تبعثر نواة الليثيوم ^{6}Li بوساطة نواة الهدف ^{24}Mg في المجال الطاقي $E_{Li}=(30-50)MeV$ بطريقة VMA

إعداد
كوثر وليد الجزار

الأستاذ المشرف
أ.د.عبدالهادي صوفان

الملخص

تم في هذا البحث تحديد البارامترات الهندسية الوصفية للكمونات الحقيقة والتخيلية والقيم العددية للعزوم من المرتبة الثانية والكمونات الضوئية الموافقة لها وتم تمثيلها بيانياً بالإضافة إلى إيجاد قيم المقاطع العرضية للمنظومة النووية المدروسة ($^{6}Li+^{24}Mg$) في المجال الطاقي المحدد $(30-50)MeV$ وذلك باستخدام طريقة التقريب التغايري للعزوم (VMA) .

وأظهرت النتائج التي حصلنا عليها توافق جيد ومنسجم إلى حد كبير مع القيم المرجعية.

الكلمات المفتاحية:

التقريب التغايري للعزوم،المقطع العرضي للتفاعل،الكمون الضوئي،المقطع العرضي التفاضلي،التكاملات الحجمية.

"The scattering of the ^{6}Li nucleus by the ^{24}Mg target nucleus in the energy range $E_{Li} = (30–50)$ MeV by (VMA) method."

Abstract:

The results demonstrated a good agreement between the obtained values and the corresponding reference data.

In this work, the geometrical descriptive parameters of the real and imaginary optical potentials, as well as the numerical values of the second-order moments and their corresponding optical potentials, were determined and graphically represented. In addition, the cross sections of the studied nuclear system were evaluated within the energy range of 30–50 MeV using the Variational Moment Approach (VMA) method. The obtained results showed good agreement and a high degree of consistency with the reference data.

Keywords:

Variational Moment Approach, reaction cross section, optical potential, differential cross section, volume integral.

المقدمة:

الفيزياء النووية هي أحد فروع الفيزياء الحديثة التي تركز على دراســـة نواة الذرة وما يحدث بداخلها من تفاعلات معقدة. وبالرغم من أن النواة تشكل جزءًا صغيرًا جدًا من حجم الذرة، إلا أن ما يحدث بداخلها يملك تأثيرًا هائلًا على حياتنا بداية من توليد الطاقة، مرورًا بالتطبيقات الطبية، إلى فهم نشأة الكون وتطوره. ظهرت الحاجة لفهم النواة وتفاعلاتها بدءًا من اكتشاف النشاط الإشعاعي وتطور العلم أكثر مع اكتشاف العناصر المشعة وصولًا إلى تحديد طبيعة النواة من خلال تجربة رذرفورد حيث أن هذه التجارب دفعت الباحثين للتعمق في فهم بنية النواة وسلوكها[1]. نظراً للتعقيد الكبير داخل النواة وللصعوبات التي واجهها العلماء في تلك المرحلة لفهم طبيعة القوى النووية أصبح من الضروري وضع نماذج تساعد في تفسير السلوك الفيزيائي للنوى الذرية حيث كل منها يسلط الضوء على زاوية معينة من سلوك النواة نذكر منها نموذج قطرة الســـائل ، نموذج النواة المركبة ،النموذج الطبقي ،نموذج غاز فيرمي ولعل أهم هذه النماذج النموذج الضـــوئي (optical model) الذي يدرس النواة كدراســـة خواص الضوء من انعكاس وانكسار وامتصاص ففي هذه الحالة تنقسم موجة الجسيم الوارد إلى النواة إلى موجة منعكســـة وموجة مرتدة وتدرس عن طريق ما يســـمى بالكمون المركب [2]. نظراً للنجاح الذي قدمه هذا النموذج في تفسير نتائج التجارب النووية كحساب المقاطع العرضية تم تطويره إلى نموذج آخر أكثر حداثة دُعي بالنموذج الضـــوئي التبددي والذي يعتبر بأن جزئي الكمون الحقيقي والتخيلي مرتبطين ارتباطا داخليا من خلال العلاقة التبددية (6). وللنموذج الضوئي التبددي فرعين أساسين الأول يدعى بتحليل النموذج الضوئي التبددي (DOMA)، أما الثاني فيدعى بالتقريب التغايري للعزوم (VMA).في هذا البحث سنعتمد طريقة (VMA) التي طبقت لدراسة تبعثر النيوكليونات بوساطة النوى في مجالات طاقية مختلفة ، ثمَّ طورت

لدراســة تبعثر نواة بوســاطة نواة أخرى والتي تعد من أهم الدراســات في الفيزياء النووية [3] كتبعثر نواة الليثيوم بوساطة نوى أهداف مختلفة كالمغنيزيوم.

