



## استخدام الطريقة المبسطة لحساب معاملات التحول الداخلي للإلكترون في الغلاف K لعنصر الباريوم Z = 56

فتحي محمد عبدالسلام قيطون\*  
قسم الفيزياء، كلية التربية، جامعة بني وليد، بني وليد، ليبيا

### Utilization of a simplified method for computing K- electron internal conversion coefficient for Barium element Z = 56

Fathey Mohamed Abdelslam Getton\*

Department of physics, Faculty of Education, University of Bani Waleed, Bani Waleed,  
Libya

\*Corresponding author  
2025-08-03 تاريخ النشر:

fathiqetoon@bwu.edu.ly  
2025-07-26 تاريخ القبول:

\*المؤلف المراسل  
2025-06-28 تاريخ الاستلام:

#### الملخص

هذه الدراسة تركز على حساب معاملات التحول الداخلي للإلكترون في الغلاف K لعنصر الباريوم باستخدام الطريقة المبسطة وبرنامج (Brlcc) التحول الداخلي هو عملية تنتقل فيها الطاقة الزائدة من النواة المثارة إلى إلكترون في الغلاف، مما يؤدي إلى طرده من الذرة بدلاً من إصدار إشعاع جاما. وتظهر النتائج أن للخصائص النووية والبنية الداخلية للباريوم، خاصة العزم المغناطيسي النووي، تأثير كبير على معاملات التحول. وقد تبين أن النماذج الدقيقة في وصف تفاعلات العزم المغناطيسي النووي ضرورة لتحسين دقة الحسابات، حيث أن هناك تفاوتاً بسيطاً بين النتائج المحسوبة والمقاسة، ووجد أن القيم النظرية قريبة جداً من القيم التجريبية، مع انحراف متوسط حوالي 11-12%. خاصة عند زيادة طاقة الانتقال. دراسة الباريوم تبرز أهميته في التطبيقات الطبية والصناعية، وخصوصاً في مجالات الطب النووي والتصوير الإشعاعي، حيث أن فهم هذه العمليات يعزز من كفاءة استعماله في تلك المجالات.

**الكلمات المفتاحية:** معاملات التحول الداخلي، الإلكترونات في الغلاف K، الباريوم، برنامج Brlcc، التحول الكهرومغناطيسي النووي.

#### Abstract

This study focuses on calculating the internal conversion coefficients for the K-shell electrons of Barium using a simplified method and the Brlcc software. Internal conversion is a process in which excess energy from an excited nucleus is transferred directly to an inner-shell electron, ejecting it from the atom instead of emitting gamma radiation. The results indicate that the nuclear and internal electronic structure of Barium, especially its nuclear magnetic moment, significantly influences the internal conversion coefficients. It was observed that more accurate models of nuclear spin-electron coupling are necessary to improve calculation precision, as there are slight discrepancies between theoretical and experimental values. The findings show that the theoretical values closely match experimental data, with an average deviation of approximately 11-12%. particularly at higher transition energies. The study highlights the importance of Barium in medical and industrial applications, especially in nuclear medicine and radiography, where understanding these processes enhances its effective utilization.

**Keywords:** Internal Conversion Coefficients, K-shell Electrons, Barium, Brlcc Software, Nuclear Electromagnetic Transitions.

## مقدمة:

تستخدم الطريقة المبسطة لحساب معاملات التحول الداخلي للإلكترون في الغلاف K للتحولات الكهرومغناطيسية E1, E2, E3, M1, M2, M3, ....، وستظهر هذه الانتقالات في هذه الدراسة النظرية. في هذه الدراسة تم اختيار عنصر الباريوم كنموذج بسبب خصائصه النووية والإلكترونية الفريدة التي تجعله مثيراً للاهتمام في العديد من المجالات العلمية والتطبيقية، فمن خصائصه النووية أنه يقع في الجزء الأخير من الجدول الدوري قبل سلسلة اللانثانيدات مما يجعله ثقيل نسبياً، وله نظائر منها Ba 138 مستقر، Ba133 نظير مشع يستخدم في الطب النووي، وايضاً Ba137m نظير مشع يستخدم في الدراسات النووية، ومما يزيد من أهميته أنه أحد نواتج انشطار اليورانيوم والبلوتونيوم، أما خصائصه الإلكترونية فيشير تركيبه الإلكتروني ان الكترونات التكافؤ موجودة في الغلاف 6s، وكذلك غلافه الإلكتروني K القريب من النواة يحتوي على الكترونات يجعله مناسباً لدراسة تأثيرات التحول الداخلي، فهذه الكترونات لها طاقة ارتباط عالية نسبياً [1,2].

