1

مقدمــة

أول ما يخطر ببال الكثير من الناس حين تذكر على مسامعهم الفيزياء النووية (physique nucléaire) هو تلك الحوادث المأساوية التي تسببت بهلاك و جرح الآلاف من البشر ، كقصف المدينتين اليابانيتين « هيروشيما » (Hiroshima) و « ناغازاكي » (Nagasaki) بالقنبلة النووية في أواخر الحرب العالمية الثانية ، و انفجار المفاعل النووي (réacteur nucléaire) لمدينة تشرنوبيل (Chernobyl) الأوكرانية سنة 1986 م . و قد ساهمت مشاكل النفايات المشعة التي تخلفها المفاعلات النووية و انتشار أسلحة الدمار الشامل في استمرار خوف الناس من استخدام الطاقة النووية . و يجدر بنا أن نذكر هنا أن هذه المخاطر الحقيقية لا تواجهها دول النادي النووي[1] فقط ، بل العالم قاطبة ، و ليس لأحد أن يعتقد بأن خلو بلاده من التكنولوجيا النووية سيجعلها بمأمن من أخطار الطاقة النووية ، فالقضية النووية عالمية و تمس حياة الناس و حياة أبنائهم في المستقبل في كل مكان من الأرض .

على الرغم من كل هذه التبعات السلبية التي يجب أن يعمل كل عاقل على حصرها في نطاق ضيق ، تعد الفيزياء النووية من أهم العلوم الحديثة التي تطورت خلال القرن العشرين ، و قد أسدت للبشرية خدمات جليلة من خلال استخدام الطاقة النووية في الصناعة و الزراعة و الطب بنوعيه التشخيصي و العلاجي و غيرها . و هي قبل كل شيء علم أساسي من علوم الفيزياء يعنى بدراسة النواة الذرية ، و قد تمكن العلماء بفضلها من استجلاء الكثير من الحقائق العلمية و فك العديد من الألغاز الكونية .

[1] هي الدول الثمانية التي تملك القنبلة النووية : الولايات المتحدة و المملكة المتحدة و فرنسا و روسيا و الصين ، و هذه الدول الخمسة هم الأعضاء الدائمون لدى مجلس الأمن بهيأة الأمم المتحدة ، يضاف إليهم الهند و باكستان و إسرائيل .

1.1 التركيــب الــذري للمــادة

الجميع يعلم اليوم أن كل الأجسام المادية ، من دون أي استثناء ، سواء أكانت جامدة أم حية ، صلبة أم سائلة أم غازية ، تتركب من الذرات (atomes) . هذه الحقيقة التي أصبحت من البديهيات العلمية لم تأت بمحض الصدفة ، و لكنها وليدة عشرات القرون من الإستقصاء و التمحص . فالنظرية الذرية للمادة (structure atomique de la matière) قديمة العهد ، إذْ تمتد جذورها إلى القرن الخامس قبل الميلاد ، غير أنها لم تعتبر نظرية علمية جادة إلا بداية من القرن التاسع عشر للميلاد .

1.1.1 نشــأة النظريــة الذريــة

يبدو أن النظرية الذرية للمادة نشأت في عهد فلاسفة الإغريق القدامى ، حين تجادلوا في موضوع قابلية المادة للتجزؤ : نأخذ جسما ماديا و نقطعه إلى أجزاء صغيرة ، ثم نأخذ تلك الأجزاء و نقطعها بدورها إلى أجزاء أصغر ، و هكذا دواليك ... السؤال هنا هو : هل بإمكاننا أن نكرر هذه العملية إلى ما لا نهاية ؟ « أرسطو » (Aristote) مثلا ، و هو أشهر الفلاسفة قديما و حديثا ، كان يرى أن الحصول على قطع أصغر فأصغر يكون دائما ممكنا ، أما « لوسيب » (Leucippe) و « ديموقريط » (Démocrite) فقد كانا يعتقدان أن عملية التقطيع ستتوقف حتما حين نصل إلى اللبنات الأساسية التي تتكون منها المادة ، و التي اعتبروها غير قابلة للتجزؤ أو الإتلاف ، و أطلقوا عليها اسم **الــذرات** (atomes) .

