



وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

جامعة الحاج لخضر

كلية العلوم

قسم علوم المادة

مدرسة الدكتور وراه

فرع : الفيزياء الفلكية

مذكرة

مقدمة لنيل شهادة الماجستير في الفيزياء الفلكية

بعنوان

Effet laser dans les milieux

Stellaires

عمل الليزر في الأوساط الفلكية

من طرف الطالبة

قلاّب سهام

أمام اللجنة :

الرئيس : الأستاذ عبد الحميد بوالجذري أستاذ التعليم العالي جامعة الحاج لخضر باتنة

المشرف: الأستاذ عبد العزيز صيد أستاذ التعليم العالي جامعة الحاج لخضر باتنة

الأعضاء: الأستاذ دراجي بهلول أستاذ التعليم العالي جامعة الحاج لخضر باتنة

الأستاذة حورية تريكي أستاذ التعليم العالي جامعة باجي مختار عنابة

بسم الله الرحمن الرحيم

تشكرات

الشكر لله و الحمد لله الذي لا إله إلا هو

أما بعد

أتقدم بالشكر الجزيل إلى كل من ساهم من قريب أو من

بعيد في إنجاز هذه الرسالة

و أخص بالذكر الأستاذ صيد عبد العزيز

الذي أشرف على عملي و أشكره جزيل الشكر على دعمه

و إرشاداته وتشجيعه

كما أتقدم بالشكر الجزيل إلى الأستاذ بولجدي والأستاذ بهلول

على نصائحهما وإرشاداتهما

كما أشكر الأستاذة الفاضلة تريكي حورية على شرف حضورها

كما أتقدم أيضا بجزيل الشكر و التقدير لرئيس لجنة المناقشة

الأستاذ: بولجدي عبد الحميد

كما أشكر أيضا أعضاء لجنة المناقشة الأساتذة:

بهلول الدراجي , تريكي حورية

كما أتوجه بشكري أيضا إلى كل من أطر الدفعة الثانية

لمدرسة الدكتوراء في الفيزياء الفلكية

السنة الدراسية 2008- 2009

شكرا

إهداء

اهدي هذا الجهد المتواضع إلى من سهر الليالي من أجل نجاحي

أمي

الغالية

إلى أبي وإجوتي و إخواني

سليم , عمار , سامية , حفيظة

إلى جميع أهل بيتي خاصة زوجي و ابنتي العزيزة

موساوية شروق

(شموسة)

وجميع زملائي و أصدقائي جميعا

خاصة ناصري فاطمة

إلى جميع الأساتذة الكرام

الفهرس

[1].....	مقدمة عامة
	الفصل الأول : المبادئ الأساسية لليزر
[5].....	1.I. مقدمة
[5].....	2.I. العناصر المكونة لليزر
[6].....	3.I. الامتصاص و الانبعاث
[7].....	4.I. نظرية إنتاج أشعة الليزر
[8].....	1.4.I. الانبعاث التلقائي
[9].....	2.4.I. الانبعاث المستحث (المحفز)
[10].....	5. I. عملية الضخ و التضخيم
[10].....	6.I. التوزيع المعكوس
[11].....	7.I. أنظمة المستويات الليزرية
[11].....	1. 7. I. نظام المستويات الثلاثية
[12].....	2. 7. I. نظام المستويات الرباعية
[13].....	3. 7. I. المقارنة بين النظامين
[14].....	8.I. خواص الليزر
[15].....	9.I. أنواع الليزر
[15].....	1. 9. 1 ليزر الحالة الصلبة
[17].....	1. 9. 2 ليزر الحالة السائلة
[18].....	1. 9. 3 ليزر الحالة الغازية
[23].....	10.I. معادلات التوزيع الذرية
	الفصل الثاني : عمل الليزر في الأوساط الفلكية
[26].....	1.II عمليات إثارة الابتدائية في البلازما قليلة الكثافة
[26].....	1.1.II. مقدمة
[27].....	2.1.II. التأين الفوتوني للذرات
[30].....	3.1.II. إعادة التركيب

- 4.1.II. إثارة وتأيين الإلكترون.....[33]
- 5.1.II. التوازن الحراري الكلي و المحلي (TE and LTE) في البلازما.....[34]
- 6.1.II. خارج – (التوازن الحراري المحلي Non-LTE) الوسط الفيزيائي الفلكي.....[37]
- II. 2 عمل الليزر في الأوساط الفلكية.....[39]
- 1.2.II. تركيب الليزر الفلكي[39]
- 2.2.II. معادلة SAHA.....[40]
- 2.II. 3. حساب نسبة الضخ في الليزر الفلكي بدلالة درجة الحرارة.....[46]
- 2.II. 4. نتائج الرصد المتعلقة بالليزر[50]
- 2.II. 4. 1. HeI و HeII في الأغلفة النجمية[50]
- 2.II. 4. 2. السديم (الإشعاعي الانبعاثي).....[51]
- 2.II. 4. 3. النجم Wolf-Rayt[54]
- 2.II. 4.4. سديم إيتا كارينا (Eta Carinae)[56]
- 2.II. 5. حساب كثافة البلازما بتحليل خط الليزر النجمي[57]
- 2.II. 6. دراسة فعل Doppler في الليزر النجمي[58]
- الفصل الثالث : إنتاج ليزر في المخبر يعمل بأشعة X بنفس طريقة الليزر النجمي
- III. 1. مقدمة[67]
- III. 2. التفاعل ليزر بلازما.....[67]
- III. 1.2. بنية البلازما المتشكلة بواسطة الليزر[68]
- III. 2. 2. خصائص بلازما ليزر.....[71]
- III. 2. 3. آليات امتصاص أشعة الليزر في البلازما[72]
- III. 3. انتشار و تضخيم الليزر X-UV[73]
- III. 3. 1. التضخيم في نظام ASE[73]
- الحاتمة[77]
- قائمة الأشكال والمخططات[79]
- المراجع.....[81]
- الملخص.....[82]

مقدمة عامة

الليزر (LASER) كلمة انجليزية وهي اختصار للعبارة :

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

و تعني تضخيم الضوء بواسطة الانبعاث المحفز للإشعاع [15].

في عام 1916 كان آنشياين أول من تنبأ بأن الذرات تستطيع أن تثبت نوعاً من الضوء له خواص لم تكن معروفة من قبل , وفي عام 1917 أدخل مبدأ الانبعاث المستحث و هو المبدأ الكامن وراء عملية الليزر, حيث انه عند إثارة الذرة بعد امتصاصها للفوتون , ينتقل الإلكترون من مستوى طاقة أدنى إلى مستوى طاقة أعلى [1].

عادة يرافق رجوع الذرة إلى المستوي الأدنى انبعاث فوتون , وهذا ما يسمى بعملية الانبعاث التلقائي [1].

أظهر آنشياين نظرياً أنه من الممكن تحفيز الذرة المثارة من أجل انبعاث الفوتون. التحفيز يتم من طرف فوتون وارد فيتم انتقال الذرة من مستوى طاقة أعلى إلى مستوى طاقة أقل , و يرافق ذلك انبعاث فوتون جديد له نفس خصائص الفوتون المحفز (نفس التردد, نفس اتجاه الانتشار , نفس حالة الاستقطاب) بالتالي تصبح جميع الفوتونات متطابقة و من ثم يحدث تضخيم الضوء.

تم إقتراح استخدام هذا المبدأ لأول مرة سنة 1954 من طرف باسوف (N.G.Basov) و بروخوروف (N.G.Prokhorov), و سمي في ذلك الوقت MASER اختصار للعبارة التي تعني [1]:

Radiation(Microwave Amplification by Stimulated Emission of) وتعني تضخيم الموجات الدقيقة بواسطة الانبعاث المحفز للإشعاع, و في أثناء وجود عدد كبير من المخابر تسعى لتطوير MASER تدخل العالم غوردون (G.Gordon) في ولادة أول MASER ضوئي .

قدم مفهوم LASER لأول مرة في عام 1958 في كتاباتشاولو (Schawlow) و بروخوروف (N.G.Prokhorov).

في سنة 1960 أجرى العالم تيودور ميمان (Theodore Maiman) أول تجربة على الليزر، في توليد شعاع ضوئي قوي نفاذ من ياقوتة حمراء تغطي الفضة طرفيها و التي يسقط عليها ضوء غامر من مصباح أنبوب زجاجي يحيط بها، فعندما سقط ضوء المصباح على الياقوتة، أهاج ذراتها و انبعث منها وميض انتشر إلى طرفيها ليصطدم بالفضة التي عكسته كالمرآة، فتتردد ذهابا و إيابا، فزادت قوته وتركيزه، انطلق شعاع لامع من الضوء الأحمر من نوع غير معهود من قبل، و في سنة 1961 قدم الأستاذ علي جاوان الإيراني (Ali Javan) أول إنتاج لليزر الغاز [ليزر الهيليوم - نيون][1]

في سنة 1964 تمت مكافأة كل من تشارلز تاونز (Charles Townes) و بروخوروف و نيكولاي باسوف بجائزة نوبل على الأعمال التي قدموها على الليزر، و ألفريد كاستلور (Alfred Kastler) على عمله في الضخ الضوئي سنة 1966.

الليزر يمتد إلى أبعد من الطيف المرئي من الأشعة تحت الحمراء إلى الأشعة السينية X في عام 1984 أمكن تصنيع أول ليزر أشعة سينية ناجح في مركز البحث Lawrence Livermore National Laboratory في الولايات المتحدة الأمريكية. وهو ليزر بالغ الخطورة والأثر، ومن المعروف أن أشعة "إكس" ذات تردد أعلى بكثير من الأشعة الضوئية، وبالتالي فإن لها قدرة عالية جداً على اختراق الأجسام التي لا يخترقها الضوء العادي، وقد تم إثبات إمكانية الحصول على أشعة "اكس" بطريقة عمل الليزر نظرياً، وتكمن الصعوبة في أنه يجب تحويل المادة إلى حالة البلازما للحصول على أشعة "اكس" الليزرية، وهذا يتطلب درجة حرارة عالية جداً لا يمكن الحصول عليها إلا من خلال تفاعل نووي، مما أدى إلى ظهور عدة اقتراحات، بأن يكون توليد الطاقة في مثل هذا الليزر عن طريق انفجار نووي صغير تحت التحكم.

مع التطور العلمي و التكنولوجي وباستعمال أقوى الأدوات في تاريخ علم الفلك تلسكوب هابل الفضائي وتلسكوب التصوير الطيفي الفضائي (HST / STIS) توصل العلماء إلى ملاحظة و اكتشاف أشعة الليزر في أطيف عدة أجسام فلكية .

في هذه المذكرة إن شاء الله سنتطرق إلى دراسة الفعل الليزري في الأوساط الفلكية : مصدرها , خواصها , ميكانيزماتها ... , أنجزنا هذه الدراسة في إطار نظرية التفاعل ليزر بلازما و في إطار نظرية الموائع.

سوف نستهل الموضوع بمدخل يشمل المبادئ الأساسية لليزر من خلال عرض العناصر المكونة لليزر , الامتصاص و الانبعاث , نظرية إنتاج أشعة الليزر , عملية الضخ و التضخيم , أنظمة المستويات الليزرية , أنواع الليزر حسب طبيعة الوسط الفعال , كما نتناول فيه دراسة معادلات التوزيع الذرية .

في الفصل الثاني ركزنا أولا على تقديم العمل النظري الذي يصف عمليات الإثارة في البلازما قليلة الكثافة حيث تطرقنا بشيء من التفصيل إلى شرح التأين الفوتوني , إعادة التركيب , التوازن الحراري الكلي و المحلي , خارج – (التوازن الحراري المحلي Non-LTE) ثانيا عمل الليزر في الأوساط الفلكية و هو لب موضوع بحثنا حيث تطرقنا إلى تركيب الليزر الفلكي , ومعادلة SAHA , حساب نسبة الضخ في الليزر الفلكي بدلالة درجة الحرارة , نتائج الرصد المتعلقة بالليزر , حساب كثافة البلازما بتحليل خط الليزر النجمي ثم يأتي دراسة فعل Doppler في الليزر النجمي

ليتبعه الفصل الثالث ليطم فيه عرض كيفية إنتاج الليزر في المختبر بأشعة X بنفس طريقة الليزر النجمي.

نختم المذكرة بخلاصة عامة مع فتح الباب للبحث في الموضوع وتحسين النتائج.

الفصل الأول

المبادئ الأساسية لليزر

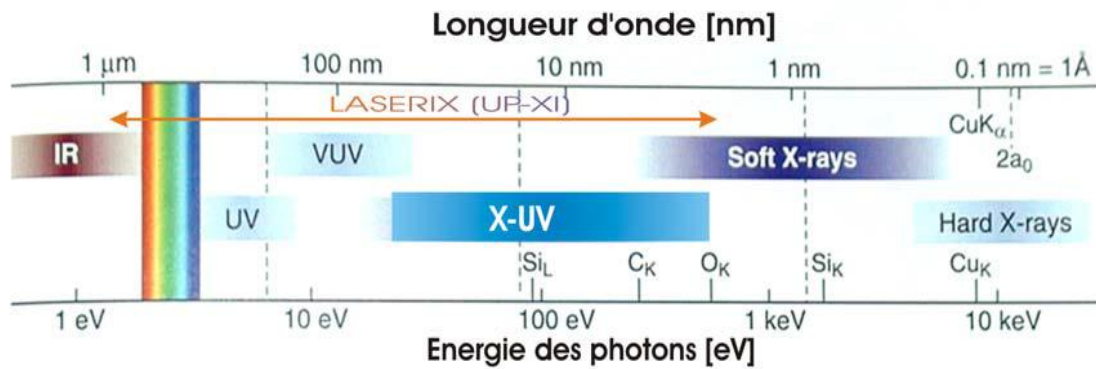
الفصل الأول

المبادئ الأساسية لليزر

I. 1 مقدمة

الليزر هو مصدر الإشعاع , يمكن أن ينتج حقول كهرومغناطيسية مكثفة في نطاقات طيفية ضيقة للغاية بدءاً من الأشعة تحت الحمراء إلى الأشعة فوق البنفسجية, له عدة استخدامات تكنولوجية : الاتصالات, الاندماج النووي, الطب, الاستعمالات العسكرية.....

في هذا الفصل سنتطرق إلى إجراء دراسة بيبلوغرافية حول الليزر :العناصر الكونية له, الامتصاص , الانبعاث التلقائي والانبعاث المخفز, ...



(الشكل I-1): إمتداد طيف الليزر [6]

I.2 العناصر المكونة لليزر :

يتشكل الليزر من ثلاثة عناصر أساسية :

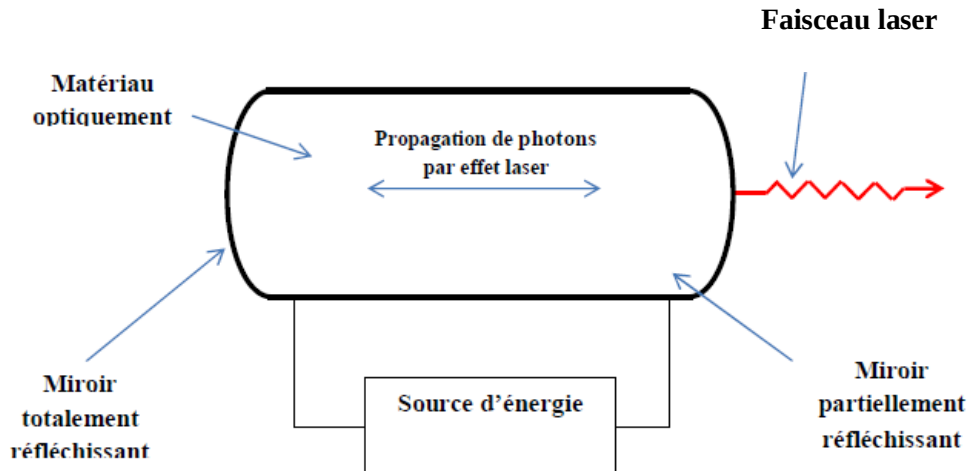
***المكبر الضوئي (المناطق النشطة an active medium):**

هو المادة التي تستخدم لتوليد شعاع الليزر أو هو مجموعة من الذرات أو الجزيئات أو الأيونات التي تثبت الإشعاعات الضوئية, لديها مستويات طاقة منفصلة تنثار بسهولة , ولها القدرة على تخزين الطاقة الواردة من الخارج عن طريق التفاعل مع الإشعاع الكهرومغناطيسي .و الطول الموجي لإصدار أشعة الليزر يعتمد على الوسط الفعال أو المناطق النشطة [19].

*عملية الضخ (Pumping):

هي عملية نقل الطاقة من مصدر الطاقة إلى الوسط الفعال المولد لليزر، و نوع المادة المستخدمة لتوليد الليزر (الوسط الفعال) تحدد طريقة ضخ المنظومة. يعتمد الضخ على [19]:

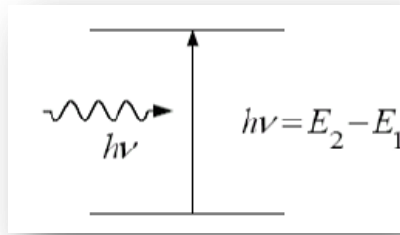
- a * نوع الوسط الفعال (صلب, سائل, غاز)
 - b * نمط التشغيل (مستمر, نبضي)
 - c * طبيعة عنصر الضخ (كهربائي, كيميائي, بصري, حراري)
 - d * عرض نطاق (طيف) الامتصاص لشعاع الضخ إذ أنه يجب أن يمتص الإشعاع بشكل جيد
- * **المرنان الضوئي (resonator Anoptical)** المرنان الضوئي يتكون من مرآتين المركز بينهما هو الوسط الفعال (الشكل 1-2)
- أحد هاتين المرآتين ذات انعكاس كلي و الأخرى ذات انعكاس جزئي [19].



(الشكل I-2): العناصر المكونة لليزر [13]

3.I. الامتصاص و الانبعاث:

a) **الامتصاص:** هو عملية انتقال (اكتساب) الطاقة من المحيط إلى المادة فتزداد طاقة ذرات أو جزيئات المادة , فتصعد من الحالة (E_1) التي كانت فيها قبل امتصاص الطاقة إلى مستويات طاقة أعلى (E_2) [13].



(الشكل I-3) الامتصاص

(b) **الانبعاث** : هو عملية انتقال (فقدان) الطاقة من المادة إلى المحيط فتقل طاقة ذرات أو جزيئات المادة , تهبط من الحالة (E_2) التي كانت فيها قبل انبعاث الطاقة إلى مستويات طاقة أوطأ (E_1) [13].

(C) عرض خط الانبعاث (Emission Linewidth):

تمتاز أشعة الليزر عن الضوء العادي بأحادية الطول الموجي (Monochromatic) أي عرض الحزمة الترددية $\Delta\nu$ يكون ضيق جداً , من الناحية النظرية يكون عرض خط الانبعاث لشعاع الليزر يساوي عدد صغير جداً من الهيرتز ولكن من الناحية العلمية يتوسع بشكل كبير لأسباب عديدة , و بالتالي تحتوي حزمة الليزر على عدد كبير من الترددات ويسمى متعدد الأنماط الطولية [16].

أسباب هذا الاتساع :

1- أسباب الاتساع المتجانس : الاتساع التصادمي (Collision Broadening), الاتساع الطبيعي (normal Broadening)

2- أسباب الاتساع غير المتجانس : الأيونات الشائبة في البلورات (Dopant Broadening), اتساع دوبلر (Doppler Broadening) [16]

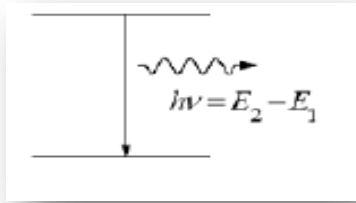
4.I. نظرية إنتاج أشعة الليزر :

يمكن توضيح نظرية إنتاج أشعة الليزر بسهولة ويسر إذا أخذنا في الاعتبار تركيب الذرة، ومنسوبي الطاقة E_1, E_2 فلكي تنتقل ذرة من المنسوب الأدنى E_1 إلى المنسوب الأعلى

E_2 فإنها تمتص قدرًا من الطاقة يساوي الفرق بين هذين المنسوبين، ولكي تنتقل الذرة من المنسوب الأعلى إلى المنسوب الأدنى فإنها تطلق قدرًا من الطاقة يساوي أيضاً الفرق بينهما، ويكون ذلك على شكل فوتون $[13]$ photon، وفي عام 1917 أوضح "أينشتين" أن الانبعاث يمكن أن يتم بإحدى الطريقتين $[19]$:

1.4.I. الانبعاث التلقائي (Spontaneous Emission):

تنتقل فيه الذرة من المنسوب الأعلى (E_2) إلى المنسوب الأدنى (E_1) تلقائياً، دون تدخل خارجي. والانبعاث التلقائي هو السمة المميزة لجميع المصادر الضوئية المألوفة، كمصباح بخار الصوديوم، أو بخار الزئبق، أو النيون. وفي كل منها تحدث ملايين الانتقالات التلقائية، نظراً لأن الانتقال التلقائي للذرات يحدث بدون تحكم، ونتيجة لذلك فإن فوتونات الضوء المنبعث غير مترابطة $[13]$.



(الشكل I-4) الانبعاث التلقائي

- يعطى معدل الانبعاث التلقائي بالمعادلة التالية $[19]$:

$$\frac{dN_2}{dt} = -A_{21}N_2 \quad (1 - I)$$

$\frac{dN_2}{dt}$: يمثل معدل الانبعاث التلقائي.

N_2 : يمثل استيطان المستوى E_2 .

A_{21} : يمثل احتمالية الانبعاث التلقائي من المستوى (E_2) إلى المستوى (E_1)

$$A_{21} = \frac{1}{t_{spont}}$$

وتحسب قيمته بالمعادلة التالية:

t_{spont} : يمثل عمر الانبعاث التلقائي أو هو الفترة الزمنية المتوسطة التي يستغرقها حدوث الانبعاث التلقائي .

2. 4.I . الانبعاث المستحث (المحفز Emission Stimulated):

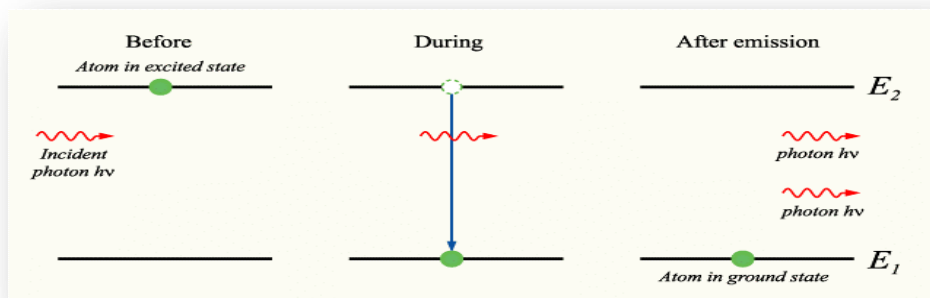
هو عملية فقدان المادة للطاقة على شكل ضوء تحت تأثير خارجي , وفيه تنتقل الذرة من المنسوب الأعلى E_2 إلى المنسوب الأدنى E_1 عندما يمر بها فوتون طاقته تعادل الفرق بين منسوبي الطاقة. ويتميز الانبعاث المستحث بانبعث فوتون جديد، فضلاً عن الفوتون الأصلي. ويكون للفوتون المستحث نفس طاقة الفوتون الأصلي، ونفس تردده، وطوله الموجي، ولذلك يقال إنهما مترابطان. والانبعاث المستحث هو السمة المميزة لمصادر الليزر [13]، و يعطى معدل الانبعاث المستحث بالمعادلة التالية [19]:

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{stim} = -w_{21}N_2 \quad (2 - I)$$

$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{stim}$: يمثل معدل الانبعاث المحفز.

w_{21} : يمثل احتمالية الانبعاث المحفز من المستوى E_2 إلى المستوى E_1 .

