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

اسم المادة: الليزر/1

المستوى الدراسي: الدراسات الأولية

المرحلة: الثالثة

المحاضرة الخامسة

عنوان المحاضرة: معدل الامتصاص ومعدل الانبعاث المحفز

مدرس المادة

أ.م. د جمال مال الله رزيج العبيدي

معدل الامتصاص ومعدل الانبعاث المحفز

كما مرَّ ذكره سابقا بان دراسة ظواهر الامتصاص والانبعاث تقع في إطار دراسة تعامل المادة (النظام الذري او الجزيئي) مع الاشعاع الكهرومغناطيسي الساقط عليها، وهناك عدة طرق لدراسة هذا الفعل المتبادل بينهما. سنعرض فيما يلي ما يسمى بالطريقة شبه التقليدية لتعامل الاشعاع مع المادة. في هذه الطريقة يعتبر النظام الذري نظاما مكمما يمكن وصفه حسب الميكانيك الكمي في حين يُعامَل المجال الكهرومغناطيسي للموجة الساقطة بطريقة تقليدية أي باستخدام معادلات ماكسويل.

لنتفحص أولا عملية الامتصاص، نأخذ نظام ذري ذا مستويين للطاقة ونفترض انه عند اللحظة t=0 يكون النظام في الحالة الأرضية أي في المستوي (1)، وان هناك موجة كهرومغناطيسية أحادية الطول الموجي ترددها $(\omega = 2\pi\nu)$ تفاعل مع النظام. ان وجود الموجة الكهرومغناطيسية يمثل اضطرابا للذرة وهو اضطراب معتمد على الزمن ويؤدي الى حدوث احتمالية لتواجد الذرة في حالة نهائية تختلف عن وضعها الابتدائي عندما تكون الطاقة التي يحملها الاضطراب مساويا الى فرق الطاقة لحالتي الذرة. ان الذرة وهي في المستوي الابتدائي (1) وحسب الدراسة التقليدية تكتسب طاقة إضافية (H') نتيجة الفعل المتبادل بينها وبين الموجة الكهرومغناطيسية الساقطة، مثلا قد تكتسب الذرة هذه الطاقة (H') نتيجة الفعل المتبادل بين عزم ثنائي القطب الكهربائي للذرة (μ_e) والمجال الكهربائي (E) للموجة الساقطة أي ان $\left(H' = \overrightarrow{\mu_e} \,.\, \vec{E}\right)$. في هذه الحالة نحن نتحدث عن تفاعل ثنائي القطب الكهربائي للذرة وهو عموما يمثل مجمل الفعل المتبادل بين الذرة والاشعاع الكهرومغناطيسي والذي يسبب الانتقال، ولكن ليس هذا هو التفاعل الوحيد الذي يتم بواسطة الانتقال. فمثلا يمكن ان يتم الانتقال بفعل تفاعل عزم ثنائي القطب المغناطيسي للذرة (μ_m) مع المجال المغناطيسي (B) للموجة الكهرومغناطيسية الساقطة، أي ان $\left(H' = \overrightarrow{\mu_m} \,.\, \vec{B}\right)$ وفي هذه الحالة نحن نتحدث عن تفاعل ثنائي القطب المغناطيسي للذرة. ولوصف التكوين الزمني لنظام هذين المستويين يلزم الرجوع الى الميكانيك الكمي. فكما ان الطريقة التقليدية تتضمن وصف الفعل المتبادل للطاقة بالمقدار (H') كذلك يتطلب الميكانيك الكمي لوصف الفعل المتبادل بإدخال هاملتون (H') حينئذ يكون هاملتون الذرة الكلي:

$$H = H_\circ + H' \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (1-22)$$

حيث ان $H_\circ$ هو هاملتون الذرة في حالة غياب المجال الكهرومغناطيسي الخارجي (ذرة غير مضطربة)، فاذا عُلم H في أي وقت $t > 0$ فيمكن دراسة التغير الزمني لحالة الذرة عن طريق معرفة التغير الزمني لدالة الموجة (ψ) للذرة من معادلة شرويدنكر المعتمدة على الزمن، أي من المعادلة:

$$H\psi = i\hbar\frac{\partial\psi}{\partial t} \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (1-23,a)$$

