وزارة التعليم العالي
والبحث العلمي
جامعة الانبار
كلية العلوم/ قسم الفيزياء

اسم المادة: الليزر/1

المستوى الدراسي: الدراسات الأولية

المرحلة: الثالثة

المحاضرة الثامنة:

عنوان المحاضرة: تعريض الخط الطيفي

مدرس المادة

أ.م. د جمال مال الله رزيج العبيدي

ميكانيكية تعريض الخط الطيفي

ورد فيما سبق بان الذرة لا ترى الاشعاع الساقط عليها بطول موجة واحدة او بتردد واحد وانما بتوزيع طيفي ضيق يُعطى عادة بالدالة $g(\Delta w)$ ، وبالمثل نقول بان الذرة عندما تنتقل من مستوي طاقة الى مستوي طاقة اخر لا تبعث او تمتص طول موجة او تردد واحد بل نطاق ضيق من الترددات توصف عادة بدالة تعطي شكل الخط الطيفي للانبعاث او الامتصاص. ان شكل هذا الخط وأسباب تعريضه، على العموم واحدة سواء كان ناتجا عن انبعاث او امتصاص وعلينا فيما يلي ان نعرف أسباب هذا التعريض للخط الطيفي وكيف يساهم كل منها في الشكل الذي نحصل عليه لانتقال معين.

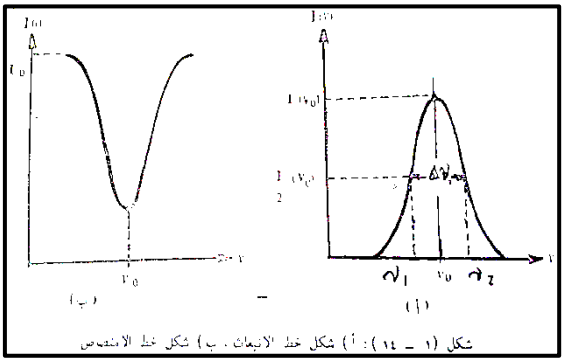
في البداية نرى ان نصنف عمليات تعريض الخط الطيفي الى شكلين رئيسين:

1- التعريض المتجانس: تدعى عملية توسيع خط الطيف متجانسة إذا أدت الى توسيع خط طيف كل ذرة ومن ثم جميع النظام بنفس الصيغة، أي ان لجميع الذرات نفس التردد الذي تتمركز حوله وهو تردد الخط الطيفي نفسه. من امثلة هذا التعريض: التعريض الطبيعي وتعريض التصادم (تعريض الضغط)

2- التعريض غير المتجانس: توصف عملية توسيع خط الطيف بانها غير متجانسة إذا أدت الى توزيع ترددات الرنين للذرات ضمن حزمة، ولذلك فإنها تؤدي الى خط طيف واسع يمثل النظام ككل بدلا من ان يوسع خط طيف كل ذرة على انفراد. من امثلة هذا التعريض: تعريض دوبلر

وسندرج فيما يلي ثلاث عمليات مختلفة تسبب تعريض الخط الطيفي وتشكل نماذج لهذين الشكلين من التعريض، تعطي مجتمعة خطا طيفيا بشكل معين وبعرض محدد يتمركز حول تردد الانتقال (ν_o) والذي يدعى بالتردد الرنيني للخط الطيفي. يُعين عرض الخط الطيفي عادة بعرض الشكل في الموضع الذي تهبط فيه شدة الانتقال الى النصف أي في الموضع $\left(I = \frac{1}{2} I_o\right)$ ويدعى هذا المدى $(\Delta\nu_o)$ بعرض الخط الكلي عند منتصف الشدة $(FWHM)$، يمكن التعبير عن عرض الخط الطيفي أيضا بدلالة التردد الزاوي (Δw_o) او بدلالة طول الموجة $(\Delta\lambda_o)$ ، لاحظ الشكل (1-14,a).

يمكن مختبريا دراسة هذا الشكل في عملية امتصاص او انبعاث لذرات المادة وذلك بقياس الخط الطيفي كدالة للتردد مثلا. الشكل (1−14) يوضح نموذجا يشكل الخط الطيفي نتيجة عملية انبعاث وكذلك نتيجة عملية امتصاص.



