الفصل الرابع:تفاعل الاشعاع مع المادة

٤-١) مقدمة Introduction

بنيت فكرة الليزر النظرية على مفاهيم تتعلق بصفات الاشعاع الكهرومغناطيسي وبصفاته المميزة لنتاج الليزر وعلى هذا الاساس لا بد من معرفة الاساس النظري لفهم الليزر من خلال تفاعل الاشعاع الكهرومغناطيسي وكيفية تعامله مع الذرات والجزئيات كالامتصاص والانبعاث. لقد صاغ العالم بلانك نظرية التوزيع الطيفي للإشعاع الحراري، ثم قام أينشتاين بجمع نظرية بلانك مع احصاءات بولتزمان للوصول الى نظرية الانبعاث المحفز التي تعد المبدأ الاساس لليزر.

٤-٢) اشعاع الجسم الاسود Blackbody Radiation

الجسم الأسود هو جسم وهمي مثالي يحقق ثلاث شروط وهي انه يمتص كل الإشعاع الكهرومغناطيسي الساقط عليه، ويشع إشعاع حراري يتناسب مع حرارته على كامل الأطوال الموجية، والإشعاع الصادر عنه يكون بشكل موحد الخواص (متساوي في كل الاتجاهات).

اذا فرضنا بأن هناك تجويفاً مملوءً بوسط عازل متجانس، وان جدران هذا التجويف قد حفظ بدرجة حرارة T فأن هذه الجدران تبعث اشعاع كهرومغناطيسي باستمرار كما انها تمتص ايضا ما يسقط عليها من الاشعاع، وعندما يصبح معدل الامتصاص والانبعاث متساوي يقال بأن شرط التوازن قد تحقق عند اي موضع داخل التجويف ويطلق على اشعاع هذا التجويف بـ (اشعاع الجسم الاسود). يمكن وصف الاشعاع لحالة التوازن هذه بكثافة طاقته ρ (وهي مقدار الطاقة الموجودة في وحدة الحجم) من التجويف، وبما ان هذه الطاقة هي نوع من الاشعاع الكهرومغناطيسي لهذا يمكن التعبير عنها بدلالة المجال الكهربائي E(t) والمجال المغناطيسي H(t) حسب العلاقة:

$$\rho = \frac{1}{2}\varepsilon E^2(t) + \frac{1}{2}\mu H^2(t) \quad \text{.....(4-1)}$$

حيث ان ε و μ هي كل من السماحية الكهربائية والنفوذية المغناطيسية للوسط الذي يملأ التجويف على التوالي.

ان الفيزياء التقليدية (الكلاسيكية) قد فشلت في تفسير النتائج التجريبية لنظرية الانبعاث اشعاع الجسم الاسود عند الاطوال الموجية القصيرة على اختلاف درجات الحرارة، حيث أُعتبر الإشعاع كموجات تشكل نمط موجة واقفة في التجويف مع عقد عند الجدران، والصيغة الكلاسيكية لكثافة طاقة الاشعاع تسمى بقانون رايلي – جينز (Rayleigh-Jeans):

$$\rho(\upsilon) = \frac{8\pi KT}{c^3}\upsilon^2 \quad \text{.....(4-2)}$$

اقترح العالم بلانك بأن الذرات تتذبذب بتردد معين، واثبت ايضاً أن كل ذرة يمكنها ان تمتص او تبعث طاقة كأشعة تتناسب مع ترددها υ فقط بثابت تناسب سمي بـ (ثابت بلانك h) وفق المعادلة الآتية:

$$E = nh\upsilon \quad \text{.....(4-3)}$$

وهكذا عندما يمتص المتذبذب او يبعث طاقة كهرومغناطيسية فإنها تزداد او تقل بمقدار hυ و 2hυ و 3hυ بشكل كمات.
تعطى كثافة الطاقة لبلانك (الصيغة الكمية) بالمعادلة الآتية:

