كلية العلوم

القسم : **الفيزياء**

السنة : **الثالثة**

المادة : نووية١

المحاضرة : الثانية/نظري/

{{ A to Z مكتبة }}

Facebook Group : A to Zمكتبة

# القوى النووية

## مقدمة:

تهتم الفيزياء النووية بمسألتين أساسيتين وهما:

1- فهم طبيعة القوى التي تؤثر بين نيكليونين.
2- فهم وتوضيح خواص النوى الثقيلة بدلالة القوى النووية.

و على الرغم من ترابط هاتين المسألتين ببعضهما الا أنهما مختلفتان كلياً لأنه اذا تمت معرفة القوى النووية بصورة كاملة فأن مسألة دراسة مجموعات مكونة من عدة جسيمات لا تزال قيد الدراسة والبحث وهي غير مفهومة في الوقت الحاضر.

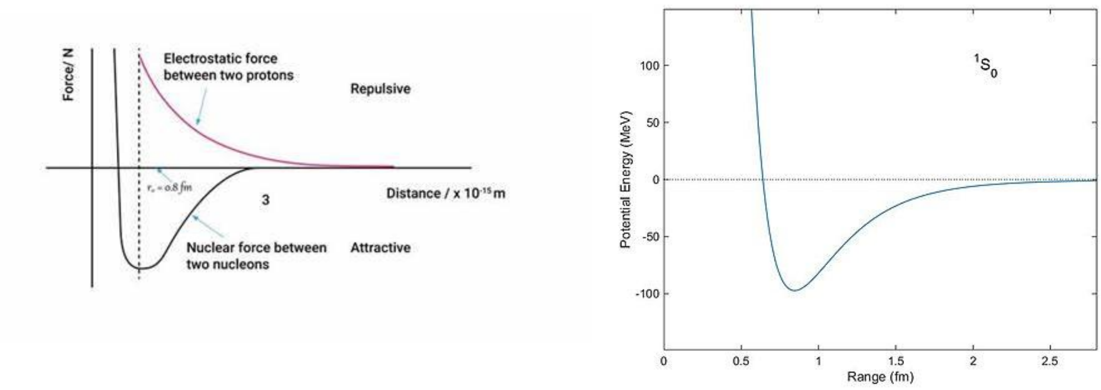
القوى الموجودة بين النيكليونات ليست بسيطة وغير واضحة بشكل تام. وأحد الأسباب التي تجعل هذه القوى غير واضحة هو أن التفاعلات بين النيكليونات ناتجة عن التفاعلات الأساسية بين الكواركات داخل النيوكليونات.

سنعرض فيمايلي أهم الفرضيات التي وُضعت لفهم القوى النووية:

1- البروتونات والنترونات هي فرميونات سبينها 1/2 لذلك هي تخضع لمبدأ باولي.
2- القوى النووية تجاذبية وقوية، وهي ذات مدى قصير جداً (بعض الفيمتوميتر fm). التشارك بين القوى والمدى القصير تجعل النظام المكون من نيكليونين مترابط بشكل كبير.
3- القوى النووية تكون مستقلة عن شحنة النيكليونات. باهمال التفاعلات الكولونية (التنافر الكهربائي بين البروتونات) فأن الطاقة الكامنة أو الكمون النووي المتشكل بين بروتون-بروتون سوف يساوي الكمون النووي الموجود بين نترون- نترون.
4- أن يكون هناك جزء آخر من القوة النووية ذو مدى أصغر بكثير من نصف قطر النواة يُحاول جعل النواة تتخذ شكلاً كروياً ويؤدي في الوقت نفسه الى ازدواج النيكليونات.
5- أن يكون للقوى النووية حد اشباع، و هو يظهر كما لو أن كل نيكليون يتبادل التأثير مع عدد محدود من النيكليونات المجاورة له مهما كان نوع النواة.
6- ان القوة بين نيكليونين تُصبح تنافرية جداً عن مسافة تبلغ 1/2 fm، ولهذا من الممكن أن نتصور أن النيوكليونات جزءاً مركزياً صلباً.

تم افتراض أن القوى النووية المؤثرة على أي نيكليون هي القوى الناتجة عن النيكليونات الأخرى التي سيكون عددها ( A-1). هذه النيكليونات تُنتج طاقة كمونية كبيرة سالبة الشحنة هي المسؤولة عن استقرار النيكليون المدروس في النواة. وتكون الطاقة الكمونية من مرتبة $10^2 MeV$ وذلك لأن الطاقة الحركية الصغرى التي يتحرك بها نيكليون في نواة خفيفة كالألمنيوم بنصف قطر 6 fm هي من مرتبة 20 MeV تقريباً.

