

الفصل الثاني

اولا : طاقة الربط النووية Nuclear Binding Energy :

هي الطاقة التي تتحرر عندما تتجمع النيوكليونات لتكوين النواة ، او هي الطاقة اللازمة لفصل جميع نيوكليونات النواة بعضها عن البعض الاخر .

*وتعزى طاقة الربط النووية هذه الى ان مجموع كتل النيوكليونات وهي منفصلة عن بعضها اكبر من كتلة النواة الناتجة من تجمعها ، وفرق الكتلة هذا قد تحول الى طاقة مبعثرة مما سبب تماسك النيوكليونات مع بعضها ، وعليه فطاقة الربط النووية $B(A,Z)$ لنواة عددها الكتلي A وعددها الذري Z هي :

$$B(A,Z)=[Zm_p+Nm_n-M_N(A,Z)]C^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

حيث m_p كتلة البروتون ، m_n كتلة النيوترون ، N العدد النيوتروني ، M_N كتلة النواة ، c سرعة الضوء .

فان كانت الكتلة مقدرة بـ kg فان الطاقة ستقدر بال جول ، ولكن هذه الوحدات غير ملائمة لذلك تستعمل وحدة الكتلة الذرية ، فعليه ان كانت الكتلة مقدرة بوحدة u ، وبما ان :

$$1 u = 931.5 \frac{MeV}{c^2}$$

لذلك امكن اعادة كتابة المعادلة (1) لتصبح كالاتي :

$$B(A,Z)= [Zm_p+Nm_n-M_N(A,Z)].C^2 \times \frac{931.5}{c^2} MeV$$

$$\therefore B(A,Z)=931.5[Zm_p+Nm_n-M_N(A,Z)] \quad \dots\dots\dots (2)$$

طاقة الربط بدلالة الكتلة النووية ، وبوحدات وحدة الكتلة الذرية .

ولقد جرت العادة على استعمال الكتلة الذرية بدلا من الكتلة النووية فلدينا :

$$M(A,Z)=M_N+Zm_e-B_e \quad \dots\dots\dots (3)$$

حيث $M(A,Z)$: كتلة الذرة ، M_N = كتلة النواة ، B_e = هي طاقة ترابط الالكترونات بالذرة وتكون قيمتها صغيرة جدا يمكن اهمالها .

نعوض المعادلة (3) في معادلة (2) فنحصل على :

$$B(A,Z)=931.5[Zm_p+Nm_n-M(A,Z)+Zm_e]$$

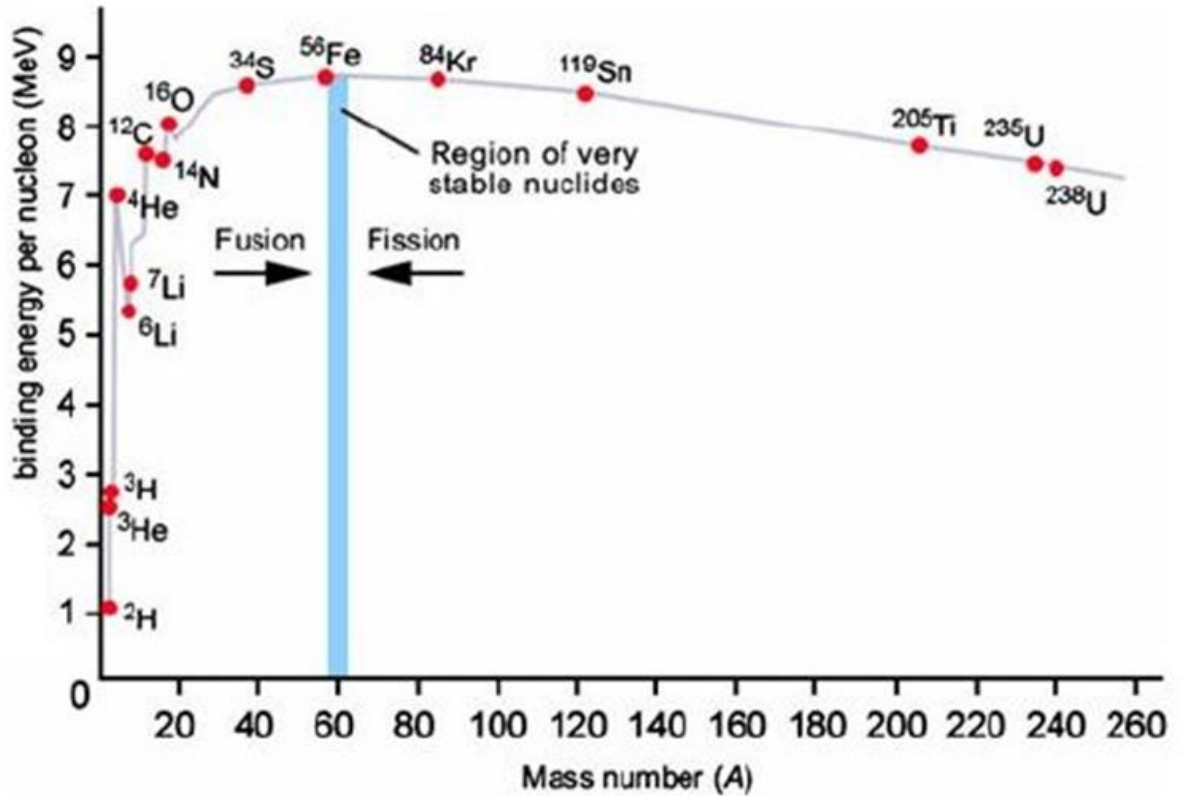
$$\therefore B(A,Z)=931.5[Zm_H+Nm_n-M(A,Z)] \quad \dots\dots\dots (4)$$

***معدل طاقة الربط :**

بقسمة طاقة الربط النووية $B(A,Z)$ على العدد الكتلي (A) نحصل على معدل طاقة الربط النووية B_{ave} ، اي معدل ربط اي من النيوكليونات داخل النواة (p) او (n) .

$$B_{ave}(A,Z)=\frac{B(A,Z)}{A} \quad \dots\dots\dots (5)$$

والشكل (1) يمثل العلاقة بين معدل طاقة الربط والعدد الكتلي (A) ،



ويمكن ملاحظة ما يلي:

- 1- يكون المنحني ثابت نسبياً باستثناء النوى الخفيفة مثل نواة الديوترون 2_1H .
- 2- أن النوى المتوسطة تمتلك أكبر القيم إلى معدل طاقة الربط النووية مثل نواة الحديد (${}^{56}_{26}Fe$) وبذلك تكون النوى المتوسطة عادة هي الأكثر استقراراً وتبلغ قيمة $(\frac{B}{A})$ بحدود 8.8 مليون إلكترون فولت .
- 3- النوى الخفيفة والنوى الثقيلة تستطيع أن تصبح أكثر استقراراً إذا وجد تفاعلاً نووياً معيناً يستطيع أن ينقلها إلى منطقة النوى المتوسطة.
- 4- النواة التي لها عدد كتلي يزيد أو ينقص كثيراً عن (60) أقل ترابطاً مما التي لها عدد كتلي قريب من (60) فهي العناصر الأكثر استقراراً.
- 5- بعد قيمة العدد الكتلي (60) تبدأ قيمة $(\frac{B}{A})$ بالنقصان التدريجي ويمكن تفسير هذا النقصان إلى كونه ناتج عن التنافر الكولومي بين البروتونات الذي يزداد تأثيره بزيادة Z الناتجة عن زيادة A.
- 6- ظهور قمم على المنحني عند $A=4,8,12,16$

مثال / جد طاقة الربط النووية لنواة النيتروجين (${}^{14}_7N$) بوحدة MeV ، إذا علمت أن كتلة ذرة ${}^{14}_7N$ تساوي 14.003074 u ، وكتلة ذرة الهيدروجين تساوي 1.007825 u ، وكتلة النيوترون تساوي 1.008665 u ، وجد أيضاً معدل طاقة الربط النووية لكل نيوكليون ؟