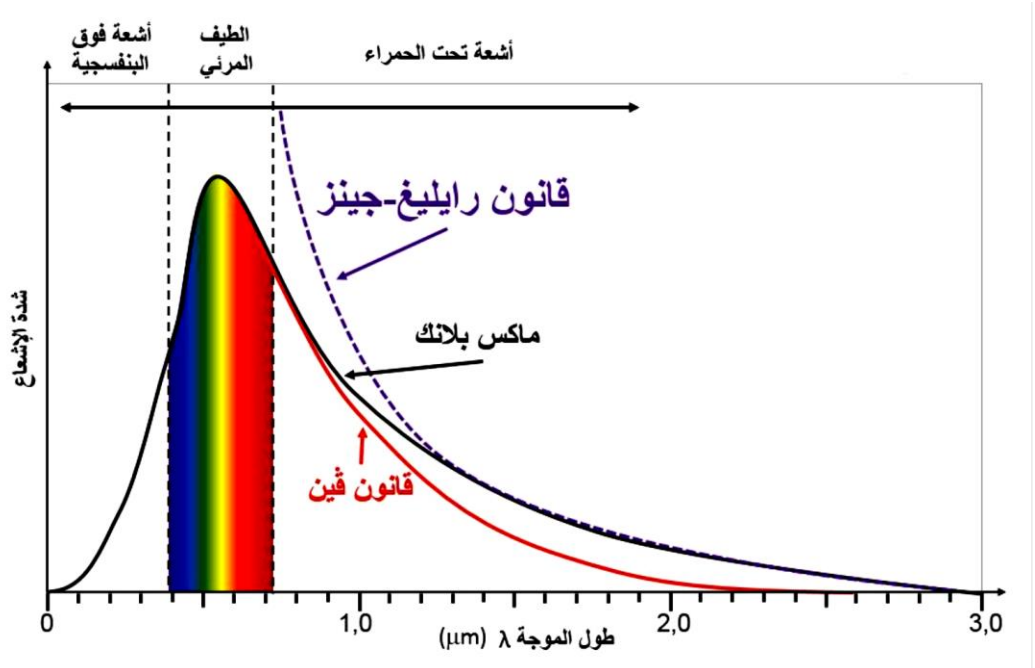
$$\rho(\upsilon) = \frac{8\pi KT}{c^3}\frac{1}{\frac{h\upsilon}{e^{KT}-1}} \quad \text{.....(4-4)}$$

من قانون بلانك نجد ان طاقة الاشعاع للجسم الاسود هي دالة للتردد، اي ان طاقة الاشعاع الكهرومغناطيسي تتوزع على قيم مختلفة للتردد ويعرف هذا بتوزيع الطاقة الطيفي. ان دالة توزيع الطاقة الطيفي هي دالة عامة لا تعتمد على شكل التجويف أو طبيعة جدرانه وانما تعتمد على التردد ودرجة حرارة التجويف فقط، وقد وجد بأن الطاقة الكلية المنبعثة E في وحدة الزمن من وحدة مساحة سطح الفجوة تتناسب مع القوة الرابعة لدرجة الحرارة المطلقة.

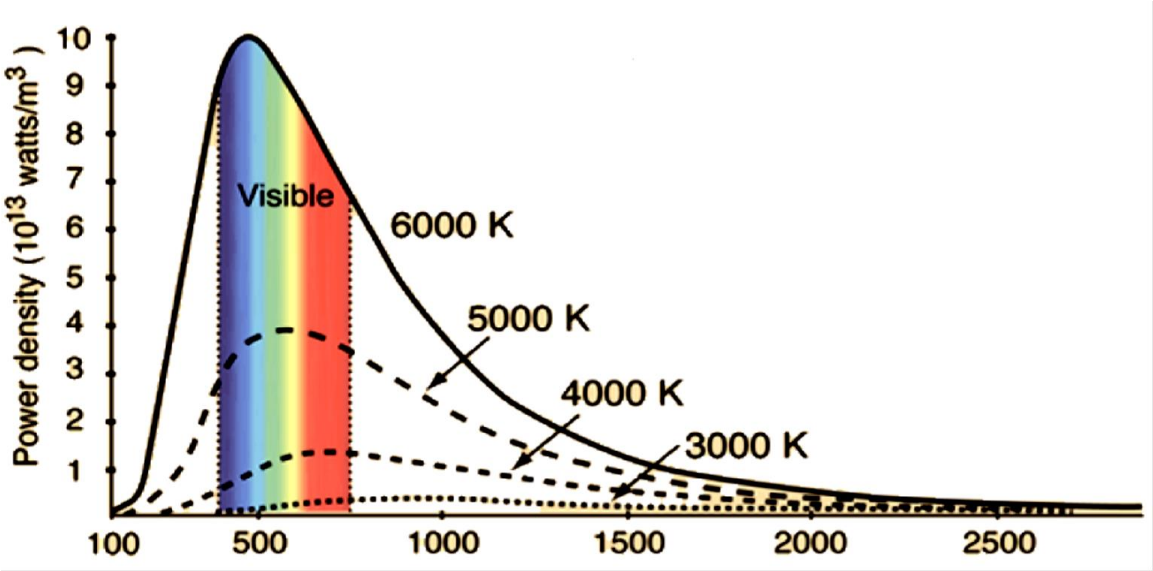
$$E = \varrho T^4 \quad \text{.....(4-5)}$$