تؤثر الطاقة الكمونية النووية على مجال قصير جداً (من 1 الى 2 fm) وهي تتناقص كلما ازدادت المسافة الفاصلة بين النيكليونات.




الشكل 1: تغير القوى النووية ( الطاقة الكمونية النووية) بدلالة المسافة الفاصلة بين نيكليونين.

الشكل يوضح أن القوى النووية تكون أعظمية من أجل مسافة فاصلة بين النيكليونات من مرتبة 0.8 fm و بعد المسافة 2 fm فأن هذه القوى تتناقص وتأخذ قيمة الصفر و تصبح القوى الكهربائية التنافرية بين النيكليونات هي المسيطرة. ومن أجل مسافة أقل من 0.8 fm فأن القوى النووية تُصبح قوى تنافرية.

وفقاً لنظرية الحقل الكمي فأن القوى بين الجسيمات هي ناتجة عن تبادل جسيمات افتراضية. ويكون مدى القوى هو طول موجة كمبتون للجسيم المتبادل ذو الكتلة m. يمكن شرح عدد من خصائص القوى النووية كمياً باستخدام الجهد النووي الذي اقترحه العالم Yukawa في عام 1939: $V(r) = g\frac{\hbar c}{r}e^{-r/r_0}$ حيث g هو ثابت التزاوج وليس له أبعاد، و r يمثل البعد عن مركز النواة و $r_0 = \frac{\hbar}{m c}$ هو طول موجة كمبتون.

والشكل العام للتفاعلات النووية القوية بين النيوكليونات يمكن أن يُكتب على شكل جمع خطي لكمونات Yukawa:

$$V(r) = \sum_i g_i \frac{\hbar c}{r} e^{-\mu_i r}$$

$\mu_i = m_i c/\hbar$ ، حيث أن المجموع يمكن أن يتم على مجموعة مستمرة أو متقطعة من الجسيمات التي يحدث بينها التبادل.

أشار Yukawa الى أن مدى القوى النووية $r_0 \approx 1.4\, fm$ يتناسب مع تبادل جسيم بكتلة $m \approx 140\, MeV$ . وهو بهذه الطريقة تنبأ بوجود جُسيم الميزون (meson π)، واكتشاف هذا الجسيم في الأشعة الكونية كان خطوة حاسمة باتجاه مفهوم القوى النووية.

## نموذج الطبقات النووية:

لدراسة كيفية توزع البروتونات والنترونات داخل النواة فقد تم وضع مجموعة من النماذج منها نموذج القطرة السائلة ونموذج الطبقات النووية وغيره من النماذج. سنستعرض في دراستنا

هذه نموذج الطبقات النووية الذي استطاع أن يُفسر الأعداد السحرية النووية. حيث أن النوى السحرية تملك مدارات مغلقة بالأعداد التالية:

N=2, 8, 20, 28, 50, 82, 126.
Z=2, 8, 20, 28, 50, 82.

تتوزع النيكليونات في سويات طاقية تم تكميمها باستخدام الأعداد الكمية n، ℓ المذكورة في النموذج الذري. تم حساب طاقة السويات باستخدام مفهوم الطاقة الكمونية لكل جسيم Independent Particle Approximation (IPA) Potential Energy

يمكن حساب الطاقة الكمونية لكل نيكليون وذلك بحساب الطاقة الكمونية الوسطية للنيكليونات الأخرى المجاورة للنيكليون المدروس. ويظهر المعدل الوسطي لأثر النيكليونات الأخرى ضمن كرة نصف قطرها $R = 1.17\ A^{1/3}\ fm$.

الطاقة الكمونية لكل نيكليون تُعبر عن الجهد الذي يتحرك به النيكليون في النواة وهو ينتج عن تأثير جهود النيكليونات الأخرى المجاورة له في النواة. نُرمز للطاقة الكمونية ب $U_{nuc}$.

في حال البروتونات نقوم بإضافة الطاقة الكمونية الناتجة عن القوى الكولونية التنافرية وذلك بسبب شحنة البروتونات وبالتالي فأن الطاقة الكمونية الكلية للبروتونات:

$$U_{(r)} = U_{nuc}(r) + \ U_{coul}\,(r)$$

$$U_{coul}(r) = (Z-1)\frac{K\ e^2}{r}$$

حيث $K$ ثابت كولون الكهربائي. و $r$ المسافة الفاصلة بين النيكليون المدروس والنيكليون المجاور الذي يتبادل التأثير الكهربائي معه.

