كلية العلوم

القسم : **الفيزياء**

السنة : **الثالثة**

المادة : فيزياء نووية1

المحاضرة: الثالثة/نظري/

{{ A to Z مكتبة }}

Facebook Group : A to Zمكتبة

العزوم النووية

مقدمة: لماذا ندرس العزوم النووية؟

تخيلوا للحظة أننا نعيش في عالم بدون تصوير بالرنين المغناطيسي (MRI)، أو بدون فهمٍ لتركيب النجوم النيوترونية، أو حتى دون القدرة على تطوير حواسيب كمومية متقدمة! كل هذه التطبيقات الحديثة – والتي غيرت مجرى الطب والعلوم والتكنولوجيا – تعتمد على ظاهرة فيزيائية دقيقة تُسمى "العزوم النووية".

لماذا ندرسها؟

1. لأنها تُخبرنا بقصة النواة الذرية:

- العزم المغناطيسي النووي يكشف عن حركة البروتونات والنيوترونات داخل النواة، وكأنه "بطاقة هوية" تُخبرنا عن تركيبها الداخلي.

- العزم الكهربائي الرباعي يُجيب على سؤال مهم: هل النواة كروية أم مشوهة؟ وهذا يؤثر على استقرارها!

2. لأنها جسر بين العالم المجهري والعالم المرئي:

- عبر تقنيات مثل الرنين المغناطيسي النووي (NMR)، نستطيع رصد جزيئات الأدوية داخل الجسم البشري، أو تحليل بنية المواد الجديدة.

3. لأنها تُفسر ظواهر كونية مذهلة:

- في النجوم النيوترونية، حيث تبلغ كثافة المادة 100 مليون طن لكل سنتيمتر مكعب، تلعب العزوم النووية دوراً حاسماً في تحديد سلوك هذه النجوم الغامضة.

4. لأنها تقودنا إلى مستقبل التكنولوجيا:

- في الحوسبة الكمية، تُستخدم النوى الذرية كوحدات تخزين (Qubits) بفضل عزومها المغناطيسية الدقيقة.

إذن، عندما ندرس العزوم النووية، لا نتعلم فقط فيزياء النواة، بل نفتح أبواباً لفهم الكون من حولنا، وتطوير تقنيات تُغير حياتنا!

1- الأعداد الكمية التي تصف حالة النيكليونات الفردية:

يمكننا تعيين الحالة الكمية لنيكليون فردي ما بواسطة مجموعة من الأعداد الكمية التي تنتج عن حل معادلة شرودينغر لنيكليون فردي ضمن حفرة كمون، وهذه الأعداد هي:

1-العدد الكمي الرئيسي n: يرتبط بالعدد الكمي القطري υ والعدد الكمي المداري ℓ بالعلاقة: $n = 2\left(\upsilon - 1\right) + \ell$ حيث $\upsilon = 1,2,3,..$، n=0,1,2,…… .

2-العدد الكمي المداري ℓ: يأخذ قيماً ℓ=0,1,2,….n حيث يتم تحديد طويلة العزم الحركي المداري بالعلاقة: $|L| = \sqrt{\ell(\ell+1)}\hbar$. وفي الفيزياء الذرية يتم ترميز السويات الطاقية حسب قيم ℓ:

ℓ	0	1	2	3	4	5
رمز السوية	s	P	d	f	g	h

3-العدد الكمي السبيني s: ويأخذ قيمة s=1/2 حيث تكون طويلة العزم السبيني: $|s| = \sqrt{s(s+1)}\hbar$.

4-العدد الكمي المغناطيسي المداري m_l: يمثل مسقط العزم الحركي المداري وفق اتجاه الحقل المغناطيسي الخارجي وهو يأخذ القيم: $m_l = -\ell, \dots \dots ,0, \dots \dots . +\ell$، أي يكون للعدد الكمي المغناطيسي المداري $(2\ell + 1)$ قيمة.

5-العدد الكمي المغناطيسي السبيني m_s: يمثل مسقط العزم السبيني وفق اتجاه الحقل المغناطيسي الخارجي $m_s = \mp 1/2$.

6-العدد الكمي j: حيث أنه العدد الكمي الذي ينتج عن التزواج بين العزم السبيني والعزم المداري و يُستخدم في تحديد العزم الكلي J الذي تُعطى طويلته بالعلاقة التالية:

$$|J| = \sqrt{j(j+1)}\hbar$$

حيث $j = \ell \mp s$. حيث يتم اتخاذ حالة التوازي والتعاكس بين العزمين السبيني والمداري.

