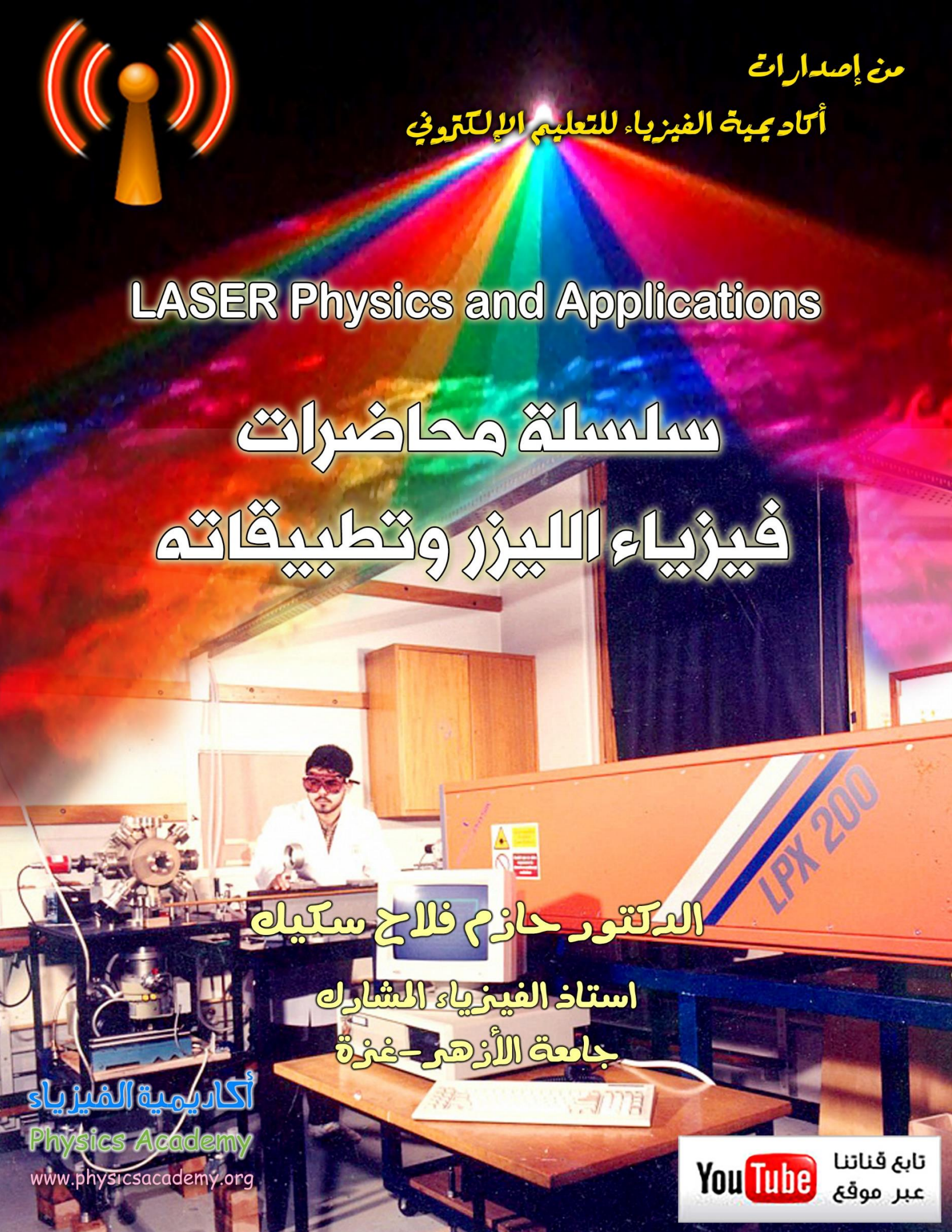
من إصدارات

أكاديمية الفيزياء للتعليم الإلكتروني

LASER Physics and Applications

# سلسلة محاضرات
# فيزياء الليزر وتطبيقاته




الدكتور حازم فلاح سكيك

استاذ الفيزياء المشارك

جامعة الأزهر-غزة

أكاديمية الفيزياء
Physics Academy
www.physicsacademy.org

YouTube تابع قناتنا عبر موقع

جامعة الأزهر – غزة
كلية العلوم – قسم الفيزياء

# سلسلة محاضرات
# فيزياء الليزر وتطبيقاته

# LASER Physics and Applications

إعداد وشرح
الدكتور حازم فلاح سكيك

# المحتويات


**Unit (1): Essentials**

**Unit (2): Laser Physics**

- **Laser Radiation and its properties.**
- **Electromagnetic radiation**
- **Emission and absorption of light**
- **Einstein relation**
- **Natural line broadening, Doppler broadening, pressure broadening**
- **Small signal gain**
- **3 level laser and 4 level laser.**
- **Laser modes**
- **Rate equations**
- **Q-switching**
- **Mode locking**

**Unit (3): Laser System**

- **Active medium.**
- **Excitation mechanism.**
- **Feedback mechanism.**
- **Atom Gas: Helium-Neon Laser (He-Ne). Ion Gas, Argon Ion Laser**
- **Molecular Gas: Carbon Dioxide Laser (CO2). Nitrogen Laser (N2).**
- **Solid State lasers: Ruby Laser. Neodimium YAG and Nd Glass Laser.**
- **Diode Laser: (Semiconductor Laser, Injection Laser).**
- **Liquid Laser: Dye Laser..**

**Unit (4): Laser Application**

- **Industrial applications.**
- **Medical applications.**
- **Military applications.**
- **Computer applications**
- **Scientific research applications.**

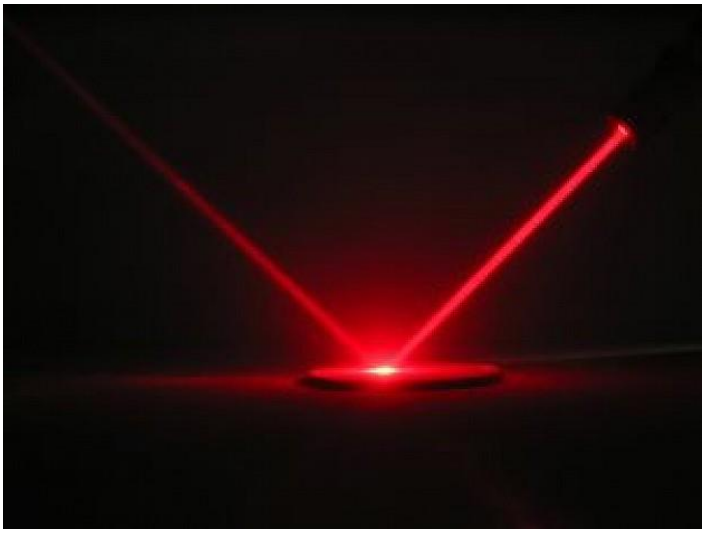
# مقدمة

دخلت أشعة الليزر في العديد من المنتجات التكنولوجية فتجدها عنصرا اساسيا في أجهزة تشغيل الأقراص المدمجة أو في ادوات طبيب الأسنان أو في معدات قطع ولحام الحديد أو في أدوات القياس وغيرها من المجالات .كل تلك الأجهزة تستخدم الليزر ولكن ما هو الليزر وما الذي يجعل الليزر مميز عن غيره من المصادر الضوئية .في هذه المقالة سوف نقوم بشرح كل ما يتعلق بالليزر بشكل مبسط وواضح.

جاءت تسمية كلمة ليزر LASER من الأحرف الأولي لفكرة عمل الليزر والمتمثلة في الجملة التالية Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation :

وتعني تكبير الضوء Light Amplification بواسطة الانبعاث الاستحثاثي Stimulated Emission للإشعاع الكهرومغناطيسي .Radiation وقد تنبأ بوجود الليزر العالم البرت اينشتاين في 1917 حيث وضع الأساس النظري لعملية الانبعاث الاستحثاثي stimulated emission وتم تصميم أول جهاز ليزر في 1960بواسطة العالم ميمان T.H. Maiman باستخدام بلورة الياقوت ويعرف بليزر الياقوت.Ruby laser

## ضوء الليزر يختلف عن الضوء العادي حيث يكون له الخصائص التالية:



الضوء المنبعث أحادي اللون monochromatic أي أن له طول موجي واحد .يحدد الطول الموجي لون الضوء الناتج وكذلك طاقته.

الضوء المنبعث من الليزر يكون متزامن coherentأي ان الفوتونات كلها في نفس الطور مما يجعل شدة الضوء كبيرة فلا تلاشي الفوتونات الضوئية بعضها البعض نتيجة لاختلاف الطور بينها.

الضوء المنبعث له اتجاه واحد directional حيث يكون شعاع الليزر عبارة عن حزمة من الفوتونات في مسار مستقيم بينما الضوء العادي يكون مشتت وينتشر في أنحاء الفراغ.

المسؤول عن هذه الخصائص هي عملية الانبعاث الإستحثاثي stimulated emission بينما في الضوء العادي يكون الإنبعاث تلقائي حيث يخرج كل فوتون بصورة عشوائية لا علاقة له بالفوتون الآخر.

العامل المهم في انتاج الليزر هو المرايا المثبتة على جانبي مادة انتاج الليزر .تساعد المرايا على عكس بعض الفوتونات إلى داخل مادة الليزر عدة مرات لتعمل هذه الفوتونات على استحثاث الكترونات مثارة أخرى لتطلق مزيدا من الفوتونات بنفس الطول الموجي ونفس الطور، وهذه هي عملية التكبير للضوء light amplification. تصمم إحدى هتين المرأتين لتكون عاكسيتها اقل من 100% لتسمح لبعض الفوتونات من الخروج عبرها وهو شعاع الليزر الذي نحصل عليه.

هذه السلسلة المتكاملة من محاضرات فيزياء الليزر وتطبيقاته وهي موجة لكل الدارسين في التخصصات العلمية في مستوى درجة البكالوريوس. تركز هذه المحاضرات على فيزياء الليزر والكثير من المفاهيم الأساسية في الفيزياء ويعتبر هذا المقرر بمثابة مقرر دراسي شامل يعتمد على كل ما درسه الطالب من مقررات في مرحلة البكالوريوس مثل الكهربية والمغناطيسية والفيزياء الحديثة والذرية وفيزياء اشباه الموصلات وفيزياء الحالة الصلبة.

آمل أن أكون قد قدمت لأبنائنا الدارسين من خلال هذا العمل المتواضع ما يعينهم على فهم واستيعاب هذا الفرع من فروع المعرفة. كما أتقدم بالشكر لكل من يقدم نصيحة حول هذه السلسلة من المحاضرات.

والله من وراء القصد


**د./ حازم فلاح سكيك**

**جامعة الأزهر – غزة**

E-mail: skhazem@gmail.com

www.hazemsakeek.net

أكاديمية الفيزياء هي عبارة عن موقع الكتروني على شبكة الانترنت يتوفر عليها المادة المساندة للمحاضرات في صورة شرح فيديو للمحاضرة مع مجموعة من الوسائل التعليمية المساعدة للطالب على فهم المادة الدراسية. تشكل الاكاديمية وسيلة تفاعلية بين المحاضر والطلبة.

# موقع الأكاديمية

## www.physicsacademy.org

# نبذة عن المحاضر

# د. حازم فلاح سكيك

## استاذ الفيزياء المشارك بجامعة الازهر - غزة

- رئيس قسم الفيزياء بجامعة الازهر - غزة في الفترة 1993-1998
- مؤسس وعميد كلية الدراسات المتوسطة بجامعة الازهر - غزة من الفترة 1996-2005
- عميد القبول والتسجيل بجامعة الازهر - غزة في الفترتين 1998-2000 و2007-2008
- مدير الحاسب الالي بجامعة الازهر - غزة في الفترة من 1994-2000
- رئيس وحدة تكنولوجيا المعلومات بجامعة الازهر - غزة في الفترة من 2000-2005
- مؤسس شبكة الفيزياء التعليمي ومنتدى الفيزياء التعليمي.
- مؤسس أكاديمية الفيزياء للتعليم الالكتروني.
- مؤسس مركز الترجمة العلمي.
- مؤسس قناة الفيزياء التعليمي على اليوتيوب.
- رئيس تحرير مجلة الفيزياء العصرية.

**لمزيد من المعلومات يرجى زيارة**

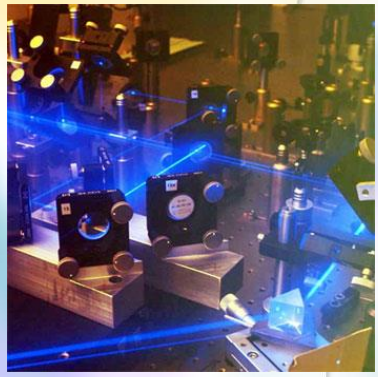
**المؤسسة الإعلامية لشبكة الفيزياء التعليمية**

www.hazemsakeek.net

Physics Academy

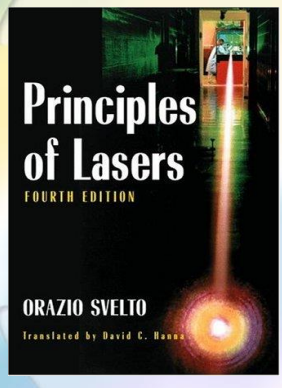
# Laser Physics

## Introduction



**Dr. Hazem Falah Sakeek**
www.hazemsakeek.com
www.physicsacademy.org

## Course Text Book




**An Introduction to Lasers and Their Applications**
Donald C. O'Shea
Addison-Wesley

**Optoelectronics : An Introduction**
J. Wilson, J.F.B. Hawkes
Englewood Cliffs ; London : Prentice-Hall

**Principles of Lasers**
Orazio Svelto
Springer

# Course Syllabus

## Unit (1): Essentials

## Unit (2): Laser Physics

- Laser Radiation and its properties.
- Electromagnetic radiation
- Emission and absorption of light
- Einstein relation
- Natural line broadening, Doppler broadening, pressure broadening
- Small signal gain
- 3 level laser and 4 level laser.
- Laser modes
- Rate equations
- Q-switching
- Mode locking



# Course Syllabus

## Unit (3): Laser System

- Active medium.
- Excitation mechanism.
- Feedback mechanism.
- Atom Gas: Helium-Neon Laser (He-Ne). Ion Gas, Argon Ion Laser (Ar+).
- Molecular Gas: Carbon Dioxide Laser (CO2). Nitrogen Laser (N2).
- Solid State lasers: Ruby Laser. Neodimium YAG and Nd Glass Laser.
- Diode Laser: (Semiconductor Laser, Injection Laser).
- Liquid Laser: Dye Laser..

# Course Syllabus

## Unit (4): Laser Application

Industrial applications.
Medical applications.
Military applications.
Computer applications
Scientific research applications.



# Internet Web Site

الموقع التعليمي للفيزياء
www.hazemsakeek.net

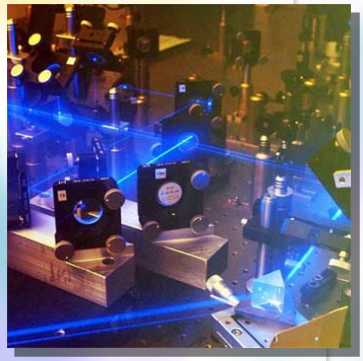
أكاديمية الفيزياء
www.physicsacademy.org

Physics Academy

# Laser Physics

## Introduction to Laser Essentials

## Lecture 1



**Dr. Hazem Falah Sakeek**
www.hazemsakeek.com
www.physicsacademy.org

## Things you need to know

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

- **Wavelength (ʎ)**
- **Frequency (υ)**
- **Period (T)**
- **Velocity of light (c)**
- **Index of refraction (n)**

We will **briefly review** these terms, but it is much better if you are 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

**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:

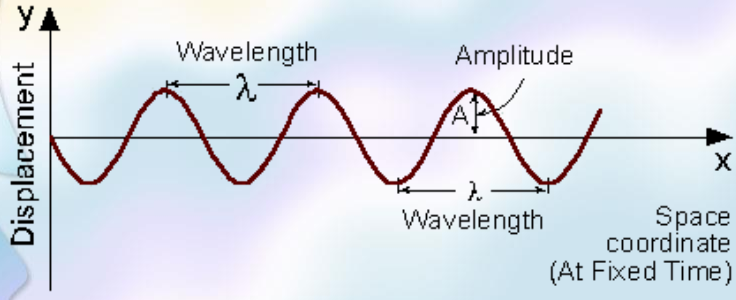
**c = 300,000 [km/sec] = 3*10$^8$ [m/sec]**

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



## Wavelength

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



## Frequency

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

**Frequency (μ)** is defined by the **number of times that the wave oscillates per second.**

Between these two parameters the relation is:

$$c = \lambda * \mu$$

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.



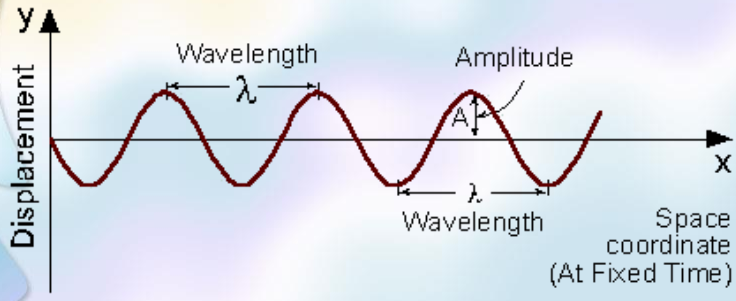
## Wave Description

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.**

## Displacement as a function of space

**Displacement as a function of space, when time is "frozen"** (held constant). 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**

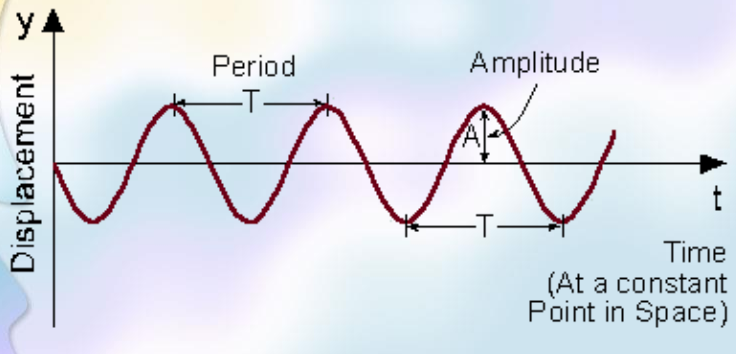



**A** = **Amplitude** = Maximum displacement from equilibrium.



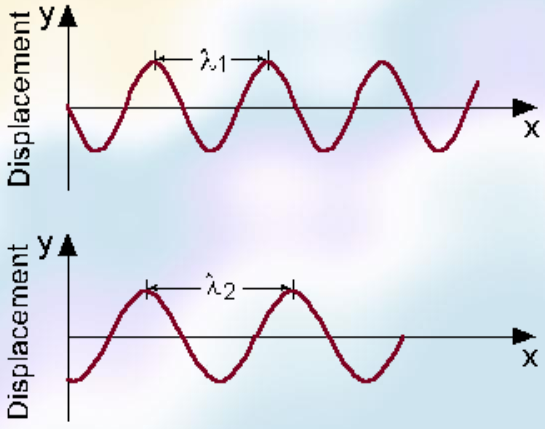
## Displacement as a function of time

**Displacement as a function of time**, in a specific place in space, as described in figure. 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**



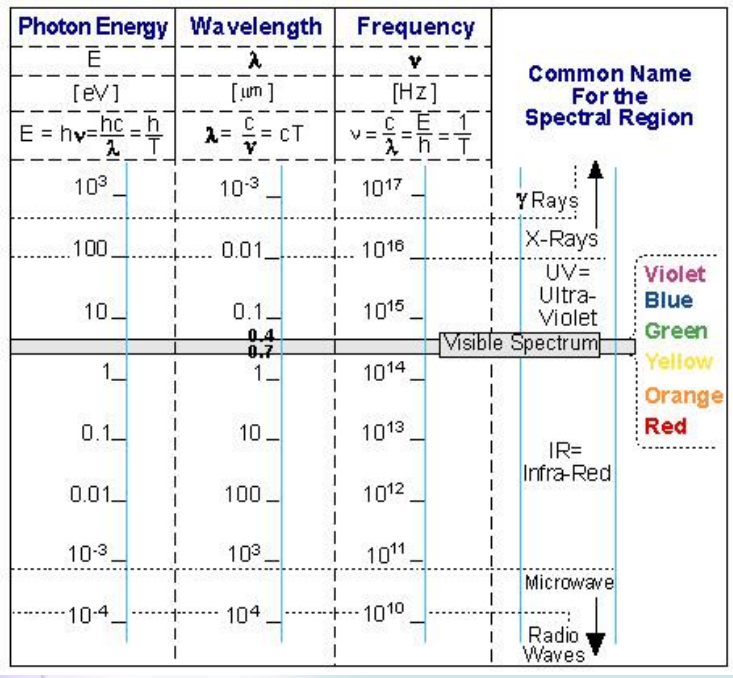
# Wavelengths Comparison

The Figure 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.






# The electromagnetic spectrum



## The most important ideas summarized in figure 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:

- **Radio-waves** which have wavelength of the order of meters, so they need big antennas.
- **Microwaves** which have wavelength of the order of centimeters. As an example: in a **microwave oven**, these wavelengths can not 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.
- **x-Rays** which are used in medicine for taking pictures of the bone structure inside the body.
- **Gamma Rays** which are so energetic, that they cause ionization, and are classified as ionizing radiation.

# 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 = (speed of light in vacuum)/(speed of light in matter)**

$$n = c/v$$

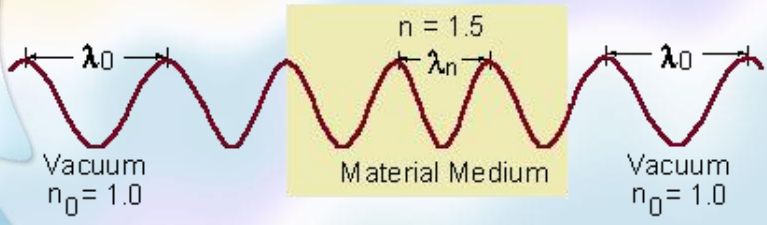
Gases, including air, are usually considered as having index of refraction equal to vacuum $n_0=1$.

