مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية
مجلد الرابع ـ العدد الثاني من ٨٥ الى ١٠٤

شوال ١٤٠١
آب ١٩٨١

المبادئ الأساسية لليزر

الدكتور ابراهيم بلال
كلية العلوم

الليزر هو ضوء مترابط وحيد اللون وقوي الشدة . هذه الصفات تكسب الليزر ميزات اساسية عن الضوء العادي سنبين هذه الميزات من خلال الدراسة التالية .

كما سنبين ان شروط الحصول على ليزر هي :

١ـ جعل الاصدار الحتوت اكبر من الاصدار التلقائي

٢ـ تكوين التوزيع المعاكس .

٣ـ الحصول على امواج مستقرة نتيجة التعادل ما بين الربح الضوئي (المتضخم) والخسارة في الجملة الضوئية .

مقدمة :

سنوضح في هذا المقال المبادئ الاساسية لعمل الليزر ولذا لابد من معرفة المبادئ الاساسية في الميكانيك الكوانتي وبخاصة مبادئ تفاعل المادة والاشعاع . ان الجمل الذرية والجزئية يمكن ان توجد في سويات طاقة منفصلة فقط واي انتقال من سوية طاقة معينة الى سوية اخرى ينتج عنه اما اصدار او امتصاص للفوتونات . ان تواتر موجه الاشعاع الممتص او الصادر تعطي بعلاقة بور

$$E_2 - E_1 = h \frac{\nu_{21}}{2\pi} \qquad (1)$$

حيث E_2 و E_1 هما سويتان منفصلتان للطاقة و ν_{21} هو التواتر و h هي ثابتة بلانك . لذا فان اي موجه كهرطيسية ذات تواتر ν_{21} يمكن ان تتفاعل مع سويتي طاقة الفرق بينهما $E_2 - E_1$. يمكن ان ننظر الى الجمل المادية على انها عدد لامتناهي من الذرات . في حالة التوازن الحراري يكون عدد الذرات في السوية الدنيا (السوية الارضية) اكثر مما هو في السويات العليا (سويات التهيج والتشرد) . ولكن عندما يتفاعل الحقل الكهرطيسي مع المادة فأن عددا في الذرات ينتقل من سوية الطاقة الدنيا الى سويات الطاقة العليا نتيجة الامتصاص .

ان تشغيل الليزر يتطلب تغيير توازن الطاقة للمادة الليزرية بحيث يصبح من الممكن ان تخزن الطاقة في الذرات او الشوارد او الجزيئات . ونحصل على ذلك بواسطة عامل ضخ خارجي يعمل على نقل الالكترونات من سوية الطاقة الدنيا الى سوية الطاقة العليا ويحدث ما يسمى بالتوزع المعاكس . أن الموجه الكهرطيسية ذات التواتر ν_{21} الواردة على الجملة الذرية ذات التوزع المعاكس سوف تضخم لانها تتسبب في هبوط الذرات من السوية العليا الى السوية الدنيا وبالتالي زيادة عدد الفوتونات . نتيجة لذلك فان الطاقة تؤخذ من الجملة الذرية وتعطى للحقل . وهذا يؤدي الى الاصدار المحثوث . لذا فان للاصدار المحثوث اهمية كبرى في الليزر حتى ان اسم الليزر يدخل فيه الأصدار المحثوث (Stimulated emission) فنجد ان الليزر هو كلمة مختصرة تأتي من الجملة التالية .

Light amplification by stimulated emission of Radition .

اي الضوء المضخم بواسطة الأصدار المحثوث للأشعاع .

١ـ تفاعل المادة مع الأشعاع :

ان دراسة الجملة الذرية يمكن ان تسهل فيما اذا اخذنا فكرة بسيطة عن تفاعل المادة مع الاشعاع وبشكل خاص أشعاع الجسم الأسود وتوزع بولتزمان وذلك لمقارنة أشعاع الجسم الأسود مع الاصدار المحثوث .

١- ١- أشعاع الجسم الأسود :

عندما يكون الاشعاع الكهرطيسي ناتج عن تجويف في حالة توازن حراري ودرجة حرارته T فأن توزع كثافة الاشعاع $\rho(\nu)d\nu$ الموجودة ضمن العرض الطيفي $d\nu$ تعطى بقانون بلانك .

$$\rho(\nu)d\nu = \frac{8\pi h\nu^3 d\nu}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{KT}} - 1} \qquad (2)$$

حيث $\rho(\nu)$ هي كثافة الأشعاع في واحدة التواتر و K ثابتة بولتزمان و c سرعة الضوء . نلاحظ من المعادلة (2) ان كثافة الأشعاع الحراري تصبح صفرا عندما يكون $\nu = 0$ او $\nu = \infty$. ان المقدار $P_n = \frac{8\pi\nu^2}{c^3}$ يعطي كثافة النسق للاشعاع في واحدة الحجم وواحدة التواتر . لذلك يمكن ان نقول ان P_n هو مقدار درجة الحرية المتعلقة بحقل الأشعاع في واحدة الحجم واحدة التواتر . ان كثافة النسق P_n له اهمية كبرى في دراسة الأصدار التلقائي (SpontaneousEmission) والأصدار المحثوث . من اجل اشعاع منتظم ومتناحي تكون كثافة اشعاع الجسم الاسود W التي تصدر من فتحة في سطحه تساوي الى $\frac{\rho(\nu)\cdot c}{4}$. واذا رجعنا الى معادلة ستيفان بولتزمان نجد ان

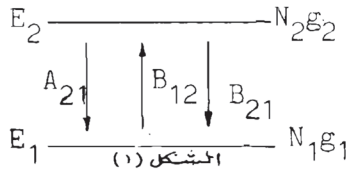
$$W = \sigma T^4 \qquad (3)$$

حيث $\sigma = 5.68\times10^{-12} W/cm^2K^4$ ، ان W تأخذ قيمة عظمى للطول الموجي λ_{max} التي يمكن ان تستنتج من قانون فين حيث $\lambda_{max} = \frac{2898.}{T(K)}$. مثلا من اجل $T = 5200\ ^\circ K$ نجده $\lambda_{max} = 0,556\ mm$ حسب قوانين المكانيك الاحصائي عندما يكون لدينا مجموعة من الذرات المتشابهة في حالة توازن حراري وفي درجة الحرارة T فأن نسبة توزع الذرات في سويتي الطاقة (1) و(2) اللتين لهما عاملي تعددية g_1 و g_2 وعدد ذرات N N وطاقة E_1 و E_2 على التوالي كما هو موضح بالشكل (١) يعطي بالعلاقة .

