



## بررسی رویدادهای شکافت هسته غیر مرکب با استفاده از توزیع جرم پاره‌های شکافت

سعید سهیلی\*، محمد خوش لسان، محدثه رنجبران و مرتضی خلیل خلیلی

دانشگاه بوعلی سینا، دانشکده علوم، گروه فیزیک

### چکیده

در مطالعه‌ی برخی از سیستم‌های شکافت القایی گزارش شد مقادیر تجربی پهنای جرم پاره‌های شکافت بیشتر از پیش‌بینی تئوری است. این اختلاف را به حضور رویدادهای شکافت هسته غیر مرکب (NCN) نسبت می‌دهند. در این پژوهش به صورت سیستماتیک، با استفاده از روش توزیع جرم به شکافت هسته غیر مرکب در سیستم‌های شکافت القایی با هسته پرتابه  $^{238}\text{U}_{92}$  پرداخته شده است. در این روش از مقایسه‌ی پیش‌بینی توزیع جرم به وسیله مدل آماری انتقاطع با مقادیر تجربی به بررسی شکافت هسته غیر مرکب پرداخته‌ایم. محاسبات نشان می‌دهند که برای واکنش‌های یون سنگین با هسته پرتابه  $^{238}\text{U}_{92}$  در بازه یکسان انرژی برانگیختگی به ازای هر نوکلئون، احتمال این فرآیند براساس برخی از خصوصیات کانال ورودی رفتار خطی دارد.

کلید واژه: شکافت القایی با یون سنگین، شکافت هسته غیر مرکب، توزیع جرم پاره‌های شکافت

## The study of non-compound nucleus fissions with fission fragment mass distribution

Soheyli, Saeed; khoshlesan, Mohammad; Ranjbaran, Mohadese; Khalil Khalili, Morteza

Department of physics, Bu-Ali Sina University, Hamedan

### Abstract:

The study of induced fission reactions show that the experimental values of fission fragment mass width are higher than the theoretical predictions. This abnormal behavior is related to the presence of Non-Compound Nucleus Fission (NCNF) events. In this research, the non-compound nucleus fission events in induced fission of different targets by  $^{238}\text{U}_{92}$  projectile are studied within the mass distribution method, in a systematic way. In this method,



analysis of the NCNF has been made by comparison between the statistical scission model predictions and the experimental values. Our calculations show a linear behavior dependencing of the NCNF probability to the entrance channel properties in heavy-ion reactions of different targets induced by  $^{238}_{92}\text{U}$  projectile over the same excitation energy range per nucleon.

**Key Words:** Heavy-ion induced fission, Non-compound nucleus fission, fission fragments mass distribution

## مقدمه

اگر چه تا به امروز پیشرفت‌های خوبی در تجزیه و تحلیل فرآیند شکافت روی داده است، اما بسیاری از جزئیات این فرآیند هنوز به طور کامل آشکار نشده است. در فیزیک هسته‌ای براساس عدد جرمی پرتابه، واکنش‌ها به دو دسته‌ی واکنش‌های یون سنگین و واکنش‌های عادی یا پرتابه سبک تقسیم می‌شوند. در واکنش‌های شکافت القایی یون‌های سنگین دو فرآیند شکافت هسته مرکب (CNF) و شکافت هسته غیر مرکب (NCNF) در رقابت با یکدیگر هستند. هسته تشکیل شده از برخورد پرتابه و هدف در شکافت هسته غیر مرکب قبل از رسیدن به تعادل کامل شکافته می‌شود. میزان این نوع شکافت (NCNF) به عواملی مانند انرژی پرتابه، عدد اتمی، عدد جرمی، اسپین، شکل و ساختار پوسته‌ای پرتابه و هدف بستگی دارد. در حالت کلی شکافت هسته غیر مرکب شامل سه نوع شبه شکافت، شکافت سریع و شکافت پیش از تعادل می‌باشد [1-3].