وفي حال النترونات فأن الطاقة الكمونية الكلية هي:

$$U_{(r)} = U_{nuc}(r)$$

باستخدام مفهوم *IPA* تم وضع السويات الطاقية في النواة. ولكن حساب السويات بواسطة *IPA* لم يكن كافياً لتفسير النوى السحرية الى أن تم إضافة حد جديد للطاقة الكمونية وهي عبارة عن طاقة كمونية إضافية ناتجة عن العزم الزاوي المداري $L$ للنيكليون و اتجاهه بالنسبة لسبين هذا النيكليون $S$.

حيث أن العزم المداري الكلي L للنيكليون يُعطى بالعلاقة:

$$L = \sqrt{l(l+1)}\ \hbar$$

و $\ell = 0, 1{,}2; 3; \ldots$ العدد الكمي المداري.

والعزم السبيني الكلي يُعطى بالعلاقة:

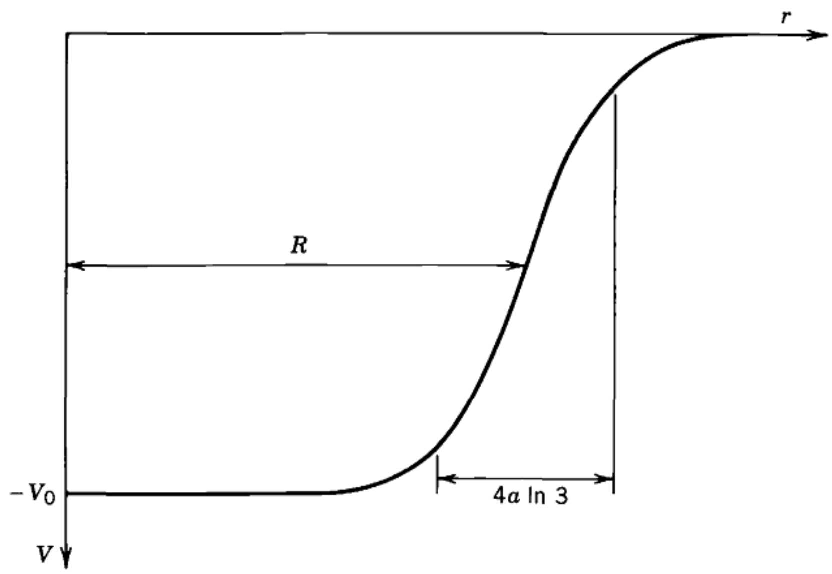
$$S = \sqrt{s(s+1)}\,\hbar$$

و $s = \frac{1}{2}$ العدد الكمي السبيني.

**هاملتون النموذج:**

ان ميزات وخصائص النوى السحرية قاد الفيزيائيون النوويون لنقل النموذج الذري المشابه (أو المشبه) للنموذج الشمسي الى نموذج مكون من جسيمات مستقلة. يعود هذا لقبول كتقريب أولي أن كل شيء يحدث كما لو أن التأثيرات المتبادلة بين نيكليون $N_\alpha$ والنيكليونات الأخرى ( A-1) تُشبه بحفرة كمون $V_\alpha$ .

الفكرة الأكثر بساطة هي أخذ نفس الكمون النووي V من أجل النيكليونات A في النواة حيث يكون $V_\alpha = V$ بشكل مستقل عن النيكليون المدروس α، كونه يُمثل متوسط التأثيرات المتبادلة بين جسيمين على كامل توزع المادة النووية ( من هنا جاء اسمه بالكمون المتوسط) وارفاقه بشدة متناسبة مع كثافة النيكليونات. تُظهر التجربة أن النوى السحرية تتميز بشكل كروي متوازن (وبما أن دراستنا ستقتصر على هذه النوى التي تُعتبر ذات استقرار كبير)، سوف نعتمد كمون متوسط كروي والصيغة المعتمدة لهذا الكمون هي صيغة Woods-Saxon التالية: $V_{(r)} = -V_0/(1+e^{\frac{r-R}{0.228\,a}})$ حيث $R = r_0 A^{1/3}$ نصف قطر البئر الكموني، a سماكة الطبقة الخارجية، و $V_0 \cong 50\ MeV$ عمق الكمون.




الشكل 2: شكل كمون النموذج الطبقي. السماكة السطحية $4a\,ln\,3$ هي المسافة التي يتغير فيها الكمون من $90\%V_0$ الى $10\%V_0$.

