

Analytical Study for α – decay Half-lives for Rn Isotopes within a Gamow – Like Mode

Dr. Haissam Ibrahim Jbeli ^{*}
Dr . Jehad Kamel Mulhem ^{**}
Hasan Mohammad Ajamia ^{***}

(Received 26 / 12 / 2022. Accepted 18 / 5 /2023)

□ ABSTRACT □

This study involved the determination of the half – lives Logarithm for alpha decay of Rn isotopes in the range $197 \leq A \leq 222$ within Gamow – Like model (GLM) which based on Gamow theory,that based on the formation of an alpha particle in the parent nucleus before its tunneling decay .In addition, a simple modification process is done on the nucleus radius, in which it was found that the changing of nucleus radius will change the decay constant value which will greatly affect the nucleus half-life logarithm as well as its effect on the inverse proportion between the nucleus radius and the potential barrier height .The half -life logarithm for the nuclei being studied was determined through several common models, that belong to another studies, such as Royer formula ,Universal Decay Law ,Viola-Seaborg formula and finally with Denisov & Khudenko formula. The comparison process depending on statistical procedures, that we undertook as in the calculation of root mean square deviation (rmsd),as well as the standard deviation (σ). The results are compared with experimental data, and also with other theoretical models, the results are in a good agreement was achieved with experimental data. results showed that the half-life logarithm increases with the increase in neutrons numbers (N) for all nuclei except that contain Z magic numbers or both.

Keywords : α - Decay , Gamow – Like Model , Half-Life ,Super heavy nuclei

Copyright  :Tishreen University journal-Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

* Professor , Physics Department , Faculty of Science , Tishreen University , Lattakia , Syria .

jbeliHaisam@gmail.com

** Professor , Physics Department , Faculty of Science , Tishreen University, Lattakia , Syria .

dr.jehadmulhem@gmail.com

*** Postgraduate Student (Master), Radiation Physics, Department of Physics, Faculty of Science, Tishreen University, Lattakia , Syria . hasan.ajamia@tishreen.edu.sy

دراسة تحليلية لأعمار النصف لتفكك الفا لنظائر الرادون وفق نموذج جاموف

د. هيثم إبراهيم جبيلي*

د. جهاد كامل ملحم**

حسن محمد عجميه***

(تاريخ الإيداع 26 / 12 / 2022. قُبل للنشر في 18 / 5 / 2023)

□ ملخص □

تضمنت هذه الدراسة تحديد أعمار نصف تفكك الفا لنظائر الرادون ضمن المجال $197 \leq A \leq 222$ باستخدام نموذج جاموف والذي يعتمد على نظرية جاموف المبنية على أساس تشكل جسيم الفا في النواة الأم قبل تفككها نقياً، مع إجراء عملية تعديل بسيطة على نصف قطر النواة. تبين بأن تغير نصف قطر النواة سيغير من قيمة ثابت التفكك مما سينعكس على لوغاريتم عمر النصف للنواة بشكل كبير فضلاً عن التناسب العكسي ما بين نصف قطر النواة وارتفاع حاجز الجهد. كما تم تحديد لوغاريتم عمر النصف من خلال عدد من النماذج المتداولة التابعة لدراسات أخرى، مثل نموذج روير وقانون التفكك العام ونموذج فيولا وسيبورغ ونموذج دينسوف وخودينكو .

تمت عملية المقارنة اعتماداً على الإجراءات الإحصائية التي تم حسابها في هذا العمل كالانحراف عن معدل مربع الجذر التربيعي والانحراف المعياري، كما تم إجراء مقارنة للنتائج التي تم الحصول عليها مع النتائج التجريبية ومع نماذج نظرية أخرى، أظهرت هذه النتائج توافق جيد مع النتائج التجريبية كما أظهرت أن لوغاريتم عمر النصف يزداد مع زيادة عدد النيوترونات عدا التي تمتلك اعداد سحرية في عدد بروتوناتها أو في عدد نيوتروناتها، أو كلاهما.

الكلمات المفتاحية: تفكك الفا - نموذج جاموف - عمر النصف - النوى الثقيلة



حقوق النشر : مجلة جامعة تشرين- سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص

CC BY-NC-SA 04

*أستاذ - قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.
jbeliHaisam@gmail.com

**أستاذ - قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.
dr.jehadmulhem@gmail.com

*** طالب دراسات عليا (ماجستير) - اختصاص فيزياء إشعاعية - قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية .

hasan.ajamia@tishreen.edu.sy

مقدمة:

يعتبر تفكك الفا من الأدوات الهامة لدراسة القوى النووية والبنية النووية [1]، ويعد واحداً من أهم أنماط تفكك النوى الثقيلة. حيث تم اكتشاف تفكك الفا من خلال تجربة قام بها العالم رذرفورد 1899 كواحد من ثلاث مكونات من الإشعاع الصادر من نواة اليورانيوم تختلف في قدرتها على اختراق المواد [2]. ومنذ ذلك الوقت تم صياغة العديد من المعادلات لحساب أعمار نصف تفكك الفا لنظائر عديدة ومختلفة كان من أبرزها :
معادلة غايغر ونوتال Geiger-Nuttall عام 1911، حيث تعتبر أول معادلة نصف تجريبية صيغت لحساب أعمار نصف تفكك الفا والتي تنص على أن لوغاريتم أعمار نصف النوى يتناسب عكساً مع الجذر التربيعي لطاقة جسيمات الفا الصادرة، و تعطى بالعلاقة الآتية:

$$\log T = a + \frac{b}{\sqrt{Q\alpha}} \quad (1)$$

حيث a, b معاملان يأخذان قيمةً تختلف من عنصر لآخر، أمكن تحديد قيمهما العددية بيانياً من أجل كل عنصر. كما تم التوصل إلى إيجاد علاقتين عامتين. وهما عبارة عن كثيرتي حدود بتابعية العدد الذري (Z) تعطيان (a,b) [3]. وكان لميكانيك الكم، بعد ظهوره، دوراً هاماً في تقديم وصف جيد لتفكك الفا [4]. حيث قام العالم جاموف Gamow، وغيره من علماء آخرين عام 1928 بصورة منفصلة وبشكل مستقل كل على حدا بتفسير تفكك الفا اعتماداً على تطبيق ميكانيك الكم في مجال الفيزياء النووية بما يعرف بمفعول النفق [5].

باستخدام تقريب WKB (Wentzel, Kramers and Brillouin) قام الباحث زيدب وآخرون (A. Zdeb et al) (بإيجاد معادلة لحساب أعمار نصف تفكك الفا المقابلة لنفذ جسيم الفا عبر حاجز جهد كولوني لبئر مربع يمثل الجزء النووي [2]. كما قام كل من فيولا Viola و سيبورغ Seaborg عام 1966 بتعميم معادلة غايغر ونوتال بالاعتماد على نظرية جاموف بإضافة متغيرات على معادلتها و افترضوا معادلة نصف تجريبية لحساب أعمار نصف تفكك الفا للعناصر الثقيلة وقد كانت النتائج المحسوبة تبعاً لهذه المعادلة على توافق جيد مع النتائج التجريبية، وقد استخدمت على نطاق واسع لحساب أعمار نصف تفكك الفا على مدى سنوات والتي لا زالت تستخدم إلى يومنا هذا [6].

علاوةً على ذلك قام العالم روير Royer عام 2000 بصياغة معادلة نصف تجريبية عرفت باسمه ، حيث قام بتقدير أعمار النصف للنوى الزوجية - الزوجية التي فيها Z زوجي و N زوجي المصدرة لجسيمات الفا من خلال احتمال اختراق حاجز الجهد في إطار تقريب WKB، بالنسبة للانحطاط التلقائي اللامتناظر باستخدام قيم طاقات الفا التجريبية بالاعتماد على نموذج القطرة السائلة ، واستنتج روير أن هناك تطابق مقبول بين القيم النظرية والتجريبية [7].
كما قام كل من العالمين دينسوف Denisov و خودينكو Khudenko، انطلاقاً من معادلة روير بتطوير معادلة نصف تجريبية لحساب أعمار نصف تفكك الفا للانتقالات الحاصلة من السوية الأساسية (النواة غير مثارة لإصدار فوتونات غاما) للنواة الأم إلى السوية الأساسية للنواة البنت [8].

تم في هذه الدراسة القيام بحساب أعمار نصف تفكك الفا لنظائر الرادون باستعمال نموذج جاموف Gamow-Like Model (GLM) وقارنا النتائج التي حصلنا عليها مع النتائج التجريبية وجرى استخدام أبرز المعادلات نصف التجريبية المستخدمة في حساب أعمار نصف تفكك الفا لمقارنتها مع نموذج جاموف GLM كمعادلة روير [9]، و قانون التفكك العام (Universal decay law UDL) [10] ، ومعادلة فيولا - سيبورغ The Viola-Seaborg

semi-empirical formula [6]، وأخيراً معادلة دينسوف - خودينكو (DEKH) [8]. كما قمنا بإجراء عملية تعديل على نصف قطر النواة في نموذج جاموف ورمزنا لذلك بـ GLM 2. تمت عملية المقارنة اعتماداً على الإجراءات الإحصائية التي قمنا بحسابها كالانحراف عن معدل مربع الجذر التربيعي والانحراف المعياري. كما قمنا بمقارنة النتائج التي حصلنا عليها مع النتائج التجريبية ومع نماذج نظرية أخرى مثل نموذج روير وقانون التفكك العام ونموذج فيولا وسيبورغ ونموذج دينسوف وخودينكو، أظهرت هذه المقارنة توافق جيد مع النتائج التجريبية كما أظهرت النتائج أن لوغاريتم عمر النصف للنوى يزداد مع زيادة عدد النيوترونات يستثنى من ذلك النوى التي تمتلك أعداداً سحرية في عدد بروتوناتها أو في عدد نيوتروناتها.

