

الفصل الثالث

التركيب الذري

Atomic Structure

٣-١: اكتشاف النشاط الإشعاعي الطبيعي 3-1: Discovery of Natural Radioactivity

من بين حوالي 2500 نواة ذرية معروفة، هناك أقل من 300 نواة مستقرة. والبعض الآخر عبارة عن تراكيب غير مستقرة تتحلل لتشكل أنوية أخرى بعد أن تبعث جسيمات وفوتونات بعملية تسمى النشاط الإشعاعي radioactivity. ويتراوح النطاق الزمني لعمليات الانحلال هذه من جزء صغير من الميكروثانية إلى مليارات السنين. ويتم تصنيف الأنوية الذرية المشعة بشكل عام إلى مجموعتين: (أ) نوى موجودة في الطبيعة، والتي ينتج عنها نشاط إشعاعي طبيعي و (ب) نوى تُنتج في المختبر من خلال التفاعلات النووية، والتي تظهر نشاطاً إشعاعياً صناعياً.

وقد اكتُشفت ظاهرة النشاط الإشعاعي الطبيعي في عام 1896 من قبل بيكريل Becquerel بعد اكتشاف رينتنجن Roentgen للأشعة السينية عام 1895. وقد لاحظ بيكريل أن إشعاعات معينة تنبعث من مركبات اليورانيوم، حيث وجد أن أملاح اليورانيوم تؤثر على الألواح الفوتوغرافية بالرغم من أنها كانت ملفوفة بورق سميك وموضوعة في ظلام دامس. وبعد ذلك بفترة وجيزة اختبر رذرفورد Rutherford نفاذية هذه الأشعة وبيّن أن هناك نوعين، أشعة ضعيفة تُمتص بسهولة من قبل المواد سمّاها أشعة ألفا alpha rays وأشعة أكثر نفاذية سمّاها أشعة بيتا beta rays. ومن الواضح الآن أن الإشعاع الذي أثر على اللوح الفوتوغرافي في تجربة بيكريل قد احتوى على أشعة بيتا. وباستخدام مثل هذه الطريقة أظهرت ماري كيوري Marie Curie أن نشاط أي ملح من اليورانيوم يتناسب طردياً مع كمية اليورانيوم الموجودة فيه، مما يدل على أن النشاط الإشعاعي هو ظاهرة ذرية. وفي عام 1898 تمكنت هي وزوجها من اكتشاف عنصرين جديدين نشطين إشعاعياً هما البولونيوم polonium والراديوم radium. وقد وُجد أن نشاط الراديوم أكبر من مليون مرة من كمية مماثلة من اليورانيوم. وقد تم اكتشاف العديد من المواد المشعة منذ ذلك الحين. وبذلك امتلأت معظم الفراغات التي كانت موجودة في الجدول الدوري قبل اكتشاف النشاط

الإشعاعي. وبالإضافة إلى إشعاعات ألفا وبيتا التي تبعثها العناصر النشطة إشعاعياً يوجد نوع ثالث من الأشعة أكثر نفاذية منهما اكتشفه فيلارد Villard عام 1900 وأطلق عليه اسم أشعة غاما gamma rays.

لذا فالأنواع الثلاثة من التحلل الإشعاعي التي تحدث في المواد المشعة هي:

- ١- تحلل ألفا (α)، حيث تنبعث دقائق ألفا التي تتكون كل منها من بروتونين ونيوترونين. لذا فإن شحنتها موجبة مقدارها $2e$ وتشبه نواة الهيليوم ${}^4_2\text{He}$ التي تتكون من بروتونين ونيوترونين أيضاً.
- ٢- تحلل بيتا (β)، وفيه تكون الدقائق المنبعثة إما إلكترونات (e^-) أو بوزترونات (e^+) positrons. والبوزترون هو ضديد الإلكترون antielectron ويشبهه في كل الصفات عدا الشحنة.

٣- تحلل غاما (γ) gamma decay، وفيه تكون الدقائق المنبعثة هي الفوتونات عالية الطاقة.

ومما يجدر ذكره أن استخدام مصطلح "الإشعاع" لوصف الانبعاثات من النوى المشعة لا يعني أنها جميعاً إشعاعات كهرومغناطيسية بل هو اصطلاح رائج منذ بداية تاريخ الفيزياء النووية. ومن المعلوم الآن أن ألفا وبيتا كليهما من الدقائق المادية التي لا تكون الطاقة السكونية لأي منهما صفراً، أما غاما فهي إشعاع كهرومغناطيسي لأنها مكونة من فوتونات، والتي هي الجسيمات المكونة للإشعاع الكهرومغناطيسي وتكون طاقتها السكونية مساوية للصفر.

3-2: Atomic Models

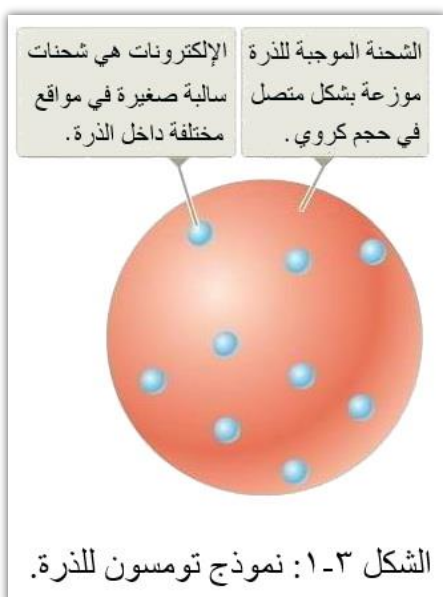
٢-٣: النماذج الذرية

في بداية القرن العشرين ثبت أن الذرة قابلة للانقسام وليست جسيماً أولياً بخلاف ما كان يُعتقد سابقاً وفق أفكار دالتون حول الذرة. ففي عام 1897 اكتشف تومسون الإلكترون، وأجريت عدة تجارب تتعلق بالإلكترونات الذرة. وتم الاستدلال من هذه التجارب على ما يلي:

أ- تحتوي الذرة المتعادلة كهربائياً على Z من الإلكترونات السالبة الشحنة، ولذا يجب أن تحتوي الذرة على شحنة موجبة مساوية لها في المقدار لأنها متعادلة.

ب- إن كتلة الإلكترون صغيرة جداً بحيث يمكن إهمالها مقارنة بكتلة أخف ذرة، مما يدل على أن معظم كتلة الذرة ناتجة عن كتلة الجسيمات التي تحمل الشحنة الموجبة.

ونتيجة لذلك اقترحت عدة نماذج، منها:



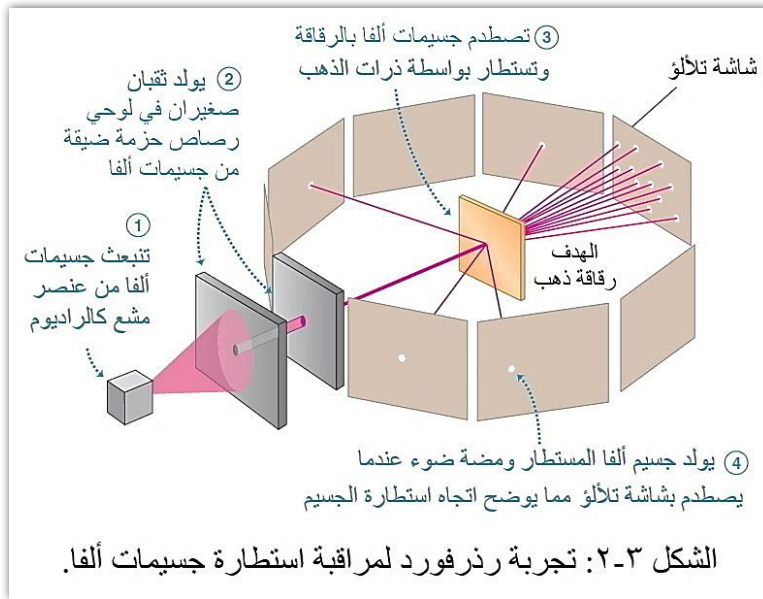
1- Thomson's model

١- نموذج تومسون

اقترح تومسون نموذجاً سنة 1898 "كما في الشكل ٣-١" يصف الذرة بأنها متعادلة كهربائياً وتنتشر في أرجائها الشحنة الموجبة والإلكترونات السالبة. ولم يستطع الحصول على ترتيب يؤدي إلى توازن مستقر، ولم يتمكن من إعطاء تفسير لترددات خطوط الطيف المرئي، وكذلك فشل هذا النموذج في تفسير استطارة جسيمات ألفا كما في الشكل ٣-٣.