وبكتابة معادلة شرودينغر $H_0\Psi = E\Psi$ حيث $H_0$ هاميلتون النموذج وهو يُكتب من أجل النيكليون α في البئر الكموني للنموذج الطبقي كمجموع للطاقة الحركية $T_\alpha$ والطاقة الكامنة $V_\alpha$ ومن أجل A نيكليون في النواة فهو حاصل مجموع الطاقات الحركية والكامنة لكل نيكليون:

$$H_0 = \sum_{\alpha=1}^{A}(T_\alpha + V_\alpha) = \sum_{\alpha=1}^{A}(T_\alpha + V_{r_\alpha})$$

ان معرفة $H_0$ يسمح بحل معادلة القيم الخاصة الذي يسمح بالحصول على القيم الخاصة للطاقة. و العلاقة السابقة تُبين وجود $A$ معادلة شرودينغر من أجل $A$ نيكليون في النواة من الشكل: $(T_\alpha + V_{r_\alpha})\psi_\alpha(\vec{r}) = \varepsilon_\alpha \psi_\alpha(\vec{r})$ حيث $\varepsilon_\alpha$ تمثل القيمة الخاصة للطاقة و $\psi_\alpha$ التابع الموجي للجسيم المدروس. الطاقة الخاصة للجملة النووية (النواة) في هذا التقريب تساوي مجموع الطاقات الخاصة للنيكليونات الفردية، والتابع الخاص يساوي جداء التوابع الخاصة الفردية:

$$\Psi(\overrightarrow{r_1},\overrightarrow{r_2},\overrightarrow{r_3},\cdots,\overrightarrow{r_A}) = \prod_{\alpha=1}^{A}\psi_\alpha(\overrightarrow{r_\alpha}), \text{ و } E = \sum_{\alpha=1}^{A}\varepsilon_\alpha$$

**إيجاد الأعداد السحرية:**

سوف تتم المعالجة أولاً بإهمال الحد التصحيحي المتعلق بالتأثير سبين-مدار $(\vec{L}.\vec{S})$. يتم حل معادلة شرودينغر من أجل كل نيكليون (التأثير المتبادل بين النيكليون المدروس $N_\alpha$ وبقية النيكليونات *A-1* في نظام مركز الكتل). نكتب المعادلة على الشكل التالي:

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2\mu}\nabla^2 + V(\overrightarrow{r_\alpha})\right]\psi_\alpha(\overrightarrow{r_\alpha}) = \varepsilon_\alpha \psi_\alpha(\overrightarrow{r_\alpha})$$

حيث μ هي الكتلة المختزلة وتساوي تقريباً كتلة النيكليون لأن $\mu = \frac{m[(A-1)m]}{m+(A-1)m} \cong m$.

ان الهاملتون $H_0$ المأخوذ من أجل جملة متناظرة كروياً يتبادل بشكل خاص مع $L^2$ و $L_z$ أي أن:

حيث أن L العزم الزاوي المداري.

وهذه الخاصية تسمح بكتابة تابع الموجة وفق الصيغة التالية:

$$\psi_\alpha(\overrightarrow{r_\alpha}) = R_{n,l}(\overrightarrow{r_\alpha})Y_l^m(\theta_\alpha,\varphi_\alpha) \equiv \frac{U_{n,l}(\overrightarrow{r_\alpha})}{\overrightarrow{r_\alpha}}\, Y_l^m(\theta_\alpha,\varphi_\alpha)$$

حيث $Y_l^m(\theta_\alpha,\varphi_\alpha)$ التابع الزاوي (أو الكروي) وهو تابع خاص ل $L^2$ و $L_z$ مع القيم الخاصة المرافقة $\ell(\ell+1)\hbar^2$ و $m\hbar$ على التوالي. و $U_{n,l}(\overrightarrow{r_\alpha})$ هو التابع المداري الذي يمكن كتابة معادلة شرودينغر له كمايلي: $\left[-\frac{\hbar^2}{2\mu}\frac{d^2}{dr_\alpha^2} + \frac{\hbar^2(\ell(\ell+1))}{2\mu\, r_\alpha^2} + V(r_\alpha)\right]U_{n,l}(\overrightarrow{r_\alpha}) = \varepsilon_\alpha\, U_{n,l}(\overrightarrow{r_\alpha})$

ان حل هذه المعادلة يسمح بالحصول على القيم الخاصة $\varepsilon_\alpha$. ولحل هذه المعادلة نأخذ صيغة تقريبية للكمون $V(\overrightarrow{r_\alpha})$ وهذه الصيغة هي كمون الهزاز التوافقي.