يمثل الرمز ϱ ثابت ستيفان – بولتزمان وقيمته (5.67×10^{-8} J K^4/m^2). يرمز للطول الموجي الذي يقابل ذروة الاشعاع المنبعث بالرمز λ_{max} ويعطى بقانون واين (فين) Wien:

$$\lambda_{max}T = 2.9 \times 10^3\ m\ K \quad \text{.....(4-6)}$$



شكل (٤-١): توزيع شدة الاشعاع



شكل (٤-٢): طيف الانبعاث للجسم الاسود

٤-٣) احصائيات بولتزمان Boltzmann Statistics

ان عدد الذرات لوحدة الحجم في مستوى الطاقة الاول E_1 في نظام ذو مستويين يساوي N_1، وعدد الذرات لوحدة الحجم في مستوى الطاقة الثاني E_2 يساوي N_2. وفرق الطاقة بين المستويين يكون ($E_2 - E_1 = h\upsilon$)، اما كثافة التوزيع الكلية للنظام فتساوي ($N = N_1 + N_2$). اذا كانت الذرات في حالة توازن حراري مع درجة حرارة المحيط فإن التوزيع النسبي في المستويين يسمى بتوزيع بولتزمان:

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\frac{h\upsilon}{KT}} \text{ .....(4-7)}$$

تبين هذه المعادلة ان زيادة درجة الحرارة تؤدي الى زيادة التوزيع في المستويات المثارة (العليا)، وفي حالة التوازن الحراري فإن نسبة التوزيع في هذه المستويات تكون اقل منها في المستويات السفلية. اما اذا كانت فجوة الطاقة كبيرة ($h\upsilon >> KT$) فإن النسبة اعلاه تقترب من الصفر، لذلك يتواجد عدد قليل من الذرات في المستويات العليا.

اذا امتلك مستويين او اكثر الطاقة نفسها فإن المستويات تسمى بالمستويات المنحلة Degenerate، اي انه من الممكن تعدد المستويات ضمن مستوي الطاقة الواحد، ويكون لجميع هذه المستويات التوزيع نفسه فتصبح المعادلة اعلاه كما يأتي:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{g_2}{g_1} e^{-\frac{h\upsilon}{KT}} \text{ .....(4-8)}$$

حيث تمثل كل من g_1 و g_2 التعددية او الوزن الاحصائي للمستويين E_1 و E_2 على التوالي، ويمثل الوزن الاحصائي (g) الطرق المختلفة لتوزيع الذرات والتي لها نفس الطاقة ويعتمد على الاعداد الكمية.

٤-٤) المقطع العرضي للانتقال Transition Cross Section

يتناسب مقطع الانتقال σ لموجة كهرومغناطيسية منتظمة الشدة I مع التدفق الفوتوني (كثافة الفيض الفوتوني) للموجة، وتعتمد مساحة المقطع العرضي على نوع المادة وتردد الموجة الساقطة. ان مساحة المقطع العرضي للانبعاث المحفز تساوي مساحة المقطع العرض للامتصاص، ويمكن وصف التفاعل المتبادل للإشعاع الكهرومغناطيسي مع المادة بمعامل الامتصاص α والذي يرتبط مع مساحة المقطع العرضي بالعلاقة:

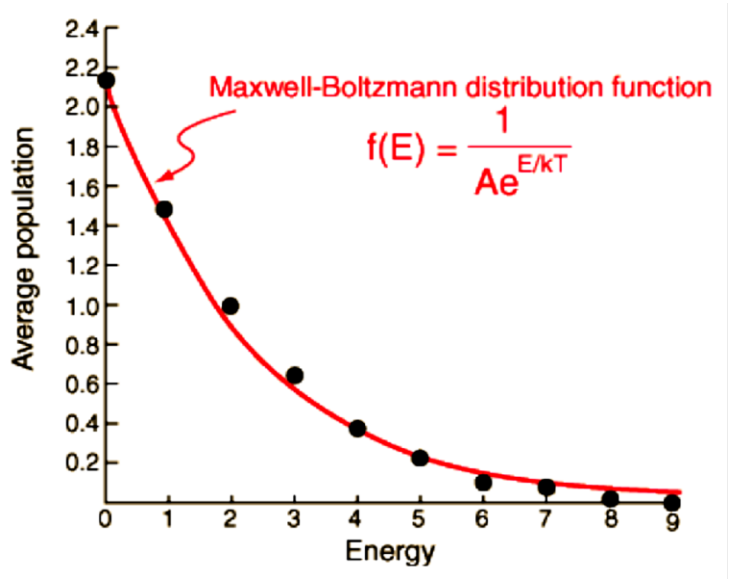
$$\alpha = \sigma(N_1 - N_2) \quad \text{.....(4-9)}$$

اي ان معامل الامتصاص يعتمد على تأهيل مستويي طاقة النظام، ويمكن قياسه بصورة مباشرة بدلالة شدة الموجة باستخدام قانون لامبرت:

$$I_x = I_\circ e^{-\alpha x} \quad \text{.....(4-10)}$$

اذا كان الوسط في حالة اتزان حراري فإن التأهيل لمستويات الطاقة للذرة يوصف حسب احصائية بولتزمان والذي يكون:

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\frac{(E_2-E_1)}{KT}} \quad \text{.....(4-11)}$$



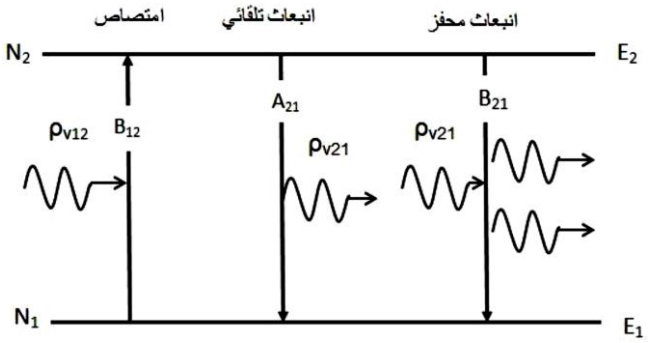
شكل (٤-٣): توزيع الذرات حسب قانون ماكسويل – بولتزمان الاحصائي

في حالة كون ($N_1<N_2$) فإن معامل الامتصاص يصبح سالباً، وفي هذه الحالة تتضخم الموجة الساقطة بدلاً من ان تضعف نتيجة امتصاص الوسط لها، فتكون النتيجة كمية موجبة والتي هي معامل الكسب G:

$$G = -\alpha = \sigma(N_2 - N_1) \quad \text{.....(4-12)}$$

٤-٥) معاملات اينشتاين Einstein Transactions

درس اينشتاين العلاقة بين احتمالية الانتقال للعمليات الثلاثة (الامتصاص، الانبعاث التلقائي، الانبعاث المحفز) واوضح ان معدلات الامتصاص والانبعاث التلقائي والمحفز تعطى بالعلاقات $(\frac{dN_1}{dt} = -B_{12}N_1\rho)$ و$(\frac{dN_2}{dt} = -A_{21}N_2)$ و$((\frac{dN_2}{dt})_{stim} = -B_{21}N_2\rho)$ على التوالي. عند حصول التوازن الحراري لمادة موضوعة داخل تجويف للإشعاع الكهرومغناطيسي فإن للإشعاع المنتشر خلال التجويف توزيع طيفي تعطى كثافته بالمعادلة (4-4) والتي تمثل معادلة التوزيع الطيفي لإشعاع الجسم الاسود كما وجده بلانك. وبفرض وجود مستويين للطاقة لذرة المادة وأن N_1 وN_2 هما تأهيل هذين المستويين وفي حالة توازن، فهناك احتمالية لحدوث كل من العمليات الثلاث بين هذين المستويين وبالشكل الآتي:



شكل (٤-٤): معاملات الاحتمالية لأينشتاين

ولما كانت المادة في حالة توازن حراري فان عدد الانتقالات نحو الاسفل (الانبعاث) يجب ان يعادل عدد الانتقالات نحو الاعلى (الامتصاص) اي ان:

$$B_{12}N_1\rho = A_{21}N_2 + B_{21}N_2\rho \quad \text{.....(4-13)}$$

$$\rho = \frac{A_{21}N_2}{B_{12}N_1 - B_{21}N_2} \quad \text{.....(4-14)}$$

$$\rho = \frac{\frac{A_{21}}{B_{21}}}{\frac{B_{12}N_1}{B_{21}N_2} - 1} \quad \text{.....(4-15)}$$

وباستخدام احصائية بولتزمان لحالة التوازن الحراري ولتوزيع ذرات المادة على مستويات الطاقة لها (معادلة 4-7) وتعويضها في المعادلة (4-15) نحصل على:

$$\rho = \frac{\frac{A_{21}}{B_{21}}}{[\frac{B_{12}}{B_{21}}e^{-\frac{h\upsilon}{KT}}] - 1} \quad \text{.....(4-16)}$$

وبما ان النظام الذري في حالة توازن حراري فهذا يعطي اشعاع مطابق لإشعاع الجسم الاسود (معادلة 4-4)، وبمقارنة هذه المعادلة مع المعادلة (4-16) ينتج:

$$B_{12} = B_{21} = B \quad \text{.....(4-17)}$$

$$\frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi KT}{c^3} \quad \text{.....(4-18)}$$

المعادلتين الاخيرتين يشار اليهما بمعادلات اينشتاين، فالمعادلة (4-17) تشير الى ان احتمالية حدوث عملية الامتصاص مكافئة لاحتمالية حدوث عملية الانبعاث المحفز، اما المعادلة (4-18) فيمكن من خلالها حساب النسبة بين معدل الانبعاث التلقائي الى معدل الانبعاث المحفز لمستويين طاقيين. وبتعويض المعادلة (4-18) في (4-4):

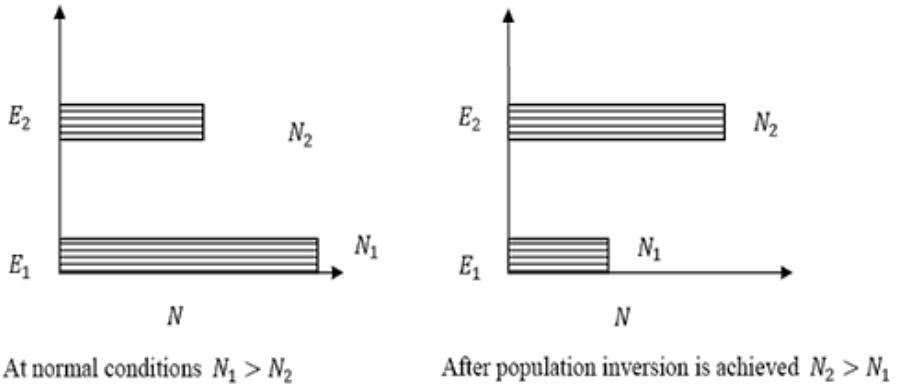
$$\rho = \frac{A_{21}}{B_{21}} \left[\frac{1}{e^{-\frac{h\upsilon}{KT}} - 1}\right] \quad \text{.....(4-19)}$$

وبما ان ($R = e^{-\frac{h\upsilon}{KT}} - 1$) حيث R تمثل النسبة بين معدل الانبعاث التلقائي الى الانبعاث المحفز، فينتج:

$$\rho = \frac{A_{21}}{B_{21}} \frac{1}{R} \quad \text{.....(4-20)}$$

$$R = \frac{A_{21}}{\rho B_{21}} \quad \text{.....(4-21)}$$

ان معدل الانبعاث التلقائي تحت شروط التوازن الحراري يكون اعلى من معدل الانبعاث المحفز، لذا فللحصول على ليزر يجب تحقيق تخطي التوازن الحراري وذلك بأن تكون كثافة التوزيع او التأهيل في المستوى الاعلى للطاقة تزيد عنها في مستوى الطاقة الاقل، أي تحقيق التأهيل العكسي (زيادة كثافة الاشعاع وتأهيل المستوى E_2).



شكل (٤-٥): تأهيل المستويات