

## 0.27 eV ENERJİLİ POLYARLAŞMIŞ NEYTRONLARIN TƏSİRİ İLƏ $^{235}\text{U}$ NÜVƏSİNİN BÖLÜNMƏSİ ZAMANI ANI QAMMA KVANTLARIN VƏ NEYTRONLARIN BUCAQ KORRELYASIYASININ ÖLÇÜLMƏSİ

Q.S. ƏHMƏDOV<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>AMEA Radiasiya Problemləri İnstitutu, Bakı, Azərbaycan, B Vahabzadə küç., 9.

<sup>2</sup>Birləşmiş Nüvə Tədqiqatları İnstitutu, Dubna, Rusiya

<sup>3</sup>NRYTN- Milli Nüvə Tədqiqatları Mərkəzi, Bakı, Azərbaycan

E-mail: ahmadovg@nf.jinr.ru

Ağır nüvələrin bölünməsi zamanı müşahidə edilən T-tək asimetriyalar on illərdir ki, tədqiq edilməkdədir. Bu asimetriyalar ilk olaraq üçqat bölünmə proseslərində, Rusiya və Avropa institutlarının alimlərinin iştirakı ilə ILL reaktorunda (Grenoble) aparılan bir sıra təcrübələrdə aşkar edilmiş və bir sıra nüvələr üçün ölçülmüşdür. Daha sonra, fırlanma effekti (ROT-rotation)  $^{235}\text{U}$  və  $^{233}\text{U}$  nüvələrinin bölünməsi zamanı ani qamma şüaların və neytronların buraxılmasında müşahidə edilsə də, effektin qiyməti  $\alpha$ -zərrəciklərin emissiyası ilə baş verən üçqat bölünmə zamanı alınan qiymətdən kiçik olmuşdur. İndiyə qədər T-tək asimetriyaların ölçülməsi üçün aparılan bütün təcrübələr  $J=3$  və  $J=4$  spin hallarının qarışq olduğu enerjilərdə polyarlaşmış neytronlarla aparıldığına görə, bu enerjilərdə spin hallarının asimetriyaya təsiri yaxşı məlum deyil. Nəzəri modellərə əsasən asimetriyanın qiymətinin dəyişmə qanunauyğunluğu təcrübi olaraq tədqiq edilməmişdir. Bunu nəzərə alaraq Almaniyanın Qarxinq şəhərində yerləşən FRM-2 reaktorunun POLI təcrübi qurğusunda  $^{235}\text{U}$  nüvəsinin 0.27 eV rezonans enerjisində qamma və neytron asimetriyalar ölçülmüşdür. Digər enerjilərdən fərqli olaraq bu enerjide  $^{235}\text{U}$  nüvəsinin spininin  $J=3$  halı üstünlük təşkil etdiyindən asimetriyanın dəyişmə qanunauyğunluğu müşahidə edilmişdir.

### GİRİŞ

Bölünmə prosesinin dinamikasını öyrənmək üçün müxtəlif ağır nüvələrin müxtəlif enerjili neytronla bölünməsi zamanı baş verən T-tək (TRI-time reversal invariance və ROT effektlər) asimetriyalarının öyrənilməsi vacibdir [1]. Bu effektlər ilkin olaraq üçqat bölünmə proseslərində [2-4] bir sıra nüvələr üçün, daha sonralar isə qamma şüaların və neytronların buraxılması ilə baş verən ikiqat bölünmə proseslərində müşahidə olunmuşdur [4-10].

