

AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASI

Əlyazması hüququnda

QEYRİ-STABİL NÜVƏLƏRİN BÖLÜNMƏSİ ZAMANI BAŞ VERƏN NADİR NÜVƏ PROSESLƏRİNİN TƏDQIQI

İxtisas: 2207.01 - Atom və nüvə fizikası

Elm sahəsi: Fizika

İddiaçı: **Qadir Səttar oğlu Əhmədov**

Elmlər doktoru dərəcəsi almaq üçün təqdim edilmiş dissertasiyanın

AVTOREFERATI

Bakı-2024

Dissertasiya işi Azərbaycan Respublikası Nəqliyyat, Rabitə və Yüksək Texnologiyalar Nazirliyi tabeliyində "Milli Nüvə Tədqiqatları Mərkəzi" Qapalı Səhmdar Cəmiyyədə yerinə yetirilmişdir.

Elmi məsləhətçilər: Akademik
Adil Abdullxaliq oğlu Qəribov
Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru
Zirəddin Yaqub oğlu Sadıqov

Rəsmi opponetlər: Akademik
fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor
Cavad Şahvələd oğlu Abdinov
Fizika elmləri doktoru
Anar Canməmməd oğlu Rüstəmov
Fizika elmləri doktoru, professor
Mirteymur Mirkazım oğlu Mirabutalıbov
Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor
Sərhəddin Qubəddin oğlu Abdullayev

Azərbaycan Respublikasının Prezidenti yanında Ali Attestasiya Komissiyasının Azərbaycan Respublikası Elm və Təhsil Nazirliyinin Radiasiya Problemləri İnstitutu nəzdində fəaliyyət göstərən BED 1.21 Dissertasiya şurası

Dissertasiya şurasının sədri: AMEA-nın müxbir üzvü
fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor
Oqtay Əbil oğlu Səmədov

Dissertasiya şurasının elmi katibi: fizika üzrə fəlsəfə doktoru, dosent
Günəli Tələt qızı İmanova

Elmi seminarın sədri: AMEA-nın müxbir üzvü
fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor
Oktay Kazım oğlu Qasımov

İŞİN ÜMUMİ XARAKTERİSTİKASI

Mövzunun aktuallığı və işlənmə dərəcəsi. Ağır nüvələrin bölünməsi ən mürəkkəb nüvə reaksiyalarından biri olduğundan kəşf edilən dövrdən indiyə qədər geniş tətbiq sahəsi tapmasına baxmayaraq bu proseslər haqqında anlayışımızda və təklif olunan modellərdə hələ də çoxlu boşluqlar mövcuddur. Bu prosesləri tədqiq etmək yalnız əsas bölünmə fraqmentlərini tədqiq etməkdən ibarət olmayıb, ilkin nüvənin halından başlayaraq müxtəlif hallardan keçərək baş verən bölünmə prosesinin müxtəlif hallarını öyrənmək də nüvə fizikasının əsas tədqiqat sahələrindən biridir. Nüvənin bölünmə yolunda dinamikasını öyrənmək mürəkkəb məsələlərdən biri olduğundan illərdir davam edən tədqiqatlara baxmayaraq prosesi tam xarakterizə etmək üçün qismən tədqiq olunmuş proseslərlə yanaşı hələ də tədqiq olunmalı proseslər qalmaqdadır. Bölünmə prosesi zamanı zərrəciklərin emissiyası iki mərhələyə bölünə bilər: birinci mərhələdə zərrəciklər bölünmə nöqtəsinə gedərkən isti mürəkkəb nüvədən emissiya oluna bilər, ikinci mərhələdə isə hər bir bölünmə fraqmenti zərrəciklərin emissiyası ilə soyuya bilər. Çox qısa zaman ərzində ($\sim 10^{-21}$ s) baş verən bölünmə proseslərində bölünmənin müxtəlif mərhələlərini tədqiq etmək üçün əsas fraqmentlərin xassələrinin tədqiq olunması kifayət deyil. Bu mərhələlər birbaşa ölçmələr üçün əlçatmaz olduğundan bu zaman emissiya olunan bölünmə məhsullarını və onların müxtəlif korrelyasiyalarını qeyd etməklə belə konfigurasiyaları və formaları tədqiq etmək mümkündür. Başqa sözlə desək əsas bölünmə fraqmentlərinin xassələrindən (kütləyə və yükə görə paylanması və onların çıxımı) başqa qırılma anında və ondan dərhal sonra emissiya olunan qamma şüaların, neytronların və yüklü zərrəciklərin xassələrinin öyrənilməsi vacibdir.

Üçqat bölünmə prosesini tədqiq etmək üçün yaranan yüklü zərrəciklərin çıxımını və enerji spektrlərinin ölçülməsi ilə yanaşı üç cisim bölünməsinin tam kinematik təsvirinə nail olmaq məqsədi ilə üçqat zərrəciklər və bölünmə fraqmentləri arasında bucaq və enerji korrelyasiyalarının öyrənilməsi üzrə tədqiqatlar aparılmışdır. Müxtəlif spontan və təsir ilə bölünən aktinoidlər üçün müxtəlif üçqat

zərrəciklərin enerji spektrləri və çıxımları müxtəlif müəlliflər tərəfindən tədqiq edilmişdir. Bir sıra tədqiqatların aparılmasına baxmayaraq qeydetmə sistemlərinin məhdud imkanlarına görə heç bir təcrübədə geniş zərrəcik oblastında və yüksək statistik təcrübələr aparılmamışdır. Əsasən də alfa zərrəciklərdən yüngül zərrəciklərin xassələri sual olaraq qalmaqdadır. Bundan əlavə aparılan təcrübələrdə standart detektorlar istifadə edildiyindən müxtəlif həyəcanlanma hallarından parçalanan zərrəciklərin xassələri öyrənilməmişdir.

Nadir nüvə prosesləri bölünmə anında fırlanan nüvənin tədqiqi üçün də istifadə edilə bilər. Neytron spin çevirmə metodunu tətbiq etməklə üçqat α -zərrəciklərin emissiyasında indiyədək məlum olmayan asimmetriya müşahidə edilmişdir. "ROT" effekt (ingiliscə: rotation of fission axis) adlandırılan bu hadisə bölünmə oxunun polyarlaşmış neytronların spininə perpendikulyar müstəvidə dönməsi kimi izah edilmişdir. ^{233}U nüvəsinin üçqat α -zərrəciklərinin polyarlaşmış neytronlar tərəfindən bucaq paylanmasında ROT effekt üçün ^{235}U nüvəsi ilə müqayisədə eyni işarə alınsa da effektin qiyməti daha kiçik olmuşdur. Üçqat bölünmədə bölünən nüvənin fırlanma təsirinin təsviri ona görə çətinləşir ki, bölünən nüvənin təxminən bölünmə anında emissiya olunan α -zərrəcik də orbital impuls əldə edir. Bundan əlavə, onun hərəkətinə uçan fragmentlərin elektrik sahəsi əhəmiyyətli dərəcədə təsir göstərir. Ona görə də üçqat bölünmədə ROT effekti model parametrləri və trayektoriya hesablamaları olmadan klassik yaxınlaşmada təsvir etmək çətindir. Mövcud kvant modelləri ROT effektin mövcudluğunu izah edir, lakin onun qiymətini izah edə bilmir. Oxşar effektin digər bölünmə məhsullarının (qamma şüalar və ya neytronlar) bucaq paylanmasında da ölçülməsi model parametrlərindən və trayektoriya hesablamalarından azad olmağa gətirib çıxara bilər və onun nəzəri təsviri daha sadələşər.

Polyarlaşmış soyuq neytronların təsiri ilə ^{233}U və ^{235}U nüvələrin ikiqat bölünməsində ani qamma kvantların və neytronların bucaq paylanmasında da ROT effekt müşahidə olunmuşdur. Bu halda ölçülən ROT effektin üçqat bölünmədə α -zərrəciklərin emissiyası zamanı alınan ROT effektin qiymətindən kiçik olmuşdur. Bundan əlavə, iki uran izotopu üçün alınan ROT asimmetriyanın işarələrinin

əks olduğu aşkar edilmişdir. Müasir modellərə görə hər hansı bölünmə məhsullarının, o cümlədən üçqat bölünmədə emissiya olunan α -zərrəciklərinin bucağa görə paylanmasında ROT effektin işarələri üst-üstə düşməlidir. İşarədə aşkar edilmiş uyğunsuzluqlar göstərir ki, ya təcrübələrin nəticələri kifayət qədər düzgün deyil, ya da ROT effekti izah etmək üçün təklif olunan model doğru deyil və müxtəlif bölünmə sistemləri üçün effektin belə baş verməsinə səbəb olan başqa bir mexanizm var. Hal-hazırda əsas suallardan biri iki çox oxşar uran izotopu (^{233}U və ^{235}U) üçün ani gamma şüaların və neytronların bucağa görə paylanmasında ROT asimetriyanın işarələrinin nə üçün fərqli olmasını araşdırmaqdır. Bəzi müəlliflərə görə bu fərqi səbəbi qonşu neytron rezonanslarına müdaxilə edən müxtəlif faza amilləridir. Hər halda bu məsələyə aydınlıq gətirmək vacib görünür. Aydındır ki, bu suala cavab verməyin yolu, ROT effektin müxtəlif enerjili polyarlaşmış neytronların təsiri ilə baş verən bölünmədə ölçülməsidir. Bu asılılığın tədqiqi nüvənin polyarlaşmasının fraqmentlərin fırlanma momentinə keçməsi kimi bölünmə mexanizmini anlamağa kömək edə bilər. Hazırda ROT effekti təsvir edə bilən bir neçə nəzəri model mövcuddur. Bu modellər ROT effekti təsvir etmək üçün iki əsas fərqli yanaşmadan istifadə edir: klassik və kvant. Klassik modeldə üçqat bölünmə prosesini iki ardıcıl mərhələyə bölmək mümkün olmadığından trayektoriya hesablamalarından istifadə edilir. Kvant yaxınlaşması isə ROT effekti izah etsə də başlanğıc qiymətlərin çatışmazlığı çətinliklər yaradır. Bəzi təklif olunan modellərə görə ROT effektin qiyməti A. Bor tərəfindən təqdim edilən bölünmə kanallarını xarakterizə edən J və K kvant ədədlərindən (fırlanma momenti və onun deformasiya oxu üzrə proyeksiyası) asılıdır. İndiyədək bir neçə bölünmə kanalının naməlum çəkilərlə qarışdırıldığı zaman soyuq polyarlaşmış neytronlarla bölünmədə effekt tədqiq olunmuşdur. Müxtəlif enerjili polyarlaşmış neytron enerjilərində aparılacaq ölçmələr müxtəlif spin vəziyyətlərini aydınlaşdırmağa və əldə etməyə imkan verəcəkdir. Bundan əlavə, mürəkkəb nüvənin rezonans vəziyyətlərində ROT effektinin ölçülməsi xüsusi maraq doğurur. Əgər həqiqətən də ROT effekt J=3 və J=4 hallarına uyğun gələn en kəsikdən asılıdırsa $^{236}\text{U}^*$ üçün spinlə ayrılmış bölünmə

kəsiyinə əsasən birinci təcrüd olunmuş rezonans mövqeyində udma en kəsiyinin spindən asılı töhfəsi işarəni dəyişməli və ya effekt kəskin azalmalıdır.

Dissertasiya işində fraqmentlərin və bölünmə məhsullarının xüsusiyyətləri arasında korrelyasiyaları və bölünmə məhsullarının emissiyasının müxtəlif xassələri tədqiq edilərək yuxarıda qeyd edilmiş məsələlər geniş tədqiq olunaraq izah edilmiş və kəsilmə nöqtəsində bölünmənin dinamikasını izah etmək üçün mühüm nəticələr alınmışdır.

Tədqiqat obyektı və predmeti. 99.99% zənginləşdirilmiş 10 və 500 kBk aktivlikli ^{252}Cf spontan və 99.99% zənginləşdirilmişdir 80 mg kütləli $^{235}\text{U}_2\text{O}_3$ mənbələri və bu mənbələrin spontan və müxtəlif enerjili neytronların təsiri ilə bölünməsi zamanı baş verən bölünmə prosesləri və effektləri, bu zaman yüklü zərrəciklərin, ani γ -kvantların və neytronların bucaq korrelyasiyası, bu korrelyasiyalarda baş verən asimmetriyalardır.

Tədqiqatın məqsəd və vəzifələri. ^{252}Cf və ^{235}U nüvələrinin spontan və təsirlə bölünməsi zamanı bölünmə məhsullarının bucaq paylanmalarının, anizotropiyalarının, enerji paylanmalarının və çıxımlarının tədqiq edilməsi ilə bölünmə anında bölünmənin dinamikasının öyrənilməsidir.

