربي في حدود ١٠٠٠وفولت وتتم عملية التفريغ من خلال الكاثود والانود

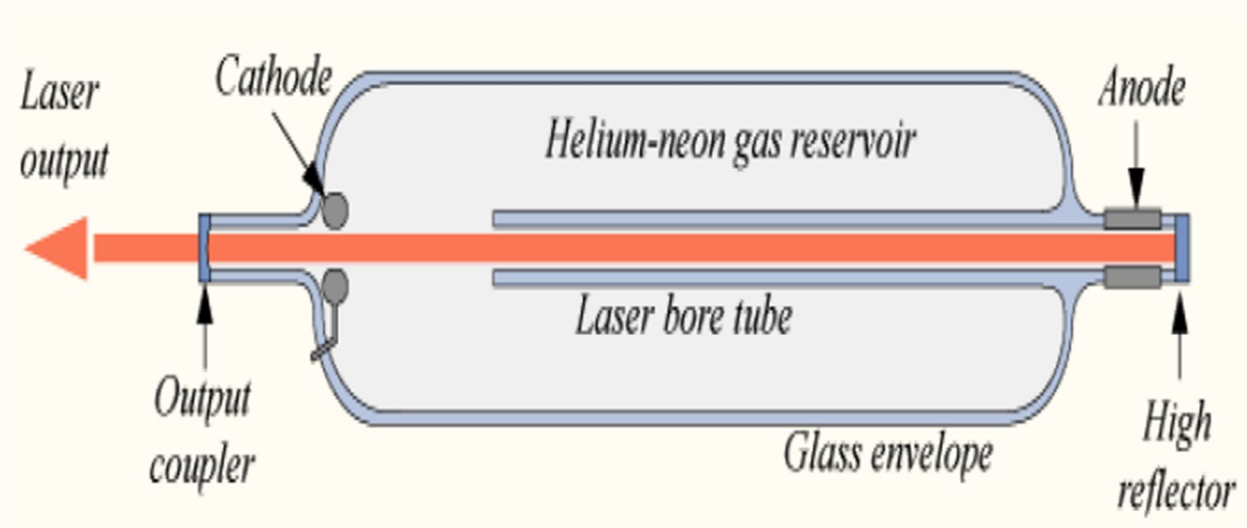
الموجودة عند نهايتي الانبوب تبداء عملية انتاج الليزر اول عند يحدث تصادم بين الكترونات التفريغ وذات الهليوم في الغاز وهذه العملية تتسبب في اثارة ذرات الهيليوم وانتقالها من المستوي الارضي الي المستوي 2^3S_1 و 2^1S_0 وهي المستويات المثاره ويحدث تصادم بين ذرات الهليوم المثارة في المستوي الارضي مع ذرات النيون القريبة منه عند هذا المستوي من الطاقة بحيث يحدث انتقال لطاقة الي ذرات النيون وبالتالي فان الكترونات ذرات النيون سوف تنتقل المستوي $3S_2$ نتيجة لتوافق مستويات طاقة ذرات الهيليوم مع مستويات طاقة ذرات النيون وهذا يعطي بالمعادلة التفاعلية التالية :-

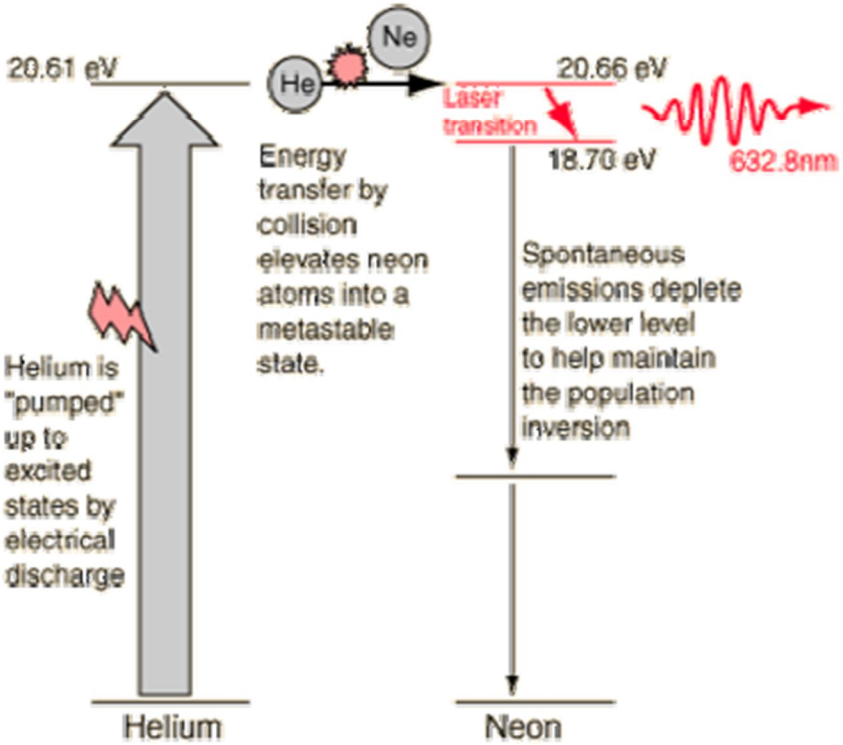
$$He(2^1S)^* + Ne + \Delta E \rightarrow He(1^1S) + Ne3s_2^*$$

