الباب الأول

أساسيات

1- التركيب الذري.

2- طاقة الربط الإلكترونية ومستويات الطاقة الذرية.

3- الانبعاث الذري.

4- النواة.

5- النظائر.

6- بين الطاقة والمادة.

7- مستويات الطاقة النووية.

8- استقرار الأنوية.

9- الموجات الكهرومغناطيسية (الفوتونات).

* * *

1- التركيب الذري Atomic Structure

تتكون العناصر من وحدات متماثلة، هي الذرات atoms، وتختلف العناصر في خواصها الفيزيائية والكيميائية طبقا لتركيبها الذري atomic structure، ولكون الذرة متناهية الصغر (يبلغ نصف قطر أصغر الذرات- ذرة الهيدروجين- حوالي نصف أنجستروم) (1) لا يمكن رؤيتها بالوسائل المتاحة، ولكن عبر تاريخ من التجارب المعملية والدراسات النظرية أمكن وضع تصور دقيق لها.

لكي نقدم صورة تقترب من الحقيقة للتركيب الذري لابد من الاستعانة بالعديد من أفرع الفيزياء، مثل: الفيزياء الذرية، وعلم الأطياف spectroscopy ، الفيزياء النووية، وفيزياء الكم quantum physics ، وغيرها، مما لا يسمح به المقام . لكننا سنكتفي بطرح تصور بسيط عبر استعراض المكونات الأساسية.

تتكون الذرة من نواة nucleus تقع في مركزها، ويتركز فيها جل كتلتها وتشغل حيزًا صغيرًا (2) منها، وتحتوي على الجزء الموجب من الشحنات و«تلف» حولها إلكترونات سالبة الشحنة (3)، ضئيلة الكتلة (4)، ومجموع الشحنات السالبة للإلكترونات يساوي الشحنة الموجبة الموجودة في النواة، وبالتالي تكون الذرة في حالتها العادية متعادلة الشحنة.

طبقا لنظرية بوهر Bohr تكون الإلكترونات حول النواة في حركة دائمة في «مدارات» مغلقة، وتمثل هذه المدارات مستويات الطاقة داخل الذرة energy levels، يميز كل منها بعدد n يُسمى العدد الكمي الرئيس principal quantum number ، يأخذ القيم الصحيحة1 ، 2 ، 3، 4 ..... ، كلٌّ يقابل مستوى للطاقة energy level.

للإلكترون أثناء حركته في المستويات المختلفة حول النواة قيمة معينة للطاقة، طبقًا للمستوى الذي تتحرك فيه تتزايد طاقة الإلكترون كلما بَعُدَ المستوى عن النواة. المستوى الأول للطاقة (n=1)، الأقرب للنواة هو الأقل طاقة، وكلما زادت n كلما زادت طاقة

---

(1) أنجستروم = 10^{-10} متر.

(2) نصف قطر النواة ~ 10^{-14} متر.

(3) شحنة الإلكترون = 1.6×10^{-19} كولوم.

(4) كتلة الإلكترون = 9.11×10^{-31} كيلوجرام.

المستوى. يسمى المستوى الأول «القشرة» K (shell K)، والمستوى الثاني L، والثالث M .....، هكذا:

العدد الكمي الرئيس n	1	2	3	4	5	6	7
مستوى الطاقة	الأول	الثاني	الثالث	الرابع	الخامس	السادس	السابع
الرمز	K	L	M	N	O	P	Q

أقصى عدد لمستويات الطاقة في الحالة المستقرة الغير مستثارة هو سبعة، والحد الأقصى لعدد الإلكترونات التي تشغل مستويات الطاقة من المستوى الأول حتى الرابع يُعطى بالعلاقة $2n^2$، فمثلًا ذرة النحاس التي تحتوي على 29 إلكترون (الرقم الذري 29) تتوزع كالآتي: 2 في المستوى K و8 في المستوى L و 18 في المستوى M، وإلكترون واحد في المستوى N. لا تنطبق القاعدة السابقة على المستويات الأعلى من الرابع.

ينتقل الإلكترون من مستوى أدنى للطاقة إلى آخر أعلى، إذا امتصت الذرة قدرًا من الطاقة يساوي تماما الفرق ما بين طاقتي هذين المستويين، وعند انتقال أحد إلكتروناتها من مستوى أعلى لآخر أقل طاقة ينبعث من الذرة قدر من الطاقة، قد يظهر على صورة انطلاق فوتون بطاقة تساوي الفرق بين طاقتي المستويين.

بالرغم من بساطة نموذج بوهر للذرة، وأنه قدم تفسيرًا لطيف ذرة الهيدروجين، وتصورًا لمستويات الطاقة وانتقال الإلكترونات، إلا أنه فشل في أن يقدم تفسيرًا لأطياف الذرات الأعقد، وإن الحديث عن حركة الإلكترونات في مدارات مغلقة حول النواة وتواجد الإلكترون في مكان معين في لحظة معينة هو تصور مبسط غير دقيق.

كانت الحاجة ماسة إذن لتصور آخر يعالج هذا القصور، ويقدم تفسيرًا أقرب إلى الحقيقة للبناء الذري atomic structure. لقد جاء هذا التطور المهم عبر معالم محددة تؤسس للنظرية الذرية الحديثة أهمها:

الطبيعة المزدوجة للإلكترون Daul Character :

أي أن الإلكترون (وجسيمات نووية، أيضًا) يملك خواص الجسيم المادي من كتلة، وكمية حركة، كما أن له أيضًا طبيعة موجية تعبر عن نفسها في صور الخواص الموجية المعروفة من تداخل وحيود. لقد جسمت علاقة دي برولي de Broglie ($\lambda = h/p$) هذه الخاصية المزدوجة، يمثل الطرف الأيسر منها الطبيعة الموجية، λ: هي الطول الموجي للموجات التي تصاحب الجسيم، ويمثل الطرف الأيسر منها الطبيعة الجسيمية له، حيث p هي كمية حركة الجسيم، $p = mv$ ، حيث m هي الكتلة و v هي السرعة، أما h فتمثل ثابت بلانك.

مبدأ عدم التيقن The Heisenberg Uncertainty Principle :

حيث لا يمكن تحديد كل من موقع وسرعة (كمية حركة) الإلكترون بكل دقة في آن واحد، كما افترضت نظرية بوهر ولكن الدقة في تحديد الموقع تكون على حساب الدقة في تحديد السرعة، والعكس صحيح، كما أن الدقة في تحديد الطاقة تكون على حساب الدقة في تحديد الزمن. لقد صاغ هيزنبرج مبدأ عدم التحديد رياضيًّا عبر العلاقة:

$$\Delta q \Delta p \geq h/2\pi$$

حيث Δq هي عدم التيقن (عدم الدقة) في تحديد الموقع، Δp هي عدم التيقن في تحديد كمية الحركة [1]، و h هو ثابت بلانك.

هذه الإنجازات العلمية المهمة أدت إلى التوصل إلى معادلة موجية، تُعتبر بحق محور فيزياء الكم، والذي يمثل التوصل إلى تصور دقيق للتركيب البنائي للذرات أحد أهم إنجازاته، إنها معادلة شرودنجر الموجية Schrodinger wave equation؛ إنها معادلة تفاضلية جزئية خطية من الرتبة الثانية والدرجة الأولى، وبحلها لمسألة معينة محددة الجهد والشروط الحدية، يمكن التوصل إلى شكل الدالة الموجية eigen function، وتحديد مستويات الطاقة المسموح بها eigen values لهذه المسألة.