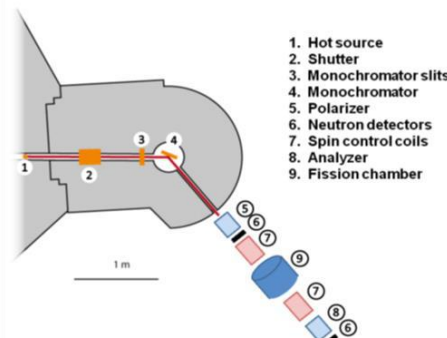
Alfa zərrəciklərdən fərqli olaraq, qamma şüalar və neytronlar yüksüz olduğundan effektləri daha yaxşı öyrənməyə imkan verir. Bu vaxta qədər aparılan təcrübələrdə  $^{235}\text{U}$  nüvəsinin spin halları ( $J=3$ ,  $J=4$ ) qarışq olduğundan, bölünmə kanallarını təyin etmək olmurdu. Nəzəri hesablamalara görə həm TRI, həm də ROT effekt kvant ədədləri olan ümumi fırlanma momentindən ( $J$ ) və onun proyeksiyasından ( $K$ ) asılıdır. Yəni, hər bir  $J$  halına müxtəlif  $K$  halları uyğun gəlir ki, bu da bölünmənin hansı haldan (kanaldan) baş verdiyini təyin etməyə imkan vermir. Bunu araşdırmaq üçün, bölünməyə səbəb olan neytronların enerjisindən və  $J$  hallarının dəyişmə tendensiyasından asılı olaraq T-tək asimetriyaları tədqiq etmək lazımdır. Bunu nəzərə alaraq,

Qarxinqdəki FRM-2 reaktorunun POLI təcrübi qurğusunda  $^{235}\text{U}$  nüvəsinin  $J=3$  halının qismən üstünlük təşkil etdiyi 0.27 eV rezonans enerjisində, qamma və neytron asimetriyaları ölçülmüşdür.

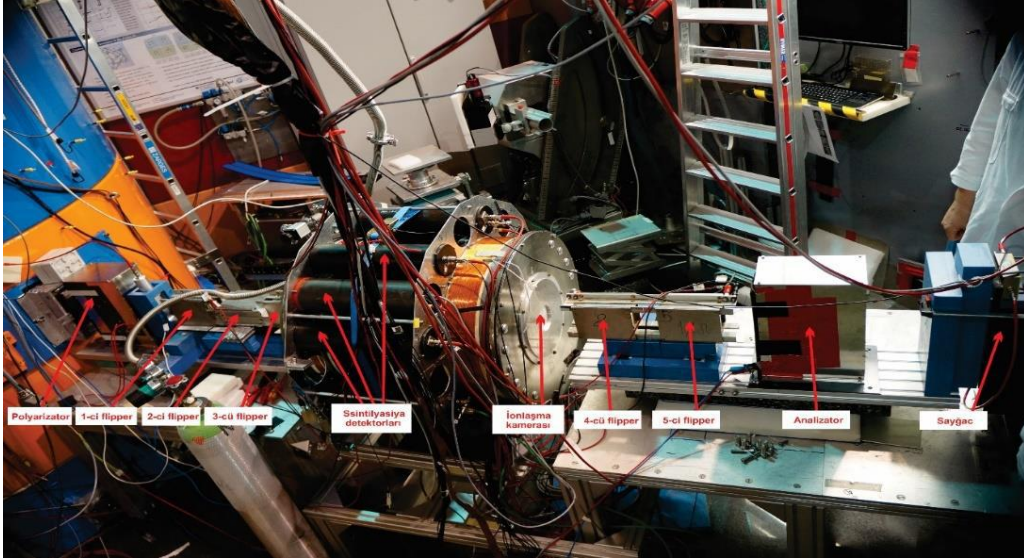
### TƏCRÜBƏ VƏ NƏTİCƏLƏRİN MÜZAKİRƏSİ

Təcrübədə enerjisi 0.27 eV olan isti neytronlardan və  $^{235}\text{U}$  mənbəsindən istifadə edilmişdir. Təcrübə reaktorun POLI kanalında yerinə yetirilmişdir. POLI kanalında yerləşdirilmiş təcrübi qurğunun sxemi şəkil 1-də verilmişdir. Mozaik mis (Cu) kristalından ibarət olan monoxromator orta enerjisi 0.27 eV ( $\lambda=0.55$  Å) olan neytronları buraxmağa imkan verir.