N_2 : تمثل استيطان المستوى E_2 .



(الشكل I - 5) الانبعاث المستحث (المحفز)

تعطى (R) النسبة بين احتمالية الانبعاث التلقائي و احتمالية الانبعاث المحفز كالآتي [19] :

$$R = e^{h\nu/KT} - 1 \quad (3 - I)$$

حيث K: هو ثابت بولتزمان ويساوي $1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$.

T: تمثل درجة حرارة المادة بالوحدة المطلقة (K).

$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J/s}$ ثابت بلانك.

ν (Hz) التواتر أو التردد.

5.I. عملية الضخ والتضخيم (Pumping process and amplification):

من أجل حدوث ظاهرة التضخيم، من الضروري أن يكون الوسط نشط أو فعال من أجل التوزيع المعكوس (قلب الإسكان) .

و يجب أن يكون عدد السكان في المستوي 2 أكبر من عدد السكان في المستوي 1 وهذا بالطبع يتطلب تدخل الطاقة الخارجية ، ذلك لأن عدد كبير من هذه الذرات تمتص طاقة كافية للانتقال إلى مرحلة أعلى إثارة ، ثم تبدأ عودة الذرات المثارة إلى حالتها الأولية فيحدث الانبعاث التلقائي للفوتونات [16].

6. I. التوزيع المعكوس (Population Inversion):

في الحالة الطبيعية للمادة، يكون الاستيطان أو عدد الذرات أو الجزيئات في الحالة الأساسية (N_0) أكبر من الاستيطان في أي مستوى أعلى. لو أن الحالة تعكس بحيث تكون عدد الذرات أو الجزيئات في الحالة السفلية أقل منها في الحالة الأعلى، أي أن $N_2 > N_1$ يمكن أن تنتج محصلة انبعاث للفوتونات ، وهو ما يسمى بالتوزيع المعكوس أو قلب الإسكان ، حسب قانون بولتزمان لتوزيع الذرات و الجزيئات كالتالي [19]:

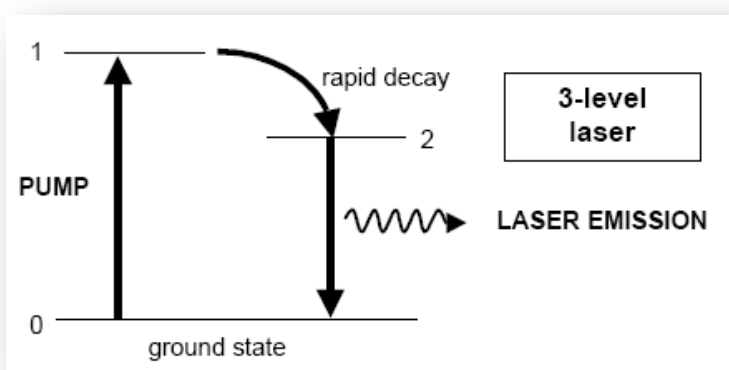
$$\frac{N_2}{N_1} = \exp\left(-\frac{E_1 - E_2}{KT}\right) \quad (4 - I)$$

حيث T درجة الحرارة المطلقة ، K ثابت بولتزمان.

I. 7. أنظمة المستويات الليزرية:

I. 7. 1. نظام المستويات الثلاثية (Triple-Level System):

يتكون من ثلاث مستويات طاقة , المستوى الأساسي (Ground) الذي يمثل المستوى الليزر السفلي (Lower Laser Level) ونرمز له (LLL), و المستوى المثييج (Excited) الذي يمثل المستوى الليزري العلوي (Upper Laser Level) و نرمز له (ULL) , و المستوى شبه المستقر (Metastable) أو المستوى الوسطي [16] .



(الشكل I-6) نظام المستويات الثلاثية

***خصائص المستويات الثلاثية :-** المستوى الأساسي هو نفسه المستوى الليزري السفلي , يجب ضخ نصف عدد الذرات أو الجزيئات من المستوى الأساسي إلى المستوى العلوي للحصول على التوزيع المعكوس, لذلك نحتاج إلى طاقة ضخ عالية جدا.

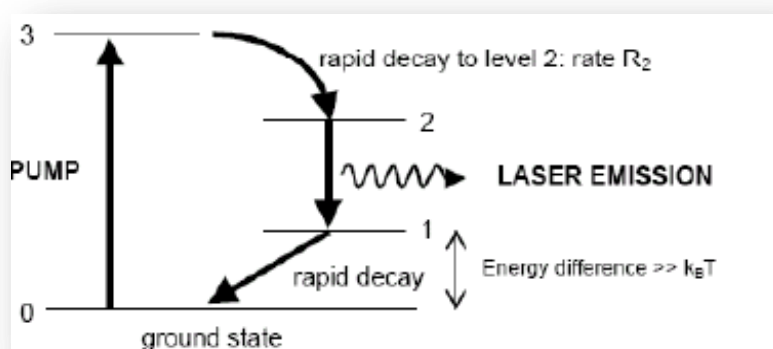
- المستوى شبه المستقر لا يتم اختياره لعملية التوزيع المعكوس لأنه لا يستطيع خزن عدد كبير من الذرات أو الجزيئات المثييجة مثل المستوى الليزري العلوي الذي يكون عريض جدا.
- تحسب قدرة الليزر الخارجة (P_L) كالتالي [19] :

$$P_L = h\nu(w_p\beta N_1 - A_{21}N_2) \quad (5- I)$$

حيث $h\nu$: طاقة الفوتون المنبعث (الليزر) w_p : معدل ضخ الذرات أو الجزيئات إلى المستوى العلوي β : كفاءة المستوى $N_2 A_{21}$: معدل الانبعاث التلقائي من المستوى شبه المستقر (Metastable) إلى المستوى الأساسي .

I. 7. 2. نظام المستويات الرباعية (Four-Level System) :

يتكون من أربعة مستويات طاقة , المستوى الأساسي (Ground), المستوى الليزري السفلي (Lower Laser Level) ونرمز له (LLL), و المستوى المثييج (Excited), و المستوى الليزري العلوي (Upper Laser Level) و نرمز له (ULL)



(الشكل I-7) نظام المستويات الرباعية

***خصائص المستويات الرباعية:** المستوى الأساسي ليس نفسه المستوى الليزري السفلي , لذلك لا نحتاج إلى مصدر ضخ قوي جدا لتحقيق التوزيع المعكوس. أكثر المواد المستخدمة لتوليد الليزر تكون ذات نظام مستويات رباعية [16], و تحسب قدرة الليزر الخارجة (P_L) كالتالي [19]:

$$P_L = h\nu \Delta N_c w_L = h\nu \Delta N_c \left(\frac{P_2}{\Delta N_c} - w_{21} \right) \quad (6- I)$$

حيث $h\nu$: طاقة الفوتون المنبعث (الليزر) .

ΔN_c : قيمة التوزيع المعكوس w_L : معدل ضخ أو نزول الذرات أو الجزيئات من المستوي الليزري العلوي إلى المستوي الليزري السفلي P_2 : قدرة الضخ المؤثرة و تحسب كالتالي :

$$P_2 = P_2 \left[1 - \left(\frac{w_2}{w_{10}} \right) \left(1 + \frac{P_1}{P_2} \right) \right] \quad (7-I)$$

ملاحظة

إذا كان عدد الذرات أو الجزيئات N_2 أكبر من N_1 بمقدار 1 فإن هذا يعني حدوث التوزيع المعكوس ما بين المستويين E_2 و E_1 [19].

7.1.3. المقارنة بين نظام المستويات الثلاثية والرابعة في الجدول التالي :

نظام المستويات الرباعية	نظام المستويات الثلاثية
يتكون من اربعة مستويات	يتكون من ثلاث مستويات
يتطلب ضخ عدد قليل من الذرات من المستوى الأرضي إلى المستوى المثييج للحصول على توزيع معكوس	يتطلب ضخ نصف عدد الذرات من المستوى الأرضي إلى المستوى المثييج للحصول على توزيع معكوس
المستوى السفلي ليس هو المستوى الليزري السفلي	المستوى السفلي هو نفسه المستوى الليزري السفلي
يحدث الفعل الليزري بين E_2 و E_3	يحدث الفعل الليزري بين E_1 و E_2
لا يحتاج إلى مصدر لطاقة ضخ عالية	يحتاج إلى مصدر لطاقة ضخ عالية
عمر المستوى E_3 صغير جدا	عمر المستوى E_3 صغير جدا
عمر المستوى E_2 طويل نسبيا	عمر المستوى E_2 طويل
يحدث انتقال سريع بين E_2 و E_3	يحدث انتقال سريع بين E_2 و E_3
قانون قدرة الليزر الخارجة $P_L = h\nu(P_2' - w_{21}\Delta N_c)$	قانون قدرة الليزر الخارجة $P_L = h\nu(w_p\beta N_1 - A_{21}N_2)$
أعلى كفاءة من نظام المستويات الثلاثية	أقل كفاءة من نظام المستويات الرباعية

تعتمد قدرات الليزر على 1. تردد شعاع الليزر (ν) 2. احتمالية انتقال المحفزة (w_p) 3. كفاءة المستوى (P_2) 4. عدد الذرات في المساويين N_1 و N_2 (ΔN_c)	تعتمد قدرات الليزر على 5. تردد شعاع الليزر (ν) 6. احتمالية انتقال المحفزة (w_p) 7. كفاءة المستوى E_2 (β) 8. احتمالية الانبعاث التلقائي A_{21} 9. عدد الذرات في المساويين N_1 و N_2
تحت شرط التوازن الحراري تكون N_2 و N_1 قليلة جدا يمكن اهمالها	تحت شرط التوازن الحراري تكون N_2 قليلة جدا يمكن اهمالها
لا يوجد انتقال بين المستوى E_1 والمستوى الأساسي	لا يوجد انتقال بين المستوى E_2 والمستوى الأساسي

8.I. خواص الليزر:

(a) أحادية الطول الموجي (Monochromatic): على عكس الضوء المنبعث من الشمس أو المصباح فهو متعدد الألوان (يتكون من عدة موجات) بينما شعاع الليزر له طول موجي واحد فقط أي تردد منفرد.

(b) التشاكه (Coherency): و يعني أن الفرق بين أي نقطتين على موجة شعاع الليزر يكون ثابت عند حركة الشعاع زمانيا و مكانيا, يعتبر الليزر المصدر الضوئي الوحيد الذي يمتلك صفة التشاكه.

(c) الإتجاهية (Directionality): هي إنتشار الحزمة باتجاه واحد و لمسافات طويلة جدا دون انفرجها عن محورها (أو انفرج قليل جدا لا يتجاوز بضعة سنتيمترات لكل كيلومتر) .

(d) السطوع (Brightness): يعني أن كثافة قدرة شعاع الليزر في وحدة المساحة تكون عالية جدا , وتسمى كثافة قدرة شعاع الليزر في وحدة المساحة بالشدة (Intensity), و تصل شدة شعاع الليزر إلى حوالي (2.10^9 W/cm^2) .

9.I أنواع الليزر

هنالك ثلاثة أنواع رئيسية من الليزر وهي حسب طبيعة الوسط الفعال:

9.I.1. ليزر الحالة الصلبة (Solid-state lasers):

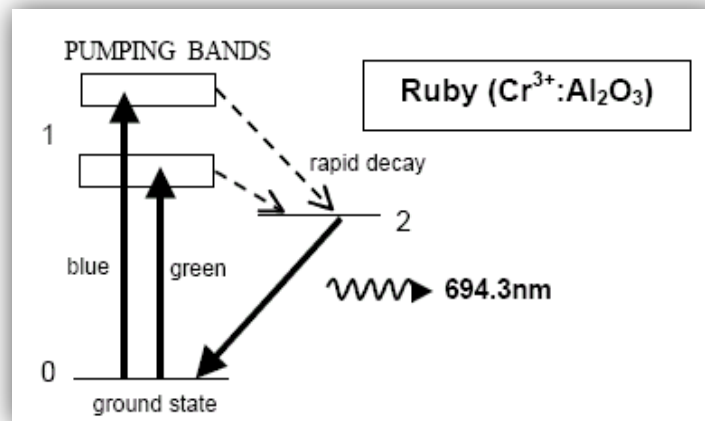
يتكون ليزر الحالة الصلبة من الوسط الفعال و مصدر الضخ و مجهز القدرة والأجزاء الملحقة , الوسط الفعال عبارة عن بلورة من مادة صلبة يتم إدخال أيونات فعالة فيها لغرض توليد الليزر, من أكثر بلورات الليزر الشائعة هي بلورات الياقوت (Ruby) والنيديميوم-ياك (Nd:YAG) و النيديميوم-زجاج (Nd:Glass) والألكسندرايت (Alexandrite) والتيتانيوم-زفير (Ti:Sapphire) , كما يعتبر ليزر أشباه الموصلات من ليزرات الحالة الصلبة ولكنه لا يستخدم بلورة وإنما تراكيب من أشباه الموصلات, يتم ضخها بواسطة التيار الكهربائي [19].

(a) ليزر الياقوت (Ruby Laser)

أكتشف عام 1960 وسطه الفعال هو بلورة الياقوت [13], هي عبارة عن أكسيد الألمنيوم (Al_2O_3) المطعم بأيونات الكروم (Cr^{+3}) بنسبة تطعيم حوالي (5 %) من الوزن الكلي بتركيز أيونات فعالة حوالي ($10^{22}m^{-3}$) , و يكون لون البلورة أحمر و قطرها يتراوح ما بين (50-200mm) , و يتم الضخ باستخدام المصباح الوميضي [19].

يعمل بنظام المستويات الثلاثية (Triple-Level System) , و يحتاج إلى تبريد جيد جداً.

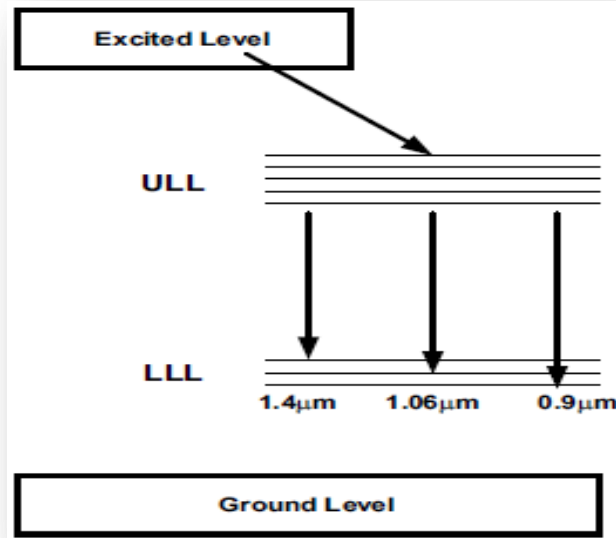
نمط التشغيل نبضي والطول الموجي لشعاع الليزر الخارج (694.3nm) (الأقوى) و (692.9nm).



(الشكل I-8) مخطط مستويات الطاقة لليزر الياقوت

(b) ليزر النيديميوم - ياك (Neodymium :YAG) :

يعتبر واحد من أهم أنواع الليزرات عموماً وقد أكتشف عام 1964, الوسط الفعال هو بلورة الياك (YAG) وهي عبارة عن أكسيد البتريوم ألنيوم ($Y_3Al_5O_{12}$) المطعم بأيونات النيديميوم (Nd^{+3}) بنسبة تطعيم لا تتجاوز (1.5%) و يكون لون البلورة أرجواني. يتم الضخ باستخدام المصباح الوميضي بكفاءة لا تتجاوز (1.5%) أو باستخدام ليزر أشباه الموصلات بكفاءة تصل إلى (70 %) وهو يعمل بنظام المستويات الرباعية و يحتاج إلى تبريد جيد و نمط العمل مستمر و نبضي , الأطوال الموجية لشعاع الليزر الخارج ثلاثة هي (1.4 μm) و (1.06 μm) (الأقوي) و (0.9 μm) [19].



(الشكل I-9) مخطط مستويات الطاقة لليزر النيديميوم - ياك

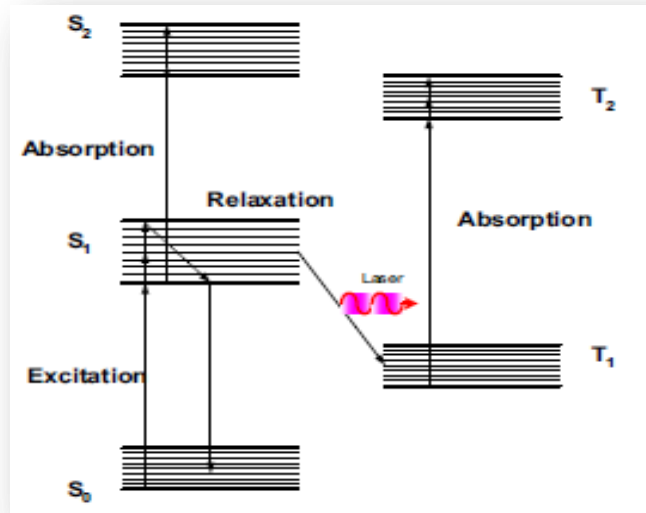
2.9.I. ليزر الحالة السائلة (ليزر الصبغة) (Dye Lasers)

يتكون ليزر الحالة السائلة من الوسط الفعال ومصدر الضخ و مجهر القدرة والأجزاء الملحقة, وسطه الفعال عبارة عن صبغة عضوية (Organic Dye) مذابة في محلول مناسب مثل الماء أو الكحول الأيثيلي وغيرها [19].

كما تمتاز ليزرات الحالة السائلة بإمكانية الحصول على حزمة عريضة من الأطوال الموجية لليزر و هذا يسمى التنعيم (Tuning).

من أبرز أنواع ليزرات الحالة السائلة

- ليزر الصبغة رودامين 6G (R6G) و يبعث في المدى (570-610)nm
- ليزر الصبغة رودامين B (RB) و يبعث في المدى (605-635)nm
- ليزر صبغة الكومارين (Coumarin) و يبعث في المدى (400-575)nm
- ليزر صبغة البوليميثان (Polymethane) و يبعث في المدى (710-950)nm



(الشكل I-10) ليزر الحالة السائلة

I. 9. 3. ليزر الحالة الغازية (Gaz Lasers) :

يتكون الليزر الغازي من الوسط الفعال ومصدر الضخ (مجهز القدرة) والأجزاء الملحقة. الوسط الفعال عبارة عن أنبوب من الزجاج أو السيراميك يحتوي على غاز واحد مثل ليزرات الأركون و الزينون والهيدروجين و النيتروجين أو خليط من غازين مثل ليزرات الهيليوم-نيون , و فلوريد الهيدروجين , و كلوريد الزينون أو خليط من أكثر من غازين مثل ليزرات $CO_2:N_2:He$ [19].

كما تقسم الليزرات الغازية إلى أنواع عديدة حسب آلية توليد الليزر إلى:

- ليزرات الغازات المتعادلة مثل (He-Ne) و (He-Cd)

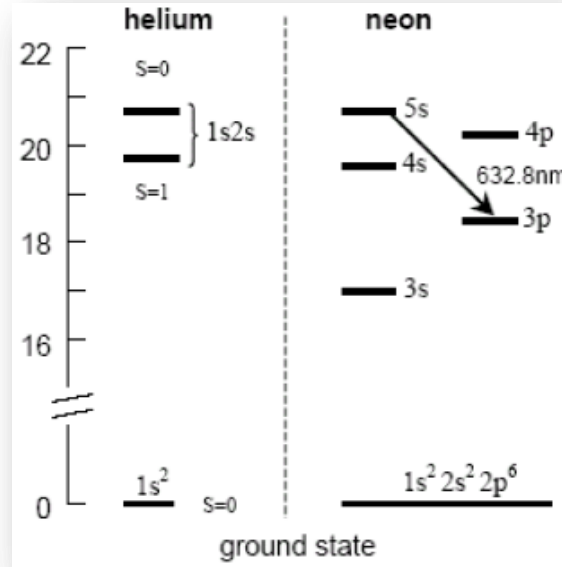
ليزرات الغازات الأيونية مثل (Ar⁺) و (Kr⁺)

ليزرات الغازات الجزيئية مثل (CO₂) و (KrF)

(a) ليزر الهيليوم - نيون (He-Ne)

الوسط الفعال عبارة عن خليط من غازي الهيليوم والنيون (He-Ne) هذه المنظومة تحتاج إلى قدرة كهربائية قليلة للاشتغال .

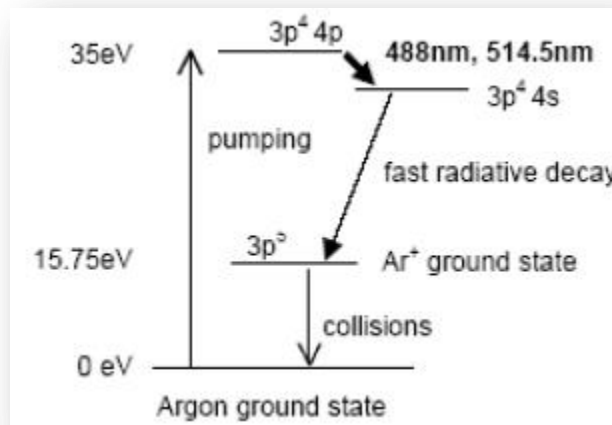
الطول الموجي الخارج هو (632.8 nm) في المنطقة الحمراء [16].



(الشكل I-11) مخطط مستويات الطاقة لليزر الهيليوم-نيون [19]

(b) ليزر أيون الأركون (Ar^+Laser)

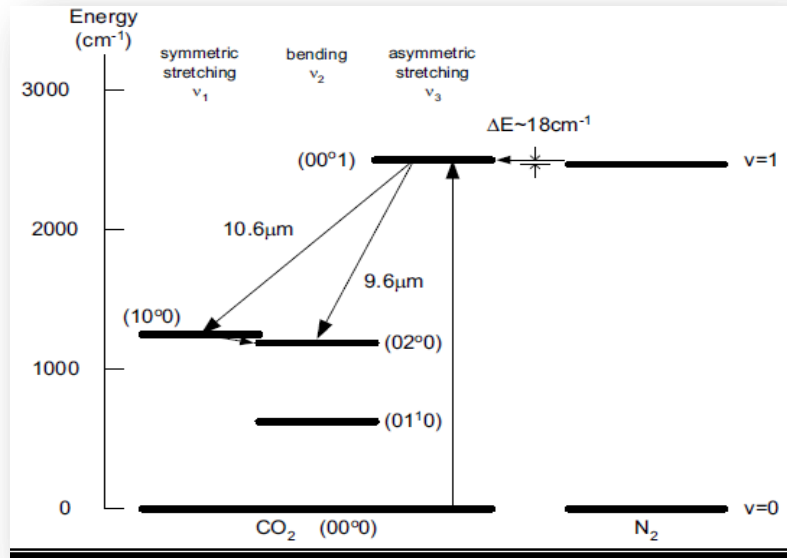
الوسط الفعال عبارة عن غاز الأركون المتأين, له طولين موجيين خارجيين هما (488nm) (أزرق) و (514.5nm) (أخضر) [19].



