



# الليزر وتطبيقاته

تأليف

د. سعود بن حميد اللحياني

الأستاذ المشارك بقسم الفيزياء / كلية العلوم  
جامعة أم القرى

# المحتويات

المقدمة

## الفصل الأول

### المبادئ الأساسية لليزر

٥	-----	الخواص الطبيعية لليزر
٩	-----	العناصر الأساسية لليزر
٢١	-----	شروط الانبعاث الليزري

## الفصل الثاني

### الترابط :

٣٨	-----	شروط الترابط
٣٨	-----	الترابط الزمني
٣٤	-----	ترابط الفضائي
٤٤	-----	مدخل مايكلسون
٤٦	-----	تجربة الشقين ليونغ
٤٩	-----	موجات مترابطة من مصادر غير مترابطة

## الفصل الثالث

### المادة الخلفية للأشعة والفيزياء الذرية:

٥٥	الضوء والقوانين العامة للإشعاع
٦٠	انبعاث وامتصاص الأشعة
٧٣	شكل واتساع الخطوط الطيفية
٧٧	الامتصاص والانبعاث المستحث
٨٥	تطبيقات الليزر

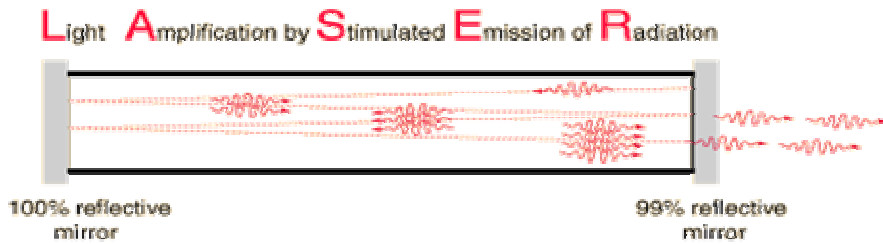
# الفصل الأول المبادئ الأساسية لليزر

# الليزر

## ١- المقدمة :

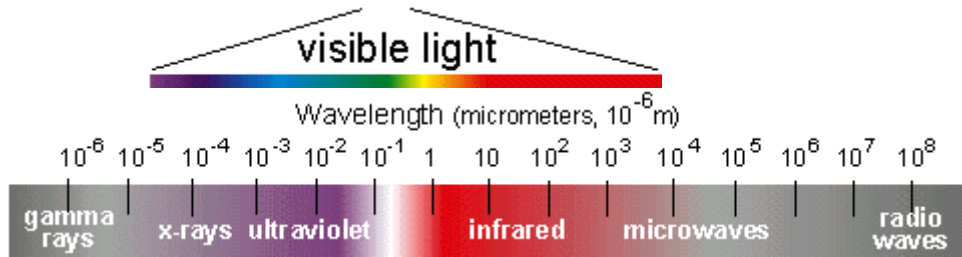
### Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.

## LASER

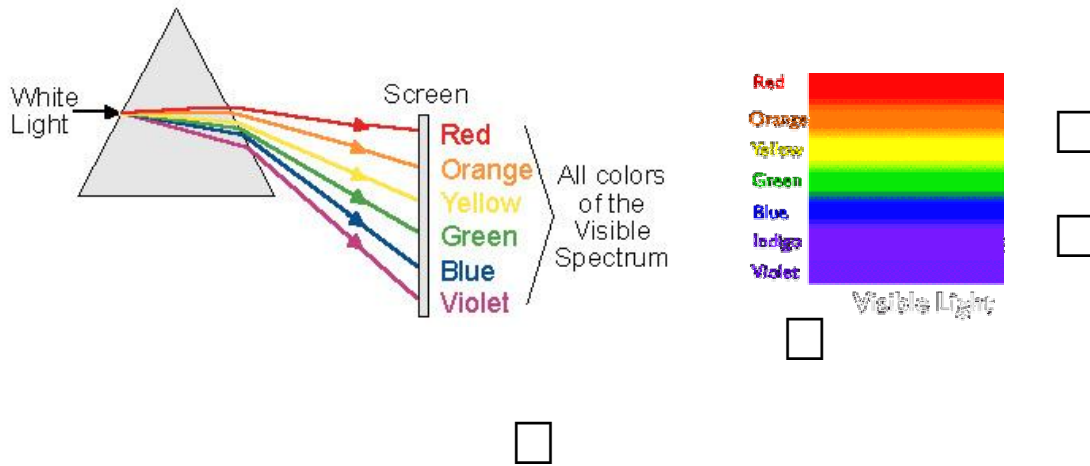


وتعني تضخيم الضوء بإنبعاث الإشعاع المحفز وهو عبارة عن حزمة ضوئية ذات فوتونات تشترك في ترددها وتتطابق موجاتها بحيث تحدث ظاهرة **التداخل البناء** بين موجاتها لتتحول إلى نبضة ضوئية ذات طاقة عالية . بينما يشع المصدر الضوئي العادي موجات ضوئية مبعثرة غير منتظمة فلا يكون لها قوة الليزر . وباستخدام بلورات لمواد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

الاضطراب الطبيعي للموجات على ترابطها Coherence، حيث تتبعث الفوتونات،  
الوحدات الأساسية لكل الإشعاعات الطيفية على شكل دفعات منتظمة ذات تردد واحد، ونظراً  
لأن الموجات تتربط فإن الفوتونات تقوي بعضها البعض وتزيد من قدرتها على نقل الطاقة.  
أن تقنية الليزر توسعت لتشمل ما وراء منطقة الموجات فوق البنفسجية باتجاه الطاقة  
العالية للأشعة السينية، وكل طول موجي في هذه المناطق يعطي القدرة والمساعدة للإنسان  
على ابتكار تطبيقات متنوعة.



شكل رقم ١-١



شكل رقم ٢ - ١

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

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

## ١ - ٢ خصائص شعاع الليزر

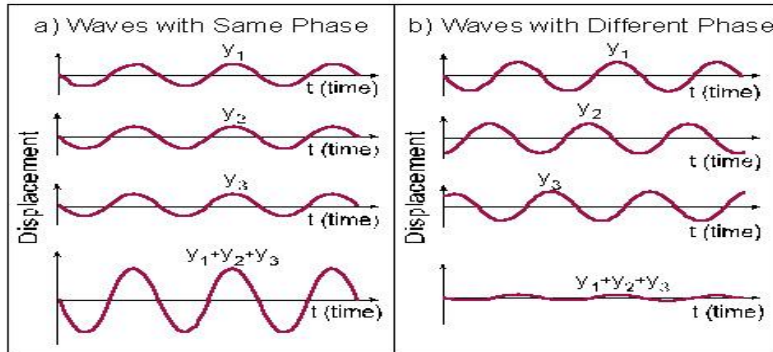
- **أحادي اللون Monochromatic** وتعني أن له عرض طيفي ضيق ينتج عنه تردد مفرد نقي، وهذه الصفة الموجبة كانت تتميز بها الأشعة الراديو دون سواها
- **توازي الحزم الضوئية Collimation** هذا يعني أن التشتت أو التفريق في الحزمة يكون معدوماً، كما أنها بطبيعتها مركزة دون حاجة لاستخدام عدسات، وقطرها قد يصل إلى أقل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

## **توازي الحزم الضوئية COLLIMATION او الاتجاهية DIRECTIONALITY**

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

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

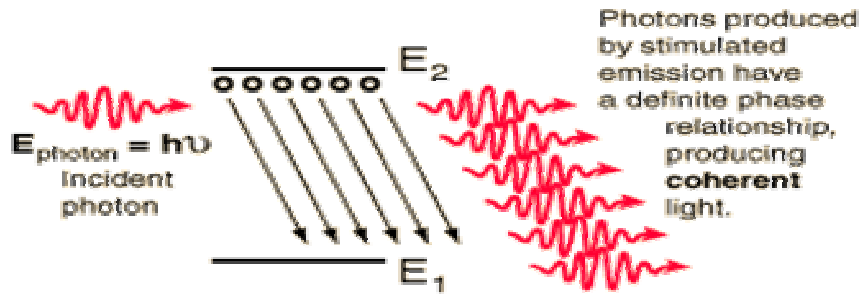
اساسيا في التكبير لضوء بحيث ان الفوتونات المنبعثة لها فرق طور محدد ومتوافق مع بعضها كما هو موضح في شكل ٤-١ . هذا الترابط يوصف علي انه ترابط زمني وترابط فضائي وكلاهما مهم في انتاج التداخل والذي يستخدم في رسم الضوء العاي الغير مترابط وذلك بسبب انه قادم من ذراه مستقلة والتي تبعث فوتونات برمن وقدره  $10^8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



شكل (١) -

١٣ -

(١ - ٣ب)



شكل ٤-١ ترابط الفوتونات المكونة لشعاع الليزر

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



### ١-٢-١: مميزات شعاع الليزر:

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

### ١-٣-١: عيوب استخدام الليزر:

- \* حزمة خطيرة وخصوصاً عند تعرضها لحاسة البصر.
- تحتاج إلى قدرة عالية للتشغيل، وحيث أن طرق البحث يمكن أن تأخذ أشكالاً متنوعة، وهي في مجملها تحويل الطاقات المختلفة إلى طاقة ضوئية.
- تحتاج إلى دقة متناهية في تطابق المستويات البصرية لبدء الانبعاث الليزري.

### ٣-١: العناصر الأساسية لليزر:

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

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

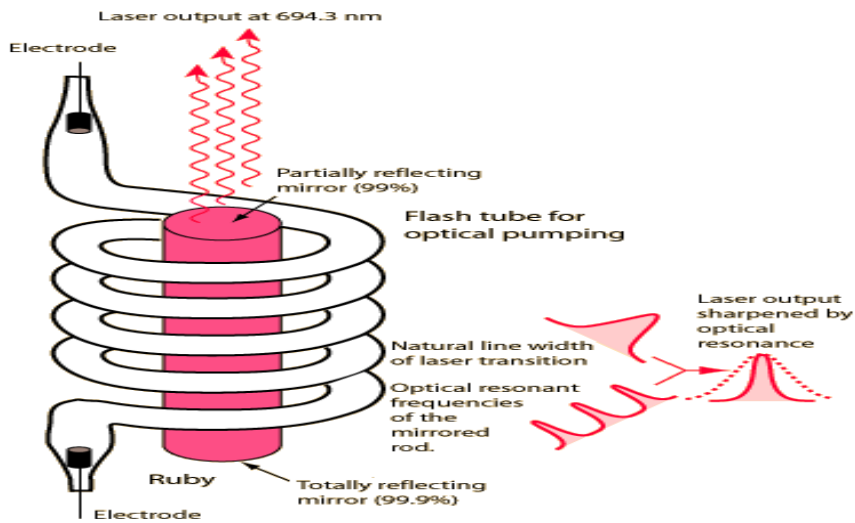
### Material Medium

### ١- الوسط المادي:

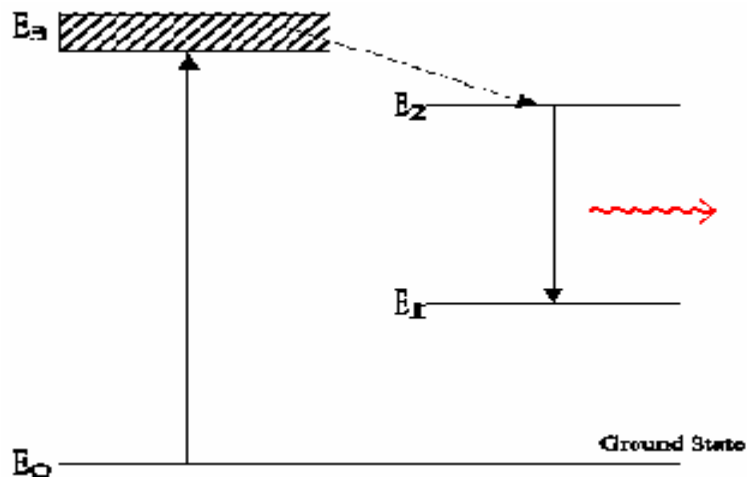
المادة الفعالة الشائعة الاستعمال حالياً لإنتاج أشعة الليزر هي علي النحو التالي:

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

مستوي الطاقة الأرضي نبعث ضوء احمر عند انبعاث هذه الضوء الأحمر تقوم المرايا العاكسة لضوء (جزئي وكلي) بعكس هذه الضوء مرة أخرى وإرجاعه إلي الوسط الفعال مما ينتج عنه إثارة ذرات الوسط أي انتقال الالكترونات الي المستويات الاعلي وتتكسر عملية إنتاج الضوء الأحمر (الليزر) حتي يصبح لهذا الضوء قدرة عالية وتستنفذ البلورة طاقتها عندها يمكننا ضخ ضوء الليزر كما هو موضح في شكل ٥-١ وشكل ٦-١ يمثل مستويات الطاقة لهذا النوع من الوسط الفعال التالي



شكل ٥-١ مكونات جهاز الروبي ليزر



شكل ٦-١ مستويات الطاقة لذرات الكروم

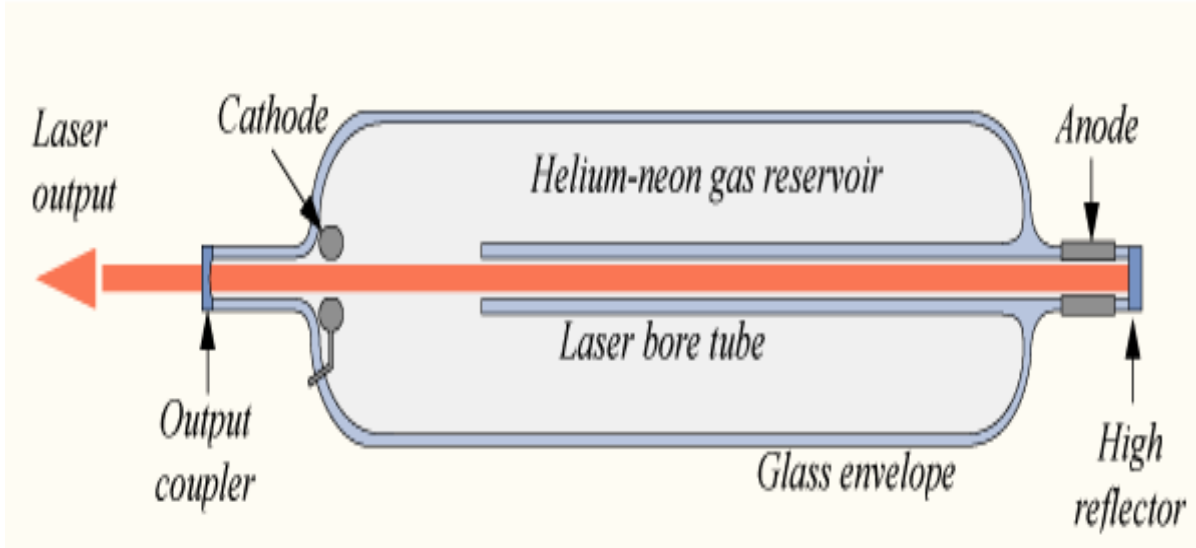
• **المواد الغازية Gas**، مثل خليط غاز الهليوم والنيون He- Ne وخليط غاز الهليوم والكادميوم He- Cd وبخار الماء H<sub>2</sub>O . فلو أخذنا الوسط الفعال **الهليوم نيون** وهو يعتبر من أشهر مواد الوسط الفعال لليزرات الغازية وغير مكلف ماديا يعمل هذا النوع من الليزر عند الطول الموجي 632nm في منطقة اللون الأحمر في الطيف الكهرومغناطيسي وكذلك عند الطول الموجي 543.5nm في منطقة اللون الأخضر من الطيف الكهرومغناطيسي وفي المنطقة تحت الحمراء عند الطول الموجي 1523nm . ان قرب مستوي الطاقة (20.60ev) لذرات الهيليوم من مستوي الطاقة (20.66ev) لذرت النيون الموضح في الشكل ١-٨ قد يتسبب في حدوث تصادمات للذرات في المستويين ويحدث انتقال للطاقة لذرات النيون وبالتالي تنتقل هذه الذرات الي مستويات اعلي مما ينجم عنه انبعاث مستمر للفوتونات باتجاهات عشوائية وباطوار مختلفه ولكن يوجد طول موجي واحد منها مطلوب ومن المهم هنا معرفة تركيب الجهاز وكيفية عمله فـجهاز الهليوم نيون ليزر هو عبارة عن الوسط الفعال ( خليط من غاز الهليوم وغاز النون) بداخل انبوب زجاجي تحت ضغط منخفض ومصدر الطاقة عبارة عن تفريغ كهربائي في حدود ١٠٠٠ فولت وتتم عملية التفريغ من خلال الكاثود والانود الموجودة عند نهايتي الانبوب تـبدأ عملية انتاج الليزر اول عند يحدث تصادم بين الكـترونات التفريغ وذات الهليوم في الغاز وهذه العملية تتسبب في اثاره ذرات الهيليوم وانتقالها من المستوي الارضي الي المستوي 2<sup>3</sup>S<sub>1</sub> و 2<sup>1</sup>S<sub>0</sub> وهي المستويات المثارة ويحدث تصادم بين ذرات الهليوم المثارة في المستوي الارضي مع ذرات النيون القريبة منه عند هذا المستوي من الطاقة بحيث يحدث انتقال لطاقة الي ذرات النيون وبالتالي فان الكـترونات ذرات النيون سوف تنتقل الي المستوي 3S<sub>2</sub> نتيجة لتوافق مستويات طاقة ذرات الهيليوم مع مستويات طاقة ذرات النيون وهذا يعطي بالمعادلة التفاعلية التالية :-



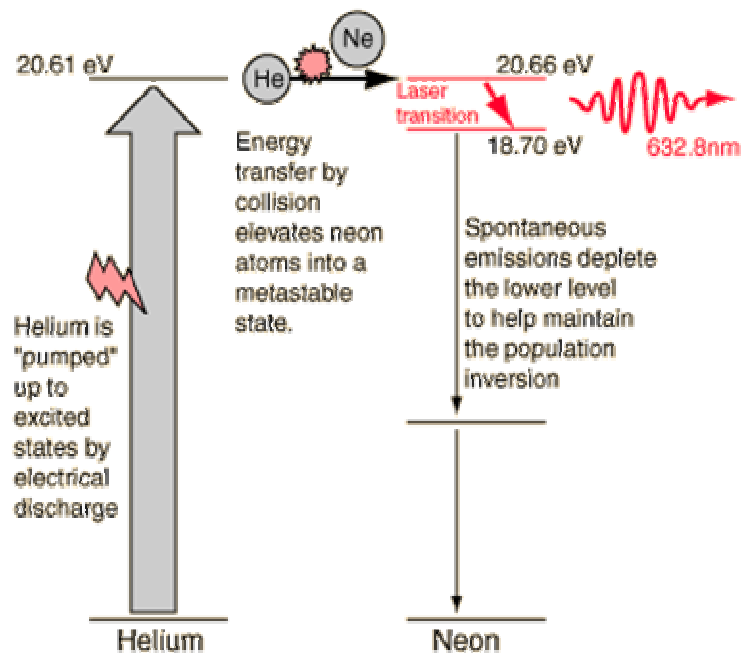
حيث ان (\*) تعني حالة استثاره لمستوي الطاقة

$\Delta E$  تعني فرق الطاقة بين اثنين من مستويات الطاقة لذرتين

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



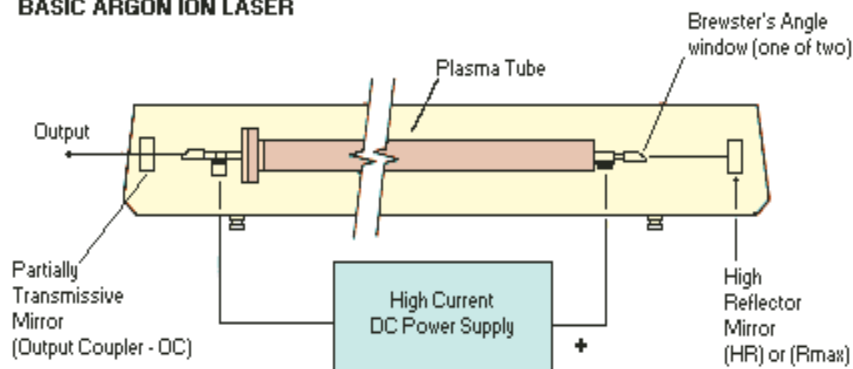
شكل ٧-١ جهاز الهيليوم نيون



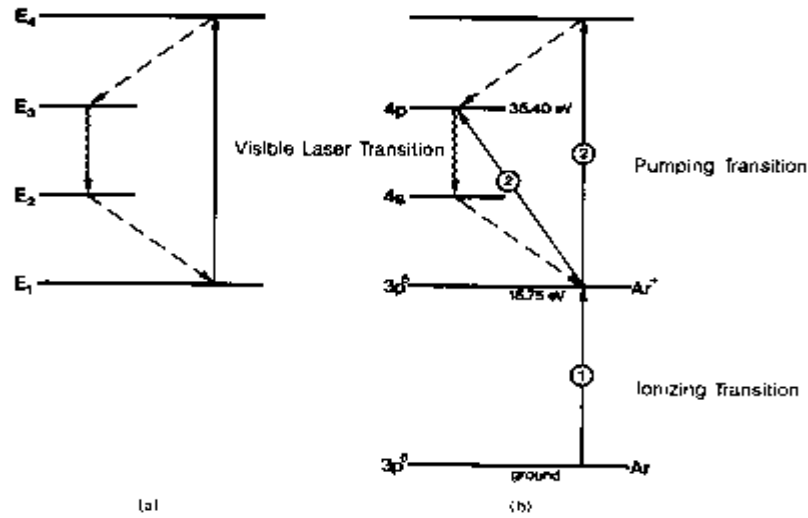
شكل ٨-١ مستويات الطاقة للهيليوم-نيون ليزر

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

BASIC ARGON ION LASER



شكل ٩-١ مكونات جهاز ارجون ليزر

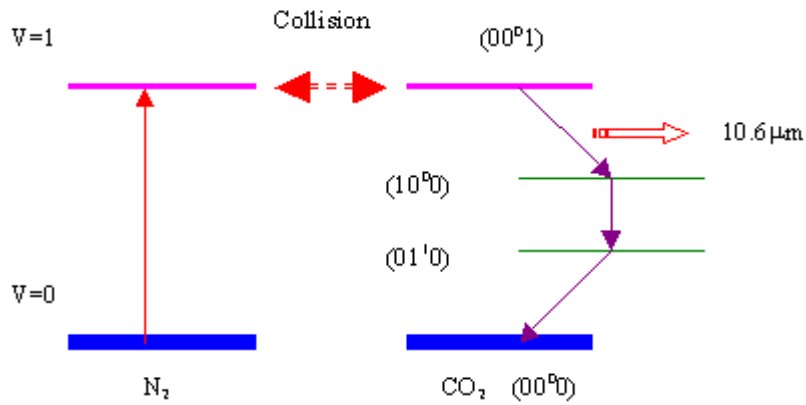


شكل ١٠-١ مستويات الطاقة للوسط الفعال لمادة الارجون

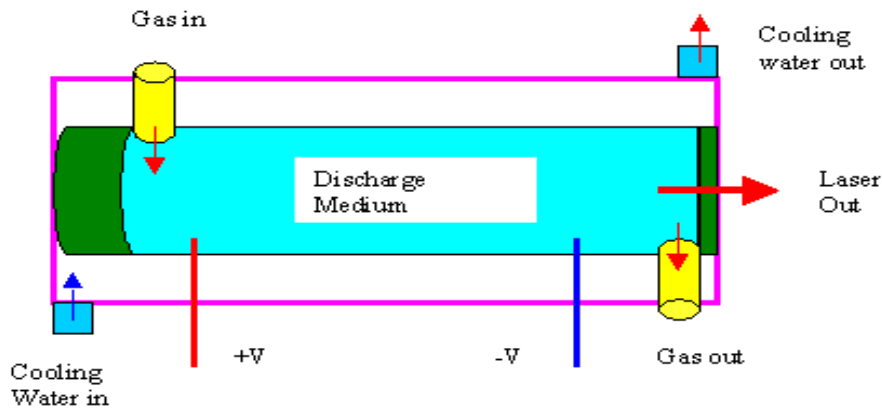
- **الجزئيات الغازية *Molecular gases***، مثل غاز أول أكسيد الكربون CO وغاز ثاني أكسيد الكربون CO... هذا النوع من الوسط الفعال لديه القدرة علي انتاج ليزر متصل بقوة ١٠ كيلو وات وكذلك وطريقة عمله مشابه الطريقة عمل الهيليوم-نيون ليزر فهو يستخدم عملية التفريغ الكهربى في ضخ الالكترونات باستخدام نسبة من غاز النتروجين كغاز . ان ليزر اكسيد الكربون له دور فعال ويمكن النتاج الليزر حتى وان كانت كفاءته في حدود ٣٠% فهو يستخدم في اللحام وعمليات القص. يحدث الانبعاث لهذا النوع من الليزر عند الطول الموجي  $10.6 \mu m$  وقدرة شعاعه تتراوح ما بين ١٠ وات الي ٢٥ كيلو وات او الي ١٠٠ كيلو وات والوسط الفعال عبارة عن خليط من غاز ثاني اكسيد الكربون والهيليوم و النتروجين بنسب وقدرها  $CO_2:N_2:He::0.8:1:7$  وعملية ضخ الالكترونات تتم اما عن طريق التفريغ الكهربى بتيار متردد او تيار

مستمر وتتم العملية عندما تمتص طاقة التفريغ الكهربى في غاز النيتروجين فقط جزء من هذه الطاقة يمتص بواسطة جزيئات غاز ثاني اكسيد الكربون مباشرة ثم ترتفع نت مستوي الطاقة الارضي (000) الي مستوي الطاقة الاعلي (001) كما ان عدد كبير من جزيئات ثاني اكسيد الكربون تتصادم مع جزيئات النيتروجين وبالتالي تحدث اثاره لجزيئات ثاني اكسيد الكربون ومن ثم فان جزيئات ثاني اكسيد الكربون في المستوي  $E_1$  تبدأ في فقد طاقتها وتسقط لمستويات الطاقة (100) او (020) الموضحة في شكل ١-١. محدثة انبعاث لضوء الليزر عند التردد  $10.6\mu m$  او  $9.6\mu m$  علي التوالي اما باقي الاضمحلالات من المستويات (100) الي (010) ، (020) الي (010) او من (010) الي المستوي الارضي (000) جميعها تفقد طاقتها علي شكل حرارة بدل من الضوء .

