الباب السادس

النماذج النووية

الباب السادس

النماذج النووية Nuclear Models

الدراسة التفصيلية لحركة النيوكليونات داخل الأنوية عملية معقدة وصعبة مقارنة بدراسة حركة الإلكترونات الذرية. ويرجع ذلك لوجود نوعين مختلفين من الجسيمات وهي البروتونات والنيوترونات وكذلك لوجود نوعين من القوي وهي القوي النووية وقوة كولوم الكهربية. ولذلك تم استخدام النماذج النووية لدراسة الظواهر النووية وتركيب وشكل النواة. وفي الواقع توجد أعداد وكثيرة من النماذج النووية التي توضح مدي اهتمام العلماء بدراسة النواة ولم يوجد حتى الآن نموذج واحد أجمع علية الجميع بالنجاح الكامل لكل مشاكل النواة.

٦,١ نموذج قطرة السائل،القانون شبه تجريبي للكتلة
Liquid Drop Model, Semiempisial Mass Formula

يعتبر هذا النموذج من أقدم النماذج النووية لأنه من ١٩٣٧م عندما أقترح بوهر أن النواة تشبه قطرة السائل حيث تسلك النويات داخل النواة سلوك جزئيات السائل داخل القطرة. وقد لوحظ تشابهاً كبيراً بين نواة الذرة وقطرة السائل من حيث:

١- أن النواة تتكون من مادة غير قابلة للانضغاط مثل قطرة السائل وأن جميع الأنوية لها كثافة نووية واحدة أي أن: $R = R_0 A^{1/3}$.

٢- أن القوي النووية متساوية بين النيوكليونات أي أن: $F_{PP} = F_{nn} = F_{np} = F_{Pn}$.

٣- أن القوي النووية ذات خاصية تشبعيه وذات مدي قصير $\sim 2F$ وهذا يقابل عملية تأثر جزئيات السائل بالجزيئات المجاورة لها.

٤- طاقة الترابط النووي لكل نيوكليون في النواة تقابل الطاقة الكامنة للتبخر أي تفتت قطرة السائل حيث تعتمد الطاقة في الحالتين علي الكتلة.

٥- النواة المركبة وعملية الاندماج النووي في الأنوية تقابل عملية التكثيف في السوائل.

٦- ظاهرة النشاط الإشعاعي في النواة تشبه ظاهرة التبخر في السوائل.

ويمكن استخدام هذا النموذج لاستنتاج علاقة تحسب كتلة النواة ومنها نحسب طاقة الترابط النووي لكل نيوكليون. وبناءاً علي الفروض السابقة يمكن كتابة طاقة الترابط النووي كما يلي :

$$E \;\square\; Z \,\square\, m_p \,\square\, (A \,\square\, Z) m_n \,\square\, f_1(A,Z) \,\square\, f_2(A,Z) \,\square\, f_3(A,Z) \qquad (٦-١)$$

حيث A, Z العدد الذري والعدد الكتلي للنواة، m_P, m_n كتلة كل من النيوترون والبروتون. $f_1(A,Z), f_2(A,Z), f_3(A,Z)$ حدود إضافية لتصحيح الكتلة طبقاً للظواهر التي تحدث في قطرة السائل. ونستطيع الآن وبناءاً علي الفروض السابقة شرح كل حد علي حدة كما يلي:

١- الحد الأول (حد الحجم)

يعتبر هذا الحد $f_1(A,Z)$ من أهم الحدود علي أساس تأثير الحجم علي الكتلة ولذلك سمي بحد الحجم لأن جميع النيوكليونات موجودة داخل النواة بمعني أنه لا يوجد نويات علي السطح الخارجي للنواة فإن ذلك يؤدي لزيادة طاقة الترابط (الطاقة الكامنة في قطرة السائل) ويؤدي بالتالي للنقص في كتلة النواة ولذلك فإن كتلة هذا الحد سالبة. وتكون أشارة هذا الحد سالبة أيضاً بسبب الطاقة الكولومية بين البروتونات والتي تعمل علي إنقاص طاقة الترابط النووي كما في شكل (٦-١). وتتناسب طاقة الترابط النووي مع كتلة أو حجم النواة ويمكن بالتالي كتابة هذا الحد علي الصورة الآتية:

$$f_1(A,Z) \;\square\; E_v \;\square\; aA \qquad (٦-٢)$$

حيث a مقدار ثابت. ويمثل هذا الحد القيمة الرئيسية لطاقة الترابط النووي.

٢- الحد الثاني (حد التوتر السطحي)

يسمي هذا بحد تأثير السطح الحر الخارجي للنواة علي كتلتها أو علي طاقة الترابط النووي وسبب ذلك أن النيوكلون الموجود علي سطح النواة يتجاذب مع النواة من جهة واحدة فقط بينما النيوكلونات الداخلية تنجذب مع النواة من كل الجهات وهذا مشابه للتوتر السطحي في السوائل ويؤدي إلي النقص في طاقة الترابط أو زيادة في كتلة النواة. ولو افترضنا أن نواة بها ٢٥ نيوكليون سنجد منها تقريباً ١٥ نيوكليون علي السطح أي أن النسبة بين النيوكلونات الموجودة علي السطح والنيوكلونات الكلية ستكون $0.60 \approx \frac{15}{25}$. بينما لو افترضنا أن نواة بها ٩ نيوكلونات ويوجد منها تقريباً ٧ نيوكلونات علي السطح أي أن النسبة بين النيوكلونات الموجودة علي السطح والنيوكلونات الكلية ستكون $0.78 \approx \frac{7}{9}$. هذا يفسر النقص الكبير في طاقة الترابط النووي لكل نيوكليون في حالة الأنوية ذات العدد الكتلي الصغير حيث نجد أن عدد النيوكلونات الموجودة علي سطح النواة تكون أكبر كثيراً من عدد النيوكلونات الموجودة عند سطح النواة في حالة الأنوية الثقيلة ذات العدد الكتلي الكبير كما في شكل (١-٦). وهكذا نجد أن النيوكلونات القريبة من السطح ترتبط مع النواة بطاقة ترابط أقل من النيوكلونات الموجودة في عمق النواة، ولذلك تنخفض طاقة الترابط الكلية للنواة بمقدار يتناسب مع عدد النيوكلونات القريبة من السطح وبالتالي مع مساحة سطح النواة S وتكون طاقة التوتر السطحي هي:

$$f_2(A,Z) = E_S = 4\pi R^2 K \qquad (٣-٦)$$

حيث K هو معامل التوتر السطحي. ويمكن كتابة المعادلة السابقة في حالة النواة علي الصورة التالية:

$$E_S = 4\pi R^2 K = 4\pi K(r_0 A^{1/3})^2 = (4\pi K r_0^2)A^{2/3} = -a_s A^{2/3} \qquad (٦-٤)$$

حيث a_s مقدار ثابت. والإشارة السالبة في المعادلة تعني أن طاقة التوتر السطحي تقلل من قيمة طاقة الترابط النووي.