(الشكل I-12) مخطط مستويات الطاقة لليزر أيون الأركون [19]

(c) ليزر ثنائي أكسيد الكربون (CO_2):

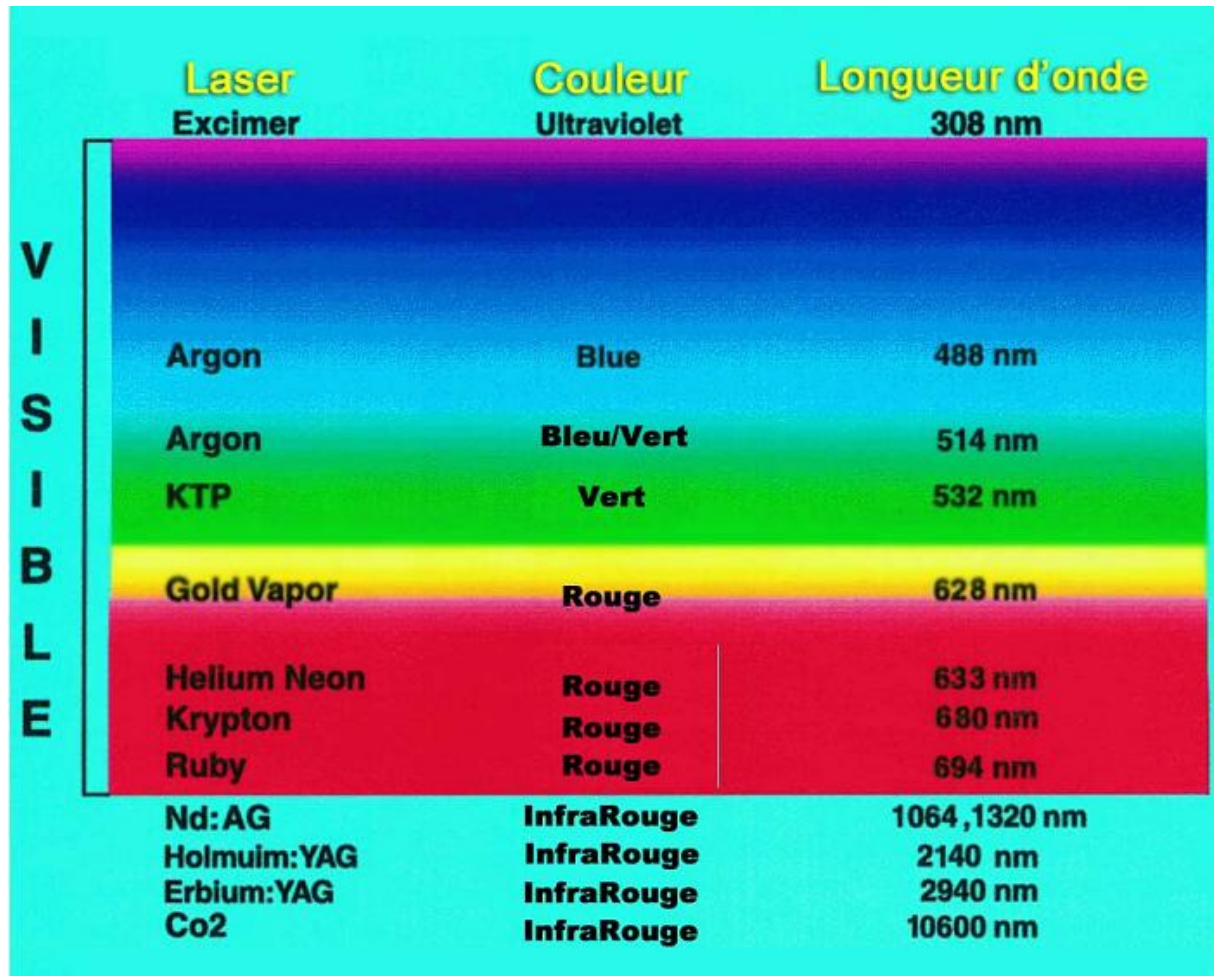
الوسط الفعال عبارة عن خليط من غازات ثنائي أكسيد الكربون والنيتروجين والهيليوم بنسب معينة. وهذا الليزر يبعث مجموعة من الأطوال الموجية ما بين $(9.2 - 10.8) \mu m$ و لكن الطول الموجي الأقوى هو $(10.6 \mu m)$



(الشكل 1-13) مخطط مستويات الطاقة لليزر CO_2 [19]

الجدول الآتي يبين عدد من أنواع الليزر المعروف

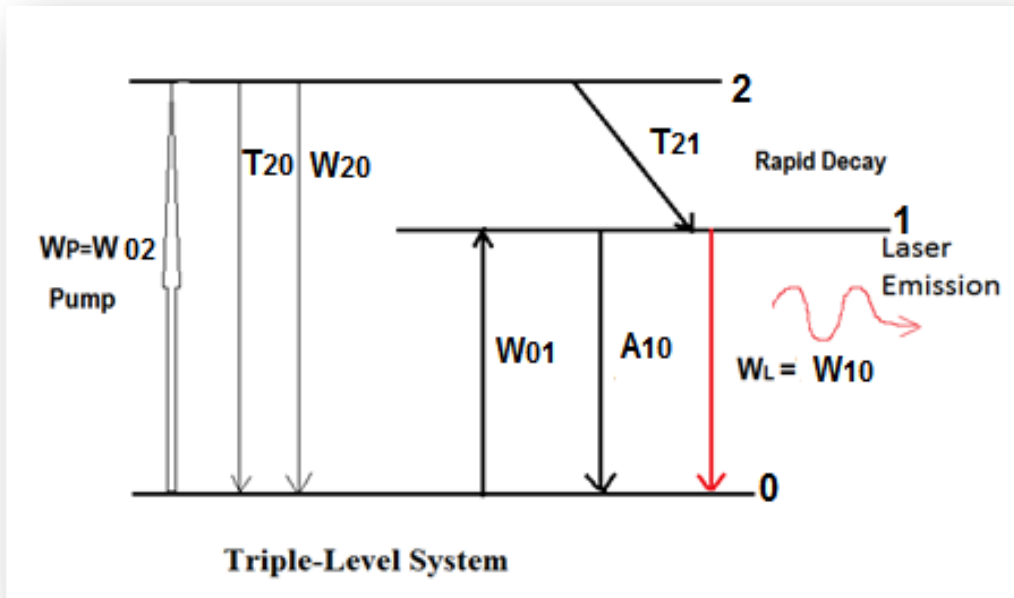
نمط التشغيل	الطول الموجة (μm)	طبيعة وسائط فعالة	الاسم العربي	الليزر
نبضي	0,68 3-levels	صلب	ألكساندرايت	Alexandrite
مستمر و نبضي	0,7 – 0,82 4-levels	صلب	ألكساندرايت	Alexandrite
مستمر و نبضي	0,488 – 0,5145	غاز	أيون الأركون	Ar^{+3}
نبضي	0,193	غاز	فلوريد الأركون	ArF
نبضي	5,59 – 6,613	غاز	أول أكسيد الكربون	CO
مستمر و نبضي	10,6	غاز	ثنائي أكسيد الكربون	CO_2
نبضي	0,51 – 0,578	غاز	بخار النحاس	Cu-vapor
مستمر و نبضي	1,55	صلب	إربيوم - سيليكات	Er-silica
مستمر و نبضي	0,824 – 0,902	صلب	زرنكسيد - الكاليوم	GaAs
نبضي	0,116 – 0,16	غاز	الهيدروجين	H_2
مستمر	0,325 – 0,442	غاز	هيليوم - كاديوم	He-Cd
مستمر	0,6328	غاز	هيليوم - نيون	He-Ne
مستمر و نبضي	2,5 – 3,4	غاز	فلوريد الهيدروجين	HF
نبضي	1,315	غاز	اليود	I_2
مستمر و نبضي	3,112 – 3,15	صلب	زرنكسيد الإنديوم	InAs
مستمر و نبضي	0,903 – 0,91	صلب	فوسفيد الإنديوم	InP
مستمر و نبضي	5,18	صلب	أنتيمونيد الإنديوم	InSb
مستمر	0,6471	غاز	الكربتون	Kr
نبضي	0,248	غاز	فلوريد الكربتون	KrF
نبضي	0,337	غاز	النيتروجين	N_2
نبضي	1,06	صلب	نيديميوم - زجاج	Nd :Glass
مستمر و نبضي	1,064	صلب	نيديميوم ياك	Nd :YAG
مستمر	0,5401	غاز	النيون	Ne
مستمر و نبضي	0,72	غاز	بخار الرصاص	Pb-vapor
مستمر و نبضي	0,57 – 0,61	سائل	رودامين 6G	R6G
مستمر و نبضي	0,605 – 0,635	سائل	رودامين B	RB
نبضي	0,69430	صلب	الياقوت	Ruby
نبضي	0,69 – 1,08	صلب	تيتانيوم - زفير	Ti :Sapphire
نبضي	0,173	غاز	الزينون	Xe_2
نبضي	0,308	غاز	كلور الزينون	XeCl
نبضي	0,351	غاز	فلوريد الزينون	XeF



(الشكل I-14) ألوان مختلف أنواع الليزرات

10.1. معادلات التوزيع الذرية

- كثافة توزيع الذرات لليزر ذو ثلاثة مستويات تعطى بالمعادلات الثلاثة التالية :



(الشكل 1-15) نظام المستويات الثلاثية

$$\frac{dN_0}{dt} = (W_{10}N_1 - W_{01}N_0) + (W_{20}N_2 - W_{02}N_0) + A_{10}N_1 + T_{20}N_2 \quad (8 - \text{I})$$

$$\frac{dN_1}{dt} = -(W_{10}N_1 - W_{01}N_0) + T_{21}N_2 - A_{10}N_1 \quad (9 - \text{I})$$

$$\frac{dN_2}{dt} = -(W_{20}N_2 - W_{02}N_0) - T_{20}N_2 - T_{21}N_2 \quad (10 - \text{I})$$

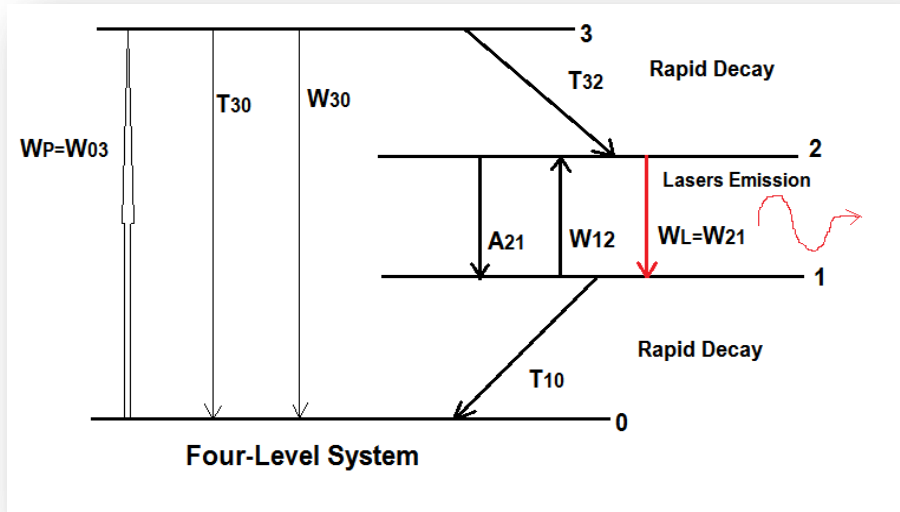
ولدينا $W_P = W_{20} = W_{02}$ ، $W_L = W_{01} = W_{10}$ وبالتالي تصبح المعادلات كالتالي :

$$\frac{dN_0}{dt} = W_L(N_1 - N_0) + W_P(N_2 - N_0) + A_{10}N_1 + T_{20}N_2 \quad (11 - \text{I})$$

$$\frac{dN_1}{dt} = -W_L(N_1 - N_0) + T_{21}N_2 - A_{10}N_1 \quad (12 - \text{I})$$

$$\frac{dN_2}{dt} = -W_P(N_2 - N_0) - T_{20}N_2 - T_{21}N_2 \quad (13 - \text{I})$$

- كثافة توزيع الذرات لليزر ذو أربعة مستويات تعطى بالمعادلات الأربعة التالية :



(الشكل 16-1) نظام المستويات الرباعية

$$\frac{dN_0}{dt} = (W_{30}N_3 - W_{03}N_0) + T_{30}N_3 + T_{10}N_1 \quad (14 - \text{I})$$

$$\frac{dN_1}{dt} = (W_{21}N_2 - W_{12}N_1) + A_{21}N_2 - T_{10}N_1 \quad (15 - \text{I})$$

$$\frac{dN_2}{dt} = -(W_{21}N_2 - W_{12}N_1) - A_{21}N_2 + T_{32}N_3 \quad (16 - \text{I})$$

$$\frac{dN_3}{dt} = -(W_{30}N_3 - W_{03}N_0) - T_{30}N_3 - T_{32}N_3 \quad (17 - \text{I})$$

ولدينا $W_P = W_{30}W_{03} =$, $W_L = W_{12} = W_{21}$ وبالتالي تصبح المعادلات كالتالي :

$$\frac{dN_0}{dt} = W_P(N_3 - N_0) + T_{30}N_3 + T_{10}N_1 \quad (18 - \text{I})$$

$$\frac{dN_1}{dt} = W_L(N_2 - N_1) + A_{21}N_2 - T_{10}N_1 \quad (19 - \text{I})$$

$$\frac{dN_2}{dt} = -W_L(N_2 - N_1) - A_{21}N_2 + T_{32}N_3 \quad (20 - \text{I})$$

$$\frac{dN_3}{dt} = -W_P(N_3 - N_0) - T_{30}N_3 - T_{32}N_3 \quad (21 - \text{I})$$

الفصل الثاني

عمل الليزر في الأوساط الفلكية

الفصل الثاني

عمل الليزر في الأوساط الفلكية

1.II. عمليات الإثارة الابتدائية في البلازما قليلة الكثافة

1.1.II. مقدمة

البلازما هي الحالة الرابعة للمادة تكون على شكل غاز يحتوي على خليط من أعداد متساوية من أيونات موجبة الشحنة و إلكترونات و ذرات متعادلة أو جزيئات, تمثل البلازما 99 % من هذا الكون [17], وهي المكون الرئيسي لمادة الشمس و غيرها من النجوم وتوجد أيضا في السحب الغازية الواقعة داخل المجرات و فيما بينها .

بما أن البلازما حالة غير مستقرة فإن قوة التجاذب الكهربائية تعمل على إعادة إتحاد (تركيب) الشحنات الموجبة و السالبة مع بعضها البعض , ويكون نتيجة إعادة التركيب انطلاق ضوء ذو تردد معين يعتمد على مستويات الطاقة للذرات المكونة لمادة البلازما [1].

الذرة (الأيون) في البلازما الفلكية قليلة الكثافة بالقرب من نجم حار (ازرق) تشارك في سلسلة من العمليات الإشعاعية و التصادمية التي تسببها الأشعة فوق البنفسجية الآتية من النجم. الشكل (1-II) يوضح بطريقة مبسطة تسلسل هذه العمليات [1].

الأشعة فوق البنفسجية للجسم الأسود تحول بالتأين الضوئي الذرات A إلى شوارد و هذا ما يكون بلازما منخفضة الكثافة, و بسبب التصادم بين الشوارد المشكلة A^+ و الإلكترونات فإنها تتحد لتكوين ذرات محايدة في الحالة الأساسية A أو في الحالة المثارة A^* , الذرات المثارة A^* تنزل (تظمحل) إلى الحالة الأساسية A بإرسال فوتونات في الانتقالات الإشعاعية المسموحة , نسبة صغيرة من الذرات تبقى في الحالة شبه مستقرة لمدة طويلة [1].

تصادم الإلكترونات بالذرات يؤدي إلى إثارتها و تأينها , فأشعة إعادة التركيب المنبعثة من الذرة A يمكن أن تثير ذرات (أيونات) من مرحلة أخرى أو حتى عناصر أخرى في البلازما إذا كان هناك توافق في طول الموجة بين الأشعة الممتصة و أشعة إعادة التركيب .

المكونات الرئيسية للبلازما الفلكية هي 90% من الهيدروجين و 10% من الهيليوم مع طاقة التأين $I(H) = 13.6 \text{ eV}$ و $I(He) = 24.6 \text{ eV}$. و لذلك الظواهر المذكورة تحدث بشكل رئيسي على ذرات الهيدروجين والهيليوم في المنطقة الساخنة من النجم والمناطق المجاورة لها.

II.1.2. التأين الضوئي للذرات:

يدور الإلكترون حول النواة في عدد محدد من مستويات الطاقة الثابتة والمحددة دون أن يفقد أو يكتسب طاقة في الحالة العادية للذرة , لكن أثناء دوران الإلكترون حول النواة بطاقة معينة فإنها تتوقف على بعد مستوى الطاقة الذي يدور فيه عن النواة حيث تتزايد طاقة المستوى بزيادة نصف قطره , في الحالة المستقرة للذرة يدور الإلكترون في مستوى الطاقة المناسب لطاقته وعند إثارة الذرة أو إكساب الذرة طاقة يقفز الإلكترون مؤقتاً إلى مستوى طاقة أعلى و يتوقف على مقدار الكم المكتسب من الطاقة , وتسمى هذه الظاهرة بالتأين الضوئي [1].

يعتمد التأين الضوئي على المقطع الفعال بدلالة التردد ν للذرة الهيدروجين في المستوى n ($n = 1$ المستوى الأساسي) , أين $\nu > \nu_c$ حيث ν_c حد التأين (حد ليمان Lyman limit : $\nu_c = 3.3 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$, $\lambda_c = 912 \text{ \AA}$).

حيث تم تحديد المقطع الفعال بدقة جيدة من قبل صيغة كرامز [1]:

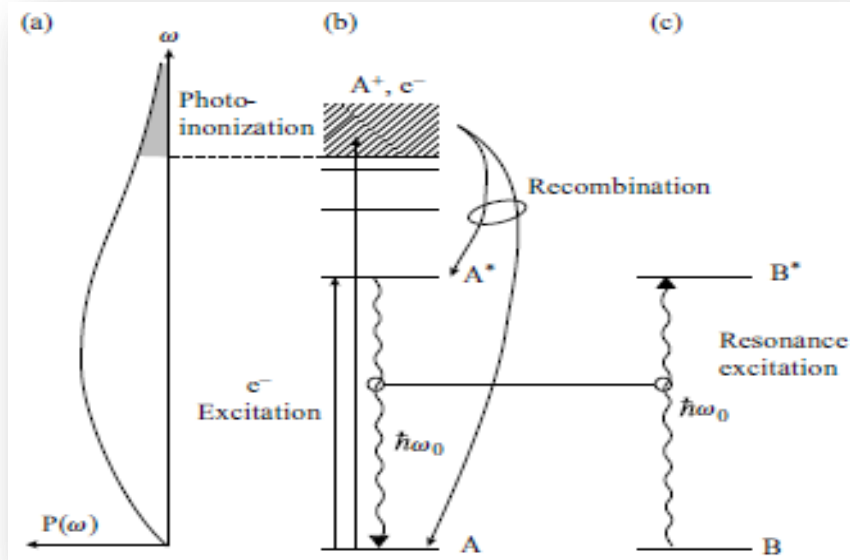
$$\sigma_i(\nu) = \frac{64}{3\sqrt{3}} \alpha \left(\frac{\nu_c}{\nu} \right)^3 \frac{\pi a_0^2}{n^5} \quad (1-II)$$

حيث: $\alpha = e^2/\hbar c$ ثابت البنية الدقيقة

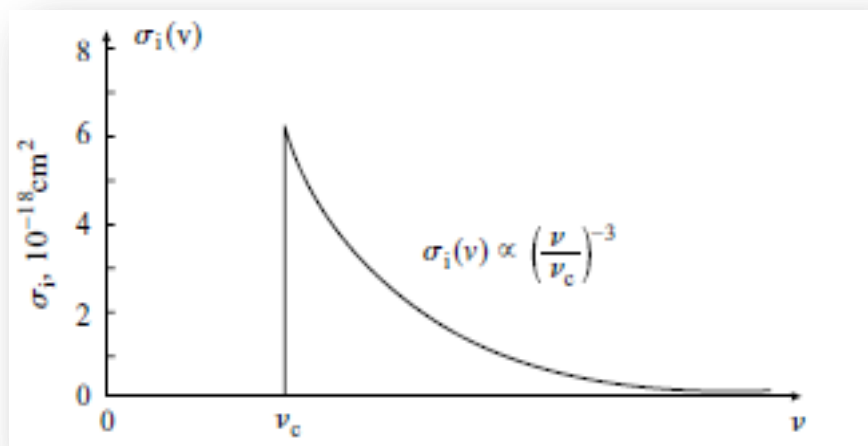
πa_0^2 : المقطع الفعال الهندسي للذرة

$$a_0 = \hbar^2/me^2 = 0.529 \cdot 10^{-8} \text{ cm} \quad (\text{Bohr radius})$$

هذه العلاقة مبينة في الشكل (II - 2) أين يمكن أن نرى المقطع الفعال للتأين الضوئي لديه الحد الأقصى عند حد التأين , ومن ثم يتناقص بسرعة وفق القانون $\left(\frac{\nu_c}{\nu}\right)^3$ و القيمة المطلقة لـ $\sigma_i = \sigma_{ph}$ بالقرب من حد التأين تقع بين $10^{-19} - 10^{-18} \text{ cm}^2$.

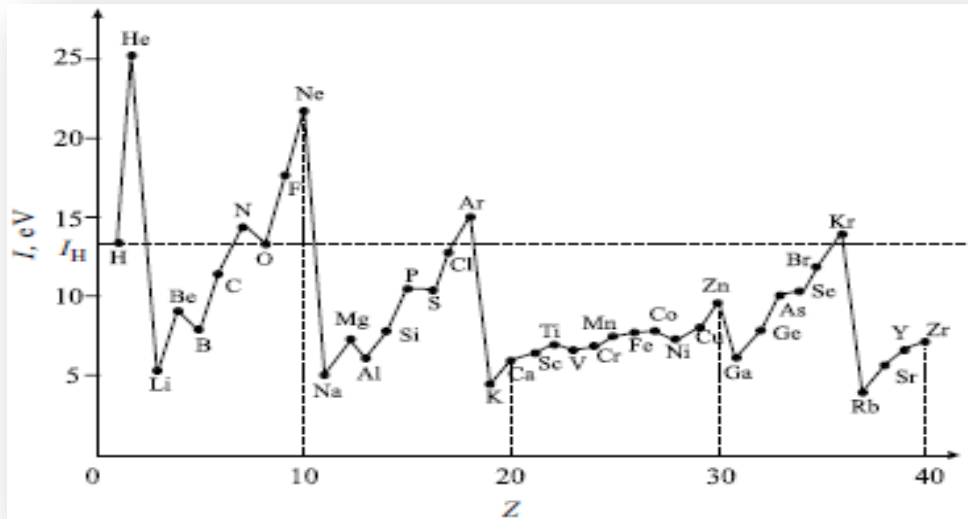


الشكل (II- 1) العمليات الأساسية تحت إشعاع الذرة بواسطة أشعة الجسم الأسود التي تحتوي على الأشعة فوق البنفسجية قصيرة الموجة الجناح (a) , بم في ذلك الإثارة المتجاورة لذرات الشوائب B (b) بواسطة إعادة تركيب الخط الطيفي للذرة A(c) [1]



الشكل (II - 2) إرتباط المقطع الفعال للتأين الضوئي لذرة الهيدروجين $\sigma_i(\nu)$ بالتردد ν بجوار عتبة التأين (Lyman limit حد ليمن) $\nu_c = 3.3 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$ ($\lambda = 912 \text{ \AA}$). [1]

الشكل (II - 3) يصف طاقات التأين للذرات المتعادلة (المحايدة) الأربعة الأولى من عناصر الجدول الدوري , كل هذه العناصر وحتى الأثقل منها يمكن العثور عليها في البلازما الفلكية وفقا لمتوسط وفرتها في الكون, الرسم البياني يبين أنه حتى يتم امتصاص كل الأشعة فوق البنفسجية النجمية بسبب التأين الضوئي للهيدروجين , فإن الإشعاع ذو الطول الموجي $\nu > \nu_c$ قادر على تأيين معظم العناصر الأخرى مع انخفاض طاقات التأين $I < I_H$, و هذا ضروري جدا بالنسبة للمناطق المحايدة , أين كثافة الإلكترون وطاقته تكون صغيرة جدا لتأيين عناصر التصادم الأخرى [1] .



