كلية العلوم

القسم : الفيزياء

السنة : الرابعة

المادة : فيزياء نووية٢

المحاضرة: السادسة/نظري/د. سمر عمران

{{ مكتبة A to Z }}

Facebook Group : مكتبة A to Z

كلية العلوم ، كلية الصيدلة ، الهندسة التقنية

2025

يمكنكم طلب المحاضرات برسالة نصية (SMS) أو عبر(What's app-Telegram)على الرقم 0931497960

المحاضرة السادسة لمقرر الفيزياء النووية 2 – د. سمر عمران

النماذج النووية

إنَّ النماذج النووية هي عبارة عن تمثيلات نظرية مبسطة لتجمع النكليونات وتفاعلاتها مع بعضها البعض في النوى الذرية. بوجد العديد من النماذج وكل نموذج استطاع أن يشرح جزء من خصائص وميزات التركيب النووي هذا يعني أنَّ كل نموذج يمتلك إمكانيات محددة.

القاسم المشترك بين جميع النماذج النووية المعروفة حتى الآن هو البحث عن فهم أوضح للبنية النووية وهذا يتطلب فهم أكبر للقوى النووية المسيطرة على هذه البنية.

اعتمدت النماذج النووية على فكرتين متناقضتين:

الفكرة الأولى: اعتبرت أنَّ كلّ نكليون لا يخضع إلا لكمون وسطي، وحركته مستقلة عن حركة النكليونات الأخرى (أيّ أنَّ التأثيرات المتبادلة بينه وبين النكليونات الأخرى مهملة). وبالتالي يمكن القول بأنَّ احتمال تبعثر أو انتثار نكليونين في النواة ضعيف، أو أنَّ المسار الحرّ الوسطي لكل نكليون على انفراد يكون كبيراً. (المسار الحرّ الوسطي: المسافة التي يقطعها الجسيم دون أن يعاني أي تصادم أو تبعثر). ويطلق على هذه النماذج التي تنتمي إلى هذه الفكرة **نماذج الجسيمات المستقلة** كالنموذج الطبقي ونموذج النكليون المفرد ونموذج غاز فيرمي.

الفكرة الثانية: اعتبرت أنَّ كلّ نكليون يتفاعل بشدة وبشكل قوي مع جميع النكليونات الأخرى وعلى الأخص النكليونات القريبة منه (بسبب المدى القصير للقوى النووية التي تؤثر بين النكليونات). وبالتالي سيكون المسار الحرّ الوسطي للنكليون قصير جداً بالمقارنة مع نصف القطر النووي. ويطلق على هذه النماذج التي تنتمي إلى هذه الفكرة **نماذج التأثيرات المتبادلة القوية أو الشديدة** كنموذج القطرة السائلة ونموذج النواة المركبة.

بالإضافة إلى النماذج التي تنتمي إلى الفكرتين السابقتين حيث لا يستطيع أي منهما أن يمثل الحقيقة بكاملها، توجد نماذج وسيطية أو توفيقية قامت بعملية التوفيق بين الفكرتين كالنموذج الجماعي والنموذج الضوئي.

نموذج القطرة السائلة:

يُعتبر هذا النموذج من النماذج النووية التي حققت نجاحاً في حساب بعضاً من خصائص النواة ، لا سيما طاقة الارتباط للنواة واعتمد هذا النموذج على عبارات تحليلية (رياضية) متقدمة وعلى مفاهيم فيزيائية جديدة واستند إلى بعض الفرضيات نذكر منها:

1- النواة عبارة عن مادة غير قابلة للانضغاط بحيث أنَّ نصف القطر النووي يتناسب مع الكتلة الذرية (العدد الكتلي) وفق العلاقة $R \sim A^{\frac{1}{3}}$

2- القوى النووية متماثلة لكل نكليون وهي بشكل خاص لا تتعلق بطبيعة النكليون أي أنها لا تميز بين النكليونات (نترون أو بروتون).

3- القوى النووية ذات مدى قصير أقل من نصف القطر الكروي ولكن تأثيرها أكبر من تأثير أية قوى موجودة في الطبيعة.