أهمية البحث وأهدافه:

تكمن أهمية هذا البحث من كون تفكك ألفا من أهم مراحل تفكك النوى الثقيلة والثقيلة جداً، حيث أن عمر النصف لتفكك ألفا يؤمن لنا معلومات حول البنية النووية مثل طاقة السوية الأساسية، وتحديد السبين النووي والنوعية (J^{π})، وتأثير نموذج الطبقات النووي على هذا النوع من التفككات. كما يستخدم تفكك ألفا في تحديد هوية النيوكليدات والعناصر الجديدة، وذلك بتتبع سلاسل التفكك الإشعاعية لتفكك جسيم ألفا انطلاقاً من النواة الأم المعروفة إلى نواة النيوكليد الغير المعروف.

الهدف الرئيس لهذا العمل، الذي تطغى عليه السمة نصف التجريبية، هو التحقق من مدى استجابة نموذج جاموف في حساب أعمار نصف تفكك ألفا لنظائر الرادون ضمن المجال $197 \leq A \leq 222$ ومقارنة النتائج التي حصلنا عليها مع نماذج أخرى، ومع النتائج التجريبية.

طرائق البحث ومواده:

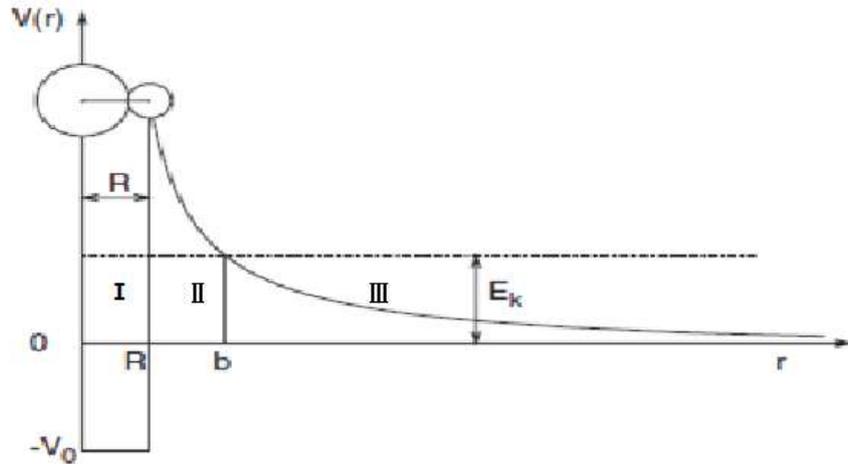
تم في هذا البحث الاعتماد على ما يلي:

نظرية اصدار جسيم ألفا ونموذج جاموف: Alpha theory and Gamow-Like Model

قام جاموف 1928 بتطبيق ميكانيك الكم على تفكك ألفا وفسر ذلك اعتماداً على الفرضيات الاتية [11]:

- يمكن أن يتواجد جسيم ألفا داخل النواة كوحدة قائمة بذاتها.

- يكون جسيم ألفا في حركة دائمة داخل النواة وواقعاً تحت تأثير جهد مماثل للجهد المبين في الشكل (1).



الشكل (1) : يبين الشكل حاجز الجهد بتابعية المسافة بين جسيم الفا والنواة الوليدة [2].

وتكون حركة جسيم الفا محدودة بالحجم الكروي الناتج عن جهد النواة البننت ويتحرك جسيم الفا ذهاباً وإياباً داخل حاجز الجهد، وعند لحظة تكون فيها الظروف مهيئة يخرج جسيم الفا من حاجز الجهد. وحسب الميكانيك التقليدي فإن طاقة جسيم ألفا ليست كافية ليتسلق حاجز الجهد ويخرج من النواة. أما حسب ميكانيك الكم، فإن احتمال وجود جسيم الفا في عنصر الحجم dv يتعين بالجاء $\psi\psi^* dv$ ، حيث ψ هو التابع الموجي الذي يمثل الجسيم الفا بتابعية الإحداثيات والزمن. ونظراً لاستمرار ψ فإن احتمال وجود الجسيم في المنطقة II من الشكل (1) غير معدوم، كما لو أن هناك ثقب في هذا الحاجز الجهدي. وتسمى ظاهرة نفاذ جسيمات الفا للحاجز الكولوني بمفعول النفق Tunneling Effect .

يعطى ثابت التفكك λ ، للنوى المصدرة لجسيم ألفا، بالمعادلة الآتية [3] :

$$\lambda = v \cdot P \quad (2)$$

حيث v : يمثل عدد تصادمات جسيم ألفا في الحاجز الجهدي، في الثانية P : احتمال نفاذ جسيم ألفا عبر الحاجز الجهدي.

يحسب احتمال نفاذ جسيم ألفا عبر الحاجز الجهدي انطلاقاً من معادلة شرودنجر، وقد تبين أن هذا الاحتمال P الذي يدعى بالنفاذية، يعطى باستخدام تقريب (WKB) بالتكامل الاتي [12,2]:

$$P = \exp \left[-\frac{2}{\hbar} \int_R^b \sqrt{2\mu(V(r) - Q_\alpha)} dr \right] \quad (3)$$

R , b حدود التكامل السابق، حيث تمثل R نصف قطر البئر المربع الكروي وتساوي حاصل جمع نصفي قطري جسيم ألفا والنواة الوليدة. والنقطة b نقطة نفاذ جسيم ألفا من حاجز الجهد. وعند هذه النقطة يكون جهد كولوم مساوٍ للطاقة الحركية لجسيمات ألفا الصادرة (E_k) وبما أن جسيمات ألفا الصادرة تحمل معظم طاقة التفكك فإن $E_k = Q_\alpha$ وتقدر b بـ fm وتعطى بالعلاقة الآتية [3]:

$$b = \frac{Z_\alpha Z_D e^2}{4\pi \epsilon_0 Q_\alpha} \quad (4)$$

وتمثل $V(r)$ طاقة الجسيم الكامنة، μ تمثل الكتلة المختزلة لجسيم الفا، \hbar ثابت بلانك مقسوماً على $\pi 2$ ، Q_α تمثل طاقة تفكك الفا وتقدر بالـ MeV ، وتعطى بالعلاقة الآتية [3]:

$$Q_\alpha = [M_p - M_d - m_\alpha] c^2 \quad (5)$$

حيث m_α, M_d, M_p هي كتلة كل من النواة الأم، والنواة البنت وجسيم ألفا على الترتيب، c هي سرعة الضوء.

نموذج جاموف 1 GLM

حسب هذا النموذج تعطى المسافة R بين النواة الوليدة وجسيم ألفا، بالعلاقة [2]:

$$R = r_0 \left(A_1^{1/3} + A_2^{1/3} \right) \quad (6)$$

A_2, A_1 يمثلان العدد الكتلي لكل من النواة البنت وجسيم الفا على الترتيب. تحسب قيمة r_0 من العلاقة الآتية [7]:

$$r_0 = \frac{1.28 A^{1/3} - 0.76 + 0.8 A^{-1/3}}{A^{1/3}} \quad (7)$$

A يمثل العدد الكتلي للنواة الأم.

Z_α, Z_D العدد البروتوني لكل من النواة البنت وجسيم الفا على الترتيب، وتقدر النسبة $\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}$ في الفيزياء النووية بـ $1.440 \text{ MeV} \cdot \text{Fm}$ [13].

وكثيراً ما تكتب النفاذية P كما يلي [2]:

$$P = e^{-2G} \quad (8)$$

واعتماداً على نظرية جاموف قام الباحث زيدب وآخرون [2]، بتطوير واستخدام نموذج لحساب أعمار نصف تفكك الفا

معتمداً على نظرية جاموف التي تحتوي على جهد كولون كمتحول وحيد متغير، كما هو مبين في الشكل (1):

ويعطى الجهد الممثل بالشكل (1) كما يلي [2]:

$$V(r) = \begin{cases} -v_0 & 0 \leq r \leq R \\ \frac{Z_\alpha Z_D e^2}{4\pi\epsilon_0 r} & r > R \end{cases} \quad (9)$$

حيث $V_0 = 25 A_1$ يمثل عمق بئر الجهد [14].

ويمكن الآن حساب احتمال التفكك أي إصدار جسيم الفا في الثانية الواحدة. فيكفي ضرب P بـ عدد تصادمات جسيم

الفا للحاجز الجهد في الثانية. وبافتراض أن قيمته تساوي $v = 10^{20} \text{ s}^{-1}$ [15].

$$\lambda = 10^{20} \cdot \exp \left[-\frac{2}{\hbar} \int_R^b \sqrt{2\mu(V(r) - Q_\alpha)} dr \right] \quad (10)$$

وتفسر العلاقة السابقة، تابعة احتمال تفكك ألفا للطاقة Q_α . وتبين أنه مع ازدياد طاقة جسيمات ألفا يزداد احتمال

التفكك بل يزداد بسرعة كبيرة. وسبب هذا هو أن التابع الأسّي في العلاقة السابقة يتوقف بشدة على المقادير الداخلة في

الأس أي على التكامل الذي يتوقف بدوره على $R - b$ المسمى عرض الحاجز الجهد، وعلى ارتفاع الحاجز فوق

Q_α أي على $V(r) - Q_\alpha$ فكلما زاد هذان المقداران نقص احتمال النفوذ عبر الحاجز. فعندما تزداد Q_α ينقص كلاً

من المقادير المذكورين فينقص الأس ويزداد λ بشدة نتيجة لذلك.

يمكننا تقدير v و R بصورة تقريبية من سرعة جسيم ألفا خارج النواة ومن خلال أي تعيين لنصف القطر النووي، لكن

المعامل الهام فعلاً هو e^{-2G} . وسنجد لاحقاً أننا لسنا بحاجة لمعرفة قيمة v بدقة عالية حتى نتمكن من التحقق من

نظرية جاموف.

يحسب عمر النصف حسب العلاقة الآتية [16]:

$$T = \frac{\ln 2}{\nu P} \quad (11)$$

وتم حساب قيمة التكامل في العلاقة (3) وبعد تعويض العلاقة التي حصلنا عليها في العلاقة (11)، نحصل على العلاقة الآتية [17]:

$$T = \frac{\ln 2}{10^{20} e^{-2 \sqrt{\frac{2\mu}{\hbar^2 Q_\alpha}} \left(\frac{Z_\alpha Z_D e^2}{4\pi\epsilon_0} \right) \left[\frac{\pi}{2} - 2 \sqrt{\frac{Q_\alpha}{B}} \right]}} \quad (12)$$

B: يمثل ارتفاع حاجز الجهد الكولوني، ويعطى بالعلاقة الآتية [2]:

$$B = \frac{Z_\alpha Z_D e^2}{4\pi\epsilon_0 R} \quad (13)$$

يمكن بعد ذلك القيام بحساب لوغاريتم عمر النصف المحسوب من العلاقة (12).