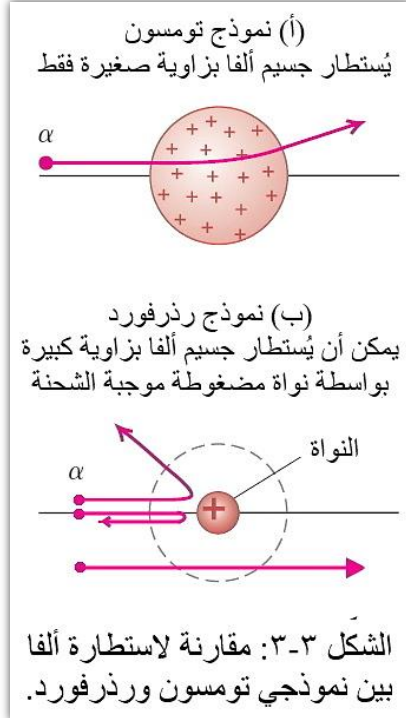
2- Rutherford model

٢- نموذج رذرفورد

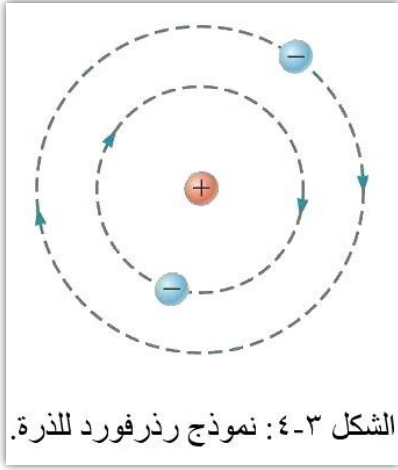


في عام 1911 قام رذرفورد وتلميذه Gaiger ومارسدن Marsden بإجراء تجربة تم فيها قذف حزمة من جسيمات ألفا α - particles من مادة مشعة طبعياً كالراديوم نحو رقائق معدنية foils كالهدف المبين في الشكل ٢-٣، ومرّت معظم الجسيمات من خلال الرقاقة كما لو كانت فضاءً فارغاً. ولكن بعض الجسيمات انحرفت

عن اتجاهها الأصلي واستطارت بزوايا كبيرة، وبعضها الآخر انحرفت مرتدة إلى الوراء بزوايا ارتداد 180° . ولم يكن من المتوقع حدوث مثل هذه الانحرافات الكبيرة على أساس نموذج تومسون، لأنه يفترض أن الشحنة الموجبة في الرقاقة المعدنية منتشرة في الذرة بأكملها. ولذلك فإن مقدار الشحنة في أي موضع محدد في الذرة سيكون غير كاف لإحداث هكذا استطارة لدقائق ألفا الموجبة، لاحظ الشكل ٣-٣. وهذا يعني أن الشحنة الموجبة للذرة يجب أن تكون متمركزة في حيزٍ منها كي تسبب هكذا انحرافات لدقائق ألفا، ولا يصح أن تكون منتشرة في كل الذرة. كما إن الإلكترونات أخف كثيراً من جسيمات ألفا ولا يمكنها أن تسبب هكذا انحرافات كبيرة.



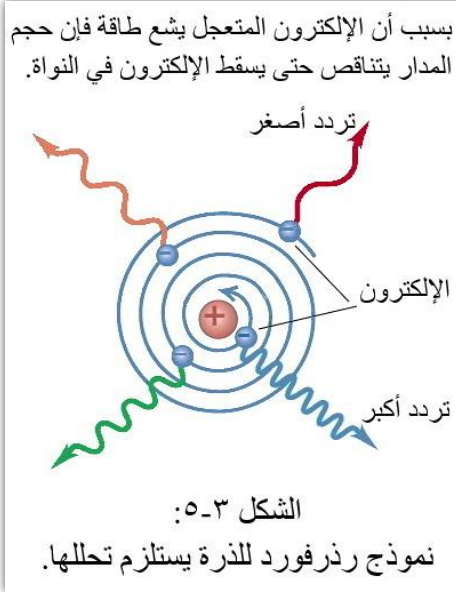
(١) تتراوح قيم طاقة جسيم α المنبعث من المصادر المشعة الطبيعية من حوالي 4 إلى 7 MeV.



وقد أوضح رذرفورد نتائجه من خلال تطوير نموذج ذري جديد افترض فيه أن الشحنة الموجبة في الذرة تتركز في منطقة صغيرة بالنسبة لحجم الذرة سمّاها النواة الذرية atomic nucleus، وأن الإلكترونات التي تنتمي للذرة تتواجد في الحجم الكبير نسبياً خارج النواة ولا تسقط في النواة الموجبة لأنها تدور في مدارات حول النواة بنفس الطريقة التي تدور بها الكواكب حول الشمس (الشكل ٣-٤)، لذا سُمي نموذج رذرفورد بالنموذج الكوكبي planetary model.

أسباب فشل نموذج رذرفورد

وفق النظرية الكهرومغناطيسية التقليدية، فإن الشحنات الكهربائية التي تتحرك بتعجيل (سواء كانت متذبذبة أو دوارة) تشع موجات كهرومغناطيسية. لذا فإن الإلكترون الذي يدور داخل الذرة سيمتلك دائماً تعجيلاً مركزياً نحو النواة، ومن ثمّ يجب أن يُصدر إشعاعاً في جميع الأوقات، ولذلك يفقد الإلكترون طاقة بشكل مستمر. وعندما تخرج الطاقة من النظام فإن نصف قطر مدار الإلكترون يتناقص باستمرار، وهذا يؤدي إلى أن يهوي الإلكترون إلى داخل النواة خلال جزء من الثانية "الشكل ٣-٥" وتنتهي الذرة. وهذه النتيجة غير واقعية.



ووفق النظرية التقليدية أيضاً، فإنه يجب أن يكون تردد الموجات الكهرومغناطيسية f المنبعثة من الإلكترونات مساوياً لتردد دورانها حول النواة. وعندما يشع الإلكترون طاقة ويقترب من النواة ستزداد سرعته الزاوية باستمرار ويزداد عدد دوراته حول النواة في الثانية الواحدة، وهذا يعني زيادة مستمرة في تردد الإشعاع المنبعث من الإلكترون. وسيكون الطيف المنبعث مستمراً "خليطاً من جميع الترددات" وليس طيفاً خطياً "متمضمناً ترددات محددة فقط" كالمرصود تجريبياً.