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**



## 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

**The velocity of Red light ($\lambda_0$= 0.6 μm) in a certain medium is 1.5*10$^8$ 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:

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

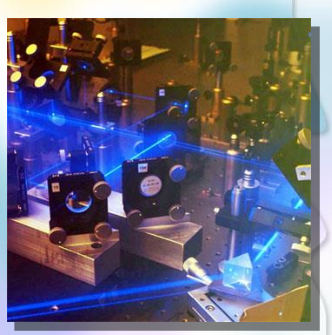
**Conclusion:** **The wavelength of Red light in a material with an index of refraction of 2.0, is 0.3 μm**

Physics Academy

# Laser Physics

## Introduction to Laser Essentials

## Lecture 2



**Dr. Hazem Falah Sakeek**
www.hazemsakeek.com
www.physicsacademy.org



## The Essentials: Atoms

# Bohr model of the atom

**Lasing action** is a process that occurs in matter.

Since matter is composed of atoms, we need to understand 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,

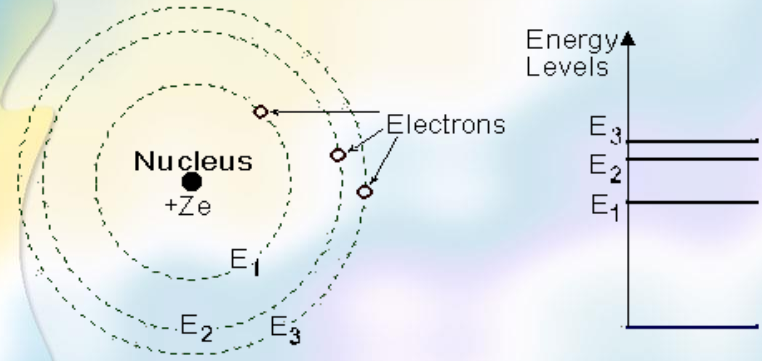
**e** = Elementary charge of the electrons:

**$e = 1.6*10^{-19}$ [Coulomb]**





The figure illustrates a simple, but adequate, picture of the atom, the Bohr model




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: **E1, E2, E3**, 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.

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 can not 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:

**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.

**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.

# 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 (*ν*)**, is determined by the formula (first given by Einstein):

$$E = h\nu$$

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

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

This formula shows that **the frequency of the radiation (*ν*), uniquely determines the energy of each photon in this radiation.**





$$E = h\,\nu$$

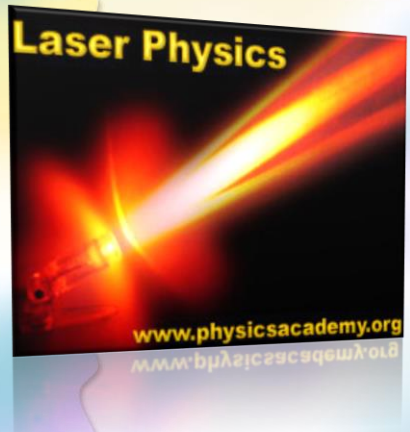
This formula can be expressed in different form, by using the relation between the frequency (*ν*) and the wavelength: $c = \lambda * \nu$ to get:

$$E = h * c/\lambda$$

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.**

# Introduction to LASER








# What is 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 أشعاع 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.

# What is LASER?

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 الاستحثاثي للإشعاع الكهرومغناطيسي.

وقد تنبأ بوجود الليزر العالم البرت اينشتاين في 1917 حيث وضع الأساس النظري لعملية الانبعاث الاستحثاثي stimulated emission وتم تصميم أول جهاز ليزر في 1960 بواسطة العالم T.H. Maiman باستخدام بلورة الياقوت ويعرف بليزر الياقوت.Ruby laser





# What is LASER?

**Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.**

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.

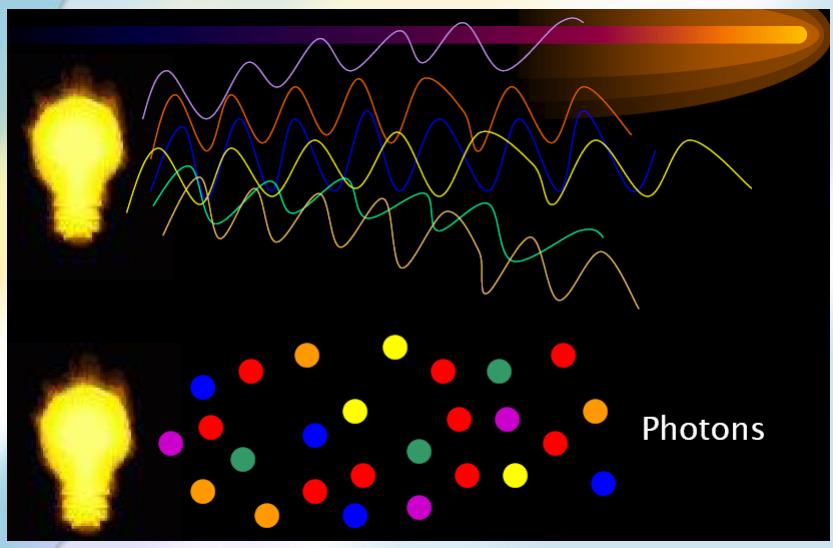
Radiation: The laser light is a form of energy that radiates, or moves out, from the laser source.

# 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 worlds most powerful research and military lasers







# خصائص شعاع الليزر

شــعاع الليــزر يمتلــك خصــائص تميــزه عــن أيــة مصــدر مــن مصــادر الإشــعاع الكهرومغناطيسي وهذه الخصائص هي :

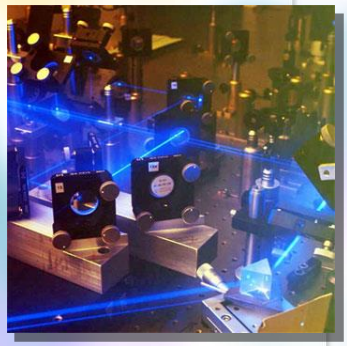
| | |
|---|---|
| 1. Monochromaticity.<br>2. Directionality.<br>3. Coherence. | هذه الخصائص جعلت لشعاع الليزر العديد من التطبيقات في كافة المجالات |

Physics Academy

# Laser Physics

## Introduction to Laser Essentials

## Lecture 3



**Dr. Hazem Falah Sakeek**
www.hazemsakeek.com
www.physicsacademy.org



## LASER Properties

| | |
|---|---|
| LASER | Light<br>Amplification<br>Stimulated<br>Emission<br>Radiation |

# Properties of LASER

شعاع الليزر يمتلك خصائص تميزه عـن أيـة مصـدر مـن مصـادر الإشعاع الكهرومغناطيسـي وهذه الخصائص هي :

| | |
|---|---|
| 1. **Monochromaticity.**<br>2. **Directionality.**<br>3. **Coherence.** | **هذه الخصائص جعلت لشعاع الليزر العديد من التطبيقات في كافة المجالات** |

•These three properties make it more of a hazard than ordinary light.
•Laser light can deposit a great deal of energy within a very small area.



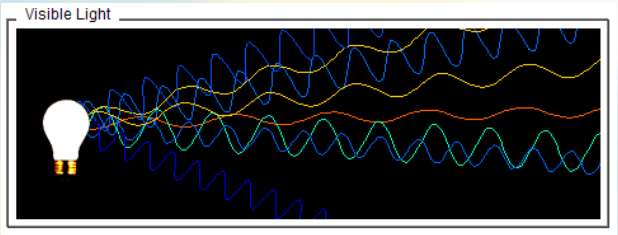


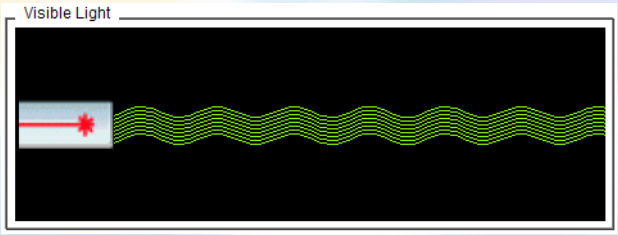
# Properties of LASER: Monochromatic

## Monochromatic

The light emitted from a laser is ***monochromatic***, it is of one wavelength (color).

In contrast, ordinary white light is a combination of many different wavelengths (colors).




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





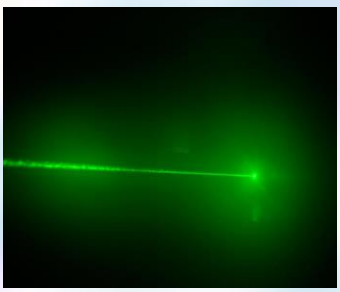
# Properties of LASER: Directional

## Directional

Lasers emit light that is highly ***directional.***

It is emitted as a narrow beam in a specific direction.

Ordinary light (sun, light bulb, a candle), is emitted in many directions away from the source.



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

# Properties of LASER: 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.**

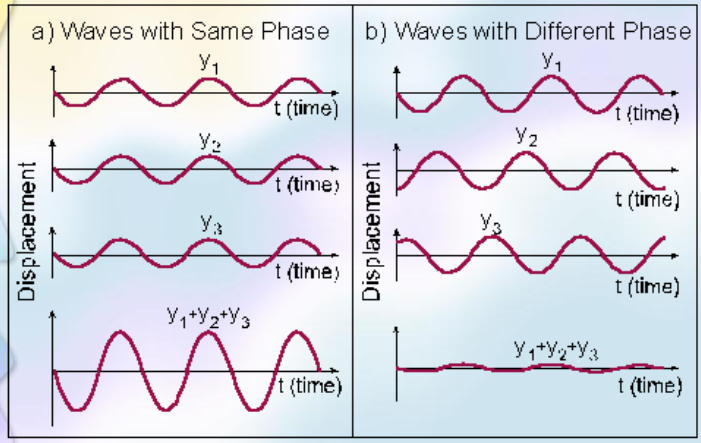
**Coherent waves are waves that maintain the relative phase between them .**





# Properties of LASER: Coherence

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



# تفتيت حصوة بواسطة الليزر

# Laser Radiation Properties

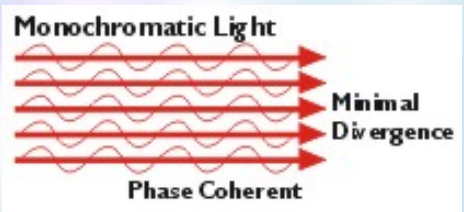
**In Summary: Laser Radiation Properties**

**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**.

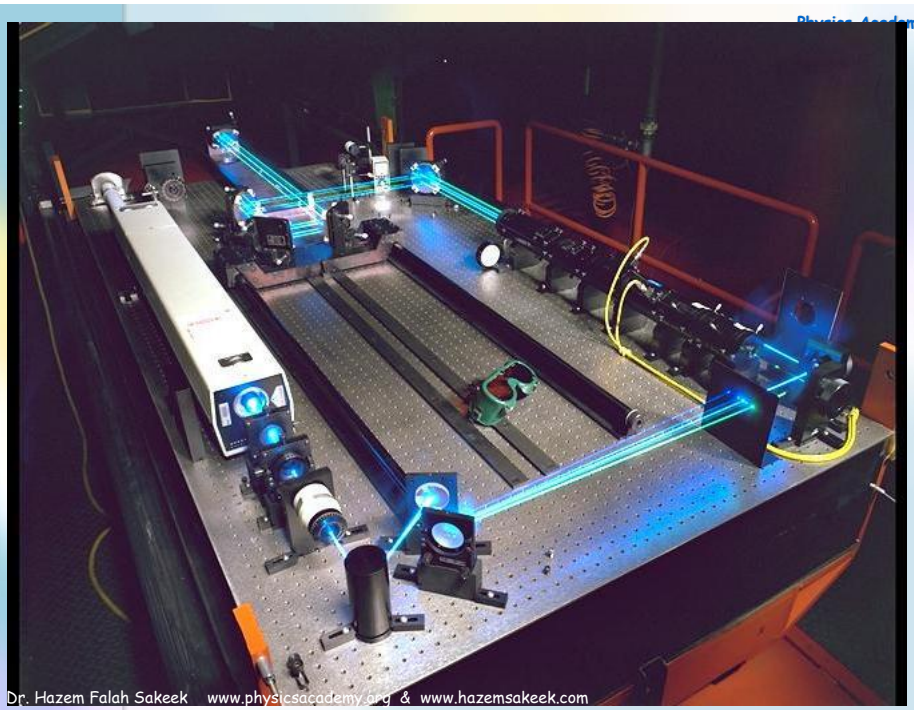
The combination of these properties gives the laser radiation many advantages, like achieving **very high power densities**, not available from other sources.



# How does a laser work?







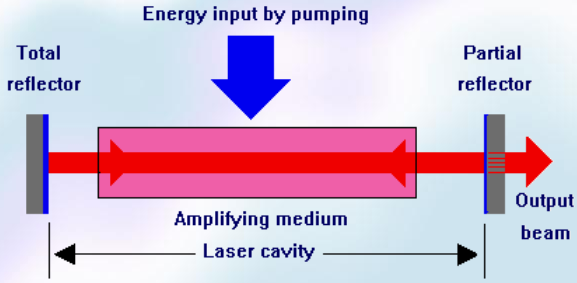
## المكونات الاساسية لجهاز الليزر

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**



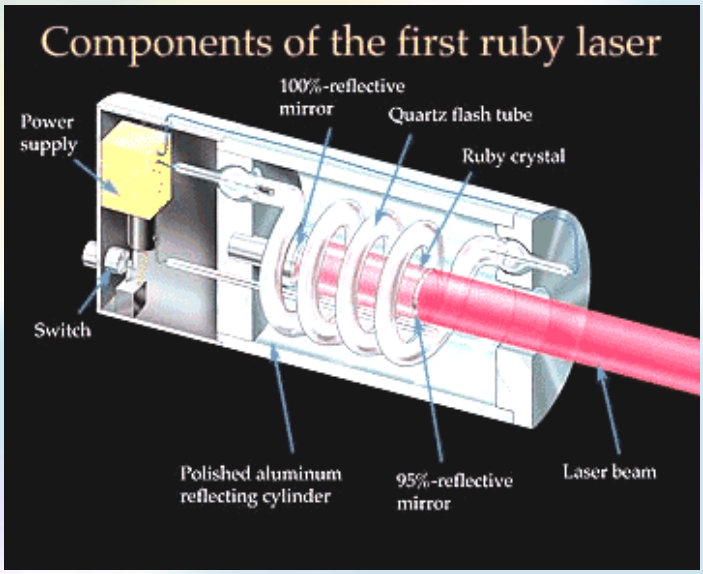





## How the First Ruby Laser Works

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.

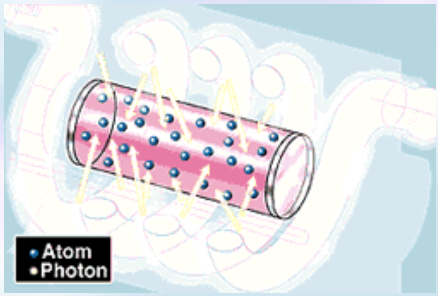
مراحل انتاج شعاع الليزر تقسم إلى اربعة مراحل هي



## Excitation

المرحلة الأولى

High-voltage electricity causes the quartz flash tube to emit an intense burst of light, exciting some of the atoms in the ruby crystal to higher energy levels.







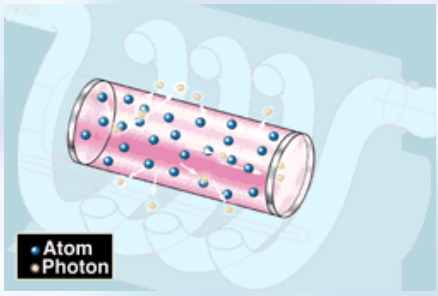

## Photon Emission

المرحلة الثانية

At a specific energy level, some atoms emit photons.

At first the photons are emitted in all directions.

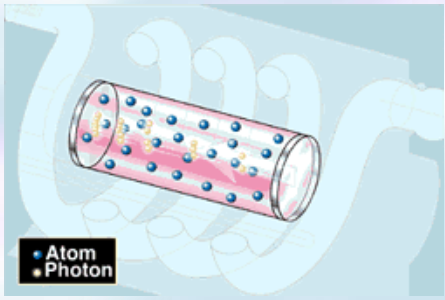
Photons from one atom stimulate emission of photons from other atoms and the light intensity is rapidly amplified.



## Amplification

المرحلة الثالثة

Mirrors at each end reflect the photons back and forth, continuing this process of stimulated emission and amplification.



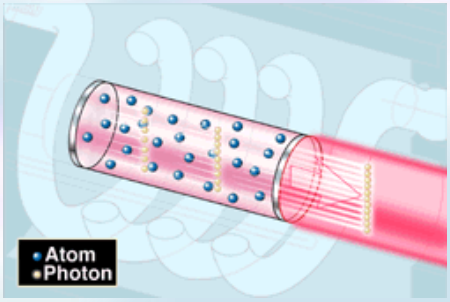





## Laser Beam

المرحلة الرابعة

The photons leave through the partially silvered mirror at one end. This is laser light.

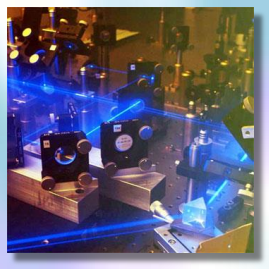


Physics Academy

# Laser Physics

## Introduction to Laser Essentials

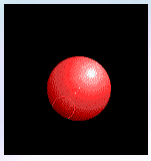
## Lecture 4



**Dr. Hazem Falah Sakeek**
www.hazemsakeek.com
www.physicsacademy.org



# 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:**

**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.

**Absorption and emission of electromagnetic radiation**

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





## Emission and Absorption of Radiation

**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 ($\nu$) 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]**

## 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**.





## Spontaneous Emission

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**.

Three possible processes between photons and atoms

- Stimulated Absorption
- Spontaneous Emission
- Stimulated Emission

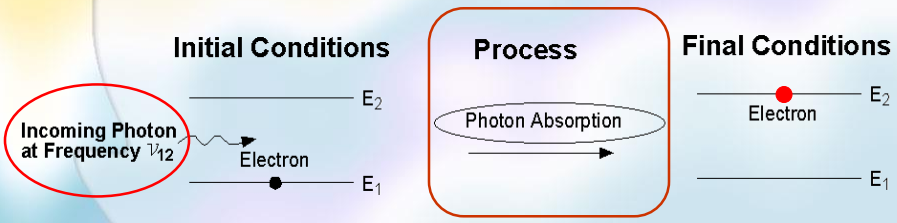




## Photon Absorption

**Photon Absorption**: A photon with frequency $\nu_{12}$ hits an atom at rest (left), and excites it to higher energy level ($E_2$) while the

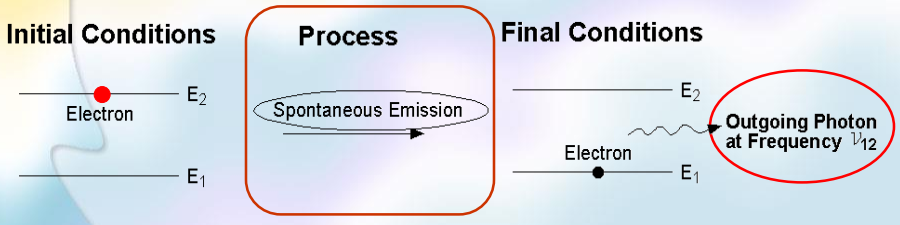
**photon is absorbed**.



Physics Academy

# Spontaneous Emission

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

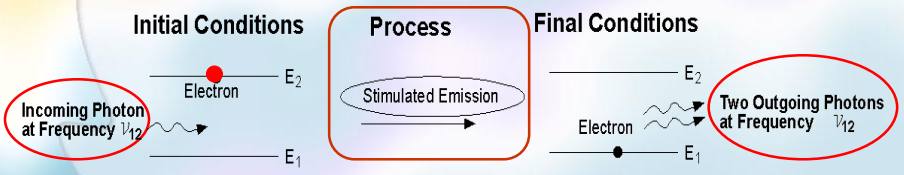





Physics Academy

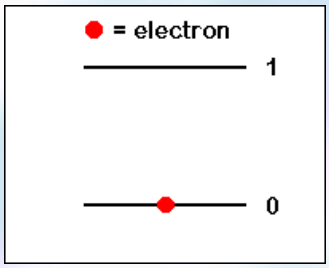
# Stimulated Emission

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



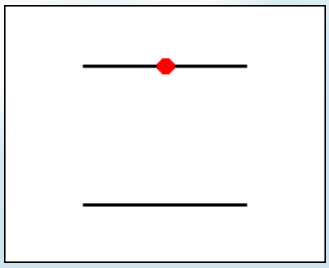
## Stimulated Absorption

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 can not 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.

# 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 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.**





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.

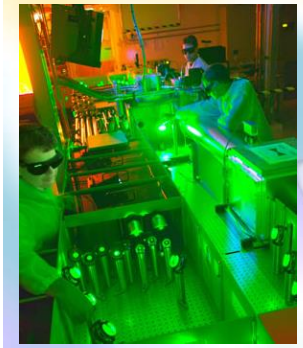
When the population number of a higher energy level is bigger than the population number of a lower energy level, a condition of "**population inversion**" is established.

