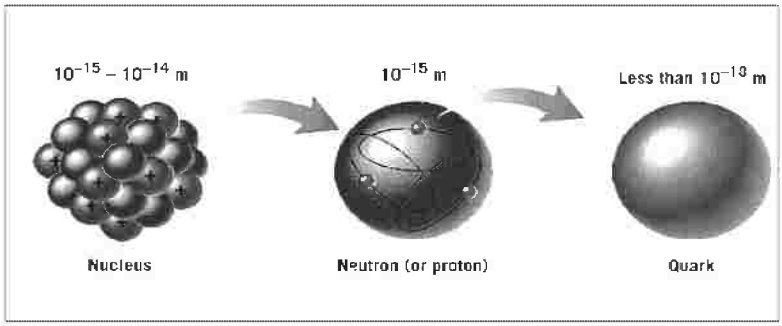
الباب الأول
الخواص الأساسية للنواة

الباب الأول

الخواص الأساسية للنواة

١-١ مكونات النواة

تتكون نواة الذرة في الحالة العامة باستثناء ذرة الهيدروجين من نوعين من الجسيمات الأولية هما البروتونات والنيوترونات وكتلتاهما متساوية تقريباً وكذلك نصف قطريهما متساويان ويمكن أن يتحول أحدهما للأخر ويتمثل الفرق الأساسي بينهما في الشحنة الكهربائية لأنها تكون موجبة للبروتون (أي تساوي شحنة الإلكترون ولكنها سالبة) بينما تكون متعادلة للنيوترون. ومن المعروف أن القوة النووية التي تؤثر بين البروتونات والنيوترونات داخل النواة لا تعتمد علي الشحنة الكهربائية ولذلك يطلق علي البروتون والنيوترون عادة نوية (نيوكلون *Nucleon*). وكان يعتقد أن البروتون والنيوترون هي الجسيمات الأولية الأساسية (Elementary particles) ولكن الأبحاث في هذا المجال أكدت أنها تتكون من جسيمات حقيقية أصغر منها تسمى الكوارك (Quark) وأن كل جسيم من الجسيمات الأولية تتكون من ثلاثة من الكوراك ويرمز لها $\{Up(U);down(d);Strange(S)\}$ وتختلف في الخصائص عن بعضها البعض ولكل جسيم منها جسيم مضاد ولقد أضيف في السنوات الأخيرة ثلاثة جسيمات جديدة من الكوارك. شكل (١-١) يوضح حجم النواة بالنسبة لحجم البروتونات والكوارك.



شكل (١-١) يوضح حجم النواة بالنسبة لحجم البروتونات والكوارك
وجدول(١-١) يوضح الجسيمات التي توجد في الذرة وفي النواة وكتلتها ومجموعتها

Atomic Particles الجسيمات الذرية					
Particle	Symbol	Charge	Mass (g)	Mass (amu)	Family
proton	p^+	+1	1.673×10^{-24}	1.00727	baryon
Neutron	N^0	0	1.675×10^{-24}	1.00866	baryon
electron/ positron	e^-/e^+	-1/+1	9.109×10^{-28}	5.458×10^{-4}	Lepton
neutrino	ν_e	0	$< 10^{-32}$	$< 5 \times 10^{-9}$	Lepton
photon	γ	0	0	0	photon

١-٢ كتلة النواة وكتلة الذرة

Mass of Nucleus and Mass of Atom

في الفيزياء النووية لا تستعمل عادة كتل الأنوية وإنما كتل الذرات المتعادلة. وهذا يرجع إلي استحالة قياس كتل هذه الأنوية بدون إلكتروناتها، وفي حالة جميع الذرات عملياً ماعدا أخفها. وتأين الذرة يصاحب عادة بانفصال إلكترون أو بضعة إلكترونات. وفي التفاعلات النووية أيضا تتكون ذرات مؤينة تأيناً ضعيفاً وليس أنوية ذرات. وحتى

أثناء انقسام الأنوية الثقيلة حيث تغادر النواتان الناشئتان حديثاً حيز الذرة الأصلية بسرعة كبيرة، فإن هاتين النواتين تحملان أكثر من نصف الإلكترونات الذرية. وبعد فرملة في الوسط تصبح كل نواتج التحولات النووية ذرات متعادلة أياً كانت الذرات الأصلية، وعلاوة علي هذا فإن كتلة الذرة المتعادلة في حدود دقة الطرق الحالية لقياس الكتل تساوي ببساطة مجموع كتل النواة والإلكترونات المكونة للذرة رغم إن كتلة الذرة من حيث المبدأ تساوي:

$$Ma = M_N + Zm + \frac{1}{c^2}\sum_i q_i, \qquad (١-١)$$

حيث m, M_N كتلتا النواة والإلكترون، Z عدد الإلكترونات الذرية، إما $\sum q_i$ فهي طاقة ارتباط النواة والإلكترونات المسماة بطاقة ربط الإلكترونات. والكميات q_i معروفة جيدا لكل إلكترون أي ذرة. وكذلك فان:

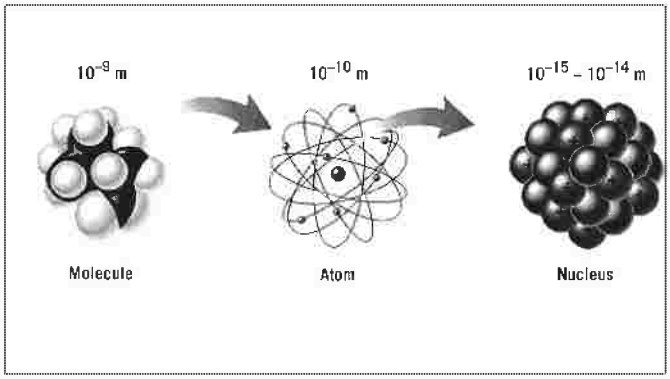
$$\sum_i q_i = 13.6 Z^{12/5} eV \qquad (١-٢)$$

إلا إن المقدار $(\frac{1}{c^2})\sum_i q_i$ صغير إلي حد يمكن إهماله بالقياس إلي M_a ولا يؤثر عملياً علي مقدار كتلة الذرة. وبهذا فإن كتلة النواة تساوي الفرق بين كتلة الذرة وكتلة الإلكترونات الذرية. وعدد الإلكترونات الذرية معروف دائماً لأنه يساوي شحنة النواة، ولذا فإن التعامل مع كتل الذرات المتعادلة لا يثير أي مصاعب في الفيزياء النووية.

١-٣ حجم النواة Nucleus Volume

يمكن قياس نصف قطر النواة باستخدام تجارب عديدة منها تجربة العالم رذرفورد الذي حصل علي نتائج مبدئية عن نصف قطر النواة وذلك بدراسة تشتت جسيمات α عند اصطدامها برقائق الذهب. وكذلك دراسة تشتت الإلكترونات السريعة بواسطة الأنوية التي أدت إلي نتائج عن نصف

قطر النواة بالإضافة إلي معرفة توزيع الشحنة الكهربية في النواة. شكل (٢-١) يوضح نصف قطر النواة بالنسبة لنصف قطر الذرة. وتشير الدلائل إلي إن للنيوترونات توزيعاً مشابهاً لتوزيع البروتونات ويمكن بالتالي دراسة توزيع الكتلة أي المادة داخل النواة. ويمكن تفسير نتائج هذه التجارب من خلال توزيع الشحنة الموضح في شكل (٣-١) ويلاحظ من الشكل أن النواة تتكون من منطقة مركزية تكون فيها كثافة الشحنة الكهربية ثابتة (ρ_0) وطبقة أو قشرة تتناقص كثافة الشحنة خلالها بصورة سريعة ولقد ثبت أن توزيع الشحنة يأخذ الصورة التالية:



شكل (٢-١) يوضح نصف قطر النواة بالنسبة لنصف قطر الذرة

وطبقة أو قشرة تتناقص كثافة الشحنة خلالها بصورة سريعة ولقد ثبت أن توزيع الشحنة يأخذ الصورة التالية:

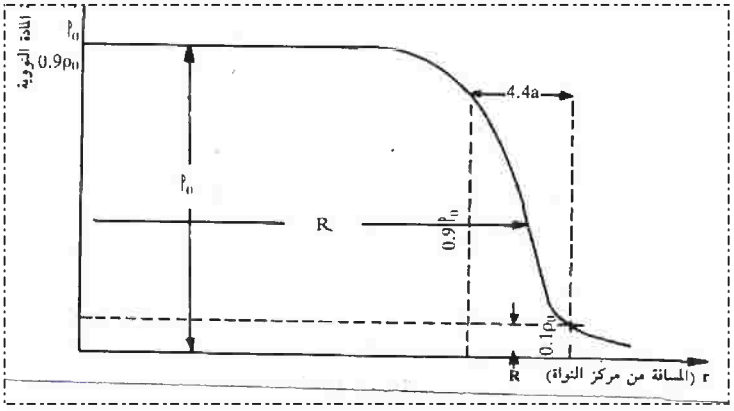
$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{1 + e^{(r-a)/b}} \qquad (٣-١)$$

حيث $\rho(r), \rho_0$ هما كثافتي الشحنة في المركز وعند أي نقطة عل بعد r من المركز علي الترتيب. و ($r - R_0$) وهو نصف قطر النواة ويساوي $(R = R_0 A^{1/3} = 1.07 \times 10^{-15} A^{1/3} m = 1.07 A^{1/3} F), (b = 0.55 \times 10^{-15} m = 0.55 F)$

ويمكن الوصول من هذه النتائج إلي ما يلي:

١- أن كثافة الشحنة الكهربية ثابتة داخل النواة وتتناقص بسرعة كبيرة خلال الطبقة السطحية والتي يكون سمكها $2b \approx 1.1F$ وهذا السمك مقدار ثابت لجميع الأنوية.

