

Reduced Transition Probability of Electric Quadrupole in the ${}^6\text{Li}$ Nucleus

Ali Moghadasi*

Department of Physics, Faculty of Science, Malayer University, Malayer, Iran

Received: 06.11.2021 Final revised: 25.08.2022 Accepted: 06.02.2023

Doi link: [10.22055/jrmb.2023.18128](https://doi.org/10.22055/jrmb.2023.18128)

Abstract

For a theoretical description of the nuclear system, it is necessary to extract the properties observed in the ground and the excited states of the nucleus. Another important application of computed data $B(E2)$ is for nuclear reaction calculations, which are essential as library parameters and nuclear reaction calculation codes such as EMPIRE and TALYS. Also, by applying the results of the reduced transition probability calculation, the cross-sections of the reaction can be easily determined and quantities such as the astrophysical S factor and the reaction rate can be obtained. The probability of a reduced electric quadrupole transition $B(E2)$ between the ground state and the excited states in the ${}^5\text{He}$ (p, γ) ${}^6\text{Li}$ radiation capture reaction with the Woods-Saxon and M3Y potentials is calculated. The value of $B(E2)$ in the ${}^6\text{Li}$ nucleus between the excited states 3^+ and 2^+ (with excitation energies of 2.18 MeV and 4.31 MeV) and the ground state with Woods-Saxon potential obtained equal to $10.2 \text{ e}^2\text{fm}^4$ and $4.678 \text{ e}^2\text{fm}^4$, respectively. Also by using the M3Y potential obtained equal to $10.25 \text{ e}^2\text{fm}^4$ and $3.78 \text{ e}^2\text{fm}^4$, respectively. There are a good agreement between the experimental data and the computational results.

Keywords: Reduced transition probability, Electric quadrupole transition, Radiative capture reaction, Quadrupole moment

* Corresponding Author: a.moghadasi@malayeru.ac.ir

احتمال گذار تقلیل یافته چارقفبی الکتریکی در هسته ${}^6\text{Li}$

علی مقدسی *

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۱۵ ویرایش نهایی: ۱۴۰۱/۰۶/۰۳ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۷

Doi link: [10.22055/jrmb.2023.18128](https://doi.org/10.22055/jrmb.2023.18128)

چکیده

برای ایجاد یک توصیف نظری جامع از سیستم هسته‌ای، لازم است که خصوصیات حالت پایه و حالت‌های برانگیخته هسته استخراج شود. یکی از کاربردهای مهم احتمال گذار چارقفبی الکتریکی ($B(E2)$) این است که به‌عنوان پارمترهای کتابخانه‌ای در کدهای محاسبه واکنش هسته‌ای مانند EMPIRE و TALYS به‌کار گرفته می‌شود. همچنین با به‌کار بستن نتایج حاصل از محاسبه احتمال گذار تقلیل یافته می‌توان به‌سادگی سطح مقطع واکنش را تعیین و به‌کمک آن کمیت‌هایی همچون فاکتور اختزفیزیکی S و نرخ واکنش را به‌دست آورد. احتمال گذار تقلیل یافته چارقفبی الکتریکی $B(E2)$ بین حالت پایه و حالت‌های برانگیخته در واکنش گیراندازی تابش ${}^5\text{He}(p,\gamma){}^6\text{Li}$ با پتانسیل وودز-ساکسون و $M3Y$ محاسبه شده است. مقدار $B(E2)$ در هسته ${}^6\text{Li}$ بین حالت‌های برانگیخته 3^+ و 2^+ (با انرژی برانگیختگی $2,186\text{ MeV}$ و $4,31\text{ MeV}$) و حالت پایه با پتانسیل وودز-ساکسون به‌ترتیب برابر $10,2\text{ e}^2\text{fm}^4$ و $4,678\text{ e}^2\text{fm}^4$ و با پتانسیل $M3Y$ به‌ترتیب برابر $10,25\text{ e}^2\text{fm}^4$ و $4,78\text{ e}^2\text{fm}^4$ به‌دست آمد، که تطابق خوبی بین داده‌های تجربی و نتایج محاسبات وجود دارد.