به منظور فهم مکانیسم فرآیندهای شکافت و شکافت هسته غیر مرکب از روش‌های تجربی متفاوتی در تحقیقات استفاده می‌شود. برخی از این روش‌ها که از لحاظ تئوری می‌توانند به وسیله مدل‌های آماری بیان شوند، شامل توزیع زاویه‌ای، توزیع جرم و توزیع جرم-زاویه پاره‌های شکافت می‌باشند. در مطالعه‌ی توزیع جرم، افزایش غیرعادی در پهنای جرم پاره‌های شکافت نشان دهنده وجود شکافت هسته غیر مرکب است. از لحاظ تئوری، پهنای جرم ( $\sigma_M$ ) به دما (T) و اسپین (L) سیستم در حال شکافت ارتباط دارد ( $\sigma_M^2 = \nu T + \mu < L^2 >$ ). بررسی‌های توزیع جرم مربوط به سیستم-های شکافت القایی متفاوت نشان می‌دهند که ضریب مربوط به اسپین در رابطه پهنای جرم کوچک است و قابل صرف نظر کردن می‌باشد [4].

## روش کار

مشاهدات تجربی مربوط به توزیع جرم در واکنش‌های شکافت القایی با یون سنگین نشان می‌دهند با افزایش انرژی پرتابه در مقادیر بالای ارتفاع سد کولنی، مقدار پهنای جرم پاره‌های شکافت افزایش می‌یابد. از طرفی با افزایش انرژی



پرتابه مقدار ارتفاع سد شکافت هسته مرکب کاهش یافته و این عمل می‌تواند به افزایش مقدار شبه شکافت منجر شود. دمای هسته مرکب در نقطه انقطاع از طریق رابطه زیر به دست می‌آید [4].

$$T = \sqrt{\frac{E_x + Q_{sym} - TKE - E_{pre}^{sci} - E_{rot}^{sci} - E_{def}}{a}} \quad (1)$$

مطابق با این رابطه  $E_x$ ,  $Q_{sym}$ ,  $TKE$ ,  $E_{pre}^{sci}$ ,  $E_{rot}^{sci}$ ,  $E_{def}$  و  $a$  به ترتیب مقدار انرژی برانگیختگی اولیه هسته مرکب، مقدار  $Q$  واکنش در شکافت متقارن، انرژی جنبشی پاره‌های شکافت، مقدار انرژی کاهش یافته توسط نوترون‌های پیش از نقطه انقطاع (انرژی حمل شده توسط هر نوترون گسیلی 8 MeV در نظر گرفته شده است)، انرژی چرخشی سیستم در نقطه انقطاع، انرژی تغییر شکل سیستم (مقدار آن 12 MeV در نظر گرفته می‌شود [5]) و پارامتر چگالی تراز است که به صورت  $a = \frac{AcN}{8.5}$  معرفی می‌شود [4]. در معادله بالا انرژی جنبشی پاره‌های شکافت با توجه به سیستماتیک ویولا به دست می‌آید [6].

$$TKE = 0.1189 \frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}} + 7.3 \quad (2)$$

در این رابطه  $A$ ,  $Z$  به ترتیب عدد اتمی و عدد جرمی هسته محصول می‌باشند. با صرف نظر کردن از جمله‌ی مربوط به اسپین در پهنای جرم، خواهیم داشت [7]:

$$\sigma_M = \sqrt{\frac{T}{k}} = \frac{1}{k} \sqrt{\frac{E_x + Q_{sym} - TKE - E_{pre}^{sci} - E_{rot}^{sci} - E_{def}}{a}} \quad (3)$$

در این رابطه،  $k$  ثابت سختی است که مقدار آن  $0.0048 \frac{MeV}{u^2}$  در نظر گرفته می‌شود [4,7].

## نتایج

در این تحقیق توزیع جرم مربوط به سیستم‌های شکافت القایی  $^{235}_{92}\text{U} + ^{16}_8\text{O}$ ,  $^{24}_{12}\text{Mg}$ ,  $^{27}_{13}\text{Al}$ ,  $^{32}_{16}\text{S}$ ,  $^{35}_{17}\text{Cl}$  مطالعه شده است. مقادیر تجربی پهنای جرم پاره‌های شکافت مربوط به این سیستم‌ها در محدوده‌ی انرژی‌های نزدیک سد کولنی