٣- الحد الثالث (حد تأثير كولوم)

يوضح الحد الثالث تأثير قوة كولوم الكهربية نتيجة التنافر الحادث في النواة من البروتونات الموجبة وهذا التنافر يؤدي إلي نقص في طاقة الترابط النووي وبالتالي زيادة في الكتلة. وأن المدى في حالة القوة الكهربية يكون كبير فإن أي بروتون يتنافر مع جميع البروتونات في النواة وليس المحيطة به فقط كما في القوة النووية. ولذلك فإن قوة التنافر الكهربي تزيد بزيادة العدد الذري Z وبزيادة العدد الكتلي A . ولحساب الطاقة الكهربية الناتجة من قوة التنافر الكولومي نفترض أن الشحنة موزعة بانتظام علي النواة فيمكن حساب كثافة الشحنة من المعادلة:

$$\rho = \frac{Ze}{\frac{4}{3}\pi R^3} \qquad (٦-٥)$$

حيث R نصف قطر النواة، Ze شحنة النواة، والمقدار $\frac{4}{3}\pi R^3$ يمثل حجم الكرة. ولحساب الطاقة الكهربية نتيجة البروتونات الموجبة في النواة نفرض أن النواة عبارة عن كرة مشحونة نصف قطرها r وتوجد شريحة علي سطح النواة سمكها dr. فيمكن حساب الجهد من قانون كولوم وهو:

$$V = \frac{4}{3}\pi\rho\frac{r^3}{r} = \frac{4}{3}\pi\rho r^2 \qquad (٦-٦)$$

إذا كانت الشحنة التي تحملها الشريحة والتي سمكها dr هي:

$$q = 4\pi\rho r^2 . dr \qquad (٦-٧)$$

وتكون الطاقة المبذولة نتيجة الشحنة علي سطح النواة هي:

$$dE = \frac{4}{3}\pi\rho r^{2} . 4\pi\rho r^{2} dr = \frac{16}{3}\pi^{2}\rho^{2} r^{4} dr \qquad (٦-٨)$$

وتكون الطاقة الكهربية الكلية الناتجة عن توزيع الشحنة تحسب من التكامل:

$$E = \int_{0}^{R} \frac{16}{3}\pi^{2}\rho^{2} r^{4} dr = \frac{16}{3}\pi^{2}\rho^{2} \int_{0}^{R} r^{4} dr \qquad (٦-٩)$$

وتصبح الطاقة الكلية بعد حساب التكامل تساوي:

$$E = \frac{16}{15}\pi^{2}\rho^{2} R^{5} \qquad (٦-١٠)$$

بالتعويض من المعادلة (٦-٥) في المعادلة (٦-١٠) بقيمة ρ نحصل علي الطاقة الكولومية نتيجة تنافر البروتونات وهي:

$$E = \frac{3}{5}\frac{Z^{2}e^{2}}{R} \qquad (٦-١١)$$

ولكن من المعلوم أن النواة تحتوي علي بروتونات لها طاقة ذاتية تربط مكوناتها مع بعض (مجموعة الكواركات) فلابد من حساب الطاقة الذاتية للبروتون وطرحها من الطاقة الكلية. وحساب الطاقة الذاتية للبروتون الواحد يحسب من:

$$E_{P} = \frac{3}{5}\frac{e^{2}}{R} \qquad (٦-١٢)$$

وتكون الطاقة الذاتية لكل البروتونات هي:

$$E_{P} = \frac{3}{5}\frac{Ze^{2}}{R} \qquad (٦-١٣)$$

وتصبح الطاقة الكولومية بعد طرح الطاقة الذاتية البروتونات هي:

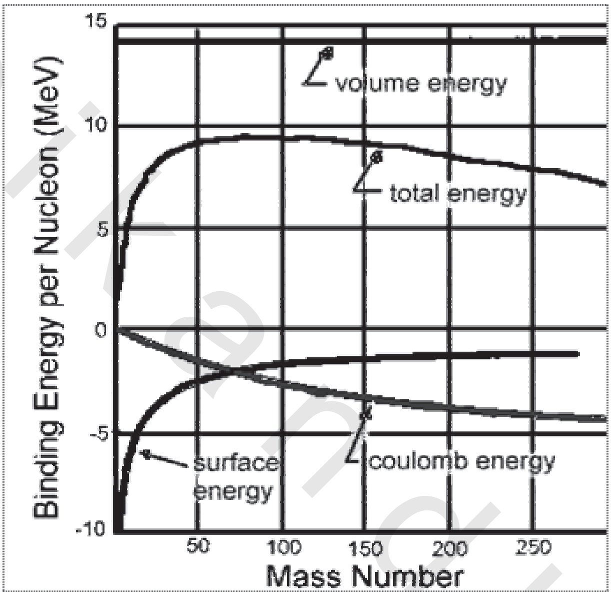
$$E_{c} = E - E_{p} = \frac{3}{5}\frac{Z^{2}e^{2}}{R} - \frac{3Ze^{2}}{5R} = \frac{3e^{2}}{5R} Z(Z-1) \qquad (٦-١٤)$$

$$E_{c} = a_{c}\frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} \qquad (٦-١٥)$$

حيث a_c مقدار ثابت وتكون قيمته تساوي:

$$a_c = \frac{3}{5}\frac{e^2}{r_0} \qquad (٦-١٦)$$

والإشارة السالبة تعني النقص في طاقة الترابط النووي كما في شكل(٦-١)



شكل (٦-١) يوضح العلاقة بين طاقة الترابط النووي والعدد الكتلي A

٤- الحد الرابع (حد التماثل)

يمثل هذا الحد العلاقة بين عدد البروتونات Z وعدد النيوترونات N في النواة. وعند قيم معينة للعدد الكتلي A توجد قيمة محددة للعدد الذري Z التي تقابل أكثر العناصر استقرارا. وفي حالة الأنوية الخفيفة يقل التأثير الكولومي فتكون هذه القيمة A/2 ويكون عدد البروتونات يساوي عدد النيوترونات في هذه الأنوية. وفي حالة غياب التأثير الكولومي، فإن الحيود عن هذا الشرط Z=A/2 سوف يؤدي إلي عدم استقرار النواة وتقل قيمة طاقة الترابط النووي. هذا التأثير يتناسب مع