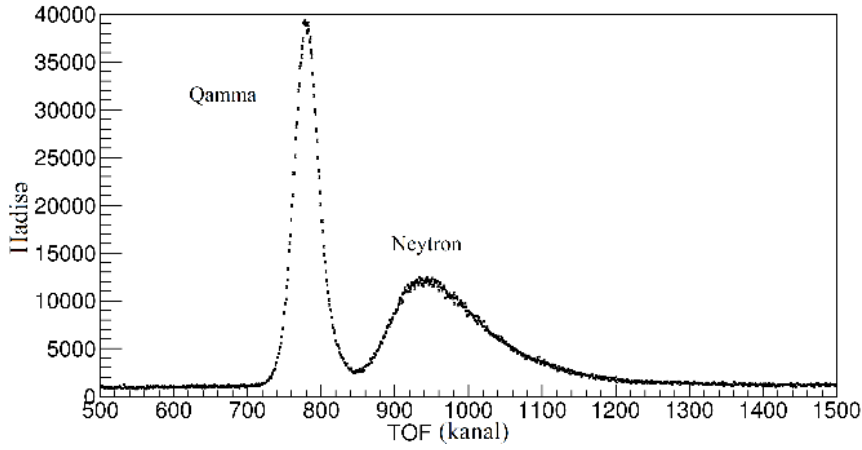
Bu enerji  $^{235}\text{U}$ -in aşağı rezonans halına uyğun gəlir. Neytronların polyarlaşdırılması üçün xüsusi hazırlanmış  $^3\text{He}$  qazı ilə doldurulmuş kolbadan istifadə edilmişdir. Analoji kolba polyarizasiyanı ölçmək üçün istifadə edilən analizator da yerləşdirilmişdir. Eksperimentdə istifadə edilən kolbanın ölçüləri  $60 \times 130$  mm, kolbadakı təzyiq isə 2.5 bar olmuşdur. Kolba, üzərinə düşən neytronların 70%-ni polyarlaşdırmağa imkan verir. Polyarlaşmanın müddəti eksponensial olaraq 40 saat ərzində azalır.



Şəkil 1. FRM-2 reaktorunun POLI [11-12] kanalında yerləşdirilmiş təcrübi qurğunun sxemi.



Şəkil 2. Təcrübi qurğunun real təsviri.



Şəkil 3. Plastik ssintilyatorlarla qeyd edilən uçuş müddətinə görə paylanma spektri.

Analizator və polyarizator neytron selinin vertikal polyarizasiyasını təmin edir. Polyarizasiyanın istiqamətini dəyişmək üçün xüsusi hazırlanmış spin idarəetmə sistemindən istifadə edilmişdir. İdarəetmə sistemi hər 1.3 saniyədə  $^{235}\text{U}$  mənbəsinin vəziyyətinə  $180^\circ$  bucaq altında spini fırlatmağa imkan verir. Şəkil 2-də təcrübi qurğunun real təsviri verilmişdir. İonlaşma kamerası  $\text{CF}_4$  qazı ilə 10 mBar təzyiqlə kimi doldurulmuşdur. Təcrübə zamanı ölçüləri  $40 \times 100 \text{ mm}^2$  olan alüminium altlıq üzərində  $82 \text{ mq } ^{235}\text{U}$  (99.99%) çökdürülmüş hədəfdən istifadə edilmişdir. Bölünmə məhsullarını qeyd etmək üçün aşağı təzyiqli nazik çoxsimli mütənasib saygacdan istifadə edilmişdir. Saygac mənbənin hər iki tərəfində yerləşdirilmişdir. Başlanğıc “start” detektor kimi istifadə olunan saygac mənbədən 3 sm, dayandırıcı “stop” detektor kimi istifadə olunan saygac isə 11 sm məsafədə yerləşdirilmişdir. Mənbədən 30 sm məsafədə yerləşdirilmiş 8 ədəd silindrik plastik ssintilyatorlar, bölünmə zamanı bölünmə məhsulları ilə eyni anda  $\pm 22.5$ ,  $\pm 67.5$ ,  $\pm 112.5$  və  $\pm 157.5$  dərəcə bucaq altında buraxılan qamma şüaları və neytronları qeyd etməyə imkan verir. Qamma detektorlar və saygac mənbənin üzərinə düşən neytron selinə ortoqonal yerləşdirilmişdir. Neytronları qamma şüalardan ayırmaq üçün müx-

təlif metodlardan [13] istifadə edilsə də, təcrübədə uçuş müddətinə görə ayırma metodundan istifadə olunmuşdur (şəkil 3).