الحل /

$$B(14,7)=931.5[Zm_H + Nm_n - M(14,7)]$$

$$B(14,7)=931.5[7 \times 1.007825 + 7 \times 1.008665 - 14.003074]$$

$$B(14,7)=104.603 \text{ MeV}$$

$$B_{ave} = \frac{B(14,7)}{A} = \frac{104.603}{14} = 7.472 \left(\frac{\text{MeV}}{\text{nucleon}} \right)$$

زيادة (نقصان) الكتلة (Mass Excess (defect) :

ان الكتلة النووية بوحدات الكتلة الذرية عادة لا تختلف كثيرا عن عدد النيوكليونات A . لهذا السبب يكون من المناسب التعبير عن الكتلة النووية بدلالة زيادة الكتلة $\Delta(Z,N)$ mass excess والتي تسمى احيانا بنقصان الكتلة mass defect ، التي تتحدد بوحدات الكتلة الذرية (u) على وفق المعادلة التالية :

$$\Delta(Z,N) = {}^A_ZM_N - A$$

وتسمى النسبة بين زيادة الكتلة $\Delta(Z,N)$ والعدد الكتلي A بنسبة الربط : packing fraction

$$P = \frac{\Delta(Z,N)}{A} = \frac{{}^A_ZM_N - A}{A}$$

مثال / احسب كتلة الديتريوم 2_1H بوحدات الكتلة الذرية u إذا علمت ان زيادة الكتلة تساوي 13135.82 Kev ؟

الحل/

$$\Delta = 13135.82 \text{ Kev} = 13135.82 \times 10^{-3} \text{ MeV}$$

$$\Delta = 13.13582 \text{ MeV}$$

$$1u = 931.5 \text{ MeV}$$

$$\Delta = \frac{13.13582}{931.5} = 0.015176 u$$

$$\therefore M = \Delta + A = 0.015176 + 2 = 2.015176 u$$

طاقة فصل الجسيمة النووية :

هي الطاقة اللازمة لتحرير الجسيمة النووية ، او انها الطاقة التي تتحرر عند تأسير الجسيمة من قبل النواة فعليه فان طاقة فصل النيوترون S_n تعني الطاقة اللازمة لتحرير او فصل النيوترون عن النواة او انها الطاقة التي تتحرر عند تأسير النيوترون من قبل النواة وبالمثل طاقة فصل البروتون S_p وطاقة فصل جسيمة الفا S_α .

يمكن التعبير عن طاقة الفصل النووية اما بدلالة الكتل او بدلالة طاقات الربط . فبدلالة الكتل يعبر عن طاقة فصل النيوترون S_n بالصيغة :

$$S_n = 931.5[M(A-1, Z) + m_n - M(A, Z)] \quad \dots\dots(6)$$

$$S_n = B(A, Z) - B(A-1, Z) \quad \text{وبدلالة طاقات الربط فان} \quad \dots\dots(7)$$

وبالمثل فان طاقة فصل البروتون S_p بدلالة الكتل :

$$S_p(A, Z) = 931.5[M(A-1, Z-1) + m_H - M(A, Z)] \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$S_p(A, Z) = B(A, Z) - B(A-1, Z-1) \quad \text{بدلالة طاقات الربط} \quad \dots\dots\dots(9)$$

وكذا الحال بالنسبة لطاقة فصل جسيمة الفا ، فبدلالة الكتل :

$$S_\alpha(A, Z) = 931.5[M(A-4, Z-2, N-2) + m_\alpha - M(A, Z)] \quad \dots\dots\dots(10)$$

$$S_\alpha(A, Z) = B(A, Z) - B(A-4, Z-2) - B(4, 2) \quad \dots\dots\dots(11)$$

وان كل زوج من هذه المعادلات يمثل معادلتين متكافئتين ولائبات ذلك نأخذ المثال الاتي :

$$\begin{aligned} S_n &= B(A, Z) - B(A-1, Z) \\ &= 931.5[Zm_H + Nm_n - M(A, Z) - Zm_H - (N-1)m_n + M(A-1, Z)] \\ &= 931.5[Nm_n - M(A, Z) - Nm_n + m_n + M(A-1, Z)] \\ &= 931.5[M(A-1, Z) + m_n - M(A, Z)] \end{aligned}$$

وهي نفس معادلة فصل النيوترون بدلالة الكتل الذرية .

مثال / ما مقدار الطاقة اللازمة لازالة نيوترون من نواة $^{41}_{19}K$ التي كتلتها الذرية تساوي (40.974856 u) ، إذا علمت ان كتلة $^{40}_{19}K$ الذرية تساوي (39.976709 u) ، وان كتلة النيوترون هي (1.008665 u)؟

الحل /

$$\begin{aligned} S_n &= 931.5 [M(A-1, Z) + m_n - M(A, Z)] \\ &= 931.5 [39.976709 + 1.008665 - 40.974856] \\ &= 931.5 [0.010518] = 9.797366 \text{ MeV} \end{aligned}$$

التأثير المزدوج واثره على طاقة الفصل النووية :

ان اعتماد القوة النووية على الزخم البرمي يسمى بالتأثير المزدوج pairing effect او تأثير الازدواج ، اي ان كل زوج من النيوكليونات المتشابهة n,n , p,p يتجاذبان بقوة كبيرة عندما يكون زخم كل منهما اعظم ما يمكن ومساو بالمقدار ومعاكس في الاتجاه للاخر. وتأثير الازدواج هو السبب في كون النوى الزوجية - الزوجية اكثر استقرارا ووفرة من النوى الزوجية - الفردية او النوى الفردية - الزوجية وهذه اكثر استقرارا ووفرة من النوى الفردية - الفردية .

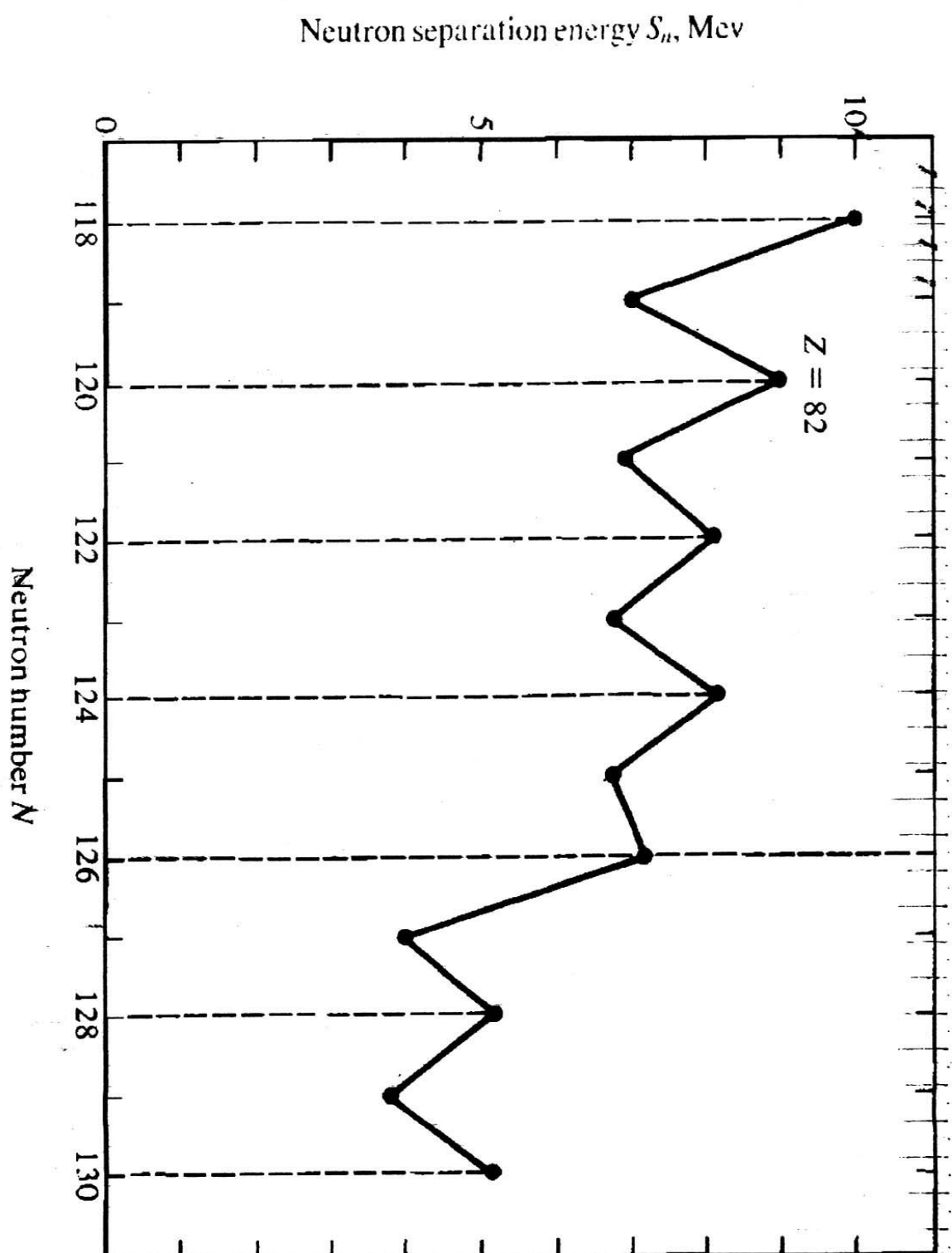
اما كيف يؤثر تأثير الازدواج على طاقة فصل الجسيمة النووية ، فلقد وجد عمليا انه لقيمة معينة للعدد الذري (Z) ، فان طاقة فصل النيوترون S_n تكون اكبر عندما يكون عدد النيوترونات زوجيا عما هي عليها لو كان عددها فرديا فمثلا :