عدد النيوترونات. وقد وجد أنه يتناسب مع القيمة $(A-2Z)^2$ وهذا الحد يتلاشي عندما تكون Z=A/2. وهذا يعني أن طاقة الترابط النووي تكون قيمة عظمي وغياب الطاقة الكولومية. وقد أثبتت الدراسات التفصيلية لهذا التأثير التماثلي أنه يتناسب عكسياً مع العدد الكتلي A ولذلك فطاقة التماثل تعطي من:

$$E_r = -a_r \frac{(A-2Z)^2}{A} \qquad (٦-١٧)$$

ومن العوامل المؤثرة علي طاقة الترابط هو حالة النواة هل هي زوجية أم فردية. ويوجد حد يسمي حد الازدواج δ تكون قيمته طبقاً للحالات هل هي فردية أم زوجية كما يلي:

١- عندما تكون النواة زوجية أي عدد البروتونات Z والنيوترونات N يكون زوجي تكون طاقة الترابط النووي أعلي ما يمكن ، ويفسر هذا عن طريق اللف المغزلي(spin) أي أنه عندما تكون Z,N زوجية فإن اللف المغزلي سيكون عكس بعضه فيتلاشي ويكون عدد الأنوية المستقرة في هذه الحالة(زوجي- زوجي) ٢٠١ نواة وتكون δ موجبة.

٢- وعندما تكون N زوجية و Z فردية أو العكس فستكون طاقة الترابط متوسطة ويكون عدد الأنوية المستقرة في حالة(زوجي- فردي) ٦٩ نواة وتكون $\delta = 0$.

٣- وعندما تكون N فردية و Z زوجية أي في حالة (فردي- زوجي) يكون عدد الأنوية ٦١ نواة وتكون $\delta = 0$.

٤- عندما تكون Z, N فردية أي في حالة (فردي – فردي) فتكون الطاقة منخفضة ويكون عدد الأنوية ٥ أنويه وتكون δ سالبة.

وبعد اكتشاف الأعداد السحرية أضيف حد يسمي δ والذي يمثل تأثير القشرة النووية وهو موجب إذا كانت N أو Z تقترب من الأعداد السحرية وبالتالي تصبح المعادلة النهائية لطاقة الترابط النووي علي الصورة:

$$E = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c Z(Z-1)A^{-1/3} - a_r (A-2Z)^2 A^{-1} \pm \delta \qquad (٦-١٨)$$

ويمكن حساب كتلة النواة من المعادلة:

$$M(A,Z) = Zm_p + Nm_n - a_v A + a_s A^{2/3} + a_c Z(Z-1)A^{-1/3} + a_r (A-2Z)^2 A^{-1} \pm \delta$$
(٦-١٩)

وقد تم تعيين الثوابت ووجد أنها تساوي:

$a_v = 14.0MeV; a_s = 13.1MwV; a_c = 0.146MeV; a_r = 19.4MeV$

أما $\delta = 270MeV$ للأنوية زوجي- زوجي والأنوية فردي- فردي وتساوي $\delta = 0$ للأنوية زوجي- فردي أو الأنوية فردي- زوجي.

وقد تم تعيين الثوابت بطريقة "mass formula" وهي كما يلي:

The" semi-empirical :"Beth- Weizaecker formula" mass formula"

$$E_b^{even-odd} \approx \underset{\text{Volume term}}{(15.75MeV)A} - \underset{\text{Surface term}}{(17.8MeV)A^{2/3}} - \underset{\text{Coulomb term}}{\frac{(0.711MeV)Z^2}{A^{1/3}}} - \underset{\text{Pauli term}}{\frac{(23.7MeV)(A-2Z)^2}{A}}$$

وعند تصحيح الأعداد الزوجية –الزوجية تكون الطاقة:

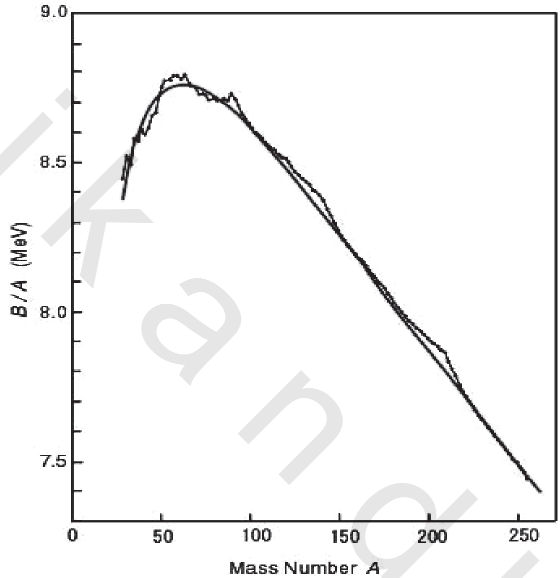
$$E_b^{even-even} \approx E_b^{even-odd} + \frac{11.18MeV}{\sqrt{A}}$$

وعند تصحيح الأعداد الفردية –الفردية تكون الطاقة:

$$E_b^{odd-odd} \approx E_b^{even-odd} - \frac{11.18MeV}{\sqrt{A}}$$

وعند دراسة النتائج العملية بين العدد الكتلي وطاقة الترابط النووي لكل نيوكليون حسب شكل (٦-٢) وجد أتفاق بينها وبين النتائج النظرية المحسوبة بالمعادلة شبة المعملية لنموذج قطرة السائل.