إنَّ الأفكار التي سمحت ببناء هذا النموذج اعتمدت على المزج بين الأفكار النظرية والأفكار التجريبية لذلك أُطلق على العلاقة التي تعبّر عن علاقة طاقة ارتباط النواة بعلاقة نصف تجريبية، وتُعطى بالعلاقة التالية:

$$B(A,Z) = a_V A - a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - a_a \frac{(N-Z)^2}{A} - \delta + \xi \qquad (*)$$

حيث a_V و a_s و a_c و a_a ثوابت مستقلة عن A و Z (العدد الكتلي والعدد الذري)، وتأخذ قيمها العددية بناءً على النتائج التجريبية لذلك تسمى بالثواب التجريبية.

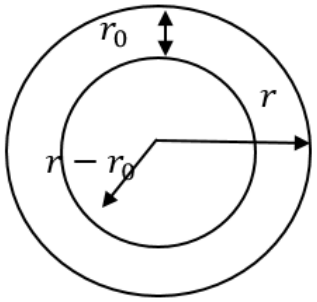
N : عدد النترونات ، Z: عدد البروتونات ، δ: ثابت يتعلق بالنواة.

سنناقش حدود العلاقة السابقة بالتفصيل نظراً لأهميتها:

الحدّ الأول: $B_V = a_V A$ طاقة الارتباط الحجمية، يتعلق هذا الحدّ بحجم النواة الذي يساوي $\frac{4}{3}\pi R^3$ وذلك بفرض أنَّ النواة كروية الشكل، ويتناسب مع العدد الكتلي A.

الحدّ الثاني: $B_s = a_s A^{2/3}$ طاقة الارتباط السطحية، يتعلق هذا الحدّ بسطح النواة، وهو من الحدود الأكثر أهمية في العلاقة الأخيرة لأنه يعطينا فكرة حول عدد النكليونات الموجودة في المركز أو البنية الداخلية للنواة وكذلك عدد النكليونات المتوضعة بالقرب من القشرة الخارجية للنواة (سطح النواة). ونشير إلى أنَّ هذا الحدّ يسيطر من أجل النوى الخفيفة.

مثال: نعلم أنَّ نصف قطر النواة الكروية الشكل يساوي $r = r_0 A^{\frac{1}{3}}$ فإذا اعتبرنا النواة تشابه قطرة السائل ذات شكل كروي وأخذنا قشرة رقيقة من سطحها سماكتها r_0 من مرتبة أبعاد النكليون كما في الشكل التالي فيمكن أن نكتب ما يلي:



إنَّ الحجم الكلي لهذه النواة التي نصف قطرها r يساوي:

$$V_t = \frac{4}{3}\pi r^3 = \frac{4}{3}\pi\left(r_0 A^{1/3}\right)^3 = \frac{4}{3}\pi r_0^3 A$$

بينما حجمها الداخلي الذي نصف قطره يساوي $(r - r_0)$:

$$V_i = \frac{4}{3}\pi(r - r_0)^3 = \frac{4}{3}\pi\left(r_0 A^{1/3} - r_0\right)^3 = \frac{4}{3}\pi r_0^3\left(A^{1/3} - 1\right)^3$$

وإذا حسبنا النسبة بين الحجمين:

$$\frac{V_i}{V_t} = \frac{\frac{4}{3}\pi r_0^3\left(A^{1/3} - 1\right)^3}{\frac{4}{3}\pi r_0^3 A} = \frac{\left(A^{1/3} - 1\right)^3}{A}$$

وطبقنا العلاقة الناتجة على نواة الألمنيوم $^{27}_{13}Al$ نجد:

$$\frac{V_i}{V_t} = \frac{\left(27^{1/3} - 1\right)^3}{27} = \frac{8}{27}$$

أيّ أنَّ عدد النكليونات الموجودة في الحجم الداخلي يساوي 8 نكيلونات، وعدد النكليونات الموجودة في القشرة الخارجية يساوي $27 - 8 = 19$ وبالتالي فإنَّ النسبة بين حجم القشرة الخارجية والحجم الكلي يساوي:

$$\frac{V_s}{V_t} = \frac{19}{27}$$

ومنه نجد أنَّ حدّ السطح ذو أهمية كبيرة ويجب أخذه بعين الاعتبار.