$$S_n(^{202}_{82}Pb_{120}) > S_n(^{201}_{82}Pb_{119})$$

كذلك وجد انه لقيمة معينة لـ (N) فان S_n تكون اكبر عندما يكون عدد البروتونات Z زوجيا عما هي عليها لو كان Z فرديا

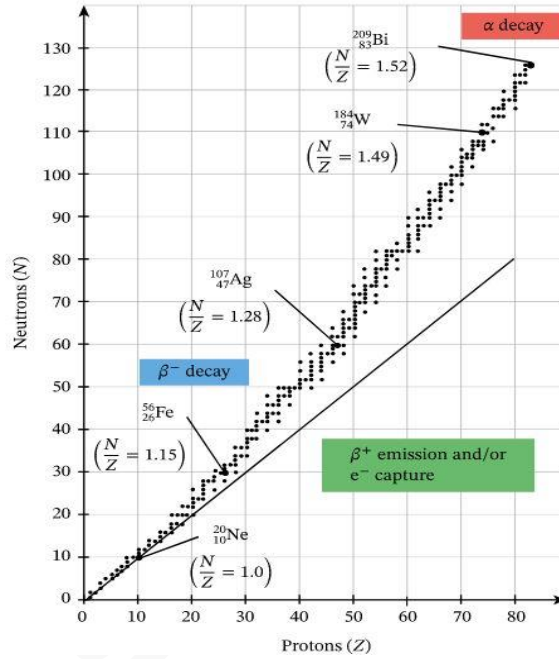
$$S_n(^{12}_6C_6) > S_n(^{11}_5B_6)$$

ويسمى الفرق $S_n(A,Z,N_{\text{even}}) - S_n(A-1,Z,N_{\text{odd}})$ بـ طاقة ازدواج النيوترون ، ففي حالة الرصاص ^{82}Pb وعند رسم طاقة الفصل S_n كدالة لـ N نجد ان S_n تكون اكبر للنظائر التي تحتوي على عدد زوجي من النيوترونات . كما في الشكل .حيث يكون هناك ارتباط اضافي بين كل زوج من النيوكليونات المتشابهة الموجودة في الحالة نفسها والتي تكون لها زخم زاوية كلية تعمل باتجاهين متعاكسين ، وان طاقة الازدواج تعمل على زيادة طاقة الارتباط للنويات وبالتالي زيادة استقرارية هذه النوى.



الوفرة الطبيعية للنوى المستقرة : Abundance of stable nuclei

النوى الموجودة والمعروفة اما تكون مستقرة stable او ذات نشاط اشعاعي radioactive ، فاذا تم رسم عدد النيوترونات N للنوى كدالة لعدد البروتونات Z ، فسنحصل على منحنى الاستقرار المبين بالشكل :



ومن هذا الشكل فان منطقة الاستقرار ستتمركز حول خط الاستقرار ($N=Z$) بالنسبة للنوى الخفيفة ، اما بالنسبة للنوى الثقيلة ، فان نقطة الاستقرار ستتحرف عن هذا الخط مقتربة من محور (N) وذلك لان النوى الثقيلة تحتوي على نيوترونات اكثر من البروتونات . (بسبب زيادة اهمية قوة كولوم) .

ان النوى غير المستقرة والواقعة على يمين منطقة الاستقرار تتحلل غالبا عن طريق تحلل B^+ او تأسير الالكترون وذلك لان فيها فائض من البروتونات ، على نقيض النوى غير المستقرة الواقعة على يسار منطقة الاستقرار التي تحتوي على فائض من النيوترونات فنراها تتحلل عن طريق تحلل $\bar{\beta}$, n , α

ويمكن تلخيص النتائج لوفرة تواجد النوى المستقرة بالجدول الاتي :

N	Even	Odd	Even	Odd
Z	Even	Even	Odd	Odd
Number of nuclides	160	53	49	4

حيث يظهر ان النوى الزوجية - الزوجية تظهر متواجدة بوفرة اكبر .

ملاحظة / الاستقرار والوفرة تزداد في حالة النوى التي لها N او Z مساوية للاعداد (2,8,20,28,50,82,126) حيث تسمى هذه الاعداد بالاعداد السحرية حيث تجعل طاقة الربط كبيرة جدا ، كما هو الحال في نواة الهيليوم ${}^4_2\text{He}$ ونواة الاوكسجين ${}^{16}_8\text{O}$ الاكثر وفرة واستقرارا من بقية نظائرها .

القوة النووية Nuclear Force :

هي القوة التي تربط مكونات النواة الى بعضها البعض وهي اقوى من القوى التنافرية الكهربائية بين البروتونات ولذا فبفعل القوة النووية تبقى البروتونات مجتمعة مع النيوترونات داخل النواة . وهناك اربع قوى في الطبيعة وهي مرتبة كالآتي من الاقوى الى الاضعف:

2-القوة الكهرومغناطيسية

1-القوة النووية

4-قوة الجاذبية

3-القوة الضعيفة

خصائص القوة النووية :

1-القوة النووية هي قوى تبادلية : على غرار تبادل الفوتونات ما بين الشحنات الكهربائية افترض العالم الياباني يوكاوا تبادل جسيمات متوسطة الكتلة اسمها الميزونات ما بين النيوكليونات . بعبارة اخرى مثلما تعزى القوة الكهرومغناطيسية الى تبادل الفوتونات فان القوى النووية تعزى الى تبادل الميزونات .

2- القوة النووية لا تعتمد على الشحنة : ان التنافر الكولومي بين البروتونات اصغر بكثير جدا من التجاذب النووي فيما بينها . ورغم زيادة تأثير التنافر الكولومي بزيادة العدد الكتلي للنوى الا ان تأثيره يبقى اضعف نسبيا ، فعليه يمكن القول ان القوة النووية بين بروتون وبروتون تساوي تقريبا القوة النووية بين البروتون والنيوترون وتساوي تقريبا القوة النووية بين النيوترون والنيوترون اي ان :

$$F_{pp} \cong F_{pn} \cong F_{nn}$$

ويمكن دعم هذا الاستنتاج من ان مستويات الطاقة ، وطاقات التهيج وطاقات الفصل والزخم الزاوي للنوى المرآتية تكون متقاربة .

3- القوى النووية قصيرة المدى : اي ان النيوكليون (n or p) يتجاذب فقط مع النيوكليونات القريبة منه ولا يتجاذب مع تلك التي تبعد عنه باكثر من 2 fm اي ان :

$$F_{nuclear} = 0 \quad \text{for} \quad r > 2fm$$

لقد تم افتراض هذه الخاصية لتفسير ثبوتية B_{ave} ، وعدم اعتمادها على العدد الكتلي A فتم افتراض ان مدى القوى النووية هي بحدود 2 fm .