تعديل نموذج جاموف GLM2 :

قمنا بتعديل نموذج جاموف GLM 1، بأخذ معادلة أخرى لنصف القطر اقترحها الباحث الياباني Koura عام 2002، وهي على الشكل التالي [18]:

$$R = 1.08 A_D^{1/3} + 2 \quad (14)$$

حيث: A_D العدد الكتلي للنواة الوليدة. استخدم الباحث Koura العلاقة السابقة في نموذج [18]، بينما سنستخدم العلاقة (14) في نموذج جاموف GLM 2 المقترح من قبلنا.

تم إهمال تأثير العزم الزاوي المداري لجسيم ألفا الصادر، في نموذجي جاموف GLM 1 و GLM 2، وافترض أن جسيم ألفا لا يمتلك عزماً زاوياً مدارياً ($\ell = 0$). يعرف الإسهام الإضافي للعزم الزاوي المداري في عملية تفكك ألفا بحاجز الطرد (النبذ) الذي يجعل إصدار جسيم ألفا أصعب، لكونه يزيد من ارتفاع حاجز الجهد. ولكنه ذو تأثير صغير جداً على معدل التفكك، مقارنة مع طاقة تفكك ألفا Q_α ، ونصف القطر النووي R [19].

حساب عمر نصف نظير الرادون ^{197}Rn ، حسب نموذج GLM 1 والموافق لتفكك ألفا التالي :

$$^{197}_{86}\text{Rn} \rightarrow ^{193}_{84}\text{Po} + ^4_2\text{He} \quad (15)$$

$$r_0 = \frac{1.28 A^{1/3} - 0.76 + 0.8 A^{-1/3}}{A^{1/3}} = 1.173 \text{ fm}$$

$$R = r_0 \left(A_1^{1/3} + A_2^{1/3} \right) = 1.173 \left(193^{1/3} + 4^{1/3} \right) = 8.640 \text{ fm}$$

$$\mu = \frac{4 \times 193}{197} = 3.918$$

$$B = \frac{Z_\alpha Z_D e^2}{4\pi\epsilon_0 R} = \frac{2 \times 84 \times 1.440}{8.640} = 28 \text{ MeV}$$

يعطى احتمال نفاذ حاجز الجهد بالعلاقة (8):

$$P = e^{-2G}$$

حيث :

$$2G = 2 \left(\frac{2\mu}{\hbar^2 Q_\alpha} \right)^{1/2} \left(\frac{Z_\alpha Z_D e^2}{4\pi\epsilon_0} \right) \left(\frac{\pi}{2} - 2 \sqrt{\frac{Q_\alpha}{B}} \right)$$

من العلاقة (5) نجد أن قيمة طاقة تفكك ألفا الموافقة لهذا التفكك $Q_\alpha = 7.41 \text{ MeV}$ نحسب $2 \left(\frac{2\mu}{\hbar^2 Q_\alpha} \right)^{1/2}$:

$$2 \left(\frac{2\mu}{\hbar^2 Q_\alpha} \right)^{1/2} = 2 \left(\frac{2\mu(u)931.5 \left(\frac{\text{MeV}}{u} \right)}{(\hbar^2 c)^2 (\text{MeV} \cdot \text{fm})^2 Q_\alpha (\text{MeV})} \right)^{1/2} =$$

$$2 \left(\frac{2 \times 3.918 \times 931.5}{(197.3)^2 \times 7.41} \right)^{1/2} = 0.318 \text{ (MeV} \cdot \text{fm)}^{-1}$$

: نحسب $\left(\frac{Z_\alpha Z_D e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)$

$$\left(\frac{Z_\alpha Z_D e^2}{4\pi\epsilon_0} \right) = (2)(84)(1.440) = 241.92 \text{ MeV} \cdot \text{fm}$$

: نحسب $\left(\frac{\pi}{2} - 2 \sqrt{\frac{Q_\alpha}{B}} \right)$

$$\left(\frac{\pi}{2} - 2 \sqrt{\frac{Q_\alpha}{B}} \right) = \frac{\pi}{2} - 2 \sqrt{\frac{7.41}{28}} = 0.541$$

وبالتعويض في العلاقة (8) نجد:

$$P = e^{-41.619} = 8.415 \times 10^{-19}$$

ومن ثم التعويض في العلاقة (12) نجد:

$$T_{1/2} = 8.236 \times 10^{-3} \text{ (s)}$$

$$\log_{10} \left(T_{1/2} \text{ (s)} \right) = -2.08$$

وذلك حسب النموذج GLM1

حساب عمر نصف نظير الرادون ^{197}Rn ، حسب نموذج GLM 2 والموافق لتفكك الفا المعطى في المعادلة (15):

$$R = 1.08 A_D^{1/3} + 2 = 1.08 \times 193^{1/3} + 2 = 8.241 \text{ fm}$$

$$\mu = \frac{4 \times 193}{197} = 3.918$$

$$B = \frac{Z_\alpha Z_D e^2}{4\pi\epsilon_0 R} = \frac{2 \times 84 \times 1.440}{8.241} = 29.355 \text{ MeV}$$

يعطى احتمال نفاذ حاجز الجهد بالعلاقة (8):

$$P = e^{-2G}$$

$$2G = 2 \left(\frac{2\mu}{\hbar^2 Q_\alpha} \right)^{1/2} \left(\frac{Z_\alpha Z_D e^2}{4\pi\epsilon_0} \right) \left(\frac{\pi}{2} - \sqrt{\frac{Q_\alpha}{B}} \right)$$

من العلاقة (5) نجد أن قيمة طاقة تفكك الفا الموافقة لهذا التفكك $Q_\alpha = 7.41 \text{ MeV}$

: نحسب $2 \left(\frac{2\mu}{\hbar^2 Q_\alpha} \right)^{1/2}$

$$2 \left(\frac{2\mu}{\hbar^2 Q_\alpha} \right)^{1/2} = 2 \left(\frac{2\mu(\text{u})931.5 \left(\frac{\text{MeV}}{\text{amu}} \right)}{(\hbar^2 c)^2 (\text{MeV} \cdot \text{fm})^2 Q_\alpha (\text{MeV})} \right)^{1/2} =$$

$$2 \left(\frac{2 \times 3.918 \times 931.5}{(197.3)^2 \times 7.41} \right)^{1/2} = 0.318 \text{ (MeV} \cdot \text{fm)}^{-1}$$

: نحسب $\left(\frac{Z_\alpha Z_D e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)$

$$\left(\frac{Z_\alpha Z_D e^2}{4\pi\epsilon_0} \right) = (2)(84)(1.440) = 241.92 \text{ MeV} \cdot \text{fm}$$

$$\text{نحسب} \left(\frac{\pi}{2} - 2 \sqrt{\frac{Q_\alpha}{B}} \right) :$$

$$\left(\frac{\pi}{2} - 2 \sqrt{\frac{Q_\alpha}{B}} \right) = \frac{\pi}{2} - 2 \sqrt{\frac{7.41}{29.355}} = 0.565$$

وبالتعويض في العلاقة (8):

$$P = e^{-43.465} = 1.328 \times 10^{-19}$$

ومن ثم التعويض في العلاقة (12) نجد:

$$T_{1/2} = 0.052 \text{ (s)}$$

$$\log_{10} \left(T_{1/2} \text{ (s)} \right) = -1.28$$

حساب أعمار نصف تفكك الفا حسب نموذج روير : (Royer empirical formula)

اقترح الباحث روير معادلة لحساب أعمار نصف تفكك الفا للانتقالات الحاصلة للنوى من السوية الطاقية الدنيا للنواة الأم إلى السوية الطاقية الدنيا للنواة البنت مبينة بالعلاقة التالية [21,20,9]:

$$\log_{10} \left[T_{1/2} \text{ (s)} \right] = a - bA^{1/6} \sqrt{Z} + \frac{cZ}{\sqrt{Q}} \quad (16)$$

حيث Z, A هما العدد الكتلي والعدد الذري للنواة الأم على الترتيب. و a, b, c ثوابت توافقية تجريبية يتم تحديدها باستخدام طريقة المربعات الصغرى تعطى قيمها في الجدول (1).

الجدول (1): يبين قيم الثوابت a, b, c في معادلة روير لمختلف أنواع النوى [21].

c	b	a	N	Z
1.5864	-1.1629	-25.31	زوجي	زوجي
1.5848	-1.0859	-26.65	فردى	زوجي
1.5920	-1.1423	-25.68	زوجي	فردى
1.6971	-1.1130	-29.48	فردى	فردى

نحسب عمر نصف نظير الرادون $^{197}_{86}\text{Rn}$ حسب نموذج روير ، والموافق لتفكك الفا، المعادلة (15) :
إن نواة نظير الرادون هذا من النوى (الزوجية - الفردية)، وبالتالي فإن قيم الثوابت المستخدمة في المعادلة (16) اعتماداً على الجدول (1) هي:

(5) نجد أن قيمة طاقة تفكك الفا الموافقة لهذا التفكك $(a = -26.65, b = -1.0859, c = 1.5848)$ ،
 $Q_\alpha = 7.41 \text{ MeV}$

بالتعويض في المعادلة (16) نجد:

$$T_{1/2} \text{ (s)} = 0.135 \text{ s}$$

$$\log_{10} \left[T_{1/2} \text{ (s)} \right] = -0.87$$

حساب أعمار نصف تفكك ألفا حسب قانون التفكك العام : UDL

تتبع الباحث كي وآخرون (Qi et al) بقانون التفكك العام للتفككات العنقودية Cluster Decay انطلاقاً من الآلية المجهرية لعملية التفكك الإشعاعي microscopic mechanism process of the radioactive decay [10]، حيث يعطى هذا القانون بالشكل التالي [22]:

$$\log_{10} [T_{1/2} (s)] = aZ_{\alpha}Z_d \sqrt{\frac{A}{Q_{\alpha}}} + b \sqrt{AZ_{\alpha}Z_d (A_d^{1/3} + A_{\alpha}^{1/3})} + c \quad (17)$$

حيث $A = \frac{A_d A_{\alpha}}{(A_d + A_{\alpha})}$ و a, b, c ثابت يتم تحديدها بوساطة المعطيات التجريبية لتفكك ألفا والتفكك العنقودي. حيث $a = 0.3949$, $b = -0.3693$, $c = -23.7615$ و Z_{α} , Z_d هما عدد البروتونات لكل من النواة البنت وجسيم ألفا على الترتيب .

