

## 60 meV ENERJİLİ POLYARLAŞMIŞ NEYTRONLARIN TƏSİRİ İLƏ $^{235}\text{U}$ NÜVƏSİNİN BÖLÜNMƏSİ ZAMANI BÖLÜNMƏ OXUNUN FIRLANMA BUCAĞININ TƏYİNİ

Q.S. ƏHMƏDOV<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> AMEA- AMEA Radiasiya Problemləri İnstitutu, Bakı, Azərbaycan

<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

Polyarlaşmış “soyuq” neytronların təsiri ilə  $^{235}\text{U}(n, f)$  reaksiyasında yaranan üçqat bölünmə zərrəcikləri (yükü zərrəciklər) üçün fırlanma (ROT) effektinin müşahidəsindən sonra ikiqat bölünmə prosesində də  $\gamma$ -kvantlar üçün analoji effekt müşahidə olunmuşdur. Effektin izahı əsas bölünmə fraqmentinin spin oriyentasiyasının saxlanması və bu spin tərəfindən yaranan  $\gamma$ -kvantların bucaq anizotropiyasına (fraqmentin kütlə mərkəzində) əsaslanır. Bu izaha əsasən ikiqat bölünmədə bölünmə oxunun fırlanma bucağını ( $\delta$ ) təyin etmək mümkün olmuşdur. Bunu nəzərə alaraq bu işdə polyarlaşmış monoxromatik “isti” neytronların ( $E_n = 60$  meV) təsiri ilə  $^{235}\text{U}$  izotopunun bölünməsi zamanı yaranan ani  $\gamma$ -şüaların bucaq paylanmasına əsasən fırlanma effekti ölçülmüşdür. Ölçülmüş effektin işarəsini düzgün müəyyən etmək üçün, polyarlaşma vektorunun istiqaməti hədəf nöqtədə müəyyən edilmişdir. Bundan əlavə, bölünmə zamanı yaranan ani  $\gamma$ -şüaların bucaq paylanmasının uyğun nəticələrini nəzərə alaraq bölünmə oxunun fırlanma bucağının  $0.069^\circ \pm 0.008^\circ$ -ə bərabər olduğu təyin olunmuşdur. Fırlanma effektinin əldə edilmiş qiyməti və işarəsi soyuq neytronlar üçün alınan effektin nəticələri ilə uyğunlaşmışdır.

**Açar sözlər:** fırlanma bucağı, ROT effekt, neytron polarizasiyası, nüvə bölünməsi,  $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ , ani qamma şüalar, neytron, plastik ssintilyasiya detektoru, çoxsimli mütənəşib sayğac, spin flipper, bucaq korrelyasiyası