4- القوى النووية قوى قابلة للاشباع : اي ان النيوكليون يمكن ان يرتبط بعدد معين من النيوكليونات وهذا يعني ان طاقة ربط النيوكليون مع بقية النواة ستبلغ حدا اعلى لا تتجاوزه بعد تجمع عدد معين من النيوكليونات حوله .

5- القوى النووية قوى تنافرية : بعد تشبع القوة النووية فانها ستعمل على ابعاد النيوكليونات بعضها عن البعض الاخر ، بان تتحول الى قوة تنافرية عندما تقل المسافة بين نيوكليونين عن $(\frac{1}{2}f_m)$ اي ان :

قوى تجاذبية نووية $2fm > r > \frac{1}{2} fm$

قوى تنافرية نووية $r < \frac{1}{2} fm$

6-القوى النووية قوى تعتمد على الزخم البرمي : ان القوة النووية بين نيوكليونين متشابهين n,n , p,p تكون اعظم ما يمكن عندما يكون الزخم الزاوي الكلي لاحدهما اعظم ما يمكن ومساو بالمقدار ومعاكس بالاتجاه للزخم الزاوي الكلي للآخر . بحيث يكون الزخم الزاوي للاثنين يساوي صفر . يسمى هذا التأثير ، اي ظاهرة اعتماد القوى النووية على الزخم البرمي بتأثير الازدواج ، اي ان كل زوج من النيوكليونات المتشابهة n,n , p,p يتجاذبان بقوة كبيرة عندما يكون زخم كل منهما اعظم ما يمكن ومساو بالمقدار ومعاكس بالاتجاه للآخر.

النماذج النووية Nuclear Models :

كما هي الحالة بالنسبة للنماذج الذرية التي اقترحت لتصور التركيب الذري ، فانه وفي حالة النواة فان هناك نظريات او نماذج نووية تقترح لوصف تركيب او حركة النواة . وتبنى هذه النماذج على أسس معينة . وتستخدم النماذج النووية لوصف او تفسير النتائج العملية المختلفة ويقاس مدى نجاح النموذج ورسوخه كنظرية بدرجة كبيرة بقدرته على تفسير النتائج العملية المعينة ، ولحد الان لا توجد نظرية او نموذج نووي واحد شامل ومتكامل لوصف التركيب النووي او القوة النووية .

وسنتطرق هنا بالتفصيل الى نموذجين هما نموذج قطرة السائل ونموذج القشرة ونشير باختصار الى بعض النماذج النووية الاخرى .

اولا: نموذج قطرة السائل liquid drop model :

اقترح العالم بور هذا النموذج عام 1937 لتفسير بعض الظواهر الفيزيائية النووية كالانبعاث النووي Radioactivity ، والانشطار النووي Nuclear fission ، واشتقاق معادلة طاقة الربط النووية ، الا انه لا يصف حركة النيوكليونات داخل النواة ولا كيفية تفاعلها مع بعضها ، ومن تسمية النموذج يتضح ان النواة قد شبعت بقطرة السائل ، وقد تكون مبررات التسمية واسباب اقتراح النموذج واحدة وهي :

1- مثلما تكبر حجما قطرة السائل بزيادة عد جزيئات السائل ، نلاحظ ان النواة تكبر حجما كلما زاد عدد نيوكليوناتها ، اي كلما زاد العدد الكتلي A ، وهذا مستنتج تجريبيا ومن المعادلة :

$$R=R_0A^{1/3} \rightarrow V = \frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{4}{3} \pi R_0^3 A$$

2- تبخر السائل ، حيث يقابل ظاهرة النشاط الاشعاعي او الانبعاث النووي فهروب قسم من جزيئات السائل من القطرة يقابل انبعاث جسيمات α ، β من النواة.

3- انقسام قطرة السائل الكبيرة الى قطرتين صغيرتين يقابل ظاهرة الانشطار النووي (وهي ظاهرة انقسام نواة ثقيلة غير مستقرة بقصفها نيوترون مثلا ، الى نواتين متقاربتين بالكتلة) .

الفرضيات الاساسية لنموذج قطرة السائل:

ليتمكن هذا النموذج من تفسير ظاهرة النشاط الاشعاعي والانشطار النووي واشتقاق طاقة الربط النووية ، تم فرض الفرضيات الاتية :

1- ان المادة النووية غير قابلة للانضغاط ، كما تدل على ذلك المعادلة التجريبية $R=R_0A^{1/3}$ حيث يزداد حجم النواة بزيادة عددها الكتلي بعبارة اخرى ان كثافة المادة النووية لا تعتمد

على حجم النواة ، كما هو الحال بالنسبة لقطرة السائل التي لا تعتمد كثافتها على حجمها :

$$2- \text{ان القوى النووية لا تعتمد على الشحنة } F_{pp} \cong F_{pn} \cong F_{nn}$$

3-ان القوى النووية قابلة للاشباع .

* ان منجزات هذا النموذج هو اشتقاق معادلة تجريبية لطاقة الترابط النووية ، او معادلة الكتلة شبه التجريبية او معادلة وايزكر وعبر عنها بدلالة مجموع عدد من الحدود او التأثيرات التي نفصلها كما يلي :

$$B(A,Z)=T_v+T_s+T_c+T_a+T_p+T_{sh}$$

1-حد الحجم (T_v) : تأثير الحجم :

استنادا الى الفرضيات الاساسية للنموذج فمن المتوقع ان زيادة عدد النيوكليونات اي زيادة العدد الكتلي A ، وبالتالي زيادة حجم النواة $V=\frac{4}{3}\pi R_0^3 A$ ، تسبب زيادة طاقة الربط الكلية للنواة اي ان :

$$T_v \propto A \rightarrow T_v=a_v A$$

وتجريبيا وجد ان $a_v=14 \text{ Mev/nucleon}$ فعليه ان :

$$T_v=14 A$$

ملاحظة : ان تأثير الحجم على طاقة الربط النووية يقابل تأثير الكتلة m على حرارة تبخر القطرة Q ، فكلما زادت كتلة القطرة كلما زادت الحرارة اللازمة لتبخيرها $Q=Lm$ ، حيث L الحرارة الكامنة للتبخير .

2- حد السطح (Surface term (T_s) (تأثير السطح) :

من المعلوم ان قطرة السائل تظهر شداً سطحياً ، فمحصلة القوى على جزيئة داخل القطرة تساوي صفر بينما محصلة القوى على جزيئة واقعة على سطح القطرة لا يساوي صفر وتكون متجهه نحو المركز . وبالمقارنة نجد انه بالنسبة للنواة فان القوى النووية التي تربط اي نيوكلليون داخل النواة مع بقية النيوكليونات تكون مشبعة وبالطبع طاقة ربط هذا النيوكلليون كبيرة نسبيا .

اما بالنسبة لنيوكلليون واقع على سطح النواة فان القوى النووية عليه تكون غير مشبعة وتبعا لذلك تكون طاقة ربطه اقل .

من هذا يمكن القول انه كلما زادت مساحة سطح النواة كلما قلت طاقة ربط النواة وحيث ان مساحة سطح الكرة ($4\pi R^2$) فان :

$$T_s \propto 4\pi R^2 \propto A^{2/3}$$

$$T_s = a_s A^{2/3}$$

وعمليا وجد ان $a_s = -13 \text{ MeV}$ فعليه :

فان $T_s = -13 A^{2/3}$ وإشارة السالب تعني ان زيادة سطح النواة تسبب نقصان في طاقة ربطها .

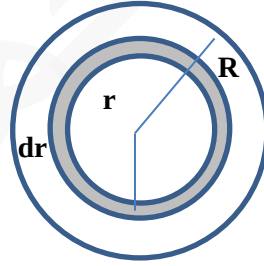
3- الحد الكولومي (Coulomb term (T_c) تأثير التنافر الكولومي :

ان التنافر الكولومي بين الشحنات المتشابهة ، وكذلك التجاذب بين الشحنات المختلفة انما يمثل قوة بعيدة المدى وغير قابلة للاشباع والمقصود بالقوة بعيدة المدى هي ان البروتون مثلا ينفر من البروتون الاخر سواء أكان قريبا او بعيدا عنه وهما يتنافران بقوة كبيرة ان كانا متقاربين ويتنافران بقوة صغيرة ان كانا بعيدين عن بعضهما .

