Study of The Properties of The Transition Strengths $|M(E2)|^2$ and The Reduced Transition Probabilities B(E2) Of Even-Even Hafnium Hf Nuclei

Yara Raeef Ranjous*
Dr. Haisam Ibrahim Jbeli**

(Received 15 / 4 / 2026. Accepted 10 / 6 / 2026)

□ ABSTRACT □

The distribution of matter in the nucleus of an atom is One of the main physical features, and it is the main focus of nuclear physics.Recently, the volume of research specializing in nuclear shapes has been steadily increasing, and large quantities of nuclear building coefficients are being compiled, providing an opportunity to discover new data on many nuclear deformations, especially quadrupole deformations. The nuclei of rare hafnium isotopes in the nuclear diagram are full of distorted nuclei, exhibiting many interesting phenomena related to nuclear structure.

In this research work, the transition Strengths and reduced transition probabilities from the ground state to the first excited state ($0^+ \rightarrow 2^+$) were calculated for a set of even-even neutron-rich $^{154-184}_{72}$Hf isotopes.

In addition, the parameters associated with reduced transition probabilities B(E2), such as the quadrupole moment Q_0 and the deformation coefficient β_2 for the $^{154-184}_{72}$Hf even-even nuclei, were calculated.Since the calculation of the transition Strengths $|M(E2)|^2$ depends on the total gamma width Γ of an excited state with a given mean lifetime (τ), We have explained the physics upon which the relationship between (Γ) and (τ) depends.Our work has shown that the transition Strengths, transition probability, quadrupole moment, and deformation parameter have relatively lower values for hafnium isotopes that have a neutron number close to the magic number N=82 or N=126.

Keywords: transition Strengths, transition probabilities, deformation parameter.

Copyright **:**Latakia University Journal (Formerly Tishreen) -Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

* **Master's student , Faculty of Science, Latakia University(Formerly Tishreen) , Latakia, Syria.**
yara.ranjous@latakia-univ.edu.sy
****Professor, Faculty of Science, Latakia University(Formerly Tishreen) , Latakia, Syria.**
haissamibrahimjubeli@latakia-univ.edu.sy

دراسة خصائص قوى الانتقال $|M(E2)|^2$ واحتمالات الانتقال المخفض $B(E2)$ لنوى الهافنيوم Hf الزوجية ـ الزوجية

يارا رئيف رنجوس *

د. هيثم إبراهيم جبيلي **

(تاريخ الإيداع 15 / 4 / 2026. قبل للنشر في 10 / 6/ 2026)

ملخّص

توزيع المادة في نواة الذرة هي إحدى السمات الفيزيائية الرئيسية، وهو مايُركز عليه علم الفيزياء النووية بشكل أساسي. تتزايد، في الآونة الأخيرة، الأبحاث المتخصصة في أشكال النوى باستمرار، ويتم تجميع كميات كبيرة من معاملات بناءالنوى، ويعتبر فرصة لاكتشاف بيانات جديدة حول العديد من التشوهات النووية، وخاصة التشوهات الرباعية الأقطاب. إن نوى نظائر الهافنيوم النادرة في المخطط النووي مليئة بنوى مشوهة، تُظهر العديد من الظواهر المثيرة للاهتمام المتعلقة بالبنية النووية.

في هذا العمل البحثي، حُسبت قوى الانتقال واحتمالات الانتقال المخفض من الحالة الأرضية إلى الحالة المثارة الأولى $(0^+ \rightarrow 2^+)$ لمجموعة من نظائر الـ $^{154-184}_{72}Hf$ الزوجية ـ الزوجية الغنية بالنيوترونات. ثم تم حساب المعاملات المرتبطة باحتمالات الانتقال المخفض $B(E2)$، مثل عزم رباعي الأقطاب Q_0 ومعامل التشوه β_2 للنوى $^{154-184}_{72}Hf$ الزوجية ـ الزوجية. وبما أن حساب قوى الانتقال $|M(E2)|^2$ يعتمد على عرض غاما الكلي Γ لحالة مثارة ذات متوسط عمر افتراضي معين (τ)، أوضحنا الفيزياء التي تعتمد عليها العلاقة التي تربط بين (Γ) و (τ). ويبيّن عملنا هذا أن قوى الانتقال، واحتمال الانتقال، وعزم رباعي الأقطاب، ومعامل التشوه، لها قيم أقل نسبياً لنظائر الهافنيوم التي تحتوي على عدد نيوتروني قريب من العدد السحري $N=82$ أو $N=126$.

الكلمات المفتاحية: قوى الانتقال، احتمالات الانتقال، معامل التشوه.

حقوق النشر : مجلة جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً)– سوريا، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص CC BY–NC–SA 04

مقدمة:

* طالبة ماجستير . كلية العلوم ـ جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً) ـ اللاذقية ـ سوريا .
yara.ranjous@latakia-univ.edu.sy
** أستاذ ـ كلية العلوم ـ جامعة اللاذقية ـ اللاذقية (تشرين سابقاً) اللاذقية ـ سوريا
haissamibrahimjubeli@latakia-univ.edu.sy

الذرة هي أصغر جزء من المادة التي تحتفظ بالخصائص الأساسية ولها مركز صغير يسمى النواة. تحتوي هذه النواة على نوعين من النيوكليونات المنفصلة (النيوترونات والبروتونات) وتحيط بها إلكترونات مدارية[1].

تتمتع النواة ذات الأعداد السحرية (8، 20، 28، 50، 82، و126) من النيوكليونات بطبقة مغلقة تعزز الشكل الكروي [2]. تأتي الأعداد السحرية من بنية طبقات النواة التي تُشبه بنية مدارات الإلكترونات.تُعرّف الطبقة بأنها عدة مستويات طاقة متقاربة، ومنفصلة بوضوح عن الطبقات الأخرى. عندما يكون للنواة طبقة رئيسية مملوءة ببروتونات أو بنيوترونات، فإنها تكون أكثر استقراراً من جاراتها، نظراً لأن فجوة الطاقة إلى الطبقات التالية كبيرة. وتؤدي هذه الفجوة إلى ظهور قيم طاقة انتقال كبيرة بين الحالة الأرضية والحالة المثارة الأولى، وعزم رباعي أقطاب منخفضٍ نسبياً[3].