هدف البحث:

اســتنباط شــكل الكمونات الضــوئية للمنظومة النووية المدروســة في المجال الطاقي المحدد ودراسة تابعيتها للطاقة وإيجاد البارامترات المثالية للكمون الضوئي وأيضاً تحديد مقاطع التفاعل باستخدام طريقة التقريب التغايري للعزوم (VMA) .

الأسس الرياضية لطريقة VMA [4,5,6,7,8,9,10,11] :

تعتمد هذه الطريقة في حسابها التكاملات الحجمية (الحقيقية والتخيلية) في استنباطها لشكل الكمون ولوسطائه الهندسية (البارامترات).

يعطى الكمون الضوئي الناتج عن التأثير المتبادل بين القذيفة والهدف بالعلاقة التالية:

$$U(r,E) = V(r,E) + iW(r,E) + V_{Ls}(r,E) + V_c(r) \qquad (1)$$

كما هو موضح من العلاقة (1) إن الكمون الضوئي المتشكل ناتج من اتحاد عدة مكونات أساسية . حيث يمثل الحد الأول $V(r,E)$ الجزء الحقيقي للكمون الضوئي الذي يتكون بدوره من مركبتين الأولى تعبر عن كمون هارتي فوك أما الثانية فتدعى بالكمون التبددي والتي بدورها تتكون من حدين تبددين سطحي$\Delta V_d(r,E)$ وحجمي$\Delta V_V(r,E)$.

يعبر عن الجزء الحقيقي للكمون بالعلاقة التالية:

$$V(r,E) = V_{HF}(r,E) + \Delta V_d(r,E) + \Delta V_V(r,E) \qquad (2)$$

أما الحد الثاني $iW(r,E)$ فيعبر عن الجزء التخيلي للكمون الضوئي الذي يتكون من مركبتين هما الكمون التخيلي السطحي$W_d(r,E)$ و الكمون التخيلي الحجمي$W_V(r,E)$ ويعبر عن ذلك بالعلاقة :

$$W(r,E) = W_d(r,E) + W_V(r,E) \qquad (3)$$

يعبر الحد الثالث $V_{Ls}(r,E)$ عن الكمون السبيني المداري الذي يعطى بالعلاقة :

$$V_{LS} = -V_{LS}(E)(4r_{LS}.a_{LS})^{-1}.g(X_{Ls})\vec{L}.\vec{\sigma} \qquad (4)$$

أما الحد الأخير $V_c(r)$ فيمثل الكمون الكولومي .

تكتب علاقة الكمون بالشكل التالي:

$$U(r,E) = V_{HF}(r,E) + \Delta V_d(r,E) + \Delta V_V(r,E) + i\big(W_d(r,E) + W_V(r,E)\big) + V_{Ls}(r,E) + V_c(r) \qquad (5)$$

منهجية تطبيق طريقة VMA:

الخطوات المتبعة في هذه الطريقة هي إيجاد مكونات الكمون الضوئي وتعويضها في العلاقة (5) .

العلاقة التبددية هي التي تربط بين الجزء الحقيقي للكمون الضوئي والجزء التخيلي :

$$\Delta V(r,E) = V_0(r,E) + \frac{P}{\pi}\int \frac{W(r,E')}{(E-E')}dE' \qquad (6)$$

يعطى الكمون التبددي السطحي والتبددي الحجمي بالعلاقتين :

$$\Delta V_V(r,E) = \frac{2}{\pi}(E-E_s)\int_{E_0}^{\infty} \frac{w_V(r,E)dE}{(E-E_s)^2-(E-E_s)} \qquad (7)$$

$$\Delta V_d(r,E) = \frac{2}{\pi}(E-E_s)\int_{E_0}^{\infty} \frac{w_d(r,E)dE}{(E-E_s)^2-(E-E_s)} \qquad (8)$$

بالمكاملة نحصل على العلاقة :

$$\Delta V_w(E) = \frac{2}{\pi}(E-E_s)\int_{E_0}^{\infty} \frac{[r^2]_w(E)dE}{g_w(E)[(E-E_s)^2-(E-E_s)^2]} \qquad (9)$$