الحدّ الثالث: $(\Delta B)_c = a_c \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}}$ طاقة الارتباط الناتجة عن التدافع الكولوني نتيجة التأثير المتبادل بين البروتونات ذات الشحنة الكهربائية الموجبة ضمن النواة. إنَّ مساهمة هذا الحدّ تنقص طاقة الارتباط $\frac{B}{A}$ وتبدو أهميته في النوى الثقيلة (أي من أجل قيم كبيرة لـ Z) أي من أجل $A \cong 60$ وما فوق.

إنَّ مساهمة هذا الحدّ من أجل النوى الخفيفة ضعيفة وذلك لأن شدّة التفاعل القوي أكبر بكثير من شدّة التفاعلات الكهربائية.

الحدّ الرابع: طاقة الارتباط اللاتناظرية أو اللامتناظرة.

إنَّ الطاقة التناظرية هي الفرق بين الطاقة النووية لنواة تمتلك N نترون و Z بروتون والنواة التي تمتلك عدداً متساوياً من النترونات والبروتونات $N = Z = \frac{A}{2}$ التي تدعى الإيزوبار isobare .

من أجل تصنيع النواة الأولى ابتداءً من نواتها الإيزوبارية، إذا كان n عدد البروتونات التي تمّ تحويلها إلى نترونات، نجد أنَّ:

$$N = \frac{1}{2}A + n \ , \ Z = \frac{1}{2}A - n \implies n = \frac{1}{2}(N - Z)$$

أي يجب صرف كمية من العمل تساوي:

$$n^2\Delta = \frac{1}{2}(N-Z)^2\Delta$$

بما أنَّ هذه العلاقة تأخذ دائماً قيمة موجبة، فطاقة الارتباط ستكون دائماً أقل من أجل نواة $N \neq Z$ منها من أجل نواة يكون فيها $N = Z$. علماً أنَّ Δ البعد بين حالات البروتونات أو حالات النترونات.

نشير إلى أنَّ هذا الحدّ يعكس سعي النواة لامتلاك نفس العدد من البروتونات والنترونات، وهذا واضح في النوى الخفيفة المستقرة التي يكون فيها $N = Z$ ، لكن ذلك لا يتحقق من أجل النوى الثقيلة بسبب أهمية الطاقة الكولونية التي تفضل زيادة عدد النترونات على عدد البروتونات.

الحدّ الخامس (طاقة التزاوج): إنَّ هذا الحدّ $\delta(A,Z)$ يأخذ بالحسبان التزاوج بين النكليونات. ويمثل خاصية عدم الاستقرار للنوى الزوجية البروتونات والنترونات بالمقارنة مع النوى الفردية – الفردية، حيث إنَّ النظائر المستقرة من النوع الأخير نادرة جداً في الطبيعة.

من أجل A فردي: $\delta = 0$

من أجل A زوجي: N,Z زوجيان: $\delta = -f(A)$

N,Z فرديان: $\delta = +f(A)$

حيث $f(A)$ موجب وبحسب فيرمي فإنَّ:

$$f(A) = a_p . A^{-3/4} . \delta \approx \frac{33MeV}{A^{3/4}} . \delta$$

باختصار:

$$\text{زوجية – زوجية} \longrightarrow (2p - 2n) \Longrightarrow -1$$

$$\text{فردية – فردية} \longrightarrow (1p - 1n) \Longrightarrow +1$$

$$\text{فردية – زوجية} \longrightarrow (2p - 1n) \Longrightarrow 0$$

الحدّ السادس (طاقة التزاوج): إنَّ هذا الحدّ ξ يأخذ بالحسبان مفهوم الطبقات النووية. وهو موجب إذا كانت قيم N أو Z قريبة من الأعداد السحرية التي سوف نتكلم عنها بشيء من التفصيل عند دراستنا لنموذج الطبقات.

هناك مفعول أُطلق عليه مفعول مافوق الاستقرار بقليل للنوى التي تمتلك عدد من النترونات أو البروتونات قريبة من $28, 50, 82, 128$. بعبارة أخرى نلاحظ وجود ترابطات قوية جداً كلما اقتربنا من الأعداد المذكورة السابقة والتي تدعى الأعداد السحرية.