**PACS:** 85.60.Ha; 21.60.-n; 24.10.-i

### GİRİŞ

Üçqat bölünmədə  $\alpha$  zərrəciyin hərəkətinə fraqmentlərin elektrik sahəsi əhəmiyyətli dərəcədə təsir etdiyindən onun trayektoriyasının bölünmə oxu ilə birlikdə fırlanması müşahidə olunmuşdur [1-4].  $\alpha$  zərrəciyin sürəti fraqmentlərin sürətindən nəzərə çarpacaq dərəcədə yüksək olduğundan,  $\alpha$  zərrəcik nüvənin ilkin deformasiya oxuna nisbətən fraqmentlərin emissiya istiqamətində trayektoriyasını dəyişə bilmir. Yəni,  $\alpha$  zərrəcik fırlanır, lakin bölünmə oxundan daha yavaş (çox kiçik bucaq qədər) dönmür. Əgər bölünən nüvə polyarlaşmayıbsa, onda nüvənin fırlanması yalnız fraqmentlərin emissiya oxuna nisbətən  $\alpha$  zərrəciklərin bucaq paylanmasının müəyyən qədər azalmasına səbəb olur. Polyarlaşmış nüvə halında, neytronun polyarlaşması ilə müəyyən edilən fırlanma istiqaməti üstünlük təşkil edir. Fırlanma bucağının işarəsi  $\delta_{FF}$  bölünən nüvənin polyarlaşmasının əksi istiqamətlərində olacaqdır. Fırlanma effekti adlandırılan bu hadisə bölünən nüvənin polyarlaşmasından asılı olaraq bölünmə oxunun bu və ya digər istiqamətdə  $\alpha$  zərrəciklərin bucaq paylanmasına nisbətən fırlanması kimi müşahidə olunur.  $\alpha$  zərrəciyin qeyd edilmə bucağı təcrübə olaraq yüngül fraqmentin hərəkətinin son istiqamətində ölçüldüyündən, mürəkkəb nüvənin polyarlaşması ilə müşahidə edilən bucaq sürüşməsi bölünmə oxunun əyilmə bucağı ilə müqayisədə  $\alpha$  zərrəciyin gecikmə ( $\Delta$ ) bucağıdır [1-4]. Qeyd etmək lazımdır ki, təcrübədə biz birbaşa olaraq üçqat bölünmədə yaranan zərrəciyin bölünmə oxunun əyilməsinə nisbətən ikiqat gecikmə bucağını qeyd edə bilirik:  $2\Delta = 2(\theta - \theta') = 2(\delta_{FF} - \delta_a)$ . Üçqat bölünmədə bölünmə oxunun  $\delta_{FF}$  (ROT effektinin qiyməti) fırlanma bucağını təyin etmək üçün trayektoriya hesablamaları nəzərə alınmalıdır [4].  $\gamma$ -şüalar və neytronlar yüksüz olduğundan onların qeyd edilməsi ilə

ROT effektin öyrənilməsi zamanı trayektoriya hesablamalarına ehtiyac qalmır.

Ani  $\gamma$  şüalarının və neytronların bucaq paylanmasında ROT effekti öyrənmək üçün bir neçə alimlər tərəfindən təcrübələr aparılmışdır [5-10].  $^{233}\text{U}$  və  $^{235}\text{U}$  nüvələrinin polyarlaşmış soyuq neytronlar tərəfindən ikiqat bölünmədə ROT effekti eyni təcrübədə, şəraitdə və eyni vaxtda ölçülmüşdür [7]. Təcrübədə istifadə edilən hədəf eyni parametrlərə malik  $^{233}\text{U}$  və  $^{235}\text{U}$  izotoplardan ibarət “sendviç” şəklində tərtib edilmişdir. Məlum olmuşdur ki,  $^{233}\text{U}$  izotopunun ikiqat bölünməsi zamanı yaranan ani  $\gamma$  şüaların bucaq paylanmasında ROT effekt  $^{235}\text{U}$  izotopu üçün baş verən analoji effektdən fərqli işarəyə malikdir.  $\alpha$  zərrəcikləri üçün isə ROT effektin işarəsi bu nüvələr üçün eynidir. Bu uyğunsuzluqlar göstərir ki, ya qruplardan hər hansı birinin ölçmələrinin nəticələri kifayət qədər dəqiq deyil, ya da ROT effekt üçün təklif olunan model effekti tam təsvir edə bilmir və müxtəlif bölünmə sistemləri üçün effekti daha yaxşı təsvir edən başqa mexanizm var. ROT effektinin bölünməyə səbəb olan neytronların enerjisindən asılılığı qrupumuz tərəfindən tədqiq edilmişdir [9-10]. Bu işdə 60 meV enerjili polyarlaşmış monoxromatik neytronların təsiri ilə  $^{235}\text{U}$  izotopunun ikiqat bölünməsi zamanı bölünmə oxunun fırlanma bucağının qiyməti və işarəsi təyin edilmişdir.