حيث يعبر $[r^2]_w(E)$ عن العزم من المرتبة الثانية ويتم توصيف تلك العزوم بعد تحديدها بعلاقة (براون–راو):

$$[r^2]_w(E) = [r^2]_{wV}(E) + [r^2]_{w_d}(E)$$

$$[\mathrm{r}^2]_{\mathrm{wd}}(\mathrm{E}) = \beta_2 \left[\frac{(\mathrm{E}-\mathrm{E}_0)^2}{(\mathrm{E}-\mathrm{E}_0)^2 + \rho^2{}_2} - \frac{(\mathrm{E}-\mathrm{E}_0)^2}{(\mathrm{E}-\mathrm{E}_0)^2 + \rho^2{}_{\mathrm{w}}} \right] \qquad (10)$$

علماً أن $(\rho_w, \rho_2, \beta_2)$ تُمثِّل الوسطاء الهندسية لبراون–راو ومن خلالها نحصل على أفضل توصيف للمنحنيات الناتجة حيث أُخذت بطريقة المطابقة بين القيم المرجعية للعزوم من المرتبة الثانية للجزء التخيلي للكمون والقيم الحسابية وفق علاقة (براون _راو)،بينما E_0 تمثل في حالة النيوكليونات $\mathrm{E}_0 = \frac{\mathrm{E_F}}{2}$ وأيضـــاً تمثل بداية الامتصـــاص،لكن في حالة كون المقذوف نواة كالليثيوم في هذه الحالة فإن طاقة فيرمي تفقد المعنى لأن النواة المقذوفة ذات تركيب معقد مشابه لتركيب النواة الهدف لهذا يتم استبدال طاقة فيرمي بطاقة اختيارية E_S.

بعد تحديد العزوم التخيلية من المرتبة الثانية يتم الانتقال إلى تحديد الكمونات التخيلية (سطحية وحجمية) كالتالي:

$$[\mathrm{r}^2]_{\mathrm{w_v}}(\mathrm{E}) = \frac{4\pi \mathrm{R}_{\mathrm{w}}^3}{3\mathrm{A}_P A_T} \left[1 + \frac{1}{3} \left(\frac{\pi a_{\mathrm{W}}}{\mathrm{R}_{\mathrm{W}}} \right)^2 \right] \mathrm{W}_{\mathrm{w}}(\mathrm{E}) = \mathrm{g}_{\mathrm{v}} \mathrm{W}_{\mathrm{v}}(\mathrm{E}) \qquad (11)$$

$\mathrm{A}_P A_T$ تمثل الأعداد الكتلية لكل من الهدف والقذيفة على الترتيب.

يتم حساب $\mathrm{R_W}$ من العلاقة:

$$R_W = r_W A^{\frac{1}{3}} \qquad (12)$$

بعد إيجاد جميع الحدود في علاقة الكمون الكلي فإن (4) تأخذ الشكل التالي :

$$V(r,E) = \frac{J_0(E_s)}{g_v} [exp\alpha(E-E_s) f(r_v) + \Delta V_w f(r_w) + \Delta V_d(E) g(r_d)] +$$

$$iW_w f(r_w) + iW_d g(r_d) + V_{ls}(r,E) + V_C \qquad (13)$$

$F(r_w)$، $g(r_d)$ عبارة عن توابع وود– ساكسون

$$g_{(r_d)} = -a_i \frac{df(x_i)}{dr} \quad , \quad F(r_w) = [1 + exp(X_i)]^{-1}$$

$$\frac{d^2\psi}{dr^2} + \frac{2M}{\left(h/2\pi\right)^2}(E - U)\psi = 0 \qquad (14)$$

بعد الحصول على القيمة الجديدة للكمون يتم إدراجها في معادلة شرودينغر وبحلها باستخدام SPI-Genoa [12] نحصل على مقاطع التفاعل التفاضلية والكلية.

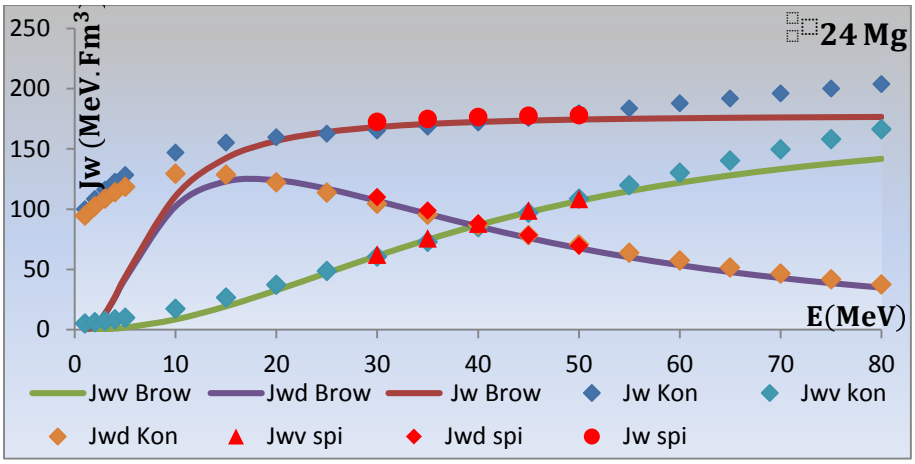
النتائج والمناقشة:

1– تم إيجاد البارامترات المثالية للكمون الضوئي الموضحة في الجدول (1) للمنظومة النووية المدروسة ($^{6}Li+^{24}Mg$) بطريقة VMA.

الجدول (1)

E (MeV)	V (MeV)	r_v Fm	a_v Fm	W_v (MeV)	r_v Fm	a_v Fm	W_d (MeV)	r_d Fm	a_d Fm	σ (mb)
30	313.0063	1.521	0.664	23.976	1.441	0.640	25.89	1.441	0.640	1544
35	306.2575	1.508	0.664	29.19	1.441	0.640	23.28	1.441	0.640	1556
40	298.3421	1.498	0.664	33.912	1.441	0.640	20.76	1.441	0.640	1555
45	289.6854	1.491	0.664	38.1	1.441	0.640	18.444	1.441	0.640	1549
50	280.5925	1.486	0.664	41.76	1.441	0.640	16.38	1.441	0.640	1540
$V_{so} = 0.85Mev$			$r_{so} = 0.96$ Fm					$a_{so} = 0.59$ Fm		

2- قمنا بتحديد قيم التكاملات الحجمية بالنسبة للجزء التخيلي للكمون (السطحي والحجمي) بعد أن تم توصيفها بعلاقة (براون-راو) وتم دراسة تابعيتها بالنسبة للطاقة .

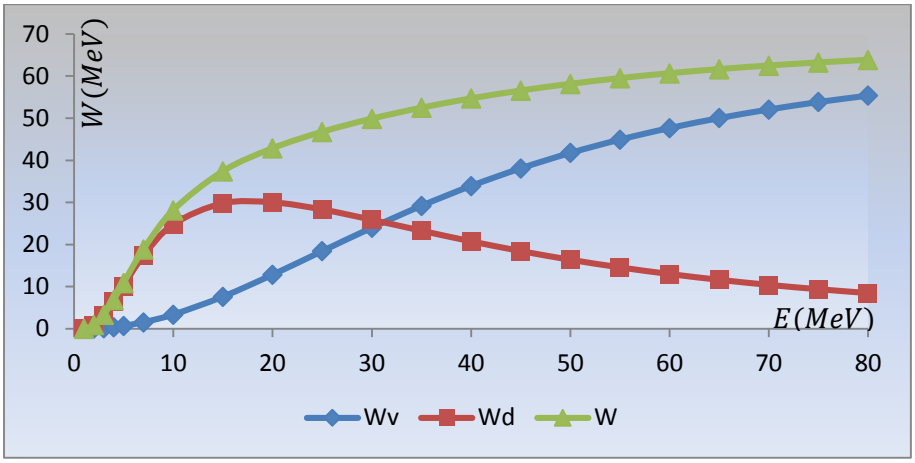


الشكل (1) يمثل تغيرات التكاملات الحجمية من المرتبة الثانية (العزوم) للكمون التخيلي بجزئيه بالنسبة للطاقة .

كما هو موضح من الشكل (1) تُظهر العزوم التخيلية السطحية والحجمية سلوكاً وتبايناً طاقياً مختلفاً فيما بينها .فنجد أن العزم التخيلي السطحي يزداد مع ازدياد الطاقة إلى أن يصل إلى قيمة عظمى ثم يبدأ بالتناقص مع ازدياد الطاقة ويعود ذلك إلى تناقص التأثيرات السطحية الناجمة عن المشاركة الفعالة للنيوكليونات السطحية للنواة الهدف بالمقابل نجد أن العزم التخيلي الحجمي يزداد بزيادة الطاقة أما بالنسبة للعزم التخيلي الكلي فيبدى سلوكاً متزايداً في البداية ومن ثم استقراراً ملحوظاً وهذا يعود إلى الاختلاف بين سلوك العزم التخيلي الحجمي والسطحي .

