کمیت های ترمودینامیکی هسته های فوق سنگین $^{278}112$ و $^{290}116$

پهلوانی،محمدرضا* (۱)– معصومی دینان،مانا(۲)
دانشگاه مازندران، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک هسته ای

چکیده:
پارامتر چگالی تراز تک ذره ای برای دو هسته فوق سنگین $^{278}112$ و $^{290}116$ محاسبه شده است. در این محاسبات از روش نیمه کلاسیکی و پتانسیل وودز-ساکسون استفاده شده است. خواص گرمایی این هسته های فوق سنگین مانند آنتروپی، دمای هسته ای و ظرفیت گرمایی در چارچوب آنسامبل میکروکانونی محاسبه شده است. همچنین تغییرات این کمیتها بر حسب انرژی برانگیختگی رسم شده است. در محاسبه کمیت های ترمودینامیکی از فرمول جابجایی گاز فرمی با یک پارامتر تطبیق پذیر استفاده شده است. فرایند شکستن جفت های کوپر و سرمایش هسته برای این هسته ها از نتایج ارایه شده قابل مشاهده شده است. نتایج حاصل در کل با داده های آزمایشگاهی تطبیق قابل قبولی دارند.
کلمات کلیدی: *چگالی تراز، آنتروپی، دما، ظرفیت گرمایی*

Thermodynamic quantities of superheavy nuclei, $^{278}112$ & $^{290}116$

Pahlavani, Mohammad Reza* [1]; Masoumi Dinan, Mana[2]
University of Mazandaran , Faculty of basic science, Department of Nuclear Physics

Abstract
The single-particle level-density parameter is calculated for the two superheavy nuclei of $^{278}112$ and $^{290}116$. In these calculations, the semi-classical method and the Woods-Saxon potential have been used. The thermal properties of these superheavy nuclei, such as entropy, nuclear temperature, and heat capacity, are calculated in the microcanonical ensemble framework. Also, variation in these quantities are plotted in terms of excitation energy. In calculating of the thermodynamic quantities, the back-shifted Fermi gas formula is used with an adjustable parameter. The presented results show the cooper pairs breaking process and cooling of the nucleus for these nuclei. In general, the results are consistent with experimental data.
Keywords: *Level density, Entropy, Temperature, Heat capacity*

مقدمه :

چگالی تراز هسته ای کمیتی بنیادین در فیزیک هسته ای است که کاربردهای وسیعی در آنالیز آماری ساختار هسته ای و واکنش های هسته ای دارد. روش های متنوعی برای محاسبه ی مستقیم و غیر مستقیم چگالی تراز هسته معرفی شده اند

ازجمله: مدل گاز فرمی(FG) [۱]، مدل جابجایی گاز فرمی(BSFG) [۲] ، مدل دما ثابت [۳] و مدل مونت کارلوی لایه ای(SMMC) [۴،۵]. مدل BSFG، مدل رایجی است که در آن رابطه چگالی تراز هسته ای را بطور مستقیم می توان نوشت. این مدل شامل دو پارامتر است: پارامتر جابجایی انرژی برانگیختگیE_1 و پارامتر چگالی تراز تک ذره ای a. برای پارامتر چگالی تراز تک ذره ای رابطه ای وابسته به چگالی تراز تک ذره ای در انرژی فرمی معرفی شده است. بنابراین مدل BSFG به مدلی با تنها یک پارامتر تطبیق پذیر تبدیل می شود. چگالی تراز تک ذره ای نیز از طریق روش نیمه کلاسیکی [۶،۷] و با وارد کردن پتانسیل میدان متوسط [۸] قابل محاسبه است.

کمیت های ترمودینامیکی هسته یعنی آنتروپی، دمای هسته و ظرفیت گرمایی را با استفاده از چگالی تراز هسته می توان محاسبه نمود. خواص گرمایی بر اساس مقادیر تجربی چگالی تراز برای چند هسته محاسبه شده است[۱۱-۹] . اما به دلیل فقدان داده تجربی چگالی تراز هسته و انرژی جدایی نوترون هسته های فوق سنگین، خواص گرمایی که با استفاده از فرمول BSFG محاسبه می شود ممکن است بسیار قابل توجه باشد، زیرا با محاسبه چگالی تراز هسته با روش BSFG شکستن اولین جفت نوکلئونی قابل مشاهده است.