بالرغم من أن الدالة الموجية لا يمكن قياسها بصورة مباشرة، فإن شدتها حاصل ضرب

---

(1) هناك علاقة ثانية لمبدأ عدم التيقن تربط الطاقة والزمن : $\Delta E \Delta t \geq h/2\pi$ ، حيث ΔE هي عدم التيقن في تحديد الطاقة، و Δt هي عدم التيقن في تحديد الزمن. ΔE قد تعبر عن سمك مستوى الطاقة، و Δt تعبر عن الفترة الزمنية التي يبقاها الإلكترون في مستوى مستثار قبل أن يعود إلى المستوى الأرضي، أي العمر الزمني life time لعملية الانتقال تلك.

الدالة الموجية ومرافقها المركب، يمثل الاحتمال النسبي لتواجد الجسيم عند موضع ما في زمن ما. صار الأقرب إلى الحقيقة طبقا لميكانيكا الكم والميكانيكا الموجية، هو الحديث عن سحابة إلكترونية electron cloud، يمكن وصفها بدالة موجية ذات طبيعة احتمالية تمثلها دالة توزيع إحصائي probability distribution function ، تعبر عن احتمال تواجد الإلكترون في مكان ما في زمن ما بدلا من الحديث عن موضع معين وسرعة معينة للإلكترون.

في ثنايا حل معادلة شرودنجر في الأبعاد الثلاثة لجهد يتمتع بتماثل كروي spherically symmetric وتطبيق الحل على ذرة الهيدروجين، وُجد أن حالة الإلكترون يحددها أربعة أعداد كمية:

عدد الكم الرئيس principal quantum number :

هو نفس العدد n الذي استخدمه بوهر من قبل في تحديد مستويات الطاقة لذرة الهيدروجين، ويأخذ قيمًا صحيحة ولا يساوي الصفر، $n = 1,2,3,4,.....$ ، وقيمته تحدد المستوى الرئيس للطاقة وتشير إلى «المدار» orbit، أو القشرة shell الذي «يتحرك» فيه الإلكترون.

عدد الكم لكمية الحركة الدورانية l / ngular momentum quantum number:

مستويات الطاقة الرئيسة التي يعبر عنها العدد الكمي n تنقسم إلى مستويات فرعية subshells. هذه المستويات الفرعية يعبر عنها العدد الكمي l (الشكل (1-1)). لكل قيمة معينة من n تأخذ l القيم الصحيحة $l = 0,1,2,3,4,.....(n-1)$. الدوال الموجية التي تمثل المستويات الفرعية تُسمى «أوربتالات» orbitals، والتي يُشار إليها بالرموز الطيفية s, p, d, f, g,.. والتي تقابل قيم $l = 0,1,2,3,4,.$ ، على الترتيب:

n (المستوى الرئيس)	1	2	3	4
l (المستويات الفرعية)	0	0,1	0,1,2	0,1,2,3
الرموز الطيفية	**s**	s,p	s,p,d	s,p,d,f

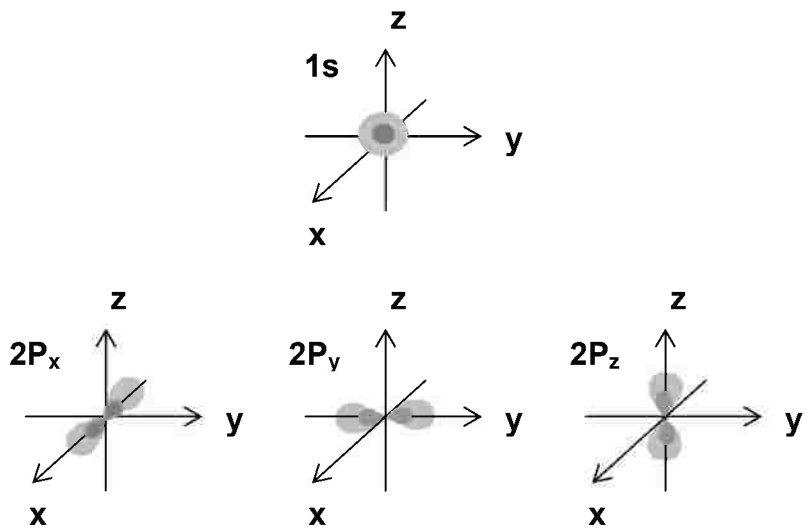
عدد الكم المغناطيسي magnetic quantum number m أو m_l :

لكل قيمة من l توجد $2l+1$ من القيم للعدد الكمي المغناطيسي m_l وهي $l,\ l-1,\ l-2,....,0,\ -1,.....,-l$. يمثل عدد الكم المغناطيسي عدد الأوربيتالات التي يحتويها مستوى فرعي معين، أي يساوي $2l+1$، فمثلًا المستوى الفرعي s يحتوي على أوربيتال واحد، حيث $l=0$ ومن ثَم $2l+1=1$، والمستوى الفرعي p يحتوي على ثلاث أوربيتالات، حيث $l=1$ ومن ثَم $2l+1=3$، وهكذا.

	المستويات الرئيسة (n)	المستويات الفرعية (l)
N	4	**4f** **4d** **4p** **4s** — l = 0,1,2,3
M	3	**3d** **3p** **3s** — l=0,1,2
L	2	**2p** **2s** — l = 0,1
K	1	**1s** — l = 0

شكل (1-1). العلاقة بين مستويات الطاقة الرئيسة والمستويات الفرعية. الرقم المكتوب على يسار الرمز الذي يعبر عن المستوى الفرعي يشير إلى المستوى الأساس.

شكل الأوربيتال يعبر عن كثافة التوزيع التي تصف احتمال تواجد الإلكترون density distribution وهو كروي، متماثل حول النواة (□)، في حالة المستوى الفرعي s. أما في حالة المستوى الفرعي p تأخذ كثافة التوزيع لكل من للأوربيتالات الثلاثة شكل كمثريتين متقابلتين على امتداد المحاور المتعامدة، ويرمز لهم بـ p_x، p_y و p_z (الشكل (2-1)).



شكل (2-1) توزيع الكثافة الاحتمالية لبعض الأوربيتالات

ترجع التسمية «مغناطيسي» إلى الدور الذي يلعبه عدد الكم المغناطيسي m_l في التمييز بين مستويات الطاقة وبالتالي انفلاق خطوط الطيف في وجود المجال المغناطيسي (□).

(□) لانعدام كمية الحركة الزاوية في هذه الحالة، حيث تُعطى بالعلاقة $l = 0$ $h/2\pi$ $\sqrt{l(l+1)}$.