Qeyd edilən hadisələr arasındakı simmetriyanı hesablamaq üçün aşağıdakı düsturdan istifadə edilmişdir:

$$R = (N^+ - N^-) / (N^+ + N^-) \quad (1)$$

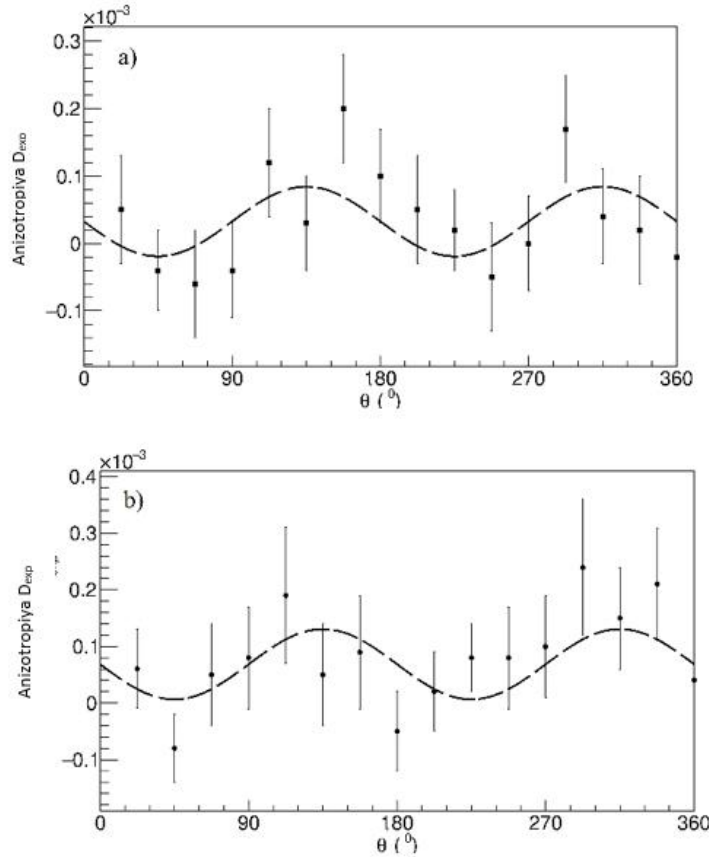
Burada  $N^+$  və  $N^-$  -neytronların polyarizasiyasına uyğun gələn hadisələrin sayıdır.

Təcrübə 7 gün ərzində aparılmışdır. Hadisələrin sayını artırmaq üçün yalnız dayandırıcı “stop” detektordan istifadə edilmişdir. ROT effektin ölçülməsində ağır və yüngül bölünmə məhsullarının kütləyə görə ayrılması əhəmiyyətli deyil. Başlanğıc detektorun istifadə edilməsi yalnız bölünmə məhsullarına görə bucaq paylanmasını artırır ki, bu da ROT asimmetriyanın azalmasına gətirib çıxarır.

Şəkil 4-də təcrübi məlumatlara əsasən (1) düsturu ilə hesablanmış anizotropiya nisbəti ( $R$ ) verilmişdir. Qamma şüalar ( $a$ ) və neytronlar ( $b$ ) bölünmə məhsullarının biri ilə sinxron qeyd edilmişdir. Şəkildə verilmiş hər bir nöqtə bir detektorun bölünmə məhsulu ilə sinxron qeyd etdiyi hadisəyə uyğundur. Bucaq asılılığı

asimetriyanı xarakterizə edən  $F=R \cdot \sin(2\theta)$  funksiyası ilə aproksimasiya olunmuşdur.  $R$  anizotropiya parametri aproksimasiya nəticəsində qamma şüalar üçün  $R_\gamma = (-5.2 \pm 2.5) \times 10^{-5}$ , neytronlar üçün isə  $R_n = (-6.2 \pm 2.9) \times 10^{-5}$  tapılmışdır. Alınan nəticələr soyuq

neytronlarla alınan nəticələrlə müqayisə edilmişdir. Soyuq neytronlarla aparılan təcrübə zamanı qamma şüalar üçün  $R_\gamma = (-16.6 \pm 1.6) \times 10^{-5}$  ( $45^\circ$ ), neytronlar üçün isə  $R_n = (-21.2 \pm 2.5) \times 10^{-5}$  ( $22.5^\circ$ ) alınmışdır.