نحسب عمر نصف نظير الرادون $^{197}_{86}\text{Rn}$ والموافق لتفكك ألفا ، المعادلة (15) ، باستخدام قانون التفكك العام :UDL

من أجل نواة الرادون في معادلة التفكك (11) نجد:

$$A = \frac{A_d A_{\alpha}}{(A_d + A_{\alpha})} = \frac{193 \times 4}{193 + 4} = 3.918 \quad , \quad a = 0.3949 \quad , \quad b = -0.3693 \quad , \quad c = -23.7615$$

$Z_d = 84$, $Z_{\alpha} = 2$ من العلاقة (5) نجد أن قيمة طاقة تفكك ألفا الموافقة لهذا التفكك $Q_{\alpha} = 7.41 \text{ MeV}$ بالتعويض في المعادلة (17) نجد:

$$T_{1/2} (s) = 0.058 \text{ s}$$

$$\log_{10} [T_{1/2} (s)] = -1.23$$

حساب أعمار نصف تفكك ألفا حسب نموذج فيولا - سيبورغ :VSS

اعتماداً على نظرية جاموف، وانطلاقاً من قاعدة غايغر- نوتال لوصف اصدار جسيمات ألفا للنوى والتي تنص على ان لوغاريتم اعمار نصف النوى يتناسب عكساً مع الجذر التربيعي لطاقة جسيمات ألفا الصادرة، تم صياغة معادلة لحساب أعمار النصف لتفكك ألفا من قبل فيولا - سيبورغ، تعطى كما يلي [6]:

$$\log_{10} [T_{1/2} (s)] = \frac{(aZ + b)}{\sqrt{Q_{\alpha}}} + cZ + d + h_{log} \quad (18)$$

حيث Z شحنة النواة الأم ، Q_{α} طاقة جسيم ألفا الصادر خلال التفاعل وتقدر بالـ MeV ، البارامترات a, b, c, d ثابت قيمها $a=1.66175$, $b=-8.5166$, $c = -0.20228$, $d = -33.9069$ والمعامل h_{log} يدل على معامل الإعاقه ويتعلق بعدد كل من البروتونات والنترونات الفردية [23]. كما أعطى فيولا- سيبورغ قيم المعامل السابق كما يلي [24]:

$$h_{log} = 0 \text{ for } Z, N \text{ even} - \text{even}$$

$$h_{log} = 0.772 \text{ for } Z = \text{odd}, N = \text{even}$$

$$h_{log} = 1.066 \text{ for } Z = \text{even}, N = \text{odd}$$

$$h_{log} = 1.114 \text{ for } Z, N \text{ odd}$$

إن إضافة المعامل h_{log} يأتي من كون أعمار أنصاف النوى الفردية العدد الكتلي أو الفردية - الفردية أكبر من أعمار أنصاف النوى التي تجاور النوى الزوجية - الزوجية . ويعود السبب إلى آلية تشكل جسيم ألفا داخل النواة ، فمن أجل النوى الزوجية-الزوجية يمتلك كل من الزوج البروتوني والنتروني سبين يساوي الصفر ويتشكل جسيم ألفا من الطبقات

العليا بسهولة، أما في حالة النوى التي تمتلك عدداً فردياً في بروتوناتها أو نيوتروناتها أو كلاهما، فإن النكليون الفردي غير المتزاوج مع نكليون آخر يمتلك سبين وعادة عزمياً حركياً مدارياً وهنا فإن جسيم ألفا سيتشكل من الزوج النكليوني الذي يمتلك عزمياً مدارياً يساوي الصفر، في المستويات التي تقع تحت النكليون الفردي، وفي هذه الحالة ، فإن النواة البنت ستكون مثارة لوجود سويات طاقة فارغة تحت المستوي الذي يحتوي النكليون الفردي. ومن أجل ذلك تم تضمين هذا المعامل إلى المعادلة نصف التجريبية [25].

نحسب عمر نصف نظير الرادون $^{197}_{86}\text{Rn}$ ، حسب نموذج فيولا-سيبورغ والموافق لتفكك الفا ، المعادلة (15) :
بعد الأخذ بعين الاعتبار أن نواة نظير الرادون في المعادلة (15) من النوى (الزوجية - الفردية)، ويتعويض كل من طاقة تفكك الفا الموافقة لهذا التفكك $Q_\alpha = 7.41 \text{ MeV}$ ، وقيم الثوابت المستخدمة a,b,c,d و h_{log} في المعادلة (18) نجد :

$$T_{1/2}(s) = 0.138 \text{ s}$$

$$\log_{10} [T_{1/2}(s)] = -0.86$$

حساب أعمار نصف تفكك الفا حسب نموذج دينسوف - خوينكو (DEKH):

انطلاقاً من معادلة روير التجريبية (المعادلة 16)، قام كل من دينسوف - خوينكو [26,8] بصياغة معادلة نصف تجريبية لحساب أعمار نصف تفكك الفا للنوى المقابلة للانتقالات من السوية الأرضية للنواة الأم إلى السوية الأرضية للنواة البنت تعطي كما يلي:

$$\log_{10} [T_{1/2}(s)] = -a - \frac{bA^{1/6}\sqrt{Z}}{\mu} + \frac{cZ}{\sqrt{Q_\alpha}} + \frac{d\sqrt{\ell(\ell+1)}}{QA^{-1/6}} - e((-1)^\ell - 1) \quad (19).$$

تمكننا المعادلة السابقة من حساب أعمار نصف تفكك الفا لكل من النوى الزوجية - الزوجية ، الزوجية - الفردية ، الفردية - الزوجية، والفردية - الفردية.

حيث A، Z العدد الكتلي وعدد البروتونات للنواة الأم على الترتيب، ℓ العزم المداري لجسيم الفا الصادر.

$\mu = \left(\frac{A}{A-4}\right)^{1/6}$ ، Q_α هي طاقة جسيم الفا الصادر. ووفقاً للمعادلة (16) السابقة، نأخذ بعين الاعتبار خضوع

اصدار جسيم الفا لقواعد انتقاء سبين - النوعية الآتية [28,27]:

$$\ell_{\min} = \begin{cases} \Delta j & \text{for even } \Delta j \text{ and } \pi_p = \pi_d \\ \Delta j + 1 & \text{for odd } \Delta j \text{ and } \pi_p = \pi_d \\ \Delta j & \text{for odd } \Delta j \text{ and } \pi_p \neq \pi_d \\ \Delta j + 1 & \text{for even } \Delta j \text{ and } \pi_p \neq \pi_d \end{cases}$$

ℓ_{\min} هو العدد الكمي المداري الأصغري .

$\Delta j = |j_p - j_d|$ هي قيم السبين والنوعية للنواة الأم والنواة البنت على الترتيب [29].

الجدول (2) : يبين قيم السبين والنوعية للنواة الأم والنواة البنت والعدد الكمي المداري الأصغري لهذا التفكك [29].

النواة الأم	النواة البنت	السبين والنوعية للنواة الأم	السبين والنوعية للنواة البنت	العدد الكمي المداري الأصغري l_{min}
$^{197}_{86}\text{Rn}$	$^{193}_{84}\text{Po}$	$3/2^-$	$3/2^-$	0
$^{198}_{86}\text{Rn}$	$^{194}_{84}\text{Po}$	0^+	0^+	0
$^{199}_{86}\text{Rn}$	$^{195}_{84}\text{Po}$	$3/2^-$	$3/2^-$	0
$^{200}_{86}\text{Rn}$	$^{196}_{84}\text{Po}$	0^+	0^+	0
$^{201}_{86}\text{Rn}$	$^{197}_{84}\text{Po}$	$3/2^-$	$3/2^-$	0
$^{202}_{86}\text{Rn}$	$^{198}_{84}\text{Po}$	0^+	0^+	0
$^{203}_{86}\text{Rn}$	$^{199}_{84}\text{Po}$	$3/2^-$	$3/2^-$	0
$^{204}_{86}\text{Rn}$	$^{200}_{84}\text{Po}$	0^+	0^+	0
$^{205}_{86}\text{Rn}$	$^{201}_{84}\text{Po}$	$5/2^-$	$3/2^-$	2
$^{206}_{86}\text{Rn}$	$^{202}_{84}\text{Po}$	0^+	0^+	0
$^{207}_{86}\text{Rn}$	$^{203}_{84}\text{Po}$	$5/2^-$	$5/2^-$	0
$^{208}_{86}\text{Rn}$	$^{204}_{84}\text{Po}$	0^+	0^+	0
$^{209}_{86}\text{Rn}$	$^{205}_{84}\text{Po}$	$5/2^-$	$5/2^-$	0
$^{210}_{86}\text{Rn}$	$^{206}_{84}\text{Po}$	0^+	0^+	0
$^{211}_{86}\text{Rn}$	$^{207}_{84}\text{Po}$	$1/2^-$	$5/2^-$	2
$^{212}_{86}\text{Rn}$	$^{208}_{84}\text{Po}$	0^+	0^+	0
$^{213}_{86}\text{Rn}$	$^{209}_{84}\text{Po}$	$9/2^+$	$1/2^-$	5
$^{214}_{86}\text{Rn}$	$^{210}_{84}\text{Po}$	0^+	0^+	0
$^{215}_{86}\text{Rn}$	$^{211}_{84}\text{Po}$	$9/2^+$	$9/2^+$	0
$^{216}_{86}\text{Rn}$	$^{212}_{84}\text{Po}$	0^+	0^+	0
$^{217}_{86}\text{Rn}$	$^{213}_{84}\text{Po}$	$9/2^+$	$9/2^+$	0
$^{218}_{86}\text{Rn}$	$^{214}_{84}\text{Po}$	0^+	0^+	0
$^{219}_{86}\text{Rn}$	$^{215}_{84}\text{Po}$	$5/2^+$	$9/2^+$	2
$^{220}_{86}\text{Rn}$	$^{216}_{84}\text{Po}$	0^+	0^+	0
$^{221}_{86}\text{Rn}$	$^{217}_{84}\text{Po}$	$7/2^-$	$9/2^+$	2
$^{222}_{86}\text{Rn}$	$^{218}_{84}\text{Po}$	0^+	0^+	0

a,b,c,d,e هي ثوابت تم تحديدها من قبل دينسوف كما هي مبينة في الجدول (3) التالي [26]:

الجدول (3): يبين قيم المعاملات المستخدمة في معادلة دينسوف - خوينكو

نوع النواة	a	b	C	d	e
زوجية - زوجية	-26.1721	-1.1549	1.6088	0	0
زوجية - فردية	-30.2365	-1.0726	1.6910	0.7198	-0.6965
فردية - زوجية	-30.0842	-1.0853	1.6925	0.2453	-0.6406
فردية - فردية	-30.8222	-0.9874	1.6577	0.5893	-0.2914

نحسب عمر نصف نظير الرادون ^{197}Rn ، حسب نموذج دينسوف-خودينكو والموافق لتفكك الفا، المعادلة (15) :

من أجل $A=197$ نحسب $\mu = \left(\frac{197}{197-4}\right)^{1/6} = 1.003$ ، وبتعويض قيم الثوابت a,b,c,d من الجدول (2) من أجل نظير الرادون ^{197}Rn ، وطاقة التفكك $Q_\alpha = 7.41 \text{ MeV}$ والعدد الكمي المداري الأصغري $l_{\min} = 0$ في معادلة لوغاريتم عمر النصف (19) نجد:

$$T_{1/2}(\text{s}) = 0.186 \text{ s}$$

$$\log_{10} [T_{1/2}(\text{s})] = -0.73$$

- تحديد الانحراف عن معدل الجذر التربيعي والانحراف المعياري وعامل التوافق للنماذج المستخدمة:

من أجل مقارنة لوغاريتم اعمار نصف النوى للقيم المحسوبة من خلال النماذج المتداولة مع القيم المحسوبة تجريبياً تم حساب الانحراف عن معدل الجذر التربيعي (rmsd)(Root mean square deviation) لمعدل القيم العملية والنظرية من خلال العلاقة الآتية [30]:

$$\text{rmsd} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\log_{10} T_{\text{exp}}^i - \log_{10} T_{\text{calc}}^i)^2}{N}} \quad (20)$$

كما تم حساب الانحراف المعياري Standard deviation (σ) للقيم العملية والنظرية من خلال العلاقة الآتية [31] :

$$\sigma = \sum_{i=1}^N \frac{|\log_{10} T_{\text{exp}}^i - \log_{10} T_{\text{calc}}^i|}{N} \quad (21)$$

حيث N هي عدد نظائر الرادون التي قمنا بحساب عمر النصف لها.

النتائج والمناقشة:

قمنا في هذا العمل، بحساب لوغاريتم أعمار النصف، بنفس الأسلوب الذي استعرضناه سابقاً، لنوى نظائر الرادون ضمن المجال المدروس، ومن أجل جميع النماذج: $222197 \leq A \leq$ بعد القيام بإجراء الحسابات المتعلقة بنموذج جاموف GLM 1 و GLM 2 وجميع النماذج الأخرى المتداولة: نموذج روير (Royer) ونموذج فيولا-سيبورغ (Viola- Seaborg) وقانون التفكك العام (UDL) ونموذج دينسوف-خودينكو (DEKH) عرضنا نتائجنا في الجدول (4).

الجدول (4) : مقارنة بين لوغاريتم عمر النصف التجريبي log_{10}^{exp} ولوغاريتم عمر النصف النظري log_{10}^{cal} حسب نموذج جاموف GLM 1 و GLM 2 لنظائر الرادون ضمن المجال $222197 \leq A$. والنماذج الأخرى المتداولة في البحث .

A , Z, N	Q_{α} (MeV)	عمر النصف التجريبي [29]	log_{10}^{exp} [T(s)]	log_{10}^{cal} [T(s)]					
				GLM 1	GLM 2	Royer	UDL	VSS	DEKH
197, 86, 111	7.41	54 ms	-1.26	-2.08	-1.28	-0.87	-1.23	-0.86	-0.73
198, 86, 112	7.34	65 ms	-1.18	-1.88	-1.05	-0.98	-1.02	-1.69	-0.88
199, 86, 113	7.13	590 ms	-0.22	-1.09	-0.31	0.06	-0.32	0.09	0.26
200, 86, 114	7.04	1.09 s	0.03	-0.77	0.01	0.03	-0.02	-0.65	0.15
201, 86, 115	6.86	7.00 s	0.85	-0.11	0.68	1.01	0.59	1.07	1.28
202, 86, 116	6.77	9.7 s	0.98	0.21	1.01	1.00	0.91	0.34	1.13
203, 86, 117	6.63	44 s	1.64	0.77	1.61	1.86	1.42	1.95	2.20
204, 86, 118	6.54	1.242m	1.87	1.11	1.93	1.87	1.75	1.24	2.02
205, 86, 119	6.39	3.83 m	2.22	1.72	2.55	2.81	2.34	2.92	3.88
206, 86, 120	6.38	5.67 m	2.53	1.80	2.65	2.49	2.36	1.90	2.65
207, 86, 121	6.25	9.25 m	2.74	2.34	3.18	3.37	2.89	3.52	3.81
208, 86, 122	6.26	34.35 m	3.16	2.31	3.11	2.96	2.83	2.41	3.13
209, 86, 123	6.15	28.5 m	3.23	2.76	3.60	3.77	3.27	3.95	4.24
210, 86, 124	6.16	2.4 h	3.93	2.72	3.65	3.36	3.22	2.84	3.54
211, 86, 125	5.96	14.6 h	4.72	3.67	4.50	4.60	4.08	4.81	5.85
212, 86, 126	6.38	23.9 m	3.15	1.70	2.51	2.37	2.26	1.90	2.52
213, 86, 127	8.24	19.5 ms	-1.71	-5.12	-4.35	-3.77	-3.99	-3.41	-1.24
214, 86, 128	9.21	270 ns	-6.57	-7.91	-7.04	-6.72	-6.48	-7.01	-6.69
215, 86, 129	8.83	2.30 μ s	-5.64	-6.92	-6.06	-5.43	-5.58	-5.01	-5.56
216, 86, 130	8.20	45 μ s	-4.34	-5.11	-4.26	-4.08	-3.93	-4.37	-4.01

217,86, 131	7.88	540 μ s	-3.27	-	-3.30	-2.78	-	-	-2.74
218,86, 132	7.26	35 ms	-1.45	-	-1.17	-1.13	-	-	-1.01
219,86, 133	6.94	3.96 s	0.60	-	0.03	0.36	0.01	0.77	1.24
220,86, 134	6.40	55.6 s	1.75	1.38	2.23	2.12	2.05	1.82	2.28
221,86, 135	6.16	25.7 m	3.18	2.46	3.31	3.50	3.04	3.91	4.67
222,86, 136	5.60	3.823 d	5.51	5.22	6.10	5.80	5.60	5.48	6.01

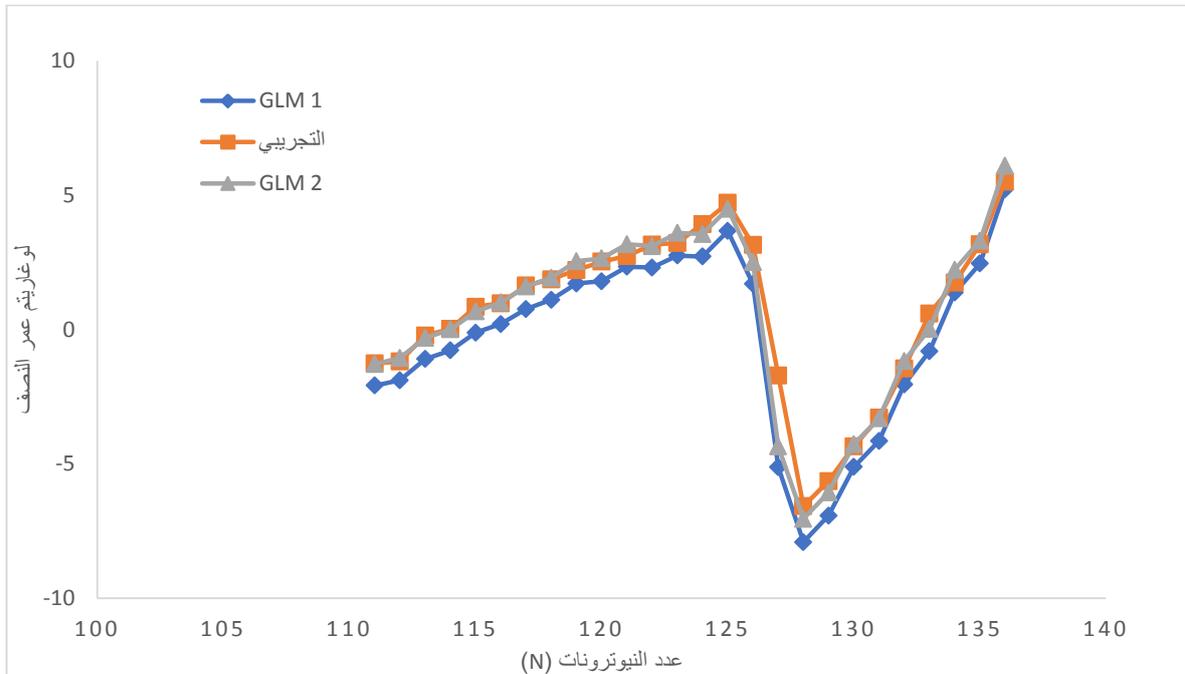
نلاحظ من الجدول (4) بأن طاقات جسيمات الفا التجريبية Q_α لنظائر الرادون تتراوح من 5.60 MeV الى 9.21 MeV كما وأن لوغاريتم عمر النصف التجريبي المقابل يتراوح من -6.57 الى 5.51 لأطول وأقصر عمر نصف مثبت في الجدول (4)، أي ازدياد طاقة التفكك بحوالي 4 MeV يوافق زيادة بلوغاريتم عمر النصف التجريبي مقدارها 12 مرة تقريبا لنواة $^{214}_{86}\text{Rn}$ و نواة $^{222}_{86}\text{Rn}$ لذا فإن عمر النصف لنظائر الرادون يتأثر متأثراً ملحوظاً بأقل تغير بقيم طاقات جسيمات الفا وإن أطول عمر نصف لنظائر الرادون يصدر جسيمات الفا بطاقات أقل والعكس صحيح.