وبهذا فإن نموذج رذرفورد لم يستطع تفسير ظاهرة انبعاث وامتصاص ترددات معينة دون غيرها للإشعاع الكهرومغناطيسي من قبل الذرة، حيث إن الانبعاث والامتصاص داخل الذرة لا يحدث لأي تردد كان بل فقط لترددات محددة حسب النتائج التجريبية. والنتيجة هي أن نموذج رذرفورد الذي اعتمد على ميكانيك نيوتن والنظرية الكهرومغناطيسية التقليدية استلزم ثلاثة توقعات خاطئة تماماً حول الذرة، هي:

(١) يجب أن تكون غير مستقرة،

(٢) يجب أن ينبعث منها الإشعاع باستمرار،

(٣) يجب أن يكون للإشعاع الذي ينبعث منها طيف مستمر.

بينما في الواقع تكون الذرة مستقرة، ولا تبعث الإشعاع إلا حين تهيج، ويكون هذا الإشعاع بترددات محددة فقط كطيف خطي وليس كطيف مستمر. وقد طور بور Bohr هذا النموذج بعد حين مستفيداً من نظرية بلانك الكمية كما في الفصل السادس من محاضراتنا.

3-3: Rutherford Scattering Theory

٣-٣: نظرية الإستطارة لرذرفورد

لأجل تطوير نظرية لاستطارة جسيمات ألفا بواسطة النوى الذرية افترض رذرفورد ما يلي:

(١) إن جسيم ألفا والنواة صغيران جداً بحيث يمكن اعتبار كل منهما جسيماً ذا كتلة وشحنة نقطية.

(٢) القوة الوحيدة المؤثرة بين جسيمات ألفا والنواة هي قوة التنافر لكولوم Coulomb repulsive force.

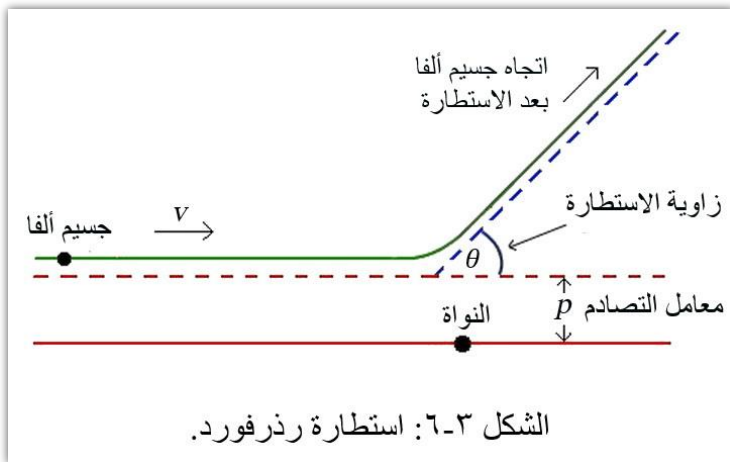
(٣) يمكن استخدام الميكانيك التقليدي لمعالجة هذه الظاهرة.

(٤) طاقة الارتداد للنواة بسبب تصادمها مع جسيمات ألفا يمكن إهمالها بسبب صغرها.

عند توجيه حزمة من جسيمات ألفا على رقاقة معدنية من الذهب أو أي عنصر آخر مناسب سيحدث تأثير متبادل بين جسيمات ألفا وأنوية ذرات العنصر، فيستطار جسيم ألفا لصغر كتلته مقارنة مع كتلة نواة عنصر الرقاقة^١. ولو افترضنا أن Ze تمثل شحنة النواة و M كتلة جسيم ألفا و Q شحنته و v سرعته الأصلية فستكون هنالك قوة تنافر بين شحنتي النواة وجسيم ألفا الموجبتين تُعطى بقانون كولوم:

$$F = k \frac{ZeQ}{r^2} \quad \dots \dots 3.1$$

حيث r : المسافة بين النواة في الرقاقة وجسيم ألفا الساقط، و k : ثابت التناسب في قانون كولوم.



وبسبب قوة تنافر كولوم يكون مسار جسيم ألفا بشكل قطع زائد، وتقع النواة في بؤرة الجانب المحدب من المسار كما في الشكل ٣-٦ الذي يظهر فيه انحراف جسيم ألفا عند اقترابه من النواة. ويمثل مسار الجسيم بخطين منقطين أولهما باتجاه

(١) العدد الذري للذهب: $(Z = 79)$.

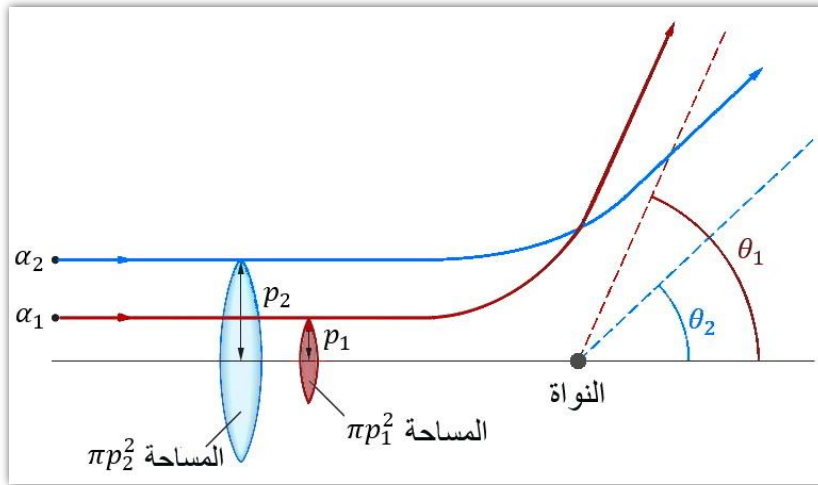
سقوط جسيم ألفا واثنيهما باتجاه انحرافه، وتعرف الزاوية θ بين الاتجاهين بزاوية الإستطارة. أما p فيسمى معامل التصادم impact parameter، وهو يمثل أصغر مسافة يبعد بها جسيم ألفا عن النواة لو استمر باتجاهه الأصلي بدون انحراف.

ويمكن تمثيل زاوية الإستطارة في الشكل ٣-٦ بالعلاقة:

$$\cot \frac{\theta}{2} = \frac{Mv^2}{kZeQ} p \quad \dots \dots 3.2$$

$$\text{or } p = \frac{kZeQ}{Mv^2} \cot \frac{\theta}{2} \quad \dots \dots 3.2'$$

والآن نفترض أن عدداً كبيراً من جسيمات ألفا قد تم توجيهه بشكل طبيعي على رقاقة من مادة مساحتها A وسمكها t تحتوي على ذرات عددها n لوحدة الحجم. وحينئذ سيكون عدد ذرات الرقاقة (وأيضاً عدد النوى) هو ntA . وأي جسيم ألفا تؤدي به سرعته الابتدائية إلى مسافة p من النواة سيستطار بزاوية تساوي θ أو أكبر منها، حيث تُعطى θ بالمعادلة 3.2. وكلما كان الجسيم أقرب - أي كلما كانت p أصغر - فإن زاوية استطارة ألفا ستكون أكبر كما في الشكل ٣-٧.



الشكل ٣-٧: نقصان زاوية الإستطارة θ بزيادة معامل التصادم: يقترب جسيما ألفا α_1 و α_2 متساويا الطاقة من النواة التي شحنتها $(+Ze)$ ، وكان الاقتراب بمقدار معاملي تصادم p_1 و p_2 ، حيث $(p_1 < p_2)$. ووفق المعادلة 3.2، ستكون الزاوية θ_1 التي يُستطار α_1 من خلالها أكبر من θ_2 للجسيم α_2 .