کلیدواژگان: احتمال گذار تقلیل یافته، گذار چارقفبی الکتریکی، واکنش گیراندازی تابش، گشتاور چارقفبی الکتریکی

مقدمه

یک دسته از این واکنش‌های همجوشی، واکنش گیراندازی تابشی است که با همجوشی هسته اتم با یک یا چند نوکلئون شروع و سپس تابش الکترومغناطیسی ساطع می‌گردد. محاسبه احتمال گذار تقلیل یافته چارقفبی الکتریکی ${}^6\text{Li}$ با استفاده از مدل خوشه‌ای و یکی از واکنش‌های گیراندازی تابش از جمله واکنش ${}^5\text{He}(p,\gamma){}^6\text{Li}$ محاسبه می‌شود.

اندازه‌گیری جمعی چارقفبی هسته‌های اتمی از اوایل دهه ۱۹۵۰ آغاز شد. چنین مجموعه‌ای به‌طور گسترده در ناحیه $N \sim Z$ یا "دره ثبات" مورد مطالعه قرار گرفت. در این ناحیه، بسیاری از پدیده‌های ساختار هسته، مانند

واکنش‌های همجوشی هسته‌ای در ستاره‌ها، واکنش‌هایی هستند که بین هسته‌ها و سایر ذرات بنیادی ایجاد می‌شوند که تمام عناصر سنگین‌تر از هیدروژن را تولید می‌کنند. در واکنش‌های هسته‌ای مربوط به اختزفیزیک، دو مکانیزم واکنش تشکیل هسته مرکب و واکنش‌های مستقیم در رقابت با هم هستند. فقط چند تراز محدود برای برانگیختگی‌های کم یک هسته مرکب وجود دارد، به‌همین خاطر مکانیسم مستقیم را نمی‌توان نادیده گرفت و حتی می‌تواند در نوکلئوس‌تتر اولیه و ستاره‌های غالب باشد.

* نویسنده مسئول: a.moghadasi@malayeru.ac.ir



همچنین با به کار بستن نتایج حاصل از محاسبه احتمال گذار تقلیل یافته می توان به سادگی سطح مقطع واکنش را تعیین و به کمک آن کمیت هایی همچون فاکتور اختزفیزیکی S و نرخ واکنش را به دست آورد.

انرژی میدان های تابشی الکترومغناطیسی به زبان ریاضی می تواند در جملات ریاضی از بسط گشتاور چند قطبی بیان شوند. از آنجا که این بسط ها سریعاً همگرا می شوند، بنابراین تنها مراتب پایین بسط اهمیت دارند. گشتاورهای چندقطبی به چگالی بار و جریان در هسته بستگی دارند. بنابراین مطالعه آنها اطلاعات زیادی از این ویژگی ها در اختیار پژوهشگران قرار می دهد. گشتاورهای مغناطیسی M1 به گشتاورهای مغناطیسی هسته و ویژگی های ذره-تنها حساس هستند. گشتاورهای الکتريکی E2 به توزیع بار هسته ای و اثرات جمعی مانند تغییر شکل حساس می باشند.

در این پژوهش به محاسبه احتمال گذار تقلیل یافته E2 در واکنش گیراندازی تابش ${}^6\text{Li}(\text{p},\gamma){}^5\text{He}$ پرداخته شده است و این کمیت برای گذار بین دو تراز برانگیخته و حالت پایه ${}^6\text{Li}$ محاسبه شده است. در نهایت نتایج با داده های تجربی موجود مورد مقایسه قرار گرفته که تطابق خوبی بین آنها مشاهده شده است.

در ادامه ابتدا روش تئوری محاسبات و جزئیات بیشتر بیان و به بحث و نتیجه گیری در خصوص نتایج می پردازیم.

تئوری محاسبات

در واکنش های گیراندازی تابشی که به شکل کلی زیر نمایش داده می شوند.



توابع موج حالت مقید را می توانیم با حل معادله شعاعی شرودینگر زیر محاسبه کنیم [۸].

$$-\frac{\hbar^2}{2m_{ab}} \left[\frac{d^2}{dr^2} - \frac{l(l+1)}{r^2} \right] u_{lj}(r)$$

بسته بودن پوسته هسته ای، در چارچوب مدل پوسته ای هسته شناسایی و توضیح داده شدند [۱،۲].