بث ان (*) تعني حالة استثاره لمستوي الطاقة

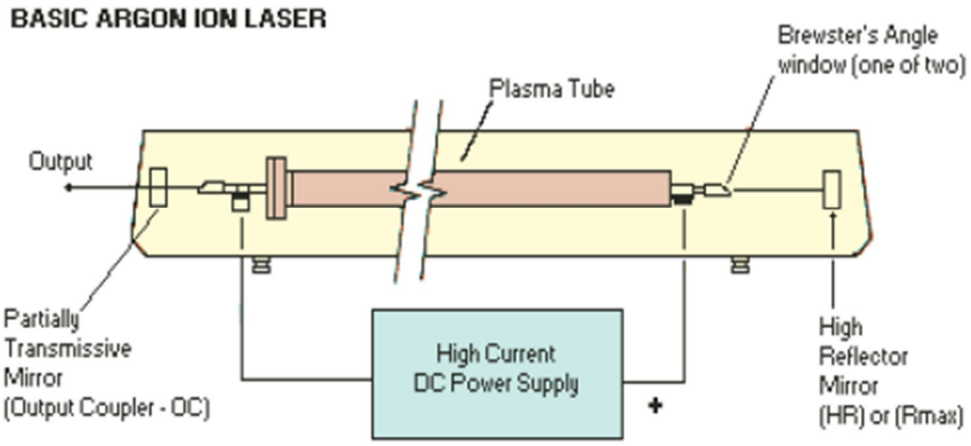
ΔE تعني فرق الطاقة بين اثنين من مستويات الطاقة لذرتين

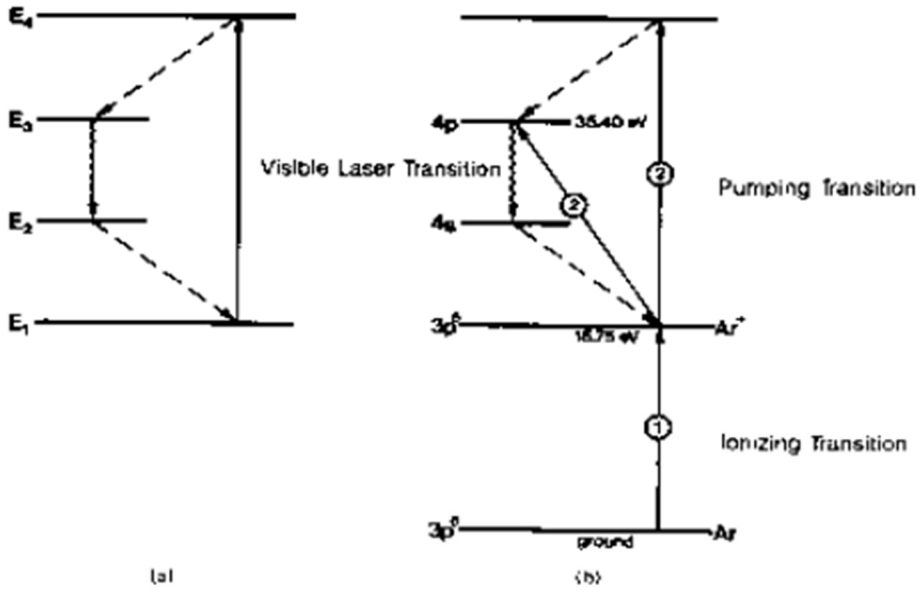
ويحدث انبعاث لشعاع الليزر وتعمل المريا علي عكس هذا الشعاع مرة اخري ويحدث تصادمات وتتكرر عملية الانبعاث لنحصل علي الليزر . يوضح الشكل ١-٧ تركيب جهاز الهيليون نيون ليزر .





- ***الجزيئات المتأنية Ionic gases*** مثل غاز الأرجون Ar وغاز الكربتون Kr . يعتبر غاز لارجون من الغازات النادرة ويستخدم هنا كوسط فعال لانتاج ليزر الارجون ويعمل بصورة موجات مستمره عند الاطوال الموجية ما بين 408.9nm الي 686.1nm ويعمل بقدرة عالية تصل الي ١٠٠ وت مستخدما عدد من الانتقالات (transitions). يتكون جهاز الارجون ليزر من انبوبة البلازما مزودة بقاذفه وهما تحت تفريغ عالي و مركبة مرنن (*Resonator Assembly*) والتي فيها تعمل القاذفه (bore) بدور العدسة لتجميع الضوء المتوافق في الطول الموجي الوحد حتي تتمكن انبوبة البلازما من انتاج الطاقة الليزرية وللحصول علي هذه الطاقة الليزرية توضع مرايا عامودية عند طرفي القاذفه احداهما عاكسة تماما لضوء ولاخري عاكسه جزئيا لضوء بحيث يمكن ضبط زويا المرايا . لكي تقوم انبوبة البلازبعملها يجب ان تدعم بمصدر جهد حتي تتمكن من اجراء عملية التفريغ بداخل القاذفه ومن ثم تحدث استثارة وتائين لذرات الارجون لتنتقل من مستوي الطاقة E_0 الارضي الي مستوي الطاقة E_1 او مباشرة تنتقل الي مستوي الطاقة الفرعي 4_P في مستوي الطاقة E_3 او الي مستوي الطاقة E_4 (التي بدورها تسقط الي 4_P) ايونات الارجون في 4_P تضمحل لتصل الي 4_S في مستوي الطاقة E_2 اما مباشرة او عندما تتم عملية استثارة فوتون الذي له طاقة مناسبه . والطول الموجي للفوتون تعتمد علي الطاقة المحددة للمستوي الموجود فيه وهي ما بين 400 الي 600nm مع انبعاث فوتونات فوق بنفسجية . يمثل الشكل ١-٩ نموذج لتركيب جهاز الارجون والشكل ١-١٠ يمثل مشتويات الطاقة للوسط الفعال