٢- يزداد نصف القطر عند كثافة شحنة مساوية $(\frac{1}{2}\rho_0)$ بزيادة العدد الكتلي (A) ولقد وجد ان نصف قطر النواة يتناسب طرديا مع $(A^{1/3})$ ويكتب عادة $R \approx R_0 A^{1/3}$ حيث R_0 ثابت تتراوح قيمته العملية بين $(1.4F \approx 1.1F)$.



شكل (٣-١) توزيع الشحنة الكهربية للنواة

٣- تعتمد الكثافة الداخلية (ρ_0) علي العدد الكتلي (A) وتتناقص بصورة بطيئة مع زيادة (A).

٤- تبين الدلائل علي أن توزيع النيوترونات داخل النواة يشبه توزيع البروتونات وبالتالي فان كثافة الكتلة $\rho_m(r)$ تشبه لحد ما كثافة الشحنة والفرق بينهما في نسبة عدد البروتونات (Z) للعدد الكتلي

(A) وبالتالي فإن كثافة الكتلة يمكن أن تكتب علي الصورة التالية

$$\rho_m(r) \approx \frac{A}{Z}\rho(r) .$$

١-٤ كثافة المادة النووية

Density of Nuclear Matter

تعرف الكثافة عموما بأنها كتلة وحدة الحجوم أي أن:

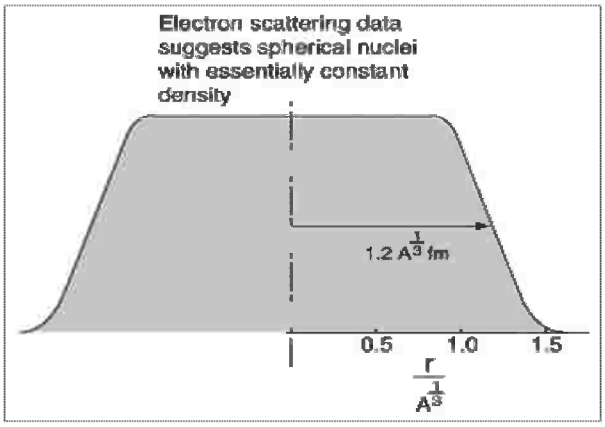
الكثافة = كتلة النواة / حجمها

= (العدد الكتلي A × عدد أفوجادرو N_A)/ حجم النواة(حجم الكرة)

$$\rho_N \approx \frac{A N_A}{V_{Nucl}} \approx \frac{A \times 1.66 \times 10^{-27}}{\frac{4}{3}\pi R^3} \approx \frac{A \times 1.66 \times 10^{-27}}{\frac{4}{3}\pi (1.2 \times 10^{-15} A^{1/3})^3} \qquad (١-٤)$$

$$\approx \frac{1.66 \times 10^{-27}}{\frac{4}{3}\pi (1.2 \times 10^{-15})^3} \approx 2.3 \times 10^{17} kg/m^3 \approx Cont. \qquad (١-٥)$$

نستنتج من حساب الكثافة النووية أنها قيمة ثابتة كما في شكل (١-٤) ولا تعتمد علي نوع العنصر النووي أو المادة وبالتالي فهي خاصية ذاتية للنواة. وهذه نتيجة تبدو منطقية لأن النواة تتكون أساساً من بروتونات ونيوترونات وهذه جسيمات أولية لا علاقة لها بنوع المادة أو النواة.



شكل (١-٤) يوضح أن كثافة المادة النووية ثابتة.

١-٥ الكتلة والطاقة وكمية الحركة

Mass, Energy and momentum

تعتمد كتلة الجسيم علي سرعة الحركة v حيث يكون

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}} \qquad (١-٦)$$

حيث $\beta = v/c$ ، c هي سرعة الضوء ، m هي كتلة السكون ، m_0 هي الكتلة النسبية وعندما يكون $v \ll c$ فان $m \approx m_0$ وبالتالي فإن الحديث عن الكتلة النسبية له معني فيزيائي عندما تقترب السرعات من سرعة الضوء. وتسمي الجسيمات المتحركة بهذه السرعات بالجسيمات النسبية والسرعة تسمي بالسرعة بالنسبية. وطبقا للنظرية النسبية فإن الطاقة الكلية للجسيم تساوي:

$$E = mc^2 \qquad (١-٧)$$

حيث m_0 هي كتلة الجسيم النسبية. وتوجد صيغة أخري للطاقة الكلية مكافئة للمعادلة(١-٧) وهى:

$$E = \sqrt{p^2c^2 + m_0^2c^4} \qquad (١-٨)$$

حيث p هي كمية الحركة للجسيم وتساوي $p = mv$. وإذا كان الجسيم ساكنا $(v = 0)$ فإن الطاقة الكلية تساوي طاقة السكون $E_0 = mc^2$. ومن المعادلة (1-8) ينتج أن الطاقة الكلية للجسيم تضم طاقة الحركة عن طريق كمية الحركة وكذلك طاقة السكون. وعند النظر إلي الطاقة الكلية للجسيم $E = mc^2$ و طاقة السكون $E_0 = mc^2$ نجد أنها علاقة تكافؤ بين الكتلة والطاقة ونجد أن $E_0 = mc^2$ تتعلق بالحالة الخاصة للجسيم الذي تختلف كتلة السكون له عن الصفر بينما $E = mc^2$ تمثل الحالة العامة لتكافؤ الكتلة والطاقة. وإذا كانت كتلة الجسيم هي m فان طاقته تكون $E_0 = mc^2$، وبالعكس فإن أي طاقة E تكون الكتلة المكافئة لها $m = \frac{E}{c^2}$. ومثال على ذلك الفوتون ليس له كتلة سكون ومع ذلك له كتلة نسبية تساوي $m = \frac{h\nu}{c^2}$ لأن طاقة الفوتون تساوي $h\nu$ ولذلك تكون له ومضة $p = mc = \frac{h\nu}{c}$ وذلك لأن الفوتون يتحرك بسرعة الضوء وهذا يتفق مع علاقة دي برولي لأن $k = \frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c}$ وعموما، فإن أي جسيم له كتلة سكون تساوي صفر تكون له كمية حركة هي:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{mc^2}{c} = mc \qquad (1-9)$$

أي أنه يتحرك دائما كالفوتون بسرعة الضوء.

وبالنسبة لحساب طاقة الحركة لجسيم نسبي T هي الفرق بين الطاقة الكلية وطاقة السكون للجسيم وتساوي:

$$T = mc^2 - mc^2 = mc^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1\right) \qquad (1-10)$$

وعندما تكون $v \ll c$ فإن الصيغة السابقة تتحول إلي صيغة الميكانيكا الكلاسيكية لطاقة الحركة $T = mv^2/2$. وإذا عوضنا عن طاقة الحركة بوحدات طاقة السكون mc^2 ورمزنا لها T^0 فإن:

$$T^0 \frac{T}{mc^2} = \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} - 1 \right) \qquad (١-١١)$$

وتكون قيمة β تساوي:

$$\beta = \frac{\sqrt{T^0 (T^0 + 2)}}{T^0 + 1} \qquad (١-١٢)$$

ونجد أن:

$$\frac{m_r}{m} = T^0 + 1 \qquad (١-١٣)$$

والجسيمات التي تعتبر نسبية هي التي تتحرك بسرعة تتعدي ١٤ % من سرعة الضوء، أي سرعتها أكبر من $(4.2 \times 10^7 m/\sec)$. وطاقة الحركة لمثل هذه الجسيمات تشكل ١ % من طاقة سكون الجسيم. وحيث أن طاقة سكون الإلكترون تساوي $0.5MeV$ فإنه يكون نسبياً عند طاقة أكبر من $5KeV$ وطاقة سكون النيوكلونات حوالي $1GeV$ فإنها تكون نسبية عند طاقة أكبر من $10MeV$ وجسيمات ألفا تكون نسبية عند طاقة أكبر من $40MeV$ ولهذا فإنه يتعين دراسة الجسيمات الثقيلة كجسيمات نسبية فقط عند طاقات تبلغ عشرات الميجا إلكترون فولت في نفس الوقت الذي يمكن فيه عملياً وعلي الدوام يمكن اعتبار الإلكترون جسيماً نسبياً. والجسيمات التي تساوي كتل سكونها صفر تعتبر نسبية بصفة دائمة.