اهمیت گردآوری و ارزیابی احتمالات گذار E2 برای هسته های زوج-زوج در دهه ۱۹۶۰ توسط استلسون و گرویزنر در آزمایشگاه ملی اوک ریج مشخص شد. آنها اولین مجموعه مقادیر B(E2) را برای اولین حالت های 2^+ به دست آوردند [۳]، که سپس توسط رامان و همکاران ادامه یافت [۴،۵]. در حال حاضر، این کار تحت نظارت برنامه داده های هسته ای ایالات متحده (USNDP) ادامه دارد. این کار به عنوان به روزرسانی دوره ای مقادیر B(E2) برای نواحی جرمی آغاز شد.

ساختار داخلی هسته نسبت به تعداد نوکلئون های تشکیل دهنده (پروتون ها و نوترون ها) تغییر می کند. این تغییرات در ساختار با تغییرات مربوطه در ترازهای برانگیختگی هسته ای و ویژگی های واپاشی حالت های برانگیخته هسته ای همراه است. اغلب در فیزیک هسته ای از خصوصیات مشاهده شده در حالت پایه و حالت های برانگیخته هسته، زیرساختی از ساختار فیزیکی این حالت ها را استخراج کرده و یک توصیف نظری جامع از سیستم هسته ای ایجاد می کنند [۶].

یکی دیگر از کاربردهای مهم داده های محاسبه شده B(E2) برای محاسبات واکنش هسته ای است. مقادیر دقیق پارامترهای تغییر شکل چارقطبی برای کتابخانه پارامتر ورودی مرجع (RIPL) و کدهای محاسبه واکنش هسته ای مانند EMPIRE و TALYS، که به طور گسترده برای سنجش ENDF استفاده می شوند، ضروری است. چنین ارزیابی هایی برای کاربرد داده های هسته ای هنگامی که کتابخانه ENDF/B-VII.1 سطوح مقطع نوترونی محاسبه شده را برای کدهای علوم و فن آوری هسته ای متداول GEANT و MCN ارائه می دهد، بسیار مهم است [۷].

که بار مؤثر در مرکز جرم (e_λ) با رابطه زیر جایگزین می‌شود.

$$e_\lambda = Z_b e \left(-\frac{m_a}{m_c}\right)^\lambda + Z_a e \left(\frac{m_b}{m_c}\right)^\lambda \quad ۸$$

المان‌های ماتریس برای گذار $JM \rightarrow J_0 M_0$ با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$\langle JM | \mathcal{O}_{E\lambda\mu} | J_0 M_0 \rangle = \langle J_0 M_0 | \lambda E | JM \rangle \frac{\langle || \mathcal{O}_{E\lambda} || J_0 \rangle}{\sqrt{2J+1}} \quad ۹$$

با استفاده از توابع موج ذره تنها المان‌های ماتریس تقلیل یافته را از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۱].

$$\langle || \mathcal{O}_{E\lambda} || J_0 \rangle = (-1)^{j+I_a+J_0+\lambda} [(2J+1)(2J_0+1)]^{1/2} \times \left\{ \begin{matrix} j & J & I_a \\ J_0 & j_0 & \lambda \end{matrix} \right\} \langle l_j || \mathcal{O}_{E\lambda} || l_0 j_0 \rangle_J \quad ۱۰$$

برای به دست آوردن $\langle l_j || \mathcal{O}_{E\lambda} || l_0 j_0 \rangle_J$ باید المان‌های ماتریس $\langle l_j || r^\lambda Y_\lambda || l_0 j_0 \rangle_J$ را تعیین کنیم. المان‌های این ماتریس برای هنگامی که مقدار $\lambda + l + l_0$ فرد باشند برابر صفر و برای مقادیر زوج به نتیجه زیر منجر می‌شود [۱۲].

$$\langle l_j || \mathcal{O}_{E\lambda} || l_0 j_0 \rangle_J = \frac{e_\lambda}{\sqrt{4\pi}} (-1)^{l_0+l+j_0-j} \frac{\hat{\lambda} \hat{j}_0}{j} \left\langle j_0 \frac{1}{2} \lambda_0 \middle| j \frac{1}{2} \right\rangle \int_0^\infty dr r^\lambda u_{lj}^j(r) u_{l_0 j_0}^{j_0}(r) \quad ۱۱$$