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

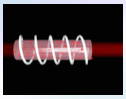
Physics Academy

# Laser Physics

## The Einstein Relation



Lecture 5

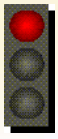


**Dr. Hazem Falah Sakeek**
www.hazemsakeek.com
www.physicsacademy.org



## The Einstein Relation

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



- **Absorption process**
- **Spontaneous Emission**
- **Stimulated Emission**

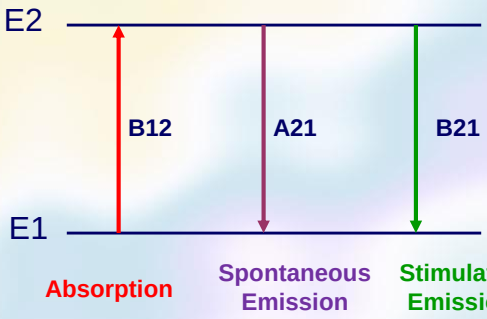
افترض اينشتين أن الذرات المكونة للمادة موزعة على مستويين للطاقة هما $E_0$ , $E_1$ حيث أن مستوى الطاقة $E_0$ يعرف باسم Ground State أما مستوى الطاقة $E_1$ فيعرف بـ Excited State. الانتقالات الثلاثة السابقة تحدث في المادة بين مستويي الطاقة عند أي درجة حرارة وهذا ما يعرف بالاتزان الحراري Thermal Equilibrium.

الشكل التالي يوضح مستويي الطاقة وتأثير كل عملية انتقال علي الذرة والإشعاع الكهرومغناطيسي.

Physics Academy

## Einstein Coefficients معاملات اينشتين

تعرف المعاملات **A21 & B12 & B21** بمعاملات اينشتين **Einstein Coefficients**
وهي التي تعطينا فكرة جيدة عن احتمالية حدوث انتقال بين مستويات الطاقة.



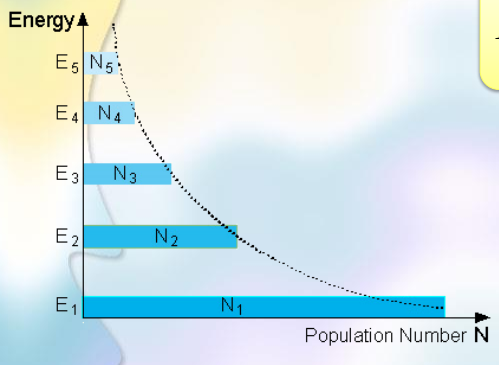

سنقوم بإيجاد العلاقات التي تربط هذه المعاملات بعضها ببعض حيث أن الانتقالات الثلاثة تحدث في المادة بصورة مستمرة وبمعدل ثابت لكل منها عند ثبوت درجة الحرارة أي في حالة الاتزان الحراري. وبمعرفة معامل من المعاملات الثلاثة يمكن حساب المعاملات الأخرى.



Physics Academy

## Population at thermal equilibrium

إن العلاقة بين تعداد الذرات في مستويات الطاقة عند الاتزان الحراري توصف بمعادلة ماكسويل بولتزمان للتوزيع الإحصائي **Maxwell- Boltzman Law**




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

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).

## Example:

Calculate the ratio of the population numbers (N1, N2) for the two energy levels E2 and E1 when the material is at room temperature (300°K), and the difference between the energy levels is 0.5 [eV]. What is the wavelength (λ) of a photon which will be emitted in the transition from E2 to E1? where $k_B = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K

## 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 (E1), there are 4 atoms in the excited state (E2) !!!





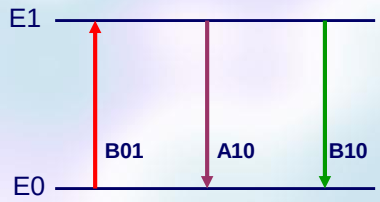
## To calculate the **wavelength:**

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

**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 $E_0$ , $E_1$

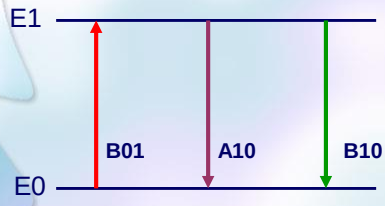







## الانبعـــاث التلقائـــي Spontaneous Emission

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:




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

Physics Academy

## Stimulated Absorption الامتصاص

تعتمد عملية الامتصاص على تعداد المستوي $E_0$ أي كلما ازداد $N_0$ 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 إذا توفر فوتون ذو طاقة تساوي فرق الطاقة بين المستويين $E_1$ و $E_0$ أي أن

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

وللتعبير عن مدى تحقق المعادلة السابقة في عملية الامتصاص فإننا نعبر عنها بكثافة الإشعاع بالدالة $\rho$ كمتغير في التردد Energy density of radiation والتي تعطي مدى احتمالية وجود فوتونات عند تردد $\nu$

ويمكن التعبير تأثير عملية الامتصاص على تغير تعداد المستوى $E_1$ بالمعادلة التالية:

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



Physics Academy

## Stimulated Emission الانبعاث الاستحثاثي

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

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

وللتعبير عن مدى تحقق المعادلة السابقة في عملية الانبعاث الاستحثاثي فإننا نعبر عنها بكثافة الاشعاع بالدالة $\rho$ كمتغير في التردد Energy density of radiation والتي تعطي مدى احتمالية وجود فوتونات عند تردد $\nu$

ويمكن التعبير تأثير عملية الانبعاث الاستحثاثي على تغير تعداد المستوى $E_1$ بالمعادلة التالية:

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

المعادلات الثلاثة السابقة الذكر تمثل الحالات المختلفة التي يمكن من خلالها أن تتفاعل الإشعاع 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**

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





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

$$\frac{N_1}{N_0} = \frac{g_1}{g_0} e^{-\frac{h\nu}{KT}} \qquad (5) \qquad \frac{N_1}{N_0} = \frac{B_{01}\rho(\nu)}{A_{10} + B_{10}\rho(\nu)} \qquad (4)$$

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

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

عند درجات الحرارة العالية فإن كثافة الإشعاع تكون كبيرة وهنا يمكن إهمال تأثير عملية الانبعاث التلقائي حيث إنها لا تتأثر بتغير درجة الحرارة.

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

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

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

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





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

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

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

**Equation (7) called Einstein equation for black body radiation**
**From the Blank equation of black body radiation**

$$\rho(\upsilon) = \frac{8\pi h\upsilon^3}{c^3} \frac{1}{\left(e^{\frac{h\upsilon}{KT}} - 1\right)} \quad (8) \longrightarrow \frac{A_{10}}{B_{10}} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \quad (9)$$

**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.**

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

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

Einstein Coefficients معاملات اينشتين





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

**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 إهمال 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 الإشعاع وتعداد المستوى E1 وهذا ما يعرف بـ Population Inversion.

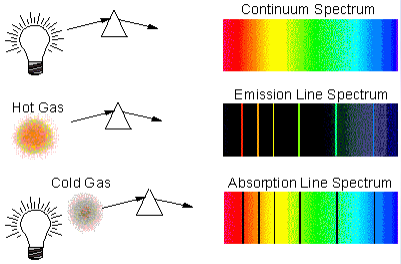
Physics Academy

# Laser Physics

## Width and Shape of Spectral lines

## اتساع وشكل الخط الطيفي

## Lecture 6




**Dr. Hazem Falah Sakeek**
www.hazemsakeek.com
www.physicsacademy.org



## Width and Shape of Spectral lines

يتولد الليزر داخل المادة عند أطوال موجية محددة تساوي احد الأطوال الموجية لخطوط الطيف المنبعثة من المادة. ولتمثيل خطوط الطيف نرسم شدة الإشعاع الكهرومغناطيسي المنبعث من المادة كدالة في التردد أو الطول الموجي.

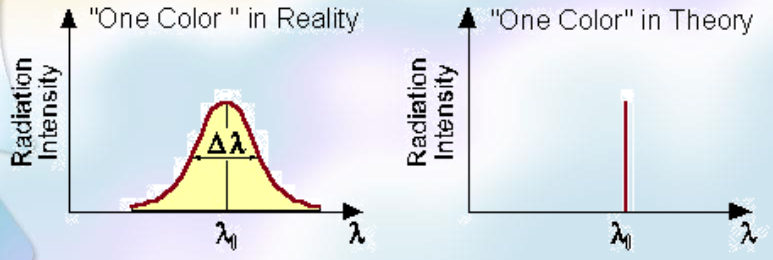
**Emission line** is described by plotting spontaneous emission radiation intensity as a function of frequency (or wavelength), for the specific lasing transition.

افترضنا سابقاً أن الطيف المنبعث من الذرة المثارة يرتكز فقط عند تردد وحيد وهو $\nu_0$ والذي يدعى Resonance Frequency

ولكن في الحقيقة فإن عمليتي الامتصاص والانبعاث لا تحدثان عند تردد وحيد فقط ولكن عند حزمة من الترددات التي تشكل اتساع في الخط الطيفي $\Delta\nu$ وهذا الاتساع في الخط الطيفي emission line يعتمد على الكثير من العوامل سنذكرها بالتفصيل خلال هذه المحاضرة.

## المقصود بمصطلح أحادي اللون Monochromatic

نظريا فإن مصطلح أحادي اللون يعني طول موجي محدد $\lambda_0$، وعند رسم منحني التغير في شدة الطيف المنبعث للمستويين طاقة مع الطول الموجي ينتج خط يعرف بالخط الطيفي spectral line كما في الشكل الموضح على الجانب الأيمن حيث أن شدة الأشعة عند أطوال موجية خارج $\lambda_0$ تساوي صفر.

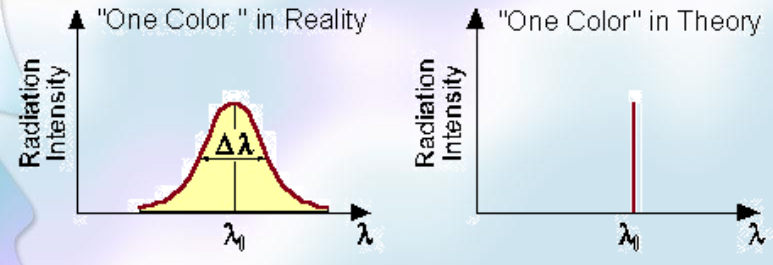



Width of spectral line (laser radiation) in Theory and in Reality

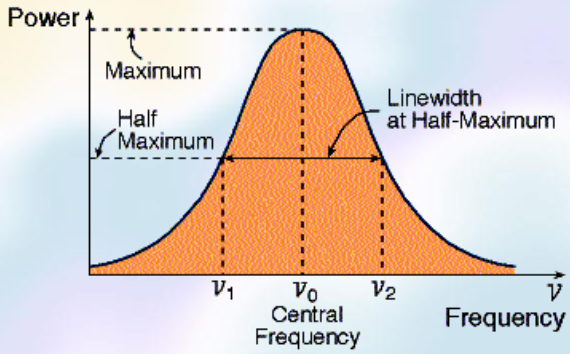




أما في الحقيقة فإن عند تمثيل العلاقة بين شدة الطيف المنبعث والطول الموجي نلاحظ أن للخط الطيفي اتساع معين مقداره $\Delta\lambda$ يعرف بـ spectral width بحيث تكون أعظم قيمة عند $\lambda_0$ وتتناقص على الأطوال الموجية المجاورة بجوار $\lambda_0$ كما في الشكل على الجانب الأيسر من الشكل التوضيحي



وللتعبير عن شكل واتساع الخط الطيفي يمكن استخدام العديد من الطرق ولكن سنستخدم الطريقة الأكثر شيوعاً وهي الاتساع عند منتصف القمة أي **Full Width at Half Maximum** والتي تكتب اختصار بـ **FWHM** كما في الشكل التالي:




**FWHM** = **F**ull **W**idth at **H**alf **M**aximum





## Broadening the of emission line

Certain mechanisms are responsible for broadening the linewidth of a laser:

- **Natural Broadening (Lifetime Broadening)**
- **Doppler Broadening**
- **Collision Broadening (Pressure Broadening)**

سنقوم بدراسة كل عامل بالتفصيل لتوضيح تأثيره على اتساع الخط الطيفي

## Natural Broadening (Lifetime Broadening)

لقد سلمنا بأن مستويات الطاقة **(0,1)** التي تعاملنا معها بأنها حادة تماماً أي أن قيمة اللاحتمية (الشك) يساوي صفر $\Delta E = 0$ لكل منهما، وهذا يشكل تناقض مع مبدأ هيزنبرج للشك حيث أن من مبدأ الشك فإن الذرة المثارة إلى المستوى $E_1$ يجب أن تبقى زمن لانهائي حتى يكون الشك في تحديد مستوى الطاقة $E_1$ يساوي صفر.

### Heisenberg uncertainty principle:

$$\Delta E \times \Delta t > h$$

$$\Delta E = h \times \Delta \nu$$

$$\Delta \nu > 1/\Delta t$$

**Numerical examples:**

$\Delta t = 10^{-8}$ [s] $\rightarrow \Delta \nu = 10^{8}$ [Hz]

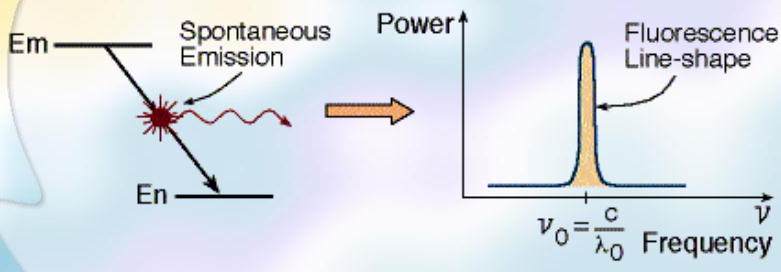
$\Delta t = 10^{-4}$ [s] $\rightarrow \Delta \nu = 10^{4}$ [Hz]

**The longer the specific energy level transition lifetime, the narrower its linewidth $\Delta \nu$ .**



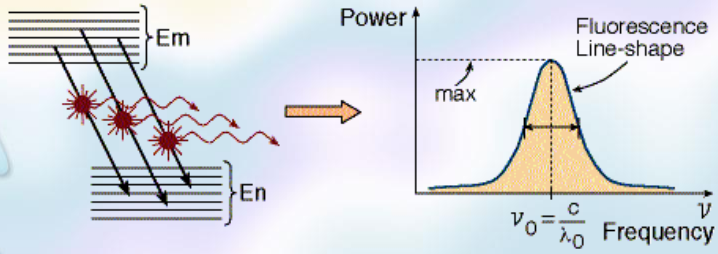


نعلم أن الزمن الذي تبقى فيه الذرة في الحالة المثارة غير محدد بشكل لانهائي. فإذا أثيرت ذرة إلى مستوي طاقة ما فسوف تبقى فيه فترة زمنية محددة ثم تعود إلى المستوى الأرضي للطاقة **Ground level** وتطلق فوتونات.




**Emission line between narrow (ideal) energy levels**

وللتغلب على هذا التناقض بين مبدأ الشك والعمر المحدود لبقاء الذرة مثارة نفرض أن مستويات الطاقة لها اتساع وأن الذرات تتوزع باحتمالية أكبر ما يمكن عند التردد $\nu_o$ كما في الشكل الموضح، ولذلك فإن احتمالية الانتقال $\nu$ اقل من احتمالية $\nu_{21}$ لان احتمالية توزيع الذرات في منتصف مستوى حزمة الطاقة اكبر ما يمكن.




Emission line between wide (real) energy levels





بأخذ متوسط عمر المستوى Average life time $\tau$ لمستوى الطاقة كمقياس للشك في الزمن $\Delta t$.

ويمكن تقدير اتساع الخط الطيفي نتيجة الاتساع الطبيعي Natural Broadening لمستوي طاقة i بالمعادلة التالية:

$$\Delta\nu_i = \frac{1}{2\pi\tau_i}$$

Where as $\Delta\nu_i = 0$ for the ground state since $\tau_i = \infty$. The upper state (excited state) have life time in the range of $10^{-6}$-$10^{-9}$ sec.

In the case of both levels involving the transition are broadened then the line width is given by

$$\Delta\nu_{21} = \Delta\nu_1 + \Delta\nu_2$$

The life time of an excited state is the inverse of the spontaneous emission probability ($A_{21}$)

$$\tau = \frac{1}{A_{21}}$$

In general case

$$\tau = \frac{1}{\sum A_{21}}$$

**The shape of spectral line due to the natural broadening is given by the line shape function g(ν)**

$$g(\upsilon) = \frac{\Delta\upsilon_n}{2\pi} \frac{1}{(\upsilon-\upsilon_o)^2 + (\Delta\upsilon_n/2)^2}$$

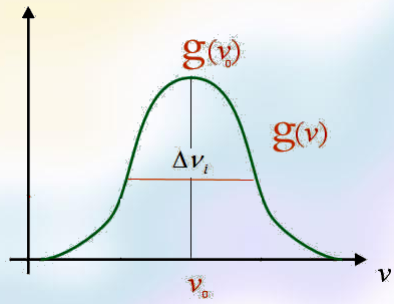
**g(ν)** دالة تعطي احتمالية حدوث الانتقال عند تردد ما.

**Δν** هي منتصف القيمة العظمى للاحتمالية وتسمى اتساع الخط الطيفي.





**Summary**
**Natural Broadening**




| Width of spectral line due to natural broadening | Shape of spectral line due to natural broadening |
|---|---|
| $\Delta\nu_i = \frac{1}{2\pi\tau_i}$ | $g(\upsilon) = \frac{\Delta\upsilon_n}{2\pi} \frac{1}{(\upsilon-\upsilon_o)^2 + (\Delta\upsilon_n/2)^2}$ |

**Lorentzian function**

# Examples

**For Sodium**

$T_{sp}$ = 16ns then $\Delta\nu_i = \frac{1}{2\pi\tau_i} = \frac{1}{2\pi \times 16 \times 10^{-9}} = 10MHz$

**For Ruby** $T_{sp}=3\times10^{-3}$sec (metastable state)

$$\Delta\nu_i = \frac{1}{2\pi\tau_i} = \frac{1}{2\pi \times 3 \times 10^{-3}} = 53Hz$$

**For Semiconductor** $T_{sp}=10^{-9}$sec

$$\Delta\nu_i = 100MHz$$

Physics Academy

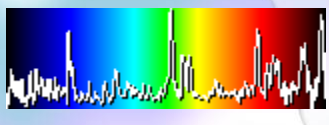
# Al-Azhar University - Gaza

# Laser Physics

## Width and Shape of Spectral lines

## اتساع وشكل الخط الطيفي

## Lecture 7



**Dr. Hazem Falah Sakeek**
www.hazemsakeek.com
www.physicsacademy.org



## Broadening the of emission line

Certain mechanisms are responsible for broadening the linewidth of a laser:

- Natural Broadening (Lifetime Broadening)
- **Doppler Broadening**
- **Collision Broadening (Pressure Broadening)**

سنقوم بدراسة كل عامل بالتفصيل لتوضيح تأثيره على اتساع الخط الطيفي

# Doppler Broadening

درسنا تأثير العمر المحدود لمستويات الطاقة على اتساع الخط الطيفي Natural Broadening، وسوف نقوم الآن بدراسة تأثير ظاهرة دوبلر على اتساع الخط الطيفي.

كما نعلم أن ظاهرة دبلر هي تغير في التردد المقاس نتيجة الحركة النسبية بين المصدر والمراقب، مثل الصوت الذي نسمعه لدي مرور سيارة إسعاف مسرعة بالنسبة لنا، فعندما يتحرك المصدر باتجاه مراقب ثابت فإن التردد المقاس بواسطة المراقب يزداد وعندما يبتعد المصدر عن المراقب الثابت يصبح التردد المقاس أقل من تردد المصدر في حالة سكون.

لفهم المقصود بظاهرة دبلر استعن بالمحاضرة على الموقع التالي

http://www.hazemsakeek.com/Physics_Lectures/medicalphysics/medical_lectures/medical_lectures_5d.htm

تحدث ظاهرة دبلر للذرات الباعثة للطيف الكهرومغناطيسي حيث أن الذرات في حالة حركة مستمرة أثناء الانبعاث الضوئي ولهذا فإن المراقب الذي يقيس تلك الترددات (المطياف Spectrometer) سوف يقيس ترددات مختلفة حسب ما إذا كانت الذرات مقتربة من المطياف أو مبتعدة عن المطياف.