Qarşıya qoyulan məqsədə çatmaq üçün aşağıdakı məsələlərin həlli nəzərdə tutulmuşdur:

- Yüklü zərrəcikləri qeyd etmək üçün koordinata həssas çox-funksiyalı ΔE -E yüklü zərrəcik teleskoplarının və onlar əsasında qeydetmə sistemin işlənilib hazırlanması;
- Polyarlaşmış neytronların spininin istiqamətinin idarə edilməsi üçün spin-flipper qurğusunun hazırlanması;
- Qeyd-etmə sisteminin effektivliyinin artırılması üçün 10 sektorlu koordinata həssas çox simli mütənasib sayğacın işlənilib hazırlanması;
- ROT effektin tədqiqi üçün ssintilyasiya və fraqment detektorlarından ibarət qeydetmə sisteminin işlənilib hazırlanması;

- Çoxfunksiyalı və cəld sinxronlaşdırma sisteminin hazırlanması;
- Nəticələrin analizi üçün çox alqoritmlı analiz proqramının yazılması;
- ^{252}Cf nüvəsinin bölünməsi zamanı üçqat bölünmə prosesinin tədqiqi;
- ^{252}Cf nüvəsinin bölünməsi zamanı dördqat bölünmə prosesinin tədqiqi;
- 4 meV, 60 meV və 270 meV enerjili neytronların təsiri ilə ^{235}U nüvəsinin bölünməsi zamanı ani qamma şüalar və neytronlar üçün bucaq paylanmalarının ölçülməsi;
- 4 meV, 60 meV və 270 meV enerjili polyarlaşmış neytronların təsiri ilə ^{235}U nüvəsinin bölünməsi zamanı ani qamma şüalar və neytronlar üçün ROT asimetriyaların ölçülməsi;
- 4 meV, 60 meV və 270 meV enerjili polyarlaşmış neytronların təsiri ilə ^{235}U nüvəsinin bölünməsi zamanı ani qamma şüalar və neytronlar üçün fırlanma bucağının təyini;
- ROT effektin polyarlaşmış neytronların enerjisindən asılılığının tədqiqi;
- ROT effektin izahı üçün modelin işlənməsi;

Tədqiqat metodları. Tədqiqatlarda bölünmə məhsullarını qeyd etmək üçün çox sektorlu çox-simli mütənasib saygac, ssintiyasiya detektorları və silisium əsaslı piksellı detektordan istifadə edilməklə $\Delta E-E$ və uçuş müddəti metodlarından və neytronların polyarlaşdırılması üçün ^3He əsaslı spin filtrlərdən, ^3He qazının polyarizasiyasını saxlamaq üçün yüksək maqnit nüfuzluq metalından hazırlanmış yüksək bircins maqnit sahəsinə malik maqnitostatik ekranlarından və neytronların polyarlaşma istiqamətini idarə etmək üçün maqnit qoruyucusuna malik flipper qurğularından istifadə edilmişdir.

Müəfiyyə çıxarılan əsas elmi müddəalar aşağıdakılardan ibarətdir:

– ^{252}Cf nüvəsinin spontan bölünməsi zamanı üçqat bölünmə zərrəciklərinin enerjilərinin və çıxımlarının təyini;

- ^{252}Cf nüvəsinin spontan bölünməsi zamanı dördqat bölünmə zərrəciklərinin enerjilərinin və çıxımlarının təyini;
- 4 meV, 60 meV və 270 meV enerjili neytronların təsiri ilə ^{235}U nüvəsinin bölünməsi zamanı ani qamma şüalar və neytronlar üçün bucağa görə paylanma spektrlərinin ölçülməsi;
- 4 meV, 60 meV və 270 meV enerjili neytronların təsiri ilə ^{235}U nüvəsinin bölünməsi zamanı ani qamma şüalar və neytronlar üçün ROT asimetriya əmsalının təyini;
- 4 meV, 60 meV və 270 meV enerjili neytronların təsiri ilə ^{235}U nüvəsinin bölünməsi zamanı ani qamma şüalar üçün bölünmənin fırlanma bucağının təyini;
- Bölünmə oxunun dönmə bucağının (ROT effekt) polyarlaşmış neytronların enerjisindən asılılığının öyrənilməsi;
- ROT effektin izahı üçün fiziki modelin verilməsi;
- Yüklü zərrəcikləri qeyd etmək üçün koordinata həssas çox-funksiyalı qeydetmə sisteminin və uyğun çox-funksiyalı cəld sinxronizasiya sisteminin hazırlanması;
- ROT effektin tədqiqi üçün ssintilyasiya detektorlarından və çox sektorlu koordinata həssas mütənasib sayğacdən ibarət qeydetmə sisteminin hazırlanması;
- Polyarlaşmış neytronların spininin istiqamətinin idarə edilməsi üçün spin-flipper qurğusunun və polyarlaşma dərəcəsini qorumaq üçün kənar maqnit sahələrinin mövcudluğunda istiqamətləndirici sahənin dayanıqlığını təmin edən μ -metaldən ibarət maqnit ekranların hazırlanması;

Tədqiqat elmi yeniliklər aşağıdakılardan ibarətdir:

- ^{252}Cf nüvəsinin spontan bölünməsi zamanı sıra nömrəsi $Z=1\div 5$ intervalında olan üçqat bölünmə zərrəciklərinin enerjiləri 8.6(2) \div 32(4) MeV, çıxımları isə ikiqat bölünməyə nəzərən $5.54(1.17)\cdot 10^{-6}\div 3.82(7)\cdot 10^{-3}$ intervalında olub ən çox ehtimala malik alfa zərrəciklərin emissiya bucağı $84(2)^0$ təyin edilmişdir. Alınan təcrübi nəticələrə və mövcud olan modellərə əsasən bu zərrəciklərin bölünmə anında yarandığı və əsas bölünmə fraqmentlərinin Kulon qarşılıqlı təsiri nəticəsində yüngül fraqmentə nəzərən emissiya meyli müşahidə edilir.

–²⁵²Cf nüvəsinin spontan bölünməsi zamanı həqiqi dördqat bölünmə prosesində yarıdan (α , α) cütlərinin enerjilərinin 14.3(9) MeV, çıxımlarının isə $0.6(2) \cdot 10^{-6}$ təyin edilməklə belə bölünmənin ehtimalının üçqat bölünməyə nəzərən daha az olduğu göstərilmişdir.

–“Psevdo” dördqat bölünmə zamanı yaranan (α , α) və (α , t) cütləri arasında bucaqlar simulyasiya edilməklə və təcrübi təyin olunmaqla bu cütləri yarıdan əsasən enerji səviyyəsi 0.092 MeV olan əsas və 3.04 MeV birinci həyəcanlanmış hallarda dayanıqsız olan ⁸Be nüvəsinin və ikinci enerji səviyyəsi 2.16 MeV olan dayanıqsız ⁷Li izotopunun parçalanmasından yarandığı təyin edilmiş, onların cəm enerjiləri uyğun olaraq 22.76(90) MeV, 23.46(25) MeV, 19.25(34) MeV, ikiqat bölünməyə nəzərən çıxımları isə $7.1(9) \cdot 10^{-6}$, $0.8(2) \cdot 10^{-6}$, $0.2(1) \cdot 10^{-6}$ təyin edilmişdir. Bu o deməkdir ki, dörd fraqmentin qeyd edilməsi kimi müşahidə olunan bu bölünmə prosesi dolayı yolla baş verir.

–Nadir nüvə proseslərini tədqiq etmək üçün eyni zamanda enerji, koordinat, zaman və zərrəciklərin növü haqqında məlumat almağa və 10 ns zaman dəqiqliyi ilə sistemi sinxronlaşdırmağa imkan verən qeydetmə sistemi işlənib hazırlanmışdır. Qeydetmə sisteminin enerji ayırdetməsi 5 MeV alfa zərrəciklər üçün 1%, koordinata görə həssaslığı 10 μ m, zamana görə ayırdetməsi 10 ns, identifikasiya gücü isə protondan karbona kimi yüklü zərrəcikəri və izotopları ayırdetməyə imkan vermişdir.

–4 meV, 60 meV və 270 meV enerjili neytronların təsiri ilə ²³⁵U nüvəsinin bölünməsi zamanı ani qamma şüalar üçün anizotropiya əmsalının enerjidən asılı olaraq dəyişmədiyi və onun orta qiymətinin $A=0.156(9)$ bərabər olması fırlanma momentinə malik həyəcanlanmış nüvədən qamma şüaların emissiyasının izotrop olmadığı və bölünmə oxu itiqamətində emissiyanın üstünlük təşkil etdiyi məlum olmuşdur.

–4 meV enerjili polyarlaşmış neytronların təsiri ilə ²³⁵U nüvəsinin bölünməsi zamanı ani qamma şüalar üçün ROT asimmetriya əmsalı uyğun olaraq $R_\gamma = -17.9(1.6) \cdot 10^{-5}$ təyin edilmişdir. Asimmetriyanın qiymətinin yüksək olması bu neytron enerjisində $J=4$ halına uyğun gələn parsial bölünmə en kəsiyinin ($\sigma=960$ barn) $J=3$ halına uyğun gələn en kəsikdək ($\sigma=550$ barn) böyük olması yəni,

bölünmənin $J=4$ halına uyğun gələn kanallardan daha çox baş verməsi ilə izah olunur.

–60 meV enerjili polyarlaşmış neytronların təsiri ilə ^{235}U nüvəsinin bölünməsi zamanı ani qamma şüalar üçün ROT asimetriya əmsalının uyğun olaraq $R_\gamma = -17.2(2.8) \cdot 10^{-5}$ təyin edilmişdir. Bu enerjiddə parisal bölünmə en kəsikləri azalsa da onların nisbəti dəyişmədiyindən 4 meV enerjili polyarlaşmış neytronlarla alınmış nəticə ilə müqayisədə asimetriya dəyişir. Başqa sözlə bu neytron enerjisində $J=4$ halına uyğun gələn parsial bölünmə en kəsiyinin ($\sigma=225$ barn) $J=3$ halına uyğun gələn en kəsikdək ($\sigma=105$ barn) böyük olması yəni, bölünmənin $J=4$ halına uyğun gələn kanallardan daha çox baş verməsi ilə izah olunur.

–270 meV enerjili polyarlaşmış neytronların təsiri ilə ^{235}U nüvəsinin bölünməsi zamanı ani qamma şüalar üçün təyin edilmiş ROT asimetriya əmsalının qiymətinin $R_\gamma = -5.2(2.5) \cdot 10^{-5}$ digər enerjilərlə müqayisədə xətlər daxilində təqribən 2 dəfə kiçik alınması $J=3$ və $J=4$ halına uyğun gələn en kəsiklərinin təqribən bərabər $\sigma(J=3) = 93$ barn və $\sigma(J=4) = 88$ barn ilə izah edilmişdir.

–4 meV, 60 meV və 270 meV enerjili polyarlaşmış neytronların təsiri ilə ^{235}U nüvəsinin bölünməsi zamanı ani qamma şüaların bucaq asimetriyasına görə bölünmə oxunun fraqmentlərin uçuş istiqamətinə nəzərən uyğun olaraq $\delta=0.103(28)^0$, $\delta=0.069(8)^0$, $\delta=0.021(9)^0$ bucağı qədər döndüyü və müsbət olduğu aşkar edilmişdir. İlk dəfə təcrübi olaraq müəyyən edilmişdir ki, indiksiya edici neytronların enerjisindən asılı olaraq ROT effektin işarəsi dəyişir, mürəkkəb trayektoriya hesablamalarından asılı olmayaraq təyin edilmiş qiyməti isə azalır. Azalmanın səbəbi verilmiş neytron enerjisində diferensial bölünmə en kəsiklərinin nisbətinin ($\sigma_f(J_+)/\sigma_f(J_-)$) enerjiddən asılı olaraq azalması və yaranan fırlanan mürəkkəb nüvə sisteminin neytronun polyarizasiya oxu ətrafında “saat əqrəbi” istiqamətində effektiv fırlanma tezliyinin “+” işarəyə malik olması və verilmiş neytron enerjisində $\sigma_f(J_+)$ diferensial bölünmə en kəsiyinin $\sigma_f(J_-)$ en kəsiyindən böyük olmasıdır.

–Ani qamma şüaların emissiyası zamanı baş verən ROT effektin izahı üçün model təklif edilmişdir. Modelə görə fırlanma momentinin

saxlanma qanununa əsasən, bölünən nüvənin deformasiya oxunun ilkin istiqamətinə görə fraqmentin fırlanma momentinin (spin) istiqaməti eyni qalır, bölünmə oxu isə δ bucağı qədər döndür ki, təcrübə olaraq bu dönmə neytronun polyarlaşmasından asılı olaraq qamma şüaların bucaq paylanmasının fraqmentin emissiya istiqamətinə uyğun dəyişməsi kimi müşahidə edilir.

–³He-un polyarlaşmasını 100 saat saxlamağa imkan verən və kənar maqnit sahələrinin mövcudluğunda istiqamətləndirici sahənin dayanıqlığını təmin edən μ -metaldan (permalloy) hazırlanmış maqnitostatik ekranlar və polyarlaşmış neytronların spininin istiqamətinin idarə edən, spinin istiqamətini lazım olan zaman müddətində dəyişən və ətraf mühitin maqnit sahəsinin spinə təsirini kompensasiya edə bilən spin-flipper qurğusu işlənib hazırlanmışdır.

–ROT effekti tədqiqində əsas bölünmə fraqmentlərini, qamma şüaları və neytronları qeyd etmək üçün CF₄ qazı ilə 0.1–10 mBar təzyiqdə işləyən və 112.4⁰ bucaq altında emissiya olunan fraqmentlərin qeyd edilməsinə imkan verən 1 mm dəqiqliyə malik koordinata həssas on sektorlu çox simli mütənəşib sayğacdən və 12 ədəd ssintilyasiya detektorundan ibarət qeydetmə sistemi işlənib hazırlanmışdır.

İşin nəzəri və praktiki əhəmiyyəti. Görülən tədqiqatların nəticələri yüksək elmi və praktiki əhəmiyyətə malikdir. Dissertasiya işində bölünmə məhsullarının (neytronların, γ -şüalarının və yüklü zərrəciklərin) müxtəlif korrelyasiyaları üzrə təcrübələr aparılmışdır ki, bu da bölünmə prosesi haqqında biliklərimizi genişləndirmişdir. Alınan nəticələr göstərmişdir ki, nadir nüvə proseslərinin tədqiqi bölünmə prosesinin ən mürəkkəb mərhələsi olan bölünmə anında bölünmənin dinamikasını və kinematikasını tədqiq etmək üçün üsul kimi istifadə edilə bilər. Ona görə də alınan nəticələr mövcud olan nəzəri modellərin yoxlanılması və genişləndirilməsi üçün vacibdir. Anı qamma kvantların və neytronların bucaq paylanmasında bölünən nüvənin fırlanma effektinin qiymətinin və işarəsinin bölünməyə səbəb olan neytronların enerjisindən asılılığı nüvənin polyarlaşmasının fraqmentlərin fırlanma momentinə çevrilməsi kimi bölünmə mexanizmini ətraflı başa düşməyə imkan verəcəkdir. İnduksiya edici

neytronların müxtəlif enerjilərində ölçmələr müxtəlif spin vəziyyətlərini aydınlaşdırmaqla yanaşı J və K kanallarının tövhələri haqqında “təmiz” məlumat əldə etməyə imkan verir. Təcrübələrdə istifadə edilmiş metodların müxtəlif məqsədli nüvə fizikası təcrübələrində tətbiqi mümkündür. Bundan əlavə alınan nəticələr yeni nəsil daha təhlükəsiz nüvə reaktorlarının qurulması, işlənmiş nüvə yanacaqlarının saxlanması üçün hesablamalarda və mövcud olan nüvə kodlarının genişləndirilməsində istifadə oluna bilər.