اما المقصود بكون القوة الكولومية قوة غير قابلة للاشباع فهذا يعني ان البروتون يمكن ان يتنافر مع اي عدد من البروتونات . فعليه فان اي بروتون في النواة يتنافر مع كل البروتونات الاخرى الموجودة في النواة ، مما يعني ان زيادة عدد البروتونات داخل النواة ، اي زيادة العدد الذري Z ، ستعمل على تقليل طاقة الربط النووية للنواة .

ولاشتقاق الحد الكولومي او تأثير التنافر الكولومي على طاقة ربط النواة التي عددها الذري Z ، وشحنتها $Q=+Ze$ ، وعدد الكتلي A ، ونصف قطرها R ، والكثافة الحجمية لشحنة النواة ρ ، ولنفرض انه في لحظة ما ونحن نجمّع النيوكليونات لتكوين النواة ، اصبحت لدينا كرة نصف قطرها (r) كما في الشكل ادناه فان شحنتها تعطى بالعلاقة :

$$q_r = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho$$



فاذا اضيفت طبقة اخرى من الشحنة سمكها (dr) فشحنة هذا الجزء ستكون :

$$dq = 4\pi r^2 dr \rho$$

وبحساب الجهد الكهربائي للنواة وكالاتي :

$$\begin{aligned} T_c &= \int_0^R \frac{k q_r dq}{r} = \int_0^R \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{4}{3} \pi r^3 \rho \cdot 4\pi r^2 dr \rho \cdot \frac{1}{r} \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{16\pi^2}{3} \rho^2 \int_0^R \frac{r^5}{r} dr \\ &= \frac{4\pi^2 \rho^2}{3\epsilon_0} \left[\frac{r^5}{5} \right]_0^R = \frac{4\pi^2 \rho^2}{15\epsilon_0} R^5 \end{aligned}$$

$$\text{but } \rho = \frac{Q}{V} = \frac{Z_e}{\frac{4}{3}\pi R^3}$$

$$\therefore T_C = \frac{4\pi \times 9 \times Z^2 e^2 R^5}{15\epsilon_0 \times 16\pi^2 R^6} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{3}{5} \frac{Z^e e^2}{R}$$

ولكن البروتون لا يمكن ان يتنافر مع نفسه انما يتنافر مع بقية البروتونات فقط ، اي انه يتنافر مع (Z-1) بروتون ، لذلك وجب طرح الحد $\frac{3Ke^2Z}{5R}$ من المعادلة الاخيرة :

$$T_c = \frac{3KZ^2e^2}{5R} - \frac{3Ke^2}{5R} Z$$

$$\therefore T_c = \frac{3Ke^2Z(Z-1)}{5R}$$

$$\text{But } R=R_0A^{1/3} \rightarrow T_c = -a_c \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}}$$

$$a_c = \frac{3ke^2}{5R_0}$$

قد تم ادخال الاشارة السالبة للاشارة الى ان التنافر الكولومي يسبب نقصان طاقة الربط النووية الكلية .

4- حد عدم التناظر (T_a) Asymmetry term (تأثير عدم التناظر) :

يقصد بالتناظر هو مدى تناظر عدد البروتونات والنيوترونات ، فمن خلال منحنى الاستقرار يتضح ان النظائر الخفيفة يتساوى فيها عدد البروتونات والنيوترونات (ابتداء من الهيدروجين حتى الكالسيوم $^{40}_{20}Ca$) ، ابتداءً من الكالسيوم يتزايد عدد النيوترونات عن عدد البروتونات حتى تتكافئ القوة النووية قصيرة المدى مع قوة التنافر بين البروتونات (طويلة المدى) .

لذلك فانه في العناصر الخفيفة فان (N-Z=0) ، وبالتالي فان هذا الحد لا يشارك في اضعاف القوة النووية (طاقة الترابط النووية الكلية) ، ولكن مع زيادة النسبة بين النيوترونات الى البروتونات اصبح هذا الحد ذو تأثير وتأثيره هو انه يعمل على انقاص طاقة الترابط النووية الكلية ومن ثم زيادة قيمة هذا الحد عن الصفر يؤثر سلبا على تماسك النواة وميلها الى الاستقرار ، ولهذا توضع اشارة سالبة لهذا الحد . يعطى هذا الحد بالمعادلة الاتية :

$$T_a = -a_a \frac{(N-Z)^2}{A}$$

5- حد الازدواج (Pairing term (T_p) (تأثير الازدواج) :

لقد وجد عمليا ان الترابط بين نيوكليونات من النوع نفسه (n, n, p, p) يكون اعظم ما يمكن عندما يكون الزخم الزاوي لكل منهما اعظم ما يمكن ويساوي بالمقدار ويعاكس بالاتجاه للآخر . وهذا التأثير يجعل النوى الزوجية - زوجية اكثر وفرة واستقرارا من النوى الزوجية - الفردية او النوى الفردية - الزوجية وهذه اكثر وفرة واستقرارا من النوى الفردية - الفردية .

فاذا رمزنا لحد الازدواج بالرمز δ فيكون :

للنوى زوجية - زوجية $+\delta$

للنوى زوجية - فردية او فردية - زوجية 0

للنوى فردية - فردية $-\delta$

6- حد القشرة T_{sh} , Shell term (تأثير امتلاء القشرة) :-

لقد وجد عمليا ان النوى التي فيها $N=Z$ ويساوي عدد سحري حيث (الاعداد السحرية 2,8,20,28,50,82,126) تكون مستقرة وذات طاقة ربط عالية وبشكل ملحوظ ، كما تكون وفرة النوى التي فيها Z or/and N يساوي عدد سحري ملحوظة بسبب استقرارها ، فعليه يمكن القول ان اقتراب Z او N او كليهما من اعداد سحرية يسبب زيادة طاقة الربط النووية وتمثل هذه الخاصية بحد في معادلة طاقة الترابط النووية ويرمز له بالرمز (η)، وقد وجد عمليات ان $T_{sh}=1 \rightarrow 3\text{MeV}$.

Ex./ $T_{sh}= 3\text{ MeV}$ for ${}^4_2\text{He}$, ${}^{16}_8\text{O}$

$T_{sh}= 2\text{ MeV}$ for ${}^{15}_8\text{O}_7$, ${}^{15}_7\text{N}_8$

$T_{sh} = 1\text{ MeV}$ for ${}^{18}_8\text{O}_{10}$

فعليه فطاقة الربط النووية وفقا لنموذج قطرة السائل ستمثل بالمعادلة الاتية :

$$B(A,Z) = T_v + T_s + T_c + T_a + T_p + T_{sh}$$

$$B(A,Z) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - a_a \frac{(N-Z)^2}{A} - \delta + \eta(1-3)MeV$$

ملاحظة : ان الثابت في المعادلة الاخيرة يمكن ايجادها بالمقارنة مع النتائج العملية المتوفرة ، وهناك اختلاف معين بين مجاميع الثوابت التي يمكن ايجادها ونعطي هنا قيما لمجموعتين من الثوابت :-

a_v	a_s	a_c	a_a	δ
14	13	0.6	19	$34/A^{3/4}$
16	18	0.72	23.5	$11/A^{1/2}$

قطع مكافئ الكتلة mass parabola :-

بسبب العلاقة $A=Z+N$ يمكن كتابة طاقة الربط النووية ، وفق نموذج قطرة السائل ، بدلالة متغيرين Z, A مثلا او بدلالة N, A او بدلالة Z, N وليس بدلالة ثلاثة متغيرات N, Z, A ، فعليه وبالتعبير عن B بدلالة Z, A فانها ستصبح كالاتي :

$$B(A,Z) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - a_a \frac{(A-2Z)^2}{A} - \delta + \eta \dots\dots (1)$$

ومن صيغة طاقة الربط النووية بدلالة الكتل يمكن التعبير عن الكتلة النووية كالاتي:-

$$M_N(A,Z) = Zm_p + Nm_n - \frac{B(A,Z)}{c^2}$$

وبالتعويض عن $B(A,Z)$ في المعادلة السابقة يمكن التعبير عن M_N بدلالة Z, A :

$$M_N(A,Z) = Zm_p + Nm_n - \left[a_v A - a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - a_a \frac{(A-2Z)^2}{A} - \delta + \eta \right] / c^2 \dots\dots (2)$$

وهذه المعادلة تسمى المعادلة شبه التجريبية للكتلة Semi empirical mass formula او

معادلة وايزكر Weizcher formula .