7-العدد الكمي المغناطيسي الكلي m_j: وهو مسقط العزم الكلي J وفق اتجاه الحقل المغناطيسي الخارجي، وهو يأخذ القيم التالية: j- ,j+1-,……,j-2 ,j-1 ,j+ التي يبلغ عددها (2j+1).

بما أن العزم الحركي الكلي J يُكتب على أنه حاصل جمع العزمين السبيني والمداري:

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

فأن مسقط العزم الحركي الكلي وفق اتجاه الحقل المغناطسي الخارج (z) يُكتب على الشكل التالي: $J_z = L_z + S_z$ وبالتالي فأن العدد الكمي المغناطيسي الكلي يُكتب على الشكل:

*العلاقات مأخوذة من كتاب Introductory nuclear physics, Kenneth S. Krane

$$m_j = m_l + m_s$$

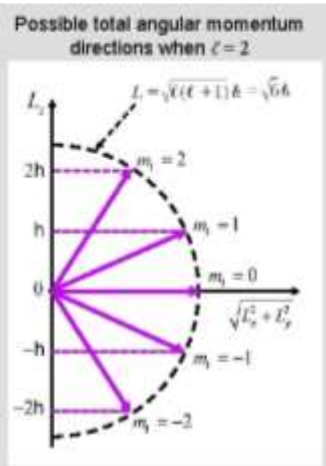
8-العدد الكمي القطري υ : يُمثل عدد العقد لتابع الموجة ويرتبط بالعدد الرئيسي بالعلاقة: $n = 2\left(\upsilon - 1\right) + \ell$، وهو يأخذ القيم...........,υ =1,2,3.

2-العزم الحركي المداري الزاوي L:

العزم الحركي المداري الزاوي للنواة (Orbital Angular Momentum of the Nucleus): هو كمية فيزيائية تُعبر عن دوران الجسيمات داخل النواة (مثل البروتونات والنيوترونات) حول مركز النواة. مثلما تدور الكواكب حول الشمس وتملك عزماً حركياً، كذلك الجسيمات داخل النواة تتحرك بشكل مداري، مما ينتج عنه عزم حركي مداري.

هذا العزم الحركي المداري يؤثر على:

- مستوى الطاقة للنواة.
- خصائص الانتقالات النووية (مثل الانبعاثات والإثارة).
- العزم المغناطيسي للنواة.



الشكل 1: مساقط العزم الحركي المداري من أجل $\ell = 2$ وفق اتجاه الحقل المغناطيسي الخارجي z

نُرمز له ب $\vec{L}$ و تتحدد طويلته باستخدام العدد الكمي المداري ℓ بالعلاقة:

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

حيث أن ℓ هو عدد صحيح يأخذ قيماً ℓ=0,1,2,....n.

وتتحدد مساقط العزم الحركي المداري وفق اتجاه الحقل المغناطيسي الخارجي باستخدام العدد المغناطيسي المداري m_l الذي يأخذ قيماً $m_l = -\ell, \dots \dots, 0, \dots \dots . +\ell$، أي يوجد $(2\ell + 1)$ مسقط.

$$L_z = m_l \hbar$$

3-العزم الحركي السبيني (المغزلي) للنيكليونات s :

هو اللف الذاتي للنيكليونات حول نفسها ونُرمز له $\vec{s}$ ويتم تحديد طويلته بالعلاقة:

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

حيث $s = \frac{1}{2}$. تتحدد مساقط العزم السبيني وفق اتجاه الحقل المغناطيسي الخارجي باستخدام العدد الكمي المغناطيسي السبيني m_s، حيث $m_s = \mp 1/2$.

*العلاقات مأخوذة من كتاب Introductory nuclear physics, Kenneth S. Krane

4-العزم الحركي الكلي للنواة (Total Angular Momentum of the Nucleus)

العزم الحركي الكلي للنواة (يُرمز له بـ $\vec{I}$ ويمكن أيضاً ب $\vec{J}$) هو كمية فيزيائية متجهة تصف الدوران الذاتي للنواة ككل، وهو ناتج عن: العزم السبيني و العزم الحركي المداري الفردي للنيكليونات المكونة للنواة:

$$\vec{I} = \sum_i (\vec{\ell}_i + \vec{s}_i)$$

عدد المساقط للعزم $\vec{I}$ وفق اتجاه الحقل المغناطيسي الخارجي يتحدد باستخدام العدد المغناطيسي الكلي $m_j = m_l + m_s$ الذي يأخذ قيماً: j- ,j+1-,......,j-2 ,j-1 ,j+ أي يكون له (2j+1) مسقط. حيث أن $j = \ell \mp s$ أي يتم اتخاذ حالة التوازي والتعاكس بين العزمين السبيني والمداري.