Müəllifin şəxsi iştirakı. Eksperimental tədqiqatların aparılmasında, əldə edilmiş nəticələrin təhlili və müzakirəsində, dissertasiya işinin strategiyasını həyata keçirilməsinin işlənilib hazırlanmasında və yazılmasında, məqalələrin nəşrində, beynəlxalq konfranslarda məruzə və tezis materiallarının müzakirəsində müəllifin şəxsi iştirakı aparıcı rol oynamışdır.

Dissertasiya işinin aprobasiyası və tətbiqi:

Dissertasiya işinin əsas nəticələri Neytronların Nüvələrlə Qarşılıqlı Təsirinə dair 23-cü Beynəlxalq Seminar: “Fundamental Qarşılıqlı Təsirlər və Neytronlar, Nüvənin Strukturu, Ultrasoyuq Neytronlar, Əlaqədar Mövzular” (2015, Dubna - Rusiya), Nüvə Fizikası İnstitutunun 60 illik yubileyinə həsr olunmuş “Nüvə Elmi və Texnologiyası” Beynəlxalq Elmi Forumu (2017, Almatı - Qazaxıstan), Neytronların Nüvələrlə Qarşılıqlı Təsirinə dair 25-ci Beynəlxalq Seminar: “Fundamental Qarşılıqlı Təsirlər və Neytronlar, Nüvənin Strukturu, Ultrasoyuq Neytronlar, Əlaqədar Mövzular” (2017, Dubna - Rusiya), “Nəzəriyyə-4” Nüvənin bölünməsinin dinamikası və sürətli neytronların və qamma şüalarının emissiyasına dair elmi seminar (2017, Varna - Bolqarıstan), Neytronların Nüvələrlə Qarşılıqlı Təsirinə dair 26-cı beynəlxalq seminar: “Fundamental Qarşılıqlı Təsirlər və Neytronlar, Nüvənin Strukturu, Ultrasoyuq Neytronlar, Əlaqədar Mövzular” (2018, Xi'an - Çin), “Aluşta-2018” gənc alim və mütəxəssislərin 7-ci illik konfransı (2018, Aluşta - Ukraniya), “Nüvə 2018” Nüvə Spektroskopiyası və Atom Nüvəsinin Strukturu üzrə 68-ci Beynəlxalq Elmi Konfrans – “Nüvə Fizikası, Atom Enerjisi və Nüvə Texnologiyasının Fundamental Problemləri” (2018, Voronej - Rusiya), Radiasiya Görüntü Dedektorları üzrə Beynəlxalq seminar,

iWoRID-20 (2018, Sundsvall-İsveç), Neytronların Nüvələrlə Qarşılıqlı Təsirinə dair 27-ci beynəlxalq seminar: “Fundamental Qarşılıqlı Təsirlər və Neytronlar, Nüvənin Strukturu, Ultrasoyuq Neytronlar, Əlaqəli Mövzular” (2019, Dubna - Rusiya), “Nüvə 2019” Nüvə Spektroskopiyası və Atom Nüvəsinin Strukturu üzrə 68-ci Beynəlxalq Elmi Konfrans – “Nüvə Fizikası, Atom Enerjisi və Nüvə Texnologiyasının Fundamental Problemləri” (2019, Dubna - Rusiya), Nüvə Fizikası üzrə PAC-ın 50-ci iclası (2019, Dubna - Rusiya), “ECNS 2019” Neytron Səpilməsi üzrə Avropa Konfransı (2019, Sankt-Peterburq - Rusiya), MLZ istifadəçilərinin yığıncağı 2020 (2020, Qarxinq – Almaniya), Radiasiya Görüntü Dedektorları üzrə Beynəlxalq seminar, iWoRID-22 (2021, onlayn), Neytronların Nüvələrlə Qarşılıqlı Təsirinə dair 28-ci beynəlxalq seminar: “Fundamental Qarşılıqlı Təsirlər və Neytronlar, Nüvənin Strukturu, Ultrasoyuq Neytronlar, Əlaqəli Mövzular” (2021, Dubna - Rusiya), MLZ istifadəçilərinin yığıncağı 2021 (2021, Qarxinq – Almaniya), Radiasiya Görüntü Dedektorları üzrə Beynəlxalq seminar, iWoRID-23 (2022, riva del Garda, İtaliya) kimi beynəlxalq konfrans və seminarlarda müzakirə edilmişdir.

Çap edilmiş işlər. Dissertasiyanın mövzusu üzrə 30 elmi iş dərc olunmuşdur. Bu işlərdən 16-sı AAK tələblərinə cavab verən jurnallarda, digərlərinin isə Beynəlxalq konfrans və seminarlarda müzakirəsi aparılmış və tezislər şəklində dərc edilmişdir.

Dissertasiya işinin yerinə yetirildiyi təşkilatın adı.

Təqdim edilən dissertasiya işi Azərbaycan Respublikasının Nəqliyyat, Rabitə və Yüksək Texnologiyalar Nazirliyi tabeliyində “Milli Nüvə Tədqiqatları Mərkəzi” Qapalı Səhmdar Cəmiyyətinin “Nüvə fizikası” şöbəsində Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyası Radiasiya Problemləri İnstitutu, Beynəlxalq Hökumətlərarası Birləşmiş Nüvə Tədqiqatları İnstitutu, Almaniyanın Münxen Texniki Universitetində yerinə yetirilmişdir.

Dissertasiyanın quruluşu və həcmi. Dissertasiya işi titul səhifəsi-1 səhifə, mündəricat - 3 səhifə (3524 işarə), giriş - 12 səhifə (20337 işarə), 1-ci fəsil - 58 səhifə (90632 işarə), 2-ci fəsil - 42 səhifə (52911 işarə), 3-cü fəsil - 20 səhifə (27624 işarə), 4-cü fəsil - 34 səhifə

(40677 işarə), 5-ci fəsil - 37 səhifə (46514 işarə), 6-cı fəsil - 15 səhifə (20440 işarə), 7-ci fəsil - 31 səhifə (39777 işarə), əsas nəticələr - 3 səhifə (5263 işarə), dissertasiyanın əsas nəticələri üzrə çap olunmuş işlərin siyahısı - 5 səhifə (8199 işarə) və 299 adda istifadə edilən ədəbiyyat siyahısı - 28 səhifə (45477 işarə), şərti işarələrin siyahısı - 2 səhifə (1423 işarə) və təşəkkür – 1 (1758 işarə) olmaqla ümumilikdə 292 səhifədən, o cümlədən 212 kompüter çap səhifəsi (382627 işarə), 146 şəkil və 8 cədvəldən ibarətdir. Dissertasiyada mövcud olan ümumi işarələrin həcmi 405065.

İŞİN MƏZMUNU

Girişdə dissertasiya işinin aktuallığı, məqsədin formalaşdırılması və əsas tapşırıqlar, tədqiqat metodları, tədqiqat obyektləri, tədqiqatın predmeti, elmi müddəalar, elmi nəticələrin yenikləri, işin nəzəri və praktiki əhəmiyyəti göstərilmişdir.

Birinci fəsildə dissertasiya işinin görülmə məqsədini və alınan nəticələri izah etmək üçün nüvənin spontan və təsirlə bölünməsi, nüvə reaksiyaları, bölünmədə baş verən anizotropiyalar, nadir nüvə bölünmələri, nüvənin kollektiv həyəcanlanması, zərrəciklərin və qamma şüaların maddə ilə qarşılıqlı təsiri və qeyd edilmə üsulları haqqında məlumat verilmişdir.

İkinci fəsildə bölünmə oxunun dönmə effektinin tədqiqi zamanı təcrübələrin aparıldığı Almaniyanın Münxen şəhərində yerləşən FRM-II tədqiqat nüvə reaktorunun POLI və Mephisto təcrübi zonalarının imkanları ilə yanaşı bu təcrübi zonalarda istifadə edilmiş əsas təcrübi hissələr və onların işlənməsi haqqında məlumat verilmişdir. Təcrübi hissələr, polyarizator/analizator qurğularından, spin idarəetmə sistemindən, qamma və neytron detektorlarından, fraqment detektorlarından, bölünmə kamerasından, həmçinin tədqiq olunan hədəflərdən ibarətdir. Hədəf olaraq $50 \times 110 \text{ mm}^2$ olan $\approx 30 \mu\text{m}$ qalınlığında alüminium altlığın hər iki tərəfinə çökdürülmüş $^{235}\text{U}_3\text{O}_8$ (99.99%)-dən istifadə edilmişdir. Uran təbəqəsinin ölçüsü $50 \times 100 \text{ mm}^2$, qalınlığı isə təxminən 1 mq/cm^2 -dir. Bu effektin tədqiqi üçün polyarlaşmış neytronlar lazım olduğu üçün neytronların polyarlaşdırılması üçün ^3He qazından istifadə edilmişdir. Neytron seli

xüsusi hazırlanmış ^3He qazı ilə doldurulmuş kolbadan keçərək neytronun spininin istiqaməti ^3He atomunun spininin istiqaməti ilə eyni olarsa belə neytronlar kolbadan keçərək polyarlaşmış neytronlar almağa imkan verir. Spinin istiqaməti əks olan neytronlar isə ^3He ilə reaksiyaya girərək kolbada udulur. Təcrübələrdə ^3He -un polyarizasiyası 80%-dən çox, ^3He kolbasının transmissiyası isə bu polyarizasiya dərəcəsinə təqribən 40% olmuşdur. Burada əsas diqqət yetirilməli olan məsələlərdən biri də He-un polyarizasiyasının uzun müddət qorunması və bununla da təcrübənin xətasının azaldılmasıdır. Kolbadakı ^3He qazının polyarlaşması relaksasiya görə eksponent olaraq azaldığından ^3He qazının polyarizasiyasını qorumaq məqsədi ilə relaksasiya müddətini iki dəfə artırmağa (100 saat) imkan verən yüksək maqnit keçiriciliyinə (~ 100000) malik materialdan yeni maqnitostatik ekranlar işlənib hazırlanmışdır. Şəkil 1-də içərisində SF kolbası olan maqnitostatik ekranın fotosəkili göstərilmişdir. Ekranın daxilində selenoidin yaratdığı maqnit sahəsi 5-10 Qs-dur.



Şəkil 1. İçərisində SF kolbası olan maqnitostatik ekran.

Polyarizatorların quruluşuna görə təcrübələrdə istifadə edilən polyarizatorlarda və analizatorlarda neytron selinin şaquli polyarlaşması alınır. Tədqiq olunan effekt isə üfüqi polyarlaşmanı tələb edir (neytron selinin istiqaməti üzrə irəli və geri). Polyarizator və bölünmə kamerası arasında neytron selinə paralel/antiparalel olaraq hər iki istiqamətdə spinin fırlanması təmin olunmalıdır. Bütün bu tələblərə cavab vermək üçün xüsusi olaraq μ -metal ekranlı bir neçə maqnit selenoidindən

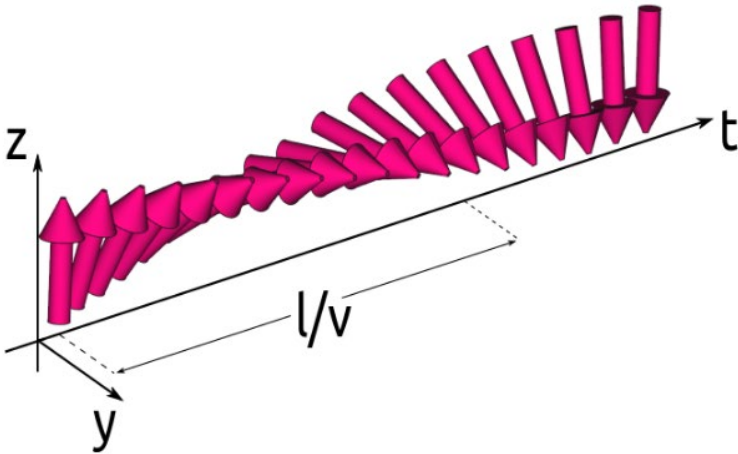
ibarət spin idarəetmə sistemi işlənilib hazırlanmış. Selenoidin işləmə prinsipi maqnit sahəsində neytronun spininin pressesiyasına əsaslanır. Neytron vahid maqnit sahəsi B olan selenoidə düşdükdə xarici sahəyə mütənasib ω tezliyi ilə sahənin istiqaməti ətrafında pressesiya (Larmor pressesiyası) etməyə başlayır. Bu pressesiyanın tezliyi aşağıdakı kimi ifadə olunur:

$$\omega = \gamma_n \cdot \langle B \rangle \quad (1)$$

harada γ_n - neytron qiromağnit nisbətidir ($-1.83 \cdot 10^8 \text{ s}^{-1}\text{T}^{-1}$). İfadədən görüldüyü kimi Larmor tezliyi neytronun dalğa uzunluğundan deyil maqnit induksiyasının qiymətindən asılıdır. (1) tənliyini belə də yazmaq olar:

$$\omega = \gamma_n \cdot \frac{B}{2\pi} = 29.16(\text{MHS/T}) \cdot B(\text{T}) \quad (2)$$

Polyarlaşma vektorunun fırlanma bucağı isə v sürəti ilə l məsafəni qət edən neytronların t vaxtından asılıdır (şəkil 2):



Şəkil 2. Neytronun fırlanma istiqamətinin maqnit sahəsində uçuş zamanından asılılığı.

$$\varphi = \omega \cdot t = \omega \cdot \frac{l}{v} = \gamma_n \cdot \frac{B \cdot l}{v} \quad (3)$$

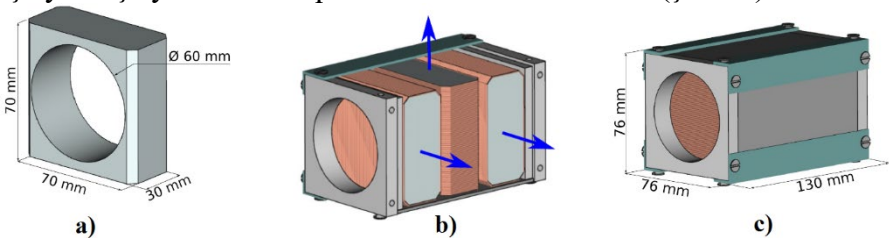
Neytron sürəti ilə dalğa uzunluğu arasındakı əlaqə $1/v = \lambda m/h$ tənliyi ilə ifadə olunur. Burada m - neytronun kütləsi, h – isə Plank sabitidir. Neytron sürətini v dalğa uzunluğu λ ilə ifadə etsək elementar

çevrilmələrdən sonra (3) tənliyi aşağıdakı formanı alır:

$$\varphi = \frac{\sqrt{2m\gamma_n} lB}{2\sqrt{E}} \quad (4)$$

(4) tənliyindən aydın olur ki, spin pressesiya maqnit sahəsinin dəyərindən və neytron enerjisindən asılıdır: eyni maqnit sahəsi və eyni neytron yolu üçün aşağı enerjilərdə pressesiya bucağı daha böyükdür.

