



محاسبه انرژی جنبشی کل پاره‌های شکافت نوترونی ایزوتوپهای اورانیوم

مهدی پور کلدیانی، پیام* (۱)

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نراق، دانشکده فنی، گروه علوم پایه

چکیده:

با کمک مدل آماری مقادیر انرژی جنبشی کل (TKE) پاره‌های شکافت نوترونی اورانیوم ۲۳۸ محاسبه شده‌اند. با مقایسه نتایج به دست آمده از محاسبات با نتایج تجربی، پارامترهای مورد نیاز برای محاسبات در مدل آماری را به دست آمده‌اند. انرژی جنبشی کل پاره‌های شکافت نوترونی دو ایزوتوپ ^{232}U و ^{235}U نیز با مقادیر تجربی مقایسه شده‌اند و پارامترهای مدل آماری برای این ایزوتوپها محاسبه شده‌اند. با کمک مقادیر پارامترهای به دست آمده از مقایسه مقادیر تجربی و تئوری، مقادیر انرژی جنبشی کل پاره‌های شکافت نوترونی بقیه ایزوتوپهای اورانیوم را به دست آورده شده‌اند.

کلمات کلیدی: انرژی جنبشی کل پاره‌های شکافت؛ مدل آماری؛ شکافت نوترونی؛ توزیع انرژی پاره‌های شکافت.

مقدمه:

از ابتدای کشف شکافت، اندازه‌گیری انرژی جنبشی پاره‌های شکافت به عنوان یکی از ویژگیهای شکافت مورد توجه بسیاری از محققان بوده است [۱-۵]. این نتایج نشان می‌دهند که توزیع انرژی جنبشی - جرمی یک منحنی ملایم است و دارای چند بی‌شینه‌های محلی می‌باشد. این بی‌شینه‌ها بستگی به زوج یا فرد بودن تعداد پروتون پاره شکافت دارد. بدین ترتیب ساختارهای ریز قابل توضیح می‌گردند [۶ و ۷].

مدل آماری مورد استفاده بر پایه این فرض است که دو پاره شکافت در فاصله معینی (d) از یکدیگر قرار دارند که تمام خواص واکنش را با کمک این سیستم دو هسته‌ای به دست می‌توان آورد. بر این روش، برخی نام سیستم دو هسته‌ای^۱ [۸ و ۹] نهادند و برخی دیگر نام مدل دو کره‌ای [۱۰] نهادند. از این مدل هم برای محاسبه انرژی پاره‌های شکافت و

^۱ dinuclear system

^۲ two spheroid model



هم برای رسم تابع توزیع جرمی استفاده شده است. همچنین تعداد نوترونهای تاخیری کل واکنش و تعداد نوترونهای هر پاره شکافت با این مدل محاسبه شده اند.

روش:

آندره [۱۱] رابطه ای ساده ای را به صورت زیر برای محاسبه انرژی جنبشی کل در مدل آماری ارائه کرده است:

$$TKE(A_i, \beta_i) = V_{coul}(A_L/A_H, \beta_i, R_i) + V_{nuc}(A_L/A_H, \beta_i, R_i) \quad (۱)$$

که A_L/A_H هسته های پاره های شکافت مکمل هستند و β_i پارامتر تغییر طول هر یک از هسته های حاصل از شکافت و R_i شعاع هر یک از هسته های شکافته شده است. در این معادله پتانسیل کولنی دو هسته شکافته شده که در فاصله معین از هم قرار دارند به صورت زیر به دست می آید.

$$V_{coul} = 1.44 \frac{Z_L Z_H}{D} \quad (۲)$$

که در این رابطه D فاصله مرکز دو هسته شکافته شده است و داریم:

$$D = d + R_L + R_H \quad (۴)$$

که d فاصله بین سطوح دو هسته شکافته شده است. انرژی پتانسیل هسته با رابطه تقریبی دو هسته مماسی به صورت زیر به دست می آید [۱۲ و ۱۳]:

$$V_{nuc} = V_{prox} = 4\pi\gamma b \left(\frac{c_1 c_2}{c_1 + c_2} \right) \Phi \left(\frac{d}{0.88} \right) \quad (۵)$$

