الفصل الأول

النــواة الذريــة

لا شك أن أول ما يتبادر إلى أذهان الكثير من الناس حين تذكر على مسامعهم الفيزياء النووية (nuclear physics) هو تلك الحوادث المأساوية التي تسببت في هلاك و جرح الآلاف من البشر ، مثل قصف المدينتين اليابانيتين "هيروشيما" (Hiroshima) و "ناغازاكي" (Nagasaki) بالقنبلة النووية في أواخر الحرب العالمية الثانية (1945) ، و انفجار المفاعل النووي (nuclear reactor) لمدينة "تشرنوبيل" (Chernobyl) الأوكرانية عام 1986 . و لقد ساهمت مشاكل النفايات المشعة التي تخلفها المفاعلات النووية و انتشار أسلحة الدمار الشامل في استمرار خوف الناس من استخدام الطاقة النووية . تجدر الإشارة هنا إلى أن هذه المخاطر الحقيقية لا تواجهها دول النادي النووي 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. التركيــب الــذري للمــادة

يعلم الجميع اليوم أن كل الأجسام المادية ، من دون أي استثناء ، سواء أكانت جامدة أم حية ، صلبة أم سائلة أم غازية ، تتركب من الذرات (atoms) . هذه الحقيقة التي أصبحت من البديهيات العلمية لم تأت بمحض الصدفة ، و لكنها وليدة عشرات القرون من البحث و التفكير . فالنظرية الذرية للمادة

(atomic structure of matter) قديمة العهد ، إذْ تمتد جذورها إلى القرن الخامس قبل الميلاد ، غير أنها لم تعتبر نظرية علمية جادة إلا بداية من القرن التاسع عشر للميلاد .

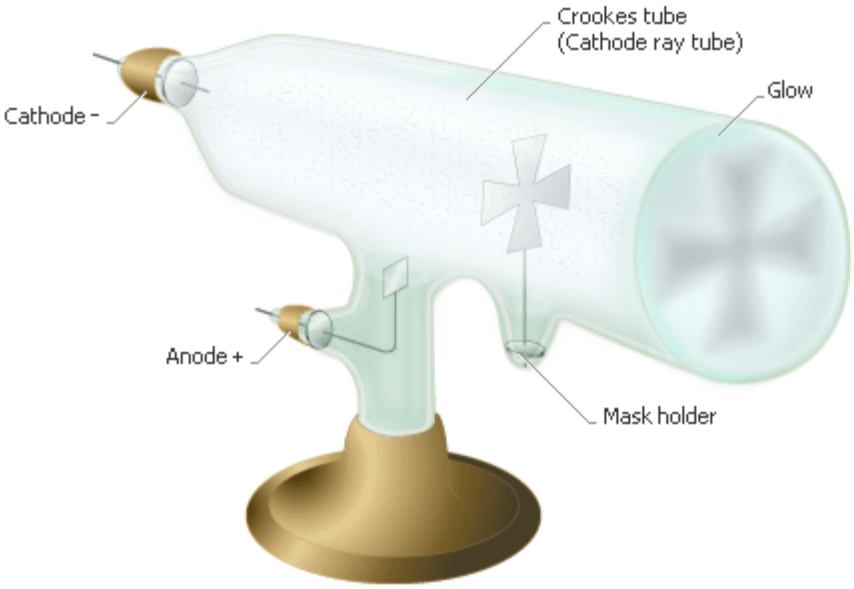
ا) نشـأة النظريــة الذريــة

يبدو أن النظرية الذرية للمادة نشأت في العهد الإغريقي القديم ، حين تجادل الفلاسفة 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 يمكننا أن نكرر هذه العملية إلى الأبد ؟ "أرسطو" (Aristotle) مثلا ، و هو أشهر الفلاسفة قديما و حديثا ، كان يرى أن الحصول على قطع أصغر فأصغر يكون دائما ممكنا ، أما "لوسيبوس" (Leucippus) و "ديموقريطس" (Democritus) فقد كانا يعتقدان أن عملية التقطيع ستتوقف حتما حين نصل إلى اللبنات الأساسية الأخيرة التي تتكون منها المادة ، التي اعتبروها غير قابلة للتجزؤ أو الإتلاف و أطلقوا عليها اسم الذرات (atoms) .

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 . المؤشرات التجريبية الأولى عن وجود الذرة لم تظهر إلا مع بداية الكيمياء الحديثة (modern chemistry) في القرن التاسع عشر للميلاد ، و كان العالم الإنجليزي "دالتون" (Dalton) أول من أبرز عام 1803 أن القوانين البسيطة التي تحكم التفاعلات الكيميائية (chemical reactions) ، كقانون انحفاظ الكتلة أو قانون "لافوازييه" (Lavoisier) ، و قانون النسب الثابتة أو قانون "بروست" (Proust) ، يمكن فهمها فهما بسيطا إذا تبنينا نظرية التركيب الذري للمادة ، و اقترح أن الأجسام المادية تتكون من الجزيئات (molecules) ، و أن كل جزيء يحتوي على عدد محدود من الذرات الأساسية المتباينة التي لا يمكن إتلافها أو تجزءتها ، ألا و هي العناصر الكيميائية (chemical elements) التي يتميز كل منها بكتلة مختلفة و يمثله رمز مختلف . مثلا H يرمز للهيدروجين و C للكربون و O للأكسيجين ...

ب) اكتشـاف الجسيمـات الأوليــة

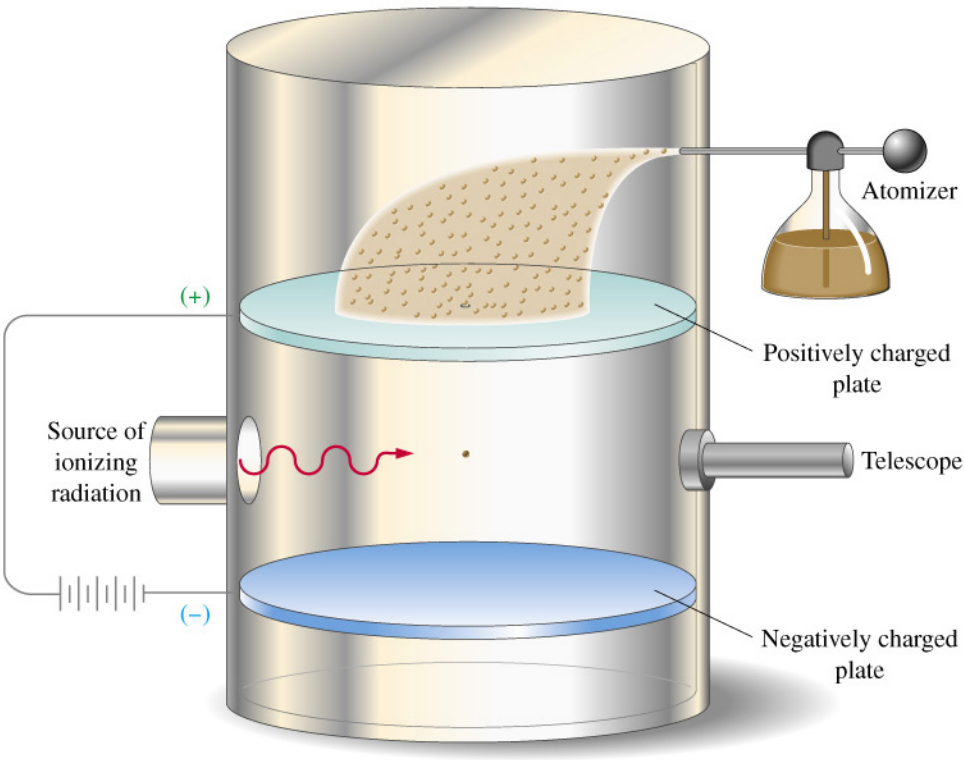
هل الذرة فعلا غير قابلة للإتلاف أو التجزؤ كما كان يعتقد "دالتون" و من قبله "لوسيبوس" و "ديموقريطس" ؟ بعبارة أخرى ، هل هي بالفعل اللبنة الأساسية لتركيب المادة ؟ الجواب عن هذا السؤال المهم جاءت به سلسلة من التجارب التاريخية شهدتها نهاية القرن التاسع عشر و بداية القرن العشرين ، و التي أثبتت أن للذرة بنية داخلية و أنها تتركب من أجزاء أصغر .