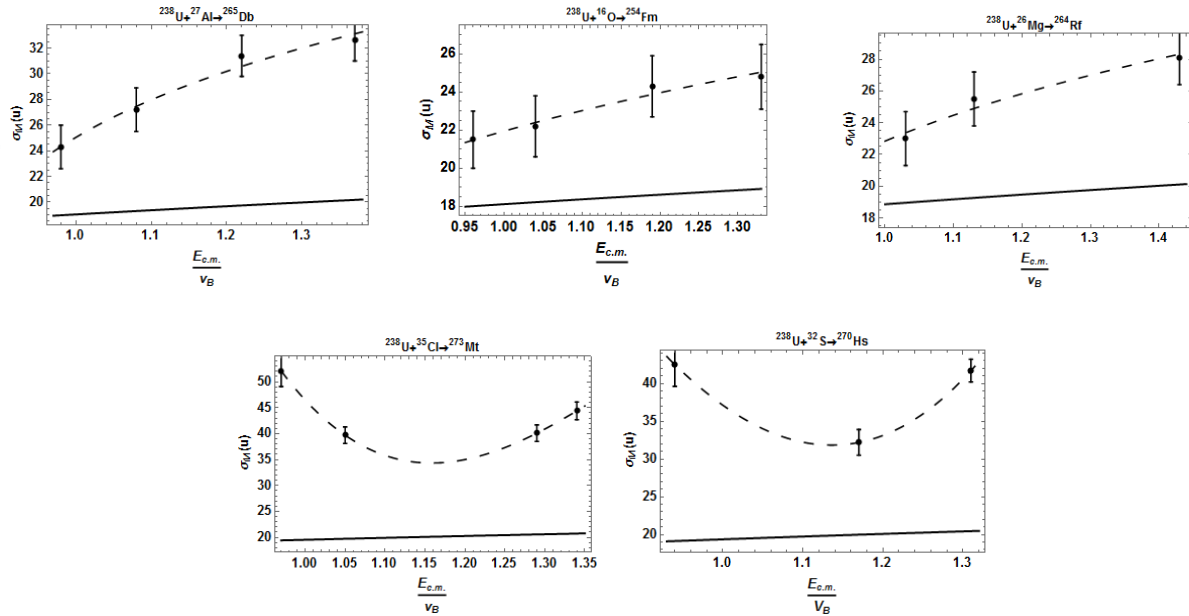


اندازه‌گیری و گزارش شده است [8]. در جدول ۱ مقادیر مربوط به کمیت‌های مورد نیاز برای پیش‌بینی پهنای جرم این واکنش‌ها به وسیله‌ی مدل آماری نقطه انقطاع آمده است.

جدول ۱: مقادیر به دست آمده مورد نیاز برای محاسبه دما در واکنش‌های با پرتابه یکسان  $^{238}_{92}U$ .

واکنش‌ها	Q-Value تشکیل هسته مرکب (MeV)	Q-Value شکافت متقارن از هسته مرکب (MeV)	$V_B$ (MeV)	TKE (MeV)	$E_{pre}$ (MEV)
$^{238}_{92}U + ^{16}_8O$	-38.33	247.90	85.00	195.05	$-1.254 + 0.062E_x$
$^{238}_{92}U + ^{26}_{12}Mg$	-75.09	276.55	123.00	207.77	$-1.254 + 0.062E_x$
$^{238}_{92}U + ^{27}_{13}Al$	-80.36	281.55	133.00	211.39	$-1.254 + 0.062E_x$
$^{238}_{92}U + ^{32}_{16}S$	-104.13	298.26	162.00	221.87	$-1.254 + 0.062E_x$
$^{238}_{92}U + ^{35}_{17}Cl$	-116.69	307.96	171.00	225.06	$-1.254 + 0.062E_x$

در شکل ۱، منحنی پیش‌بینی محاسبه شده از مدل آماری نقطه انقطاع (مطابق با رابطه ۳) به همراه مقادیر تجربی پهنای جرم مربوط به واکنش‌های شکافت القایی با پرتابه یکسان  $^{238}_{92}U$  نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مقادیر پیش‌بینی کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده هستند. اختلاف بین مقادیر تجربی و پیش‌بینی مدل نشان‌دهنده‌ی وجود شکافت هسته غیر مرکب است.