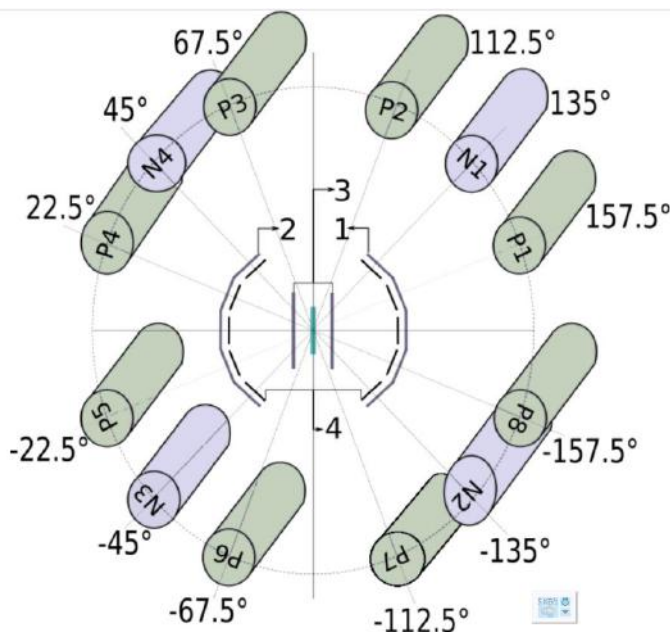
### EKSPERİMENTAL VƏ NƏZƏRİ HİSSƏ

Təcrübə Qarxinqdəki (Almaniya) Münhen Texniki Universitetinin Heinz Meyer-Leibniz tədqiqat neytron mənbəyində (FRM II reaktoru) aparılmışdır. Təcrübədə POLI difraktometrinin polyarlaşmış neytron selindən istifadə edilmişdir. POLI təcrübə qurğusunda [11-12] ikiqat fokuslu monoxromatorlardan və Cu-mozaiq və Si-super kristalından istifadə edilərək lazım

olan enerjili intensiv monoxromatik neytron selinin alınması mümkündür. Neytronlar  $^3\text{He}$  neytron spin filtrindən istifadə edilərək polarlaşdırılmışdır [13].

Təcrübədə istifadə edilən təcrübi qurğunun sxemi şəkil 1-də verilmişdir. Sistem qamma detektorlarla əha-

tə olunmuş ionlaşma kamerasından ibarətdir. İonlaşma kamerası  $\text{CF}_4$  qazı ilə 10 mbar təzyiqlə kimi doldurulmuşdur. Təcrübə zamanı ölçüləri  $40 \times 100 \text{ mm}^2$  olan alüminium altlıq üzərinə 82 mg  $^{235}\text{U}$  (99.99%) çökdürülmüş mənbədən istifadə edilmişdir.



Şəkil 1. Neytron seli istiqamətindən təcrübi qurğunun sxemi.

Bölmə məhsullarını qeyd etmək üçün aşağı təzyiqli nazik çoxsimli mütənasib sayğacdən istifadə edilmişdir. Sayğac mənbənin hər iki tərəfində yerləşdirilmişdir. Başlanğıc “start” detektor kimi istifadə olunan sayğac mənbədən 3 sm, dayandırıcı “stop” detektor kimi istifadə olunan sayğac isə 11 sm məsafədə yerləşdirilmişdir. Mütənasib sayğacla həm də bölmə məhsullarının sürətini (momentini) ölçmək üçün istifadə olunmuşdur. Mənbədən 30 sm məsafədə yerləşdirilmiş 8 ədəd silindirik plastik ssintilyatorlar, bölmə zamanı bölmə məhsulları ilə eyni anda  $\pm 22.5$ ,  $\pm 67.5$ ,  $\pm 112.5$  and  $\pm 157.5$  dərəcə bucaq altında buraxılan qamma şüaları və neytronları qeyd etməyə imkan verir. Qamma detektorlar və sayğacla mənbənin üzərinə düşən neytron selinə ortoqonal yerləşdirilmişdir. Neytronları  $\gamma$ -kvantlardan ayırmaq üçün müxtəlif metodlardan [14-15] istifadə edilsə də bu təcrübədə uçuş müddətinə görə ayırma metodundan istifadə edilmişdir.

Eksperimentdə dayanma detektorunun on seqmentinin hər birindən alınan impuls səkiz müstəqil plastik detektordan gələn uyğun impuls bölmə fraqmentləri və  $\gamma$  detektorların oxları arasında 16 müxtəlif bucaq əmələ gətirir:

$$\theta = Pl_{ang} - FF_{ang} \quad (1)$$

burada  $FF_{ang}$  və  $Pl_{ang}$  müvafiq olaraq bölmə fraqmentinin dayanma detektoru və plastik  $\gamma$ -detektorlarının seqmentlərinin bucaq mövqələridir.