كما يوضح الشكل ١-٢ نموذج لجهاز ثاني اكسيد الكربون.



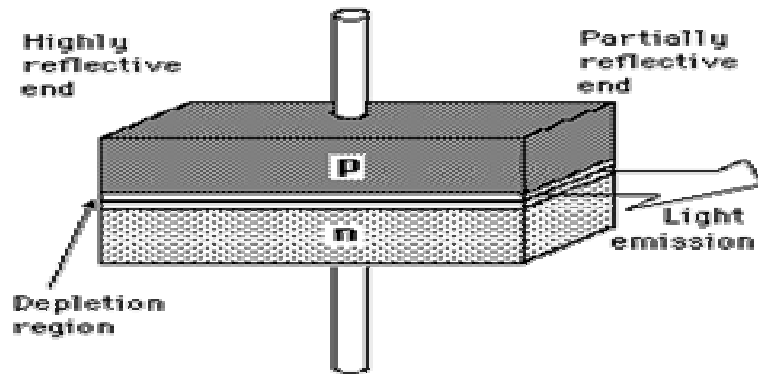
شكل ١-١ مستويات طاقة لثاني اكسيد الكربون





شكل ١٢-١ مكونات جهاز الليزر لثاني اكسيد الكربون

- **الصبغات السائلة Liquid dye**، وهي صبغات كيميائية عضوية مختلفة مذابة في الماء. يعمل هذا النوع من الليزر عند الترددات المستمره مع جزيئات محده ذات الصبغة الكيميائية حيث ان جزيئات هذه الصبغات لها عدد كبير من خطوط الطيف وكل خط طيف له خصائصه و تردد هذه الخطوط المتداخلة يمكن ضبطها لإنتاج الليزر الفعال . ان رودمين (rhodamine 6G) يعتبر من اشهر انواع الصبغات المستخدمه وفي الحقيقة ان الوسط الفعال له عبارة عن صبغه في وسط مائي .
- **المواد الصلبة نصف الموصله Semi - conductors**، مثل أرسنيك الجاليوم Ga-As...  
As. الوسط الفعال لهذا النوع من الليزر يعطي ضوء احادي اللون ومترايط من خلال وصلة p-n المتكونه من طبقات الجاليوم وفي نهايتي هذا المركب وضعت مرآيا متوازيه احدهما عاكسه تماما للضوء وفي الطرف الاخر مرآيا عاكسه جزئيا للضوء ويرتبط طول الوصله بطول الموجي للضوء الخارج وهذا النوع من الوصلات هو من نوع الاتحياز الامامي كما هو موضح في الشكل ١٣-١ التالي



شكل ١٣-١ تمثل الوصله المنتجه لاشعة الليزر

Source of Energy

٢- مصادر الطاقة:

وهي التي تحدد طريقة الحث لإثارة المادة الفعالة وحثها على بعث إشعاع الليزر...  
وتتنوع مصادر الطاقة المستخدمة حالياً ومنها:

\* **الطاقة الكهربائية *Electrical energy***، وتتمثل في استعمال الطاقة الكهربائية  
المباشرة بأسلوبين مثل:

استخدام مصادر للترددات الراديوية R.F. كطاقة داخلية. أو استخدام التفريغ  
الكهربائي في التيار المستمر مثال ذلك ليزر غاز ثاني أكسيد الكربون - وليزر الهليوم /  
نيون، وليزر غاز الأرجون... الخ.

\* **الطاقة الضوئية *Radiant energy***، والمعروفة باسم الضخ الضوئي، ويمكن أن  
تنبعث من مصدرين رئيسيين:

استخدام المصابيح الوهاجة **Flash lamp** ذات القدرة الكبيرة كما في ليزر الياقوت.  
أو استخدام شعاع الليزر كمصدر طاقة إلى ليزر آخر، وهذه الأخيرة شائعة الاستخدام  
في إنتاج إشعاعات ليزرية كثيرة في مناطق الطيف المختلفة، ومثال ذلك ليزرات الصبغات  
السائلة Dye المتوفرة تجارياً.

\* **الطاقة الحرارية *Thermal energy***، يمكن أن يتسبب كل من الضغط الحركي  
للغازات، والتغيرات في درجات الحرارة في حث وإثارة المواد لتبعث أشعة الليزر.

\* **الطاقة الكيميائية *Chemical energy***، تعطي التفاعلات الكيميائية بين مزيج من  
الهيدروجين  $H_2$  والفلور  $F_2$  طاقة مسببة لحث هذه الجزيئات على بعث الإشعاع الليزري،  
وكذلك مع خليط فلوريد الديتريوم DF، وثاني أكسيد الكربون.. مثال ذلك الليزرات  
الكيميائية.

### Resonator

### ٣ - مسبب الرنين

وهو الوعاء الحاوي والمنشط لعملية التكبير، وفي العادة يستخدم إما:

\* **المرنن الخارجي**: وهو مرأتان متوازيتان في نهاية الأنبوب الحاوي للمادة الفعالة، وتكون الانعكاسات المتعددة بينهما هي الأساس في عملية التكبير الضوئي Amplification، كما في الليزرات الغازية .

\* **المرنن الداخلي**: ويتمثل في طلاء نهايات المادة الفعالية لتعمل عمل المرآة، كما في ليزر بلورات الياقوت Ruby وليزر عقيق الألمنيوم والزرجاج Nd: Yag، وفي الليزرات الصلبة بصورة عامة.

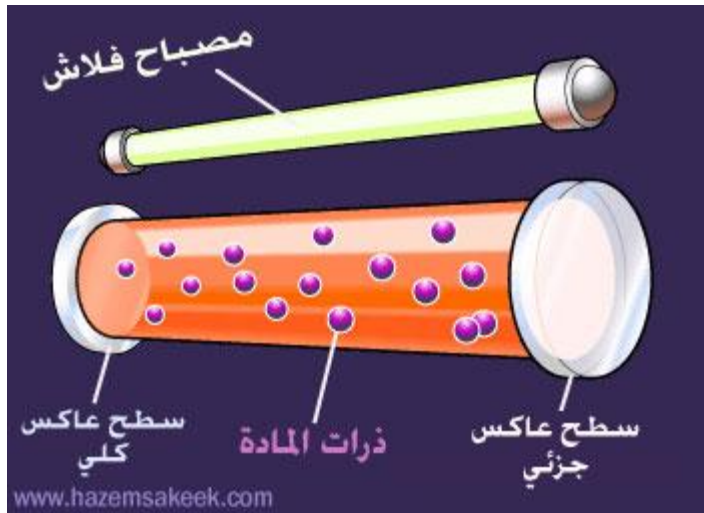
وفي كلا الحالتين يجب أن تكون إحدى المرأتين عاكسة كلياً للفوتونات الضوئية والأخرى تسمح بالنفاذ الجزئي لكي يتسنى لشعاع الليزر الخروج منها خارج المرنن.

### ✦ مثال ليزر بلورات الياقوت Ruby Laser

استخدم في تصميم أول ليزر، قضيب من بلورات الياقوت الصناعي ( المخصب بذرات الكروم)، كمادة فعالة طوله بوصتان وقطره نصف بوصة. طلي نهايتا هذا القضيب بالفضة ليكون غرفة عاكسة للضوء داخله مكونة بذلك مرنن Resonator من نفس المادة. وقد طليت إحدى النهايتين لتكون أقل انعكاساً للضوء عن الأخرى، وذلك للسماح لبعض من الأشعة المنعكسة الداخلية بالنفاذ خارج القضيب الياقوتي ... أحيط هذا القضيب الياقوتي بأنبوب حلزوني يحوي غاز الزينون Xe الذي يعطي وميض ضوئي متقطع إلى البلورة الياقوتية عند تشغيله بفعل التفريغ الكهربائي، وكما يلاحظ فإن طريقة الحث هنا تتم بوساطة مصدر ضوئي للطاقة.

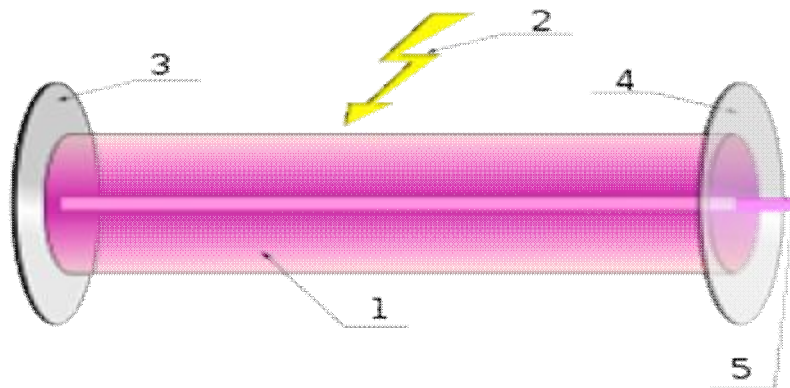
عند امتصاص الياقوت لهذه الطاقة الوميضية الضوئية تبدأ ذرات الكروم في التهيح، حيث إن اكتساب ذرات الكروم لهذه الطاقة يرفعها إلى مستويات طاقة أعلى مما كانت عليه، كما أن ذرات الكروم غير قادرة على الصمود في مستويات الطاقة العليا هذه أكثر من واحد على مليون من الثانية، تبدأ بعدها بالنزول ( أو ما يعرف بالانحلال Decay )، محولة بذلك الطاقة المكتسبة إلى ذرات الياقوت المجاورة، وهذه بدورها تبعثها على شكل دقائق ضوئية أو فوتونات، والتي تنعكس يمينا ويسارا داخل القضيب الياقوتي بسرعة الضوء فيتجمع في لحظة زمنية عدد هائل من الدقائق الضوئية المترابطة في الطور من كل ذرات الياقوت،

وعند وصول طاقة الفوتونات إلى الحد الكافي لنفاذها خارج القضيب على هيئة حزمة ضوئية مترابطة وشديدة تسمى حينئذ بالانبعاث الليزري. أما الجهاز فيسمى بالليزر الياقوتي. و الشكل ١٤-١ التالي يوضح نموذج لجهاز الليزر



شكل ١٤-١ ليزر بلورات الياقوت Ruby Laser

فيما يوضح الشكل ١٥-١ التالي دور الأجزاء الرئيسية لجهاز الليزر



### شكل ١-١٥

Active laser medium	١. الوسط الليزري الفعال
Laser pumping energy	٢. طاقة كهربائية لتحفيز الوسط
High reflector	٣. عاكس للشعاع عالي الجودة
Output coupler	٤. منضم مخرج شعاع الليزر (عدسة مستوية أو مقعرة)
Laser beam	٥. شعاع الليزر

#### ٤- -موصفات العدسة:-

قد يكون سطح العدسة الداخلي مستويا أو مقعرا وذلك بحسب الغرض المرغوب فيه. ويطلق على السطح الداخلي للعدسة بطلاء فضي نصف عاكس حتى يستطيع شعاع الليزر الخروج من الوسط إلى الخارج. وإذا كانت هناك رغبة في تجميع الشعاع الخارج وتركيزه في بؤرة يكون السطح الخارجي للعدسة مقعرا. كما يطلق على السطح الخارجي بطلاء يمنع الانعكاس، لكي يتيح خروج شعاع الليزر الناتج من دون فاقد.

#### معامل انعكاس العدسة:-

يعتمد عدد الانعكاسات لأشعة الضوء المتراكمة داخل الوسط على نوع الوسط المستخدم. ففي ليزر الهيليوم-نيون نحتاج إلى درجة انعكاس للمرآة بنسبة ٩٩% لكي يعمل الجهاز. وأما في حالة ليزر النيتروجين فلا حاجة للانعكاس الداخلي (درجة انعكاس ٠%) حيث أن ليزر النيتروجين يتميز بدرجة فائقة على إنتاج الأشعة. ومن جهة أخرى تعتمد خواص العدسة المتعلقة بانعكاس الضوء على طول موجة الضوء. ولهذا يُعطي للخواص الضوئية للعدسة عناية خاصة عند تصميم جهازا لليزر.

#### ١-٣: شروط الانبعاث الليزري:

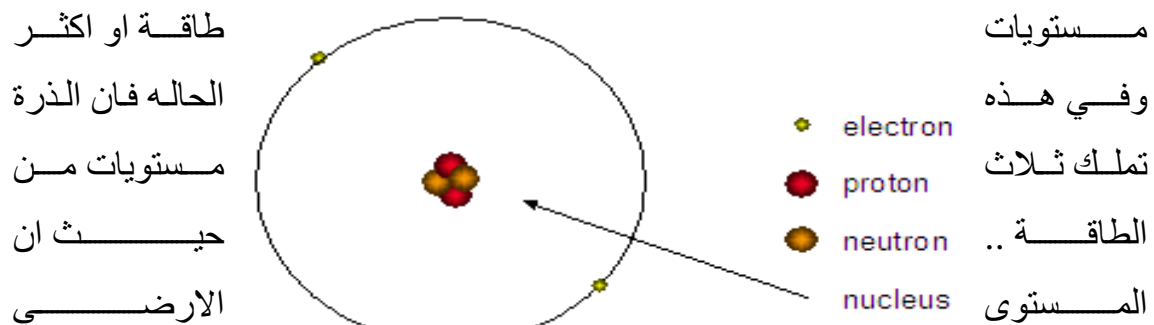
للحصول على أشعة الليزر من الضروري توفر ثلاثة شروط أساسية وهي:

a. توفر الانبعاث الحثي

b. حدوث التعداد المعكوس

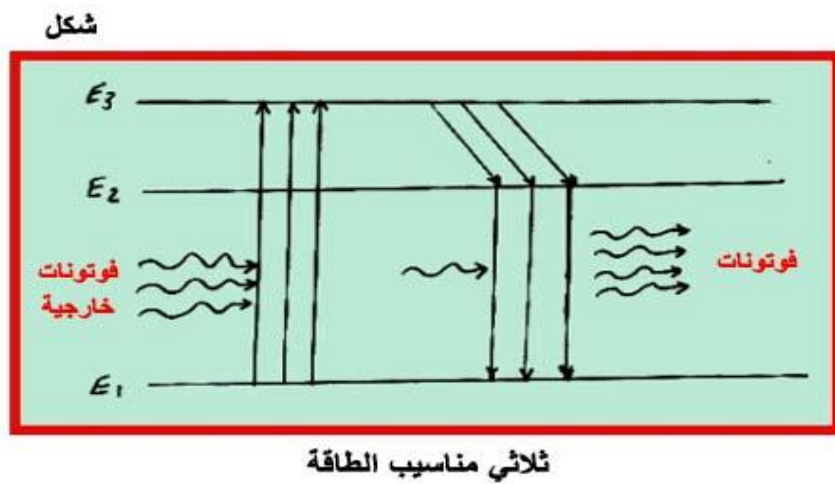
c. إيجاد التكبير الضوئي.

ولشرح هذه الظواهر، يجب أن نتذكر أن كل المواد المتوفرة في الطبيعة، بدون تميز، سواء كانت في حالة صلبة أو سائلة أو غازية، تتألف من عنصر أو أكثر على شكل جزيئات أو ذرات. تتألف هذه الجزيئات والذرات من الكتلونات وبروتونات وجسيمات نووية أخرى كما موضح في شكل ١-١٦. توجد جميع هذه الجسيمات في الطبيعة في حالة استقرار، أو في حالة تهيج، ونعبر عن ذلك بوجود هذه الجسيمات في مستويات طاقة مختلفة، ومستويات الطاقة هي الميزة لذرة عن أخرى أو جزئية عن أخرى. الذرة هي أصغر الجسيمات الموجودة المكونة للعناصر وهي تحتفظ بخصائص العنصر. وهي تتألف من نواة ذات شحنة موجبة محاطة "بسحابة" من الإلكترونات السلبية كما هو موضح في شكل ٧. بغض النظر عن العنصر فإن جميع ذرات عنصر معين يكون لها نفس العدد من الشحنة الموجبة (البروتونات) في النواة والشحنة السالبة (الإلكترونات) فيل سحابة. محتوى الذرات علي مستوي طاقة من نوع معين قد تتغير اعتمادا على مصادر الطاقة الواردة من الألكترونات داخل الغيمة فمن المعروف بأنه قد نجد مثلاً في غاز الأكسجين عدداً كبيراً من ذرات الأكسجين في مستويات طاقة منخفضة (ويعرف أحياناً بالأرضية) ، بالإضافة إلى عدد يسير من ذراته في حالة تهيج، أي في مستويات طاقة عالية. حيث ان لكل نوع من أنواع الذرة يحتوي على كميات معينة من الطاقة. عندما الذرة تحتوي على كمية اقل من الطاقة لما هو متاح لها ، حينئذ تسمى "المستوى الارضي الذري" **"atomic ground state"**. حيث انه اقل مستوى من حيث قيمة الطاقة في الذرة. ما اذا الذرة تحتوي على طاقة اضافية فوق مستواها الارضي حينئذ تسمى ومن "المستوى الذري المتهيج او المحفز **excited**". **"atomic state"** الشكل ١-١٧ الاتي هو شكل مبسط يبين مستويات الطاقة للذرة ذو ثلاثة



يسمى  $S_1$ ، والمستوى المتهيج يسمى  $S_2$   $S_3$  فعندما يطلق المستوى المتهيج الطاقة الزائدة فان الإلكترونات سوف تنخفض الى المستوى الأدنى للطاقة او ما يسمى بالارضي. المستويات الثلاثة هي طريقة تستخدم هنا لغرض التوضيح.

شكل ١-١٦ المكونات الأساسية للذرة



شكل ١-١٧: مستويات الطاقة الثلاثة في الصورة العامة

ولتوضيح التوزيع المداري للإلكترونات الجزيئات والذرات لابد من معرفة أسس توزيع الإلكترونات في مدارات الذرة بصوره مبسطة رغم انها تدرس في مادة الإلكترونات الا انه من باب المراجعة والتوضيح نقول التالي :-  
يمكن فهم الشكل الإلكتروني للذرة وكيفية توزيع الإلكترونات على مداراتها من خلال القواعد الآتية:

أولا - مبدأ الاستبعاد "قاعدة باولي" :

ينص على أنه :



"لا يمكن لإلكترونين" أو أكثر" في نفس الذرة امتلاك نفس قيم الأعداد الكمية الأربعة

بينما يمكن أن يشتركا في رقم واحد أو رقمين أو ثلاثة أرقام فقط"

وبالتالي فإنه لا يستوعب المدار الواحد أكثر من إلكترونين فمثلا :

١ - المستوى الفرعي (S) يحتوي على مدار واحد وبالتالي تكون سعته القصوى تساوي إلكترونين.

٢ - المستوى الفرعي (P) يحتوي على ثلاثة مدارات فتكون سعته القصوى ٦ إلكترونات.

٣ - المستوى الفرعي (d) يحتوي على خمسة مدارات فتكون سعته القصوى ١٠ إلكترونات.

٤ - المستوى الفرعي (f) يحتوي على سبعة مدارات فتكون سعته القصوى ١٤ إلكترونات.

لـ ولتوضيح هذه النظرية نأخذ ذرة الهليوم ( $He$ ) كمثال والتي تحتوي على إلكترونين في المستوى (1S) وهذا المستوى قيمة (n) له = ١ وقيم كل من (L) و ( $m_l$ ) = صفر لذا تكون قيم الأعداد الكمية الأربعة للمستوى هي كما يلي:

الأعداد الكمية				
$M_s$	$M_l$	L	n	عدد الإلكترونات
$+1/2$	0	0	١	الأول
$-1/2$	0	0	١	الثاني

من هنا نلاحظ : انه سمي بمبدأ الاستبعاد لأنه يستبعد احتمالية وجود أكثر من ( $2(n^2)$ ) إلكترون في المدار الواحد.

من خلال ما ذكر سابقا نلاحظ ما يلي

١ - لا يتسع المدار الواحد لأكثر من إلكترونين.

٢ - الإلكترونات التي تشغل نفس المدار تكون متعاكسة الغزل.

٣ - أكبر عدد من الإلكترونات للمدار الواحد يساوي ( $2(n^2)$ ).

و من خلال الاستنتاجات السابقة لا يمكن وضع ثلاثة إلكترونات في المدار الواحد لأنها ستتساوى في رقم الكم المغزلي لأن له قيمتان فقط مما يعني أننا سنجد إلكترونين باتجاه

غزل واحد. وهذا مخالف لمبدأ الاستبعاد. حيث سيصبح للإلكترونين نفس الأعداد الكمية الأربعة.

عدد المدارات والإلكترونات في المستويات الرئيسية و العلاقة الرياضية التي تربط بينها.

المستوى	الأفلاك	الإلكترونات
الأول	١	٢
الثاني	٤	٨
الثالث	٩	١٨
الرابع	١٦	٣٢

(أ) عدد المدارات في أي مستوى رئيس يساوي  $(n)^2$

(ب) عدد الإلكترونات التي يستوعبها أي مستوى طاقه رئيس يساوي  $[2x(n)^2]$

ثانيا - مبدأ البناء "قاعدة أوفباو":

تنص هذه القاعدة على أن " إلكترونات الذرة في حالتها المستقرة يتم توزيعها على المستويات الفرعية حسب طاقتها بدءاً بالمستوى الفرعي الأدنى طاقة ثم الذي يليه"

كيفية كتابة الترتيب الإلكتروني للعناصر حسب المدارات:

الترتيب الإلكتروني: هي وصف للطريقة التي تتوزع فيها الإلكترونات على مدارات الذرة

أو هي كيفية ملء المدارات الذرية بالإلكترونات.

للوصول إلى التركيب الإلكتروني الصحيح لذرة العنصر يجب مراعاة القواعد التالية.

١ - عدد الإلكترونات التي يتم توزيعها على المدارات الذرة المتعادلة يساوي العدد الذري للعنصر.

٢ - لا يحتوي المدار الواحد أكثر من إلكترونين.

٣ - تتابع مستويات الطاقة الفرعية المدارات بحسب العلاقة  $(n+l)$

$(1S < 2S < 2P < 3S < 3P < 4S < 3d < 4P < 5S < 4d < 5P < 6S < 4f < 5d < 6P < 7S.....)$

٤ - مراعاة أكبر عدد من الإلكترونات الذي يستوعبه كل مستوى فرعي حين تعبئته فإذا امتلأ ذلك المستوى ننتقل إلى المستوى الذي يليه.

٥ - مراعاة الحالات الخاصة تبعا لقانون ثبات المدارات الممتلئة ونصف الممتلئة.

لترتيب المستويات الفرعية الآتية حسب الطاقة  $(3S, 4S, 3d, 2S, 3P)$  يكون الترتيب كالاتي

$(2S < 3S < 3P < 4S < 3d)$

### ويتم تمثيل الترتيب الالكتروني لعنصر ما بطريقتين :

أولا - استخدام رموز المستويات الفرعية: حيث تكتب رموز المستويات الفرعية مشتملة

على عدد الإلكترونات كلاحقة فوقيه مثلا النيروجين ( $7N = 1S^2, 2S^2 2P^3$ )

و ( $4Be = 1S^2, 2S^2$ ) ويمكن التعبير عن التوزيع الالكتروني للذرات بدلالة الغازات النبيلة

حيث يتم استبدال التركيب الالكتروني للمستويات الداخلية لذرات العناصر بوضع رمز

الغاز النبيل الذي يمثلها مثلا  ${}_{11}Na = [10Ne] 3S^1$  //  ${}_{6}C = [2He] 2S^2 2P^2$

ثانيا - التمثيل المداري أو المخطط المداري: حيث يمثل كل مدار بصندوق يحتوي على

الإلكترونات مشتملة على دورانها المغزلي ويلزم هذا النوع حين نريد معرفة توزيع

الإلكترونات المستوى الفرعي الواحد من أجل معرفة عدد الإلكترونات المنفردة.

$\frac{\uparrow\downarrow}{1S}$	$\frac{\uparrow\downarrow}{2S}$	$\frac{\uparrow}{2Px}$	$\frac{\uparrow}{2Py}$	$\frac{\downarrow}{2Pz}$	<b>مثل الكربون الذي يحتوي على ستة إلكترونات</b>
---------------------------------	---------------------------------	------------------------	------------------------	--------------------------	---

تستبدل التراكيب الالكترونية للمستويات الداخلية برموز غير نبيلة وذلك لأن العناصر غير

النبيلة تكون مستوياتها الخارجية غير مكتملة بالالكترونات مقارنة مع الغازات النبيلة التي

تكون مستوياتها الخارجية مكتملة بالالكترونات.