که C_i شعاع مرکزی ساسی پاره های شکافت است و به صورت زیر تعریف می شود:

$$C_i = R_i - \frac{b^2}{R_i} \quad (۶)$$

شعاع هر هسته با رابطه نیمه تجربی [۱۴]

$$R_i(fm) = 1.28R_{0,i} + 0.8R_{0,i}^{-1} - 0.76 \quad (۷)$$

بیان می شود که $R_{0,i}$ شعاع تغییر شکل هسته به صورت زیر است:

$$R_{0,i}(\theta) = R_0 \sum (1 + \beta_i Y_{i0}(\theta)) \quad (۸)$$

Y_{i0} هماهنگهای کروی و θ زاویه محور تقارن و محور شکافت است و داریم: $R_0 = \sqrt[3]{A_i}$. گاما ضریب کشش سطحی است که به صورت زیر تعریف می شود [۱۵]

$$\gamma = 0.9517 \sqrt{(1 - 2.61I_1^2)(1 - 2.61I_2^2)} \quad MeV/fm^2 \quad (۹)$$

و می دانیم

$$I_i = \frac{N_i - Z_i}{A_i} \quad (۱۰)$$

^۳Süsmann central radii



N_i و A_i ، Z_i اعداد اتمی و جرمی و تعداد نوترون هر پاره شکافت هستند. در معادله (۵)، Φ تابع تقریبی جهانی^۴ است و به صورت زیر تعریف می شود [۱۶]:

$$\Phi(\varepsilon) = \begin{cases} -1.7817 + 0.9270\varepsilon + 0.0169\varepsilon^2 - 0.0514\varepsilon^2 & \text{for } 0 \leq \varepsilon \leq 1.9475 \\ -4.41e^{-\varepsilon/0.7176} & \text{for } 1.9475 \leq \varepsilon \end{cases} \quad (11)$$

عدد اتمی پاره های شکافت نیز با کمک رابطه معروف توزیع چگالی غیر قابل تغییر^۵ می تواند به صورت زیر به دست آید [۱۷ و ۱۸]:

$$Z_{UCD} = \frac{Z_{cn}(A+v)}{A_{cn}} \quad (12)$$

که v تعداد نوترون قبل از زمان تکینگی^۶ است که با مقایسه با نتایج تجربی مقدار آن صفر در نظر گرفته شده است. A_{cn} و Z_{cn} عدد جرمی و عدد اتمی هسته مرکب هستند.

نتایج و بحث:

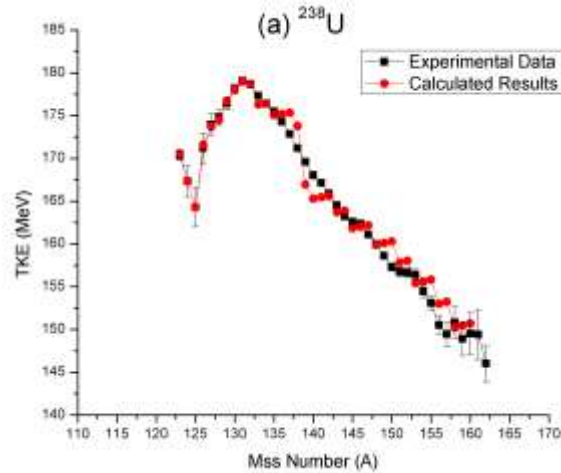
در شکل ۱، انرژی جنبشی کل پاره های شکافت نوترونی را به کمک مدل آماری ارائه شده در بخش قبل برای اورانیوم ۲۳۸ رسم شده است. برای رسم این شکل، پارامتر تغییر شکل هسته بر حسب عدد جرمی پاره های شکافت به صورت زیر تعریف شده است.

$$\beta_i = \begin{cases} 0.26 & \text{for } A_i < 139 \\ 0.3 & \text{for } A_i > 139 \end{cases} \quad (13)$$