Neytron polarlaşmasının iki əks istiqamətində detektorlar arasında seçilmiş bucaq üçün  $\gamma$ -şüaların sayılma sürətlərini müvafiq olaraq  $N^+(\theta)$  və  $N^-(\theta)$  kimi ifadə edərək, asimmetriyanı aşağıdakı kimi ifadə edə bilərik:

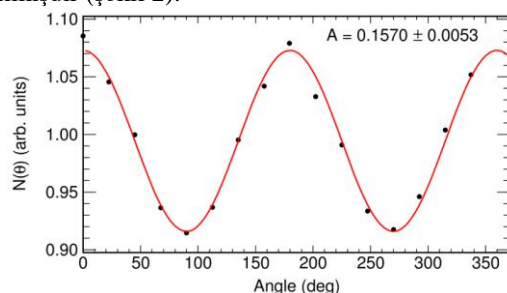
$$D(\theta) = (N^+(\theta) - N^-(\theta)) / (N^+(\theta) + N^-(\theta)) \quad (2)$$

burada,  $N^+(\theta)$ - spin seli istiqamətinə paralel (sağ polarlaşma) və  $N^-(\theta)$ - isə spin seli istiqamətinə antiparalel olan hala uyğundur (sol polarlaşma).

Bəzi müəlliflərə əsasən ROT effekt bölmə fraqmentlərinin böyük fırlanma momenti ilə güclü deformasiyaya uğramış bölmə sisteminin qırılma prosesi ilə birbaşa bağlıdır. Bölmə fraqmentinin simetriya oxuna perpendikulyar yönəlmiş bu momentlər  $\gamma$ -kvantların emissiya zamanına qədər ( $10^{-14}$ s) saxlanılır və nəticədə  $\gamma$ -kvantların emissiyasının bölmə oxuna nəzərən məlum olan bucaqlar üzrə anizotropiyası yaranır:

$$N(\theta) \sim 1 + A \cos^2(\theta), \quad (3)$$

burada  $A$ - fraqmentlərin böyük fırlanma momentinə uyğun gələn bucaq anizotropiya əmsəlidir. Bu əmsal eyni  $\gamma$ -kvant enerji intervalına və detektorların eyni həndəsi konfigurasiyasına uyğun gəlir ki, bu da ani  $\gamma$ -kvantların müşahidəsi ilə ROT effekt üçün istifadə edilmişdir (şəkil 2).



Şəkil 2. Bölmə oxuna nəzərən  $\gamma$ -şüaların bucaq paylanması

(2) və (3) ifadələrindən istifadə edərək, bəzi sadə çevrilmələrdən sonra ROT asimetriya üçün aşağıdakı düstur əldə edilmişdir:

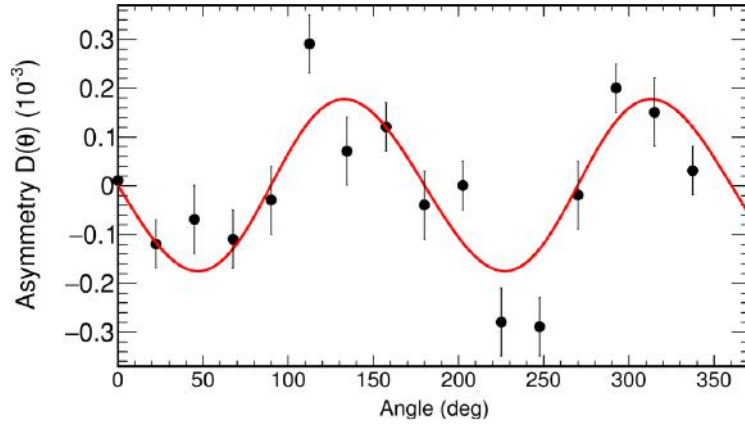
$$D(\theta) \approx -A\delta_{FF} \sin(2\theta) / (1 + A \cos^2\theta), \quad (4)$$

