

محاسبه‌ی انرژی تحریکی جفت نوکلئون در هسته‌ی ^{240}Pu

سلیمان معروفی^{۱۱}، کارشناس ارشد فیزیک هسته‌ای، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مهاباد

عزیز بهکامی^{۱۲}، دکتری فیزیک هسته‌ای و عضو هیئت علمی دانشگاه شیراز و علوم تحقیقات فارس

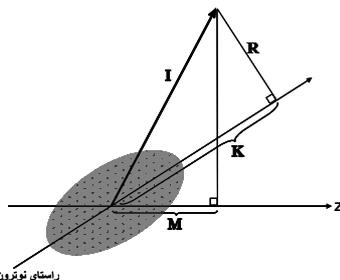
چکیده

در این مقاله مطالعه‌ی توزیع زاویه‌ای پاره‌های شکافت حاصل از بمباران ^{239}Pu با نوترون در انرژی‌های متعدد کمتر از $1,4 \text{ MeV}$ به روش نظری محاسبه شده و با مقادیر تجربی مقایسه گردیده است. مقادیر K^2 با استفاده از نظریه‌ی مدل آماری حالت انتقال (TSM) در پدیده‌ی شکافت هسته‌ای در انرژی‌های بمباران متعدد محاسبه شده است و تغییرات واریانس نظری K^2 بر حسب انرژی نوترون تابشی رسم شده است. افزایش سریع K^2 در انرژی‌های بیشتر از $0,6 \text{ MeV}$ می‌تواند حالت جفت نوکلئون ایجاد شده در نتیجه‌ی تشکیل دو-شبه‌ذره^{۱۳} در یک هسته‌ی سنگین را توجیه کند. مقدار انرژی تحریک در هسته‌ی مرکب ^{240}Pu به ازای انرژی‌های نوترون فرودی 1 MeV دارای انرژی بستگی نوترون $7,47 \text{ MeV}$ و انرژی تحریکی $2,57 \text{ MeV}$ است. این مقدار انرژی تحریکی محاسبه شده یعنی $2,57 \text{ MeV}$ همان انرژی تحریکی جفت نوکلئون در هسته‌ی مرکب ^{240}Pu می‌باشد.

کلیدواژه: توزیع زاویه‌ای، پاره‌های شکافت، انرژی تحریکی، TSM

مقدمه

پدیده‌ی شکافت هسته‌ای که سالیان دراز از کشف آن توسط هانس^{۱۴} و استراسمن^{۱۵} می‌گذرد، مطالعات و پژوهش‌های گسترده و متنوعی را به خود دیده است. بیشتر این پژوهش‌ها به دلیل بررسی حالت انتقال از دیدگاه مکانیک کوانتومی حائز اهمیت هستند. بردار I اندازه حرکت زاویه‌ای کل را تعیین می‌کند. مقدار M مؤلفه‌ی اندازه حرکت زاویه‌ای کل در روی محور Z ثابت شده در فضا است. این امتداد به‌عنوان امتداد پرتو فرودی تعیین می‌شود. مقدار K مؤلفه‌ی اندازه حرکت زاویه‌ای کل در امتداد محور تقارن هسته است. اندازه حرکت زاویه‌ای چرخشی R بر محور تقارن هسته عمود است، بنابراین K بطور کلی یک ویژگی



شکل (۱): شماتیک جفت‌شدگی اندازه حرکت زاویه‌ای هسته‌ی تغییر شکل یافته

از حرکت ذاتی است. زاویه‌ی θ نشان دهنده‌ی زاویه‌ی بین محور تقارن هسته و محور Z ثابت شده در فضا است بستگی بین I ، M و K بطور شماتیک در شکل (۱) نشان داده شده است. در مدل آماری حالت انتقال توزیع زاویه‌ای پاره‌های

¹¹ -smahrofi@yahoo.com

¹² -behkami@susc.ac.ir

¹³ -Two-quasiparticle

¹⁴ - Hahns

¹⁵ - Strassman

شکافت به طور ساده با استفاده از مجذور تابع موج چرخشی در رابطه‌ی (۱) داده شده است. و تابع $d_{M,K}^I(\theta)$ بوسیله‌ی رابطه‌ی (۲) تعریف می‌شود [۶].