نلاحظ من الشكل أن التكاملات الحجمية التخيلية (السطحية والحجمية) المحسوبة بطريقة VMA تظهر تقارباً جيداً من القيم التي حصلنا عليها من تصنيف كونيك [13] في المجال الطاقي MeV (30-50).

3- وفقاً للجدول (1) وبالاعتماد على المنهجية المتبعة تم تحديد قيم الكمونات الضـــوئية التخيلية (السطحية والحجمية) وتمثيلها بيانياً في الشكل التالي:

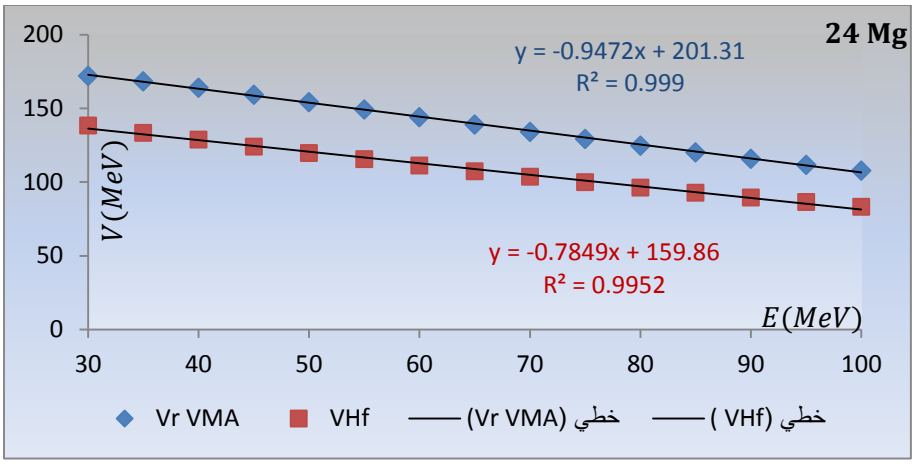


الشـكل (2) يمثل تغيرات الكمونات الضـوئية التخيلية (السـطحية والحجمية) بالنسـبة للطاقة للمنظومة النووية المدروسة .

نلاحظ من الشكل أن الكمون الضـوئي يتبع سـلوكاً مشـابهاً لسـلوك التكاملات الحجمية ويعود ذلك إلى العلاقة التي تربط بينهما $[r^2]_w = qw(E)$.

وأيضاً تسلك الكمونات الضوئية المحسوبة بطريقة VMA سلوك مشابه للكمونات التي حصلنا عليها من تصنيف كونيك [13] .

4- تم دراســـة التغير الطاقي لكلٍّ من الكمون الحقيقي وكمون هارتي-فوك وتم تمثيلها بيانياً في الشكل التالي بناءً على النتائج التي حصلنا عليها من VMA:



الشكل (3) يمثل تغيرات الكمون الحقيقي وكمون هارتي–فوك بالنسبة للطاقة للمنظومة النووية المدروسة .

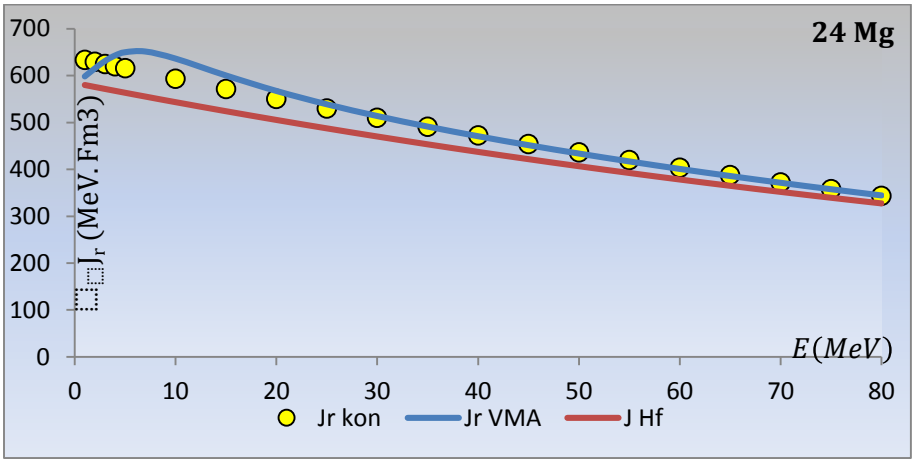
نلاحظ من هذا الشكل السلوك الخطي لكل من الكمون الحقيقي وكمون هارتي–فوك بالنسبة للطاقة وتم التعبير عن هذا السلوك بالمعادلات التالية :

$$V_r = -0.9472E + 201.31$$

$$V_{Hf} = -0.7849E + 159.86$$

حيث أنه من خلال هذه العلاقات يمكننا تحديد قيم الكمون الحقيقي وكمون هارتي–فوك من أجل أي قيمة طاقية مختارة.