### حساب طاقة المستويات:

يمكن توضيح ذلك من خلال القواعد والأمثلة التالية

١ - يمكن تحديد طاقة أي مستوى من جمع قيم  $(n+l)$  لذلك المستوى فالمستوى الذي له

قيمه  $(n+l)$  أعلى تكون طاقته أعلى.

مثال أيهما أعلى طاقه  $(4S)$  أم  $(3d)$  الإجابة  $(4S)$  أقل طاقه لذلك يعبا بالالكترونات أولا

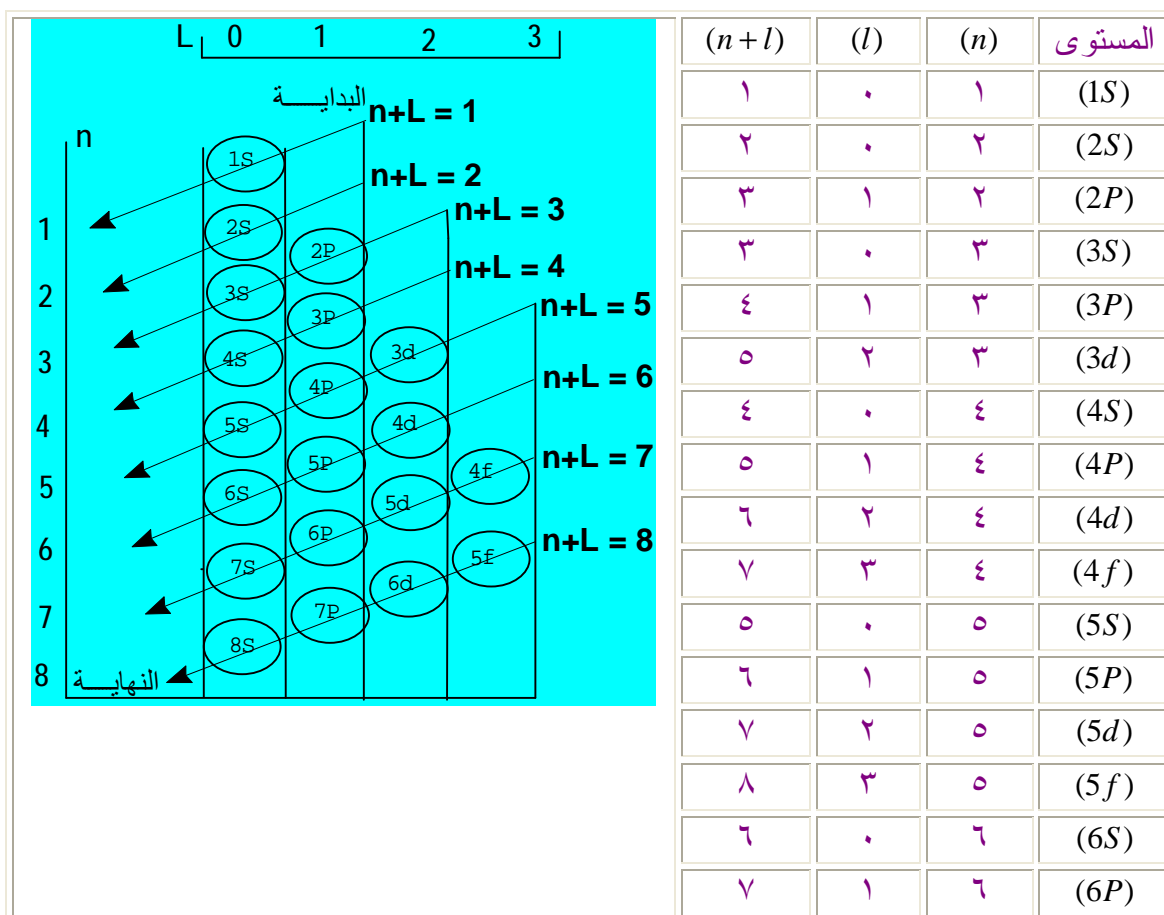
المستوى	قيمة (n)	قيمة (L)	قيمة (n+l)
3d	3	2	5
4S	4	0	4

٢- إذا تساوى مجموع قيم  $(n+l)$  لمستويين فإننا نأخذ قيمة  $(n)$  فالمستوى الذي له قيمة  $(n)$  أعلى تكون طاقته أعلى.

**مثال** أيهما أعلى طاقته  $(5S)$  أم  $(4P)$  الإجابة  $(4P)$  أقل طاقته لذلك يعبا أولاً

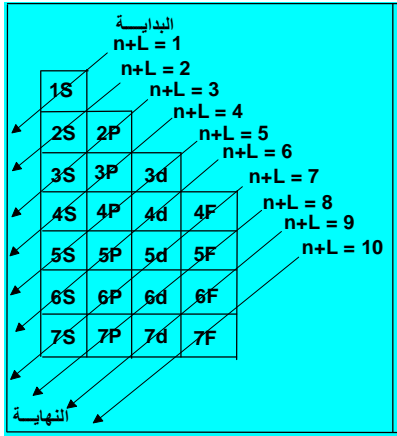
المستوى	قيمة $(n)$	قيمة $(L)$	قيمة $(n+l)$
4P	4	1	5
5S	5	0	5

لمعرفة التركيب الإلكتروني نرسم المستويات على شكل دوائر مرتبة بشكل هرمي ومن ثم نملاً في اتجاه الأسهم الموضحة في الشكل التالي.



الشكل التالي يوضح التوزيع الإلكتروني لعدد من العناصر:

العنصر	التوزيع
الصوديوم $(_{11}Na)$	$(1S^2, 2S^2 2P^6, 3S^1)$
الكالسيوم $(_{20}Ca)$	$(1S^2, 2S^2 2P^6, 3S^2 3P^6, 4S^2)$



$(1S^2, 2S^2 2P^6, 3S^2 3P^1)$	الألمنيوم ( $_{13}Al$ )
$(1S^2, 2S^2 2P^6, 3S^2 3P^6, 4S^2 3d^{10} 4P^2)$	الجرمانيوم ( $_{32}Ge$ )
$(1S^2, 2S^2 2P^6, 3S^2 3P^3)$	الفسفور ( $_{15}P$ )
$(1S^2, 2S^2 2P^6, 3S^2 3P^6, 4S^2 3d^{10} 4P^4)$	السلينيوم ( $_{34}Se$ )
$(1S^2, 2S^2 2P^6, 3S^2 3P^6, 4S^2 3d^{10} 4P^5)$	البروم ( $_{35}Br$ )
$(1S^2, 2S^2 2P^6, 3S^2 3P^6)$	الأرغون ( $_{18}Ar$ )
$(1S^2, 2S^2 2P^6, 3S^2 3P^6, 4S^2 3d^1)$	السكانديوم ( $_{21}Sc$ )
$(1S^2, 2S^2 2P^6, 3S^2 3P^6, 4S^1 3d^5)$	الكروم ( $_{24}Cr$ )
$(1S^2, 2S^2 2P^6, 3S^2 3P^6, 4S^2 3d^6)$	الحديد ( $_{26}Fe$ )
$(1S^2, 2S^2 2P^6, 3S^2 3P^6, 4S^1 3d^{10})$	النحاس ( $_{29}Cu$ )
$(1S^2, 2S^2 2P^6, 3S^2 3P^6, 4S^2 3d^{10})$	الزئبق ( $_{80}Hg$ )

وبشكل عام فإنه يتم توزيع الإلكترونات في الذرات من المستوى الأقل طاقة إلى المستوى الأكثر طاقة ولكن يحصل أحيانا أن تتداخل طاقة المدارات في المستويات المختلفة إذ نجد أن طاقة المدار (4s) أقل من طاقة المدارات (3d) ومعنى ذلك أنه يجب ملء المدار (4s) أولاً ثم العودة لملء المدارات (3d) رغم أن (4s) يوجد في المستوى الرئيسي الرابع بينما يوجد (3d) في المستوى الرئيسي الثالث. ويكون التوزيع الإلكتروني الصحيح المستند إلى الحقائق التجريبية مختلف عن التوزيع الإلكتروني المستنبط من الشكل.

\*\_ بالنسبة لعنصر الكروم (Cr) وعدده الذري ٢٤ نجد أن ترتيبه الإلكتروني طبقاً للقواعد يجب أن يكون  $[Ar] 4S^2 3d^4$  ولكن تبعا للقاعدة القائلة " بأن المستويات الفرعية تكون أكثر ثباتا عندما تكون خالية تماما أو عندما تكون نصف ممتلئة، أو ممتلئة بالإلكترونات" فان هذا الترتيب السابق يصبح أقل ثباتا ويتحول إلى الترتيب الأكثر ثبات

وهو  $[Ar] 4S^1 3d^5$  وينطبق أيضا على  $\{_{42}Mo = \text{-----}/5S^1 4d^5\}$  وبنفس هذا

الأسلوب نجد أن الترتيب الإلكتروني لعنصر النحاس (Cu) وعدده الذري ٢٩

$[Ar] 4S^2 3d^9$  ولكن طبقا للقاعدة الخاصة بثبات المستوى الفرعي (d) نجد أن الترتيب

الإلكتروني الحقيقي الأكثر ثبات هو  $[Ar] 4S^1 3d^{10}$  والذي تمتلئ فيه مدارات (d)

تماما. وينطبق أيضا على  $\{_{47}Ag = \text{-----}/5S^1 4d^{10}\}$

### كيفية كتابة الترتيب الإلكتروني للأيونات:

١- في حالة الأيونات الموجبة يحذف من العدد الذري بمقدار الشحنة الموجودة على الأيون.

توزيع العنصر	توزيع الأيون
$_{11}Na = (1S^2, 2S^2 2P^6, 3S^1)$	$_{11/10}Na^{+1} = (1S^2, 2S^2 2P^6)$
$_{12}Mg = (1S^2, 2S^2 2P^6, 3S^2)$	$_{12/10}Mg^{+2} = (1S^2, 2S^2 2P^6)$
$_{13}Al = (1S^2, 2S^2 2P^6, 3S^2 3P^1)$	$_{13/10}Al^{+3} = (1S^2, 2S^2 2P^6)$

٢- في حالة الأيونات السالبة يضاف من العدد الذري بمقدار الشحنة الموجودة على الأيون.

توزيع العنصر	توزيع الأيون
$_{9}F = (1S^2, 2S^2 2P^5)$	$_{9/10}F^{-} = (1S^2, 2S^2 2P^6)$
$_{8}O = (1S^2, 2S^2 2P^4)$	$_{8/10}O^{-2} = (1S^2, 2S^2 2P^6)$

### ثالثا - قاعدة هوند:

استطاع العالم هوند لدى دراسة الخواص المغناطيسية أن يضع قاعدته التي وضح فيها

بأن الإلكترونات لا تتزاحج في المستوى الفرعي الواحد إلا إذا كان عددها أكبر من عدد

هذه المستويات. أي تتوزع الإلكترونات على المدارات المستوى الفرعي الواحد فرادى

على أن تكون متشابهة في اتجاه الغزل ثم تصبح متزاوجة بعد أن يصبح المدار نصف

ممتلئاً"

و تنتص القاعدة على ما يلي : ( تكون حالة الذرة أكثر ثباتا عندما يتم توزيع إلكترونات المستوى الفرعي الواحد على أكبر عدد ممكن من المدارات ذلك المستوى بنفس اتجاه الغزل قبل البدء بعملية الإزدواج ).

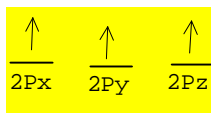
### التوضيح لهذه النظرية

نأخذ الأكسجين والذي يحتوي على ثمانية إلكترونات نبدأ بتوزيع الإلكترونات على المدارات بحسب الطاقة  $O = 1s^2 2s^2 2p^4$  أن الإلكترون الأول والثاني يتم وضعهما في المستوى الرئيسي الأول (1S) والإلكترون الثالث والرابع يتم وضعهما في المستوى الرئيسي الثاني (2S) بغزل مختلف بحسب قاعدة الاستبعاد لباولي. أما الإلكترونات الخامس والسادس والسابع فيتم وضعهما في المدارات (2P<sub>x</sub>, 2P<sub>y</sub>, 2P<sub>z</sub>) فرادى بنفس اتجاه الغزل ثم يوضع الإلكترون الثامن ليزواج الإلكترون الخامس في المدار (2P<sub>x</sub>).

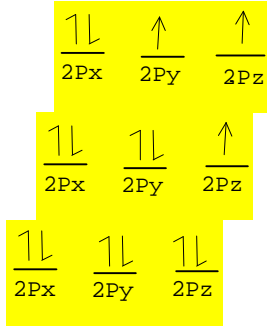
$\frac{\uparrow\downarrow}{1s}$	$\frac{\uparrow\downarrow}{2s}$	$\frac{\uparrow\downarrow}{2p_x}$	$\frac{\uparrow}{2p_y}$	$\frac{\uparrow}{2p_z}$	ليصبح الترتيب الإلكتروني للأكسجين حسب قاعدة هوند الأكثر ثبات كما يلي.
---------------------------------	---------------------------------	-----------------------------------	-------------------------	-------------------------	---

وبشكل عام بما أن الإلكترونات تحمل شحنات سالبة وتميل إلى التنافر مع بعضها عند وجودها معا فإنها تفضل الانتشار وشغل المدارات بطريقة فردية قبل البدء بعملية الإزدواج.

كيفية توزيع الإلكترونات في المستويات الفرعية وفقاً لقاعدة هوند:



تتوزع الإلكترونات الثلاث على مدارات (P) كما يلي



تتوزع الالكترونات الأربعة على مدارات (P) كما يلي

تتوزع الالكترونات الخمسة على مدارات (P) كما يلي

تتوزع الالكترونات الستة على المدارات (P) كما يلي

نلاحظ مما سبق أن :

١- لا يحدث تزاوج في المدارات المتساوية في الطاقة مثل  $(2p_x, 2p_y, 2p_z)$  ما لم يتم وضع إلكترون في كل منها.

٢- عندما تكون المدارات المتساوية في الطاقة نصف ممتلئة أو أقل من ذلك، يجب أن تكون الالكترونات بنفس اتجاه الغزل فيكون أكثر ثبات عملاً بقاعدة التأثير المغناطيسي لغزل الالكترونات. كل ما ذكر سابقاً يوضحه علم الطيف الذي يعتبر المفتاح لدراسة ومعرفة هذه المستويات في كل ذرة وجزئية معروفة لنا، وكذلك معدل توزيع الذرات بين مستويات الطاقة المختلفة. ومن المعروف بأنه قد نجد مثلاً في غاز الأوكسجين عدداً كبيراً من ذرات الأوكسجين في مستويات طاقة منخفضة (ويعرف أحياناً بالأرضية)، بالإضافة إلى عدد يسير من ذراته في حالة تهيج، أي في مستويات طاقة عالية، ويعتمد وجود هذه الذرات هنا أو هناك ونسبتها على الظروف الطبيعية المحيطة بغاز الأوكسجين. وكمثال آخر، في الماء، نجد أن غالبية جزيئاته وذراته تكون في مستويات منخفضة في درجات الحرارة العادية، أما عند رفع هذه الحرارة فتنجس الذرات إلى مستويات طاقة عليا بعد امتصاصها للطاقة الحرارية، إلا أنها دوماً تنجح للهبوط للمستويات المنخفضة وخصوصاً بعد زوال المسبب، وأنداك تُرجع هذه الذرات والجزيئات الطاقة الممتصة على صيغة إشعاع



كهرومغناطيسي، يعتمد طول موجته على فرق الطاقة بين المستويات التي حصل بينها الانتقال.

### b- الانبعاث المحث Stimulated Emission

تحت الظروف الطبيعية ( العادية ) تكون غالبية الذرات في مستوى الطاقة الأقل، وعدد قليل منها يكون في المستويات العليا. والذرات التي تكون في حالة تهيج أي في مستويات طاقة عليا تنبعث الفوتونات تلقائياً. للتخلص من حالة التهيج، أي الطاقة الزائدة وللنزول إلى مستويات طاقة أقل، ومثل هذه العملية تكون عشوائية الحدوث، والفوتونات المنبعثة لا تكون مترابطة مع بعضها البعض، أي لا تكون بنفس الطور. يوضح في الشكل ١-١٨ طريقة اكتساب الإلكترون المداري لطاقة ضوئية لكي يتمكن من الانتقال إلى مستوى طاقة اعلي .



شكل ١-١٨ انتقال الإلكترون من مستوى طاقة إلى مستوى طاقة اعلي

في حين انه عند فقدان هذا الإلكترون لطاقته فانه ينتقل إلى مستوى طاقة اقل مع نفاذ

شعاع فوتوني كما هو موضح في شكل ١٩-١

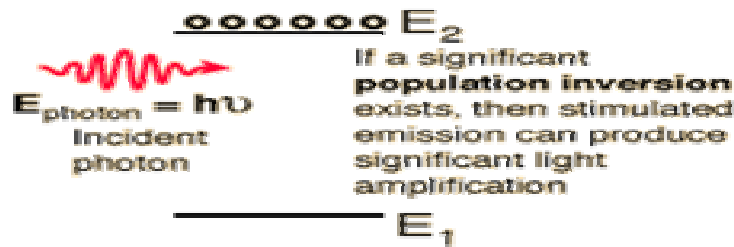


شكل ١-١٩: يوضح كيفية انبعاث الفوتون عند انتقال الإلكترون من مستوى طاقة

عالي الي مستوى طاقة اقل

### b - التعداد المعكوس Population Inversion

ويتطلب ابعاث أشعة الليزر العمل على زيادة عدد الذرات في مستويات الطاقة العليا، أي زيادة تعدادها عن الحالة الطبيعية فيها باستخدام طاقة خارجية مثلاً، وعندما يكون عدد الذرات في مستويات الطاقة العليا أكثر من عدد الذرات في مستويات الطاقة الدنيا نستطيع القول بأنه حصل انقلاب في **التعداد أو عكس التعداد**، وهو ما سميناه بالتعداد المعكوس **Population Inversion**. وتحت هذه الشروط يكون احتمال حدوث الانبعاث المحتث كبير، ويمكن الحصول على فوتونات مترابطة في الطور مع بعضها البعض كما هو موضح في شكل ١-٢٠.



شكل ١-٢٠ التعداد المعكوس

### c - التكبير الضوئي Light Amplification

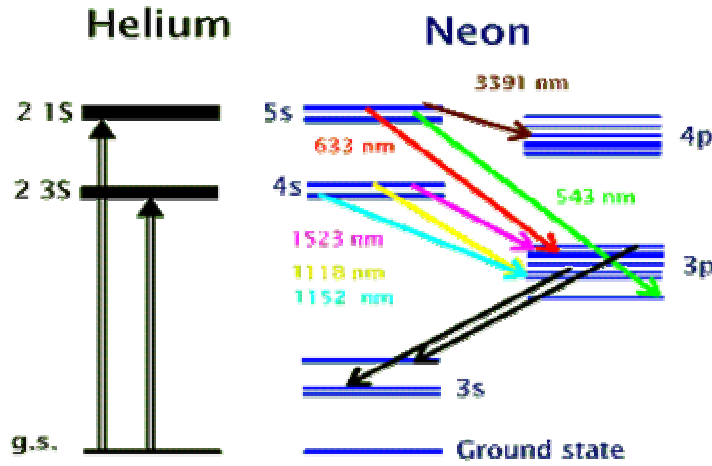
عندما تجبر مجموعة من الذرات أو الجزيئات لتكون في وضع متهيج، أي تملك طاقة عليا، بمعنى آخر الحصول على تعداد كثيف في مستويات الطاقة العليا، فإن انبعاث فوتون مفرد خلال انتقال الذرة أو الجزيئية إلى مستوى أقل سوف يحث غالبية الذرات الأخرى الموجودة في نفس مستويات الطاقة للانتقال وبعث الطاقة الزائدة على شكل فوتون

يسمى الليزر بالليزر النبضي pulse laser عندما يضخ النظام مرة أخرى للحصول على تعداد معكوس آخر ونبضة ليزرية أخرى وذلك بعد إكمال عملية الانبعاث المحتث ورجوع غالبية الذرات المهيجة إلى وضع الاستقرار. ويجري عادة ضخ باستمرار إما بفوتونات خارجية، أو بتفريغ كهربائي خصوصاً للمواد الغازية.

أما بالنسبة لليزر التي تنتج إشعاع مستمر C.W. Laser بدلاً من حزمة نبضية فإنها تحتاج إلى وجود ثلاثة مستويات للطاقة لإحكام شرط التعداد المعكوس بدلاً من المستويين في حالة الشعاع النبضي. وفي هذا النوع تضخ الذرات باستمرار من مستويات الطاقة الأرضية إلى مستويات الطاقة العليا، ومن ثم تنتقل هذه الذرات المثيجة إلى مستوى ثالث وسطي قيمة طاقته تقع بين المستوى الأرضي والمستوى الأعلى.

مثال ذلك ليزر غاز الهليوم - نيون He - Ne Laser يمثل هذا النوع أحد الليزر المتوفرة تجارياً على نطاق واسع، حيث ينتج ضوءاً طوله الموجي ٦٣٢,٨ نانومتر، وهو أحمر اللون، والمادة الفعالة لهذا الليزر هي خليط من غاز الهليوم والنيون، كما أن غالبية ذرات هذين الغازين تقع في المستويات الإلكترونية  $n=2$  و  $n=1$  على التناظر. وعند إثارة هذه الذرات إلى مستويات طاقة عليا فإنها يجب أن تعود إلى المستوى IS في الهليوم، و  $2s$  في النيون لإعادة الاستقرار في مستويات الطاقة الأرضية.

بالنسبة لذرات الهليوم فإن طاقة المستوى  $2S(n=2,1=0)$  تقدر بـ  $٢٠,٦١$  إلكترون فولت فوق المستوى الأرضي، وهي أقل من مستوى الطاقة  $2p(n=2,1=1)$  عند حدوث التفريغ الكهربائي في الغاز، أي عند إثارة ذراته، فإن الإلكترونات المتركة في المستوى  $2s$  لا تستطيع العودة إلى المستوى الأرضي  $1S$  وذلك لكون الزخم الدائري المداري Orbital angular momentum لكلا المستويين متشابه، وكذلك كون طبيعة المستوى  $2S$  شبه المستقرة تجعل الكثير من الإلكترونات تنتهي بها. أما بالنسبة لذرة النيون فإن طاقة المستوى  $4S(n=4,1=0)$  تقدر بـ  $٢٠,٦٦$  إلكترون فولت فوق المستوى الأرضي شكل ١-٢١



شكل ١-٢١ مستويات الطاقة لهيليوم-نيون ليزر

لهذا ولتقارب الطاقة بين المستويين 2S في الهليوم و 4S في النيون توفر أحد المنافذ لرجوع الإلكترونات الموجودة في المستوى 2S في الهليوم إلى المستوى الأرضي عن طريق تصادمها مع إلكترونات النيون والذي يؤدي بدوره إلى تهيج إلكترونات النيون في المستوى 2p إلى المستوى 4S. أما فرق الطاقة الجزيئي بين المستويين 2S في الهليوم و 4S في النيون فعادة يعوض من الطاقة الحركية الحرارية لذرات الهليوم. (-)  $0.05 = 20.61$  (20.66 إلكترون فولت). وفي الواقع فإن استمرار إثارة الإلكترونات إلى المستوى 2S في الهليوم يؤدي إلى ضخ الإلكترونات إلى المستوى 4S في النيون.

ويحدث فعل الليزر عند انتقال الإلكترونات من المستوى 4S إلى المستوى 3P في النيون باعثة فوتونات جزئية ذات طول موجي مقداره ٦٣٢,٨ نانومتر. وفي خليط غاز الهليوم والنيون يمكن حدوث انتقالات مترابطة أخرى، ولكن بأطوال موجية أخرى تقع في المنطقة تحت الحمراء (غير مرئية).

يمكن تلخيص ما ذكر سابقا علي انه يجب أن يُضح الوسط المادي من مصدر طاقة لحث الذرات والجزيئات على النهيج، أي الارتفاع إلى مستوى طاقة أعلى لا تتواجد فيه عادة تحت الظروف الطبيعية، وتكون ما يسمى بالتعداد المعكوس، والذي فيه تكون غالبية ذرات وجزيئات المادة في مستويات الطاقة العليا بدلاً من المستويات المنخفضة. وبعدها ينبعث الشعاع الليزري بوساطة الانبعاث المحتث وعمليات التكبير الضوئي .

إن طول موجة هذا الشعاع الليزري يتناسب عكسياً مع مقدار الفرق في قيمة الطاقة بين المستويات العليا والمنخفضة من ذرات أو أيونات أو جزيئات المادة الباعثة.

وتتناسب كفاءة الوسط الليزري مع معدل الفرق في طاقة المستويات بالنسبة إلى طاقة المستوى العلوي. الكفاءة الحقيقية لليزرات التي تكون أوساطها المادية متألفة من جزيئات مثل غاز ثاني أكسيد الكربون أكبر كفاءة من الليزرات المتألفة من ذرات مثل الهليوم-نيون، أو الأيونات مثل الأرجون. فمثلاً تتراوح كفاءة ليزر ثاني أكسيد الكربون من ١٠ إلى ٢٠% بينما تقدر كفاءة ليزر الأرجون بمعدل ١%.