والترددات المقاسة تعتمد على السرعة النسبية للذرات بالنسبة للمطياف كما في معادلة دبلر التالية:

$$\nu = \nu_o\left(1 \pm \frac{v}{c}\right)$$

**Classical Doppler Effect**

يمكن التمييز بين مجموعة من الذرات على حسب سرعاتها فلو اختلفت مجموعة في سرعتها فإن الترددات المنبعثة منها تختلف وبالتالي نستطيع تمييز الترددات نتيجة لاختلاف السرعات. ومن النظرية العامة للغازات فإن احتمالية انتماء ذرة إلى مجموعة من الذرات سرعتها تنحصر في المدى v to v+dv يمكن إيجادها من توزيع ماكسويل بولتزمان كما يلي:

$$\frac{dN}{N} = \left(\frac{M}{2\pi kT}\right)^{1/2} e^{-1/2\frac{mv^2}{kT}} dv$$

وبالتالي فإن احتمالية أن تكون سرعة الذرة واقعة في المدى v to v+dv يمكن التعبير عنها بالدالة g(v)dv





$$g(v)dv = \frac{dN}{N} = \left(\frac{M}{2\pi kT}\right)^{1/2} e^{-1/2\frac{mv^2}{kT}} dv \qquad (*)$$

where dN the total number of atoms have velocity in the range v to v+dv

N the total number of the atoms
M the mass of the atom
T the temperature in Kelvin at thermal equilibrium

وحيث أن الترددات المنبعثة من الذرة نتيجة للانتقال بين مستويي الطاقة 1 و 2 سوف يكون معتمداً على سرعة الذرة من خلال معادلة دبلر على النحو التالي

$$\nu = \nu_o\left(1 \pm \frac{v}{c}\right)$$

السرعة

التردد

سنقوم الآن بإيجاد علاقة بين السرعة v والتردد $\nu$ وذلك للتعويض في المعادلة (*) كما يلي:

التردد

$$\nu = \nu_o \pm \frac{\nu_o \mathrm{v}}{c} \rightarrow \frac{\nu - \nu_o}{\nu_o} = \frac{\mathrm{v}}{c}$$

السرعة

السرعة

$$\mathrm{v} = c\left(\frac{\nu - \nu_o}{\nu_o}\right)$$

&

$$d\mathrm{v} = \frac{c}{\nu_o} d\nu$$

التردد

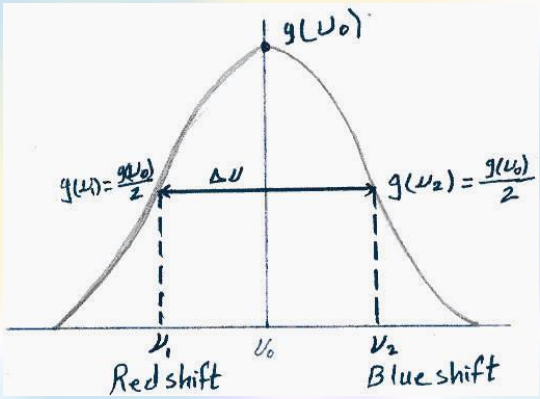
بالتعويض في المعادلة (*) عن v و dv نحصل على

$$g(\nu)d\nu = \frac{c}{\nu_o}\left(\frac{M}{2\pi kT}\right)^{1/2} e^{-1/2\frac{mc^2}{kT}(\frac{\nu-\nu_o}{\nu_o})^2} d\nu \quad (**)$$

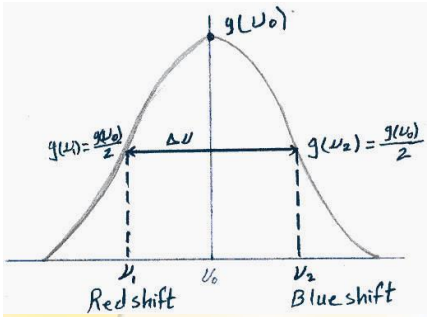
وهذه المعادلة تسمى معادلة Gaussian Function والتي تعطي الاتساع في الخط الطيفي نتيجة ظاهرة دبلر والشكل التالي يوضح الاتساع المطلوب إيجاد قيمته.








بالتعويض في المعادلة السابقة (**) عن التردد $\nu_o$ ومن الشكل أيضا نلاحظ أن عند التردد $\nu_1$ هو نصف قيمة الدالة عند التردد $\nu_o$ وعليه نحصل على المعادلتين التاليتين.




$$g(\nu_o) = \frac{c}{\nu_o}\left(\frac{M}{2\pi kT}\right)^{1/2}$$

$$g(\nu_1) = \frac{g(\nu_o)}{2} = \frac{c}{\nu_o}\left(\frac{M}{2\pi kT}\right)^{1/2} e^{-1/2\frac{Mc^2}{kT}(\frac{\nu_1-\nu_o}{\nu_o})^2}$$

بالقسمة المعادلتين نحصل على المعادلة التالية :

$$\frac{g(\nu_1)}{g(\nu_o)} = \frac{1}{2} = e^{-1/2\frac{Mc^2}{kT}(\frac{\nu_1-\nu_o}{\nu_o})^2}$$



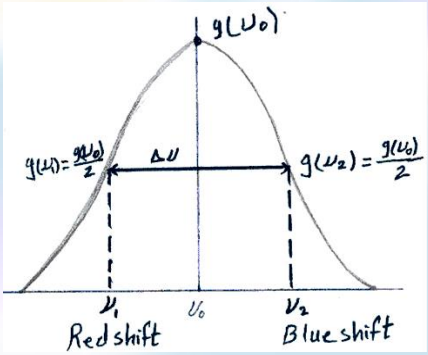


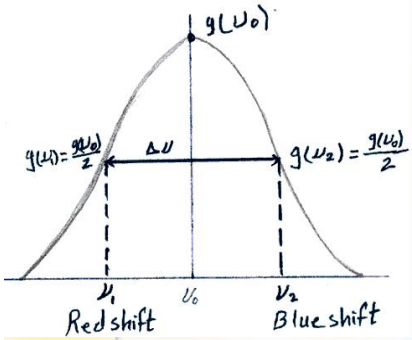
للتخلص من الدالة الاسية نأخذ اللوغارتم للطرفين فنحصل على المعادلة التالية

$$\ln 2 = \frac{Mc^2}{2kT}(\frac{\nu_1-\nu_o}{\nu_o})^2$$

وبهذا فإن

$$\frac{\nu_1-\nu_o}{\nu_o} = \left(\frac{2kT\ln 2}{Mc^2}\right)^{1/2}$$








وحيث أن من الشكل التوضيحي للمنحني اتساع دبلر فإن

$$\nu_1 - \nu_o = \frac{\Delta\nu}{2}$$

$$\Delta\nu = 2(\nu_1 - \nu_o) = 2\nu_o\sqrt{\frac{2kT\ln 2}{Mc^2}}$$

بالتعويض عن الثوابت نحصل على مدى الاتساع الناتج عن ظاهرة دبلر

$$\Delta\nu \cong 7\times10^{-7}\nu_o\sqrt{\frac{T}{M}}$$





$$\Delta\nu \cong 7\times10^{-7}\nu_o\sqrt{\frac{T}{M}}$$

لاحظ أن

مدى الاتساع يتناسب طردياً مع التردد الأصلي للطيف المنبعث وعليه فإن ظاهرة دبلر تؤثر على الترددات الكبيرة مثل الانبعاث الكهرومغناطيسي في مدى اللون الأزرق أو أكثر، أما الترددات في مدى اللون الأحمر أو أقل فإن ظاهرة دبلر لا تلعب دوراً أساسيا في الاتساع.

كما أن الاتساع نتيجة ظاهرة دبلر يزداد بزيادة درجات الحرارة ويزداد بنقصان الكتلة

## Example

For Infrared λ=10.6μm in $CO_2$ laser [m=44, T=300k]

$$\Delta\nu_D = 60MHz$$

$$\Delta\lambda_D = 0.2\text{Å}$$

$$\Delta\lambda_D = \frac{\lambda^2 \Delta\nu}{c}$$

For visible λ=6328Å [m=20, T=400k]

$$\Delta\nu_D = 1500MHz$$

$$\Delta\lambda_D = 0.02\text{Å}$$





For vacuum UV λ=1216Å

$$\Delta\nu_D = 55GHz$$

$$\Delta\nu_{natural} = 10MHz$$

$$\Delta\lambda_D = 0.03\text{Å}$$

---

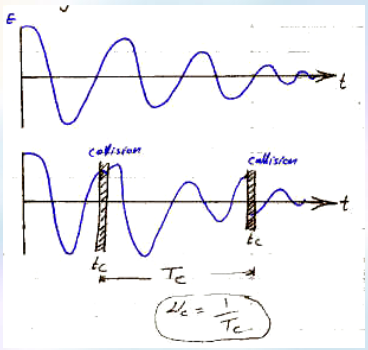
$$\Delta\nu_D \alpha \nu_o$$

$$\Delta\nu_D \alpha \frac{1}{\sqrt{m}}$$

$$\Delta\nu_D \alpha \sqrt{T}$$

## Pressure Broadening (Collision Broadening)

ينتج عن التصادمات المرنة بين الذرات الباعثة للإشعاع الكهرومغناطيسي بعضها ببعض. ويتسبب التصادم في انقطاع القطار الموجي المنبعث من الذرة وهذا الانقطاع يدوم لفترة قصيرة جدا $10^{-13}$sec ، مما يسبب أحداث قفزات عشوائية في طور القطار الموجي، كما في الشكل، وتكون المحصلة النهائية لهذه التصادمات هو اتساع في مدى الترددات المنبعثة من الذرات المتصادمة حول التردد الأصلي $\nu_0$ وفي هذه الحالة فإن الدالة التي تعطي شكل الخط الطيفي هي




$$g(\upsilon) = \frac{\Delta\upsilon}{2\pi}\frac{1}{(\upsilon-\upsilon_o)^2+(\Delta\upsilon/2)^2}$$





**والشرط الأساسي لهذه المعادلة هو أن يكون الزمن بين التصادمات أكبر بكثير من زمن التصادم نفسه أي أن**

Tc >> tc

where Tc is the time between collisions
tc is the time of collision

$\Delta\nu$ is the spectral line broadening due to the natural lifetime and the collision process, therefore

$$\Delta\nu = \frac{1}{2\pi}(A_1 + A_2 + 2\nu_{coll})$$

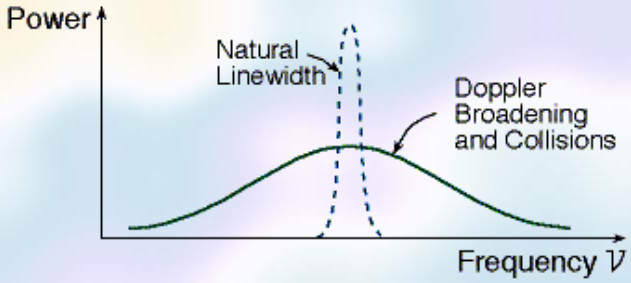
Collision rate

when $2\nu_{coll} >> A_1+A_2$

For each atomic wave function is interrupted by $\nu_{coll}$

$$\Delta\nu = \frac{\nu_{coll}}{\pi}$$

وهذا يعطي الاتساع نتيجة للتصادمات وقد تم إهمال الاتساع نتيجة العمر المحدود لمستويات الطاقة وذلك لصغر قيمته بالمقارنة بالاتساع الناتج عن التصادمات بين الذرات








## Homogenous & Non-homogeneous Broadening

يقسم الاتساع إلى نوعين يعرفان بالاتساع المتجانس Homogenous Broadening

مثل الاتساع الناتج عن Life time Broadening & Pressure Broadening

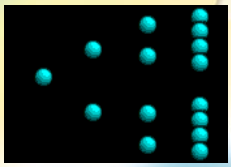
والنوع الثاني يعرف بالاتساع الغير متجانس Non-homogeneous Broadening مثل Doppler Broadening

وذلك لأن في دبلر يمكننا التميز بين مجموعة وأخرى من الذرات حسب سرعاتها، أما في Pressure و Life time فلا يوجد تمييز بين مجموعة من الذرات وأخرى.

في حالة الاتساع الغير متجانس فإن التكبير لليزر يحدث فقط بواسطة مجموعة محددة من الذرات أما في الاتساع المتجانس فإن كل الذرات تشارك في عملية التكبير لإنتاج الليزر. (سيأتي توضيح ذلك لاحقاً).

Physics Academy

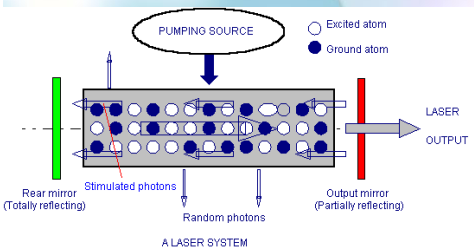
# Laser Physics



## Absorption and Small Signal Gain Coefficient

معادلة الليزر

## Lecture 8

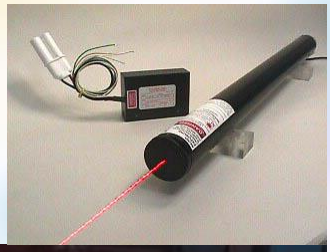


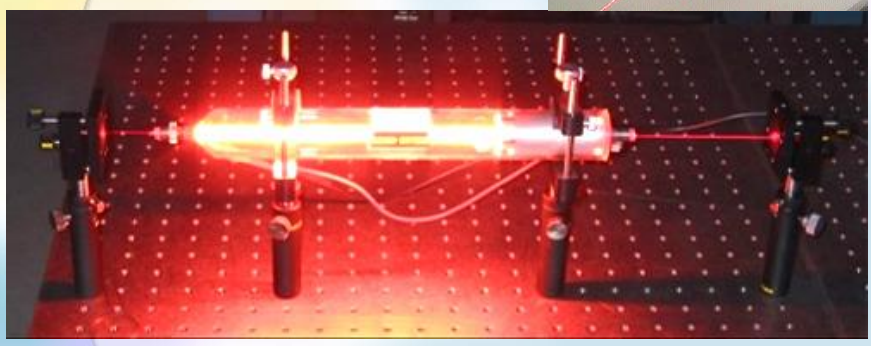

**Dr. Hazem Falah Sakeek**
www.hazemsakeek.com
www.physicsacademy.org

Physics Academy

## HeNe Laser in Action

# HeNe Laser tube





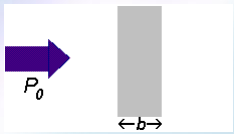




# Absorption of electromagnetic Radiation

من المحاضرات السابقة علمنا أن عملية امتصاص فوتون photon absorption بواسطة ذرة، فإن حالة الذرة تتغير من ذرة غير مثارة إلى ذرة مثارة بطاقة تساوي طاقة الفوتون الذي اكتسبته.

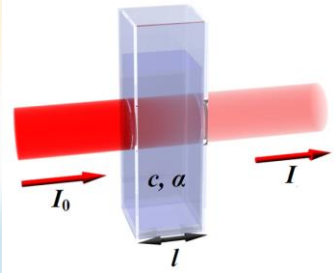
وهذا بالفعل ما يحدث عند النظر إلى الذرة في المادة على حدا. ولكن إذا اعتبرنا الحالة الجاهرية لوصف عملية الامتصاص macroscopic system فإن جزء من الشعاع الكهرومغناطيسي الساقط على المادة سوف يمتص وفي الحالة العادية Thermal Equilibrium فإن شدة الشعاع النافذ أقل من الشعاع الساقط والعلاقة التي تربط شدة الشعاع النافذ مع الشعاع الساقط وسمك المادة هو قانون لامبرت Lambert Law



$$I = I_0 \exp(-\alpha x)$$

$I_0$ = Intensity of incoming radiation.

$\alpha$ = Absorption coefficient of the material.




It is common to use units of **centimeter** ($10^{-2}$ [m]), to measure the width of the material (x), so **the units of the absorption coefficient ($\alpha$) are:**

**[$cm^{-1}$] = [1/cm].**

ومن هذه المعادلة نستنتج أن كلما ازداد سمك المادة كلما كانت شدة الأشعة النافذة **transmitted** اقل.





**Example: Absorption Coefficient ($\alpha$)**

**Calculate the absorption coefficient (a) of materials which transmit 50% of the intensity of the incident radiation on a 10 [mm] width, to the other side.**

**Solution**

Using the exponential absorption law:

$$\alpha = 1/x * \ln(I_o/I) = 1/1 * \ln(1/0.5) = 0.69\ cm^{-1}$$

**Results from the exponential absorption law:**

- For every material, **absorption depends on the width of the material**. The thicker the material, less radiation will be transmitted through.
- For a certain width (x) of the material, absorption depends only on the **absorption coefficient ($\alpha$), which is characteristic of each material**.

# Small Signal Gain Coefficient

إن ما سبق لا ينتج شعاع ليزر لأن الأشعة النافذة أقل من الأشعة الساقطة والمطلوب هو الحصول على شعاع مكبر بعد نفاذه من المادة، وكما نعلم أن كل من عمليتي الانبعاث التلقائي والأستحثاثي تزيد من شدة الأشعة، بينما عملية الامتصاص تقلل من شدة الأشعة النافذة. وللحصول على الليزر يجب أن تكون عملية الانبعاث أكبر من عملية الامتصاص حتى نحصل على شعاع ليزر.

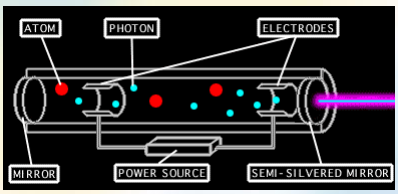
يوضح الشكل أعلاه ذرة مثارة (السحابة الخضراء) استحثت بواسطة فوتون فكانت النتيجة فوتون مكبر

وقد درس العالم اينشتين تأثير تفاعل الإشعاع الكهرومغناطيسي مع المادة من خلال عمليات الانتقال الثلاثة

1. Absorption
2. Spontaneous Emission
3. Stimulated Emission

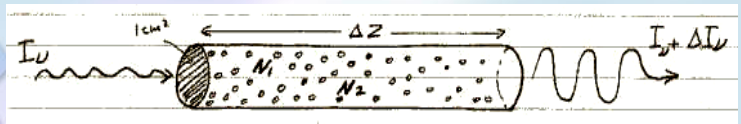
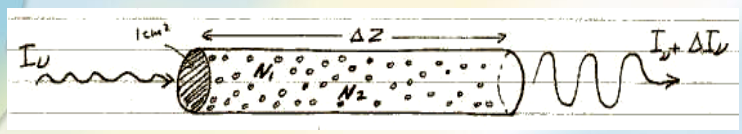







Consider a collimated beam of light travelling in z-direction and passing through an atomic gas, For simplicity assume that there is only a single radiative transition, which occurs between two energy state E1 and E2 where E2 > E1. The incident light is monochromatic at the transition frequency

$$\nu_{21} = (E_2 - E_1) / h$$

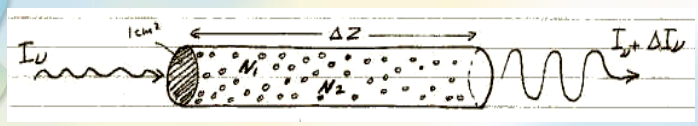


The light beam is characterized by its **irradiance**, **I**,

$$\mathbf{I_\nu = C\,\rho(\nu)}$$

Where $I_\nu$ is the irradiance (energy per unit area per sec)
C is the speed of light (m/sec)

$\rho(\nu)$ is the energy density ($J/m^3$)

**The magnification of $I_\nu$ as it interacts with the atoms in E1 & E2 along the z-direction is as follow:**

$\Delta I_\nu =$ $+ N_2 * \Delta z * 1\ (I_\nu/C)\ B_{21}\ g(\nu) * h\nu$ Stimulated emission

$- N_1 * \Delta z * 1\ (I_\nu/C)\ B_{12}\ g(\nu) * h\nu$ Absorption

$+ N_2 * \Delta z * 1\ A_{21}\ g(\nu) * h\nu$ Spontaneous emission

يمكن تجميع المعادلة بالصورة التالية

$$\frac{\Delta I_\nu}{\Delta z} = \frac{dI_\nu}{dz} = \frac{h\nu}{C}(B_{21}N_2 - B_{12}N_1)g(\nu)I_\nu + h\nu A_{21}N_2 g(\nu)$$

$$\frac{\Delta I_\nu}{\Delta z} = \frac{dI_\nu}{dz} = \frac{h\nu}{C}(B_{21}N_2 - B_{12}N_1)g(\nu)I_\nu + h\nu A_{21}N_2 g(\nu)$$

حيث أن عملية الانبعاث التلقائي تحدث بوجود أو عدم وجود فوتونات ساقطة على المادة أي إنها لا تعتمد على **I** لذا فإنها تهمل في المعادلة.

نلاحظ أيضاً أن قيمة التغير في شدة الأشعة بالنسبة للمسافة **z** تكون قيمة سالبة إذا كانت $N_1 > N_2$ وهذا ما يحدث في الطبيعة، وهنا لا نحصل على تكبير، ولذلك إذا أردنا تكبير الأشعة لنحصل على ليزر فإنه من الضروري أن تكون $N_2 > N_1$ وهذا ما يعرف بانقلاب التعداد **Population Inversion**. لنعود إلى المعادلة السابقة ونستخدم معادلات اينشتين السابق الذكر وهما:

$$\frac{B_{01}}{B_{10}} = \frac{g_1}{g_0} \qquad \frac{A_{10}}{B_{10}} = \frac{8\pi h \upsilon^3}{c^3}$$





وبذلك ينتج أن

$$\frac{dI_\nu}{dz} = \frac{h\nu}{C}(B_{21}N_2 - \frac{g_2}{g_1}B_{21}N_1)g(\nu)I_\nu$$

$$\frac{dI_\nu}{dz} = \frac{h\nu}{C}B_{21}(N_2 - \frac{g_2}{g_1}N_1)g(\nu)I_\nu$$

وبالتعويض عن B21 باستخدام معادلات اينشتين ينتج التالي

$$\frac{dI_\nu}{dz} = \frac{h\nu}{C}\frac{A_{21}C^3}{8\pi h\nu^3}(N_2 - \frac{g_2}{g_1}N_1)g(\nu)I_\nu$$

باختصار المعادلة السابقة ينتج أن

$$\frac{dI_\nu}{dz} = A_{21}\frac{\lambda^2}{8\pi}(N_2 - \frac{g_2}{g_1}N_1)g(\nu)I_\nu$$

**Laser Equation**

$$\frac{dI_\nu}{dz} = A_{21}\frac{\lambda^2}{8\pi}\left(N_2 - \frac{g_2}{g_1}N_1\right)g(\nu)I_\nu$$

الثوابت في المعادلة لها وحدة $m^{-1}$ أو $cm^{-1}$ ولهذا تعرف باسم معامل الحصيلة الصغيرة
**Small signal Gain Coefficient**

$$\gamma_o(\nu) = A_{21}\frac{\lambda^2}{8\pi}\left(N_2 - \frac{g_2}{g_1}N_1\right)g(\nu)$$

وقد سميت كذلك لأننا اعتبرنا أن $I_\nu$ صغيرة بحيث لا تؤثر على $N_2$ أي أن $N_2$ ستبقى ثابتة. والحال سيكون مختلف إذا كانت الشدة $I_\nu$ كبيرة فإن المعادلة لا تصلح لأن $N_2$ ستتغير مع الشدة.