توفر الخصائص النووية للحالات المثارة الأولى $\mathbf{2}^+$ في النوى الزوجية ـ الزوجية، معلومات مهمة عن تطور الخصائص النووية والدراسات لنموذج الطبقات. يُعتبر احتمال الانتقال المخفض لعزم رباعي الأقطاب الكهربائي مهم لمعلومات البنية النووية. في النوى الزوجية ـ الزوجية، أيضاً تُعتبر قوة انتقال أشعة غاما عاملاً هاماً، وتُستخدم لتحديد الأهمية النسبية للتأثير الجماعي وتأثير الجسيمات المفردة في تحديد أنماط الانتقالات وبنية النواة، كما تُوفّر معلومات قيّمة عن سبين، وطاقة، وأعمار الحالات المثارة في النوى [4].

تم حساب قوى الانتقال $|M(E2)|^2$ بالاعتماد على قيمة عرض غاما الكلي Γ وعرض غاما الجزئي للرباعي الكهربائي $\Gamma_{w.u}(E2)$، و حساب احتمال الانتقال$B(E2)$ لعدد من النظائر $_{52}Te$و $_{34}Se$الزوجية ـ الزوجية. وتبيَّنَ أنقيمة $|M(E2)|^2$ تعتمد على عرض غاما الكليΓ وعرض غاما الجزئي للرباعي الكهربائي $\Gamma_{w.u}(E2)$، بينما يعتمد $B(E2)$ على طاقة انتقالات غاما E والعدد الكتلي A للنواة [4].

وتمت دراسة احتمال انتقال رباعي الأقطاب الكهربائي $B(E2)$، ومعامل التشوه β_2، وعزم رباعي الأقطاب الذاتي Q_0لمستويات الانتقال في نظائر الكادميوم الزوجية ـ الزوجية، حيث أُجريت الحسابات لمستويات الانتقال ($0^+ \rightarrow 2^+$، $2^+ \rightarrow 4^+$، $4^+ \rightarrow 6^+$ و $6^+ \rightarrow 8^+$) باستخدام طريقة أفضل توافق كلي (Global Best Fit(GBF.

وكشفت هذه الدراسة عن اتجاهات منهجية في هذه المعايير النووية عبر السلسلة النظائرية ومع زيادة مستويات الانتقال [1].

تمت دراسة تأثير عزم رباعي الأقطاب الكهربائي (Q_o) ومعامل التشوه (β_2) لنظائر الـ $_{38}Sr$ على تشوه النواة. وأثبتت هذه الدراسة أن تشوه شكل النواة يحدث بشكل أقل في النوى عندما يقترب عدد النيوترونات من عدد النيوترونات السحري (N=50)، ويزداد عندما يبتعد عنه [5].

ولدراسة العلاقة بين استقرار النوى المُصدرة لأشعة (β) وشكلها لبعض العناصر الآيزوبارية ذات العدد الكتلي الزوجي (A=152 – 162)، تم أولاً تحديد الآيزوبار الأكثر استقراراً عن طريق رسم القطع المكافئ الكتلي (رسم طاقة الارتباط (B.E) كتابع للعدد الذري (Z)) لكل أسرة آيزوبارية. ثم تم حساب معامل التشوه الرباعي (δ) الذي يشير إلى مقدار انحراف شكل النواة عن الشكل الكروي، والذي يعتمد على قيمة العزم الرباعي الذاتي (Q_0) الذي يُحدد انحراف توزيع الشحنة النووية عن التوازن الكروي. ويُعد عزم رباعي الأقطاب الكهربائي (Q_0) أحد المقادير المهمة لتحديد شكل النواة، وهو ما يرتبط باحتمال الانتقال $B(E)\uparrow$، ولذلك لحساب (Q_0) فقد تم حساب احتمال الانتقال [6].

ولدراسة العلاقة بين شكل النواة المشوه ونشاطها الإشعاعي في سلسلتي اليورانيوم . 238 والثوريوم ـ 232، تم حساب معامل التشوه الرباعي (β_2) والانحراف المركزي (e)، وتمت مقارنة السلسلة الإشعاعية مع تغير (β_2) و(e) كمؤشر على تغير شكل النواة مع تغير النشاط الإشعاعي. وللحصول على قيمة معامل التشوه الرباعي (β_2)، تم حساب قيمة

احتمال الانتقال الرباعي المعتمدة ($E2; 0^+\rightarrow 2^+$) B من معادلة أفضل توافق كلي. وقد اتضح من النتائج، أن النوى المشعة من خلال تفككها لكلا السلسلتين، تحاول تحقيق المزيد من الاستقرار عن طريق تغيير شكلها نحو شكل الكرة المثالي [7].

وقد تم حساب قيم معامل التشوه الرباعي (β_2) والاختلاف المركزي (e) كمؤشر للتغير في شكل النواة لدراسة ترابط شكل الآيزوتونات، (الآيزوتونات Isotones نيوكلايدات لها نفس عدد النيوترونات N) التي لها عدد كتلي زوجي (A=46–62) و (A=164–182)، مع توزّع الشحنة النووية. حُسبت قيمة معامل تشوه رباعي الأقطاب (β_2) وقيمة (δ) بطريقتين: معامل التشوه (β_2) محسوب بالاعتماد على احتمال الانتقال الرباعي الكهربائي المخفض للانتقال الذي بدوره محسوب من معادلة أفضل توافق كلي، و(δ) محسوب بالاعتماد على (Q_0). يرمز عزم رباعي الأقطاب الكهربائي (Q_0) إلى مقدار انحراف توزيع الشحنة النووية عن التوازن الكروي، ويرتبط بشكل وثيق باحتمال الانتقال المخفض ↑B(E2)، ولذا فهو يُحسب بالاعتماد عليه. وقد بينت نتائج الدراسة أن قيم المعاملان (β_2) و (e) هي الأدنى بالنسبة للنوى التي تحتوي على عدد من البروتونات أقرب إلى العدد السحري، مما يعني أن النوى التي تحتوي على عدد سحري مستقرة [8].

