الفصل الخامس

الامتصاص و الانبعاث المحفز

(مفعول الليزر)

1- مقدمة

عرف الناس أن الجسيمات، مثل السيارة والإلكترون، هي كتل وأن لحركتها زخما وعرفوا أن الأمواج مثل الضوء والصوت، هي حركة وانها حين تحمل الطاقة فإنها تفعل ذلك من خلال الوسط الذي تنتقل خلاله. وعرف الناس أيضا ان الجسيمات متحيزة تحتل مكانا صغيرا كان أو كبيرا. إن الأمواج ممتدة لا يحصرها مكان وخاصية التحيز هذه مهمة جدا كصفة بارزة للجسيمات كما عرفوا ان الجسيمات متجزأة قطعا وان الأمواج متصلة.

ولكن مع بدايات القرن العشرين تم التعرف على جملة من الظواهر التي كشف عن صفات جسيمية للأمواج وصفات موجية للجسيمات مما فتح أبوابا جديدة للفيزياء غيرت كثيرا مما كنا نعرف ووفرت أفاقا لتطبيقات عملية كثيرة ثمرتها التقنيات الحديثة التي نتعامل بها في كافة أنشطة الحياة العصرية مثل الكمبيوترات السريعة وأجهزة الهاتف الخلوي وأجهزة الاتصالات عبر الأقمار الصناعية وأجهزة الليزر والمجسمات البصرية تحت الحمراء وفوق البنفسجية والأجهزة الطبية المتطورة وغيرها كثير.

إن الإشعاع الكهرومغناطيسي الذي يشمل الضوء المرئي والأشعة تحت الحمراء وفوق البنفسجية والأشعة السينية يعتبر حركات موجية حسبما دلت عليها تجارب التداخل الضوئي. ان تجارب تداخل الضوء المتمثلة بالتداخل الائتلافي والتداخل البناء تعتبر أداة اختبار للكشف عن الحركات الموجية حيث تتطلب وجود موجتين في مكان واحد بنفس الزمن. وعلى العكس فان النتائج المستخلصة من تجارب امتصاص الأشعة السينية وإشعاع الجسم الأسود والتأثير الكهروضوئي تدل على ان الإشعاع هو سيل من الجسيمات يطلق عليها الفوتونات تمتص الواحدة تلو الأخرى في أزمنة متعاقبة. ويمكن اعتبار الضوء في بعض التجارب كانه موجات وفي تجارب أخرى كانه جسيمات، وعلى ذلك يمكن تقسيم هذه التجارب إلى شقين، تجارب الانتشار الموجي التي لها الخاصية الموجية والتي تستند في تفسيرها على تعيين الفرق بين طولي مساري موجتين وتجارب التأثير الكهروضوئي التي لها خاصية الجسيمات.

ان الإشعاع هو نوع من انواع الطاقة وهو كلمة ذات مضمون شامل وتضم أنواع مختلفة من الأشعة، وينطلق الإشعاع من الأجسام المتذبذبة على صورة دفعات صغيرة جدا من الطاقة تدعى كمات و تعتمد طاقة هذه الكمات على تردد الإشعاع حسب العلاقة التالية :

$$E = h\nu \qquad (1)$$

2- تعريف

يمكن تقسيم الإشعاع من حيث التأثير على المواد و خاصة المواد الحية إلى إشعاع مأين وإشعاع غير مأين، ويعرف الإشعاع المأين بأنه الإشعاع الذي تكون طاقته أكبر أو تساوي 13.6 eV ، أما الإشعاع الذي تكون طاقته أقل من ذلك فهو الإشعاع غير المؤين.