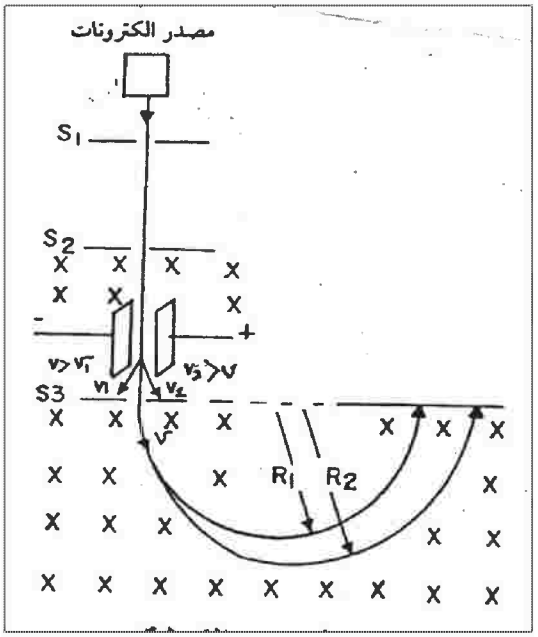
١-٦ تعيين كتلة النواة Mass of the Nucleus

من المعروف أن كتلة الذرة مركزة في نواتها ويمكن عند قياس كتلة الذرة حساب كتلة النواة وذلك بطرح كتلة الإلكترونات الذرية مع إهمال طاقة الربط للإلكترونات في الذرة وهي صغيرة جداً نسبياً. ويمكن قياس كتل الذرات بدقة عالية قد تصل للواحد من المليون وذلك

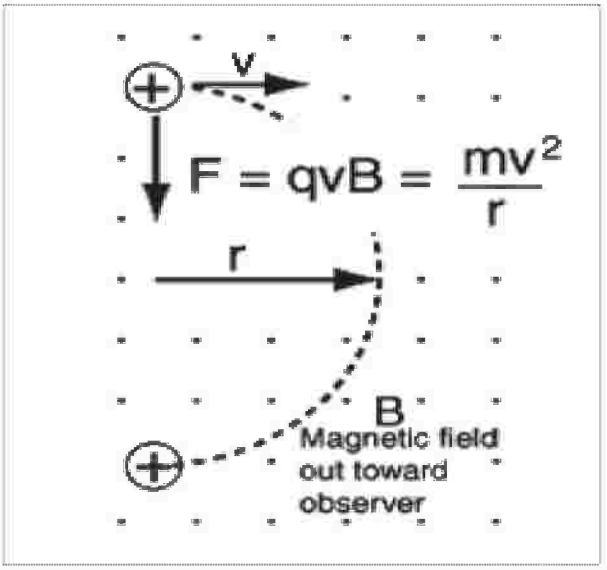
باستخدام مطياف الكتلة. ويوضح شكل (١-٥) أبسط أنواع هذه الأجهزة. ويتكون الجهاز من مصدر لأيونات المادة المراد قياس كتلة ذراتها. وتصدر الأيونات بسرعات واتجاهات مختلفة ويمكن استخدام عدة حواجز (S_1, S_2) بفتحات صغيرة للحصول علي شعاع ضيق من الأيونات التي لها نفس الاتجاه وتدخل الأيونات بعد ذلك منطقة يؤثر فيها مجال كهربي (E) ومجال مغناطيسي(B) ويكون المجالان متعامدين وعموديين علي شعاع الأيونات ويؤثر المجال الكهربي علي الأيونات بقوة (qE) حيث q هي الشحنة الكهربية بينما يؤثر المجال المغناطيسي بقوة (Bqv) حيث v هي سرعة الأيون في الاتجاه المعاكس للقوة الأولي. وتخرج من الفتحة (S_3) فقط الأيونات التي لا تنحرف عن مسارها وهي تلك الأيونات التي تكون سرعتها v بحيث تتساوي القوتان ويكون في هذه الحالة :

$$qE = Bqv \Rightarrow v = (E/B) \qquad (١-١٤)$$

أما الأيونات التي تكون سرعتها أكبر أو أصغر من ذلك تنحرف نحو اليمين أو اليسار علي التوالي وتصطدم بالحاجز ولا تخرج من الفتحة (S_3). ويسمي هذا التركيب بمرشح السرعة(Velocity filter) ويدخل شعاع الأيونات بعد ذلك في مجال مغناطيسي منتظم يؤدي لانحرافها حيث يصبح مسارها علي شكل قوس من دائرة يعطي نصف قطرها R حيث تنشأ قوة طرد مركزية $(\frac{mv^2}{R})$ كما في شكل (١-٦).



شكل (١-٥) مطياف الكتلة



شكل (١-٦) تأثير المجال المغناطيسي علي الشحنة

وبالتالي فإن:

$$Bqv = \frac{mv^2}{R} \Rightarrow \frac{Bq}{v} = \frac{m}{R} \Rightarrow m = \frac{BqR}{v} \qquad (١-١٥)$$

وبالتعويض من المعادلة (١-١٤) في المعادلة (١-١٥) نحصل علي:

$$m = \frac{B^2qR}{E} \qquad (١-١٦)$$

حيث m كتلة الأيون الذي يكون نصف قطره R وتسقط الأيونات علي لوح تصوير فوتوغرافي لقياس نصف قطر مسارها ويمكن حساب كتلتها. وإذا وجد في الشعاع أيونات مختلفة الكتلة فإنها تنفصل لمسارات مختلفة تعتمد أنصاف أقطارها علي كتلتها حسب العلاقة السابقة. فإذا كانت العينة تحتوي علي جسمين مختلفي الكتلة m_1, m_2 ودخل الجسيمان المجال المغناطيسي B بسرعة واحدة v وبشحنة واحدة q فإن :

$$(\frac{qB}{v} = \frac{m_1}{R_1}) \quad \text{و} \quad (\frac{qB}{v} = \frac{m_2}{R_2}) \qquad (١-١٧)$$

أي أن:

$$\frac{m_1}{R_1} = \frac{m_2}{R_2} = Cont. \qquad (١-١٨)$$

وبالتالي فإن كلاً من الجسمين سيتحرك في مسار خاص به ومن ثم يتجمع عند نقطة معينة . أي أن الجسمين سوف ينفصلان عن بعضهما البعض.

١-٧ اللف المغزلي Spin

نظراً لأن النيوكلونات لها عزماً ميكانيكاً ذاتياً يساوي $\hbar/2$، فإن الأنوية أيضاً يجب أن يكون لها عزم ميكانيكي. بالإضافة إلي ذلك فإن النيوكلونات داخل الأنوية في حالة حركة دائمة ولذلك تشترك في عمل حركة داخل النواة تتميز بعزم كمية حركة محدد لكل نيوكلون.

والعزوم الميكانيكية في الحركة النسبية أو العزوم الدورانية تأخذ فقط قيماً صحيحة من $\hbar$. وتجمع كل العزوم الميكانيكية للنيوكلونات المغزلي منها والدوراني معطية العزم الميكانيكي للنواة J ويسمي أيضاً مغزلية النواة أو (اللف) وأحياناً يرمز بالرمز I .

وبالرغم من أن عدد النيوكلونات في النواة قد يكون كبير جداً فإن مغزلية النواة J في العادة مقدار صغير لا يتجاوز بضع وحدات من $\hbar$ وذلك يتحدد بالطريقة الغريبة التي تتفاعل بها النيوكلونات المتشابهة. فالبروتونات المتزواجة (زوجي- زوجي) وكذلك كل النيوترونات المتزاوجة تتفاعل فقط بحيث يعوض كل نيوكلون مغزلية الآخر، أي يتعاكسان من حيث اتجاه مغزلية كل منهما أي أن أزواج النيوكلونات المتشابهة دائماً تتفاعل بمغزلية متعاكسة. بالإضافة إلي ذلك، فإن عزم كمية التحرك الدوراني لزوج من البروتونات أو النيوترونات يساوي صفر. ونتيجة لذلك فإن الأنوية التي تتكون من عدد زوجي من البروتونات والنيوترونات (زوجي- زوجي) ليس لها عزم كمية تحرك أي أن $J=0$. أما الأنوية التي تتكون من بروتونات ونيوترونات غير متزواجة هي التي يكون لهل مغزلية لا تساوي صفر . إذا كان هناك نيوكلون واحد غير متزواج فإن مغزليته تجمع مع كمية تحركه الدورانية وبذلك تكون مغزلية النواة (زوجي – فردي) أو (فردي – زوجي) مضاعفات صحيحة من $\frac{1}{2}\hbar$ أي $(\frac{1}{2}\hbar,\frac{3}{2}\hbar,\frac{5}{2}\hbar.....)$ أما الأنوية (فردي- فردي) فإن مغزليتها تكون مضاعفات صحيحة من $\hbar$ أي $(1\hbar,2\hbar,3\hbar.....)$

١-٨ العزم المغناطيسي النووي Magnetic moment

تحتوي النواة علي شحنات كهربية موجبة وعندما تتحرك الشحنة الكهربية يتولد مجالاً مغناطيسياُ ولذلك يوجد اللف المغزلي والعزم المغناطيسي للنواة ويقاس العزم المغناطيسي في الأطياف الذرية بوحدات

ماجنتون بوهر $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}$ ويعرف علي أنه "العزم المغناطيسي الكلاسيكي الناتج عن إلكترون يدور في أصغر مدار من مدارات ذرة الهيدروجين بكمية تحرك دوراني مقدارها $\hbar$ "والماجنتون بوهر يساوي

$$\mu_B = 9.2732 \times 10^{-24} \frac{J.m^2}{wb.} (J/Tesla) \qquad (١-١٩)$$

كما أمكن قياس العزم المغناطيسي الناتج عن الحركة المغزلية للإلكترون

$$\mu_s = 2.0032 \times s \times \mu_B = 9.2889 \times 10^{-24} \frac{J.m^2}{wb.} (J/Tesla) \qquad (١-٢٠)$$