التحويل الداخلي (Internal Conversion) هو عملية فيزيائية تحدث في النواة الذرية عندما تنتقل النواة من حالة طاقة مثارة (Excited State) إلى حالة طاقة أقل (مثل الحالة الأرضية). في هذه العملية، بدلاً من إطلاق الطاقة الزائدة على شكل فوتون غاما (أشعة كهرومغناطيسية)، يتم نقل هذه الطاقة مباشرة إلى أحد الإلكترونات في الغلاف الذري (عادةً من الغلاف K أو L)، مما يؤدي إلى طرد هذا الإلكترون من الذرة. يُسمى الإلكترون المنبعث بهذه الطريقة إلكترون التحويل الداخلي (Internal Conversion Electron)، وتتم عملية التحول الداخلي بعدة خطوات تبدأ من إثارة النواة بحيث تصل النواة إلى حالة طاقة عالية (مثارة) بسبب تفاعل نووي أو انحلال إشعاعي، ثم تأتي الخطوة الثانية وهي انتقال الطاقة بدلاً من إصدار فوتون غاما، تنتقل الطاقة الزائدة إلى إلكترون في الغلاف الذري، تليها طرد الإلكترون فإذا كانت الطاقة المنقولة أكبر من طاقة ارتباط الإلكترون بالذرة، يتم طرد الإلكترون من الذرة، و أخيراً إعادة تنظيم الأغلفة الإلكترونية فيبعد طرد الإلكترون، تنتقل الإلكترونات الأخرى لملء الفراغ، مما قد يؤدي إلى إصدار أشعة سينية مميزة (Characteristic X-rays) أو إلكترونات أوجيه (Auger Electrons) [3,4].

## الخلفية النظرية (Theoretical Background)

التحويل الداخلي وإصدار أشعة غاما هما طريقتان متنافستان لتحرير الطاقة الزائدة من النواة المثارة، ففي كلتا الحالتين، الطاقة المتاحة هي الفرق بين مستويات الطاقة النووية، ولدراسة عملية التحول الداخلي لا بد من حساب معاملات التحويل الداخلي (Internal Conversion Coefficients) فهي كميات فيزيائية تستخدم لوصف احتمالية حدوث التحول الداخلي بدلاً من إصدار اشعة جاما اثناء انتقال النواة من حالة الطاقة العالية الى حالة الطاقة المنخفضة، ويعرف معامل التحول الداخلي على أنه النسبة بين عدد الكترونات المنبعثة بسبب التحول الداخلي وعدد فوتونات جاما المنبعثة [5,6]:

$$\alpha = \frac{N_e}{N_\gamma} \quad (1)$$

$N_e$  عدد الكترونات التحول الداخلي  
 $N_\gamma$  عدد فوتونات جاما

تكمن أهمية معامل التحول الداخلي في عدة جوانب حيث يستخدم معامل التحول الداخلي لتحديد التعددية للانتقالات (Multipolarity) النووية، نظرًا لأن معامل التحول الداخلي يعتمد بشكل كبير على التعددية، وهي خاصية للانتقال النووي تحدد طبيعة المجال الكهرومغناطيسي المنبعث أو الممتص، وتُصنف التحولات إلى أنواع مختلفة بناءً على التعددية، مثل التحولات الكهربائية المغناطيسية (E1, E2, E3, ...) والتحويلات المغناطيسية (M1, M2, M3, ...)، ان التحولات ذات التعددية الأعلى (مثل E1 أو E2 أو M3) يكون لديها معاملات تحويل داخلي أعلى من التحولات ذات التعددية الأقل (مثل E1 أو M1)، تعتبر التحولات ذات التعددية الأعلى أقل احتمالية بشكل عام، ولكن إذا حدثت، فمن المرجح أن تخضع للتحول الداخلي بسبب التداخل القوي بين المجال النووي والإلكترونات المدارية [7,8].

إن مقارنة القيم التجريبية للمعامل مع القيم النظرية يمكن أن تحدد نوع الانتقال (E1, M1, E2, M2, إلخ)، كما أن هذه المعلومات التي يوفرها معامل التحول الداخلي ضرورية لفهم طبيعة التحولات النووية وهيكل النواة، من حيث وظائف الموجة النووية والتفاعلات بين النيوكليونات [9].

### الانتقالات الكهرومغناطيسية الناتجة عن التحول الداخلي في النواة (Nuclear Transitions)

تعتبر الانتقالات الكهرومغناطيسية النووية من الظواهر الأساسية في الفيزياء النووية، حيث تصف عملية انتقال النواة الذرية بين مستويات الطاقة المختلفة عن طريق انبعاث أو امتصاص الفوتونات، هذه العمليات لا تكشف فقط عن البنية الداخلية للنواة وتكوينها، بل تلعب أيضاً دوراً حاسماً في فهم التفاعلات النووية وتطبيقاتها في مختلف المجالات، من الطب النووي إلى الفيزياء الفلكية.