وقد ساعدت المعادلة شبه المعملية في تفسير الخواص الأستقرارية لبعض الأنوية، خاصة المشعة مثل □ والأيزوبارات. فعند دراسة جدول الأنوية نلاحظ أن معظم الأيزوبارات تفترق عن بعضها البعض من حيث رقم الشحنة بمقدار ٢ أي أن $\square Z \square 2$ وأن حوالي ٦٠ زوجاً من الأيزوبارات وجد أن لها $\square Z \square 2$ وأن زوجين فقط



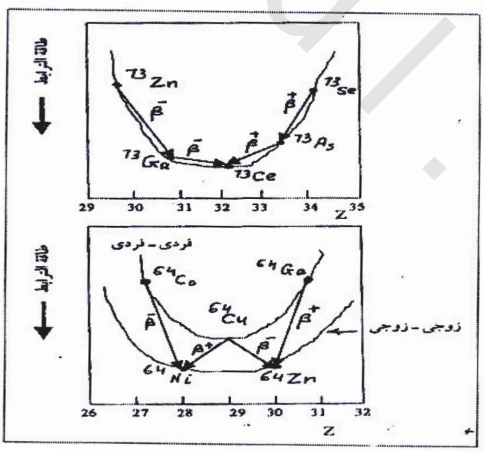
شكل (٢-٦) يوضح التوافق بين النتائج العملية والحسابات النظرية لطاقة الترابط النووي لكل نيوكليونِ

لهما $\square Z \square 1$. العناصر الأخيرة هي: $^{113}_{48}Cd, ^{113}_{49}In, ^{123}_{51}Sb, ^{123}_{52}Te$. القيم $A \square 113, A \square 123$ هما القيمتان الفرديتان للعدد الكتلي اللتان لهما أكثر من عنصر مستقر. ويمكن للقيم الزوجية للعدد الكتلي A أن يوجد أيزوبارين مستقرين $(A \square 96,124,130,136)$ وقد يوجد ثلاث. وعند النظر الي المعادلة (٦-١٩) لطاقة الترابط النووي عندما يكون العدد الكتلي A فردي نجد أن الحدود الوحيدة المتغيرة هي التي تحتوي علي Z وهذه

تعتمد علي Z^2 حيث يختفي الحد فردي- زوجي. وعند رسم علاقة طاقة الترابط النووي لمجموعة من الأنوية لها A عدد فردي و Z متغير، سينتج منحني يسمي منحني السلسلة شكل (٣-٦). من المنحني نلاحظ أن طاقة الترابط النووي تقل بزيادة Z حتى تصل إلي القاع الذي يمثل أكثر الأنوية استقراراً والتي لها أكبر طاقة ترابط نووي. ويوجد عامة عنصر واحد عند القاع وسيكون هو العنصر الوحيد المستقر في المجموعة. وكل الأيزوبارات التي لها طاقة ترابط نووي أقل ستكون علي ذراعي المنحني وكتل هذه العناصر ستكون أكبر من كتلة العنصر المستقر ولذلك تنحل هذه العناصر بانبعاث إلكترون أو بوزيترون أو بأسر إلكترون ذري من المدار K. الأيزوبارات المتبقية من التحلل والتي تقع علي يسار العنصر المستقر عندها عدد أقل من البروتونات عن المستقر ولذلك تنحل بانبعاث إلكترون حسب التفاعل التالي:

$$^{73}_{30}Zn \rightarrow {}^{73}_{31}Ga \rightarrow {}^{73}_{32}Ge \qquad (٦-٢٠)$$

الأيزوبارات التي تقع علي يمين العنصر المستقر تحتوي علي بروتونات أكثر ولذلك



شكل (٣-٦) يوضح منحني السلسلة لطاقة الترابط النووي والعدد الذري

الأيزوبارات التي تقع علي يمين العنصر المستقر تحتوي علي بروتونات أكثر ولذلك تنحل بانبعاث بوزيترونات أو بأسر إلكترونات ذرية حسب التفاعل التالي:

$$^{73}_{34}Se \xrightarrow{\beta^{+} or E.C} {}^{73}_{33}As \xrightarrow{E.C} {}^{73}_{32}Ge \qquad (٦-٢١)$$

وتختلف هذه النتائج بالنسبة للأيزوبارت التي $A = 73$ زوجي بسبب التأثير فردي- زوجي وسيظل منحني الترابط النووي Z علي شكل السلسلة. وفي حالة الأنوية زوجي- زوجي ستكون لها طاقة ترابط إضافية موجبة $135MeV / A$ أما الأنوية فردي- فردي فتقل طاقة الترابط بنفس هذه القيمة ولذلك يوجد منحنيان أحدهما عندما تكون Z زوجي، A زوجي والأخر عندما تكون Z فردي A زوجي كما في الشكل.

الأنوية فردي- زوجي تقع علي المنحني العلوي ولهذا فهي غير مستقرة بالنسبة للأنوية علي المنحني السفلي. ومن الشكل نلاحظ أنه يوجد أيزوباران زوجي- زوجي قريبان من القاع ويختلفان في Z $(\Delta Z = 2)$. الأنوية التي علي اليسار تنحل باعثة إلكترونات والأنوية التي علي اليمين تنحل باعثة بوزيترونات. الأيزوبار الموجود بقاع المحني العلوي ينحل بانبعاث $\beta^{-} or \beta^{+}$.

٦,٢ نموذج القشور النووية Shell Nuclear Model

يعتبر نموذج القشرة النووية من أهم النماذج النووية التي ساعدت علي فهم التركيب النووي. فقد أتضح في الأونة الأخيرة أن الكثير من الخواص النووية يتغير بطريقة دورية تشبه إلي حد كبير النظام الدوري للعناصر. ومن دراسة الفيزياء الذرية وجد أن امتلاء الأغلفة الإلكترونية للذرة بوجود عدد معين من الإلكترونات عند الأعداد (2,8,18,32,......) وهذه الأرقام يطلق عليها الأرقام السحرية Magic Numbers والعناصر التي تملك الأرقام السحرية تكون خاملة كيميائياً، أي أن طاقة الفصل عالية جداً (طاقة التأين) مقارنة بالعناصر التي تقع قبلها أو بعدها

في الجدول الدوري حيث تكون مدارات هذه العناصر مقفلة وتكون الذرات مستقرة ومثل هذه الأرقام الأعداد الذرية للغازات النبيلة أو الخاملة. وعند مقارنة الشواهد التجريبية يمكن أن يكون هناك تركيباً قشرياً للنواة كما في الذرة. وتوجد أعداد سحرية في الأنوية كما في الذرة والأعداد السحرية في حالة النيوترونات هي $N = (2,8,20,28,50,82,126)$ وفي حالة البروتونات هي $Z = (2,8,20,28,50,82)$. والأعداد السحرية للبروتونات والنيوترونات فسرت علي أنها تكون مدارات أو قشور مغلقة من البروتونات والنيوترونات وتكون مستوياتها مستقلة عن بعضها البعض.