**تقريب الهزاز التوافقي:**

من السهل تشبيه كمون Woods- Saxon بحفرة كمون مربعة أو بهزاز توافقي. سنعتمد تقريب الهزاز التوافقي ويُشبه الكمون المتوسط ب:

$$V(\vec{r}) = -V_0[1-(r/R)^2]$$

حيث $V_0$ العمق المركزي للحفرة عند $r=0$ للكمون النووي الذي نصف قطره R (نصف قطر النواة) و يُعرف بالعلاقة:

$$V(r)=\begin{cases}-V_0, & r\le R\\ 0, & r>R\end{cases}$$

ويُكتب الكمون المتوسط السابق على الشكل التالي:

$$V(r) = -V_0 + \frac{1}{2}\mu\omega_0^2 r^2$$

حيث $\omega_0$ تردد الهزاز $\omega_0 = \sqrt{\frac{2V_0}{\mu R^2}}$.

وفي حالة الهزاز التوافقي تُكتب الطاقات الخاصة على الشكل:

$$E_n = (n_x + n_y + n_z + \frac{3}{2})\hbar\omega_0$$

حيث $n = n_x + n_y + n_z$، وبالنتيجة فأنه من أجل قيمة ما ل n فأن عدد الإمكانيات (أي عدد التراكيب) يُعطى بالعلاقة التالية: $\frac{(n+1)(n+2)}{2}$ و اذا أخذنا بعين الاعتبار درجة تولد السبين:

$$g_s = 2S+1 = 2\left(\frac{1}{2}\right)+1 = 2$$

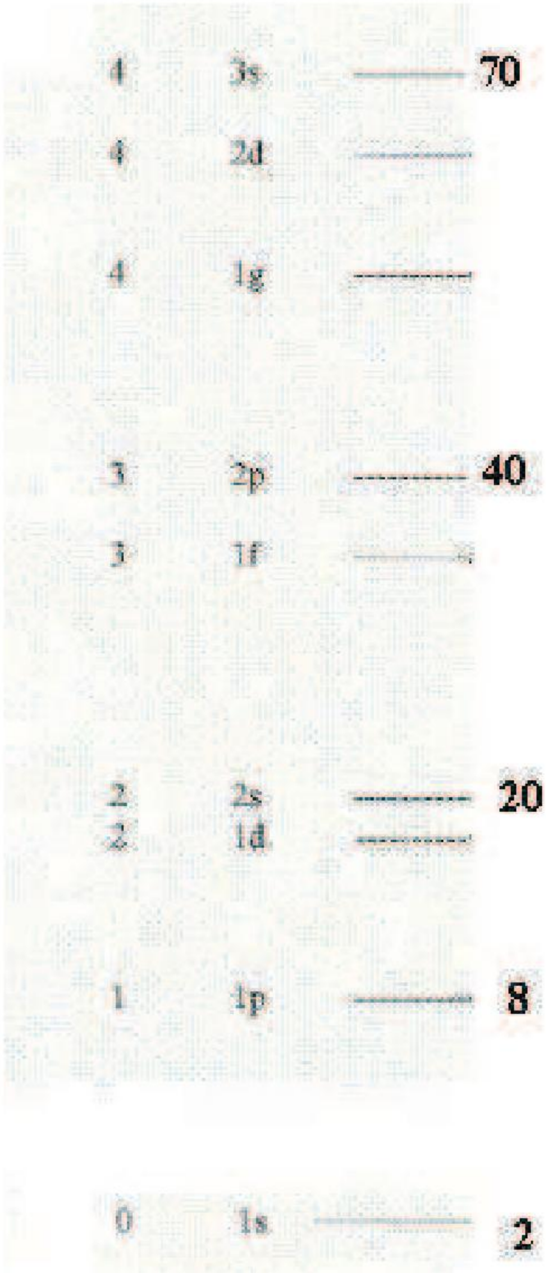
أي أن درجة التولد الكلية لسوية الطاقة $E_n$ تُعطى بالعلاقة:

$$d_n = g_s\frac{(n+1)(n+2)}{2} = (n+1)(n+2)$$

هذا يعني أنه يمكن وضع (n+1)(n+2) من النيكليونات المتماثلة في الطبقة المرقمة بالعدد n ، ويمكن إعادة كتابة العلاقة المعبرة عن طاقة الهزاز التوافقي بتابعية العدد الكمي المداري $\ell$ و العدد القطري ʋ على الشكل التالي:

$$E_{\upsilon,l} = \left[2\left(\upsilon-1\right)+\ell+\frac{3}{2}\right]\hbar\omega_0$$

حيث n العدد الذي يمثل رقم السوية الطاقية الأساسية ويرتبط بالعددين العدد الكمي المداري $\ell$والعدد القطري ʋ بالعلاقة:$n = \left[2\left(\upsilon-1\right)+\ell\right]$ حيث $\upsilon = 1,2,3,\ldots$ و $n = 0,1,2,3,\ldots$.