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{g_2}{g_1} \exp\frac{-(E_2-E_1)}{KT} \qquad (4)$$

نلاحظ من (4) انه من اجل $E_2-E_1 > KT > 0$ فأن $\frac{N_2}{N_1}$ قريبة جدا من الصفر وهذا يعني ان عدد الذرات في السوية العليا

قليل جدا .



الشكل (١)

الشكل (١)

وهذا يعني انه عند درجة حرارة الصفر المطلقة تكون كل الذرات في السوية الارضية . ولكن بأرتفاع درجة الحرارة يرتفع عدد من الذرات نتيجة التهيج والتشرد الى سويات أعلى حتى نصل الى حالة يكون فيها عدد الذرات في السويات العليا أكبر منما هو في السوية الأرضية . اي نحصل على ما نسميه بالتوزع المعاكس وسوف نجد ان هذا احد شروط الحصول على الليزر .

١ـ ٢ـ عوامل أنيشتاين .

لنفترض انه لدينا سويتي طاقة (1) و(2) كما هو موضح بالشكل (١) وان العدد الكلي للذرات N يساوي $N_1 + N_2$. ان الأنتقال الأشعاعي بين سويتي طاقة مختلفتان بالمقدار $E_2 - E_1$ يمكن الذرة ان تنتقل من E_2 الى E_1 وتصدر اشعاعا او ان تنتقل من E_1 الى E_2 وتمتص اشعاعا . هذه الطاقة في الحالتين تظهر على شكل كوانتا طاقتها $h\nu_{21}$. لذا فأنه يمكننا ان نعرف التفاعلات التالية بين المادة والاشعاع في جملة ذرية بسيطة مؤلفة من سويتي طاقة E_1 و E_2 .

أـ الأمتصاص :

عندما تمر موجة كهرطيسية وحيدة اللون وذات تواتر ν_{21} بين جملة ذرية الفرق في الطاقة بين اي سويتين هو $h\nu_{21}$ فان عدد الذرات في السوية الدنيا ينقص بعدل يتناسب مع كثافة الاشعاع $\rho(\nu)$ وعدد الذرات السوية الدنيا N_1 اي ان

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = B_{12}\rho(\nu) N_1 \qquad (5)$$

حيث B_{12} ثابت التناسب . ان الجداء $B_{12}\rho(\nu)$ يمكن ان يفسر على انه الاحتمال في واحدة التواتر بأن انتقالا ما سوف يحدث نتيجة تأثير الحقل .

بـ الأصدار التلقائي :

بعد ان تنتقل الذرة الى السوية العليا بواسطة الامتصاص فأن عددالذرات فيها يتناقص نحو الاسفل بعدل يعطي بالعلاقة

$$\frac{d N_2}{d t} = - A_{21} N_2 \qquad (6)$$

حيث A_{21}هو ثابت التناسب ويسمى عامل الاصدار التلقائي . ان الاصدار التلقائي تابع أحصائي للزمان والمكان ولايوجد اي علاقة تربط طورالذرات المشعة تلقائيا . الكوانتا المشعة هي كوانتاغير مترابطة وهذا مايؤدي الى حدوث ما يسمى بالضجيج الكوانتي . ان الاصدار التلقائي يتعلق بحياة الالكترونات في السوية العليا (سوية التهيج) ويمكن ان يحدث ذلك بدون وجود حقل كهرطيسي وهذا ما نلاحظه من مكاملة المعادلة رقم (6) او ان نجد ان

$$N_2(t) = N_2(o) \exp (t/\tau_{21}) \qquad (7)$$

حيث τ_{21} هي حياة الاشعاع التلقائي للسوية (2) والذي يتناسب عكسامع عامل انيشتاين A_{21} حيث

$$\tau_{21} = A_{21}^{-1} \qquad (8)$$

د ـ الاصدار المحثوث :

في هذه الحالة الذرة تعطي الحقل الاشعاعي اصدارا محثوثا بحسب العلاقة

$$\frac{d N_2}{d t} = -B_{21} \rho(\nu) N_2 \qquad (9)$$

حيث B_{21} ثابت التناسب .

اذا جمعنا الامتصاص والاصدار التلقائي والمحثوث في المعادلات (5)و(6) و(9) نجد ان

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = - \frac{\partial N_2}{\partial t} = B_{21} \rho(\nu) N_2 - B_{21} \rho(\nu) N_1 + A_{21} N_2 \qquad (10)$$

ان المساواة $\frac{\partial N_1}{\partial t} = - \frac{\partial N_2}{\partial t}$ واضحة وذلك لان مجموع N_1 وN_2 يساوي مقدارا ثابتا . في حالة التوازن الحراري يكون عدد الانتقالات في واحدة الزمن من E_1 الى E_2 وبالعكس متساو وبالتالي يكون $\frac{\partial N_1}{\partial t}$ يساوي ويعاكس بالاتجاه $\frac{\partial N_2}{\partial t}$ وكل منهما يساوي الصفر، لذلك بجعل $\frac{\partial N_2}{\partial t}$ تساوي الصفر واستخدام معادلة بولتزمان (المعادلة 4) نجد ان

$$\rho(\nu) = \frac{A_{21} / B_{21}}{(g_1/g_2)(B_{12}/B_{21}) \exp(h\nu/KT) - 1} \qquad (11)$$

وبمقارنة المعادلة (11) بمعادلة اشعاع الجسم الاسود (المعادلة 2)

نجد ان

$$\frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi \nu^2}{c^3} h \nu \qquad B_{21} = \frac{g_1}{g_2} B_{12} \qquad (12)$$

هذه العلاقات تسمى علاقات انيشتاين . نلاحظ انه في حالة

$g_1 = g_2$ يكون $B_{12} = B_{21}$

١ـ ٣ ـ ترابط طور الاشعاع المحثوث :

ان دراسة الاشعاع المحثوث تبين ان آلية تضخيم الذرات للحقل المطبق و كيفية الحصول على اشارة مترابطة بالطور متناسبة مباشرة مع الحقل الكهربائي . لذا يمكننا ان نقول ان التضخيم يحافظ على ترابط الطور . ان البرهان على هذه النظرية يتطلب دراسة تفصيلية كوانتية لتفاعل المادة مع الاشعاع وهذا خارج نطاق هذا البحث .