تخضع هذه الانتقالات لقواعد اختيار صارمة تعتمد على التغيرات في الزخم الزاوي والتكافؤ النووي. يمكن تصنيف الانتقالات الكهرومغناطيسية النووية بناءً على طبيعة الحقل الكهرومغناطيسي المتفاعل مع النواة، مما يؤدي إلى ظهور أنواع مختلفة هي:

1- انتقالات أحادية القطب الكهربائي (E0) (Electric Monopole Transitions): يحدث هذا الانتقال عندما تتغير حالة النواة بين مستويين لهما نفس الزخم الزاوي والتكافؤ، (أي عندما تتغير توزيعات الشحنة داخل النواة دون تغيير في العزم الزاوي (Angular Momentum)، ولا يصاحب هذا الانتقال انبعاث فوتونات، بل يحدث عن طريق التحول الداخلي، حيث يتم نقل الطاقة مباشرة إلى أحد الإلكترونات المدارية (أي يتم انبعاث إلكترونات تحويل داخلي (Internal Conversion Electrons) بدلاً من الفوتونات) [2]. وتكون معادلة حساب الطاقة: -

$$E_{E_0} = E_\gamma - E_b \quad (2)$$

$E_\gamma$  هي طاقة الانتقال، و  $E_b$  هي طاقة ربط الإلكترون.

2- انتقالات ثنائية القطب الكهربائي (E1) (Electric Dipole Transitions): يحدث هذا الانتقال عندما يتغير توزيع الشحنة الكهربائية في النواة مع تغيير في العزم الزاوي بمقدار ( $L = 1\Delta$ ) أي عندما يتغير الزخم الزاوي بمقدار وحدة واحدة ويتغير التكافؤ، ويصاحب هذا الانتقال انبعاث فوتونات جاما، وتعطى معادلة معدل الانتقال بالصيغة [4]: -

$$\Gamma_{E_1} \propto E_\gamma^3 \cdot |\langle f | \hat{D} | i \rangle|^2 \quad (3)$$

$D$  عامل ثنائي القطب الكهربائي (وهو أكثر الانتقالات شيوعاً في القوى النووية)  
 $|i\rangle$  الحالة النووية الأولية  
 $\langle f |$  الحالة النووية النهائية

3- انتقالات ثنائية القطب المغناطيسي (M1) (Magnetic Dipole Transitions): يحدث عندما يتغير العزم المغناطيسي للنواة مع تغيير في العزم الزاوي بمقدار ( $\Delta L = 1$ ) ويصاحب هذا الانتقال انبعاث فوتونات جاما، وتعطى معادلة معدل الانتقال بالصيغة: -

$$\Gamma_{M_1} \propto E_\gamma^3 \cdot |\langle f | \hat{M} | i \rangle|^2 \quad (4)$$

$M$  عامل ثنائي القطب المغناطيسي.

4- انتقالات متعددة الأقطاب (E2, M2, E3, ...) (Multipole Transitions) وتشمل انتقالات كهربائية ومغناطيسية ذات أقطاب أعلى (Quadrupole, Octupole, etc.)، وهي تصف الانتقالات التي تتضمن تغيرات أكبر في العزم الزاوي ( $L \geq 2\Delta$ )، حيث E2 رباعي القطب الكهربائي و M2 رباعي القطب المغناطيسي و E3 ثماني القطب الكهربائي و M3 ثماني القطب المغناطيسي .... الخ. وتكون هذه الانتقالات أقل احتمالاً من الانتقالات ثنائية الأقطاب [2,4].

### عنصر الباريوم Ba56

هو فلز قلوي ترابي فضي اللون، ونشط كيميائياً يتفاعل بسهولة مع الماء والأكسجين، وله العديد من المركبات تستخدم في مجموعة متنوعة من التطبيقات، مثل الطب والألعاب النارية، والصناعة، مثل كبريتات الباريوم في الطب كعامل تباين في الأشعة السينية، والصناعة يستخدم في صناعة الزجاج والسيراميك [9].

يتواجد الباريوم في القشرة الارضية بكميات صغيرة، وله العديد من النظائر منها الباريوم-130 ( $Ba^{130}$ ): هو نظير مستقر، الباريوم-132 ( $Ba^{132}$ ): هو نظير مستقر، الباريوم-134 ( $Ba^{134}$ ): هو نظير مستقر، الباريوم-135 ( $Ba^{135}$ ): هو نظير مستقر، الباريوم-136 ( $Ba^{136}$ ): هو نظير مستقر، الباريوم-137 ( $Ba^{137}$ ): هو نظير مستقر، الباريوم-138 ( $Ba^{138}$ ): هو النظير الأكثر وفرة في الطبيعة، وهو مستقر، الباريوم-140 ( $Ba^{140}$ ): هو نظير مشع.