الشكل 3: توزع النيكليونات على السويات الطاقية في النموذج الطبقي

من الشكل 3 نلاحظ أن أخفض سوية طاقية 1s ($n=0, \ell = 0 , \upsilon = 1$) تحتوي نيكليونين (بروتونات أو نترونات) وهذا يُمثل العدد السحري الأول 2. ومن ثم تأتي السوية الطاقية 1p وتحتوي 6 نيكلويونات. وهذا يُفسر الرقم السحري الثاني 8 (2+6=8). ومن ثم تأتي السوية 1d وهي قريبة جداً من السوية 2s لذلك نعتبر أنهما على نفس الطبقة وهي تحتوي 12 نيكليون وهذا يُفسر العدد السحري الثالث (8+12=20). ومن ثم تأتي السويتين الطاقيتين 1f و 2p وهما قريبتين من بعضهما ويمكن اعتبارهم يشغلان نفس الطبقة وتحتويان عدد من النيكليونات قدره 20 فيكون العدد الكلي للنيكليونات (20+20 =40). هذا يفترض أن العدد السحري القادم هو 40 ولكن تجريبياً العدد السحري هو يجب أن يكون 50.

جدول1: توزع السويات الطاقية في النموذج الطبقي حيث n رقم الطبقة و $E_n$ طاقة الطبقة و $d_n$ عدد النيكليونات الموجودة في السويات الطاقية و $\sum_n d_n$ عدد النيكليونات الموجودة في الطبقات، $(\ell)$ رمز السوية الطاقية.

| n | $E_n$ | $d_n$ | $\sum_n d_n$ | $\upsilon(\ell)$ |
|---|---|---|---|---|
| 0 | $\frac{3}{2}\hbar\omega_0$ | 2 | 2 | 1s |
| 1 | $\frac{5}{2}\hbar\omega_0$ | 6 | 8 | 1p |
| 2 | $\frac{7}{2}\hbar\omega_0$ | 12 | 20 | 1d, 2s |
| 3 | $\frac{9}{2}\hbar\omega_0$ | 20 | 40 | 1f, 2p |
| 4 | $\frac{11}{2}\hbar\omega_0$ | 30 | 70 | 1g, 2d, 3s |
| 5 | $\frac{13}{2}\hbar\omega_0$ | 42 | 112 | 1h, 2f, 3p |
| 6 | $\frac{15}{2}\hbar\omega_0$ | 56 | 168 | 1f, 2g, 3d, 4s |

من الجدول نلاحظ أن النموذج السابق سمح بالحصول على الأعداد السحرية الثلاثة الأولى 2,8,20 و لم يُعط الأعداد السحرية 28,50,82,126.

ولحل مشكلة إيجاد الأعداد السحرية فأنه تم ادخال مفهوم التزاوج سبين-مدار على كمون Woods- Saxon وهو يعكس التفاعل بين العزم الزاوي المداري والعزم الزاوي السبيني ويظهر في الفيزياء الذرية. ومنشأ هذا التزاوج سبين-مدار هو مغناطيسي و أثره هو تصحيح بسيط في الفيزياء الذرية. أما في طاقة الربط النووية فأن أثر هذه الظاهرة هو أكبر ب 20 مرة وهي تنشأ من الكمون النووي نفسه الذي يتناسب مع التزاوج سبين-مدار $(\vec{L}.\vec{S})$:

$$V(r) \to V(r) + W(r)\boldsymbol{L.S}$$

أي أنه وبسبب التزاوج سبين-مدار ستنقسم كل سوية طاقية يكون فيها $\ell \neq 0$ الى سويتين حسب اتجاه العزم السبيني S بالنسبة للعزم المداري L. فعندما S يكون موازي ل L فأن السوية الطاقية تملك طاقة أخفض من الحالة التي يكون فيها S لا يوازي L ( وهذا في حالة النوى أما في حالة الذرة فالحالة تكون العكس تماماً).