الشكل (II - 3) طاقة التأين I للعناصر بدلالة العدد الذري Z , حيث I_H طاقة تأين الهيدروجين

معدلالتأين الضوئي $W_i = W_{ph}$ (in s^{-1}) يحدد بواسطة تحت الإشعاع بسطوع طيفي للحالة $P(\nu, \Omega)$ (بالوحدة $photons/cm^2 \cdot s \cdot st \cdot Hz$) والمقطع الفعال $\sigma_i(\nu)$ [1]:

$$W_i = \int_{\nu_c}^{\infty} \int \sigma_i(\nu) P(\nu, \Omega) d\nu d\Omega \quad (2-II)$$

لأجل التوازن الإيزوتروبي (isotropic) الإشعاعي تصبح العلاقة كالتالي :

$$W_i = 4\pi \int_{\nu_c}^{\infty} \sigma_i(\nu) P(\nu, \tau) d\nu \quad (3-II)$$

إن وجود جناح للأشعة فوق البنفسجية في طيف الأشعة ضروري لأجل التأين الضوئي لذرات الهيدروجين (الشكل II - 1 a), و الأشعة فوق البنفسجية غالبا ما تعني الإشعاع ذو الطول الموجي $\lambda_c = 912 \text{ \AA}$. $\lambda > \lambda_c$.

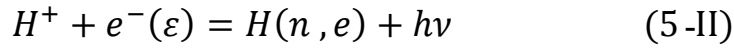
3.1.II. إعادة التركيب :

هي عملية عكسية للتأين الضوئي , أي عند وجود إلكترون سالب و أيون موجب بالقرب من بعضهما البعض فإنه يمكن إعادة إلتحامهما [18], مكونين بذلك ذرة أو جزيء متعادلا, و تعرف هذه الظاهرة باسم (إعادة التركيب **Recombination**) و يتناسب معدل إعادة التركيب (أي عدد مرات إعادة التركيب في وحدة الحجم وفي وحدة الزمن) طرديا مع تركيز كل من الإلكترونات n_- و الأيونات n_+ و يمكن تحديده من العلاقة [13]:

$$\frac{dn_+}{dt} = \frac{dn_-}{dt} = -\alpha n_+ n_- \quad (4-II)$$

حيث α معامل ثابت يعرف باسم معامل إعادة التركيب .

- على سبيل الميثال إعادة تركيب ذرة الهيدروجين :



أين $\varepsilon = \frac{mv^2}{2}$ هي الطاقة الحركية للإلكترون .

المقطع الفعال لإشعاع إعادة التركيب للحالة $n, \sigma_r(n)$ يرتبط بسرعة الإلكترون كما بنفس الطريقة المقطع الفعال للتأين الضوئي يعتمد على زيادة طاقة الفوتون $h\nu$ على طاقة التأين I_c [1] .

إن المقطع الفعال للتأين الضوئي $\sigma_i^n(\nu)$ يرتبط بالمقطع الفعال لإشعاع إعادة التركيب $\sigma_r^n(\nu)$ وفقا لعلاقة ميلن (the Milne relation) [1]:

$$\sigma_r^n(\nu) = \frac{g_i(n)}{g_{i+1}(1)} \left(\frac{h\nu}{mc\nu} \right)^2 \sigma_i(\nu) \quad (6-II)$$

أين $g_i(n)$: الوزن الإحصائي للحالة n .

$g_{i+1}(1)$: الوزن الإحصائي للأيون في الحالة الأرضية.

في نطاق درجة الحرارة $T_e = (5-10) \cdot 10^3 K$ ، نموذجيا في حالة البلازما قليلة كثافة، المقطع الفعال لإعادة التركيب حوالي 10^{-20}cm^2 ، يعني أنه أقل بكثير من المقطع الفعال الهندسي لذرة الهيدروجين πa_0^2 ، والإلكترون الضوئي الذي يظهر في البلازما الفلكية يريد الوصول إلى حالة التوازن مع بقية الجسيمات المشحونة عند درجة حرارة معينة T_e [1].
 بالتالي فإن معدل إعادة التركيب في درجة حرارة T_e يمكن التعبير عنه بدلالة معامل إعادة التركيب في الحالة المرتبطة n على النحو التالي:

$$\alpha_n(T_e) = \int_0^\infty \sigma_r(n, \nu) \nu f(\nu) d\nu \quad (7 - II)$$

حيث $f(\nu)$ دالة توزيع الإلكترونات (توزيع ماكسوال - بولتزمان) :

$$f(\nu) = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi k T_e} \right)^{3/2} \nu^2 \exp \left[- \left(\frac{m \nu^2}{2k T_e} \right) \right] \quad (8 - II)$$

حيث أن α_n ترتبط بالحالة الكوانتية النهائية n للهيدروجين و يعطى في الجدول (1 - II) إعادة التركيب الأكثر احتمالا وهي الحالة الأساسية ($n = 1$).

لكن في البلازما الفلكية ومع ارتفاع كثافة الضوء ، الفوتون في استمرارية ليمان L_c ، أي أن الطاقة $h\nu > I_c$ تمتص بسبب تأين ضوئي جديد لذرة هيدروجين أخرى ، من خلال إعادة التركيب و الاضمحلال المتعاقب للإشعاع انطلاقا من الحالات عالية الارتباط ، 70 % من كل إعادة التركيب للحالة المثارة يملئ المستويات $2p$ و يبعث إشعاع في خط ليمان $Ly\alpha$ [1].
 مجموع معاملات إعادة التركيب لجميع المستويات يساوي مجموع جميع المستويات النهائية

$$\alpha(T_e) = \sum_n \alpha_n(T_e) \quad (9 - II)$$

$\alpha_{4s} = 3.6$	$\alpha_{4p} = 9.7$	$\alpha_{4d} = 11$	$\alpha_{nf} = 5.5$
$\alpha_{3s} = 7.8$	$\alpha_{3p} = 20$	$\alpha_{3d} = 17$	
$\alpha_{2s} = 23$	$\alpha_{2p} = 54$		
$\alpha_{1s} = 160$			
$\alpha_A = \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n = 420;$		$\alpha_B = \alpha - \alpha_{1s} = 260$	

الجدول (1 - II) معاملات إعادة التركيب α_n للهيدروجين في درجة حرارة

$$T_e = 10^4 K \text{ (في الوحدة } 10^{-15} \text{ cm}^3/\text{s})$$

حيث أن $\alpha(T_e)$ ترتبط بدرجة الحرارة و توضح بشكل تقريبي جيد بالعلاقة [1]:

$$\alpha(T_e) \simeq 3.10^{-11} \frac{(Z-1)^2}{\sqrt{T_e}} [cm^3.s^{-1}] \quad (10 - II)$$

على سبيل التعميم , من خواص العدد الذري Z أنه يعطي درجة تأين و درجة إعادة تركيب الأيون , أي أن H^+ ذرة ذات تأين منفرد , $Z=2$ تأين مضاعف , $Z=3$... إلخ ,

و النسبة لاحتتمال إعادة التركيب في وحدة الزمن W_{rec} يتعلق بكثافة الإلكترون n_e و معامل إعادة التركيب [1] :

$$W_{rec} = n_e \alpha(T_e) \quad (11 - II)$$

الصيغ أعلاه لمعدلات التأين الضوئي و إعادة التركيب الإشعاعي تقودنا إلى اعتبار توازن التأين في سحابة غاز الهيدروجين (سديم، تكثيف الغاز) حيث يبدو عمل الليزر الفلكي.



الشكل (II - 4) كيف يصدر الضوء من الذرة

II-1-4 - إثارة و تأين الإلكترون :

التصادم بين الذرة وإلكترون الطاقة العالية $\epsilon = m v^2/2$ يتجاوز طاقة التأين E_n للحالة n أو طاقة التأين I يمكن أن تأين أو تثير الذرة على التوالي . والمقطع الفعال لبعض عمليات التصادم له قيمة ضمن مجال واسع حول المقطع الفعال لحركة الغاز πa_0^2 , ولتقدير هذه المقاطع الفعالة للذرات و الأيونات بالتفصيل هناك أساليب مختلفة في الدراسة الشاملة من طرف العالم (Sobel'man et al., (1981) [1]

الشكل (II - 5) يظهر المقطع الفعال للإثارة بالنسبة للتحويلات المسموحة $1s-2p$ والمحظورة (الممنوعة) $1s-2s$ لـ H^+ بدلالة الطاقة ϵ , تتفق النتائج التجريبية بشكل مقبول مع نتائج الحسابات في تقريب BOR الأبسط , وفق الطابع ثنائي القطب من هذا التقريب، وحساب المقطع الفعال للانتقالات المسموحة في الشكل (II - 5a) هو أعلى من المنحنى التجريبي في حين أن الاتفاق جيد في حالة التحويلات الممنوعة الشكل (II - 5 b) , ولكن العديد من هذه المقاطع الفعالة أقل رتبة من المقطع الفعال للانتقالات الإشعاعية المجاورة .

لذلك تثار الحالة الشبه مستقرة عن طريق سلسلة من الأضمحلال الإشعاعي من الحالة عالية الارتباط أو من خلال إثارة إلكترون التصادم من الحالة الأساسية.

الشكل (II - 6) يبين أن المقطع الفعال للتأين من الحالة الأساسية للهيدروجين يتعلق بطاقة الإلكترون ϵ , و يمكن أن نرى أن هذا المقطع الفعال هو أعلى بكثير من إشعاع إعادة التركيب في البلازما قليلة الكثافة.

II.1.5. التوازن الحراري الكلي و المحلي (TE and LTE) في البلازما:

في حالة الوسط الغازي (plasma) و في الليزر الفلكي من الضروري جدا أن يكون على الأقل زوج واحد من مستويات عنصر واحد (ذرة , أيون) تحت عدم التوازن في هذا الوسط و الجزيئات ذات الكتل الكبيرة في هذه الحالة تكون دائما تحت التوازن الحراري [1].

في حالة التوازن الكلي, الذرات (الأيونات) والأشعة تكون تحت التوازن الحراري ' أين التردد يصف توزيع الإشعاع عن طريق توزيع بلانك [1]:

$$U(\nu) = \left(\frac{8\pi\nu^2}{c^3} \right) \frac{h\nu}{\exp\left(\frac{h\nu}{KT}\right) - 1} \left[\frac{\text{erg}}{\text{cm}^3\text{HZ}} \right] \quad (12 - II)$$

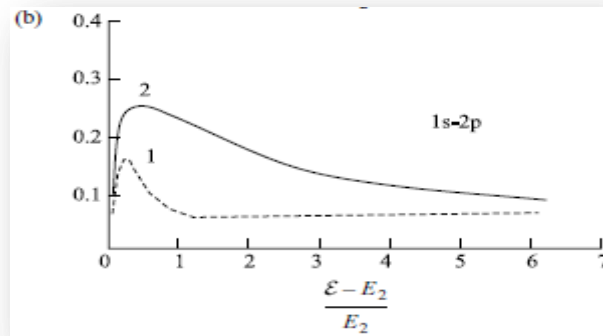
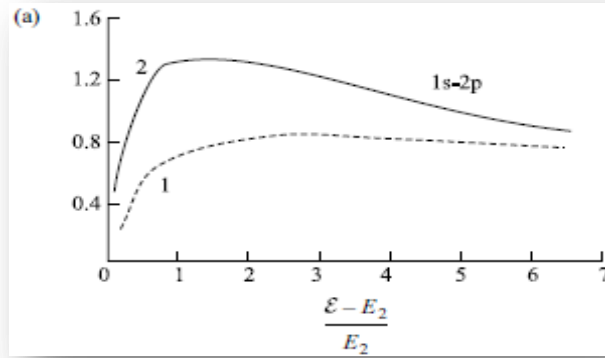
حيث : $U(\nu)$ كثافة الطاقة للإشعاع الطيفي , T : درجة الحرارة , $\nu = \frac{\omega}{2\pi}$ التردد ,

وتوزيع الذرات بين مستويات الطاقة ثابتة من خلال توزيع بولتزمان [17] :

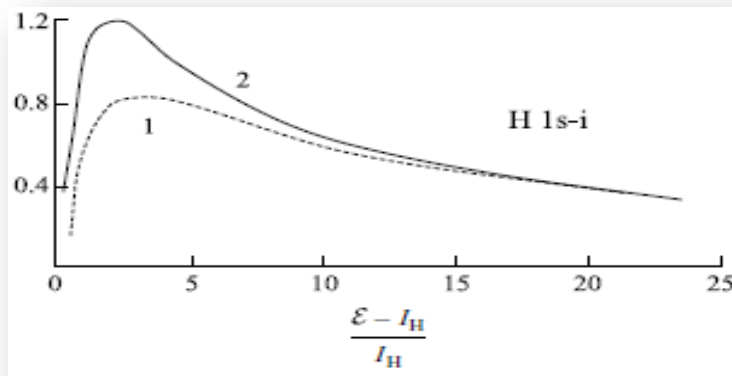
$$W_n = g_n \exp\left(-\frac{E_n}{KT}\right) \quad (13 - II)$$

$$\frac{n_i}{n_j} = \frac{g_i}{g_j} \exp\left(-\frac{\Delta E_{ij}}{KT}\right) \quad (14 - II)$$

حيث g_i و g_j الوزن الإحصائي للمستويين i و j



الشكل (II - 5) المقاطع الفعالة الفعلية (في وحدة πa_0^2) للانتقال المسموح $1s-2p(a)$ والممنوع $1s-2s(b)$ لذرة الهيدروجين : (1) التجربة , (2) تقريب BORN (تعديل Sobel'man et al., 1981) [1]



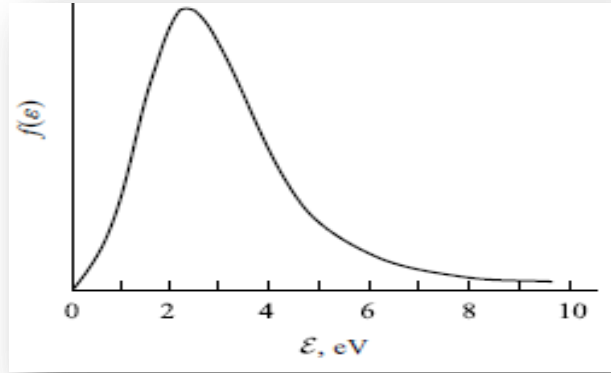
الشكل (II - 6) المقطع الفعال الفعلي (في وحدة πa_0^2) لتأين ذرة الهيدروجين انطلاقاً من الحالة الأساسية: (1) التجربة و (2) تقريب BORN [1].

يتم تحديد توزيع الإلكترونات بدلالة الطاقة ε من قبل توزيع ماكسوال المستمد من توزيع سرعة الذرات (II – 8) كما يلي [1]:

$$f(\varepsilon) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} T^{-3/2} \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} e^{-\varepsilon/T} \quad (15 - II)$$

وللسهولة تكتب ε وكذا درجة الحرارة T في وحدة الطاقة (1 eV = 11605 K).

الشكل (II – 7) يوضح توزيع إلكترونات الغاز مع $T_e = 10^4 K$ و $kT_e \simeq 1$ eV, يمكن للإلكترونات في ذيل هذا التوزيع أن تثير مستويات الطاقة في معظم الذرات فيما عدا الهيدروجين و الهيليوم و التي تتطلب طاقة من 10 إلى 20 eV لإثارة الإلكتروناتهما.



الشكل (II – 7) توزيع ماكسوال لطاقة الإلكترون في مجموعة الإلكترون

مع درجة الحرارة $T_e = 10^4 K$

يوضح توزيع الذرات على مختلف مراحل التأين (i) من خلال توزيع ساها (Saha) [1]:

$$\frac{N^{(i+1)}}{N^{(i)}} = \frac{g_{i+1}}{g_i} \frac{2}{n_e} \left(\frac{mkT_e}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} e^{-E_i/kT_e} \quad (16 - II)$$

أين E_i : طاقة تأين الذرة A_i .

n_e : كثافة الإلكترونات الحرة في درجة الحرارة T_e

g_i : الوزن الإحصائي للحالة الأساسية للذرة A_i ($Z=1$) (يتوافق مع ذرة محايدة).

في درجة حرارة عالية و في الذرات المعقدة يتم استبدال الأوزان الإحصائية بدوال التقسيم

للحالات المثارة . فمن المعتاد أن يعبر عن طاقة التأين بالإلكترون فولط ($1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-12} \text{ erg}$), تأين العناصر الأكثر وفرة هما الهيدروجين و الهيليوم .

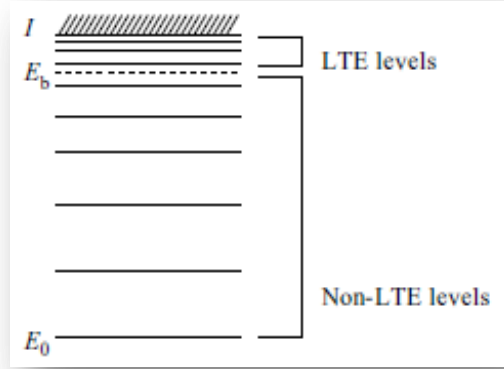
II-1-6- خارج - (التوازن الحراري المحلي Non-LTE) الوسط الفيزيائي الفلكي:

لاحظ العلماء أن هناك إنحراف بالنسبة للتوازن الحراري المحلي LTE في الغلاف النجمي عندما تنخفض كثافة البلازما , و يتحقق التوازن الحراري المحلي LTE في الطبقات العميقة من الغلاف أين يحدث تأين الذرات أساسا عن طريق التصادم , في هذه الطبقات العميقة يحدد توزيع الإسكان على مستويات الذرات (الأيونات) وحالات التأين المجاورة بتوزيع بولتزمان - ساها و يحدد تردد توزيع الإشعاع بواسطة توزيع بلانك [1].

تتناقص لائحة التصادمات نحو الطبقات العليا في الغلاف النجمي , و منه ففي الطبقات العليا تكون إثارة الذرات بالتصادم أقل بالنسبة لإثارتها من خلال عمليات الإشعاع , ومنه فإن في الطبقات العليا قليلة الكثافة عمليات الإشعاع هي المهيمنة في الغلاف النجمي, و بالتالي عدد سكان المستويات أقل بكثير من حد التأين , و لا يحدد بدرجة حرارة الإلكترون T_e , لكن يحدد عن طريق درجة حرارة الإشعاع الفعال في تردد إثارة الفوتونات .

يتضح التعبير من LTE إلى Non-LTE في الشكل (II - 8), حيث E_b هي الحدود التقليدية لطاقة الإثارة بين أنظمة LTE و Non-LTE المتعلقة بمستويات الطاقة العلوية و السفلية على التوالي , هذه الحدود تعتمد على كثافة البلازما , أي تأخذ الحدود في الارتفاع عندما تنخفض الكثافة [1] .

بالتالي فإن الانحراف عن LTE في الأوساط الفلكية مشروط بكون توزيع الطاقة للجسيمات الحرة (ذرات و إلكترونات, أيونات) يمكنها في بعض الأحيان أن لا تتميز بدرجة حرارة واحدة [1].



الشكل (II - 8) انتقال إسكان LTE المستويات المثارة إلى إسكان المستويات

المنخفضة non - LTE اعتمادا على كثافة البلازما .

يعبر عن الإسكان $N_n(\text{non-LTE})$ للمستوى الذري n بحد السكان لنفس المستوى $N_n(\text{LTE})$ في التوازن الحراري المحلي نستخدم المعامل b_n [1]:

$$N_n(\text{non-LTE}) = b_n N_n(\text{LTE}) \quad (\text{II} - 17)$$

أين يتم تحديد السكان $N_n(\text{LTE})$ من خلال توزيع بولتزمان و ساها ,

و المعامل b_n يميز درجة تحويل سكان الحالة N_n من التوازن الحراري المحلي .

لأجل الليزر الفلكي من الضروري أن b_n لبعض مستويات الطاقة يمكن أن يكون أكبر بكثير من 1, و لما يكون المعامل $b_n > 1$ قد تحدث طاقة حوالي $E \simeq E_b$ أنظر الشكل (II - 8) , حيث المستوى العلوي يثار بواسطة التصادم , في حين يتم إفراغ المستوى الأقل بسبب الانتقالات الإشعاعية السريعة إلى المستويات الأدنى , احتمال حدوث هذه العملية أساسا لتشكّل ما يسمى ليزر الفيزياء الفلكية [1].

2.II. عمل الليزر في الأوساط الفلكية

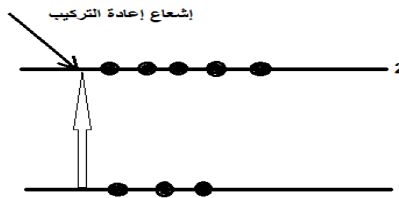
2.II.1. تركيب الليزر الفلكي :

إن تركيب الليزر الفلكي غير تركيب الليزر المخبري فالليزر الفلكي وجد كظاهرة طبيعية دون أي تدخل من الإنسان. رغم هذا فإن الليزر الكوني أو الطبيعي يحتوي على كل الأجزاء الرئيسية لليزر المخبري , فهو يتكون من :

- **المرنان الضوئي (An optiqal resonator)** : فيحالة الليزر الكوني المرنان لا يحتوي على عاكس للضوء (المرآتين) من أجل عملية تضخيم الضوء , يعوض عن ذلك بالطول الكبير للوسط الفعال. حيث أن المسافة التي يقطعها الإشعاع في الفلك كبيرة جدا أي طول الوسط الفعال كبير جدا من رتبة المسافات الفلكية كافية للتضخيم.

- **الوسط المظخم (An active medium)** : وهو عبارة عن بلازما في حالة تمدد و تخضع لعملية الضخ الناتج عن إشعاع إعادة التركيب.

- **مصدر إشعاع الضخ** : عبارة عن بلازما في حالة تمدد و تخضع لعملية تبريد نتيجة هذا التمدد مما يزيد من عدد الفوتونات الناتجة عن إعادة التركيب و تكون أكبر من عدد الفوتونات الممتصة بفعل التأين , و بالتالي ينتج إشعاع في الوسط الفعال , هذا الإشعاع هو المسؤول عن عملية ضخ الوسط الفعال و يسمى إشعاع إعادة التركيب.



الشكل (II-9) الضخ بواسطة إشعاع إعادة التركيب

في حالة التوازن الكهروحراري يكون هناك توازن بين عدد الذرات المتأينة وعدد الذرات الغير متأينة وتعطى بقانون Saha .

2.2.II. معادلة ساهـا (Saha):

- مجال صحة معادلة Saha :

معادلة ساهـا تعطي بدلالة مستوى تأين العنصر $i + 1$ بالنسبة للمستوى i يتطلب أن يكون الغاز في حالة توازن حراري (على الأقل محليا) و الكثافات تكون منخفضة بما فيه الكفاية، بحيث أن متوسط المسافة بين الذرات هو أكبر من حجم هذا المدار المرتبط بالمستوى ذات الطاقة العالية [5].