وتأخذ المعادلة الصورة التالية :

$$\frac{dI_\nu}{dz} = \gamma_o(\nu)I_\nu$$



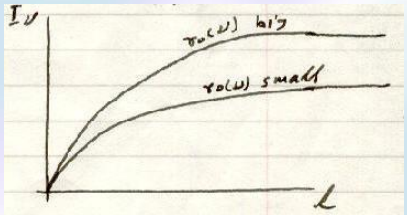


بتكامل طرفي المعادلة مع العلم بأن dz يتغير من القيمة 0 إلى *l* وهو أبعاد المادة التي طولها *l*

$$\int \frac{dI_\nu}{I_\nu} = \gamma_o(\nu)\int_0^l dz$$

$$I_\nu(l) = I_\nu(0)e^{\gamma_o(\nu)l}$$

$$\frac{I_\nu(l)}{I_\nu(0)} = Gain$$




عندما تكون Small signal gain coefficient كبيراً
فإن الشدة تزداد بسرع إلى حد التشبع Saturation level

## Cross-section for stimulated emission

لنعود إلى معادلة التكبير التالية

$$\gamma_o(v) = A_{21}\frac{\lambda^2}{8\pi}(N_2 - \frac{g_2}{g_1}N_1)g(v)$$

حيث أن وحدة الكميات الفيزيائية التالية في المعادلة السابقة

$$A_{21}\quad \frac{\lambda^2}{8\pi}\quad g(v)$$

$$\text{sec}^{-1}.\text{m}^2.\text{sec}=\text{m}^2$$

هي وحدة مساحة فإنها تعرف باسم مساحة مقطع عملية الانبعاث الاستحثاثي **Cross-section for stimulated emission** وهذه تعبر عن احتمالية حدوث الانبعاث الاستحثاثي فكلما زادت مساحة المقطع كلما ازدادت عملية الانبعاث الاستحثاثي.

$$\sigma_{SE} = A_{21}\frac{\lambda^2}{8\pi}g(v)$$





وبهذا يمكن كتابة معادلة التكبير لليزر على النحو التالي:

$$\gamma_o(v) = \sigma_{SE}(v).\Delta N$$

**Laser Equation**

حيث أن $\Delta N$ تعطي مقدار فارق التعداد بين مستويات الطاقة $E_1$ و $E_2$ وفي حالة الليزر يجب أن يكون فارق التعداد موجباً.

$$\Delta N = N_2 - \frac{g_2}{g_1}N_1$$

**Example**

To build a laser of magnification of $0.1\text{cm}^{-1}$ and If it's stimulated emission cross section is $10^{14}\text{cm}^2$.

Then we need population difference $\Delta N=10^{13}\text{cm}^{-3}$

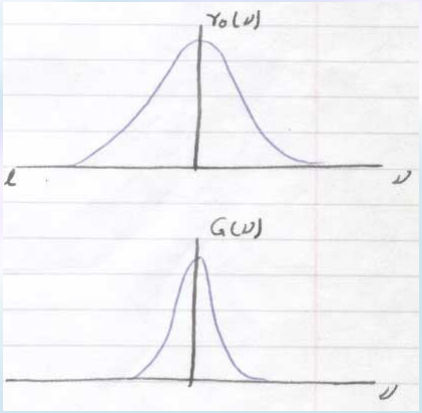
# Gain and Gain coefficient

الدالة G تعرف باسم التكبير Gain والدالة $\gamma_o$ تعرف بمعامل التكبير وكلا الدالتين يعتمدان على التردد ولكن الدالة G تعتمد على التردد بدالة آسية حيث أن

$$\gamma_o(\nu) = C\, g(\nu)$$

أما الدالة G

$$G(\nu) = e^{\gamma o(\nu) l} = e^{C\, g(\nu)}$$








# Laser Amplifier

Physics Academy

Al-Azhar University - Gaza

# Laser Physics

## Optical Feedback

Lecture 9

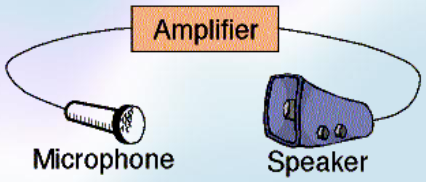
**Dr. Hazem Falah Sakeek**
www.hazemsakeek.com
www.physicsacademy.org



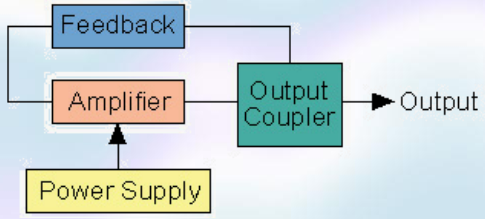
## Optical Feedback التغذية العكسية الضوئية

يعمل الليزر مثل أي مذبذب الكتروني، وفكرة المذبذب هو جهاز ينتج ذبذبات بدون وجود مؤثر خارجي، ولشرح ذلك نستخدم مثال جهاز مكبر الصوت والذي يتكون من ميكرفون **microphone** وسماعة **speaker** يوصل بينهما جهاز تكبير **amplifier** كما في الشكل التالي:

عندما يكون الميكرفون موضوعاً أمام السماعة كدائرة مغلقة فإننا نسمع صفير متصل من السماعة وذلك بدون الحاجة إلى مصدر صوت خارجي.



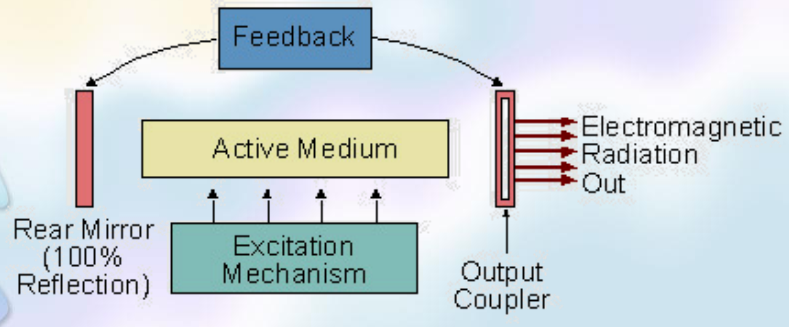
وهذه فكرة التغذية العكسية حيث أن الإشارة الصوتية الداخلية الصادرة من السماعة **(noise)** يلتقط بواسطة الميكرفون ومن ثم يتم تكبيره بواسطة المكبر ويعاد بثه من خلال الميكرفون وتتكرر العملية إلى أن يتم تكبير الصوت ويصدر على شكل صفير متصل.








وبنفس الفكرة يعمل مذبذب الليزر حيث يتم إعادة جزء من الفوتونات المكبرة بواسطة عملية الانبعاث الاستحثاثي باستخدام مرايا ليتم تكبيرها، والشكل التالي يوضح فكرة عمل مذبذب الليزر.



عندما تسقط فوتونات ذات شدة $I_o$ خلال مادة مكبر الليزر **active medium** فإنها تتكبر بمقدار **G** وتصبح شدة الأشعة $I_oG$ وباستخدام مرآة $R_2$ فإن جزء من الأشعة ينعكس بمقدار $R_2$ وتصبح شدة الأشعة $I_oGR_2$,

تعمل المرأة على إعادة الأشعة للمكبر مرة أخرى لتتكبر الأشعة بمقدار **G** مرة أخرى وتخرج $I_oGR_2G$ لتسقط على المرأة الأخرى $R_1$ وتكون شدة الأشعة عند انعكاسها $I_oGR_2GR_1$

وهذا ما يحدث للأشعة عند دخولها للمكبر خلال دورة تكبير واحدة ويكون التكبير المكتسب في المقدار **GG** والفقد في الأشعة يكون ناتج عن $R_1R_2$.

والشرط الأساسي ليصبح المذبذب يعمل كمكبر للإشارة هو أن يكون الناتج النهائي بعد دورة واحدة أكبر من الإشارة الأصلية $I_o$ أي أن،





$I_oGR_2GR_1 \geq Io$

$GR_2GR_1 \geq 1$ **

**This is the condition for the oscillator to become amplifier. i.e. the Gain for single round trip is ≥ 1**

**The gain is given by the function**

$$G(\nu) = e^{\gamma_o(\nu)l}$$

**Substitute for G in equation ** we get**

$$R_1R_2e^{2\gamma_o(\nu)l} \geq 1$$

$$e^{2\gamma_o(\nu)l} \geq \frac{1}{R_1R_2}$$

**This equation can be written as follow**

$$\gamma_o(\nu) \geq \frac{1}{2l}\ln\frac{1}{R_1R_2}$$

**الطرف الأيسر من العلاقة السابقة تمثل Gain per unit length والطرف الأيمن يمثل Losses per unit length**

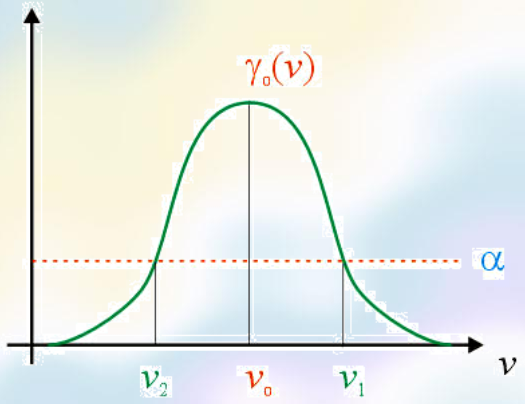
**لنفرض أن الرمز $\alpha$ يعبر عن مقدار الفقد في الإشارة لذا فإن**

$$\alpha = \frac{1}{2l}\ln\frac{1}{R_1R_2}$$

**نلاحظ أن الخسارة losses لا يعتمد على التردد وفي هذه الحالة يمكن تمثيل الخسارة على منحني الـ Gain كدالة في التردد بخط مستقيم كما في الشكل**








**لاحظ أنه ليس كل الترددات تحت منحني Gain يمكن أن تنتج ليزر ولكن فقط تلك الترددات التي تحقق الشرط الذي ينص على أن الحصيلة يجب أن تكون اكبر من أو يساوي الخسارة وهذا يتحقق في المدى الترددي $\nu_1$-$\nu_2$ كما موضح في الشكل أعلاه**

من معلوماتنا السابقة عن دالة الـ **Gain** أنه يمكن التعبير عنها بثابت مضروباً في دالة **line shape function** كما يلي:

$$\gamma_o(\nu) = C\, g(\nu)$$

وحيث ان أكبر قيمة للـ **Gain** تكون عند التردد $\nu_o$

$$\gamma_o(\nu_o) = C\, g(\nu_o)$$

**Divide both equations we get**

$$\gamma_o(\nu) = \gamma_o(\nu_o)\frac{g(\nu)}{g(\nu_o)} \quad ***$$





**For homogenous broadening** **g($\nu$) is given by**

$$g(\nu) = \frac{\Delta\nu}{2\pi[(\nu-\nu_o)^2 + (\Delta\nu/2)^2]}$$

$$g(\nu_o) = \frac{2}{\pi\Delta\nu}$$

**Substitute for g($\nu$) and g($\nu_o$) in equation *** we get**

$$\gamma_o(\nu) = \gamma_o(\nu_o)\frac{g(\nu)}{g(\nu_o)} \quad ***$$

$$\gamma_o(\nu) = \gamma_o(\nu_o)\frac{(\Delta\nu/2)^2}{(\nu-\nu_o)^2 + (\Delta\nu/2)^2}$$

$$\gamma_o(\nu) = \gamma_o(\nu_o)\frac{(\Delta\nu/2)^2}{(\nu-\nu_o)^2+(\Delta\nu/2)^2}$$

وهذه المعادلة تعطي الـ **Gain** عند أي تردد بدلالة الـ **Gain** عند التردد $\nu_o$

**For the laser action the gain at frequency $\nu_o$ should be grater than the losses $\alpha$ ,i.e.**

سنقوم في الخطوات التالية بإيجاد المدى الترددي الذي **Bandwidth for the laser** يتحقق فيه شرط الحصول على الليزر وعلاقته باتساع منحنى الـ **Δv Gain**

$$\frac{\gamma_o(\nu_o)}{\alpha} > 1$$

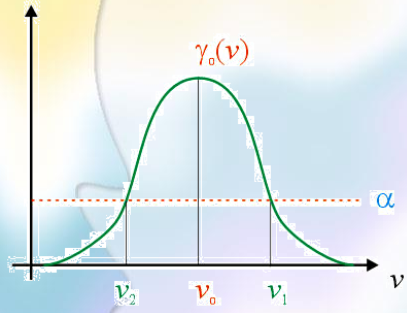
$$\frac{\gamma_o(\nu_o)}{\alpha} = N \qquad N > 1$$





حيث أن **N** عدد صحيح يعبر عن النسبة بين مقدار الحصيلة عند التردد $\nu_o$ إلى الخسارة، ويكون مقدار الخسارة **losses** هو

$$\alpha = \frac{\gamma_o(\nu_o)}{N}$$




**From the figure $\alpha = \gamma_o(\nu_1)$**

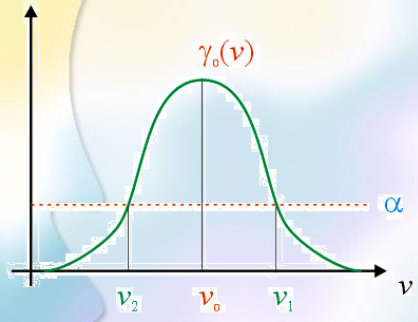
$$\gamma_o(\nu_1) = \gamma_o(\nu_o)\frac{(\Delta\nu/2)^2}{(\nu_1-\nu_o)^2+(\Delta\nu/2)^2}$$

$$\alpha = \gamma_o(\nu_1) = \frac{1}{N}\gamma_o(\nu_o)$$

$$\frac{1}{N}\gamma_o(\nu_o) = \gamma_o(\nu_o)\frac{(\Delta\nu/2)^2}{(\nu_1-\nu_o)^2+(\Delta\nu/2)^2}$$

$$\nu_1 - \nu_o = \frac{\Delta\nu}{2}(N-1)^{1/2}$$

$$\nu_1 - \nu_2 = 2(\nu_1 - \nu_o) = \Delta\nu(N-1)^{1/2}$$




كما هو موضح في الشكل

$$\nu_1 - \nu_2 = \Delta\nu\sqrt{(N-1)}$$

المدى الترددي لمكبر الليزر Bandwidth for the laser action





## المدى الترددي لمكبر الليزر Bandwidth for the laser action

المدى الترددي لمكبر الليزر Bandwidth for the laser action

$$\nu_1 - \nu_2 = \Delta\nu\sqrt{(N-1)}$$

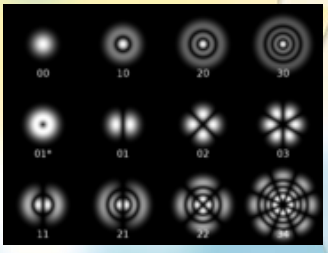
كلما كبرت قيمة N كلما كانت الحصيلة أكبر من الخسارة وهذا أفضل لكفاءة الليزر وعندما تكون N=2 يكون المدى الترددي لليزر مساوياً لاتساع منحنى Δv Gain وعندها تكون الحصيلة ضعف قيمة الخسارة، وعندما تكون N=1 تكون الحصيلة تساوي الخسارة ويكون المدى الترددي في هذه الحالة مساوياً للصفر $\nu_2 - \nu_1 = 0$

عندما تكون N اقل من 1 فإن المقدار تحت الجذر يصبح سالباً وهذا ليس له معنى فيزيائي ولا يمكن على الإطلاق الحصول على ليزر في هذه الحالة حيث تصبح الخسارة أكبر من الحصيلة.

Physics Academy

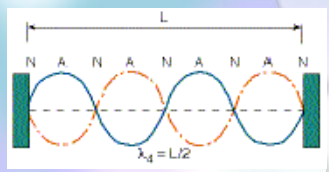
Al-Azhar University - Gaza

# Laser Physics




## Laser Modes

Lecture 10




**Dr. Hazem Falah Sakeek**
www.hazemsakeek.com
www.physicsacademy.org

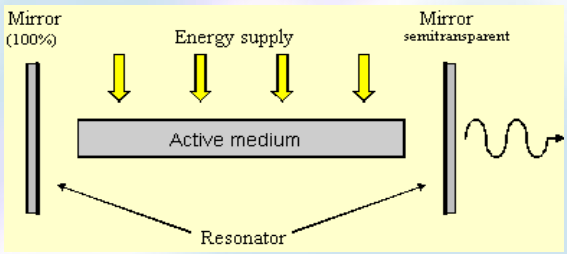


## Laser Modes أنماط الليزر

علمنا من المحاضرات السابقة أنه للحصول على الليزر نستخدم التغذية العكسية بواسطة المرايا وذلك لتكبير الشعاع الضوئي خلال مروره بالوسط المشع لليزر، لهذه المرايا دور في التأثير على الإشعاع الكهرومغناطيسي داخل المكبر حيث ينتج نوعين من الأنماط تعرف بالأنماط الطولية **longitudinal modes** والأنماط المستعرضة **transverse modes**

**Longitudinal modes** only specific frequencies are possible inside the optical cavity of a laser, according to standing wave condition.

**Transverse modes** are created in cross section of the beam, perpendicular to the optical axis of the laser.



# Longitudinal modes (Axial Modes)

Using **Fabry-Perot interferometer** one can observe that the output of the laser beam consists of a number of discrete frequency components. **These modes are known as longitudinal modes or axial modes.** These modes are created inside the optical resonator between the two mirrors.

إن السبب يعود في تكون هذه الأنماط يعود إلى تكون أمواج موقوفة بين المرآتين. وكما نعلم أن الأمواج الموقوفة تتكون **standing wave** نتيجة لتداخل موجتين لهما نفس التردد وتنتشران في اتجاهين متعاكسين في المسافة بين المرآتين. وكمثال على هذه الأمواج الوتر الموسيقي في الجيتار.





# Standing waves in a laser

**In a laser an optical cavity is created by two mirrors at both ends of the laser.**

**These mirrors serve two goals:**

1. **They increase the length of the active medium, by making the beam pass through it many times.**
2. **They determine the boundary conditions for the electromagnetic fields inside the laser cavity.**

**The axis connecting the centers of these mirrors and perpendicular to them is called Optical Axis of the laser. The laser beam is ejected out of the laser in the direction of the optical axis.**

**An electromagnetic wave which move inside the laser cavity from right to left, is reflected by the left mirror, and move to the right until it is reflected from the right mirror, and so on.**

# Conditions for Standing Waves

**Two waves of the same frequency and amplitude are moving in opposite directions, which is the condition for creating a standing wave.**

**standing waves, must fulfill the condition:**

$$L = q\,\lambda_q/2$$

**L = Length of the optical cavity.**

**q = Number of the mode, which is equal to the number of half wavelengths inside the optical cavity. The first mode contains half a wavelength, the second mode 2 halves (one) wavelength.**

**$\lambda_q$ = Wavelength of mode m inside the laser cavity.**

**In fact the number of modes (q) in most laser is very large. For Example if the central wavelength is 500nm and the mirror separation is 25cm , q has a value of 1000000, since q can be any integer, there are many possible wavelengths within the laser transition shape.**





**Example: The length of an optical cavity is 25 cm. Calculate the frequencies $\nu_q$ and wavelengths $\lambda_q$ of the following modes:**

1. **q =1**
2. **q = 10**
3. **q = 100**
4. **q = $10^6$**

| | $\lambda_q = \frac{2L}{q}$ | $\nu_q = q\frac{C}{2L}$ |
|---|---|---|
| 1 | $\lambda_1 = 2\cdot\frac{0.25}{1} = 0.5$ | $\nu_1 = 6*10^8$ [Hz] Radio Wave |
| 2 | $\lambda_{10} = 2\cdot\frac{0.25}{10} = 0.05$ | $\nu_2 = 6*10^9$ [Hz] Short Wave Communication |
| 3 | $\lambda_{100} = 2\cdot\frac{0.25}{100} = 5\cdot10^{-3}$ | $\nu_3 = 6*10^{10}$ [Hz] Microwaves |
| 4 | $\lambda_{10^6} = 2\cdot\frac{0.25}{10^{-7}} = 0.5\cdot10^{-6}$ | $\nu_4 = 6*10^{14}$ [Hz] Green Color |

# The separation between axial modes

**If the First mode is q**
**Then**

$$L = q\,\lambda_q / 2$$

**If the Second mode is q+1**
**Then**

$$L = (q+1)\,\lambda_{q+1} / 2$$

**It is more convenient to refer to the axial modes by their frequency**

$$\nu_q = \frac{C}{\lambda_q} = q\frac{C}{2L}$$

$$\nu_{q+1} = \frac{C}{\lambda_{q+1}} = (q+1)\frac{C}{2L}$$

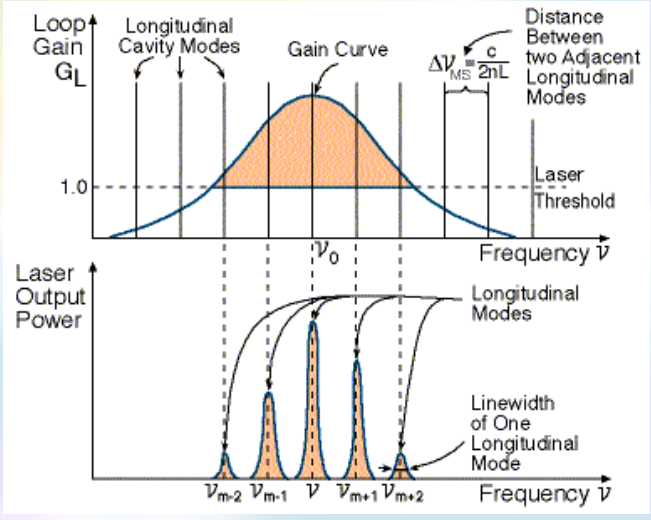
$$\nu_{q+1} - \nu_q = \frac{C}{2L}(q+1-q) = \boxed{\frac{C}{2L}}$$

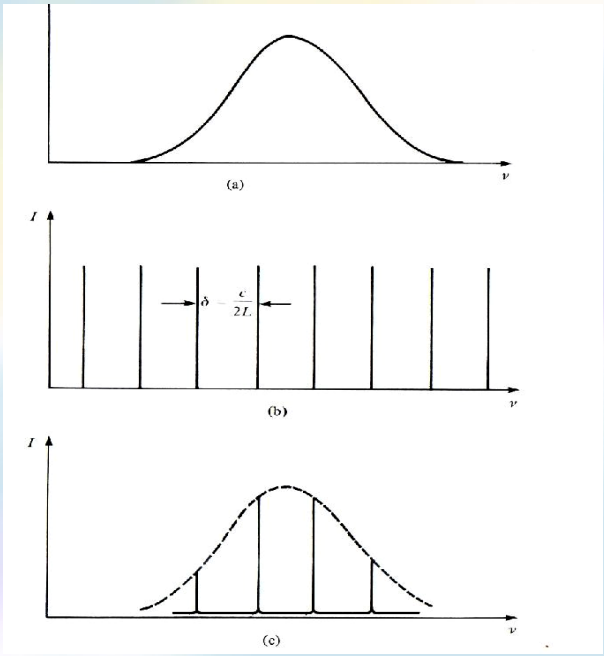




**The separation between neighboring frequencies is equal to C/2L *i.e.* dependent only on the separation between mirrors and independent of q.**

**For L=25cm The separation between neighboring frequencies is $6\times10^{8}\,sec^{-1}$.**










# ملاحظات

تزداد عدد الأنماط تحت منحنى الحصيلة كلما زاد طول مكبر الليزر L وذلك لأن الفاصل بين الأنماط يقل بزيادة L

It is clear that a single mode laser can be made by reducing the length of the cavity, such that only one longitudinal mode will remain under the fluorescence curve with $G_L$>1.