في غياب دليل تجريبي مفحم ، ظلت فكرة التركيب الذري للمادة مجرد نظرية فلسفية طيلة حوالي 25 قرنا ، فهي لم تعتمد كليا إلا في مستهل القرن العشرين . و لم تظهر المؤشرات التجريبية الأولى عن وجود الذرة إلا مع بداية الكيمياء الحديثة (chimie moderne) في القرن التاسع عشر للميلاد . و كان العالم الإنجليزي « دالتون » (Dalton) أول من أبرز سنة 1803 م أن القوانين البسيطة التي تضبط التفاعلات الكيميائية (réactions chimiques) ، كقانون انحفاظ الكتلة أو قانون « لافوازييه » (Lavoisier) ، و قانون النسب المعينة أو قانون « بروست » (Proust) ، يمكن فهمها فهما بسيطا إذا تبنينا نظرية التركيب الذري للمادة ، و اقترح « دالتون » (Dalton) أن الأجسام المادية تتكون من الجزيئات (molécules) ، و أن كل جزيء يحتوي على عدد محدود من الذرات الأساسية المتباينة التي

لا يمكن إتلافها أو تجزءتها ، هي **العناصر الكيميائية** (éléments chimiques) ، و يتميز كل عنصر بكتلة مختلفة و يمثله رمز مختلف (H بالنسبة للهيدروجين ، C للكربون ، O للأكسيجين ...) .

2.1.1 اكتشاف الجسيمات الأولية

هل الذرة فعلا غير قابلة للإتلاف أو التجزؤ كما كان يعتقد « دالتون » (Dalton) ، و من قبله « لوسيب » (Leucippe) و « ديموقريط » (Démocrite) ؟ بعبارة أخرى ، هل النواة فعلا هي اللبنة الأساسية في تركيب المادة ؟ الجواب عن هذا السؤال المهم جاءت به سلسلة من التجارب التاريخية شهدتها نهاية القرن التاسع عشر و بداية القرن العشرين ، و التي أثبتت أن للذرة بنية داخلية و أنها تتركب من أجزاء أصغر .

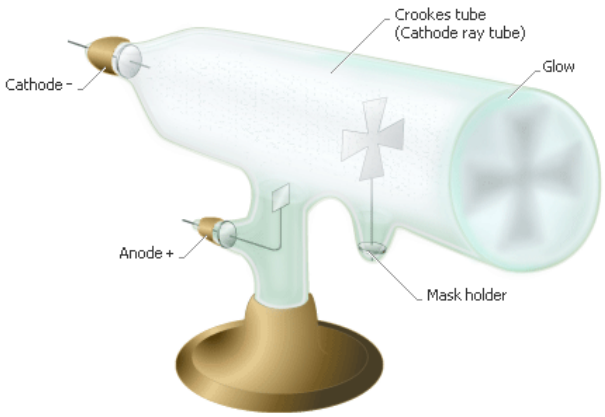
أ) اكتشاف الإلكترون

اكتشاف الإلكترون ، الذي يعد من الخطوات العملاقة الأولى للمحتوى الحديث لبنية المادة ، مرتبط ارتباطا وثيقا بأنبوب التفريغ الكهربائي أو أنبوب « كروكس » (tube de Crookes) ، الذي صممه عالم بريطاني يحمل نفس الإسم سنة 1869 م ، و هو يتمثل في أنبوب زجاجي محكم الإغلاق يحتوي على غاز تحت ضغط منخفض ، و يوجد بطرفيه مسريان كهربائيان معدنيان (électrodes) (الشكل 1.1) . عند تطبيق فرق كمون مرتفع (15000 V ≈) بين طرفي الأنبوب ، و خفض الضغط تدريجيا ، تحدث ظاهرتان على التوالي : حين يبلغ الضغط حوالي 0.1 atm يصبح الغاز متوهجا (أي منيرا)[1] ، و عندما يبلغ حوالي 0.01 atm تختفي هذه الظاهرة كليا و تحل محلها ظاهرة ثانية تتمثل في توهج الشاشة المقابلة للمهبط (cathode) .