- القيم الممكنة:

- إذا كان عدد النوكليونات زوجيًا: I عدد صحيح (0, 1, 2, ...).

- إذا كان عدد النوكليونات فرديًا: I عدد نصف صحيح (1/2, 3/2,.......).

أمثلة تطبيقية:

- نواة الديوتيريوم (H^2): تحتوي على بروتون ونيوترون. العزم الكلي I=1 (مجموع سبينين 1/2).

- نواة الهيليوم-4 (He^4): نواة زوجية-زوجية، (I = 0) (جميع العزوم تُلغي بعضها).

التطبيقات الفيزيائية:

- الرنين المغناطيسي النووي (NMR): يعتمد على تفاعل العزم الكلي للنواة مع المجال المغناطيسي.

- الفيزياء الفلكية: يلعب دوراً في تحديد خصائص النجوم النيوترونية.

5-الطبقات النووية:

نستخدم المصطلحات الطيفية نفسها التي يتم استخدامها في الفيزياء الذرية من أجل وصف الحالات الطاقية في الفيزياء النووية وفق التالي:

ℓ	0	1	2	3	4	5
رمز السوية	s	P	d	F	g	h

ويكون رمز السوية الطاقية النووية $\upsilon\ell_j$ فمن أجل حالة طاقية تمتلك الأعداد الكمية التالية:

*العلاقات مأخوذة من كتاب Introductory nuclear physics, Kenneth S. Krane

n=2, l=2, s=1/2⟹ $j = \ell \mp s$

$$j = \frac{5}{2}, \quad \frac{3}{2}$$

حيث $n = 2\left(\upsilon - 1\right) + \ell$ ، بالتعويض عن قيمة n و ℓ نجد قيمة $\upsilon = 1$

فيكون رمز السوية الطاقية النووية هو: $1D_{5/2}, 1D_{3/2}$.

6-تجميع النيكليونات والسويات النووية:

عند اتحاد نكليونين أو أكثر لتكوين النواة فأن الحالة الكمية الناتجة تُسمى بالسوية النووية وهذه السوية يمكن أن تكون السوية الأساسية أو أي سوية مثارة للنواة وتتصف كل سوية بقيمة خاصة للعزم الحركي الكلي.

ان طريقة تجميع العزم الحركي المداري والعزم الحركي السبيني للنيكليونات ضمن النواة من أجل الحصول على العزم الحركي الكلي تتعلق بنوع التفاعل الموجود بينهما.

يُستخدم عادةً في الفيزياء الذرية نوعان من التجميع هما: طريقة تجميع العزم الحركي السبيني مع العزم الحركي المداري والمسماة بطريقة التجميع سبين-مدار وتُرمز لها ب L-S. وطريقة تجميع العزوم الحركية الكلية وتُرمز لها ب j-j.

ونستخدم هاتين الطريقتين في تجميع العزوم الحركية للنيكليونات في النواة. سندرس أولاً طريقة التجميع L-S.

a) طريقة التجميع L-S:

يُعتبر في هذا التجميع أن التأثير المتبادل بين العزوم الحركية المدارية $\vec{\ell}$ والعزوم الحركية السبينية $\vec{s}$ للنيكليونات يكون مهملاً ولكن بالمقابل فأن العزوم المدارية $\vec{\ell}$ تتجمع بقوة بين بعضها وتُعطي المحصلة $\vec{L}$. وكذلك نفس الشيء بالنسبة للعزوم الحركية السبينية حيث تكون المحصلة $\vec{S}$. وبعد الحصول على العزم الحركي المداري المحصل $\vec{L}$ والعزم الحركي السبيني المحصل $\vec{S}$ فأن $\vec{L}$ و $\vec{S}$ يجتمعان بدورهما لتشكيل العزم الحركي الكلي للسوية النووية $\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$. تُستخدم هذه الطريقة في حالة العناصر الخفيفة.

يتم ترميز السوية النووية على الشكل التالي: $^{2s+1}L_J$ حيث 2s+1 هو التعددية.

مثال: من أجل L=0 ، S=1/2 فأن J=L+S =1/2 وبالتالي فأن السوية النووية هي $^2S_{1/2}$.