وبناءً على العلاقة بين S و L فلقد تم تعريف العزم الزاوي الكلي للنيكليون J:

$$\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$$

$$J = \sqrt{j(j+1)}\hbar\,, \qquad j = \ell \mp s$$

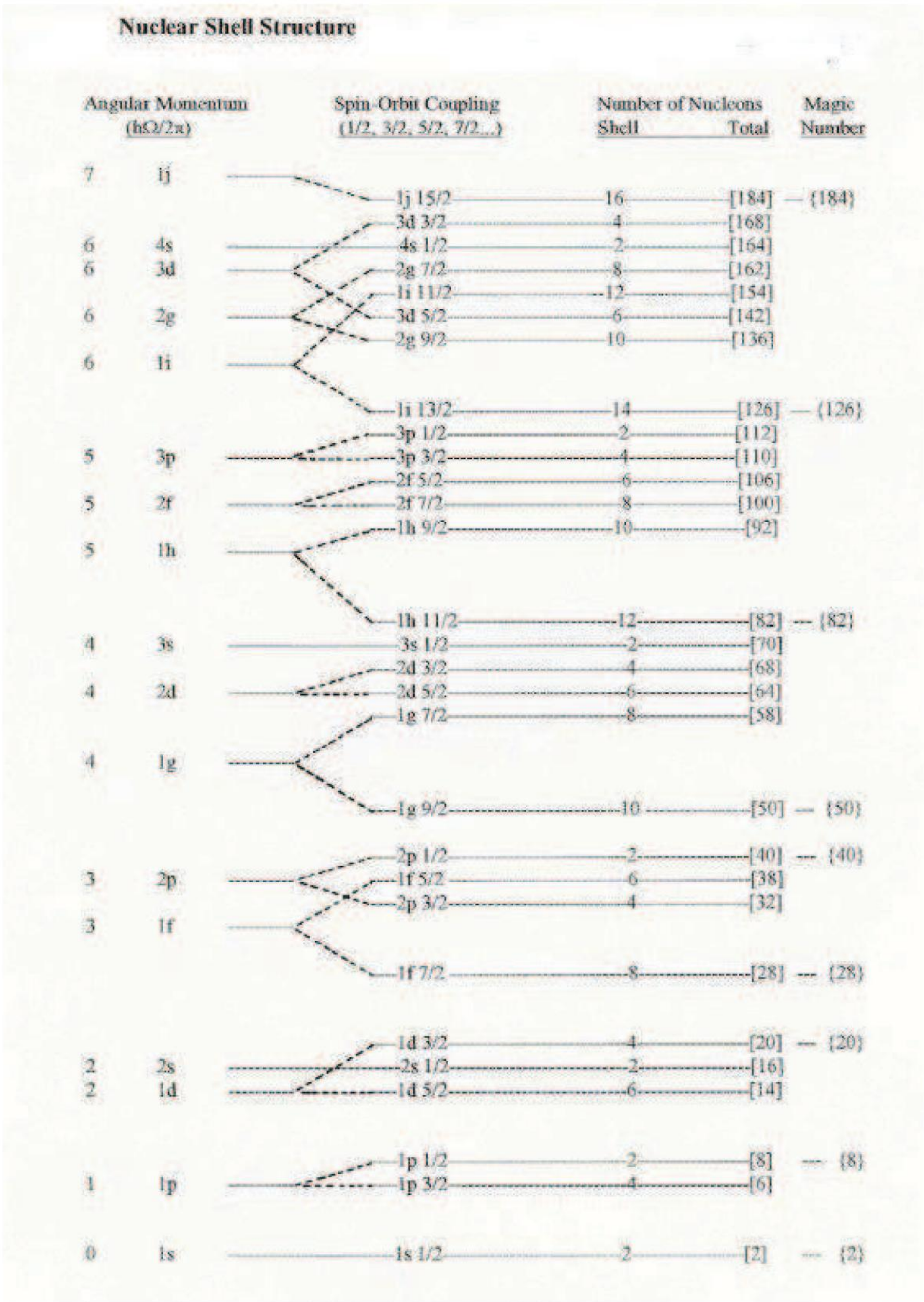
حيث $j = \ell + \frac{1}{2}$ في حالة التوازي أو $j = \ell - \frac{1}{2}$ في حالة عدم التوازي.