# الفصل الثاني الترابط Coherence

## ٢- شروط الترابط Conditions for Coherence

إن حزمة الضوء المنبعثة من الليزر يمكن أن تمتلك ميزة الترابط الكامل Completely Coherent . ولكن المصادر الضوئية شائعة الاستعمال مثل أنابيب الفلورسنة Fluorescent و مصابيح الكهرباء أو أشعة الشمس تكون عديمة الترابط ولكن من الممكن الحصول على ضوء مترابطة من مصدر إشعاعي يبعث أشعة ضوئية غير مترابطة ولكن على حساب الشدة هذا الضوء بحيث يصبح عندها الضوء عديم الاستعمال (أو غير ذي فائدة تطبيقية)، ولجميع الأغراض التطبيقية فإن الليزر يعطي أو يوفر حزمة ضوء مترابطة وذات قدرة كبيرة. إن هذه الميزة التي لم يسبق الحصول عليها جعلت الليزر من أهم اكتشافات الفيزياء الحديثة.

إن الضوء الناتج عن الليزر يمكن اعتباره موجة تذبذب بتردد قدره ١٠ ذبذبة في الثانية الواحدة وطول موجي قدره  $1/100$  من الملمتر تقريباً: ولكي تكون لدينا موجة من هذا النوع مترابطة يجب تحقيق شرطين . **الأول:** أنها يجب أن تكون ذات تردد منفرد تقريباً أي أن الانتشار في التردد أو عرض الخط يجب أن يكون صغيراً، إذا تحقق هذا الشرط يمكن القول أن الضوء مترابط زمنياً temporal coherence . **ثانياً:** أن تكون لجهة الموجة شكل معين ويبقى ثابتاً مع الزمن. لو تحقق هذا الشرط ل قيل أن الضوء مترابط فضائياً spatially coherent . وتعرف لجهة الموجة على أنها السطح المتكون من نقاط متساوية الطور. وفي حالة مصدر نقطي. فإن الموجة تنتج بحيث يبقى الطور ثابتاً على أي بعد ثابت عن المصدر نفسه، لذلك فإن المصدر النقطي للضوء يبعث لجهة موجة كروية. إن حزمة الضوء ذات الأشعة المتوازية تماماً تكون لها لجهة موجة مستوية. وإن مصدر الضوء تام المترابط يجب أن يكون ترابطاً زمنياً وفضائياً بشكل كلي.

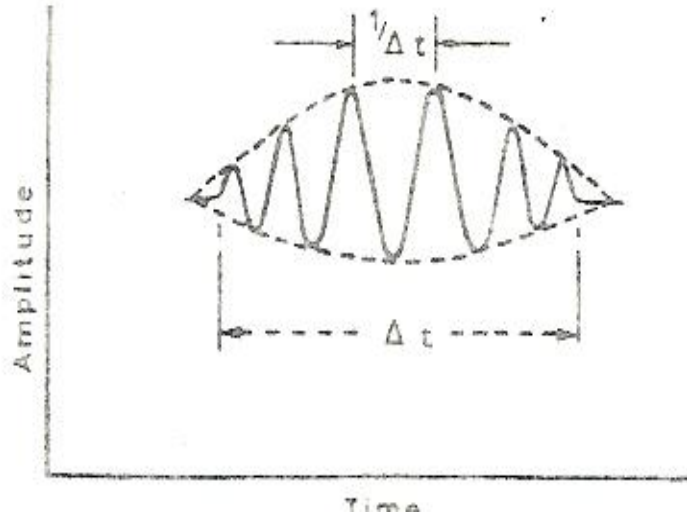
### ٢ - ١ - الترابط الزمني Time Coherence :

لغرض فهم ما المقصود بالترابط الزمني ، من الضروري دراسة الكيفية التي يتكون بها فوتون الضوئي، لنفرض أن الكتروناً غير مداره حول الذرة إلى مدار آخر أقل طاقة فإن

ذلك يؤدي إلى انبعاث فوتون ذي طاقة  $E$ . إن انبعاث فوتون (أو التغير في طاقة الذرة) يمكن القول أنه يحدث في زمن محدد يرمز له  $\Delta t$  ويطلق عليه العمر الزمني Lifetime عندما تكون الذرة في الفضاء. أي عندما تكون معزولة عن المؤثرات الخارجية، فإن  $\Delta t$  تكون لها قيمة  $10^{-8}$  ثانية حيث يمكن تصور الفوتون كموجة ذات طول محدود ذات سعة ترتفع من قيمة صفر إلى قيمة عظمى ثم تهبط إلى الصفر مرة أخرى عندما يكمل الإلكترون الانتقال إلى المستوى الأقل طاقة بعد مرور فترة العمر، إن تردد الموجة المنبعثة يعطي بالمعادلة التالية:

$$g = E/h \quad (2 - 1)$$

أن موجة كهذه تعرف بالرتل الموجي القاسوي Gaussian wavertrai شكل ١-٢



شكل ١-٢ رتل الموجة القاسويه

يجب أن نفهم أن من الطبيعي أن تتبعث ترددات مختلفة من قبل الذرة بعد تهيجها ونتيجة لذلك يتكون طيف مكون من مجموعة من الخطوط المنفردة. وعلى كل حال وبقدر ما يتعلق الأمر بهذه الدراسة فإننا سنأخذ الاعتبار حالة خط واحد فقط ناتج عن انتقال معين.



إن الضوء المنبعث من مصباح تفرغ كهربائي مملوء بالغاز يتكون من عدد كبير من الأطوال الموجبة وكل واحدة منها تم اشعاعها من قبل تلك الذرات في الغاز والتي تعاني انتقالاً من المستويات العليا للطاقة إلى المستويات السفلى للطاقة.

إن الخسارة في الطاقة والتي تحدث بشكل متصل من المصباح بهذه الطريقة تسترجع من طاقة كهربائية التي يزود بها. نفرض جداً أنه من الممكن وبجهاز خيالي أن نراقب نقطة مختارة في مسار أطوال موجات تنبعث من المصباح. نفرض كذلك أن جهازنا هذا يستطيع الكشف عن التغيرات في السعة والطور لفترات زمنية قصيرة ( أفضل من  $10^{14}$  ثانية وهو تقريباً نفس الزمن اللازم لذبذبة واحدة للموجة لتمر من نقطة المراقبة).

لذلك فمن الممكن، وعندما مرور رتل موجة كاوسي من نقطة المراقبة أن تلاحظ سعة الموجة وهي ترتفع وتهبط. فإذا كان التردد الموجة يساوي  $10^{14}$  هيرتز  $\Delta t$  تساوي

$10^{-8}$  ثانية فيكون من الواضح إمكان ملاحظة مليون تموج undulations في السعة.

بما أن الذرات في غاز ما يشع بطريقة عشوائية. لذا فليس من الممكن التنبؤ بوصول رتل الموجة التالي إلى نقطة المراقبة بعد أن يكن الرتل السابق قد مر، مع هذا فحالما تصل نهاية الجبهة لطول الموجة إلى نقطة المشاهدة يمكن التنبؤ عن السعة والطور بعد فترة من الزمن بفرض أن الرتل الموجي ما يزال يمر بنقطة المراقبة. بهذا يمكن أن ندرك أن  $\Delta t$  هو أطول فاصلة زمنية يمكن خلالها التنبؤ عن الطور والسعة.

إنها الإمكانية ( المقدره ) عن التنبؤ عن السعة والطور الذين يمثلان جوهر الترابط و أن الضوء يقال عنه مترابط لزمن  $\Delta t$  وكلما طال هذا الزمن يكون الترابط أكبر والعمر  $\Delta t$  يسمى زمن الترابط، هذا النوع من الترابط يطلق عليه ترابط الزمن **the time coherence**.

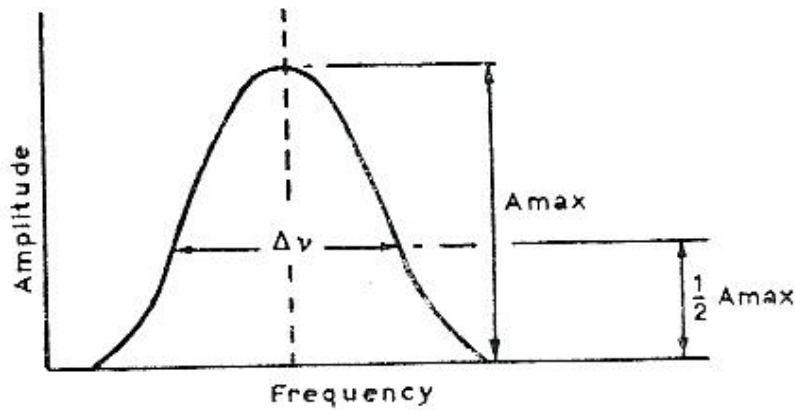
إن رتل الموجة الفعلي يمكن إيجاده بضرب عدد الدورات في طول الموجة بالطول الموجي.

$$l = \frac{\Delta t}{1/v} \lambda \quad (2 - 2)$$

والذي يكافئ حاصل ضرب ومن الترابط بسرعة الضوء.

$$I = c \Delta t \quad (2 - 3)$$

ولقد ذكرنا في بداية هذا الفصل بأن عرض خط ضيق narrow line width يعني ترابط زمنياً - وهذا واضح من تطبيق طريقة رياضية معروفة باسم تحليل فوريير Fourier analysis على رتل الموجة الكاوسي. لقد رأينا فيما أن الإشعاع المنبعث من ذرة نتيجة لانتقال الكتروني بين مستويين طاقة يتكون من أرتال موجبة لها أطوال محدودة وتردد منفرد  $n$  لو طبقنا تحليل فوريير على رتل موجة من هذا النوع يمكن أن نبرهن أنه مكافي لعدد غير متناهي الطول من أرتال موجبة ذات ترددات مختلفة ومنتشرة حول تردد مركزي لها، أن الإنتشار أو عرض الخط لهذه الترددات يقاس عند نقطتي منتصف السعة ويرمز له بـ  $\Delta r$  أن شكل الخط موضح في الشكل ٢-٢.



شكل 2.2 رتل موجة كاوسي

شكل ٢-٢

إن هذا الوصف أكثر ملائمة لرتل موجة محدود ولكن يجب التأكيد بأن الوصفين صحيحان.

من المفيد إيجاد علاقة بين  $\Delta r$  عرض خط مصدر الضوء، وطول الترابط لتحقيق ذلك سنستفيد من العلاقة (17) التي تلخص الوصف مار الذكر لتحليل فوريير

$$\Delta n = \frac{1}{\Delta t} \quad (2 - 4)$$

يمكن أن نرى من هذه العلاقة أن لمصدر الضوء الذي يولد ارتال موجبة طويلة ذات قيم كبيرة من  $\Delta t$  وكذلك زمن ترابط كبير، وله عرض خط صغير جداً. لذلك فمن تشاكه الزمن يمكن التعبير عنه بثلاث طرق:

أ - أن زمن الترابط  $\Delta t$ ، وهو الزمن الذي يستغرقه رتل موجة للعبور منه نقطة المشاهدة أو.

ب - عرض الخط  $\Delta n$  (أو  $\Delta l$ ) أو

ج - طول الرتل الموجي أو طول التشاكة 1.

إن العلاقة بين طول الترابط وعرض الخط يمكن اشتقاقها كما يلي:

من المعادلة: 2-3

$$l = c \Delta t \quad (2-5)$$

ولذلك من المعادلة 2-4

$$l = c / \Delta v$$

ولكن

$$c = v l$$

بمفاضلة المعادلة 2.7 نحصل على

$$\Delta v = \frac{c}{l^2} \Delta l$$

(مع إهمال الإشارة السالبة) وبالتعويض عن المعادلة 2.8 في المعادلة 2.0 نحصل

$$l = \frac{l^2}{\Delta l} \quad \text{على:}$$

نستطيع الآن حساب طول الترابط لرتل موجة ناتج عن انتقال بين مستويين طاقة ذرية

في الفراغ وله عمر يساوي  $10^{-8}$  ثانية بما أن:

$$\Delta t \approx 10^{-8} \text{ s} \quad \text{ثانية} \quad (2-10)$$

$$\Delta v \approx 10^8 \quad \text{هيرتز} \quad (2-11) \quad (\text{من المعادلة 2.4})$$

لو افترضنا أن الضوء الناتج عن الانتقال هو اخضر فان

$$(2.12) \quad \text{سنتمر} \quad 205 \times 10^4$$

لذلك ومن المعادلة 2.8

$$\Delta\lambda = 0.001 \text{ انكستروم} \quad (2.13)$$

وأخيراً تكون قيمة

$$l \approx 3 \text{ أمتار.} \quad (2.14)$$

إن هذه النتيجة استخرجت لحالة مثالية ولذرة منفردة، عندما يكون هنالك العديد من الذرات القريبة من بعضها فإن عرض الخط الطبيعي natural linewidth الخط المرتبط بالحالة السابقة يقال عنه إن اتسع ازداد (broadened out).

إن هذه الزيادة في عرض الخط له سببين رئيسيين، وجود ذرات مشعة أخرى (الزيادة في العرض بسبب الضغط (pressure broadening)) وحركة الذرات المشعة الأخرى (الزيادة في العرض بسبب تأثير دوبلر (Doppler broadening)). برغم هذه التأثيرات نجد أن مصباح الكاديوم تحت ضغط واطئ يمكن أن يعطي خطأ يبلغ عرضه فقط 0.01 انكستروم مع طول ترابط مقداره 30 سنتيمتر. من ناحية ثانية فإن أغلب مصادر الضوء الاعتيادية تتكون من أعداد كبيرة من الأطوال الأوسع ولكل واحد منها طول ترابط صغير جداً. لربما بلغت جزء من المليمتر.

أما المواد الصلبة فإن الخطوط تتسع بحيث تعطي شكلاً متصلاً بسبب كون الذرات متقاربة جداً بحيث أن المجالات الكهربائية والمغناطيسية للذرات تشوه مستويات الطاقة إلى درجة كبيرة وبتغير واسع وهذا سنشير إليه لاحقاً. عند دراستنا لليزرات الحالة الصلبة سندرس أطول الترابط المتوفرة من الليزرات لاحقاً في الفصل التالي، يكفي أن نقول أنه يمكن تحقيق أطوال ترابط بمئات الكليومترات وبكلام أشمل. أن أغلب لأجهزة الليزر المتوفرة تجارياً أطوال ترابط تتراوح بين بضعة سنتيمترات وعشرات الأمتار.

## ٢-٢ - الترابط الفضاء Space Coherence :

لكي يكون مصدر الضوء مترابط يجب أن يكون مترابط زمنياً وفضائياً، يتحتم علينا الآن دراسة ترابط الفضاء بصورة أكثر تفصيلاً.

إن الترابط الزمني يعني إمكانية التنبؤ عن الطور والسعة بعد فاصلة زمنية بين مشاهدتين observations ابتدائية ونهائية. إذا تكررت عملية التنبؤ هذه بعد زمن معين، يقال أن الترابط الزمني قد تحقق وهو ذا قيمة تساوي الفواصل الزمنية بين التنبؤات، في حالة ترابط الفضاء، فإن الاهتمام لا ينصب على الملاحظات المختلفة وبنقاط مختلفة في الزمن على طول الرتل الموجي، وإنما على نقاط مختلفة في الفضاء وعلى جبهة الموجهة يقال أن الموجه مترابط فضائياً إذا كان هنالك فرق طور ثابت بين أية نقطتين مختارتين على جبهة الموجه، إن المصطلح ثابت يعني زمن طويل بما فيه الكفاية بحيث نستطيع القيام بعملية معينة على جبهة الموجه ولتكن مشاهدة بواسطة العين أو بواسطة التصوير، إن الليزر جيد التصميم يمكنه أن يحتفظ بترابط فضائي غير محدود تقريباً بالمقابل للترابط الزمني الذي يستمر اعتيادياً فقط الجزء من الثانية. إن مصادر الضوء التقليدية أو الاعتيادية تعتبر دائماً غير مترابطة بسبب الانبعاث العشوائي غير المتساوي للفوتونات من قبل ذرات المصدر.

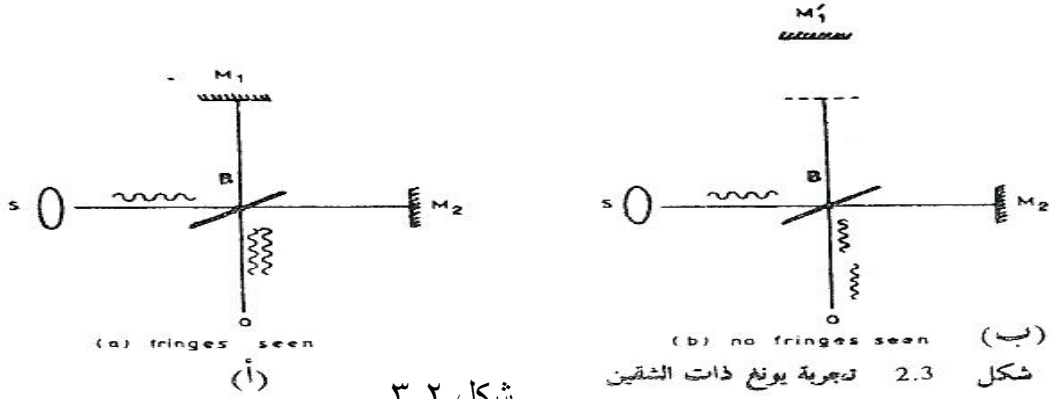
أما في حالة الليزر فالوضعية مختلفة تماماً، وسبب هذا كون عملية خلق الفوتونات ناتجة عن سلسلة من الانبعاثات المرغمة والتي فيها جميع الفوتونات تمثل موجات جميعها بنفس الطور. إن ترابط الزمن والفضاء يمكن تلخيصها وفيما يلي: عندما نتكلم عن ترابط الزمن فإننا نقصد أن الأطوار النسبية بين أية نقطتين "في الزمن" يجب أن تبقى ثابتة لفاصلة زمنية طويلة. بينما يشتمل ترابط الفضاء من ناحية أخرى على الأطوار النسبية بين نقطتين في الفضاء بحيث تبقى ثابتة لفاصلة زمنية طويلة أيضاً. في كل حالة كلما كانت الفاصلة الزمنية طويلة كلما كان الترابط أكبر.

لغرض توضيح هاتين الفكرتين بصورة عملية من المفيد دراسة تجربتين تقليديتين. الأولى قام بها مايكلسون والأخرى قام بها يونغ Young .

## ٣-٢ - مدخل مايكلسون: The Michelson Inter Formatter :

الشكل ٣-٢ يوضح الترتيب الضوئي الذي يطلق عليه مدخال مايكلسون، أن جبهة موجهة من المصدر S يتم شطرها إلى جزئين بواسطة المرآة B المفضضة جزئياً Partially silvered لأجل توفير جبهتي موجهتين لهما نفس الشكل والشدة، إن المرآتين

$M_2, M_1$  تعملان على إعادة جمع جبهتي الموجتين في نقطة المشاهدة  $O$  والتي غالباً تكون نظارة فلكية telescope .



شكل ٢-٣

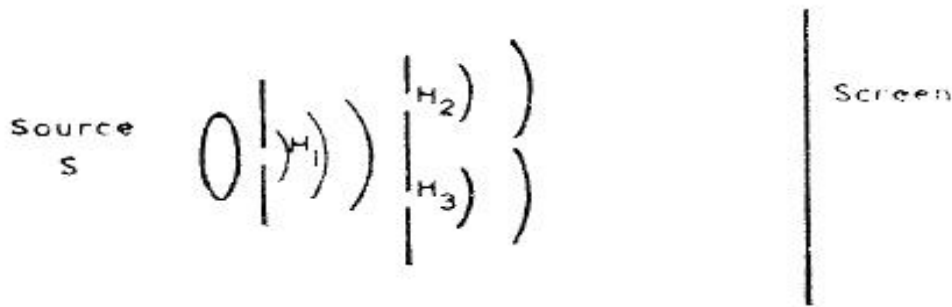
تصور أن رتل موجة ينبعث عن المصدر المنتشر (الممتد) extended sources  $S$  إذا كانت المسافة بين شاطر الحزمة والمرآتين متساويتين ( بغرض أن سمك شاطر الحزمة مهملة) فإن رتلي الموجتين الناتجتين بواسطة شاطر الحزمة تتداخلان overlap تماماً في طريقهما من شاطر الحزمة إلى نقطة المراقبة  $O$  نتيجة لذلك نحصل على أهداف عند النظر خلال النظارة الفلكية ( انظر شكل ٢-٣ أ). ولو عملنا على تأخير إحدى رتلي الموجتين سوف لن يحصل تداخل كلي في النظارة الفلكية. نتيجة لذلك يقل وضوح الأهداف لأن ذلك الجزء من رتل الموجة والذي لم يحصل فيه تداخل يضيف خلفية براقية (مضيئة) على نظام الأهداف.

لو تحركت المرآة  $M_1$  إلى الموقع الجديد  $M_1$  (انظر شكل ٢-٣ ب) بحيث أن المسار المقطوع من قبل أخذ رتلي الموجة أطول ( أو أقصر ) من المسار الذي يقطعه الرتل الآخر بمقدار طوله على الأقل، سوف لن نرى أهداف تداخل interference Fringes . سنشاهد فقط إضاءة منتظمة خلال النظارة الفلكية، لو حركنا أي من المرآتين عمودياً على مستويهما بحيث تختفي الأهداف، فإن المسافة التي تحركتها أي من المرآتين تساوي نصف طول رتل الموجة، بهذه الطريقة نستطيع قياس طول رتل الموجة وكذلك طول الترابط. من هذه العملية نستطيع أن نستخرج زمن الترابط، وهو الزمن الذي يستغرقه رتل الموجة كي يقطع أعظم مسار إضافي ممكن بحيث أن الأهداف عنده قابلة للرؤية.

إن استخدام مصدر ممتد للضوء في مدخال مايكلسون يساعد على رؤية الأهداب ضمن زاوية معقولة خلال النظارة الفلكية. إن ترابط الفضاء للمصدر غير ضروري لأن فرق الطور النسبي بين جهتي الموجتين المعاد جمعها ثابت مهما كانت سرعة تغير قيمتهما المطلوبة.

## ٥-٢ - تجربة الشقين ليونغ : Young's Two-Slit Experiment

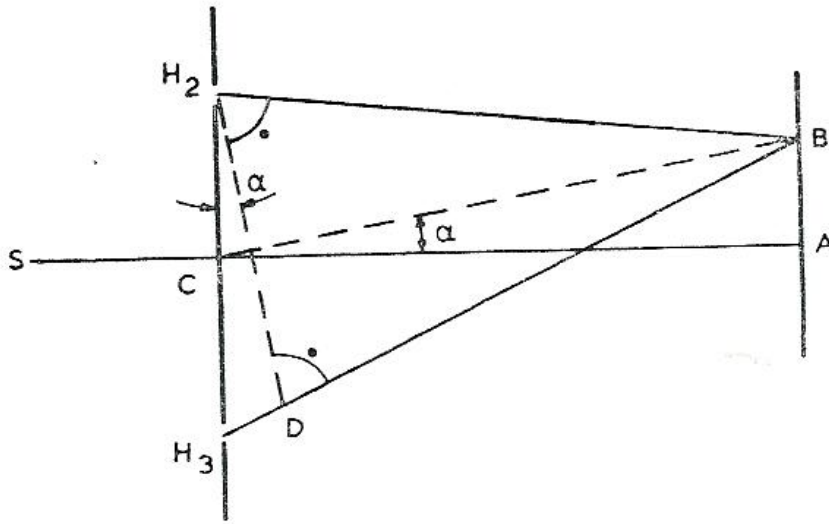
إن تجربة الشقين ليونغ، التي وصفت في الفصل الأول على أنها الأساسية أو الموثوق بها لقبول النظرية الموجبة للضوء، مثال جيد لضرورة الترابط الفضائي لكي يحدث التداخل. في تجربة يونغ، الموضحة في الشكل (٤-٢) هناك مصدرين للضوء يبعثان موجات تجمع لتكون أهداف على شاشة معينة.



شكل 2.4 تجربة يونغ ذات الشقين

شكل ٤-٢

إن الفاصلة بين كل هديين مكونين بواسطة الشقين يمكن حسابها بسهولة عند الرجوع إلى الشكل (٤-٢) حيث أن  $H_2, H_3$  هما شقان يعملان كمصدرين وهما بنفس الطور، إذا كان الشقان متماثلين بالمسافة على الخط SA (محور الضوء optic axis) يمكن مشاهدة هدب مضيء على الشاشة في النقطة A تصور أننا اخترنا موقعاً جديداً. لآ بحيث أن AB يقابل زاوية a عند النقطة C. فإن الاختلاف في فرق المسارين الشعاعين المارين من Ha إلى B ومن  $H_2$  إلى B يعتبر موجوداً. لو أن AB صغير مقارنة مع AC فإن



شكل 2.5

شكل ٥-٢

$$a = \frac{AB}{AC} \quad (2-15)$$

$$\frac{H_3P}{H_2H_3} \quad \text{ولكن (2-16)}$$

لو تم اختيار B لتكون في موقع أول هذب مضيء بعيداً عن المركز فإن

$$H_3P = A \quad (2-17)$$

وبتعويض المعادلة (2-17) في المعادلة (2-16) واستخدام المعادلة (2-15) نحصل

على:

$$\frac{I}{H_2H_3} = \frac{AB}{AC}$$

ليكن عرض الشق  $H_2H_3 = d$

وليكن أيضاً  $AC = 1$

لذلك فإن فاصلة الهذب تكتب على شكل

$$AB = \frac{If}{d}$$

إذا كان  $I = 6328$  انكستروم  $f = 1$  متر ،  $d = 1$  ملمتر . فإن قيمة فاصلة الهذب

ستكون بحدود 0.6 ملمتر تقريباً.