شكـل 1: أنبوب "كروكس" : يصدر المهبط إلكترونات تسقط على قعر الأنبوب فيصبح مضيئا .

- اكتشـاف الإلكتـرون

اكتشاف الإلكترون (electron) يعد من الخطوات العملاقة الأولى للمحتوى الحديث لبنية المادة ، و هو مرتبط ارتباطا وثيقا بأنبوب التفريغ الكهربائي أو أنبوب "كروكس" (Crookes tube) الذي صممه عالم بريطاني يحمل نفس الإسم عام 1869 ، و هو يتمثل في أنبوب زجاجي محكم الإغلاق يحتوي على غاز تحت ضغط منخفض ، و يوجد بطرفيه مسريان كهربائيان معدنيان (electrodes) (الشكل 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) ، 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 سببه أشعة غير مرئية يصدرها المهبط تسقط على قعر الأنبوب ، أطلق عليها اسم الأشعة الكاثودية (cathode rays) . عام 1895 أثبت العالم الفرنسي "بيران" (Perrin) أن الأشعة الكاثودية تتألف من جسيمات تحمل شحنة كهربائية سالبة ، حيث لاحظ أنها تنحرف عندما تعرض إلى حقل مغناطيسي خارجي . و عام 1897 أظهر العالم الإنجليزي "طومسون" (Thomson) أن هذه الظاهرة لا تتوقف على طبيعة الغاز الموجود داخل الأنبوب و لا على طبيعة المعدن الذي يدخل في تكوين المسريين ، مما يعني أن هذه الجسيمات التي أطلق عليها اسم الإلكترونات هي إحدى المكونات الأساسية للذرة ، و قام "طومسون" بقياس نسبة شحنة الإلكترون إلى كتلته ، و كذلك سرعة هذه الجسيمات .



شكـل 2: تجربة "ميليكان" الشهيرة التي سمحت بقياس الشحنة الكهربائية للإلكترون .

عام 1909 تمكن العالم الأمريكي "ميليكان" (Millikan) من قياس شحنة الإلكترون بفضل تجربة تاريخية تمثلت في دراسة حركة قطيرات مشحونة من الزيت يتم رشها بين صفيحتي مكثف أفقي (الشكل 2) . بتطبيق فرق كمون مناسب ، يمكننا جعل قطيرات الزيت عالقة في الهواء في حالة توازن تام ، و من ثم نستنتج شحنة الإلكترون التي تساوي قيمتها المطلقة :

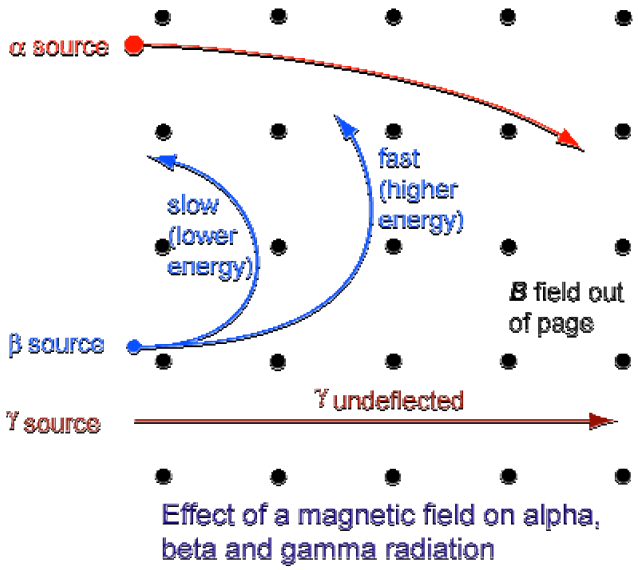
$$\mathrm{e} = 1.602 \times 10^{-19}\ \mathrm{C}$$

هذه هي أصغر قيمة للشحنة الكهربائية على الإطلاق . اكتشف أيضا "ميليكان" أن الشحنة الكهربائية تكون دائما مضاعفا صحيحا للعدد e .

بعد قياس شحنة الإلكترون ، أصبح من السهل جدا استنتاج كتلة الإلكترون ، فهي تساوي :

$$m_{\mathrm{e}} = 9.109 \times 10^{-31}\ \mathrm{kg}$$

تجدر الإشارة هنا إلى أن هذه القيمة صغيرة جدا بالمقارنة مع وزن الذرة ، فهي مثلا حوالي 2000 مرة أقل من كتلة الهيدروجين (hydrogen) الذي يعتبر أخف العناصر الطبيعية وزنا .



شكـل 3: تأثير الحقل المغناطيسي على الإشعاعات النووية .

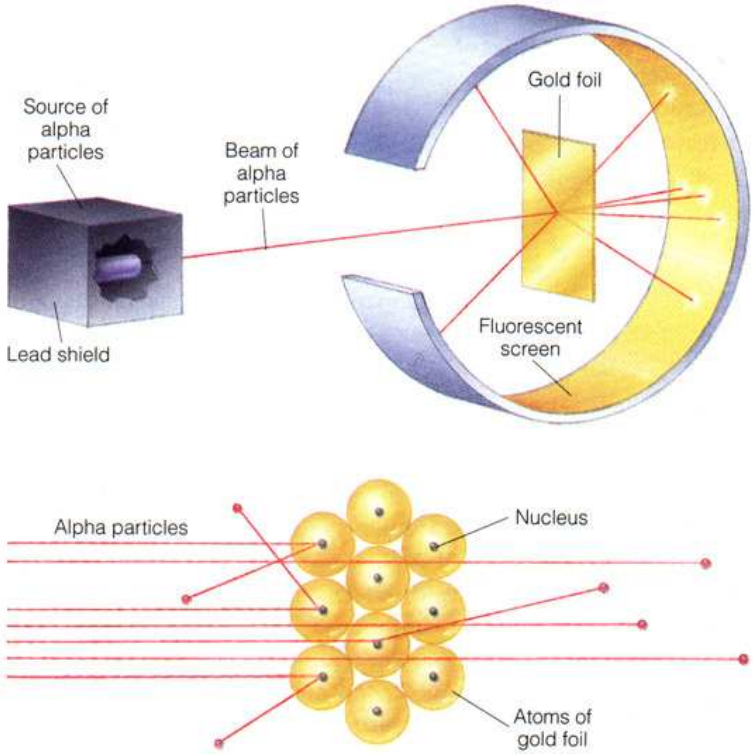
- اكتشـاف الاشعاعـات النوويـة

عام 1896 اكتشف العالم الفرنسي "بكرال" (Becquerel) النشاط الإشعاعي (radioactivity) من خلال تجاربه على العناصر الثقيلة ، حيث لاحظ أن أملاح اليورانيوم تصدر بصورة تلقائية أشعة تشبه الأشعة السينية (X-rays) التي كان قد اكتشفها "رونتجن" (Roentgen) قبل سنة . كانت هذه الأشعة تتأثر بطرق مختلفة عند تعرضها 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 (الشكل 3) . سميت هذه الأشعة ألفا (alpha) و بيتا (beta) 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 (helium) ، و أن الإشعاع β إلكترونات (electrons) ، و أن الإشعاع γ فوتونات (photons) عالية الطاقة . يعد اكتشاف الإشعاعات النووية من أهم المحطات في تاريخ الفيزياء الحديثة لأنها سمحت بسبر أغوار المادة و اكتشاف تركيبها الأساسي .