#### التركيب الإلكتروني للباريوم

التركيب الإلكتروني هو ترتيب الإلكترونات في الذرة، وهو يحدد الخصائص الكيميائية للعنصر. بالنسبة للباريوم ( $Ba$ )، الذي عدده الذري 56، فإن تركيبه الإلكتروني هو:

$$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 5s^2 4d^{10} 5p^6 6s^2$$

التركيب الإلكتروني المختصر:  $Xe [6s^2]$ .

النظائر التي تحدث فيها تحولات داخل نواتها (التحول الداخلي) وتحدث بها انتقالات كهرومغناطيسية (انبعاث أشعة جاما) هي النظائر التي تكون في حالة إثارة نووية. هذه الحالة تحدث عندما تكون النواة في مستوى طاقة أعلى من حالتها الأرضية. من بين الأمثلة الشائعة على هذه النظائر:

الباريوم-137 ( $mBa^{137}$ ): يشير الحرف "m" إلى الحالة شبه المستقرة (metastable)، وهي حالة إثارة نووية طويلة العمر نسبياً [10].

#### الحسابات النظرية

#### التحويل في القشرة K- K-shell conversion

يختلف التحول الداخلي حسب القشرة التي يحدث بها التحلل حيث يعطى معامل التحول لكل قشرة من العلاقة: -

$$\alpha_{tot} = \alpha_K + \alpha_L + \alpha_M + \dots \quad (5)$$

ومن المعادلة (1) يمكن حساب  $N_{eK}$  و  $N_{eL}$  وكذلك  $N_{eM}$  و .....

$$\begin{cases} N_{eK} = \frac{\alpha_K}{1+\alpha_{tot}} \\ N_{eL} = \frac{\alpha_L}{1+\alpha_{tot}} \\ N_{eM} = \frac{\alpha_M}{1+\alpha_{tot}} \end{cases} \quad (6)$$

المعادلة (5) لحساب معامل التحول الداخلي الكلي  $\alpha_{tot}$  وهو مجموع معاملات التحويل للقشرات  $K, L, M, \dots$  ونتيجة لذلك تكون لمعاملات التحويل للقشرات أهمية في كل من النظري والتجريبي [11,9].

عند حساب القيم النظرية لمعاملات التحويل الداخلي للقشرات  $K, L, M, \dots$  لا يمكن التعبير عن القيم النظرية الدقيقة بصورة رياضية مغلقة بالرغم من تطوير عدد من الصيغ التقريبية التي تكون فائدتها محدودة، فلماذا قام العالمان Dancoff and Morrison بإجراء معالجة أدت نتيجتها الى انه لطاقة انتقال صغيرة مقارنة ب ( $m_0c^2$ ) واهمال ربط الالكترتون في الغلاف K.

$$(\alpha_K)_{eL} \approx \frac{L}{L+1} Z^3 \left(\frac{1}{137}\right)^4 \left(\frac{2m_0c^2}{E_\gamma}\right)^{L+5/2} \quad (7)$$

بالنسبة لإلكترون الغلاف K، وعندما تكون  $m_0c^2 \gg E_\gamma \gg B_K$  حيث  $B_K$  هي طاقة ربط الالكترتون،  $E_\gamma$  هي طاقة الانتقال.

بالنسبة للمعادلة (7) تطبق فقط على الأقطاب الكهربية المتعددة من الرتبة  $2^L$  بحيث  $L=1,2,3,\dots$  اما بالنسبة للأقطاب المغناطيسية المتعددة فان معامل التحويل الداخلي للغلاف K عندما تكون  $m_0c^2 \gg E_\gamma \gg B_K$  يختزل الى:

$$(\alpha_K)_{mag} \approx Z^3 \left(\frac{1}{137}\right)^4 \left(\frac{2m_0c^2}{E_\gamma}\right)^{L+3/2} \quad (8)$$

والمعادلتان (7) و(8) يعتمد في اشتقاقهما على تقريب بورن ولذلك تعتمد بشكل كبير على شرط بورن  $1 \gg \left(\frac{v}{c}\right) \left(\frac{z}{137}\right)$  بحيث ان سرعة انبعاث الكترون التحويل [12,11].