٢ ـ الامتصاص والربح الضوئي :

سوف ندرس هنا العلاقة بين الامتصاص والتضخيم الضوئي . وهذا يعني انه لابد من ان نقرب الدراسة الرياضية من الحقيقة وذلك بأدخال مفهوم شكل الخط الطيفي الذري .

٢ ـ ١ مشكل الخط الطيفي الذري :

افترضنا في الدراسة السابقة انه لدينا جملة بسيطة مؤلفة من سويتين وان حقلا كهرطيسيا وحيد اللون ذو تواتر ν_{21} يتفاعل معها وان هناك فاصل بين السويتين مقداره $h\nu_{21}$. في هذه الدراسة سوف نفترض انه لدينا انتقال ذو عرض طيفي مقداره $\Delta\nu$ يتفاعل مع حقل عرضه $d\nu$. ولكن قبل ان نتمكن من وضع معادلات الانتقال فأنه من الضروري ان نعرف تابع توزع عرض الخط الطيفي $g(\nu - \nu_{21})$.

ان هذا التوزع المتمركز عند ν_{21} هو الشكل التوازني لعرض تعرف الانتقال الطيفي . لنفترض ان N_2 هو عدد الشوارد في السوية العليا فيكون التوزع الطيفي للشوارد في واحدة التواتر هو

$$N(\nu) = g(\nu - \nu_{21}) \cdot N_2 \qquad (13)$$

اذا كاملنا الطرفين من اجل كل التواترات نحصل على

$$\int N(\nu)\, d\nu = N_2 \int g(\nu - \nu_{21})\, d\nu = N_2 \qquad (14)$$

وهذا ينتج عنه ان التابع $g(\nu, \nu')$ هو تابع منتظم اي ان تكامله يساوي الواحد . اذا عرفنا التابع $g(\nu, \nu')$ يمكننا ان نحسب $N(\nu)d\nu$ في التسوية الاولى والقادرة على الامتصاص في المجال ν الى $\nu+d\nu$. ان عدد الذرات في السوية الثانية والقادرة على الاشعاع في نفس المجال يمكن ان نستنتج من المعادلة (14) فنجد

$$N(\nu)\,d\nu = g(\nu,\nu')\,d\nu \;.\; N_2 \qquad (15)$$

لذا فأن $g(\nu,\nu')$ ماهو الا الاحتمال بأن انتقال ما سوف يصدر او يمتص فوتونا ذو طاقة تتراوح بين ν و $h(\nu+d\nu)$. كما ان الاحتمال بأن انتقال ما يحدث ما بين $o=\nu$ و $\nu=\nu$ يجب ان تساوي الواحد . واضح من تعريف $g(\nu,\nu')$ انه يمكننا كتابة المعادلة (16) بالشكل التالي .

$$\frac{dN_2}{dt} = A_{21}\; N_2 g(\nu,\nu')\,d\nu \qquad (16)$$

حيث N_2 عدد الذرات في السوية (2) و $\frac{dN_2}{dt}$ هو عدد الفوتونات المشعة تلقائيا في الثانية في مجال التواتر ν و $\nu+d\nu$.

ان عرض الخط الطيفي وشكله يتبع العوامل التي تؤدي الى تعريض الخط الطيفي . وهذا التعريض اما ان يكون متجانسا وفي هذه الحالة يكون ناتجا عن زمن الحياة الطبيعي او نتيجة تصادم الذرات مع بعضها او نتيجة الاهتزاز . واما ان يكون التعريض غير متجانس اي يكون ناتج عن مفعول دوبلر . ان ما يميز التعريض المتجانس عن التعريض غير المتجانس هو ان الاول يكون له شكل لورنزي بينما الثاني يكون له شكل غاوسي (انظر الشكل 2).

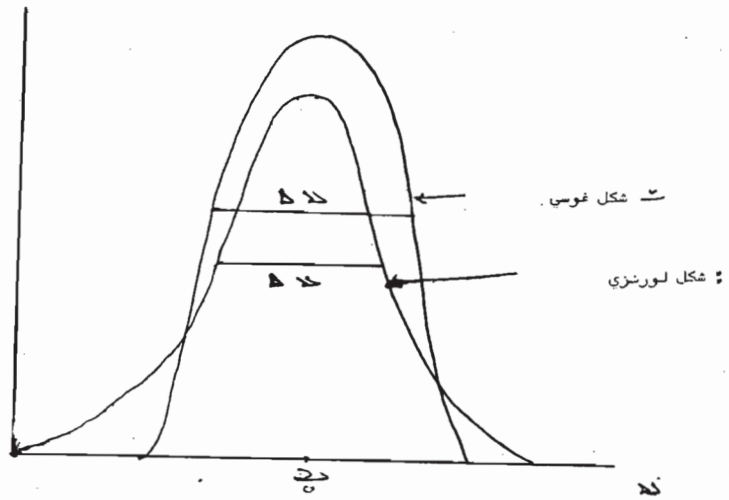
٢ ـ ٢ـ الامتصاص بواسطة الأشعاع المحتوت :

لنفترض أنه لدينا حزمة ضوئية شبه مجمعة ذات كثافة طاقة $\rho(\nu)$ ترد على عينه ممتصه سمكها dx وانه لدينا جملة ضوئية تعمل مابين سويتي طاقة E_1 و E_2 كثافة الذرات فيهما N_1 (السوية الارضية) و N_2 (سوية التهيج) على التوالي . سندرس في هذه الحالة الاصدار والامتصاص ولكن سنهمل الاصدار التلقائي .