İkiqat bölünmədə buraxılan ani  $\gamma$ -kvantların bucaq paylanmasını (4) düsturu ilə interpolyasiya etməklə anizotropiya əmsalının  $A=0.1570\pm 0.0053$  olduğu müəy-

yən edilmişdir. Şəkil 3-də bucağa görə paylanmanın aşağıdakı funksiya ilə aproksimasiyası göstərilmişdir:

$$D(\theta) = R_\gamma \sin(2\theta), \quad (5)$$

burada  $R_\gamma$ -asimetriya əmsalıdır.  $^{235}\text{U}$  izotopunun polyarlaşmış "isti" neytronlar tərəfindən bölünməsindən ani  $\gamma$ - kvantlar üçün asimetriya əmsalının  $R_\gamma = -(17.3 \pm 2.8) \times 10^{-5}$  olduğu təyin edilmişdir (şəkil 3).



Şəkil 3. D asimetriya nisbətinin bucaqdan asılılığı.

(4) və (5) ifadələrini müqayisə edərək  $\delta_{FF} = -R_\gamma(1 + A \cos^2\theta)/A$  yazmaq olar. Bu bucaq  $\gamma$ -kvantların bucaq paylanmasına uyğun gələn bucaq sürüşməsini göstərən iki qat bölünmədə bölünmə oxunun fırlanmasını xarakterizə edir. Nəhayət,  $\gamma$ -kvantlarının sonrakı emissiyası üçün  $^{235}\text{U}$  izotopunun ikiqat bölünməsi üçün fırlanma bucağının  $\delta_{FF} = 0.069^\circ \pm 0.008^\circ$  bərabər olduğu tapılmışdır.

## NƏTİCƏLƏR

$^{235}\text{U}$  izotopunun 60 meV enerjili polyarlaşmış neytronların təsiri ilə iki qat bölünməsi zamanı buraxılan  $\gamma$ -kvantların bucaq paylanmasına görə bölünmə oxunun fırlanma bucağı ( $\delta_{FF} = 0.069^\circ \pm 0.008^\circ$ ) təyin olunmuşdur. Alınan nəticə istilik neytronlarının təsiri ilə  $^{235}\text{U}$  izotopu üçün alınmış  $\delta_{FF} = 0.103^\circ \pm 0.028^\circ$  nəticəsi ilə müqayisə edilə bilər. Buradan belə nəticə çıxır ki, effekt istilik neytronlarının təsiri ilə baş verən

bölünmə ilə müqayisədə kiçik olmasına baxmayaraq, nəticələr xətlər daxilində üst-üstə düşür. İkiqat bölünmədə əldə edilən fırlanma bucağı üçqat bölünmə üçün bölünmə oxunun fırlanma bucağı ilə də müqayisə oluna bilər:  $\delta_{FF}(TF) = 0.18^\circ \pm 0.02^\circ$ . Demək olar ki, üçvə ikiqat bölünmədə bölünmə oxunun hər iki fırlanma bucağı eyni işarəyə malikdir və ikiqat bölünmə halında bucağın mütləq qiyməti kiçikdir. Bu nəticə, bu iki hal üçün fərqli qırılma konfigurasiyasının göstəricisi ola bilər ki, bu da fraqmentlərin müxtəlif orta ətalət momentləri ilə əlaqədardır.