^۴the universal proximity potential

^۵The unchanged chargedensity distribution

^۶Post-scission

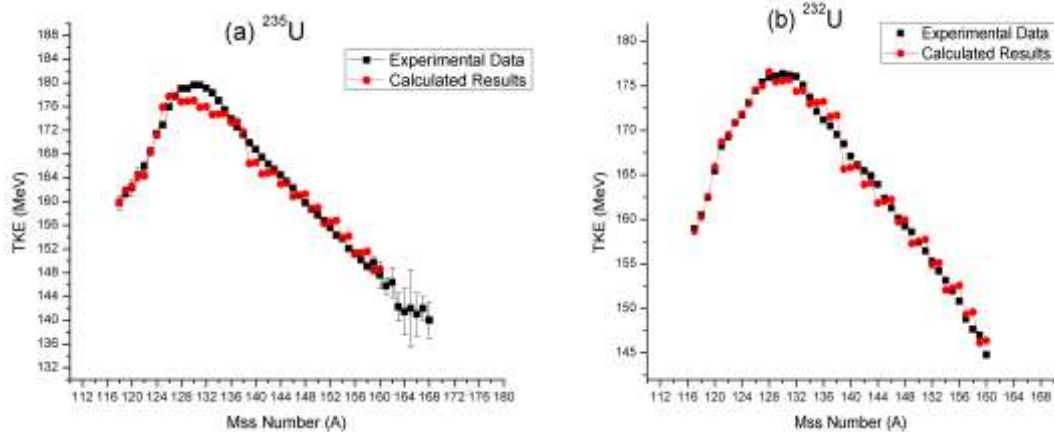


شکل شماره (۱) انرژی جنبشی کل پاره‌های شکافت نوترونی برای اورانیوم ۲۳۸ به همراه مقادیر تجربی [۱۹] ولی این مقادیر برای پاره‌های شکافت با اعداد جرمی کمتر از ۱۳۰ تطابق خوبی نداشتند بنابراین مانند مرجع [۹] مقادیر تغییر شکل هسته را برای تک تک پاره‌های شکافت به دست آیند. پس مقادیر پارامتر تغییر شکل هسته اورانیوم ۲۳۸ برای پاره‌های شکافت با عدد جرمی بزرگتر از ۱۳۰ در جدول ۱ آورده شده‌اند.

جدول شماره (۱): پارامتر تغییر شکل برای شکافت نوترونی اورانیوم ۲۳۸:

| 132 | 131 | 130 | 129 | 128 | 127 | 126 | 125 | 124 | 123 | A_1 |
|------|------|-------|------|-------|------|-----|------|-------|------|---------------------|
| 0.23 | 0.23 | 0.244 | 0.26 | 0.275 | 0.28 | 0.3 | 0.35 | 0.335 | 0.31 | $\beta_1 = \beta_2$ |

به کمک روش بیان شده در بخش قبل (رابطه ۱)، انرژی جنبشی کل پاره‌های شکافت نوترونی بر حسب پاره‌های شکافت، برای اورانیوم ۲۳۵ و ۲۳۲ محاسبه شده و همراه با مقادیر تجربی در شکل ۲ رسم گردیده‌اند.



شکل شماره (۲) انرژی جنبشی کل پاره های شکافت نوترونی برای (a) اورانیوم ۲۳۵ و (b) اورانیوم ۲۳۳ به همراه مقادیر تجربی آنها به ترتیب از مراجع [۲۰] و [۲۱].

مانند اورانیوم ۲۳۸، مقادیر تغییر شکل هسته ها برای پاره های شکافت با اعداد جرمی کمتر از ۱۲۷ جداگانه محاسبه شده اند و در جدول ۲ ارائه گردیده اند.

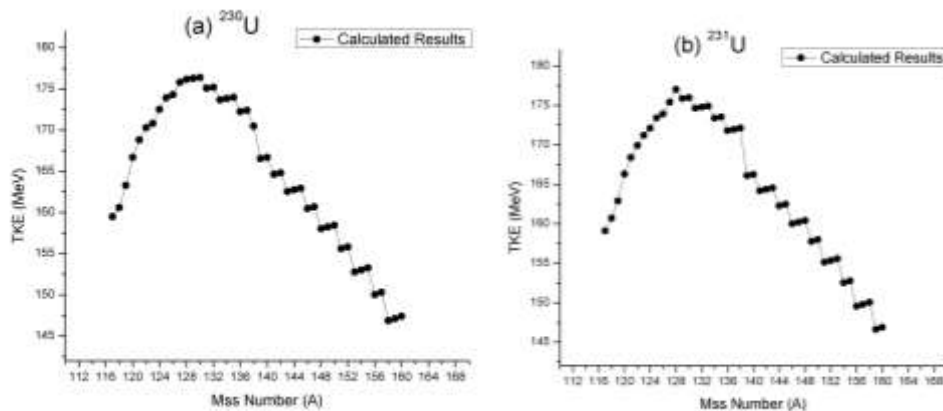
جدول شماره (۲): پارامتر تغییر شکل برای شکافت نوترونی اورانیوم ۲۳۵ و ۲۳۲:

| | | | | | | | | | | | |
|------|------|-----|-------|-------|-------|-------|------|------|-----|------|-----------------------------|
| 127 | 126 | 125 | 124 | 123 | 122 | 121 | 120 | 119 | 118 | 117 | A_1 |
| 0.26 | 0.27 | 0.3 | 0.31 | 0.33 | 0.365 | 0.365 | 0.38 | 0.38 | 0.4 | | $^{235}\text{U}\beta_{1,2}$ |
| 0.28 | 0.29 | 0.3 | 0.308 | 0.321 | 0.33 | 0.34 | 0.36 | 0.38 | 0.4 | 0.41 | $^{232}\text{U}\beta_{1,2}$ |