على سبيل المثال، في حالة ذرة الهيدروجين، نصف قطر بور للمستوى n هو [5]:

$$a_n = (n + 1)^2 \frac{\hbar^2}{m_e e^2} = 5.28 \cdot 10^{-9} (n + 1)^2 \text{ cm} \quad (18-II)$$

وبالتالي فإن كثافة الذرات هي:

$$\rho \sim \frac{m_A}{4/3\pi(2a_0)^3} \sim 0.3 \mu g \text{ cm}^{-3} \quad (19-II)$$

في التطبيق معادلة ساهـا تبدأ من المسافة $\sim 10a_0$ و هو ما يعادل $\sim 2.7 \cdot 10^{-3} g \text{ cm}^{-3}$

- اشتقاق معادلة Saha :

معادلة Saha تم اشتقاقها إنطلاقاً من قانون بولتزمان الذي ينص على نسبة عدد الذرات في المستوى i إلى عدد الذرات في المستوى j و هي [17]:

$$\frac{n_i}{n_j} = \frac{g_i}{g_j} e^{-\Delta E_{ij}/KT} \quad (20-II)$$

حيث g_i و g_j الوزن الإحصائي للمستوى i و j على الترتيب.

ΔE_{ij} : هو الفرق في الطاقة بين المستويين i و j .

نسبة عدد الذرات في المستوى i إلى العدد في جميع المستويات هي كالتالي:

$$\frac{n_i}{n} = \frac{g_i}{g_0 e^{+\Delta E_{i0}/KT} + g_1 e^{+\Delta E_{i1}/KT} + g_2 e^{+\Delta E_{i2}/KT} + \dots} \quad (21-II)$$

حيث لدينا $\Delta E_{ij} = (E_i - E_j)$

و منه

$$\frac{n_i}{n} = \frac{g_i e^{-E_i/KT}}{g_0 + g_1 e^{-E_1/KT} + g_2 e^{-E_2/KT} + \dots}$$

ندخل المتغير u دالة التقسيم للذرات (أو الأيونات)، (fonction de partition)، لأن u متغير بدلالة درجة الحرارة فإنه يكتب في العادة $u(T)$ و نكتب النسبة كما يلي:

$$\frac{n_i}{n_j} = g_i \frac{e^{-E_i/KT}}{u} \quad (22-II)$$

أين E_i هي الفرق في الطاقة بين المستوى i و المستوى الأساسي .

الآن نعمم هذه المعادلة على الإلكترونات في الحالة الحرة و لتكن n_i عدد الذرات فيك المستوى i ، و ليكن المستوى $i + 1$ أين تكون إثارة الإلكترون في إستمرارية عندما تكون كمية الحركة في المجال (P و $P + dp$) فإن طاقة الإلكترون تعطي ب :

$$E_e = \frac{p_e^2}{2m_e} \quad (23 - II)$$

و بالتالي نكتب معادلة بولتزمان كما يلي:

$$\frac{dn_{i+1}}{n_i} = \frac{dg_{i+1}}{u_i} \exp \left(-\frac{E_i + \frac{p_e^2}{2m_e}}{KT} \right) \quad (24 - II)$$

حيث (E_i) : هي الطاقة اللازمة لتأين المستوى الأساسي.

dg_i : الوزن الإحصائي لمستوى التأين.

- و الآن نعتبر أن dg_i يتكون من عنصرين هما:

أحدهما هو الأيون g_{i+1} ، و الثاني هو الإلكترون الحر dg_e .

الأول هو الوزن الإحصائي للمستوى الأساسي للأيون، في حين الثانية يمكن حسابها باستعمال قاعدة الإستثناء (The Exclusion Rule) الحالة المعطاة لكل نوع كوانتومي طور الفضاء قد تتكون من إلكترونين إثنين فقط (Spin up and spin down)

عدد الحالات المنحطة (degenerate states) في الحجم h^3 هو:

$$dg_e = 2 \frac{d^3x d^3P}{h^3} = 2 \frac{dV d^3P}{h^3} = \frac{2}{h^3} dV 4\pi P^2 dP \quad (25 - II)$$

$$\frac{dn_{i+1}}{n_i} = \frac{8\pi P_e^2}{h^3} \frac{g_{i+1}}{u_i(T)} \exp\left(-\frac{E_i + \frac{P_e^2}{2m_e}}{KT}\right) dV dP \quad (26 - II)$$

و لدينا عدد الإلكترونات في الحجم

$$\int dV = \frac{1}{n_e} \quad (27 - II)$$

بالتالي فإن إجمالي عدد الإلكترونات في كل المستويات المستمرة هو:

$$\frac{n_{i+1}}{n_i} = \frac{g_{i+1}}{u_i(T)} \frac{8\pi}{n_e h^3} e^{-E_i/KT} \int_0^\infty P_e^2 \exp\left(-\frac{P_e^2}{2m_e KT}\right) dP \quad (28 - II)$$

إذا وضعنا $x^2 = P_e^2 / 2m_e KT$ نجد

$$\frac{n_{i+1}}{n_i} = \frac{g_{i+1}}{u_i(T)} \frac{8\pi}{n_e h^3} e^{-E_i/KT} \int_0^\infty (2m_e KT) x^2 e^{-x^2} \cdot (2m_e KT)^{1/2} dx$$

$$\frac{n_{i+1}}{n_i} = \frac{g_{i+1}}{u_i(T)} \frac{8\pi}{n_e h^3} e^{-E_i/KT} (2m_e KT)^{3/2} \int_0^\infty x^2 e^{-x^2} dx \quad (29 - II)$$

و لدينا $\int_0^\infty x^2 e^{-x^2} dx = \frac{\sqrt{\pi}}{4}$ منه :

$$\frac{n_{i+1}}{n_i} = \frac{g_{i+1}}{u_i(T)} \frac{8\pi}{n_e h^3} e^{-E_i/KT} (2m_e KT)^{3/2} \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{4}$$

و منه

$$\frac{n_{i+1}}{n_i} = \frac{2}{n_e} \frac{g_{i+1}}{u_i(T)} \frac{(2\pi m_e KT)^{3/2}}{h^3} e^{-E_i/KT} \quad (30 - II)$$

و أخيرا نلاحظ أن العملية الحسابية أعلاه لـ n_{i+1} تصف ذرات الأنواع n_i التي لها إلكترون واحد في المستوى المستمر (the continuum state) أي المتأين ,

و أن n_{i+1} لا تعتبر نفس الذرات المثارة (و بعبارة أخرى n_{i+1} في العبارة (II – 30) تشمل فقط الذرات المتأينة من المستوى الأساسي).

- و من أجل $i+1$ تشمل جميع مستويات الإثارة، علينا أن نلخص مرة أخرى كل المساهمات بنفس الطريقة تماما كما فعلنا في العبارة (II – 22) و هكذا فإن الوزن الإحصائي في العبارة (II – 30) ينبغي أن تحل محله دالة التقسيم فنكتب:

$$\frac{n_{i+1}}{n_i} = \frac{2}{n_e} \frac{u_{i+1}(T)}{u_i(T)} \frac{(2\pi m_e KT)^{3/2}}{h^3} e^{-E_i/KT} \quad (31 - II)$$

و بالإختصار يمكن أيضا كتابتها من الشكل:

$$\frac{n_{i+1}}{n_i} = \frac{2}{n_e} \frac{g_{i+1}}{g_i} \frac{(2\pi m_e KT)^{3/2}}{h^3} e^{-E_i/KT} \quad (32 - II)$$

وهي معادلة Saha التي تربط بين عدد الذرات في المستوى التأين $i + 1$ إلى عدد الذرات في مستوى التأين i أين:

n_{i+1} : كثافة الذرات في مستوى التأين (m^{-3}) $i + 1$

n_i : كثافة الذرات في مستوى التأين i

n_e : كثافة الإلكترون (m^{-3})

$u_{i+1}(T)$: دالة التقسيم لمستوى التأين $i + 1$

$u_i(T)$: دالة التقسيم لمستوى التأين i

m_e : كتلة الإلكترون $(9.11.10^{-31} \text{ kg})$

E_i : طاقة التأين للمستوى i

T : درجة الحرارة.

h : ثابت بلانك $(6.62606.10^{-34} \text{ JS}^{-1})$

K : ثابت بولتزمان ($K = 1.381 \cdot 10^{-16}$)

و من المعتاد أن يعبر عن طاقة التأين بالإلكترون فولط ($1ev = 1.602 \cdot 10^{-12}erg$)، و
تأين العناصر الأكثر وفرة هما الهيدروجين و الهيليوم، فمن المهم لمعادلة الحالة إعطاء
بعض العناصر :

- تأين الهيدروجين: $1: \frac{2g_{i+1}}{g_i} = 13.54 ev$ $E(H)$
- التأين الأول للهليوم: $4: \frac{2g_{i+1}}{g_i} = 24.48 ev$ $E(H_eI)$
- التأين الثاني للهليوم: $1: \frac{2g_{i+1}}{g_i} = 54.17 ev$ $E(H_eII)$

لرسم تغيرات $\frac{n_1}{n_0}$ بدلالة T نستعمل القيم التالية :

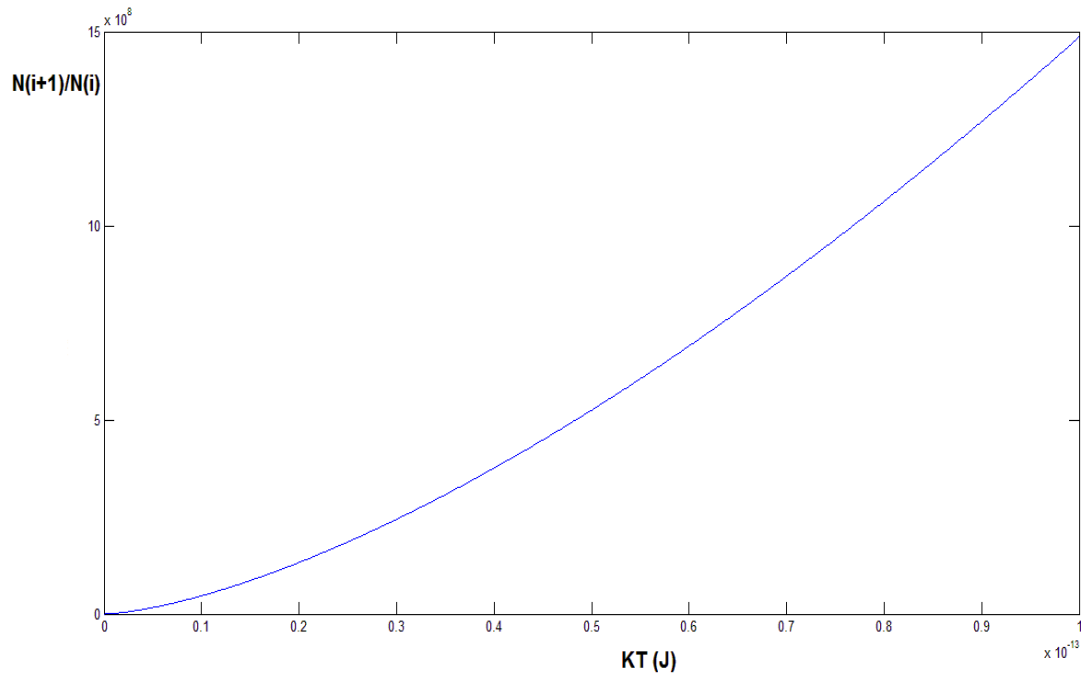
$$m_e = 9.11 \cdot 10^{-31}kg$$

$$h = 6.62606 \cdot 10^{-34}JS^{-1}$$

$$E(H) = 13.54 ev = 21.664 \cdot 10^{-19}J$$

$$\frac{2g_i}{g_0} = 1$$

$$n_e: 5 \cdot 10^{25}m^{-3} \leq n_e \leq 2 \cdot 10^{27}m^{-3}$$



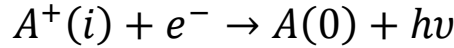
الشكل (II- 10) يمثل منحنى تغيرات النسبة $\frac{n_{i+1}}{n_i}$ بدلالة درجة الحرارة T

من المنحنى البياني نلاحظ أنه كلما زادت درجة الحرارة زادت النسبة $\frac{n_{i+1}}{n_i}$ ، و لكن كلما زادت الكثافة انخفضت النسبة $\frac{n_{i+1}}{n_i}$ نظرا إلى احتمال أكبر لإعادة التركيب.

II.2.3. حساب نسبة الضخ في الليزر الفلكي بدلالة درجة الحرارة:

نعتبر بلازما في حالة تمدد. نعتبر هذا التمدد كظوم ومن أجل التبسيط البلازما تبقى محكومة بقانون توازن ساها-بولتزمان.

التضخيم الإشعاعي مصدره إشعاع إعادة التركيب المتعلق بالانتقال من الحالة المتأينة (i) إلى الحالة الذرية (0):



في الحالة التي تكون هناك درجة حرارة ثابتة يكون هناك توازن بين التأين وإعادة التركيب وبالتالي تمتص كل الفوتونات الناتجة عن إعادة التركيب في عملية التأين. في هذه الحالة لا يكون لدينا في المحصلة إشعاع إعادة التركيب الذي من شأنه أن يلعب دور الضخ الإشعاعي في الليزر الكوني.

إذا أخذنا في عين الاعتبار التبريد الذي تخضع له البلازما نتيجة لتمدها في الفضاء نجد أن نسبة عمليات إعادة التركيب تصبح أكبر من عمليات التأين. وبالتالي ينتج في المحصلة إشعاع إعادة التركيب.

إنطلاقاً من قانون التوازن لساها-بولتزمان (المعادلة II - 32) على اعتبار درجة حرارة البلازما متناقصة في الزمن: $T = T(t)$.

- تتغير درجة الحرارة لبلازما في حالة تمدد بسرعة $C_s = \sqrt{\frac{ZT}{m_i}}$ يمكن حسابها من معادلة فلاسوف في إطار النظرية الحركية للبلازما كما يلي:

$$T(t) = \frac{T_0}{1 + \frac{t^2}{\tau^2}} \quad (II - 33)$$

حيث T_0 هي درجة الحرارة الابتدائية و τ هو الزمن المعياري للتمد.

نسبة المضخة في هذه الحالة يمكن حسابها كما يلي:

$$W_p = \frac{2g_i}{g_0} \left(\frac{m}{2\pi\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{2tT_0}{\tau^2 \left(1 + \frac{t^2}{\tau^2} \right)^2} \frac{\left(\frac{3}{2} T^{\frac{1}{2}} + IT^{-\frac{1}{2}} \right)}{\frac{4g_i}{g_0} \frac{1}{n_e} \left(\frac{mT}{2\pi\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} + \left(\frac{g_i}{g_0} \right)^2 \frac{1}{n_e^2} \left(\frac{mT}{2\pi\hbar^2} \right)^3} e^{-I/T} \quad (II - 34)$$

المنحنى البياني الممثل في الشكل (II - 11) يبين تغيرات نسبة المضخة W_p بدلالة الزمن t حيث لدينا:

$$m_e = 9.11 \cdot 10^{-31} kg$$

$$\hbar = 1.05457 \cdot 10^{-34} Js^{-1}$$

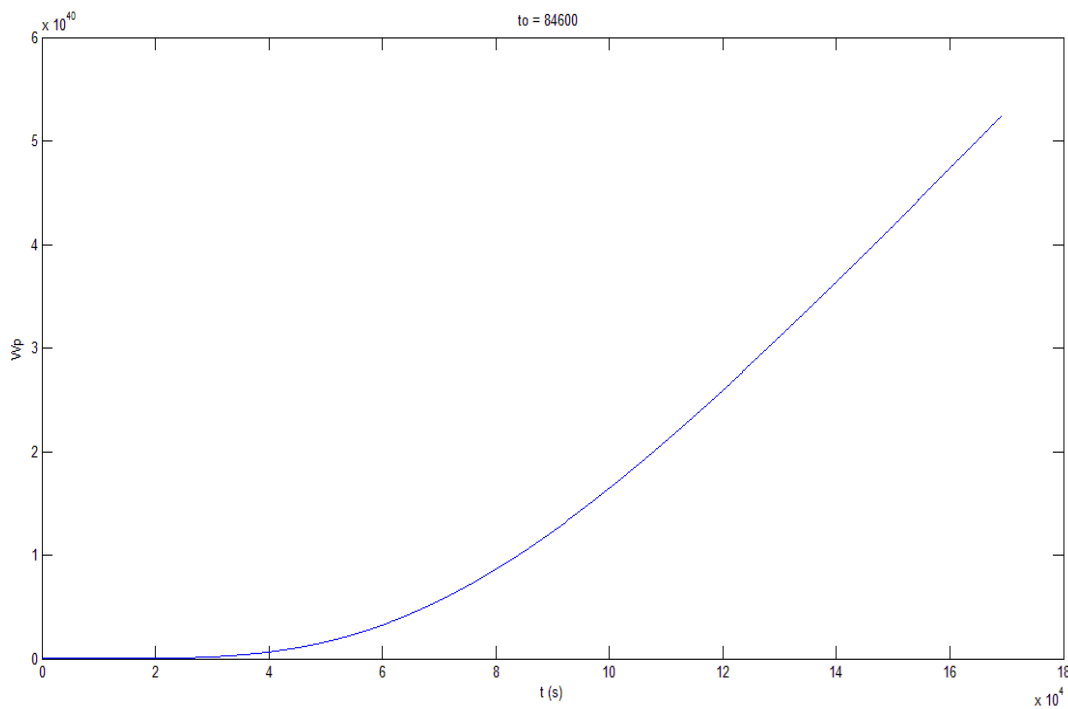
$$T_0 = 1 \text{ ev} = 1.6 \cdot 10^{-19} J$$

$$E(H) = 13.54 \text{ ev} = 21.664 \cdot 10^{-19} J$$

$$\frac{2g_i}{g_0} = 1$$

$$n_e: 5 \cdot 10^{25} m^{-3} \leq n_e \leq 2 \cdot 10^{27} m^{-3}$$

البيان يبين أننسبة المضخة تتناسب طرديا مع الزمن أي أن نسبة المضخة في حالة تزايد مع مرور الزمن



الشكل (11-II) يمثل منحنى تغير أننسبة المضخة W_p بدلالة الزمن t

المنحنى البياني الممثل بالشكل (II-12) يمثل تغيرات درجة الحرارة T بدلالة الزمن t

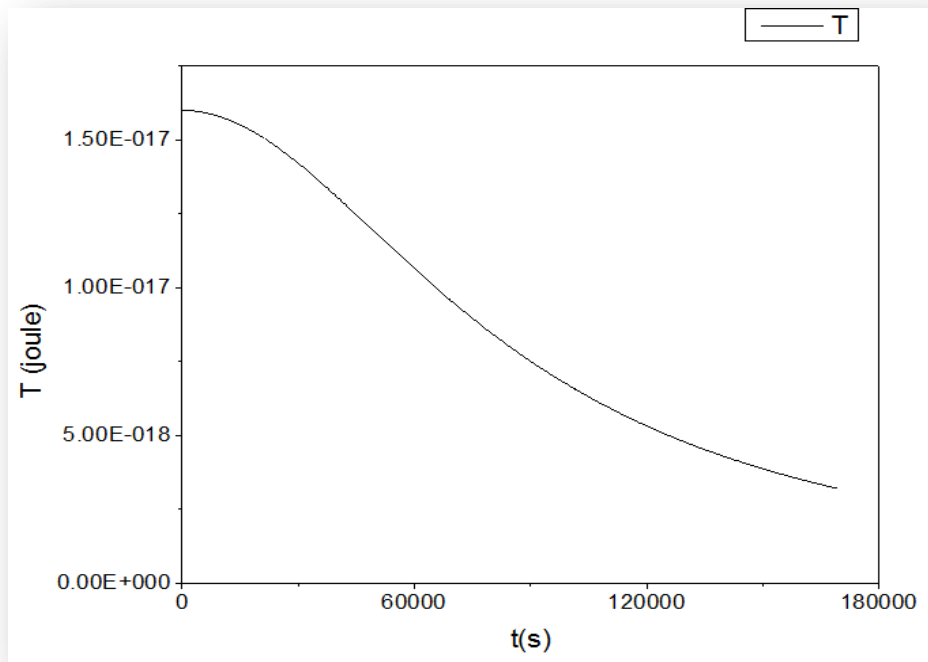
$$T(t) = \frac{T_0}{1 + \frac{t^2}{\tau^2}}$$

بأخذ القيم التالية:

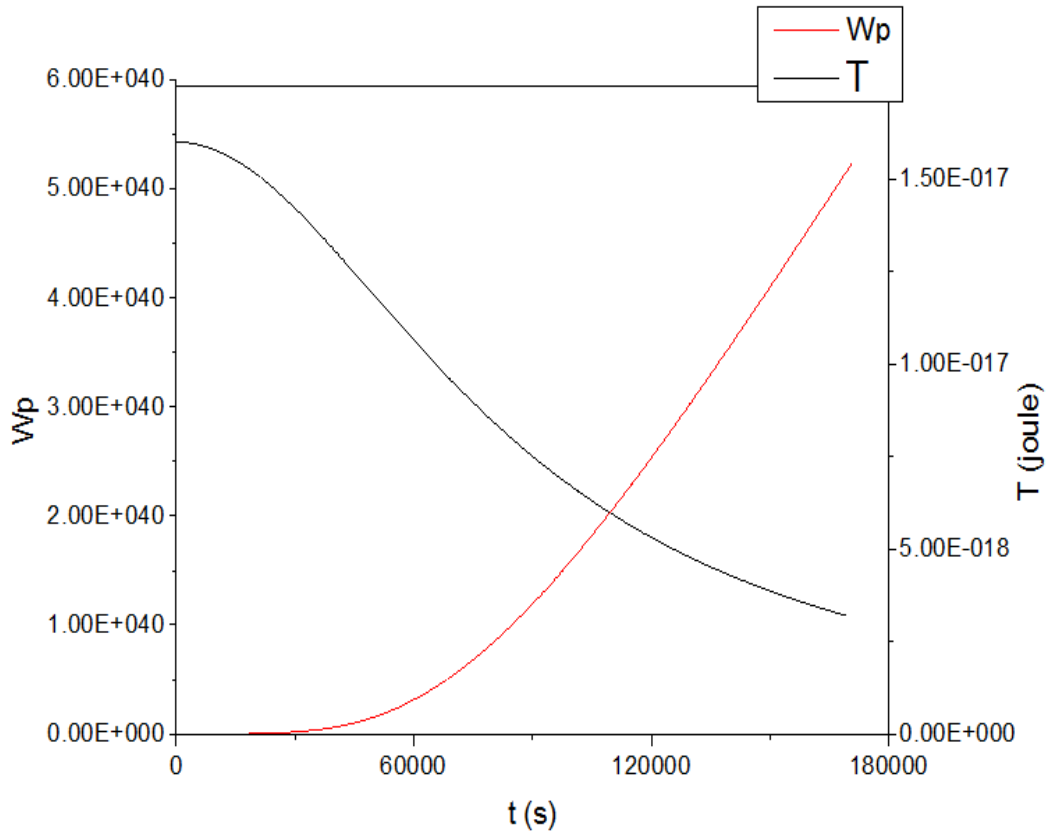
$$\tau = 86400s$$

$$T_0 = 160 \cdot 10^{-19} ev$$

من البيان نجد أن كلما زاد الزمن نقصت درجة الحرارة , أي في حالة تمدد البلازما مع مرور الزمن فإنه تحدث تبريد لهذه البلازما



الشكل (II-12) يمثل منحنى تغيرات درجة الحرارة T بدلالة الزمن t



الشكل (13-II) يمثل منحنيي تغير انتسبة المضخة W_p و درجة الحرارة T بدلالة الزمن t

بمقارنة تغيرات نسبة المضخة W_p مع درجة الحرارة T في الشكل (13- II) نجد أن نسبة المضخة تكون موجبة في حالة درجة الحرارة المتناقصة، أي كلما إبتعدنا عن سطح النجم يكون هناك تناقص في درجة الحرارة مع تمدد البلازما أي يحدث لها تبريد (تناقص في درجة الحرارة) فيكون هناك تزايد في إنطلاق أشعة إعادة التركيب و هي المتسببة في زيادة نسبة المضخة W_p .