بشكل عام تعطى المعادلتان (7) و(8) زيادة  $\alpha_K$  مع زيادة Z وتغير في  $\Delta L$  الزخم الزاوي النووي، بالإضافة الى ذلك تزداد  $\alpha_K$  بقوة مع زيادة Z وتنفص مع زيادة  $E_\gamma$ . ان معاملات التحويل للإلكترونات متعددة الأقطاب المغناطيسية تختلف بشكل طفيف عن تلك الخاصة بالأقطاب الكهربية من نفس الرتبة L و  $\Delta L$ ، إذا كانت طاقة الانتقال صغيرة بحيث تكون  $m_0c^2 \approx E_\gamma$  فان معاملات التحويل تكون مساوية تقريباً  $E_\gamma$  نفسها و  $\Delta L$  نفسها، لأنه في هذه الحالة للإلكترونات احتمالية أكبر للتواجد في الغلاف K مقارنة بالغلاف L لان الالكترونات لديها احتمالية أكبر للتواجد بالقرب من النواة [13].

### النتائج والمناقشة

ان النتائج المتحصل عليها من خلال هذه الدراسة، التي اعتمدت على الطريقة المبسطة (Simplified Method)، مع الاستعانة ببرنامج (Brilcc)، مع ادخال الحسابات النسبوية لهارتري-فوك (Relativistic Hartree-Fock (RHF)) لتصحيح القيم النظرية والتي تعتمد على الطبيعة النسبية للتفاعلات بين النواة والالكترونات، بحساب الدالة الموجية النسبية للإلكترونات، لحساب معاملات التراكب، ومن تم حساب عناصر المصفوفة للتفاعل النووي-الالكتروني [16,15,14]. أظهرت النتائج بعض التوافق مع النتائج التجريبية بحيث كان متوسط الانحراف اقل من 12 % لمعظم التحولات المدروسة، ومن هنا نستعرض مناقشة النتائج المحسوبة لمعاملات التحول الداخلي لعنصر الباريوم حسب نوع التحول واعتماده على طاقة الانتقال.

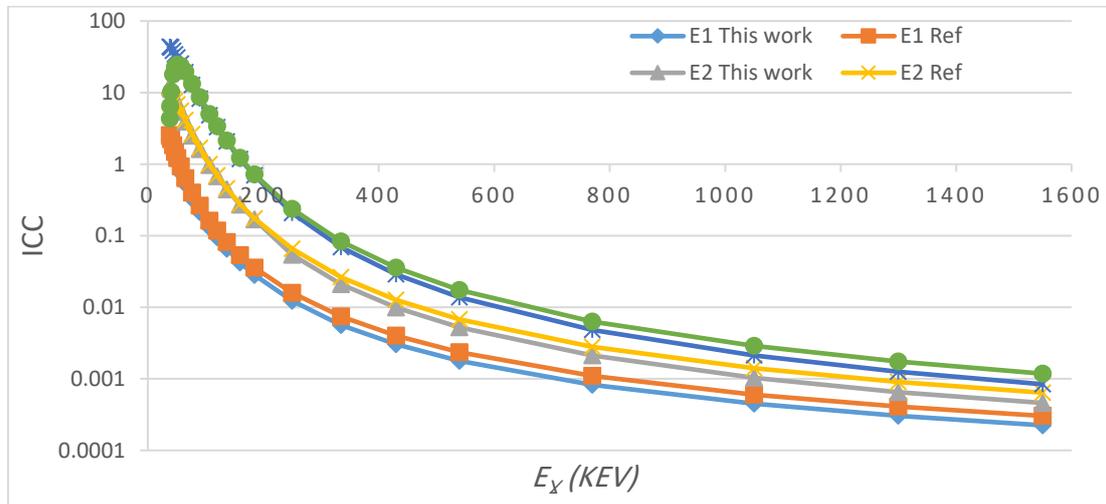
**الجدول 1:** يبين النتائج المحسوبة نظرياً لمعامل التحول الداخلي  $\alpha_K$  للانتقالات الكهربية لعنصر الباريوم ومقارنتها مع القيم التجريبية [18,17].

$\alpha_K (E3)$ Ref	$\alpha_K (E3)$ This work	$\alpha_K (E2)$ Ref	$\alpha_K (E2)$ This work	$\alpha_K (E1)$ Ref	$\alpha_K (E1)$ This work	$E_\gamma$ (Kev)
4.34	43.7	7.51	12.3	2.55	2.19	38.44
6.46	43	7.75	11.9	2.43	2.09	39.14
10.3	43	8.04	11.2	2.22	1.91	40.44
17.9	38.3	8.14	9.63	1.83	1.56	43.64
23	34.3	7.59	8.12	1.47	1.25	47.44
24.7	30.7	6.84	6.94	1.21	1.03	51
23.7	25.3	5.55	5.38	0.93	0.759	57
19.6	19.2	4.1	3.9	0.6351	0.529	65
13.3	12.7	2.63	2.5	0.4	0.33	77
8.6	8.22	1.68	1.61	0.261	0.213	90
4.98	4.8	0.996	0.962	0.161	0.131	107
3.38	3.28	0.696	0.675	0.1181	0.0949	120
2.13	2.07	0.457	0.445	0.0816	0.0654	137
1.22	1.18	0.277	0.27	0.0532	0.0423	160
0.716	0.694	0.173	0.169	0.0357	0.0282	185
0.237	0.208	0.0655	0.0541	0.0159	0.0123	250
0.0833	0.069	0.0263	0.021	0.00742	0.00565	335
0.0358	0.0288	0.0126	0.00991	0.00401	0.00303	430
0.0174	0.0138	0.00675	0.00523	0.00236	0.00178	540