ولحساب احتمالية تواجد جسيم ألفا ضمن هذه المسافة، افترض وجود دائرة نصف قطرها p مرسومة حول كل نواة، وستكون $(\sigma = \pi p^2)$ هي مساحة المقطع العرضي المحيط بكل نواة، وتمثل المساحة الفعالة لإحداث الإستطارة، أي المقطع العرضي للاستطارة. وستكون المساحة الفعالة الكلية في الرقاقة مساوية لعدد نوى الهدف ntA مضروباً بمساحة المقطع العرضي σ ، أي $ntA\sigma$. ونظراً لأن كل جسيم ألفا يقترب مسافة p من النواة سينحرف بزاوية أكبر من θ أو تساويها فإن f الذي يمثل احتمالية

انحراف جسيم ألفا بهكذا زاوية أو نسبة ما يُستطار بزاوية $\theta \leq$ من العدد الكلي لجسيمات ألفا الساقطة سيساوي النسبة بين المساحة الفعالة الكلية $ntA\sigma$ والمساحة الكلية A التي سقطت عليها جسيمات ألفا من الرقاقة:

$$f = \frac{\text{عدد جسيمات ألفا المستطارة بزاوية } \theta \leq}{\text{عدد جسيمات ألفا الساقطة}} = \frac{\text{المساحة الفعالة الكلية}}{\text{مساحة الهدف}} = \frac{ntA\sigma}{A} = nt\sigma = nt\pi p^2$$

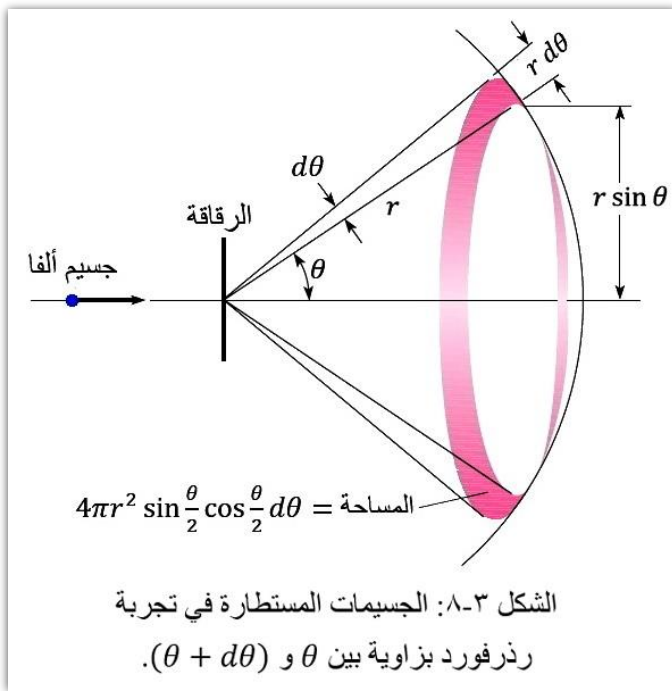
وبالتعويض عن قيمة p من المعادلة 3.2':

$$f = nt\pi p^2 = nt\pi \left(\frac{kZeQ}{Mv^2} \cot \frac{\theta}{2} \right)^2 = nt\pi \left(\frac{kZeQ}{Mv^2} \right)^2 \cot^2 \frac{\theta}{2} \quad \dots \dots 3.3$$

وقد فُرض في هذه الحسابات أن الرقاقة نحيفة جداً بحيث أن المقاطع العرضية للنوى المتجاورة لا تتداخل مع بعض وأن انحراف جسيم ألفا يحدث بمواجهة نواة واحدة فقط.

وفي تجربة فعلية تم الكشف عن جسيمات ألفا مستطارة بين θ و $(\theta + d\theta)$ كما في الشكل ٣-٨ ويمكن حساب عددها بواسطة اشتقاق المعادلة 3.3 بالنسبة لـ θ :

$$df = 2\pi n t p d p = -\pi n t \left(\frac{kZeQ}{Mv^2} \right)^2 \cot \frac{\theta}{2} \csc^2 \frac{\theta}{2} d\theta \quad \dots \dots 3.4$$



لاحظنا في الشكل ٣-٢ شاشة فلورية

fluorescent screen وضعها غايغر ومارسدن على مسافة r من الرقاقة، وتم الكشف عن جسيمات ألفا المستطارة بواسطة التلألؤ الذي سببته. وتلك الجسيمات المستطارة بين θ و $(\theta + d\theta)$ وصلت إلى منطقة عرضها $r d\theta$ وهي جزء من كرة نصف قطرها r . ونصف قطر المنطقة نفسها هو $r \sin \theta$ كما في الشكل ٣-٨ وستكون مساحة المنطقة dA من الشاشة التي ضربتها جسيمات ألفا هي:

$$dA = (2\pi r \sin \theta)(r d\theta) = 2\pi r^2 \sin \theta d\theta = 4\pi r^2 \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} d\theta \quad \dots \dots 3.5$$

وإذا كان N_i يمثل العدد الكلي لجسيمات ألفا الساقطة على الرقاقة خلال التجربة فإن العدد المستطار في $d\theta$ عند الزاوية θ هو $N_i df$. والعدد $N(\theta)$ لوحدة المساحة الذي يضرب الشاشة عند الزاوية θ هو:

$$N(\theta) = \frac{N_i |df|}{dA} = N_i \frac{\pi n t \left(\frac{kZeQ}{Mv^2} \right)^2 \cot \frac{\theta}{2} \csc^2 \frac{\theta}{2} d\theta}{4\pi r^2 \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} d\theta}$$

$$N(\theta) = \frac{N_i k^2 n t (Ze)^2 Q^2}{4r^2 (Mv^2)^2 \sin^4(\theta/2)} \quad \dots \dots 3.6$$

وهذه المعادلة هي صيغة استطرارة رذرفورد. ويمكن كتابتها بصيغة أخرى بعد معرفة أن شحنة جسيم ألفا $(Q = 2e)$ وطاقته الحركية $(E_k = \frac{1}{2} Mv^2)$ كما يلي:

$$N(\theta) = \frac{N_i n t}{4r^2 \sin^4(\theta/2)} \left(\frac{kZe^2}{E_k} \right)^2 \quad \dots \dots 3.7$$

حيث $N(\theta)$: عدد جسيمات ألفا لوحدة المساحة، والتي تصل إلى شاشة المراقبة بزاوية استطرارة θ .
 N_i : العدد الكلي لجسيمات ألفا الساقطة على الرقاقة.

n : عدد الذرات (أو النوى) لوحدة الحجم في الرقاقة. و t : سمك الرقاقة.

K : ثابت التناسب في قانون كولوم: $(K = 1/4\pi\epsilon_0 = 9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2)$.

و ϵ_0 : سماحية الفراغ $(\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N.m}^2)$.

Z : العدد الذري لذرات الرقاقة، و e : شحنة الإلكترون أو البروتون $(1.602 \times 10^{-19} \text{ C})$ ، و Ze : شحنة النواة.

r : المسافة من الشاشة إلى الرقاقة. E_k : الطاقة الحركية لجسيمات ألفا.

ويمكن حساب عدد الذرات لوحدة الحجم n لعنصر معين من العلاقة:

$$n = \frac{\text{atoms}}{m^3} = \frac{1/m^3}{1/\text{atom}} = \frac{\text{mass}/m^3}{\text{mass}/\text{atom}} = \frac{\rho}{(\text{atomic mass})(\text{atomic mass unit})} = \frac{\rho}{Wu} \quad \dots 3.8$$

but $u = \frac{1}{N_A}$ if u is measured in kg and N_A is measured in kmole^{-1}

or u is measured in g and N_A is measured in mole^{-1} .

$$\rightarrow n = \frac{\rho N_A}{W} \quad \dots \dots 3.9$$

حيث ρ : كثافة المادة. W : الكتلة الذرية atomic mass للعنصر، وهي مقدار المادة الموجودة في ذرة العنصر، ويُعبّر عنها بمضاعفات وحدة الكتلة الذرية u ، وتقارب قيمتها مجموع كتل البروتونات والنيوترونات الموجودة داخل النواة.