(2) من مبادئ النظرية الكهرومغناطيسية، يصاحب العروة التيارية current loop (شحنة كهربية (إلكترون) تتحرك في مسار مغلق) عزم مغناطيسي magnetic moment μ_l ناتجًا عن كمية الحركة الزاوية الناتجة عن الحركة الدورانية للشحنة. إذا أثر مجال مغناطيسي $\vec{B}$ على إلكترون يتحرك حركة دائرية فثَمة تفاعل يحدث بين العزم المغناطيسي μ_l والمجال المغناطيسي يتولد على إثره عزم ازدواج torque $\vec{\mu}_l \times \vec{B}$، والذي يؤدي إلى دوران متجه كمية الحركة الدورانية $\vec{L}$ حول المجال المغناطيسي بتردد ω_e، ويكون التغير في الطاقة الذي يصاحب ذلك التفاعل: $\Delta E = \pm \frac{h}{2\pi} \omega_e$ حيث تشير الإشارة إلى اتجاه الدوران. فرق الطاقة هذا هو المسئول عن انفلاق خطوط الطيف عند التأثير بمجال مغناطيسي.

عدد الكم المغزلي spin quantum number:

فضلا عن حركة الإلكترون حول النواة، يتحرك حركة مغزلية spin حول محوره. هذه الحركة إما أن تكون في عكس اتجاه حركة عقارب الساعة counterclockwise، ويشار للحركة المغزلية في هذه الحالة بالرمز (↑) (spin up) أو أن تكون الحركة المغزلية للإلكترون في نفس اتجاه حركة عقارب الساعة clockwise، ويشار للحركة المغزلية حينئذ بالرمز (↓) (spin down). يصاحب اللف المغزلي للإلكترون كمية حركة زاوية spin angular momentum تساوي $\pm h/2\pi$ (h هي ثابت بلانك). لا يتسع أي أوربتال لأكثر من إلكترونين، لف أحدهما المغزلي عكس لف الآخر. يقال: إن الإلكترونين حينئذ في حالة تزاوج paired ويُرمز لذلك بالرمز (↓↑).

لمزيد من الإيضاح، نطبق القواعد السابقة على حالة بعينها، كيف يتم توزيع إلكترونات ذرة ما في مستويات الطاقة المختلفة، لتكن ذرة الصوديوم والتي عددها الذري، Z=11 :

1s (إلكترونان)، 2s (إلكترونان)، $2p$ (ست إلكترونات، اثنان لكل من الأوربيتالات $2p_x$ ، $2p_y$ ، $2p_z$)، 3S (إلكترون واحد)، ليكون المجموع 11 إلكترونًا.

ثَمة ملاحظة يجب تأكيدها قبل التحول لموضوع آخر: بالرغم من عدم دقة التصور أن الإلكترون يتحرك في مدارات حول النواة، وأنه يلف حول نفسه في حركة مغزلية أيضا، وأن الأصح أن تُحدد حالته من خلال حل معادلة شرودنجر، ومعرفة الدالة الموجية، وقيم الطاقة المميزة من خلال أعداد الكم، يظل هذا التصور البسيط مفيدًا في بعض الأحيان، خاصة عند تناول الموضوع من قبل غير المختصين أو الطلاب المبتدئين.

2 – طاقة الربط الإلكترونية ومستويات الطاقة الذرية

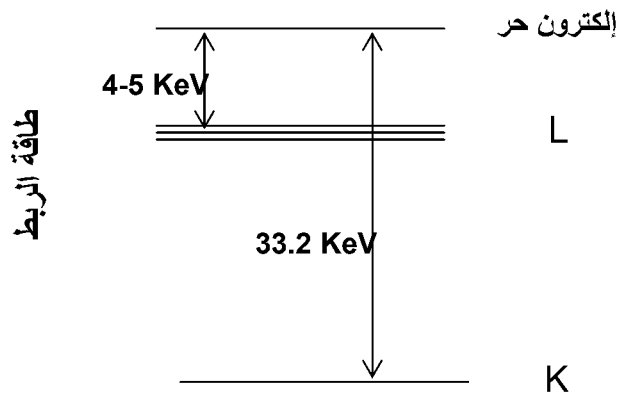
Electorn Binding Eenergy and Atomic Enenrgy Leves

في الذرات المستقرة، تُشغل أولا المدارات الأقرب إلى النواة innermost shells ولقربها من النواة تكون الأكثر ارتباطًا بها. من الممكن أن تنتقل الإلكترونات من مدار لآخر أعلى (استثارة excitation)، أو حتى تترك الذرة تماما (تأين ionization)، إذا ما مُدت بقدر من الطاقة يكفيها للتغلب على الطاقة التي تربطها بالنواة، تلك الطاقة يمكن أن

تتوفر بطرق مختلفة كأن تصطدم الذرة بجسيم آخر، أو أن تمتص فوتونًا، مثلا الطاقة اللازمة لتحريك إلكترون من مدار لآخر أعلى تساوي تماما الفرق بين طاقتي الربط في هذين المدارين.

طاقة الربط Binding Energy ، E_B لمدار معين هي تلك الطاقة اللازمة لإزالة إلكترون من هذا المدار إلى خارج الذرة تماما، وعلى هذا تكون $E_{BK} > E_{BL} > E_{BM}$..... . حيث E_{BK} هي طاقة الربط للمدار K و E_{BL} هي طاقة الربط للمدار L،.....، وهكذا.

يمكن تمثيل طاقات الربط الإلكترونية على مخطط لمستويات الطاقة energy level diagram. يوضح الشكل (3-1) مثل هذا المخطط للمدارين K ، و L في ذرة اليود iodine. المستوى الأدنى يمثل الإلكترون الأقوى ارتباطًا بالنواة وفوق هذا المستوى يقع باقي المستويات، والمستوى الأعلى في الشكل يمثل إلكترون حر unbound (free) electron:



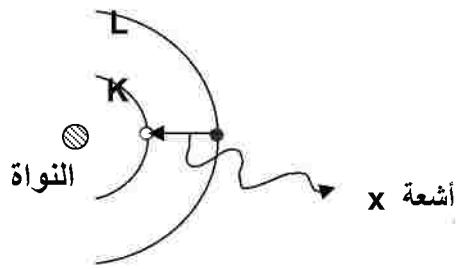
شكل (3-1). مستويا الطاقة K وL لذرة اليود. المحور الرأسي يمثل الطاقة اللازمة لإزالة إلكترون مداري من الذرة تماما (طاقة الربط).

المسافة الرأسية (على تدريج الطاقة) بين K وأعلى مستوى تمثل طاقة الربط له و هي تساوي 33.2 Kev في حالة ذرة اليود.

3 - الانبعاث الذري[1] Atomic Emission

3-1 الأشعة السينية x rays

إذا ما أُذيل إلكترون من أحد المدارات الداخلية inner shells، فغالبا ما ينتقل إلكترون من مدار أبعد outer shell ليملأ الفراغ الذي تركه الإلكترون الأول، ومن ثَم ينطلق قدر من الطاقة يساوي الفرق بين طاقة الربط للمدارين، وقد تظهر هذه الطاقة المنطلقة على هيئة فوتونات للأشعة السينية x rays ، ونظرًا لأن الفرق في الطاقة بين المستويات المختلفة داخل الذرة هو:



شكل (4-1). انطلاق أشعة x المميزة نتيجة انتقال إلكترون من مدار خارجي ليملأ فراغا في مدار داخلي.