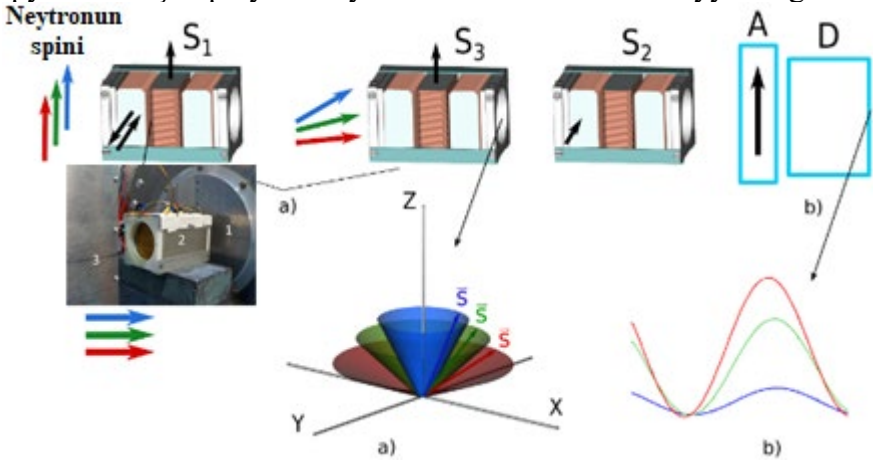
Selenoid hər 1.3 saniyədən bir spini verilmiş vəziyyətdə 180 dərəcə döndərməyə imkan verir. Bu cür cihazların kombinasiyasından istifadə etməklə eyni zamanda xarici maqnit sahələrinin selin polyarizasiyasına təsirini kompensasiya etmək, həmçinin polyarlaşma vektorunun istənilən istiqamətini lazımi yerdə almaq və dövrü fırlanmanı təmin etmək olar. Təcrübə şərtlərinin tez-tez dəyişdiyi hallarda bu cür qurğular çox faydalıdır. Çünki hər bir hal üçün öz aparıcı maqnit sahəsini yaratmaq lazım deyil. Bu cihazın əsas üstünlüyü kiçik ölçülərlə birlikdə maqnit sahəsinin yüksək bircinsliliyi, neytron seli üçün böyük axın sahəsi, yüksək sürət (zəif təsirlərin ölçülməsi zamanı vacib olan 1 Hz döndərmə tezliyi) və idarə etmə sadəliyidir. Spin flipper qurğusu DC mənbəyindən müstəqil işləyən üç eyni düzbucaqlı selenoidlərdən ibarətdir (şəkil 3).



Şəkil 3. Spin idarəetmə qurğusunun quruluşu. a - poliamid gövdə; b - kənar sahələri kompensasiya etmək üçün lazım olan ferromaqnit ekranın içərisində flipperlər; c – spin idarəetmə qurğusunun ümumi görünüşü.

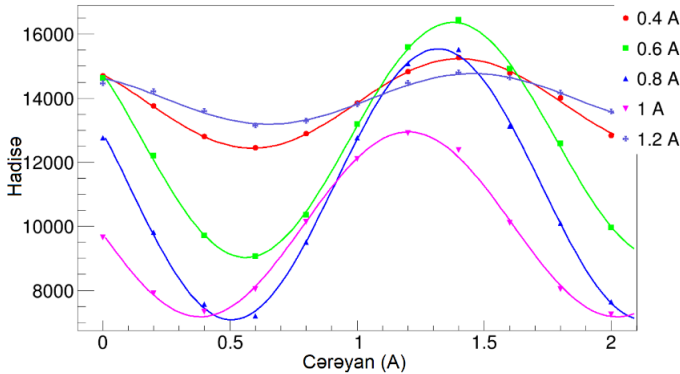
Təcrübədə üç eyni spin-idarəetmə qurğusu istifadə edilmişdir: ikisi korreksiya edici, biri isə sınaq üçün. İlk korreksiya qurğusu (S1) polyarizatoradan dərhal sonra yerləşdirilir. Bu qurğu hədəfin mövqeyində fırlanma oriyentasiyasına nəzarət edir və eyni zamanda flipper kimi istifadə olunur. İkinci qurğu isə (S2) nümunə ilə analizator

arasında yerləşdirilir və polarizasiyanın dərəcəsinə nəzarət etmək üçün analizatorda fırlanma oriyentasiyasına nəzarət etmək üçündür. Test cihazı (S3) müvəqqəti olaraq hədəfin mövqeyində yerləşdirilir və eksperimentdən əvvəl hədəfin mövqeyində spin oriyentasiyasını təyin etmək üçün birinci qurğu (S1) ilə birlikdə istifadə olunur (şəkil 3). Təcrübə zamanı sınaq cihazı çıxarılır və nümunə ilə əvəz olunur. Təcrübədə istifadə olunan kompakt ölçülü spin-idarəetmə qurğusunun fotosəkili də şəkil 4-də göstərilmişdir. S₁ və S₃ qurğularının ilk kompensasiya selenoidlərindəki maqnit sahəsi Z oxu boyunca yönəldilmişdir. S₁ qurğusunun selenoidində cərəyanın hər bir qiymətinə uyğun S₃ qurğusunun selenoidi üçün "fırlanma əyrisi" ölçülmüşdür (şəkil 4 (a)). Bu halda sınaq qurğusunun çıxışında φ bucağının konusu S₁ cihazının selenoidində cərəyanın müxtəlif qiymətləri üçün polarizasiya vektorunun həndəsi vəziyyətini göstərir.



Şəkil 4. Neytronun spin vektorunun maqnit sahəsi ətrafında pressesiyası. S₁, S₂ və S₃: spin-idarəetmə qurğuları, A: analizator və D: neytron detektoru. Şəkildəki qara ox maqnit sahəsinin istiqamətini, rəngli oxlar neytronun spinin fırlanma istiqamətini göstərir. a) "Spin fırlanma əyrisi", S₁ cihazının ikinci selenoidinə müəyyən cərəyan verildikdə və S₃ cihazının ikinci selenoidinə cərəyan yavaş-yavaş dəyişdirilir. b) Neytron detektorunun sayma sürətinin kosinusu.

Onda Z oxu boyunca analizatora əsasən neytronun spininin bir komponenti daxil olur. Cərəyanın xətti dəyişməsi neytron detektorunun sayma sürətinin kosinusuna və ya sinusuna gətirib çıxarır (şəkil 4 (b)). Spin polyarizasiyası sınaq qurğusunun mövqeyində uzununa olduqda əyrinin amplitudu maksimum olur. Şəkil 5-də selenoidlərdə cərəyanı axtarmaqla neytron selinin polyarlaşmasının maksimum qiymətinin təyin edilməsi zamanı əldə olunmuş təcrübi əyrilər göstərilmişdir. S₁ qurğusunun ilk kompensasiya selenoidindəki cərəyan 200 mA addımlarla 0.4-dən 1.2 A-a qədər dəyişdirilmişdir (şəkildə müxtəlif rənglərdə göstərilmişdir) və hər addım üçün S₃ cihazının ilk kompensasiya selenoidi üçün "fırlanma əyrisi" hədəf mövqeyində ölçülmüşdür. Beləliklə, neytron detektorunun sayma sürətinin kosinusunu ölçülmüşdür. Bu əyri histoqramda göstərilən $N=a+b \cdot \cos(2\pi I/d+c)$ funksiyası ilə aproksimasiya edilərək parametrlər müəyyən edilmişdir.

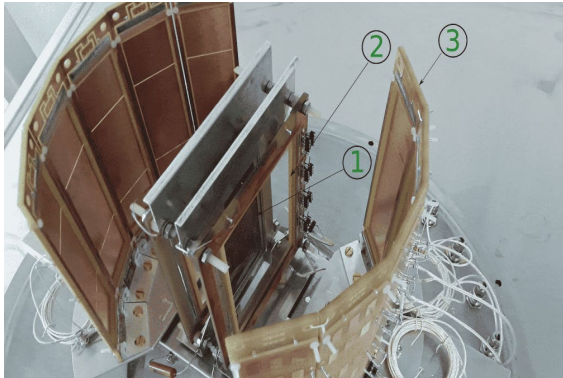


Şəkil 5. S₃ sınaq qurğusunda detektorun sayma sürətinin cərəyandan asılılığı ("fırlanma əyrisi"). Müxtəlif rənglər S₁ cihazının ikinci kompensasiya selenoidində müxtəlif cərəyanları göstərir.

Burada a, b – kosinus astana qiyməti və amplitudu, c - faza sürüşməsi və $d = I_{360} - 360^0$ fırlanma üçün lazım olan cərəyandır. Əyriyə baxdıqda görünür ki, hər əyri üçün tək b amplitud deyil, həm də astana qiyməti a və faza sürüşməsi c dəyişir. Test qurğusunun mövqeyində neytron polyarlaşması uzununa olduqda amplitud maksimuma çatır. Bu, S₁

qurğusunun ilk kompensasiya selenoidində $I = 0.8$ A cərəyanına uyğun gəlir.

Təcrübədə əsas bölünmə məhsullarını qeyd etmək üçün çoxsimli mütənasib sayğacdən istifadə edilmişdir. Tədqiq olunan hədəflər 10 mBar təzyiqdə tetraflorometan qazı (CF_4) ilə doldurulmuş paslanmayan poladdan hazırlanmış, ölçüləri isə $\varnothing 50 \times 100$ sm olan bölünmə kamerasına yerləşdirilmişdir. Neytron depolyarizasiyasının qarşısını almaq üçün kameranın giriş və çıxış pəncərələri nazik Al ərintisindən hazırlanmışdır. Bölünmə aktı hər iki tərəfdən hədəfə paralel yerləşən iki fraqment detektoru, yerə həssas çoxsimli aşağı təzyiqli mütənasib sayğaclar (YHATMS) tərəfindən qeydə alınmışdır. Fraqment detektoru başlanğıc və dayanma detektorundan ibarət sistemdir. Ölçmələrin birinci seriyasında başlanğıc detektorlar hədəfdən 2.5 sm, dayanma detektorları isə hədəfdən 12.5 sm məsafədə yerləşdirilmişdir. Bu YHATMS yalnız iki sektordan ibarət olmuşdur. Təcrübələrin ilk seriyasından fərqli olaraq, sonrakı təcrübələrdə təcrübi qurğunun bucağa həssaslığını və effektivliyini artırmaq üçün beş müstəqil seqmentdən ibarət yeni YHATMS işlənib hazırlanmışdır (şəkil 6).



Şəkil 6. Aşağı təzyiqli koordinata həssas çoxsimli mütənasib sayğacın fotosəkili. 1: hədəf; 2: başlanğıc detektor; 3: seqmentli dayanma detektoru.