$$W(\theta) \propto |d_{M,K}^I(\theta)|^2 \quad (۱)$$

$$d_{M,K}^I(\theta) = [(I+M)!(I-M)!(I+K)!(I-K)!]^{1/2} \times (-1)^x [Sin(\frac{\theta}{2})]^{K-M+2x} [Cos(\frac{\theta}{2})]^{2I-K+M-2x} \times \sum_x \frac{1}{(I-K-x)!(I+M-x)!(x+K-M)!x!}$$

در اینجا جمع روی x است و تا وقتی که هیچ یک از مقادیر داخل پرانتزها منفی نشود، در اعداد صحیح ادامه می‌یابد. توزیع زاویه‌ای $W_{M,K}^I(\theta)$ با در نظر گرفتن احتمال گسیل پاره‌های شکافت تحت زاویه‌ی θ از رابطه‌ی (۳) بدست می‌آید [۶].

$$W_{M,K}^I(\theta) = \left[\frac{2I+1}{2} \right] |d_{M,K}^I(\theta)|^2 \quad (۳)$$

در مجموع وقتی اندازه حرکت زاویه‌ای بسیار وابسته به اسپین‌های هسته‌ی هدف و پرتابه هستند، تصویر اندازه حرکت زاویه‌ای روی محور ثابت فضایی Z (امتداد پرتو فرودی) نسبت به I اندازه حرکت زاویه‌ای کل خیلی کوچکتر هستند [۳]. در این حد وقتی اسپین‌های هسته‌ی هدف و پرتابه صفر هستند و هیچ ذره‌ای قبل از رخ دادن شکافت از هسته‌ی هدف اولیه گسیل نمی‌شود (به عبارت دیگر $M=0$)، توزیع زاویه‌ای برای یک I ویژه با فرض یک توزیع K -گوسی به شکل معادله‌ی (۴) است [۱].

$$W(\theta) \propto \sum_{K=-I}^I \frac{(2I+1) |d_{M=0,K}^I(\theta)|^2 \exp(-K^2/2K_0^2)}{\sum_{K=-I}^I \exp(-K^2/2K_0^2)} \quad (۴)$$

بنابراین وقتی مقادیر متعدد I از هسته‌های مرکب شرکت می‌کنند و ضرایب انتقال T_I معلوم هستند، توزیع زاویه‌ای کل برای $M=0$ مانند رابطه‌ی (۵) می‌باشد.

$$W(\theta) \propto \sum_{I=0}^{\infty} (2I+1) T_I \sum_{K=-I}^I \frac{(2I+1) |d_{M=0,K}^I(\theta)|^2 \exp(-K^2/2K_0^2)}{\sum_{K=-I}^I \exp(-K^2/2K_0^2)} \quad (۵)$$

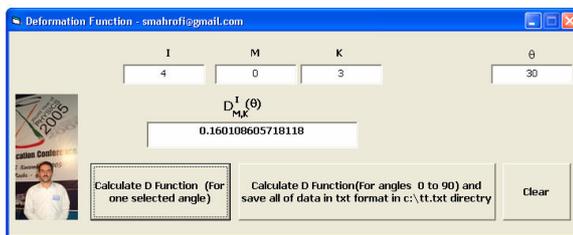
در اینجا ضرایب انتقال به صورت T_I نوشته شده‌اند. این ضرایب به کمک مدل اپتیکی توسط گروه‌های تخصصی محاسبه و در اختیار پژوهشگران قرار می‌گیرد. در این مقاله از ضرایب انتقال نوترون (پیری - بک) برای $A = 240$ استفاده شده است.

روش کار

برای انجام محاسبات مربوط به تابع موج تغییر شکل هسته، $d_{M,K}^I(\theta)$ ، بایستی شرط‌های رابطه‌ی (۶) بین مقادیر I, M, K, x برقرار باشند:

$$\Rightarrow \begin{cases} I - K - x \geq 0 & \Rightarrow x \leq I - K \\ I + M - x \geq 0 & \Rightarrow x \leq I + M \\ x + K - M \geq 0 & \Rightarrow x \geq M - K \\ x \geq 0 & \Rightarrow x \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

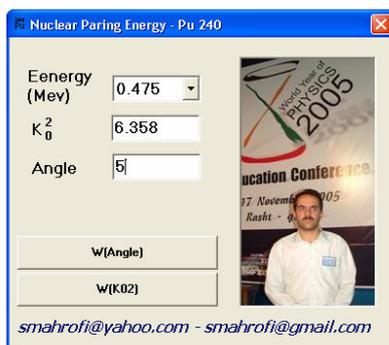
بنابراین محدوده‌ی تغییرات x از $MIN(I - K, I + M)$ (کران بالا) تا $MAX(x, M - K)$ (کران پایین) می‌باشد. با برنامه نویسی در زبان Microsoft Visual Basic 6.0 با تعریف توابع فاکتوریل،