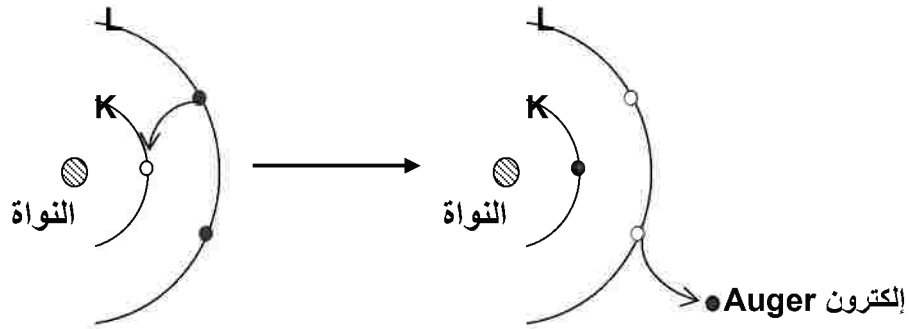
صفة مميزة لكل ذرة يتوقف على التركيب البنائي لها، فإن الأشعة المنطلقة تُسمى الأشعة المميزة characteristic radiation ، أو الأشعة السينية المميزة characteristic x rays. الشكل (4-1) عبارة عن شكل تخطيطي لهذه العملية.

3-2 إلكترونات Auger

هناك احتمال بديل لانطلاق أشعة x المميزة، فعندما يسقط إلكترون من مستوى خارجي ليملأ فراغًا في المستوى الداخلي تنتقل الطاقة التي تمثل الفرق بين المستوى الذي يسقط منه الإلكترون، والمستوى الذي به الفراغ إلى إلكترون مداري آخر، فينطلق ذلك الأخير تاركًا الذرة بدلا من انبعاث فوتونات أشعة (شكل (5-1)). يُسمى هذا الإلكترون Auger

(1) المقصود هنا: ذلك الذي نقابله في مجال الطب النووي، وإلا فالمصطلح أوسع معنى من ذلك.

electron وطاقة حركة هذا الإلكترون المنطلق تساوي $(E_{BK} - E_{BL}) - E_{BL}$، أي تساوي $E_{BK} - 2E_{BL}$ ، وذلك بفرض أن الإلكترون كان قد سقط من المدار L إلى المدار K.



شكل (5-1). انطلاق إلكترون Auger بدلًا من أشعة x.

بانطلاق إلكترون Auger يكون لدينا فراغان، هذان الفراغان يملآن بإلكترونين من مدارين خارجيين، ويصاحب هذه العملية الجديدة انبعاث أشعة x المميزة أو إلكترونين من إلكترونات Auger، وقد يحدث انطلاق فوتون أشعة x وإلكترون Auger معا، أيهما يحدث؟ تلك مسألة احتمالات.

4 - النواة The Nucleous

تتكون النواة من جسيمات موجبة الشحنة تسمى **بروتونات** protons، وأخرى متعادلة الشحنة تسمى **نيوترونات** neutrons والبروتون جسيم نووي كتلة السكون (1) له 1.67×10^{-27}Kg وتمثل كتلته حوالي 1840 ضعف كتلة الإلكترون وله شحنة موجبة مساوية في المقدار لشحنة الإلكترون وعدد البروتونات في الذرة المتعادلة يساوي عدد الإلكترونات. أما النيوترونات فهي جسيم متعادل الشحنة كتلته تساوي تقريبا كتلة البروتون وهو في حالته الحرة (أي عند تواجده خارج النواة) غير مستقر فيبقى على حالته تلك 12 ثانية

(1) طبقا للنظرية النسبية تتغير كتلة الجسيم m التي تتحرك بسرعة عالية v تقترب من سرعة الضوء c بتغير سرعته، فهي تزيد بزيادة السرعة طبقًا لـ $m = m_0 / \sqrt{1-(\frac{v}{c})^2}$ ، حيث m_0 هي كتلة السكون.

في المتوسط، ثم لا يلبث أن يتحول إلى بروتون وإلكترون، وجسيم أولي آخر elementary particle يسمى مضاد النيوترينو antineutrino .

1-4 تعريفات مهمة

الرقم الذري Atomic Number:

يُعرف الرقم الذري بأنه عدد البروتونات الموجودة في نواة هذا العنصر، وهو بالطبع عدد الإلكترونات في الذرة المتعادلة ويرمز له بالرمز Z.

الرقم الكتلي Mass Number:

يساوي عدد البروتونات والنيوترونات الموجودة في النواة ويرمز له بالرمز A والرقم الكتلي يساوي تقريبًا كتلة الذرة، حيث يمثل كل من البروتون والنيوترون أكبر المكونات كتلة، ويكتب الرقم الكتلي عادة في الطرف الأيسر العلوي من رمز العنصر بينما يكتب الرقم الذري (عدد البروتونات) في الطرف الأيسر السفلى منه فمثلا يرمز لنواة ذرة الهيليوم بالرمز $^{4}_{2}He$ ، حيث تحتوي على اثنين من البروتونات واثنين من النيوترونات.

وحدة الكتلة الذرية Atomic Mass Unit:

في مجال الفيزياء الذرية والنووية نتعامل مع كتل غاية في الضآلة، ومن ثَم يكون من غير المناسب استخدام الوحدات العادية للكتل، والوحدة الأساسية المستخدمة في هذا المجال هي وحدة الكتل الذرية atomic mass unit (amu)، وهي تساوي تماما (1/12) من كتلة ذرة الكربون- 12 ($^{12}_{6}C$) وتبلغ قيمتها $1.66\times10^{-27}\,kg$، ولقد اتفق العلماء بعد محاولات شتى على استخدام C-12 لتعريف هذه الوحدة لاستقرار هذا النظير ولوفرته.

إذن 1 amu = $\frac{1}{12}$ من كتلة $^{12}_{6}C$

ومن ثم تكون كتل الجسيمات الذرية بهذه الوحدات كالآتي:

كتلة الإلكترون = 0.000548 amu

كتلة البروتون = 1.00727 amu

كتلة النيوترون = 1.00727 amu

ونظرا لأن كتلة الإلكترون صغيرة جدًّا بالنسبة لكتلة كل من البروتون والنيوترون، وأن كتلة البروتون تساوي تقريبًا كتلة النيوترون، وأن كلا يساوي تقريبا 1 amu فإن كتلة الذرة بوحدات amu تساوي (تقريبا) الرقم الكتلي A. من المهم أن نذكر (وسيأتي بعد ذلك تفصيل) أن كتلة النواة لا تساوي مجموع كتل مكوناتها بل أقل قليلا وهذا الفارق الضئيل، كان قد تحول عند تكون النواة إلى طاقة لربط مكوناتها. هذا الفارق يسمى الخلل الكتلي mass defect.

إلكترون فولت Electron Volt (ev)

إحدى وحدات الطاقة الشائع استخدم مضاعفاتها في مجال الطاقة النووية وتعرف على أنها الطاقة التي يكتسبها الإلكترون عند وقوعه تحت تأثير فرق للجهد قيمته واحد فولت وهي تساوي 1.6×10^{-19} جول (نظرا لأن شحنة الإلكترون تساوي 1.6×10^{-19} كولوم). مضاعفات هذه الوحدة التي كثيرا ما تستخدم هي: كيلو إلكترون فولت $kev = 10^3\,ev$، ميجا (mega) إلكترون فولت فولت $Mev = 10^6\,ev$.