في حالة استخدام مصدر اعتيادي ممتد وغير مترابطه يجب وضع ثقب صغير جداً

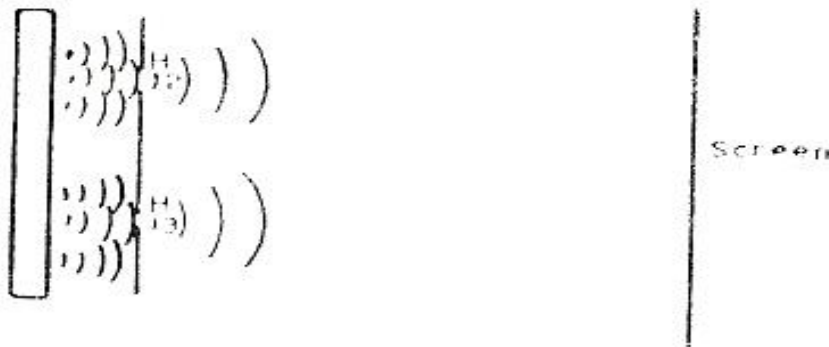
small pinhole في  $H_1$  والذي يعمل كمصدر نفطي مترابط للضوء لغرض إضاءة الشقين



في  $H_2$  ,  $H_3$  لقد فرض أن مرشح ألوان قد وضع أمام المصدر الضوئي لكي ينتج ضوء أساسياً أحادي اللون . أن  $H_2$  و  $H_3$  يعملان كمصدرين مترابطين وتظهر مجموعة من الأهداب على هيئة خطوط مستقيمة تقريباً على الشاشة، في حالة عدم استخدام مرشح فإن مصدر الضوء الأبيض سيؤدي إلى ظهور أهداب ملونة والتي تتداخل فيما بينها لتلطيخ النموذج.

لنفرض أن الشقين  $H_2$  و  $H_3$  تمت إضاءتهما بواسطة مصدر غير مترابط مثل أنبوب فلورة كما هو موضح في الشكل (٦-٢) في هذه الحالة حتى لو وضعنا مرشح أمام الأنبوبة لتوفير مصدر أحادي اللون فإن الأهداب سوف لا تظهر، لو كان بالإمكان أخذ صورة للشاشة بزمن قدرة ١٠ ثانية فإن نظام معين للأهداب سيظهر، ولو أخذنا صورة أخرى ولنفس الفترة الزمنية بعد الصورة الأولى بعد زمن معين فإن أهداباً ستظهر في موقع مختلف بسبب تغير الطور النسبي بين  $H_2$  و  $H_3$  ولذلك لفترة زمنية طويلة فإن المعدل المتغير بسرعة للأهداب ينتج إضاءة منتظمة بالنسبة للعين البشرية.

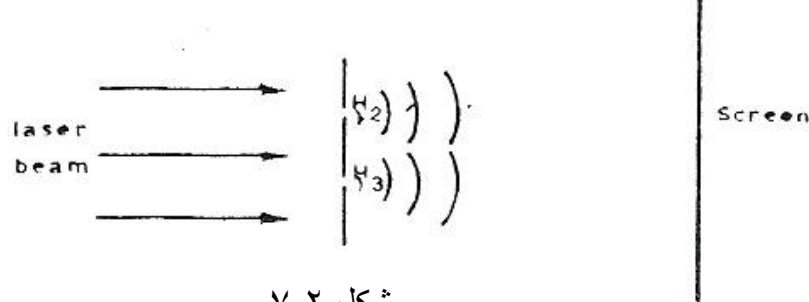
الشكل (٧-٢) بين الحالة بعد تبديل الأنبوب بليزر تبعث جبهة موجة متساوية، في هذه الحالة تظهر الأهداب وذلك لأن الشقين  $H_2$  و  $H_3$  يضاءان بجبهة موجة مترابطة فضائياً أي أن الشقين  $H_2$  و  $H_3$  يعملان كمصدرين بنفس الطور.



شكل ٦-٢ تجربة يونغ ذات الشقين باستخدام انبوبة فلورة كمصدر.

شكل ٦-٢

الشكل (٧-٢) يرينا الحالة بعد تبديل الأنبوبة، ليزر تبعث جبهة موجة مستوية في هذه الحالة تظهر الأهداب وذلك لأن الشقين  $H_2$  و  $H_3$  يضاءان بجبهة موجة مترابطة فضائياً أي أن الشقين  $H_2$  و  $H_3$  يعملان كمصدرين بنفس الطور



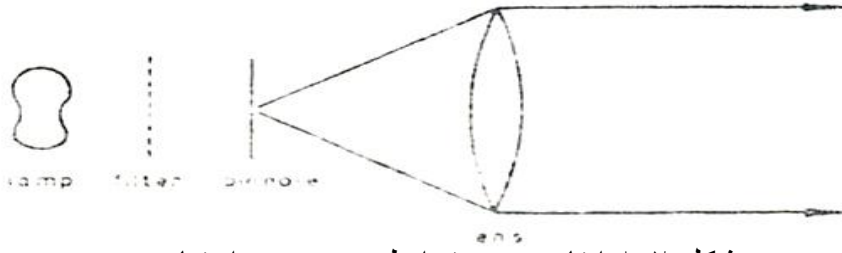
شكل ٧-٢

كما يظهر في الشكل (٧-٢) جبهة مستوية تضئ الشقين لو وضعها شاشة ناشرة Diffusing screen بين الليزر والشقين فهل يمكن أن ترى الأهداب؟ والجواب يكون بالإيجاب لأن الطور عند الشقين ليس مهماً أن يكون نفسه بل المهم أن يكون الفرق فيه ثابتاً. وهنا ظهرت مسألة جلبت التباس لبعض من الوقت، وأن الترابط الفضائي لا يعني بالضرورة أن تكون جبهة الموجة مستوية بل يعني أن شكل جبهة الموجة لا يتغير مع الزمن. وتعتبر جبهة الموجة المستوية حالة خاصة من ترابطه الفضائي، حيث أن الطور ثابت على امتداد جبهة الموجة ويطلق عليه أحادي الطور uniphase لو أن الشاشة الزجاجية الموضوع أمام الليزر في الشكل (٧-٢) ثم تدويرها بشكل سريع فإن الضوء يصبح غير مترابطة فضائياً، وأن الأهداب سوف لن تظهر.

## ٦-٢ - موجات مترابطة من مصادر غير مترابطة:

### Coherent Waves From Incoherent Sources

إن الشكل (٨-٢) يرينا كيف أن موجة أحادية الطور ومترابطة زمنياً يمكن الحصول عليها من مصدر غير مترابطة باستخدام مصباح تحت ضغط واطئ ثم وضع فتحة صغيرة جداً أمامه يتم بعد ذلك ترشيح الضوء لغرض الحصول على طول موجي واحد. لو وضعنا عدسة بحيث تقع بؤرتها عند الفتحة الصغيرة فإن ذلك يؤدي إلى إنتاج جبهة موجة مستوية (أحادية الطور)، مع ذلك يجب أن نتذكر أن موجة كهذه تكون شدتها واطئة جداً، وذلك بمراتب عديدة أقل من شدة الليزر.



شكل ٨-٢ إنتاج ضوء ترابط من مصدر اعتيادي

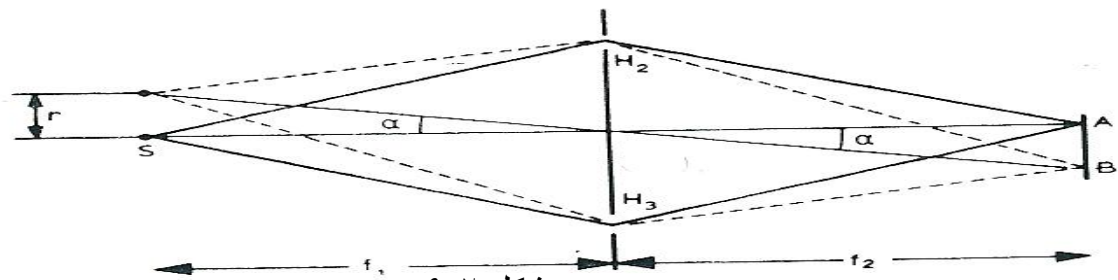
إن حجم الفتحة الصغيرة هذه لغرض ترشيح الضوء غير المترابط فضائياً لها أهمية حرجة. فلو كانت الفتحة عبارة عن شق فإن العرض الأعظم له يوجد يمكن تمثيله كما هو في الشكل (٩-٢) حيث أن  $H_2$  و  $H_3$  شقان متماثلان الموقع بالنسبة للخط  $SA$  ويعبدان عن بعضهما مسافة  $3r$  ويتكون هذب مضئ إلى النقطة  $A$  (أي زيادة في عرض الشق)، فإن ذلك يؤدي إلى انتقال الهذب المضئ من  $A$  إلى موقع جديد هو  $B$ . لو أن المسافة التي تحركها المصدر  $r$  كافية فإن الهذب المضئ سيتطابق مع الموقع. اجعل قيمة  $r$  مساوية إلى مقدار ما بحيث أن أول هذب مضئ زحف مسافة مقدارها نصف فاصلة هذب وهكذا فلو أن عرض الشق ازداد إلى أن أصبح يساوي  $2r$  فإن الأهداب ستختفي كلياً ويقال في هذه الحالة عن المصدر أنه أصبح غير مترابطة. أن فاصلة الأهداب تعطى بالمعادلة (٢-١٨) ولهذا لكي يكون المصدر غير مترابطة.

$$AB = \frac{1}{2} \frac{lf_2}{d} \quad (2.19)$$

$$a = \frac{AB}{f_2} = \frac{r}{f_1} \quad (2.20)$$

$$\frac{rf_2}{f_1} = \frac{1}{2} \frac{lf_2}{d} \quad (2.21)$$

$$r = 0.5 \frac{lf_1}{d} \quad (2.22)$$



شكل ٩-٢

أي أن يكون عرض الشق أقل من  $lf_1/d$  لكي يعمل كمصدر ترابط، ولمصدر دائري الشكل نصف قطره ٣,٠ فيمكن البرهنة على أن نصف القطر للمصدر لكي يكون غير مترابط وذلك عندما يعطي نصف قطر المصدر بالقيمة التالية.

$$r = 0.61 \frac{lf_1}{d} \quad (2-23)$$

إن المساحة التي يحددها نصف القطر هذا يطلق عليها مساحة الترابطية coherence area . ويمكن البرهنة على المصدر لكي يكون مترابط كلياً فإن نصف قطره ( في حالة كون المصدر دائري الشكل ) يكتب الشكل التالي:

$$r = 0.16 \frac{lf_1}{d} \quad (2-24)$$

وهكذا وفي تجربة يونغ Young إذا استعملنا على سبيل المثال ضوء طول موجته ٥٠٠٠ أنغستروم وكانت المسافة بين الشقين ١ مم ويبعدان عن الشاشة مسافة ١٠ سم، فإن أعظم قطر للمصدر الدائري الشكل ومن المعادلة ٢٤-٢ يساوي 16/m .

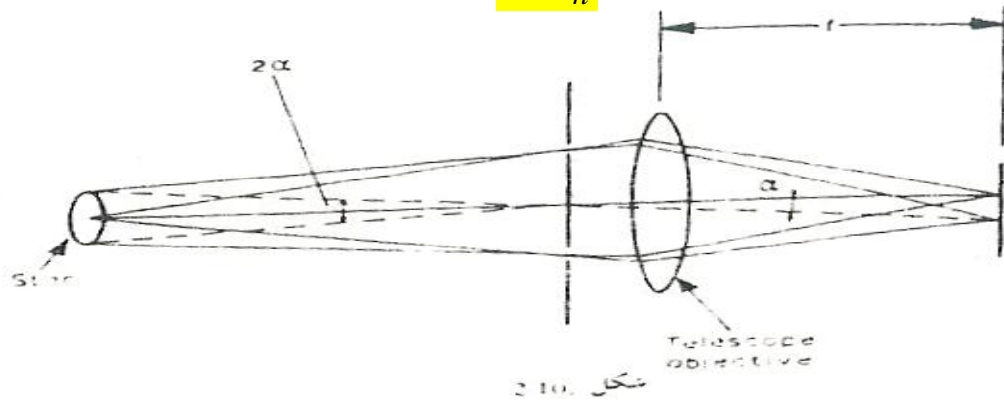
كذلك فإننا لو استخدمنا عدسة محدبة بعدها البؤري f يساوي ٢,٨ سم، لتوليد جبهة موجة مستوية ومترابطة عن طريق جعل الضوء الذي طول موجته ٥٠٠٠ أنغستروم فإن أعظم والمار من خلال فتحة صغيرة موضوعة أمام المصدر متوازياً فإن الفتحة الصغيرة لا يجوز أن يتجاوز قطرها 0.45/m .

إن أحد التطبيقات الشيقة والممتعة للمصادر غير المترابطة والتي تظهر وكأنها مترابطة على أن تكون صغيرة كفاية هو في قياس القطر الزاوي للنجوم. لنفرض أن أحد النجوم تمت رؤيته بواسطة نظارة فلكية مزودة بشقي يونغ's Young وموضوعين أمام العدسة العينية كما هو موضح في الشكل ٢-١٠ إن صورة النجم ستكون على شكل نموذج حيود محدود الحجم تقطعه مجموعة من الأهداف المستقيمة. لو حركنا الشقين بصورة تدريجية عن بعضهما فإن الأهداب ستختفي . لو أن فاصلة الشقين عند هذا الموضع هي h فبالاعتماد على المعادلة 2.22 فإن

$$a = \frac{1}{2} \frac{lf/h}{f} \quad (2-25)$$

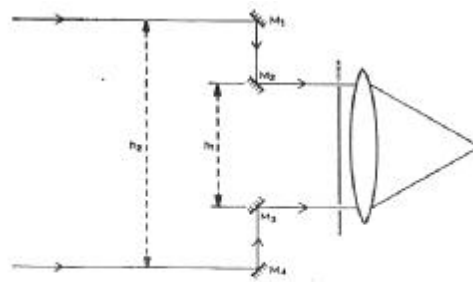
$$a = \frac{l}{2h} \quad (2.26) \text{ أي أن}$$

لذلك فإن القطر الزاوي للنجم يساوي  $2a = \frac{l}{h}$



شكل ١٠-٢

إن الترتيب الموضح في الشكل ١١-٢ يفيد من الناحية العملية حيث يجنبنا مشكلة استخدام عدسات عينية كبيرة . إن الضوء القادم من النجم ينعكس بواسطة اربع مرآيا مستوية  $M_1, M_2, M_3, M_4$  وبهذه الطريقة تزداد فاصلة الشقين من  $h_1$  و  $h_2$  وهذا يؤدي إلى زيادة التحليل الزاوي . إن نظاماً كهذا يطلق عليه مدخال مايكلسون النجمي *Michelson stellar ignorance* أما أحدث الأجهزة المستعملة لهذا الغرض فهو ما يعرف باسم مدخال هانبري - براون وتويز *knownwnasa Hanbury- Brownad Twisstell arinterfevmetr* وهو يمثل المكافئ الالكتروني لمدخال مايكلسون النجمي.



شكل ١١-٢ مدخال مايكلسون النجمي

شكل ١١-٢

## الفصل الثالث

### المادة الخلفية للأشعة والفيزياء الذرية

Background material on radiation and  
atomic physics

### المادة الخلفية للأشعة والفيزياء الذرية:

#### Background material on radiation and atomic physics

تعتمد تقنية الليزر على أفكار مختلفة وحقائق تركزت في مجالات مختلفة من الفيزياء والهندسة. فهي تستند بمعظم ثقلها على تقنية البصريات الاعتيادية، فتستخدم مثلاً المرنانة Resonator الكهرومغناطيسية، كما وتتضمن صفات التفريغ الكهربائي في الغازات، وبصورة عامة، تعتمد هذه التقنية على تلك الظواهر الموجودة في الفيزياء الذرية والجزيئية والتي لا تتواجد في هيكل الفيزياء التقليدية. وتعد تقنية الليزر ممكنة فقط بسبب وجود الظواهر الفيزيائية التي تفهم بدلالة النظرية الكمية، وجديراً أن يكون الروس قد أطلقوا على الليزر "المولدات الكمية للأشعة".

ومع ذلك فإن هناك العديد من الأوجه العملية لتقنية الليزر مما يجعلها فرعاً من فروع الهندسة. فعندها تتعامل مع موضوع الليزر من الناحية العملية، نجد إنه ليس بالإمكان دائماً اشتقاق كل شيء من المبادئ الأولية. فلذلك وجب علينا أن ندرك النتائج الرئيسية لهذه المبادئ. ولا يمكن أن نفهم هندسة الليزر من فهم الصفات الرئيسية لنظرية الكم، كما ويحتاج توضيح العمليات المتبعة في تقنية الليزر إلى معرفة بعض الحقائق الأساسية في البصريات والفيزياء الذرية وفيزياء الطيف. فلذا يجب علينا إشراكها عرفياً بالمصطلحات العلمية المستخدمة في هذه المجالات باستثناء ذلك الشخص الذي يكون ملماً بجميع القوانين اللازمة في هذا المجال وملماً بالمصطلحات العلمية المناسبة. على الرغم من كون معظم الأشخاص الباحثين فعلاً في الليزر قد تعاملوا مع الكثير منها في دراستهم للبصريات والفيزياء الحديثة والنظرية الذرية. وبما أن الغرض من هذا الكتاب هو مقدمة، فمن الجدير أن نبدأ بمسح

مختصر للقوانين والعلاقات الأساسية اللازمة وتتعرف على المصطلحات التي ستستخدم في الفصول اللاحقة وتذكر الحقائق الأساسية مجمعة من دون أن نحاول استعراض النظرية الفيزيائية استعراضاً نظامياً. وأما تلك المواضيع كالاتحام مثلاً والانبعثات المستحث والتي تلعب دوراً أساسياً فسنتأني إلى توضيحها بصورة موسعة.

ولربما لا يرغب القارئ المضطلع في الفيزياء الحديثة من أن يعنى النظر في المحتويات الموجودة في فصل المقدمة. ولكن بإمكانه أن يستخدمه مرجعاً للمصطلحات والتعاريف للحدود والصيغ المستعملة في الفصول اللاحقة.

## ١.٢ الضوء والقوانين العامة للإشعاع :

إن اهتمامنا سيتركز على الأشعة الكهرومغناطيسية. ضمن أو بالقرب من منطقة الأشعة المرئية. فالطول الموجي في منطقة اهتمامنا يتغير من  $0.3\mu\text{m}$  وإلى  $03\mu\text{m}$  والتردد من  $10^{13}$  إلى  $10^{15}$  هرتز. مع التأكيد على حقيقة تعاملنا مع الأشعة الكهرومغناطيسية وليس مع أشعة مرئية فقط. وهنا سنتفادى العلاقات العامة المستعملة في البصريات الاعتيادية، التي تعتمد في تفسيرها للضوء بتأثيره على العين البشرية. وبناء على ذلك، سوف لا نتكلم عن الإضاءة ولكن سنتكلم عن الكميات المشعة التي بالإمكان قياسها باستخدام كاشف له القابلية على تسجيل انتقال الطاقة بوساطة الأشعة الكهرومغناطيسية وسنعيد باختصار العلاقات المستعملة الأساسية المقرونة بانتقال الطاقة من هذا النوع.

إن ما يشبه فيض الإضاءة في البصريات الاعتيادية هو الفيض الإشعاعي radiation flux . ويعرف بمعدل الطاقة الإشعاعية المارة خلال سطح ما، ويقاس بوحدات القدرة، أي بالواط ( جول كل ثانية ) أو ارك لكل ثانية، وأما شدة الأشعة الساقطة على السطح فتدعى بكثافة الفيض الإشعاعي، بينما يدعى الفيض الإشعاعي المبتعث لكل وحدة مساحة من سطح المصدر، باسم لانبعثات الإشعاعي radiant emittance والكميتان الأخريان لهما الوحدات نفسها، ووحدتهم في نظام MKS هي الواط لكل متر مربع، ولكي نعين انتشار الأشعة الإتجاهي **directional distribution** لسطح مشع، نحتاج إلى فكرة واضحة عن الإشعاعية



radiance في اتجاه معلوم. وهذا هو الفيض الإشعاعي باتجاه معلوم لكل وحدة  $N$ . وبالإمكان توضيح معناه كما يلي: سطح مشع معلوم مساحته  $A$  يميل بزاوية  $q$  عن الخط العمودي على السطح، فيكون الفيض الإشعاعي في مخروط صغير ذات زاوية صلبة مقدارها  $d\Omega$  streadians حول الاتجاه المعني هو  $d\Omega \cos q$   $N$  وعندما تكون  $N$  غير معتمدة على الاتجاه، نقول بأن السطح يشع أو يشتم استناداً لقانون لامبرت، وفي هذه الحالة يكون الفيض الإشعاعي الكلي من السطح هو  $\pi NA$  ويرتبط بالكمية  $N$  كمية أخرى تدعى كثافة الطاقة الإشعاعية وتعرف بكمية الطاقة الإشعاعية  $U$  المخزونة في وحدة الحجم. والآن لنستفد من وجود المرشحات  $filters$  والموحدات  $monochromators$  التي تساعدنا على تصنيف الأشعة بدلالة ترددها أو طولها الموجي، لأنه يمكن اعتبار جميع الكميات المتعلقة بالأشعة دوال للتردد  $\nu$  « أي للطول الموجي  $\lambda$  ؛ ويمكن تذييل رموز هذه الكميات بحروف دلالية سفلية. فالرمز  $u_l$  يعرف كما يلي: كثافة الطاقة الإشعاعية للفترة الترددية المحصور ما بين  $\nu$  و  $\nu + d\nu$  هي  $u_n dn$ . كما أن الرمز  $u_l$  يعود إلى كثافة الطاقة في الفترة من الطول الموجي  $l$  إلى  $l + dl$  وبناءً على هذا، فإن الكميتين  $u_n$  و  $u_l$  هما كميتان مترابطتان ولكنهم دوال لكميات مختلفة. وأما الفترتان  $n$  إلى  $n + dn$  و  $l$  إلى  $l - dl$  فهما فترتان متكافئتان توضحان المنطقة الطيفية نفسها عندما يكون  $dn/n = dl/l$  وبسهولة يمكن أن نبين بأن  $u_l dl = u_n dn$  وهنا تعطى كل من  $n$  و  $l$  بوحدات اختيارية، ولكن حاصل ضربهما هو عبارة عن سرعة الضوء.

ومن الملائم عادة أن نصف الأشعة بدلالة الطول الموجي عندما نتعامل معها في التجارب والتطبيقات العملية، ولكن في الحسابات النظرية، وخاصة تلك التي تشتمل على الطاقة يكون التردد أكثر ملائمة كمتغير للدالة. وعندما تكون الأشعة الكهرومغناطيسية الموجودة في تجويف رنان في حالة توازن حراري عند درجة الحرارة المطلقة  $T$  فإن دالة التوزيع للكثافة الإشعاعية المعتمدة على التردد تعطى بقانون بلانك:

$$u_n dn = \frac{8\pi h n^3}{c^3} \frac{dn}{e^{(hn/kT)} - 1} \quad (3.1)$$

وهنا  $h$  هو ثابت بلانك ،  $k$  هو ثابت بولتسمان، و  $c$  هي سرعة الضوء، وأما القيم العددية لهذه الكميات فمعطاة في الملحق A في نهاية الكتاب.

من المعروف أن الأشعة تهرب من خلال ثقب مقطوع في جدران تجويف ما بمعدل يساوي  $W = uc/4$  لكل وحدة مساحة من الثقب. وهذه هي كيفية الفيض الإشعاعي في مخرج التجويف، وهو يمثل الانبعاث الإشعاعي للجسم الأسود. وهناك العديد من الأجسام تشع مثل هذا الجسم الأسود المثالي. وبالحقيقة، يمكن حساب التوزيع الطيفي spectral distribution للأشعة المنبعثة من مصابيح متوهجة، ومن أقواس تفريغ كهربائية شديدة بتقريب مناسب وذلك بتطبيق علاقة بلانك.