تم، في هذا العمل، حساب قوى الانتقال $|M(E2)|^2$ بالاعتماد على قيمة عرض غاما الكلي Γ وعرض غاما الجزئي للرباعي الكهربائي $\Gamma_{w.u}(E2)$، و حساب احتمال الانتقال B(E2) لنظائر الهافنيوم Hf الزوجية ـ الزوجية، وذلك للانتقال من الحالة الأرضية إلى الحالة المثارة الأولى ($0^+\rightarrow 2^+$). كما تم حساب المعاملات المرتبطة باحتمال الانتقال مثل عزم رباعي الأقطاب (Q_0) ومعامل التشوه (β_2). وبين هذا العمل تأثير المعاملات المحسوبة على البنية النووية، وأيضاً عن كيفية تأثير هذه المعاملات على بنية النواة. وبينت هذه الدراسة أن قوى الانتقال، واحتمال الانتقال، وعزم رباعي الأقطاب، ومعامل التشوه، لها قيم أقل نسبياً للنظائر التي تحتوي على عدد نيوتروني قريب من العدد السحري N=82 أو N=126. أي أن تشوه شكل النواة يحدث بشكل أقل في النوى عندما يقترب عدد النيوترونات من أحد العددين السحريين السابقين، ويزداد عندما يبتعد عن أحدهما.

أهمية البحث وأهدافه:

يهدف هذا البحث إلى حساب قوى الانتقال $|M(E2)|^2$ و احتمالات الانتقال ↑B(E2) لانتقالات غاما من المستوي المثار الأول إلى المستوي الأرضي لنوى الـHf الزوجية –الزوجية، وحساب عزم رباعي الأقطاب (Q_0) ومعامل التشوه (β_2) المرتبطان باحتمال الانتقال.و تكمن أهمية هذا البحث في أنه يوفر اختبارات مهمة لنموذج الطبقات النووي.

طرائق البحث ومواده:

1- عرض غاما الكلي

افترض برايت وفيجنر أنه إذا تفكك جسيم غير مستقر عند طاقة E_0 وفقاً لقانون $\exp(-\Gamma t)$، فإن كثافة الطاقة يجب أن تتوزع تقريباً وفقاً لتوزيع برايت ـ فيجنر [9] .

$$P(E)=\frac{1}{2\pi}\frac{\Gamma}{(E-E_0)^2+(\frac{\Gamma}{2})^2} \qquad (1)$$

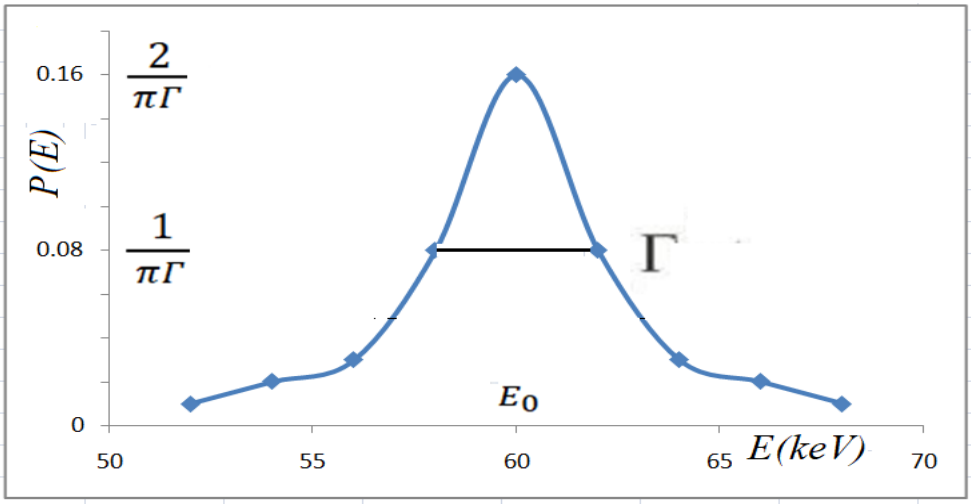
ويُعرف التوزيع P(E) في الفيزياء النووية بتوزيع برايت ـ فيجنر *Breit-Wigner*. وهذا التوزيع له قيمة عظمى من $\frac{2}{\pi\Gamma}$ أجل $E=E_0$،وله عند منتصف القيمة العظمى السابقة قيمتان للطاقة نحصل عليهما بالتعويض عن P(E) بـ $\frac{1}{\pi\Gamma}$ في المعادلة (1) فنجد : $E-E_0=\pm\frac{\Gamma}{2}$ أي لدينا: $E_1=E_0-\frac{\Gamma}{2}$ و $E_2=E_0+\frac{\Gamma}{2}$، أي أن $\Delta E=E_2-E_1=\Gamma$. ومن أجل القيمة العظمى

$P_m(E)=\frac{2}{\pi\Gamma}=0.16$ فإن $\Gamma=4keV$، وبالتالي نحصل كمثال، من أجل طاقة أشعة غاما $E_0=60keV$ الصادرة عن الأمرسيوم $^{241}_{93}Am$، على القيم المبينة في الجدول(1).

الجدول(1): يبين توزيع برايت ـ فيجنر من أجل الطاقة $E_0=60keV$ والقيمة العظمى $P_m(E)=0.16$.

E(keV)	52	54	56	58	60	62	64	66	68
P(E)	0.01	0,02	0.03	0.08	0.16	0.08	0.03	0.02	0.01

واعتماداً على الجدول (1) قمنا برسم المنحني المبين في الشكل(1) والمبين فيه العرض الكلي Γ للتوزيع عند منتصف القيمة العظمى، والذي يطلق عليه اتساع (عرض) مستوي الإثارة.



الشكل (1): منحني برايت ـ فيجنر.

لنلاحظ أن عرض غاما الكلي Γ يصبح أصغر كلما كانت كثافة الطاقة العظمى$P_m(E)$ أكبر. فمثلاً من أجل $P_m(E)=\frac{2}{\pi\Gamma}=0.32$ نجد أن $\Gamma\approx 2keV$.