محاسبات نظری و تجزیه و تحلیل نتایج :

فرمول چگالی تراز هسته در مدل BSFG با یک پارامتر تطبیق پذیر به صورت زیر بیان می شود

$$\rho(U) = \frac{1}{12\sqrt{2}\sigma}\frac{e^{2\sqrt{aU}}}{a^{1/4}U^{5/4}} \qquad (۱)$$

$$U = E - E_1 - E_{pair} \qquad (۲)$$

$$\sigma^2 = 0.0888A^{2/3}\sqrt{aU} \qquad (۳)$$

که a، σ، U، E، E_1 و E_{pair} بترتیب پارامتر چگالی تراز، پارامتر قطع اسپین، انرژی برانگیختگی موثر، انرژی برانگیختگی، پارامتر جابجایی انرژی و انرژی زوجیت هسته ها هستند. انرژی زوجیت با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود

$$E_{pair} = \begin{cases} \frac{12}{\sqrt{A}} & \text{زوج} - \text{زوج} \\ 0 & \text{فرد} - A \\ -\frac{12}{\sqrt{A}} & \text{فرد} - \text{فرد} \end{cases} \qquad (۴)$$

پارامتر چگالی تراز به صورت

$$a = \frac{\pi^2}{6} g \quad (۵)$$

که

$$g = g_n(\varepsilon_F^n) + g_p(\varepsilon_F^p) \quad (۶)$$

تعریف می شود. در این رابطه، $g_n(\varepsilon_F^n)$ و $g_p(\varepsilon_F^p)$ بترتیب چگالی تراز تک ذره ای نوترونی و پروتونی در انرژی فرمی نوترون و پروتون اند.

چگالی تراز تک ذره ای با استفاده از روش نیمه کلاسیکی و با استفاده از رابطه

$$g = \frac{2}{\pi}\left(\frac{2m}{\hbar^2}\right)^{\frac{3}{2}} \int dr\, r^2 \sqrt{\varepsilon - V(r)}\,\theta\big(\varepsilon - V(r)\big) \quad (۷)$$

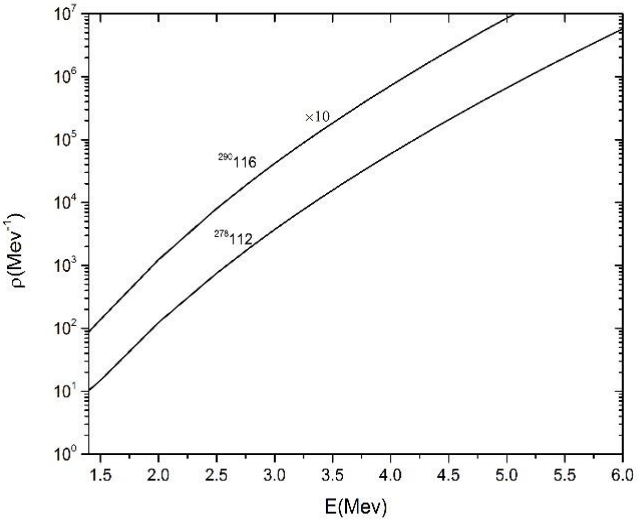
محاسبه می شود. در رابطه بالا، m جرم تک ذره ای و $\theta(x)$ تابع پله و $V(r)$ پتانسیل هسته ای اند که در اینجا ما از پتانسیل هسته ای وودز–ساکسون استفاده کرده ایم. همچنین برای پروتون ها پتانسیل کولمبی نیز در نظر گرفته شده است. با استفاده از داده های موجود دروبسایت NRV [۱۲] برای انرژی فرمی نوترون و پروتون و حل معادله ۷ بصورت عددی چگالی تراز تک ذره ای برای هسته های ^{278}۱۱۲و^{290}۱۱۶ محاسبه شده است. بعلت فقدان چگالی تراز تجربی، تنها پارامتر تطبیق پذیر رابطه چگالی تراز یعنی پارامتر جابجایی انرژی برانگیختگی طوری تعیین شده است که نتایج منطقی برای خواص گرمایی هر هسته بدست آید وشکستن اولین جفت نوکلئونی در انرژی $2\Delta(\Delta = \frac{12}{\sqrt{A}})$ قابل مشاهده باشد.