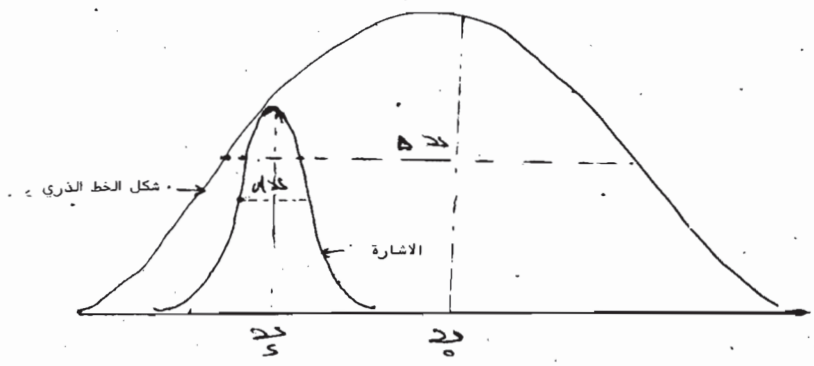
من المعادلتين (10) و (12) يمكن ان نكتب

$$-\frac{dN_1}{dt} = \rho(\nu)\, B_{21}\left(\frac{g_2}{g_1} N_1 - N_2\right) \qquad (17)$$

وهذه المعادلة صحيحة في حال كون سويتي الطاقة ضيقتين (اي لايوجدفيها اي تعرض) والفرق بينهما هو $h\nu_{21}$ وان لدينا ضوء وحيد اللون تواتره ν_{21} يتفاعل مع الجملة الذرية . لنحسب الآن العلاقة التي تربط تفاعل عرضيين طيفيين لهما سويتي طاقة متعرضتين وفرق الطاقة يتمركز حول ν_{21} ونصف عرضه $\Delta\nu$ ويتميز بالتابع $g(\nu-\nu_{21})$. واشارة تتمركزحول ν_{21} وتعرضها $d\nu$ (كما يلاحظ من الشكل 3).



الشكل(٢)



الشكل (3)

ان العرض الطيفي للأشارة ضيق اذا ما قورن مع تعرض العرض الطيفي للأنتقال . في هذه الحالة يكون عدد الذرات الممكن ان تتفاعل مع اشعاع تواتره ν وعرض حزمته $d\nu$ هو

$$(\frac{g_2}{g_1} N_1 - N_2) g(\nu, \nu_0) d\nu \qquad (18)$$

اذا قسمنا طرفي المعادلة (17) على حجم الأناء V وضربناهما بالمقدار $h\nu$ واستبدلنا N_1 و N_2 بكافتيهما n_1 و n_2 تصبح المعادلة (17) على الشكل التالي .

$$-\frac{d}{dt}[\rho(\nu)d\nu] = \rho(\nu) d\nu B_{21} h\nu g(\nu, \nu_0)(\frac{g_2}{g_1} n_1 - n_2) \qquad (19)$$

هذا يعطي مقدار الطاقة الممتصة في المجال $d\nu$ والمتمركزة حول ν . في جملة الليزر الحقيقية يكون الطول الموجي $d\nu$ في المعادلة (19) ذو عرض ضيق جدا اذا ما قورن بعرض الخط الطيفي . لذا فأن عمل الليزر يمكننا ان ننسبه على انه تفاعل عرض الخط المتعرض لسويات الطاقة مع حقل كهرطيسي وحيد اللون . وبذا يمكن تمثيل كثافة الفوتونات لأشعاع وحيد اللون ذا تواتر ν يتابع (ν, ν_0) . بعد مكاملة المعادلة (19) في المجال $d\nu$ نحصل من اجل اشارة وحيدة اللون ذات تواتر ν وانتقال ذو عرض متعرض على مايلي

$$-\frac{d\rho(\nu)}{dt} = \rho(\nu) B_{21} h\nu g(\nu, \nu_0)(\frac{g_2}{g_1} n_1 - n_2) \qquad (20)$$

ان الاشارة سوف تنتشر في مادة سمكها dx خلال زمن قدره $dt = \frac{dx}{c}$. عندما تتقدم الاشارة من السماكة x الى السماكة $x+dx$ فأن طاقة الحزمة تنقص بالمقدار

$$-\frac{d\rho(\nu)}{dx} = h\nu \rho(\nu) g(\nu, \nu_0) B_{21} (\frac{g_1}{g_2} n_1 - n_2) \frac{1}{c} \qquad (21)$$

وبمكاملة المعادلة (21) نحصل على ما يسمى بمعادلة الامتصاص فيكون

$$\rho(\nu) = \rho_0(\nu) \exp[-\alpha(\nu) x] \qquad (22)$$

حيث $\sigma_{21}(\nu) = \frac{h\nu g(\nu, \nu_0) B_{21}}{c}$ و $\alpha(\nu) = (\frac{g_2}{g_1} n_1 - n_2)\sigma_{21}(\nu)$

من اجل $\frac{g_2}{g_1} n_1 > n_2$ فأن الطاقة تتناقص كلما ازدادت x . ويحدث الامتصاص

الاعظمي عندما تكون كل الذرات في السوية الدنيا. من اجل $n_1 = \frac{g_1}{g_2} n_2$ فان الامتصاص يصبح معدوماً وبالتالي فان المادة تكون شفافة .

ان المقدار σ_{21} هو سطح مقطع التصادم من اجل الانتقال الاشعاعي 1 ← 2 وهو يرتبط بسطح مقطع الامتصاص بالعلاقة

$$\frac{\sigma_{21}}{\sigma_{12}} = \frac{g_1}{g_2} \qquad (23)$$

وبعمليات جبرية يمكننا البرهنة على ان . . .

$$\sigma_{21} = \frac{A_{21} \cdot \lambda_0^2}{4\pi n^2 \Delta\nu} \cdot \left(\frac{\ln 2}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (24)$$

حيث n قرينة الانكسار والرموز الاخرى لها دلالتها المعروفة ان المقدار σ_{21} هو مقدار صغير جدا اى من رتبة $10^{-16} - 10^{-20} cm^2$.