Başlanğıc detektorları hədəfdən 3 sm, dayanma detektorları isə 11 sm məsafədə yerləşdirilmişdir. Hər bir detektor anod kimi istifadə olunan

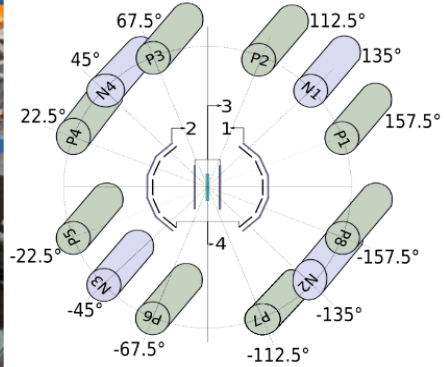
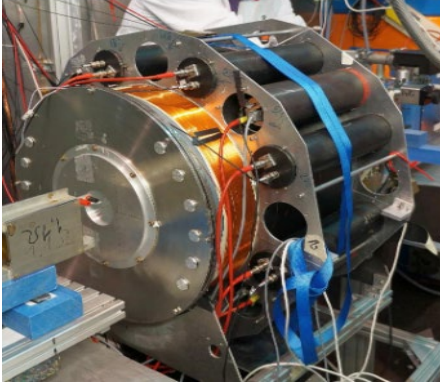
Ø25 µm örtüklü volfram məfillərindən hazırlanmışdır. Katod eyni simdən kvadrat tor şəklində hazırlanmışdır. Simin aralığı 1 mm, katod ilə anod arasında məsafə isə ~3.2 mm-dir. Ümumi katoda ~560–600 V gərginlik tətbiq edilir. Stop detektorunun bir sektorunun ümumi sahəsi 70×140 mm², start detektorunun ölçüləri isə 140×140 mm²-dir. Stop detektorundan fərqli olaraq start detektoru tək sektorlu seçilmişdir. Start detektoru hədəfə yaxın olduğundan geniş bucaqlarda ölçmə aparmağa imkan verir. Start detektorundan çıxan bölünmə fraqmentlərinin hamısını qeyd etmək üçün stop detektoru çox sektorlu seçilmişdir. Nəticədə qeydetmə sisteminin effektivliyini artırmaq mümkün olmuşdur. Bölünmə fraqmentlərinin qeyd edilməsi üçün istifadə edilən YHATMS-nin əsas üstünlükləri aşağıdakılardır: zamana görə yüksək performans, yüksək effektivlik, yüksək şəffafıq və detektor daxilində aşağı enerji itkisi, geniş səth sahəsi, yüksək sayma dərəcəsi, yerə görə yüksək həssaslıq, uzun müddət stabil işləmə. Cədvəl 1-də YHATMS-ın əsas parametrləri verilmişdir.

Cədvəl 1.
YHATMS-in əsas parametrləri

İşləmə təzyiqi	~ 0.1–10 mBar
İşlədiyi qaz	izobutan, heptan, etilen, CF ₄
Anod-katod məsafəsi	~ 1.6–3.2 mm
Anod simləri arasındakı məsafə	~ 1 mm
Anod siminin diametri	~ 10–25 µm
Sabit səhədə elektrik sahəsi	~ 10 ² –10 ³ V/(sm·mBar)
Simin səthində elektrik sahəsi	~ 10 ⁴ –10 ⁵ V/(sm·mBar)
Qazın tam gücləndirməsi	~ 10 ⁴ –10 ⁶
Simlərdə güclənmə	~ 10 ¹ –10 ³
Signalın qalxma müddəti	~ 2–5 ns
Zamana görə ayırdetmə	~ 0.1–1 ns

Bölünmə kamerasının daxilində və xaricində istifadə edilmiş detektor sisteminin sxematik görünüşü şəkil 7-də göstərilmişdir. Başlama detektorları hədəfdən 1 sm, dayanma detektorları isə 11 sm məsafədə yerləşdirilmişdir. Hər dayanma detektoru hədəfin sol tərəfində 0⁰,

$\pm 22.5^{\circ}$, $\pm 45^{\circ}$, sağ tərəfində isə $\pm 135^{\circ}$, $\pm 157.5^{\circ}$ və 180° bucaqları altında yerləşdirilmiş beş müstəqil seqmentdən ibarətdir (şəkil 7). Bölünmə zamanı emissiya olunan ani γ -kvantları və neytronları qeyd etmək üçün istifadə olunan detektorlar bölünmə kamerasından kənarında onun ətrafında yerləşdirilmişdir. Ssintilyasiya detektoru kimi plastik və NaI(Tl) kristallarından istifadə edilmişdir ki, bu da təkcə γ -kvantları deyil, həm də neytronları qeyd etməyə imkan vermişdir. Qamma şüaların qeydedilmə effektivliyini artırmaq üçün təcrübədə dörd NaI(Tl) ssintilyasiya detektoru da istifadə olunmuşdur. Detektorlar hədəfin mərkəzindən təxminən 30 sm məsafədə yerləşdirilmişdir. Ani neytronlar və γ -kvantlar, uçuş vaxtı (TOF) metodundan istifadə edilərək ayrılmışdır və bu məsafədə qamma şüalara və neytronlara uyğun gələn piklər arasındakı məsafə 18 ns olmuşdur.

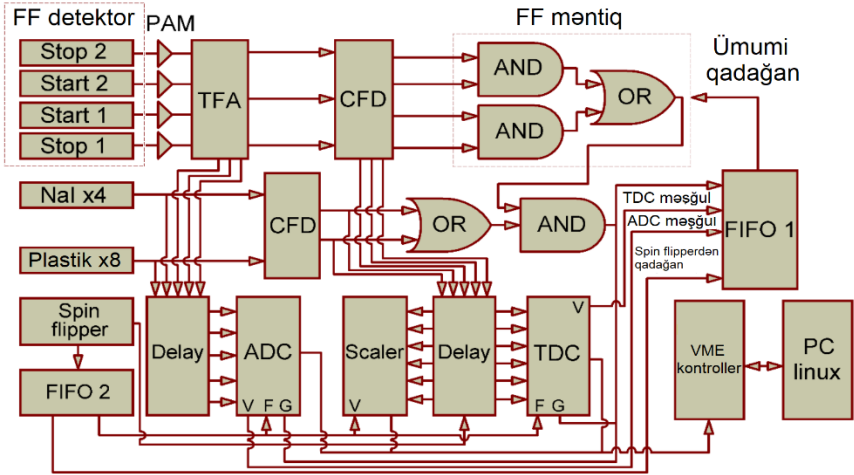


Şəkil 7. Bölünmə kamerasının yığılmış tam forması. Çıxış Al pəncərəsi sol tərəfdə görünür. Sağ şəkildə detektorlar və onların yerləşmə bucaqları sxematik olaraq təsvir edilmişdir.

Qamma və neytron detektorları bölünmə kamerasının ətrafında yerləşdirilmişdir. Bu detektorlar fraqmentlərin qeyd edilmə oxuna nəzərən fraqmentlər ilə eyni anda $\pm 22.5^{\circ}$, $\pm 67.5^{\circ}$, $\pm 112.5^{\circ}$ və $\pm 157.5^{\circ}$ bucaqları altında buraxılan ani γ -kvantları və neytronları qeyd edir.

Üçüncü fəsildə ROT effektin tədqiqi üçün aparılmış eksperimentlərdə məlumatların əldə edilməsi sistemi, nüvə fizikasında geniş istifadə olunan standart elektronika modulları, eksperimentin aparılması metodologiyası və məlumatların necə əldə edildiyi

haqqında məlumat verilmişdir. Təcrübənin məlumat toplama sistemi (MİTS) bütün detektorlardan siqnalların toplanmasına, siqnalların rəqəmsallaşdırılmasına və qeydə alınmasına, həmçinin eksperimental qurğunun işini qurmaq və idarə etməyə imkan vermişdir. Təcrübədə çoxlu sayda detektor istifadə edildiyindən onların iş prinsipini tənzimləmək üçün çoxlu sayda NİM modullar istifadə edilmişdir. MİTS-in sadələşdirilmiş diaqramı şəkil 8-də göstərilmişdir. Bütün təcrübələrdə MİTS, gücləndirici modullardan (PAM), gücləndiricilərdən (TFA), dəqiq zaman qeydləri yaratmaq üçün sabit hissə diskriminatorlarından (CFD), zaman rəqəmsal çeviricilərindən (TDC), VƏ (AND) və VƏYA (OR) məntiq modullarından, məntiqi fan-in/fan-out (FIFO) modullardan, analoq rəqəmsal çeviricilərdən (ADC), gecikdiricilərdən (Delay), sayğaclarından (Scaler) və Linux əməliyyat sistemində işləyən VME-PC interfeysindən ibarət olmuşdur.



Şəkil 8. Məlumatların qeyd edilməsi sisteminin sadələşdirilmiş sxemi.

Tədqiq olunan ROT effektin kiçikliyini ($\sim 10^{-4}$) nəzərə alaraq, səhv effekt yarada biləcək aşağıdakı mümkün təcrübə asimetriya mənbələri araşdırılmışdır:

1. Neytron və qamma detektorlarının tərkibinə daxil olan

ənənəvi fotogücləndiricilərə spin idarəetmə cihazlarının maqnit sahəsinin təsiri səhv effektdə gətirib çıxara biləcək səbəblərdən biri ola bilər. Nəticədə asimmetriyanın 10^{-5} -dən kiçik olduğu müşahidə olunmuşdur ki, bu da əsas effektin qiyməti ilə müqayisədə kifayət qədər kiçikdir.

2. Məlumatların emalı sistemində spin flipperlərin neytronun spinini bir istiqamətdən digərinə döndərmə müddətinin, yəni keçidin təsiri digər səbəb ola bilər. Məlumatların işlənməsi zamanı bu asimmetriyaya uyğun gələn məlumatlar nəzərə alınmamışdır. Orta asimmetriyanın qiyməti 10^{-5} -dən kiçik olmuşdur.

3. Neytron selinin polyarlaşmasının istiqamətinin dəyişməsini qeyd etmək üçün məlumat toplama vaxtının asimmetriyası da effektdə təsir edən səbəblərdəndir. Bu vaxt bir kristal osilyator tərəfindən təyin edildiyi halda başqa bir kristal osilyator tərəfindən idarə edilir. Ölçmələr zamanı məlumat toplama vaxtının asimmetriyası 10^{-6} -dan çox olmamışdır.

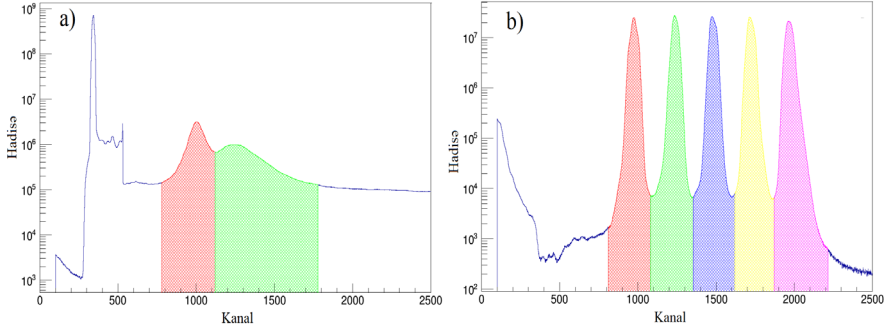
Təcrübi üsulun təsvir edilən dəqiqliyi sistemə və statistik xətlərlə müəyyən edilir. Verilmiş təhlilə əsasən belə nəticəyə gəlmək olar ki, metodun sistemə xətası $1.5 \cdot 10^{-5}$ -dən çox deyil. Statistik xəta toplanan məlumatların sayı ilə müəyyən edilir. İstifadə olunan metodda məlumat toplama sürəti iki amillə məhdudlaşır. Birincisi, məlumat toplama sistemini təşkil edən elektronikanın ölü (ingiliscə: dead time) vaxtıdır. Generatordan istifadə edilən sınaq təcrübəsində müəyyən edilmişdir ki, TDC bloku və məlumat toplama proqramı daxil olmaqla sistem $1.2 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$ sayda faydalı hadisələrin qeyd edilməsini təmin edə bilər. Hər bir hadisəni ayrıca qeyd edən məlumat toplama proqramından istifadə edərkən maksimum yüklənmə təxminən $2 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$ olmuşdur ki, bu rəqəm də ilk növbədə kompüterin (prosessor və disk sistemi) performansından asılıdır. Hadisələrin $2 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$ yüklənməsi məlumat dəstinin 1 saniyə üçün $7 \cdot 10^{-3}$ statistik xətasına uyğundur. Təcrübi qurğumuzda (γ -kvantları qeyd edərkən) eksperimental olaraq təyin edilmiş qiymətləri nəzərə alsaq qeydetmə sistemində (sabit xarakteristikalar və detektorların düzülüşü halında) ani bölünmə neytronlarının və γ -kvantlarının bucaq paylanması asimmetriyanın müəyyən edilməsinin statistik dəqiqliyinin $2 \cdot 10^{-2}$ -dən

(bir detektordan vahid saniyədə alınan məlumat dəstəsi üçün) daha yaxşı olması əlçatmazdır. 8 detektorun (plastik ssintilyatorların) nəzərə alındıqda əldə edilə bilən maksimum statistik dəqiqliyin yaxşılaşır və 1 saniyədə toplanan məlumat dəstəsi üçün $7 \cdot 10^{-3}$ təşkil edir. Yuxarıda qeyd edildiyi kimi elektronika eyni məhdudiyəti verir. Asimmetriyanın ölçülməsində sistemin imkanları daxilində 100 günlük ölçmələr üçün $2.5 \cdot 10^{-6}$ statistik dəqiqliyə nail olmaq mümkündür. Məlumatların qeyd edilməsinin faktiki sürəti sistem üçün nəzəri hesablanmış limitdən bir tərtib kiçik olduğundan 1 saniyədə əldə edilən məlumatlar üçün statistik xəta $2.5 \cdot 10^{-2}$ tərtibində olmuşdur.

Xəta mənbələrindən başqa məlumatların düzgün və effektiv analizi də təcrübi nəticələrin əldə olunmasında vacib şərtlərdən biridir. Bunu nəzərə alaraq ROOT paketi əsasında C++ proqramlaşdırma dilində eksperimental məlumatları emal etməyə və eksperimentin nəticələrini rahat və vizual formada təqdim etməyə imkan verən analiz proqramı yazılmışdır. Bir gün ərzində qeyd edilən hadisələrin ölçüsü 5 dəqiqəlik ekspozisiyalara (1 ekspozisiya - 60 dövr; 1 dövr - 4 spin flip; 1 spin flip – 1.3 saniyə) bölünmüş və sıxılmış halda 5 Gbayt tərtibində olub oflayn halda analiz edilmişdir. Proqram neytronları qamma kvantlardan (şəkil 9 (a)) və dayanma detektorunun ayrı-ayrı seqmentlərini (şəkil 9 (b)) ayıran uçuş vaxtı spektrlərində vaxt intervallarını da təyin edir. Hər bir dayanma detektoru bir xətt üzrə birləşdirilmiş gecikmə xətləri ilə ayrılan və bir TDC kanalına qoşulmuş beş seqmentdən ibarətdir. Başlanğıc detektoruna nisbətən siqnalın çatma vaxtı bölünmə fraqmentlərinin hansı seqmentdə qeyd edildiyini göstərir. Hadisələrin sayı inteqrallama üsulu ilə müəyyən edilir (rənglənmiş sahəyə bərabər). Proqram səkkiz müstəqil plastik detektorun impulslarının stop detektorun on seqmentinin hər bir impulsu ilə üst-üstə düşməsinə əsasən təcrübədə fraqment və n/γ detektorları arasında 16 müxtəlif bucaq üçün məlumatlar toplanır:

$$\theta = P_{\text{lang}} - FF_{\text{ang}} \quad (8)$$

burada P_{lang} və FF_{ang} müvafiq olaraq plastik detektorların və stop detektorun seqmentlərinin bucaq mövqələridir (şəkil 7).