- اكتشـاف النـواة الذريـة

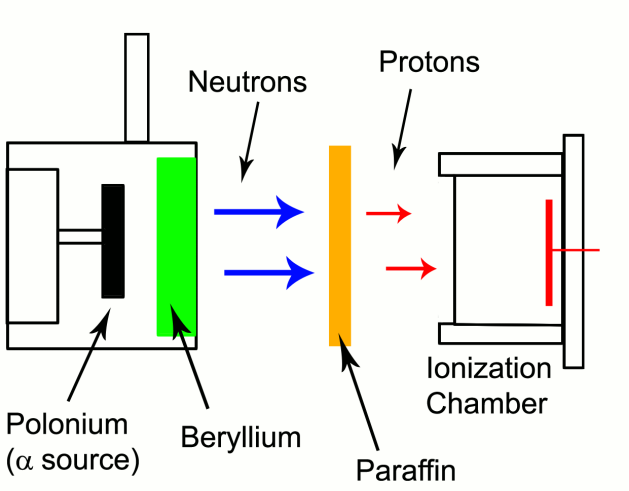
اكتشاف الإلكترون كإحدى المركبات الأساسية للذرة أدى إلى طرح سؤالين :

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 ؟



شكـل 4: أغلبية الجسيمات α تخترق الوريقة الذهبية دون انحراف ، لكنها في بعض الحالات النادرة تصطدم بالنوى الذرية للذهب فتنحرف بشدة عن مسارها الأصلي و قد ترتد تماما إلى الوراء (تجربة "روذرفورد") .

للإجابة عن هاذين السؤالين ، اقترح العلماء نظريات مختلفة ، لكن الأمر لم يحسم إلا عام 1911 حين اكتشف "روذرفورد" (Rutherford) ، مع طالبيه "جيجر" (Geiger) و "مارسدن" (Marsden) ، النواة الذرية (atomic nucleus) ، و ذلك بفضل تجربة شهيرة تمثلت في قذف وريقة ذهبية بحزمة من جسيمات α - يبعثها مصدر مشع - و مراقبة مساراتها (الشكل 4) . يلاحظ في هذه التجربة أن الأغلبية الساحقة لجسيمات α تخترق الوريقة الذهبية من دون انحراف ، لكن عدد ضئيل منها ينحرف بشدة عن مساره الأصلي ، و في بعض الأحيان يرتد الجسيم α تماما إلى الوراء . أشار "روذرفورد" إلى أن ارتداد جسيمات α إلى الوراء يدل على وجود قوة نابذة بالغة الشدة داخل الذرة ، لا يمكن أن تنتجها الإلكترونات لأنها سالبة و أخف وزنا من الجسيمات α بحوالي 7000 مرة ، و بالتالي فإن أثرها مهمل تماما . التفسير الوحيد هو تمركز الشحنة الموجبة للذرة في مكان متناهي الصغر داخل الذرة ، و هذه هي النواة الذرية . عندما يكون التصادم رأسيا بين جسيم α و نواة ذرية من نوى الوريقة الذهبية ، يكون الإنحراف كبيرا بسبب قوة التنافر 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" أن قطر النواة أصغر من القطر الذري بحوالي 10000 مرة ، أي أنه من رتبة 10^{-14} m .



شكـل 5: عند اختراقها لمادة البرافين ، تنتج النوترونات بروتونات يمكن كشفها بسهولة (تجربة "شادويك") .

- اكتشـاف البروتـون و النوتـرون

بعد اكتشاف النواة الذرية ، اهتم العلماء بدراسة بنيتها الداخلية من خلال قذفها بمختلف الإشعاعات النووية المتوفرة آنذاك . عام 1918 اكتشف "روذرفورد" أن عنصر النيتروجين (nitrogen) ، عندما يقذف بجسيمات α ، يتحول أحيانا إلى أكسجين (oxygen) ، و ينبعث في نفس الوقت جسيم جديد أخف وزنا من الجسيم α ، هو البروتون (proton) :

$$\alpha + \mathrm{N} \rightarrow \mathrm{O} + \mathrm{p}$$

كرر العلماء هذه التجربة مع عناصر أخرى كالبورون (boron) و الفلور (fluorine) 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 :

$$m_{\mathrm{p}} = 1.672622 \times 10^{-27}\ \mathrm{kg}$$

عام 1932 قام العالم البريطاني "تشادويك" (Chadwick) بقذف مادة البريليوم (beryllium) بجسيمات α فلاحظ انبعاث جسيمات جديدة ، هي النوترونات (neutrons) التي تحمل نفس وزن البروتون تقريبا . 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) . اكتشاف النوترون يعد تحولا حاسما في تاريخ الفيزياء النووية ، لأنه أدى إلى اكتشاف القوة النووية (strong nuclear force) ، و بالتالي الطاقة النووية (nuclear energy) التي استخدمت في مجالات متعددة ، بما في ذلك القنبلة النووية التي اخترعت حوالي عشر سنوات بعد اكتشاف النوترون .

ج) النمـوذج الحديـث للـذرة

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

- تتركب الذرة من نواة مركزية و إلكترونات تدور حولها على مسافات كبيرة جدا مقارنة بقطر النواة .
- تشمل النواة الذرية عددا من البروتونات ، يدعى الرقم الذري (atomic number) و يرمز له بالحرف Z ، و عددا من النوترونات يرمز له بالحرف N . البروتونات و النوترونات معا تمثل النويات (nucleons) . عدد النويات يسمى الرقم الكتلي (mass number) و يرمز له بالحرف A . لدينا :

$$A = Z + N \qquad (1)$$

- عدد الإكترونات يكون دائما مساويا لعدد البروتونات (Z) ، مما يضمن تعادل الذرة كهربائيا ، و بالتالي فإن الرقم الذري Z هو الذي يحدد الخصائص الكيميائية للذرة .

تمثل كل قيمة للرقم الذري Z عنصرا كيميائيا (chemical element) ، و يتميز كل عنصر بإسم و رمز مختلفين . مثلا ، $Z = 8$ يمثل الأكسجين (O) و $Z = 26$ يمثل الحديد (Fe) . العنصر هو إذن مجموع الذرات التي تحتوي على نفس العدد من البروتونات و نفس العدد من الإلكترونات .

يمثل كل زوج من العددين Z و N نكليدا (nuclide) . فالنكليد إذن هو مجموع الذرات التي تحتوي على نفس العدد من البروتونات و نفس العدد من النوترونات . عمليا يكتب النكليد على الشكل التالي :

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

حيث يرمز X إلى العنصر المدروس . مثلا :

$$^{2}_{1}\mathrm{H}_{1} \ ; \ ^{4}_{2}\mathrm{He}_{2} \ ; \ ^{56}_{26}\mathrm{Fe}_{30} \ ; \ ^{238}_{92}\mathrm{U}_{146} \ \cdots$$

نعرف لحد الساعة 118 عنصرا كيميائيا ، الإثنان و تسعون (92) الأولى منها طبيعية ، أي موجودة في قشرة الأرض ، باستثناء التكنيشيوم (technetium) و البروميثيوم (promethium) . تعرف العناصر التي يزيد رقمها الذري عن 92 بالعناصر ما وراء اليورانيوم (transuranians) ، و هي غير موجودة في الطبيعة و يتم إنتاجها اصطناعيا في مخابر الفيزياء النووية عن طريق التفاعلات النووية (nuclear reactions) . كما يوجد 339 نكليدا طبيعيا منها 252 نكليدا مستقرا ، و حوالي 3000 نكليدا اصطناعيا .