لمعرفة الأسس الفيزيائية للكشف عن الإشعاع و التأثيرات البايولوجية له يجب فهم طريقة التفاعل بينه و بين المادة و التي يتم خلالها إنتقال الطاقة من الإشعاع إلى المادة التي يتفاعل معها ،وهذا التفاعل قد يحصل بين الإشعاع والكترونات الذرة ،أو بين الإشعاع و نواة الذرة،و أخيرا بين الإشعاع و الذرة بأجمعها. يعتمد نوع التفاعل و قدرة إختراق الإشعاع للمادة على نوع و طاقة ذلك الإشعاع و طبيعة المادة التي يتفاعل معها. والمقصود بالتفاعل بين الإشعاع والذرات أو الجزيئات أو الإالكترونات هو القوة الكهربائية المتبادلة بين الإشعاع و المادة و التي تتضمن قوة تجاذب أو تنافر و ليس المقصود بها التماس الميكانيكي ين الإشعاع والمادة وينتج عن ذلك ظاهرة التأين أو التهيج و تنتقل الطاقة إلى المادة،التي يتحول معظمها إلى حرارة نتيجة لإهتزاز الذرات و الجزيئات وتكون التفاعلات إما بتفاعل الإشعاع مع الجسيمات المشحونة أو تفاعل الإشعاع مع الفوتونات.

إن التفاعل بين الإشعاع و المادة مهم على الخصوص لغرضين :

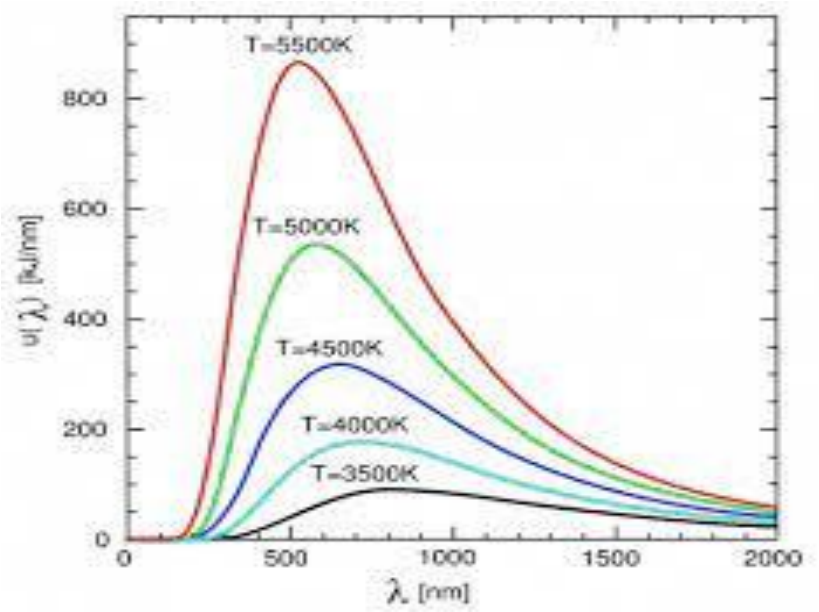
1. يمكن استخدام هذا التفاعل للكشف عن الإشعاعات و قياس طاقتها.
2. يمكن دراسة (من خلال هذا التفاعل) تأثير الإشعاعات على المواد وخاصة تأثيرها على الخلايا والأنسجة الحية.

. يعتمد التفاعل بين الإشعاع و المادة على طبيعة الإشعاع الفيزيائية و طاقته و يعتمد أيضا على طبيعة الوسط.

3- الطبيعة الجسيمية للإشعاع

الإشعاع الحراري الصادرمن الأجسام الساخنة غير العاكسة،هو نوع من الموجات الكهرومغناطيسية، التي كانت تعتبر في الفيزياء اللاسلكية على أنها سيل مستمر أو متصل.و كانت القياسات الدقيقة التي أجريت على شدة الإشعاع الصادر عن أجسام متوهجة بالحرارة قد دلت على أن شدة الإشعاع تتغير مع الطول الموجي بطريقة غير خطية، حيث تظهر قيمة عليا لشدة الإشعاع عند طول موجي بطريقة غير خطية،كما في الشكل(5-1).ولوحظ علاوة على ذلك ،أن القيمة العظمى لشدة الإشعاع تتزحزح بزيادة درجة الحرارة في

إتجاه الضوء المرئي،بما يتفق مع تجربتنا من أن جسما مسخن لدرجة الإبيضاض يكون أسخن مما لو كان في درجة الإحمرار.