5– التابعية الطاقية للعزوم الحقيقية للمنظومة النووية $(^{6}Li+^{24}Mg)$ في المجال الطاقي (30–50) MeV .

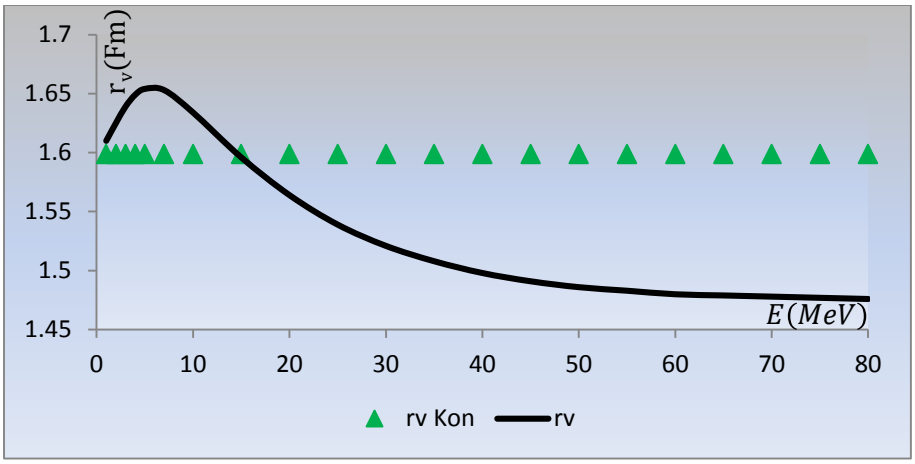


الشكل (4) يمثل تغيرات العزم الحقيقي وعزم هرتي فوك بالنسبة للطاقة.

نلاحظ من هذا الشكل أنه عند الطاقات المنخفضة يزداد العزم الحقيقي حتى يبلغ قيمة عظمي ثم يبدأ بعدها بالتناقص مع زيادة الطاقة .ويفسر هذا بأن القيمة العظمى للعزم الحقيقي تعكس ظاهرة يطلق عليها اسم ظاهرة الشذوذ العتبي للجزء الحقيقي للكمون الضوئي حيث تشير هذه الظاهرة إلى مساهمة مشتركة وفعالة لقنوات التفاعل المختلفة .

وأيضاً نلاحظ توافق جيد بين قيم العزوم الحقيقية للكمون الضوئي وفق طريقة VMA وتلك المحسوبة وفق التصنيف العالمي لكونيك [13] .

6- دراسة التابعية الطاقية لنصف قطر الكمون الحقيقي على المجال MeV(30-50) للمنظومة النووية المدروسة.

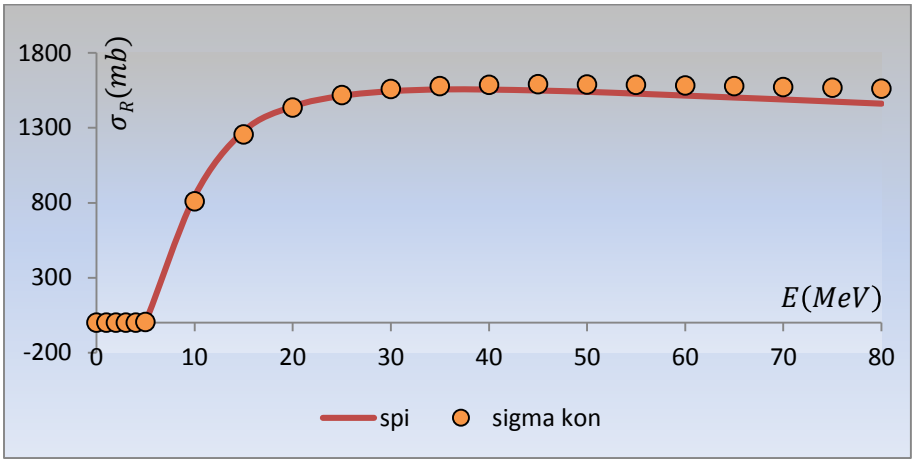


الشـــكل (5) يمثل تغيرات نصـــف قطر الكمون الحقيقي بالنســـبة للطاقة للمنظومة النووية المدروسة.