النوى التي لها نفس الرقم الذري Z و تختلف في رقمها الكتلي A تسمى نظائر (isotopes) . العناصر الكيميائية كلها مزيج من عدة نظائر ، فالهيدروجين (H) مثلا له 3 نظائر طبيعية و الأكسجين (O) له 3 و الحديد (Fe) له 4 و القصدير (Sn) له 10 ...

النوى التي تحتوي على نفس العدد N من النوترونات و تختلف في رقمها الذري Z تسمى متساويات النوترونات (isotones) . مثلا :

$$^{12}_{5}\mathrm{B}_{7}\ ;\ ^{13}_{6}\mathrm{C}_{7}\ ;\ ^{13}_{7}\mathrm{N}_{7}\ ...$$

النوى التي لها نفس الرقم الكتلي A و تختلف في رقمها الذري Z تسمى متساويات الكتلة (isobars) . مثلا :

$$^{40}_{18}\mathrm{Ar}\ ;\ ^{40}_{19}\mathrm{K}\ ;\ ^{40}_{20}\mathrm{Ca}\ ...$$

2. وحـدات و أبعـاد

الأطوال على مستوى النواة الذرية متناهية القصر ، فهي من رتبة الفمتومتر (femtometre) ، أي $10^{-15}\ \mathrm{m}$ ، لذلك نستخدم عادة هذه القيمة كوحدة للأبعاد في الفيزياء النووية بدلا عن المتر (metre) ، هي تعرف أيضا باسم الفرمي (fermi) ، رمزه fm ، تكريما للفيزيائي الإيطالي الذي يحمل نفس الإسم :

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

يتميز السلم الزمني للفيزياء النووية بمدى فسيح جدا ، إذْ أن بعض الظواهر النووية لا تدوم أكثر من $10^{-20}\ \mathrm{s}$ ، كانحلال النكليد $^{5}_{2}\mathrm{He}$ مثلا ، بينما تستغرق أخرى ملايين السنين ، كانحلال النكليد $^{236}_{92}\mathrm{U}$. لهذا السبب ، نستعمل كل الوحدات الزمنية في الفيزياء النووية .

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

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

مع العلم أن الإلكترون فلط ، رمزه eV ، يساوي :

$$1\ \mathrm{eV} = 1.602 \times 10^{-19}\ \mathrm{J}$$

الكتل النووية (nuclear masses) هي الأخرى صغيرة جدا مقارنة مع وحدة قياس الكتلة في النظام العالمي للوحدات ، أي الكيلوغرام (kilogram) . و لهذا نستعمل عادة ما يعرف بوحدة الكتلة الذرية (atomic mass unit) ، رمزها u ، و هي تساوي اصطلاحا جزءا واحدا من 12 جزءا من كتلة نكليد الكربون ${}^{12}_{6}\mathrm{C}$ ، و هذا يعني أن كتلة النكليد ${}^{12}_{6}\mathrm{C}$ تساوي اصطلاحا :

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

من جهة أخرى يُعرَّف عدد "آفوغادرو" (Avogadro) كالعدد الإجمالي للذرات الموجودة في $12\ \mathrm{g}$ من النكليد ${}^{12}_{6}\mathrm{C}$ و هو يساوي :

$$N_{\mathrm{A}} = 6.02 \times 10^{23}$$

و منه نستنتج أن :

$$1\ \mathrm{u} = \frac{1}{12}\frac{M\left({}^{12}_{6}\mathrm{C}\right)}{N_{\mathrm{A}}} = \frac{1}{N_{\mathrm{A}}} = 1.6605 \times 10^{-24}\ \mathrm{g} = 931.5\ \mathrm{MeV/c^2}$$

قانون "أينشتاين" (Einstein) لتكافؤ الكتلة و الطاقة يقودنا إلى العلاقة المهمة التالية :

$$1\ \mathrm{u} = 931.5\ \mathrm{MeV/c^2} \qquad (2)$$

تجدر الإشارة هنا إلى أن :

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

و من ثم تعادل كتلة نواة تحمل A نوية :

$$m \approx A\ \mathrm{u}$$

اختيار وحدة الكتل الذرية بهذه الطريقة يجعل كتلة النواة الذرية المعبر عنها بوحدة الكتل الذرية (u) مساوية للكتلة المولية الذرية (atomic molar mass) المعبر عنها بوحدة الغرام (g) :

$$m\ (\mathrm{u}) = \frac{m\ (\mathrm{g})}{u\ (\mathrm{g})} = N_{\mathrm{A}} \times m\,(\mathrm{g}) = M\ (\mathrm{g})$$

3. نصف القطر النووي

على غرار نصف القطر الذري ، تعريف نصف القطر النووي (nuclear radius) غير دقيق ، لأن النواة الذرية ليست كرة صلبة محدودة في الفضاء . نصف قطر النواة الذرية يعطينا فقط فكرة عن حجم المكان الذي تتمركز فيه النويات في أغلب الأحيان .

تم قياس نصف القطر النووي بواسطة تجارب استطارة الإلكترونات السريعة ، و هي تتمثل في قذف نوى ذرية بحزمة من الإلكترونات التي تتراوح طاقتها بين 5 MeV و 10 MeV و دراسة الإلكترونات التي تعكسها النوى الذرية . كل هذه التجارب تشير إلى أن نصف القطر النووي R يتناسب مع الجذر التكعيبي للعدد الكتلي A :

$$R = r_0 A^{1/3} \tag{3}$$

حيث يمثل r_0 ثابتا قيمته :

$$r_0 \approx 1.2 \text{ fm}$$

باستخدام العلاقة السابقة يمكننا حساب الحجم V للنواة الذرية :

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3 = \frac{4}{3}\pi r_0^3 A \approx 10^{-45} A \ (\text{m}^3)$$

نرى هنا أن حجم النواة الذرية يتناسب طردا مع العدد الكتلي A الذي يمثل عدد النويات ، فكلما كانت النواة أثقل كان حجمها أكبر . نستنتج أيضا من العلاقة السابقة أن r_0 يمثل بالتقريب نصف قطر النوية (بروتون أو نوترون) .

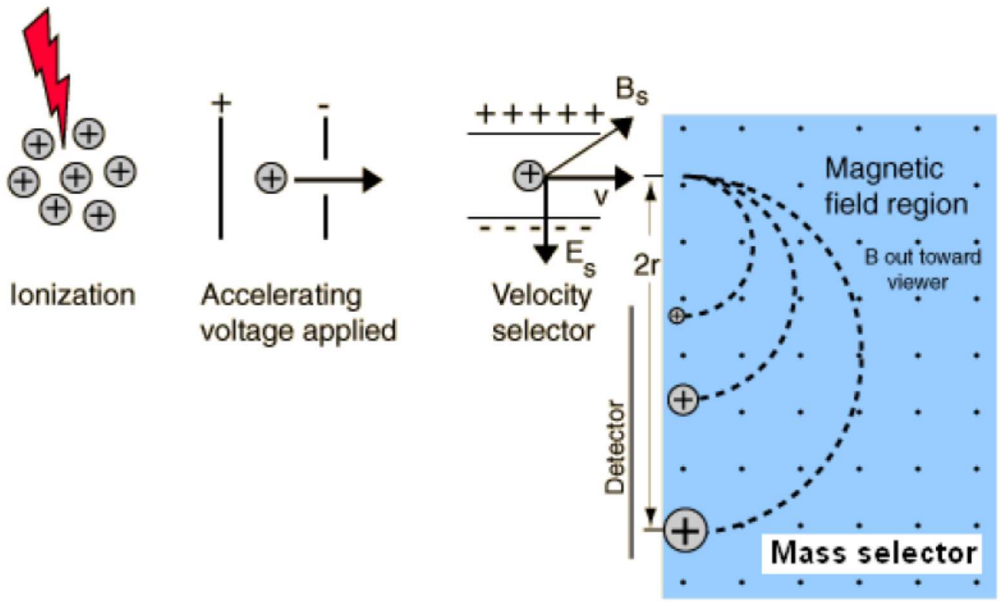
من جهة أخرى ، يمكننا حساب الكتلة الحجمية النووية :

$$\rho = \frac{M}{V} \approx \frac{1.66 \times 10^{-27} A}{10^{-45} A} \approx 10^{18} \ (\text{kg/m}^3)$$