من الواضح انه لقيمة معينة لـ (A) فان كل من المعادلتين 1 ، 2 سيصبح بشكل قطع مكافئ parabola أي $f(z)=a+bz+cz^2$ حيث f تمثل M او B ، حيث c,b,a ثوابت تعتمد قيمها على A .

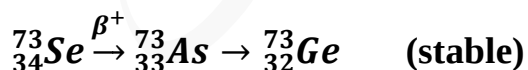
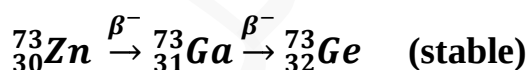
بعبارة اخرى ، عند رسم كتل او طاقات ربط الايزوبارات التي اعدادها الكتلية A ، كدالة لـ Z سنحصل على منحنى بشكل قطع مكافئ . وستكون هناك حالتين :

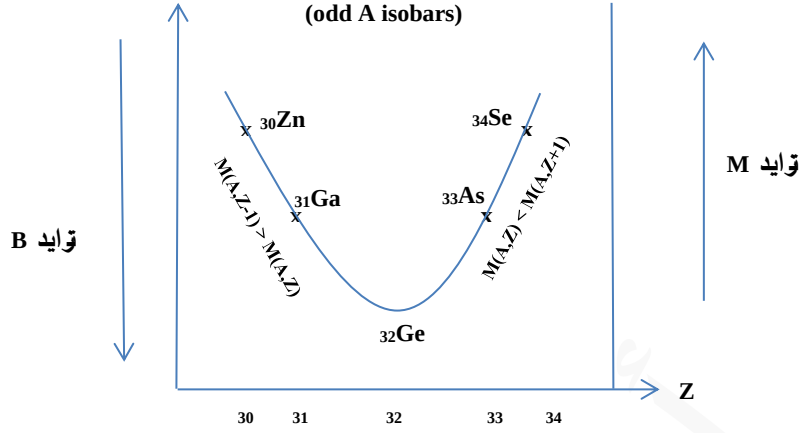
1- عندما يكون A فرديا ، سيكون هناك قطع مكافئ واحد ، وستكون للمنحنى نهاية صغرى عند قيمة صحيحة لـ Z (integer) ، والتي تمثل العدد الذري للايزوبار المستقر والاكثر ارتباطا والاقل كتلة .

بينما الايزوبارات الاخرى تتحلل عن طريق تحلل β^- , β^+ او الاسر الالكتروني لتنتهي بذلك الى الايزوبار المستقر.

فمثلا هناك خمسة آيزوبارات ذات العدد الكتلي الفردي A=73 هي :

الزنك $^{73}_{30}\text{Zn}$ ، والكالسيوم $^{73}_{31}\text{Ga}$ (وهما يتحللان ببعث β^-) ، والسيلينيوم $^{73}_{34}\text{Se}$ (ويتحلل ببعث β^+) ، والآرسينك $^{73}_{33}\text{As}$ (ويتحلل بتأسير الكترون) ، والايزوبار المستقر هو الجرمانيوم $^{73}_{32}\text{Ge}$ ، وهذا موضح بالشكل الاتي ، والمعادلات الآتية :





ولتأكيد دقة تعبير وصياغة طاقة الربط ، وفق نموذج قطرة السائل ، يمكن استخراج القيمة النظرية للعدد الذري للآيزوبار الأكثر استقرار وذلك بأخذ مشتقة B بالنسبة لـ Z ومساواتها بالصفر ، ومن ثم حساب وتحديد قيمة Z وكالاتي:

$$B(A,Z) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - a_a \frac{(A-2Z)^2}{A} + \delta + \eta$$

$$\frac{\partial B}{\partial Z} = 0 - 0 - \frac{2a_c Z}{A^{1/3}} + \frac{a_c}{A^{1/3}} + 4a_a \frac{A}{A} - 8a_a \frac{Z}{A} = 0$$

$$Z = \frac{4a_a}{2a_c A^{-1/3} + 8a_a A^{-1}} \times \frac{A}{8a_a}$$

$$\therefore Z_A = \frac{\frac{A}{2}}{1 + \frac{a_c}{4a_a} A^{2/3}}$$

$$Z_A = \frac{\frac{A}{2}}{1 + \frac{a_c}{4a_a} A^{2/3}} = \frac{\frac{73}{2}}{1 + \frac{0.6}{4 \times 19} (73)^{2/3}}$$

$$Z_A = 32.2077 \cong 32$$

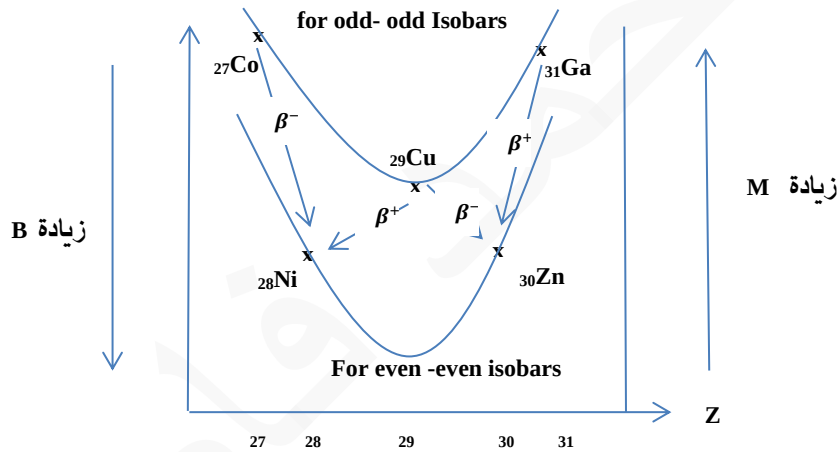
2- عندما يكون A للآيزوبارات زوجيا ، سيكون هناك آيزوبارات فردية - فردية وآيزوبارات زوجية - زوجية وبالمطبع فان تأثير الازدواج سيجعل الآيزوبارات الزوجية - الزوجية أكثر استقرارا بزيادة طاقة ربطها بمقدار $+\frac{33}{A^{3/4}}$ ، بينما تكون الآيزوبارات الفردية - الفردية أقل

استقرارا وقلقة حيث طاقات ربطها قلت بمقدار $-\frac{33}{A^{3/4}}$ ، وعلى هذا الاساس فهناك قطعان مكافئان :

الاول للآيزوبارات الزوجية - الزوجية

والثاني للآيزوبارات الفردية - الفردية

فمثلا للعدد الكتلي $A=64$ هناك آيزوباران زوجية - زوجية هما الزنك ${}^{64}_{30}\text{Zn}$ والنيكل ${}^{64}_{28}\text{Ni}$ وثلاثة ايزوبارات فردية - فردية هي الكاليوم ${}^{64}_{31}\text{Ga}$ والكوبلت ${}^{64}_{27}\text{Co}$ والنحاس ${}^{64}_{29}\text{Cu}$ وكما موضح بالشكل ادناه :



نموذج القشرة النووي Shell Model :

1- ان نموذج القشرة النووي هو احد اهم النماذج في التركيب النووي وقد اظهرت

التجارب بان النوى التي لها عدد بروتونات (Z) او عدد نيوترونات (N) يساوي احد

الاعداد السحرية فانها تكون مستقرة والاعداد السحرية هي : 2, 8, 20, 28, 50, 82

[126, .

وتشكل الاعداد السحرية للبروتونات والنيوترونات قشرات مغلقة (Closed Shell) شبيهة بالقشرات الالكترونية للذرات وتكون قشرات النيوترونات وقشرات البروتونات مستقلة عن بعضها البعض .