Aparılan işlər Azərbaycan Respublikasının Prezidenti yanında Elmin İnkişafı Fondunun № EIF—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] F. Goennenwein, M. Mutterer, A. Gagarski et al.. Phys. Lett., 2007, B 652, 13.
- [2] P. Jesinger, G.V. Danilyan, A. Gagarski et al.. Phys. Atom. Nucl., 1999, 62, 1608.
- [3] P. Jesinger, A. Kötzle, A. Gagarski et al.. Nucl. Instrum. Meth., 2000, A 440, 618.
- [4] A. Gagarski, F. Gönnerwein, I. Guseva et al.. Phys. Rev., 2016, C 93, 054619.
- [5] G.V. Danilyan, J. Klenke, V.A. Krakhotin et al.. Phys. At. Nucl., 2009, 72, 1812.
- [6] G.V. Danilyan, J. Klenke, V.A. Krakhotin et al.. Phys. At. Nucl., 2011, 74, 671.
- [7] G.V. Danilyan, J. Klenke, Yu. Kopatch et al.. Phys. At. Nucl., 2014, 77, 677.
- [8] G.V. Valsky, A.M. Gagarski, I.S. Guseva et al.. Bull. Russ. Acad. Sci. Phys., 2010, 201074, 767.
- [9] D. Berikov, G. Ahmadov, Yu. Kopatch, et al.. Phys. Rev., 2021, C 104, 024607.
- [10] Yu. Kopatch, V. Novitsky, G. Ahmadov et al.. EPJ Web Conf. 2-18, 169, 00010.
- [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] D. Berikov, V. Hutanu, Yu. Kopatch et al.. J. Instrum. 2020, 15, P01014.
- [14] R. A. Akbarov, G. S. Ahmadov, F. I. Ahmadov et al.. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, vol. 936, pp. 549-551, 2019.
- [15] D.V. Berikov, et al.. Вестник. Серия Физическая (ВКФ), [S.I.], 2019, v. 71, n. 4, p. 29-34.

Q.S. ƏHMƏDOV

G.S. Ahmadov

### **DETERMINATION OF THE ROTATION ANGLE IN THE $^{235}\text{U}(n, f)$ REACTION INDUCED BY 60 meV POLARIZED NEUTRONS**

A similar effect was observed for  $\gamma$ -quanta in binary fission after observing the ROT effect for ternary fission particles (charged particles) formed in the  $^{235}\text{U}(n, f)$  reaction induced by polarized cold neutrons. The explanation of this effect is based on maintaining the spin orientation of the main fission fragment and the angular anisotropy of the  $\gamma$ -quanta generated by the spin (fragment center of mass). Based on this explanation, it is possible to determine the angle of rotation  $\delta$  of the fission axis in binary fission. This work presents the results obtained for the effect of rotation (ROT) in the angular distribution of prompt  $\gamma$  rays from the fission of  $^{235}\text{U}$  induced by monochromatic polarized "warm" neutrons ( $E_n = 60$  meV). The polarization vector direction is determined at the target position in order to correctly determine the sign of the measured effect. Moreover, the rotation angle of the fission axis was determined to be equal to  $0.069^\circ \pm 0.008^\circ$  taking into account the fit results of the angular distribution of the prompt fission  $\gamma$  rays. The obtained value and sign of the ROT effect are consistent with the results of the ROT effect obtained for cold neutrons.

Г.С. Ахмедов

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛА ПОВОРОТА В РЕАКЦИИ $^{235}\text{U}(n, f)$ ИНДУЦИРОВАННОЙ ПОЛЯРИЗОВАННЫМИ НЕЙТРОНАМИ С ЭНЕРГИЕЙ 60 мэВ**

Аналогичный эффект наблюдался для  $\gamma$ -квантов в бинарном делении после наблюдения ROT-эффекта для частиц тройного деления (заряженных частиц), образующихся в реакции  $^{235}\text{U}(n, f)$ , индуцированной холодными поляризованными нейтронами. Объяснение этого эффекта основано на сохранении ориентации спина основного осколка деления и угловой анизотропии  $\gamma$ -квантов, генерируемых спином (центр масс осколка). На основе этого объяснения можно определить угол поворота  $\delta$  оси деления при бинарном делении. Представлены результаты, полученные для эффекта вращения (ROT) в угловом распределении мгновенных  $\gamma$ -квантов от деления  $^{235}\text{U}$ , индуцированного монохроматическими поляризованными «теплыми» нейтронами ( $E_n = 60$  мэВ). Направление вектора поляризации определяется в целевой позиции, чтобы правильно определить знак измеряемого эффекта. Кроме того, угол поворота оси деления был определен равным  $0.069^\circ \pm 0.008^\circ$  с учетом результатов аппроксимации углового распределения мгновенных  $\gamma$ -квантов деления. Полученная величина и знак эффекта ROT согласуются с результатами эффекта ROT, полученными для холодных нейтронов.

*Qəbul olunma tarixi: 13.05.2022*