الشكل(5 -1) :إشعاع الجسم الأسود .

وقد أدى تحليل هذه النتائج العلمية إلى إسخلاص عدة قوانين هامة لوصف طبيعة الإشعاع الحراري، منها قانون"بلانك"الذي توصل إليه في عام 1900م، وتقوم فرضية "بلانك"في إستنتاج قانونه الشهير على القول بنظرية الكم التي تقضي بتكميم الطاقة المشعة E ذات التردد ν بحيث تنبعث، أو تمتص على شكل كميات محددة تأخذ القيم:

$$E = nh\nu \qquad (2)$$

. وبناء على نظرية الكم يعرف الفوتون بأنه الكم بالنسبة للطاقة الكهرومغناطيسية، و طاقة جميع الفوتونات ليست نفسها، فالضوء اللأزرق يبعث أو يمتص في كمات طاقاتها أكبر من كمات الضوء الأحمر،لأن الطول الموجي للون الأزرق أقصرو تردده أكبر.وإذا كان لدينا مصدران للضوء لهما نفس التردد (أي نفس اللون) فإنهما يبعثان فوتونات لهما نفس الطاقة hν والمصدر الأكثرنصوعا يبعث عدد أكبر من الفوتونات في الثانية، بالنسبة لمصدر نفس اللون الأقل نصوعا.

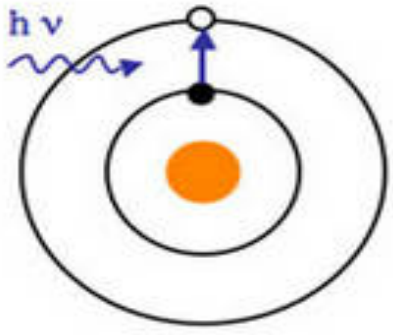
إن الذرة تبعث ضوءا فقط إذا إستثيرت بشكل ما إلى واحد من مستويات الطاقة العليا لها، وعندئذ يستطيع الإلكترون أن يهبط عائدا نحو النواة فينبعث الضوء خلال هذه العملية على شكل كمات تعرف بإسم"الفوتونات"، وتعود الذرة إلى حالات الإستقرار الأصلية. ان نشأة الضوء من داخل جزيئات الغاز و السوائل و الجوامد تشبه نشأته من داخل الذرات المنفردة من عدة أوجه، إلا أنها أكثر تعقيدا.

4 – الإشعاع في الفيزياء الذرية

تميل الذرة في الحالات العادية الى شغل المستوي الاساسي للطاقة ، فعند تغيير مستويات الطاقة من مدار إلى مدار يكون إما بإمتصاص أو بإنبعاث فوتون . حيث وضح العالم "أينشتاين" في عام 1917 م، أن الإنبعاث يتم بطريقتين هما الإنبعاث التلقائي والإنبعاث المحفز. وسنوضح فيما يلي هذه العمليات و سنأخذ مثال ذرة الهيدروجين و هي أبسط الذرات تركيبا.

4-1- الإمتصاص

عند قذف ذرة الهيدروجين المستقرة بفوتون ذات طاقة مناسبة فإن ذلك يؤدي إلى زيادة سرعة الحركة الدورانية للإلكترون في مداره الخاص أو إجبار الإلكترون على الإنتقال من مستوى الإستقرار E_1 (المستوي الاساسي) إلى مستوى طاقة أعلى E_2 وبذلك تصبح الذرة في حالة مثارة وتعرف هذه الظاهرة "بالإمتصاص" الشكل (5–2).



الشكل (5-2): آلية حدوث عملية الإمتصاص .