2- قوى الانتقال $|M(E2)|^2$

يُعطى عرض غاما الكلي (Γ) لحالة مثارة ذات متوسط عمر افتراضي (τ) بالعلاقة [4,10]:

$$\Gamma=\frac{\hbar}{\tau}\quad(2)$$

حيث: $\hbar=0.658212\times10^{-15}eV.s$، ويُعطى τ، بدلالة T عمر النصف للحالة المثارة، بالعلاقة التالية:

$$\tau=\frac{T}{ln2}\qquad(3)$$

اقترح فايسكوف Weisskopf و بلات *Blatt* أن أشعة غاما γ تنتج عن انتقال بروتون وحيد من مستوى نووي إلى آخر حسب نموذج الطبقات. وقد بين فايسكوف أن احتمال الانتقال المخفض لأشعة γ يتم وفق حالتي الانتقالات

الكهربائية $(E\ell)$ والمغناطيسية $(M\ell)$، وأن متعددات الأقطاب لقيم ℓ المنخفضة هي السائدة[11]. ومن خلال عرض أشعة غاما الكلي، يمكننا حساب قوة الانتقال لـE2 بواسطة المعادلة [4,12]:

$$|M(E,M(L))|^2 = \frac{\Gamma(\mathrm{E,M(L)})}{\Gamma_{\mathrm{W.u}}(\mathrm{E,M(L)})}$$

حيث: Γ(E ،M (L)): هو عرض غاما الجزئي للانتقال الكهربائي، وللانتقال المغناطيسي.

$\Gamma_{\mathrm{W.u}}$ (E،M (L)): عرض غاما الجزئي للانتقال الكهربائي، للانتقال المغناطيسي، (بوحدات فايسكوف)، و L : مراتب متعددة.

بالنسبة لانتقال أشعة غاما المختلطة (E2 + M1)، فإن العرض الكلي يساوي مجموع العرض الجزئي لمركبات ثنائي القطب المغناطيسي Γ (M1) و العرض الجزئي لمركبات رباعي الأقطاب الكهربائي Γ(E2)، أي:

$$\Gamma(\mathrm{M1}) + \Gamma(\mathrm{E2}) = \Gamma$$

ولذا يكون بالنسبة لانتقالات E2 النقية:

$$\Gamma(\mathrm{E2}) = \Gamma$$

وتُعطى قوى الانتقال لـ E2 من أشعة غاما بالمعادلة التالية [4]:

$$|M(E2)|^2 = \frac{\Gamma(\mathrm{E2})}{\Gamma_{\mathrm{W.u}}(\mathrm{E2})} \qquad (4)$$

حيث $\Gamma_{\mathrm{W.u}}$ (E2): هي عرض غاما الجزئي لرباعي الأقطاب الكهربائي، بوحدات فايسكوف، والتي يمكن الحصول عليها من المعادلة التالية [4,12]:

$$\Gamma_{\mathrm{W.u}}(\mathrm{E2}) = 4.7925 \times 10^{-23} A^{4/3} E^5 \qquad (5)$$

حيث A: هو العدد الكتلي للنواة، E: هي طاقة الانتقالات لـ γ بوحدات keV.

3- احتمال الانتقال المخفض لرباعي الأقطاب الكهربائي ↑B(E2)

نصف، في هذه الفقرة، الإجراء المستخدم لحساب احتمال الانتقال المخفض (مخفض لأنه من أجل الانتقال $2^+ \rightarrow 0^+$ فقط) لرباعي الأقطاب الكهربائي ولعزم رباعي الأقطاب الكهربائي الموافق وعامل التشوه. إن قيم احتمال الانتقال المخفض لرباعي الأقطاب الكهربائي ↑B(E2) تلعب دوراً هاماً في الفيزياء النووية، وهي مطلوبة بشدة في حسابات النماذج النووية[13].

وفقاً لطريقة أفضل توافق كلي، فإن معرفة الطاقة(keV) E للحالة 2^+ هو كل ما هو مطلوب لحساب متوسط العمر τ(مقدراً بالـps) لأشعةγ، ومن ثم، قيمة[3](e^{2}b^2)↑(E2) B. وبالتالي يتم حساب قيم احتمال الانتقال لرباعي الأقطاب الكهربائي المخفض ↑(E2) B، من الحالة الأرضية إلى الحالة المثارة الأولى 2^+ للنوى الزوجية ـ الزوجية بالمعادلة [6]:

$$B(E2)\uparrow = 2.6 \times E^{-1} Z^2 A^{-2/3} \qquad (6)$$

4- عزم رباعي الأقطاب الكهربائي

عزم رباعي الأقطاب الذاتي intrinsic الكهربائي النووي هو معامل يصف توزيع الشحنة النووية. يشير عزم رباعي الأقطاب الذاتي الكهربائي غير الصفري Q_0 إلى أن توزيع الشحنة ليس متماثلاً كروياً. حسب الاصطلاح، تعتبر قيمة Q_0 موجبة (Q_0> 0) إذا كان الشكل الإهليلجي متطاولاً وسالبة (Q_0<0) إذا كان مفلطحاً [3]. يُحسب عزم رباعي الأقطاب الذاتي Q_0، المرتبط باحتمال الانتقال لرباعي الأقطاب الكهربائي ↑B(E2)، بالمعادلة التالية [5,14]:

$$Q_0 = \left[\frac{16\pi B(E2)\uparrow}{5e^2}\right]^{1/2} \qquad (7)$$

هنا، Q_0 يُقاس بوحدة البارن(b).

5-معامل التشوه

يمثل معامل التشوه مقدار تشوه رباعي الأقطاب النووي (متطاول أو مفلطح) ويشير أيضاً إلى انحراف شكل النواة عن التناظر المحوري [7]، أي هو معامل يقيس استطالة الشكل المتماثل محورياً لنواة مشوهة عن شكلها الكروي. يُشارإلى عامل التشوه بالرمز β_2، وهو مرتبط بـ B(E2)↑، ويُحسب بواسطة المعادلة [8,15]:

$$\beta_2 = \frac{4\pi}{3ZR_0^2}\left[\frac{\mathrm{B(E2)}\uparrow e^2b^2}{e^2}\right]^{1/2} \qquad (8)$$

هنا، R_0 هو متوسط نصف القطر النووي الذي يمكن الحصول عليه من المعادلة التالية:

$$\mathrm{R}_0^2 = 0.0144A^{\frac{2}{3}}\ barn(b) \qquad (9)$$

النتائج والمناقشة:

قوى الانتقال: تم حساب قوى الانتقال $|\mathrm{M(E2)}|^2$ من أجل الانتقالات لـ γ من الحالات المثارة في نوى الهافنيوم $^{154-184}_{72}\mathrm{Hf}$، التي تم إعطاء متوسط عمر لها سابقاً [16]. تم تطبيق هذه الحسابات على النحو التالي:

حساب قيم Γ(E2)، $\Gamma_{\mathrm{W.u.}}$(E2) و$|\mathrm{M(E2)}|^2$ لنوى الهافنيوم $^{162-180}\mathrm{Hf}$ الزوجية ـ الزوجية بالاعتماد على العلاقات (2)،(5) و (4) على الترتيب، ثم رتبنا النتائج في الجدول(2).