تبين العلاقة السابقة أن الكتلة الحجمية النووية مستقلة تماما عن العدد الكتلي A ، فهي نفسها بالنسبة لكل النوى الذرية ، و تبين أيضا أن قيمتها ضخمة جدا ، فهي أكبر بحوالي 10^{15} مرة من الكتلة الحجمية للماء (10^3 kg/m^3) ، و هذا يعطينا فكرة عن مدى تراص المادة النووية .

4. كتلـة النـواة الذريـة

يعد قياس الكتل الذرية من أهم مراحل تطور الفيزياء النووية ، و كان أول جهاز استخدم لهذا الغرض مطياف الكتلة (mass spectrograph) الذي اخترعه العالم البريطاني "أستون" (Aston) عام 1919 ، و هو جهاز دقيق يسمح بفصل النظائر بعضها عن بعض باستخدام مجالات كهربائية و مغناطيسية (الشكل 6) . يتكون مطياف الكتلة من ثلاث وحدات : منبع للأيونات أين تُشرد مركبات العينة لتوليد جزيئات مشحونة ، و وحدة تحليل حيث تُفرز الأيونات بحسب كتلها عن طريق تطبيق حقول كهربائية و مغناطيسية ، و مكشاف أين تقاس و تحسب وفرة الأيونات الملتقطة .



شكـل 6: مطياف الكتلة .

بعد انتاج الأيونات و تسريعها بواسطة فرق كمون بين صفيحتي مكثف عمودي ، يتم انتقاء السرعة v بتطبيق حقلين كهربائي E و مغناطيسي B في نفس الوقت . الأيونات التي تستمر في حركتها في خط مستقيم و لا تحيد لا يمينا و لا يسارا هي التي تكون عندها قوتا "كولوم" (Coulomb) و "لورنتس" (Lorentz) متعاكستين :

$$qE = qvB$$

حيث تمثل q الشحنة الكهربائية للأيون ، و منه :

$$v = \frac{E}{B}$$

يتم فصل النظائر في المكشاف أين يُطبق فقط حقل مغناطيسي B . قانون "نيوتن" (Newton) للحركة يقودنا إلى العلاقة :

$$m\frac{v^2}{r} = qvB$$

حيث يمثل r نصف قطر المسار الدائري للأيون داخل المكشاف ، و من ثمَّ :

$$r = \frac{mv}{qB} = \frac{mE}{qB^2} \qquad (4)$$

بما أن قيم q و B و E ثابتة ، فإن وجود نظائر في العينة المدروسة يؤدي حتما إلى قيم مختلفة للمقدار r ، مما يؤدي إلى فصل النظائر .

5. طاقــة الربــط النــووي

ا) تعريــف

الكتلة $m(A,Z)$ لأي نكليد ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$ تكون دائما أقل بقليل من حاصل جمع كتل النويات التي تتألف منها :

$$m(A,Z) < Zm_{\mathrm{p}} + (A-Z)m_{\mathrm{n}}$$

حيث تمثل m_{p} كتلة البروتون و m_{n} كتلة النوترون . مثلا ، بالنسبة للنكليد ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$ الذي يتكون من بروتونين و نوترونين ، لدينا :

$$\Delta m = 2m_{\mathrm{p}} + 2m_{\mathrm{n}} - m(4,2) = 0.03040 \text{ u}$$

نفترض الآن أن النواة ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$ تتفكك و تحرر نوياتها :

$${}^{4}_{2}\mathrm{He} \longrightarrow 2\mathrm{p} + 2\mathrm{n}$$

نلاحظ هنا أن كتلة الجملة تزداد بمقدار يساوي Δm . بناءا على علاقة "أينشتاين" (Einstein) ، عملية التفكك لايمكنها أن تتم إلا إذا قدمنا لهذه الجملة كمية من الطاقة قدرها :

$$\Delta mc^2 = [2m_{\mathrm{p}} + 2m_{\mathrm{n}} - m(4,2)]c^2 = 28.32 \text{ MeV}$$

نفترض الآن التفاعل العكسي :

$$2\mathrm{p} + 2\mathrm{n} \longrightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He}$$

نلاحظ هنا أن الكتلة تنقص بنفس المقدار Δm ، و هذا يعني أن هذه الجملة تحرر نفس الكمية من الطاقة و التي قدرها 28.32 MeV .

طاقة الربط النووي (nuclear binding energy) هي الطاقة الازمة لتفكيك النواة إلى مكوناتها المنفصلة من النويات ، أو هي الطاقة المحررة عند تشكيل النواة انطلاقا من نوياتها :

$$B(A,Z) = [Zm_{\mathrm{p}} + (A-Z)m_{\mathrm{n}} - m(A,Z)]c^2 \qquad (5)$$

مثلا ، بالنسبة للنكليد ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$:

$$B(4,2) = 28.32 \text{ MeV}$$

لحساب طاقة الربط النووي نستخدم أحيانا ما يعرف بزيادة الكتلة (mass excess) :

$$\Delta(A,Z) = m(A,Z) - A \qquad (\mathrm{u}) \qquad (6)$$

و من ثَمَّ نحصل على صيغة ثانية لطاقة الربط النووي :

$$B(A,Z) = [Z\Delta_{\mathrm{p}} + (A-Z)\Delta_{\mathrm{n}} - \Delta(A,Z)]c^2 \qquad (7)$$

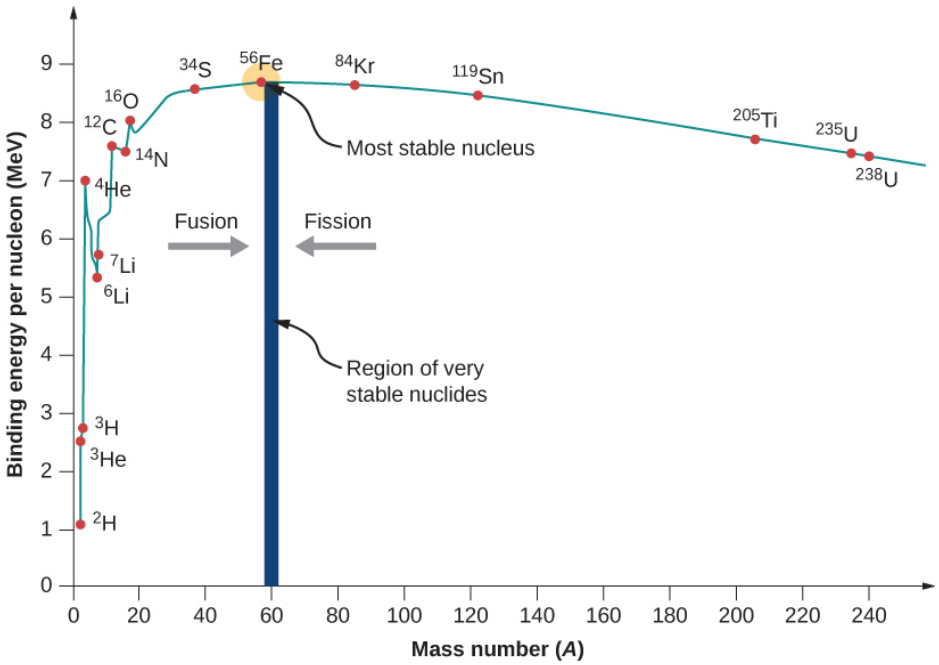
حيث :

$$\begin{cases} \Delta\mathrm{p} = m_{\mathrm{p}} - 1 = 6.778 \text{ MeV/c}^2 \\ \Delta\mathrm{n} = m_{\mathrm{n}} - 1 = 8.071 \text{ MeV/c}^2 \end{cases}$$