سرعان ما أدرك العلماء أن توهج الشاشة مرده إلى أشعة غير مرئية يصدرها المهبط تسقط على قعر الأنبوب ، أطلق عليها اسم الأشعة الكاثودية (rayons cathodiques) . عام 1895 م ، أثبت العالم الفرنسي « بيران » (Perrin) أن الأشعة الكاثودية تتألف من جسيمات تحمل شحنة كهربائية سالبة إذْ لاحظ أنها تنحرف عندما تعرض إلى حقل مغناطيسي خارجي . و عام 1897 م ، أظهر العالم الإنجليزي « طومسون » (Thomson) أن هذه الظاهرة لا تتوقف على طبيعة الغاز الموجود داخل

[1] نجد هذه الظاهرة مثلا في أنبوب النيون (neon tube) الذي يستخدم في الإنارة .

الأنبوب و لا على طبيعة المعدن الذي يدخل في تكوين المسريين ، مِمَّا يعني أن هذه الجسيمات – التي أطلق عليها اسم الإلكترونات (électrons) – هي إحدى المكونات الأساسية للذرة ، و قام « طومسون » (Thomson) بقياس نسبة شحنة الإلكترون إلى كتلته ، و كذلك سرعة الإلكترونات .



الشكـل 1.1 : أنبوب كروكس عبارة عن وعاء زجاجي محكم الإغلاق يوجد بطرفيه مسريان كهربائيان و يحتوي على غاز تحت ضغط منخفض . عند تطبيق فرق كمون مرتفع ، يصدر المهبط إلكترونات تسقط على قعر الأنبوب فيصبح مضيئا .

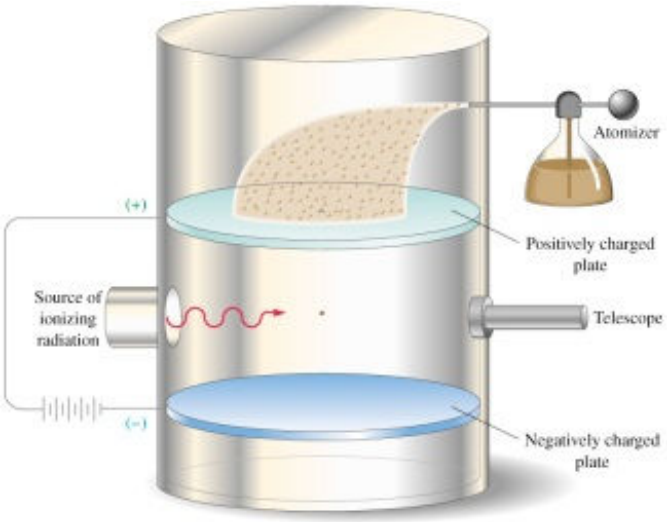
سنة 1909 م ، تمكن العالم الأمريكي « ميليكان » (Millikan) من قياس شحنة الإلكترون بفضل تجربة تاريخية تمثلت في دراسة حركة قطيرات مشحونة من الزيت بين صفيحتي مكثف أفقي (الشكل 2.1) ، و وجد أن قيمتها المطلقة – التي يرمز إليها بالحرف e – هي :

$$e = 1.602\times10^{-19}\ C$$

هذه هي أصغر قيمة للشحنة الكهربائية على الإطلاق . اكتشف أيضا « ميليكان » (Millikan) أن الشحنة الكهربائية ، مهما كانت قيمتها ، تكون دائما مضاعفا صحيحا للعدد e . بعد قياس شحنة الإلكترون ، أصبح من السهل استنتاج كتلة الإلكترون ، فهي تساوي :