تُظهر نتائج عرض غاما الكلي (Γ) و غاما فايسكوف (Γ_{wu}) المعروضة في الجدول (2) لنوى الهافنيوم $^{162-180}\mathrm{Hf}$، أن قيم عرض غاما الكلي (Γ) أكبر من تلك المقدرة بواسطة وحدة فايسكوف (w.u.)، خاصة عندما يبتعد عدد النيوكليونات أكثر فأكثر عن عدد النيوترونات السحري N=82 ، نظراً لأن النيوكليونات، من أجل العدد السحري السابق، تقع في طبقات مغلقة. ويؤكد الشكل (2) صحة النتيجة السابقة، حيث نجد أن قيمة قوة الانتقال $|\mathrm{M(E2)}|^2$ تزدادكلما ابتعدنا عن العدد السحري N=82 لتعود لتتناقص عندما نقترب من العدد السحري N=126.

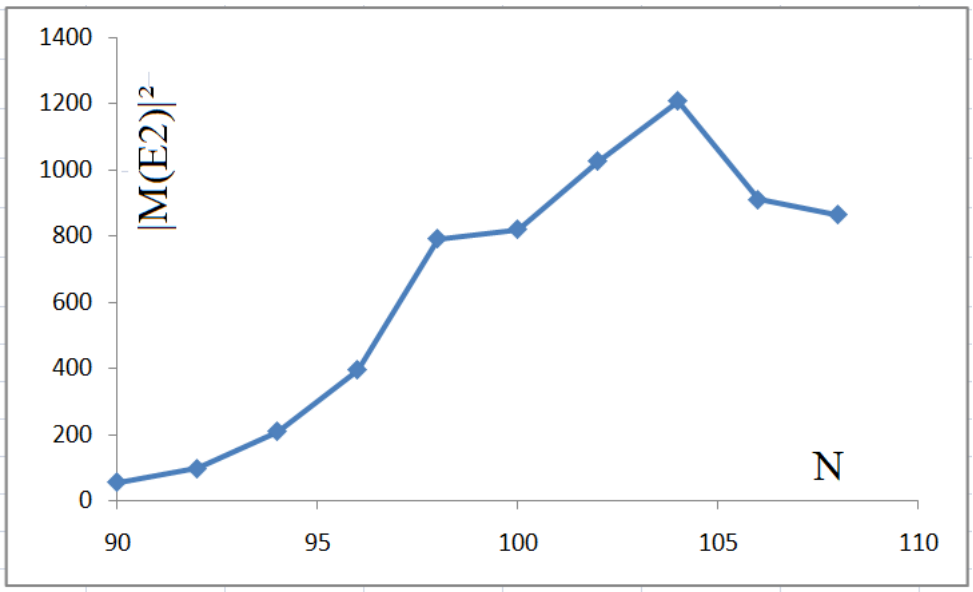
لماذا تؤدى المعادلة (4) لمثل قيم Γ المبينة في الجدول (2)؟ ما الفيزياء الكامنة وراء هذه النتيجة؟

إن المعادلة (2) المستخدمة لحساب العرض الكلي Γ تُكتب كما يلي:

$$\Gamma.\ \tau = \hbar$$

الجدول(2): عرض غاما الكلي Γ(E2) والعرض الجزئي$\Gamma_{\mathrm{W.u.}}$(E2) و الطاقة E(keV) ومتوسط العمر τ(ps) وقوة الانتقال$^2|M(E_2)|$ لنظائر نوى الهافنيوم$^{162-180}_{72}Hf$.

A	N	$\tau(ps)$ [16]	E(keV) [16]	Γ(E2)× 10^{-7} (eV)	Γ(E2)w.u.×10^{-9} (eV)	$\|M(E2)\|^2$
162	90	148	285	44.473	79.58	55.8846
164	92	370	211.05	17.789	18.0144	98.7509
166	94	717	158.5	9.18	4.3737	209.8909
168	96	1280	124	5.14228	1.3024	394.831
170	98	1770	100.8	3.7187	0.46967	791.7686
172	100	2240	95.22	2.9384	0.35884	818.8607
174	102	2210	90.985	2.97833	0.29027	1026.055
176	104	2140	88.351	3.0757	0.25446	1208.716
178	106	2145	93.180	3.0685	0.33708	910.318
180	108	2210	93.326	2.97833	0.34483	863.7096



الشكل (2):العلاقة بين قوى الانتقال²|M(E2)| و عددالنيوترونات N لنوى الهافنيوم $^{162-180}_{72}Hf$ الزوجية ـ زوجية.

إن المعادلة السابقة نتجت عن استخدام مبدأ الارتياب لهايزنبرغ ΔE.Δt≥ħ لقياس أعمار النصف القصيرة جداً [17,18]، من خلال ربط عرض مستوى الطاقة (Γ=ΔE) لحالة ما بمتوسط عمرها(τ =Δt). أي أن العرض المقاس Γ لا يمكن معرفته بدقة أحسن من: $\Gamma \approx \hbar/\tau$، حيث ħ هو ثابت بلانك المختزل. وتوضح العلاقة السابقة والشكل (1) أن الذروة بعرض Γ كبير توافق متوسط عمر أقصر، بينما الذروة بعرضΓ صغير توافق متوسط عمر أطول. ويوضح هذا التناسبَ العكسي بين Γ و τ، المبين في الجدول (2).