شكل (١ ـ ١٤) : أ) شكل خط الانبعاث . ب) شكل خط الامتصاص

1- التعريض الطبيعي

ان الخط الطيفي للانبعاث التلقائي يعاني بطبيعته تعريضا متجانسا نتيجة العمر المحدود لمستويي الطاقة (τ_1, τ_2) ذات العلاقة بعملية الانتقال واللذين يحدث بينهما الانتقال فمستوى الطاقة لا يمكن ان يتخذ له قيمة محددة من الطاقة، E_2 مثلا، ولكن في الواقع له توزيع ضيق للطاقة يتمركز حول هذه القيمة ويوصف عادة بالمقدار (ΔE)، وحسب مبدأ اللادقة تكون:

$$\Delta E . \Delta t \approx \hbar \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (1-48)$$

أي ان:

$$\Delta E \approx \frac{\hbar}{\Delta t} \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (1-49)$$

والمقدار (Δt) هو الاحتمالية في الوقت لإيجاد الذرة في مستوي الطاقة (E) وتقاس هذه الاحتمالية بمتوسط زمن عمر ذلك المستوي (τ). اما التردد $(\Delta \nu)$ المرافق لتوزيع الطاقة (ΔE) لمستوي الطاقة (E) فيمكن التعبير عنه بالعلاقة:

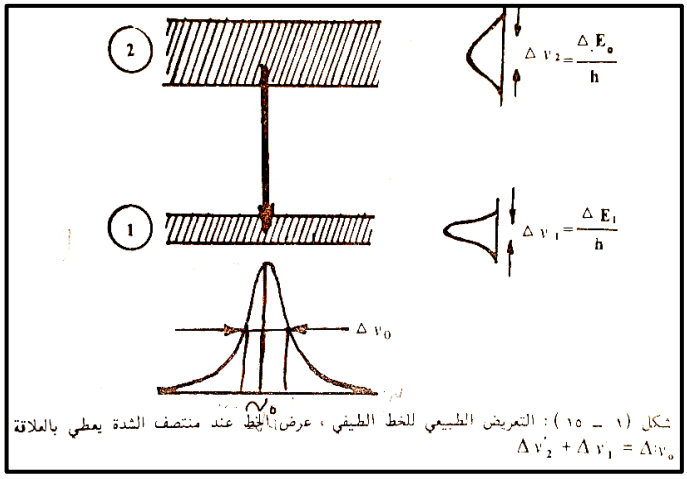
$$\Delta \nu_\circ = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2\,\pi\,\tau}} \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (1-49)$$

بهذا يكون التعريض الطبيعي للخط الطيفي الذي تردده يساوي (ν_o) والحاصل بين مستويي الطاقة E_1 و E_2 ، لاحظ الشكل (1−15)، وفق العلاقة التالية:

$$\Delta \nu_\circ = \Delta \nu_1 + \Delta \nu_2$$

أو ان:

$$\boldsymbol{\Delta\nu_{\circ}} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2\pi\tau_1}} + \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2\pi\tau_2}} \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (1-50)$$



شكل (١ ـ ١٥) : التعريض الطبيعي للخط الطيفي ، عرض الخط عند منتصف الشدة يعطي بالعلاقة
$\Delta\nu'_2 + \Delta\nu'_1 = \Delta\nu_0$

$(\Delta\nu_o)$ تمثل التعريض الطبيعي للخط الطيفي او عرض الخط الكلي عند منتصف الشدة $(FWHM)$ اما شكل الدالة التي تعبر عن شكل الخط الطيفي الناتج بسبب هذا النوع من التعريض فهي دالة لورنتز، والتوزيع اللورنتيزي، لاحظ أيضا الشكل $(15-1)$، يُعطى بالدالة:

$$\boldsymbol{g(\nu-\nu_o)_L} = \frac{\boldsymbol{\Delta\nu_o}}{\mathbf{2\,\pi}}\left[(\boldsymbol{\nu}-\boldsymbol{\nu_o})^2 + \left(\frac{\boldsymbol{\Delta\nu_o}}{\mathbf{2}}\right)^2\right]^{-1} \dots\dots\dots (\mathbf{1-51})$$

بهذا تكون قيمة الدالة عند القمة، أي عند الموضع $\nu = \nu_o$ كالتالي:

$$g(0) = \frac{2}{\pi\,\Delta\nu_o} \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (1-52)$$

ان هذا التعريض وارد لكل خط طيفي وقد يكون اقل أهمية من بعض اشكال التعريض الأخرى التي سنتطرق اليها.

مثال :

احسب التعريض الطبيعي للخط الطيفي لليزر الهيليوم–نيون ذو الطول الموجي 632.8 nm الحاصل بين مستويي الطاقة $3S_2$ $(\tau_2 = 19.6\,ns)$ و $2p_4$ $(\tau_1 = 18.7\,ns)$.