وأما في التطبيقات العملية، فيفضل توضيح توزيع الطاقة الإشعاعية بدلالة لطول الموجي، وتعطى العلاقة بالشكل التالي:

$$W(\lambda, T)d\lambda = \frac{C_1 \lambda^{-5} d\lambda}{\exp(C_2/\lambda T) - 1}, \quad (3.2)$$

حيث  $C_1 = 2\pi hc^2$  ،  $C_2 = hc/k$  ، وأما الكمية  $W(\lambda, T)$  فتمثل الفيض الإشعاعي اللطيف distribution . نستدل من ما مضى، على أن الطاقة الإشعاعية المنبعثة، من جسم متوهج لا تتمركز في منطقة ترددية معينة بل أنه عند كل درجة حرارة، يتواجد طول موجي يكون عنده الفيض الإشعاعي للظيف أعلى ما يكون، وليكن هذا الطول الموجي هو  $(\lambda_M)$  ويمكن حسابه من قانون الإزاحة للعالم وين Wien's displacement law .

$$\lambda_M T = a \quad (3.3)$$

حيث  $a$  هي كمية ثابتة وتتناسب القيمة العظمى للفيض الإشعاعي الطيفي عند درجة حرارة معينة تناسباً طردياً مع القوة الخامسة لدرجة الحرارة المطلقة. ونرمز للقيمة العظمى بالرمز  $W_M(T)$  آنئذ.

$$W_M(T) = W(\lambda_M, T) = bT^5 \quad (3.4)$$

وأما الفيض الانبعاثي الكلي عند الدرجة الحرارية المطلقة  $T$  فيعطى بقانون ستيفن-بولتسمان كما يلي:

$$W_T = \int_0^{\infty} W(\lambda, T) d\lambda = s T^5 \quad (3.5)$$

ومن الملائم عادة في البصريات أن نحيد عن التمسك باستعمال نظام المتر كغم ثانية MKS فعندما تقاس المساحة السطحية بوحدة السنتمتر المربع ويقاس الطول الموجي بالانكشتروم ( $10^{-10} \text{ m}$ ) فإن الثوابت المستعملة ستمتلك القيم التالية:

$$C_1 = 3.741 \times 10^{20} \text{ W - cm}^{-2} (\text{A}^\circ)^4,$$

$$C_2 = 1.439 \times 10^8 \text{ A}^\circ \text{ K}$$

$$a = 2.898 \times 10^7 \text{ A}^\circ \text{ K}$$

$$b = 1.286 \times 10^{-19} \text{ W - cm}^{-2} (\text{K}^\circ)^{-5},$$

$$s = 5.679 \times 10^{-12} \text{ W - cm}^{-2} (\text{K}^\circ)^{-4},$$

وبالامكان تبسيط الحسابات العددية للأشعة المنبعثة من الجسم الأسود في منطقة معينة من الطيف بتعريف المتغير  $=IT$  ، والسبب في هذا هو كون الدوال  $W(\lambda(T)/W_M(T)$  و  $\int_0^{\lambda} W(\lambda\lambda T) d\lambda\lambda / T$  هما دوال للمتغير  $c$  فقط. ويمكن الرجوع إلى الدوال وهي مرتبة بمقاديرها النموذجية في المرجع (1) ويجرى عادة حساب قيمة الدالة  $(W(\lambda T))$  أو تكاملها لفترة معلومة من الطول الموجي  $I$ ، بإيجاد أولاً القيمة العظمى للإنبعاث الإشعاعي للطيف  $W_M(T)$  أو الانبعاث الإشعاعي الكلي  $W_T$  ومن ثم تضرب بالقيم المناسبة للدوال الموجودة في الجداول.

فمثلاً الجسم الأسود عند درجة الحرارة  $5200 \text{ K}$  يمتلك قيمته الإشعاعية العظمى عند الطول الموجي  $5575 \text{ \AA}$ ، مع العلم أن هذا الطول الموجي يقع في مركز الطيف المرئي تقريباً. وعلاوة على ذلك، فإن حوالي 40% من أشعة هذا الجسم تقع في منطقة الأشعة المرئية من الطيف، وحوالي 6% في المنطقة فوق البنفسجية وأما النسبة الباقية فتقع في منطقة الأشعة تحت الحمراء.

وأما المصادر الضوئية الغازية، فتنبعث عند اشتغالها تحت ضغوط منخفضة بأشعة تحوي مجاميع من الأطياف الخطية العريضة منها والحادة. وإضافة لذلك، ربما تحوي طيفاً مستمراً ذات شدة أقل من شدة الأطياف الأخرى. وتعتمد ترددات هذه الخطوط الطيفية

المبتعثة على مكونات الغاز المستخدم. وأما شدة إضاءة الخطوط وكذلك اتساعها فيعتمدان على عدة عوامل، كالضغط ودرجة حرارة الغاز والطريقة المستخدمة لتهيج الغاز. فإذا كان الضغط منخفضاً تكون الخطوط الطيفية حادة، ولكن إضاءة الغاز باعتباره مصباحاً تكون واطئة. وكلما ازداد الضغط، تزداد الإضاءة ويزداد عرض الخطوط الطيفية، ويبلغ العشرات من الأنكستروم، وأخيراً تتراكم الخطوط مع بعضها البعض وتفقد صفة الطيف المتقطع.

وأما المصادر ذات الإضاءة الأعلى - أعني ذات فيض إشعاعي أعلى في المنطقة المرئية - فهي الأقواس ذات الضغط العالي والأنابيب المتفلورة، ولكي نحصل على إضاءة عالية تشغل الأنابيب المتفلورة بقدرة عالية جداً، ويمكن الحفاظ على مستواها العالي لفترات قصيرة من الوقت. وهذا بالطبع يحتاج إلى تشغيل متقطع بدوره عمل منخفضة. ويتم تزويد هذه الأنابيب المتفلورة بالطاقة اللازمة عن طريق تفريغ موسعات كبيرة تتراوح سعتها ما بين 100 و عدة آلاف من المايكروفراد ومشحونة لفلوطية يتراوح مقدارها من 1000 إلى 2000 فولت، وتعطى أنابيب الزنون Xenon المتهيجة بهذه الطرق وميضاً بحدود 1 msec وبتوزيع طيفي يشابه تقريباً المبتعث من جسم أسود في درجات حرارة ما بين 6500 °K و 10.000

ويشع الضوء المبتعث من المصادر المذكورة آنفاً في جميع الاتجاهات وتملئ الأشعة المبتعثة من سطح صقيل لجسم صلب متوهج، زاوية صلبة مقدارها  $2\pi$  sr (طبعاً لا تكون الشدة متجانسة بل تخضع لقانون لامبرت). ولإنتاج حزمة متوازية من الأشعة المبتعثة من المصادر المذكورة أعلاه، يكون من الضروري وضع المشع في المستوى البؤري للجهاز البصري. ولكن بما أن المصدر ذات حجم محدود، فالحزمة الناتجة سوف لا تكون متوازية، ولكن سيكون هناك تشتت زاوي مساوياً للحجم الزاوي للمصدر منظوراً من أحد المستويات الرئيسية للجهاز البصري. ولكيما نحصل على حزمة حادة، نستعمل فقط جزءاً صغيراً من المصدر الممتد، وبالإضافة إلى كل ما ذكر، فإنه لا يمكن استخدام كل الطاقة المبتعثة من هذا المصدر شبه النقطي وذلك بسبب فتحة الجهاز البصري التي تعمل كمانع فعال يحمي جزءاً كبيراً من الأشعة. ومن هذا يتبين بأنه لا يمكن تحويل إلا جزءاً صغيراً من الطاقة المبتعثة

من المصدر الضوئي الاعتيادي إلى حزمة متوازية تقريباً. وكلما كانت حاجتنا إلى توازي الأشعة أكثر، كان المتوفر من الطاقة أصغر.

ويمكن استخدام مجاميع من المرايا والعدسات لتوجيه الأشعة المبعثة من المصدر والساقطة على جسم ما. وبهذا الأسلوب يكون من الممكن تركيز الضوء على حاجز وربما يكون بمقدورنا أن نبتكر جهاز بصري بإمكانه خلق صورة على سطح ما، تكون إضاءتها أكثر بكثير من إضاءة المصدر الممتد نفسه. ومن مفهومنا الحالي، هذا يعني بأن كثافة الدفق الضوئي عند الصورة هي أعلى من الكثافة الموجودة عند المصدر، ولكن هناك نظرية معروفة في البصريات التقليدية لا تسمح بحدوث مثل هذه الظاهرة وبعبارة أدق لا يمكن إحداثه بمشعات تخضع لقانون لامبرت إذا كانت الأوساط التي يتواجد فيها كل من المصدر والصورة تمتلك نفس معامل الانكسار.

وضمنياً يعتبر سريان مفعول قانون لامبرت ونتائجه، صفة أساسية مشتركة في جميع المصادر الضوئية غير المصادر الليزرية، فلو انتقينا ضوء من جزئين مختلفين لمصدر ضوئي اعتيادي واستخدمناهما في إنارة منطقة معينة من شاشة، فسوف لا يكون بالإمكان رؤية ظاهرة التداخل بينهما. لأن الأجزاء المختلفة من المصدر الضوئي نفسه تشع بطريقة غير مترابطة اتجاهياً (incoherently)، واعني، من دون علاقة طور ثابتة وسنأتي إلى شرح هذا الموضوع بعد قليل بصورة تفصيلية.

وأما الآن فيمكننا تلخيص الحدود الرئيسية للمصادر الضوئية التقليدية وكما يلي:

تتوزع الطاقة المبعثة من مصدر شديد على مدى منطقة عريضة نسبياً من الطيف. يصعب عادة تسديد الطاقة المشعة باتجاه معين، والحزمة المسددة لا يمكن تحسينها إلا على حساب شدة الضوء المتوفرة.

لا يمكن إسقاط الأشعة الصادرة من مصدر ممتد لتكوين صورة يرافقها زيادة في الإضاءة.

### ٢-٣ انبعاث وامتصاص الأشعة Emission and absorption of radiation

من المعروف جيداً، أن الأنظمة أو المنظومات الذرية، كالذرات والأيونات، والجزئيات بإمكانها أن تتواجد في حالات ساكنة معينة، يناظر كل منها قيمة محددة من الطاقة. وتميز هذه الحالات بأرقام كمية quantum numbers. وأما قيم الطاقة العديدة فتدعى بمستويات المنظومة الذرية. وفي حالة الذرات المعزولة، توصف الحالات States بالأرقام الكمية التي تميز المدارات orbits واللف الذاتي spins للإلكترونات المتواجدة خارج الغلاف الإلكتروني المغلق. وتستفيد التسمية المألوفة لهذه الحالات من استخدام الرموز التي تدل ( للبدء ) على المقادير والمركبات المهمة للزخوم الزاوية التي تبقى (تقريباً) ثابتة وأما في حالة الجزيئات، فإن وصف الحالة state يتضمن الأرقام الكمية المقترنة بالحركات الدورانية والاهتزازية للجزيئية إضافة للأرقام الكمية التي توصف الحركات الإلكترونية.

فعندما تمتلك اثنين أو أكثر من الحالات نفس الطاقة، فإن ذلك المستوى يدعى مستوى منحل degenerate ، ويكون العدد من الحالات التي تمتلك الطاقة نفسها هو بمثابة كثرة المستوى "multiplicity of the level" وغالباً ما نستخدم الكلمة حالة State لتعني مستوى؛ كما وتعتبر كل الحالات التي تمتلك الطاقة نفسها على أنها متشابهة، ويمكن أن تحدث الانتقالات transitions فيما بين الحالات المستقرة مصحوبة بانبعاث أو امتصاص طاقة على شكل أشعة، أو بانتقال الطاقة من أو إلى منظومة أخرى. وإذا كان الانتقال transition هو انتقال إشعاعي، فإن تردد الأشعة المنبعثة أو الممتصة من قبل المنظومة تعطى بالعلاقة الترددية لبور Bohr :

$$hv = E_2 - E_1 \quad (3.6)$$

حيث  $E_2$  ,  $E_1$  هما طاقات الحالات الذي حدث وسطهما الانتقال والثابت  $h$  هو ثابت بلانك.

ويدعى مستوى المنظومة الذي يمتلك أقل طاقة بمستوى الهمود ground level، بينما يدعى أي مستوى آخر غيره بمستوى تهيج excited level ويمكن استخدام أيضاً المصطلحات "حالة الهمود" و"حالة متهيجة" لتدل على هكذا مستويات. فالذرة المتواجدة في

مستوى الهمود بإمكانها فقط امتصاص أشعة، ويجري عادة ترقيم المستويات مبدئين بمستوى الهمود وحسب الزيادة في درجة طاقة المستوى، أما إذا لم تكن المنظومة الذرية في مستوى الهمود، فإن بإمكان هذه المنظومة تغيير حالتها إلى مستوى أوطأ مع بعث أشعة ومن دون أية مسببات خارجية. وتدعى هذه الظاهرة بالانبعاث الآني Spontaneous emission. كما تدعى الاحتمالية لكيما تغير الذرة الموجودة في المستوى  $n$  حالتها آنيًا إلى المستوى الأدنى  $m$  في فترة وحدة الزمن، باحتمالية الانتقال الآني \* يستدل عليها بالرمز  $A_{nm}$  وهذه الكمية هي ميزة خاصة للزوج من مستويات الطاقة المذكورة في السؤال. ويمكن الحصول على  $A_{nm}$  في حالة وجود العديد من المستويات، عن طريق جمع الاحتماليات كلها على مدى جميع الأزواج من الحالات المتضمنة. فلو كان هناك مثلاً تجمع واسع من المنظومات الذرية، وكان العدد  $n$  من المنظومات متواجداً في المستوى  $n$ ، فسيكون العدد الكلي للانتقالات التي تحدث بالثانية الواحدة من المستوى  $n$  إلى المستوى  $m$  يساوي  $N_n A_{nm}$  تقريباً، وستكون القدرة المشعة عند التردد  $\nu_{nm} = (E_n - E_m)/h$  هي  $N_n = (E_n - E_m) A_{nm}$ .

ويكون انبعاث الأشعة الآنية من ذرات المنظومة بطور عشوائي، وبناءً عليه ستبعث المنظومة التي تكون ذراتها غير معتمدة الواحدة على الأخرى (كالغاز مثلاً) بأشعتها كمصدر غير متلاحم.

وتحدث الانتقالات transitions فيما بين مستويات الطاقة الذرية أو الجزيئية ليس بصورة آنية فقط، ولكن تحدث أيضاً تحت ظروف الحث Stimulation الناتجة عن أشعة كهرومغناطيسية ذات تردد ملائم، فتحت ظروف معينة، والتي سنأتي إلى ذكرها بعد قليل تكون احتمالية تغيير حالة المنظومة الذرية خلال وحدة الزمن من المستوى  $n$  إلى المستوى  $m$  هي:

$$P_{nm} = A_{nm} + u_n B_{nm}, \quad (3.7)$$

حيث أن  $u_n$  هي الكثافة الإشعاعية عند التردد الذي يعود إلى فرق الطاقة بين المستويين  $A_{nm}$  و  $B_{nm}$  هما ثوابت تحددها المنظومة نفسها. كما ويمكن في حالة وجود

الأشعة ذات التردد الملائم، أن تمر أيضاً المنظومة الذرية من مستوى طاقة منخفض إلى مستوى طاقة أعلى. وتكون احتمالية حصول مثل هكذا حدث ( أي الامتصاص ) هي:

$$P_{mn} = u_n B_{mn} \quad (3.8)$$

وتتكون الأشعة المبتعثة من منظومة ذرية متواجدة في مجال إشعاعي خارجي، من جزأين . فالجزء الذي تتناسب شدته طردياً مع  $A_{nm}$  هو الأشعة الآتية، والتي يكون طورها غير معتمداً على طور الأشعة الخارجية، وأما الجزء الثاني فهو الجزء الذي تتناسب شدته طردياً مع  $uB_{nm}$  ويدعى بالأشعة المستحثة (المستشارة) والتي يكون طورها هو طور الأشعة الخارجية الحادثة نفسه.

وليس هنالك أية أشعة تكون أحادية الطول الموجي بصورة أكيدة، ولغرض التبسيط، سنفرض منذ الآن بأن المدى الطيفي لكل خط ذري، ضيق جداً، بحيث لا يمكن تحليل التوزيع ( أي توزيع الطاقة ) كدالة للتردد ضمن الخط الواحد، وأنا سنرصد فقط الطاقة الكلية المبتعثة أو الممتصة.

كما وتعد المعادلات 3.7 , 3.8 ، علاقات مهمة وسارية المفعول ما بين الثوابت  $B, A$  ويجوز تطبيقها في حالة كون الأشعة موحدة الخواص isotropic أو مشوشة chaotic لا تظهر أية أفضلية اتجاهية وكذلك عندما لا تتغير الكثافة الإشعاعية  $u_n$  بصورة ملحوظة على طول المدى الترددي للخط الطيفي.

وتدعى العلاقات ما بين الثوابت  $B, A$  بعلاقات اينشتاين، ويعبر عنها عادة بالصيغة:

$$B_{nm} = B_{mn}, \quad A_{nm} = \frac{8\pi h n^3}{c^3} B_{nm} \quad (3.9)$$

وتصح هذه المعادلات في الفراغ فقط لجسيمات تمتلك مستويات طاقة غير منحلة non-degenerate وأما إذا كانت مستويات الطاقة منحلة، فإن علاقة اينشتاين الأولى تأخذ الشكل:

$$g_n B_{nm} = g_m B_{mn} \quad (3.10)$$



حيث تمثل كل من  $g_m$  و  $g_n$  كثرة multolicity المستويين  $n$  و  $m$  ، على التوالي وأما العلاقة الثانية فلا تتأثر بكثرة المستويات، ولكن في المواد الصلبة والتي يختلف معامل انكسارها بصورة معتبرة عن وحدة واحدة. يجب أن يستعاض عن العلاقة الثانية بالعلاقة:

$$A_{nm} = \frac{8\pi h n^3 h^3}{c^3} B_{nm} \quad (3.11)$$

ويعود سبب ظهور معامل الانكسار  $h$  إلى أن كون المعامل الموجود أمام  $B_{nm}$  ينتج من حساب عدد الصيغ الإشعاعية radiation modes الموجودة في عنصر حجمي.

والآن لننتقل بحديثنا إلى مبدأ مدى العمر lifetime الذي كثيراً ما يستخدم في وصف العمليات الانتقالية فيما بين الحالات المختلفة للذرة. حيث يمكن ببساطة ربط مدى العمر لحالة ما باحتمالية الانتقال من تلك الحالة. فلتنك  $pdt$  هي ربط مدى العمر لحالة ما باحتمالية الانتقال من تلك الحالة  $s$  لكي تترك تلك الحالة خلال فترة زمنية قصيرة مقدارها  $dt$  ( ويجب أن تكون هذه الفترة قصيرة جداً لكي يتحقق الشرط  $pdt \ll 1$  ). إذن، وفي حالة كون  $p$  ثابتة، سيتناقض عدد الذرات المتواجدة في الحالة  $s$  بصورة أسية حسب العلاقة

$N(t) = N_0 e^{-pt}$  ومن هنا سيكون عدد الذرات التي تترك الحالة  $S$  في الفترة الزمنية من  $t$  إلى  $t + dt$  هو  $pN_0 e^{-pt} dt$ . وبناءً عليه سيكون مدى العمر الوسطي average lifetime للذرة في المستوى  $s$  هو:

$$T = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} tp N_0 e^{-pt} dt = \frac{1}{p} \quad (3.12)$$

وبضوء العلاقة (3.12) يدعى معكوس الاحتمالية الانتقالية للعملية بمدى عمر العملية نفسها، ولو كان بإمكان حالة ذرية أن تتغير بوساطة عدة عمليات ذات مدى اعمار  $t_1, t_2, \dots, t_n$  وكانت هذه العمليات مستقلة من وجهة النظر الاحصائية فأنذ يمكن ربط مدى العمر للحالة بمدى إعمار العمليات التي بوساطتها يمكن للحالة أن تتغير عن طريق المعادلة:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} + \dots + \frac{1}{t_n} \quad (3.13)$$

وعملياً لا يجري الرصد على ذرة منفردة ولكن على مجموعة تحوي البلايين من الذرات والتي ليس من الضروري أن تكون في الحالة نفسها، فلو كان العدد الضخم من الذرات  $N_0$  فسيكون توزيع هذه الذرات فيما بين الحالات المختلفة تحت ظروف التوازن الحراري وعند درجة الحرارة المطلقة  $T$ ، خاضعاً لقانون بولتسمان، وهذا يعني، أن عدد الذرات في الحالة  $j$  سيكون:

$$N_j^1 = \frac{N_0 e^{-E_j/kT}}{\sum_j e^{-E_j/kT}}, \quad (3.14)$$

حيث  $E_j$  هي طاقة الحالة  $j$  وسيكون احتلال جميع الحالات التابعة لنفس المستوى متساوياً، لذلك سيكون عدد الذرات في المستوى  $n$  هو  $N_n = g_n N_n$ ، حيث تشير  $N_n$  إلى التزايد في عدد الذرات (أي اعلي نسبة) population أية حالة من حالات المستوى  $n$ . وأنذ واعتماداً على المعادلة (3.14) سترتبط شعبيات مستويات الطاقة  $n$ .  $m$  بوساطة العلاقة :

$$\frac{N_n}{g_n} = \frac{N_m}{g_m} e^{-(E_n - E_m)/kT} \quad (3.15)$$

ويتضح من العلاقة (3.15) بأن جميع الذرات عند درجة الصفر المطلق ستكون في حالة الهمود، كما ويحتاج شرط التوازن الحراري عند أية درجة حرارة، بأن تكون الكثافة التزايد للذرات للحالة ذات الطاقة الأوطئ أكثر من الكثافة الشعبية للحالة ذات الطاقة الأعلى.

ولنعد الآن طقم ensemble ذري منسجم الأجزاء عند درجة الصفر المطلق. إن هذا الطقم له قابلية فقط على امتصاص الأشعة التي تتحصر تردداتها في المتسلسلة  $(E_i - E_1)/h$ ، حيثما  $i = 2, 3, \dots$  فإذا كان الطقم الذري في حالة توازن حراري عند درجة حرارة معلومة ولتكن  $T$  عندئذ ستكون حالة الهمود هي ليست الحالة الوحيدة المحتملة من قبل الذرات، وبناءً على ذلك سيكون هناك أيضاً امتصاص أشعة ذات التردد المناظر للانتقال الذي يحدث فيما بين الحالات المثيجة، وكحقيقة عملية، علينا أن نتذكر بأن المستويات المثيجة الأولى لأغلب الذرات والأيونات تكون في الأقل على ارتفاع

$10^{-12} \times 2$  فوق مستوى الهمود، وأن مقدار حاصل الضرب  $KT$  عند درجة الحرارة  $T = 500 \text{ }^\circ\text{K}$  هو  $0.07 \times 10^{-12}$  تقريباً.

ولذلك، فعند الدرجات الحرارية المتوسطة، سيتواجد القليل من الذرات حتى في المستوى المتهيج الأول مقارنة بعدد الذرات الموجودة في حالة الهمود والسبب في ذلك يعود إلى كون العامل الآسي في المعادلة (2.15) صغيراً جداً. أما الامتصاص الإشعاعي الذي يحتاج إلى انتقال من مستوى متهيج، فسوف يكون ضعيفاً، لأن عدد الانتقالات من المستوى  $n$  إلى المستوى  $m$  يتناسب طردياً مع  $N_n$ .

وكنتيجة لامتصاص الأشعة ستضطرب حالة التوازن للطقم الذري، فلنفرض بأن الأشعة الممتصة هي أشعة أحادية الطول الموجي، عندئذ فالذرات التي تتهيج فوق المستوى المتهيج الأول عن طريق امتصاصها للأشعة، سيكون بإمكانها الرجوع بصورة مباشرة إلى حالة الهمود إما عن طريق الأشعة الآنية أو المستحثة، أو بإمكانهم إتباع مسار آخر ليغيروا حالتهم إلى مستوى سفلي آخر غير مستوى الهمود. وبهذه الطريقة يمكنهم أن يتدرجوا إلى أسفل مقياس الطاقة  $\text{energy scale}$  باعثن عند كل مرحلة أشعة تختلف في ترددها عن تردد تلك الأشعة التي رفعتهم ( أي الذرات ) أصلاً من حالة الهمود، واستناداً إلى العلاقة (3.6) التي تربط الطاقة والتردد، فإن الأشعة المنبعثة في العملية التعاقبية Cascade process والتي تدعي بالفلورة fluorescence ستمتلك ترددات أوطأ من تردد الأشعة المهيجة.

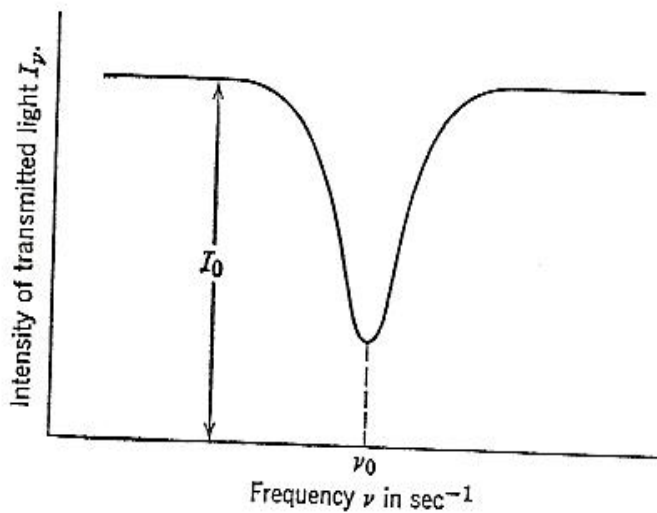
والآن لنعد طقماً ذرياً ليس من الضروري أن يكون في حالة التوازن الحراري ولنسمي مرة أخرى عدد الذرات لكل وحدة حجم والمتواجدة في الحالة  $n$  بالاسم  $N_n$  ولنفرض  $n > m$  فماذا ستكون استجابة الطقم الذري لأشعة مسددة ذات تردد وكثافة نحن نعلم بأن عدد الانتقالات المتجهة إلى الأسفل من المستوى  $n$  وإلى المستوى  $m$  سيكون  $A_{nm}$  ( $N_n + uB_{nm}$ ) لكل ثانية، وسيكون عدد الانتقالات المتجهة إلى الأعلى هو  $N_m B_{nm}$  فكلما كان  $N_n$  أقل من  $N_m$  وهذه هي الحالة دائماً، فإن الحزمة الساقطة ستعاني خسارة صافي مقدارها  $(N_m - N_n)uB_{nm}$  من الكمات quanta لكل ثانية، وأما عدد الكمات

والذي ينبعث بصورة أنية، فيظهر كأشعة مشتتة، وهكذا فالحزمة المارة خلال المادة التي تكون شعبيات حالاتها الواطئة أكبر من شعبيات الحالات الأعلى، ستعاني خسارة دائماً في الشدة، أو بكلام آخر، ستمتلك المادة معامل امتصاص موجب.