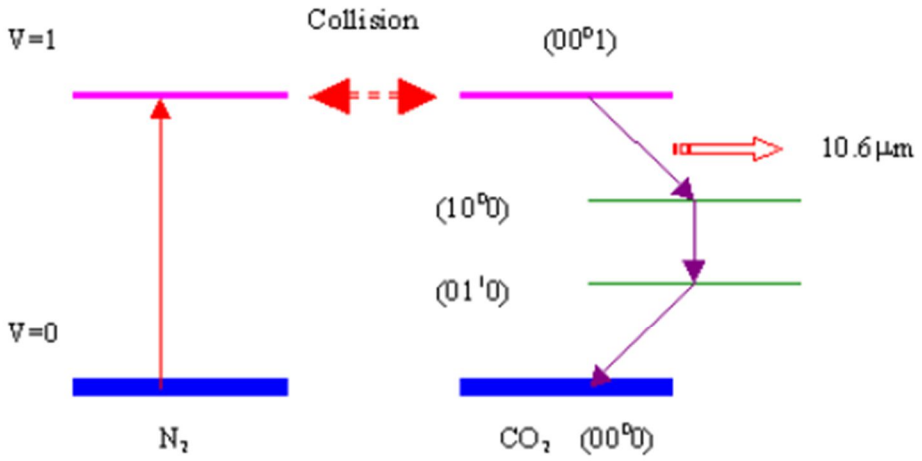




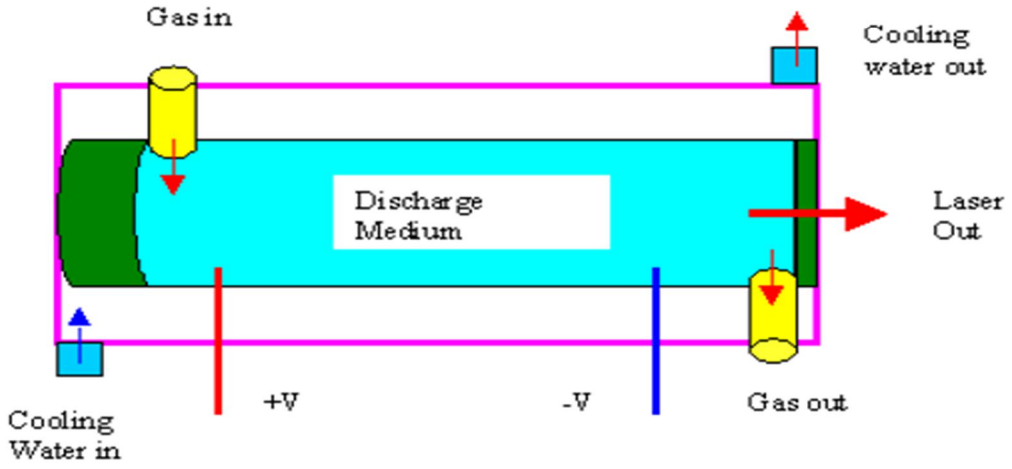
شكل ١-١٠ مستويات الطاقة للوسط الفعال لمادة الارجون

- ***الجزيئات الغازية Molecular gases***، مثل غاز أول أوكسيد الكربون CO وغاز ثاني أوكسيد الكربون CO... هذا النوع من الوسط الفعال لديه القدرة علي انتاج ليزر متصل بقوة ١٠ كيلو وات وكذالك وطريقة عمله مشابه الطريقة عمل الهيليوم-نيون ليزر فهو يستخدم عملية التفريغ الكهربي في ضخ الالكترونات باستخدام نسبة من غاز النتروجين كغاز . ان ليزر اكسيد الكربون له دور فعال ويمكن النتاج الليزر حتي وان كانت كفائيه في حدود ٣٠% فهو يسخدم في اللحام وعمليات القص. يحدث الانبعاث لهذا النوع من الليزر عند الطول الموجي 10.6 μ m وقدرة شعاعه تتراوح ما بين ١٠ وات الي ٢٥ كيلو وات او الي ١٠٠ كيلو وات والوسط الفعال عبارة عن خليط من غاز ثاني اكسيد الكربون والهيليوم و النتروجين بنسب وقدرها $CO_2:N_2:He::0.8:1:7$ وعملية ضخ الالكترونات تتم اما عن طريق التفريغ الكهربي بتيار متردد او تيار مستمر وتتم العملية عندما تمتص طاقة التفريغ الكهربي في غاز النيتروجين فقط جزء من هذه الطاقة يمتص بواسطة جزيئات غاز ثاني اكسيد الكربون مباشرة ثم ترتفع نت مستوي الطاقة الارضي (000) الي مستوي الطاقة الاعلي (001) كما ان عدد كبير من جزيئات ثاني اكسيد الكربون تتصادم مع جزيئات النتروجين وبالتالي تحدث اثاره لجزيئات ثاني اكسيد الكربون ومن ثم فان جزيئات ثاني اكسيد الكربون في المستوي E_1 تبداء في فقد طاقتها وتسقط لمستويات الطاقة(100) او (020) الموضحة في شكل ١-١١ محدثة انبعاث لضوء الليزر عند التردد 10.6μ m او 9.6 μ علي التوالي اما باقي الاضمحلالات من المستويات (100) الي (010) ، (020) الي (010) او من (010) الي المستوي الارضي (000) جميعها تفقد طاقتها علي شكل حرارة بدل من الضوء .

كما يوضح الشكل ١-١٢نموذج لجهاز ثاني اكسيد الكربون.