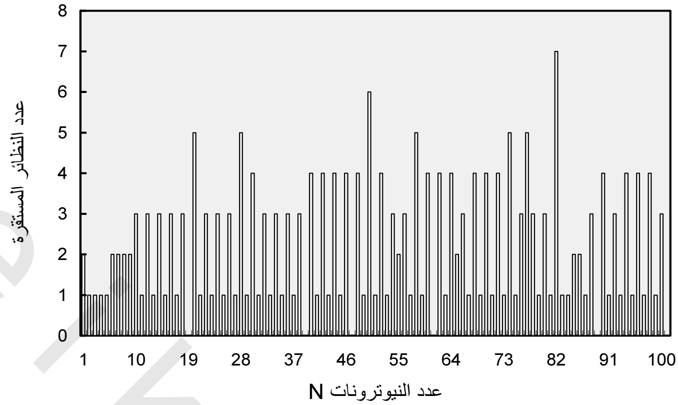
٣-٦ الشواهد والبراهين علي وجود نموذج القشور النووية:

١- الأنوية التي لها Z,N تساوي ٢،٨ $({}^{16}_{8}O_8, {}^{4}_{2}He_2)$ أكثر استقرارا من جيرانها.

٢- عند دراسة منحني طاقة الترابط النووي لكل نيوكليون والعدد الكتلي للأنوية المختلفة وجد أن المنحني لا يكون أملس ولكن توجد به بعض النتوءات التي تقابل زيادة مفاجئة في طاقة الترابط النووي لكل نيوكليون. وقد وجد أن هذه النتوءات تحدث عند العناصر الآتية:

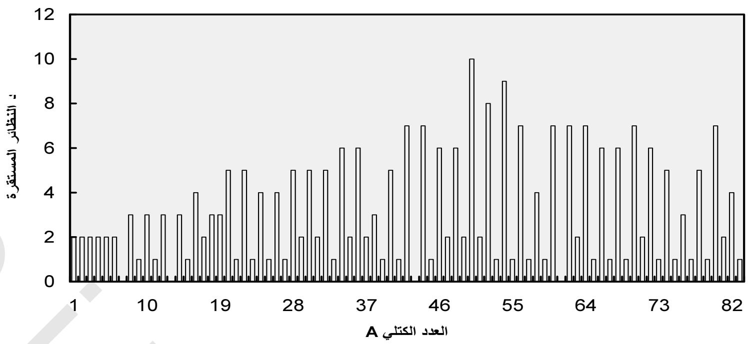
$$\begin{aligned}&{}^{208}Po(Z = 82, N = 50), {}^{120}Sn(Z = 50, N = 70),\\&{}^{140}Ce(Z = 58, N = 82), {}^{88}Sr(Z = 38, N = 50).\end{aligned} \qquad (٦-٢٢)$$

٣- لوحظ أن عدد النظائر المستقرة التي تكون فيها Z أو N أو كلاهما معاً أعداد سحرية أكثر من عدد النظائر التي تكون فيها Z أوN أكبر أو أقل من الأعداد السحرية ومثال علي ذلك عدد النظائر التي لها Z=20 يساوي ٦ بينما عدد النظائر في حالة Z=19 يساوي ٣ وعدد النظائر في حالة Z=21 يساوي ١ كما في شكل (٦-٤).



شكل (٤-٦) عدد النظائر المستقرة في حالة Z أو N من الأعداد السحرية

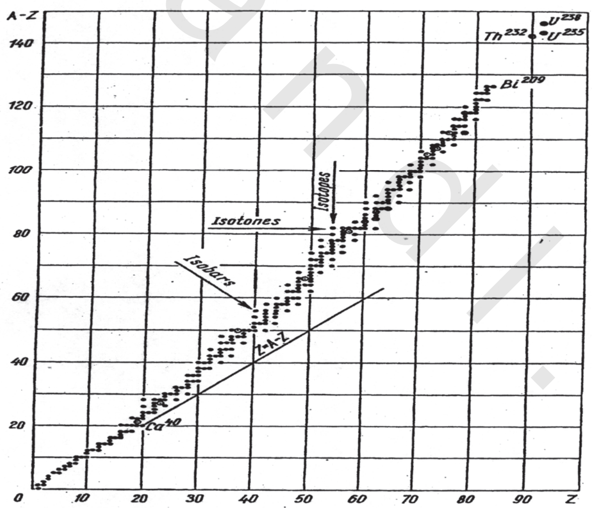
٤- لوحظ أن عدد الأيزوتونات المستقرة يكون كبيراً عندما تكون عدد النيوترونات سحري.ومثال علي ذلك عدد الأيزوتونات المستقرة التي لها $N=82$ يساوي ٧ بينما عدد الأيزوتونات حول هذا العدد يقل إلي ٤. وعندما تكون $N=50$ يكون عدد الأيزوتونات يساوي ٦ بينما يقل إلي أربعة حول هذا العدد كما في شكل (٥-٦).



شكل (٥-٦) عدد الأيزوتونات المستقرة في حالة عدد النيوترونات يكون عدداً سحرياً

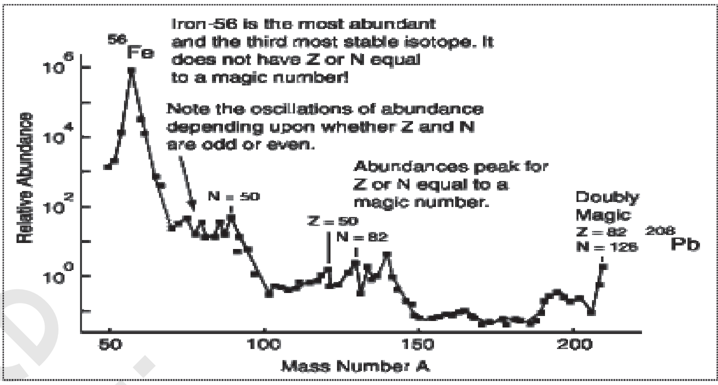
٥- لقد وجد أن هناك ارتباطا محدداً بين طاقات الترابط النووي ومدي انتشار العناصر المختلفة في الطبيعة ويمكن الاستدلال علي الاستقرار النسبي للعناصر المختلفة بعدد النظائر المستقرة. شكل (٦-٦) يوضح عدد النظائر المستقرة كدالة في العدد الذري Z. ومن الشكل نجد أن أخف العناصر الذي له أكثر من نظيرين هو عنصر الأكسجين ($^{16}_{8}O$) والعنصر الأول الذي له أربعة نظائر مستقرة هو الكبريت ($^{32}_{16}S$) وأثقل نظائره هو ($^{36}_{16}S$) الذي يحتوي علي ٢٠ نيوترون. ويوجد ٥ نظائر للكالسيوم Z=20، ويوجد ٧ نظائر للموليبدنيوم أخفها هو (^{92}Mo) الذي يحتوي علي ٥٠ نيوترون. وتوجد ١٠ نظائر تحدث مرة واحدة فقط عند Z=50. ويوضح شكل (٤-٦) أيضاً عدد النظائر المستقرة التي لها نفس العدد المعين من النيوترونات (الأيزوتونات) كدالة في عدد النيوترونات N. ومن هذا الشكل نلاحظ أن النهايات العظمي للأيزوتونات المستقرة تقع عند N=20,28,50,82 وأن طاقة جسيمات ألفا المنبعثة من الأنوية الثقيلة المشعة تعطي برهاناً قوياً للأعداد السحرية Z=82 و N=126 لأن وجود عنصر