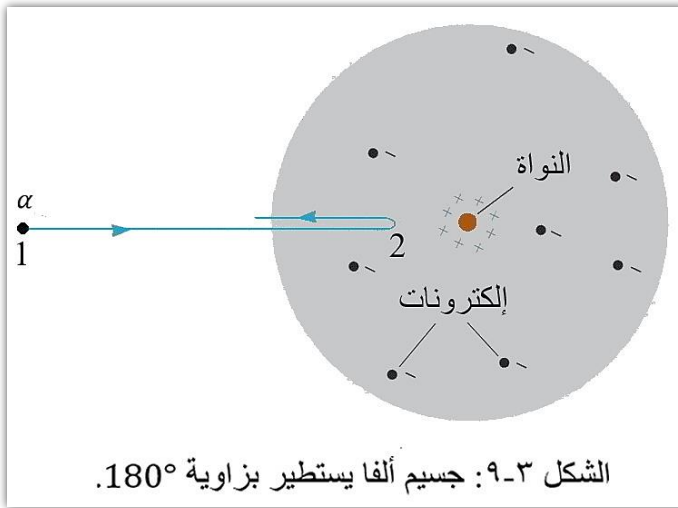
u : وحدة الكتلة الذرية atomic mass unit، وهي المقدار الذي يساوي $\frac{1}{12}$ من كتلة ذرة واحدة من نظير الكربون ^{12}C . إذن $(1 u \approx 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg})$. لذا فإن كتلة كل من البروتون والنيوترون تقارب $1 u$ ، والإلكترون ليس له سوى جزء صغير من قيمة هذه الكتلة.

N_A : عدد أفوكادرو Avogadro's number، وقيمته: $(N_A \approx 6.022 \times 10^{23} \text{ mole}^{-1})$ ، ويمثل عدد الجسيمات (الذرات أو الجزيئات) المحتواة في مول واحد من المادة.

مثال ٣-١: وجّه جسيم ألفا مباشرة نحو نواة ذهب (شحنتها $+79e$). ما هو الحد الأدنى للطاقة الحركية الابتدائية التي يجب أن يمتلكها جسيم ألفا كي يقترب بمقدار $(5 \times 10^{-14} \text{ m})$ من مركز نواة الذهب قبل أن يعكس اتجاهه ويستطير بزاوية 180° ؟ افترض أن نواة الذهب - التي تبلغ كتلتها حوالي 50 مرة بقدر كتلة جسيم ألفا - تبقى في حالة سكون خلال العملية.

الحل: القوة الكهربائية التنافرية التي تؤثر بها نواة الذهب تبطئ جسيم ألفا إلى أن توقفه عند اقترابه منها، ثم يعكس اتجاهه. وهذه القوة محفوظة، ولذلك فإن الطاقة الميكانيكية الكلية (الطاقة الحركية لجسيم ألفا + الطاقة الكامنة الكهربائية للنظام) تكون محفوظة.

لتكن النقطة 1 هي الموقع الابتدائي لجسيم ألفا كما في الشكل ٣-٩، وهو بعيد جداً عن نواة الذهب، ولتكن النقطة 2 على مسافة $(5 \times 10^{-14} \text{ m})$ من مركز النواة. والطاقة الحركية E_{k1} لجسيم ألفا عند



النقطة 1 تسمح له بالوصول إلى النقطة 2 ثم يتوقف، وتكون طاقته الحركية حينئذ $(E_{k2} = 0)$. ولإيجاد قيمة E_{k1} نستخدم قانون حفظ الطاقة ومعادلة الطاقة الكامنة الكهربائية $(U = k q_\alpha q_{Au}/r)$.

عند النقطة 1 تكون المسافة r بين جسيم ألفا ونواة الذهب لا نهائية عملياً، أي لا يوجد تأثير لقوة التنافر. لذا فإن $(U_1 = 0)$

عند النقطة 1. وعند النقطة 2 ستكون الطاقة الكامنة:

$$U_2 = k \frac{q_\alpha q_{Au}}{r} = k \frac{(2e)(79e)}{r} = k \frac{158e^2}{r} = 9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2 \frac{158(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})^2}{5 \times 10^{-14} \text{ m}}$$

$$= 7.28 \times 10^{-13} \text{ J} = 4.55 \times 10^6 \text{ eV} = 4.55 \text{ MeV}$$

من مبدأ حفظ الطاقة:

$$E_{k1} + U_1 = E_{k2} + U_2$$

$$E_{k1} + 0 = 0 + U_2 \rightarrow E_{k1} = U_2 = 4.55 \text{ MeV}$$

وهذا يعني أن جسيم ألفا يجب أن يمتلك طاقة حركية ابتدائية مقدارها 4.55 MeV كي يقترب مسافة $(5 \times 10^{-14} \text{ m})$ من النواة.

مثال ٣-٢: هل يصح افتراض بقاء نواة الذهب في حالة سكون في المثال السابق كما افترض رذرفورد في نظريته لاستطارة جسيمات الفا بواسطة النوى الذرية؟

الحل: يلاحظ أنه عندما يتوقف جسيم ألفا مؤقتاً قرب النواة فسيُنقل كل زخمه الابتدائي إلى نواة الذهب بسبب مبدأ حفظ الزخم الخطي. وبما أن جسيم ألفا يمتلك كتلة ($m_\alpha = 6.64 \times 10^{-27} \text{ kg}$) وكانت طاقته الحركية الابتدائية ($E_{k1} = \frac{1}{2} m_\alpha v_1^2 = 7.28 \times 10^{-13} \text{ J}$) كما استنتجنا في حل المثال السابق فيمكن حساب سرعته الابتدائية كما يلي:

$$v_1 = \sqrt{\frac{2E_{k1}}{m_\alpha}} = \sqrt{\frac{2(7.28 \times 10^{-13} \text{ J})}{6.64 \times 10^{-27} \text{ kg}}} = 1.48 \times 10^7 \text{ m/s}$$

وسيكون زخمه الابتدائي:

$$p_1 = m_\alpha v_1 = (6.64 \times 10^{-27} \text{ kg})(1.48 \times 10^7 \text{ m/s}) = 9.83 \times 10^{-20} \text{ kg.m/s}$$

وكما ذكرنا، سينقل هذا الزخم إلى نواة الذهب التي كتلتها ($m_{Au} = 3.27 \times 10^{-25} \text{ kg}$). ومع هذه الكتلة الكبيرة نسبياً (أكبر بحوالي 50 مرة من كتلة جسيم α) ستكون سرعة النواة أبطأ بكثير من سرعة جسيم ألفا (أبطأ بحوالي 50 مرة من سرعة جسيم α):

$$p_{Au} = m_{Au} v_{Au} \rightarrow v_{Au} = \frac{p_{Au}}{m_{Au}} = \frac{9.83 \times 10^{-20} \text{ kg.m/s}}{3.27 \times 10^{-25} \text{ kg}} = 3 \times 10^5 \text{ m/s}$$

$$\frac{v_\alpha}{v_{Au}} = \frac{1.48 \times 10^7 \text{ m/s}}{3 \times 10^5 \text{ m/s}} \approx 50$$

وطاقة النواة الحركية ستكون:

$$E_{kAu} = \frac{1}{2} m_{Au} v_{Au}^2 = \frac{1}{2} (3.27 \times 10^{-25} \text{ kg})(3 \times 10^5 \text{ m/s})^2$$

$$= 1.47 \times 10^{-14} \text{ J} = 0.092 \text{ MeV}$$

هذه الطاقة الحركية الارتدادية لنواة الذهب تشكل 2% فقط من الطاقة الكلية في هذه الحالة، لأن الطاقة الكلية هي:

$$E = E_{kAu} + U_2 = 0.092 \text{ MeV} + 4.55 \text{ MeV} = 4.642 \text{ MeV}$$

$$\frac{E_{kAu}}{E} = \frac{0.092 \text{ MeV}}{4.642 \text{ MeV}} = 0.0198 \approx 2\%$$

لذلك يمكن إهمال حركة النواة واعتبارها ساكنة.