ومن أجل L=1، S=1/2 فأن $J = L \mp S = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}$ وبالتالي فأنه لدينا سويتين نوويتين هما: $^2P_{3/2}$ ، $^2P_{1/2}$.

b) طريقة التجميع j-j:

تُستخدم هذه الطريقة في حالة العناصر الثقيلة. مثال: نفترض أنه لدينا نكليون على السوية المقابلة لعزم مداري $\ell = 0$ أي السوية s يجتمع مع نكليون على السوية المقابلة لعزم مداري $\ell = 1$ أي السوية p. يجتمع هذين النيكليونين وفق الطريق j-j كمايلي:

نحسب العزم الحركي الكلي للنيكليون الأول:

*العلاقات مأخوذة من كتاب Introductory nuclear physics, Kenneth S. Krane

$$\ell = 0, s = \frac{1}{2} \Longrightarrow\ j_1 = \ell + s = \frac{1}{2}$$

والعزم الحركي الكلي للنيكليون الثاني:

$$\ell = 1, s = \frac{1}{2} \Longrightarrow\ j_2 = \ell \mp s = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}$$

يتم تجميع j_1 و j_2 على مرحلتين:

الأولى: تُمثل $j_1 = j_2 = \frac{1}{2}$ وتُعطي $J = j_1 \mp j_2 = \frac{1}{2} \mp \frac{1}{2} \Longrightarrow J = 0,1$

الثانية: تُمثل $j_1 = \frac{1}{2}, j_2 = \frac{3}{2}$ وتُعطي $J = j_1 \mp j_2 = \frac{1}{2} \mp \frac{3}{2} \Longrightarrow J = 1,2$

هذا يعني أن عملية التجميع تؤدي الى أربع قيم مختلفة للعزم الحركي الكلي J، يمثل كل منها سوية محددة. ويتم تمثيل السويات الأربع على النحو التالي:

$$(s_{1/2}, p_{1/2})_0,\ (s_{1/2}, p_{1/2})_1,\ (s_{1/2}, p_{3/2})_1,\ (s_{1/2}, p_{3/2})_2$$

حيث يوضع بين قوسين الرمزين المعبرين عن الحالة الافرادية للنيوكليونين بتابعية قيمة j و ℓ لكل منهما. وتوضع قيمة J الناتجة كدليل في الأسفل من الجهة اليمنى.

7- العزم المغناطيسي:

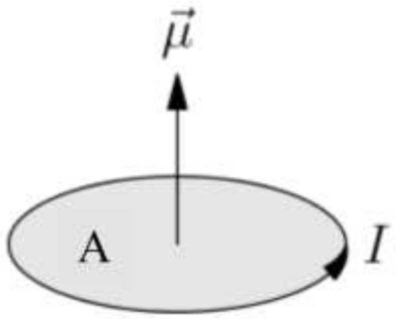
- **العزم المغناطيسي المداري:**

أولاً- دراسة كلاسيكية:

لنعتبر تيار I يمر في حلقة دائرية تُحدد سطحاً مستوياً A. ان العزم المغناطيسي $\vec{\mu}$ المرافق لهذا التيار هو شعاع ناظمي على السطح:

$$\vec{\mu} = \frac{1}{c}\ I\ A\ \vec{n} \quad (1)$$

حيث c سرعة الضوء و $\vec{n}$ وحدة الشعاع الناظم الذي يتجه مع اتجاه $\vec{\mu}$.



الشكل 2: تشكل العزم المغناطيسي عند مرور التيار في حلقة دائرية مساحة سطحها A.

اذا كان التيار السابق I ناتجاً عن جسيم ذو شحنة q وكتلة m، يرسم مسار دائري نصف قطره r بسرعة v فأن:

$$I = \frac{qv}{2\pi r} \qquad (2)$$

بتعويض 2 في 1 وضرب طرفي العلاقة وقسمتها على 2m نحصل على:

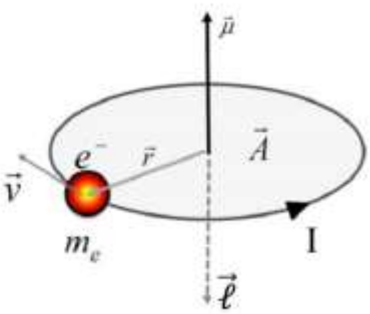
$$\vec{\mu} = \frac{1}{c}\frac{qv}{2\pi r}\pi r^2 \frac{2m}{2m}\vec{n} = \frac{q}{2mc}(\mathrm{rmv})\vec{n} \quad (3)$$

وبما أن العزم المداري يُعطى كلاسيكياً من الجداء الخارجي لكمية الحركة مع نصف القطر الذي يتحرك عليه الجسيم:

$$\vec{L} = m\vec{v}.\vec{r}$$

فأن العزم المغناطيسي المداري يُعطى بالعلاقة:

$$\vec{\mu}_l = \frac{q}{2mc}\vec{L} \qquad (4)$$



الشكل 3 تشكل العزم المغناطيسي عند مرور تيار ينتج عن حركة جسيم مشحون e^- و كتلته m_e.