احتمال الانتقال المخفض لرباعي الأقطاب الكهربائي ↑B(E2): تم حساب احتمال الانتقالالمخفض لرباعي الأقطاب الكهربائي ↑B(E2)، بوحدة (e^2 b^2)، لعدد من انتقالات γ من مستويات الطاقة للنوى الهافنيوم $^{154-184}$Hf الزوجية ـ الزوجية باستخدام المعادلة (6)، كما هو موضح في الجدول (3). وتمت، في الجدول السابق، مقارنة القيم المحسوبة من قبلنا مع القيم المرجعية SSANM:[16] نموذج نيلسون المقارب أحادي الطبقة Single–Shell Asymptotic Nilsson Model، حيث يفترض النموذج أن النواة مشوهة بقدر ما يمكن أن تكون طبقة واحدة، و يتم إعطاء قيم

↑B(E2) بوحدة e^2b^2 بالعلاقة [19]:

$$B(E2)\uparrow = \frac{5}{16\pi}[eQ_0]^2$$

حيث: Q_0 عزم رباعي الأقطاب ويُقاس بوحدة البارن(b).

وقارنا أيضاً مع القيم المرجعية [16]: FRDM نموذج القطرة المحدود المدى Finite–Range Droplet Model.

و في النموذج السابق يتم حساب أشكال الحالة الأرضية النووية عن طريق تقليل تابع الطاقة الكامنة النووية بالنسبة لدرجات حرية الشكل ε_2، ε_3، ε_4، ε_6 في معاملات نيلسون الكروية المضطربة.

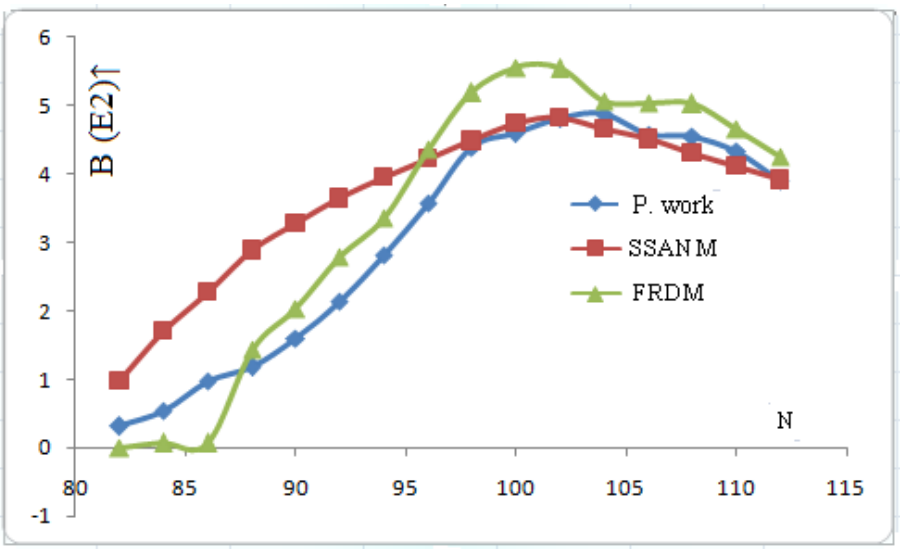
يوضح الشكل (3) مقارنة بين قيم احتمال الانتقال المخفض↑B(E2) المحسوبة من قبلنا P.work مع القيم المرجعية [16]: SSANM وFRDM، لنوى الهافنيوم $^{154-184}$Hf. تتوافق قيم العمل الحالي بشكل كبير مع القيم المرجعية

[16]، وخاصة عندما تقترب من العدد السحري N=82 أو N=126. ويظهر هذا التوافق جلياً بملاحظة أن قيم العمل الحالي والقيم المرجعية لها أصغر القيم من أجل العدد السحري N=82 ثم تتزايد القيم الثلاث بالابتعاد عن العدد السحري N=82 لتعود فتتناقص القيم الثلاث عندما تقترب من العدد السحري N=126.

الجدول (3): يبين مقارنة قيم احتمال الانتقال المخفض B(E2)↑، بوحدة (e^2 b^2) المحسوبة من قبلنا P. work مع قيم المرجع [16]:SSANM و FRDM للنوى $^{154-184}$Hf.

A	N	E(keV) [16]	B(E2; $0^+ \rightarrow 2^+$) e^2 b^2		
			P. work	[16]	
				SSANM	FRDM
154	82	1513	0.31	0.973	0.003
156	84	858	0.542	1.706	0.064
158	86	476.36	0.968	2.273	0.0672
160	88	389.6	1.175	2.88	1.432
162	90	285	1.591	3.281	2.032
164	92	211.05	2.132	3.645	2.79
166	94	158.5	2.824	3.954	3.357
168	96	124	3.57	4.22	4.358
170	98	100.8	4.392	4.481	5.184
172	100	95.22	4.587	4.738	5.558
174	102	90.985	4.805	4.825	5.537
176	104	88.351	4.876	4.667	5.058
178	106	93.180	4.58	4.511	5.033
180	108	93.326	4.546	4.307	5.028
182	110	97.79	4.326	4.109	4.665
184	112	107.4	3.893	3.91	4.253

عزم رباعي الأقطاب الكهربائي و معامل التشوه: تم حساب عزم رباعي الأقطاب الذاتي (Q_0) لنوى نظائر الهافنيوم $^{154-184}$Hf الزوجية ـ الزوجية باستخدام المعادلة (7)، والنتائج معروضة في الجدول(4)، وقد قورنت بالقيم المرجعية المتوفرة [16]. تتوافق قيم عزم رباعي الأقطاب الذاتي المحسوبة من قبلنا P.work باستخدام نموذج الطبقات توافقاً جيداً مع النتائج المرجعية السابقة.



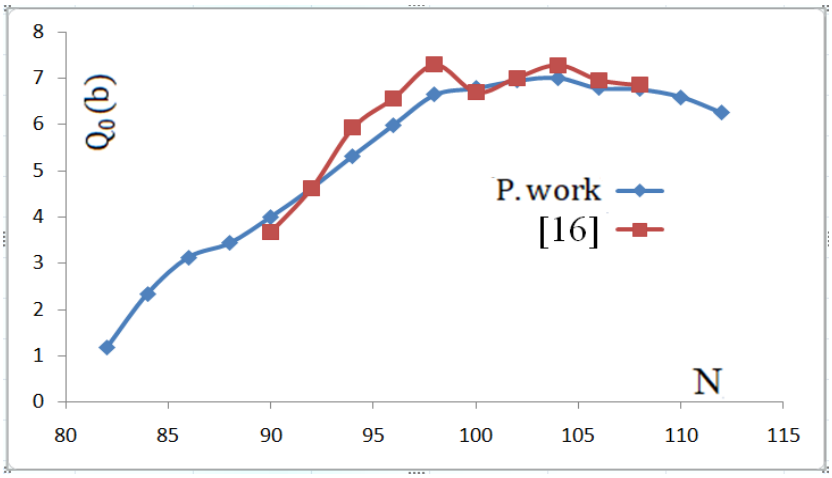
الشكل (3): يبين مقارنة قيم احتمال الانتقال المخفض B(E2)↑ المحسوبة من قبلنا P.work مع القيم المرجعية [16]: SSANM وFRDM، لنوى الهافنيوم $^{154-184}$Hf.