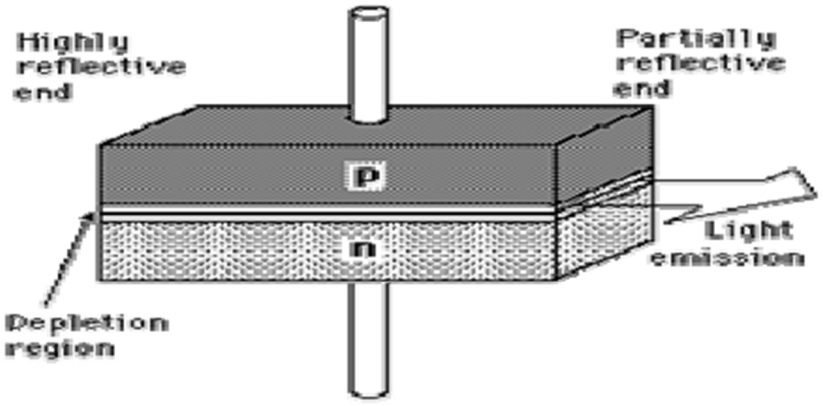
شكل ١-١١ مستويات الطاقة لثاني اكسيد الكربون



شكل ١-١٢ مكونات جهاز الليزر لثاني اكسيد الكربون

- ***الصبغات السائلة Liquid dye***، وهي صبغات كيميائية عضوية مختلفة مذابة في الماء. يعمل هذا النوع من الليزرات عند الترددات المستمره مع جزيئات محدده ذات الصبغة الكيمائية حيث ان جزيئات هذه الصبغات لها عدد كبير من خطوط الطيف وكل خط طيف له خصائصه و تردد هذه الخطوط المتداخلة يمكن ضبطها لإنتاج اليزر الفعال . ان رودمين (rhodamine 6G) يعتبر من اشهر انوع الصبغات المستخدمه وفي الحقيقة ان الوسط الفعال له عبارة عن صبغه في وسط مائي .

- ***المواد الصلبة نصف الموصلة Semi - conductors***، مثل أرسنيك الجاليوم -Ga... As. الوسط الفعال لهذا النوع من الليزرات يعطي ضوء احادي اللون ومترابط من خلال وصلة p-n المتكونه من طبقات الجاليوم وفي نهايتي هذا المركب وضعت مرايا متوازيه احداهما عاكسه تماما للضوء وفي الطرف الاخر مريا عاكسه جزئيا للضوء ويرتبط طول الوصله بطول الموجي للضوء الخارج وهذا النوع من الوصلات هو من نوع الاتحياز الامامي كما هو موضح في الشكل ١-١٣ التالي



شكل ١-١٣ تمثل الوصله المنتجه لاشعة الليزر

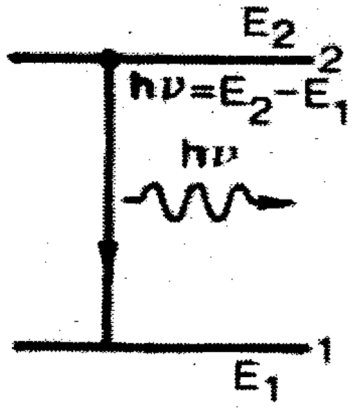
Lecture Eight

الانبعاث الذاتي (التلقائي)

لنفرض ان مستويي لذرة او جزيئة لوسط ما هما : (1)، (2) لنفرض بان $E_1 < E_2$ (لاحظ الشكل ادناه). للسهولة نفرض ان المستوى (1) هو المستوى الارضي لذرة المادة وان الذرة في البداية هي في المستوى (2). فما دام $E_1 < E_2$ فالذرة طبيعيا تحاول الاضمحلال الى المستوى (1) وبهذا تحرر طاقة بمقدار E_2-E_1 على شكل موجات كهرومغناطيسية، هذه الظاهرة تدعى بالانبعاث الذاتي (التلقائي) او المشع، اما تردد الموجة المنبعثة فيعبر عنها بدلالة قانون بلانك، اي ان:

$$\nu = \frac{(E_2 - E_1)}{h} \quad \text{.....(1)}$$

حيث ان h هو ثابت بلانك.



ان الانبعاث الذاتي يكون مميزا بانبعاث فوتون بطاقة E_2-E_1 مساوية الى $h\nu$ عندما تضمحل الذرة من مستوى الطاقة (2) الى مستوى الطاقة (1). ويوصف هذا الانبعاث عادة على النحو التالي: لنفرض ان وحدة الحجم من المادة تحوي عددا من الذرات يساوي N_2 في المستوى (2) في الزمن (t) مثلا. بهذا يكون

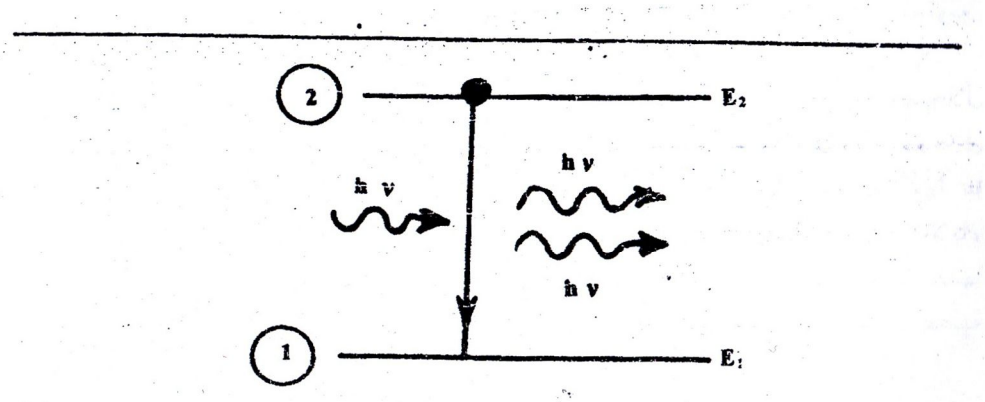
معدل الاضمحلال لذرات المادة نتيجة الانبعاث الذاتي والمعبر عنه بالمقدار $(dN_2/dt)_{sp}$ متناسبا مع العدد N_2، اي ان:

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{sp} = -AN_2 \quad \text{.....(2)}$$

حيث ان المعامل A يدعى باحتمالية الانبعاث الذاتي او المعامل A لأينشتاين. ان الانبعاث الذاتي هو احد الطريقتين المحتملتين لاضمحلال الذرة: فالاضمحلال قد يحدث دون ان يصحبه انبعاث لموجات كهرومغناطيسية ويدعى هذا الاضمحلال (بالاضمحلال غير المشع) وتخسر الذرة فرق الطاقة عن طريق اصطدامها بما حولها من الذرات او الجزيئات المماثلة او المخالفة او عن طريق اصطدامها بجدار الاناء الذي يحويها.

الانبعاث المحفز

لنفرض ان الذرة موجودة ايضا في المستوي (2) ولكن هذه المرة بحضور اشعاع كهرومغناطيسي متواجد في الوسط وتردد (v) بحيث ان (hv) يساوي تماما الفرق بين طاقتي المستويين (1) و(2). عند توفر هذا الشرط، اي عندما يكون تردد الموجات الساقطة مساويا لتردد الانتقال الذري فهناك احتمالية محددة لهذا الاشعاع ان يحفز الذرة التي هي في المستوي (2) ويجبرها على الانتقال منه الى المستوي الاوطا (1). في هذه الحالة يتحرر فرق الطاقة $(E_2 - E_1)$ للذرة المنتقلة على شكل موجات كهرومغناطيسية تضاف الى الموجة الساقطة وتتحد صفاتها معا بشكل خاص. ففي هذه الحالة وبسبب كون عملية الانبعاث المحفز عملية اضطرارية ومن قبل الموجة الساقطة فالموجة المنبعثة من اية ذرة محفزة في المستوي (2) تكون متحدة في الطور مع الموجة الساقطة كما ان الاخيرة تحدد اتجاه انتقال الموجة المنبعثة. ان هذا يمثل فرقا جوهريا بين الانبعاث المحفز والانبعاث الذاتي فالأخير يحدث بصورة تلقائية محضة وبمجرد وجود الذرة في حالة محرضة فالذرة المضمحلة تبعث اشعاعا كهرومغناطيسيا لا يكون له علاقة طور محددة بتلك الذي تبعثه ذرة اخرى متواجدة في المستوي ذاته كما ان هذا الاشعاع قد ينتقل باي اتجاه في الفضاء.



شكل (١ ـ ٩) : تخطيط توضيحي لعملية الانبعاث المحفز.

توصف عملية الانبعاث المحفز بالمعادلة الاتية:

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{st} = -W_{21}N_2$$

حيث ان (W_{21}) يدعى باحتمالية الانتقال المحفز وكما هو الحال للمعامل (A) يكون للمعامل (W) وحدة مقلوب الزمن (s^{-1}) ولكن المقدار (W) لا يماثل المقدار (A) من ناحية كون الاول لا يعتمد فقط على الانتقال المحدد بين المستويين المعنيين (1) و (2) وانما يعتمد على شدة الاشعاع الكهرومغناطيسي الساقط، فلموجة كهرومغناطيسية مستوية يكون:

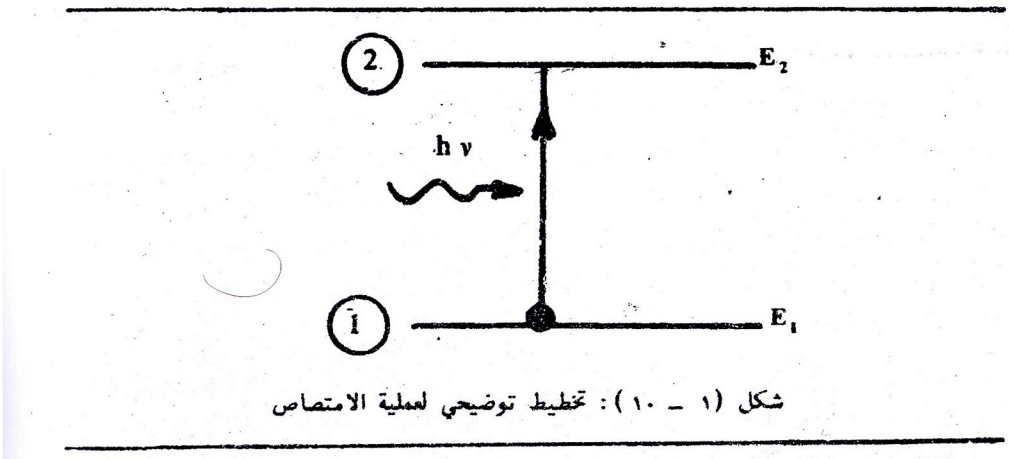
$$W_{12} = \sigma_{21}F$$

حيث يمثل المقدار (F) التدفق الفوتوني للموجة الساقطة، اما ثابت التناسب (σ_{21}) فهو كمية لها ابعاد المساحة وتدعى بمقطع الانبعاث المحفز.

الامتصاص

لنفرض الان بان الذرة متواجدة في المستوي الاوطا للطاقة، المستوي (1) فاذا كان هذا المستوي الارضي فان الذرة ستبقى هناك ما لم تتعرض الى محرض خارجي وكمثال على هذا تعرض الوسط الى اشعاع كهرومغناطيسي ذي تردد (ν) بحيث ان ($h\nu$) يساوي فرق الطاقة بين المستويين قيد الدرس. في هذه

الحالة تكون للذرة احتمالية محدودة للارتقاء الى المستوي الاعلى (2) اذ تغذي الموجة الكهرومغناطيسية الساقطة الذرة بمقدار فرق الطاقة ($E_2 - E_1$) الذي تحتاجه لإتمام عملية الانتقال هذه والتي تدعى بعملية الامتصاص.