وهكذا نجد أن النسبة بين العزم المغناطيسي للإلكترون مقاساً بوحدات ماجنتون بوهر وعزم كمية تحرك M مقاساً بوحدات $\hbar$ ، نسبة ثابتة أي أن $\mu = gM$ حيث المعامل g يسمي النسبة الجيرومغناطيسية وتساوي واحد $(g_t = 1)$ للحركة الدورانية و $(g_s = 2)$ للحركة المغزلية للإلكترون. ويمكن تطبيق هذه النتائج علي حركة البروتونات والنيوترونات داخل النواة لحساب العزم المغناطيسي لها وذلك لأنه أتضح أن اللف المغزلي في وحدات $\hbar$ موجود عند كثير من الجسيمات الأولية بما فيها البروتون والنيوترون وهو ما يعرف بالماجنتون النووي μ_N والذي يمثل وحدة العزم المغناطيسي لجسيم له كتله البروتون m_p ويساوي:

$$\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p} = 5.051 \times 10^{-27} (J/Tesla) \qquad (١-٢١)$$

وتكون قيمة الماجنتون النووي للبروتون تساوي:

$$\mu_p = 2.7928 \times \mu_N = 14.1064 \times 10^{-27} (J/Tesla) \qquad (١-٢٢)$$

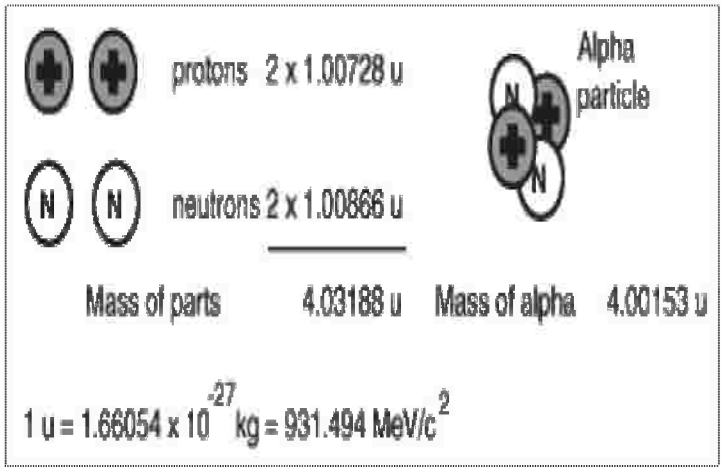
وقد ظهر عند قياس العزوم المغناطيسية لأنويه الذرات أن النيوترون الذي لا يحمل شحنة كهربية يجب أن يكون له عزم مغناطيسي. ولقد أكدت التجارب وجود العزم المغناطيسي للنيوترون ووجد أنه يساوي:

$$\mu_n = -1.913148\,\mu_N = -9.6633\times10^{-27}\,(J/Tesla) \qquad (١-٢٣)$$

والإشارة السالبة تعني أن اتجاه متجه العزم المغناطيسي في عكس اتجاه متجه اللف مثل الإلكترون، أما الإشارة الموجبة تعني الاتجاه المنطبق علي اتجاه اللف. والإشارة السالبة توضح أيضاً أن هناك نوعاً ما من الشحنة السالبة التي تطوف حول النيوترون مع الرغم أنه جسيم متعادل كهربياً وتفسير ذلك يظهر من دراسة القوي النووية وتركيب النيوكلونات التي أظهرت أن النيوكلون الطبيعي محاط دائماً بسحابة من الميزونات π التي تبعث وتمتص بواسطة النيوكلون ويتحول كل منهما للأخر.

١-٩ طاقة الترابط النووي Nuclear Binding Energy

إن معرفة كتلة البروتون والنيوترون بدقة عالية سمحت بمقارنة كتلة النواة M بالمجموع الكلي لكتل النيوكلونات المكونة لها. وكان يعتقد أن كتلة النواة تساوي مجموع كتل البروتونات والنيوترونات التي تدخل في تركيبها ولكن عند استخدام مطياف الكتلة لقياس كتلة النواة الحقيقة وجد أنها اصغر من مجموع كتل النيوكلونات المكونة لها وهذه نتيجة طبيعة لأن النواة هي نظام متماسك من النيوكلونات ترتبط بعضها البعض بكمية من الطاقة تسمي طاقة الترابط النووي. ومثال علي ذلك أن طاقة الترابط النووي تحسب كالأتي: Nuclear binding energy = Δmc^2 والفرق في الكتلة لجسيم ألفا يساوي $\Delta m = 0.0304$ u فتكون طاقة الترابط النووية لجسيم ألفا تساوي 28.3 MeV كما في شكل (١-٧) :



شكل(٧-١) يوضح طاقة الترابط النووي لجسيم ألفا

ويتم استنتاج المعادلة العامة التي يمكن بها حساب طاقة الترابط النووي كالأتي: فإذا كان العدد الذري للنواة Z والعدد الكتلي لها A فإن كتلة البروتونات الموجودة في النواة هي $(m_p Z)$ وكتلة النيوترونات هي $(A Z)m_n$ ويكون مجموع كتلة النيوكلونات الموجودة في النواة $((m_p Z)+(A Z)m_n)$. الفرق في الكتلة بين كتلة النواة M ومجموع كتل النيوكلونات المكونة لها هي:

$$m Z m_p (A Z)m_n M \qquad (١-٢٤)$$

وفي الحقيقة فإن النقص في الكتلة قد تحول لطاقة تربط مكونات النواة تسمي طاقة الترابط النووي وهي :

$$E_B mc^2 (Z m_p (A Z)m_n M)C^2 \qquad (١-٢٥)$$

وفي بعض الأحيان يمكن التعبير عن طاقة الترابط النووي بدلالة كتل الذرات المتعادلة. ويعرف أن كتل الذرات تختلف عن كتل الأنوية بمقدار كتل الإلكترونات. وتكتب معادلة طاقة الترابط النووي بدلالة كتل الذرات المتعادلة كالأتي:

$$E_B (Z m_H (A Z)m_n M)C^2 \qquad (١-٢٦)$$

حيث m_H كتلة ذرة الهيدروجين، M كتلة ذرة العنصر وتقدر هذه القيم بوحدات الكتل الذرية التي تعادل ٩٣١,٥ م.ا.ف فيمكن حساب طاقة الترابط النووي بوحدة الطاقة :

$$E_B = (Z m_H + (A - Z)m_n - M) \times 931.5 MeV \qquad (١-٢٧)$$

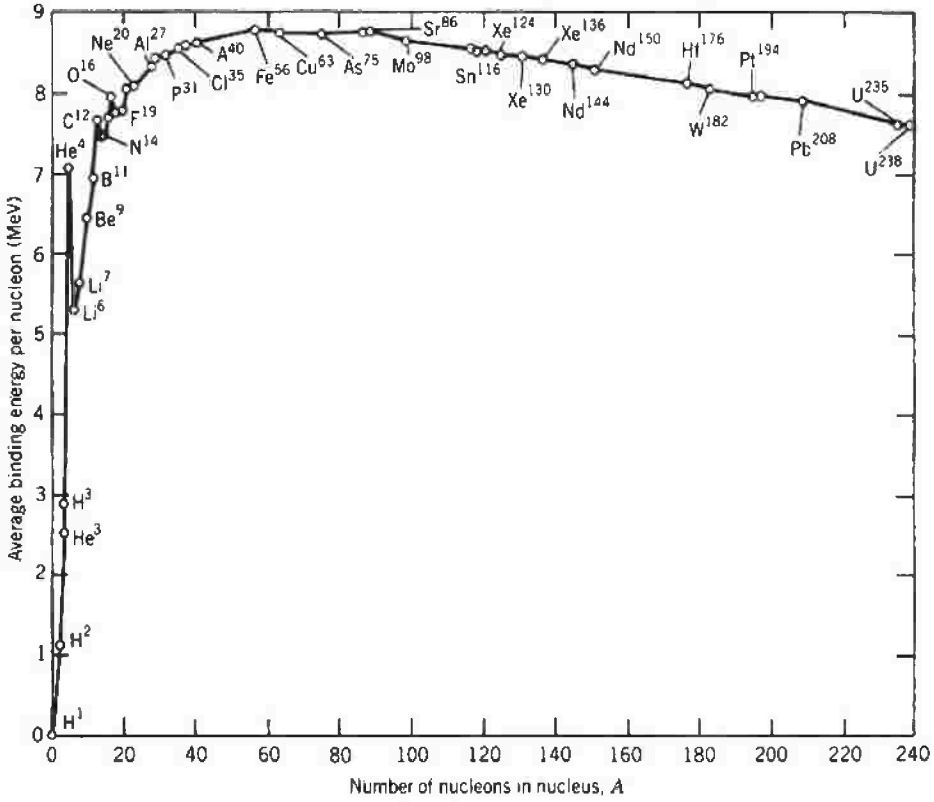
ويمكن حساب طاقة الترابط النووي لكل نيوكلون بقسمة طاقة الترابط النووي علي العدد الكتلي A حيث تكون:

$$E_n = E_B / A = (Z m_p + (A - Z)m_n - M) \qquad (١-٢٨)$$

شكل(٨-١) يمثل العلاقة البيانية بين طاقة الترابط النووي لكل نيوكلون والعدد الكتلي A لمختلف العناصر.

من الشكل نلاحظ أن :

١- طاقة الترابط النووي لكل نيوكلون En تزيد بصورة سريعة جداً مع زيادة العدد الكتلي A للعناصر الخفيفة التي لا يزيد العدد الكتلي لها عن ٢٠ وتبلغ حوالي ٨ مليون إلكترون فولت عند $A = 20$.