كما تم الحصول على معاملات التشوه لنوى نظائر الهافنيوم $^{154-184}$Hf الزوجية ـ الزوجية باستخدام المعادلة (8) والنتائج معروضة في الجدول (4).تمت مقارنة معاملات التشوه المحسوبة من قبلنا P.work المرتبطة بإطار نموذج الطبقات مع النتائج المرجعية المتوفرة [13]. تتوافق قيم معاملات التشوه المحسوبة P.work باستخدام نموذج الطبقات توافقاً جيداً مع النتائج المرجعية السابقة.

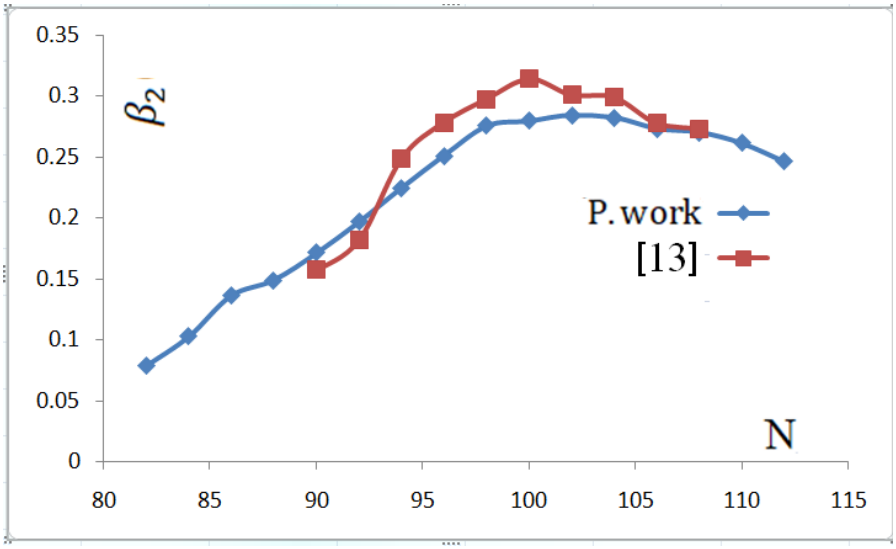
الجدول(4): يبين مقارنة قيم معامل التشوه β_2 المحسوبة P.work والمرجعية [13] و مقارنة قيم عزم رباعي الأقطاب $Q_0(b)$ المحسوبة P.work والمرجعية [16] مقدرة بالـ (b) لنوى الهافنيوم $^{154-182}$Hf.

A	N	$R_0^2(b)$	B(E2)	β_2(P.work)	β_2[13]	Q_0(b)(P.work)	Q_0(b)[16]
154	82	0.4137	0.31	0.0783		1.1765	
156	84	0.4173	0.542	0.1026		2.3342	
158	86	0.4208	0.968	0.1360		3.1195	
160	88	0.4244	1.175	0.1486		3.4369	
162	90	0.4279	1.591	0.1715	0.1574	3.9993	3.68
164	92	0.4314	2.132	0.1969	0.1819	4.6296	4.63
166	94	0.4350	2.824	0.2248	0.2488	5.3228	5.93
168	96	0.4384	3.57	0.2507	0.2781	5.9908	6.57
170	98	0.4419	4.392	0.2759	0.2976	6.6448	7.3
172	100	0.4454	4.587	0.2798	0.314	6.7907	6.70
174	102	0.4488	4.805	0.2841	0.301	6.9502	7.00
176	104	0.4522	4.876	0.2820	0.299	7.0013	7.28
178	106	0.4557	4.58	0.2732	0.2779	6.7855	6.961
180	108	0.4591	4.546	0.2702	0.2732	6.7603	6.85
182	110	0.4625	4.326	0.2616		6.5947	
184	112	0.4658	3.893	0.2464		6.2559	

واعتماداً على الجدول(4) تم رسم الشكل (4) الذي يمثل مقارنة بين قيم عزم رباعي الأقطاب $Q_0(b)$المحسوبة من قبلنا P.work والمرجعية [16] بتابعية عدد النيوترونات N لنوى الهافنيوم $^{154-184}_{72}Hf$ الزوجية ـ زوجية. ونستنتج من الشكل (4) السابق أن أقل قيمة لعزم رباعي الأقطاب Q_0 المحسوبة من قبلنا هي من أجل العدد السحري N = 82، لتزداد بعد ذلك قيم عزم رباعي الأقطاب ثم تعود، القيم المحسوبة، لتتناقص عندما تقترب من العدد السحري N = 126.



الشكل (4):مقارنة بين قيم عزم رباعي الأقطاب$Q_0(b)$المحسوبة من قبلنا P.work والمرجعية [16] بتابعية عدد النيوترونات N لنوى الهافنيوم $^{154-184}_{72}Hf$ الزوجية ـ زوجية.



الشكل (5): مقارنة بين قيم معامل التشوهβ_2المحسوبة من قبلنا P.work
والمرجعية [13] بتابعية عدد النيوترونات N لنوى الهافنيوم $^{154-184}_{72}Hf$ الزوجية ـ زوجية.

واعتماداً على الجدول(4) تم رسم الشكل (5) الذي يمثل مقارنة بين قيم معامل التشوه β_2المحسوبة من قبلناP.work والمرجعية [13] بتابعية عدد النيوترونات N **لنوى الهافنيوم** $^{154-184}_{72}Hf$ الزوجية ـ زوجية. ونستنتج من الشكل السابق أن أقل قيمة لمعامل التشوه β_2 المحسوبة من قبلنا هي من أجل العدد السحري N = 82، لتزداد بعد ذلك قيم معامل التشوه ثم تعود، القيم المحسوبة، لتتناقص عندما تقترب من العدد السحري N = 126.