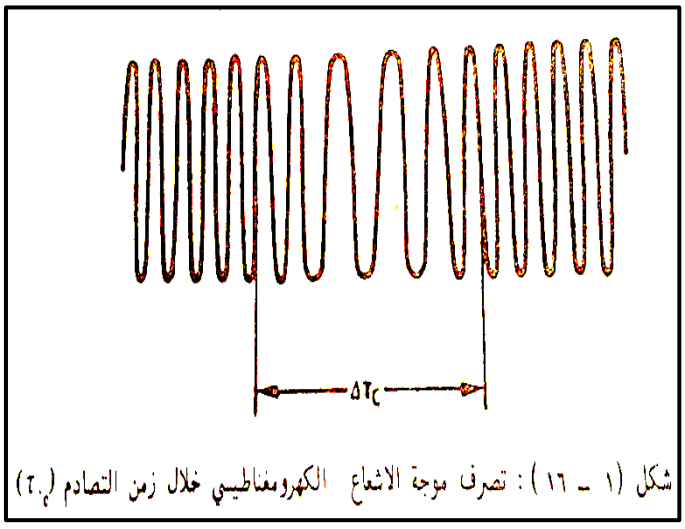
ان التعريض الطبيعي لهذا الخط وفق العلاقة $(50-1)$ يكون:

$$\Delta\nu_\circ = \frac{1}{2\pi\times19.6\times10^{-9}} + \frac{1}{2\pi\times18.7\times10^{-9}} = 16.6\ MHz$$

2- تعريض التصادم (تعريض الضغط)

هو تعريض متجانس للخط الطيفي سببه تعرض الذرة المشعة او الممتصة للتصادم مع ما جاورها من الجزيئات والذرات، فمثلا في حالة الغاز، تتصادم الذرة معذرات او جزيئات أخرى مماثلة او مغايرة لها كذلك مع جسيمات متعادلة او مشحونة وحتى مع جدران الاناء الذي يحتويها. ان عملية التصادم والتي يكون زمنها قصير جدا تؤثر على الاشعاع وتحدث فيه تغيرا فجائيا في الطور، لاحظ شكل (16-1)، مما يسبب تعريضا للخط الطيفي ويعتمد مقدارها على متوسط الزمن بين تصادمين $(\tau_{collision})$. اما شكل الخط الطيفي الناتج عن ذرات المادة والتي تعاني من عملية التصادم فيُعطى بدالة لورنتز أيضا حيث يكون عرض الخط عند منتصف الشدة:

$$\boldsymbol{\Delta\nu_\circ = \frac{1}{\pi\,\tau_c}} \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \boldsymbol{(1-53)}$$



شكل (١ ـ ١٦) : تصرف موجة الاشعاع الكهرومغناطيسي خلال زمن التصادم (τ_c)

يمكن حساب المقدار (τ_c) من النظرية الحركية للغازات حيث يقدر هذا الزمن بالنسبة بين بين معدل المسار الحر ومعدل الانطلاق، أي ان:

$$\tau_c \approx \frac{(mKT)^{1/2}}{(8\pi)^{1/2}pd^2} \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (1-54)$$

p ضغط الغاز و d قطر الجزيئة او الذرة و T درجة الحرارة المطلقة و m كتلة الجزيئة او الذرة، فمثلا في ليزر الهيليوم–نيون يكون ضغط الغاز عادة $0.5\ Torr$ واذا اخذنا قيمة d للنيون حوالي $0.1\ nm$ ففي درجة حرارة الغرفة $(300\ K)$ تكون $\tau_c \approx 0.5 \times 10^{-6}\ s$.

<u>مثال:</u>

احسب عرض الخط الطيفي عند منتصف الشدة لليزر الهيليوم–نيون اذا كان الزمن بين تصادمين متتاليين هو $0.5 \times 10^{-6}\ s$.

$$\Delta\nu_\circ = \frac{1}{\pi\,\tau_c} = 0.64\ MHz$$

من الواضح ان τ_c يتناسب عكسيا مع الضغط ولذلك يزداد تعريض الخط بازدياده، أي مع زيادة تردد التصادم، كذلك تسبب عملية التصادم في كثير من الأحيان إزاحة لتردد الخط الطيفي نحو جهة الأحمر (الأطول موجيا) او نحو جهة الأزرق (الأقصر موجيا).

المصادر:

1- فيزياء الليزر – سهام عفيف قندلا

2- Introduction to Laser Physics 1st Edition- K. Shimoda

3- Basics of Laser Physics: For Students of Science and Engineering. (Graduate Texts in Physics) 2nd Edition.