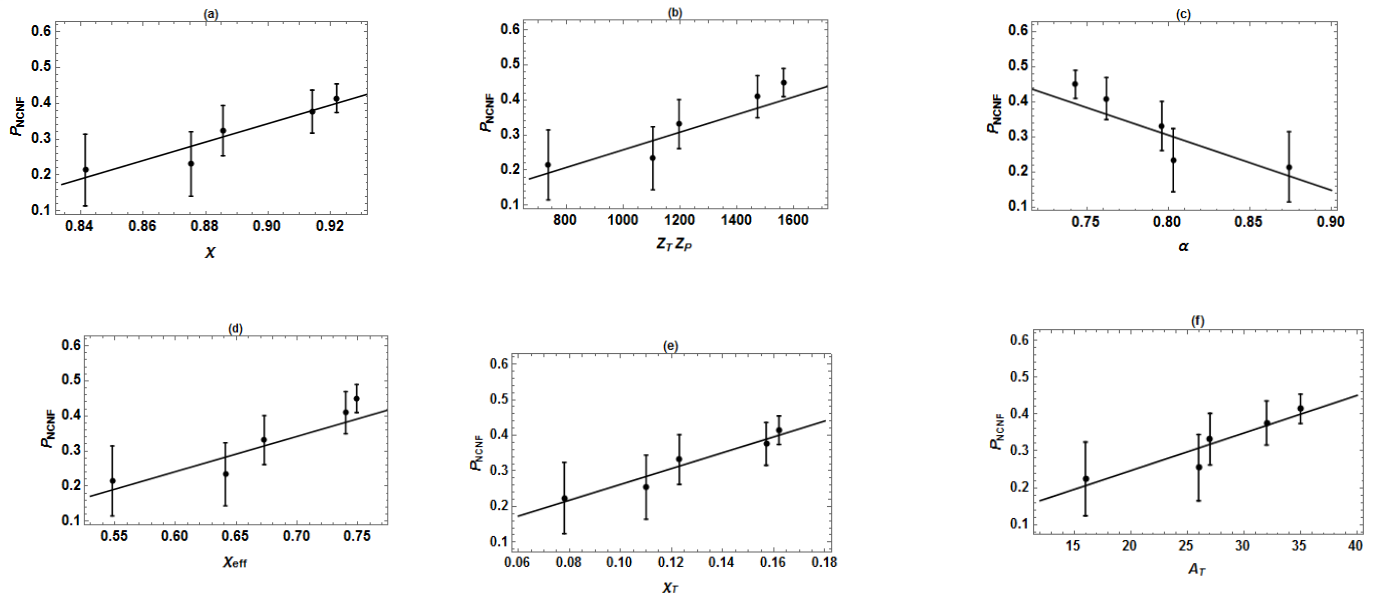


شکل ۱: نمودار پهنای جرم پاره‌های شکافت مربوط به واکنش‌های دارای پرتابه یکسان  $^{238}\text{U}$  و هسته‌های هدف مختلف. منحنی‌های پُر و خط‌چین به ترتیب نشان‌دهنده‌ی پیش‌بینی پهنای جرم و رفتار مقادیر تجربی می‌باشند [8].

در روش توزیع جرم پاره‌های شکافت، از مقایسه‌ی بین مقادیر تئوری و تجربی پهنای جرم می‌توان کمیت مهم احتمال شکافت هسته غیر مرکب را مطابق با رابطه زیر به دست آورد [4]:

$$P_{NCN} = 1 - \frac{\sigma_M^{sci}}{\sigma_M^{exp}} \quad (4)$$

در این رابطه  $\sigma_M^{sci}$  و  $\sigma_M^{exp}$  به ترتیب مقادیر تئوری و تجربی پهنای جرم پاره‌های شکافت هستند. رفتار احتمال میانگین شکافت هسته غیر مرکب بر اساس برخی از خصوصیات کانال ورودی مربوط به این واکنش‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است. محاسبات مربوط به  $P_{NCN}$  در بازه مشترک  $\frac{E_{c.m.}}{V_B}$  بین ۱.۰۳-۱.۲۹ انجام گرفته است ( $V_B$  ارتفاع سد کولنی واکنش می‌باشد).



شکل ۲: نمودار احتمال شکافت هسته غیر مرکب برای واکنش‌های شکافت القایی پرتابه یکسان  $^{238}_{92}U$  بر اساس برخی از خصوصیات کانال ورودی شامل: (a) پارامتر شکافت پذیری، (b) حاصل ضرب عدد اتمی پرتابه و عدد اتمی هدف، (c) عدم تقارن جرمی کانال ورودی، (d) پارامتر شکافت پذیری موثر هسته محصول، (e) پارامتر شکافت پذیری هسته هدف و (f) عدد جرمی هسته هدف. خط رسم شده در شکل‌ها برازش مقادیر احتمال شکافت هسته غیر مرکب است.