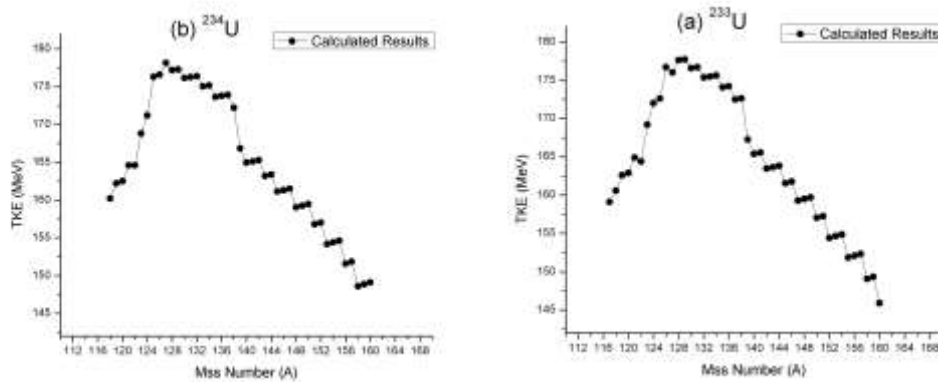
این مقادیر نشان می دهند که تغییر شکل هسته های شکافته شده با نزدیک شدن به اعداد جرمی ۱۲۰ (پاره شکافت متقارن) بیشتر می شوند. با توجه به اینکه در واکنش نوترونی اورانیوم محدوده اعداد جرمی ۱۳۰ تا ۱۴۰ دارای پاره های شکافت با اعداد جادویی هستند [۲۲]، مسلماً کم شدن تغییر شکل مربوط به هسته های کروی و پایدارتر است. در آخر با کمک نتایج به دست آمده برای شکافت نوترونی اورانیوم ۲۳۸ و ۲۳۵ و ۲۳۲، انرژی جنبشی کل پاره های شکافت نوترونی بقیه ایزوتوپهای اورانیوم محاسبه شده و در شکل‌های ۳-۵ رسم گردیده اند.



برای محاسبه انرژی جنبشی کل پاره های شکافت نوترونی ^{230}U و ^{231}U از مقادیر پارامترهای منطبق شده^۷ برای شکافت نوترونی ^{232}U استفاده شده است. یعنی این دو هسته را شبیه هسته ^{232}U گرفته ایم فقط در مورد ^{231}U به دلیل فرد-زوج بودن آن طبیعتاً اختلافاتی وجود خواهد داشت؛ اما چون مقادیر تجربی برای هسته های فرد-زوج وجود ندارد، امکان امتحان کردن نتایج وجود نداشت. مقادیر نتایج تجربی از مرجع EXFOR [۲۲] استخراج شده اند. این مرجع داده های تجربی را به صورت فرمت نوشتاری سازگار با بیشتر نرم افزارهای رسم ارائه می دهد.



شکل شماره (۳) انرژی جنبشی کل پاره های شکافت نوترونی ^{230}U (a) ^{231}U (b)