وبالإمكان إنشاء طقم ذري ( على الورقة بسهولة ) يكون فيه عدد الذرات في الحالة  $n$  أعني  $N_n$  أكبر من  $N_m$  حتى في حالة كون  $n > m$  وعندئذ يقال بأن هذا الطقم يحوي تزايد معكوس *population inversion*. وبالتأكيد سيكون هذا الطقم ليس في حالة توازن ديناميكي حراري. ولنفرض الآن بأنه قد تم تأسيس التزايد معكوس بطريقة ما فيما بين المستويين 1 و 2. وهذا يعني بأنه قد وجدنا عملية معينة أدت إلى جعل  $N_2 > N_1$ . فتحت هذه الظروف، ستشع المادة أشعة أنية. وإضافة لذلك، ستعمل المادة كمضخم للأشعة عند التردد الملائم، واعني  $n = (E_2 - E_1)$ . وهنا ستظهر الاشعاعات الأنية ذات التردد نفسه كنتشويش للمضخم *amplifier noise*. ومن هذا نستنتج بأن التقنية الليزرية تعالج المشاكل العملية التي ترتبط باستحداث مواد في مثل هكذا حالة غير متوازنة وباستثمار القابلية التكبير لتوليد الضوء.

ولكي نطور العلاقات الكمية التي تغطي عملية التكبير، يكون من الضروري أن نلقي نظرة أدق على عملية الامتصاص، وتوضح بالرياضيات المثالية المتعلقة بالحدة اللامتناهية *infinite sharpness* للمستويات والخطوط الطيفية، ففي تجربة الامتصاص الحقيقية، يجري تسجيل شدة الضوء النافذ من خلال طبقة معلومة من المادة، بينما يتغير تردد الضوء الساقط مع إبقاء شدته ثابتة. والنتيجة النموذجية لمثل هكذا تجربة هو المنحني المبين في

الشكل (١-٣)



شكل 1.3 خط امتصاصي

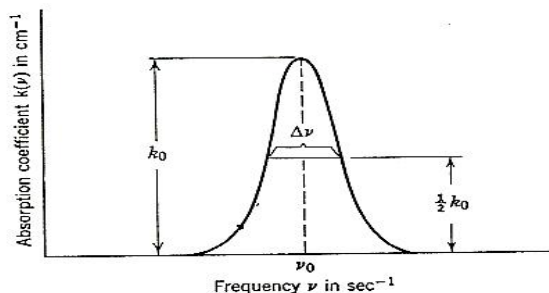
ومن الفرضية التي تنص على أن الانخفاض في شدة الضوء  $I$  المار من خلال مادة سمكها  $dx$  يتناسب تناسباً طردياً مع  $I dx$ ، نستنتج بأن التغيير في  $I$  كدالة للعمق  $x$  يتبع القانون:

$$I_n(c) = I_0 e^{-k(n)c} \quad (3.16)$$

حيث يحدد  $k(n)$  من المشاهدات ذات النوعية المبينة في الشكل 1.3 والذي يمثل شدة الضوء عند عمق معلوم في المادة الماصة، ويعد التردد  $n_0$  على أنه مركز الخط الامتصاص، وإذا ما قيست  $x$  بالسنتيمترات فسوف نعبر عن  $k(n)$  بدلالة مقلوب السنتيمترات، ويمكن الحصول من هذه المشاهدات على  $k(n)$  كدالة للتردد، والنتيجة هو منحنى مشابه لما هو مبين في الشكل ٢-٣.

ويعد الاتساع الكلي للمنحنى عند الموضع الذي يكوه فيه  $k(n)$  قد انخفض إلى نصف قيمته الظمى  $k_0$  على أنه اتساع الخط الامتصاصي ويرمز له بالرمز  $\Delta n$ . وكثيراً ما تدعى هذه الكمية "الاتساع النصفى half width". وهذا لا يعني نصف إتساع المنحنى، بل الاتساع الكلي عند نقاط نصف القيمة العظمى.

وهناك علاقة مهمة تربط المساحة الاجمالية الواقعة تحت المنحنى المبين في الشكل ٢-٣ مع معاملات اينشتاين ومع شعبيات الحالات المسؤولة عن الامتصاص المتمركز حول التردد المركزي  $n^0$  وقد اشتقت هذه العلاقة من قبل Ladenburg, Fuchbauer في أوائل العشرينات.



شكل 1.4 التغيير في معامل الامتصاص كدالة للتردد في خط امتصاصي

شكل ٣-٢

لنعد الآن حزمة ضوئية متوازية يتغير ترددها ما بين  $n + dv, v$  شدتها  $I$ ، تنتقل في الاتجاه الموجب للأحداثي  $x$  من خلال طبقة من الذرات تحدها السطوح المستوية  $x$  و  $x+dx$  ولتكن سرعة الضوء في هذا الوسط هي  $u = c/h$  حيث أن  $h$  هو معامل انكسار الوسط. وبناءً على ذلك، ستنقل جبهة الطور phase front من خلال شريحة سمكها  $dx$  بزم من مقداره  $dt=dx/v$ . والآن لنفرض بأن هناك  $N_1$  من الذرات لكل سنتيمتر مكعب في المستوى  $I$  فقط العدد  $dN_1$  منها له القابلية على الامتصاص الإشعاعي في المدى الترددي  $v$  إلى  $v+dv$  وأن هناك  $N_2$  من الذرات لكل سنتيمتر مكعب في المستوى 2 فقط العدد  $dN_{2v}$  منها له القابلية على البعث الإشعاعي في المدى الترددي نفسه، إذن، فكلما تقدمت جبهة الطور من  $x$  إلى  $x+dx$ ، فإن الانخفاض بالطاقة الإشعاعية للحزمة سيعطى بالشكل.

$$-d(I_v dv) = hv(B_{12} dN_{1v} - B_{21} dN_{2v})I_v \frac{dx}{u} \quad (3.17)$$

وهنا استفدنا من حقيقة كون الأشعة المبعثة بوساطة الحث، تكون متلاحمة مع الأشعة الحادثة؛ وبذلك ستعمل على تقوية الحزمة الضوئية. وأما الأشعة المبعثة أنياً فلا تساهم مساهمة ملحوظة في تكوين الحزمة لكونها إشعاعات غير مسددة.

ومن العلاقة (3.17) نحصل على :

$$-\frac{1}{I_v} \frac{dI}{dx} d_v = \frac{hv}{c} (B_{12} DN_{1v} - B_{21} DN_{2v}) \quad (3.18)$$

ويمكننا الآن أن نميز بأن الطرف الأيسر يمثل  $k(v)dv$  ونحصل بعد التكامل

الذي يُجرى على مدى الخط الكلي المتمركز حول  $v_0$  ، على :

$$\int k(v) dv = \frac{hv_0}{c} (B_{12} N_{1v} - B_{21} N_{2v}) \quad (3.19)$$

وهنا يمكن حذف  $B_{12}$  باستخدام العلاقة (2.5) ويمكن التعبير عن  $B_{12}$  بدلالة  $A_{12}$  بالاستفادة من العلاقة (3.11) وبهذه الطريقة نحصل على علاقة العالمين Ladenburg, Fuchtbauer وهي :

$$\int k(v) dv = \frac{c^2 A_{21}}{8\pi v o^2 h^2 g_1} \left( N - \frac{g_1}{g_2} N_2 \right) \quad (3.20)$$

وهذه هي العلاقة الأساسية، والتي يمكن أن نكتبها بالشكل.

$$\int k(v) dv = k \left( N_1 - \frac{g_1}{g_2} N_2 \right) \quad (3.21)$$

ويمكن كتابة الثابت  $k$  بعدة أشكال، إحداها:

$$k = \frac{I^2 A_{21} g_2}{8\pi h^2 g_1} \quad (3.22)$$

وأما الصيغة المفضلة الأخرى من قبل العديد من المؤلفين فهي:

$$k = \frac{c^2 g_2}{8\pi h^2 v^2 t_2 g_1} \quad (3.23)$$

حيث يدعى المقدار  $t_2 = 1/A_{21}$  بمدى العمر للذرات في المستوى 2 .

إن الوضع الذي كثيراً ما يواجهنا هو أن تكون المادة غير متهيجة، بحيث لا يتواجد إلا القليل من الذرات في الحالات غير حالة الهمود. وفي مثل هذا الوضع سيكون أساس حدوث كل الامتصاص كنتيجة لانتقال من حالة الهمود، وكلما بقيت شدة الأشعة الممتصة ضئيلة، بقي عدد الذرات المتواجدة في الحالة النهائية terminal state مهملًا، فلو رمزنا إلى معامل امتصاص المادة غير المتهيجة تماماً بالرمز  $k/(v)_0$  فسيكون:

$$\int k(v)_0 dv = k N_0 \quad (3.24)$$

حيث يمثل  $N_0$  العدد الكلي للذرات لكل وحدة حجم.

ومن المهم أن نلاحظ بأنه تحت الظروف الموضحة أعلاه، سيتناسب تكامل معامل الامتصاص بكل بساطة تناسباً طردياً مع عدد الذرات المتواجدة، وأن مقداره لا يعتمد على شكل الخط الامتصاصي، وتبين العلاقة (3.24) المعنى الفيزيائي للثابت  $k$  فهو المقطع

العرضي الامتصاصي المتكامل لكل ذرة بالنسبة للخط الامتصاصي المفروض في السؤال، حيث تدعى الكمية  $S(v) = k(v)_0 / N_0$  بالمقطع العرض الامتصاصي لكل ذرة.

ومن المعقول أن يكون فرضنا على أن شكل الخط الطيفي نفسه لا يعتمد على توزيع الذرات فيما بين مستويات الطاقة، وهذا يعني أنه بالإمكان كتابة الدالة  $k(v)$  كحاصل ضرب دالتين، الأولى دالة للتردد والثانية دالة لكل من  $N_1$  و  $N_2$  ومع الأخذ بنظر الاعتبار بوجود سريان مفعول العلاقة (3.21) نكتب :

$$k(v) = kg(v, v_0) (N_1 - \frac{g_1}{g_2} N_2) \quad (3.25)$$

حيث أن  $v_0$  هو التردد المركزي للخط الطيفي و  $g(v, v_0)$  هي دالة الشكل للخط والتي تمتلك قيمة غير الصفر فقط في المنطقة الصغيرة المحيطة بالتردد  $v_0$  وقد عيرت normalized بطريقة، بحيث يتحقق الشرط.

$$\int g(v, v_0) dv = 1, \quad (3.26)$$

عندما يمتد التكامل ليشمل المنطقة الإجمالية التي تكون فيها الدالة  $g(v, v_0)$  لا تساوي صفراً.

وتتناسب القيمة القصوى لمعامل الامتصاص تناسباً طردياً مع القيمة القصوى، لمنحنى دالة الشكل الخطي  $g(v_0, v_0)$ . وأما البرمترات الأخرى، وكما ذكرنا سابقاً، ستناسب عكسياً مع انتشارية spread الخط الامتصاصي، وتعتبر القيمة بالرمز  $k_0$  وترتبط بالمتغيرات الأخرى كالاتي:

$$k_0 = k N_{0g}(v_0, v_0) \quad (3.27)$$

وللسهولة ندخل التديل الرمزي  $g(0)$  بدل  $g(v_0, v_0)$  وإنه لمن المعقول أن نفعل هذا لأن  $g$  في العادة هي دالة للمتغير  $v - v_0$ .

وعندما تكون المادة في حالة التوازن الحراري، فإنه يمكن وصف توزيع الذرات فيما بين المستويات باستخدام العلاقة (3.15) وسنحصل عند أية قيمة موجبة لدرجة الحرارة المطلقة، على المتباينة.



$$\frac{N_n}{g_n} < \frac{N_m}{g_m}, \quad (3.28)$$

كلما تحقق شرط المتباينة  $E_m < E_n$  :

وكثيراً ما يعزى في المراجع للوضع اللامتوازن والذي تكون فيه المتباينة (3.28) معكوسة، على أنه حالة ذات درجة حرارة سالبة negative temperature وتحسب القيمة لدرجة الحرارة T من توزيع الذرات فيما بين مستويات الطاقة باستخدام صيغة بولتسمان (3.15) ويمكن تطبيق هذه الفكرة فقط لزوج من المستويات، وتنبثق من استخدام هذه الصيغة لزوج من المستويات في منظومة ليست في حالة التوازن الحراري، كما أن درجة الحرارة المستخدمة بهذا الشكل لا تمتلك معناها المألوف: فالمقدار  $KT/2$  لا يعني متوسط طاقة المنظومة لكل درجة حرية واحدة، كما لا يمكن استنتاج أي شيء من قيمة T يتعلق بتوزيع الشعبيات في الحالات الأخرى غير الزوج الذي اشترك في حساب القيمة السالبة لدرجة الحرارة T لذلك فإن استخدام الاصطلاح "درجة الحرارة السالبة" سوف لا يسهل فهم الظواهر اللامتوازنة، فالأحسن أن نتجنب استخدامه ونتكلم بدلاً عنه بدلالة الشعبية المعكوسة population inversion. ولم يكن غرضنا من تقديم المصطلح "درجة الحرارة السالبة" إلا لكيما يزودنا بربط مع لغة المراجع ذات الصلة بالموضوع وليس غير. وإذا واجهنا في بعض الأحيان التعبير "استحدثت الدرجة الحرارية السالبة للمستويات n و m فإنه لا يعني أكثر من كون المتباينة (3.28) قد عكست بينما بقيت المتباينة  $E_m < E_n$ :

وعندما تأخذ الشعبية المعكوسة محلها فيما بين المستويين n و m فإن العلاقة (3.21) ستعطي قيمة سالبة لمعامل الامتصاص المتكامل، وسيكون عندنا شرط الامتصاص السالب، وهذا يعني بأن عندنا تكبير amplification. وهذا الامتصاص السالب أو التكبير هو حصيلة الزيادة في الأشعة المستحثة Stimulated على الأشعة الممتصة absorbed، فبالنسبة لمادة تكون في شرط الامتصاص السالب ضمن منطقة ترددية معينة، ستنمو الموجة الضوئية الساقطة عليها حسب القانون المعطى في العلاقة (3.16)، الذي يمثل في حالتنا هذه نمو أسي بمعدل مقداره  $a = -k(\nu)$

ويمكن حساب معدل التكبير a من العلاقة (3.21)، والتي يمكن كتابتها بالشكل:

$$a(v) = kg(v, v_0)N, \quad (3.29)$$

حيث أن :

$$N = \frac{g_1}{g_2} N_2 - N_1 \quad (3.30)$$

هو المقياس العددي للشعبية المعكوسة، ويعد المقدار  $n = N/N_0$ ، والذي يدعى بالشعبية المعكوسة النسبية، ذات فائدة أكبر لأنه يساوي 1- بالنسبة للمادة غير المثيجة تماماً ويساوي 0 بالنسبة للمادة التي لا تمتص ولا تكبر وأنذ سنحصل على:

$$a(v) = {}_k N_{0g}(v, v_0)n = k(v)on, \quad (3.31)$$

$$\int a(v) dv = {}_k N_0 n \quad \text{ومن ثم:}$$

وهكذا أمكننا التعبير عن معدل التكبير ومعدل التكبير المتكامل بدلالة الشعبية المعكوسة النسبية والخواص الامتصاصية للمادة التي يمكن قياسها وهي في حالة اللاتهيح . unexcited state

### ٣-٣ شكل واتساع الخطوط الطيفية : shape and width of spectral lines

يمكن تحديد معاملات اينشتاين التي أدخلناها في الجزئية السابقة ٣-١، من مواصفات تركيب الذرة. وكما رأينا، فإن هذه المعاملات تقوم بتحديد المعدل الانبعاثي الكلي والمعدل الامتصاصي الكلي المتكاملان على مد الخط الطيفي الإجمالي. ويعطي المعدل الانبعاثي أو الامتصاصي في المدى الطيفي الضيف ما بين  $v, v + dv$ ، بالمقدار  $k(v) dv$ ، الذي يرتبط بالثابت  $A_{21}$  عن طريق العلاقة (3.20). ونعني هنا بالمدى الطيفي الضيق على أنه واحد يكون مداه الترددي صغيراً مقارنة بالاتساع الكلي للخط الطيفي، ونحن نذكر هذا الموضوع هنا لأننا نتعامل في التقنية الليزرية مع التكبير في المناطق الطيفية الضيقة جداً، والتي تكون بصورة عامة أضيق بكثير من اتساع الخط الطيفي الذي يمكن مشاهدته مثلاً في غاز أو في بلورة. وحيث أن توزيع الشعبية ومعامل اينشتاين يحددون فقط تكامل المقدار  $k(v)$  فإن القيمة العظمى للامتصاص أو للتكبير ستعتمد على اتساع وشكل الخط الطيفي،

فذلك يكون من الأفضل أن نلقي نظرة قريبة على شكل الخط الطيفي كما نرصده في حالة انبعائه أو امتصاصه من قبل منظومة من الذرات، كالغاز مثلاً.

يكون الإتساع الطبيعي، أو الذاتي intrinsic لخط ذري ما، صغيراً للغاية، وهذا هو الاتساع الخطي الذي نتوقع مشاهدته من ذرات وهي في حالة سكون ومن دون أية أفعال متبادلة مع بعضها البعض، ويوجد هناك حد نظري للاتساع الخطي تحت هذه الظروف، ولكن يمكن تجاهله في أغلب الحالات لكونه صغيراً فيما لو قورن بمؤثرات التعريض الناتجة عن المسببات الأخرى الموجودة بشكل ثابت. فالعاملان الرئيسيان اللذان يساهمان فعلاً في تعريض الخط الطيفي line broadening هما التغيرات الترددية الناتجة من الحركة الحرارية للذرات، وكذلك تلك التغيرات الناتجة من توقف الامتصاص أو الانبعاث الإشعاعي بواسطة التصادمات الذرية atomic collisions .

فالحركة الحرارية thermal motion للذرات تسبب التعريض الدوبلري Doppler-broadening والذي يمكن حساب اعتماده على التردد بالطريقة التالية:

تتناسب احتمالية تواجد مركبة سرعة ( ولتقل المركبة باتجاه الاحداثي x ) لذرة في غاز عند درجة الحرارة المطلقة T فيما بين القيم  $u_x$  ,  $u_x + \Delta u_x$  طردياً مع المقدار  $[\exp(-mu_x^2 / 2kT)] \Delta u_x$  ولكن نعلم بأن ازاحة دوبلر مع التردد، ترتبط مع السرعة النسبية  $\dot{v}_x$  باتجاه المشاهد حسب المعادلة:

$$\frac{n - n_0}{n_0} = \frac{u_c}{c}, \quad (3.32)$$

حيث c هي سرعة الضوء وبناءً عليه سيعطي تأثير دوبلر، التوزيع الترددي الكاوسي Gaussian frequency distribution الآتي:

$$P(v) dv = P_0 e^{-\beta(v-v_0)^2 / v_0^2} dv, \quad (3.33)$$

حيث  $b = mc^2 / 2kT$  وهنا تناسب  $P(v) dv$  طردياً مع القدرة الطيفية المبتعثة للغاز. وأما الثابت  $P_0$  فيتم تحديده من الشروط الذي يقتضي بأن يكون تكامل توزيع الاحتمالية  $P(v)$  على مدى جميع الترددات مساوياً لواحد. وبناءً عليه:

$$P_0 = \frac{c}{v_0} \left( \frac{m}{2pkT} \right)^{1/2} \quad (3.34)$$

وأما إتساع منحنى التوزيع المعطي بالعلاقة (3.33) والذي يُحسب من عند النفاط التي تكون فيها القدرة مساوية لنصف قيمتها العظمى، فيعطي بالشكل :

$$\Delta v = 2 \frac{v_0}{c} \left( \frac{2kT \log 2}{m} \right)^{1/2} \quad (3.35)$$

حيث تمثل  $m$  هنا كتلة الجزيئية، ويمكننا تحرير العلاقة (3.35) عن طريق إدخال الوزن الجزيئي  $M = N_0 m$  وثابت الغاز  $R = KN_0$  ويتم هذا بضرب الكميات الذرية بعدد أفوكادرو، ومن ثم، وعند تعويض القيم العددية المناسبة، سنحصل على الصيغة التالية للتعريض دوبلري بالنسبة للخطوط الطيفية:

$$\Delta v = 7.162 \times 10^{-7} \left( \frac{T}{M} \right)^{1/2} v_0 \quad (3.36)$$

وهنا يجب أن نذكر بأن الاتساع الخطي لخط ما، يعتمد على درجة حرارة الغاز فقط. وأما المسبب الرئيسي الثاني للتعريض الخطي في الغاز، فهو تصادم الجسيمات المشعة ( الذرات أو الجزيئات) مع بعضها البعض والتوقف الناتج للعملية الاشعاعية. فلو افترضنا أي رتل موجي wavetrain فإن هذا الرتل الموجي لا يمكن أن يكون أحادي الطول الموجي بدرجة صرفة، لأن طيفه ينتشر كدالة عكسية مع امتداد الرتل كدالة للزمن. فكلما قطع التصادم الذري، عملية الانبعاث الاشعاعي أو الامتصاص الاشعاعي، فإن الرتل الموجي الطويل الذي سيكون متواجداً بطريقة ما أو بأخرى، سيقطع، ولكن بعد التصادم ستبدأ العملية الانبعاثية أو الامتصاصية من جديد وبطور أشعة جديد ومن دون أية ذاكر لطور الأشعة قبل التصادم، وسيتواجد نتيجة التصادمات المتتالية، العديد من العمليات الإشعاعية أو الامتصاصية المتقطعة، وسيكون بالطبع الاتساع الخطي للأشعة الناتجة عن هذه المجموعة من العمليات أكبر من الاتساع الخطي للعملية غير المتقطعة المفردة. ولذلك يجب حساب الشكل الخطي، واعني توزيع الترددات، حساباً إحصائياً.

وقد أُجري الحساب التقليدي الأصلي لهذا النوع من التوزيع في أوائل القرن الحالي من قبل H.A. Lorentz الذي بين بأنه عندما يكون تردد التصادمات صغيراً بالمقارنة مع

التردد اللامضطرب  $\nu_0$  فإن التعبير التالي يوصف التوزيع الترددي للخط المعرض تعريضاً تصادمية (لورنس).

$$g(\nu) = \frac{\Delta\nu}{2p} \frac{1}{(\nu - \nu_0)^2 + (\Delta\nu/2)^2} \quad (3.37)$$

وهنا  $\nu_0$  هو التردد المركزي و  $\Delta\nu$  يمثل الاتساع width بين نقاط المنحنى التي تنخفض عندها القدرة إلى نصف قيمتها. وأما العامل  $\Delta\nu/2p$  فإنه يؤكد تسوية normalization الدالة اعتماداً على المساحة المحصورة تحت المنحنى، أي:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} g(\nu) d\nu = 1. \quad (3.38)$$

ويمكن ربط الاتساع الخطي  $\Delta\nu$  بمعدل الزمن  $t$  الذي يمر بين تصادمين متتالين بالشكل التالي :

$$\Delta\nu = \frac{1}{p t} \quad (3.39)$$

وبما أن التردد التصادمي يتناسب طردياً مع كثافة الغاز، فسيتناسب الاتساع الخطي line width لمنحنى لورنس تناسباً طردياً مع الكثافة أيضاً. وعلى الرغم من أن كل من التعريض الدبلوري والتصادمي يعملان على إنتاج منحنيات توزيع ترددية ذات أشكال جرسية، إلا أن هذه المنحنيات تختلف اختلافاً كلياً عن بعضها البعض. وهذا الاختلاف موضع في الشكل ٣-٣ الذي يبين منحنيين من النوع اللورنسي والكاوسي مرسومين بنفس المقياس ويمتلكان اتساعات خطية متساوية، ويمكن ربط القيم القصوى لهذه المنحنيات باتساعات خطوطها كما يلي:

بالنسبة لمنحنى كاوس:

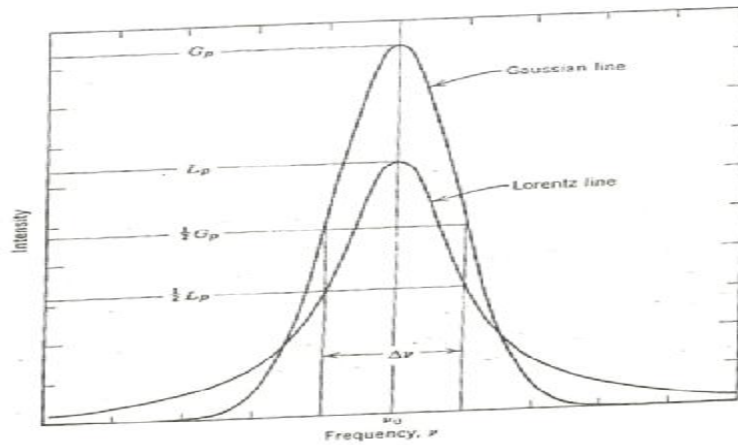
$$g(0)_G = \frac{2}{\Delta\nu} \left(\frac{\log 2}{p}\right)^{1/2} = \frac{0.939}{\Delta\nu} \quad (3.40)$$

بالنسبة لمنحنى لورنس:

$$g(0)_L = \frac{2}{p\Delta\nu} = \frac{0.637}{\Delta\nu} \quad (3.41)$$

كما يظهر أيضاً بأن القيمة القصوى لمنحنى كاوس تزيد بمقدار 50 % تقريباً عن القيمة القصوى لمنحنى لورنس.