ب) طاقــة الربــط النــووي لكــل نويــة

يمكن تقدير مدى استقرار النوى الذرية من خلال طاقة الربط النووي لكل نوية (B/A) ، و هي تمثل القيمة المتوسطة اللازمة لاقتلاع نوية واحدة من النواة . فكلما كان هذا المقدار أكبر ، كلما كانت النواة أشد تماسكا . يعطينا الشكل 7 تطور طاقة الربط النووي لكل نوية B/A بدلالة العدد الكتلي A . نستنتج من هذا البيان النقاط التالية :

- من أجل $A \leq 20$ ، تزداد طاقة الربط النووي لكل نوية B/A مع العدد الكتلي A بصورة متقطعة من حوالي 1 MeV إلى حوالي 8 MeV .
- من أجل $A \geq 20$ ، لا تتغير طاقة الربط النووي لكل نوية B/A كثيرا مع العدد الكتلي A ، و تساوي تقريبا في هذا المجال 8 MeV .
- تبلغ طاقة الربط النووي لكل نوية B/A ذروتها من أجل $A = 60$ ، و هو يمثل الحديد ، فالحديد إذن هو أشد النوى استقرارا .
- التغير البطيئ للقيمة انطلاقا من حوالي $A = 60$ يدل على أن القوة النووية قد تشبعت و لم تبق تعمل إلا القوة الكهرومغناطيسية ، و هذا دليل على قصر مدى القوة النووية القوية .
- نستنتج أيضا من هذا البيان ، أن النوى الخفيفة تنزع إلى الإتحاد فيما بينها ، و هو ما يعرف بالإنصهار النووي (nuclear fusion) ، و ذلك لتشكيل نوى أثقل لكن أشد استقرارا ، بينما تنزع النوى الثقيلة إلى الإنشطار ، و هو ما يعرف بالإنشطار النووي (nuclear fission) ، و ذلك لتكوين نوى أخف وزنا لكن أكثر استقرارا .



شكـل 7: طاقة الربط النووي لكل نوية بدلالة العدد الكتلي .

ج) طاقـة فصـل البروتـون و النوتـرون

هناك أيضا مقداران فيزيائيان غالبا ما نجدهما ضمن جداول الفيزياء النووية ، هما طاقة فصل البروتون (proton separation energy) ، و هي الطاقة المتوسطة اللازمة لاقتلاع بروتون من نواة ما :

$$S_{\mathrm{p}}({}^{A}_{Z}\mathrm{X}) = B({}^{A}_{Z}\mathrm{X}) - B({}^{A-1}_{Z-1}\mathrm{Y}) \tag{8}$$

و طاقة فصل النوترون (neutron separation energy) ، و هي الطاقة المتوسطة اللازمة لاقتلاع نوترون من نواة ما :

$$S_{\mathrm{n}}({}^{A}_{Z}\mathrm{X}) = B({}^{A}_{Z}\mathrm{X}) - B({}^{A-1}_{Z}\mathrm{X}) \tag{9}$$

طاقة فصل البروتون أو النوترون تشبه إلى حد بعيد طاقة تأين الذرات . يعطينا الجدول (1) التالي أمثلة عن زيادة الكتلة و طاقة فصل النوترون و طاقة فصل البروتون لبعض النكليدات .

	Δ (MeV/c^2)	S_{p} (MeV)	S_{n} (MeV)
${}^{16}_{8}\mathrm{O}$	-4.737	15.66	12.13
${}^{17}_{9}\mathrm{F}$	1.952	16.81	0.60
${}^{208}_{98}\mathrm{Pb}$	-21.76	7.37	8.01

جدول 1: أمثلة عن زيادة الكتلة و طاقتي فصل البروتون و النوترون .

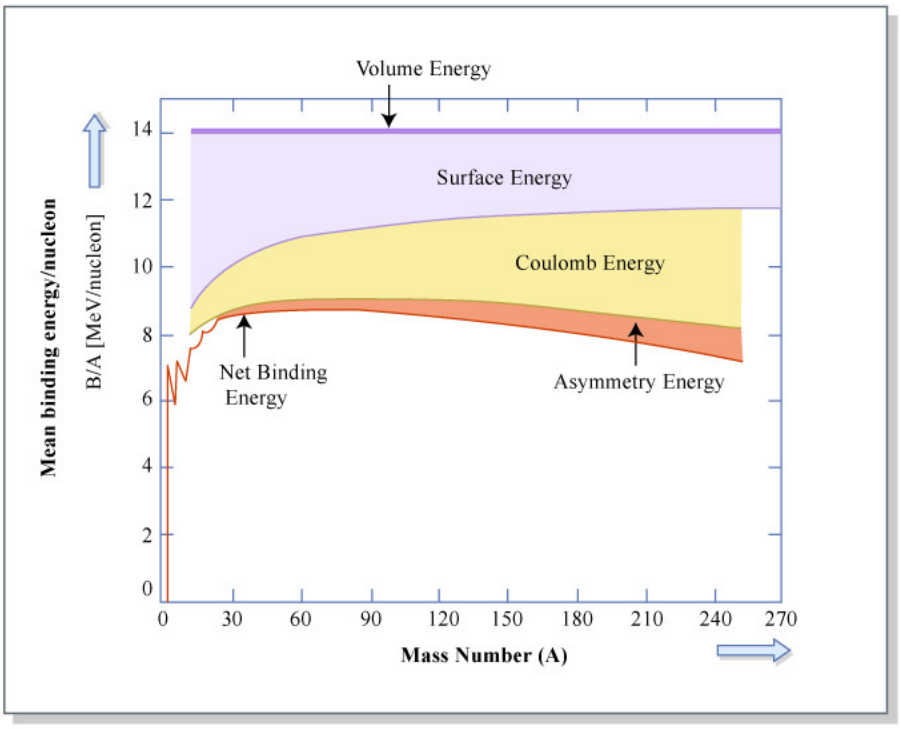
6. نمـوذج قطـرة السائـل

لا يكتفي الفيزيائي النووي بالدراسات التجريبية ، بل يعمل أيضا على ربطها نظريا بالتفاعلات (interactions) التي تحدث بين النويات داخل النواة الذرية . و لقد وضع العلماء على مر السنين نماذج عديدة لتفسير الخصائص المختلفة للنوى الذرية على أسس مبسطة ، سنعرض منها في هذا الفصل واحدا فقط ، هو نموذج قطرة السائل (liquid drop model) ، مع العلم أن هناك نماذج أخرى ، بعضها غير دقيقة و قد طواها الزمن منذ أمد بعيد ، و بعضها بالغة الدقة لكنها معقدة نوعا ما .