*العلاقات مأخوذة من كتاب Introductory nuclear physics, Kenneth S. Krane

عندما يكون الجسيم المتحرك على المدار الدائري هو الكترون فأننا نعوض عن الشحنة $q=-e$ والكتلة ب m_e: $\mu_l=\frac{-e}{2m_e\,c}\,\vec{L}$ ونسميه بالعزم المغناطيسي المداري للالكترون.

عندما يكون الجسيم المتحرك على المدار الدائري هو بروتون فأننا نعوض عن الشحنة $q=+e$ والكتلة ب m_p: $\mu_l=\frac{+e}{2m_p\,c}\,\vec{L}$ ونسميه بالعزم المغناطيسي المداري للبروتون.

عندما يكون الجسيم المتحرك على المدار الدائري هو نترون فأن $\mu_l=0$ لأن شحنة النترون معدومة.

ثانياً-دراسة كمية:

تُعطى قيمة L وفق قوانين الكم بالعلاقة:

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

نعوض هذه القيمة في العلاقة (4) نجد:

$$\mu_l=\frac{q}{2mc}\sqrt{\ell(\ell+1)}\,\hbar \qquad (5)$$

ونُعرف من العلاقة 5 مايُسمى بمغنيتون Bohr $\mu_B=\frac{q\hbar}{2mc}$. وهو يتغير حسب الجسيم المشحون المتحرك فاذا كان الكتروناً فأن $\mu_B=\frac{e\hbar}{2m_ec}$ وبالتالي فأن العزم المغناطيسي المداري الالكتروني: $\vec{\mu}_{\ell_e}=-\mu_B\,\vec{L}$. أما اذا كان الجسيم المشحون بروتوناً فأن مغنيتون Bohr $\mu_B=\frac{e\hbar}{2m_pc}$ و يُسمى بالمغنيتون النووي μ_N وبالتالي فأن العزم المغناطيسي المداري البروتوني $\vec{\mu}_{\ell_p}=\mu_N\,\vec{L}$

- **العزم المغناطيسي السبيني:**

العزم المغناطيسي السبيني هو خاصية كمومية أساسية للبروتونات والنيوترونات داخل النواة، ناتجة عن دورانها حول محورها الذاتي.

السبين هو خاصية كمومية تشبه الزخم الزاوي الكلاسيكي، لكنها لا تعتمد على حركة فيزيائية حقيقية. ويكون سبين البروتون والنترون يساوي $s=\frac{1}{2}$. يتشكل العزم المغناطيسي السبيني للبروتونات بسبب شحنة البروتون. النترون ليس له شحنة ولكنه يمتلك عزم مغناطيسي سبيني نتيجة مكوناته (كواركات مشحونة).

ويُعطى العزم المغناطيسي السبيني للنيكليونات بالعلاقة:

$$\vec{\mu}_s=g_s\left(\frac{e}{2m_pc}\right)\vec{s}$$

$$\mu_s=g_s\left(\frac{e\hbar}{2m_pc}\right)s=\ g_s\mu_N s$$

حيث g_s هو عامل لاندي للسبين يساوي 5.58 للبروتونات و -3.83 للنترونات.

بالتعويض عن قيمة عامل لاندي فنجد أن العزم المغناطيسي السبيني:

للبروتونات $\mu_{s_p}=2.793\,\mu_N$، وللنترونات $\mu_{s_n}=-1.913\,\mu_N$. وهذه القيم هي قيم تجريبية أما نظرياً فكان من المتوقع أن $\mu_{s_p}=1\,\mu_N$، $\mu_{s_n}=0$ وهذا الفرق كان دليلاً على وجود مكونات (كواركات) داخل البروتونات والنترونات.

العزم المغناطيسي الكلي للنواة:

نحصل على العزم المغناطيسي الكلي للنواة بجمع العزوم المغناطيسية المدارية والسبينية لجميع النيكليونات. حيث يكون العزم المغناطيسي المداري لجميع البروتونات:

*العلاقات مأخوذة من كتاب Introductory nuclear physics, Kenneth S. Krane

$$\vec{\mu}_{\ell_p} = \mu_N g_{\ell_\alpha} \sum_{\alpha=1}^{Z} \overrightarrow{\ell_\alpha}$$

ويكون العزم المغناطيسي الكلي للنواة:

$$\vec{\mu} = \mu_N \sum_{\alpha=1}^{A} (g_{\ell_\alpha} \vec{\ell}_\alpha + g_{s_\alpha} \vec{s}_\alpha)$$

حيث $g_{\ell_\alpha} = 1$ للبروتونات ، $g_{\ell_\alpha} = 0$ للنترونات، $g_{s_\alpha} = 5.58$ للبروتونات و $g_{s_\alpha} = -3.83$ للنترونات.