برای گذار بین حالت‌های مقید، احتمال گذار تقلیل یافته به کمک رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$B(E\lambda; l_0 j_0 J_0 \rightarrow l j J) = (2J+1) \times \left\{ \begin{matrix} j & J & I_a \\ J_0 & j_0 & \lambda \end{matrix} \right\}^2 |\langle l_j || \mathcal{O}_{E\lambda} || l_0 j_0 \rangle|^2 \quad ۱۲$$

آهنگ گذار چارقطبی الکتریکی هر یک از گذارها به کمک رابطه زیر به دست می‌آید.

$$T(E2) = 1.225 \times 10^9 E_\gamma^5 B(E2) \quad ۱۳$$

و عمر متوسط هر تراز قبل از گذار چارقطبی الکتریکی، با جایگذاری در رابطه زیر برحسب پیکوتانیه تعیین می‌شود.

$$\tau = 8.16 \times 10^2 / (E_\gamma^5 B(E2)) \quad ۱۴$$

$$+[V_0(r) + V_c(r) + \langle \mathbf{s} \cdot \mathbf{I} \rangle V_{SO}(r)] u_{lj}^j(r) = E_i u_{lj}^j(r) \quad ۲$$

هسته‌های a ، b و c به ترتیب دارای اسپین ذاتی I_a ، s و J می‌باشند. تکانه زاویه‌ای مداری برای حرکت نسبی هسته‌های a و b با l بیان می‌شود. تکانه زاویه‌ای به صورت $\mathbf{l} + \mathbf{s} = \mathbf{j}$ و $\mathbf{j} + \mathbf{I}_a = \mathbf{J}$ کویپل می‌شوند، که به J اسپین کانال می‌گویند.

در پتانسیل وودز-ساکسون پتانسیل‌های $V_0(r)$ و $V_{SO}(r)$ به کمک رابطه‌های زیر به دست می‌آید:

$$V_0(r) = V_0 f_0(r) \quad ۳$$

$$V_S(r) = -V_{SO} \left(\frac{\hbar}{m_\pi c}\right)^2 \frac{1}{r} \frac{d}{dr} f_S(r)$$

$$f_i(r) = \left[1 + \exp\left(\frac{r-R_i}{a_i}\right)\right]^{-1} \quad ۴$$

که پارامترهای V_0, V_{SO}, a_0, R_0 و R_{SO} با برازش با انرژی حالت پایه تعیین می‌شوند. به کمک این رابطه می‌توان مجموع پتانسیل هسته‌ای و کولنی حالت‌های مقید را به دست آورد.

در پتانسیل $M3Y$ پتانسیل‌های $V_0(r)$ و $V_{SO}(r)$ به کمک رابطه‌های زیر به دست می‌آید:

$$V_0^{M3Y}(r) = \lambda_0 \int d^3 r_1 d^3 r_2 \rho_a(r_1) \rho_b(r_2) t(s) \quad ۵$$

$$V_S^{M3Y}(r) = \lambda_{SO} \left(\frac{\hbar}{m_\pi c}\right)^2 \frac{1}{r} \frac{d}{dr} V^{M3Y}(r)$$

که

$$t(s) = A \frac{e^{-\beta_1 s}}{\beta_1 s} + B \frac{e^{-\beta_2 s}}{\beta_2 s} + C \delta(s) \quad ۶$$

که ρ_a و ρ_b به ترتیب چگالی ترازهای حالت پایه هسته‌های a و b هستند و $s = |\mathbf{r} + \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1|$. برای شناخت کامل‌تر از کمیت‌های موجود در رابطه بالا می‌توان به مرجع [۹] مراجعه کرد.

عملگر گذارهای چند قطبی الکتریکی به صورت زیر است [۱۰]:

$$\mathcal{O}_{E\lambda\mu} = e_\lambda r^\lambda Y_{\lambda\mu}(\hat{\mathbf{r}}) \quad ۷$$

پایین ترین گذارهای چارقطبی الکتریکی ($E2$) بین حالت پایه و حالات برانگیخته 3^+ و 2^+ به ترتیب با انرژی برانگیختگی $2,186 \text{ MeV}$ و $4,31 \text{ MeV}$ رخ می دهند.