شكل (٨-١) طاقة الترابط النووي لكل نيوكلون كدالة في العدد الكتلي

٢- تزيد طاقة الترابط النووي لكل نيوكلون En بصورة بطيئة مع زيادة العدد الكتلي A وتبلغ قيمتها ٨,٧ مليون إلكترون فولت عند $A \approx 60$.

٣- تتناقص طاقة الترابط النووي لكل نيوكلون En بعد ذلك ببطء شديد مع زيادة العدد الكتلي A وتبلغ قيمتها ٧,٦ مليون إلكترون فولت عند $A \approx 240$.

٤- طاقة الترابط النووي لكل نيوكلون En لبعض العناصر مثل الهيليوم ${}^{4}_{2}He$ والكربون ${}^{12}_{6}C$ والأكسجين ${}^{16}_{8}O$ تكون كبيرة لأن نواة الهيليوم تحتوي علي أربعة نيوكلونات فتكون مستقرة بينما

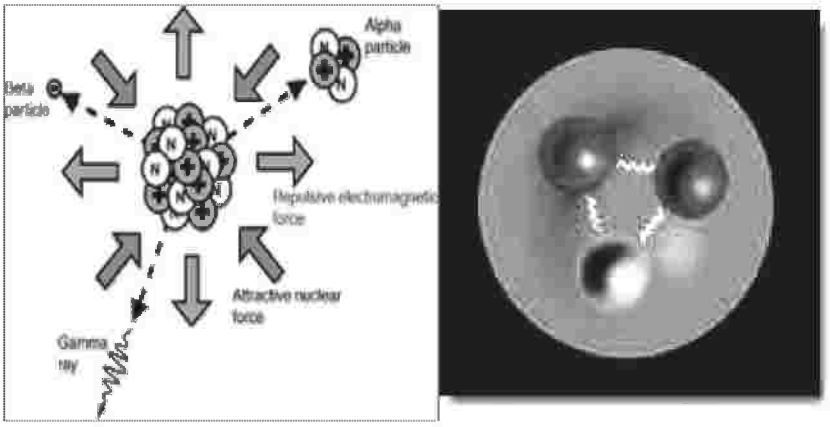
نواة الهيليوم $_{2}^{5}He$ غير مستقرة وغير موجودة ومن المقترح أن تكون بعض العناصر مثل الكربون تتكون من ثلاثة أنويه هيليوم والأكسجين يتكون من أربعة أنوية هيليوم وبذلك تكون أكثر استقراراً لأن طاقة الترابط النووي لها كبيرة.

٥- طاقة الترابط النووي لكل نيوكلون En تكون صغيرة في حالة الأنوية الخفيفة لأنه حسب تفسير نموذج قطرة السائل تكون معظم أو جميع النيوكلونات في هذه الحالة واقعة علي السطح الخارجي للنواة. وأن طاقة الترابط للنواة السطحية أصغر من تلك الموجودة داخل النواة وذلك لتفاعلها مع عدد أقل من النيوكلونات. وهذا يشبه ظاهرة التوتر السطحي في السوائل.أما في الأنوية الثقيلة فيرجع صغر طاقة الترابط النووي لكل نيوكلون En لقوة التنافر الكهربي بين البروتونات الواقعة بعيداً عن مركز النواة. وأن قوة التجاذب النووي بين هذه البروتونات صغيرة جداً وقد تكون معدومة لان القوي النووية ذات مدي قصير جداً ولا تؤثر إلا علي عدد صغير جداً ومحدود من النيوكلونات المجاورة.

١٠-١ القوي النووية Nuclear Force

تتكون النواة من بروتونات موجبة الشحنة ونيوترونات متعادلة الشحنة وعند تطبيق قانون كولوم نجد أن القوة الكهربية الموجودة داخل النواة قوة تنافر بين البروتونات متشابهة الشحنة فلابد من قوي تعمل علي ربط مكونات النواة تعرف بأنها طاقة الترابط النووي التي تعمل على ربط مكونات النواة مع بعضها البعض وتبلغ قيمة هذه الطاقة عدة ملايين من الإلكترون فولت (م. أ. ف). وعند حساب طاقة الترابط النووي للديوترون وجد أنها حوالي(3.23) م. أ. ف بينما طاقة الترابط لإلكترون ذرة الهيدروجين حوالي (13.6) إلكترون فولت. وهذا يؤكد وجود قوة

تجاذب أخري داخل النواة لتتغلب علي قوي التنافر الكهربي وتعمل علي ترابط النواة. و تعرف هذه القوي بالقوي النووية وتفاعلها يكون من النوع القوي. شكل(٩-١) قوى التجاذب النووية بين البروتونات والنيوترونات وقوى التنافر بين البروتونات وكذلك أنواع النشاط الإشعاعي النووي مثل إشعاعات جاما وجسيمات ألفا وبيتا . ومن المعروف أن القوى التي تربط الإلكترونات بالنواة هى قوى كهرومغناطيسية . أما القوى التي تربط مركبات النواة بعضها ببعض فهى القوى النووية الجاذبة والتي تؤثر على مسافة واحد فيرمي (١٠-١٥ متر).



شكل(٩-١) يوضح قوى التجاذب النووية بين البروتونات والنيوترونات

القوة النووية الشديدة تضمن بقاء البروتونات والنيوترونات مع بعضها البعض في نواة الذرة دون أن تتطاير بعيداً وتتكون نواة الذرة بهذه الطريقة وهذه القوة من الشدة بمكان بحيث إنها تكاد تجعل البروتونات والنيوترونات تلتصق ببعضها البعض داخل النواة ولهذا السبب يطلق على الجسيمات الدقيقة التي تمتلك هذه القوة اسم "gluon" وهي تعني "اللصق" باللاتينية وقد ضبطت قوة الربط هذه بدقة بالغة، إذ تم ترتيب شدة هذه القوة بشكل دقيق للإبقاء على مسافة معينة بين

البروتونات والنيوترونات فلو كانت هذه القوة أشد قليلاً، لتصادمت البروتونات والنيوترونات مع بعضها البعض أما لو كانت هذه القوة أضعف قليلاً، لتشتت البروتونات والنيوترونات.

وعند دراسة القوي الموجودة في الطبيعة وجد أنها أربعة قوي:

١- القوي النووية تكون بين النيوكلونات في النواة وتنقل من خلال البايونات.

٢- القوي الكهرومغناطيسية والتي تنتج بين المجالات الكهربية والمغناطيسية ويكون الفوتون هو الجسيم في هذا التفاعل.

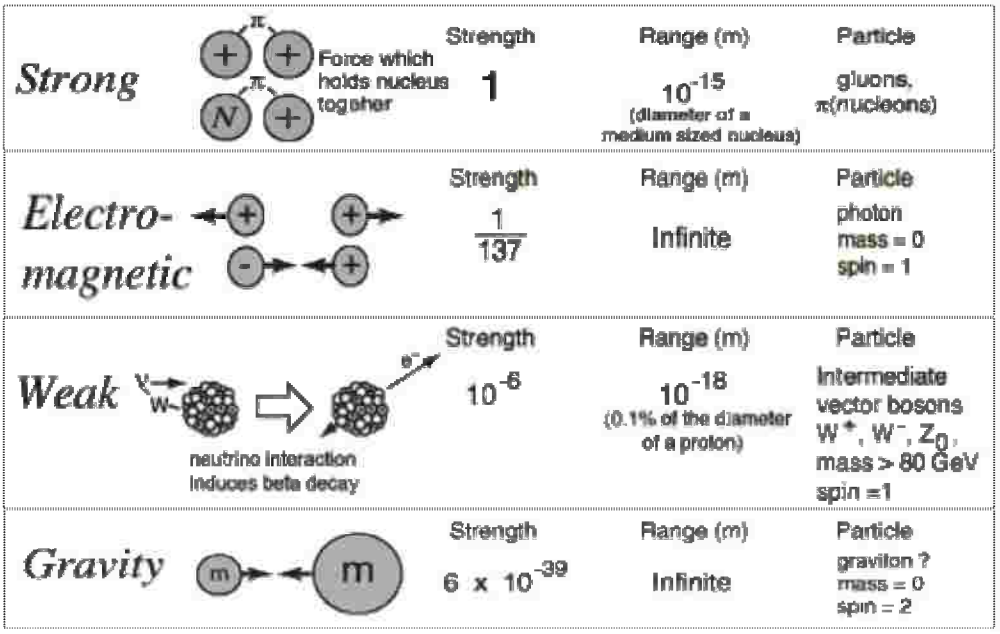
٣- القوي الضعيفة والتي تنتج بسبب تفكك بيتا وبعض الجسيمات الأولية.

٤- قوي الجذب بين الجسيمات وهي تكون بين الجسيمات الكبيرة.

الجدول (2-1) يبين القوى المعروفة في الطبيعة حيث يتضح أن القوة النووية هي الأقوى من بين جميع القوى المعروفة كما تظهر أيضاً في شكل (١٠-١).