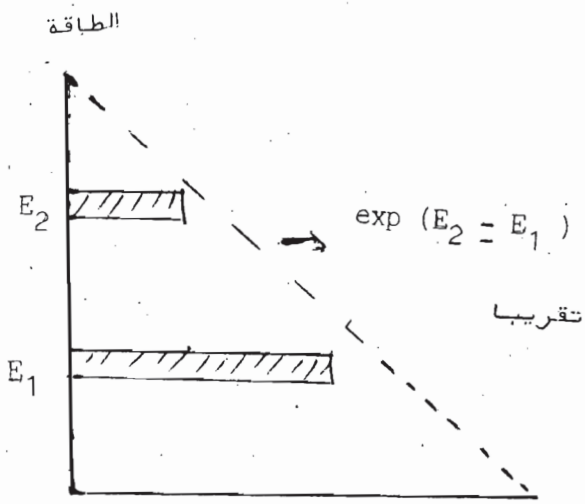
٣- التوزع المعاكس

بحسب توزع بولتزمان في مجموعة من الذرات في حالة توازن حرارى يكون عدد الذرات في السويات العليا قليل (انظر الشكل 4 , 5) لذا فان الفرق ($N_1 - N_2$) يكون دوما موجبا ، اى ان عامل الامتصاص ($\alpha(\nu)$) موجب وبالتالي فان الاشعاع الوارد سوف يمتص . لنفرض الآن اننا نستطيع ان نحصل على عدد كبير من الذرات في السوية العليا اكثر مما هو في السوية الدنيا ، في هذه الحالة يصبح التوزع سالبا وفي نفس الوقت الامتصاص المحثوث يصبح اصدارا محثوثا او تضخيما للاشارة المطبقة . اى ان الاشارة المطبقة تربح طاقة عندما تتفاعل مع المقل اى انها تضخم والطاقة المقدمة للاشارة المطبقة تؤخذ من الذرات المتفاعلة هذا يعني ان عامل الامتصاص ($\alpha(\nu)$) يكون سالبا وبالتالي فانه

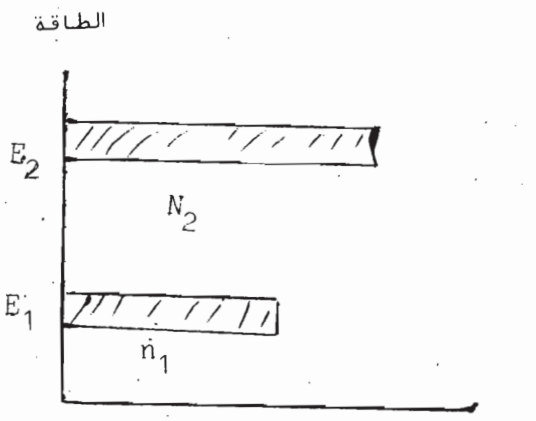
$$d\,\alpha(\nu) / d\nu > 0 \qquad (25)$$

ان الشرط الاساسي من اجل التضخيم هو الحصول على ذرات في السوية

العليـــا اكثر مما هي في السوية الدنيا وذلك من اجل فتـــــرة زمنيـــة محدوده اى ان $N_2 > N_1$ اذا كان $E_2 > E_1$ وهـــذا ما يؤدى الى التوزع المعاكس انظر الشكل (4) .



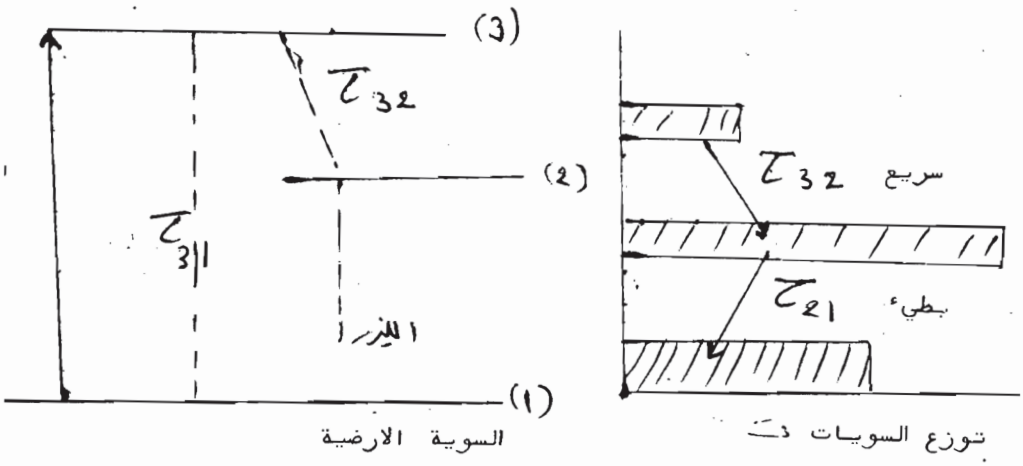
الشكل (٤)



الشكل (٥)

ان التوزع المعاكـــس هو حـالة غير عاديـــة ولايمكـن ملاحظتهـــا في حالـــة التوازن الحراري . في حـال كون توزع السويتين متسـاو نقـــول اننـــا وصلنـــا الى توزع العتبة وكلما ازدادالفرق بين السويتين ΔN ازدادت الطاقة ΔNh المقدمة للحقل ، ولفهم معنى التـــوزع المعاكس ندرس حالة جملة ذرية مكونة من ثلاث سويات واخرى مكونة من اربع سويات . لنجد كيف يمكن دراسة تفاعل المادة مع الاشعاع حيث ان معظم الدراسة السابقة كانت تعتمد على افتراض سويتي طاقة فقط .

٢-١- جملة مكونة من ثلاث سويات للطاقة (مثل ليزر الياقوت):
انظر الشكل (6)



الشكل (6)

في البدء تكون معظم الذرات في السوية الارضية ،ولكن نتيجة الضخ يرتفع عدد كبير من الذرات التي تصبح ذرات - 13 لما متهيجة الى السوية (3) . معظم الذرات في السوية (3) تنتقل بواسطة الاصطدامات الى السوية (2) بسرعة كبيرة وبعدها تنتقل الى السوية الارضية صادرة الليزر . اذا كانت شدة الضخ دون مستوى العتبه فان الذرات في السوية (2) تعود الى السوية الارضية بواسطة الاصدار التلقائي .