يتم المقارنة بين القيم التجريبية لطاقة الفصل والتي نرمز لها بـ S_{exp} والقيم المحسوبة S_{cal} باستخدام العلاقة (*) النصف تجريبية.

وبالتعريف طاقة الفصل هي الطاقة اللازمة لنزع نكليون غير متزاوج من نواة فردية.

يمكن تحديد ثوابت العلاقة (*) من معطيات تجريبية متوفرة، ويمكن استخدام عدة مجموعات من القيم لهذه الثوابت.

وهذه القيم مقدرة بالـ MeV، حيث: $r_0 = 1.24\ Fermi\ ,\ \ 1u = 931MeV$

نموذج غاز فيرمي:

يُعد من أبسط النماذج النووية ويُنسب إلى نماذج النواة ذات الجسيمات المستقلة وهذا ما يجعل المعطيات التي يقدمها عن خواص النواة ومميزاتها قليلة.

تُعتبر المادة النووية العالية الكثافة وفق هذا النموذج شبيهة بغاز فيرمي المتحلل. هذا أيضاً حالة مكونات النجوم الباردة ذات الكثافة العالية مثل جزيئات الهيليوم -3 السائل بدرجات الحرارة المنخفضة، الإلكترونات الذرية ..... ونكليونات النواة.

تُعطى طاقة فيرمي في الحالة اللانسبية بالعلاقة التالية:

$$E_F = \frac{P_F^2}{2m} = \frac{\hbar^2}{2m}\left(\frac{3\pi^2 N}{V}\right)^{2/3}$$

علماً أنَّ: P_F كمية حركة فيرمي، N عدد الفرميونات، V الحجم، m كتلة الجسيم.

نقول أننا في حالة غاز فيرمي متحلل عندما تكون طاقة فيرمي E_F أكبر بكثير من KT، وهذا الشرط مكافئ لـ:

$$n\lambda_T^3 \gg 1$$

حيث $n = \frac{N}{V}$ عدد الفرميونات في واحدة الحجم، λ_T الأطوال الموجية الحرارية المرافقة ، K ثابتة بولتزمان.

نقول عن غاز فيرمي أنّهُ متحلل عندما تكون المسافة الوسطى بين مكوناته أصغر بكثير من الأطوال الموجية الحرارية المرافقة λ_T، حيث:

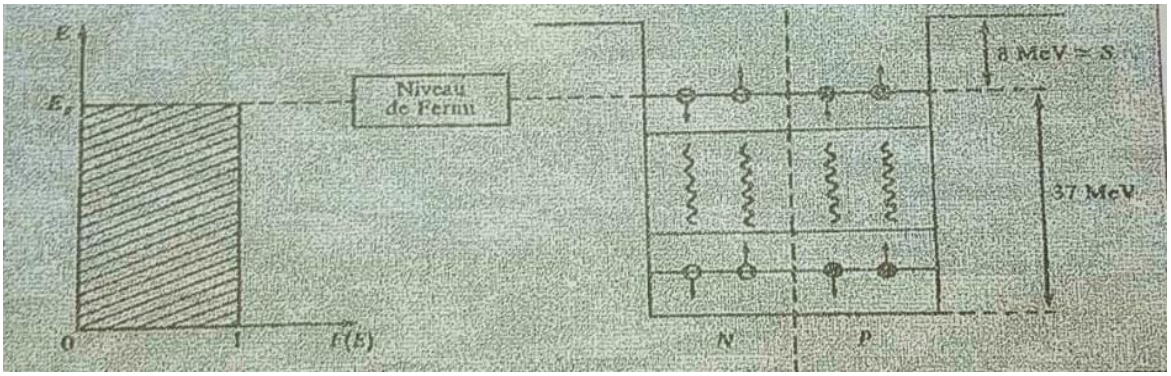
$$\lambda_T = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2mKT}}$$

ملاحظة نستخدم كثيراً في الفيزياء النووية نموذج غاز فيرمي من أجل تقدير مراتب المقدار الفيزيائي المأخوذ بعين الاعتبار ولتوضيح ذلك هناك مثالين: عمق حفرة الكمون النووي وطاقة اللاتناظر لكمون لاتناظري.