كما نلاحظ أن هناك توافق جيد بين القيم التجريبية للوغاريتم عمر نصف نظائر الرادون والقيم التي قمنا بحسابها حسب نموذج جاموف GLM 2، باستثناء قيمة لوغاريتم عمر النصف المحسوبة لنواة النظير $^{213}_{86}\text{Rn}$ والتي لا تتوافق مع قيمة لوغاريتم عمر النصف التجريبي لنواة النظير السابقة، وذلك لأن جسيم ألفا الصادر يمتلك عزماً مدارياً عالٍ ($\ell = 5$)، والذي بدوره يزيد من ارتفاع حاجز الجهد، مما يجعل إصدار جسيم ألفا من النواة أصعب ويعطي نواة النظير استقراراً إضافياً. وهذا ما يمكن ملاحظته بمقارنة قيمة لوغاريتم عمر النصف المحسوبة لنواة النظير نفسها حسب نموذج دينسوف-خودينكو الذي يأخذ بعين الاعتبار العزم الكمي المداري، مع لوغاريتم عمر النصف التجريبي والذي يبدو متقارباً مقارنةً مع جميع النماذج الأخرى. بينما لا نلاحظ هذا التوافق الجيد بين قيم لوغاريتم عمر النصف المحسوبة والتجريبية باستخدام نموذج GLM 1. مما يدل على إمكانية استخدام نموذج جاموف GLM 2 في تفسير نظرية تفكك الفا وحساب عمر النصف بدقة أفضل من النموذج GLM 1 الذي يعطي تنبؤات ملحوظة ما بين القيم العملية والنظرية للوغاريتم عمر النصف لنظائر الرادون المدروسة. ويعود السبب في تلك التباينات الملحوظة في لوغاريتم عمر النصف النظري والتجريبي في النموذج GLM 1 إلى نصف قطر النواة المعتمد الذي كان له الأثر الكبير في تلك التباينات.

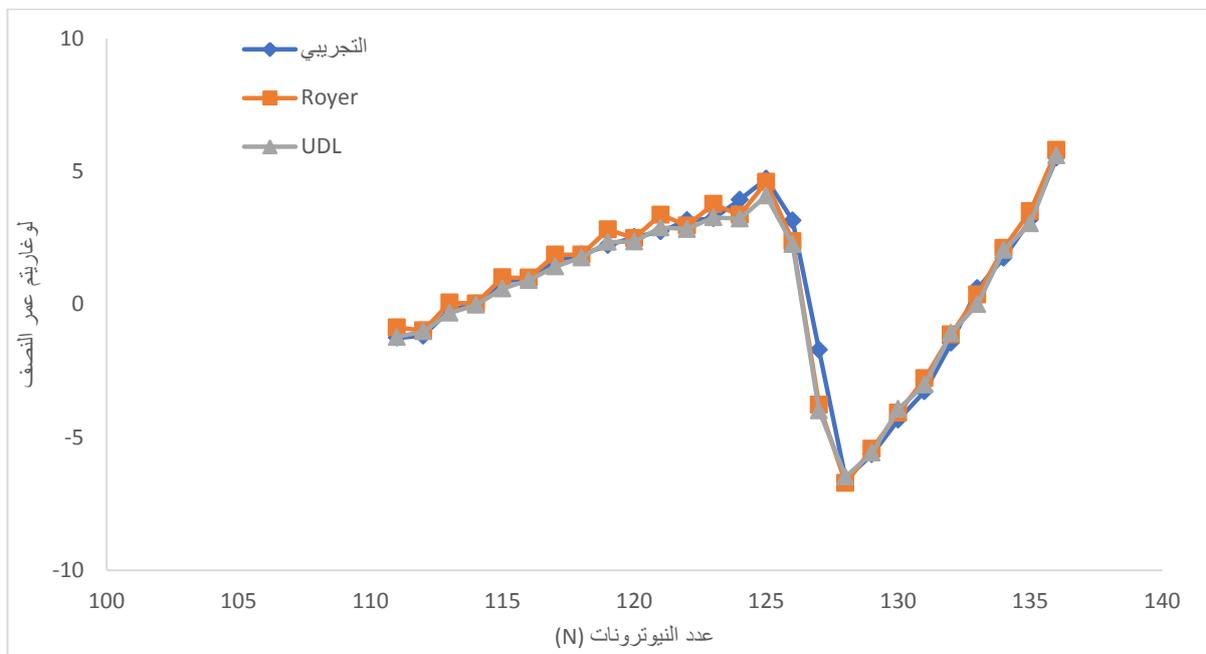
ينضح من الجدول (4) مفعول أطلق عليه مفعول ما فوق الاستقرار بقليل للنوى التي تمتلك عدداً من النيوترونات أو البروتونات قريبة من 28، 50، 82، 126 بعبارة أخرى نلاحظ وجود ترابطات قوية جداً كلما اقتربنا من الأعداد المذكورة السابقة والتي تدعى بالأعداد السحرية حيث نلاحظ أن لوغاريتم عمر نصف نظير الرادون $^{211}_{86}\text{Rn}$ الذي يمتلك عدد نيوتروني 125 هو الأكبر من بين جميع نظائر الرادون المدروسة، التي تسبق العدد السحري النيوتروني 126. بينما بقية النماذج الأخرى في الجدول (4) فقد أعطت توافقات جيدة ما بين القيم التجريبية والنظرية للوغاريتم اعمار نصف نظائر الرادون ويمكننا اعتماد تلك النماذج في حساب أعمار نصف تفكك الفا وتقديم تفسير لهذا التفكك.

علاقة لوغاريتم عمر النصف مع عدد النيوترونات :

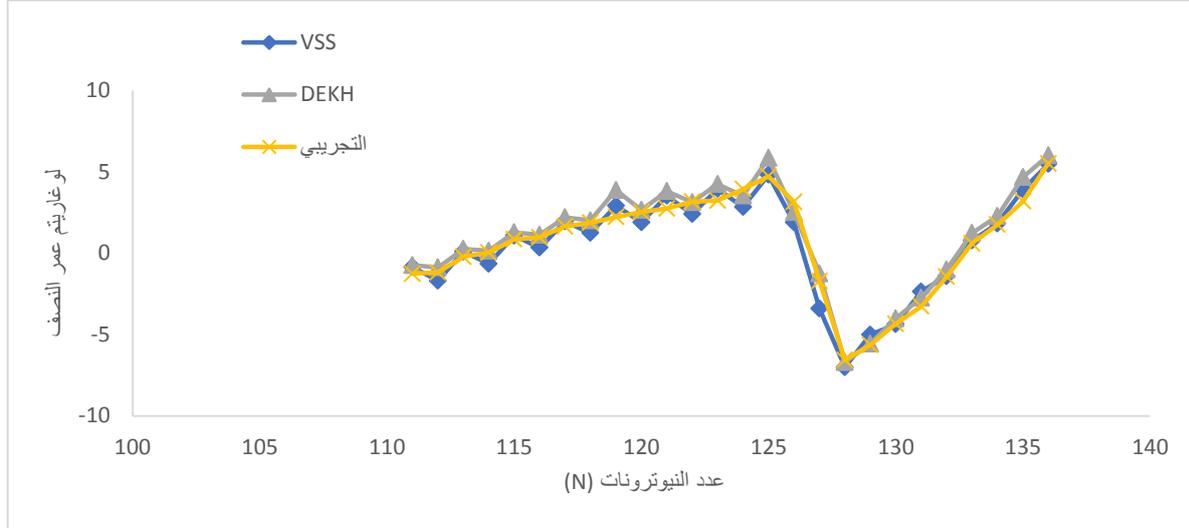
من أجل إجراء مقارنات ما بين القيم التجريبية والنظرية لأعمار نصف نظائر الرادون قمنا برسم الأشكال (2) و (3) و (4) التي تبين العلاقة ما بين عدد النيوترونات ولوغاريتم عمر النصف التجريبي وأعمار النصف النظرية المحسوبة حسب نموذجي جاموف GLM 1 و GLM 2 والنماذج الأخرى المستخدمة، بتابعة عدد النيوترونات.



الشكل (2) : علاقة لوغاريتم عمر النصف مع عدد النيوترونات لنوى نظائر الرادون حسب النموذجين GLM 1 و GLM 2.