عدد الأنماط التي يمكن أن تنتج ليزر تلك التي يتحقق عندها شرط الحصيلة أكبر من أو يساوي الخسارة كما هو واضح في المنطقة الملونة في الشكل أعلاه.

للحصول على عدد الأنماط التي يمكن أن تكبر تحت منحنى الحصيلة نقسم Laser bandwidth على المسافة بين نمطين C/2L

The approximate number of possible laser modes is given by the width of the Laser bandwidth divided by the distance between adjacent modes:

# Example

The length of the optical cavity in He-Ne laser is 30 cm. The emitted wavelength is 0.6328 μm. Calculate:

1. The difference in frequency between adjacent longitudinal modes.
2. The number of the emitted longitudinal mode at this wavelength.
3. The laser frequency.





# Solution

1. The equation for difference in frequency is the same as for the basic mode:

$(\Delta\nu)=C/(2L)= 3*10^8$ m/s/(2*0.3 m)$=0.5*10^9$ Hz=0.5 GHz

2. From the equation for the wavelength of the $q_{th}$ mode:

$\lambda_q = 2L/q$

$q = 2L/\lambda_q = 2*0.3$ [m]$/0.6328*10^{-6}$ [m ] $= 0.948*10^6$

which means that the laser operate at a frequency which is almost a million times the basic frequency of the cavity.

**3. The laser frequency can be calculated in two ways:**

**a) By multiplying the mode number from section 2 by the basic mode frequency:**

$\nu = q*(\Delta\nu) = (0.948*10^6)(0.5*10^9\ Hz) = 4.74*10^{14}\ Hz$

**b) By direct calculation:**

$\nu = c/\lambda = 3*10^8\ m/s/0.6328*10^{-6}\ m = 4.74*10^{14}\ Hz$





# Example

**The length of the optical cavity in He-Ne laser is 55cm. The Laser bandwidth is 1.5 GHz. Find the approximate number of longitudinal laser modes.**

**Solution**

**The distance between adjacent longitudinal modes is:**

$\Delta\nu = c/(2L) = (3*10^8\ m/s)/(2*0.55\ m) = 2.73*10^8\ s = 0.273\ GHz$

**The approximate number of longitudinal laser modes:**

**N = Laser bandwidth $/\Delta\nu$ = 1.5 GHz/0.273 GHz = 5.5 ≈ 5**

## The importance of Longitudinal Optical Modes at the Output of the Laser

The importance of Longitudinal modes of the laser is determined by the specific application of the laser.

1. In most high power applications for material processing or medical surgery, the laser is used as a mean for transferring the energy to the target. Thus there is no importance for the longitudinal laser modes.
2. In applications where interference of electromagnetic radiation is important, such as holography or interferometric measurements, the longitudinal modes are very important.
3. In spectroscopic and photochemical applications, a very defined wavelength is required. This wavelength is achieved by operating the laser in single mode, and than controlling the length of the cavity, such that this mode will operate at exactly the required wavelength. The structure of longitudinal laser modes is critical for these applications.
4. When high power short pulses are needed, mode locking is used. This process causes constructive interference between all the modes inside the laser cavity. The structure of longitudinal laser modes is important for these applications.

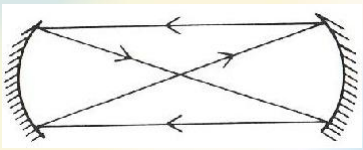


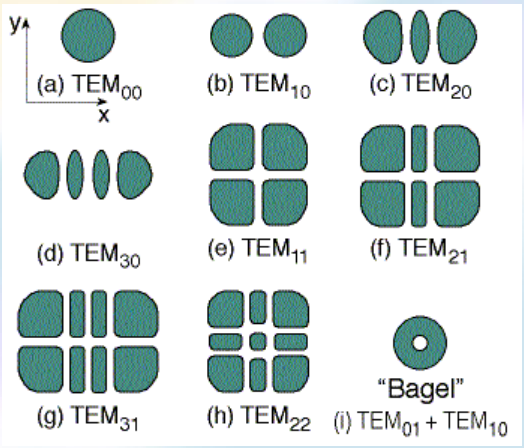


## Transverse modes

بدراسة توزيع شدة أشعة الليزر على مساحة المقطع عمودياً على المحور الضوئي لليزر Optical axis laser وجد أنها تأخذ أشكال مختلفة تعتمد على دقة موقع المرايا وأي تغير طفيف يؤدي إلى تغيير هذه الأشكال والتي تعرف بالأنماط المستعرضة Transversal Mode

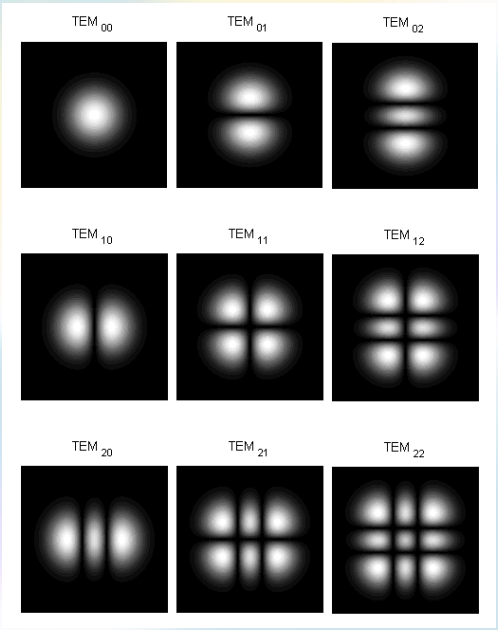
بإسقاط شعاع ليزر على شاشة بيضاء بعد تكبيره بواسطة عدسة مفرقة يمكن فحص الأنماط المستعرضة لشعاع الليزر. والشكل التالي يوضح مجموعة من هذه الأشكال حيث يبين اللون الأخضر اكبر شدة لليزر والمناطق البيضاء ينعدم فيها الليزر.




y
x
(a) TEM00
(b) TEM10
(c) TEM20
(d) TEM30
(e) TEM11
(f) TEM21
(g) TEM31
(h) TEM22
"Bagel"
(i) TEM01 + TEM10



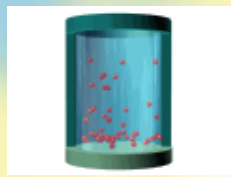



TEM 00
TEM 01
TEM 02
TEM 10
TEM 11
TEM 12
TEM 20
TEM 21
TEM 22

Physics Academy

Al-Azhar University - Gaza

# Laser Physics



## Population Inversion

Lecture 12

**Dr. Hazem Falah Sakeek**
www.hazemsakeek.com
www.physicsacademy.org



## Population Inversion انقلاب التعداد

انقلاب التعداد شرط رئيسي لعملية الانبعاث الاستحثاثي **stimulated emission** اللازم لتكبير الضوء، وانقلاب التعداد هو توزيع للذرات على مستويات الطاقة يختلف عن التوزيع في حالة الاتزان الحراري **thermal equilibrium** الخاضع لإحصائيات ماكسويل بولتزمان، ولتوضيح فكرة انقلاب التعداد سوف نقوم بشرح مختصر للتوزيع في حالة الاتزان الحراري.

### Thermal Equilibrium

**From thermodynamics we know that a collection of atoms, at a temperature T [$^0$K], in thermodynamic equilibrium with its surrounding, is distributed so that at each energy level there is on the average a certain number of atoms.**

**The number of atoms ($N_i$) at specific energy level ($E_i$) is called Population Number.**

The **Boltzmann equation** determines the relation between the **population number** of a specific energy level and the temperature:

$$N_i = \text{const} * \exp(-E_i/kT)$$

$N_i$ = **Population Number** = number of atoms per unit volume at certain energy level $E_i$.

k = **Boltzmann constant**: $k = 1.38*10^{23}$ [Joule/$^0$K].

$E_i$ = **Energy of level i**. We assume that $E_i > E_{i-1}$.

**Const** = proportionality constant. **It is not important when we consider population of one level compared to the population of another level.**

**T = Temperature in degrees Kelvin** [$^0$K] (**Absolute Temperature**).





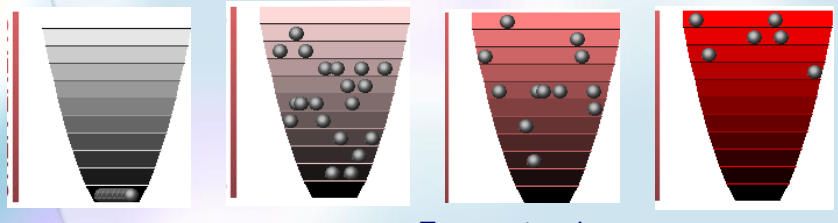
The Boltzmann equation shows the dependence of the population number ($N_i$) on the energy level ($E_i$) at a temperature T.

From this equation we see that:

1. The higher the temperature, the higher the population number.
2. The higher the energy level, the lower the population number.

## الاتزان الحراري

عند درجات الحرارة المنخفضة تكون كل الذرات في المستوى الأرضي وبزيادة درجة الحرارة (بتحريك المؤشر لليمين تثار الذرات لمستويات طاقة اعلي وهذا خاضع لقانون ماكسويل بولتزمان الإحصائي عند الاتزان الحراري.



## Relative Population ($N_2/N_1$)

The relative population ($N_2/N_1$) of two energy levels $E_2$ compared to $E_1$ is:

$$N_2/N_1 = \text{const}^* \exp(-E_2/kT) / \text{const}^* \exp(-E_1/kT)$$

$$N_2/N_1 = \exp(-(E_2-E_1)/kT)$$

The proportionality constant (const) is canceled by division of the two population numbers.

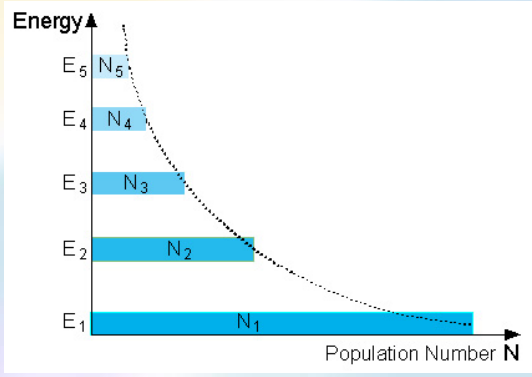
**Conclusions:**

1. The relation between two population numbers ($N_2/N_1$) does not depend on the values of the energy levels $E_1$ and $E_2$, but only on the difference between them: $E_2 - E_1$.
2. For a certain energy difference, the higher the temperature, the bigger the relative population.





**The Figure below shows the population of each energy level at thermal equilibrium.**




*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°K), and the difference between the energy levels is 0.5 [eV]. What is the wavelength ($\lambda$) 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:**

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

$$= 4 * 10^{-9}$$

**ومن هذه النتيجة يتبين لنا أنه عند درجة حرارة الغرفة يكون التعداد في مستوي الطاقة الأرضي الف مليون ذرة في حين التعداد في المستوي الأول 4 ذرات فقط!!!**





**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.**

# Population Inversion

We saw that in a thermal equilibrium Bolzman equation shows us that :

$$N_1 > N_2 > N_3$$

Thus, the population numbers of higher energy levels are smaller than the population numbers of lower ones.

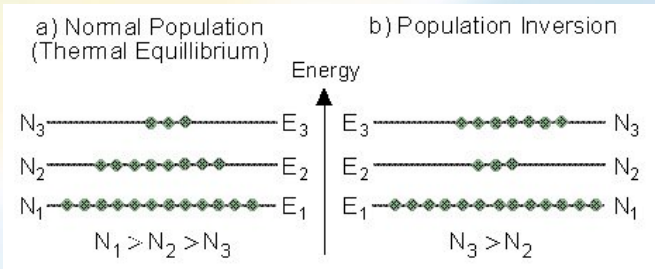
This situation is called "Normal Population". In a situation of normal population a photon impinging on the material will be absorbed, and raise an atom to a higher level.

By putting energy into a system of atoms, we can achieve a situation of "Population Inversion". In population inversion, at least one of the higher energy levels has more atoms than a lower energy level.





An example is described in the Figure. In this situation there are more atoms ($N_3$) in an higher energy level ($E_3$), than the number of atoms ($N_2$) in a lower energy level ($E_2$).



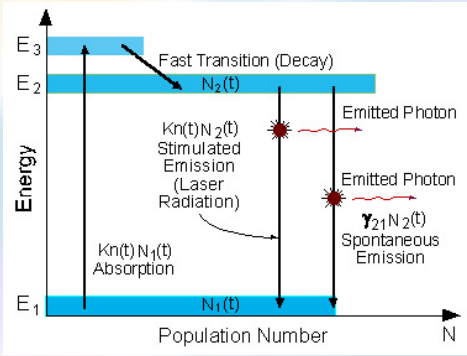

*"Normal Population" compared to "Population Inversion".*

The process of raising the number of excited atoms is called "Pumping".

# Three Level Laser

A schematic energy level diagram of a laser with three energy levels is the figure below.

The two energy levels between which lasing occur are: the lower laser energy level ($E_1$), and the upper laser energy level ($E_2$).




*Energy level diagram in a three level laser*





To achieve lasing, energy must be pumped into the system to create population inversion. So that more atoms will be in energy level $E_2$ than in the ground level ($E_1$).

Atoms are pumped from the ground state ($E_1$) to energy level $E_3$. They stay there for an average time of $10^{-8}$ [sec], and decay (usually with a non-radiative transition) to the meta-stable energy level $E_2$.

Since the lifetime of the meta-stable energy level ($E_2$) is relatively long (of the order of $10^{-3}$ [sec], many atoms remain in this level.

If the pumping is strong enough, then after pumping more than 50% of the atoms will be in energy level $E_2$, a population inversion exists, and lasing can occur.

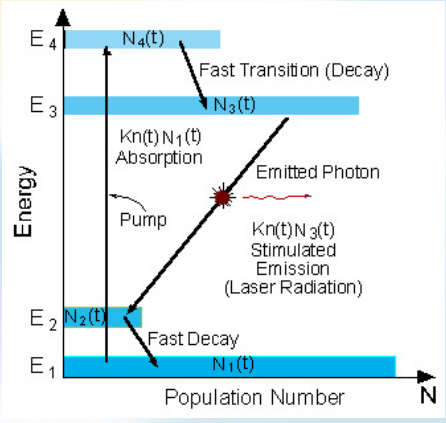
**Question**

The condition of high pumping, limits the operation of a three level laser to pulsed operation. Why is continuous operation impossible in a three level laser?

# Four Level Laser

The schematic energy level diagram of a four level laser is shown in the figure below.

Compared to the equivalent diagram of a three level laser, there is an extra energy level above the ground state. This extra energy level has a very short lifetime.




*Energy level diagram in a four level laser*







The pumping operation of a four level laser is similar to the pumping of a three level laser. This is done by a rapid population of the upper laser level ($E_3$), through the higher energy level ($E_4$).

The advantage of the four level laser is the low population of the lower laser energy level ($E_2$).

To create population inversion, there is no need to pump more than 50% of the atoms to the upper laser level.

The population of the lower laser level ($N_2(t)$) is decaying rapidly to the ground state, so practically it is empty. Thus, a continuous operation of the four level laser is possible even if 99% of the atoms remain in the ground state (!)

**Advantages of four level lasers Compared to three level lasers:**

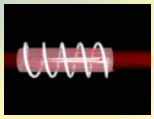
- The lasing threshold of a four level laser is lower.
- The efficiency is higher.
- Required pumping rate is lower.
- Continuous operation is possible.

**Summary**

In a three level laser the lower laser level is the ground state.
In a four level laser the lower laser level is above the ground state.

Physics Academy

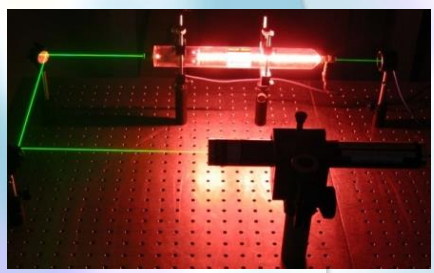
Al-Azhar University - Gaza



# Laser Physics

## Round trip gain with losses

## Lecture 13



**Dr. Hazem Falah Sakeek**
www.hazemsakeek.com
www.physicsacademy.org



## Round trip gain with losses

درسنا في محاضرات سابقة الحصيلة الناتجة عن دورة كاملة لليزر خلال المادة، وعلمنا أن انقلاب التعداد شرط أساسي لكي يستمر الحصول على ليزر ولكن الفقد الناتج عن عدة عوامل يسبب في نقصان الحصيلة. ولكي نحصل على ليزر فإن الحصيلة لكل دورة يجب أن تكون على الأقل أكبر من الخسارة في كل دورة. في هذه المحاضرة سنركز على العلاقة بين الحصيلة والخسارة.

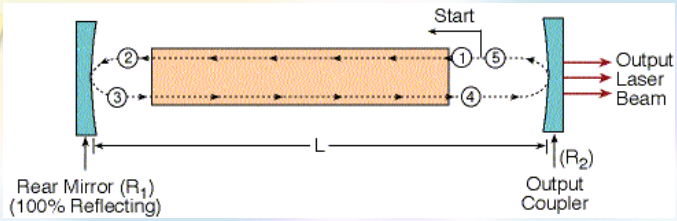
**The total losses of the laser system is due to a number of different processes these are:**

1. **Transmission at the mirrors**
2. **Absorption and scattering by the mirrors**
3. **Absorption in the laser medium**
4. **Diffraction losses at the mirrors**

**All these losses will contribute to reduce the effective gain coefficient to ($\gamma_o$- k)**

# Round trip Gain (G)

**Figure below show the round trip path of the radiation through the laser cavity. The path is divided to sections numbered by 1-5, while point "5" is the same point as "1".**




*Round trip path of the radiation through the laser cavity.*

**By definition, Round trip Gain is given by:**

$$G = I_5 / I_1$$

**G = Round trip Gain.**
**$I_1$ = Intensity of radiation at the beginning of the loop.**
**$I_5$ = Intensity of radiation at the end of the loop.**





# Gain (G) Without Losses

**From lecture (9) we found that the intensity after one round trip is given by the equation**

$$I_5 = R_1 * R_2 * G^2 * I_1$$

Physics Academy

# Gain (G) With Losses

We assume that the losses occur uniformly along the length of the cavity (L). In analogy to the Lambert formula for losses, we define loss coefficient ($\alpha$), and using it we can define absorption factor k:

$$k = e^{(-2\alpha L)}$$

k = Loss factor, describe the relative part of the radiation that remain in the cavity after all the losses in a round trip loop inside the cavity.

All the losses in a round trip loop inside the cavity are 1-k (always less than 1).

$\alpha$ = Loss coefficient (in units of 1 over length).

2L = Path Length, which is twice the length of the cavity.



Physics Academy

Adding the loss factor (k) to the equation of $I_5$:

$$I_5 = R_1 * R_2 * G_A^2 * I_1 * k$$

From this we can calculate the round trip gain:

$$G = I_5/I_1 = R_1 * R_2 * G_A^2 * k$$

As we assumed uniform distribution of the loss coefficient ($\alpha$), we now define gain coefficient ($\gamma$), and assume active medium gain ($G_A$) as distributed uniformly along the length of the cavity.

$$G_A = e^{(+\gamma L)}$$

Substituting the last equation in the Loop Gain: $k = \exp(-2\alpha L)$

$$G = R_1 * R_2 * \exp(2(\gamma - \alpha)L)$$

$$G = R_1^* R_2^* \exp(2(\gamma-\alpha)L)$$

When the loop gain (G) is greater than 1 (G > 1), the beam intensity will *increase* after one return pass through the laser.

When the loop gain (G) is less than 1 (G < 1), the beam intensity will *decrease* after one return pass through the laser. laser oscillation decay, and no beam will be emitted.

**Conclusion:**

There is a threshold condition for amplification, in order to create oscillation inside the laser.

This Threshold Gain is marked with index "th".

$$G_{th} = 1$$

For continuous laser , the threshold condition is:

$$G_{th} = 1 = R_1 R_2 G_A^2 k = R_1^* R_2^* \exp(2(\gamma-\alpha)L)$$





# Example

Active medium gain in a laser is 1.05. Reflection coefficients of the mirrors are: 0.999, and 0.95. Length of the laser is 30cm. Loss coefficient is: $\alpha = 1.34*10^{-4}\ cm^{-1}$.