چگالی تراز تک ذره ای و پارامترهای چگالی تراز هسته ای هسته های^{278}۱۱۲ و^{290}۱۱۶ در جدول ۱ لیست شده است. ستون های اول و دوم بترتیب چگالی های تراز تک ذره ای نوترونی و پروتونی را نشان می دهند. پارامتر چگالی تراز تک ذره ای و پارامتر جابجایی انرژی برانگیختگی بترتیب در ستون های سوم و چهارم قرار گرفته اند.

تغییر چگالی تراز با انرژی برانگیختگی برای هسته های ^{278}۱۱۲و^{290}۱۱۶ در شکل ۱ ارائه شده است. همان طور که انتظار داشتیم چگالی تراز هسته های سنگینتر قدری بیشتر از هسته های سبک است.

جدول شماره (۱) مقادیر چگالی تراز تک ذره ای در انرژی فرمی و پارامترهای چگالی تراز هسته ای a و E_1

هسته ها	$g_n(\varepsilon_F^n)$	$g_p(\varepsilon_F^p)$	$a(MeV^{-1})$	$\mathrm{E}_1(MeV)$
^{278}112	9.64	6.99	27.38	0.41
^{290}116	10.01	7.22	28.36	0.46

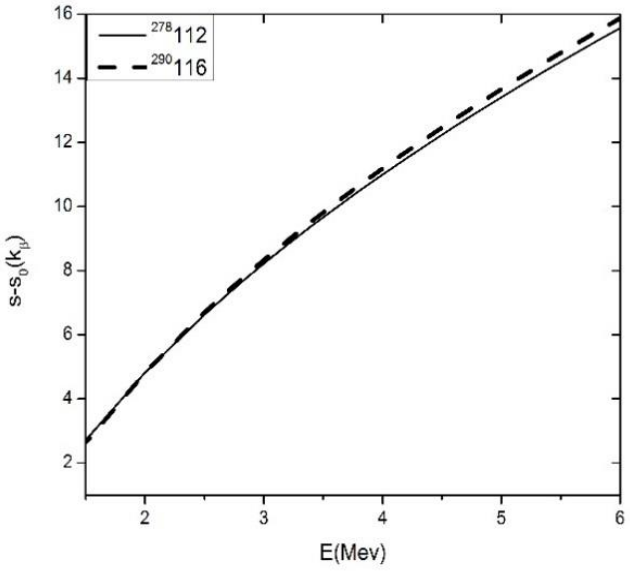


شکل شماره(۱) تغییر چگالی تراز با انرژی برانگیختگی برای^{۲۷۸}۱۱۲و^{۲۹۰}۱۱۶

محاسبه چگالی تراز هسته بصورت تابعی از انرژی این امر را میسر می کند که کمیت های ترمودینامیکی سیستم مانند آنتروپی، دما و ظرفیت گرمایی را محاسبه کنیم. هسته اتم منزوی یک سیستم بسیار مناسب برای تئوری آنسامبل میکروکانونی است زیرا انرژی برانگیختگی آن تیز و تعداد ذرات آن ثابت است. آنتروپی در آنسامبل میکروکانونی به صورت زیر بیان می شود

$$S(E) = k_B \ln \rho(E) + S_0 \qquad (۸)$$

که S_0 یک ثابت نرمالیزاسیون است و به گونه ای تعیین می شود تا شرط سوم قانون ترمودینامیک برقرار باشد.