الشكل (3) - علاقة لوغاريتم عمر النصف مع عدد النيوترونات لنوى نظائر الرادون حسب نموذج روير (Royer) وقانون التفكك العام (UDL)

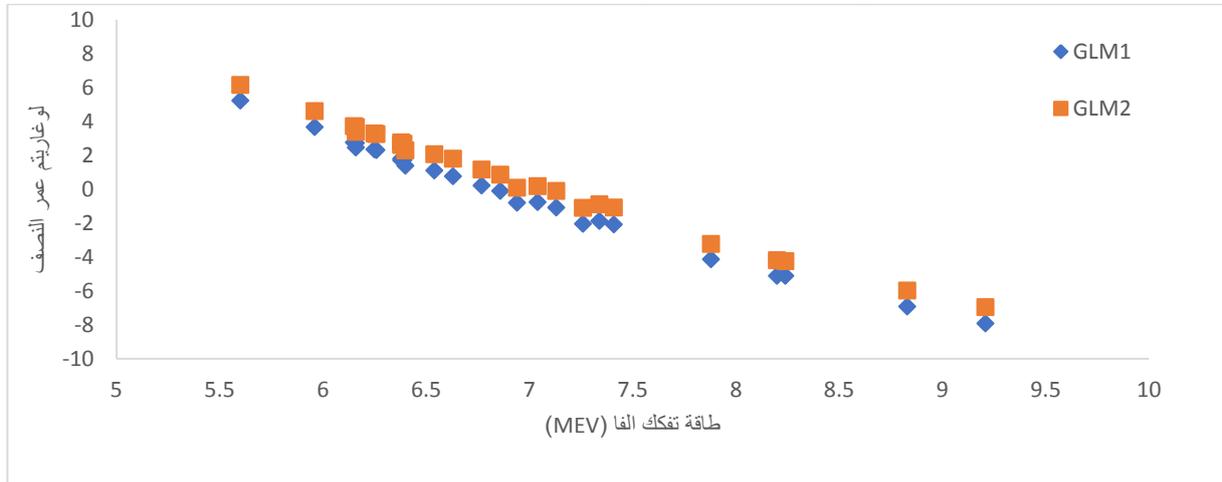


الشكل (4) : علاقة لوغاريتم عمر النصف مع عدد النيوترونات لنوى نظائر الرادون حسب نموذج فيولا - سيبورغ (VSS) ونموذج دينسوف - خودينكو (DEKH)

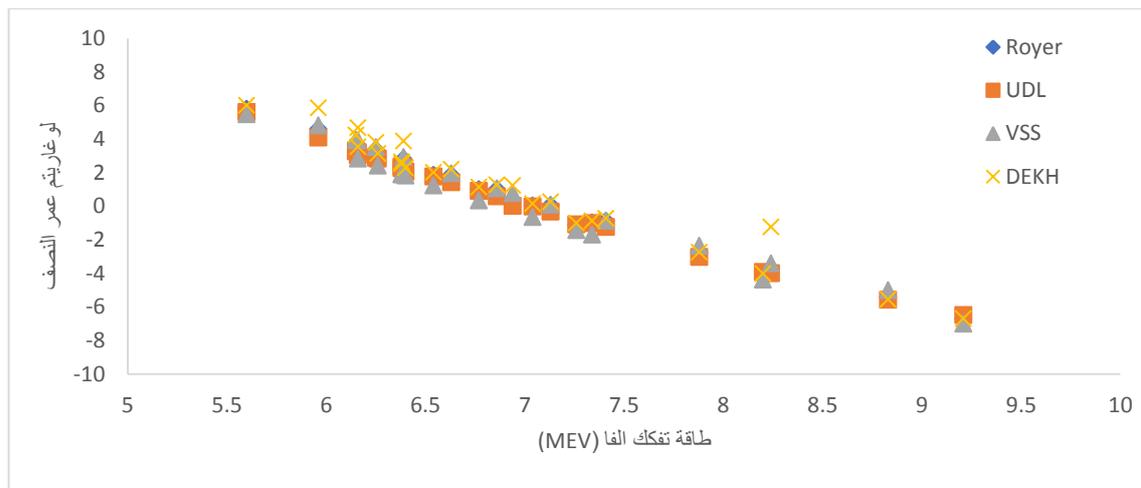
يتبين من الأشكال أعلاه والتابعة لنموذج جاموف والنماذج الأخرى أنّ لوغاريتم عمر النصف يزداد مع اقتراب العدد النيوتروني لنظير الرادون من العدد النيوتروني 125 الذي يسبق العدد السحري النووي 126 وهو عدد يرافق طبقة نووية مغلقة أو مملوءة [32]. وعند هذا العدد السحري ستصبح النوى ذات ترابط قوي جداً وتحريض هذه النوى يتطلب طاقة أكبر بكثير من الطاقة اللازمة لتحريض النوى اللاسحرية. بمعنى أن النواة تصبح أكثر استقراراً فيزداد عمر النصف لها. وبالتالي نستنتج أنّ العدد السحري يخفي في النوى الغنية بالنيوترونات، وهي حقيقة ترتبط ببنيته النووية وهذا ما يتفق مع بعض التنبؤات النظرية التي تقترح أنّ قشرة النيوترونات تضعف ما يسمى بالتأثر النووي سبين-مدار. وهذا التأثير مصطلح ظاهري يستخدم في نموذج الحقل الواسع ليصف ما إذا كان الاندفاع الزاوي السبيني الذاتي للنكليون يشير إلى اتجاه اندفاعه الزاوي المداري، أو إلى الاتجاه المعاكس. يفصل التأثير سبين-مدار الحالات التي يكون لها الاندفاع الزاوي المداري نفسه مما يقضي إلى العدد السحري المرشح جيداً في المنظومات القريبة من الاستقرار. على كل حال تضعف قوة هذا المصطلح سبين-مدار في المنظومات الغنية بالنيوترونات، مما يقضي إلى إعادة ترتيب مدارات النكليون الوحيد، وبالتالي اختفاء الأعداد السحرية. بشكل عام وبالعودة إلى الجدول (4) نجد أنّ طاقة تفكك ألفا بعد العدد النيوتروني 125 تزداد والذي يقابله تناقص في لوغاريتم عمر النصف، ثم تعود لتتناقص مع ازدياد عدد النيوترونات، الأمر الذي يقابله زيادة في لوغاريتم عمر النصف التجريبي والنظري معاً، لأن زيادة عدد النيوترونات يتغلب على قوة التناقص الكولومي بين البروتونات فيجعل النواة أكثر استقراراً وبهذا يزداد عمر النصف: تتوضع النيوترونات بين البروتونات لتخفيف قوى التدافع الكهربائي بينها والفائض منها يغلف النواة مشكلاً غلافاً نيوترونياً تزداد سماكته وكثافته وتتناقص من نظير إلى آخر مع الاقتراب من طبقة نيوترونية مملوءة (عدد نيوتروني سحري) والابتعاد عنها مسبباً إعاقة لجسيم ألفا عند إصداره [33]. وهذا ما نستطيع ملاحظته مع تناقص طاقة تفكك ألفا مع ازدياد عدد النيوترونات من نظير إلى آخر بمتابعة ازدياد عدد النيوترونات انطلاقاً من النظير $^{214}_{86}\text{Rn}$ حتى النظير $^{222}_{86}\text{Rn}$.

علاقة لوغاريتم عمر النصف حسب نموذج جاموف مع طاقة تفكك الفا

من أجل إجراء مقارنة ما بين لوغاريتم عمر النصف وطاقة تفكك الفا لنظائر الرادون يمكن ذلك من خلال الشكلين (5) و (6) اللذان يوضحان العلاقة بين لوغاريتم عمر النصف وطاقة تفكك الفا لنظائر الرادون حسب نموذج جاموف GLM 1 و GLM 2. والنماذج الأخرى المدروسة في البحث.



الشكل (5) : يوضح العلاقة بين لوغاريتم عمر النصف و طاقة تفكك الفا لنظائر الرادون حسب النموذجين GLM 1 و GLM 2



الشكل (6) - يوضح العلاقة بين لوغاريتم عمر النصف و طاقة تفكك الفا لنظائر الرادون حسب نموذج روير (Royer) _ قانون التفكك العام (UDL) ونموذج فيولا - سيبورغ (VSS) ونموذج (SemFIS) ونموذج دينسوف - خودينكو (DEKH).

يتضح من الشكلين (5)(6) التناسب العكسي ما بين لوغاريتم عمر النصف النظري وطاقة تفكك الفا. وبمقارنتها مع الأشكال (2)(3)(4) نجد أن طاقة تفكك جسيم الفا تتناسب عكساً أيضاً مع عدد النيوترونات الذي يسبق العدد النيوتروني السحري 126. ثم نلاحظ ازدياد في قيمة طاقة تفكك الفا للنظائر التي تمتلك عدد نيوتروني يلي العدد النيوتروني السحري السابق، إلى حد معين يعقبه تناقص مستمر مترافق مع ازدياد عدد النيوترونات بمعنى أن ازدياد عدد النيوترونات في النواة سينقص من طاقة تفكك جسيم الفا وهذا ما نلاحظه لأقل قيمة لطاقة تفكك جسيم الفا المسجلة للنظير $^{222}_{86}\text{Rn}$ الذي يمتلك العدد النيوتروني 136.

الانحراف عن معدل الجذر التربيعي (rmsd) والانحراف المعياري (σ) :

تم حساب قيم الانحراف عن معدل الجذر التربيعي (rmsd) والانحراف المعياري (σ) من المعادلتين (20) و (21) لنموذج جاموف والنماذج الأخرى المتداولة. وقمنا بإجراء المقارنات بين تلك النتائج والنماذج جميعها، حتى نتمكن من الاستدلال على صحة التوافقات بين القيم النظرية والتجريبية للوغاريتم عمر النصف لنظائر الرادون المدروسة. إذ كلما كانت النتائج قريبة من الصفر لكل من (rmsd) و (σ) يكون بالإمكان الاعتماد على النموذج في تفسير نظرية تفكك الفا وتحديد لوغاريتم أعمار النصف لها. كما تعد تلك الاستدلالات عمليات إحصائية دقيقة تفسر لنا كثير من المتغيرات التي يتم معالجتها، إذ يبين الجدول (5) قيم الانحراف عن معدل الجذر التربيعي وقيم الانحراف المعياري للنماذج جميعها.

الجدول (5) : يبين قيم الانحراف عن معدل الجذر التربيعي (rmsd) وقيم الانحراف المعياري (σ) للنماذج جميعها

النماذج	rmsd	σ
G. L. M 1	1.11	0.96
G. L. M 2	0.60	0.33
Royer	0.53	0.36
VSS	0.68	0.55
UDL	0.55	0.33
DEKH	0.67	0.53

من الجدول (5) نلاحظ أن قيمة الانحراف عن معدل الجذر التربيعي (rmsd) أفضل من أجل GLM2 مقارنة مع القيمة الموافقة لـ GLM 1. وكذلك من أجل الانحراف المعياري (σ). وهذا يدل على إمكانية استخدام نموذج جاموف GLM 2 بدقة أفضل من النموذج GLM 1.