**Calculate:**

1. The loss factor k.
2. The round trip gain G.
3. The gain coefficient ($\gamma$).

# Solution

**1. The loss factor k:**

$$k = \exp(-2\alpha L) = \exp[-2(1.34*10^{-4})*30] = 0.992$$

**2. The Loop gain G:**

$$G = R_1 R_2 G_A^2 k = 0.999*0.95*1.052*0.992 = 1.038$$

Since $G_L > 1$, this laser operates above threshold.

**3. The gain coefficient ($\gamma$):**

$$G_A = \exp(\gamma L)$$
$$\text{Ln } G_A = \gamma L$$

$$\gamma = \text{Ln } G_A / L = \ln(1.05)/30 = 1.63*10^{-3}\ [\text{cm}^{-1}]$$

The gain coefficient ($\gamma$) is greater than the loss coefficient ($\alpha$), as expected.





# Example

Helium Neon laser operates in threshold condition. Reflection coefficients of the mirrors are: 0.999, and 0.97. Length of the laser is 50 cm. Active medium gain is 1.02.

**Calculate:**

1. The loss factor k.
2. The loss coefficient $\alpha$.

# Solution

Since the laser operates in threshold condition, $G_{th} = 1$.
Using this value in the round trip gain:

$$G_{th} = 1 = R_1 R_2 G_A^2 k$$

1. The loss factor k:

$$k = 1/( R_1 R_2 G_A^2) = 1/(0.999*0.97*1.02^2) = 0.9919$$

As expected, k < 1.

2. The loss coefficient ($\alpha$) is calculated from the loss factor:

$$k = \exp(-2\alpha L)$$

$$\ln k = -2\alpha L$$

$$\alpha = \ln k/(-2L) = \ln(0.9919)/(-100) = 8.13*10^{-5}\ [cm^{-1}]$$

**Attention:**

If the loss factor was less than 0.9919, then G < 1, and the oscillation condition was not fulfilled.





# Example

Reflection coefficients of the mirrors are: 0.999, and 0.95. All the losses in round trip are 0.6%.

Calculate the active medium gain.

# Solution

For finding the active medium gain $G_A$, the loss factor (k) must be found.

All the losses are 1-k.

$$1-k = 0.006$$
$$k = 0.994$$

Using this value in the threshold loop gain:

$$G_{th} = 1 = R_1 R_2 G_A^2 k$$

$$(G_A)_{th} = 1/\text{sqrt}(R_1 R_2 k) = 1/\text{sqrt}(0.999*0.95*0.994) = 1.03$$

The active medium gain must be at least 1.03 for creating continuous output from this laser.





# Summary

G = round trip Gain, determines if the output power of the laser will increase, decrease, or remain constant. It include all the losses and amplifications that the beam have in a complete round trip through the laser.

$$G_L = R_1 R_2 G_A^2 k$$

$R_1$, $R_2$ = Reflection coefficients of the laser mirrors.
$G_A$ = Active medium gain as a result stimulated emission.

$$G_A = \exp(+\gamma L)$$

$\gamma$ = Gain coefficient.
L = Active Medium length.

k = Optical Loss Factor in a round trip path in the laser cavity.

$$k = \exp(-2\alpha L)$$

$\alpha$ = Loss coefficient.

# Summary

When G = 1, The laser operate in a steady state mode, meaning the output is at a constant power. This is the threshold condition for lasing, and the active medium gain is:

$$(G_A)_{th} = 1/\text{sqrt}( R_1 R_2 k)$$

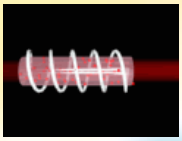
The round trip Gain is:

$$G_L = R_1 * R_2 * \exp(2(\gamma - \alpha)L)$$

Physics Academy

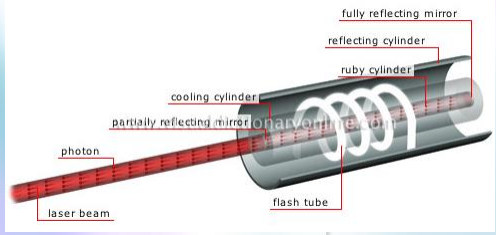
Al-Azhar University - Gaza

# Laser Physics



## Steady State Oscillation and Gain Saturation

## Lecture 14




**Dr. Hazem Falah Sakeek**
www.hazemsakeek.com
www.physicsacademy.org



## Population inversion and pumping threshold condition

From the equation of **small signal gain** one can conclude that the population inversion required for reaching the **lasing threshold**:

$$\gamma_o(\nu) = A_{21}\frac{\lambda^2}{8\pi}\left(N_2 - \frac{g_2}{g_1}N_1\right)g(\nu)$$

$$\left(N_2 - \frac{g_2}{g_1}N_1\right) = \frac{8\pi\,\gamma_o(\nu)}{A_{21}\lambda^2 g(\nu)}$$

At threshold the population inversion

$$\Delta N_{th} = \frac{8\pi\,\gamma_{th}(\nu)\,\tau_{21}}{\lambda^2 g(\nu)}$$

Note that the lasing threshold will be readily when g(*v*) is maximum at $v = v_o$ corresponding to the center of the natural linewidth.

$$g(v_o) = \frac{1}{\Delta \upsilon}$$

$$\Delta N_{th} = \frac{8\pi \gamma_{th}(v)\tau_{21}\Delta \upsilon}{\lambda^2}$$





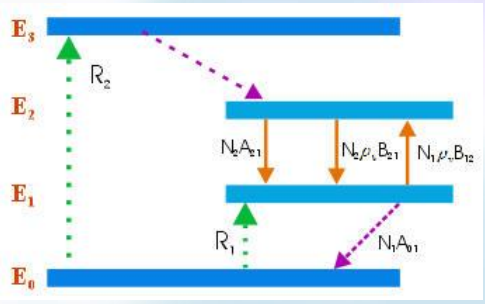
# Pumping power required to reach threshold condition

To find the power required for a 4-level laser system to reach the threshold we will use the rate equations.

First we assume that $E_1 >> KT$ so the thermal population of the energy level 1 is negligible.

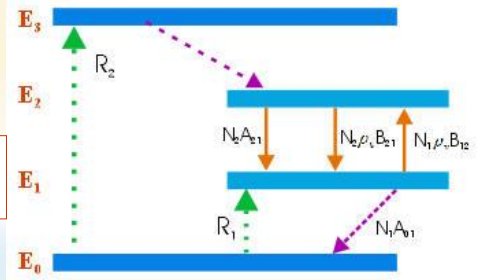
Second we assume that the population of the ground state does not change during lasing action.

$R_1$ and $R_2$ are the rate of pumping then the rate equation for the population for the change in $N_2$ and $N_1$



$$\frac{dN_2}{dt} = R_2 - N_2A_{21} - \rho_\nu B_{21}(N_2 - N_1)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = R_1 + \rho_\nu B_{21}(N_2 - N_1) + N_2A_{21} - N_1A_{10}$$




**In steady state condition $dN_2/dt = dN_1/dt = 0$ ( we assumed that $g_1=g_2$ and $R_1=0$)**

**By solving the above two rate equations we get**

$$N_1 = R_2 / A_{21}$$

$$N_2 = R_2\left[1 + \frac{\rho_\nu B_{21}}{A_{10}}\right](A_{21} + \rho_\nu B_{21})^{-1}$$

**and hence**

$$N_2 - N_1 = R_2\left(\frac{1 - A_{21}/A_{10}}{A_{21} + \rho_\nu B_{21}}\right)$$





$$N_2 - N_1 = R_2\left(\frac{1 - A_{21}/A_{10}}{A_{21} + \rho_\nu B_{21}}\right)$$

**For population inversion $A_{21}<A_{10}$ or $T_{21}>T_{10}$ (The upper lasing level has a longer spontaneous emission life time than the lower level.**

**In most laser $T_{21}>>T_{10}$ and hence $(1 - A_{21}/A_{10}) \cong 1$**

**At threshold**

**At threshold the radiation density $\rho_\nu$ is very small and we can assume that ($\rho_\nu=0$)**

$$(N_2 - N_1)_{th} = \Delta N_{th} = R_{th}\left(\frac{1 - A_{21}/A_{10}}{A_{21}}\right) \quad *$$

**In steady state**

**In steady state situation the gain becomes equal to the losses then we can write**

$$\Delta N_{th} = \frac{R(1 - A_{21}/A_{10})}{A_{21} + \rho_v B_{21}} \quad **$$

$$(N_2\text{-}N_1)_{ss} = (N_2\text{-}N_1)_{th}$$

**From equations * & ** we get**

$$\frac{R_{th}}{A_{21}} = \frac{R}{A_{21} + \rho_v B_{21}}$$

**and hence the radiation density $\rho_v$**

$$\rho_v = \frac{A_{21}}{B_{21}}\left(\frac{R}{R_{th}} - 1\right)$$

**This mean that the power output is directly proportional to the pumping power within the laser cavity**





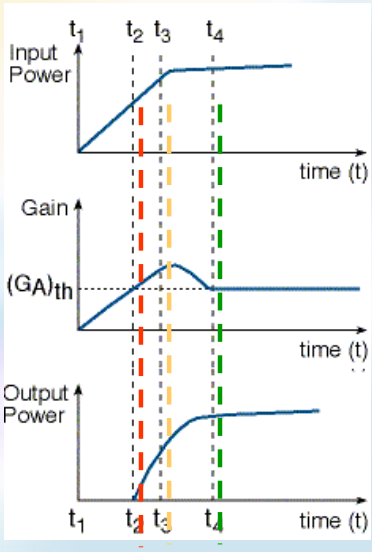
**At time $t_1$** the excitation mechanism is activated. As a result, the active medium gain and loop gain increase.

**At time $t_2$** the active medium gain is equal to the threshold gain, and the round trip gain is equal to 1. Lasing starts, and output power of the laser start to increase.

**At time $t_3$** the input power reaches its steady state (constant input power). The active medium gain is a little above threshold, and the round trip gain is a little above "1".

Output power from the laser continues to rise,

At until $t_4$ when it reaches its steady state value. Then the active medium gain is equal to the threshold gain, and the gain is equal to "1".




**علاقة كلا من pumping و Gain وpower laser power كدالة في الزمن**

# Gain saturation in homogeneously laser

In a continuous wave laser (CW Laser) at steady state lasing, the gain (G) is always "1".

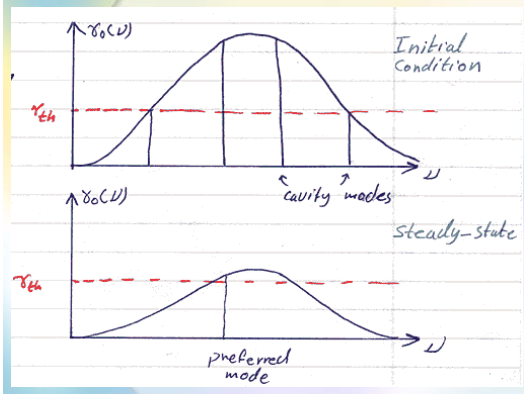
At this state, the gain value for each longitudinal laser mode is dropping from the value of the small signal gain to the threshold gain $G_{th}$, which is equal to the saturation gain.

Increasing pumping cause an increase in the output power of the laser. The system will stabilize on higher power when the net gain will be equal to the threshold gain.

The active medium gain depends on population inversion, and the width of the laser line shape. This gain is influenced by the lasing process itself, since lasing change the population inversion conditions. Stimulated emission causes depletion of the upper laser level, and reduces the population inversion. Thus, gain is reduced until pumping increase the upper level population again.








في الشكل الموضح أدناه نلاحظ ثلاثة أنماط اهتزازية تحت منحنى الحصيلة يتحقق عندها شرط أن الحصيلة اكبر من أو يساوي الخسارة. وحيث أن شعاع الليزر يتولد نتيجة لعملية الانبعاث الاستحثاثي stimulated emission ، والتي بدورها تقلل من فارق التعداد وهذا سيؤدي بمنحنى الحصيلة إلى النقصان حتى يصل إلى حد الحالة الحرجة. أما بالنسبة للأنماط الاهتزازية الثلاثة فهي لكل منها تردد خاص وبنقصان منحنى الحصيلة يختل شرط الحصول على ليزر لبعض منها حتى لا يبقى إلى نمط اهتزازي واحد وهذا ما يعرف single mode laser.

# Conclusions

1. **The saturation gain of the active medium is equal to the threshold gain $G_{th}$.**

2. **Homogeneously broadened laser should automatically operates in a single mode once steady state is reached.**

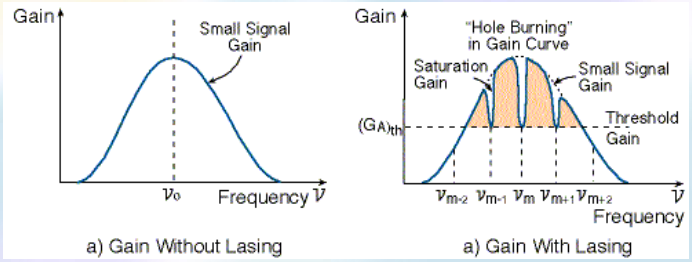




# Gain saturation in non-homogeneously laser

في حالة الليزر ذو الاتساع الغير متجانس فإن الأمر يكون مختلف تماماً لأنه يمكن التمييز بين مجموعة من الذرات ومجموعة أخرى من ناحية التردد المنبعث تحت منحنى الحصيلة، وعليه لأن إنتاج الليزر يؤدي إلى نقصان الحصيلة فقط عند الترددات التي يحدث عندها الليزر فقط أي عند الأنماط الاهتزازية التي يتحقق عندها شرط الحصيلة اكبر من الخسارة. وهذا سوف يحدث ما يسمى **hole burning** كما هو في الشكل أدناه.

**Conclusions**
Each moment, most of the energy stored inside the active medium is not used to create the radiation out of the laser




**The value of the saturation gain drops for each lasing mode, from the small signal gain to threshold gain $G_{th}$ This process is called "hole burning" in the gain curve.**

# Pulsed Laser

**Pulsed laser is pumped at high intensity for a short period of time.**

**As a result, the active medium gain, and the loop gain are much higher than for continuous wave laser, so the output power is higher.**

## Pulse Shape Out of a Pulsed Ruby Laser

**Figure below describes the shape of a single pulse out of a Ruby laser, compared to the pumping pulse from the flash lamp.**

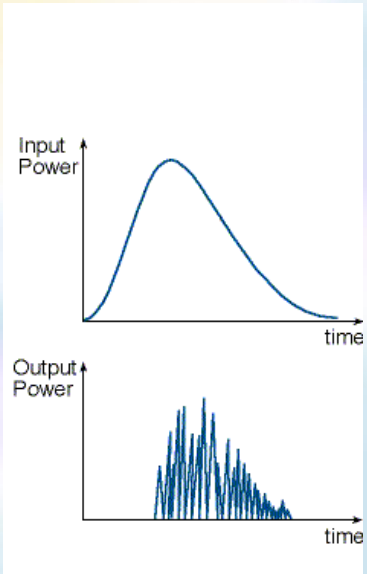




نعلم ان الضوء الصادر من الفلاش هنا يستخدم كوسيلة لقلب التعداد في بلورة (الياقوت) والشكل المقابل يوضح العلاقة بين شدة إضاءة الفلاش مع الزمن.

بالمقابل نلاحظ في الشكل الخاص بتغير شدة الليزر مع الزمن نلاحظ أن الشدة تتغير بين قيمة عظمى وصفر في خلال فترة بقاء ضوء الفلاش وهذا ما يعرف بظاهرة الشرارة Case Spiking.

لاحظ هنا ان الليزر يبدأ بعدة فترة زمنية محددة من بدأ الفلاش وهذه الفترة الزمنية لازمة للوسط ليصل إلى حالة الحصيلة أكبر من الخسارة.




*Single pulse out of a Ruby laser, compared to the pumping pulse from the flash lamp*

The output laser pulse is about 1 millisecond, and it is composed of hundreds or thousands of small pulses.

Each of the small pulses is called a spike, and last about a microsecond.

The spikes appear randomly in time, and differ from each other in its length and peak power.

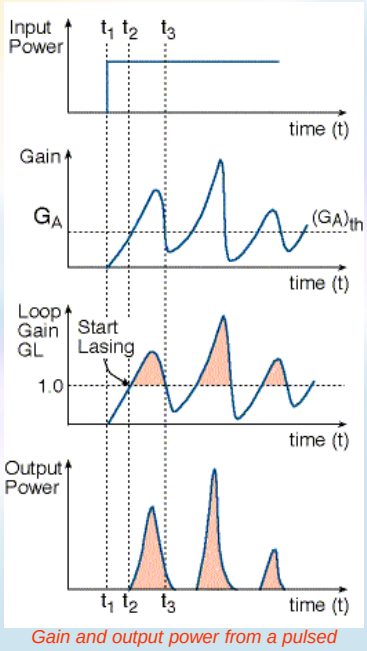




**Starting from $t_1$**, the active medium gain and the loop gain increase rapidly as a result of continuous strong pumping.

**At time $t_2$**, the active medium gain arrive to the threshold value, and the loop gain arrive to "1" - lasing starts. The active medium gain and loop gain continue to rise since the output power has not reach the saturation value that cause "hole burning" in the gain curve.

**Until time $t_3$**, the high value of the loop gain causes intense pulse of laser radiation. Thus, the active medium gain drops below the threshold value. When the loop gain is below "1", lasing stops, and the whole process starts again as long as the pumping continue.




*Gain and output power from a pulsed solid state laser.*

Each longitudinal laser mode starts at a different time, with a different photon.

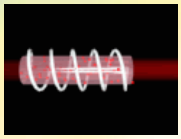
There is a competition between the longitudinal modes on the energy inside the active medium.

Thus, the random nature of the spikes: Each spike has its own peak power and duration.

Physics Academy

Al-Azhar University - Gaza

# Laser Physics



## Modifying the laser output

Lecture 15

Dr. Hazem Falah Sakeek
www.hazemsakeek.com
www.physicsacademy.org



## Modifying the laser output

درسنا في المحاضرات السابقة فكرة عمل الليزر والعوامل الأساسية التي بدونها لا يمكن الحصول على شعاع ليزر.

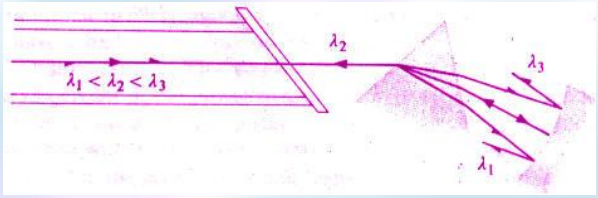
في هذه المحاضرة سنقوم بإلقاء الضوء على الطرق والأساليب المتبعة لتسخير شعاع الليزر للتطبيقات العملية. على سبيل المثال يستخدم الليزر لقطع المعادن واللحام وهذا يتطلب زيادة طاقة شعاع الليزر أو الحصول على شعاع ليزر يعمل بنمط محوري واحد لتطبيقات الدراسات الطيفية أو الاتصالات. وهذا سيكون موضح من خلال العناوين الأربعة التالية:

- **Selection of the laser emission lines**
- **Single-mode operation**
- **Q-Switching**
- **Mode Locking**

## Selection of the laser emission lines

نعلم أن الليزر ينتج من انتقال الذرات المثارة من مستويات الطاقة الأعلى إلى مستويات الطاقة الأقل وذلك إذا تحققت الشروط المطلوبة لتكون الحصيلة اكبر من الخسارة. وهذا قد يتحقق في المادة المنتجة لليزر لأكثر من تردد كما سنرى في المحاضرة القادمة **He-Ne Laser**

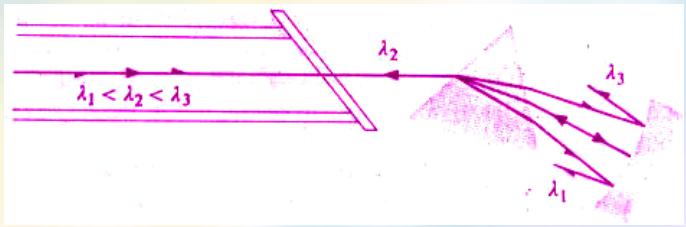
هنا نحن لا نتحدث على الأنماط المحورية تحت منحنى الحصيلة ولكن المقصود هو خطي ليزر أو أكثر مختلفين ولكل منهما تردد خاص ومنحنى حصيلة. وكلا من هذه الترددات سوف تكبر وتنتج ليزر عند أكثر من تردد في نفس الوقت.




يوضح الشكل كيف يمكن تكبير الطول الموجي $\lambda_2$ فقط باستخدام المنشور








للتغلب على هذه الظاهرة يتم استخدام منشور **Prism** بين المادة المنتجة لليزر والمرآة حيث أن لكل تردد زاوية انكسار خاصة حسب **Snell's Law** وبضبط وضع المنشور بحيث يكون التردد المراد تكبيره للحصول على ليزر عنده يسقط بزاوية قائمة على المرآة وبالتالي ينعكس على نفسه ليعود إلى المادة ويكبر، بينما الترددات الأخرى تنعكس خارج المادة المكبرة ولا تنتج ليزر. كما يمكن استخدام **Diffraction Grating** أو **Filters**

# Single-mode operation

يكون الضوء الناتج من ليزر يعمل عند نمط محوري أحادي اقرب ما يكون إلى المصدر الضوئي أحادي اللون. حيث أننا درسنا في المحاضرات الأولى موضوع اتساع الخط الطيفي نتيجة للعوامل متعددة وبهذا فإن الضوء أحادي اللون يكون له اتساع محدود، وهذا الاتساع يحدد مدى دقة مصطلح أحادي اللون **Monochromatic Light Source** واقل اتساع يمكن الحصول عليه من ليزر يعمل بنمط محوري واحد **Single mode operation.**

## كيف يمكن الحصول على Single mode laser ؟

تعتمد فكرة الحصول على ليزر يعمل بنمط محوري وحيد على زيادة المسافة بين الأنماط المحورية المتجاورة إلى مسافة تصل على الأقل مساوية لاتساع منحنى الحصيلة. وبهذا يكون النمط المحوري $q_0$ هو النمط المتحقق عنده شرط الحصيلة أكبر من الخسارة بينما الأنماط الأخرى $q_{0-1}$ أو $q_{0+1}$ تقع خارج منحنى الحصيلة.