II.2.4. نتائج الرصد المتعلقة بالليزر

العمليات الأولية لإثارة الذرات تعمل في كل من المختبر و أشعة الليزر الفلكي، هذه العمليات مفيدة خاصة على مقترحات انعكاس السكان بواسطة التصادمات، هنا نلخص العديد من نتائج الرصد المتحصل عليها أثناء البحث .

II.2.4.1. HeI و HeII في الأغلفة النجمية

كان يستخدم في البحث عن قلب الإسكان في التحولات HeI و HeII حسابات النماذج التالية: إثارة الإلكترون، العودة عن الإثارة، التأين و إعادة التركيب مع الإلكترونات و الاضمحلال الإشعاعي [1].

بالنسبة لسميث Smith سنة (1969) اعتبر أبسط بنية للذرة و قلب الإسكان في الانتقالات المسموحة في المجال الضوئي [1], (الانتقال $4686A^0, n = 4 \rightarrow n = 3$ و $HeII$)

$$HeI \text{ (الانتقال } 4921A^0, 4^1D - 2^1P^0, 6678A^0, 3^1D - 2^1P^0, 7281A^0, 3^1S - 2^1P^0 \text{)}$$

الحسابات أدت إلى أن كثافة قلب الإسكان $10^4 - 10^5 cm^{-3}$ أصغر بكثير بالنسبة لكثافة الهيليوم $10^{13} - 10^{15} cm^{-3}$ و $N(H_e)$ كثافة الإلكترون كبيرة أيضا

$N_0 \approx 10^{14} - 10^{15} cm^{-3}$ في درجة حرارة $10^4 - 10^{16} K$ ، و T_e ، و هو يطابق إلى تضخيم كبير و مع ذلك فإن نطاقات القيم المعلمة لتحقيق مكاسب إيجابية هي ضيقة نسبيا.

اقترح Varshin و زملائه العمل على أن هذه القيم المعلمة قابلة للتحقيق في طبقات سطح نوع من النجوم الأولى و خاصة مع النجوم ذات درجة حرارة عالية مع ارتفاع معدل فقدان الكتلة (Mass-loss) [1].

التوسع السريع في البلازما الفلكية (مثل الغلاف الموسع للنجم وولف رايت Wolf-Rayet) ينبغي أن يؤدي التبريد السريع إلى إعادة التركيب،

إن مراقبة عمل الليزر في هذه الانتقالات ستكون صعبة جدا بسبب ارتفاع شدة الانبعاث التلقائي في الخطوط المسموحة ، فالانبعاث المستحث يمكن ان يسفر بعض التحسينات في الشدة نتيجة للتقارب بين معدل انتقال الانبعاث المستحث و معدل التصادم (الغير اشعاعي

(Non-Radiation) لقلب الإسكان , و هناك تأثير كبير لليزر يمكن أن يكون متوقع في الخطوط الممنوعة أو انتقالات إعادة التركيب بين المستويات الأكثر إثارة في نطاق الأشعة تحت الحمراء البعيدة.

II.2.4.2. السدم :

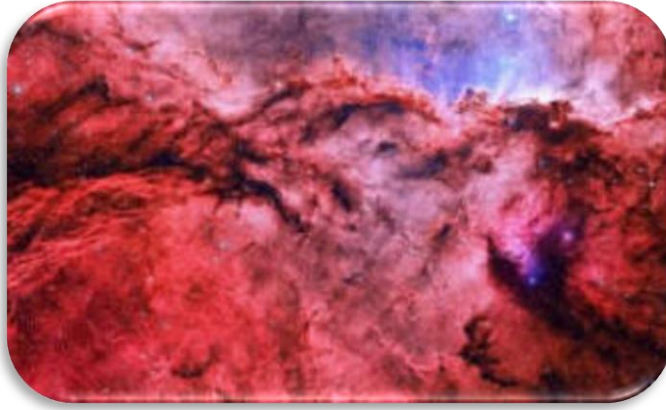
السدم في الغالب منطقة ولادة النجوم، ففي هذه المناطق تتوافر تشكيلات كبيرة من الغاز و الغبار و غيرها من المواد، و التي تتجمع معا لتشكيل كتل أكبر، و التي بدورها تبدأ في جذب المزيد من المادة المنتشرة في السدم، و في النهاية سوف تصبح هائلة بما يكفي لتشكيل نجم أو أكثر، فتتشكل النجوم الضخمة في مركز السدم.

يمكن رأيت هذه السدم نتيجة تأين الغاز المحيط بها بتأثير الأشعة فوق البنفسجية، و الذي يساعد على جعلها مرئية في الموجات الضوئية، و تأخذ النجوم الجديدة في التشكيل و يطلق عليها حينئذ النجوم الشابة أو الناشئة، مكونة تجمع نجمي حر.

- السديم الإشعاعي (الإنبعثي)

هو سديم يلمع ويبعث ضوءه الخاص نتيجة اتحاد الإلكترونات بالبروتونات لتشكيل ذرات الهيدروجين، يحدث ذلك عندما يقترب الإلكترون من البروتون فيحدث تولد للطاقة تظهر على شكل ضوء احمر، وحيث ان هذه العملية تحدث لغالبية الذرات داخل السديم في الوقت نفسه فإنه يظهر باللون الأحمر.

ينشأ هذا السديم نتيجة انبعاث الأشعة فوق البنفسجية من نجم ما ساخن جدا على سحابة من غاز الهيدروجين، وتحدث نتيجة لذلك عملية تأين للذرات (انتزاع الإلكترونات من الذرات)، ومن الممكن أن تبدأ الإلكترونات الحرة بعد ذلك في عملية الاتحاد والاندماج، وغالبا ما تكون تلك السدم هي من بقايا توالد النجوم الضخمة.



تسمى أيضا مناطق بلازما الهيدروجين (HII)، وتعود هذالتمسية إلى أنها مؤلفة في الغالب من بلازما الهيدروجين المؤين والكترونات الحرة، حيث أن ذرات الهيدروجين الموجودة في الوسط بيننجمي تتأين بتأثير الإشعة فوق البنفسجية من نجم أو أكثر يتواجدون في مكان قريب من السديم، وتكون فقط النجوم الحارة جدا من التصنيف النجمي O أو B أو A، وهي النجوم الفتية في العادة، هي التي تتسبب في ذلك حيث أن لها القدرة على إصدار إشعة فوق البنفسجي كافية لتأيين الهيدروجين، أما الطاقة الفائضة بعد تأين الهيدروجين تتحول إلى طاقة حركية للألكترونات، في النهاية وخلال التصادم تصبح الطاقة مشتركة مع جزيئات الغاز الأخرى، ويحدث توازن في السديم عندما تصل درجة حرارة هذه الطاقة الحركية بين 7,000 كيلفن و 20,000 كلفن.

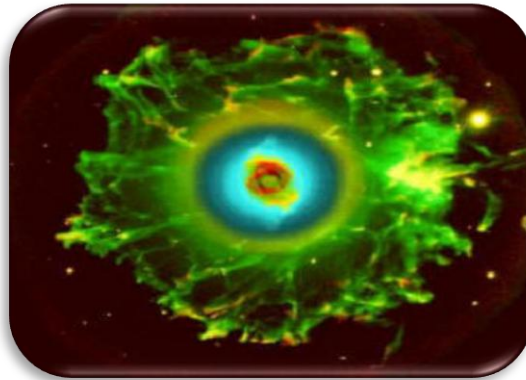
تتراوح كتلة السديم عادة من 100 إلى 10,000 كتلة شمسية، ويمكن أن تنتشر في مساحة أقل من سنة ضوئية واحدة إلى عدة مئات السنين الضوئية. ولهذا السبب تتفاوت كثافتهم إلى حد كبير، فتتراوح من ملايين الذرات لكل سنتيمتر مكعب إلى فقط بضعة ذرات لكل سنتيمتر مكعب اعتمادا على ضغط السديم، وعادة ما تكون الكثافة حوالي ألف ذرة لكل سنتيمتر مكعب، ودرجة حرارتها المتوسطة 10,000 كيلفن تقريبا.

يعتمد لون السديم على تركيبه الكيميائي ودرجه تأينه، الأكثر شيوعا يكون أحمر اللون ويعود سبب ذلك إلى انتشار الهيدروجين بين النجوم، وحيث أن طاقه تأينه منخفضة نسبيا، ولكن إذا توافرت طاقة أكثر وعناصر أخرى ستتأين و إن السديم قد يبدو بألوان أخرى مثل الأخضر

والأزرق , ومعظم سدم هذا النوع يتكون من 90 % من الهيدروجين، والبقية من الهليوم والأكسجين والنيتروجين وعناصر أخرى.

سديم الإشعاع الأكثر شيوعا هو حيث تتواجد سحابة من الغاز بين النجوم يسيطر عليها ذرات الهيدروجين المحايدة وتتأين تلك الذرات من نجم أو أكثر في مكان قريب من نوع O أو B. تبعث تلك النجوم الحارة واللامعة جدا كميات كبيرة من الأشعة فوق البنفسجية الغنية بالطاقة، حيث تقوم الفوتونات بفصل ذرات الهيدروجين المحايدة عن إلكترونها إلى نواة الهيدروجين وتصبح الإلكترونات حرة طليقة، ثم تحدث ثانية عملية إعادة تركيب ذرة الهيدروجين المحايد مرة أخرى، لكنها تكون في حالة إثارة، وبينما تعود ذرة الهيدروجين المحايدة إلى حالتها الأقل طاقة و تصدر فوتونات في أطوال موجة بصرية تقابل طول الموجة الحمراء للطيف المرئي، وهذا الذي يعطي سديم الإشعاع لونه الأحمر المتميز، وهذا واحد من احتمالات تشكل الليزر بين النجوم .

النوع المشترك الآخر لسديم الإشعاع هو السديم الكوكبي , حيث أنه يشمل على قزم أبيض في المركز محاط بغيوم من الغاز نتيجة تطور النجم الأصلي إلى مرحلة القزم الأبيض. في هذه الحالة، الغاز المثار لا يكون بالضرورة هو الهيدروجين المحايد، لكنه يمكن أن يحتوي على كميات كبيرة من الهليوم المؤين (HeII) وبذلك يظهر السديم باللون الأزرق، أو أكسجين مؤين (OIII) وحينها يكون السديم ذو لون أخضر. وحيث أن الطاقة اللازمة لتأين الهليوم أكبر بكثير من الهيدروجين، فإن المناطق الزرقاء في السدم الكوكبية تكون مناطق ساخنة وتشير إلى مناطق غازات ذات إثارة أعلى.



II.2.4.3. النجم Wolf-Rayt:

النجم Wolf-Rayt يظهر بعض الخصائص الطيفية المحددة , و المهم وجود خطوط إنبعث عريضة بشكل رئيسي للهيليوم و أيضا النيتروجين وأحيانا الكربون و الهيدروجين .



بوجود أو غياب أحد الخطوط الطيفية فإن القوة النسبية تسمح بتصنيف النجم -Wolf-Rayt وهناك نوعان رئيسيان من فئات النجم Wolf-Rayt وهما :

النجوم الغنية بالنيتروجين (التصنيف WN), والغنية بالكربون (التصنيف WC) , و بالإضافة إلى ذلك يمكن تصنيف الصنف WN إلى فئتين فرعيتين :

النجوم (WNL (Wolf N Late المتأخرة , والنجوم (WNE (Wolf N Early المبكرة وهذا التصنيف صالح أيضا للنجوم WC لكنه نادر الإستخدام .

يعتمد التصنيف الدقيق على نقاط القوة النسبية (La Force Relative) لخطوط معينة , على النحو المحدد في نظام سميث - شار-ا- موفات (Smith, Shara et Moffat) ويمكن إستخدام هذا التصنيف لمناقشة مسار تطور النجوم , عموما تتم كتابة المسار التطوري للنجم الضخم كما يلي:

→ → → O RSG / JBVWNLWNEWC SN

حيث: O النجم من النوع O

RSG : النجم العملاق الأحمر

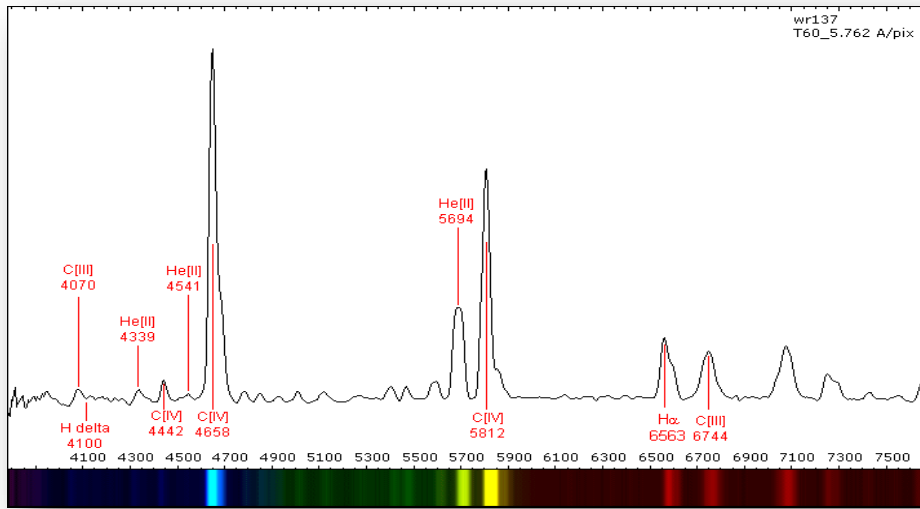
JBV : نجم أزرق مضيئ متغير

SN : تعني السوبرنوبا (Supernova)

كل النجوم لا تمر من خلال جميع المراحل لأنها تعتمد على ثلاث خصائص : الكتلة , سرعة الدوران , المعدن (métallicité)

الرسم البياني الشكل (II-14) هو طيف انبعاث النجم WR , أقوى هذه الانبعاثات تأتي من الخط الأزرق للكربون C[IV] في 4658nm و الانبعاث الثاني من الخط الأصفر وهو أقل في 5812 nm , و خطوط أخرى ضعيفة مثل C[III] في 6744nm و 4070nm .

انبعاث ضوء آخر وهو بسبب وجود الهيليوم وهي خطوط ضعيفة He[II] موجودة في 5694nm , 4541nm , 4339nm .



الشكل (II-14) طيف النجم Wolf-Rayt (WR 137) من النوع الطيف WC 7

II.2.4.4 سديم إيتا كارينا (EtaCarinae)

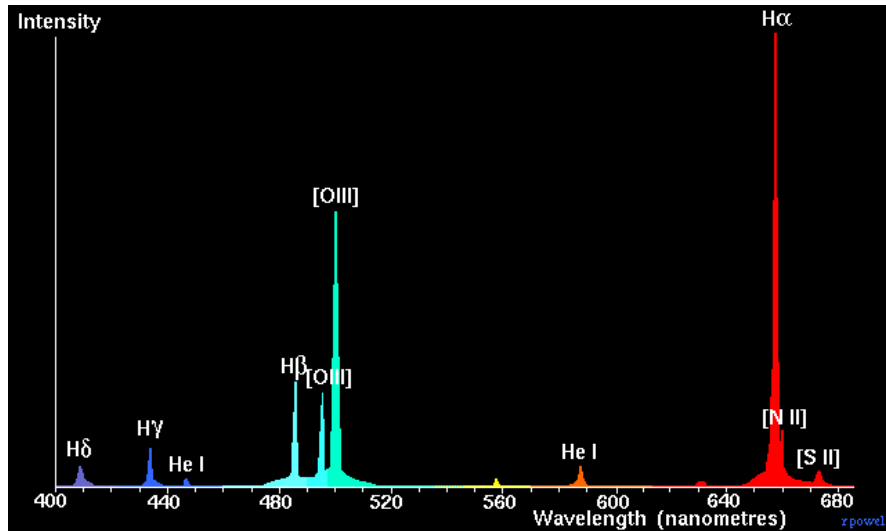
سديم أو سحابة القاعدة أو كارينا هي سحابة كونية عظيمة الإتساع , تحيط عدة تجمعات نجمية مفتوحة و يرمز لها طبقا للفهرس ب NGC 3372 , يبعد عنا بحوالي 9000 سنة ضوئية في ذراع برج القوس من المجرة , على الرغم من أن المسافة كبيرة إلا أن المنطقة الوسطى من هذا السديم هي مشرقة بما فيه الكفاية لرؤيتها بالعين المجردة



أكثر السدم نجدها مشرقة حمراء و السبب لأنها تتكون في معظمها من الهيدروجين , فعندما يضيئ الهيدروجين يبعث منه ضوء أحمر ساطع .

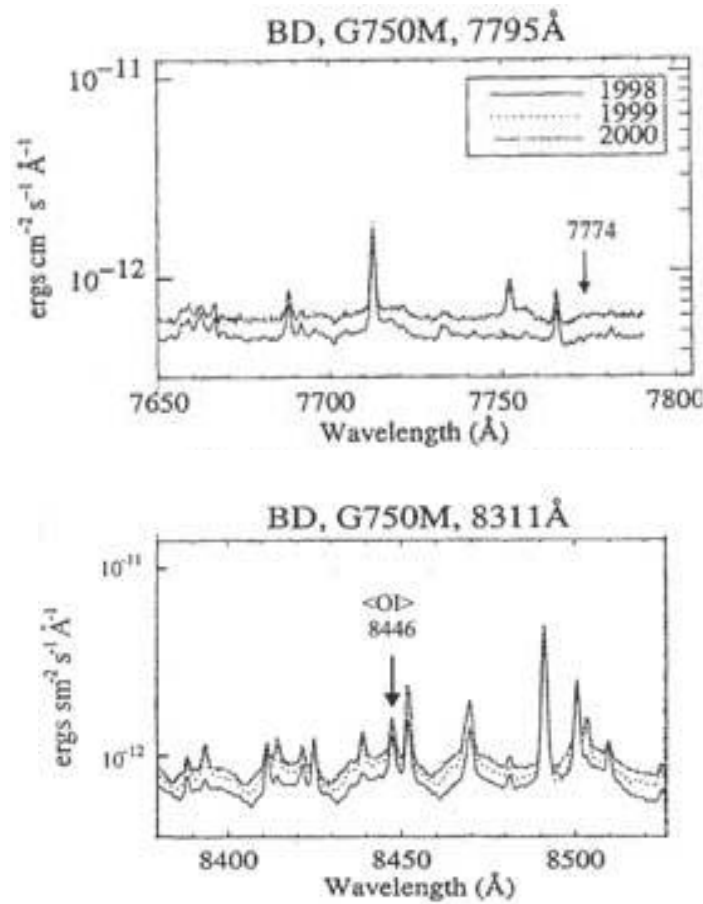
الرسم البياني الشكل (II-15) يدل على شدة الضوء الصادر أو هو الطيف النموذجي لإنبعاث هذا السديم , أقوى هذه الإنبعاثات تأتي من الخط الأحمر للهيدروجين - ألفا ($H\alpha$) في 656nm و أيضا الهيدروجين يبعث ضوء أزرق لكنه أضعف (من 410nm إلى 486nm) .

إنبعاث ضوء آخر مهم و هو بسبب وجود الأكسجين $O[III]$ و هما خطين (501nm و 496nm) , هذا النوع من الضوء غالبا ما يكون هو الأقوى في السدم الكوكبية فيعطيها اللون الأزرق و الأخضر المميز , وهذا واحد من احتمالات تشكل الليزر بين النجوم



الشكل (II-15) طيف إنبعاث السديم Eta Carinae

II.2.5. حساب كثافة البلازما بتحليل خط الليزر النجمي



الشكل (II-16) خطوط الطيف النجمي تحتوي على [O I] 8446

الشكل (II - 16) يبين خطوط الطيف النجمي الملتقطة في ثلاث سنوات متتالية . حيث تم تمثيل خط الطيف الأول لسنة 1998 بخط غليظ , وخط الطيف الثاني لسنة 1999 بخط متقطع , وخط الطيف الثالث لسنة 2000 بخط رفيع .

من ملاحظة هذه الخطوط الثلاثة, نرى أن خط الطيف الأول يكون أعلى من خط الطيف الثاني , وخط الطيف الثالث أقل أو أسفل منهما هذا دلالة على تناقص شدة الإشعاع مع مرور الزمن بسبب نقص الكثافة ومنه نستنتج أنه : كلما زادت البلازما في التمدد و البرودة , نقص عدد الذرات (الكثافة) و بالتالي نقص شدة الإشعاع مع مرور الزمن .

II.2.6. دراسة فعل دوبلر في الليزر النجمي

هو تغيير ظاهري للتردد أو الطول الموجي للأمواج عندما ترصد من قبل مراقب متحرك بالنسبة للمصدر الموجي، يدعى هذا التأثير بتأثير دوبلر نسبة لدوبلر الذي اكتشف هذا التأثير عام 1842[11].

تأثير دوبلر هو طريقة تستخدم في الفيزياء الفلكية من أجل تحديد سرعة النجوم من التحليل الطيفي للضوء الذي تبعثه هذه النجوم , تركز هذه العملية على تطبيقين إثنين متميزين و هما نموذج توسع الكون و الكشف عن النجوم المزدوجة[12].

فقد استخدمها العالم الفلكي الأمريكي هابل عام 1929 في رصد النجوم , و اكتشف أن مجرة أندروميدا تقع خارج مجرتنا، و كانت دهشته كبيرة عندما وجد عن طريق ظاهرة دوبلر أن كل تلك المجرات تبتعد عنا بسرعة عظيمة و في جميع الاتجاهات، ووصل لهذا التفسير عندما وجد أن أطياف تلك المجرات منزاحة بدرجات متفاوتة نحو اللون الأحمر و منه أن الكون في حالة اتساع.

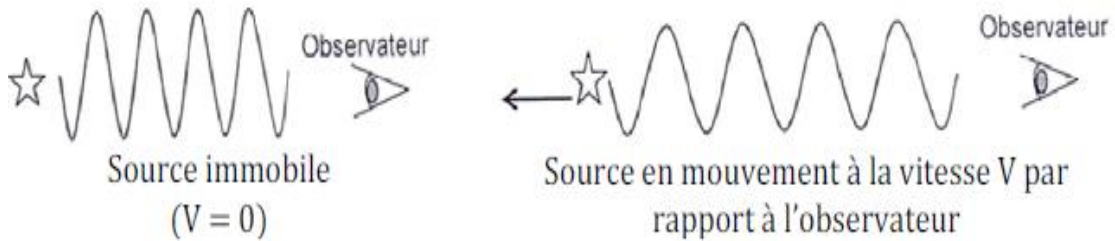
- مبدأ دوبلر:

عند ملاحظة λ_0 الطول الموجي للخط المرجعي من الطيف المدروس (مصدر ثابت بالنسبة للمراقب) و λ الطول الموجي للإشعاع المنبعث من مصدر متحرك عندما يتحرك نجم بعيد

عن الأرض، هناك تحول نحو الأطوال الكبيرة و يسمى بالانزياح نحو الأحمر (Red Shift)

$$Z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$$

و يتميز بالعدد



الشكل (II - 17) مبدأ دوبلر

صيغة دوبلر تعطي سرعة الازاحة V من مصدر الضوء بالنسبة للمراقب على

$$V = c \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} \quad \text{الأرض [12] (II - 35)}$$

C : هي سرعة الضوء في الفراغ ($C = 2.99792 * 10^8 \text{ m.s}^{-1}$)

- الانزياح نحو الأحمر:

في عام 1930 وجد أودين هابل (Edwin Hubble) بالتجربة أن جميع المجرات تبتعد عن الأرض، و أظهر من الطيف أن هناك تحولا كبيرا نحو اللون الأحمر، و يبدو أن التحول أو الانزياح إلى الأحمر يتناسب مع المسافة.

$$Z = \frac{H_0 d}{c} \quad \text{(II - 36)}$$

حيث (H_0): ثابت يدعى بثابت هابل.