4-2 الإنبعاث التلقائي

عند إصطدام فوتون بذرة الهيدروجين، تمتصه هذه الذرة فينتقل الإلكترون إلى مستوى طاقة أعلى E_2 مما هو فيه E_1 وبذلك تكون الذرة في حالة إثارة، و لكن كما نعلم ان الذرة تميل دوما للرجوع الى الاستقرار اي المستوى الاساسي او الأدنى E_1 و تنطلق طاقة نتيجة هذا الإنتقال قيمتها:

$$h\nu = E_2 - E_1 \qquad (3)$$

ويطلق على عملية تحرير الطاقة المنطلقة على شكل موجات كهرومغناطيسية بعملية "الإنبعاث التلقائي "و يتميز بتردد يساوي:

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h} \qquad (4)$$

بإفتراض وجود عدد من الذرات N_2 لكل وحدة حجم في المستوي المثار E_2 التي تنتقل إلى مستوي الطاقة الأقل أو الأدنى E_1 بواسطة الانبعاث التلقائي بمعدل يتناسب مع N_2، ويحسب الإنتقال في هذه الحالة بالعلاقة التالية :

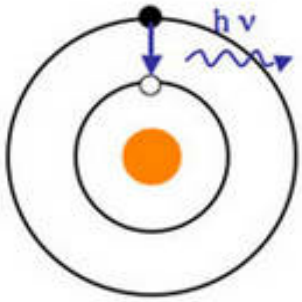
$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right) = -A_{21}N_2 \qquad (5)$$

الإشارة السالبة هنا لأن المشتق بالنسبة للزمن سالب. المعامل A_{21} الذي، تم إدخاله بهذه الطريقة، هو ثابت موجب ويدعى معدل الانبعاث التلقائي أو معامل أينشتاين للانبعاث التلقائي. ولقد توصل إليه أينشتاين حينها من تطبيق اعتبارات الترموديناميك الحراري.

ان الكمية $\tau = 1/A_{21}$ هي مدة حياة الانبعاث التلقائي (أو مدة حياة الحالة المشعة). و نكتب بشكل عام:

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right) = -\frac{N_2}{\tau} \qquad (6)$$

حيث إنّ τ هي مدة حياة الانحلال اللاإشعاعي لطاقة السوية . نلاحظ أن القيمة العددية للمعاملA_{21} وكذلك τ تتوقف فقط على الانتقال المعتبر. ومن جانب آخر، فإن A_{21} للانحلال غير المشع لا يتوقف فقط على الانتقال و إنما أيضا على خواص الوسط المحيط.



الشكل (5-3): آلية حدوث الانبعاث التلقائي.

3-4 الانبعاث المحفز

لنفرض الآن أن الذرة في البدء كانت في السوية (2) وأن موجة كهرومغناطيسية ترددها $\nu = \nu_0$ يساوي تردد الموجة الصادرة بشكل تلقائي وباعتبار أن لهذه الموجة تردد الانتقال الذري ذاته، لذلك توجد احتمالية كاملة لأن يؤثر حقل هذه الموجة قسريا على الذرة لتشرع في الانتقال $2 \rightarrow 1$. في هذه الحالة يتحرر فرق الطاقة $E_2 - E_1$ على شكل موجة كهرومغناطيسية تتضاف إلى الموجة الواردة .وهذه هي ظاهرة الانبعاث المحفز.