2-4 نصف قطر النواة وكثافة المادة النووي

من خلال تحليل العديد من النتائج التجريبية، أمكن التوصل إلى العلاقة التجريبية empirical التي تعطي تقديرًا لنصف قطر النواة r كدالة في عددها الكتلي A :

$$r = r_0 A^{\frac{1}{3}}$$

حيث: r_0 كمية ثابتة، قيمتها $1.2\times10^{-13}\,cm$.

تدلل هذه العلاقة أن:

- القوى النووية التي تربط الجسيمات النووية داخل النواة (النيوكليونات nucleons، البروتونات أو النيوترونات) لا تعتمد على الشحنة، فهي تتواجد بين النيوترون والنيوترون، $n-n$، وبين البروتون والبروتون $p-p$ وبين البروتون والنيوترون $p-n$، ذلك لأن الذي يحدد نصف القطر هي تلك القوى التي تجمع هذه الجسيمات إلى بعضها، وأن نصف القطر يحدده العدد الكتلي (الذي يشمل البروتونات والنيوترونات).

- الكثافة النووية nuclear density ثابتة لجميع الأنوية:

$$\frac{A}{V}=\frac{A}{\frac{4}{3}\pi r_0^3 A}\approx\frac{1}{r_0^3}$$

هذه العلاقة الأخير تمثل الكثافة العددية (عدد النيوكليونات لوحدة الحجوم) ولتحويلها لكثافة مادية نضربها في كتلة النيوكليون، 10^{-24} g ≈، وبهذا يتضح أن كثافة المادة النووية في حدود 10^{12} مرة من كثافة المادة العادية.

5- النظائر Isotopes

يقال: إن للعنصر الواحد نظير أو أكثر، إذا كان لأنوية هذه النظائر نفس عدد البروتونات (أي لها نفس العدد الذري Z) واختلفت في العدد الكتلي A، أي تحتوي الأنوية على أعداد مختلفة من النيوترونات N فمثلا للهيدروجين ثلاثة نظائر؛ وهي الهيدروجين ^1_1H، والذي يطلق عليه الهيدروجين الخفيف، والديوتيريم deuterium ^2_1H ويسمى الهيدروجين الثقيل والتريتيم tritium ^3_1H، وبصفة عامة يوجد لكل عنصر عدة نظائر بعضها يتواجد في الطبيعة، والبعض يمكن إنتاجه صناعيًّا باستخدام المعجلات والمفاعلات النووية، وغالبا ما يتواجد العنصر في الطبيعة على هيئة خليط من نظائره، وأحيانا تحتاج عملية فصل النظائر مستوى راق من التقنية.

لا تختلف نظائر العنصر الواحد فيما بينها في خواصها الكيميائية، حيث تعتمد تلك الخواص على تكوين الروابط المختلفة بين الذرات، والتي بدورها تعتمد على التركيب الإلكتروني لهذه الذرات، ومن ثَم تعتمد على الرقم الذري Z الذي هو واحد لجميع نظائر العنصر الواحد.

تختلف النظائر فيما بينها من حيث سلوك الأنوية؛ فمنها المستقر، ومنها غير المستقر النشط إشعاعيًّا radioactive فتتفكك مصدرة جسيمات نووية، وأشعة كهرومغناطيسية، فبينما النظيران ^1_1H و ^2_1H مستقران يكون النظير ^3_1H مشعا.

تعميمًا للفائدة نذكر بعض المصطلحات الأخرى الشائعة الاستخدام:

- الأنوية التي لها نفس العدد الكتلي A وتختلف في العدد الذري Z (مثل $^{130}_{54}Xe$, $^{130}_{53}I$ كذلك $^{131}_{55}Cs$, $^{131}_{54}Xe$, $^{131}_{53}I$) تسمى Isobars.

- الأنوية التي لها نفس عدد النيوترونات N وتختلف في العدد الذري Z (مثل $^{133}_{55}Cs$, $^{132}_{54}Xe$, $^{131}_{53}I$ ، فعدد البروتونات لكل منها يساوي 78) تُسمى Isotones.

– الأنوية التي لها نفس العدد الكتلي A والعدد الذري Z ، ومع هذا تختلف في خواصها الإشعاعية (أي في محتوى الطاقة) تسمى Isomeres ، وعند كتابة رمزها يتبع العدد الكتلي بالحرف m تمييزا لها وذلك مثل ^{99m}Tc Technetium-99m . تلك الحالة، Isomeric state ، تمثل حالة مستثارة للنواة بعمر يمكن قياسه ، أي تبقى النواة على حالتها المستثارة تلك فترة زمنية يمكن قياسها واستخدامها في تطبيقات مختلفة، تلك الحالة نشير إليها بالحالة شبه المستقرة metastable state. يتم التحول من هذه الحالة الأيزوميرية Isomeric state إلى الحالة الأرضية للنواة (أي الحالة المستقرة) بإطلاق فوتونات جاما:

$$^{99m}Tc \rightarrow {}^{99}Tc + \gamma$$

6 - بين الطاقة والمادة

يبدو الأمر كما لو كانت المادة والطاقة شيئين مختلفين، فمثلا المادة لها وزن، بينما الطاقة لا توزن. غير أنه يمكن النظر للمادة كما لو كانت نوعًا آخر من الطاقة كثيفة القوام، حيث يمكن القول بأن الطاقة يمكن تخزينها داخل المادة، ومن خلال بعض العمليات الفيزوكيميائية يمكن لجزء من المادة أن يتحول إلى طاقة. ألا يؤدي هذا إلى الظن بأن المادة والطاقة هما في حقيقة الأمر صورتان لشيء واحد؟

توصل أينشتين من خلال النظرية النسبية الخاصة إلى علاقة بين الكتلة m (المادة) والطاقة E:

$$E = mc^2 \qquad (1-1)$$

حيث c هي سرعة الضوء. والعلاقة تنص على أن الطاقة تتخذ صورة كتلة صغيرة إضافية عندما تخزن في المادة، وتعود الكتلة إلى ما كانت عليه عندما تتحرر هذه الطاقة، والعلاقة تمثل قانونًا واحدًا لحفظ الكتلة والطاقة، وهذا المفهوم سيكون أكثر وضوحا عند تناولنا لموضوع طاقة الربط النووي.