في الفيزياء الذرية فأن التزاوج سبين-مدار يؤدي الى انزياح في الطاقة يتناسب مع:

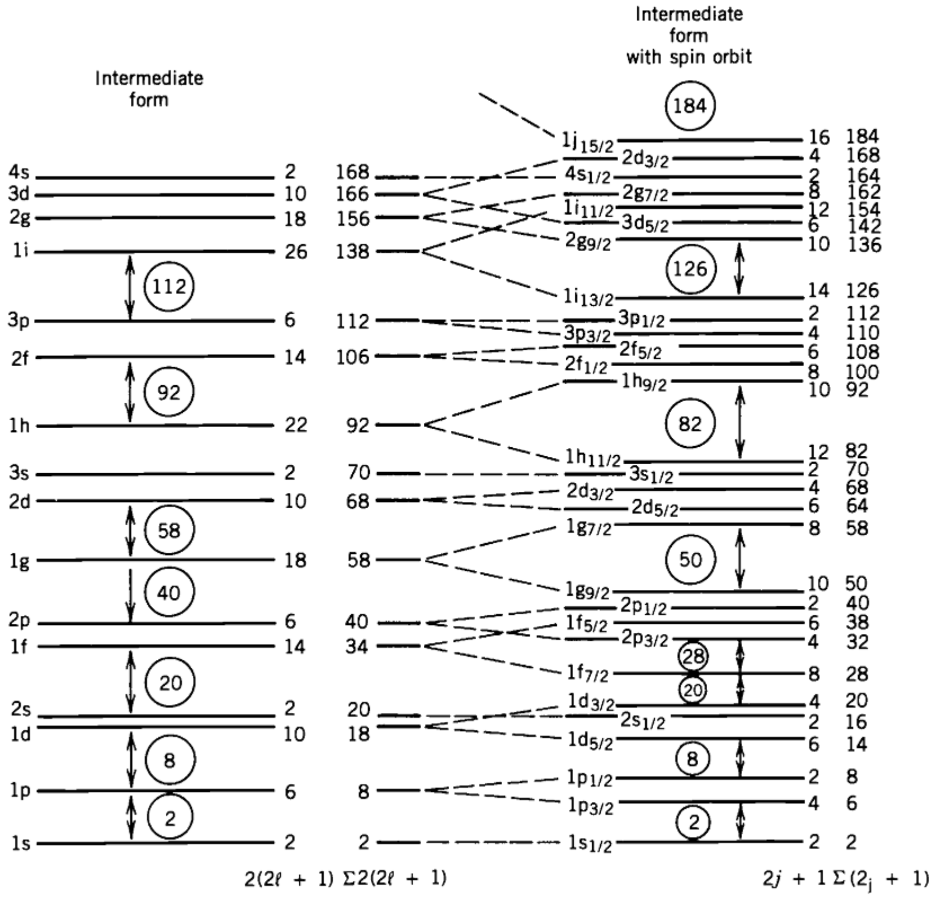
$$j(j+1) - \ell(\ell+1) - s(s+1), \qquad (s = \frac{1}{2})$$

وفي حال الفيزياء النووية فأن هذا التزاوج يؤدي الى انشطار السوية الطاقية الى سويتين تكون فيه السوية التي تمتلك رقم j أعلى هي الأخفض طاقياً على عكس الفيزياء الذرية.

الشكل 4: توزع السويات الطاقية في النموذج الطبقي بعد ادخال أثر التزاوج بين العزم السبيني والعزم المداري.



نلاحظ من الشكل 4 أن السوية 1g من أجل n=4 انشطرت الى سويتين وهما $1g_{7/2}, j = 7/2$ و $1g_{9/2}, j = 9/2$. طاقة السوية $1g_{9/2}$ تكون منخفضة جداً لذلك فهي تنضم الى الطبقة الأخفض وبذلك فأن الطبقة الرابعة في النموذج ستتشكل من السويات الطاقية التالية: $1f_{7/2}, 2p_{3/2}, 1f_{5/2}, 2p_{1/2}, 1g_{9/2}$ ويكون العدد الأعظمي من النيكليونات الذي يمكن أن يشغل أحد هذه السويات هو 2j+1 . وبالتالي فأن عدد النيكليونات التي ستتواجد في الطبقة الرابعة هو 30=10+2+6+4+8 وباضافة الرقم 30 الى عدد النيكليونات الموجودة في الطبقة الأخفض 20 سنحصل على العدد السحري 50.




الشكل 5: توضيح توزع السويات الطاقية في النموذج الطبقي ومحاولة تفسير الأعداد السحرية. في الشكل اليساري النموذج الطبقي من دون إضافة التأثير المتبادل بين العزمين السبيني والمداري الى الكمون النووي، وفي الشكل اليميني النموذج الطبقي مع إضافة التأثير المتبادل بين العزمين السبيني والمداري الى الكمون النووي و ظهور الأعداد السحرية 2,8,20,28,50,82,126.