شکل شماره(۲) تغییر آنتروپی هسته های ۱۱۲^{۲۷۸}و۱۱۶^{۲۹۰}با انرژی برانگیختگی

ثابت بولتزمن(k_B) را برای سادگی برابر با یک در نظر می گیریم. دمای هسته ای بصورت زیر تعریف می شود

$$T = \left(\frac{\partial S}{\partial E}\right)_V^{-1} \quad (۹)$$

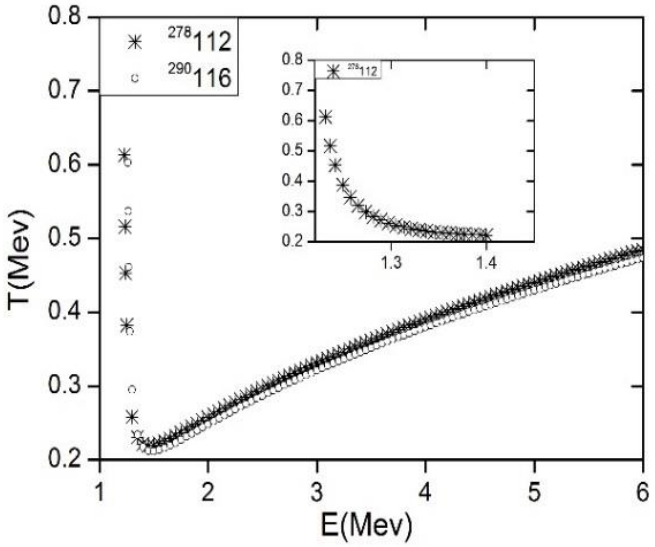
به طور مشابه ظرفیت گرمایی را می توان با استفاده از مشتق دما به صورت زیر محاسبه نمود

$$C_V = \left(\frac{\partial T}{\partial E}\right)_V^{-1} \quad (۱۰)$$

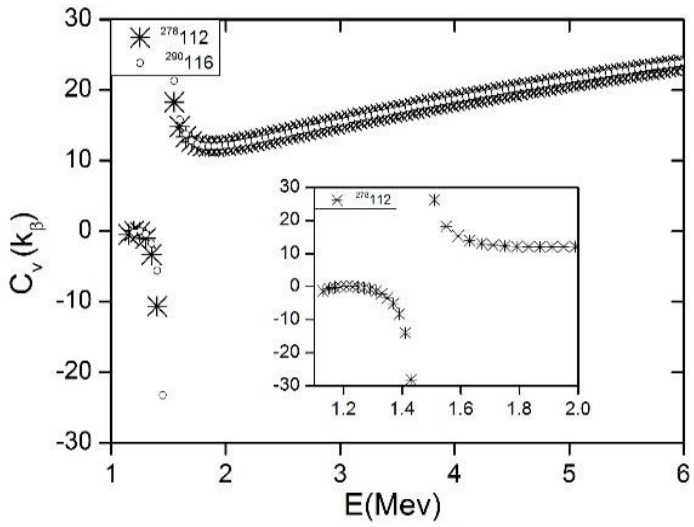
شکل ۲ تغییرات آنتروپی هسته های۱۱۲^{۲۷۸}و۱۱۶^{۲۹۰} را برحسب انرژی برانگیختگی نشان می دهد. با افزایش انرژی برانگیختگی آنتروپی هسته ها افزایش می یابد اما شیب افزایش آنتروپی در انرژی پایین حولMev ۲ بیشتر است. تغییرات دمای هسته ای و ظرفیت گرمایی برای این هسته ها در شکل های ۳ و ۴ رسم شده است.

همان طور که در شکل ۳ دیده می شود دمای هسته در انرژی های بینMev ۱/۲ تا Mev ۱/۴ به طور ناگهانی کاهش می یابد که متناظر است با سرد شدن هسته از دمای Mev ۰/۶ تا Mev ۰/۲. این پدیده را به عنوان شکستن اولین جفت نوکلئونی می توان تعبیر کرد. برای ظرفیت گرمایی در شکل ۴ نتایج مشابهی بدست آمده است. همین طور مقادیر منفی برای این کمیت بدست آمده است که آن را بعنوان نشانه ای از شکستن اولین جفت نوکلئونی می توان در نظر گرفت. با

استفاده از رابطه پارامتر زوجیت برای نوترون ها و پروتون ها $\Delta\sim 12/\sqrt{A}$، نتیجه بدست آمده برای شکستن اولین جفت نوکلئونی یعنی $E\sim 2\Delta=$ ۱/۴ منطقی به نظر می رسد.