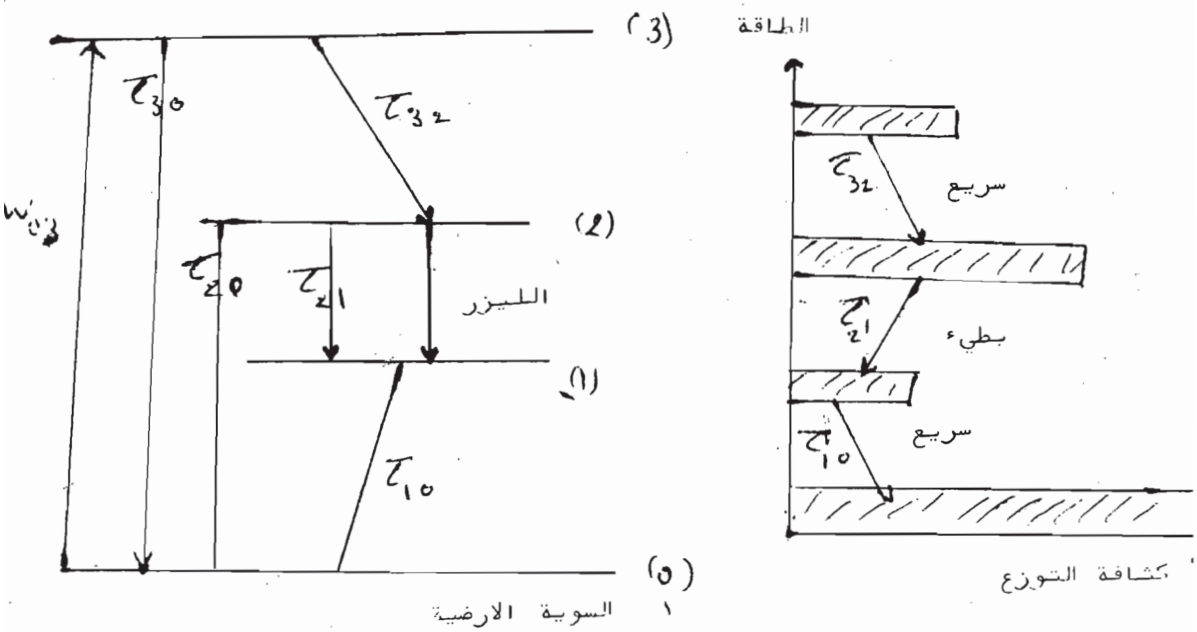
في هذه الحالة من الضروري ان يكون معدل انتقال الاشعاع في السوية العليا الى السوية (2) سريع جدا بالمقارنة مع الانتقال التلقائي . لذا فان زمن حياة الذرة في السوية (2) يجب ان يكون كبير بالمقارنة مع الانتقال $2 \longrightarrow 3$ اى

ان $\tau_{21} \gg \tau_{32}$ اى ان عدد الذرات في السوية

(3)مهمل بالنسبة لعددهافى السويتين(2) و(1)وبذا يكون $N_1 + N_2 = N_{tot}$

وهكذا نرى انه يمكن ان نشبه عمل الجملة ذات الثلاث سويات بجملة ذات سويتين فقط .

٣-٢- الجملة ذات الاربع سويات : مثل ليزر الزجاج: (انظرالشكل (7)



الشكل (7)

في الجملة ذات السويات الثلاث الانتقال الليزرى يحصل بين السوية (2) والسوية (1) (السوية الارضية) وهذا يؤدى الى اعطاء مردود ضعيف ،ويمكن ان نرفع من قيمة المردود بتسريع الضخ من السوية التي يذهب اليها الانتقال الليزرى فاذا استطعنا بطريقة ما ان نزيد عدد ذرات السوية العليا وفي نفس الوقت نقلل من عدد ذرات السوية الدنيا فاننا نخلق توزعا معاكسا سريعا وذا مردود عالي وهذا ما يحدث في الجملة

المكونة من اربع سويات .
يتبين لنا مماسبق ان الحصول على توزع معاكس مهم جدا في الليزر لذا سوف ندرس طرق الحصول على توزع معاكس او ما يسمى بطرق الضخ .

٤- طرق الضخ :

٤-١- الضخ الضوئي :ويكون هذا بان يحاط القضيب الليزرى مثل الياقوت او النديميوم بمصباح ضوئي يشع طاقة عالية تمتص هذه الطاقة من قبل الالكترونات في السوية الدنيا مما يساعد علىانتقالها الى السوية العليا . يستعمل في هذه الحالة عدة انواع من المصابيح مثل مصابيح الوميض (مصابيح زينون او كريبتون او نيون) او المصابيح المستمرة كمصابيح الزئبق والتنغستمين)

في هذا النوع من الضخ من المفيد ان يكون الربط (اى نسبة الطاقة الممتصة من قبل الليزر الى الطاقة الصادرة من مصباح الوميض) ما بين المشع الضوئي والقضيب الليزرى جيدا حتى نحصل على مردود عالي . لذلك يوضع القضيب الليزرى اقرب ما يمكن الى المشع الضوئي او ان تستعمل جملة ضوئية بحيث يكون خيال المصباح يقع على القضيب الليزرى .