### بحث و نتیجه گیری

وجود و یا عدم حضور شکافت هسته غیر مرکب، مهمترین عامل در مطالعات گسترده‌ی توزیع جرم سیستم‌های شکافت القایی به وسیله‌ی یون‌های سنگین است. پهن شدگی توزیع جرم نشان‌دهنده‌ی شکافت هسته غیر مرکب می‌باشد. در این مقاله، به صورت سیستماتیک توزیع جرم پاره‌های شکافت مربوط به واکنش‌های دارای پرتابه یکسان  $^{238}_{92}U$  و هسته‌های هدف متفاوت بررسی شده است. از مقایسه‌ی پیش‌بینی تئوری پهنای جرم با مقادیر تجربی اندازه‌گیری شده، مقدار احتمال شکافت هسته غیر مرکب برای این واکنش‌ها به دست آمده و با توجه به خصوصیات کانال ورودی آنالیز شده



است. محاسبات نشان می‌دهند که در محدوده انرژی پرتابه بالای ارتفاع سد کولونی، رفتار احتمال شکافت هسته غیر مرکب براساس برخی از خصوصیات کانال ورودی شامل: حاصل ضرب عدد اتمی پرتابه و عدد اتمی هسته هدف، عدد جرمی هسته هدف، پارامتر شکافت پذیری هسته مرکب، کمیت عدم تقارن جرمی کانال ورودی، پارامتر شکافت پذیری موثر هسته مرکب و پارامتر شکافت پذیری هسته هدف تقریباً خطی می‌باشد. این نتیجه در توافق با بررسی‌های سیستماتیک از طریق ناهمسانگردی زاویه‌ای پاره‌های شکافت است [9].

### منابع

- 1- V. S. Ramamurthy and S. S. Kapoor, "Interpretation of Fission-Fragment Angular Distributions in Heavy-Ion Fusion Reactions" Phys. Rev. Lett. **54**, 178-182 (1985).
- 2- B. B. Back, R. R. Betts, J. E. Gindler, B. D. Wilkins, S. Saini, M. B. Tsang, C. K. Gelbke, W. G. Lynch, M. A. McMahan, and P. A. Baisden, "Angular distributions in heavy-ion-induced fission" Phys. Rev. C **32**, 195-213 (1985).
- 3- S. Kailas, "Heavy-ion induced fission at near barrier energies" Phys. Rep. **284**, 381-416 (1997).
- 4- Lin, C. J., du Riets, R., Hinde, D. J., Dasgupta, M., Thomas, R. G., Brown, M. L., Evers, M., Gasques, L. R., and Rodriguez, M. D. "Systematic behavior of mass distributions in  $^{48}\text{Ti}$  induced fission at near barrier energies". Phys. Rev. C **85**, 014611 (2012).
- 5- Back. B. B. "Complete fusion and quasifission in reaction between heavy ion". Phys. Rev. C **31**, 2104 (1985).
- 6- Viola, V. E., Kwiatkowski, K., and Walker, M. 1985. "Systematics of fission fragment total kinetic energy release". Phys. Rev. C **31**, 1550 (1985).
- 7- Back, B. B., Fernandez, P. B., Glagola, B. G., Handerson, D., Kaufman, S., Keller, J. G., Sanders, S. J., Videbaek, F., Wang, T. F., and Wilking, B. D. "Entrance channel effects in quasifission reactions". Phys. Rev. C **53**, 1734 (1996).
- 8- Shen, W. Q., Albinski, J., Gobbi, A., Gralla, S., Hildenbrand, K. D., Herrmann, N., Kuzminski, J., Muller, W. F. J., Stelzer, H., and Toke, J. 1987. "Fission and quasifission in U-induced reactions". Phys. Rev. C **36**, 115 (1987).
- 9- Soheyli, S., and Khalili, M. k. "Non-compound-nucleus fission events and standard saddle-point statistical model". Phys. Rev. C., Vol. **85**, 034610 (2012).