شکل شماره(۳) تغییردمای هسته های ^{۲۷۸}۱۱۲ و ^{۲۹۰}۱۱۶ بر حسب انرژی برانگیختگی



شکل شماره(۴) تغییر ظرفیت گرمایی هسته های $^{278}112$و$^{290}116$با انرژی برانگیختگی

نتایج :

به منظور محاسبه کمیت های گرمایی هسته مانند آنتروپی، دما و ظرفیت گرمایی به طور مستقیم از چگالی تراز هسته می توان استفاده کرد. مقادیر تجربی چگالی تراز هسته اطلاعات منحصر بفردی در زمینه خواص گرمایی هسته ها ارائه می دهد، اما رابطه تئوری مدل BSFGبا یک پارامتر تطبیق پذیر نیزبه نتائج خوبی در ناحیه انرژی برانگیختگی پایین منجر می شود. در این تحقیق تئوری چگالی تراز تک ذره ای دو هسته فوق سنگین$^{278}112$و$^{290}116$با در نظر گرفتن پتانسیل وودز-ساکسون و پتانسیل کولمبی در چارچوب روش نیمه کلاسیکی محاسبه شده است. برای محاسبه پارامتر چگالی تراز تک ذره ای در مدل BSFG، چگالی تراز تک ذره ای در انرژی فرمی برای این هسته ها محاسبه شده است و پارامتر جابجایی انرژی نیز برای این هسته های فوق سنگین تعیین شده است. با استفاده از فرمول مدل BSFG برای چگالی تراز هسته های $^{278}112$و$^{290}116$، آنتروپی، دمای هسته و ظرفیت گرمایی برای این هسته ها محاسبه شده است و در نواحی انرژی برانگیختگی پایین مورد مطالعه قرار گرفته است. در اثر افزایش غیر عادی آنتروپی حول $E\sim2\Delta$، کاهش در

دمای هسته و مقادیر منفی ظرفیت گرمایی مشاهده می شوند که شکستن اولین جفت نوکلئونی را در این هسته ها نشان می دهند، بنابراین مقادیر پارامتر جابجایی انرژی تعیین شده منطقی به نظر می رسد.

مراجع:

1. A. Bohr and B. R. Mottelson, Nuclear Structure, (World Scientific, 1998) Vol. 1.
2. A. J. Koning, S. Hilaire and S. Goriely, Global and local level density models, Nucl. Phys. A810, 13 (2008).
3. A. Gilbert and A. G. W. Cameron, A composite nuclear level density formula with shell corrections, Can. J. Phys. 43, 1446 (1965).
4. S.E. Koonin, D.J. Dean and K. Langanke, shell model Monte Carlo methods**,** Phys. Rep. 278, 1 (1997).
5. Y. Alhassid, G. F. Bertsch and L. Fang, Nuclear level statistics: Extending shell model theory to higher temperatures, Phys. Rev. C 68, 044322 (2003).
6. S. Shlomo, Energy level density of nuclei, Nucl. Phys. A539, 17 (1992).
7. A. Bhagwat et al., Microscopic-macroscopic approach for binding energies with the Wigner-Kirkwood method, Phys. Rev. C 81, 044321 (2010).
8. J. Suhonen, From Nucleons to Nucleus (Springer-Verlag, 2007).
9. H. T. Nyhus et al., Level density and thermodynamic properties of dysprosium isotopes, Phys. Rev. C 85, 014323 (2012).
10. E. Melby, et al., Thermal and electromagnetic properties of ^{166}Er and ^{167}Er, Phys. Rev. C 63, 044309 (2001).
11. M. Guttormsen et al., Constant-temperature level densities in the quasicontinuum of Th and U isotopes, Phys. Rev. C 88, 024307 (2013).
12. V.I. Zagrebaev et al., NRV: Low Energy Nuclear Knowledge Base, http ://nrv.jinr.ru/nrv.