شکل (۲): نرم افزار طراحی شده جهت محاسبه مقادیر

$$d_{M,K}^I(\theta)$$

بعنوان شرایط مرزی مساله در محاسبات نظری استفاده شود. این دو شامل توزیع زاویه‌ای پاره‌های شکافت در کمترین زاویه‌ی قابل آشکارسازی یعنی حدود $3 / 7^\circ$ و در بیشترین زاویه‌ی قابل آشکارسازی یعنی



شکل (۳): نرم افزار طراحی شده جهت محاسبه مقادیر ناهمسانگردی زاویه‌ای

مینیموم $MIN(a, b)$ و ماکزیمم $MAX(a, b)$ و ایجاد حلقه بر حسب مقادیر x می‌توان مقادیر $d_{M,K}^I(\theta)$ را با دقت زیاد حساب کرد. جهت محاسبه‌ی مقادیر نظری K^2 لازم است از دو مقدار توزیع زاویه‌ای پاره‌های شکافت تجربی

90° می‌باشند. در اینجا از داده‌های تجربی آزمایشگاه ملی آرگون^{۱۶} آمریکا که توسط جان هایزنگا و عزیز بهکامی اندازه‌گیری شده‌اند، استفاده شده است [۵]. نسبت

$$\frac{W_{M,K}^I(3,7^\circ, E_n, K^2)}{W_{M,K}^I(90^\circ, E_n, K^2)}$$

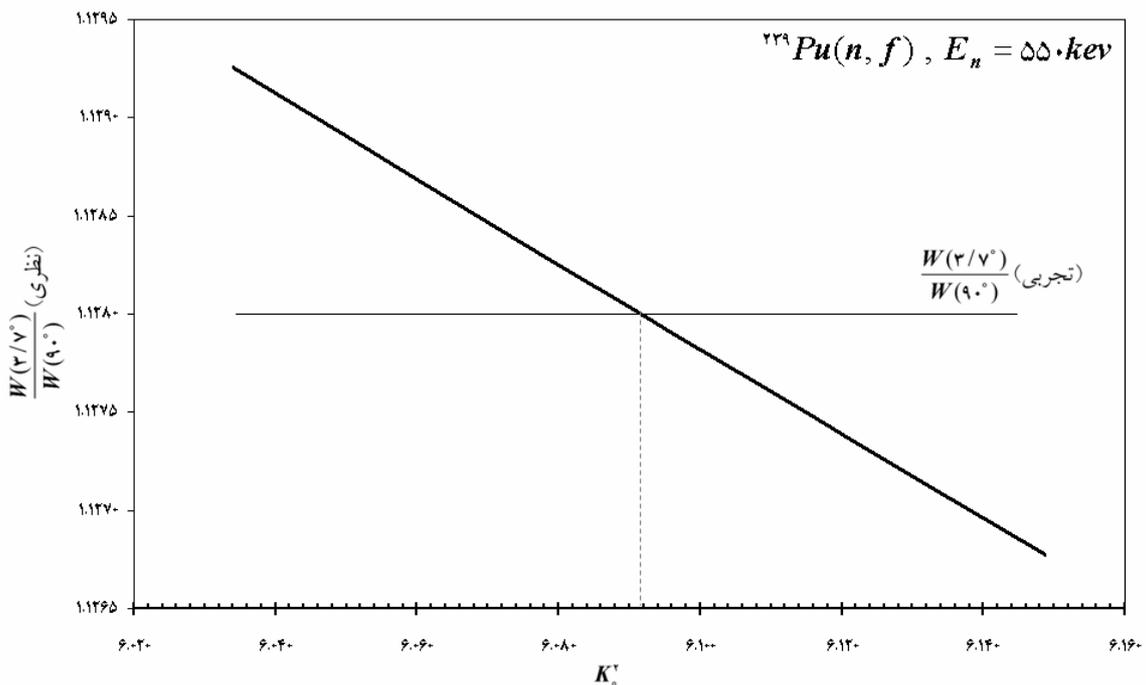
بعنوان ناهمسانگردی زاویه‌ای پاره‌های شکافت، برحسب K^2 برای هر انرژی را باید آن قدر تغییر داد تا نسبت محاسبه شده‌ی نظری با مقدار مشابه تجربی یکدیگر را قطع کنند. شکل (۳) نرم افزار طراحی شده جهت انجام این محاسبات را نشان می‌دهد.