العزم المغناطيسي الكلي للنواة هو مجموع العزوم المغناطيسية المدارية للبروتونات و العزوم المغناطيسية السبينية للبروتونات والنترونات.

عند تطبيق حقل مغناطيسي خارجي وفق الاتجاه z فأن العزم المغناطيسي الكلي للنواة يأخذ 2J+1 اتجاه (مسقط) وفق الاتجاه z. حيث J هو العدد الكمي المرتبط بالعزم الزاوي الكلي للنواة.

نموذج شميث لحساب العزم المغناطيسي الكلي للنواة:

تُبين التجارب أن العزم الزاوي الكلي للنوى ذات العدد الزوجي من البروتونات والنترونات يكون معدوم دوماً. وهذا يدل على وجود تفاعلات داخل النواة تُفضل تجميع النيكليونات في أزواج تؤدي الى انعدام عزومها.

اقترح شميث بناءً على هذه النتائج التجريبية نموذجاً يسمح بإيجاد العزم المغناطيسي للنوى ذات العدد الكتلي الفردي. حيث أن العزم الزاوي الكلي للنيكليون الفردي الأخير هو الذي يُساهم في تحديد العزم الزاوي الكلي للنواة لأن جميع النيكليونات الأخرى المتبقية (زوجية-زوجية) تتجمع في أزواج لتعطي عزماً زاوياً كلياً يساوي الصفر.

وهكذا فأن العزم المغناطيسي الكلي للنواة يأتي نتيجة مساهمة هذا النيكليون الفردي، وعليه عندما يكون النيكليون الفردي بروتوناً فأن العزم المغناطيسي الكلي هو حاصل جمع العزم المغناطيسي المداري والسبيني للبروتون، وعندما يكون نتروناً فأن العزم المغناطيسي الكلي هو العزم المغناطيسي السبيني للنترون.

النيكليون الفردي يمكن أن يتواجد على السوية الموافقة ل $j = \ell + s$ أو الموافقة ل $j = \ell - s$.

يكون العزم المغناطيسي الكلي من أجل نيكليون فردي موجود في السوية $j = \ell + s$:

$$\mu = \left[g_\ell \left(j - \frac{1}{2}\right) + \frac{1}{2} g_s\right] \mu_N \ *$$

ويكون العزم المغناطيسي الكلي من أجل نيكليون فردي موجود في السوية $j = \ell - s$:

$$\mu = \frac{1}{j+1}\left[j\left(j + \frac{3}{2}\right) g_\ell - \frac{1}{2} g_s\right] \mu_N \ *$$

8-العزم الكهربائي رباعي الأقطاب:

يقدم هذا العزم الكهربائي رباعي الأقطاب Q وصفاً عن شكل توزع الشحنة داخل النواة.
فعندما $Q = 0$ فهذا يعني أن توزع الشحنة داخل النواة يمتلك تناظر كروي، أما عندما $Q > 0$

*العلاقات مأخوذة من كتاب Introductory nuclear physics, Kenneth S. Krane

فهذا يعني أن توزع الشحنة يُعطي النواة شكلاً اهليليجياً متطاولاً (شكل سيجار)، وعندما $Q<0$ فأن توزع الشحنة يأخذ شكلاً اهليليجياً مفلطح (شكل قرص).
يتم حساب العزم Q في النموذج الطبقي باستخدام المؤثر $3Z^2-r^2$، في الحالة التي يكون فيها العزم الزاوي الكلي للجسيم المفرد يمتلك مسقط أعظمي على طول المحور z (أي $m_j=+j$).