الرصاص كمنتج نهائي في ثلاث سلاسل إشعاعية تشير إلي الطبيعة الخاصة للأنوية التي لها Z=82. فالأنوية التي بها ١٢٨ نيوترون مثل $({}^{212}_{84}Po, {}^{213}_{85}At)$ تشع علي غير العادة جسيمات ألفا (α) ذات طاقة عالية بحيث $(E_\alpha \approx 8.78MeV, 9.2MeV)$ علي الترتيب وزمن نصف العمر $(t_{1/2} \approx 3\times10^{-7})$ لعنصر ${}^{212}_{84}Po$ بينما لم يقاس زمن نصف العمر لعنصر ${}^{213}_{85}At$ وفي كلتا الحالتين فإن النواة الابنة لها ١٢٦ نيوترون، أي يوجد ميل شديد للأنوية التي تحتوي علي ١٢٨ نيوترون لتشع جسيمات ألفا (α) وتتغير إلي الحالة المستقرة التي بها عدد من النيوترونات يساوي ١٢٦. وقد وجدت حالات شبيهه في حالة تفكك بيتا (β) فطاقة جسيمات بيتا تكون كبيرة عندما يكون عدد البروتونات أو النيوترونات في النواة الابنة مساوياً لعدد سحري.



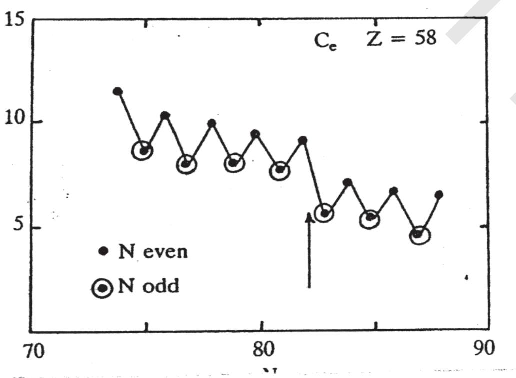
شكل (٦-٦) عدد النظائر المستقرة من الأيزوتونات كدالة في العدد الكتلي A

٦- لقد لوحظ أن العناصر التي لها Z,N أعداد سحرية تكون متوافرة في الطبيعة أكثر من غيرها كما في شكل (٦-٧)



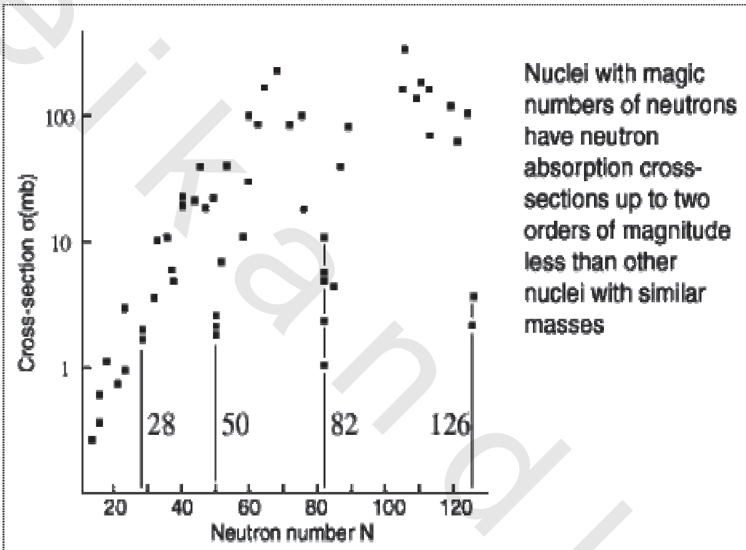
شكل (٦-٧) توافر العناصرفي الطبيعة التي لها Z, N أعداد سحرية

٧- طاقة الفصل للبروتونات والنيوترونات عند الأعداد السحرية تكون أكبر من طاقة الفصل للعناصر التي بجوار الأعداد السحرية. و عند إضافة ١ للعدد السحري فإن طاقة الفصل تكون صغيرة جدا كما في شكل (٨-6) وهذا يدل علي أن الأغلفة النووية ممتلئة ولا تقبل أي زيادة في عدد النيوترونات أو البروتونات. وهذه الخاصية تشبه طاقة التأين في الذرات حيث نجد أن الغازات الخاملة لها طاقة تأين كبيرة بينما في حالة القلويات تقل هذه طاقة التأين كثيراً. نلاحظ من الشكل تأثير الازدواج وهو في حدود ٢ م.أ.ف لعنصر السيزيوم



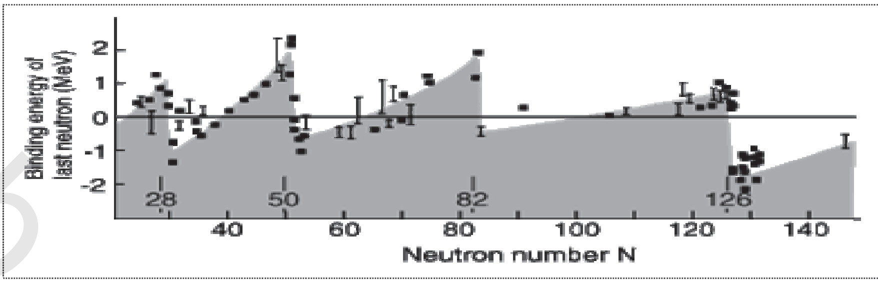
شكل (٨-٦) يوضح أن طاقة الفصل عند الأعداد السحرية تكون كبيرة

٨- في حالة الأنوية التي لها عدد سحري من النيوترونات تكون مساحة مقطع الامتصاص لها يكون أكبر عند الأعداد السحرية وتكون أكبر مرتين من الأنوية التي ليس لها عدد سحري كما في شكل (٩-6ً) وهذا أيضاً يدل علي أن الأغلفة النووية ممتلئة ولا تقبل أي زيادة في عدد النيوترونات وهذا يؤدي إلي استقرار هذه الأنوية.