كما هو مبين من الشكل أن سلوك نصف قطر الكمون الحقيقي المحسوب وفقاً لطريقة VMA يبدأ بالتزايد إلى أن يصـل إلى قيمة عظمى ويبدأ بعدها بالتناقص مع ازدياد الطاقة وهذا بدوره يعبر عن شذوذ سلوك نصف قطر الكمون الحقيقي الذي يرجع إلى مشاركة العديد من قنوات التفاعل المختلفة ضمن هذا المجال .

بينما نلاحظ سلوك نصف القطر الحقيقي الناتج من تصنيف كونيك[13] يأخذ قيمة ثابتة مع تغير طاقة المقذوف وبالتالي هذا لا يعكس التغيرات التي تطرأ على نصـــف القطر بشـــكل واضح ولا على التأثيرات المتبادلة بين القذيفة والهدف أيضاً.

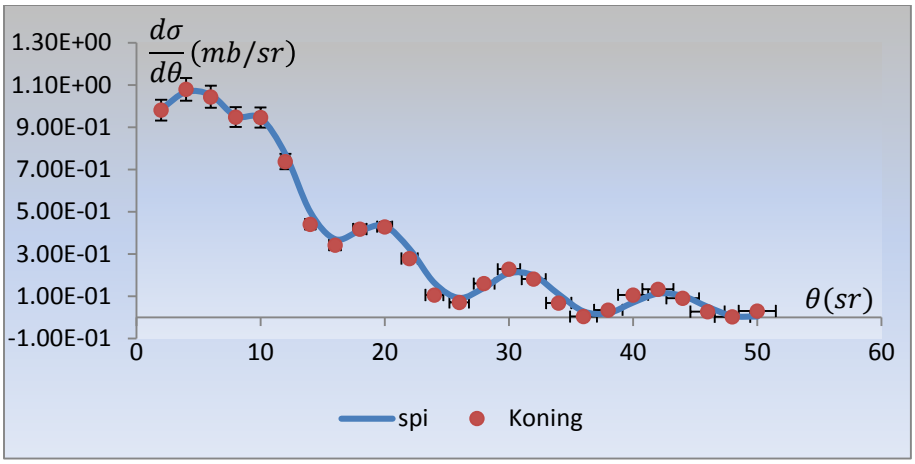
7- تحديد قيم المقطع العرضي للتفاعل للمنظومة المدروسة ($^{6}Li+^{24}Mg$) ودراسة تابعيتها للطاقة كما هو مبين في الشكل (6).



الشكل (6) يمثل تغيرات المقطع العرضي للتفاعل ضمن المجال الطاقي المدروس .

نلاحظ أن المقطع العرضي للتفاعل يبدأ بقيم صغيرة عند الطاقات المنخفضة ومع زيادة طاقة المقذوف يزداد بشكل أكبر نتيجة مشاركة العديد من قنوات التفاعل وازدياد احتمال التفاعل بين نواة الليثيوم ونواة الهدف وبعد الوصول إلى حد معين من الطاقة نلاحظ أن المقطع العرضي للتفاعل يبدأ بالتشبع ويأخذ قيم شبه ثابتة ويظهر شكل المنحني وكأنه خط مستقيم تقريباً.

8- دراسة تغير المقطع العرضي التفاضلي بالنسبة للزاوية عند طاقة قذف ثابتة ضمن المجال الطاقي المدروس.



الشكل (7) يمثل تغيرات المقطع العرضي التفاضلي للمنظومة النووية المدروسة بالنسبة للزاوية عند الطاقة 30MeV .

نلاحظ من الشكل التوافق الجيد بين القيم الناتجة من برنامج SPI والقيم المحسوبة من تصنيف كونيك [13].

الاستنتاجات:

وفقاً لمنهجية VMA المتبعة في هذه الورقة البحثية وباستخدام الكودين (VMA-SPI) و SPI تم دراسة تبعثر الليثيوم بواسطة نواة الهدف ^{24}Mg في المجال الطاقيMeV(30-50) وتم التوصل إلى العديد من النتائج نذكر منها :

1- حصلنا على قيم البارامترات المثالية للكمون الضوئي للمنظومة النووية المدروسة على المجال الطاقي MeV(30-50) بفاصل طاقي $\Delta E = 5MeV$ حيث قمنا بتثبيت قيم وسطاء الكمون السبيني المداري باعتبارها غير تابعة للطاقة.