ان العزم الكهربائي ثنائي القطب d للنواة هو مقدار تتمتع به جملة مكونة من شحنتين نقطيتين متساويتين بالقيمة q ومتعاكستين بالإشارة وتكون قيمة العزم $d=qa$ حيث a هي المسافة الفاصلة بين الشحنتين. ويمكن للعزم ثنائي القطب أن يتكون من شحنتين سالبة وموجبة أو من شحنة موجبة (سالبة) وأخرى صفرية (جسيم معتدل). وبما أن النواة تتألف من بروتونات (موجبة) ونترونات (معتدلة)، ففي حال عدم انطباق مركزي ثقل البروتونات والنترونات يكون للنواة عزم كهربائي ثنائي الأقطاب.
العزم الكهربائي رباعي الأقطاب يتكون من عزمين ثنائيي الأقطاب ومتوجهين توجهاً متعاكساً ومنزاحين مسافة b أحدهما عن الآخر فيكون العزم الرباعي لهذه الجملة:

$$Q = 2db$$

$$Q = 2qab$$

اذا افترضنا أن شحنة النواة موزعة ضمنها بكثافة حجمية ρ وبحيث يكون للجملة محور تناظر z فأن العزم الكهربائي رباعي الأقطاب يُحسب من العلاقة:

$$Q = \int \rho\,(3Z^2-r^2)\,dV$$

فاذا كانت ρ ثابتة القيمة (لا تتوقف على Z أيضاً) فان Q يتحدد من شكل النواة فقط.
يُقاس Q بواحدة barn حيث $1b=10^{-24}cm^2=10^{-28}m^2$.

ويتم حساب Q كمياً من العلاقة التالية في حالة البروتون المفرد:

$$Q_{sp} = -\frac{2j-1}{2(j+1)}r^2$$

حيث

$$r^2 = \frac{3}{5}R^2 = \frac{3}{5}R_0^2A^{2/3}$$

إشكالية أكثر إثارة للقلق تتعلق بالنوى التي تحتوي على نترون فردي. النترون غير المشحون خارج الغلاف الفرعي الممتلئ لا ينبغي أن يكون له أي عزم رباعي أقطاب من الأساس. لكن القياسات التجريبية تُبين وجود عزم كهربائي رباعي الأقطاب للنوى ذات النترون المفرد وتكون قيمه عموماً أصغر من نظيرتها ذات البروتون الفردي، إلا أنها بالقطع ليست صفراً.

عندما يحتوي الغلاف الفرعي على أكثر من جسيم واحد، يمكن لجميع الجسيمات في الغلاف الفرعي أن تساهم في العزم رباعي الأقطاب. وبما أن السعة القصوى لأي غلاف فرعي هي 2j+1 ، فإن عدد النكليويات في الغلاف الفرعي غير الممتلئ سيكون في المدى من 1 إلى 2j.
العزم الرباعي القطبي المقابل هو:

$$Q = Q_{sp}\left[1-2\frac{n-1}{2j-1}\right]$$

حيث n هو عدد النيكليونات في الغلاف الفرعي $1\le n\le 2j$ و Q_{sp} هو العزم رباعي الأقطاب للنيكليون المفرد.
عندما يكون $n = 1$، فإن $Q = Q_{sp}$، ولكن عندما يكون $n = 2j$ (ما يُقابل غلافاً فرعياً ينقصه نيكليون واحد ليكون ممتلئاً)، فإن $Q = -Q_{sp}$، و هو ما نسميه عزوم رباعية الأقطاب لحالات الفراغ. وبدرجة

*العلاقات مأخوذة من كتاب Introductory nuclear physics, Kenneth S. Krane

تقريب جيدة جداً يكون Q(جسيم) = -Q(فراغ). أي أن عزوم رباعية الأقطاب لحالات الفراغ تكون موجبة ومعاكسة في الإشارة لعزوم رباعية الأقطاب لحالات النيكليون الفردي.

9-النوعية:

في الفيزياء النووية فأن النوعية (Parity) هي خاصية تناظر الدالة الموجية للنواة تحت انعكاس الاحداثيات المكانية:

$$P\Psi(\vec{r}_1,\vec{r}_2,\dots.) = \Psi(-\vec{r}_1,\vec{r}_2,\dots.)$$

حيث P مؤثر العكس في الفراغ وهو يعكس احداثيات الموضع.

تُعد النوعية من الخصائص المهمة في فهم حالات النواة وتفاعلاتها. وهي تُعرف كمايلي:

- اذا كانت الدالة الموجية للنواة تبقى كماهي عند انعكاس الاحداثيات$\Psi(-\vec{r}) = \Psi(\vec{r})$ فان النواة لها نوعية زوجية ويُرمز لها P=+1 أو +.
- اذا انعكست إشارة الدالة الموجية $\Psi(-\vec{r}) = -\Psi(\vec{r})$ فان النواة لها نوعية فردية ويُرمز لها P=-1 أو -.