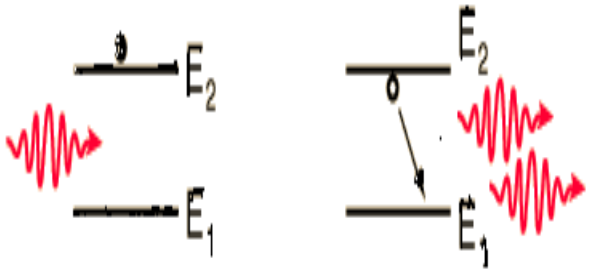
يوجد فرق أساسي بين عمليتي الانبعاث التلقائي و الانبعاث المحفز. في حالة الانبعاث التلقائي تصدر الذرات أمواجا كهرومغناطيسية ولا توجد علاقة محددة تربط بين أطوار هذه الموجات. إضافة لذلك فإن الموجة تصدر فأي اتجاه ، لكنها تصدر بشكل مختلف في حالة الانبعاث المحفز باعتبار أن العملية قد تمت قسريا بواسطة الموجة الكهرومغناطيسية الواردة مما يؤدي إلى إضافة طور الموجة الصادرة إلى طور الموجة الواردة وفي نفس الاتجاه عند الإصدار.

الشكل (5-4) يوضح ظاهرة الانبعاث المحفز و تتمثل إحتمالية الانبعاث المحفز بمعدل الإنتقال من E_1 إلى E_2 بالعلاقة التالية :

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right) = -B_{21}N_2 \qquad (7)$$

حيث إنّ $\frac{dN_2}{dt}$ هو المعدل الذي تتم وفقه الانتقالات $2 \rightarrow 1$ كنتيجة للانبعاثات المحفزة وأن B_{21} هو معدل الانبعاث المحفز. وكما هو الحال في تعريف المعامل A_{21} بالمعادلة (5-5) ، فإن

المعامل B_{21} له أيضا مقلوب زمن $(time)^{-1}$ وخلافا للمعامل A_{21} فإن B_{21} لا يتوقف على الانتقال الخاص ولكن يعتمد على شدة الموجة الكهرومغناطيسية الواردة . وبصورة أدق فإنه في حالة موجة مستوية سوف نبرهن على أنه يساوي أيضا أبعاد مقلوب زمن $(time)^{-1}$.



الشكل (5-4): آلية حدوث الانبعاث المحفز

لدينا :

$$B_{21} = \sigma_{21} F \qquad (8)$$

حيث F تمثل تدفق الفوتونات للموجة الواردة و σ_{21} هي كمية لها وحدة السطح وتدعى المقطع العرضي للانبعاث المحفز ، تتوقف هذه الكمية على خصائص الانتقال المعين فقط .

لنفرض الآن أن الذرة موجودة في البداية في السوية (1). فإذا كانت هذه السوية هي السوية الأساسية فسوف تبقى في هذه السوية ما لم يؤثر فيها محرّض خارجي . والآن لنفرض أن موجة كهرومغناطيسية ترددها يتحدد بالمعادلة (2) وردت على المادة. ففي هذه الحالة هناك احتمالية معينة لانتقال الذرة إلى السوية (2) وتحصل الذرة على فرق الطاقة $E_2 - E_1$ اللازمة لهذا الانتقال من الموجة الكهرومغناطيسية الواردة وهذه تمثل عملية الامتصاص.

وبطريقة مشابهة لتعريف $\mathbf{B_{21}}$ في المعادلة (7) يمكن أن نعرّف معدل الامتصاص B_{12} بالمعادلة :

$$\left(\frac{dN_1}{dt}\right) = -B_{12} N_1 \qquad (9)$$

حيث إن $\frac{dN_1}{dt}$ هو معدل الانتقالات $1 \rightarrow 2$ العائدة للامتصاص و N_1 هو إسكان السوية (1) وهو يمثل عدد الذرات (في وحدة الحجم) الموجودة في زمن معين فيها . و كما في المعادلة (8) نستطيع كتابة :

$$B_{12} = \sigma_{12} F \qquad (10)$$

حيث ان σ_{12} مساحة مميزة (للمقطع العرضي للامتصاص) التي تتوقف على الانتقال المعين.

لقد حاولنا فيما سبق شرح ظاهرتي الانبعاث التلقائي والانبعاث المحفز وعملية الامتصاص. ويمكن وصف هذه العمليات بدلالة مفهوم الفوتونات كما يلي:

في عملية الانبعاث التلقائي تصدر الذرة فوتونا أثناء انتقالها من السوية (2) إلى السوية (1).