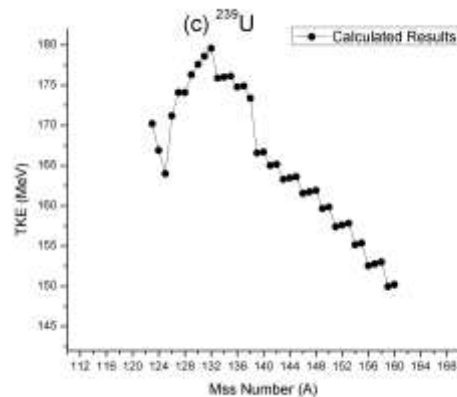
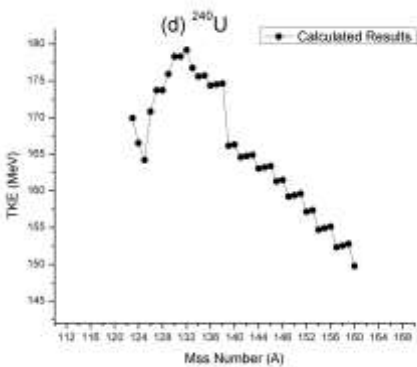
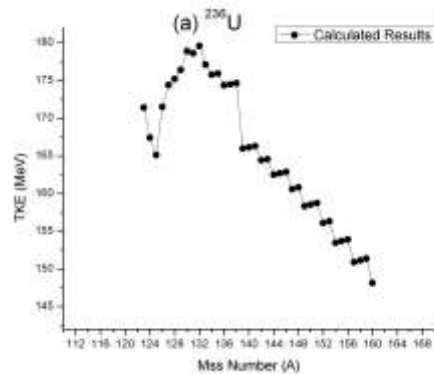
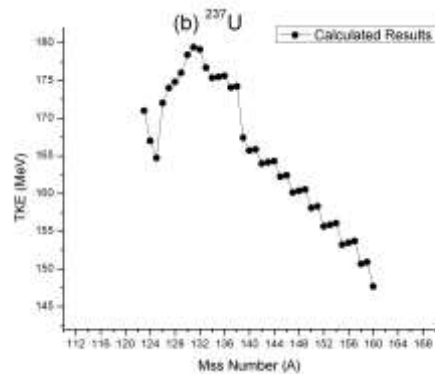
شکل شماره (۴) انرژی جنبشی کل پاره های شکافت نوترونی ^{233}U (a) ^{234}U (b)

^۷Fitted parameters

برای محاسبه انرژی جنبشی کل پاره‌های شکافت نوترونی ^{233}U و ^{234}U از مقادیر پارامترهای به دست آمده برای شکافت نوترونی ^{235}U استفاده شده است. برای محاسبه انرژی جنبشی کل پاره‌های شکافت نوترونی ^{236}U ، ^{237}U ، ^{239}U و ^{240}U از مقادیر پارامترهای منطبق شده حاصل از شکافت نوترونی ^{238}U استفاده شده است.

نتیجه گیری :

انرژی جنبشی کل پاره‌های شکافت نوترونی برای ایزوتوپهای اورانیوم به کمک مدل آماری، محاسبه و رسم شده است. برای محاسبه مقادیر، پارامترهای مورد نیاز در مدل آماری (یعنی: تغییر شکل هسته‌های شکافته شده β و فاصله مماسی بین دو پاره شکافت (d) با کمک مقادیر تجربی به دست آمده اند. در محاسبات دیده می شود که هسته‌هایی که به شکل کروی نزدیک ترند (یعنی تعداد پروتون یا تعداد نوترون جادویی دارند) دارای مقدار تغییر شکل هسته کمتری نسبت به هسته‌های معمولی هستند.



شکل شماره (۵) انرژی جنبشی کل پاره‌های شکافت نوترونی ^{236}U (a) ^{237}U (b) ^{239}U (c) و ^{240}U (d).



تغییرات انرژی جنبشی کل پاره‌های شکافت نوترونی در محدوده نزدیک به پاره‌های شکافت متقارن زیاد است. این تغییرات در شکافت هسته ^{238}U (شکل ۱) کمتر از دو هسته ^{235}U و ^{232}U (شکل ۲) دیده می‌شود به طوری که برای هسته ^{232}U به شدت کاهش می‌یابد و به مقدار 155 MeV می‌رسد در حالیکه برای هسته ^{238}U مقدار آن دوباره افزایش می‌یابد و در کمترین حالت هم از 160 MeV عبور نمی‌کند. این نشان از تفاوت زیاد این دو ایزوتوپ دارد.

مراجع :