لنفرض أن المرسل و المستقبل ينتقل على نفس الخط، هناك ثلاث مراجع قاليبية للدراسة:

- مرجع الوسط الذي تنتشر فيه الموجة، مع c هي سرعة الموجة في الوسط (ليس بالضرورة أن تكون من سرعة الضوء)
- المرجع المرتبط بالمرسل (المصدر): مع (V_{em}) تدعى السرعة الجبرية للإرسال بالنسبة للمرجع.

- المرجع المرتبط بالمستقبل: مع (V_{rec}) تدعى سرعة الاستقبال بالنسبة للمرجع مع الاتفاق أن السرعة تحسب موجبة في اتجاه انتشار الإشارة (من المرسل إلى المستقبل)، و بالتالي السرعة (V_{em}) موجبة و (V_{rec}) سالبة تتوافق تقريبا بين المصدر و المستقبل، في حين أن السرعة (V_{em}) سالبة و (V_{rec}) موجبة تتوافق مع المسافة.

إذا (f_{em}) هو تردد الموجة في مرجع المصدر، ثم يحصل المتلقي (المستقبل) على موجة من التردد (f_{rec})

$$f_{rec} = \frac{c - V_{rec}}{c - V_{em}} \cdot f_{em} = \frac{1 - (V_{rec}/c)}{1 - (V_{em}/c)} \cdot f_{em} \quad (37 - II)$$

لنفرض أن مصدر الإشارة يرسل نبضات بتوتر (f_{em}) و الحركة النسبية بين المرسل و المستقبل عبارة عن حركة على نفس المحور.

عندما يرسل المصدر النبضة الثانية فإن النبضة الأولى تكون قد تحركت بمسافة

$$d_0 = cT_{em} \quad (38 - II)$$

في المعلم (1) لدينا ($T_{em} = \frac{1}{f_{em}}$) و يكون مصدر الإشارة قد تحرك بمسافة ($V_{em} \cdot T_{em}$) خلال الزمن (T_{em})، تصبح المسافة بين النبضتين.

$$d_1 = (c - V_{em}) \cdot T_{em} \quad (39 - II)$$

لنحسب الزمن، (T_{rec}) الذي يفصل بين لحظتي وصول النبضتين إلى المستقبل، هذا الأخير يستقبل النبضة الأولى في بداية المجال الزمني (T_{rec}) و بعد ذلك يتحرك من مكانه الأول بمسافة ($V_{rec} \cdot T_{rec}$) في اللحظة التي يستقبل فيها النبضة الثانية.

خلال المجال الزمني (T_{rec})، النبضة الثانية تكون قد قطعت المسافة

$$d_2 = d_1 + V_{rec}T_{rec} = cT_{rec} \quad (40 - II)$$

و لدينا من المعادلتين:

$$\begin{cases} d_1 + V_{rec}T_{rec} = cT_{rec} \\ d_1 = (c - V_{em})T_{em} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} d_1 = (c - V_{rec})T_{rec} \\ d_1 = (c - V_{em})T_{em} \end{cases}$$

بالمساوات بين (39 - II) و (40 - II) نجد:

$$(c - V_{em})T_{em} = (c - V_{rec})T_{rec} \quad (41 - II)$$

بتعويض $(T_{rec} = \frac{1}{f_{rec}} \text{ و } T_{em} = \frac{1}{f_{em}})$ نجد

$$(c - V_{em})f_{rec} = (c - V_{rec})f_{rec}$$

و منه :

$$f_{rec} = \frac{c - V_{rec}}{c - V_{em}} f_{em} \quad (42 - II)$$

- في حالة المنبع (المصدر) متحرك و المستقبل ثابت ($V_{rec} = 0$) يكون :

$$f_{rec} = \frac{c}{c - V_{em}} f_{em} = \frac{1}{1 - \frac{V_{em}}{c}} f_{em} \quad (43 - II)$$

- و في حالة المنبع ثابت و المستقبل متحرك ($V_{em} = 0$) تكون

$$f_{rec} = \frac{c - V_{rec}}{c} f_{em} = \left(1 - \frac{V_{rec}}{c}\right) f_{em} \quad (44 - II)$$

نلاحظ أن الحالتين غير متناظرتين : حيث إذا كان المستقبل يبتعد عن المرسل بسرعة أكبر من c فإنه لن يستقبل أبدا الإشارة , أما إذا كان المرسل يبتعد عن المستقبل بسرعة أكبر من c فإن المستقبل يستقبل الإشارة.

في الحالة الكلاسيكية لا نستطيع عكس الأدوار بين المرسل و المستقبل، فهناك عدم التناظر في انزياح التردد بين المتلقي و مرسل يتحرك (تلقى تردد يختلف عن الأول من نفس المرسل) , هذا التباين يرجع إلى الوسط الذي تنتشر فيه الموجة و هذا مبرهن عليه في الأمواج الصوتية.

في حالة الأمواج الكهرومغناطيسية في الفراغ سرعة الموجة هي سرعة الضوء, لا تتأثر بسرعة المعلم و لذلك يجب معالجة المسألة في إطار النسبية لنحصل على تناظر بين الحالتين، حيث لا نميز بين سرعة المرسل و سرعة المستقبل، فقط السرعة النسبية بينهما تأخذ بعين الاعتبار.

- حساب النسبية:

قبل إعطاء صيغة تأثير دوبلر النسبية في الحالة العامة، أولاً هذا برهان مبسط لعبارة دوبلر النسبية في حالة جميع الحركات التي تكون على نفس المحور، و على نفس المحور يكون انتشار الإشارة.

مبدأ هذا الحساب هو الأخذ بعين الاعتبار تأثير تمدد الزمن الذي يصحب الانتقال من معلم ثابت إلى معلم متحرك.

نرمز للسرعة بين المرسل و المستقبل ب V و التي تكون موجبة في حالة الابتعاد عن بعضهما، و نتيجة لذلك إذا كان المنبع هو الوحيد الذي يتحرك فإن $V_{em} = -V$ و إذا كان المستقبل هو الوحيد الذي يتحرك فإن $V_{rec} = +V$

أولاً: نعتبر المنبع هو الذي يتحرك، إذا حسبنا بالصيغة الكلاسيكية السابقة تواتر الإشارة عند الاستقبال لما:

$$\begin{cases} V_{em} = -V \\ V_{rec} = 0 \end{cases}$$

هو:

$$f_{rec} = \frac{f_{em}}{1 + \left(\frac{V}{C}\right)} = \frac{f_{em}}{1 + B} \quad (45 - II)$$

حيث: $B = V/C$

الآن إذا أخذنا بعين الاعتبار معامل التمدد الزمني للنسبية:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{V^2}{C^2}\right)}} = (1 - B^2)^{-1/2} \quad (46 - II)$$

الذي يرفع من المجال الزمني المقاس عند المستقبل الثابت و منه فإن التواتر ينقص بالمعامل المقلوب

$$[1 - (V^2/C^2)]^{1/2}$$

و منه يعطينا التواتر (f_{rec}) كما يلي:

$$f_{rec} = \frac{1}{\delta} \frac{f_{em}}{1 + B}$$

$$f_{rec} = \frac{\sqrt{1-B^2}}{1+B} f_{em}$$

$$f_{rec} = \sqrt{\frac{1-B}{1+B}} f_{em} (47 - II)$$

ثانياً: الآن نعتبر المرسل هو الثابت و المستقبل متحرك، باستعمال الصيغة الكلاسيكية نجد:

$$\begin{aligned} V_{em} &= 0 \\ V_{rec} &= +V \end{aligned} \text{لما}$$

$$(48 - II) f_{rec} = (1-B) f_{em} \text{ فإن}$$

بأخذ معامل التمدد الزمني بعين الاعتبار، فإن العبارة التالية

$$f_{em} = \frac{f_{rec}}{(1-B)} \quad (49 - II)$$

هي التي يجب ضربها بالمعامل $[1 - (V^2/C^2)]^{1/2}$ فنصل إلى النتيجة التالية:

$$f_{em} = \frac{\sqrt{1-B^2}}{1-B} f_{rec}$$

$$f_{em} = \sqrt{\frac{1+B}{1-B}} f_{rec} \quad (50 - II)$$

و منه نستنتج f_{rec} :

$$f_{rec} = \sqrt{\frac{1-B}{1+B}} f_{em} \quad (51 - II)$$

و هي نفس العبارة المبرهن عليها في الحالة السابقة، و هذا ما يبين أن مفعول دوبلر متناظر و لا يتأثر بالسرعة النسبية بين المرسل و المستقبل.

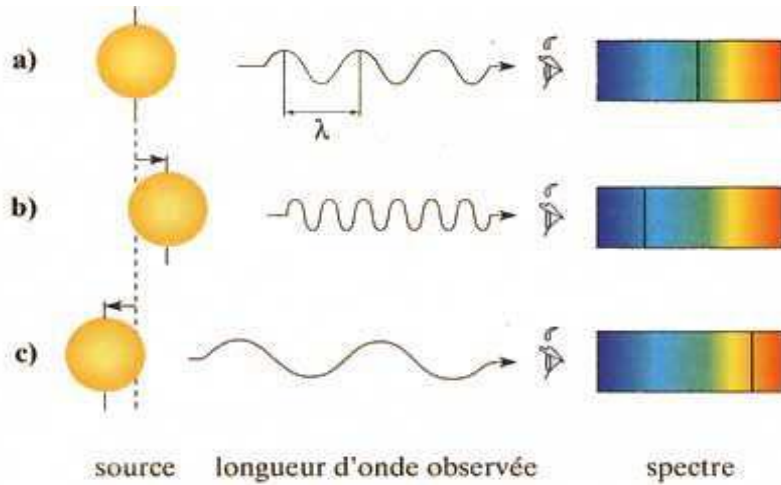
مفعول دوبلر النسبي يمزج بين مفعولين، تأثير الحركة القاليلية الذي يدخل السرعة القطرية بين المرسل و المستقبل و تأثير التمدد الزمني الذي يدخل قيمة السرعة الكلية.

- مجال التطبيق:

تأثير دوبلر يستعمل في المجالات التي يكون مطلوباً فيها سرعة وسط أو جسم متحرك، كما يستعمل في التطبيقات التالية:

- المجال الفلكي:

- تأثير دوبلر له أهمية كبيرة في علم الفلك لأنه يعرفنا على سرعة الأجرام السماوية و سرعة المادة داخل هذه الأجرام.
- تأثير دوبلر يمكننا بشكل مباشر من معرفة السرعة القطرية للنجم، حيث بدراسة الطيف الخاص بالمجسم السماوي نلاحظ أن خطوط الطيف مزاحة من حيث طول الموجة بالنسبة لنفس خطوط الطيف التي تمت ملاحظتها في المختبر.
- إنزياح خطوط الطيف يكون باتجاه اللون الأحمر في حالة أن النجم يبتعد، و يكون الانزياح في اتجاه اللون البنفسجي في حالة أن النجم يقترب.



الشكل (II - 18) إنزياح خطوط الطيف [11]

- قياس سرعة النجوم أو سحب الغاز بين النجوم مكنت من تدقيق حركة المادة داخل درب التبانة، و تحديد الحركة الحلزونية.
- تأثير دوبلر يفسر سبب وجود خطوط طيف ذات عرض في طول الموجة أكبر من الحالة الطبيعية، حيث بسبب التحريض الحراري تتحرك الذرات في جميع

الاتجاهات، حيث جزء منها يتحرك مبتعدا مع ارتفاع في طول الموجة و جزء يتحرك مقتربا مع انخفاض في طول الموجة.

- العرض المميز للموجة λ_0 يقاس بمقدار يسمى عرض دوبلر و هو متناسب طردا مع السرعة المتوسطة للتحرير الحراري.

$$\Delta\lambda_D = \frac{\lambda_0}{C} \sqrt{\frac{2KT}{m}} \quad (52 - II)$$

حيث K: ثابت بولتزمان
m: كتلة الذرات.

إذن عرض خط الطيف هو عبارة عن مقياس لدرجة حرارة النجم، و التحريض الحراري ليس السبب الوحيد لاتساع أو زيادة خط الطيف، بل هناك حركة مضطربة للمادة في جميع الأوساط الفلكية تشارك في زيادة عرض خط الطيف.

الفصل الثالث

إنتاج ليزر في المخبر يعمل بأشعة X
بنفس طريقة الليزر النجمي

III. فيزياء تضخيم ليزر X-UV للبلازما الكثيفة

1.III مقدمة

أول ما ظهر مخطط ضخ الليزر في سنة 1967 في كتاب بعنوان "some Approaches to vacuum UV and X-ray lasers"، بحثاً عن امكانية انشاء عكس الإسكان في حدود طاقة "X-UV" بواسطة التأين الضوئي للذرة المحايدة ليتم انشاء الأيونات , و بواسطة إنعكاس الإسكان من الضرورة توليد عمل الليزر [6].

في هذا المحور، سوف نصف بنية و مبادئ الآليات الفيزيائية المطبقة في انتاج و تطوير البلازما التي تم إنشاؤها بواسطة الليزر لأجل توليد X-UV انطلاقاً من تأيين و إعادة تركيب هدف صلب, و سنتحدث عن الأداة الأساسية لفيزياء البلازما الكثيفة ذات الصلة بدراسة توليد تضخيم الليزر X-UV من هدف صلب و كذلك وصف البلازما التي ينتجها أشعة الليزر لتضخيم X-UV

III. 2. التفاعل ليزر بلازما:

نوع الحقل الكهربائي لموجة شدة الليزر تقارب ($10^8 Wcm^{-2}$) (للعناصر ذات Z متوسطة) الذي يتجاوز حقل إلكترون الذرة . خلال تفاعل حزمة كثيفة من الليزر مع إلكترونات هدف صلب، يتم انتزاعها بأكثر سرعة (في وقت أقل بكثير من النبضة) من خلال إمتصاص عدة فوتونات [6].

أولاً: الإلكترون المقذوف (الإلكترون الحر) يقوم بنقل الطاقة إلى الإلكترونات الأخرى من شبكة الذرات بواسطة التصادمات، الذي يتبعه طرد في المادة، الإلكترونات المقذوفة تتسارع في حقل الليزر و بواسطة التصادمات مع ذرات الوسط تنشئ بلازما ساخنة و كثيفة [6].

ثانياً: توسع البلازما يولد موجة الصدم (ashockwave) التي تنتشر نحو المناطق الداخلية للهدف ثم يتفاعل الليزر مع البلازما التي تتوسع في الاتجاه المعاكس لإنتشار حزمة الليزر [6].

في هذه الديناميكية، البلازما تقدم تدرج في الكثافة و الحرارة الإلكترونية، و يمكن أن نميز مناطق مختلفة من البلازما على طول محور الليزر الحادث .

III-2-1 بنية البلازما المتشكلة بواسطة الليزر:

البلازما يمكنها أن تتحلل في مختلف المناطق، ممددة على طول محور الليزر , كما أنتطورها الفضائي و الزماني يختلف وفق وسط التفاعل، يمكن أن نميز بين أربعة آليات تتحكم في هيدروديناميكا هذه البلازما:

- امتصاص طاقة الليزر المتكونة عن طريق العديد من العمليات المختلفة و لكن غالبا ما تكون خاضعة لامتصاص إشعاع الكبح العكوس (Braking Inverse Radiation).

- نقل الطاقة داخل الهدف.

- توسع الجزء المتآكل من الهدف.

- إرسال و انتقال الإشعاعات.

يمكن بهذا تحديد مناطق البلازما الموافقة لكل عملية , (الشكل III-1) الذي يعطي خصائص البلازما مثل درجة الحرارة و الكثافة الإلكترونية.

- الكثافة الحرجة: (Critics Density)

من أهم العناصر الأساسية في التفاعل بلازما – ليزر هو الكثافة الحرجة , عندما نرسل أشعة الليزر على هدف صلب، الإلكترونات الحرة في البلازما تولد تغيير في انتشار حزمة الليزر في البلازما، و يمكن أن نكتب علاقة تشتت موجة الليزر (Dispersion of the laser wave) في البلازما كما يلي [6]:

$$\frac{K_L^2 c^2}{w_L^2} = 1 - \frac{w_{P,e}^2}{w_L^2} (1 - III)$$

أين K_L : عدد الموجة.

w_L : تواتر الليزر.

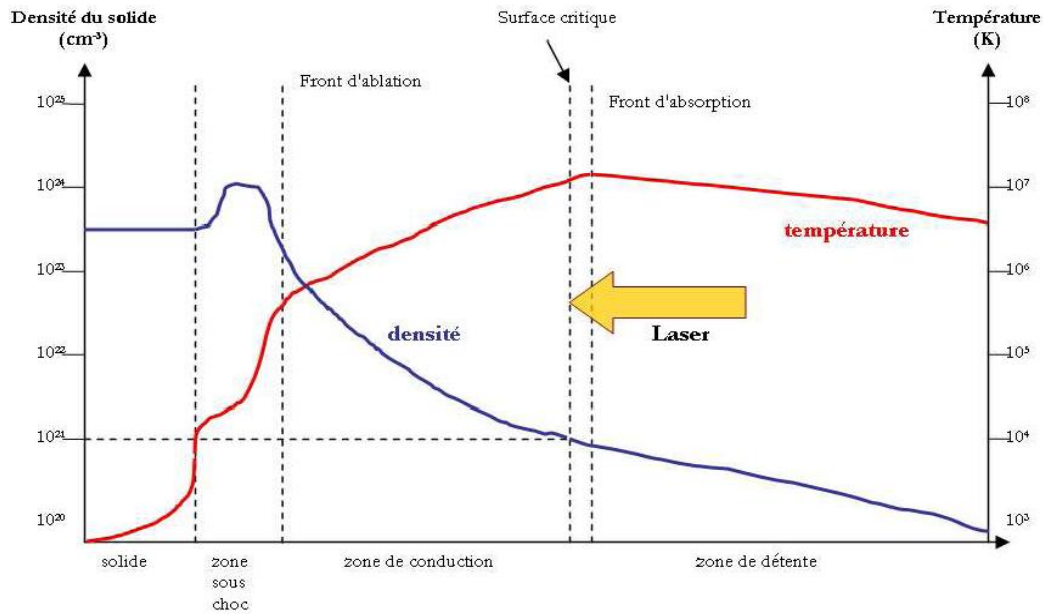
$w_{P,e}$: تواتر البلازما الإلكتروني و يعطى بالعلاقة [17]:

$$w_{P,e} = \sqrt{\frac{n_e e^2}{m_e}} (2 - III)$$

حيث n_e : كثافة الإلكترونات.

m_e : كتلة الإلكترون.

e : الشحنة الإلكترونية.



الشكل (1-III) : بنية بلازما متشكلة من تفاعل الليزر مع هدف صلب،

مظهر التغيرات الفضائية للكثافة و درجة الحرارة في مختلف مناطق البلازما

معطي في نظام تفاعلات النانوثانية (Nanoseconde) و متوسط العدد الذري [6].

يبين الشكل (1-III) أن أشعة الليزر تنتشر في المناطق ذات كثافة عالية، و يصبح شعاع الموجه صغير شيئاً فشيئاً حتى ينعدم من أجل قيمة للكثافة يصبح لدينا ما يلي [6]:

$$w_L = w_{P,e} \quad (3 - III)$$

و لا يمكن لإشعاع الليزر فيما بعد أن ينتشر ، بل إنه ينعكس (موضع الانعكاس يعتمد على زاوية السقوط) هذه الكثافة تدعى الكثافة الحرجة n_c و تعرف بـ [6]:

$$n_c = \frac{m_e w_L^2}{4\pi e^2} \quad (4 - III)$$

من أجل $n_e > n_c$ عدد الأمواج يصبح خياليا .

يمكننا التعبير عن الكثافة الحرجة بدلالة طول موجة إشعاع الليزر الحادث في البلازما [9]:

$$n_c \approx \frac{1,1 \cdot 10^{21}}{\lambda_L^2 [\mu m]} [cm^{-3}] \quad (5 - III)$$

حيث: λ_L طول موجة الليزر و تقاس بالميكرومتر.

على سبيل المثال :من أجل حزمة الليزر Ti:Sa لدينا $\lambda_L = 0.8 \mu m$ فإن الكثافة الحرجة تتساوي إلى $(n_c \approx 1,8 \cdot 10^{21} cm^{-3})$, و من أجل شعاع Nd-laser $\lambda_L = 1.06 \mu m$ فإن الكثافة الحرجة تقارب $(n_c \approx 10^{21} cm^{-3})$.

يترتب على هذا المصطلح n_c أن معامل إنكسار البلازما عند نقطة كثافة الإلكترونات n_e يأخذ القيمة [9]:

$$n = \left(1 - \frac{n_e}{n_c}\right) \quad (5 - III)$$

كل عمليات الامتصاص و الانعكاس تحدث لما $n_e \leq n_c$, يسمى هذا المجال في البلازما بالمنطقة تحت الحرجة "under-Critical" أو تحت الكثيفة "under-dense" [6].

يبين الشكل (1-III) أيضا المناطق الرئيسية في البلازما المنتجة بالليزر، السطح الحرج (critical Surface) من البلازما وهو حد انتشار الليزر، المنطقة تحت الحرجة ($n_e < n_c$) بنية هذه المنطقة ذات أهمية خاصة في توليد ليزر X-UV من هدف صلب , منطقة التوصيل ($n_e > n_c$) (the conduction zone) سمكها يعتمد على شدة الليزر ومدة النبضة، المنطقة

تحت الصدم (the under-choczone) هنا تكون الكثافة كبيرة جدا أو تساوي كثافة المادة الصلبة [9].

تسخين البلازما يعود إلى إلكترونات التوصيل الحراري، و من الممكن أيضا بواسطة الإشعاعات ذات طول موجة قصيرة قادمة من المنطقة دون الحرجة -و تسمى هذه المنطقة أيضا (plasma corona) بلازما الغلاف الخارجي للنجم - هذه المنطقة ليست بعيدة عن السطح الحرج، لها درجة حرارة عالية (من 200ev إلى 1000ev) و يحدث فيها انبعاث أشعة Soft X-ray laser بسبب انعكاس السكان [6].

III-2-2 خصائص بلازما -ليزر :

الهدف هنا تقديم مميزات كثافة و درجة حرارة قبل - البلازما (pre-plasma) في نطاق توليد ليزر X-UV التصادم الإنتقالي , نعرف أيضا مجال قبل - البلازما و حدوث تضخيم أشعة X-UV, توزيع الكثافة و درجة الحرارة لقبل - البلازما قد تم وصفها في الشكل (III-1).