Şəkil 4. Qamma şüalar (a) və neytronlar (b) üçün anizotropiya nisbəti ( $R$ )

İsti neytronlarla aparılan təcrübədən belə nəticəyə gəlmək olar ki, başqa enerjilərdə alınan təcrübə nəticələrlə müqayisədə 0.27 eV enerjili neytronlarla  $^{235}\text{U}$  nüvəsinin bölünməsi zamanı ROT asimetriyanın qiyməti kifayət qədər kiçikdir. Bunun da səbəbi 0.27 eV rezonans enerjisində  $J=3$  və  $J=4$  hallarının en kəsiklərinin bir-birinə yaxın olmasıdır.

## NƏTİCƏLƏR

0.27 eV enerjili polyarlaşmış neytronların təsiri ilə  $^{235}\text{U}$  nüvəsinin bölünməsi zamanı ani qamma şüaların və neytronların bucaq paylanması, başqa sözlə anizotropiyası ölçülmüşdür. Bu enerjide qamma şüalar üçün  $R_\gamma = (-5.2 \pm 2.5) \times 10^{-5}$  və neytronlar üçün  $R_n = (-6.2 \pm 2.9) \times 10^{-5}$  alınmış nəticələr, soyuq neytronlarla alınan nəticələrlə ( $R_\gamma = (-16.6 \pm 1.6) \times 10^{-5}$  ( $45^\circ$ ),

$R_n = (-21.2 \pm 2.5) \times 10^{-5}$  ( $22.5^\circ$ )) müqayisə edilmişdir. Müqayisədən də görüldüyü kimi 0.27 eV enerjili neytronlarla  $^{235}\text{U}$  nüvəsinin bölünməsi zamanı baş verən anizotropiya nisbətinin qiyməti (ROT- asimetriya) kifayət qədər kiçikdir. Nəzəri modellərə əsasən 0.27 eV rezonans enerjisində  $J=3$  və  $J=4$  hallarının en kəsiyi bir-birinə yaxın olduğundan, anizotropiya nisbətinin (ROT asimetriyanın) qiyməti kiçik olmalıdır. Çünki  $J=3$  və  $J=4$  halına uyğun gələn bölünmə kanallarından bölünmənin baş vermə ehtimalı bir-birinə çox yaxındır.

Aparılan işlər Azərbaycan Respublikasının Prezidenti Yanında Elmin İnkişafı Fondunun №EİF—BGM-5-AZTURK-1/2018-2/01/1-M-01 nömrəli, SOCAR elm fondunun və Çex Respublikasının Birləşmiş Nüvə Tədqiqatları İnstitutundakı səlahiyyətli nümayəndəsinin qrant layihələri çərçivəsində yerinə yetirilmişdir.

- [1] S.A. Barabanov. Symmetry and spin-angular correlations in the reactions and decays. Simmetrii i spin-uglovyie korrelyatsii v reaktsiyakh i raspadakh (Russian), FizMatLit, 2010.
- [2] F. Goennenwein, M. Mutterer, A. Gagarski, I.Guseva, G. Petrov, V. Sokolov, T.Zavarukhina,

- Yu. Gusev, J.von Kalben, V. Nesvizhevski, T. Soldner. Phys. Lett. B, 2007, 652, 13.
- [3] P. Jesinger et al. Interference effect in the angular distribution of outgoing particles in ternary fission induced by cold polarized neutrons, Phys. Atom. Nucl. 62, 1999, 1608.