جدول(٢-١) القوى المعروفة في الطبيعة

القوة الطبيعية	الجسيم	طاقة الكتلة السكونية	القيمة
القوى النووية	بايون	$100MeV$	1
القوى الكهرومغناطيسية	فوتون Phton	*Zero*	10^{-2}
القوي الضعيفة	بوزون	$8000 - 9000MeV$	10^{-12}
قوى الجذب العام	جرافتون Graviton	*Zero*	10^{-40}



شكل(١٠-١) يوضح القوى الطبيعية الأربعة المعروفة

خصائص القوة النووية

١- القوي النووية هي قوة تجاذب ولكنها ليست كذلك على طول المسافة الفاصلة بين النيوكليونات. فقد لوحظ أن هذه القوى تغير من هذه الخاصية عندما تكون المسافة الفاصلة بين النيوكليونات أقل من حوالي0.4 فيرمي وبالتالي تصبح في هذا المدى قوة تنافرية. وقد وجد ما يعرف بالقلب (اللب) الصلب (Hard Core) الذي يعمل على تباعد النيوكليونات عن بعضها البعض في المسافات الأقل من ٠,٤ فيرمي وإلا فسوف تندمج هذه النيوكليونات مع بعضها البعض مكونة جسيماً واحداً. وهذا غير مشاهد في الطبيعة إذ أن مكونات النوة تظل محتفظة بشخصية كل منها (البروتونات والنيوترونات).

2- القوي النووية ذات مدى قصير جداً وتكون ذات فاعلية كبيرة جداً عندما تكون المسافة بين الفاصلة بين النيوكلونات صغيرة جداً (٣-٢)

فيرمي فقوة الجذب بين البروتونات تفصل بينها هذه المسافة تكون أكبر ١٠٠ مرة من قوة التنافر الكهربي بينهما.وتتناقص القوي النووية بصورة سريعة جداً مع زيادة المسافة الفاصلة بين النيوكلونات وتنعدم هذه القوي عندما تكون المسافة بين البروتونين حوالي ١٠ فيرمي وتصبح القوي المؤثرة عليها هي قوة التنافر الكهربية فقط. وتسبب هذه الخاصية عدم استقرار بعض الأنوية مثل اليورانيوم والتي تحتوي علي عدد كبير من البروتونات والتي يؤدي زيادتها عن حد معين إلي زيادة قوة التنافر الكهربي أكثر من قوة التجاذب النووي وذلك لأن البروتونات البعيدة عن مركز النواة تتجاذب خلال القوي النووية مع عدد قليل من النيوكلونات المجاورة بينما تتنافر كهربياً مع جميع بروتونات النواة.

3- تمتاز القوة النووية بخاصية التشبع Saturation. إذ نلاحظ أن الأنوية التي تحتوي على أربعة نيوكليونات هي أنوية مستقرة كنواة $^{4}_{2}He$ بينما نلاحظ أن الأنوية التي تحتوي على خمسة نيوكليونات مثل $^{5}_{2}He$, $^{5}_{3}Li$ غير مستقرة وغير موجودة. وهذا يعني أن هناك تشبعاً للقوة النووية بحيث تعمل على ربط أربعة نيوكليونات مع بعضها البعض .

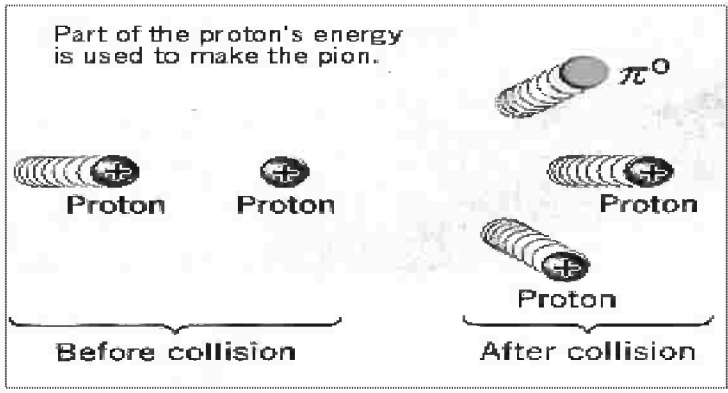
٤- لا تعتمد القوة النووية على الشحنة الكهربية. وهذا يعني أن القوة الرابطة بين زوج النيوترونات تساوي تلك الناتجة عن زوج البروتونات وتساوي تلك الناتجة بين بروتون ونيوترون.

نظرية الميزون

اقتراح الياباني يوكاوا (Yukawa) في عام ١٩٣٥ م نظريته الجديدة لتفسير القوي النووية وسميت نظرية الميزون. لقد أفترض أن القوة النووية تنشأ من التفاعل بين النيوكلونات يتم نتيجة تبادل جسيمات معينة تسمي الميزونات π وتقدر كتلة الميزون بحوالي

($200m_e \approx 106MeV$) حيث m_e كتلة الإلكترون ولقد اكتشفت هذه الميزونات في الأشعة الكونية ولكن هذه الجسيمات جاءت من الإشعاع الكوني حيث التفاعلات الناتجة هي تفاعلات ضعيفة بينما نجد أن القوى النووية هي تفاعلات قوية. ولقد أكتشف يوكاوا في عام ١٩٤٧ م ميزون يوكاوا وتبين أن شحنة هذا الجسيم يمكن أن تساوي شحنة الإلكترون أو البروتون ويمكن أن يكون متعادل الشحنة الكهربية وسمي بالبايون (π) وهو الذي تتبادله النيوكليونات ولقد أكتشف باول Powell عام ١٩٤٧ م البايون السالب والموجب(π^-,π^+) بينما أكتشف موير Moyer عام ١٩٥٠ م البايون المتعادل (π^0) وتكون كتلة وطاقة السكون للبايونات الموجبة والسالبة هي $m(\pi^\pm) \approx m(\pi^\pm) \approx 274m_e \approx 140MeV$ بينما تكون كتلة وطاقة السكون للبايون المتعادل هي $m(\pi^0) \approx 264m_e \approx 135MeV$.

وبالتالي فإنه يمكن اعتبار أن النيوكليون عبارة عن لب (قلب) صلب تطوف حوله سحابة من البايونات. وهكذا فإنه يمكننا تصور النيوكليون على أنه يطلق ويمتص بايون(π) وهمي طول الوقت. ويمكن اعتبار هذا البايون على أنه حقيقي وذلك خلال فترة عدم التأكد والتي تعطى بدلالة قانون عدم التأكد. وتفترض نظرية يوكاوا أن كتلة النيوكلون ثابتة ولا تتغير نتيجة امتصاص أو إطلاق البايونات لان كتلة كل من البروتون والنيوترون ثابتة ولم يحدث عليها أي تغيير في كتلتها. وقد يبدو هذا متناقضاً مع قانون حفظ النسبية ولكن الحقيقة غير ذلك لأنه يمكن استخدام مبدأ اللايقين لتوضيح أن التغيير في الطاقة النسبية عند حدوث هذه العمليات لا يزيد عن مقدار اللايقين في الطاقة كما حدده هايزنبرج وبالتالي فان هذه العملية لا تتناقض مع مبدأ حفظ أو بقاء الطاقة النسبية لان الفترة الزمنية التي تتم فيها هذه العملية قصيرة جداً. وتنتج القوي النووية بين نيوكليونين كالأتي كما في شكل (١١-١):



شكل(١-١١) يوضح تبادل البايون المتعادل بين البروتونات

١- تبادل البايونات بين النيوترون- نيوترون عن طريق تبادل بايون متعادل وتكتب المعادلة:

$$n \rightarrow n + \pi^0 \rightarrow n \qquad (١-٢٩)$$

٢- تبادل البايونات بين البروتون- البروتون عن طريق تبادل بايون متعادل وتكتب المعادلة:

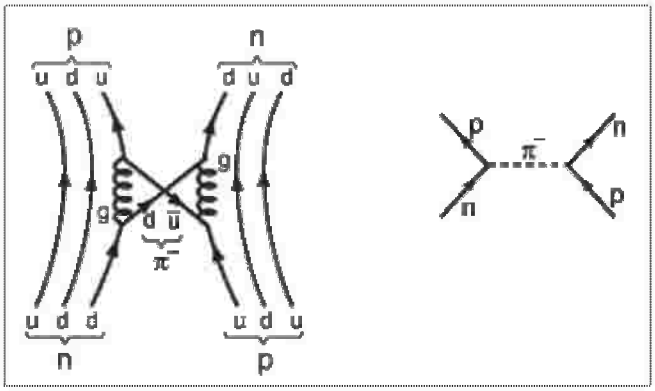
$$p \rightarrow p + \pi^0 \rightarrow p \qquad (١-٣٠)$$

٣- تبادل البايونات بين البروتون- النيوترون عن طريق تبادل بايون موجب وتكتب المعادلة:

$$p \rightarrow n + \pi^+ \rightarrow p \qquad (١-٣١)$$

٤- تبادل البايونات بين النيوترون- البروتون عن طريق تبادل بايون سالب كما في شكل (١-١٢) وتكتب المعادلة:

$$n \rightarrow p + \pi^- \rightarrow n \qquad (١-٣٢)$$



شكل(١٢-١) يوضح تبادل البايون السالب بين البروتونات والنيوترونات

ويمكن تعيين كتلة البايون بإستخدام مبدأ عدم التحديد لهيزينبرج وهو:

$$\Delta p \cdot \Delta x \geq \hbar \qquad (١-٣٣)$$

ولو اعتبرنا أن $\Delta x \approx 1.5F$ وهو نصف قطر النواة R وان :

$$\Delta p \approx m_\pi C \qquad (١-٣٤)$$

حيث C سرعة الضوء فيمكن تعيين كتلة البايون كالأتي:

$$m_\pi CR \approx \hbar \quad m_\pi \approx \frac{\hbar}{RC} \qquad (١-٣٥)$$

$$m_\pi \approx \frac{1.05 \times 10^{-34}}{1.2 \times 10^{-15} \times 3 \times 10^{8}} \approx 0.292 \times 10^{-27}\, kg \approx 132 MeV$$

وهذه النتيجة تتفق مع النتائج العملية حيث تكون قيمة كتلة البايون $m(\pi) \approx 140 MeV$.