حيث: $i = \sqrt{-1}$ ، $\hbar = \frac{h}{2\pi}$

لحل هذه المعادلة بدلالة (ψ) يتم ادخال الدالة الذاتية غير المضطربة لكل من المستويين (1) و (2) وهما على التوالي:

$$\psi_1 = \mu_1 e^{-iE_1 t/\hbar} \qquad ; \qquad \psi_2 = \mu_2 e^{-iE_2 t/\hbar}$$

بشرط ان تحقق كل من μ_1 و μ_2 معادلة شرويدنكر غير المعتمدة على الزمن، أي ان:

$$H_\circ\mu_j = E_j\mu_j \ , \ \ j = (1,2,3 \dots\dots) \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (1-23,b)$$

اما عندما تكون الذرة تحت تأثير الموجة الكهرومغناطيسية الساقطة فتكون دالة الموجة للذرة هي:

$$\psi = a_1(t)\psi_1 + a_2(t)\psi_2$$

حيث تكون a_1 و a_1 اعدادا معقدة معتمدة على الزمن وكنتيجة معروفة في الميكانيك الكمي تعطي المعاملات $|a_1|^2$ و$|a_2|^2$ الاحتمالية في الزمن(t) لتواجد الذرة في المستوي (1) والمستوي (2) على التوالي، كما انهما مرتبطين بالعلاقة:

$$|a_1|^2 + |a_2|^2 = 1 \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (1-24)$$

لذا عند حساب احتمالية الانتقال (W_{12}) يجب حساب الكمية $|a_1|^2$ او الكمية$|a_2|^2$ حيث أن:

$$W_{12} = \frac{|a_2|^2}{t} \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (1-25)$$

باستخدام صفة التعامد للدوال الموجية الذاتية واستخدام الطريقة الاضطرابية يمكن حساب المقدار (W_{12}) مثلا في حالة كون الفعل المتبادل والمسبب للانتقال الذري يتأتى نتيجة الفعل المتبادل

بين المجال الكهربائي للموجة الكهرومغناطيسية الساقطة وعزم ثنائي القطب الكهربائي للذرة أي الفعل المتبادل لثنائي القطب الكهربائي والمتمثل بالمعادلة:

$$H' = e\overrightarrow{E}\ (\vec{r},t).\vec{\mathrm{r}} \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (1-26)$$

e شحنة الأكثرون المنتقل و $\vec{\mathrm{r}}$ المتجه الذي يحدد الموقع و $\overrightarrow{E}(\vec{r},t)$ هو المجال الكهربائي في الموضع $\vec{\mathrm{r}}$.

لا نريد ان ندخل في تفاصيل هذا الاشتقاق حيث انه وارد بالتفصيل في معظم الكتب الأساسية للميكانيك الكمي ولكن لابد من ذكر المقادير المعتمدة والظروف التي يصح فيها تطبيق المعادلات الناتجة. فمثلا يتطلب الحل معرفة طول الموجة الكهرومغناطيسية الساقطة مقارنة بالأبعاد الذرية، فعندما يكون طول الموجة الساقطة اكبر بكثير من الابعاد الذرية (وهذا يتحقق عند استخدام الاشعاع الكهرومغناطيسي في المدى المرئي وبمقارنة طول الموجة للضوء الأصفر مثلا $\lambda = 500\ nm$ بالأبعاد الذرية التي تكون في حدود 0.1 nm) ففي هذه الحالة يمكن التوصل الى التعبير التالي:

$$W_{12} = \frac{\pi}{3\mathrm{n}^2\varepsilon_\circ\hbar^2}\ |\vec{\mu}_{12}|^2\rho\ g(\Delta\omega) \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (1-27,a)$$

n معامل الانكسار للنظام الذري و $\varepsilon_\circ$ سماحية الفراغ اما $\vec{\mu}_{21}$ فيمثل عزم ثنائي القطب الكهربائي، حيث تكون:

$$\vec{\mu}_{12} = e\int \mu_2^*\,\vec{r}\mu_1 dV \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (1-28)$$