نتایج

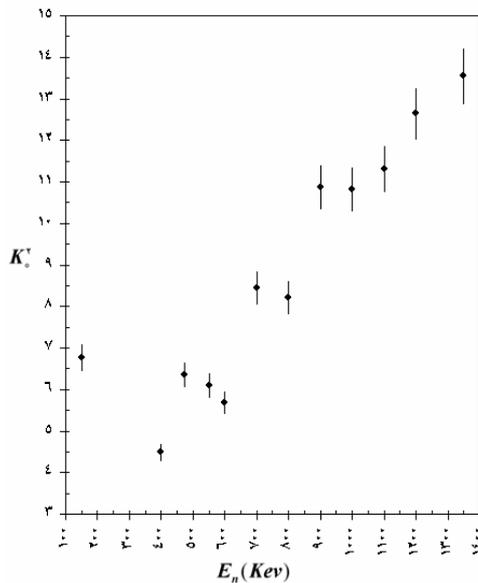
در جدول (۱) تغییرات ناهمسانگردی زاویه‌ای بر حسب K^2 برای $E_n = 550KeV$ محاسبه شده بعنوان نمونه آورده شده است. در شکل (۴) نمودار تغییرات ناهمسانگردی زاویه‌ای نظری و تجربی بر حسب K^2 برای این انرژی رسم شده است. در این انرژی $K^2 = 6/091$ است.

جدول (۱): تغییرات ناهمسانگردی زاویه‌ای بر حسب K^2 برای $E_n = 550KeV$

K^2	$W(3/7^\circ)$	$W(90)$	$\frac{W(3/7^\circ)}{W(90)}$ (نظری)	$\frac{W(3/7^\circ)}{W(90)}$ (تجربی)
6/07	3/8773	3/4359	1/1285	1/1280
6/08	3/8768	3/4362	1/1282	1/1280
6/09	3/8763	3/4364	1/1280	1/1280
6/10	3/8759	3/4366	1/1278	1/1280
6/11	3/8754	3/4368	1/1276	1/1280



شکل (۴) نمودار تغییرات ناهمسانگردی زاویه‌ای نظری و تجربی بر حسب K^2 برای $E_n = 550KeV$



شکل (۵): تغییرات K_0^2 بر حسب انرژی نوترون فرودی

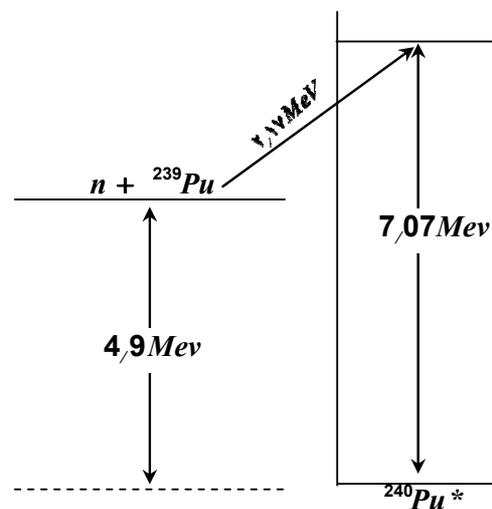
اگر در سایر انرژی‌ها (۱۵۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۴۷۵، ۷۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۹۰۰، ۱۰۰۰، ۱۱۰۰، ۱۲۰۰ و 1350 KeV) محاسبات فوق را تکرار و مقادیر K_0^2 را بر حسب انرژی نوترون فرودی رسم شود، نمودار شکل (۵) بدست می‌آید. مقادیر K_0^2 از مرتبه‌ی ۵ تا ۶ برای انرژی‌های نوترون تا 600 KeV هستند. افزایش سریع K_0^2 در انرژی‌های بیشتر از 600 KeV بدین منظور تفسیر می‌شوند که حالت جفت نوکلئون ایجاد شده در نتیجه‌ی تشکیل حالت‌های دو-شبه‌ذره در یک هسته‌ی سنگین است.

بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به مقادیر انرژی نوترون‌های فرودی و انرژی

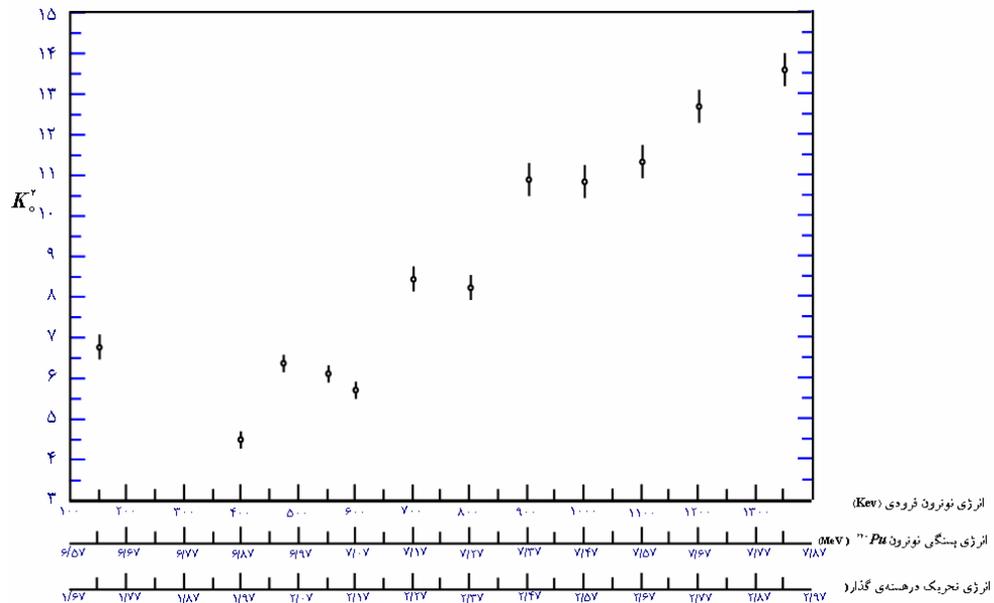
آستانه‌ی شکافت ^{240}Pu مقادیر انرژی بستگی نوترون را برای مقایسه با این انرژی‌ها محاسبه می‌شود. برای این منظور انرژی آستانه‌ی شکافت ^{240}Pu برابر $4,9 \text{ MeV}$ است [2] و انرژی بستگی نوترون به ازای انرژی نوترون فرودی 600 KeV برابر $7,07 \text{ MeV}$ است [۴]. انرژی تحریک در هسته‌ی گذار برابر است با $7,07 - 4,9 = 2,17 \text{ MeV}$ است.

با توجه به شکل (7) مشاهده می‌شود که مقدار انرژی تحریک در هسته‌ی ^{240}Pu به ازای انرژی‌های نوترون فرودی 1000 KeV و انرژی بستگی نوترون $7,47 \text{ MeV}$ برابر $2,57 \text{ MeV}$ است. این افزایش سریع K_0^2 در محدوده‌ی انرژی نوترون فرودی بین 600 KeV و 1000 KeV منجر به تشکیل جفت نوکلئون در هسته‌ی مرکب ^{240}Pu می‌شود. به ازای انرژی‌های بیشتر از 1000 KeV مقادیر K_0^2 تقریباً ثابت می‌شوند. این نشان می‌دهد که مقدار انرژی تحریکی محاسبه شده



شکل (۶) تشکیل هسته‌ی مرکب ^{240}Pu تحت نوترون فرودی با انرژی 600 KeV نشان می‌دهد.

یعنی $2,57\text{MeV}$ همان انرژی تحریکی جفت نوکلئون در هسته‌ی مرکب ^{240}Pu می‌باشد.



شکل (۷): تغییرات K_0^2 برحسب انرژی نوترون فرودی (KeV) و انرژی بستگی نوترون و انرژی تحریکی ^{240}Pu در (MeV)

مراجع

- [10]. A.N., Behkami, Z. Kargar, M. N. Nasrabadi and N.Azizi, Study of Anisotropies in neutron-induced fission of ^{240}Pu , Nuclear Science Journal, Vol.37, No.5, pp.307, October 2000
- [11]. E. H. Auerbach and F. G. J. Perey, Brookhaven National Laboratory Report No. BNL-765, 1962
- [12]. El-hajja, R., A Simultaneous Measurement of the angular distribution, University of New South Wales, PhD Thesis, (2000)
- [13]. J. H. E. Mattauch, W. Thiele, and A. H. Wapstra, Nucl. Phys. 67, 1 (1965)
- [14]. J.R. Huizenga, A.N. Behkmi, Nuclear Pairing Energy of Transition Nucleus ^{240}Pu , Phys. Rev., Vol.174, No.4, (1968)
- [15]. Vandenbosch, R. and Huizenga, J.R., Nuclear Fission, Academic Press, New York, (1973)