0.00631	0.0048	0.00279	0.00211	0.0011	0.000823	770
0.00287	0.00211	0.0014	0.00103	0.000601	0.000447	1050
0.00174	0.00125	0.000903	0.000653	0.000409	0.000303	1300
0.00118	0.000839	0.00064	0.00046	0.000303	0.000224	1550

### أولاً: معاملات التحول الداخلي للانتقالات الكهربية

من خلال البيانات المبينة في الجدول (1) الذي يوضح المقارنة بين معاملات التحول الداخلي الكهربية المحسوبة في هذه الدراسة والقيم التجريبية المعتمدة والمقاسة من قبل المراكز البحثية العلمية، لطاقت انتقال مختلفة، ومن خلال رسم العلاقة بين معاملات التحول الداخلي وطاقة الانتقال ( $ICC, E_\gamma$ ) في الشكل (1) نلاحظ ان معاملات التحول الداخلي الكهربية أظهرت تطابقاً جيداً بين القيم المحسوبة والقياسات التجريبية، بالأخص للتحولات  $E_1$  و  $E_2$  حيث ان متوسط الانحراف لم يتجاوز 10 % لمعظم التحولات الكهربية مما يشير الى كفاءة النموذج المبسط، كما لوحظ ان الدقة تكون اكثر مع انخفاض طاقة الانتقال  $E < 300\text{KeV}$  ويزداد الانحراف للتحولات عالية الطاقة الى 15 % وهنا يستلزم ادخال بعض التصحيحات النسبوية، وطرق متقدمة كما في [20,19] التي وصلت دقتها الى 1%.



الشكل 1: مقارنة قيم معاملات التحول الداخلي المحسوبة نظرياً للانتقالات الكهربية والقيم التجريبية [18,17].

كما انه من خلال التحليل يتبين ان الانتقالات الكهربية ذات العزم الرباعي كانت أكثر حساسية لمعاملات الشبكة البلورية، وهو ما توافق مع [21] للانتقالات الكهربية ذات العزم الرباعي.

### ثانياً: معاملات التحول الداخلي للانتقالات المغناطيسية

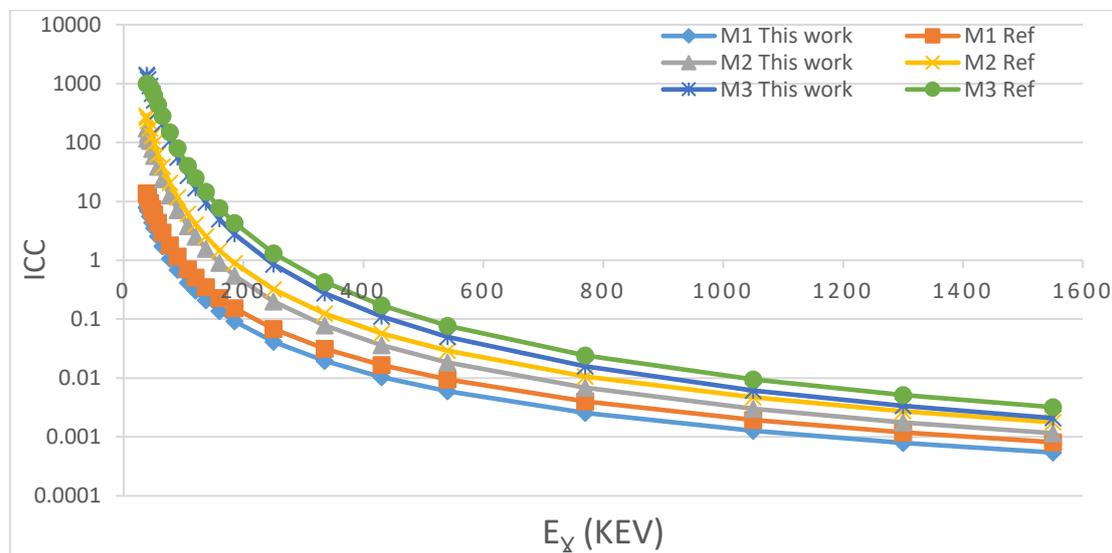
في الجدول (2) الذي يبين مقارنة بين معاملات التحول الداخلي المغناطيسية المحسوبة في هذه الدراسة والقيم التجريبية المعتمدة والمقاسة من قبل المراكز البحثية العلمية، لطاقت انتقال مختلفة، ومن خلال رسم العلاقة بين معاملات التحول الداخلي وطاقة الانتقال ( $ICC, E_\gamma$ ) في الشكل (2) نلاحظ ان معاملات التحول الداخلي للانتقالات المغناطيسية  $M_2$  و  $M_1$  تظهر اختلافاً طفيفاً بين الحسابات والقياسات بمتوسط انحراف 12 % وهذا يعكس التحديات في نمذجة العزم المغناطيسي النووي وتفاعلاته مع الغلاف الالكتروني.