شكل (١ ـ ١٠): تخطيط توضيحي لعملية الامتصاص

يمكننا بطريقة مماثلة ان نعبر عن معدل الامتصاص بالمعادلة:

$$\left(\frac{dN_1}{dt}\right)_{ab} = -W_{12}N_1$$

حيث ان (N_1) تمثل تأهيل المستوي (1)، اي عدد الذرات المتواجدة في المستوي (1) لوحدة الحجم من الوسط الذري في زمن معين. كما يمثل المقدار (W_{12}) احتمالية الامتصاص وبنفس الطريقة يمكن التعبير عن المقدار (W_{12}) بالعلاقة:

$$W_{12} = \sigma_{12}F$$

حيث يكون للمقدار (σ_{12}) بعد المساحة ويدعى بمقطع الامتصاص ويعتمد فقط على الانتقال المعين.

اخيرا لابد لنا ان نذكر بان مقطعي الامتصاص والانبعاث المحفز متساويان ($\sigma_{12} = \sigma_{21} = \sigma$) وهذا يعني ايضا تساوي احتمالية عملية الانبعاث المحفز لاحتمالية عملية الامتصاص اي ان ($W_{12} = W_{21} = W$) عند تواجد الذرة في اشعاع كهرومغناطيسي مناسب وهي نتيجة توصل اليها اينشتاين في مطلع القرن السابق. كما يمكن القول بان عملية الانبعاث المحفز هي عملية امتصاص سالبة او باتجاه معاكس.

مقطع الانتقال، معامل الامتصاص ومعامل الكسب

يمكن تعريف مقطع الانتقال (σ) بالشكل الاتي:

$$\sigma = \frac{W}{F} \quad .....(1)$$

حيث ان ($F = I / \hbar\omega$) والذي يمثل التدفق الفوتوني وعند تعويض قيمته في معادلة (1) نحصل على:

$$\sigma = \frac{W}{I}\hbar\omega \quad .....(2)$$

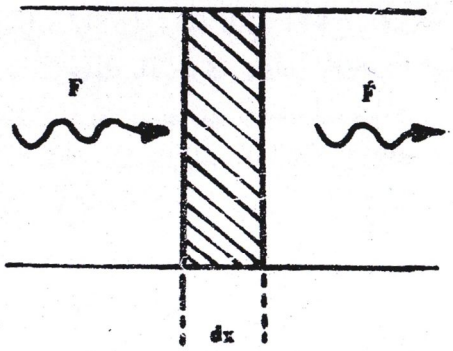
ويمكن ايضا وصف الفصل المتبادل للإشعاع الكهرومغناطيسي مع المادة بكمية اخرى معروفة الا وهي معامل الامتصاص (α) والذي يرتبط مع مقطع الانتقال (σ) بالعلاقة الاتية:

$$\alpha = \sigma(N_1 - N_2) \quad .....(3)$$

فاذا كان تأهيل المستوى الأوطأ (N_1) اكبر من تأهيل المستوي الاعلى منه (N_2) لذا فان المقدار (α) مقدار موجب، وبهذا الشكل فان هذا المعامل يعتمد على تأهيل المستويين لذرات المادة، اضافة الى هذا فان اهمية استخدام معامل الامتصاص (α) تقع في امكانية قياسه وبصورة مباشرة في اكثر الحالات وذلك كما يلي:

لاحظ الشكل ادناه، فاذا سقط سيل فوتوني (F) على وسط متجانس باتجاه (x) مثلا فان التغير في هذا التدفق (dF) نتيجة عبوره مسافة (dx) في الوسط يمكن التعبير عنه بالمعادلة:

$$dF = -\alpha F dx \quad \text{.....(4)}$$



شكل (١ ـ ١٢) : التغير المتناهي في الصغر dF في التدفق الفوتوني لموجة كهرومغناطيسية مستوية نتيجة عبورها مسافة dx في الوسط .

فاذا قطع هذا السيل مسافة (L) داخل المادة فان النسبة بين التدفق (F) والتدفق الساقط (F_o) تكون:

$$F = F_o e^{-\alpha L} \quad \text{.....(5)}$$

وبدلالة شدة الاشعاع (I) يكون:

$$I = I_o e^{-\alpha L} \quad \text{.....(6)}$$

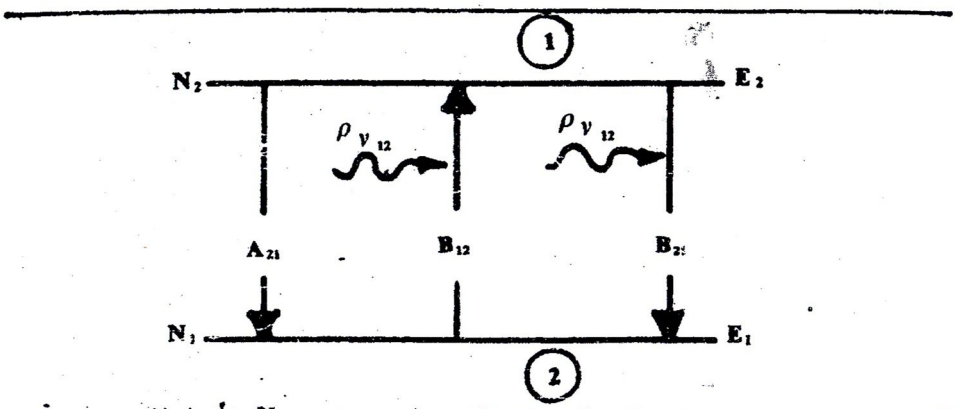
ومن الاستنتاجات الاخرى حول الموضوع هي الحالة التي يكون فيها ($N_1 \; N_2 <$) وهي حالة الليزر فان معامل الامتصاص المعرف في المعادلة (6) يغدو سالبا وفي هذه الحالة تتضخم الموجة الساقطة بدلا من ان تضعف نتيجة الامتصاص من قبل الوسط، عندها نتكلم عن كمية جديدة (G) تعرف بالشكل الاتي:

$$G = -\alpha = \sigma(N_2 - N_1) \quad \text{.....(7)}$$

هذه الكمية تدعى بمعامل الكسب.