عمق حفرة الكمون النووي:

يوجد طريقة بسيطة لإيجاد مرتبة مقدار عمق حفرة الكمون الوسطي النووي، تتكون هذه الطريقة بملاحظة أنه من أجل تحرير نكليون من نواة ما (أي نزع نكليون من نواة) ذات الطاقة الحركية الأكثر ارتفاعاً (طاقة فيرمي) يجب إعطاؤه طاقة فصل قدرها S. وبما أنَّ الغاية هي الحصول على مرتبة مقدار فيزيائي، لنأخذ $N = Z$ و S من مرتبة طاقة ارتباط نكليون في النواة: $\frac{B}{A} \cong 8MeV$ يكون لدينا حسب الشكل:

$$V_0 \cong E_F + S \cong 37MeV + 8MeV \cong 45MeV$$



(a) (b)

الشكل: يمثل احتمال إشغال الحالات الكمومية (الكوانتية): هذا الاحتمال يساوي الواحد حتى مستوى فيرمي، وهو معدوم فوق هذا المستوى (a). يمكن وضع بروتونين ونترونين في كل حالة كوانتية حتى الانتهاء من عدد النكليونات (b).

في الواقع إنَّ عوامل كمون وود ساكسون المعطى بالعلاقة التالية:

$$V(r) = -\frac{V_0}{1 + \exp(\frac{r - R}{0.228a})}$$

والأكثر توافقاً وملائمة مع التجربة هي:

- من أجل نصف قطر الكمون: $R = r_0 A^{1/3}$ حيث $r_0 \cong 1.25\ Fermi$
- من أجل سماكة المساحة: $a \cong 3\ Fermi$
- من أجل عمق الكمون: $V_0 \cong 50\text{MeV}+$ حدود تصحيحية.

إنَّ مبدأ الحدّ التصحيحي المُضاف إلى عمق الحفرة الكمونية النووية يحمل اسم كمون لا تناظري مُعطى بالعلاقة التالية:

$$V_a = \pm 25 \frac{N - Z}{A} MeV$$

حيث: (+) من أجل البروتونات، (−) من أجل النترونات.

إنَّ وجود هذا الحدّ التصحيحي يرتبط بحد اللاتناظر للعلاقة نصف التجريبية (*) التي تكلمنا عنها في نموذج القطرة السائلة.

نموذج الطبقات النووية:

إنَّ قصور نموذج القطرة السائلة ونموذج غاز فيرمي عن دراسة البنية الداخلية للنواة دفع إلى ظهور نموذج الطبقات للنوى الكروية الذي يُعتبر حجر الزاوية في الفيزياء النووية.

يعتمد هذا النموذج على عدد كبير من النتائج التجريبية التي تمّ تجميعها والتي تظهر انتظام في الخصائص والميزات النووية. نذكر من هذه الخصائص:

1- ملاحظة الأعداد 126,82,50,28,20,8,2 والتي تسمى الأعداد السحرية وهي أعداد ترافق الطبقات النووية المغلقة أو المفتوحة.
2- النوى التي تحوي أعداد سحرية (نوى سحرية) هي عبارة عن نوى ذات طاقة ترابط قوي جداً وتحريض هذه النوى يتطلب طاقة أكبر بكثير من الطاقة اللازمة لتحريض النوى اللاسحرية.
3- عزم رباعي الأقطاب الكهربائي للنوى السحرية صغير جداً مما يدل على الشكل الكروي لهذ النوى.

إنَّ ميزات وخصائص النوى السحرية قاد الفيزيائيون النوويون لنقل هذا النموذج إلى نموذج مكون من جسيمات مستقلة، بحيث أنَّ كل شيء يحدث كما لو أنَّ التأثيرات المتبادلة بين نيكلون N_α وبقية النكليونات $(A-1)$ تشبّه بحفرة كمونية V_α .

الفكرة الأكثر بساطة هي أن نأخذ نفس الكمون النووي من أجل جميع نكليونات النواة (أي من أجل A نكليون) وبالتالي $V_\alpha = V$ ويسمى بالكمون المتوسط لأنه يمثل متوسط التأثيرات المتبادلة بين جسيمين على كامل الخارطة النووية وعادةً يكون مرفقاً بشدة تتناسب مع كثافة النكليونات.