سؤال ١: لماذا استعملنا في المثال ٣-٢ الحسابات التقليدية لمعرفة سرعة وزخم وطاقة جسيم ألفا ونواة الذهب ولم نستعمل الحسابات النسبية؟

مثال ٣-٣: تم قياس نصف قطر نواة الذهب Au بواسطة استطرارة إلكترون عالي الطاقة فكانت 6.6 fm . ما هي الطاقة الحركية لجسيمات α التي كان يحتاجها رذرفورد كي يصل جسيم α إلى سطح النواة قبل أن يعكس اتجاهه بزاوية 180° ؟

الحل: كما في المثال ٣-١:

$$E_{k\alpha} = U_2 = k \frac{158e^2}{r} = (9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{158(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})^2}{6.6 \times 10^{-15} \text{ m}}$$

$$= 5.515 \times 10^{-12} \text{ J} = 34.47 \text{ MeV}$$

لا تنبعث جسيمات ألفا بهذا طاقة عالية من المواد ذات الإشعاع الطبيعي لأن قيم طاقات جسيمات α المنبعثة من المصادر المشعة الطبيعية تتراوح بين حوالي 4 MeV و 7 MeV . لذا لم يكن بإمكان رذرفورد الوصول إليها لعدم وجود معجلات الطاقة العالية في ذلك الزمان. ولذلك، لم يكن بإمكانه إجراء هكذا تجربة لمعرفة نصف قطر نواة الذهب.

سؤال ٢: هل يصح حساب سرعة جسيمات ألفا في المثال ٣-٣ بالتعويض عن $E_{k\alpha}$ بالمقدار $\frac{1}{2} m_\alpha v_\alpha^2$ بعد معرفة كتلة جسيم ألفا؟ ولماذا؟

مثال ٣-٤: جد النسبة التي تُستطار بزوايا تزيد عن 45° من حزمة جسيمات ألفا طاقتها الحركية 7.7 MeV عندما تسقط على رقاقة ذهبية سمكها $(3 \times 10^{-7} \text{ m})$ إذا علمت أن العدد الذري للذهب 79 وكثافته $(1.93 \times 10^4 \text{ kg/m}^3)$ وكتلته الذرية 197 u و $(1 \text{ u} = 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg})$. وللفادة فإنه للمقارنة مع سمك الرقاقة المستعملة هنا، يبلغ قطر شعرة الإنسان حوالي 10^{-4} m .

الحل: نبتدء بإيجاد n ، عدد ذرات الذهب لوحدة الحجم في الرقاقة، من العلاقة:

$$n = \frac{\rho}{Wu} = \frac{1.93 \times 10^4 \text{ kg/m}^3}{(197 \text{ u/atom})(1.66 \times 10^{-27} \text{ kg/u})} = 5.9 \times 10^{28} \text{ atoms/m}^3$$

نحول الطاقة الحركية لوحدة eV :

$$E_k = \frac{1}{2} Mv^2 = 7.7 \text{ MeV} = (7.7 \times 10^6 \text{ eV})(1.6 \times 10^{-19} \text{ J/eV}) = 1.23 \times 10^{-12} \text{ J}$$

$$f = \pi n t \left(\frac{kZeQ}{Mv^2} \right)^2 \cot^2 \frac{\theta}{2} = \pi n t \left[\frac{kZe(2e)}{2E_k} \right]^2 \cot^2 \frac{\theta}{2} = \pi n t \left(\frac{kZe^2}{E_k} \right)^2 \cot^2 \frac{\theta}{2}$$

$$= (3.14)(5.9 \times 10^{28} \text{ m}^{-3})(3 \times 10^{-7} \text{ m}) \left[\frac{(9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2)(79)(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})^2}{1.23 \times 10^{-12} \text{ J}} \right]^2 \cot^2 \frac{45}{2}$$

$$f = 7.097 \times 10^{-5}$$

أي إن جسيمات ألفا الساقطة سيستطار منها بزاوية 45° أو أكثر حوالي 7 فقط من كل مائة ألف جسيم ساقط. وهذا يعني أن الرقاقة المستخدمة شفافة عملياً مقابل جسيمات ألفا بحيث تسمح بمرور هكذا نسبة كبيرة من الجسيمات الساقطة عليها.

٣-٣-١: التحقق تجريبياً من نظرية الإستطارة لردفورد

توضح دراسة المعادلة 3.6 $\left[N(\theta) = \frac{N_i k^2 n t (Ze)^2 Q^2}{4r^2 (Mv^2)^2 \sin^4(\theta/2)} \right]$ أنه إذا كانت نظرية ردفورد للذرة صحيحة فإن عدد جسيمات ألفا $N(\theta)$ التي تسقط على وحدة المساحة من شاشة تبعد مسافة r من نقطة الاستطارة يجب أن يتناسب:

١- طردياً مع سمك الرقاقة t ,

٢- طردياً مع مربع شحنة النواة لمادة الرقاقة $(Ze)^2$,

٣- عكسياً مع مربع الطاقة الحركية الابتدائية لجسيم ألفا $\frac{1}{2} Mv^2$,

٤- عكسياً مع $\sin^4(\theta/2)$.

وقد تم اختبار الاستنتاجات المذكورة أعلاه والتحقق منها بشكل تجريبي في سلسلة من التجارب التي أجريت في مختبر ردفورد، وقد أثبت فيها غايغر ومارسدن أن نظرية الاستطارة لردفورد صحيحة من الناحية الأساسية، لكن تلك التجارب لم تكن دقيقة بما يكفي لتحديد قيمة العدد الذري Z بصورة مضبوطة. ولم ينجح تشادويك Chadwick حتى عام 1920 في قياس شحنة النواة مباشرة عن طريق استخدام تقنيات استطارة جسيمات ألفا. وفي غضون ذلك، تبنى بور فرضية ردفورد النووية في عمله على الأطياف الذرية، وتمكن موزلي Moseley من خلال عمله على أطياف الأشعة السينية أن يقيس شحنة النواة وأنها تساوي Ze .

إن تقنية استطارة الجسيمات التي ابتكرها ردفورد لدراسة الذرات لها تطبيقات واسعة في مختلف أنحاء الفيزياء. فقد قدمت استطارة الإلكترونات عالية الطاقة من البروتونات والنيوترونات أول تلميح تجريبي عن وجود الكواركات quarks. ويستخدم مطياف ردفورد للإستطارة الخلفية backscattering spectroscopy على نطاق واسع كتقنية تحليل سطحي شديد الحساسية.