حسابات اينشتاين لمعاملات الاحتمالية

لو نظرنا الى الشكل ادناه وفرضنا بان (N_2, N_1) ذرة خلال المتر المكعب هما على التوالي تاهيل هذين المستويين في حالة التوازن وان (ρ_v) تمثل الكثافة الطيفية، لذلك فهناك احتمالية لحدوث العمليات الثلاث الاتية الا وهي: الانبعاث التلقائي، الانبعاث المحفز والامتصاص.



شكل (١ ـ ١٢) : توضيح المعاملات الاحتمالية لاينشتاين ، N_1 و N_2 تأهيل المستويين E_1 و E_2 على التوالي اما التردد ν_{12} فيعطى بالعلاقة : $h\nu_{12}=(E_2-E_1)$

1- الانبعاث التلقائي (الذاتي): يحصل من المستوى (2) الى المستوى (1) باحتمالية مقدارها (A_{21}) ذرة لكل ثانية وان عدد مثل هذه الانتقالات في الثانية الواحدة وفي المتر المكعب ويساوي ($A_{21}N_2$).

$$r_{sp} = A_{21}N_2 \quad .....(1)$$

2- الامتصاص: فيحصل عند وجود المادة في وسط اشعاع كهرومغناطيسي وبكثافة (ρ_{v12}) فان ذرة المادة التي في المستوى (1) قد تمتص هذا الاشعاع وتقفز الى المستوى (2) باحتمالية ($W_{12} = B_{12}\rho_{v12}$) ذرة لكل ثانية، حيث ان المقدار (B_{12}) ثابت ويدعى بمعامل B-اينشتاين. اما عدد مثل هذه الانتقالات من المستوى الاسفل باتجاه نحو الاعلى في الثانية الواحدة وللمتر المكعب من المادة يساوي ($W_{12}N_1$) او يساوي ($B_{12}N_1\rho_{v12}$).

$$r_{ab} = B_{12}N_1\rho_{v12} \quad .....(2)$$

3- الانبعاث المحفز: والذي يحصل بحضور المادة تحت تأثير الاشعاع الكهرومغناطيسي ايضا ذو الكثافة الطيفية (ρ_{v12}). فالذرة التي هي في المستوى الاعلى تتحفز بسبب هذا الاشعاع وتنتقل الى المستوى الأوطأ وباحتمالية تساوي ($W_{21} = B_{21}\rho_{v12}$) ذرة لكل ثانية، حيث ان المقدار (B_{12}) ثابت ويدعى بمعامل B-اينشتاين. اما عدد مثل هذه الانتقالات من المستوى الاعلى باتجاه نحو الاسفل في الثانية الواحدة وللمتر المكعب من المادة يساوي ($W_{21}N_2$) او يساوي ($B_{21}N_2\rho_{v12}$).

$$r_{st} = B_{21}N_2\rho_{v12} \quad .....(3)$$

ولما كانت المادة في حالة توازن ثرموداينميكي، فان عدد الانتقالات باتجاه نحو الاسفل يجب ان تعادل عدد الانتقالات باتجاه نحو الاعلى، اي ان ($r_{ab} = r_{sp} + r_{st}$):

$$B_{12}N_1\rho_{v12} = A_{21}N_2 + B_{21}N_2\rho_{v12} \quad .....(4)$$

$$B_{12}N_1\rho_{v12} - B_{21}N_2\rho_{v12} = A_{21}N_2$$

وبترتيب الحدود يمكن ان نحصل على المعادلة الاتية:

$$\rho_{v12} = \frac{A_{21}N_2}{B_{12}N_1 - B_{21}N_2} \quad .....(5)$$

وبقسمة البسط والمقام في معادلة (5) على (N_2)، نحصل على:

$$\rho_{v12} = \frac{A_{21}}{B_{12}\left(\frac{N_1}{N_2}\right) - B_{21}} \quad .....(6)$$

وباستخدام احصاء بولتزمان لحالة التوازن الثرموداينميكي ولتوزيع ذرات المادة على مستويات الطاقة لها، اي ان:

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\frac{h\nu}{KT}} \quad .....(7)$$

وبتعويض معادلة (7) في معادلة (6) نحصل على:

$$\rho_v = \frac{A_{21}}{B_{12}e^{\frac{hv}{KT}} - B_{21}} \quad .....(8)$$

وبمقارنة هذه المعادلة بمعادلة بلانك لإشعاع الجسم الاسود والتي هي:

$$\rho_v = \frac{8\pi hv^3}{c^3\left(e^{hv/KT} - 1\right)} \quad .....(9)$$

ينتج ان: $B_{12} = B_{21} = B$ وعليه وبمساواة معادلة (8) مع معادلة (9) نحصل على:

$$\frac{A}{B\left(e^{hv/KT} - 1\right)} = \frac{8\pi hv^3}{c^3\left(e^{hv/KT} - 1\right)}$$

$$\therefore \frac{A}{B} = \frac{8\pi hv^3}{c^3} \quad .....(10)$$

تشير المعادلة (10) الى ان احتمالية حدوث عملية امتصاص المادة لإشعاع الجسم الاسود مكافئة تماما لاحتمالية حدوث عملية الانبعاث المحفز وبسببه ايضا.