$$m_e = 9.109\times10^{-31}\ kg$$

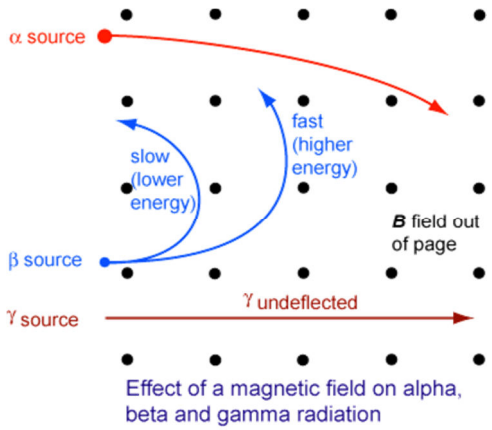
تجدر الإشارة هنا إلى أن هذه القيمة صغيرة جدا بالمقارنة مع الذرات ، فهي أقل بحوالي 2000 مرة من كتلة الهيدروجين (hydrogène) الذي يعد أخف العناصر الطبيعية وزنا .



الشكــل 2.1 : تجربة « ميليكان » (Millikan) تسمح بقياس الشحنة الكهربائية التي تحملها قطيرات من الزيت يتم رشها بين طرفي مكثف أفقي . بتطبيق فرق كمون مناسب ، يمكن أن نجعل قطيرات الماء عالقة في الهواء في حالة توازن .

ب) اكتشــاف الإشعاعــات النوويــة

سنة 1896 م ، اكتشف العالم الفرنسي « بكرال » (Becquerel) النشاط الإشعاعي (radioactivité) من خلال تجاربه على العناصر الثقيلة ، حيث لاحظ أن أملاح اليورانيوم تصدر بصورة تلقائية أشعة تشبه الأشعة السينية (rayons X) التي كان قد اكتشفها « رونتجن » (Röntgen) قبل سنة . و كانت هذه الأشعة تتأثر بطرق مختلفة عند تعرّضها لحقل مغناطيسي ، فهناك الأشعة التي كانت تنحرف يمينا ، و هناك الأشعة التي كانت تنحرف يسارا ، و هناك الأشعة التي لم تتأثر بالحقل المغناطيسي و لم تنحرف لا يمينا و لا يسارا (الشكـل 3.1) . سميت هذه الأشعة ألفا (alpha) و بيتا (bêta) و غاما (gamma) ، و يرمز لها عادة بالحروف اليونانية α و β و γ . اتضح فيما بعد أن الإشعاع α هو في الواقع نوى الهليوم (hélium) ، و أن الإشعاع β إلكترونات (électrons) ، و أن الإشعاع γ فوتونات (photons) ذات طاقة عالية . و يعد اكتشاف الإشعاعات النووية من أهم المحطات في تاريخ الفيزياء الحديثة لأنها سمحت بسبر أغوار المادة و اكتشاف تركيبها الأساسي .



الشكـــل 3.1 : تأثيـر الحقـل المغناطيـسي على الإشـعاعـات النوويـة .