المقادير الهيدروديناميكية الأكثر أهمية لدراسة خصائص قبل - البلازما من اجل تضخيم X-UV هي [6]:

- الكثافة الإلكترونية: $5.10^{19} cm^{-3} \leq n_e \leq 2.10^{21} cm^{-3}$
- طول تدرج الكثافة الإلكترونية: $5\mu m \leq L \leq 300\mu m$: $L = \frac{n_e}{\nabla n_e}$
- درجات الحرارة الأيونية و الإلكترونية.
- درجة تأين قبل - البلازما.

من أجل نظام الضخ يسمى (الانتقالي Transient) يبين أن توليد قبل - البلازما ثابتة المقادير المذكورة سابقا باستثناء درجة الحرارة الإلكترونية الناتجة عن تسخين الإلكترونات بواسطة نبضة ليزر قصيرة [6].

عموما كل الخصائص الهيدروديناميكية للبلازما خلال فترة قصيرة جدا من الضخ بواسطة نبضة قصيرة (تجريبيا بضع بيكو ثانية "Picosecondes") تبقى ثابتة تقريبا.

III-2-3 آلية امتصاص أشعة الليزر في البلازما:

أثناء تفاعل الليزر- بلازما يتم امتصاص طاقة الليزر بواسطة البلازما, و هنا نعين آليات امتصاص طاقة الليزر من أجل شدة نبضة الليزر ($I < 10^{15} \text{ cm}^{-2}$) و مدة النبضة ليست بقصيرة جدا ($\tau > 500 \text{ fs}$).

إن انتقال طاقة نبضة الليزر للسخن تسخن الإلكترونات الحرة من قبل – البلازما و هي أساسا تسخن بواسطة التصادم إلكترون – فوتون في مجال كولوم للأيون، أي بواسطة إشعاع الكبح العكوس (BI), و تسمى أحيانا امتصاص إشعاع الكبح العكوس (Bremsstrahlung inverse) أو الامتصاص التصادمي [6].

عملية إشعاع الكبح الطبيعية هي تباطؤ الإلكترون بواسطة تصادمات كولوم مع الذرة، فينتقل الإلكترون إلى حالة خالية من الطاقة, و يمكن كتابة العملية كما يلي:

$$e^{-}(E) + atom \rightarrow e^{-}(E - \Delta E) + atom + \hbar w$$

حيث $\hbar w = \Delta E$: طاقة إرسال الفوتون

و عملية إشعاع الكبح العكوسة هي:

$$e^{-}(E) + ion + \hbar w \rightarrow e^{-}(E + \Delta E) + ion$$

حيث $\hbar w = \Delta E$: طاقة امتصاص الفوتون.

إذن الإلكترون يتسارع مكتسبا طاقة حركية، هذه الطاقة يتم تحويلها إلى طاقة حرارية عن طريق التصادمات إلكترون – إلكترون و هذا ما يؤدي إلى زيادة في درجة الحرارة.

الإلكترونات الحرة في البلازما تهتز في الحقل الكهرومغناطيسي الليزري و تخضع للتصادمات العشوائية مع الأيونات و بالتالي طاقة تماسك الإهتزاز (*The Coherent oscillation energy*) تحول إلى طاقة حرارية.

يعتمد فقدان الطاقة من حزمة الليزر في البلازما على تردد التصادمات إلكترون - أيون و طاقة إهتزاز الإلكترون في مجال الليزر .

تردد التصادم إلكترون - أيون $v_{e,i}$ يعتمد على الكثافة و درجة الحرارة و حالة تأين البلازما , و نكتب [6]:

$$v_{e,i} \propto \frac{n_e Z}{T_e^{3/2}}$$

معدل التسخين K للبلازما يكون متناسب مع [6]:

$$K \propto \frac{n_e Z}{T_e^{3/2}} \cdot \frac{n_e}{n_c}$$

و يعبر عن طاقة الليزر الممتصة في البلازما كما يلي [13][6]:

$$I_{abs} = I_0 e^{-kr}$$

حيث k : معامل امتصاص أشعة الكبح العكوسة .

r : المسافة التي تقطعها حزمة الليزر في البلازما .

I_0 : شدة الليزر في الفراغ

3.III. انتشار و تضخيم الليزر

بعد أن وصفنا الخصائص الرئيسية للبلازما , سنتطرق لعملية تضخيم أشعة X-UV في نظام

يسمى نظام تضخيم الانبعاث التلقائي في البلازما (ASE : Amplified Spontaneous

Emission)

3.III.1. التضخيم في نظام ASE:

وسط انبعاثات الأشعة ملائم لعملية الانتقال بين مستويين ذريين, حيث إسكان المستوى العلوي

N_2 و إسكان المستوى الأدنى N_1 يمكن وصفهما من قبل قيمتين فيزيائيتين : الانبعاث

(emissivity) و معامل الكسب (The Gain Coefficient).

- الانبعاثية J : هي الكثافة الطيفية للطاقة المشعة و التي ينتجها في وحدة الثانية و في وحدة الحجم من الوسط ، و يعبر عنها بالوحدة $(W.cm^{-3})$ و يكتب على الشكل [6]:

$$J(\nu) = N_2 \cdot h\nu \cdot A_{21}(\nu) \quad (6 - III)$$

حيث h : ثابت بلانك.

ν : التردد أو التواتر.

$A_{21}(\nu)$ معامل أنشتاين و الذي يعبر عن احتمال الانبعاث العفوي أو التلقائي في الفترة الفاصلة بين التردد $(\nu, \nu + d\nu)$ و هو يكتب كنتيجة من الاحتمال الكلي A من الانبعاث التلقائي للانتقال بين مستويين، و الدالة المعدلة $\phi(\nu)$ (normalized function) لشكل الطيف لهذا الانبعاث (spectral profil) تكتب على النحو التالي:

$$A_{21}(\nu) = \phi(\nu)A_{21} \quad (7 - III)$$

مع

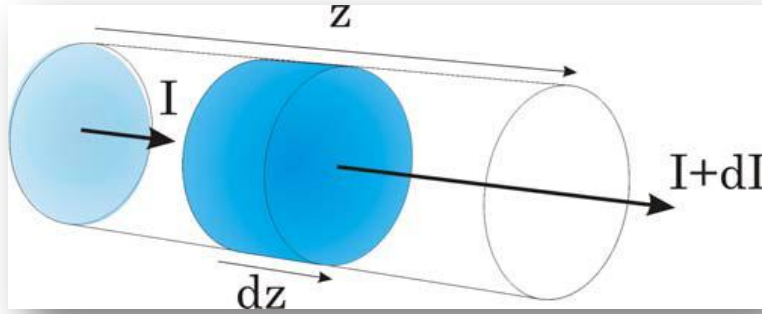
$$\int_0^\infty \phi(\nu) d\nu = 1 \quad (8 - III)$$

- معامل الكسب (*The Gain Coefficient*): عندما يتم انعكاس الإسكان نتحصل على $N_2 > N_1$ ، معامل الربح $G(\nu)$ بدلالة التردد ν يعطى بالعلاقة التالية [6]:

$$G(\nu) = \left(N_2 - \frac{g_2}{g_1} N_1 \right) \frac{C^2}{8\pi\nu_0^2} \cdot A_{21} \cdot \phi(\nu) \quad (9 - III)$$

حيث g_1 و g_2 هي الأوزان الإحصائية للمستويين 1 و 2

التردد ν_0 هو التردد المركزي في شكل خط الطيف.



الشكل (2-III) تأثير بين الانتقال الإشعاعي في عمود البلازما.

الشكل (2-III) يبين مبدأ حساب الانتقال الإشعاعي في حالة عنصر من بلازما متجانسة، و حجمًا سطوانيًّا ثابت (dV) و الطول (dz)، و يعتبر انتشار الإشعاع في اتجاه عمود البلازما مع إهمال آثار انكسار الأشعة في البلازما، و الأخذ في الاعتبار فقط الانتقال بين المستويين 1 و 2، نعبّر عن التغير في الشدة (dI_ν) لأجل عبور عنصر البلازما الطول (dz) من المعادلات (9 - III)، (7 - III)، (6 - III) على النحو التالي [6]:

$$\frac{dI_\nu}{dz} = J(\nu) + G(\nu) \cdot I_\nu \quad (10 - III)$$

ثم من تكامل المعادلة (10 - III) نحصل على الشدة (I_ν) بدلالة التردد المنبعث (ν) من خلال طول عمود البلازما (L)، فليكن

$$I(\nu, L) = \frac{J(\nu)}{G(\nu)} (e^{G(\nu) \cdot L} - 1) = S(\nu) \cdot (e^{G(\nu) \cdot L} - 1) \quad (11 - III)$$

حيث ($S(\nu)$): دالة المصدر (The sourcefunction)

و العبارة (11 - III) تظهر أنه في حالة وجود ربح موجب معناه انعكاس الإسكان، و تضاعف الشدة مع طول البلازما في هذا الوسط المعاملات $J(\nu)$ و (ν) تصف عمليات الامتصاص و الانبعاث في البلازما، و تعتمد على إسكان المستويات الموافق لتردد الانتقالات (ν)، هذه المعاملات تعتمد أيضا على شكل الخط الطيفي ($\phi(\nu)$).

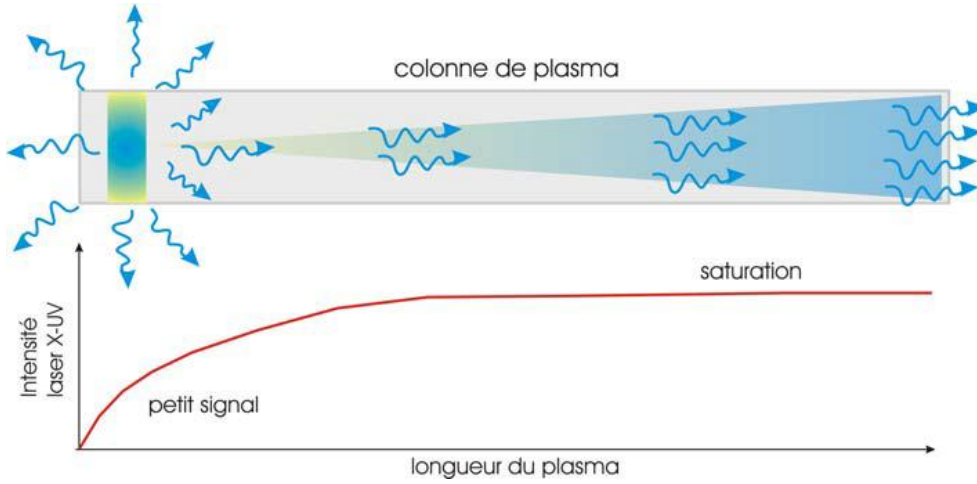
يمكن أن يقترب (ν) من (ν_0) التردد المركزي، و من تعريف الانبعاثية (III - 6) و الربح (III - 9) و باستخدام المساوات التالية:

$$\frac{J(\nu)}{G(\nu)} = \frac{j_0}{g_0} \quad (12 - III)$$

يمكننا كتابة المعادلة (III-11) على الشكل التالي:

$$I(\nu, L) = \frac{j_0}{g_0} (e^{G(\nu) \cdot L} - 1) \quad (13 - III)$$

أين j_0 و g_0 الانبعاثية و الربح لمركز الخط الطيفي على الترتيب



الشكل (III-3) تمثيل تخطيطي لمبدأ التضخيم.

يبين الشكل (III-3) مبدأ التضخيم من الانبعاث العفوي بواسطة الانبعاث المستحث، و يبدأ التضخيم بواسطة الانبعاثات العفوية وفقاً للمحور الطولي (الانتشار)، و يبين المنحنى السفلي تطور شدة شعاع الليزر على طول عمود البلازما.

الخاتمة

الليزر الفلكي هو الكم الإلكتروني (Electronic quantum) الطبيعي من الحجم الأقصى، ويرتكز الليزر الفلكي المكتشف على الضخ الضوئي و يعمل وفقا لمخطط شبيه بالمخطط المقترح الأول في مختبر الليزر منذ 50 عاما من قبل (C. Townes and A. Scawlow) [1] 1958.

نعتقد أن تضخيم الليزر و الانبعاث المحفز للإشعاع هو ظاهرة شائعة و منتشرة خاصة لتكثيف الغاز قرب النجوم اللامعة، بالرغم من ذلك، فإن الكشف عن تأثير الليزر في الفضاء هو أقل وضوحا في المنطقة البصرية من الطيف من تأثير الميزر في منطقة الموجات الدقيقة (microwave regio)، أين يعطى الميزر خطوط إشعاع قوية عالية السطوع لدرجة حرارة إستثنائية ($10^{10} - 10^{15} K$).

في المنطقة البصرية تأثير الليزر يرفع شدة الخطوط الممنوعة الضعيفة إلى شدة الخطوط المسموحة القوية شريطة أن تكون هناك إثارة ضوئية انتقائية من المستويات العليا في الانتقالات الليزرية، هذا يفسر الفرق الشاسع بين معدل الانبعاث التلقائي و آليات انتاج عكس الإسكان في مناطق طول الموجة الضوئية و الموجات الدقيقة (microwave).

أهم صعوبة في اكتشاف تأثير الليزر هو شدة الانبعاث التلقائي الذي يحجب تأثير الانبعاث المستحث، لذلك فإن ملاحظة الانتقالات الممنوعة هي أكثر وسيلة واعدة للكشف عن تأثير الليزر في الفضاء.

إن ملاحظة ضيق بعض الخطوط الطيفية القادمة من المنطقة الليزرية هو أفضل دليل على حدوث الليزر الفلكي، و مع تقدم التلسكوب البصري الكبير لاستقبال تغيرات الليزر تجعل هذه المهمة أكثر واقعية في العقد المقبل.

فكرة استعمال الليزر للإتصالات بين النجوم و بين الكواكب (شوارتر و تاونز Townes and Schwartz 1960) ولدت مباشرة بعد اكتشاف الليزر، فمن الطبيعي جدا لأن الليزر يرسل شعاع متماسك و مباشر، أي أن هذا الشعاع منارة المجرة Galactic، و في الواقع يمكن أن يتم الكشف عن هذه المنارة في المسافات بين النجوم. فإمكانية الكشف عن الإشارات على مسافات حالي 100 سنة ضوئية يمكن اعتباره كأول خطوة، و الكشف على المسافات 100-1000 سنة ضوئية ستكون الخطوة الثانية.

فقد أجريت التجارب الأولى (رينس Reines و آخرون سنة 2002) و التجارب الجديدة سوف يتم تنفيذها مستقبلا.

إن ملاحظة تأثير الليزر في أجواء المريخ و الزهرة للجزيئ CO_2 في طول الموجة $10\mu m$ مشروع يؤدي إلى الليزر الكوكبي للإتصالات بين نجمي (شيروود Sherood و آخرون 1992).

و قد شوهدت أولى المراحل لولادة تكنولوجيا الليزر الفلكي (astrolaser)، و أنه من الصعب جدا التنبؤ بنتائج هذا الاتجاه في المستقبل.

النتائج التي توصلنا إليها في هذه المذكرة :

- قمنا بعرض نتائج الملاحظات الفلكية لليزر الفلكي

- قمنا بحساب نسبة الضخ في الليزر الفلكي باستخدام قانون ساها .

- قمنا بعرض تغير نسبة الضخ بدلالة الزمن و مقارنتها مع درجة الحرارة .

من الممكن عرض أفكار جديدة تتضمن إمكانية تضخيم إشارة الليزر الطبيعي في بعض الأوساط بين نجمية.

قائمة الأشكال و المخططات :

- الشكل (I-1) امتداد يف الليزر.....[5]
- الشكل (I-2) العناصر المكونة لليزر.....[6]
- الشكل (I-3) الامتصاص.....[7]
- الشكل (I-4) الانبعاث التلقائي.....[8]
- الشكل (I-5) الانبعاث المستحث.....[9]
- الشكل (I-6) نظام المستويات الثلاثية.....[11]
- الشكل (I-7) نظام المستويات الرباعية.....[12]
- الشكل (I-8) مخطط مستويات الطاقة لليزر الياقوت.....[16]
- الشكل (I-9) مخطط مستويات الطاقة لليزر النيدميوم-ياك.....[17]
- الشكل (I-10) مخطط ليزر الحالة السائلة.....[18]
- الشكل (I-11) مخطط مستويات الطاقة لليزر الهيليوم – نيون.....[19]
- الشكل (I-12) مخطط مستويات الطاقة لليزر أيون الأركون.....[19]
- الشكل (I-13) مخطط مستويات الطاقة لليزر CO_2[20]
- الشكل (I-14) ألوان مختلف أنواع الليزر.....[22]
- الشكل (I-15) نظام المستويات الثلاثية.....[23]
- الشكل (I-16) نظام المستويات الرباعية.....[24]
- الشكل (II-1) العمليات الأساسية تحت إشعاع الذرة.....[28]
- الشكل (II-2) ارتباط المقطع الفعال للتأين الضوئي للذرة بالتردد.....[28]
- الشكل (II-3) طاقة التأين I للعناصر بدلالة العدد الذري Z.....[29]
- الشكل (II-4) كيف يصدر الضوء من الذرة.....[33]
- الشكل (II-5) عالية المقطع الفعال بوحدة πa_0^2[35]
- الشكل (II-6) عالية المقطع الفعال لتأين ذرة الهيدروجين.....[35]

- الشكل (II-7) توزيع ماكسوال لطاقة الإلكترون في مجموعة الإلكترونات..[36]
- الشكل (II-8) انتقال سكان LTE للمستويات المثارة إلى سكان المستويات المنخفضة-mon [38].....LTE
- الشكل (II-9) الضخ بواسطة إشعاع إعادة التركيب[39]
- الشكل (II-10) يمثل منحنى تغيرات النسبة $\frac{n_{i+1}}{n_i}$ بدلالة درجة الحرارة[45]
- الشكل (II-11) يمثل منحنى تغيراتنسبة المضخة W_p بدلالة الزمن t [47]
- الشكل (II-12) يمثل منحنى تغيراتدرجة الحرارة T بدلالة الزمن t [48]
- الشكل (II-13) يمثل منحنىي تغيراتنسبة المضخة W_p و درجة الحرارة T بدلالة الزمن t [49]
- الشكل (II-14) طيف النجم Wolf-Rayt (WR 137) من النوع الطيف WC 7 [55]
- الشكل (II-15) طيف إنبعاث السديم Eta Carinae [57]
- الشكل (II-16) خطوط الطيف النجمي تحتوي على OI [57]
- الشكل (II-17) مبدأ دوبلر..... [59]
- الشكل (II-18) إنزياح خطوط الطيف [64]
- الشكل (III-1) بنية البلازما التي تم إنشاؤها بواسطة الليزر [69]
- الشكل (III-2) تأشير الانتقال الإشعاعي في عمود البلازما..... [75]
- الشكل (III-3) تمثيل تخطيطي لمبدأ التضخيم..... [76]

المراجع

- [1] Letokhov, V. S. 2002. Astrophysical lasers. *Kvantovaya Elektronika* (Russian) **32**(12), 1065–1079.
- [2] Litvak, M. M. 1969. Infrared pumping of interstellar OH. *Astrophysical Journal* **156**, 471–492.
- [3] Richard J. Saykally ; Mid-IR Laser Action in the H₃ Rydberg Molecule and Some, *California* 94720-1460
- [4] Y. P. Varshni and R. M. Nasser ; LASER Action in stellar envelopes ; (Received 26 March, 1986)
- [5] Saha Equation ; Supplement to Chapter 4 of *Astrophysics Processes (AP)* by Hale Bradt (Camb. U. Press 2008)
- [6] Kevin Cassou , Etudes d'amplificateurs plasma laser à haute cadence dans le domaine X-UV et applications , 14 décembre 2006
- [7] Susan Lea, Plasma Physics , January 2007
- [8] Les Lasers principe et fonctionnement . R. Dandlier
- [9] Coherent Sources of XUV Radiation . H.K.V. Lotsch 2005
- [10] Astrophysical Laser operating in the OI 8446 Å line in the Weigelt blobs of η carinae ; S. Johansson and V.S. Letokhov . 2005
- [11] Effet Doppler – Fizeau en astrophysique
- [12] Caractéristique et propriétés des ondes – Effet Doppler et astrophysique . [https:// www .sciences physiques.info](https://www.sciences physiques.info)
- [13] Les Lasers et leurs application modernes . M. Ahdoub et A. Barhdadi
- [14] أساسيات الليزر و تقنياته , إعداد عدي عطا حمادي , 2004
- [15] دراسة نظرية تفاعل الليزر عالي الشدة مع قناة بلازما موجودة مسبقا , إعداد نايفة سليمان محمد العطوي , سنة 2011
- [16] أساسيات في فيزياء الليزر , أ.م. د. بهاء حسين
- [17] دراسة التحريض الإلكتروني في حالة القيم الصغيرة لوسيط الصدم في البلازما , محمودي منال , 2013
- [18] أساسيات الفيزياء الحديثة , الدكتور غازي ياسين القيسي , 2006

ملخص :

لوحظت خطوط أشعة الليزر في أطيف عدة أجسام فلكية. تم تفسير هذه الأشعة عن طريق تضخيماً لإشعاع بواسطة ضخ مستوى طاقي (المستوى الليزري الأعلى) بإشعاع إعادة التركيب في البلازما الفلكية مما ينتج عنه عكاس في الإسكان بين مستويات الطاقة.

إشعاعات إعادة التركيب المسؤولة عن عملية الضخ الضوئي تنتج في البلازما الفلكية عندما تكون في حالة تمدد في الفضاء ويكون هذا التمدد مصحوب بعملية تبريد للبلازما.

في هذه المذكرة قمنا بحساب نسبة الضخ بواسطة إشعاع إعادة التركيب فسرنا الفعل الليزري في البلازما الفلكية. تم أيضاً تفسير الإنزياح الطيفي في الخطوط المشاهدة وكذا نقصان شدة خطوط الليزر الفلكي مع الزمن.

الكلمات المفتاحية: الليزر ، الوسط النجمي ، أشعة إعادة التركيب.

Abstract

Laserraysare observedin the spectraofseveralstellar objects. Theseraysare interpreted by theamplificationof light in stellar plasma by pumping of upper level by therecombination radiation.Thisrecombinaison radiation is produced in plasma in expansion accompanied by rapid cooling. The recombinaison radiation creates then a population inversion in the plasma ions and consequently an amplification of light.

In this thesis,we have calculated the pumping rate by recombinaison rays. We have presentedan interpretation ofthe laser effectinastrophysicaljetswithinthe fluidplasma theory. We have alsointerpreted thespectralshift(Doppler) observed intheastrophysicallaserslinesand thedecrease in the amplitudeof theastrophysical laserrays.

Keywords: laser, stellarmedium,recombination radiation

Résumé :

Des rays laser sont observés dans les spectres de plusieurs objets stellaires. Ces rays sont interprétés par la création d'une inversion de population sous l'effet de pompage optique dans les niveaux d'énergie des ions dans les plasmas stellaires et par conséquent l'amplification de rayonnement. Le pompage est assuré par le rayonnement de recombinaison produit dans les plasmas stellaires qui subit une détente dans l'espace accompagnée d'un refroidissement.

Dans ce mémoire, nous avons calculé le taux de pompage par le rayonnement de recombinaison. Nous avons présenté une interprétation de l'effet laser dans les jets astrophysique dans le cadre de la théorie fluide des plasmas. Nous avons également interpréter le décalage spectrale (effet Doppler) que subit les lignes lasers astrophysique ainsi que la diminution de l'amplitude de la ray laser astrophysique.

Mots clés : laser, milieu stellaire, rayonnement de recombinaison.