جدول ۱. پارامترهای پتانسیل وودز-ساکسون و $M3Y$

پارامترهای پتانسیل وودز-ساکسون	$V_0(\text{MeV})$	-۵۴,۴۸
	$R_0(\text{fm})$	۲,۳۹
	$a_0(\text{fm})$	۰,۶۵
	$V_{so}(\text{MeV})$	-۱,۰۰
	$R_{so}(\text{fm})$	۲,۳۹
	$a_{so}(\text{fm})$	۰,۶۵
	$R_c(\text{fm})$	۲,۳۹
پارامترهای پتانسیل	$F_c(\text{MeV})$	۳,۲۸
	$F_{so}(\text{MeV})$	۰,۲۷
	$R_c(\text{fm})$	۲,۳۹

ابتدا باید معادله شرودینگر را برای حالت های پایه و برانگیخته مدنظر حل و تابع موج آن را تعیین کنیم. در این مرحله از آنجا که حالت پایه ${}^5\text{He}$ برابر $1/5^-$ (پارته فرد) ولی هر سه حالت مورد مطالعه پارته زوج دارند، به همین خاطر باید تکانه زاویه ای مداری حرکت نسبی بین پروتون و هلیوم (l) در کانال ورودی واکنش ${}^5\text{He}(p,\gamma){}^6\text{Li}$ برابر ۱ باشد تا قانون پایستگی پارته برقرار بماند.

پارامترهای پتانسیل وودز-ساکسون و پتانسیل $M3Y$ که در جدول ۱ آمده است، انرژی حالت پایه را نسبت به کانال وردی واکنش برابر $4,497 \text{ MeV}$ - به دست می دهد. پس از تعیین تابع موج برای حالت برانگیخته و حالت پایه با جای گذاری آن در معادله های (۸,۹) و انتگرال گیری المان های ماتریس تقلیل یافته را محاسبه و سپس با استفاده از رابطه ۱۲ مقدار احتمال گذر چارقطبی الکتریکی تقلیل یافته را به دست می آوریم.

احتمال گذار تقلیل یافته چارقطبی الکتریکی ($B(E2)$) بین حالت پایه 1^+ و حالات برانگیخته 3^+ و 2^+ با استفاده

که E_γ برابر انرژی گامای تابشی در گذار الکترومغناطیسی مدنظر است. در انتها به کمک رابطه $(\tau = \hbar/\Gamma)$ پهنای تابش گامای ناشی از این گذار را می توان محاسبه کرد.

در پایان به کمک رابطه ۱۲ سطح مقطع واکنش $\gamma + c \rightarrow a + b$ را به کمک رابطه زیر به دست می آوریم.

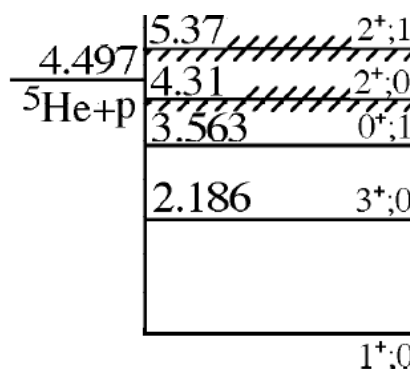
$$\sigma_\gamma^{(\lambda)}(E_\gamma) = \frac{(2\pi)^3(\lambda+1)}{\lambda[(2\lambda+1)!!]^2} \left(\frac{m_{ab}}{\hbar^2 k}\right) \left(\frac{E_\gamma}{\hbar c}\right)^{2\lambda-1} \frac{dB(E\lambda)}{dE} \quad 15$$

با استفاده از رابطه برگشت پذیری سطح مقطع واکنش گیراندازی تابش $a + b \rightarrow c + \gamma$ از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$\sigma_{(E\lambda)}^{(rc)}(E) = \left(\frac{E_\gamma}{\hbar c}\right)^{2\lambda-1} \frac{2(2l_c+1)}{(2l_a+1)(2l_b+1)} \sigma_\gamma^{(\lambda)}(E_\gamma) \quad 16$$

سطح مقطع کل با مجموع گیری روی همه حالت های گذار به دست می آید.

اکنون مقدمات تئوری لازم برای انجام محاسبات فراهم شده است. در بخش بعدی به کمک روابطی که در این قسمت بیان شد، شرحی از انجام محاسبات بیان می شود.