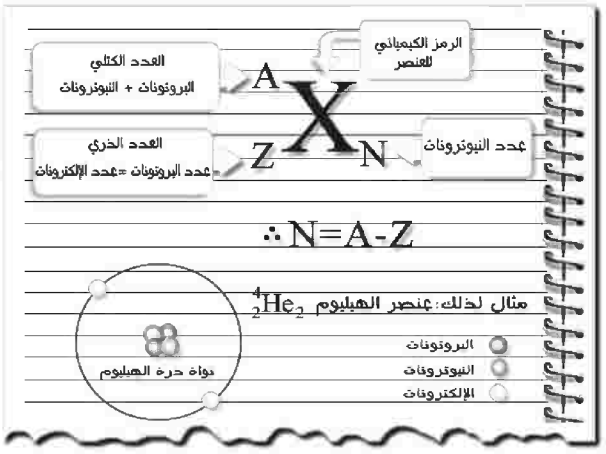
١١-١ بعض المصطلحات الهامة في الفيزياء النووية

١- العدد الكتلي للنواة (A) Mass Number

هو مجموع عدد البروتونات (p) والنيوترونات (n) في النواة.

٢- العدد الذري للنواة (Z) Charge Number

هو عدد البروتونات في النواة ويساوي عدد الإلكترونات في الأغلفة الذرية. شكل(١٣-١) يوضح كيفية كتابة العنصر والرموز التي تدل على التفاصيل الكاملة عنه.



شكل(١٣-١) يوضح كيفية كتابة العنصر والعدد الكتلي والعدد الذري

٣- وحدة الكتل الذرية $(a.m.u)$ (Atomic Mass Unit)

هي تساوي $(\frac{1}{12})$ من كتلة ذرة الكربون (^{12}C) المتعادلة وتكون قيمتها مقدرة بالجرامات وحيث أن الوزن الجزيئي بالجرامات يساوي العدد الكتلي (A) علي عدد أفوجادرو (N_A) فتكون قيمتها بالجرام هي:

$$1(a.m.u) = \frac{1}{12} \times \frac{12}{N_A} = \frac{1}{6.025 \times 10^{23}} = 1.66 \times 10^{-24} g.$$

٤- الإلكترون فولت (eV) Electron Volt

هو إحدى وحدات قياس الطاقة في التفاعلات النووية ويعرف علي أنة كمية الطاقة التي يكتسبها الإلكترون عندما ينتقل خلال جهد مقداره واحد فولت. ويساوي $1(eV) = 1.6 \times 10^{-12} erg$

٥- المليون إلكترون فولت (MeV) هو مضاعفات لوحدة الإلكترون فولت ويساوي $1MeV = 10^{6}eV = 1.6 \times 10^{-6}erg$ وللتحويل من وحدة الكتل الذرية $(a.m.u)$ إلي وحدة المليون إلكترون فولت (MeV) يكون

$1(a.m.u) = 931.5MeV$

٦- الجيجا إلكترون فولت (GeV) (البليون إلكترون فولت (BeV)) ويساوي

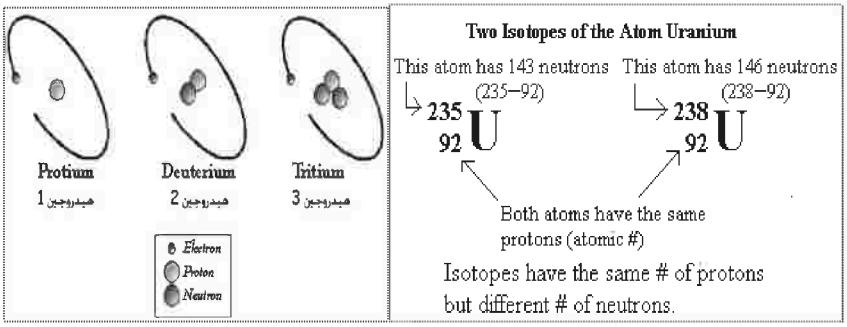
$1GeV = 1BeV = 10^{9}eV = 1.6 \times 10^{-3}erg$

٧- النويدة (النيوكليد) (Nucleide)

يستخدم عادة أسم نويدة أو نيوكليد عند التركيز علي المكونات النووية وطاقتها لأنه يوجد لمعظم العناصر أكثر من نواة واحدة وذلك لاختلاف عدد النيوترونات مثل الكربون والتي تكتب النويدة لها علي الصورة ($^{12}_{6}C$) وتحتوي علي ٦ بروتون و٦ نيوترون بينما تكتب نويدة اليورانيوم علي الصورة ($^{238}_{92}U$) وتحتوي علي ٩٢ بروتون و١٤٦ نيوترون. وأن عدد النويدات المعروفة في الوقت الحاضر كبير جدا مقارنة بعدد العناصر. وتقسم النويدات عادة لمجموعات تشترك في بعض الخواص مثل النظائر والأيزوبارات والأيزوتونات.

٨- النظائر (Isotopes)

هي نويدات لها نفس العدد الذري (Z) وتختلف في العدد الكتلي (A) أي أنها تختلف في عدد النيوترونات وتعتبر نظائر اليورانيوم أشهر مثال علي ذلك حيث يوجد ١٤ نظيرا لها ولكن اشهرها ($^{233}U, ^{234}U, ^{235}U, ^{238}U$). والشكل التالي يوضح أشهر النظائر لذرة اليورانيوم الهيدروجين ($^{1}H, ^{2}H, ^{3}H$) كما في شكل (١٤-١).



شكل(١٤-١) يوضح نظائر ذرة الهيدروجين واليورانيوم

٩- الأيزوبارات (Isobars)

هي نويدات تختلف في العدد الذري (Z) ولها نفس العدد الكتلي (A) مثل $(^{37}_{16}S,^{37}_{17}Cl)or(^{234}_{91}Pa,^{234}_{92}U)or(^{11}_{6}C,^{11}_{7}N)$

١٠- الأيزوتونات (Isotones)

هي نويدات لها نفس عدد النيوترونات ولكن مختلفة في عدد البروتونات وبالتالي في العدد الكتلي (A) مثل $(^{37}_{17}Cl,^{39}_{19}K)or(^{16}_{8}O,^{15}_{7}N)$.

١١- الأيزومار (Isomer)

هي نويدات العنصر نفسه ولكنها تتواجد في حالات إثارة مختلفة تكون في الغالب ذات أعمار ممكنة القياس بسهوله وغالبا ما ينتج عنها أشعة γ.

١٢- الفيرمي (Fermi)

هو وحدة قياس نصف قطر النواة ويساوي $(1F = 10^{-15}m)$ وسمي بهذا الاسم نسبة إلي عالم الفيزياء النووية فيرمي (E. Fermi).

١٣- البارن (Barn)

هو وحدة قياس مساحة مقطع التفاعل النووي ويساوي $(1b = 10^{-28}m^2)$.

١٤- الميزونات (Mesons)

هي جسيمات مثل البايونات(π^0,π^+,π^-) والميزونات (π^0,π^+,π^-) لها خواص معينة وأعداد كمية معينة وتقع كتلتها بين كتلة السكون

للإلكترون وكتلة البروتون وتلعب الميزونات دوراً هاماً في فهم طبيعة القوي النووية.

١٥- البوزيترون (Positron)

هو الجسيم المضاد للإلكترون ويحمل نفس الخواص إلا أنه موجب الشحنة.

١٦- الفوتون (Photon)

هو وحدة الكم في الإشعاع الكهرومغناطيسي ويظهر علي هيئة أشعة أو كمات.

١-١٢ أمثلة محلولة

مثال(١-١) أوجد أنصاف أقطار أنوية الماغنسيوم (A=24) ، السيلكون (A=28) الحديد (A=56) ، اليورانيوم (A=238) علماً بأن $R_0 = 1.2F$.

الحل: يحسب نصف قطر النواة من المعادلة: $R = R_0 A^{1/3}$ حيث A العدد الكتلي للنواة

نصف قطر نواة الماغنسيوم (A=24)

$$R = R_0 A^{1/3} = 1.2 \times (24)^{1/3} = 1.2 \times 2.8845 = 3.46F$$

نصف قطر نواة السيلكون (A=28)

$$R = R_0 A^{1/3} = 1.2 \times (28)^{1/3} = 1.2 \times 3.0366 = 3.64F$$

نصف قطر نواة الحديد (A=56)

$$R = R_0 A^{1/3} = 1.2 \times (56)^{1/3} = 1.2 \times 3.8259 = 4.59F$$

نصف قطر نواة اليورانيوم (A=238)

$$R = R_0 A^{1/3} = 1.2 \times (238)^{1/3} = 1.2 \times 6.1972 = 7.44F$$

نستنتج من الحل أن نصف قطر النواة يزيد بزيادة العدد الكتلي للنواة.