يتضح لنا من الجدول (5) أن قانون التفكك العام يعد من النماذج التي يمكن أن نعول عليها، إلى جانب النماذج الأخرى ومن بينها النموذج GLM 2 المقترح من قبلنا باستثناء النموذج GLM 1 الذي سجل انحرافات عالية القيمة وتباينات ملحوظة بين القيم النظرية والتجريبية للوغاريتم أعمار النصف. فمن أجل قانون التفكك العام نجد أن 95% من القيم التي حصلنا عليها (0.55) أقل من 0.61. ونجد أن هذه القيم تتراوح ضمن المدى المقبول [34].

الاستنتاجات والتوصيات:

استناداً إلى هذا العمل نصف التجريبي قمنا بحساب لوغاريتم أعمار نصف تفكك الفا لنظائر الرادون ضمن المجال $197 \geq A \geq 222$ اعتماداً على نموذج جاموف. وقمنا بحساب قيم الانحراف عن معدل الجذر التربيعي (rmsd) والانحراف المعياري (σ)، وبتتبع الدراسة السابقة، يمكن استنتاج ما يلي:

1- إن نصف قطر النواة الذي اعتمدها في نموذج جاموف GLM 2 أعطى لوغاريتم عمر نصف تفكك الفا لنظائر الرادون المدروسة بشكل أفضل مقارنة مع GLM 1، مما يدل على أهمية معرفة نصف قطر النواة للحصول على نتائج أكثر دقة.

2- تمثل النتائج التي حصلنا عليها باستخدام نموذج جاموف بغض النظر عن GLM 1 و GLM 2 توصيفاً جيداً لعملية إصدار جسيم ألفا . وحساب أعمار النصف لنظائر النوى التي تخضع لمثل هذا النوع من التفككات، وتعطي صورة عن طبيعة القوة النووية وحدود هذه القوة من حيث قدرتها على ربط النكليونات فيما بينها ضمن النواة، وبالتالي تحقيق الاستقرار النووي. حيث أن النوى هي بنية معقدة، على عكس البنية الذرية المعروفة بدقة كبيرة .

4- بالعودة إلى الجدول (4) نجد أن الأزداد في طاقة تفكك ألفا يقابله تناقص في لوغاريتم عمر النصف، وتتناقص طاقة التفكك مع ازدياد عدد النيوترونات، الأمر الذي يقابله زيادة في لوغاريتم عمر النصف التجريبي والنظري معاً، لأن زيادة عدد النيوترونات يتغلب على قوة التناظر الكولومي بين البروتونات فيجعل النواة أكثر استقراراً وبهذا يزداد عمر النصف: تتوضع النيوترونات بين البروتونات لتخفيف قوى التناظر الكهربائي بينها والفائض منها يغلف النواة مشكلاً غلافاً نيوترونياً تزداد سماكته وكثافته وتتناقص من نظير إلى آخر مع الاقتراب من طبقة نيوترونية مملوءة (عدد نيوتروني سحري) والابتعاد عنها مسبباً إعاقة لجسيم ألفا عند إصداره. وهذا الاختلاف في كثافة وسماكة هذه الطبقة النيوترونية يعزى إليه الاختلاف في أعمار نصف تفكك ألفا .

5- يزداد لوغاريتم عمر نصف جسيم ألفا مع اقتراب العدد النيوتروني لنظير الرادون من عدد نيوتروني سحري لأن الأعداد السحرية للنيوترونات يرافقها طبقات نووية مغلقة أو مملوءة ذات ترابط قوي جداً، مما يدل على نجاح النموذج الطبقي المقترح من قبل كل من ماريا ماير ويوهانس جنزين في تفسير استقرار النوى السحرية وتوصيف بنية النواة الذرية، التي تضم أعداداً سحرية من البروتونات أو النيوترونات.

يعد هذا العمل أساساً في فهم آلية تفكك ألفا وفق نظرية جاموف، إذ يوصى بالعودة إليه عند إجراء أبحاث تتعلق بالنشاط الإشعاعي المتعلق بجسيم ألفا ، وحساب أعمار النصف للنوى المصدرة له .

References:

- [1] E. Shin, Y. Lim, C. H. Hyun and Y. Oh, "Nuclear isospin asymmetry in α decay of heavy nuclei," *Physical Review C*, 94(2), 2016.
- [2] Zdeb, A, Warda, M and Pomorski, K, "Half-lives for α and cluster radioactivity within a Gamow-like model," *Physical Review C*, 87(2), 024308., 2013.
- [3] [MEYERHOF W E . Elements of Nuclear Physics . McGraw-Hill international edition ,physics series,1967.
- [4] Hassanabadi, H, Javadimanesh, E, Zarrinkamar, S and R. H, "An angle-dependent potential and alpha-decay halflives of deformed nuclei for $67 \leq Z \leq 91$," *Chinese physics C*, 37(4),044101, 2013.
- [5] Gamow, G., "Zur quantentheorie des atomkernes," *Zeitschrift für Physik*, 51(3-4), 204-212, 1928.
- [6] Dong, T and Ren, Z, "New calculations of α -decay halflives by the Viola-Seaborg formula," *The European Physical Journal A-Hadrons and Nuclei*, 26(1), 69-72., 2005.
- [7] Royer, G., "Alpha emission and spontaneous fission through quasi-molecular shapes," *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 26(8), 1149, 2000.
- [8] Denisov, V. Y and Khudenko, A. A, " α -decay half-lives:Empirical relations,"

- Physical Review C, 79(5), 054614., 2009.
- [9] Royer, G and Zhang, H. F, "Recent α decay half-lives and analytic expression predictions including superheavy nuclei.," *Physical Review C*, 77(3), 037602., 2008.
- [10] Qi, C., Xu, F. R, Liotta, R. J and Wyss, R., "Universal decay law in charged-particle.," 2009.
- [11] JBELI H, MULHEM J, TFIHA A and N. HAIDAR . NUCLEAR PHYSICS.Lattakia.Tishreen University, 2009, pp. 110-111.
- [12] Krappe, H. J and Pomorski, K., "Theory of Nuclear Fission: A Textbook (Vol. 838).," Springer Science & Business Media., 2012.
- [13] Poenaru, D. N, Gherghescu, R. A and Greiner, W., "Single universal curve for cluster radioactivities and α decay.," *Physical Review C*, 83(1), 014601., 2011.
- [14] Blendowske, R. and Walliser, H., "Systematics of cluster-radioactivity-decay constants as suggested by microscopic calculations.," *Physical review letters*, 61(17),1930., 1988.
- [15] Royer, G., and Moustabchir, R., "Light nucleus emission within a generalized liquid-drop model and quasimolecular shapes.," *Nuclear Physics A*, 683(1), 182-206., 2001.
- [16] Hassanabadi, H., Javadimanesh, E., and Zarrinkamar, S., "A new barrier potential and alpha-decay half-lives of even–even nuclei in the $82 \leq Z \leq 92$ regime.," *Nuclear Physics A*, 906,84-93., 2013.
- [17] Krane K S . INTRODUCTORY NUCLEAR PHYSICS :John Wiley & Sons ;1987
- [18] Koura,H. Alpha -decay half-lives and fission barriers for super heavy nuclei predicted by a nuclear mass formula, *Journal of Nuclear and Radiochemical Science* ,2002
- [19] Loveland,W.Morrissey,D.Seaborg,G.Modern Nuclear Chemistry. :John Wiley & Sons,2006,667.
- [20] Royer, G., "Analytic expressions for alpha-decay half-lives and potential barriers.," *Nuclear Physics A*, 848(3), 279-291., 2010.
- [21] Rashmirekha Swain, S. K. Patra and B. B. Sahu, "Nuclear structure and decay modes of Ra isotopes within an axially deformed relativistic mean field model," *Chinese Physics C*, 2018.
- [22] Qi, C, Xu, F. R., Liotta, R. J, Wyss, R., Zhang, M. Y., Asawatangtrakuldee, C., and Hu, D., "Microscopic mechanism of charged-particle radioactivity and generalization of the Geiger-Nuttall law.," *Physical Review C*,80(4), 044326., 2009.
- [23] Santhosh, K. P., and Priyanka, B, "Predictions for the α -decay chains of $Z= 120$ superheavy nuclei in the range $272 \leq A \leq 319$." *Physical Review C*, 90(5), 054614., 2014.
- [24] Viola, V. E and Seaborg, G. T., "Nuclear systematics of the heavy elements—II Lifetimes for alpha, beta and spontaneous fission decay.," *Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry*, 28(3), 741-761., 1966.
- [25] Belyaev,A.Ross,D.The Basic of Nuclear and Particle Physics, Springer Science & Business Media.,2021,395.
- [26] Denisov, V. Y., and Khudenko, A. A, "Erratum: α -decay half-lives: Empirical relations," *Physical Review C*, 82(5), 059901., 2010.
- [27] Denisov, V. Y., and Khudenko, A. A., " α -Decay half-lives, α -capture, and α -nucleus potential.," *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 95(6), 815-835., 2009.

- [28] Denisov, V. Y., Davidovskaya, O. I., and Sedykh, I. Y., "Improved parametrization of the unified model for α -decay and α capture.," *Physical Review C*, 92(1), 014602., 2015.
- [29] Audi, G., Kondev, F. G., Wang, M., Pfeiffer, B., Sun, X., Blachot, J., and MacCormick, M., "The NUBASE2012 evaluation of nuclear properties," *Chinese Physics C*, 36(12),1157., 2012.
- [30] Dongdong Ni and Zhongzhou Ren, "Microscopic calculation of α -decay half-lives within the cluster model," *Nuclear Physics A* 825, pp. 145-158, 2009.
- [31] Dong, J.M., Hongfei , Z, Wei,Z. and Qing, L.J., "Half-lives of super heavy Nuclei in Z=113 Alpha decay chain.," *CHIN.PHYS.LETT.*, p. 12, 2008.
- [32] Ibrahima Sakho, *Nuclear Physics 1, Nuclear Deexcitations, Spontaneous Nuclear Reactions*, ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc,2021
- [33] Abbas.M, Nizam.M, Taleb.A, *The Neutronic Shell Surrounding the Nucleus and α Decay*, Tishreen University ,Syria,2021
- [34] J. C. Bryan, *Introduction to NUCLEAR SCIENCE*, CRC Press, 2013.