شکل ۱. ترازهای هسته ${}^6\text{Li}$ و انرژی کانال ورودی واکنش ${}^5\text{He}(p,\gamma){}^6\text{Li}$

روش محاسبات و نتایج

همان گونه که در شکل ۱ مشخص است، هسته ${}^6\text{Li}$ دارای حالت پایه با اسپین 1^+ و حالت های برانگیخته به ترتیب برابر اسپین های 3^+ ، 0^+ ، 2^+ و ... می باشد.

جدول ۲. مقایسه نتایج محاسبه در هسته ${}^6\text{Li}$ با دو پتانسیل وودز-ساکسون و M3Y.

$E_i \rightarrow E_f$	$2,186 \rightarrow 0$	$4,31 \rightarrow 0$	
$J_f^\pi \rightarrow J_i^\pi$	$3^+ \rightarrow 1^+$	$2^+ \rightarrow 1^+$	
نوع گذار	E2	E2	
B(E2) ($e^2\text{fm}^4$)	تجربی	۱۰,۶۹	۴,۴۰
	WS	۱۰,۲۰	۴,۶۷۸
	M3Y	۱۰,۲۵	۴,۷۸
T(E2) (s^{-1})	تجربی	$6,54 \times 10^{11}$	$8,02 \times 10^{12}$
	WS	$6,24 \times 10^{11}$	$8,52 \times 10^{12}$
	M3Y	$6,27 \times 10^{11}$	$8,71 \times 10^{12}$
T_7 (eV)	تجربی	$(4,40 \pm 0,34) \times 10^{-4}$	$(5,4 \pm 2,8) \times 10^{-3}$
	WS	$4,11 \times 10^{-4}$	$5,61 \times 10^{-3}$
	M3Y	$4,13 \times 10^{-4}$	$5,73 \times 10^{-3}$

بحث و نتیجه‌گیری

احتمال گذار تقلیل یافته بین ترازهای هسته در فیزیک هسته‌ای از اهمیت بالایی برخوردار است و در محاسبات نظری برای به دست آوردن کمیت‌های مشاهده پذیر مهم‌تری مانند سطح مقطع و نرخ واکنش مورد نیاز می‌باشد. احتمال گذار چارقفی الکتریکی هسته ${}^6\text{Li}$ طی واکنش ${}^5\text{He}(p,\gamma){}^6\text{Li}$ با در نظر گرفتن نیروهای دوجسمی بین پروتون و ${}^5\text{He}$ مورد بررسی قرار گرفت که در این محاسبات از دو سری پتانسیل وودز-ساکسون و M3Y استفاده شد.

احتمال گذار تقلیل یافته چارقفی الکتریکی در تراز برانگیخته 3^+ بیشتر از تراز برانگیخته 2^+ است، در مقایسه بین دو تراز مورد مطالعه نیمه عمر و عمر

از پتانسیل وودز-ساکسون به ترتیب برابر $10,2 e^2\text{fm}^4$ و $4,678 e^2\text{fm}^4$ و با پتانسیل M3Y به ترتیب برابر $10,25 e^2\text{fm}^4$ و $3,78 e^2\text{fm}^4$ به دست آمد.

با استفاده از رابطه ۱۳ آهنگ گذار چارقفی الکتریکی تراز برانگیخته 3^+ با استفاده از آهنگ گذار تقلیل یافته تجربی و محاسبه شده به کمک پتانسیل وودز-ساکسون و M3Y به ترتیب برابر (s^{-1}) $6,54 \times 10^{11}$ و $6,24 \times 10^{11}$ و $6,27 \times 10^{11}$ محاسبه شد. همین کمیت برای تراز برانگیخته 2^+ به همان ترتیب برابر (s^{-1}) $8,02 \times 10^{12}$ و $8,52 \times 10^{12}$ و $8,71 \times 10^{12}$ (s) به دست آمد.

به کمک رابطه ۱۴ عمر متوسط دو تراز برانگیخته مورد مطالعه را محاسبه و در نهایت پهنای گامای تابشی از هر یک از گذارها تعیین می‌شود. برای تراز برانگیخته 3^+ پهنای تابش گاما به صورت تجربی برابر (eV) $(4,40 \pm 0,34) \times 10^{-4}$ گزارش شده است [۱۳] و با استفاده از نتایج به دست آمده پهنای تابش گاما با پتانسیل وودز-ساکسون و M3Y به ترتیب برابر (eV) $4,11 \times 10^{-4}$ و $4,13 \times 10^{-4}$ به دست آمد. همچنین پهنای تابش گاما برای تراز برانگیخته 2^+ از داده‌های تجربی برابر (eV) $(5,4 \pm 2,8) \times 10^{-3}$ و با پتانسیل وودز-ساکسون و M3Y به ترتیب برابر (eV) $5,61 \times 10^{-3}$ و $5,73 \times 10^{-3}$ محاسبه شد. نتایج به دست آمده و مقایسه آن با نتایج تجربی [۱۳] در جدول ۲ به طور خلاصه بیان شده است.