2- اوضح هذا النموذج بان المجال المركزي للنيوكليونات في النواة هو التأثير المتبادل بين الحركة البرمية والحركة المدارية لها ، وكذلك تأثير الازدواج النيوكليوني (وفق مبدأ الانفرد لباولي) بالاضافة الى التأثير الكولومي .

ان تأثيرات الحركة البرمية نتيجة دوران كل نيوكليون حول نفسه يولد عزما مغناطيسيا مقداره (S) ويساوي $(\pm \frac{1}{2} \hbar)$ ، واما تأثير الحركة الدورانية الناتج من دوران النيوكليون حول مركز النواة يولد عزما مقداره ℓ ويساوي الزخم الزاوي المداري.

3- يفترض هذا النموذج وجود تفاعل قوي بين الزخم الزاوي المداري وبين الزخم الذاتي لكل نيوكليون ، فوجود هذا التفاعل فان مستويات الطاقة ذات القيمة الاكبر للزخم الزاوي الكلي z تقع دائما تحت المستويات التي تكون لها القيمة الاصغر. فمثلا في حالة المستوى 1P يكون الانقسام كالآتي :



هناك رموز معينة تحدد كل مستوى من مستويات الطاقة النووية وهذه الرموز هي :

(1) n : العدد الكمي التوافقي ويأخذ القيم 1 ، 2 ، 3 ، 4 ، 1

(2) l : العدد الكمي المداري حيث يقابل كل رقم رمز معين وحسب الجدول الآتي :

ℓ	0	1	2	3	4	5	6
الرمز	s	p	D	f	G	h	I

(3) J : الزخم الزاوي للمستوي النووي حيث : $J = \ell \pm S = \ell \pm \frac{1}{2}$

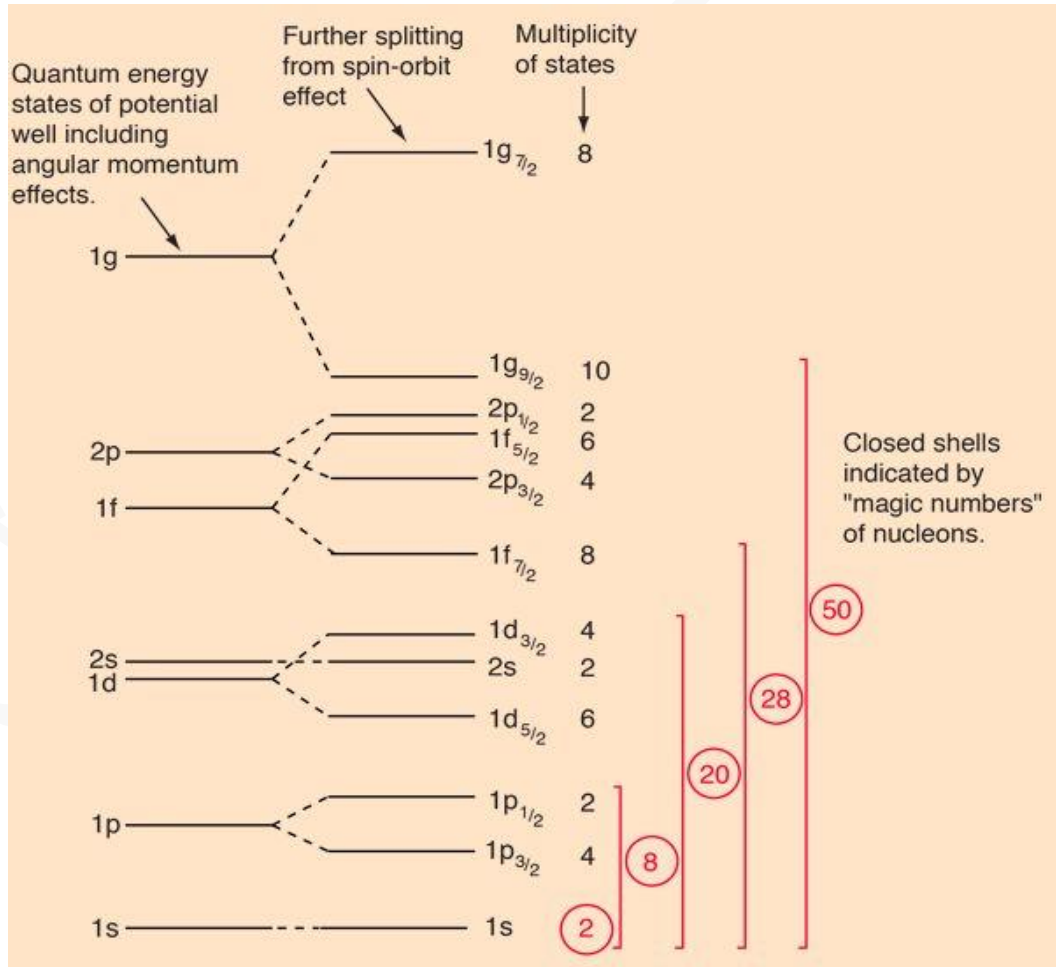
(4) عدد الاحتواء للمستوي الثانوي $(2J+1)$

(5) عدد الاحتواء في المستوى الرئيسي $2(2\ell + 1)$

(6) التماثل النووي (π) parity :

وهو اما ان يكون موجبا (زوجيا) او فرديا (سالبا)

ملاحظة : تتجمع مستويات الطاقة بشكل مجاميع وبفواصل كبيرة بين المجموعة والآخرى، وتسمى مستويات الطاقة لكل مجموعة والمتقاربة مع بعضها بالقشرة Shell ، وعندما تغلق القشرة فانها تغلق بعدد سحري من النيوكليونات . والمخطط الاتي يوضح كيفية توزيع مستويات الطاقة .



ملاحظة : نستطيع ان نحدد قيم البرم النووي والتماثل النووي لأي نواة في المستوى الارضي لها (ground state) بالاعتماد على القواعد الاتية :

1- في حالة النوى (زوجية - زوجية) فان الزخم الزاوي الكلي لها يكون مساويا للصفر ($J=0$) والتماثل موجبا $\pi=+$ اي ان $J^\pi=0^+$.

2- في حالة النوى (زوجية - فردية) او (فردية - زوجية) ، فان الزخم الزاوي الكلي يعتمد على زخم آخر نيوكليون ، اما التماثل فيحسب من المعادلة $\pi = (-1)^l$ ، حيث l يمثل العدد الكمي المداري لآخر نيوكليون منفرد موجود في النواة.

3- في حالة النوى (فردية - فردية) فان الزخم الزاوي الكلي للنواة يحسب من زخم آخر نيوترون وبروتون منفرد وله قيمة محصورة بين :

$$J_{total}=|J_p-J_n| \rightarrow |J_p+J_n|$$

$$\pi = (-1)^{\ell_{p+} \ell_n}$$

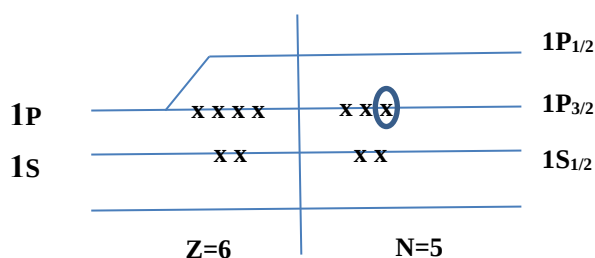
اما التماثل فيمكن حسابه من المعادلة

مثال : أوجد J^π لنواة $^{11}_6C$ ؟

$$J_{total}=\frac{3}{2}$$

$$\pi=(-1)^l = (-1)^1 = -$$

$$J^\pi = \left(\frac{3}{2}\right)^-$$



ملاحظة : هناك حالات شاذة يحصل فيها عدم تطابق مع النتائج العملية وذلك يعود الى حالة الازدواج النووي والذي يحصل عند تحقق الشرطين التاليين :

1- ان المستوى الذي له قيمة (ℓ) اكبر فانه يميل الى الازدواج قبل المستوى الذي (ℓ) صغير.

2- ان المستويين متقاربين (لا يحدث انتقال من قشرة مغلقة بعدد سحري) فعند توفر الشرطين فيحصل انتقال نيوكليوني الى المستوى الذي له (ℓ) كبيرة .