Şəkil 9. Plastik sintillyatorlardan (a) və dayanma detektorlarından birinin (b) uçuş vaxtı spektri.

Sonra proqram (8) düsturla hesablanmış hər bir bucaq üçün neytron selinin polyarlaşma istiqamətindən asılı olaraq asimmetriya əmsallarını müəyyən edir:

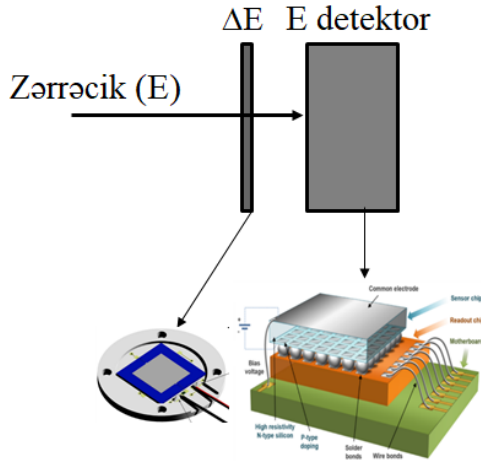
$$D(\theta) = \frac{N^+(\theta) - N^-(\theta)}{N^+(\theta) + N^-(\theta)} \quad (9)$$

burada $N^+(\theta)$ və $N^-(\theta)$ neytron selinin polyarlaşmasının iki əks istiqamətində seçilmişdir bucaq üçün detektorların qeyd etdiyi γ -kvantların sayıdır. Xətanı müəyyən etmək üçün proqrama aşağıdakı ifadə əlavə edilmişdir:

$$\sigma = \sqrt{\frac{D(\theta) - 1}{N^+(\theta) + N^-(\theta)}} \quad (10)$$

Dördüncü fəsilə nadir nüvə proseslərinin tədqiqi üçün təcrübi üsulların işlənməsindən bəhs edilmişdir. Təcrübələrdə yüklü zərrəciklərin identifikasiyası xüsusi enerji itkisinin (dE/dx) ölçülməsinə əsaslanır. Yüklü zərrəciklər mühitdən keçdikdə, enerjisinin bir hissəsini itirir atomları ionlaşdırır, sərbəst elektronlar yaradır. Zərrəciyin enerji itkisi onun sürətindən və yükündən (z) asılı olduğundan bu üsul yüklü zərrəcikləri müəyyən enerji intervalında identifikasiya etməyə imkan verir. Bu üsulu eksperimental olaraq tətbiq etmək üçün, qalın E detektorunun qarşısında adətən məqsəddən asılı olaraq nazik ΔE detektoru yerləşdirilərək iki laylı detektor sistemindən istifadə edilmişdir (şəkil 10). ΔE -E adlanan bu üsul nazik

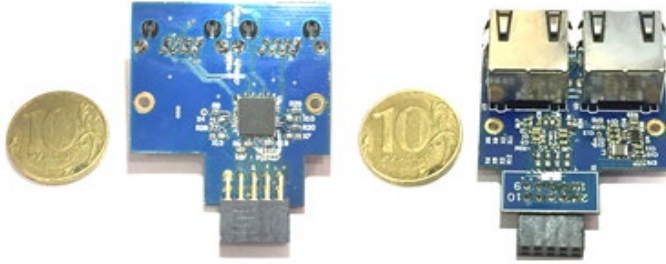
detektorun qalınlığı və dayanma gücü ilə məhdudlaşır. Təcrübədə zərrəciklər arasındakı bucağı ölçmək və çox parametrlı sistem yaratmaq üçün E detektoru kimi silisium əsaslı hibrid piksellı Timepix detektorundan istifadə edilmişdir. Ənənəvi Timepix detektorlardan fərqli olaraq istifadə olunan detektorlar modifikasiya olunaraq onların eyni zamanda həm piksellı həm də adi silisium detektoru kimi işləməsinə nail olunmuşdur. Yüklü zərrəciklərin identifikasiyasına əsaslanan teleskopda ΔE detektoru kimi 15 μm və 150 μm qalınlıqlı nazik PAD detektorlarından istifadə olunduğu halda, 300 və 600 μm qalınlıqlı Timepix detektoru isə E detektoru kimi istifadə edilmişdir. ΔE detektorunun qalınlığa görə qeyri-bircinsliliyi 8% olmuşdur. Şəkil 10-də teleskopun sxematik təsviri göstərilmişdir. Təcrübə üçün 3 ədəd ΔE -E teleskopu işlənilib hazırlanmışdır. Birinci və üçüncü teleskop He daxil olmaqla ondan ağır izotopları, ikinci teleskop isə protondan başlayaraq zərrəcikləri identifikasiya etməyə imkan vermişdir.



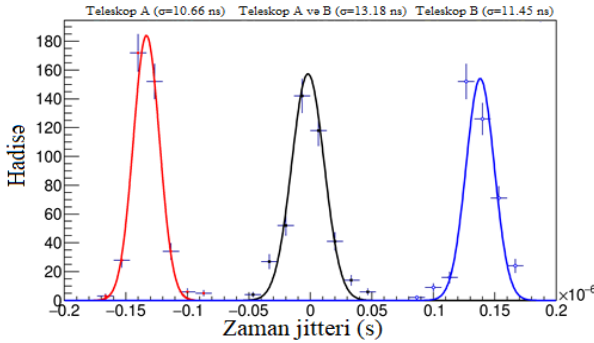
Şəkil 10. Teleskopun sxematik təsviri.

Təcrübələrdə lazım olmayan hadisələrin aradan qaldırılması üçün detektorların sinxronlaşdırılması əsas üsullardan hesab olunur. Nadir bölünmə prosesləri az ehtimallı olduğundan bu proseslərin tədqiq edilməsi üçün uzunmüddətli təcrübələr aparmaq lazımdır. Buna görə də, gücləndirici, gərginlik qidalandırıcısı, diskriminator, komparator, sinxronizasiya və s. kimi bütün əsas elektron hissələrdən

ibarət güclü qeyd etmə sistemi faydalı məlumatların əldə edilməsi üçün çox vacibdir. Nadir bölünmə proseslərini öyrənmək üçün istifadə edilmiş sinxronizasiya və məlumat toplama sistemi ilə yeni hazırlanmış $\Delta E-E$ teleskopu yuxarıda sadalanan bir çox arzu olunan xüsusiyyətləri özündə birləşdirir. Sinxronizasiya sisteminin əsas məqsədi standart spektrometr və piksel detektorları kimi müxtəlif detektor sistemlərin qeyd edilən hadisələrin lazım olan dəqiq vaxtda qeydiyyatını təmin edən ümumi detektor sisteminə inteqrasiyasıdır. Sistemdə çox nöqtəli aşağı gərginlikli diferensial siqnal (MLVDS) standartının yüksək sürət və uzun məsafələrə ötürmə qabiliyyəti, krostolk və küyün daxil olmasına qarşı bütün üstünlüklərindən istifadə edilmişdir. Şəkil 11-də sinxronizasiya sisteminin şəkili verilmişdir. Sinxronizasiya sistemi 32 ədəd detektoru sistemə qoşmağa və eyni zamanda işləməsini təmin etməklə yanaşı proqram vasitəsi ilə sinxronlaşdırmaq üçün istənilən kombinasiyanı almağa imkan verir.



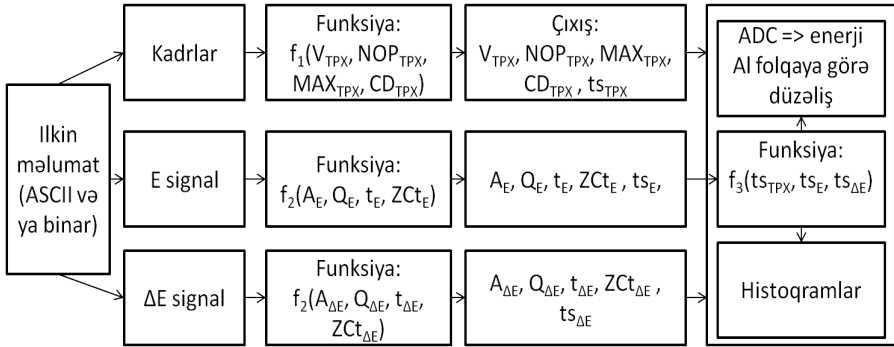
Şəkil 11. Sinxronizasiya sisteminin şəkili.



Şəkil 12. Teleskoptakı detektorlar və teleskoplar arasındakı zaman fərqi.

Hər iki teleskoptakı detektorlar və teleskoplar arasındakı zaman fərqi şəkil 12-də verilmişdir. Şəkildən görüldüyü kimi zaman fərqi təqribən 10 ns (siqma)-dir. Sinxronlaşma sistemini idarə etmək üçün interfeysi olan xüsusi yazılmış proqramdan istifadə edilmişdir. Heç bir fiziki müdaxilə olmadan proqramın köməyi ilə istənilən sinxronlaşma konfigurasiyasını həyata keçirmək mümkündür.

Lazım olan məlumatların əldə edilməsi üçün güclü və sürətli aşkarlama sistemlərindən istifadə olunsa da rəqəmsal məlumatların işlənməsi fiziki təcrübələrin, əsasən də mürəkkəb təcrübələrin mühüm hissəsi hesab olunur. Nadir nüvə bölünmələrinin tədqiqində uzunmüddətli ölçmələrdən əldə edilən məlumatlar üçün çoxlu alqoritmdən ibarət ROOT əsaslı analiz proqramı yazılmışdır. Məlumatların işlənilməsi bir neçə alqoritmdən ibarət proqramda oflayn rejimdə aparılmışdır. Şəkil 13-də məlumatların işlənməsi prosesinin sadələşdirilmiş blok diaqramı göstərilmişdir.

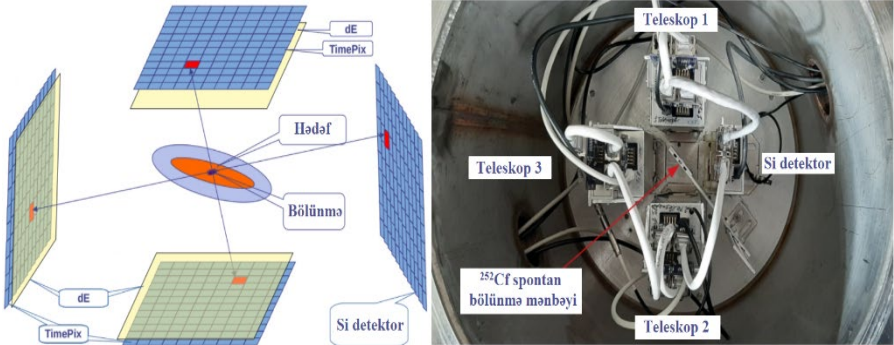


Şəkil 13. Proqramın blok sxemi.

Birinci alqoritm, klasterin həcmi (V_{TPX}), klasterdəki piksellərin sayı (NOP_{TPX}), klasterdəki maksimum TOT (MAX_{TPX}) və klasterin diametri (CD_{TPX}) haqqında məlumatlardan istifadə edərək klasterləri digər klaster növlərindən ayıra bilir. Timepix detektorundan alınan kadrları oxumaqla detektorun piksel hissəsindən alınan məlumatları, ikinci alqoritm, Timepix, ΔE və Si detektorlarının ümumi hissəsindən alınan siqnalları amplitudlarına (A_E və $A_{\Delta E}$), sahələrinə (Q_E və $Q_{\Delta E}$), ofset vaxtlarına (ZCt_E və $ZCt_{\Delta E}$ - sıfır nöqtəsi ilə kəsişmə vaxtı) və eninə (t_E və $t_{\Delta E}$) görə analiz edərək X və qamma şüaların yaratdığı

İstənməyən hadisələri və elektronik hissələrin yaratdığı siqnalları filtrləyir. Üçüncü alqoritm isə digər alqoritmlərdən alınmış nəticələri analiz edir. Nəticədə, proqram zərrəciklərin identifikasiyası üçün ΔE - E spektrləri (enerji vahidlərində) və hissəciklər üçün enerji spektrləri daxil olmaqla yekun nəticələri almağa imkan verir. Proqramda hər bir zərrəcik üçün istifadə edilən uducunun xassələrinə uyğun düzəlişlər də nəzərə alınmışdır.

Nadir nüvə proseslərini tədqiq etmək üçün istifadə edilmiş təcrübi qurğunun sxematik təsviri və real görünüşü şəkil 14-də verilmişdir. Qeydetmə sistemi 3 zərrəcik teleskopu və Si detektorundan ibarətdir. Mənbədən əsas bölünmə hissəciklərini qeyd etmək üçün adi Si detektoru istifadə olunub.