در انتها با بهره‌گیری از نتایج مراحل قبل سطح مقطع واکنش ${}^5\text{He}(p,\gamma){}^6\text{Li}$ محاسبه شد، این واکنش به علت نیمه عمر کوتاه هسته هدف تا کنون مورد مطالعه تجربی قرار نگرفته است. در شکل ۲ نمودار سطح مقطع محاسبه شده این واکنش در انرژی‌های اختزلفیزیکی نمایش داده شده است.

در پایان سطح مقطع واکنش ${}^5\text{He}(p,\gamma){}^6\text{Li}$ در بازه انرژی‌های اخت‌فیزیکی برای اولین بار محاسبه شد. سطح مقطع در بازه انرژی ۰/۲ تا ۰/۸ مگا الکترون ولت از مرتبه 10^{-3} میلی بارن می‌باشد که برای اندازه‌گیری تجربی در آزمایشگاه مناسب بوده و تنها مانع در اندازه‌گیری تجربی این واکنش نیمه عمر کوتاه هسته ${}^5\text{He}$ است. اما با نگاهی به روابط (۱۵) و (۱۶) کاملاً مشخص است که اگر مقدار احتمال گذار تقلیل یافته به‌درستی تعیین شود، نتایج به‌دست آمده برای سطح مقطع دارای اعتبار و قابل اعتماد خواهد بود.

با مقایسه نتایج محاسبات با نتایج تجربی تطابق خوبی بین آنها مشاهده می‌شود که نشان دهنده قابلیت روابط تئوری و پتانسیل‌های مورد استفاده برای محاسبه احتمال گذار تقلیل یافته می‌باشد. در ادامه می‌توان همین محاسبات را با در نظر گرفتن نیروهای سه جسمی و ... با همین پتانسیل یا پتانسیل‌های دیگر بهبود داد.

مرجع‌ها

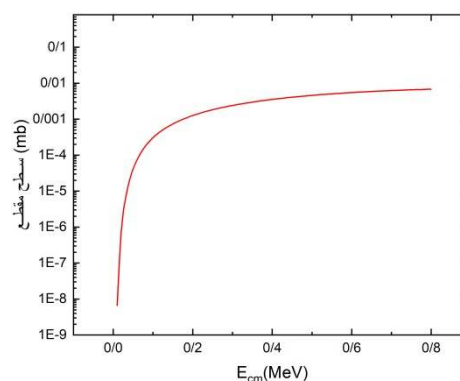
[1] M.G. Maye, Nuclear Configurations in the Spin-Orbit Coupling Model. I. Empirical Evidence, *Physical Review* **78** (1950) 16-21. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.78.16>

[2] E.K. Warburton, J.A. Becker, B.A. Brown, Mass systematics for $A=29-44$ nuclei: The deformed $A\sim 32$ region, *Physical Review C* **41** (1990) 1147-1166. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.41.1147>

[3] P.H. Stelson, L. Grodzins, Nuclear transition probability, $B(E2)$, for $0_{g.s.}^+ - 2_{\text{first}}^+$ transitions and deformation parameter, β_2 ; *Nuclear Data Sheets. Section A 1* (1965) 21-102. [https://doi.org/10.1016/S0550-306X\(65\)80004-0](https://doi.org/10.1016/S0550-306X(65)80004-0)

[4] S. Raman, C.H. Malarkey, W.T. Milner, C.W. Nestor Jr., P.H. Stelson, Transition probability, $B(E2)_{\uparrow}$, from the ground to the first-excited 2^+ state of even-even nuclides, *Atomic Data and Nuclear Data Tables* **36**

متوسط تراز برانگیخته 3^+ بیشتر و بالعکس آهنگ گذار و پهنای تابش گاما در این تراز کمتر می‌باشد.