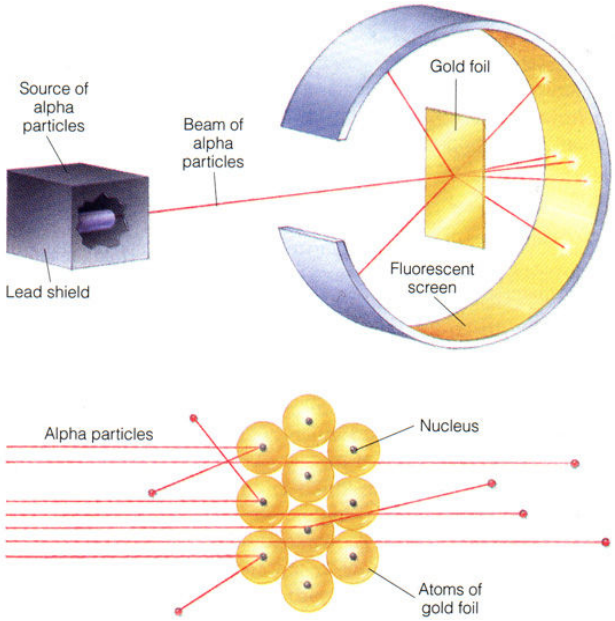
ج) اكتشـــاف النـــواة الذريـــة

اكتشاف الإلكترون كإحدى المركبات الأساسية للذرة أدى إلى طرح سؤالين :

1. ما دامت كتلة الإلكترونات مهملة أمام كتلة الذرة ، فأين توجد الكتلة المتبقية للذرة ؟
2. و ما دامت الذرة متعادلة كهربائيا و الإلكترونات سالبة ، فأين توجد الشحنة الكهربائية الموجبة للذرة ؟

للإجابة عن هاذين السؤالين ، اقترح العلماء عدة نظريات مختلفة ، لكن الأمر لم يحسم إلا سنة 1911 م حين اكتشف « روذرفورد » (Rutherford) و طالبيه « جيجر » (Geiger) و « مارسدن » (Marsden) النواة الذرية (noyau atomique) بفضل تجربة شهيرة تمثلت في قذف وريقة ذهبية بحزمة من جسيمات α و مراقبة مساراتها (الشكـل 4.1) . يلاحظ في هذه التجربة أن الأغلبية الساحقة لجسيمات α تخترق الوريقة الذهبية من دون انحراف ، لكن هناك عدد ضئيل منها ينحرف بشدة عن مساره الأصلي ، و في بعض الأحيان يرتد تماما إلى الوراء . أشار « روذرفورد » (Rutherford) إلى أن ارتداد جسيمات α إلى الوراء يدل على وجود قوة نابذة بالغة الشدة داخل الذرة ، قوة لا يمكن أن تنتجها الإلكترونات لأنها سالبة و أخف وزنا من الجسيمات α بحوالي 7000 مرة ، و بالتالي فإن أثرها مهمل تماما . التفسير الوحيد حسب هذا العالم هو تمركز الشحنة الموجبة للذرة في مكان متناهي الصغر داخل الذرة ، و هو النواة الذرية ، فعندما يكون التصادم رأسيا بين جسيم α و نواة ذرية من

نوى الوريقة الذهبية ، يكون الإنحراف كبيرا بسبب قوة الدفع الكولومية بين الشحنتين الموجبتين . لوحظ أيضا خلال هذه التجربة أن الجسيمات α التي ترتد إلى الوراء هي بنسبة حوالي 1 من كل 10000 ، و بما أن القطر الذري من رتبة 10^{-10} m ، استنتج « روذرفورد » (Rutherford) أن قطر النواة أصغر من القطر الذري بحوالي 10000 مرة ، أي أنه من رتبة 10^{-14} m .



الشكـل 4.1 : تجربـة « روذرفـورد » (Rutherford) تتمثـل في قـذف وريقـة ذهبيـة بجسيمـات α يبعثـها مصـدر مشـع . أغلبيـة الجسيمـات α تخـترق الوريقـة دون انحـراف ، لكنـها في بعـض الحـالات النـادرة تصطـدم بالنـوى الذريـة فتنحـرف بشـدة عن مسـارها الأصـلي و قد ترتـد تمامـا إلى الـوراء .