وبما أنَّ النوى السحرية ذات شكل كروي متوازن وذات استقرار كبير، سنعتمد الكمون المتوسط الكروي والذي يُعطى بالصيغة الرياضية التالية: صيغة وود-ساكسون:

$$V(r) = -\frac{V_0}{1+\exp(\frac{r-R}{0.228a})}$$

حيث أنَّ قيم R وa وV_0 الأكثر توافقاً وملائمة مع التجربة هي:

- من أجل نصف قطر الكمون (نصف القطر النووي): $R = r_0 A^{1/3}$ حيث $r_0 \cong 1.25\ Fermi$، قيمة r_0 ثابتة في هذه العلاقة وتتغير تبعاً لنوع النواة خفيفة $r_0 = 1.3\ Fermi$ أو ثقيلة $r_0 = 1.2\ Fermi$.
- من أجل سماكة المساحة: $a \cong 3\ Fermi$

- من أجل عمق الكمون: $V_0 \cong 50\text{MeV}$

يُكتب هاميلتون النموذج على الشكل التالي:

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

حيث T_α الطاقة الحركية للنكليون α ، V_α الكمون المتوسط.

معرفة H_0 يسمح لنا بحلّ معادلة القيم الخاصة ونكتب:

$$H_0\Psi = E\Psi$$

من أجل A نكليون نكتب:

$$[T_\alpha + V(r_\alpha)]\Psi_\alpha(\vec{r}) = \varepsilon_\alpha\Psi_\alpha(\vec{r})$$

حيث Ψ_αو ε_α التابع الموجي الخاص للنكليون المدروس والقيمة الخاصة للطاقة على التوالي.

يمكن القول أنَّ الطاقة الخاصة للجملة النووية المدروسة تساوي مجموع الطاقات الخاصة للجسيمات الفردية وتُعطى بالعلاقة التالية:

$$E = \sum_{\alpha=1}^{A}\varepsilon_\alpha$$

والتابع الموجي الخاص يساوي جداء التوابع الخاصة الفردية:

$$\Psi(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots\dots\dots \vec{r}_A) = \prod_{\alpha=1}^{A}\Psi_\alpha(\vec{r}_\alpha)$$

سؤال: اذكر خصائص النوى السحرية؟

- استقرار عالٍ: هي النوى الأكثر استقراراً والتي تأخذ فيها N أو Z أو كلاهما أحد القيم العددية التالية: 126,82,50,28,20,8,2 (تسمى الأعداد السحرية) .
- طاقة ارتباط عالية: هي عبارة عن نوى ذات طاقة ارتباط قوي جداً وتحريض هذه النوى يتطلب طاقة أكبر بكثير من الطاقة اللازمة لتحريض النوى اللاسحرية.
- عزم رباعي الأقطاب الكهربائي للنوى السحرية صغير جداً مما يدل على الشكل الكروي لهذ النوى، وهذا يعود أيضاً إلى التوازن في القوى النووية.
- كل نواة تحوي أحد الأعداد السحرية لها عدد كبير من النظائر أو الايزوتونات المستقرة وطاقة فصل النترونات فيها عالية جداً .

- مقاومة عالية للانشطار: تُظهر النوى السحرية مقاومة أكبر للانشطار النووي التلقائي.
- وفرة طبيعية عالية (أكثر انتشاراً في الطبيعة): بعض النوى السحرية مثل Pb^{208}(82 بروتون و 126 نترون) تكون أكثر وفرة في الطبيعة بسبب استقرارها.
- نصف عمر طويل: غالباً ما تكون النظائر ذات النوى السحرية أكثر ثباتاً وعمراً أطول.
- النوى السحرية المغلفة بالكامل (بروتونات ونترونات سحرية) سبينها صفر أما إذا كانت سحرية بجانب واحد فقط قد يكون سبينها ليس صفراً.
- التكافؤ غالباً موجب أما الشحنة فتعتمد على عدد البروتونات وليست بالضرورة موجبة بالكامل.

أمثلة على النوى السحرية:

He^4 (2 بروتون و 2 نترون)

O^{16} (8 بروتون و 8 نترون)

Ca^{48} (20 بروتون و 28 نترون)

Pb^{208} (82 بروتون و 126 نترون)