- [4] P. Jesinger et al.. Observation of a triple correlation in ternary fission: is time reversal invariance violated?, Nucl. Instrum. Meth. A, 2000, 440, 618.
- [5] G.V. Danilyan, J. Klenke, V.A. Krakhotin, V.L. Kuznetsov, V.V. Novitsky, V.S. Pavlov, P.B.Shatalov. Phys. At. Nucl., 2009, 72, 1812.
- [6] G.V. Danilyan, J. Klenke, V.A. Krakhotin, Yu.N.Kopach, V.V. Novitsky, V.S. Pavlov, P.B.Shatalov. Phys. At. Nucl., 2011, 74, 671.
- [7] G.V. Danilyan, J. Klenke, Yu. Kopatch, V.A.Krakhotin, V.V. Novitsky, V.S. Pavlov, P.B.Shatalov. Phys. At. Nucl. 2014, 77, 677.
- [8] G.V. Valsky, A.M. Gagarski, I.S. Guseva, D.O. Krinitsin, G.A. Petrov, Yu.S. Pleva, V.E. Sokolov, V.I. Petrova, T.A. Zavarukhina, and T.E. Kuzmina. Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2010, 74, 767.
- [9] D. Berikov, G. Ahmadov, Yu. Kopatch, et al. , Effect of rotation in the  $\gamma$ -ray emission from 60 meV polarized neutron-induced fission of the  $^{235}\text{U}$  isotope, Phys. Rev. C 104, 024607, 2021.
- [10] D.Berikov, V.Hutanu, Yu.Kopatch, G.Ahmadov, A.Gagarski, V.Novitsky, G.Danilyan, S.Masalovich, J. Klenked and H. Deng. J. Instrum. 2020, 15, P01014.
- [11] V. Hutanu, M. Meven, and G. Heger. Phys. B: Condens. Matter. 2007, 397 135.
- [12] V. Hutanu. J.Large-Scale Res. Facil. 1 A16 2015.
- [13] R.A. Akbarov, G.S. Ahmadov, F.I. Ahmadov, D.Berikov, M.Holik, R.Mammadov, S.M.Nuruyev, A. Z. Sadigov, Z. Y. Sadygov and S.I. Tyutyunnikov. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 2019, vol. 936, pp. 549-551.

**G.S. Ahmadov**

**MEASUREMENT OF ANGULAR CORRELATION OF PROMPT GAMMA QUANTA AND NEUTRONS IN THE FISSION OF  $^{235}\text{U}$  INDUCED BY POLARIZED NEUTRONS WITH ENERGY OF 0.27 EV**

The asymmetry of the rotational effect observed in the fission of heavy nuclei has been extensively studied for decades. These effects were first discovered in ternary fission processes, in a series of experiments at the ILL reactor (Grenoble) with the participation of scientists from Russian and European institutions, and measured for a number of nuclei. Later on, the ROT effect was observed in the emission of fast gamma rays and neutrons in the fission of  $^{235}\text{U}$  and  $^{233}\text{U}$  nuclei. However, the value of the effect was smaller than the value obtained for  $\alpha$ -particles in the ternary fission. All the experiments were carried out with polarized cold neutrons with several spin states ( $J = 3$  and  $J = 4$ ) where the effect of spin states on the effect is not well known. Therefore, in this work, gamma asymmetry was measured at the resonance energy of 0.27 eV of the  $^{235}\text{U}$  nucleus at the POLI experimental facility of the FRM-2 reactor in Garching, Germany. Unlike other energies for which the effect was measured, it was possible to see changing of ROT asymmetry at this energy, where the  $J = 3$  spin state of the  $^{235}\text{U}$  nucleus was dominated.

**Г.С. Ахмедов**

**ИЗМЕРЕНИЕ УГЛОВОЙ КОРРЕЛЯЦИИ МГНОВЕННЫХ ГАММА КВАНТОВ И НЕЙТРОНОВ ПРИ ДЕЛЕНИИ  $^{235}\text{U}$  ПОЛЯРИЗОВАННЫМИ НЕЙТРОНАМИ С ЭНЕРГИЕЙ 0.27 ЭВ**

Асимметрия эффекта вращения, наблюдаемая при делении тяжелых ядер, широко изучается в течение многих десятилетий. Впервые эти эффекты были обнаружены в процессах тройного деления, в серии экспериментов на реакторе ILL (Гренобль) с участием ученых российских и европейских институтов и измерены для ряда ядер. Позднее ROT эффект наблюдался при испускании быстрых гамма-квантов и нейтронов при делении ядер  $^{235}\text{U}$  и  $^{233}\text{U}$ . Однако, величина эффекта оказалась меньше величины, полученной для  $\alpha$ -частиц в тройном делении. Все эксперименты проводились с поляризованными холодными нейтронами со смешанными спиновыми состояниями ( $J = 3$  и  $J = 4$ ), где влияние спиновых состояний на эффект недостаточно известно. Поэтому в данной работе гамма-асимметрия была измерена при резонансной энергии 0.27 эВ ядра  $^{235}\text{U}$  на экспериментальной установке POLI реактора FRM-2 в Гархинге, Германия. В отличие от других энергий, для которых измерялся эффект, можно было наблюдать изменение ROT асимметрии при этой энергии, где преобладало спиновое состояние  $J = 3$  ядра  $^{235}\text{U}$ .

*Qəbul olunma tarixi: 28.01.2022*