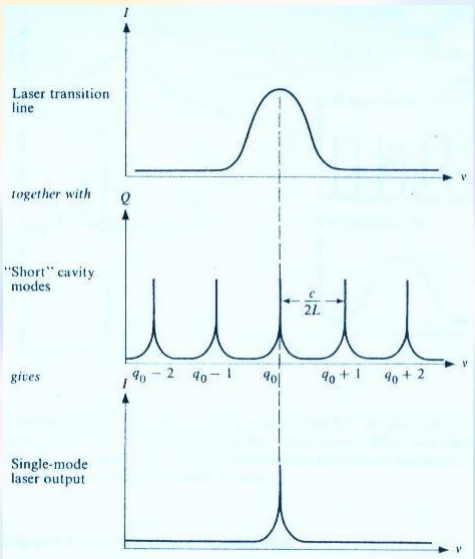




المسافة بين نمطين محوريين تعطى بالعلاقة $C/2L$ وبهذا يعني انه كلما قل **L** طول المكبر كلما زادت المسافة بين النمطين المحوريين. فإذا ما صمم المكبر بحيث يكون طوله يحقق الشرط

$$C/2L \geq \Delta\nu$$

لهذه الطريقة اثر على تقليل مادة المكبر وبالتالي طاقة الليزر ولكن تستخدم في تطبيقات تكون بحاجة إلى اقرب ما يكون للتردد أحادي اللون.



# Q-Switching

**تحتاج العديد من التطبيقات إلى طاقة عالية لليزر مثل التطبيقات الصناعية لليزر في اللحام والقطع ولزيادة طاقة الليزر نستخدم عدة طرق للحصول على Q-Switching حيث يتم التحكم في توقيت عملية الانبعاث الاستحثاثي عن طريق التحكم في مستوى الخسارة . كيف؟؟**

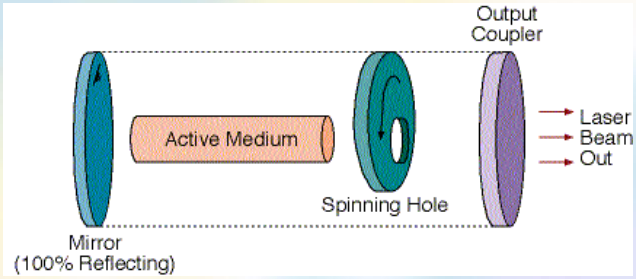
من المحاضرات السابقة لاحظنا أن نبضة الليزر المنبعثة من Ruby laser تحتوي على Spikes وهذا يعود إلى توالي حدوث الانبعاث الاستحثاثي والضخ لقلب التعداد خلال عملية الإثارة بواسطة Flash lamp والتي تستمر لفترة زمنية تصل إلى microseconds فإذا ما تم إيقاف الانبعاث الاستحثاثي خلال فترة الضخ الضوئي لزيادة الحصيلة يمكن الحصول على نبضة ليزر في فترة زمنية تصل إلى.Nanoseconds

## فكرة عمل الـ Q-Switching

تعتمد فكرة الـ Q-Switching على إيقاف مؤقت لليزر من خلال التحكم في مستوى الخسارة خلال عملية الضخ حتى يتم زيادة تعداد مستوى الليزر إلى اكبر قيمة ممكنة وهذا يعني زيادة الحصيلة إلى قيمة اكبر بكثير من القيمة الحرجة Threshold Gain. ثم نقوم بتقليل مستوى الخسارة إلى القيمة الأساسية وهذا سيؤدي إلى أن يكون الـ Gain أكبر بكثير من الـ Threshold فتحدث عملية الانبعاث الاستحثاثي في فترة زمنية قصيرة تنتج عنه نبضة ليزر ذات طاقة عالية.

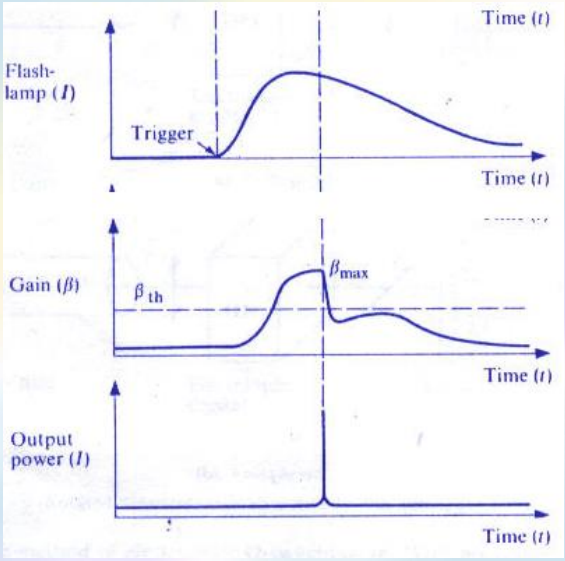







يوضح الشكل أعلاه فكرة التحكم بالخسارة حيث تم وضع قرص دائري به فتحة تدور بسرعة حول المحور الضوئي لليزر. فعندما تحجب الأشعة عن المرآة خلف القرص يتم زيادة التعداد وتكبير الحصيلة وذلك لأن مستوى الخسارة يعد كبير جداً وعند وصول الفتحة في القرص في مستوى المحور الضوئي تصبح الخسارة في أدنى مستوى لها بينما تزال الحصيلة في أعلى مستوى لها وهذا سيؤدي إلى انبعاث نبضة ليزر في فترة زمنية قصيرة مما يعني طاقة هائلة.

**Q-switch acts as a shutter that can be open suddenly inside the laser cavity**



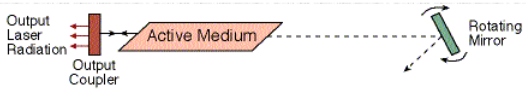

يوضح الشكل التالي التغير الزمني في كلاً من الـ **Flash Lamp** المستخدمة في انقلاب التعداد والمنحى الحصيلة ونبضة الليزر الناتجة.





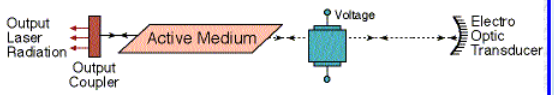
## طرق مختلفة للـ Q-Switching

**Turning mirror at the end of the optical cavity**



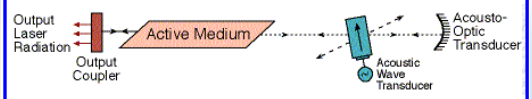

Only when the mirror is facing the other mirror, there is lasing. To increase the number of pulses per second, a special drum with many mirrors is turning. Thus for every turn of the drum, many pulses are emitted, since each mirror on the drum is facing the cavity separately.

**Electro-Optic transducer**



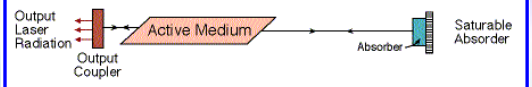

Change the transmission through the device by electric voltage.

**Acousto-Optic transducer**




Change the transmission through the device by acoustic signal

**Saturable absorber**




An absorber that becomes transparent when it reach saturation. It is usually a dye solution which prevents lasing by absorption. When the radiation arrives at a certain level, this absorber comes to saturation, and since it can no longer absorb radiation, it becomes transparent. At that moment lasing can occur, and all the stored energy inside the cavity is emitted as a single pulse.





# Mode Locking

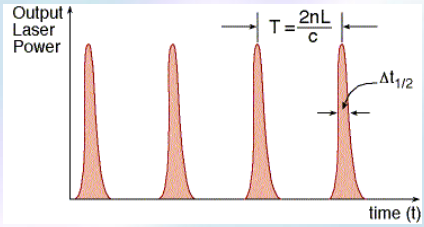
Locking the longitudinal optical modes inside the cavity is achieved by locking the relative phase of all the optical modes, such that at a certain point they all have the same phase.

At this point a constructive interference occur between all the laser modes, and the result is a single pulse, with very short width and very high peak power, which move between the mirrors of the cavity.

This moving pulse cause the laser output to be orderly chain of pulses.

The length of each pulse is from 1 psec ($10^{-12}$ sec), up to 1 nsec ($10^{-9}$ sec).

In figure the output laser radiation of a mode locked laser can be seen.




**Output laser radiation of a mode locked laser.**

## Mode Lock Optical Switch

The element locking the laser modes is an optical switch inside the cavity.

This switch is opened for a very short time equal to the length of the pulse, and than close for a period of time equal to the time of round trip of the pulse inside the cavity.

The location of the switch is near one of the end mirrors.

The switch allows the pulse to pass to the mirror and back, and than close to disable other pulses from building up.

The switch opens again when this particular pulse arrive again from the other mirror.

This is a synchronous switching which accumulates all the energy in a single pulse moving back and forth between the cavity mirrors. Each time it reaches the output coupler, a single pulse is emitted.

The mode locking is done with an Acousto-optical modulator, and the frequency of its operation is determined by the travel time of the pulse between the mirrors.





## Time Interval (T) between two Adjacent Pulses.

The time interval (T) between two adjacent pulses is the time of flight of the single pulse inside the cavity for a complete round trip:

$$T = 2L/C$$

L = Cavity length.

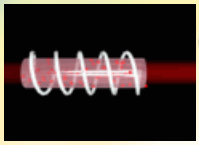
c = Velocity of light inside the active medium.

In a mode locked diode lasers, the pulse length can be a few picoseconds ($10^{-12}$ [s]), with pulse rate of hundreds of Gigahertz ($10^{11}$ [Hz]).

Physics Academy

Al-Azhar University - Gaza

# Laser Physics



## Laser System: He-Ne laser

## Lecture 16

Dr. Hazem Falah Sakeek
www.hazemsakeek.com
www.physicsacademy.org



## Laser System

درسنا في المحاضرات السابقة فكرة عمل الليزر بشكل عام مع التركيز على العوامل المؤثرة على الليزر. والآن سوف نخصص دراستنا على عدة أنظمة لليزر تختلف باختلاف المادة **Active medium** ويمكن تقسيم أنظمة الليزر إلى خمسة أقسام هي على النحو التالي:-

- The **state of matter of the active medium**: solid, liquid, gas, or plasma.
- The **spectral range of the laser wavelength**: visible spectrum, Infra-Red (IR) spectrum, etc.
- The **excitation (pumping) method of the active medium**: Optic pumping, Electric pumping, etc.
- The **characteristics of the radiation emitted from the laser**.
- The **number of energy levels which participate in the lasing process**.

سوف نعتمد على النوع الأول والذي يقسم الليزر حسب المادة **Active medium** والذي يحدد الخواص التالية:

- **Laser Wavelength.**
- **Preferred pumping method.**
- **Order of magnitude of the laser output.**
- **The efficiency of the laser system.**

We saw that the **two basic requirements for laser action** are:

- **Population Inversion** between the upper and lower laser energy levels.
- **The active medium must be transparent to the output wavelength.**

تجدر الإشارة هنا إلى أن **active medium** هي التي تحدد خواص الليزر ولهذا السبب تعود تسمية الليزر حسب المادة المستخدمة.





# Laser types

**[1] Gas lasers:**

**Atom Gas:**

- Helium-Neon Laser (He-Ne).
- Metal Vapor Laser (Copper, Gold).
- Helium Cadmium Laser (He-Cd).

**Ion Gas:**

- Argon Ion Laser ($Ar^+$).
- Krypton Laser ($Kr^+$).

**Molecular Gas:**

- Carbon Dioxide Laser ($CO_2$).
- Nitrogen Laser ($N_2$).
- Excimer Laser.
- Chemical Laser.
- Far Infra-Red Laser (FIR).

**[2] Solid State lasers:**

- Ruby Laser.
- Neodimium YAG and Nd Glass Laser.
- Color Center Laser.
- Titanium Sapphire Laser.
-

**[3] Diode Laser (Semiconductor Laser, Injection Laser).**

**[4] Dye Laser (Liquid).**

**[5] Special Lasers:**

- Free Electron Laser (FEL).
- X Ray Laser.

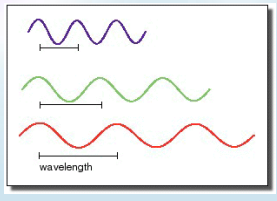




## WAVELENGTHS OF MOST COMMON LASERS

| | |
|---|---|
| Argon fluoride (Excimer-UV) | 0.193 |
| Krypton chloride (Excimer-UV) | 0.222 |
| Krypton fluoride (Excimer-UV) | 0.248 |
| Xenon chloride (Excimer-UV) | 0.308 |
| Xenon fluoride (Excimer-UV) | 0.351 |
| Helium cadmium (UV) | 0.325 |
| Nitrogen (UV) | 0.337 |
| Helium cadmium (violet) | 0.441 |
| Krypton (blue) | 0.476 |
| Argon (blue) | 0.488 |
| Copper vapor (green) | 0.510 |
| Argon (green) | 0.514 |
| Krypton (green) | 0.528 |
| Frequency doubled Nd YAG (green) | 0.532 |
| Helium neon (green) | 0.543 |
| Krypton (yellow) | 0.568 |
| Copper vapor (yellow) | 0.570 |
| Helium neon (yellow) | 0.594 |
| Helium neon (orange) | 0.610 |
| Gold vapor (red) | 0.627 |
| Helium neon (red) | 0.633 |
| Krypton (red) | 0.647 |
| Rohodamine 6G dye (tunable) | 0.570-0.650 |
| Ruby ($CrAlO_3$) (red) | 0.694 |
| Gallium arsenide (diode-NIR) | 0.840 |
| Nd:YAG (NIR) | 1.064 |
| Helium neon (NIR) | 1.15 |
| Erbium (NIR) | 1.504 |
| Helium neon (NIR) | 3.39 |
| Hydrogen fluoride (NIR) | 2.70 |
| Carbon dioxide (FIR) | 9.6 |
| Carbon dioxide (FIR) | 10.6 |

Key: UV = ultraviolet (0.200-0.400 $\mu$m)
VIS = visible (0.400-0.700 $\mu$m)
NIR = near infrared (0.700-1.400 $\mu$m)



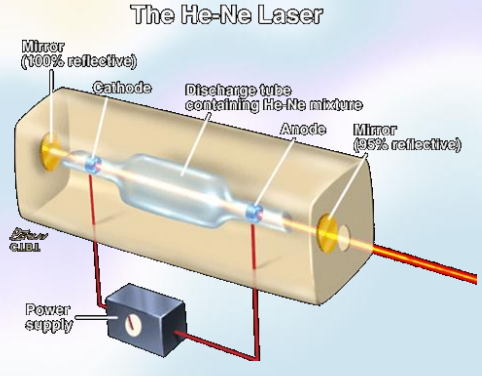
# Helium-Neon (He-Ne) Laser

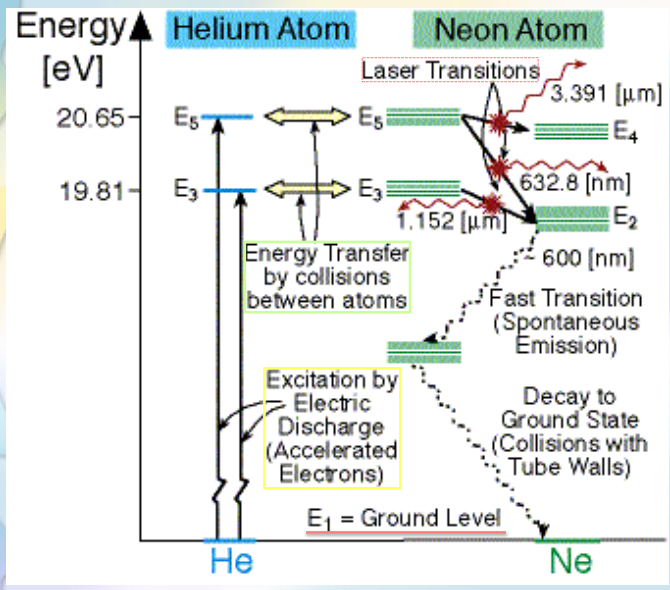
The Helium-Neon laser was the most common laser until the spread of **diode lasers**.

It was first built in 1961 by Ali Javan. The active medium is a noble gas Neon (Ne), and it is a 4 level laser.

- Two **meta-stable energy levels** act as **upper laser levels.**
- The He-Ne laser have two lower laser levels, so quite a few wavelengths can come out of the transitions between these levels.
- **The important wavelengths are:**

$\lambda_1$= (632.8 nm), $\lambda_2$=1.152 μ m, $\lambda_3$=3.3913 μ m






The energy level diagram of a Helium-Neon laser





The excitation process of the **Neon** atoms is a two stages process:

- The high voltage causes electrons to accelerate from the cathode toward the anode. These **electrons** collide with the He atoms and transfer kinetic energy to them.
- The **excited Helium** atoms collide with the Neon atoms, and transfer to them the energy for excitation.

Thus Helium gas does not participate in the lasing process, but increases the excitation efficiency

**The role of the Helium gas in He-Ne laser** is to increase the efficiency of the lasing process. Two effects make Helium particularly valuable:

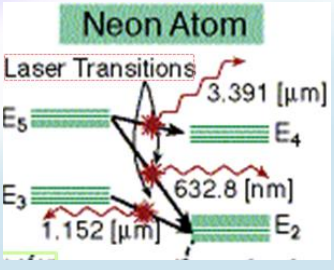
- The direct excitation of Neon gas is inefficient, but the direct excitation of He gas atoms is very efficient.
- An excited state of the He atom (labeled $E_5$) has an energy level which is very similar to the energy of an excited state of the Neon atom (also labeled $E_5$).



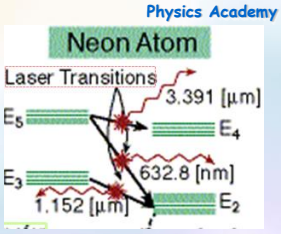


**Red Wavelength out of He-Ne Laser:** Most of the applications of He-Ne Laser use the **red wavelength**, because it is the strongest line and it is in the visible region of the spectrum.

**As shown in the figure, this red light is emitted when the Neon atom goes from the energy level labeled $E_5$ to the energy level labeled $E_2$, a much bigger energy difference than for the other transitions.**



**A problem** with creating this red light is that a Neon atom in state $E_5$ may also emit 3.3913 μm radiation. This emission decreases the population of the $E_5$ level, without producing visible radiation.




- **The solution** to this problem is to use a special coating on the laser mirrors which selectively reflect only the red light. This coating causes reflection back into the optical cavity of only the desired (red) wavelength, while all other wavelengths are transmitted out, and not forced to move back and force through the active medium.
- In a similar way, other selective reflecting coating can be used on the mirrors to select other transitions. This procedure allows commercial production of He-Ne lasers at other wavelengths in the visible spectrum. For example, orange, yellow and green He-Ne lasers can be produced, but the laser efficiency is much lower than for the red.





## Absorption and Amplification in He-Ne Laser

- He-Ne laser is a 4 level laser, so the lifetime of the **lower laser energy level** needs to be very short.
- In a Neon gas, which is the active lasing gas, the transition (decay) from the lower laser level is not fast enough, but it is accelerated by collisions with the tube walls. Because the number of collisions with the tube walls increase as the tube becomes narrow, the laser gain is inversely proportional to the tube radius. So, **the tube diameter of a He-Ne laser must be as small as possible**.

- The **low gain of the active medium in a He-Ne laser limits the output power to low power**.
- In laboratory prototypes an output power of the order of 100 μW was achieved, but commercial lasers are available only in the output range of 0.5-50 mW.
- The **output coupler** of He-Ne laser is a mirror with coating that transmits about 1% of the radiation to the output. This means that the power inside the optical cavity is a 100 times more than the emitted power.

## Commercial He-Ne Lasers:

| | |
|---|---|
| **Wavelength:** | 632.8 [nm] |
| **Output Power:** | 0.5-50 [mW] |
| **Beam Diameter:** | 0.5-2.0 [mm] |
| **Beam Divergence:** | 0.5-3 [mRad] |
| **Coherence Length:** | 0.1-2 [m] |
| **Power Stability:** | 5 [%/Hr] |
| **Lifetime:** | >20,000 [Hours] |

# الدكتور حازم فلاح سكيك
## أستاذ الفيزياء المشارك
## جامعة الأزهر - غزة

- رئيس قسم الفيزياء بجامعة الازهر - غزة في الفترة ١٩٩٣-١٩٩٨
- مؤسس وعميد كلية الدراسات المتوسطة بجامعة الازهر - غزة من الفترة ١٩٩٦-٢٠٠٥
- عميد القبول والتسجيل بجامعة الازهر - غزة في الفترتين ١٩٩٨-٢٠٠٠ و٢٠٠٧-٢٠٠٨
- مدير الحاسب الالي بجامعة الازهر - غزة في الفترة من ١٩٩٤-٢٠٠٠
- رئيس وحدة تكنولوجيا المعلومات بجامعة الازهر - غزة في الفترة من ٢٠٠٠-٢٠٠٥
- مؤسس موقع الفيزياء التعليمي
- مؤسس اكاديمية الفيزياء للتعليم الالكتروني
- مؤسس مركز الترجمة العلمي
- مؤسس قناة الفيزياء التعليمي على اليوتيوب
- مؤسس ورئيس تحرير مجلة الفيزياء العصرية

لمزيد من المعلومات يرجى زيارة
المؤسسة الإعلامية لشبكة الفيزياء التعليمية
www.hazemsakeek.net

أكاديمية الفيزياء
Physics Academy
www.physicsacademy.org