٤-٢- استعمال انابيب الانفراغ :اذا كان لدينا غاز في حالة انفراغ اى لدينا بلازما مكونه من عدد من الجسيمات في حالة تفاعل . من الممكن اذا ان يتفاعل الكترون مع ذرة فيسويتها الارضية معطيا اياها طاقة مما ينتج عنه فقدان الالكترون جزء من طاقته وارتفاع الذرة الى سوية اعلى ، لنأخذ مثلا على ذلك اصطدام الكترون مع ذرة الهليوم وفق المعادلة .

$$e + He \longrightarrow e + He^{*} \quad (26)$$

طاقة عالية — طاقة دنيا

اذن يمكننا ان تنقل الالكترونات في سوية دنيا الى سوية عليا بواسطة الاصطدامات ما بين الكترون ذره او شاردة او ذرة متهيجة شرط توفر قيم الطاقة والحرارة والضغط المناسبة . لناخُذ مثلا على ذلك ليزر بخار المعادن حيث ان الطاقة المتبادلة بين ذرة الهليوم في السوية شبه المستقرة او في سوية متشردة وذره بخار المعدن التي نرمز اليها بالحرف X تحسب من العلاقتين التاليتين:

$$\begin{aligned} He\ (2^1, 2^3 5) + X &\longrightarrow He + X^{*+} + e \\ He^+ + X &\longrightarrow He + X^{*+} \end{aligned} \qquad (27)$$

حيث X يمثل Cd او Zn او Hg

فنحصل على ليزر الهليوم ـ كاديـــوم او الهليوم زنك او الهليوم زئبق بالتتالي .

ان التفاعلات السابقة تنتج انتقالات في السويات الالكترونية تؤدى الى انتقالات ليزرية في المجالين البنفسجي والمرئي . عند دراسة الجزئيات هناك انتقالات دورانية وجزئية بالاضافة الى الانتقـــالات الالكترونية . وهذه الانتقالات تنتج عنها اطوالا موجبة في المجـــال ما تحت الاحمر ،ولذا نرى ان اهم انواع ليزر الجزيئات هو ليزر Co_2 الذي طول موجته يساوى 10.6 μm .

٤ـ٣ ـ الضخ الكيميائي : اى ان نستخدم الحرارة الناتجة عن تفاعل كيميائي ما في رفع سرية الذرات من سوية دنيا الى سويـــة عليا . وهذا النوع من الضخ يستعمل في ليزر مركبات الفلور والزينون

٤ـ٤ ـ الضخ بواسطة حزمة من الالكترونات العالية الطاقة والمقذوفة الى غاز مثل ليزر فلور الزيتون

٤ـ٥ ـ الضخ النووى : استخدمت الطاقة الناتجة عن تفجير نووى ـ بسيط في ليزر الالكترونات الحرة وفي ليزر الاشعة السينيـــة واشعة غاما .

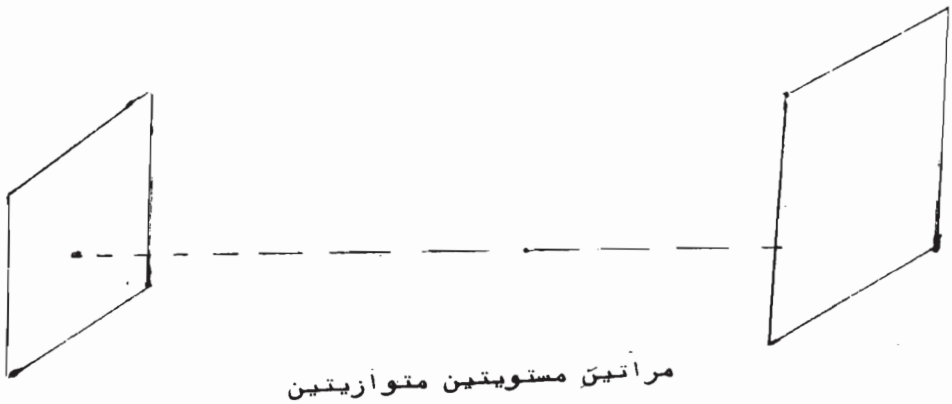
٤-٦ - الضخ الليزري : هناك طريقتان اخرى للضخ وهي تسليط ليزر ما على لارغون او الازوت على خلية مملوءة بصباغ RH 6G و Chromine فتمتص الخلية الصبغية الاشعاع الليزري ثم تصدر اشعاعا ليزريا اخر ذا طول موجي مختلف وهذا ما يسمى بالليزر الصباغي . ويمتاز هذا الليزر عن غيره بقدرته على التوليف اى الحصول على مجموعة من الاطوال الموجية ضمن مجال طيفي معين بدلا من طول موجه واحد .

٥- الجمل الضوئية :

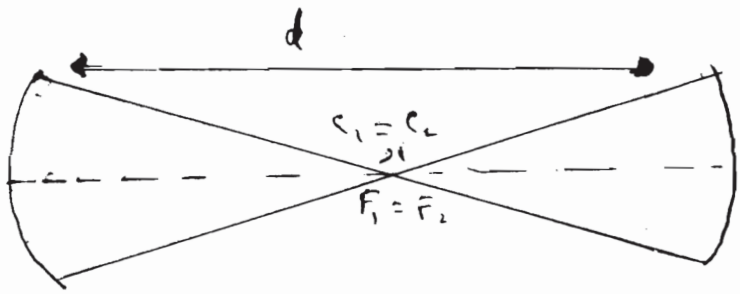
قلنا في الدراسة السابقة ان نتيجة للاصدار المحثوث ينتج فوتونات . هذه الفوتونات لا بد من تضخيمها ضوئيا حتى يحصل الليزر لذا نستخدم ما نسميه الجملة الضوئية . وهي عبارة عن سطحين عاكسين منفصلان عن بعضهما البعض (قد يكونان متوازيان او غير متوازيان) ويحتويان على عناصر عازلة متجانسة ومنتظمة ،الجمل الضوئية المستخدمة في الليزر تشبه الجمل الضوئية المستخدمة في الامواج الميكروية ولكنها تختلف عنها بما يلي :

١) الجمل الضوئية الليزرية مفتوحة اى تستخدم في ظروف المخبر العادية
٢) ان ابعاد المرايا الضوئية المستخدمة اكبر بكثير من طول الموجه .