شکل ۲. سطح مقطع واکنش ${}^5\text{He}(p,\gamma){}^6\text{Li}$ در انرژی‌های اخت‌فیزیکی.

در این محاسبات و نتایج گزارش شده در برخی مقالات دیگر [۶] مشهود است که مقدار احتمال گذار تقلیل یافته چارقطبی الکتریکی در گذار به‌حالت پایه با اسپین حالت برانگیخته نسبت مستقیم و با انرژی گامای تابشی گذار بین ترازها نسبت عکس دارد.

مقدار نتایج محاسبات احتمال گذار تقلیل یافته چارقطبی الکتریکی با دو پتانسیل وودز-ساکسون و $M3Y$ در تراز برانگیخته 3^+ کم‌تر از مقدار تجربی گزارش شده به‌دست می‌آید. اما در مورد تراز برانگیخته 2^+ برعکس بوده و نتایج محاسبات بیش از مقدار تجربی است و عملاً در محاسبات تئوری صورت گرفته اختلاف بین احتمال گذار تقلیل یافته چارقطبی الکتریکی دو تراز اندکی کاهش می‌یابد.

در این محاسبات، برخلاف برخی نتایج دیگران برای هسته‌های دیگر که پیش بینی می‌کنند پتانسیل $M3Y$ نسبت به وودز-ساکسون به نتایج بهتری منجر می‌شود، تفاوت معناداری بین نتایج حاصل از دو پتانسیل مشاهده نگردید و حداقل در این مورد خاص پتانسیل‌ها نسبت به هم مزیتی ندارند.

- [9] C.A. Bertulani, RADCAP: A potential model tool for direct capture reactions, *Computer Physics Communications* **156** (2003) 123-141. [https://doi.org/10.1016/S0010-4655\(03\)00441-7](https://doi.org/10.1016/S0010-4655(03)00441-7)
- [10] A. Bohr, B. Mottelson, *Nuclear Structure I*, Benjamin, New York (1969). <https://www.worldscientific.com/worldscibooks/10.1142/3530#t=oc>
- [11] A.R. Edmonds, *Angular Momentum in Quantum Mechanics*, Princeton University Press, Princeton (1960). <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/9781400884186/html>
- [12] R.D. Lawson, *Theory of the Nuclear Shell Model*, Clarendon Press, Oxford, 1980. https://openlibrary.org/books/OL4425037M/Theory_of_the_nuclear_shell_model
- [13] D.R. Tilley, C.M. Cheves, J.L. Godwin, G.M. Hale, H.M. Hofmann, J.H. Kelley, C.G. Sheu, H.R. Weller, Energy levels of light nuclei $A = 5, 6, 7$, *Nuclear Physics A* **708** (2002) 3-163. [https://doi.org/10.1016/S0375-9474\(02\)00597-3](https://doi.org/10.1016/S0375-9474(02)00597-3)
- (1987) 1-96. [https://doi.org/10.1016/0092-640X\(87\)90016-7](https://doi.org/10.1016/0092-640X(87)90016-7)
- [5] S. Raman, C.W. Nestor, P. Tikkanen, Transition probability from the ground to the first-excited 2^+ state of even-even nuclides, *Atomic Data and Nuclear Data Tables* **78** (2001) 1-128. <https://doi.org/10.1006/adnd.2001.0858>
- [6] B.N. Edae, A.K. Chaubey, calculation of reduced transition probabilities $b(e2)$ for rotational excited ground band states even-even nuclei in lanthanide and actinide series, *International Journal of Scientific Research* **6** (2017) 561-565. <https://doi.org/10.36106/ijsr>
- [7] B. Pritychenko, M. Birch, B. Singh, M. Horoi, Tables of E2 transition probabilities from the first 2^+ states in even-even nuclei, *Atomic Data and Nuclear Data Tables* **107** (2016) 1-139. <https://doi.org/10.1016/j.adt.2015.10.001>
- [8] A. Moghadasi, H. Sadeghi, R. Pourimani, Calculation of Reaction rate and astrophysical S-Factor for $^{16}\text{O}(p,\gamma)^{17}\text{F}$ Reaction, *Journal Of Research On Many Body Systems* **8** (2017) 157-165. <https://doi.org/10.22055/JRMBS.2018.13896>