خصائص النوى السحرية :

- 1- انغلاق كامل القشرة (إمتلاء القشرة النووية) .
- 2- عدد الايزوتونات والايزوتوبات والايزوبارات عالية جدا .
- 3- طاقة فصل النيوترونات فيها عالية جدا .
- 4- بسبب طاقة الارتباط العالية فانها تحتاج الى طاقات كبيرة من اجل تهيجها .
- 5- احتمالية حدوث تفاعل نووي لهذه النوى قليل جدا لان الفواصل بين مستويات الطاقة كبيرة .
- 6- تكون هذه النوى ذات استقرارية عالية ووفرة كبيرة جدا .

مثال 1 / جد الزخم الزاوي الكلي للنواة $^{14}_7N_7$

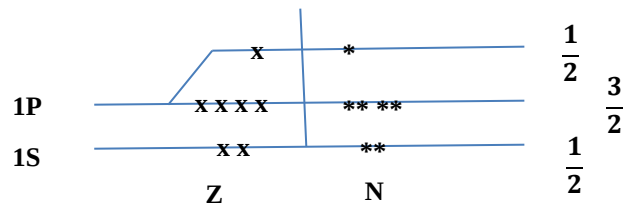
الحل / النواة لها $N=7, P=7$ فيكون توزيعها كالاتي :

$$J_p = \frac{1}{2}, J_N = \frac{1}{2}$$

$$J_{total} = \left| \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \right| \rightarrow \frac{1}{2} + \frac{1}{2}$$

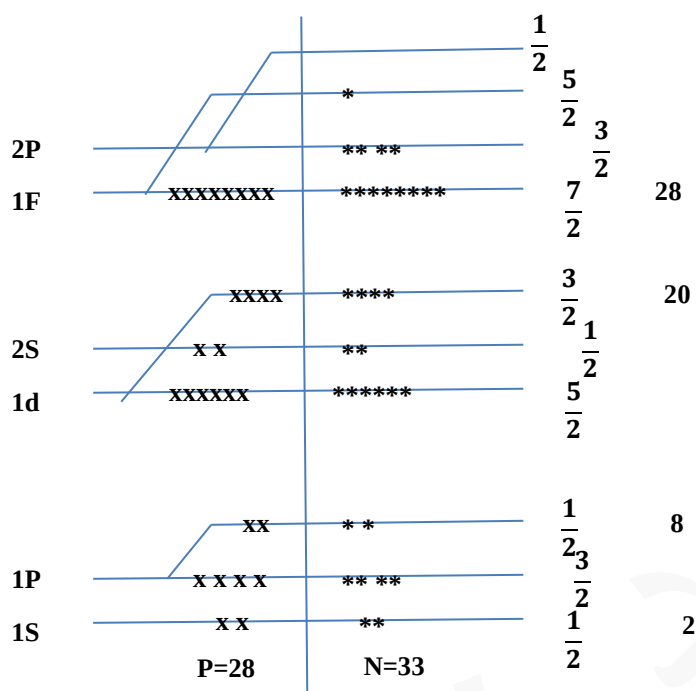
$$J_{total} = 0 \rightarrow 1$$

$$J_{total} = 0, 1$$



مثال 2/ جد قيمة $(J)^\pi$ للنواة ${}^{61}_{28}\text{Ni}$ ؟

الحل/ نواة النيكل لها $P=28, N=33$



$J_p=0$

في هذا المثال يحدث انتقال نيوترون من المستوى $2P_{3/2}$ الى المستوى $1F_{5/2}$ وذلك لان قيمة (ℓ) للمستوى ($1F$) اكبر من قيمة (ℓ) للمستوى $2P$ وأيضاً ان المستويين متقاربين ، فيحصل ازدواج نووي فيبقى هنا النيوترون المنفرد في المستوى $2P_{3/2}$.

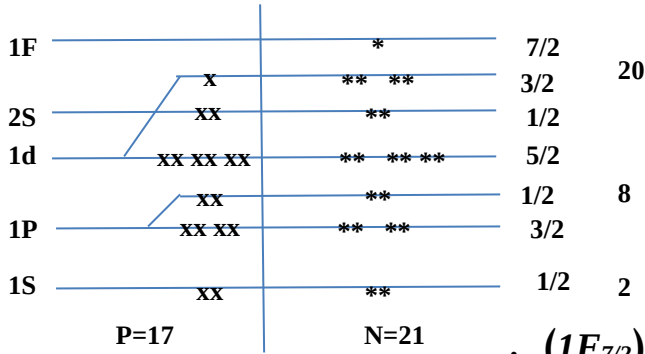
$$J_N = \frac{3}{2} \rightarrow J_{\text{total}} = \frac{3}{2} \rightarrow (J)^\pi = \left(\frac{3}{2}\right)^-$$

مثال 3/ على اساس نموذج القشرة ذات النيوكليون الواحد وباعتبار شد الجرم بالمدار ، ما هي التسمية الطيفية لنواة $^{38}_{17}Cl$ ؟

الحل/

For $^{38}_{17}\text{Cl}$: P=17 , N=21

فتكون التسمية الطيفية كالآتي :



آخر نيوترون له $J_N = \frac{7}{2}$ ويقع في المستوى $(1F_{7/2})$.

اما آخر بروتون منفرد فيكون في المستوى $1d_{3/2}$ الذي قيمة (ℓ) له اعلى من قيمة (ℓ) للمستوى $2S_{1/2}$ فيحصل انتقال من $2s$ الى $1d$ لتحقيق شرط الازدواج بين المستويين المتقاربين.

اذن آخر بروتون منفرد يقع في المستوى $2S_{1/2}$

$$J_{tot} = \left| \frac{1}{2} - \frac{7}{2} \right| \rightarrow \frac{1}{2} + \frac{7}{2}$$

$$= |-3| \rightarrow 4 \rightarrow J_{tot} = 3, 4$$

تنبؤات نموذج القشرة :

1- ان تنبؤات نموذج القشرة للزخم الزاوي الكلي للنوى تتفق بشكل جيد جدا مع النتائج العملية ، حيث ان الزخم الزاوي لنيوكليونين يساوي صفرا ولقشرة مغلقة يساوي صفرا أيضاً . الزخم الزاوي الكلي للنواة سيساوي الزخم الزاوي الكلي للنيوكليونات خارج القشرات المغلقة .

2- يتنبأ نموذج القشرة بوجود حالات شبه مستقرة في النوى التي فيها قشرات غير ممتلئة ، اي النوى ذات Z, N او كلاهما قريباً من عدد سحري .

3- يتوقع نموذج القشرة ان يكون عزم رباعي الاقطاب (عزم رباعي الاقطاب هو مقياس لانحراف النواة عن الشكل الكروي) صفراً او قريباً من الصفر للاعداد السحرية.

نماذج نووية اخرى :

1- نموذج الحركة الجماعية Collective motion model :

ان النوى التي تكون بعيدة عن الاعداد السحرية هي ليست كروية ولكن تبدي لان تكون متطاولة باتجاه القطبين (رأسياً) او متطاولة باتجاه الاستواء (أفقياً) . في هذه النوى المشوهة فان المحور الرئيسي يدور في الفضاء وينتج عن ذلك حركة جماعية والتي يشارك فيها كل النيوكليونات .

2- النموذج الاحصائي Statistical Model :

يفترض هذا النموذج ان هناك ترابطاً نووياً قوياً بين النيوكليونات بحيث لا يمكن دراستها انفرادياً وانما يمكن معاملتها احصائياً . هذا النموذج يعطي معدلات للكميات الفيزيائية لكل نيوكليون . ان النتيجة الجيدة لهذا النموذج هي تفسيره لطاقة الترابط النووية.

3- النموذج العنقودي Cluster Model :

ويسمى نموذج جسيم α . يفترض ان جسيم α هو وحدة بناء النواة ، اي ان النوى تتكون من عدد صحيح من العدد الكتلي لجسيم α (اي مضاعفات 4) . يطبق هذا النموذج في النوى ذات $(A=4n)$ مثل :

$$^{12}_6C \cong 3 \alpha , ^{16}_8O = 4 \alpha$$