ملاحظة: من معادلة اينشتاين اي معادلة (8) فان:

$$\rho_v = \frac{A}{B\left(e^{hv/KT} - 1\right)}$$

$$\rho_v = \frac{A}{BR} \Rightarrow R_o = \frac{A}{\rho_v B}$$

نجد ان: $(R_o = e^{hv/KT} - 1)$، حيث ان (R_o) تسمى بالنسبة بين معدل الانبعاث الذاتي ومعدل الانبعاث المحفز لزوج من مستويات الطاقة.

مثال: احسب النسبة بين معدل الانبعاث الذاتي الى معدل الانبعاث المحفز لمصباح تنكستن بدرجة حرارة ($2000K^o$)، وكان معدل تردد الانبعاث مساويا ($5\times10^{14}\,Hz$)، ثم جد النسبة بين تأهيل مستويي الطاقة المناظرين لهذا الانتقال؟

Solution:

$$R_o = e^{hv/KT} - 1$$

$$R_o = e^{\frac{6.6\times10^{-34}\times5\times10^{14}}{1.38\times10^{-23}\times2000}} - 1 \approx e^{12} - 1 = 1.5\times10^{5}$$

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\frac{hv}{KT}} \approx e^{-12} = 6.14\times10^{-6}$$

مثال: احسب النسبة بين معدل الانبعاث الذاتي الى معدل الانبعاث المحفز لطول موجة الضوء الاصفر اي لطول موجة ($590nm$) بدرجة حرارة الغرفة ($300K^o$)، ثم جد:

1- النسبة بين تأهيل مستويي الطاقة المناظرين لهذا الانتقال؟

2- بأية درجة حرارة يكون معدل الانبعاث المحفز مساويا الى معدل الانبعاث الذاتي؟

3- ما طول الموجة التي يكون لها ($R_o = 1$) بدرجة حرارة الغرفة؟

مثال: في التوزيع الطيفي للجسم الاسود فان (λ_m) هي قمة طول الموجة التي تعطي النهاية العظمى للدالة التي تمثل هذا الاشعاع في قانون فين، فاذا علمت ان ثابت فين هو ($2.9\times10^{-3}\,m.K^o$) فاحسب مقدار (λ_m) في درجة حرارة ($6000K^o$) وما هو اللون المناظر لطول الموجة هذه؟

مثال: اثبت ان معامل الكسب (G) يعطى بالصيغة:

$$G = (N_2 - N_1)\frac{Bnhvg(\Delta v)}{c}$$

حيث ان (B) يمثل معامل B- اينشتاين، (n) هو معامل انكسار الوسط، (h) هو ثابت بلانك، (v) هو تردد الاشعاع، $g(\Delta v)$ هي دالة شكل الخط الطيفي وان (c) هي سرعة الضوء بالفراغ؟

Solution:

ان مقطع الانتقال يعطى بالمعادلة:

$$\sigma = \frac{W}{F} \quad .....(1)$$

حيث ان (W) تمثل احتمالية الانتقال و(F) هو التدفق الفوتوني والذي يعطى بالمعادلة الاتية:

$$F = \frac{I}{hv} \quad .....(2)$$

وعند تعويض معادلة (2) في معادلة (1) نحصل على:

$$\sigma = \frac{W}{I} hv \quad .....(3)$$

وبما ان احتمالية الانتقال تعطى ($W = B\rho_v = B\rho g(\Delta v)$) وعند تعويضها في معادلة (3) نحصل على:

$$\sigma = \frac{\rho B h v g(\Delta v)}{I} \quad .....(4)$$

ولكن شدة الاشعاع تعطى ($I = \rho c / n$) وعند تعويض قيمتها في معادلة (4) نحصل على:

$$\sigma = \frac{B n h v g(\Delta v)}{c} \quad .....(5)$$

وبما ان معامل الامتصاص ( ) يعطى :

$$\alpha = (N_1 - N_2)\sigma$$

$$\alpha = (N_1 - N_2)\frac{Bnhvg(\Delta v)}{c} \quad \text{.....(6)}$$

وبما ان معامل الكسب هو ($G = -\alpha$) وعليه يكون:

$$G = (N_2 - N_1)\frac{Bnhvg(\Delta v)}{c} \quad \text{.....(7)}$$

مثال: أ) اذا تضاعفت شدة الضوء المارة مرة واحدة خلال وسط ليزري الذي طوله ($0.5m$)، احسب معامل الكسب على اعتبار ان الجهاز لا يتضمن خسارة. ب) اذا كانت الزيادة في شدة الاشعاع بمقدار (5%) فقط لنفس المسار فكم يكون معامل الكسب؟

Solution:

a) $I = I_o e^{GL}$

$2 = e^{0.5G}$

$ln\,2 = 0.5G$

$G = 1.39m^{-1}$

b) $I = I_o + 0.05I_o = 1.05I_o$

$1.05I_o = I_o e^{0.5G}$

$$G = \frac{ln\,1.05}{0.5} = 0.098m^{-1}$$

مثال: اذا تضاعفت شدة الضوء المار خلال وسط ليزري طوله ($1m$)، احسب: 1- معامل الكسب على فرض ان الجهاز لا يتضمن خسارة. 2- اذا كانت الزيادة في شدة الاشعاع بمقدار (6%) فقط ولنفس الطول فكم يكون مقدار معامل الكسب؟