أسئلة

- ١- في تجربة رذرفورد لاستطارة جسيمات ألفا مرّت معظم الجسيمات من خلال الرقاقة كما لو كانت فضاء فارغاً، وانحرفت بعض الجسيمات عن اتجاهها الأصلي واستطارت بزوايا كبيرة، وبعضها الآخر انحرف مرتداً إلى الوراء بزاوية 180° . علل هذه الحالات الثلاثة.
- ٢- في تجربة رذرفورد لاستطارة جسيمات ألفا: كلما كان جسيم ألفا أقرب من النواة فإن زاوية استطارة ألفا ستكون أكبر. علل هذا فيزيائياً.
- ٣- أثار اكتشاف رذرفورد لنواة الذرة سؤالاً مهماً: ما الذي يمنع الإلكترونات سالبة الشحنة من السقوط في النواة الموجبة الشحنة بسبب التجاذب الكهروستاتيكي القوي؟ ما جوابك عن هذا السؤال؟
- ٤- لنفترض أنك كررت تجربة استطارة رذرفورد باستخدام طبقة رقيقة من الهيدروجين الصلب بدلاً من رقاقة الذهب. (الهيدروجين مادة صلبة عند درجات حرارة أقل من 14 K ، ونواة ذرة الهيدروجين هي بروتون واحد، أي لها حوالي ربع كتلة جسيم ألفا). هل تتوقع مقارنة بالتجربة الأصلية مع رقاقة الذهب أن تخضع جسيمات ألفا في هذه التجربة إلى:
 - (أ) استطارة بزاوية أكبر، (ب) نفس مقدار زاوية الإستطارة، (ج) استطارة بزاوية أصغر؟ وما السبب؟
- ٥- لماذا من الضروري في تجربة استطارة رذرفورد أن تكون الرقاقة المستخدمة رقيقة جداً؟
- ٦- لماذا استطاع رذرفورد توقع حد أدنى لنصف قطر نواة الألمنيوم^١ ولم يستطع هذا لنصف قطر نواة الذهب؟
- ٧- افترض رذرفورد في نظريته لاستطارة جسيمات ألفا بواسطة النوى الذرية أن القوة الوحيدة المؤثرة بين جسيمات ألفا والنواة هي قوة التنافر الكهروستاتيكية. بيّن تقييمك لافتراض رذرفورد بعد أن تقارن قوة الجاذبية بين نواة الذهب التي كتلتها $(3.27 \times 10^{-25}\text{ kg})$ وجسيم ألفا الذي كتلته $(6.64 \times 10^{-27}\text{ kg})$ ويبعد مسافة r مع القوة الكهروستاتيكية التنافرية.

مسائل محلولة

- (١) في تجربة معينة، تسقط جسيمات α من الراديوم ^{226}R على رقاقة فضة وتُستطار منها بزاوية $(\theta = 45^\circ)$ ، ويُعدّ الكاشف 450 جسيماً في كل دقيقة. فإذا ظل كل شيء على حاله باستثناء أن الكاشف قد حُرِّك لرصد الجسيمات المستطارة عند 90° ، فكم جسيم سيتم حسابه في الدقيقة؟
- الحل:** باستعمال المعادلة 3.7، فإن $[N(\theta) = 450]$ عندما $(\theta = 45^\circ)$ ، ولكننا لا نمتلك معلومات عن بقية المتغيرات في المعادلة. لذا سنفترض أن جميع المقادير الأخرى تساوي ثابتاً مقداره C :

$$N(\theta) = 450 = \frac{N_{int}}{4r^2 \sin^4(\theta/2)} \left(\frac{kZe^2}{E_k} \right)^2 = C \sin^{-4} \left(\frac{45}{2} \right)$$

$$\text{or } C = 450 \sin^4 \left(\frac{45}{2} \right)$$

لذا عندما يتحرك الكاشف إلى $(\theta = 90^\circ)$ فإن قيمة C لا تتغير. ولذلك:

(١) قدر رذرفورد نصف قطر نواة الألمنيوم بأنه $(1 \times 10^{-14}\text{ m})$ ، بينما هو $(3.6 \times 10^{-15}\text{ m})$ وفق الحسابات الحالية.

$$N(\theta) = C \sin^{-4} \left(\frac{90}{2} \right) = 450 \sin^4 \left(\frac{45}{2} \right) \sin^{-4} \left(\frac{90}{2} \right) = 38.6 \approx 39 \text{ particles/min}$$

(٢) في إحدى التجارب أُسقط 10^8 من جسيمات ألفا كل ثانية على رقاقة من الفضة $^{107}_{47}\text{Ag}$ سمكها $(5 \times 10^{-7} \text{ m})$. فإذا كانت الطاقة الحركية لجسيم ألفا تساوي 8.22 MeV وعدد الذرات في وحدة الحجم للفضة يساوي $(5.9 \times 10^{28} \text{ atom/m}^3)$ ، فاحسب عدد جسيمات ألفا الذي يسجله عداد غايغر خلال عشر ثوان إذا علمت أن مساحة نافذة العداد تساوي 10^{-4} m^2 ، وأن بُعدها عن مركز الاستطارة يساوي 0.05 m ، وأن العداد موضوع باتجاه يصنع زاوية مقدارها 60° مع اتجاه الحزمة الساقطة.

$$N(\theta) = \frac{N_i n t}{4r^2 \sin^4(\theta/2)} \left(\frac{kZe^2}{E_k} \right)^2 \quad \text{الحل :}$$

$$= \frac{10^8 (5.9 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}) (5 \times 10^{-7} \text{ m})}{4(0.05 \text{ m})^2 \sin^4(30)} \left[\frac{(9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2)(47)(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})^2}{(8.22 \times 10^6 \text{ eV})(1.6 \times 10^{-19} \text{ J/eV})} \right]^2$$

$$= 3.2 \times 10^5 \text{ particles/m}^2$$

$$\text{For 10 seconds: } N(\theta) = 3.2 \times 10^5 \times 10 = 3.2 \times 10^6 \text{ particles/m}^2$$

سيكون عدد جسيمات ألفا الذي يسجله عداد غايغر خلال عشر ثوان:

$$N(\theta)dA = 3.2 \times 10^6 \text{ particles/m}^2 \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 320 \text{ particles}$$

سؤال ٣: وحدة المقدار $N(\theta)$ هي particles/m^2 . بيّن كيف هذا من المعادلة 3.7.

(٣) في إحدى التجارب أُسقط 10^{10} من جسيمات ألفا في اتجاه عمودي على سطح رقاقة من الذهب Au سمكها 10^{-7} m . فإذا كانت الطاقة الحركية لجسيم ألفا تساوي 7.11 MeV وعدد الذرات في وحدة الحجم للذهب يساوي $(5.9 \times 10^{28} \text{ atom/m}^3)$ فاحسب عدد جسيمات ألفا المستطارة بزاوية $(60^\circ \leq \theta \leq 90^\circ)$.

$$df = -\pi n t \left(\frac{kZeQ}{Mv^2} \right)^2 \cot \frac{\theta}{2} \csc^2 \frac{\theta}{2} d\theta \quad \text{الحل :}$$

$$f = \int_{60}^{90} df = -\pi n t \left(\frac{kZeQ}{Mv^2} \right)^2 \int_{60}^{90} \cot \frac{\theta}{2} \csc^2 \frac{\theta}{2} d\theta$$

$$f = -\pi n t \left(\frac{kZeQ}{Mv^2} \right)^2 \left[-\cot^2 \frac{\theta}{2} \right]_{60}^{90} = -\pi n t \left(\frac{kZeQ}{Mv^2} \right)^2 \left[-\cot^2 \frac{90}{2} + \cot^2 \frac{60}{2} \right]$$

$$= -\pi n t \left(\frac{kZeQ}{Mv^2} \right)^2 [-1 + 3] = -2 \pi n t \left(\frac{kZeQ}{Mv^2} \right)^2$$

$$|f| = 2 \pi n t \left(\frac{kZe^2}{E_k} \right)^2$$

$$= 2 (3.14) (5.9 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}) (10^{-7} \text{ m}) \left[\frac{(9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2)(79)(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})^2}{(7.11 \times 10^6 \text{ eV})(1.6 \times 10^{-19} \text{ J/eV})} \right]^2$$

$$= 9.49 \times 10^{-6}$$

سيكون عدد جسيمات ألفا المستطارة بزاوية $(60^\circ \leq \theta \leq 90^\circ)$:

$$N_i |f| = 10^{10} \times 9.49 \times 10^{-6} = 94900 \alpha - particles$$

(٤) إذا كان معامل التصادم p يساوي $(2.6 \times 10^{-13} m)$ عند اسقاط جسيمات ألفا طاقتها الحركية $5 MeV$ على رقاقة من الذهب سمكها $m \times 10^{-6}$ ، فاحسب زاوية الاستطارة.