وفي الواقع، بإمكان العوامل المسببة لكلا النوعين من التعريض أن تتواجد في نفس الوقت. وبناءً عليه، سيؤدي اقتران كل هذه العوامل إلى الحصول على أشكال خطية معقدة أكثر. وكثيراً ما يحدث أن يتغلب واحد فقط من هذه العوامل، وفي مثل هذه الحالة، ستؤدي الحسابات المعتمدة على ذلك العامل إلى نتائج صحيحة تقريباً.



شكل 1.5 خطوط كاسية ولورنسية بعرض خطي مشترك .  
حيث تدل كل من  $G_p$  و  $L_p$  على الشدة القصوى لكل منهما .

### شكل ٣-٣

وأما بالنسبة للخطوط الطيفية للأيونات الموجودة في شبكة بلورية فيكون عامل تعريضها ناتجاً عن التغيرات التي تحدث في المجال الكهربائي الذي تتواجد فيه هذه الأيونات، ويحدث هذا بسبب انشطار مستويات الطاقة المنحلة degenerate للأيونات بتأثير المجال البلوري crystal field وتكون تقلبات هذا المجال في كثير من الأحيان كبيرة إلى درجة تكفي لطمس معالم التركيب الدقيق fine structure . وقد يحدث بعض التعريض من حقيقة تواجد الأيونات المختلفة في مجالات (وسطية average) مختلفة وذلك بسبب اختلاف مواضعهم بالنسبة لمواقع العيوب والالتواءات الموجودة في البلورة، وأما المسبب

الأخر للتعريض الخطي في البلورة فنتج عن الحركة الحرارية لعناصر الشبكة ذاتها، حيث تعمل الاهتزازات الشبكية على إخضاع الأيونات إلى مجالات متغيرة إحصائياً فتسبب بالتالي إلى جعل تعريض الخط الطيفي معتمداً على درجة الحرارة.

### ٤-٣ الامتصاص والانبعاث المستحث absorption and stimulated emission

لقد أدخلنا في الجزئية السابقة ٣-١ قوانين غطت عملية انتقال المنظومات الذرية بين حالة وأخرى، والمصحوبة ببعث أو امتصاص الأشعة. وهنا سنحاول إعادة بحث القوانين الأنفة الذكر وإظهار علاقتها بالنظرية الفيزيائية، كما سنحاول في هذا المقطع إعطاء دعم للنصوص التي كثيراً ما سألنا القارئ ليقبلها عن ثقة، وسوف نبحت كذلك بعض التفاصيل الأساسية التي حُذفت فيما مضى، والقارئ الذي يرغب في حصر اهتمامه بالمظاهر التقنية لليزر فقط، بإمكانه أن يترك هذا المقطع من دون قراءة، حتى يحتاجه عندما يصبح في حيرة من أمره عن ماهية طبيعة الأشعة المستحثة.

فغرضنا الأول الآن أظهار الحقيقة على أن وجود الانبعاث المستحث للأشعة وسريان مفعول علاقات اينشتاين هما نتائج لكل من قانون بلانك لأشعة الجسم الأسود والعلاقة الترددية لبور (3.32) وقانون بولتسمان (3.40)، حيث تعطل هذه العلاقات نظرياً ماهية توزيع الجسيمات المتواجدة في حالة توازن حراري مع خزان حراري heat reservoir .

وسنسلك في مناقشتنا هنا، المسلك الجدلي الأصلي الذي اتبعه اينشتاين ونفرض وجود تجميع من الذرات المتشابهة في تجويف مغلق، جدرانه محفوظة عند درجة الحرارة (المطلقة) الثابتة  $T$  ولنفرض بأن ذرات هذه المجموعة تتميز باحتوائها على سلسلة من مستويات الطاقة كمثال  $E_1, E_2, \dots$  إلى آخره، والتي يمكن فيما بينها أن تحدث الانتقالات المصحوبة بانبعاث أو امتصاص الأشعة التي يمكن تحديد تردداتها بوساطة علاقة بسور.

ونعلم من خبرتنا بأنه أينما تواجدت ذرات بطاقة أكثر من الحد الأدنى الممكن minimum possible فلا بد أن يحدث في آخر الأمر انبعاث آني للأشعة، ونعلم أيضاً أنه يمكن أن يحدث امتصاص للأشعة، وأن معدل امتصاص الطاقة الإشعاعية يتناسب طردياً مع شدة المركبة الطيفية المفضلة من الأشعة. وبالمقارنة مع سلوكية تشغيل المذبذبات التوافقية

العينية macroscopic وتطبيق مبدأ التناظر لبور، يمكننا أننذ أن نفترض بأنه من المحتمل أيضاً أن تحدث عملية الانبعاث المستحث، ويحتمل أن يتناسب المعدل الزمني لحدوثه تناسباً طردياً مع كثافة الدفع الإشعاعي الطيفي، وهكذا فنحن مهينون لأن نفترض بأن الانتقالات من المستوى العلوي ٢ إلى المستوى السفلي ١ تحدث بمعدل زمني يساوي:

$$P_{21} = A_{21} + u_{\nu} B_{21}, \quad (3.41)$$

حيث أن  $u_{\nu}$  هي الكثافة الإشعاعية عند التردد.

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h} \quad (3.42)$$

وحيث  $A_{21}$  ,  $B_{21}$  هما الثوابت التمييزية للذرة. أما الانتقالات المتجهة إلى أعلى، أي الانتقالات من المستوى ١ إلى المستوى ٢، فتحدث بمعدل زمني يساوي :

$$P_{12} = u_{\nu} B_{12}, \quad (3.43)$$

وبما أننا قد أنهينا وضع هذه الفرضيات، فلنسعى الآن لتحديد الثوابت  $A_{21}, B_{12}, B_{21}$  نحن نعلم أن في حالة التوازن الحراري، يبقى عدد الذرات في كل حالة state ثابتاً (باستثناء بعض التقلبات الصغيرة). إذاً، لو فرضنا بأن  $N$  يرمز إلى عدد الذرات الموجودة في الحالة ز تحت ظروف التوازن الحراري، أننذ سيكون:

$$N_1 P_{12} = N_2 P_{21} \quad (3.44)$$

واستناداً إلى عقلائي بولتسمان (3.14) , (3.42) سيكون:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{e^{(-E_2/kT)}}{e^{(-E_1/kT)}} = e^{-h\nu/kT} \quad (3.45)$$

ولنعوض عن  $N_1, N_2$  ، النسبة  $P_{12}/P_{21}$  فنحصل من (3.41) و(3.44) على:

$$\frac{u_{\nu} B_{12}}{A_{21} + u_{\nu} B_{21}} = e^{-h\nu/kT} \quad (3.46)$$

وبحل هذه العلاقة بالنسبة للمقدار  $u_{\nu}$  نحصل على:

$$u_{\nu} = \frac{A_{21}}{B_{12}} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - B_{21}/B_{12}} \quad (3.47)$$



ولكن يمكن الحفاظ على التوازن الحراري في داخل تجويف ما، بواسطة الأشعة التي يكون توزيعها الطيفي خاضعاً لقانون بلانك . وبناءً على هذا، يجب أن تكون كثافة الطاقة المعطاة بالعلاقة (5.7) منسجمة مع قانون بلانك لأية قيمة من  $T$  . وهذا فقط يكون ممكناً إذا تحقق الشرطان:

$$B_{21} = B_{12} \quad (3.48)$$

and

$$A_{21} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} B_{12}$$

وهكذا وبهذه النتائج نكون قد إستقننا علاقات اينشتاين (3.4) للحالة غير المنحلة nodegenerate case . وأما الصيغ العامة للعلاقات التي تتضمن الكثرات  $g_2, g_1$  فيمكن الحصول عليها بسهولة وذلك بتطبيق قانون بولتسمان بشكله الأكثر عموماً والمعطى بالعلاقة (3.15).

لقد فرضنا في مجرى الاشتقاق أعلاه بأن المجال الإشعاعي التي تخضع له الذرات، هو من النوع الذي يمكن إيجاده في تجويف أسود black cavity . فهو أولاً، مجال إشعاعي مشوش chaotic ، لا يظهر أية أفضلية اتجاهية أو محلية وثانياً، هو مجال إشعاعي يتميز بكون كثافته الإشعاعية  $u_\nu$  تتغير مع التردد تغيراً بطيئاً، بحيث يجوز اعتبار كثافته الإشعاعية ثابتة على مدى الاتساع للخط الطيفي line width لانتقال ذري معين. واستناداً لما ذكرناه الآن، فسوف لا يكون بالإمكان إزالة القيود اعلاه كلياً لكيما تثبت علاقات اينشتاين . ومثالاً على ذلك، فسوف لا يكون صحيحاً أن نقول بأن معدل الانبعاث المستحث في تجويف رنان cavity resonant يتناسب طردياً مع  $u_\nu$  عند أية نقطة في داخل ذلك التجويف. وتحت ظروف ملائمة يمكن عملياً تحديد الثابت  $A_{21}$  وذلك بإجراء القياسات العملية لشدة الخطوط الطيفية ولمعدل الاضمحلال التفلوري rate of decay of fluorescence كما يمكن تحديد المعادلات b عن طريق القياسات الامتصاصية absorption measurements . وتعد عملية حساب هذه العوامل باستخدام المبادئ الأساسية، من أصعب العمليات الموجودة في مجال ميكانيكا الكم، فالمعاملات B ترتبط بمعدل التغيير

الزمني لحالة ذرة معرضة لمجال كهرومغناطيسي خارجي، فهم إذن يعكسون حال اضطراب الذرة من قبل فعل خارجي بتغير مع الزمن، وبناءً عليه سيكون موضوع حسابهم خاضعاً لنظرية الاضطراب المعتمدة على الزمن *time-dependent perturbation theory* نحن نعلم بأنه بالإمكان تمييز الذرة بواسطة معادلة شرودنجر. فالذرة تحت شرط عدم الاضطراب تكون في إحدى حالاتها الساكنة التي يمكن وصفها بالدالة الموجبة.

$$\Psi = y_n(r) e^{-i w_n t} \quad (3.49)$$

حيث تقترن بهذه الدالة الموجبة، الطاقة  $E_n = h w_n$  والتي تمثل القيمة الوصفية *eigenvalue* لمعادلة شرودنجر غير المعتمدة على الزمن. وأما العدد الصحيح  $n$  فيمثل كل الأرقام الكمية اللازمة لوصف تلك الحالة، بينما يمثل المتغير  $r$  كل متجهات الموضع اللازمة لوصف جسيمات المنظومة.

فيمكننا الآن اعتبار الاضطراب كنتيجة لوجود حد إضافي قيمته  $H$  في دالة هملتون للمنظومة. وذلك بغرض أن مقدار هذا الحد يبقى صفرًا حتى بلوغ الزمن  $t = 0$ . وبناءً عليه، سيكون شكل الدالة الموجبة للمنظومة حتى الزمن  $t=0$  هو كما معطي بالعلاقة (3.49) وتكون الطاقة الوصفية لها هي  $E_n$ . ولكن عند الزمن  $t > 0$  أعني في حالة وجود الاضطرابات، فلا يمكن تمثيل الدالة الموجبة للمنظومة بالعلاقة (3.49)، بل يمكن كتابتها بالشكل:

$$\Psi = \sum_m C_m(t) y_m(r) e^{-i w_m t} \quad (3.50)$$

وتمكننا نظرية الاضطراب من حساب المعاملات  $C_m(t)$  بدلالة دالة هملتون المضطربة وبدلالة الدوال الموجبة  $y_m$  حيث تكون الوساطات الأساسية في الحساب هم عناصر المصفوفة.

$$H_{nm}(t) = \int y_n e^{i w_n t} H y_m e^{-i w_m t} du, \quad (3.51)$$

حيثما  $H'(r,t)$  هو المشغل *operator* المقترن بالاضطراب، كما ويمتد التكامل على مدى التوزيع الفضائي الكلي. وأخيراً يمكن البرهنة باستخدام ميكانيك الكم على صحة العلاقة التالية:

$$\frac{dc_m}{dt} = -\frac{i}{h} H_{nm}(t), \quad m = 1, 2, \dots \quad (3.52)$$

وأن من أحد المبادئ الأساسية في نظرية الكم هي كون الكميات  $|c_1(t)|^2$  و  $|c_2(t)|^2$  ... الخ، وتعطي الاحتمالية بكون أن قياسات الطاقة على المنظومة (3.50) تؤدي إلى الحصول على القيم  $E_1, E_2, \dots$  وبالتالي فإن معدل التغير الزمني للمقدار سيعطي المعدل الزمني لتغيير حالة الذرة من الحالة الأصلية  $n$  وإلى الحالة النهائية  $m$ .

ولغرض حساب المعدلات الزمنية للانتقالات، علينا إجراء التكامل في المعادلة (3.51) ومن ثم استخدام عناصر المصفوفة المحتسبة لكيما تكامل المعادلة (3.52) وبما أن  $C_m(0) = 0$  ،  $C_n(0) = 1$  بالنسبة للحالات  $m \neq n$  ، فسوف يكون :

$$c_m(t) = -\frac{i}{h} \int_0^t H_{nm}(t) dt, \quad (3.53)$$

بالنسبة للحالات  $m \neq n$ .

وعلينا أن نعلم بأن عنصر المصفوفة يعتمد على المجال الذي يعمل الاضطراب وكذلك على الدوال الموجبة للحالتين الأولية والنهائية، وأن أبسط أشكال المجال هو ذلك المجال الناتج عن موجة مستوية أحادية الطول الموجي وذات استقطاب مستوية بحيث يمكن تمثيل متجه جهدها بالصيغة:

$$A = A_0 u \cos(\omega t - k \cdot r) \quad (3.54)$$

حيث تشير وحدة المتجهات  $u$  إلى اتجاه الاستقطاب الكهربائي، وأما متجه الانتشار  $k$  propagation vector فهو عمودي على وحدة المتجهات  $u$ ؛ ومقداره  $2\pi/\lambda$  ولنفرض الآن بأننا نتعامل مع منظومة ذرية أبعادها أصغر بكثير من طول موجة الإشعاع الساقطة. ولنضع أصل إحداثياتنا في مركز الذرة نفسها، فمع هذا الفرض، ستكون الكمية  $k \cdot r$  أصغر من واحد عندما يكون  $r$  مقيداً في المنطقة التي يسهل للإلكترونات الوصول إليها. آنذاك يمكن إنجاز حل عناصر المصفوفة ومن ثم الحسابات اللاحقة للدوال بفكها حسب القوى الأسية للكمية  $k \cdot r$  ، فنحصل من ذلك على النتائج التالية:-

١- يحدث فقط اضطراب محسوس للذرة عندما تكون  $w$  أي التردد الزاوي للموجة الساقطة، مساوياً تقريباً للفرق  $w_m - w_n$  أو للفرق  $w_n - w_m$ . بينما في جوار التردد الزاوي  $w_{nm} = w_m - w_n$  ، ويكون معامل الاعتماد الزمني للمقدار  $|c_n(t)|^2$  من النوع:

$$\left[ \frac{\sin \frac{1}{2}(w - w_{nm})t}{\frac{1}{2}(w - w_{nm})} \right]^2 \quad (3.55)$$

وهناك أيضاً تعبير متشابه يستخدم لوصف معامل الاعتماد الزمني للتردد الزاوي  $w \approx -w_{nm} = w_{mn}$  أن هذه التعابير expressions تبين الميزة الرنينية للعمليات الانبعائية والامتصاصية، والتي تناظر المتذبذب التقليدي الموجود في مجال توافقي شغال.

٢- عند استخدامنا التقريب من الدرجة الأولى ( بدلالة القوى الأسية للكمية  $k.r$  ) فإن معامل الاعتماد اللازمي ( غير معتمد على الزمن) في التكامل (3.51) سيمثل الفعل المتبادل للمجال الكهربائي المشتق من العلاقة (3.54) من عزم ثنائي القطب الكهربائي electric dipole moment للذرة وتعلل كذلك الفعل المتبادل للمجال الكهربائي مع عزم رباعي الأقطاب quadrupole moment. فحساباتنا في حالة التقريب من الدرجة الأولى تنتج بالشكل:

$$H_{nm} = E u(u, m) \quad (3.56)$$

حيث يعد مصفوف ثنائي القطب الكهربائي  $u$  الشبيه analog الميكانيكي الكمي لعزم ثنائي القطب الكهربائي الكلاسيكي والذي يعطي بالشكل:

$$u_c = \sum eiri \quad (3.57)$$

حيث يتحرك المجموع على مدى كل الجسميات المشحونة للذرة. وتعطي مركبات مصفوفة ثنائي القطب الكهربائي  $u$  بإحداثيات ديكارتية كالاتي:

$$u_x(n, m) = e \int y^* x y_m du, \quad (3.58)$$

$$u_y(n, m) = e \int y^* y y_m du,$$

$$u_z(n, m) = e \int y^* z y_m du,$$

وأخيراً، وتحت هذه الدرجة من التقريب ، يتناسب المعدل الزمني للانتقال

$$|E|^2 / u (n, m) / \cos^2 q, \text{ transioton طردياً مع المقدار:}$$

حيث تمثل الزاوية المحصورة بين اتجاهي  $u, E$  ويجب أن يؤخذ معدلها average في

حالة كون الذرات لها الحرية في توجيه نفسها بالنسبة للمجال.

وهكذا نستنتج بأن المعدل الزمني لانبعث الأشعة المستحثة يتناسب طردياً ( في حالة

التقريب من الدرجة الأولى)، مع مربع شدة المجال الكهربائي للأشعة الساقطة. ونذكر، ومن

دون برهان، بأن الأشعة المبتعثة تكون متلاحمة (في الطور) مع الأشعة الحاثثة

. Stimulation radiation

وفي الحالات البسيطة، أي تلك الحالات التي تسود فيها صفة الموجة المستوية

المفردة، يتناسب مربع شدة المجال الكهربائي طردياً مع الكثافة الإشعاعية  $u$  . ولذلك يحق لنا

أن نقول بأن المعدل الزمني للانبعث المستحث يتناسب طردياً مع  $u$  . وهذا أيضاً صحيحاً

بالنسبة لتجويف اسود blackbody cavity حيث يكون المجال الإشعاعي فيه من النوع

المشوش chaotic فأن المعدل الزمني للانبعث المستحث الذي يمكن الحصول عليه يتناسب

أيضاً طردياً مع الكثافة الإشعاعية.

ويمكن الحصول على اشتقاق كامل لعلاقة اينشتاين من نظرية الاضطراب عن طريق

تغيير فرضنا السابق وانتقالنا من المجال أحادي الطول الموجي إلى مجال اشعاعي ذات

طيف عريض، وهذه الخطوة تحتاج إلى تكامل الدالة (3.12) في مدى المجال الترددي ،

ومن ثم أخذ متوسطة (معدلة) على مدى جميع الاتجاهات الفضائية. فتكون النتيجة هي:

$$B_{21} = \frac{8p^3}{3h^2} / u (2,1) / ^2 \quad (3.59)$$

وأنذ يمكن حساب المعدل الزمني للانبعث الآني من المعادلة (3.11) وهو:

$$A_{21} = \frac{64p^4 v^3}{3hc^3} / u (2,1) / ^2 \quad (3.60)$$

وعلى الرغم من وجود صعوبة هائلة في حساب عناصر مصفوفة ثنائي القطب، تكون من السهل في الكثير من الأحيان أن نقرر فيما إذا كانت مقادير هذه العناصر مساوية لصفر أم لا.

## استخدامات شعاع الليزر:-

يستخدم الليزر حالياً في مجالات متعددة كاستعمالها في الأقراص المدمجة وفي صناعة الإلكترونيات وقياس المسافات بدقة -خاصة أبعاد الأجسام الفضائية- وفي الإتصالات. كما تستخدم أشعة الليزر في معالجة بعض أمراض العيون حيث يتم تسليط أشعة ليزر عالية الطاقة على شكل ومضات في نقطة معينة في العين لزمان قصير -أقل من ثانية-. ومن أمراض العيون التي يستخدم فيها الليزر:

### في الطب

- اعتلال الشبكية السكري.
- ثقب الشبكية.
- انسداد أو تخثر الوريد الشبكي.
- الزرق (ارتفاع ضغط العين).
- عيوب الإنكسار الضوئي في العين (طول أو قصر النظر و اللابؤرية).
- انسداد القنوات الدمعية.

- بعض الأورام داخل العين.
- عمليات التجميل حول العين.
- حالات اندثار البقعة الصفراء.

كما يستخدم الليزر في العمليات الجراحية مثل جراحة المخ والقلب والأوعية الدموية والجراحة العامة. في عام ١٩٦٠ اخترع جهاز الليزر الذي يطلق الأشعة وحيدة اللون والاتجاه ويمكن ان تتركز بدرجة عالية بوساطة عدسة محدبة . كما ان هناك الكثير من المواد القادرة على اطلاق اشعة الليزر منها المتجمدة (الياقوت الاحمر و زجاج النيوديميوم) ،والغازية(الهليوم والنيون والزينون) مواد شبيهة موصلة (زرنيخ، الجاليوم و انتيمون الانديوم)

### في الصناعة

عندما يجري تحفيز جهاز الليزر بوساطة الكهرباء ترتفع طاقة ذراتها من المستوى الأدنى إلى المستوى الأعلى ،وتعود الانخفاض إلى مستوى الطاقة الأدنى مرورا بالمستوى الأوسط نتيجة عدم استقرار الجسيمات الواقعة في مسار الطاقة ، عندها تنبعث الفوتونات التي تعطي رنيناً في جهاز الليزر وتخرج من الجهاز بطاقة كبيرة وصلت اقصى ما وصلت اليه ١٧٠٠ مليون ميغاواط ويتم التفاعل في ثلاثة على عشرة ملايين ثانية وضغطها مليون وخمسين الف كيلو جرام على السنتمتر المربع ودرجة الحرارة بين ١٠٠-٢٠٠ الف درجة . ويأمل العلماء باستعمال تلك الطريقة في التوصل إلى الإندماج النووي للعناصر الخفيفة مثل الهيدروجين الثقيل و التريتيوم و الليثيوم بغرض إنتاج الطاقة الكهربائية .

- وتستخدم أنواع من أجهزة الليزر كالموصوفة أعلاه ولكن تعمل بطاقات أقل ، تصل حرارتها إلى بين ١٠٠٠ و ١٨٠٠ درجة مئوية في الصناعة في قطع ألواح الصلب ، قد يصل سمك اللوح منها ٣ سنتمتر . وميزتها أنها تقطع بدقة متناهية حيث يُوجه جهاز الليزر بوساطة الحاسوب .

• ومن استخدامات الليزر لحام المواد الصلبة والنشطة والمواد التي تتمتع بدرجة انصهار عالية مع امتيازها بدقة التصنيع بسبب اطلاقها لحزمة كثيفة ضيقة مركزة ، كما تستطيع أشعة الليزر فتح ثقب قطره ٥ ميكرومتر خلال ٢٠٠ ميكروثانية في أشد مواد المعمورة صلابة ( الماس والياقوت الاحمر والتيتانيوم) وبفضل قصر مدة التصنيع لا يحدث اي تغير في طبيعة المادة.

• كما لها استخدام مهم اخر وهو قياس المسافات بدقة متناهية ، سواء المسافات القصيرة أو الطويلة . وأشعة الليزر تستطيع قياس عشرة امتار دون إحداث خطأ يتجاوز واحد على عشرة الاف من المتر . كما استخدمت أشعة الليزر في تحديد بعد القمر عن الأرض . وقد تم ذلك في في السبعينات حيث وضع رواد الفضاء على القمر مرآة لعكس الليزر عند سقوطه عليها ، وبعد ذلك وجه شعاع ليزر من الأرض إلى القمر وبانعكاسه على المرآة على سطح القمر وعودته إلى الأرض أستطاع العلماء حساب بعد القمر عن الأرض بدقة لم يتوصلوا إليها من قبل .

• وهي تستخدم أيضا في تحديد الأهداف بدقة بالغة جدا، حيث ان كان الهدف على مسافة ٢٠ كم ووجهنا شعاع ليزر فسوف ينحصر مقطع الشعاع في دائرة ضوئية قطرها ٧ سم فقط . وإذا أطلقت إلى القمر فسيكون قطر الدائرة المشكلة ٣،٢ كم فقط.

وتجري في أمريكا أبحاثا هائلة لاستخدام الليزر نو طاقة عالية جدا لتدمير الصواريخ المعادية عالياً في الفضاء قبل وصولها إلى أمريكا ، واستطاعوا تحقيق بعض النجاح على هذا الطريق ولكن الأبحاث لا زالت مستمرة ، وأولا لإتقان هذه التكنولوجيا الجديدة ، ثم بناء شبكة عظمي لإكتشاف الصواريخ المعادية حين انطلاقها ، ويتبع ذلك توجيه أجهزة الليزر القوي (أو سلاح الليزر) على الصاروخ المعادي لتدميره في الفضاء ، وتتضمن هذه التكنولوجيا أيضا استخدام الأقمار الصناعية وقيامها بدور في هذا النطاق . وقد رصدت الولايات المتحدة اموالا باهظة لإحداث تقدم في هذا المشروع .