2- تم الحصول على قيم التكاملات الحجمية من المرتبة الثانية بالنسبة للجزء التخيلي للكمون (السطحي والحجمي) بعد أن تم توصيفها بعلاقة براون-راو وأيضاً وقمنا بتمثيلها بيانياً ومن ثم ناقشنا السلوك الذي تتبعه تلك العزوم.

3- تم إيجاد قيم الكمونات الضوئية التخيلية (السطحية والحجمية) ودراسة تغيراتها بالنسبة للطاقة ومُثلت بيانياً في الشكل (2) وتبين لنا أنها تسلك سلوك مشابه للعزوم التخيلية وهذا يعزى إلى العلاقة التي تربط بينهما $[r^2]_w = qw(E)$.

4- تم دراسة التغيرات لكل من الكمون الحقيقي وكمون هارتي- فوك بالنسبة للطاقة حيث تم توصيف السلوك الذي تتبعه هذه الكمونات بالعلاقتين :

$$V = -0.9472E + 201.31$$

$$V_{Hf} = -0.7849E + 159.86$$

5- قمنا بدراسة تابعية نصف قطر الكمون الحقيقي للطاقة وتم مقارنة السلوك الذي يتبعه مع نصف قطر الكمون الحقيقي المحسوب من التصنيف العالمي لكونيك [13] .

6- تم تحديد قيم مقاطع التفاعل ودرست تابعيتها للطاقة وتبين لنا من الشكل التطابق الجيد بين قيم مقاطع التفاعل التي حصلنا عليها وفق طريقة VMA وتلك المحسوبة وفق تصنيف كونيك [13].

7- تم دراسة تغير المقطع العرضي التفاضلي كتابع للزاوية عند طاقة ثابتة مختارة ضمن المجال الطاقي المدروس .

التوصيات:

إتاحة استخدام طريقة VMA لتشمل مجالات طاقية أعلى للجسيم المقذوف وأيضاً لتشمل نوى أهداف ثقيلة.

المراجع:

[1]Krane, K. S. (1991). Introductory nuclear physics. John Wiley & Sons.

[2] د-أنيس بلال، محاضرات الفيزياء النووية لطلاب السنة الرابعة فيزياء، قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة حمص.

[3] Hodgson, P. E. (1990). The unification of the nuclear optical potential. *Contemporary physics*, *31*(5), 295-308.

[4**]** ROMANOVSKY E. A , BELAL. A , MORZENA L .R, 1993 , News. RAS ,Phys . Vol . 57, No . 10 , P. 179.

[5]ROMANOVSKY E. A, BOTROS. S, SBASKIA T. E,1995, News. RAS Phys. Vol .59, No. 5, P. 117.

[6]ROMANOVSKY E. A, BOTROS. S, BECPALOVA, B.O,1995, News. RAS, Phys. Vol. 59, No. 1, P. 145.

[7]BELAL. A ,2006-Investigating the resultant characteristics of proton scattering on nuclei $50 \leq A \leq 70$ with energy near the columbic barrier (E = EB) using(VMA)model, Journal of Syria- Homs, Vol.28, No.2, p.279-297- Albaath University.

[8]BELAL. A, 2009-Using the Dispersion Optical Model for Analysis of Proton Scattering by Nuclei $Zr^{92,94,96}$Energy Range close to columbic barrier Journal of AL Baath University –Syria-Homs, No.31.

[9]Al-Mustafa, H., & Belal, A. A Dispersive Optical Model Analysis of the Alpha Particles Scattering by Titanium Element Nucleus and Its Natural Isotopes.

[10]Белал, А., & Саллум, Р. (2019). STUDY OF REACTION SECTIONS FOR THE SYSTEM ($\boldsymbol{n}$+ $\boldsymbol{Sn112}$) INTHE ENERGY RANGE ($\mathbf{100} \leq\leq \mathbf{125}\boldsymbol{MeV}$) **Using** METHOD OF (VMA). *Аллея науки*, *1*(9), 19-24.

[11] أوس علي. (2024). دراسة التباينات الطاقية للعزوم من المرتبة الثانية بالنسبة للجزء التخيلي للكمون الضوئي للتفاعل (α+[Fe] _26^ 56) باستخدام طريقة (VMA). *سلسلة العلوم الأساسية*, *46*(8)..

[12] PEREY F.G. code SPI-GENOA (unpublished)1976.

[13] koning, A. J., & Rochman, D. (2012). Modern nuclear data evaluation with the TALYS code system. *Nuclear data sheets*, *113*(12), 2841-2934