الحل :

$$\cot \frac{\theta}{2} = \frac{Mv^2}{kZeQ} p = \frac{E_k}{kZe^2} p$$

$$= \frac{(5 \times 10^6 eV)(1.6 \times 10^{-19} J/eV)}{(9 \times 10^9 N.m^2/C^2)(79)(1.6 \times 10^{-19} C)^2} (2.6 \times 10^{-13}) = 11.43$$

$$\frac{\theta}{2} = \cot^{-1} 11.43 = 5^\circ \rightarrow \theta = 10^\circ$$

(٥) في تجربة استطارة رذرفورد، استطارت جسيمات ألفا طاقتها الحركية $4 MeV$ من رقاقة ذهب (تحتوي نواة الذهب على 79 بروتوناً و 118 نيوترونًا). افترض أن جسيم ألفا معيناً يتحرك مباشرة نحو نواة الذهب ويستطير للخلف بـ 180° ، وأن نواة الذهب تظل ثابتة طول الوقت. احسب (أ) مسافة أدنى اقتراب لجسيم ألفا من نواة الذهب، (ب) أقصى قوة تؤثر على جسيم ألفا واتجاهها.

الحل: (أ) باستعمال مبدأ حفظ الطاقة:

$$E = E_{k_i} + U_i = E_{k_f} + U_f$$

$$E_{k_i} + 0 = 0 + k \frac{q_\alpha q_{Au}}{r_{min}} \rightarrow r_{min} = k \frac{q_\alpha q_{Au}}{E_{k_i}} = k \frac{(2e)(79e)}{E_{k_i}} = k \frac{158e^2}{E_{k_i}}$$

$$r_{min} = (9 \times 10^9 N.m^2/C^2) \frac{(158)(1.6 \times 10^{-19} C)^2}{(4 \times 10^6 eV)(1.6 \times 10^{-19} J/eV)} = 5.69 \times 10^{-14} m$$

(ب) أقصى قوة تؤثر على جسيم ألفا ستكون بعكس اتجاه سقوطه، أي بزاوية 180° .

$$F_{max} = k \frac{q_\alpha q_{Au}}{r_{min}^2} = (9 \times 10^9 N.m^2/C^2) \frac{(158)(1.6 \times 10^{-19} C)^2}{(5.69 \times 10^{-14} m)^2} = 11.24 N$$

(٦) تسقط حزمة من جسيمات ألفا على هدف من الرصاص. ويتجه أحد جسيمات ألفا وجهاً لوجه نحو نواة ذرة رصاص معينة، ويتوقف عند مسافة $(6.5 \times 10^{-14} m)$ من مركز النواة. (هذه النقطة تكون خارج النواة). افترض أن نواة الرصاص - التي تحتوي على 82 بروتوناً - تبقى في حالة سكون. مع العلم أن كتلة جسيم ألفا هي $(6.64 \times 10^{-27} kg)$. (أ) احسب الطاقة الكامنة الكهروستاتيكية في اللحظة التي يتوقف فيها جسيم ألفا. وليكن الناتج بوحدتي الجول و MeV . (ب) ما هي الطاقة الحركية الابتدائية (بالجول و MeV) التي امتلكها جسيم ألفا؟ (ج) ما هي السرعة الابتدائية لجسيم ألفا؟

الحل: (أ)

$$U = k \frac{q_\alpha q_{Pb}}{r_{min}} = (9 \times 10^9 N.m^2/C^2) \frac{(2)(82)(1.6 \times 10^{-19} C)^2}{6.5 \times 10^{-14} m} = 5.81 \times 10^{-13} J$$

$$= 5.81 \times 10^{-13} J (1 eV/1.6 \times 10^{-19} J) = 3.63 \times 10^6 eV = 3.63 MeV$$

(ب) باستعمال مبدأ حفظ الطاقة:

$$E_{k_1} + U_1 = E_{k_2} + U_2$$

حيث أن النقطة 1 هي الموقع الابتدائي لجسيم α والنقطة 2 هي المكان الذي يتوقف فيه جسيم α لحظياً. وقد كان جسيم α في البداية بعيداً عن نواة الرصاص بحيث أن

$$r_1 = \infty \rightarrow U_1 = 0,$$

كما إن توقف جسيم α قرب النواة يعني أن $(E_{k_2} = 0)$. لذا سينتج:

$$E_{k_1} = U_2 = 5.81 \times 10^{-13} J = 3.63 \text{ MeV}$$

(ج)

$$E_{k_1} = \frac{1}{2} m_{\alpha} v_1^2 \rightarrow v_1 = \sqrt{\frac{2E_{k_1}}{m_{\alpha}}} = \sqrt{\frac{2(5.81 \times 10^{-13} J)}{6.64 \times 10^{-27} \text{ kg}}} = 1.32 \times 10^7 \text{ m/s}$$

ملاحظتان: (١) $(v/c = 0.044)$ ، أي أقل من 0.1. ولذلك يصح استخدام التعبير غير النسبي $(E_{k_1} = \frac{1}{2} m_{\alpha} v_1^2)$.
(٢) عندما يتوقف جسيم ألفا، يتم تحويل كل طاقته الحركية الابتدائية إلى طاقة كامنة كهروستاتيكية للنظام.

فهرست الفصل الثالث

الصفحة	الموضوع
١	١-٣: اكتشاف النشاط الإشعاعي الطبيعي
٢	٢-٣: النماذج الذرية
٣	١- نموذج تومسون
٣	٢- نموذج رذرفورد
٤	أسباب فشل نموذج رذرفورد
٥	٣-٣: نظرية الإستطارة لرذرفورد
١٢	١-٣-٣: التحقق تجريبياً من نظرية الإستطارة لرذرفورد
١٣	أسئلة
١٣	مسائل محلولة

مصادر الفصل الثالث

- ١- الفيزياء الذرية، د. طالب ناهي الخفاجي و د. عباس حمادي و د. هرمز موشي، 1980.
- ٢- مفاهيم في الفيزياء الحديثة، آرثر بايزر، ترجمة الطبعة الثانية.
- 3- Concepts of Modern Physics, Arthur Beiser, 6th ed. 2003.
- 4- Fundamentals of physics- Halliday, Resnick, Walker—10th ed. 2014.
- 5- Introduction to Atomic and Nuclear Physics, Semat and Albright, 5th ed. 1972.
- 6- Modern Physics, A. Serway, J. Moses and A. Moyer, 3rd ed. 2005.
- 7- Modern Physics, Paul A. Tipler and Ralph A. Llewellyn, Sixth Edition, 2012.
- 8- Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics, Serway and Jewett, 9th ed. 2014.
- 9- University Physics with Modern Physics, Young and Freedman, 13th ed, 2012.