مثال(٢-١)- أحسب النسبة بين حجم الذرة وحجم النواة للألمونيوم (A=27) علماً بأن نصف قطر الذرة يساوي ٢ أنجستروم؟

الحل: أولاً نحسب نصف قطر نواة الألمونيوم:

$$R = R_0 A^{1/3} = 1.2 \times (27)^{1/3} \approx 1.2 \times 3 = 3.6F = 3.6 \times 10^{-15} m$$

نفرض أن حجم ذرة الألمونيوم $(V_{atom.})$ وحجم النواة $(V_{Nucl.})$

$$\frac{V_{Atom}}{V_{Nucl.}} = \frac{\frac{4}{3}\pi R_{Atom}^3}{\frac{4}{3}\pi R_{Nucl.}^3} = \frac{R_{Atom}^3}{R_{Nucl.}^3} = \frac{(2 \times 10^{-10})^3}{(3.6 \times 10^{-15})^3} = \frac{6 \times 10^{-30}}{46.66 \times 10^{-45}} \approx 1.7 \times 10^{14}$$

مثال(٣-١) مطياف كتلة يعمل عند مجال مغناطيسي قدره $(B = 0.22 Tesla)$ فإذا كانت سرعة الأيونات $(v = 4.8 \times 10^5 \, m/s)$ فأحسب المسافة التي تفصل بين نقطتي سقوط ذرتي الأكسجين (١٦) و(١٨) علماً بأن الأكسجين ثلاثي التكافؤ.

الحل: من المعادلة (١٥-١) نستنتج منها حساب نصف قطر المسار وهي:

$$m = \frac{BqR}{v} \quad R = \frac{mv}{Bq}$$

ثم نحسب نصف قطر المسار للأكسجين (١٦)

$$R_{16} = \frac{mv}{Bq} = \frac{16 \times 1.66 \times 10^{-27} \times 4.8 \times 10^5}{0.22 \times 3 \times 1.6 \times 10^{-19}} = 120.73 \times 10^{-3} m = 12.07 cm$$

ثم نحسب نصف قطر المسار للأكسجين (١٨)

$$R_{18} = \frac{mv}{Bq} = \frac{18 \times 1.66 \times 10^{-27} \times 4.8 \times 10^5}{0.22 \times 3 \times 1.6 \times 10^{-19}} = 135.82 \times 10^{-3} m = 13.58 cm$$

وتكون المسافة بين نقطتي السقوط هي:

$$D = 2(R_{18} - R_{16}) = 2(13.58 - 12.07) = 2 \times 1.51 = 3.02 cm$$

ونلاحظ أنه لا يمكن حساب المسافة بين نقطتي السقوط كالفرق بين نصفي القطرين وذلك لأن مركزين مختلفين.

مثال(٤-١)- أحسب طاقة الترابط النووي لنواة الكربون ($^{12}_{6}C$) ثم احسب طاقة الترابط النووي لكل نيوكلون علماً بأن:

$M_C = 11.9967amu, m_p = 1.00728amu, m_n = 1.00867amu$

الحل: من معادلة طاقة الترابط النووي (١-٣١)

$$E_B = \Delta mc^2 = (Z m_p + (A - Z)m_n - M)C^2$$

وللتحويل من وحدة كتل ذرية(amu) إلي وحدات طاقة (MeV) نجعل المعادلة كالأتي:

$$E_B = \Delta mc^2 = (Z m_p + (A - Z)m_n - M) \times 931.5$$

$$E_B = (6 \times 1.00728 + 6 \times 1.00867 - 11.9967) \times 931.5$$

$$E_B = (6 \times 1.00728 + 6 \times 1.00867 - 11.9967) \times 931.5$$

$$E_B = (12.0957 - 11.9967) \times 931.5 = 0.099 \times 931.5 = 92.44MeV$$

لحساب طاقة الربط لكل نيوكلون نقسم طاقة الترابط النووي علي العدد الكتلي:

$$E_n = E_B / A = \frac{92.44}{12} = 7.7MeV / nucleon$$

مثال(٥-١) إذا علمت أن طاقة الترابط النووي لنواة الكبريت ($^{32}_{16}S$)هي ٢٧٢ مليون إلكترون فولت. أحسب كتلة نواة الكبريت علماً

$m_p = 1.00728amu, m_n = 1.00867amu$

الحل: من معادلة طاقة الترابط النووي

$$E_B = (Z m_p + (A - Z)m_n - M) \times 931.5$$

$$272 = (16 \times 1.00728 + 16 \times 1.00867 - M_S) \times 931.5$$

$$\frac{272}{931.5} = (16 \times 1.00728 + 16 \times 1.00867 - M_S)$$

$$0.292 = (16.1165 + 16.1387 - M_S)$$

$$0.292 = (32.2552 - M_S)$$

$$M_S = 32.2552 - 0.292 = 31.9632$$

مثال(٦-١)- أحسب طاقة الترابط النووي لنواة التريتيوم (${}^{3}_{1}H$) ونواة الهيليوم(${}^{3}_{2}He$) ثم ماذا تستنتج من الفرق في الطاقة بينهما؟ علماً بأن:

$m_p = 1.00728 amu, m_n = 1.00867 amu, M({}^{3}_{1}H) = 3.01515 amu, M({}^{3}_{2}He) = 3.01494 amu$

الحل: أولاً نحسب طاقة الترابط النووي لنواة التريتيوم (${}^{3}_{1}H$)

$$E_B = (Z m_p + (A - Z)m_n - M) \times 931.5$$

$$E_B = (1 \times 1.00728 + 2 \times 1.00867 - 3.01515) \times 931.5$$

$$E_B = (1.00728 + 2.01734 - 3.01515) \times 931.5$$

$$E_B = (3.02462 - 3.01515) \times 931.5 = 0.00947 \times 931.5 = 8.82 MeV$$

ثانياً نحسب طاقة الترابط النووي لنواة الهيليوم (${}^{3}_{2}He$)

$$E_B = (Z m_p + (A - Z)m_n - M) \times 931.5$$

$$E_B = (2 \times 1.00728 + 1 \times 1.00867 - 3.01494) \times 931.5$$

$$E_B = (2.01456 + 1.00867 - 3.01515) \times 931.5$$

$$E_B = (3.02323 - 3.01494) \times 931.5 = 0.00829 \times 931.5 = 7.72 MeV$$

نستنتج من حساب طاقة الترابط النووي لكل من نواة التريتيوم (${}^{3}_{1}H$) ولنواة الهيليوم (${}^{3}_{2}He$) أن نواة الهيليوم تحتوي علي بروتونين يحدث بينهما قوة تنافر كولومية وبالتالي تحتاج طاقة أكبر لاستقرار النواة بينما نواة التريتيوم تحتوي علي بروتون واحد وتكون مستقرة وعند حساب طاقة التنافر الكولومية للبروتونين وجد أنها تساوي ٠,٧٢ م.أ.ف وبإضافة هذه الطاقة إلي طاقة الترابط النووي للهيليوم نجد أن مجموعهما قريب جداً من طاقة الترابط النووي للتريتيوم.

مثال(٧-١)- إذا كانت أقل طاقة حركة للبروتون للتغلب علي قوة التنافر بينه وبين نواة اليورانيوم (${}^{238}_{92}U$) هي ١٥ م.ا.ف .أحسب أقل طاقة حركة للتغلب بين اليورانيوم وكل من جسيمات ألفا (${}^{4}_{2}He$) والنيوترون.

الحل: قانون كولوم للشحنات ينص علي

$$F = K\frac{q_1 q_2}{R^2}$$

أولاً: في حالة في حالة قذف اليورانيوم(U) بالبروتون(P) تكون قوة التنافر الكهربي الكولومي هي:

$$F_{UP} = K\frac{(e)(92e)}{R^2} = 92K\frac{e^2}{R^2}$$

ثانياً: في حالة في حالة قذف اليورانيوم(U) بجسيمات ألفا (α) تكون قوة التنافر الكهربي الكولومي هي:

$$F_{U\alpha} = K\frac{(2e)(92e)}{R^2} = 182K\frac{e^2}{R^2}$$

من المعادلتين السابقتين نحصل علي:

$$\frac{F_{U\alpha}}{F_{UP}} = 2 \quad E_\alpha = 2E_P \quad E_\alpha = 2 \times 15 = 30MeV$$

أما في حالة النيوترون فلا يوجد قوة تنافر وبالتالي فإن طاقة الحركة تساوي صفر(من الناحية النظرية).

١٣- ١ أسئلة عامة

١- أحسب طاقة الترابط النووي للأنوية ${}^{4}_{2}He, {}^{2}_{1}H$. وماذا تستنتج من الفرق بينهما.

٢- اشرح كيف يمكن قياس كتلة النواة باستخدام مطياف الكتلة.

٣- أذا علمت أن طاقة الترابط النووي لنواة الكربون $({}^{12}_{6}C)$هي٩٢,١٦ مليون إلكترون فولت. أحسب كتلة نواة الكربون علماً $m_p = 1.00728amu, m_n = 1.00867amu$

٤- لماذا عندما تكون المسافة بين النيوكليونات اقل من ٥,٤ فيرمي تصبح القوة تنافرية.

٥- أوجد أنصاف أقطار أنوية الليثيوم (A=7) ، الكبريت (A=32) الكريبتون (A=84) ، اليورانيوم (A=235) علماً بأن $R_0 = 1.2F$.

٦- أثبت أن معدل طلقة الترابط النووي لكل نيوكليون تساوي تقريباً ٧,٤ م.أ.ف.

٧- اشرح نظر يوكاوا ثم أوجد كتلة البايون.

٨- وضح أي الأنوية التالية تمثل نظائر، أيزوبارات،أيزوتونات

$({}^{37}_{17}Cl, {}^{39}_{19}K) or ({}^{16}_{8}O, {}^{15}_{7}N)$ $({}^{37}_{16}S, {}^{37}_{17}Cl) or ({}^{234}_{91}Pa, {}^{234}_{92}U)$ $({}^{233}U, {}^{234}U)$