إذا حسبت الكتلة بالكيلوجرامات والسرعة بالمتر/ثانية كانت الطاقة بالجول Joule وباستخدام العلاقة السابقة يمكن حساب ما تكافئه وحدة الكتل الذرية amu من طاقة :

$$1.66\times10^{-27}\,Kg\times(3\times10^{8})^{2}\,m^{2}/sec^{2}$$
$$=1.492\times10^{-10}\,Joule=931Mev$$

1-6 طاقة الربط النووي
Nuclear Binding Energy

كما أسلفنا، تحتوي النواة على بروتونات موجبة الشحنة ونيوترونات متعادلة، ومن ثم كانت هناك قوى تنافر كهروإستاتيكية، فيما بين البروتونات والقوة الكهروإستاتيكية بين شحنتين تتناسب عكسيًّا مع مربع المسافة بينهما، وذلك طبقا لقانون كولوم (1)، وهذه القوى كبيرة القيمة داخل النواة، حيث تتواجد البروتونات في حيز صغير، وكلما زاد عدد البروتونات في النواة كلما زادت قوى التنافر؛ لأن مدى تأثير القوى الكهروإستاتيكية كبير نسبيًّا، فمن المتوقع إذن أن تتناثر هذه البروتونات من محتواها ولكي تحتفظ النواة بكيانها لابد وأن يكون هناك نوع آخر من القوى التجاذبية أكبر كثيرًا من قوى التنافر الكهروإستاتيكية بين البروتونات. تلك هي القوى النووية Nuclear Force والتي تتميز بأنها:

- أكبر بكثير من القوى الأخرى المعروفة كالقوى الكهربية والمغناطيسية وقوى الجاذبية الأرضية.
- ذات مدى قصير جدًّا (أقل من قطر النواة حيث تتواجد داخلها)
- تتواجد بين مكونات النواة المختلفة؛ سواء كانت مشحونة أو غير مشحونة.

لقد وجد أن كتلة النواة ككل أقل من مجموع كتل مكوناتها، وهذا الفرق في الكتلة هو المسئول عن طاقة الربط النووية E_b، فإذا كانت p تمثل عدد البروتونات في النواة وتمثل n عدد النيوترونات، وكتلة كل من البروتون والنيوترون على الترتيب m_p وm_n، وكانت M هي كتلة النواة، فإنه طبقا للعلاقة بين الكتلة والطاقة (العلاقة (1-1)) تكون:

$$E_B=[(pm_p+nm_n)-M]c^2$$

وطاقة الربط بالنسبة للنواة كطاقة التأين بالنسبة للذرة، فكما أن طاقة التأين هي الطاقة اللازم إعطاؤها للإلكترونات المدارية كي تنطلق بعيدا خارج الذرة، فإن طاقة الربط النووي

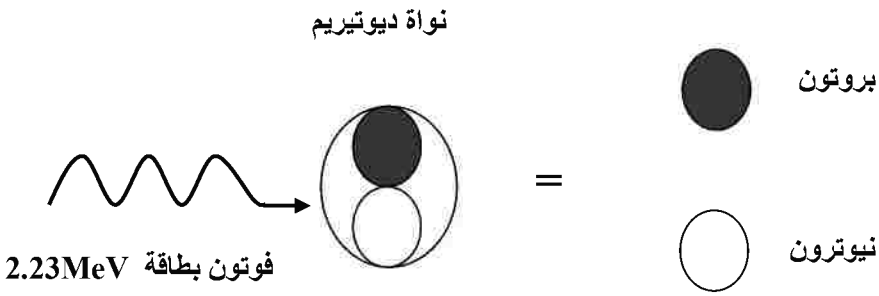
---

(1) القوة الكهروإستاتيكية F بين شحنتين q_1، q_2 تفصل بينهما مسافة r تعطى بقانون كولوم: $F=q_1\times q_2/r^2$.

هي الطاقة اللازم إعطاؤها للنواة كي تتفكك إلى مكوناتها، ولنأخذ مثالًا نواة الديوتيريم $_1^2H$، فكتلتها 2.014102 amu بينما مجموع كتل مكوناتها 2.01649 amu، وبالتالي تكون طاقة الربط:

$$= 2.23MeV = 0.002388amu \times 931MeV$$

وقد تحققت هذه النتيجة عمليًّا فإذا ما سقطت فوتون جاما بطاقة 2.23 Mev على نواة ديوتيريم فلقتها إلى بروتون حر ونيوترون حر (شكل 6-1).



شكل (6-1). فوتون جاما بطاقة 2.23 Mev يفلق نواة
الديوتيريم إلى بروتون حر ونيوترون حر

عادة ما يُعبر عن طاقة الربط لكل نيوكليون nucleon (يطلق النيوكليون على البروتون والنيوترون)، ويتم ذلك بقسمة طاقة الربط الكلية للنواة E_b على العدد الكتلي A أي (A = P+N)، ولكي نتصور كم هي هائلة طاقة الربط النووية تلك نقوم بتحويل إحدى الوحدات المستخدمة في مجالها (1 Mev) إلى وحدة يشيع استخدامها بين الأطباء والمشتغلين بالعلوم الحيوية (البيولوجية)، وهي السعر (cal):

$$1\ eV = 1.6 \times 10^{-19}\ Joule$$
$$1\ Joule = 2.39 \times 10^{-4}\ kcal$$
$$\therefore 1\ eV = 3.82 \times 10^{-23}\ kcal$$
$$1\ amu = 1.66 \times 10^{-27}\ kgram$$
$$\therefore\ 1\ Mev/nucleon = 10^6 \times 3.82 \times 10^{-23}\ kcal/1.66 \times 10^{-27}\ kgram$$
$$= 2.3 \times 10^{10}\ kcal/kgarm$$

أي أن واحد Mev لكل نيوكليون يقابل أكثر من عشرين ألف مليون كيلو سعر لكل كيلوجرام.

7- مستويات الطاقة النووية

للنواة مستويات طاقة تشبه إلى حد ما الكيفية التي تترتب بها مستويات الطاقة للإلكترونات المدارية، غير أن المستويات النووية ذات طاقة أعلى كثيرًا، وهناك نماذج نووية تفسر الطريقة التي تترتب بها هذه المستويات داخل النواة، أحدها نموذج القشرة shell model، والذي تتحدد فيه حركة النيوكليونات nucleons حول بعضها البعض بمجموعة من الأعداد الكمية.

الحالة الأكثر استقرارا لنواة ما تُسمى الحالة الأرضية ground state، حيث تكون طاقة النواة عند قيمتها الدنيا، غير أن هناك وضعان آخران:

- **الحالة المستثارة** excited state: وهي حالة أعلى طاقة وغير مستقرة ذات طبيعة مؤقتة لا تلبث أن تنتقل النواة إلى الحالة الأرضية، وللتعبير عن النواة في حالتها المستثارة تُوضع العلامة * على رمز النظير الذي يمثلها، ${}^{A}_{Z}X^{*}$.