شكل (٩-٦) يوضح أن مساحة مقطع التفاعل عندما النيوترونات تكون أعداد سحرية

٩- الطاقة اللازمة لنزع النيوترون الذي يوجد في المدار الأخير في حالة الأغلفة النووية الممتلئة يعتمد علي نوع التركيب القشري. فعند الأعداد السحرية يحتاج هذا النيوترون إلي طاقة كبيره. والخط الموجود عند الصفر يوضح القيمة المتوقعة لطاقة الترابط النووي بصيغة Weizsaeker formula كما في شكل (١٠-6ً).



شكل (١٠-٦) يوضح طاقة الترابط النووي عندما تكون النيوترونات أعداد السحرية

٦-٤ قواعد النموذج القشري

من الشواهد والبراهين السابقة وجد أن النواة مكونة من نيوكلونات موزعة بطريقة معينة كما في الذرة، ولمعرفة توزيع هذه النيوكلونات لابد من معرفة الجهد للنواة. ولقد وضعت فروض عديدة لبناء النموذج القشري للنواة منها:

١- أن كل نيوكليون يتحرك في مداره داخل النواة مستقلاً عن بقية النيوكليونات ويتحدد المدار بدالة طاقة(بئر) جهد $V(r)$ التي تمثل التأثير المتوسط للتفاعلات مع بقية النيوكلونات وهي متساوية لكل نيوكليون.

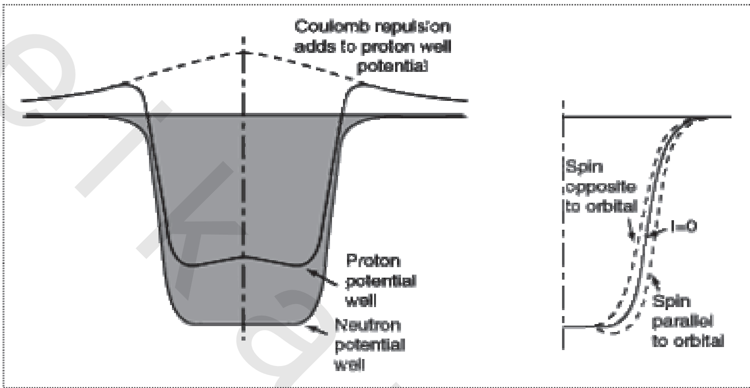
٢- طاقة الجهد يأخذ شكلاً كروياً في أبسط الحالات وذلك في حالة الأغلفة المغلقة أما غير ذلك فإن شكل النواة سيأخذ شكلاً بيضاوياً أو غير ذلك.

٣- كل نيوكليون يعتبر جسيماً مستقلاً، والتفاعل بين النيوكلونات يعتبر اضطراباً صغيراً في التفاعل بين النيوكليون وجهد المجال ويطلق علي النموذج غالباً اسم نموذج الجسيم المستقل.

عند حل معادلة شرودنجر يمكن استنتاج مستويات الطاقة للنيوكلونات النووية وكانت أول محاولة لتفسير الأعداد السحرية بنيت علي الفرضية

الأساسية بأن النيوكلونات تتحرك بحرية في دالة الجهد النووية. وأول دالة جهد استخدمت هي البئر المربع (Square Well Potential) كما في شكل (٦-١١) حيث:

$$V(r) = -V_0 \quad (r < R)$$
$$V(r) = 0 \quad (r > R) \qquad (٦\text{-}٢٣)$$



شكل (٦-١١) يوضح دالة الجهد المربع للبروتونات والنيوترونات

ثم استخدمت دالة الجهد التوافقي للمتذبذب التوافقي البسيط Harmonic Oscillator أي أنه إذا كان لدينا جسيم واقع تحت تأثير قوة تناسب مع مربع المسافة r^2 بين الجسيم ونقطة محددة فإن دالة الجهد تعطي بالعلاقة:

$$V(r) = \frac{1}{2} K r^2 \qquad (٦\text{-}٢٤)$$

وتكون معادلة شرودنجر كالأتي:

$$E\psi = \left\{ -\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + V(r) \right\}\psi \qquad (٦\text{-}٢٥)$$

وعند حل معادلة شرودنجر وتطبيق ميكانيكا الكم، كانت النتيجة هي أن البروتونات والنيوترونات تكون مستويات طاقة أو مدارات مستقلة ولكن

بأعداد لا تتفق مع النتائج التجريبية وهذه الأعداد هي 2,8,20,40,70,112,168 وبمقارنة هذه الأعداد بالأعداد السحرية سنجد أنها تتفق معها في الأعداد الثلاثة الأولي فقط. وإذا تم إدخال دالة جهد المتذبذب التوافقي مع بئر الجهد المربع كما يلي:

$$V(r) = -V_0\left(1 - \frac{r^2}{r_0^2}\right)(r \le r_0) \qquad (٦-٢٦)$$

وتكون معادلة شرودنجر كالأتي:

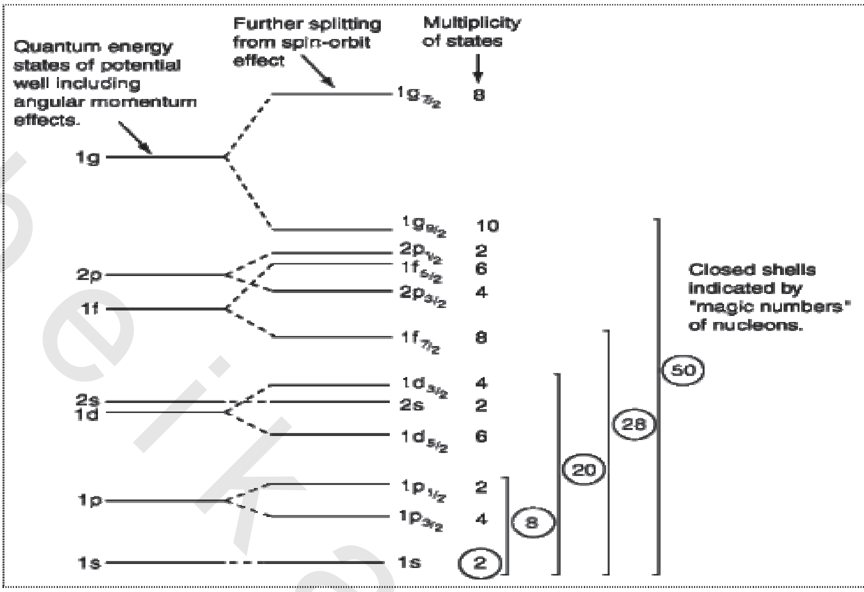
$$E\psi = -\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2\psi - V_0\left(1 - \frac{r^2}{r_0^2}\right)\psi \qquad (٦-٢٧)$$