أ. في عملية الانبعاث المحفز يحرّض الفوتون الوارد الذرة للانتقال من السوية (2) إلى السوية (1) ومن ثم نحصل على فوتونين (الفوتون المحرّض والفوتون المتحرّض).
ب. أما في عملية الامتصاص فإن الفوتون الوارد يمتص لنقل الذرة من السوية (1) إلى السوية (2).

ومما تجب ملاحظته وأثبته أينشتاين في بداية القرن العشرين، أنه عندما تكون كل من السويتين لا غير منحلة فإن $B_{12}=B_{21}$ وهذا يعني تساوي احتمالية الانبعاث المحفز والامتصاص ولهذا سنعتبر منذ الآن أن $\sigma_{21} = \sigma_{12}$ و عليه يمكننا أن نكتب:

$$g_2 B_{21} = g_1 B_{12} \qquad (11)$$

وبالتالي يكون:

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

بحيث ان g_1 و g_2 يمثلان ازدواجية المستويات.

4-4 التوزيع العكسي

عندما تكون الذرة في حالة إثارة فإن عدد الذرات في المستويات العليا تكون أكبر من عدد الذرات في المستوى الأساسي، وبعبارة أخرى يكون التوزيع معكوس. و يطلق عليه هذه التسمية ،لأن عدد الحالات ذات المستويات الأدنى للطاقة في الوضع الإتزان الحراري (العادي) أكبر من عددها في المستويات العليا للطاقة ، وكلما إرتفع مستوى الطاقة قل عدد الحالات حسب دالة إحصائية تعتمد على درجة الحرارة المطلقة للوسط و على دالة التوزيع ل "ماكسويل بولتزمان" التي تعطى بالشكل :

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{g_2}{g_1} \exp\left(-\frac{\Delta E}{k_B T}\right) \qquad (13)$$

و لكن من أجل حدوث إنبعاث محفز كبير والحصول على فوتونات مترابطة في الطول بعضها مع بعض. لابد من جعل ($N_2 > N_1$) بواسطة تسليط أو ضخ طاقة مناسبة للوسط الفعال لدفع الذرات من السوية (1) إلى السوية (2) وبذلك نقول أنه حصل إنقلاب إسكاني. فالفوتونات التي تتمتع بهذه الإمكانية هي التي يمكن أن تصدر ضوء مضخما-الليزر-.

السلسة 5

الامتصاص و الانبعاث المحفز

التمرين الأول:

تبعا لعلاقات أينشتاين فإن:

$$A_{21}= \rho(\upsilon)\left(\beta_{12}\,\frac{N_1}{N_2} - \beta_{21}\right) \qquad (1)$$

. باستعمال توزيع بولتزمان للإسكان أكتب من جديد العلاقة (1).

إذا اعتبرنا ان العلاقة الناتجة صالحة لكل درجات الحرارة حتى الى ما لا نهاية. بين أن:

$$g_1\,\beta_{12} = g_2\,\beta_{21}$$

. استنتج علاقة جديدة ابتداء من (1) تعطي A_{21} بدلالة B_{21}

. باستعمال علاقة بلانك $\rho(\upsilon)$ استنتج العلاقة التالية:

$$\frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi h}{\lambda^3}$$

التمرين الثاني:

باعتبار أن أطول موجات الانتقالات الهرتيزية يعطى في حدود $\lambda \approx 1\ m$ و أن الانتقالات الضوئية في حدود $\lambda \approx 1\ \mu$

. بين أن الإصدار المحرض يمكن أن يهمل عند الانتقالات الضوئية.

. بين أن الإصدار الآني يمكن أن يهمل عند الانتقالات الهرتيزية.

التمرين الثالث :

ابتداء من العلاقة: $\frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi h}{\lambda^3}$

* بين أن امتصاص خط الرنين يتناسب عكسيا مع مدة حياة الحالة المثارة المعنية.