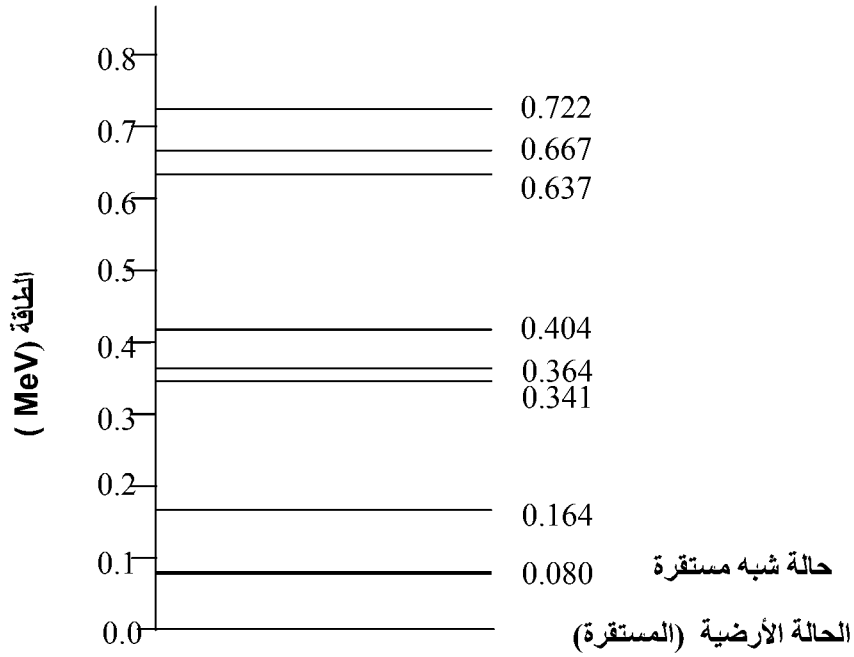
- **الحالة شبه المستقرة** (1) metastable state: وهي حالة غير مستقرة أيضا، لكن عمرها قد يكون أطول كثيرا من عمر الحالة المستثارة (قد يطول متوسط العمر لبعضها إلى بضع ساعات) أي تعود إلى حالة الاستقرار (الحالة الأرضية) بعد زمن أطول وتسمى أيضا الحالة الأيزوميرية ispmeric state، ويضاف الحرف m إلى الرمز الذي يمثلها تمييزًا لها، حيث تُكتب على الصورة ${}^{Am}X$، أو على الصورة X – Am، مثالًا لذلك ${}^{99m}Tc$ أو Tc – 99 m، ونواتا عنصر واحد أحدهما في الحالة شبه المستقرة، والأخرى في حالة الاستقرار تُسميان isomers (مثل ${}^{99m}Tc$ و ${}^{99}Tc$).

الانتقال من ترتيب arrangement معين للنيوكليونات داخل النواة إلى ترتيب آخر، أي من حالة للطاقة إلى حالة أخرى، يصاحبه انطلاق كمية معينة من الطاقة من النواة أو مد النواة بقدر من الطاقة، تماما كما يحدث في حالة انتقال الإلكترونات بين مستويات الطاقة الذرية المختلفة. هذه الترتيبات المختلفة للجسميات النووية داخل النواة قد تؤدي إلى تواجد

---

(1) البادئة meta مشتقة من كلمة يونانية تعني بالعربية تكاد (almost).

النواة في حالة مستثارة أو حالة شبه مستقرة، تلك هي مستويات الطاقة المختلفة، والانتقال من مستوى أعلى للطاقة إلى آخر أقل يؤدي إلى انطلاق كمية محددة discrete للطاقة النووية تخرج على:

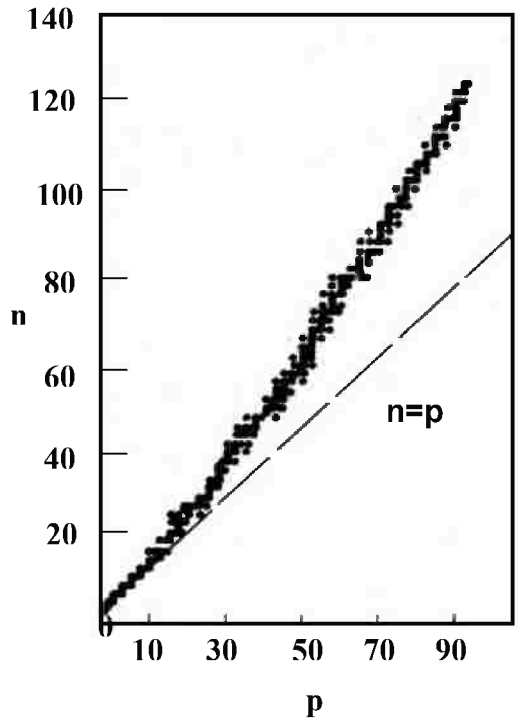


شكل (7-1). مخطط لبعض مستويات الطاقة النووية للنظير Xe^{131}.
تمثل الحالة شبة المستقرة على الرسم بخط أزهى.

هيئة فوتونات جاما وجيسمات نووية، كذلك لكي تتحول النواة من حالة الاستقرار إلى الاستثارة لابد من مد النواة بطاقة خارجية كافية لذلك، غالبا ما تكون عن طريق قذفها بجسيم نووي معجل. شكل (7-1) يعبر عن رسم تخطيطي لبعض من مستويات الطاقة لنواة Xe^{131}.

8 - استقرار الأنوية Nuclear Stability

لوحظ أن هناك ارتباط بين استقرار الأنوية (أي أنها أنوية غير مشعة تلقائيا) ونسبة النيوترونات إلى البروتونات في النواة neutron-to-proto ratio n/p. يلخص الشكل (8-1)، هذه العلاقة حيث تمثل p على المحور:



شكل (8-1). استقرار الأنوية – العلاقة بين النيوترونات والبروتونات للأنوية المستقرة.

الأفقي وتمثل n على المحور الرأسي:

بالنسبة للعناصر المستقرة الخفيفة (حتى Z~ 20) يكون عدد النيوترونات مساوٍ تقريبًا لعدد البروتونات، n/p~1 (انظر شكل (8-1)) وعند زيادة p تبدأ النسبة في الارتفاع عن الواحد. إن زيادة معتدلة في عدد النيوترنات في الأنوية الثقيلة تعزز الاستقرار، ذلك للتغلب على قوى التنافر الكهروإستاتيكية (قوى كولوم) بين البروتونات، فعلينا أن نتذكر أن القوى النووية التي تجعل مكونات النواة مترابطة تتواجد بين النيوكليونات بغض النظر عن كونها مشحونة أو متعادلة، بينما قوى كولوم تتواجد فقط بين الجسيمات المشحونة.

من ناحية أخرى لوحظ ارتباط استقرار الأنوية بكون أعداد النيوترونات والبروتونات زوجي أو فردي even or odd، فمن بين حوالي 300 من النظائر المستقرة المختلفة يكون أكثر من نصفها لها أعداد زوجية من البروتونات والنيوترونات، وتلك يطلق عليها الأنوية زوجي- زوجي (even – even nuclii) وهذا يؤدي إلى التصور أن التزاوج بين

البروتونات والنيوترونات يؤدي إلى الاستقرار. من ناحية أخرى وُجد أن حوالي 20٪ من الثلاثمائة نظير المستقرة تكون عدد بروتوناتها زوجيًّا، وعدد نيوتروناتها فرديًّا وحوالي نفس النسبة حين يكون p فرديًّا و n زوجيًّا، بينما هناك أربع أنوية فقط يكون لها كلا من p وn فردي.