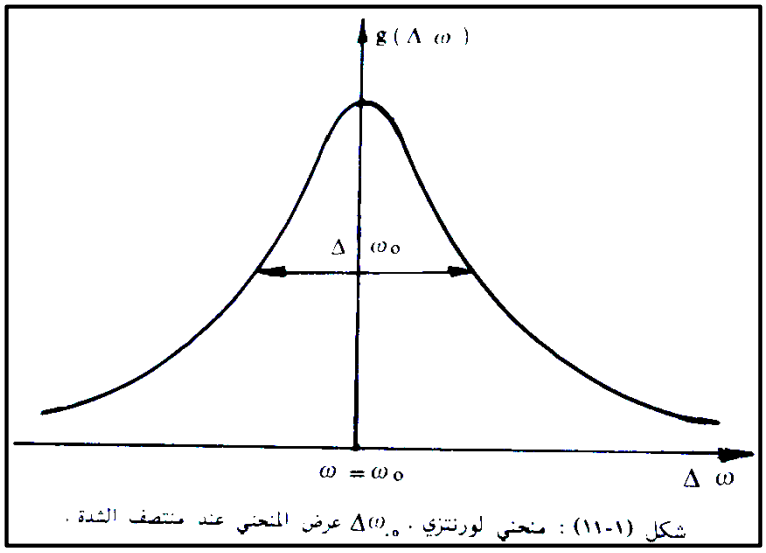
وإن $|\vec{\mu}_{12}|$ تمثل مقدار المتجه $\vec{\mu}_{21}$ وهو متجه يحدد موضع الذرة بالنسبة لاتجاه المجال الكهربائي للموجة الكهرومغناطيسية الساقطة.

اما المقدار $g(\Delta\omega)$ فيشير الى ما يلي: ان التردد $\Delta\omega$ والذي يساوي $(\omega - \omega_\circ)$ يمثل مدى التردد الذي تراه الذرة مع الزمن للإشعاع الكهرومغناطيسي الساقط عليها، حيث ان الذرة لا ترى اشعة أحادية الموجة بتردد واحد يساوي$(\omega_\circ)$ بل بتوزيع طيفي معين يعطى بالدالة $g(\Delta\omega)$ والتي تدعى بدالة شكل الخط الطيفي. ان هذه الدالة معايرة للمقدار 1، أي: $\int_{-\infty}^{+\infty} g\ d\omega = 1$ ، اما شكلها فيعتمد على الظاهرة التي تسبب تعريض الخط الطيفي، فغالبا ما يعبر عن هذا الشكل بدالة لورنتز المبينة في الشكل (11-1).

يمكن كتابة المعادلة $(1-27,a)$ بدلالة الاشعاع الكهرومغناطيسي الساقط أي بدلالة (I) حيث $\left(I=\frac{\rho c_\circ}{n}\right)$ وكما يلي:

$$W_{12}=\frac{\pi}{3n\varepsilon_\circ c_\circ\hbar^2}\,|\vec{\mu}_{21}|^2 I\; g(\Delta\omega)\;\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(1-27,b)$$

$c_\circ$ سرعة الضوء في الفراغ.



شكل (١-١١) : منحني لورنتزي . $\Delta\omega_{\circ}$ عرض المنحني عند منتصف الشدة .

يمكن أيضا وبنفس الطريقة اشتقاق احتمالية الانبعاث المحفز (W_{21}).

ومن ملاحظة المعادلة (1–28) يتضح ان $|\mu_{12}|=|\mu_{21}|$ ، لذلك باستخدام العلاقة $(1-27,b)$ يمكن التوصل الى:

$$W_{12}=W_{21}\;\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(1-29)$$

أي ان **احتمالية الانبعاث المحفز تساوي احتمالية الامتصاص** وبهذا يمكن ان نرمز لأي منهما بالرمز W ، كذلك $|\mu_{12}|=|\mu_{21}|=\mu$ ، أي ان المعادلتان $(1-27a,b)$ ستكونان بالشكل:

$$\boldsymbol{W=\frac{\pi}{3n^2\varepsilon_\circ\hbar^2}\,|\mu|^2\rho\; g(\Delta\omega)\;\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(1-27,c)}$$

$$\boldsymbol{W=\frac{\pi}{3n\varepsilon_\circ c_\circ\hbar^2}\,|\mu|^2 I\; g(\Delta\omega)\;\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(1-27,d)}\text{،}\quad\left(I=\frac{\rho c_\circ}{n}\right)$$

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.