بالنظر إلى القيم التجريبية لطاقة الربط النووي ، لا سيما طاقة الربط النووي لكل نوية ، تشير المعطيات إلى أنه يمكن تمثيل النواة الذرية بقطرة سائل ما (liquid drop) ، كروية الشكل ، أين تلعب النويات نفس دور الجزيئات . أوجه الشبه هنا تتمثل فيما يلي :

- الكتلة الحجمية للنواة الذرية ثابتة و لا تتوقف على عدد نوياتها ؛ و كذلك مختلف السوائل ، فهي غير إنضغاطية (incompressible) ، أي لا ينقص حجمها مع تزايد الضغط ، مما يجعل كتلها الحجمية ثابتة .
- الحجم في كلتي الحالتين يتناسب مع عدد المكونات ، النويات بالنسبة للنواة الذرية ، و الجزيئات بالنسبة لقطرة السائل .
- الطاقة اللازمة لتفكيك النواة الذرية إلى مركباتها الأصلية - و هي طاقة الربط النووي بحكم تعريفها - تتناسب مع كتلة النواة ، فكلما كانت النواة أثقل كانت طاقة الربط النووي أكبر ؛ و كذلك الطاقة اللازمة لفك جزيئات القطرة السائلة بعضها عن بعض (أي تبخيرها) ، فهي تتناسب مع كتلة القطرة .

أول نموذج للنواة الذرية يعتمد على هذه الفكرة اقترحه العالم الروسي "غامو" (Gamow) ، و قام بتطويره العالم الألماني "فايساكر" (Weizsäcker) عام 1935 ، و هو يسمح بشرح بعض الخصائص الأساسية للنواة الذرية كطاقة الربط النووي لكل نوية و نصف القطر النووي ... يؤدي هذا النموذج إلى ما يعرف بالصيغة النصف تجريبية للكتلة (semi-empirical mass formula) أو قانون "بيته و فايتساكر" (Bethe-Weizsäcker formula) .



شكـل 8: إسهامات مختلف حدود الصيغة نصف التجريبية للكتلة في طاقة الربط النووي لكل نوية .

ا) الصيغـة النصـف تجريبيـة للكتلـة

في إطار نموذج قطرة السائل ، نفترض أن طاقة الربط النووي تساهم فيها عدة ظواهر فيزيائية مستقلة فيما بينها ، مما يسمح لنا بصياغتها على شكل جمع عدد من الحدود ، لكل واحد منها معامل خاص تحدد قيمته تجريبيا . الصيغة النصف تجريبية للكتلة تعطى على النحو التالي :

$$B(A,Z) = a_{\rm v}A - a_{\rm s}A^{2/3} - a_{\rm c}\frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_{\rm a}\frac{(A-2Z)^2}{A} + \delta \qquad (10)$$

حيث يمثل A الرقم الكلي و Z الرقم الذري ، و الباقي $(a_{\rm v},\ a_{\rm s},\ a_{\rm c},\ a_{\rm a})$ ثوابت :

$$a_{\rm v} = 15.8\ \text{MeV}\ ; \quad a_{\rm s} = 18.3\ \text{MeV}\ ; \quad a_{\rm c} = 0.71\ \text{MeV}\ ; \quad a_{\rm a} = 23.2\ \text{MeV}$$

الحد الأول للقانون (10) يمثل الطاقة الحجمية (volume energy) ، و الثاني الطاقة السطحية (surface energy) ، و الثالث الطاقة الكولومية (Coulomb energy) ، و الرابع طاقة عدم التناظر (asymmetry energy) ، و الخامس (δ) طاقة التزاوج (pairing energy) . يبين لنا الشكل (8) إسهامات مختلف هذه الحدود في طاقة الربط النووي لكل نوية .

- الطاقــة الحجميــة

كتقريب أولي ، يمكننا أن نقول أن طاقة الربط النووي تتناسب مع عدد النويات A التي تدخل في تكوين النواة ، مما يقودنا إلى الحد الأول من القانون نصف التجريبي للكتلة :

$$\Delta B_{\mathrm{v}} = a_{\mathrm{v}} A$$

- الطاقــة السطحيــة

النويات الموجودة على سطح النواة الذرية لا تتعرض إلى قوى تجاذب من جميع الجهات مثل النويات الداخلية . فاعتمادنا على الطاقة الحجمية وحدها يعني أننا قد بالغنا في تقدير طاقة الربط النووي ، و ذلك بإهمالنا لمفعول السطح (surface effect) . بما أننا نعتبر أن النواة الذرية كروية الشكل ، تكتب مساحتها على هذا النحو :

$$S = 4\pi R^2 = 4\pi r_0^2 A^{2/3}$$

هذا يعني أن هناك حد ثاني للصيغة نصف التجريبية للكتلة من شكل :

$$\Delta B_{\mathrm{s}} = -a_{\mathrm{s}} A^{2/3}$$

- الطاقــة الكولوميــة

التنافر الذي يحدث بين البروتونات داخل النواة الذرية ، بسبب الشحنة الكهربائية ، يؤدي هو الآخر إلى التقليص من قيمة طاقة الربط النووي . لتقدير هذا المفعول الذي يزداد مع كتلة النواة ، نفترض أن الشحنة الكهربائية تتوزع بانتظام داخل النواة الذرية ، فكثافتها هي إذن :

$$\rho = \frac{Ze}{(4/3)\pi R^3}$$

نحسب الآن الطاقة الكهربائية الكامنة داخل طبقة محصورة بين r و $r + \mathrm{d}r$ من النواة :

$$\mathrm{d}E_{\mathrm{c}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{q\,\mathrm{d}q}{r}$$

بما أن :

$$q = \rho \times \frac{4}{3}\pi R^3$$

نستنتج :

$$\mathrm{d}q = \rho \times 4\pi r^2 \mathrm{d}r$$

و منه :

$$E_{\mathrm{c}} = \int_0^R \mathrm{d}E_{\mathrm{c}} = \frac{4\pi}{15\epsilon_0}\rho^2 R^5$$

بعد تعويض نصف القطر النووي $\left(R = r_0 A^{1/3}\right)$ ، نحصل على :

$$E_{\mathrm{c}} = \frac{3e^2}{20\pi\epsilon_0 r_0}\frac{Z^2}{A^{1/3}} \tag{11}$$

بكتابة الطاقة الكولومية على شكل :

$$\Delta B_{\mathrm{c}} = -a_{\mathrm{c}}\frac{Z^2}{A^{1/3}}$$

نستنتج معامل الحد الكولومي للصيغة نصف التجريبية للكتلة :

$$a_{\mathrm{c}} = \frac{3e^2}{20\pi\epsilon_0 r_0} \approx 0.71 \text{ MeV} \tag{12}$$

تجدر الإشارة هنا إلى أن a_{c} هو الثابت الوحيد الذي يمكن حسابه نظريا .