وبعد حل معادلة شرودنجر وجد أنها تعطي أعداداً تتفق مع النتائج التجريبية ما عدا العدد ٢٨. وقد وجد أنه للحصول علي أعداد تتفق مع النتائج التجريبية يجب إدخال فرض جديد وهو ينص علي أن طاقة النيوكليون تختلف جوهرياً إذا كانت مغزليته موازية لعزم التحرك المداري أو معاكسة له. وعندما أدخل هذا الفرض في النظرية أدي إلي الحصول علي أعداد متفقة مع التجارب العملية أي أن (2,8,20,50,82,126) وعليه يمكن تفسير كلمة سحري حيث صمم النموذج النووي بحيث إنه عند معاملته رياضياً يعطي الأعداد الصحيحة أي المتفقة مع التجربة.

وفي عام ١٩٤٩م أقترح العلماء جنسين وماير Goeppert-Mayer and Jensen نموذجاً جديداً أخذين في الاعتبار الازدواج بين اللف المغزلي $(\vec{S})$ والحركة الدورانية $(\vec{I})$. وطبقاً لهذا النموذج فإن بئر الجهد يأخذ الشكل التالي:

$$V(r) = u(r)(\vec{S}\vec{I}) \qquad (٦-٢٨)$$

حيث $V(r)$ هو جهد المتذبذب الهارموني (جهد ساكسون- وودز) Saxon-Woods Potential ، حيث $u(r) = \frac{1}{r}\frac{\partial V}{\partial r}$ وفي هذه الحالة يكون للمستوي ذي العدد الكمي l قيمتين للطاقة طبقاً للدوران المتبادل للف المغزلي $(\vec{S})$ وكمية الحركة الزاوية المدارية $(\vec{l})$. فإذا كان اللف المغزلي موازياً لاتجاه اللف المداري فإننا نحصل علي القيمة الصغرى لطاقة المستوي، بينما نحصل علي القيمة الكبرى عندما يكون اللف المغزلي في عكس اتجاه اللف المداري أي أن المستوي ذي العدد الكمي المداري l يتفرع إلي مستويين فرعيين ذي العدد الكمي $i = l \pm \frac{1}{2}$ أي أنه بدلاً من الحالة np أي $(l = 1)$ فإننا نحصل علي الحالتين الفرعيتين $np_{3/2}, np_{1/2}$ وأيضاً في الحالة nd أي $(l = 2)$ فإننا نحصل علي الحالتين الفرعيتين $nd_{3/2}, nd_{5/2}$ وهكذا. وتكون طاقة المستوي ذو القيمة الكبرى I أقل من طاقة المستوي ذو القيمة الصغرى I والشكل (٦-١٢) يوضح انقسام وإعادة ترتيب المستويات في أبسط نموذج قشري (نموذج الجسيم المنفرد).



شكل (١٢-٦) انقسام وإعادة ترتيب المستويات في نموذج الجسيم المفرد

ويوضح جدول (١-٦) ترتيب الحالات والنيوكلونات في المستويات الفرعية والذي يتحدد بالعلاقة $m = 2i+1$ وكذلك العدد الكلي للنيوكلونات بالمستويات المغلقة N حيث $(N \square \sum m)$. من هذا الجدول يمكن ملاحظة أن المستويات المغلقة تحتوي علي عدد من النيوكلونات يساوي القيم العملية للأعداد السحرية (2,8,20,50,82,126).

جدول (٦-١) يوضح ترتيب الحالات والنيوكليونات في المستويات الفرعية

المدار Shell	State حالة المستوي	m = 2i+1	$(N \,\square\, \sum m)$
١	$1S_{1/2}$	٢	٢
٢	$1p_{3/2}, 1p_{1/2}$	٢+٤=٦	٨
٣	$1d_{5/2}, 2s_{1/2}, 1d_{3/2}$	٦+٢+٤=١٢	٢٠
٤	$1f_{7/2}, 2p_{3/2}, 1f_{5/2}, 2p_{1/2}, 1g_{9/2}$	٨+٤+٦+٢+١٠=٣٠	٥٠
٥	$1g_{7/2}, 2d_{5/2}, 2d_{3/2}, 3s_{1/2}, 1h_{11/2}$	٨+٦+٤+٢+١٢=٢	٨٢
٦	$1h_{9/2}, 2f_{7/2}, 2f_{5/2}, 3p_{3/2}, 3p_{1/2}, 1h_{13/2}$	١٠+٨+٦+٤+٢+١٤=٤٤	١٢٦

ويتم توزيع الأنوية في مستويات وذلك بمعرفة عدد النيوكليونات التي تحتويها الأنوية وكذلك قيم اللف المغزلي والقيم I التي تميز الحالات. وقد وضعت الفروض الآتية والتي تحققت عملياً في حالة توزيع الأنوية في مستويات:

١- كمية التحرك الزاوية الكلية لنظام يحتوي علي عدد زوجي من البروتونات وعدد زوجي من النيوترونات تساوي صفراً.

٢- كمية التحرك الزاوية الكلية لنظام يحتوي علي عدد فردي من النيوكليونات تتعين بمقدار كمية التحرك الزاوية $\vec{i} \,\square\, \vec{S} \,\square\, \vec{I}$ للنيوكليون المنفرد(غير المتزواج).

٣- كمية التحرك الزاوية الكلية لنظام (فردي – فردي) والذي نيوكليوناته غير المتزواجة توجد في حالات متطابقة تساوي ضعف كمية التحرك الزاوية للنيوكليون.

٤- تزداد قيمة طاقة المستويات ذات العدد n بزيادة العدد الكمي المداري l.

٥- طاقة التفاعل المغزلي – المداري للحالة التي بها $\vec{S},\vec{I}$ متوازيين تكون أكبر منها في حالة ما إذا كانت $\vec{S},\vec{I}$ غير متوازيين.