د) اكتشـاف البروتـون و النوتـرون

بعد اكتشاف النواة الذرية ، اهتم العلماء بدراسة بنيتها الداخلية ، و ذلك من خلال قذفها بمختلف الإشعاعات النووية . سنة 1918 م ، اكتشف « روذرفورد » (Rutherford) أن عنصر الآزوت (azote) ، عندما يقذف بجسيمات α ، يمتص أحيانا الجسيم α و يتحول إثر ذلك إلى أكسجين (oxygène) ، و ينبعث في نفس الوقت جسيم أخف وزنا من الجسيم α ، هو البروتون (proton) :

$$\alpha + N \rightarrow O + p$$

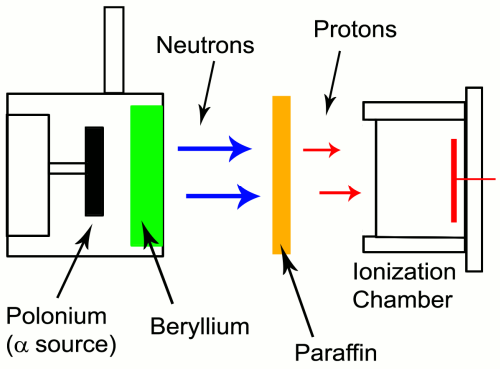
و لقد كرر العلماء هذه التجربة مع عناصر أخرى كالبورون (bore) و الفلور (fluor) و تحصلوا أيضا على بروتونات . يحمل البروتون شحنة كهربائية موجبة تساوي القيمة المطلقة لشحنة الإلكترون ، أما كتلته فهي أكبر من كتلة الإلكترون بحوالي 1934 مرة و تساوي :

$$m_p = 1.672622\times10^{-27}\ \text{kg}$$

عام 1932 م ، قام العالم البريطاني « تشادويك » (Chadwick) بقذف مادة البريليوم (béryllium) بجسيمات α فلاحظ انبعاث جسيمات محايدة ، و هي النوترونات (neutrons) التي لها تقريبا نفس وزن البروتون :

$$m_n = 1.674927\times10^{-27}\ \text{kg}$$

على عكس البروتون ، لا يحمل النوترون شحنة كهربائية ، و بالتالي فإن كشفه بطريقة مباشرة صعب جدا ، غير أنه – عند اختراقه للمادة – ينتج أحيانا بروتونا يمكن كشفه بسهولة (الشكل 5.1) . اكتشاف النوترون يعد تحولا حاسما في تاريخ الفيزياء النووية ، لأنه أدى إلى اكتشاف القوة النووية (force nucléaire) ، و بالتالي الطاقة النووية (énergie nucléaire) التي استخدمت في مجالات متعددة بما فيها القنبلة النووية التي اخترعت حوالي عشر سنوات بعد اكتشاف النوترون .



الشكـــل 5.1 : تجربـة « شادويـك » (Chadwick) تتمثـل في قـذف البريلـيوم بجسيـمات α مـما يـؤدي إلى إنتـاج النوتـرونات . عند اختراقـها لمـادة البرافيـن ، تنتـج النوتـرونات بـروتونات يمكـن كشفـها بسهولـة .

3.1.1 النمـوذج الحديـث للـذرة

بعد اكتشاف الجسيمات الأساسية الثلاث ، الإلكترون و البروتون و النوترون ، ألف العلماء نموذجا حديثا للذرة ، يعرف بنموذج « روذرفورد » (Rutherford) ، و يتلخص في النقاط التالية :

- تتركب الذرة من نواة و إلكترونات تدور حولها على مسافات كبيرة جدا مقارنة بقطر النواة الذرية .
- تشتمل النواة الذرية على عدد من البروتونات ، يرمز له بالحرف Z و يدعى الرقم الذري (nombre atomique) ، و على عدد من النوترونات ، يرمز له بالحرف N . عدد البروتونات و النوترونات — التي يجمعها اسم النُّوَيَّات (nucléons) — يساوي إذن $A = Z + N$ ، و هو يدعى الرقم الكتلي (nombre de masse) .
- يكون دائما عدد الإكترونات مساويا لعدد البروتونات أي Z ، مما يضمن تعادل الذرة كهربائيا .