- [1] W. Lang, H.G. Clerc, H. Wohlfarth, H. Schrader, K.H. Schmidt, Nuclear charge and mass yields for $^{235}\text{U}(n_{th}, f)$ as a function of the kinetic energy of the fission products, Nucl. Phys. A 345, 34 (1980).
- [2] F.J. Hambsch, H.H. Knitter, C. Budtz-Jorgensen, J.P. Theobald, Fission mode fluctuations in the resonances of $^{235}\text{U}(n,f)$, Nucl. Phys. A 491, 56 (1989)
- [3] R. Hentzschel, H.R. Faust, H.O. Denschlag, B.D. Wilkins, J. Gindler, Mass, charge and energy distributions in the very asymmetric fission of ^{249}Cf induced by thermal neutrons, Nucl. Phys. A 571, 427 (1994).
- [4] Yu.V. Pyatkov, V.G. Tishchenko, V.V. Pashkevich, V.A. Maslov, D.V. Kamanin, I.V. Kljuev, W.H. Trzaska, Manifestation of fine structures in the fission fragment mass-energy distribution of the $^{233}\text{U}(n_{th},f)$, Nucl. Instrum. Methods A 488, 381 (2002).
- [5] L. Dematte, C. Wagemans, R. Barthelemy, P.D'hondt, A. Deruytter, Fragments' mass and energy characteristics in the spontaneous fission of ^{236}Pu , ^{238}Pu , ^{240}Pu , ^{242}Pu , and ^{244}Pu , Nucl. Phys. A 617, 331 (1997).
- [6] Yu.V. Pyatkov, G.G. Adamian, N.V. Antonenko, V.G. Tishchenko, Cluster approach to description of fission modes, Nucl. Phys. A 611, 355 (1996).
- [7] A.V. Andreev, G.G. Adamian, N.V. Antonenko, S.P. Ivanova, and W. Scheid, Possible explanation of fine structures in mass-energy distribution of fission fragments, Eur. Phys. J. A 22, 51 (2004).
- [8] G.G. Adamian, N.V. Antonenko, W. Scheid, in: Christian Beck (Ed.), Clusters in Nuclei, vol. 2, in: Lect. Notes, Phys., vol. 848, Springer-Verlag, Berlin, 2012, p. 165
- [9] H. Pasca, A.V. Andreev, G.G. Adamian, and N.V. Antonenko, Extraction of potential energy in charge asymmetry coordinate from experimental fission data, Eur. Phys. J. A. 52, 369 (2016).
- [10] A. Ruben, H. Marten, and D. Seeliger, Energy partition in nuclear fission, Z. Phys. A 338, 67 (1991)
- [11] A. V. Andreev G. G. Adamian, N. V. Antonenko, S. P. Ivanova, W. Scheid, Possible explanation of fine structures in mass-energy distribution of fission fragments, Eur. Phys. J. A 22, 51 (2004).
- [12] J. Blocki, W.J. Swiatecki, A generalization of the Proximity Force Theorem, Ann. Phys. NY 132, 53 (1981).
- [13] J. Blocki, J. Randrup, W.J. Swiatecki, C.F. Tsang, Proximity forces, Ann. Phys. NY 105, 427 (1977).
- [14] J. Blocki, J. Randrup, W.J. Swiatecki, C.F. Tsang, A generalization of the Proximity Force Theorem, Ann. Phys. NY 132, 53 (1981).
- [15] K. R. Vijayaraghavan, M. Balasubramaniam, and W. von Oertzen, Collinear versus triangular geometry: A ternary fission study, Phys. Rev. C 90, 024601 (2014).
- [16] J. Blocki, W.J. Swiatecki, C.F. Tsang, A generalization of the Proximity Force Theorem, Ann. Phys. NY 132, 53 (1981).



- [17] H. Umezawa, S. Baba, H. Baba, Systematic behaviour of the most probable charge in the medium-energy fission, Nucl. Phys. A. 1971. 160, 65.
- [18] N. Sugarman, and A. Turkevich, Radiochemical Studies: The Fission Product, edited by C. D. Coryell and N. Sugarman McGraw-Hill, New York, 1951. vol. 3. p. 1396.
- [19] F.Vives, F.-J.Hambsch, H.Bax, S.Oberstedt, Investigation of the fission fragment properties of the reaction $^{238}\text{U}(n,f)$ at incident neutron energies up to 5.8 MeV, Nuc. Phys. A, 662, 1, 63 (2000).
- [20] S.Zeynalov, V.Furman, F.-J.Hambsch, M.Florec, V.Yu.Kononov, V.A.Khryachkov, Yu.S.Zamyatnin, Conf: Int.Sem.on Interactions of Neutrons with Nuclei, No.13, p.351 (2006)
- [21] M.Asghar, F.Caitucoli, B.Leroux, P.Perrin, G.Barreau, Fission-fragment energy correlation measurements for (n, f) of ^{232}U and ^{233}U , Nucl. Phys. A. 368, 2, 328 (1981).
- [22] EXFOR Experimental Nuclear Reaction Data Base (2017), <http://www-nds.iaea.org/EXFOR>.