يُستنتج من معطيات الجداول (2) و (3) و (4) والأشكال البيانية المقابلة، أن قوى الانتقال، واحتمال الانتقال، وعزم رباعي الأقطاب، ومعامل التشوه، لها قيم أقل نسبياً للنظائر التي تحتوي على عدد نيوتروني قريب من العدد السحري N=82 أو N=126.

الاستنتاجات والتوصيات:

1 ـ حساب العرض الكلي Γ، المستخدم للحصول على قوى الانتقال، يعتمد على مبدأ الارتياب لهايزنبرغ.

2 ـ قوى الانتقال $|M(E2)|^2$ تزداد كلما ابتعدنا عن العدد السحري N=82 لتعود لتتناقص عندما نقترب من العدد السحري N=126.

3 ـ قيم احتمال الانتقال المخفض↑B(E2) المحسوبة تتوافق توافقاً جيداً مع النتائج المرجعية وخاصة عندما تقترب من العدد السحري N=82 أو N=126.

4 ـ قيم المعاملان Q_0، β_2 المحسوبة باستخدام نموذج الطبقات بينت تشوه نوى نظائر الهافنيوم $^{154-184}$Hf الزوجية ـ الزوجية، وينخفض هذا التشوه عندما نقترب من العدد السحري N=82 أو N=126.

نوصي بدراسة خصائص قوى الانتقال^2|M(E2)| واحتمالات الانتقال B(E2) لنوى الهافنيومHf الزوجية ـ الزوجية من أجل الحالات المثارة الأعلى من الحالة الأولى $(0^+\rightarrow2^+)$ مثل الحالة $(2^+\rightarrow4^+)$ أو الحالة $(4^+\rightarrow6^+)$.

References:

[1] M. S. Nayyef, "Study of nuclear properties for even-even nuclei (Transition probabilities B(E2)↑, deformation parameters β_2 and quadrupole moments Q_0)" , *International Journal of Applied Research* 11(7): 379-384, 2025.

[2] O. Sorlin, and M.-G. Porquet, "Nuclear magic numbers: new features far from stability", *arXiv*:0805.2561v1 [nucl-ex], 16 May 2008.

[3]T.Islam, R.Amin, Md. Ashraful Alam, and J.Islam, "Upward Transition Probabilities B(E2)↑Properties Study of Even-Even $^{104-114}$Ru Nuclei", *World Journal of Nuclear Science and Technology*, 10, 129-137, 2020.

[4] M.S. Nayyef," Study the transition strengths $|M(E2)|^2$ and transition probability B(E2) in $_{52}$Te & $_{34}$Se nuclei", * International Journal of Physics and Mathematics*, 6(2): 24-28, 2024.

[5]N.T.Jarallaha," Quadrupole Moment & Deformation Parameter for Even-Even $_{38}$Sr (A=76-102) Nuclide", * Science Direct, Energy Procedia* ,157, 276–282, 2017.

[6]N.T.Jarallah, and M.S.Nayyef," Study the Relationship between Beta Decay Stability of Nuclide and its Shape for Some even-even Isobars", * Journal of Physics*: Conference Series 1879 ,032103, 2021.

[7]H. A. Marid, N.T. Jarallah, and H. M. Abduljabbar," Radioactivity effect on the shape of even-even nuclei for uranium and thorium series", * Results in Physics* ,406–409, 11 2018.

[8] M.S. Nayyef, "Nuclear charge distribution effect on the shape for some even-even nuclide", * International Journal of Physics and Applications* ,6(2): 33-38, 2024.

[9] V. Petkov, and M.Zworski, "Breit-Wigner Approximation and the Distribution of Resonances", * Vienna, Preprint ESI *,600 , 1998.

[10] I.M.Hassan,S.A.Ebrahiem, and R.S.A.Al-Khafaji, "Calculated the quadrupole electrical transmission $|M(E2)|^2$W.u↓ for even-even nuclides of strontium ($^{78-100}$Sr and $^{66-76}$Ge)" ,* RESEARCH ARTICLE*, AUGUST 17 2022.

[11] I.Sakho, *Nuclear Physics 1: Nuclear Deexcitations, Spontaneous Nuclear Reactions*, wiley, 9 Dec 2021.

[12] N.T. Jarallah," Calculation Of the Transition Strengths $|M(E2)|^2$ and Transition Probability B(E2) in 38Sr and 58Ce Nuclei", *JOURNAL OF COLLEGE OF EDUCATION* ,NO.1,2015.

[13] B. Pritychenko, M. Birch, B. Singh, and M. Horoic" Tables of E2 Transition Probabilities from the first 2^+ States in Even-Even Nuclei", * arXiv*:1312.5975v8 [nucl-th] 12 Dec 2016.

[14] N.T. Jarallah, and H.J. Hassan." Study The Deformation Parameters ($\beta 2$, δ) For Even-Even Nuclei (A=38-48 & A=74-92)" . *JOURNAL OF COLLEGE OF EDUCATION *,2016.

[15] N.T. Jarallah, and H.J. Hassan, "Determination of the Shape for ($_{54}$Xe and $_{82}$Pb) Nuclei from Deformation Parameters (β, δ)" , * Iraqi Journal of Science*, 57, 2015-2016.

[16] S. RAMAN, C. W. NESTOR, JR., and P. TIKKANEN, "TRANSITION PROBABILITY FROM THE GROUND TO THE FIRST-EXCITED 2^+ STATE OF EVEN–EVEN NUCLIDES", *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 78, 1–128, 2001.

[17] H. JBELI, J. MULHEM, A. TFIHA, * NUCLEAR PHYSICS (1) *, Tishreen University, 2018.

[18] A.Belyaev, and D.Ross, "The Basics of Nuclear and Particle Physics.", * Springer Nature* , June 30, 2021.

[19] F.H.Obeed, And A.K.Hasan," Calculation Of Quadrupole Deformation Parameter B2 From Reduced Transition Probability $B(E2)\uparrow$ For Transition $0_1^+ \rightarrow 2_1^+$At Even-Even $^{62-68}$zn Isotopes." *Nucl. Phys. At. Energy*,030-041, 2021.