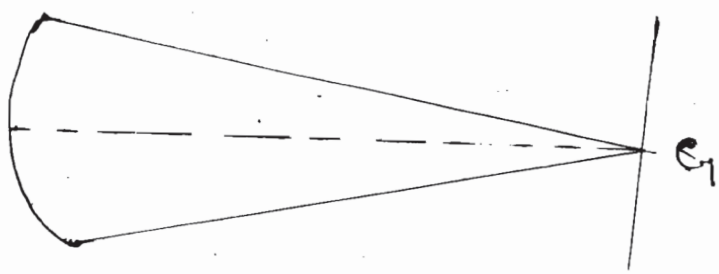
بشكل عام الجملة الضوئية هي عبارة عن مراتين متقابلتين فينعكس الضوء بينهما عدة مرات لكي تكون امواج مستقرة . وهناك انواع مختلفة للجمل الضوئية منها ما هو شكل فابري بيرو (اى سطحين متوازيين) وتسميها بالجملة الضوئية المتوازية المستوية او ان يكون على شكل مراتين مقعرتين لها نفس المركز او نفس المحرق او ان احداهما مستوية والاخرى مقعرة . انظر الشكل (8)



مراتين مستويتين متوازيتين



مراتين لهما نفس المركز او نفس البؤرة



مراتين احدهما مستوية والاخرى مقعرة

الشكل (8)

ان الشيء المهم الذى يجب ان نعرفه عن المرايا هو ان دورها الاساسي ينحصر في تضخيم اهتزاز الاشارة الضوئية بين سطحيها نتيجة الانعكاسات المتتالية . مما ينتج امواج مستقره بالاضافة الى ذلك فان الانعكاسات المتتالية بين سطحي المراتين تؤدى الى جعل الخسارة الناتجة عن الامتصاص على سطحي المراتين والخرج الليزرى متعادل مع الربح الناتج عن التضخيم مما ينتج امواجا مستقرة .

بحسب معالجة فوكس ولي الامواج المستقرة تحوى نسق ذات اهتزازات طولانية باتجاه المحور تعطي بالعلاقة .

$$= \frac{mc}{2L} \qquad 28$$

حيث m عدد صحيح . واهتزازات عرضانية تسمى بالنسق TEM . هناك طرق عدة لتقليل عدد هذه المنسق والحصول على النسق المحورى TEM . كما انه من الممكن الحد من عدد النسق المحورية .

لا اود ان ادخل في تفاصيل الجمل الضوئية اكثر من هذا لان الغوص فيها يتطلب دراسة توزع الحقل الكهرطيسي دراسة رياضية لسنا بحاجة لها هنا .

٦- عمل الليزر وخواصه :

بعد الدرلسة السابقة نستطيع ان نصف بشكل موجز عمل الليزر كما يلي : نتيجة حدوث التوزع المعاكس وبوجودالفوتونات نحصل على الاصدار المحثوث . هذا الاصدار يهتز بين المراتين حتى تتكون امواج مستقرة . ولكن الجملة الضوئية لا تسمح الا لعدد محدود من النسق بالاهتزاز وبالتالي الحصول على الليزر . يخرج عادة من الليزر الموجود داخل المراتين جزء بسيط لا يتجاوز ١٥ % من المفيد ان نذكر ان هناك بعض الليزرات التي تعمل بشكل نبضي

يدوم لبضعة اجزاء من الثانية وبعضها يعمل بشكل مستمر ،وهذا يتوقف على زمن حياة الذره في السويات العليا . ان الليزرات التي تعمل بشكل نبضي لا تحتاج الى جملة ضوئية غالبا ذلك لان زمن حياة الفوتونات صغير لا يتعدى الميكروثانية مما لا يسمح للفوتونات بالانتشار مسافة تساوى المسافة الفاصلة بين المرآتين ،ونسمي هذه الليزرات بالليزرات المنتهية ذاتيا .

يهمنا من الليزر بشكل عام صفاته اى الاتجاهية والشده وعرض الخط الطيفي او بشكل اخر خواصه الترابطية .فالضوء الليزرى يختلف اختلافا كليا عن الضوء العادى اذ ان الليزر موجه لمسافات طويلة كما ان استطاعته قد تصل الى 10^{12} W ونقاوه الطيفي اى $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 10^{-15}$ وعرض نبضته يتراوح ما بين 10^{-12} - 10^{-6} s وهو ضوء وحيد اللون وذو انفراج اى حزمه صغير مما يعطيه كثافة طاقة هائلة . هذه الصفات تعطي لليزر اهمية كبرى في الكثير من التطبيقات .

٧- نظريات الليزر :

هناك ثلاث نظريات لليزر ودراسة هذه النظريات تتطلب معرفة جيدة بالفيزياء الكوانتية ،لذا فسوف نكتفي بذكر النظريات دون التطرق الى تفاصيلها .

٧-١- النظرية الشبه كلاسيكية :فيفرض في هذا الحالة ان - الجملة الليزرية هي جملة كوانتية بينما الحقل لكهرطيس هو حقل كلاسيكي . وتدرس في هذه الحالة معادلات تفاعل المادة مع الاشعاع . فائدة هذه النظرية انها تعرف العلاقات التي تعبر عن عناصر الليزر الهامة مثل الترابط والتخامد ولكنها لا تصف الاصدار التلقائي .

٣٤ـ نظرية معادلات النسبة : اى دراسة الدخل والخرج لكل سوية طاقة على حده . والافتراض انه في حالة العتبة يكون الدخل مساويا للخرج ،وكمثال لذلك ما وجدناه عندما درسنا جملتين من ثلاث واربع سويات للطاقة .

٣٧ـ النظرية الكوانتية : في هذه الحالة يكون كلا من الحقل الكهرطيسي والمادة في الحالة الكوانتية . وفي هذه الحالة نحصل على تفسير فيزيائي جيد لكل المفاهيم السابقة .

ـ المراجع :

1- TRIEST CONFERONCE 1973,ATOMS MOLECULES AND LASERS INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY , VIENNA 1974

2- SVELTO.O.TRANS LATED BY D.C.HANA. PRINCIPLES OF LASER. HEYDEN.LONDON.1976

3- KOECHNER .W.SOLID STATE LASER ENGINEERING. SPRINGER VERLAG.NEW YORK.1976

4-ROSS .D.LASERS LIGHT AMPLIFIERSAND OSCILLATORS AP.LONDON.1969.

5- BELAL.I.K.PH.D.THESIS

6- BARNERS.F.S.LASER THEORY.IEEE PRESS.1972.