تمثل كل قيمة للرقم الذري Z عنصرا كيميائيا (élément chimique) ، و يتميز كل عنصر بإسم و رمز مختلفين . مثلا $Z = 8$ هو الأكسيجين و $Z = 26$ الحديد ... العنصر هو إذن مجموع الذرات التي تحتوي على نفس العدد من البروتونات داخل النواة ، و نفس العدد من الإلكترونات المدارية .

يمثل كل زوج من العددين Z و N نويدة أو نكليدا (nucléide) ، فالنكليد إذن هو مجموع الذرات التي تحتوي على نفس العدد من البروتونات و نفس العدد من النوترونات . عمليا يعرف كل نكليد على الشكل التالي :

$$^{A}_{Z}\mathrm{X}_{N}$$

حيث يرمز X إلى العنصر المدروس . مثلا :

$$^{2}_{1}\mathrm{H}_{1}\ ,\ ^{4}_{2}\mathrm{He}_{2}\ ,\ ^{56}_{26}\mathrm{Fe}_{30}\ ,\ ^{235}_{92}\mathrm{U}_{143}\ \ldots$$

نعرف لحد الساعة 118 عنصرا كيميائيا ، الإثنان و تسعون (92) الأولى منها طبيعية ، أي موجودة في قشرة الأرض ، باستثناء التكنيسيوم (technécium) $_{43}$Tc و البروميثيوم (prométhéum) $_{61}$Pm . تعرف

العناصر ذات الأرقام الذرية التي تزيد عن 92 بالعناصر ما وراء اليورانيوم (éléments transuraniens) ، و هي غير موجودة في الطبيعة و يتم إنتاجها اصطناعيا في مخابر الفيزياء النووية عن طريق التفاعلات النووية (réactions nucléaires) . كما يوجد 340 نكليدا طبيعيا منها 255 نكليدا مستقرا ، و حوالي 3000 نكليدا اصطناعيا .

بإمكان ذرتين أن تملكان نفس عدد البروتونات و تختلفان في عدد النوترونات ، في هذه الحالة نقول أنهما نظيران (isotopes) . العناصر الطبيعية كلها مزيج من عدة نظائر ، فالهيدروجين (H) مثلا له 3 نظائر و الأكسيجين (O) 3 و الحديد (Fe) 4 و القصدير (Sn) 10 ... النكليدات التي لها نفس العدد N – بصرف النظر عن الرقم الذري Z – تسمى متساويات النوترونات (isotones) ، و التي لها نفس الرقم الكتلي A ، و إن كانت تختلف في الرقم الذري Z ، تسمى متساويات الكتلة (isobares) .

2.1 تكافـؤ الكتلـة و الطاقـة

يعد تكافؤ الطاقة و الكتلة (équivalence masse-énergie) من أهم نتائج نظرية النسبية الخاصة (relativité restreinte) التي ألفها « أينشتاين » (Einstein) عام 1905 م ، و هي تبرز أن الكتلة m و الطاقة E لجسم ما مقداران متكافئان يمكن نقل أحدهما للآخر ، و تعبر عنها العلاقة الشهيرة :

$$E = m\,c^2 \tag{1.1}$$

حيث تمثل c سرعة الضوء في الفراغ ($c = 3\times10^8$ m/s) . تشير أيضا هذه العلاقة إلى أن أي كتلة مادية قادرة على تقديم طاقة خيالية إذا أمكن تحويلها و تحريرها . مثلا ، 1 كلغ من المادة ينتج حوالي 9×10^{16} J و هي قيمة عالية جدا[1] . و من جهة أخرى ، يحتاج الحصول على كتلة مادية صغيرة إلى طاقة هائلة . و تشير أيضا إلى أن كل تغير في الكتلة لجملة مادية يصحبه تغير في الطاقة ، و كذلك كل جملة فيزيائية مصدرة للطاقة على أي شكل الأشكال ينقص وزنها ، بحيث :

$$\Delta E = \Delta m\,\mathrm{c}^2 \tag{2.1}$$

[1] هذه القيمة تساوي تقريبا الطاقة الكهربائية الإجمالية التي استهلكتها الجزائر بأكملها خلال سنة 2005 .