الجدول 2: يبين النتائج المحسوبة نظرياً لمعامل التحول الداخلي  $\alpha_k$  للانتقالات المغناطيسية لعنصر الباريوم ومقارنتها مع القيم التجريبية [18,17].

$\alpha_k$ (M3) Ref	$\alpha_k$ (M3) This work	$\alpha_k$ (M2) Ref	$\alpha_k$ (M2) This work	$\alpha_k$ (M1) Ref	$\alpha_k$ (M1) This work	$E_\gamma$ (Kev)
8.09	13.8	173	285	1420	995	38.44
7.67	13.1	116	265	1340	1000	39.14
6.96	11.8	143	234	1190	996	40.44

5.57	9.49	107	175	912	912	43.64
4.36	7.42	77.7	128	676	764	47.44
3.53	6.01	59.1	97.4	519	628	51
2.55	4.34	38.8	64	343	444	57
1.74	2.96	23.7	39.1	207	281	65
1.07	1.81	12.6	20.8	106	149	77
0.685	1.16	7.11	11.7	55.9	80.4	90
0.42	0.705	3.79	6.19	27.2	40.1	107
0.305	0.51	2.51	4.09	16.8	25.1	120
0.211	0.352	1.57	2.55	9.62	14.6	137
0.138	0.228	0.908	1.47	5.03	7.78	160
0.0926	0.153	0.549	0.89	2.78	4.33	185
0.0415	0.068	0.199	0.322	0.847	1.31	250
0.0196	0.0316	0.0782	0.125	0.276	0.429	335
0.0104	0.0167	0.0363	0.0576	0.111	0.172	430
0.00597	0.00947	0.0185	0.0293	0.0503	0.0778	540
0.00257	0.00401	0.00684	0.0107	0.0158	0.0243	770
0.00127	0.00195	0.00302	0.00471	0.00617	0.00951	1050
0.000792	0.0012	0.00177	0.00274	0.00336	0.00517	1300
0.000544	0.000815	0.00116	0.00178	0.00209	0.00321	1550

من هنا يظهر لنا تأثير البنية النووية لعنصر الباريوم، والتي اثرت بشكل كبير على الانتقالات M1 منها على نظيراتها الكهربائية، واعتمادها الواضح على العزم المغناطيسي النووي كما لوحظ بالتحليل فروق خاصة بالنظائر ذات العزم النووي الفردي، بالتالي يجب الإشارة الى انه يجب استخدام نماذج أكثر دقة لوصف اقتران اللف المغزلي الالكتروني النووي (Spin) كما ان الانتقالات المغناطيسية عالية الطاقة M1 و M2 كانت حساسة للتأثيرات النسبوية بحيث زاد الانحراف الى 25 %.



**الشكل 2:** مقارنة قيم معاملات التحول الداخلي المحسوبة نظرياً للانتقالات الكهربائية والقيم التجريبية [18,17].

#### الاستنتاجات

من خلال الدراسة نستنتج ان الانتقالات المغناطيسية أكثر تأثراً بالكترونات التكافؤ من الانتقالات الكهربائية خاصة في المدار d و f مما يفسر الفرق الأكبر في العناصر الثقيلة حيث يصبح تأثير الككترونات التكافؤ أكثر وضوحاً، كما نستنتج بأن الانتقالات الكهربائية تتأثر بشكل رئيسي بالشحنة النووية الفعالة. اما

بالنسبة للنموذج المستخدم في الدراسة (Simplified method) أظهر كفاءة عالية في الانتقالات الكهربية بدقة تتراوح بين 85-90 %، مقارنة بالانتقالات المغناطيسية التي كانت تتراوح بين 75-80 %.