- طاقــة عــدم التماثــل

النوى لا تكون دائما متناظرة باعتبار عدد البروتونات و عدد النوترونات ، فالغالب هو أن عدد النوترونات أكبر من عدد البروتونات (شكل 9) . الحد الذي يمثل عدم التناظر للنوى الذرية هو :

$$\Delta B_{\mathrm{a}} = -a_{\mathrm{a}}\frac{(A-2Z)^2}{A}$$

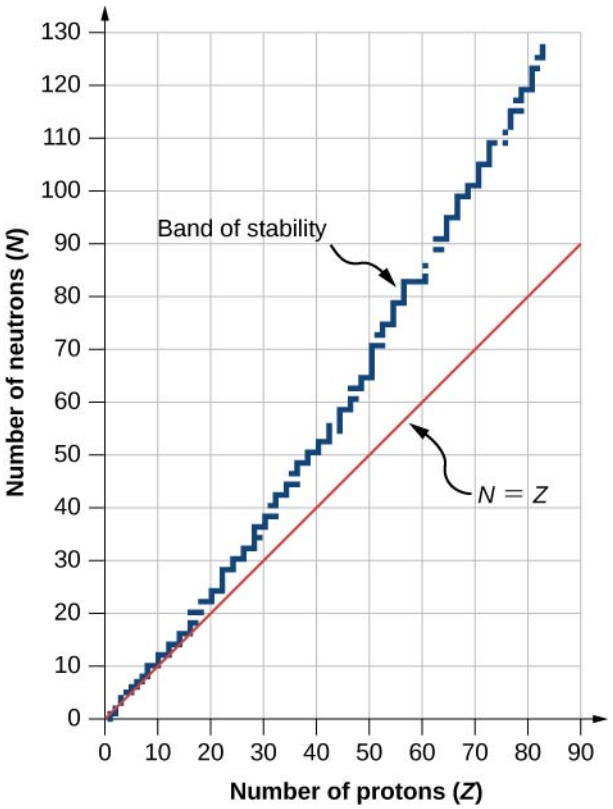
في حالة التناظر $\left(A = 2Z\right)$ ، يكون هذا الحد منعدما $\left(\Delta B_{\mathrm{a}} = 0\right)$.

- طاقــة التــزاوج

النوى التي تتضمن عددا زوجيا من البروتونات و عددا زوجيا من النوترونات (نقول أنها زوجية-زوجية) تكون دائما أكثر استقرارا من النوى الموجودها بجوارها المباشر . هذا يعنى أن النويات تنزع دائما إلى التزاوج لتشكيل نوى شديدة الإستقرار . نرى هذا المفعول بوضوح في الطبيعة حيث يوجد 4 نوى فقط فردية-فردية مستقرة ، بينما يوجد 167 نواة زوجية-زوجية مستقرة . حتى نأخذ بعين الإعتبار هذه الظاهرة ، نضيف حدا تصحيحيا يكون موجبا بالنسبة للنوى الزوجية-زوجية و سالبا بالنسبة للنوى الفردية-فردية ، و منعدما في باقي الحالات الأخرى :

$$\delta = \begin{cases} +a_{\mathrm{p}}A^{-1/2} & (Z,\ N \text{ even}) \\ 0 & (A \text{ odd}) \\ -a_{\mathrm{p}}A^{-1/2} & (Z,\ N \text{ odd}) \end{cases} \tag{13}$$

حيث يمثل a_{p} ثابتا تحدد قيمته تجريبيا و هو يساوي حوالي 34 MeV .



شكـل 9: منحنى الاستقرار النووي .

ب) واد الاستقـرار البيتـاوي

باستخدام تعريف طاقة الربط النووي (5) و الصيغة نصف التجريبية للكتلة (10) ، يمكننا أن نكتب كتلة النواة الذرية على النحو التالي :

$$m(A,Z)c^2 = Zm_{\mathrm{p}} + (A-Z)m_{\mathrm{n}} - a_{\mathrm{v}}A + a_{\mathrm{s}}A^{2/3} + a_{\mathrm{c}}\frac{Z^2}{A^{1/3}} + a_{\mathrm{a}}\frac{(A-2Z)^2}{A} - \delta$$

بالنسبة لقيمة معينة للرقم الكتلي A ، يمكننا أن نكتب :

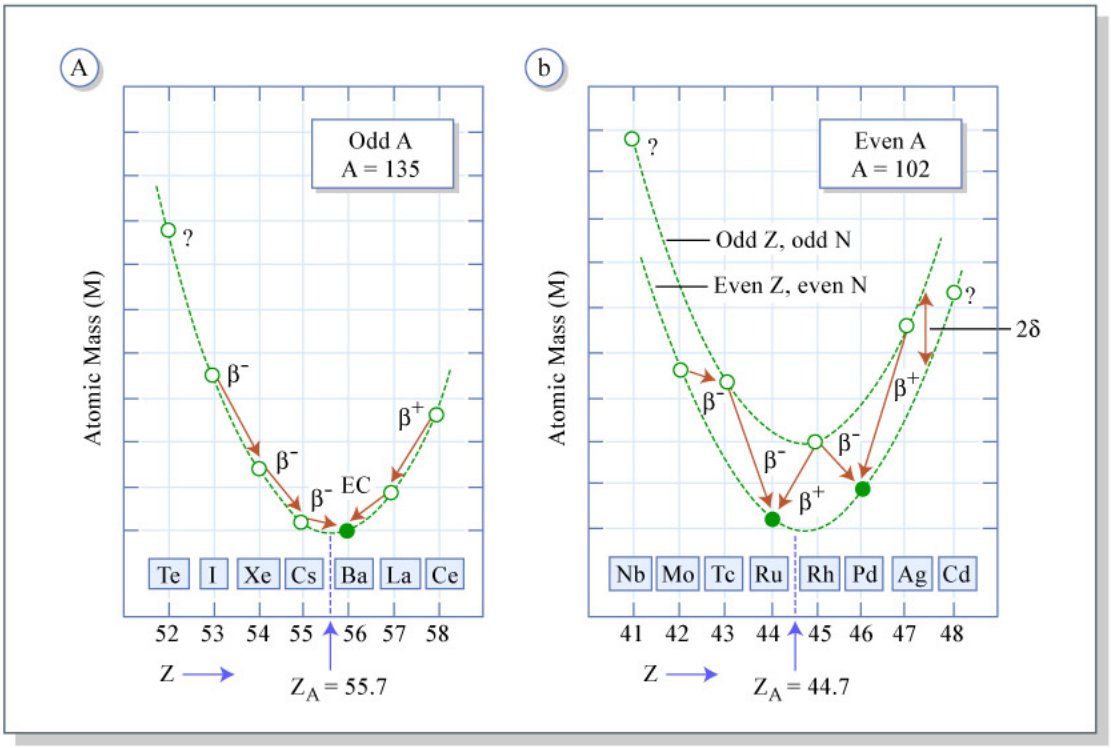
$$m(Z)c^2 = aZ^2 - bZ + c$$

بحيث :

$$\begin{cases} a &= a_{\mathrm{c}}A^{-1/3} + 4a_{\mathrm{a}}A^{-1} \\ b &= (m_{\mathrm{n}} - m_{\mathrm{p}})c^2 + 4a_{\mathrm{a}} \\ c &= Am_{\mathrm{n}}c^2 - a_{\mathrm{v}}A + a_{\mathrm{s}}A^{2/3} + a_{\mathrm{a}}A - \delta \end{cases}$$

رسم الكتلة $m(Z)$ بدلالة الرقم الذري Z يعطينا قطعا ناقصا (parabola) مع قيمة دنيا في النقطة :

$$Z_{\min} = \frac{b}{2a} = \frac{(m_{\mathrm{n}} - m_{\mathrm{p}})c^2 + 4a_{\mathrm{a}}}{2(a_{\mathrm{c}}A^{-1/3} + 4a_{\mathrm{a}}A^{-1})}$$



شكـل 10: كتلة النكليدات المتساوية الكتلة بدلالة الرقم الذري .

إذا كان الرقم الكتلي A فرديا $(\delta = 0)$ ، نحصل على قطع مكافئ واحد ، و أما إذا كان زوجيا ، نحصل على قطعين مكافئين بسبب الحد δ الذي يكون موجبا إذا كان الرقم الذري Z زوجيا و سالبا إذا كان Z فرديا (الشكل 10) . بالنسبة لقيمة معينة للعدد الكتلي A ، نلاحظ أن النوى تميل إلى التفكك البيتاوي (β) حتى تصل إلى حالة الإستقرار الممثلة بأدنى قيمة للكتلة و التي تدعى واد الإستقرار البيتاوي (beta valley of stability) (انظر الشكل 9) .