الشمس مثلا ينقص وزنها بحوالي 4 ملايين طن في كل ثانية بسبب الإشعاع الذي تصدره مع العلم أن كتلة الشمس كبيرة جدا ($\approx 2\times10^{30}$ kg) .

هناك علاقة ثانية للفيزيائي « أينشتاين » (Einstein) كثيرة الإستعمال في الفيزياء النووية ، و هي تربط بين الطاقة E و كمية الحركة p و كتلة السكون m_0 :

$$E^2 = p^2c^2 + m_0^2c^4 \tag{3.1}$$

3.1 وحـدات و أبعـاد

الأطوال على مستوى النواة الذرية متناهية الصغر ، فهي من رتبة الفمتومتر (femtomètre) ، أي من رتبة 10^{-15} m . لهذا استخدمت هذه القيمة كوحدة للأبعاد في الفيزياء النووية بدلا عن المتر (m) و أطلق عليها اسم الفرمي (fermi) ، رمزه fm ، تكريما للفيزيائي النووي الإطالي الذي يحمل نفس الإسم :

$$1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$$

يتميز السلم الزمني للفيزياء النووية بمدى فسيح جدا ، حيث نجد أن بعض الظواهر النووية لا تدوم أكثر من 10^{-20} s ، كانحلال النكليد $^{5}_{2}\text{He}$ مثلا ، بينما تستغرق أخرى ملايين السنين ، على غرار انحلال النكليد $^{236}_{92}\text{U}$.

الجول (joule) ، و هو وحدة قياس الطاقة في النظام الدولي للوحدات ، قيمته كبيرة جدا بالمقارنة مع قيم الطاقات النووية (énergies nucléaires) . لهذا نستخدم عادة في الفيزياء النووية – بدلا عن الجول – وحدة أخرى هي الميغاإلكترون فلط (megaélectron-volt) ، رمزها MeV ، و هي تساوي كما يشير إليه اسمها مليون إلكترون فلط (électron-volt) :

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$$

مع العلم أن الإلكترون فلط ، رمزه eV ، يساوي :

$$1 \text{ eV} = 1.602\times10^{-19} \text{ J}$$

الكتل النووية (masses nucléaires) هي الأخرى صغيرة جدا مقارنة مع وحدة قياس الكتلة في النظام الدولي للوحدات ، أي الكيلوغرام (kilogramme) . و لهذا نستعمل عادة لقياس الكتلة ما يعرف بوحدة الكتلة الذرية (unité de masse atomique) ، رمزها u ، و هي تساوي اصطلاحا جزءا واحدا من 12 جزءا من كتلة نكليد الكربون ${}^{12}_{6}\mathrm{C}$:

$$1\ \mathrm{u} = \frac{1}{12}\, m\left({}^{12}_{6}\mathrm{C}\right)$$

هذا يعني أيضا أن كتلة النكليد ${}^{12}_{6}\mathrm{C}$ تساوي اصطلاحا :

$$m\left({}^{12}_{6}\mathrm{C}\right) = 12\ \mathrm{u}$$

من جهة أخرى يعرف عدد آفوغادرو (nombre d'Avogadro) $\mathcal{N}$ كالعدد الإجمالي للذرات الموجودة في 12 g من النكليد ${}^{12}_{6}\mathrm{C}$ و هو يساوي :

$$\mathcal{N} = 6.022\times10^{23}$$

و منه نستنتج أن :

$$1\ \mathrm{u} = 1.660539\times10^{-27}\ \mathrm{kg} = 931.502\ \mathrm{MeV/c^2}$$

تجدر الإشارة هنا إلى أن :

$$m_\mathrm{p} \approx m_\mathrm{n} \approx 1\ \mathrm{u}$$