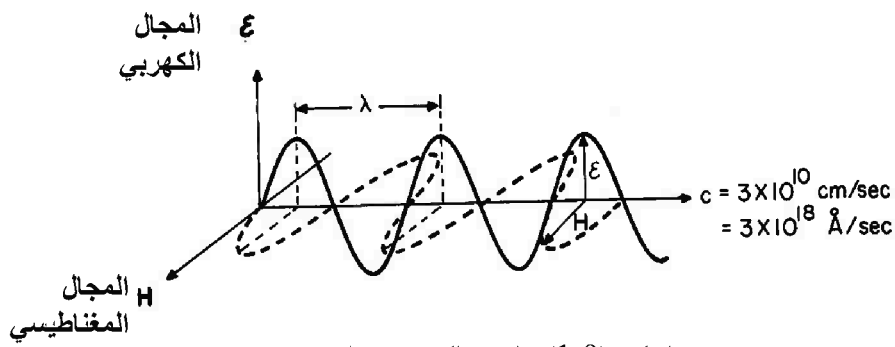
9 - الموجات (الإشعاعات) الكهرومغناطيسية

(الفوتونات)

Electromagnetic Radiation (Photons)

أشعة (فوتونات) جاما، الأكثر استخداما في مجال الطب النووي، عبارة عن: موجات كهرومغناطيسية مصدرها الأنوية المشعة. لا تختلف أشعة جاما عن باقي أنواع الإشعاع الكهرومغناطيسي: كموجات الراديو، الضوء المرئي، أو أشعة X، .....، في طبيعتها، إنما الاختلاف في المدى الذي يقع فيه تردد ν الموجة الكهرومغناطيسية (أو طولها الموجي λ).

الموجة الكهرومغناطيسية عبارة عن مجالين: أحدهما كهربي، والآخر مغناطيسي، يتذبذبان في مستويين متعامدين بنفس التردد وفي نفس الطور in phase ، ويكون اتجاه انتشار الموجة الكهرومغناطيسية في الاتجاه العمودي على كليهما (الشكل (9-1))، ولا تحتاج الموجات الكهرومغناطيسية لوسط مادي، كما هو الحال في الموجات الميكانيكية، كي تنقل خلاله فلها القدرة على الانتقال في الفراغ بسرعة ثابتة، هي سرعة الضوء ($c \approx 3\times10^{8} m/s$) والدليل على ذلك هو وصول ضوء الشمس إلينا عبر الفراغ.



الشكل (9-1): الموجه الكهرومغناطيسية

كأي موجة، الطول الموجي λ هو المسافة بين قمتين متتاليتين أو قاعين متتاليين أو أي نقطتين متتاليتين تتحركان في طور واحد، والتردد ν هو عدد التذبذبات (الأطوال الموجية) في الثانية الواحدة والعلاقة بينهما :

$$\nu = c / \lambda$$

هذه العلاقة تبدو واضحة عندما نتذكر أن السرعة هي: المسافة التي تقطعها الموجة في الثانية ومن ثَم تؤدي قسمتها على الطول الموجي إلى عدد الموجات في الثانية، وهذا هو التردد، كما أن الطول الموجي عكس التردد، بمعنى أن الطول الموجي الكبير يقابله تردد صغير (ومن ثَم طاقة صغيرة، كما سيتضح)؛ ذلك لأن حاصل ضربهما يساوي مقدار ثابت وهو سرعة الضوء.

يمتد طيف الموجات الكهرومغناطيسية electromagnetic spectrum على مدى كبير، حيث يبلغ طول موجة أشعة الراديو radio waves عدة أميال، إلى كسر من الأنجستروم، كما في حالة أشعة جاما إلى أقل من ذلك بكثير في حالة بعض مركبات الأشعة الكونية cosmic rays (القائمة (1-1)):

القائمة (1-1): الطول الموجي والطاقة لمختلف أنواع الموجات الكهرومغناطيسية.

النوع	الطول الموجى	الطاقة (eV)
موجات الراديو، TV، الرادار	$10^{-1} - 10^{5}$ cm	$10^{-9} - 10^{-3}$
الأشعة دون الحمراء Infra Red (IR)	$10^{-4} - 10^{-1}$cm	$10^{-1} - 2$
الضوء المرئي	$4000 - 7000A^{o}$	$2 - 3$
الأشعة فوق البنفسجية Ultra Violet (UV)	$50 - 4000A^{o}$	$3 - 25$
أشعة X	$10^{-1} - 50A^{o}$	$25 - 10^{5}$
أشعة جاما	$10^{-2} - 1A^{o}$	$10^{4} - 10^{6}$

كانت النظرية الكهرومغناطيسية التي طورها ماكسويل تكفي لتفسير انتقال وسلوك الموجات الكهرومغناطيسية والظواهر المرتبطة بها حتى نهاية القرن التاسع عشر، ولكن ثَمة ظواهر فيزيائية أخرى، مثل التأثير الكهروضوئي (الباب الرابع). وإشعاع الجسم الأسود black body radiation التي استعصى تفسيرها.

هذه الاعتبارات وغيرها دفعت Max Plank و Albert Einstein في بداية القرن العشرين إلى التفكير بأن الانبعاث الكهرومغناطيسي ليس بفيض متصل من الطاقة كما كان يُظن، ولكن يتصرف الإشعاع الكهرومغناطيسي على أنه كميات quanta محدد القيمة من الطاقة discrete "paket" of energy، أي أن طاقة الإشعاع الكهرومغناطيسي مكممة quantiz تُسمى هذه الكميات فوتونات each quantum of electromagnetic energy is called photon . يمكن إجمال خواص الفوتون:

- ليس له كتلة سكون، ولا يمكن تعجيله بالرغم من أن له كمية حركة.
- غير مشحون.
- يتحرك في الفراغ بسرعة الضوء.
- طاقة الفوتون E تتناسب مع تردد الإشعاع الكهرومغناطيسي ν وثابت التناسب هو ثابت بلانك المعروف h، والذي تم الحصول علية بمواءمة قانون الإشعاع الذي استنبطه بلانك مع منحنيات إشعاع الجسم الأسود: $h = 6.626196 \times 10^{-27}\ erg.sec$

$$\therefore \quad E = h\nu$$

- من علاقة دي برولي $\lambda = h/p$ ، حيث p هي كمية الحركة، ومن العلاقة $E = h\nu$ يتضح أن كمية الحركة للفوتون هي: $h\nu/c$.
- يشع المصدر، فقط أعدادًا صحيحة من الفوتونات ولا يمكن أن تكون كسورًا.

لنضرب الآن مثالا عدديًّا بسيطًا لاستخدام بعض المعادلات السابقة:

احسب طاقة فوتون أشعة جاما الذي يساوي طولها الموجي $\lambda = 0.1A^{o}$.

الحل:

$$E = h\nu = hc / \lambda$$

وبالتعويض بقيمة الطول الموجي والثوابت مع استخدام تحويلات الوحدات المختلفة:

$$E = 1{,}24MeV$$

* * *

المراجع:

- Robley D. Evans, The Atomic Nucleous, McGraw-Hill Book Company, Inc, NY, 1955.
- Arthur Beiser, Modern Physics, McGraw-Hill Book Company, Inc, NY, 1967.
- Robert A. Howard, Nuclear Physics, Wadsworth publishing Company, Belmont, Ca. 1963.
- Elmer E. Anderson, Modern Physics and Quantum Mechanics, W.B. Saunders Company, Philadelphia, 1971.
- W. E. Burcham, Nuclear Physics, An Introduction, Longman, London, 1965.
- W. E. Burcham and M. Jobes, Nuclear and Particle Physics, Longman Ssientific & Technical, London, 1995.

* * *