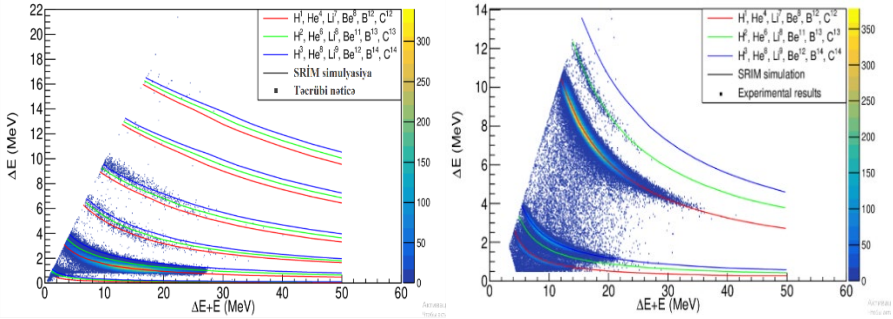
Şəkil 14. Təcrübi qurğunun sxematik təsviri və real görünüşü.

Si detektorunun sahəsi 20×20 mm² və qalınlığı 300 µm-dir. Bu detektordan siqnalları qeyd etmək üçün işlənilib hazırlanmış qeyri standart Spectrig modulundan istifadə edilmişdir. Detektor sistemini ilkin olaraq yoxlamaq üçün sistemin mərkəzinə yerləşdirilmiş aktivliyi 10 kBq, diametri isə 3-5 mm olan ²⁵²Cf radioaktiv mənbəyindən istifadə edilmişdir. Detektorları ²⁵²Cf mənbəyinin alfa parçalanmadan yaranan alfa zərrəciklərdən (6.2 MeV) qorumaq üçün detektorların qarşısına qalınlığı 30 µm olan alüminium folqalar qoyulmuşdur. Beləliklə, detektorlar yalnız üçqat və dördqat bölünmədən çıxan yüklü zərrəcikləri qeyd etmişdir. Təcrübə 1 mBar təzyiq altında aparılmışdır. Şəkil 15-də teleskop 1 və 2 üçün iki ölçülü ΔE - E spektri verilmişdir. Təcrübi nəticələrin doğruluğunu yoxlamaq üçün SRİM proqramında

istifadə edilən detektorların qalınlığına uyğun olaraq ΔE -E metodu simulyasiya edilmiş və nəticələr müqayisə üçün eyni spektrdə verilmişdir. Şəkildən görüldüyü kimi teleskop izotopları identifikasiya etməyə imkan verməsə də zərrəcikləri identifikasiya etmək mümkün olmuşdur. Simulyasiyadan alınan nəticələr təcrübədən alınan nəticələrlə yaxşı uyğunlaşmışdır.

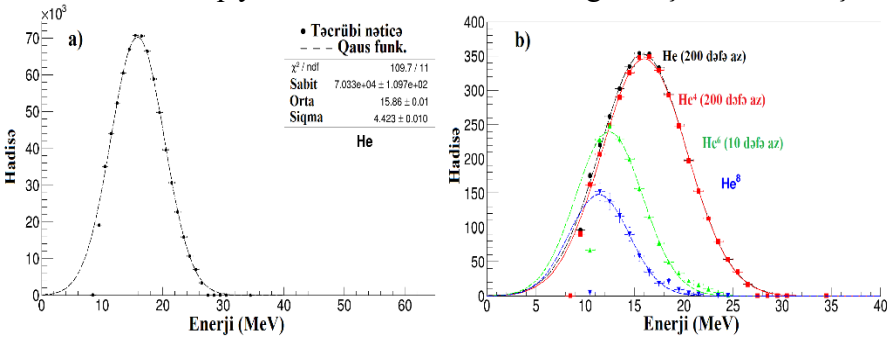
Detektorların enerjiyə görə kalibrənməsi ^{226}Ra mənbəyi ilə 2000–7686.82 keV enerji intervalında aparılmışdır. ^{226}Ra qarışıq alfa mənbəyi 4601 keV-dən yüksək enerjili 6 müxtəlif enerjili (4601, 4784.34, 5489.48, 6002.35, 5304.33, and 7686.82 keV) alfa zərrəciklər buraxdığına baxmayaq aşağı enerjili alfa zərrəciklər almaq üçün ΔE detektorundan istifadə edilmişdir. Detektorlar həm teleskop həm də tək halda kalibrənməmişdir. ΔE detektorları enerjiyə görə kalibrənmək üçün E detektorunun nəticələrində istifadə edilmişdir. Nəticədə bütün detektorlar üçün enerjinin kanaldan asılılıqları alınmışdır. Bu asılılıqlar geniş enerji intervalında (500-50000 keV) xətti xarakter daşıyır. E detektoru üçün spektrometrdə olduğu halda alınan enerji ayırdetməsi 160 keV, ayrılıqda isə 88 keV olmuşdur. Yerə görə ayırdetmə isə 55 μm -dir.

Beşinci fəsilə 30 mm diametrlə və 70 $\mu\text{g}/\text{sm}^2$ qalınlıqlı alüminium oksid (Al_2O_3) altlığı üzərində elektrodpozisiya üsulu ilə 3-5 mm diametrdə çökdürülmüş 370 kBk aktivlikli ^{252}Cf iki tərəfli spontan mənbəyi ilə aparılmış nadir nüvə proseslərinin nəticələri verilmişdir. Hər üç teleskopdan alınmış məlumatlara uyğun 2 ölçülü ΔE -E spektrləri qurulmuşdur. ^{252}Cf üçqat bölünmə zərrəciklərinin teleskoplarla çəkilmiş enerjiyə görə kalibrənməmiş 2 ölçülü ΔE -E spektri birinci və ikinci teleskoplar üçün şəkil 15-də göstərilmişdir. Birinci teleskop ^4He , ^6He , ^8He , Li, Be, B və C kimi zərrəciklərin identifikasiyasına imkan verdiyi halda 2-ci teleskopun ΔE -E spektrində ^1H , ^2H , ^3H , ^4He , ^6He və ^8He kimi zərrəciklərin identifikasiyasını görmək mümkün olmuşdur. Küy signal nisbətinin zəif olmasına görə 3-cü teleskopun nəticələrində isə yalnız He, Li, Be, B və C zərrəciklər müşahidə edilmişdir. Şəkildə həmçinin SRİM simulyasiyasının nəticələri verilmişdir və təcrübə ilə yaxşı uyğunlaşdığı görünür.



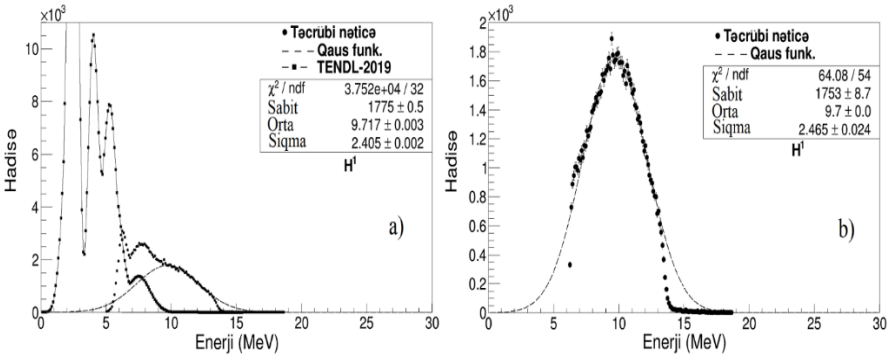
Şəkil 15. ^{252}Cf üçqat bölünmə zərrəciklərinin birinci və ikinci teleskopa çəkilmiş enerjiyə görə kalibrlənmiş 2 ölçülü ΔE - E spektri.

Şəkil 16 (a)-da üçqat bölünmədən qeyd edilmiş alfa zərrəciklərin enerji spektrinə baxsaq 10 MeV enerjilərdə spektr kəsilsə də ümumi paylanmanın Qaus funksiyasına tabe olduğunu görürük. Bu o deməkdir ki, digər zərrəciklər üçün bu üsuldən istifadə etmək olar. İstifadə edilən Al folqaya (31 μm) və nazik detektorun qalınlığına görə kəsik formada alınmış zərrəciklərin enerji spektrini Qaus funksiyası ilə aproksimasiya etməklə onların enerjiləri və çıxımı təyin edilmişdir. Şəkil 16 (b)-də müxtəlif He izotopları üçün enerji spektrləri və Qaus funksiyası ilə aproksimasiya göstərilmişdir. Qeyd edilmiş zərrəciklərdən yalnız protonların enerji spektrinin digər üçqat hissəciklərlə müqayisədə daha mürəkkəb olduğu müşahidə edilmişdir.



Şəkil 16. ^{252}Cf nüvəsinin üçqat bölünməsi zamanı qeyd edilmiş He izotoplarının enerjiyə görə paylanma spektri və müvafiq Qaus funksiyası.

Protonların enerji spektri şəkil 17-də göstərilmişdir. Şəkil 17(a)-da 3 komponent aydın görünür: aşağı ($E_p \sim 6.5$ MeV), orta ($E_p \sim 7.5$ MeV) və yüksək enerjili komponent ($E_p \sim 9.2$ MeV). Spontan bölünmə mənbəyi olan ^{252}Cf alfa aktiv izotop olub alfa zərrəciklər, qamma şüalar və neytronlar emissiya edir. Ona görə də protonları yarada biləcək kənar reaksiyaları analiz etmək spektri doğru analiz etməyimiz üçün vacibdir. Bölünmə neytronlarının (n, p) və 6.2 MeV enerjili alfa zərrəciklərin təsiri ilə baş verən (α, p) reaksiyaları zamanı yaranan protonlar üçqat bölünmə protonlarının çıxımına əhəmiyyətli töhfə verə bilər. Bizim halda aşağı enerjili komponent yarımkəçirici detektorlar daxilində $\text{Si}(n, p)$ reaksiyalarından yaranan protonlara ümumi enerji spektri $\text{Al}(\alpha, p)$ reaksiyalarından yaranan protonlara uyğundur. Müxtəlif mümkün mənbələrdən gələn töhfələri təhlil etmək üçün protonların enerji spektri Talys-1.96 kodu vasitəsilə hesablanmışdır. Hesablama nəticəsində məlum olmuşdur ki, (α, p) reaksiyasından yaranan protonlar üçqat bölünmədən yaranan protonların enerji spektrinə ən çox töhfə verir. $\text{Al}(\alpha, p)$ reaksiyalarından başqa (n, p) və (γ, p) reaksiyaları üçün də Talys hesablamaları aparılmış və məlum olmuşdur ki, bu reaksiyalardan yaranan zərrəciklərin protonların çıxımına töhfəsi xətlər daxilində olur. Şəkil 17(b)-də simulyasiyanın nəticələri çıxıldıqdan sonra təcrübi nəticələr verilmişdir. Göründüyü kimi təcrübi nəticə Qaus funksiyasına tabe olur və çıxılmadan əvvəlki nəticə ilə sonrakı nəticə üst-üstə düşür.



Şəkil 17. $\text{Al}(\alpha, p)$ reaksiyalarından və üçqat bölünmədə emissiya olunan protonların enerji spektri.

Üçqat bölünmədən qeyd edilmiş bütün zərrəciklər üçün alınmış nəticələr cədvəl 2-də toplanmışdır. Cədvəldən görüldüyü kimi alfa zərrəciklərin çıxımı digər zərrəciklərlə müqayisədə kifayət qədər çoxdur. Alfa zərrəciklərin çıxımının çox olmasının səbəbi bu zərrəciklərin dayanıqlı olmasıdır. Məlum olduğu kimi alfa zərrəciklər ${}^4_2\text{He}$ izotopudur. Bu izotop iki neytrona və iki protona malik olduğundan spinlərin paylanmasına görə dayanıqlı sistem (nüvə) əmələ gətirir.

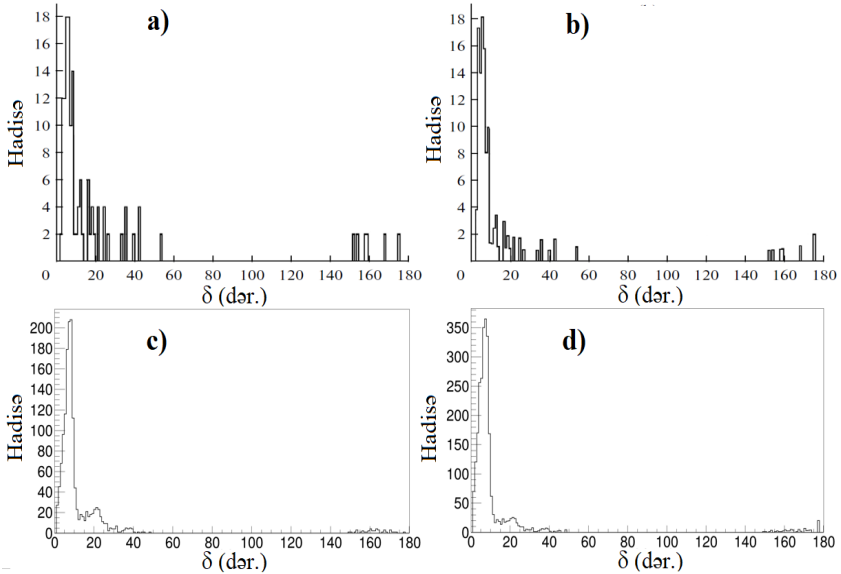
Cədvəl 2.
Bütün üçqat bölünmə zərrəcikləri üçün alınmış nəticələr

Üçqat zərrəcik	Astana enerjisi (MeV)	Enerji (MeV)	Siqma (MeV)	Çıxım (ikiqat bölünməyə nisbət)
H ¹	5.5	9.72(20)	2.46(0.03)	$7.2(4) \cdot 10^{-5}$
H ²	6.0	9.02(18)	3.28(0.01)	$4.1(2) \cdot 10^{-5}$
H ³	6.5	8.59(19)	3.25(0.01)	$3.46(20) \cdot 10^{-4}$
⁴ He	9.5	15.99(24)	4.33(0.01)	$3.82(7) \cdot 10^{-3}$
⁶ He	10.5	12.44(62)	3.42(0.01)	$1.03(5) \cdot 10^{-4}$
⁸ He	11.0	11.23(56)	3.21(0.04)	$5.68(30) \cdot 10^{-6}$
Li	20	15.66(0.42)	5.38(0.02)	$2.1(2) \cdot 10^{-5}$
Be	28	21.92(1.12)	5.95(0.04)	$6.1(4) \cdot 10^{-5}$
B	39	26.67(3.14)	7.50(0.79)	$5.54(1.17) \cdot 10^{-6}$
C	49	31.74(4.60)	8.09(0.97)	$1.65(97) \cdot 10^{-5}$

Çıxımı yüksək olan ikinci zərrəcik isə tritiumdur. Be üçün çıxımın çox alınması da dayanıqlı nüvəyə əsasən izah olunur. Be nüvəsi Li nüvəsinə nəzərən dayanıqlı olduğundan Be-un çıxımı Li-un çıxımından çoxdur. Ümumiyyətlə cüt-cüt nüvələr tək-cüt və tək-tək nüvələrə nəzərən dayanıqlı olurlar.