كيف تُحدد النوعية للنواة؟

تتحدد نوعية النواة من نوعية النيكليونات المكونة لها كمايلي:

$$P_{tot} = P_{int} * P_{orb}$$

حيث P_{int} تُمثل النوعية الذاتية للمكونات فهي زوجية للالكترون والبروتون والنترون. و P_{orb} تُمثل النوعية المدارية وتُحدد من العزم المداري الكلي للنيكليونات $\sum_i \ell_i$. فاذا كان للعزم المداري الكلي قيمة زوجية فأن النوعية تكون زوجية وإذا كانت القيمة فردية فأن النوعية تكون فردية.

وحسب ميكانيك الكم فأن النوعية تُعطى بالعلاقة $(-1)^\ell$ حيث تبين أنه عندما نؤثر على التابع $Y_\ell^m(\theta,\varphi)$الذي يمثل القسم الزاوي من التابع الموجي بمؤثر العكس P:

$$PY_\ell^m(\theta,\varphi) = Y_\ell^m(\pi-\theta,\varphi+\pi) = (-1)^\ell Y_\ell^m(\theta,\varphi)$$

يمثل $(-1)^\ell$ القيمة الخاصة لمؤثر العكس P.

مثال: لتحديد النوعية لنواة الهليوم ${}_2^4He$ التي تحتوي بروتونين ونترونيين:

$$P_{He} = P_p * P_n * (-1)^\ell$$

حيث $P_n = P_p = +1$ النوعية الذاتية للبروتونات والنترونات. و $\ell = 0$ لأن البروتونين والنترونيين يتواجدان على السوية $1s_{\frac{1}{2}}$. بالتالي فأن نوعية نواة الهيليوم تكون زوجية.

في النوى التي يكون فيها توزع البروتونات والنترونات (Z فردي- N زوجي) أو (Z زوجي- N فردي) فأن النوعية تتحدد من العزم المداري للنيكليون الفردي $(-1)^\ell$.

في النوى التي يكون فيها توزع البروتونات والنترونات (Z فردي- N فردي) فالنوعية تتحدد من العزم المداري للبروتون المفرد والنترون المفرد $(-1)^{\ell_p+\ell_n}$.

*العلاقات مأخوذة من كتاب Introductory nuclear physics, Kenneth S. Krane

في النوى التي يكون فيها توزع البروتونات والنترونات (Z زوجي- N زوجي) فالنوعية تتحدد من محصلة العزم المداري $\sum_i \ell_i$ وبالتالي فالنوعية تكون زوجية.

ونذكر أن ترميز السوية الطاقية النووية يُرمز لها باستخدام العزم الكلي والنوعية كمايلي: J^P.
مثال: السوية الطاقية لنواة الليثيوم $^{7}_{3}Li$ (Z= 3 و N= 4) يُرمز لها ب $(\frac{3}{2})^-$.

تمارين:

1-احسب العزم النووي الكلي والنوعية للنوى التالية: الليثيوم $^{7}_{3}Li$- الأوكسجين $^{17}_{8}O$- الأوكسجين $^{15}_{8}O$- الكربون $^{13}_{6}C$- الفلور $^{19}_{9}F$- الكربون $^{12}_{6}C$.

2-ليكن لدينا نواة تحتوي على بروتون مفرد يتواجد في السوية $1d_{5/2}$ ونترون مفرد في السوية $1f_{7/2}$.

احسب العزوم النووي الكلي باستخدام طريقة التجميع L-S وطريقة التجميع j-j.

3-احسب العزم المغناطيسي للنوى التالية : الأوكسجين$^{17}_{8}O$ - و البيزموت $^{209}_{83}Bi$- الأوكسجين $^{16}_{8}O$ - الكربون $^{13}_{6}C$.

4-احسب العزم الكهربائي رباعي الأقطاب بواحدة البارن وحدد شكل توزع الشحنة لنواة البوتاسيوم $^{39}_{19}K$ - ولنواة الأوكسجين $^{16}_{8}O$ - ولنواة الأوكسجين $^{17}_{8}O$.

5- احسب العزم الكهربائي رباعي الأقطاب بواحدة البارن لنواة لوتيتيوم $^{175}_{71}Lu$ اذا افترضنا أن توزع الشحنة يأخذ شكل اهليليجي متطاول (شكل سيجار) فأن معادلة العزم الكهربائي تُعطى بالعلاقة التالية:

$$Q = \frac{2}{5} Z(2c^2 - a^2 - b^2)$$

حيث $a = b = 6\ fm$ و $c = 7.2\ fm$ و Z=71 عدد البروتونات و $1fm^2 = 10^{-2}b$.

*العلاقات مأخوذة من كتاب Introductory nuclear physics, Kenneth S. Krane