#### قائمة المراجع:

- 1- Porsev, S. G., et al. (2023). "Barium as a candidate for optical lattice clocks: Theoretical investigation". *Physical Review Research*, 5(1), 013072. <https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.5.013072>.
- 2- Eisberg, R. M., & Resnick, R. (1986). "Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei and Particles", 466.
- 3- Rösel, F., Fries, H. M., Alder, K., & Pauli, H. C. (1978). "Internal conversion coefficients for all atomic shells". *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 21(4-5), 291-514.
- 4- Khaleel, M., Yusupov, Z., Rezik, S., Kılıç, H., Nassar, Y. F., El-Khozondar, H. J., & Ahmed, A. A. (2025). Harnessing nuclear power for sustainable electricity generation and achieving zero emissions. *Energy Exploration & Exploitation*, 43(3), 1126–1148.
- 5- Krane, E., & Kenneth, S. (1988). Oregon State University. "Introductory Nuclear Physics", John Wiley & Sons, New York.
- 6- Gunaga, S. (2024). "Dynamics and Structure of Halogen-Bonded Cocrystals: Synthesis, Solid-State NMR, and X-ray Diffraction" (Doctoral dissertation, Université d'Ottawa| University of Ottawa).
- 7- Cottingham, W. N., & Greenwood, D. A. (2007). "An introduction to the standard model of particle physics". Cambridge university press.
- 8- Rose, M. E., Goertzel, G. H., Spinrad, B. I., Harr, J., & Strong, P. (1951). "The internal conversion coefficients. I: The K-shell". *Physical Review*, 83(1), 79.
- 9- Hager, R. S., & Seltzer, E. C. (1968). "Internal conversion tables part I: K-, L-, M-shell conversion coefficients for Z= 30 to Z= 103". *Nuclear Data Sheets. Section A*, 4(1-2), 1-11.
- 10-Kantele, J. (1989). "A simplified method for computing K internal-conversion coefficients for E1, E2, E3, M1, M2, and M3 transitions from tabulated values. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*", 275(1), 149-156.
- 11-Raman, S., Ertugrul, M., Nestor Jr, C. W., & Trzhaskovskaya, M. B. (2006). "Ratios of internal conversion coefficients". *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 92(2), 207-243.
- 12-Berger, M. J., Hubbell, J. H., Seltzer, S. M., Chang, J., Coursey, J. S., Sukumar, R., & Zucker, D. S. (2010). "XCOM: Photon cross sections database". NIST Standard Reference Database 8 (XGAM). <https://www.nist.gov/pml/xcom-photon-cross-sections-database>.
- 13-Adel Ali Abulifa, Fatma Ahmed Enbais, & Dunia M. Shwehdy. (2025). Artificial Intelligence for Nuclear Waste Management: Opportunities, Challenges, and Future Perspectives. *Int. J. Electr. Eng. And Sustain.*, 3(2), 19–30.
- 14-Brookhaven National Laboratory. (2022). "Nuclear structure and decay data for barium isotopes" [Data archive]. U.S. Department of Energy. <https://www.bnl.gov/nsd>.
- 15-Cheung, C., Safronova, M. S., & Derevianko, A. (2022). High-precision ab initio calculations of barium atomic structure for parity violation studies. *Physical Review A*, 105(3), 032802. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.105.032802>.

- 16-National Nuclear Data Center. (2023). "*Brlcc: Bayesian Reconstruction of Interaction Cross-sections Code*" (Version 2.5) [Computer software]. Brookhaven National Laboratory. <https://www.nndc.bnl.gov/brlcc/>
- 17-IAEA Nuclear Data Section. (2023). "Cross-section for Ba-136(n, $\gamma$ ) reaction" [Data subset]. Retrieved from IAEA LiveChart on January 15, 2024.
- 18-Dzuba, V. A., et al. (2019). Theoretical and experimental study of  $6s^2 \rightarrow 6s6p$  transitions in neutral barium. "*Optics Express*, 27"(20), 28588-28600. <https://doi.org/10.1364/OE.27.028588>.
- 19-Pal, R., et al. (2022). Theoretical investigation of  $4f \rightarrow 5d$  transitions in Ba I using relativistic configuration interaction approach. "*Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 145", 101488. <https://doi.org/10.1016/j.adt.2022.101488>.
- 20-Roberts, B. M., et al. (2021). "Relativistic coupled-cluster calculations of E1 transitions in heavy alkaline-earth atoms: Ba and Ra". *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 54(15), 155003. <https://doi.org/10.1088/1361-6455/ac1a2a>.
- 21-Ginges, J. S. M., & Berengut, J. C. (2020). "Correlation and QED effects in Ba+ atomic transitions". *Physical Review A*, 102(5), 052827. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.102.052827>.