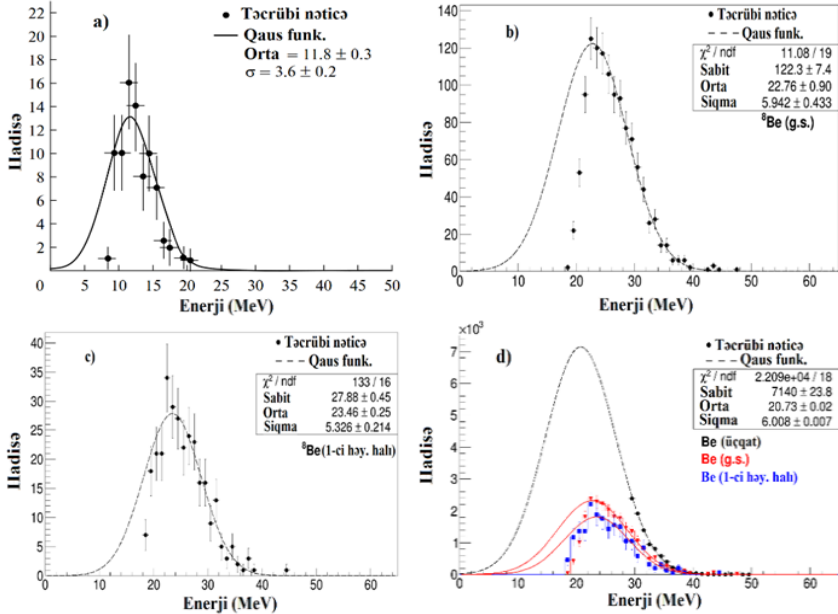
²⁵²Cf nüvəsinin dördqat bölünməsi zamanı əsas bölünmə məhsulları (fraqmentlər) ilə birlikdə iki yüngül zərrəcik də emissiya

olunur. Belə zərrəciklərin həm “həqiqi” həm də “psevdo” dördqat bölünmədə emissiya oluna bilər. “Psevdo” dördqat bölünmə zərrəciklərini qeyd etmək “həqiqi” dördqat bölünmə zərrəcikləri ilə müqayisədə çox çətinidir. Bu zərrəciklər arasındakı bucağın tapılması, enerjilərinin ölçülməsi üçün adi yarım keçirici detektor istifadə etdikdə hər iki zərrəcik eyni bir detektora düşdüyündən hər iki zərrəcik bir hadisə (zərrəcik) kimi qeyd olunur. Təcrübələrdə piksellə Timepix detektorlarından istifadə edildiyindən onları asanlıqla identifikasiya etmək mümkün olmuşdur. Dördqat bölünmə prosesinin tədqiqi üçün də şəkil 16-da göstərilmiş qeyd etmə sistemindən istifadə edilmişdir. (α, α) və (α, t) cütləri arasında təcrübədən alınmış paylanma spektrləri şəkil 18 (a) və (c)-də verilmişdir. Şəkil 18 (a) və (b)-də köhnə təcrübə qurğusu ilə alınan nəticələndir. Bu təcrübələrdə aktivliyi az olan mənbə istifadə edildiyindən toplanan statistika az olmuşdur. Bərpa olunmuş spektr şəkil 18 (b) və (d)-də verilmişdir. Şəkildə 140° -dən böyük bucaqlara uyğun gələn hadisələr əsl dördqat bölünmə zərrəciklərinə uyğundur.



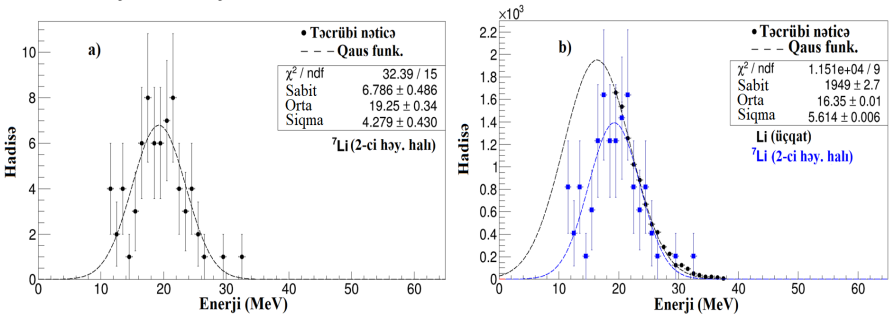
Şəkil 18. Təcrübədə alınmış dördqat bölünmə zərrəcikləri arasındakı bucaq paylanması. (a) və (c): bərpa olunmamış, (b) və (d): bərpa olunmuş.

Şəkil 18 (b) və (d)-dən göründüyü kimi kiçik bucaqlarda hadisələrin sayı çoxdur. Dördqat zərrəciklərin orta kinetik enerjiləri üçqat zərrəciklərin kinetik enerjilərinə bənzəyir lakin bir qədər azdır. Aşkar edilmiş cütlərin çoxu (α - α) cütləridir (70%). Bu cütlər yüksək statistikaya görə daha ətraflı təhlil edilmişdir. Müəyyən edilmişdir ki, aşkar edilmiş hadisələrin əksəriyyəti Be nüvəsinin əsas və ilk həyəcanlanmış hallardan parçalanması zamanı yaranır. Bölünmənin kinematikasına əsasən hesablanmışdır ki, ^8Be izotopunun əsas haldan bölünməsi zamanı əmələ gələn alfa zərrəciklər arasında maksimum bucaq 8° olmalıdır. Bu bucaqdan böyük bucaqlardakı hadisələr ^8Be izotopunun həyəcanlanmış halları ilə izah olunur. 1-ci həyəcanlanmış halda (α , α) cütləri arasında bucağın maksimumu $7.11(13)^\circ$, həyəcanlanmış halda isə $21.25(22)^\circ$ olmuşdur. Qeyd etmə sisteminin həndəsəsi çərçivəsində onlar arasında bucağın 60° kimi dəyişdiyi müşahidə edilmişdir. Trayektoriya hesablamalarından istifadə edərək həm əsas, həm də 1-ci həyəcanlanma halında (α , α) cütləri arasındakı bucaqlar simulyasiya olunmuşdur. Nəticələr yaxşı uyğunlaşmışdır.



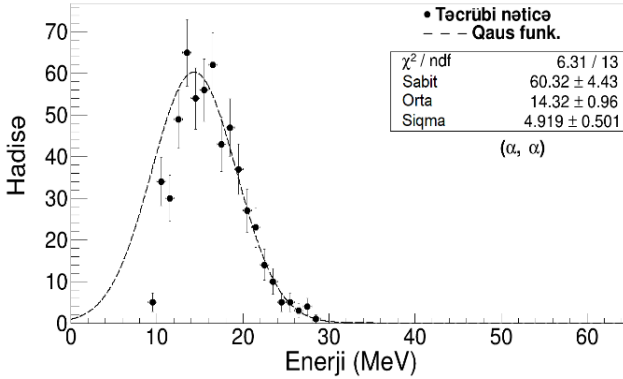
Şəkil 19. ^8Be izotopunun əsas halında (α , α) cütləri üçün bucağa (sol) və enerjiyə (sağ) görə paylanma spektrləri.

Köhnə qeyd etmə sistemi ilə ölçülmüş əsas halda (α , α) cütləri üçün enerjiyə görə paylanma spektri şəkil 19 (a)-da verilmişdir. Yeni qeyd etmə sistemi ilə alınmış nəticələr isə şəkil 19 (b)-də göstərilmişdir. Əsas halda cütlər arasındakı bucaq 110^0 -dən kiçik götürülmüşdür və bu hadisələrə uyğun enerji spektri qurulmuşdur. Həyəcanlanmış hal üçün alınmış enerji spektri şəkil 19 (c)-də göstərilmişdir. Şəkil 19 (d)-də müqayisə üçün üçqat bölünmədə qeyd edilmiş Be izotoplarının enerji spektri ilə “psevdo” dördqat bölünmə məhsulları olan (α , α) cütlərinin enerji spektrləri göstərilmişdir. Nəticələr üçqat bölünmənin nəticələrinə normallaşdırılmışdır. ^7Li izotopunun 2-ci həyəcanlanmış hal üçün alınmış (α , t) cütlərinin cəm enerji spektri şəkil 20 (a)-da göstərilmişdir. Şəkil 20 (b)-də müqayisə üçün üçqat bölünmədə qeyd edilmiş Li izotoplarının enerji spektri ilə “psevdo” dördqat bölünmə məhsulları olan (α , t) cütlərinin enerji spektrləri göstərilmişdir. Şəkil 20 (b)-də göstərilən nəticələr üçqat bölünmənin nəticələrinə normallaşdırılmışdır.



Şəkil 20. ^7Li izotopunun 2-ci həyəcanlanmış halı üçün (α , t) cütlərinin bucağa (sol) və enerjiyə (sağ) görə paylanma spektrləri.

Həqiqi dörd qat bölünmədə emissiya olunan (α , α) və (α , t) cütləri də analiz edilmişdir. Bu bölünmə prosesi üçün də zərrəciklərin enerjiləri və çıxımı təyin olunmuşdur. Şəkil 21-də (α , α) cütləri üçün enerjiyə görə paylanma spektrləri verilmişdir. Bu cütlər üçün orta kinetik enerji $14.32(96)$ təyin edilmişdir. (α , t) cütləri üçün toplanan statistik məlumatlar az olsa da təyin edilmiş qiymətlər bu prosesin baş vermə ehtimalının hansı tərtibdə olduğunu deməyə əsas verir.



Şəkil 21. Dördqat bölünmədə emissiya olunan (α, α) cütləri enerjiyə görə paylanma spektri.

Cədvəl 3. Dördqat bölünmə zərrəcikləri üçün alınmış nəticələr

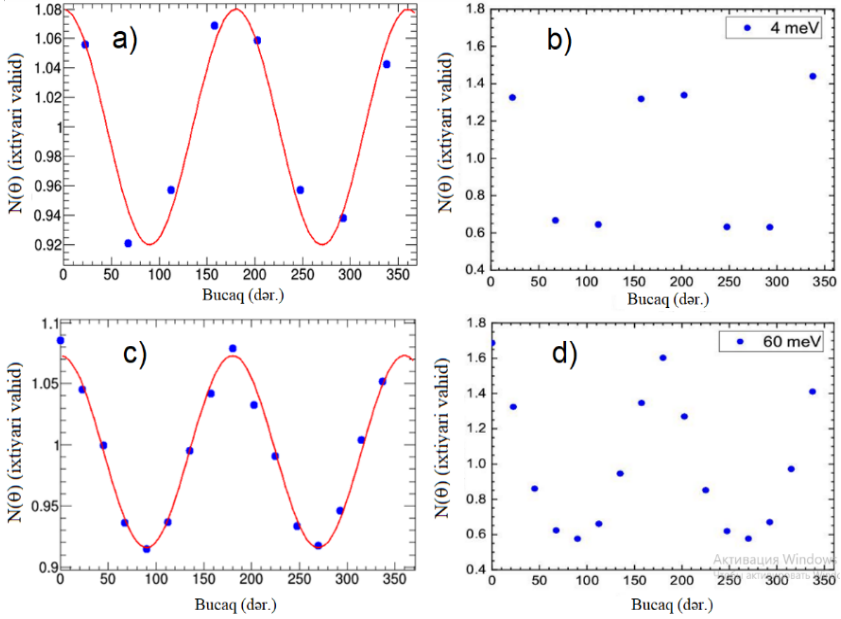
Zərrəcik	Enerji (MeV)	Sigma (MeV)	Çıxım (ikiqat bölünməyə nisbət)
Əsas hal ¹ (α)	11.8(3)	3.6(2)	$1.3(3) \cdot 10^{-6}$
1-həy. halı ¹ (α) (köhnə)	14.5(2.0)	-	$3.6(9) \cdot 10^{-6}$
Be (α, α) (əsas hal)	22.76(90)	5.942(433)	$3.7(9) \cdot 10^{-6}$
Be (α, α) (1-ci həy. halı)	23.46(25)	5.326(214)	$0.7(2) \cdot 10^{-6}$
Li (α, t) (2-ci həy. halı)	19.25(34)	4.279(430)	$0.15(1) \cdot 10^{-6}$
Be (α, α) (əsas hal*)	22.76(90)	5.942(433)	$7.1(9) \cdot 10^{-6}$
Be (α, α) (1-ci həy. halı*)	23.46(25)	5.326(214)	$0.8(2) \cdot 10^{-6}$
Li (α, t) (2-ci həy. halı*)	19.25(34)	4.279(430)	$0.19(1) \cdot 10^{-6}$
(α, α)	14.32(96)	4.919(370)	$0.6(2) \cdot 10^{-6}$
(α, t)	13.77(25)8. 51(1.8)	4.397(855) 3.356(708)	$0.2(1) \cdot 10^{-6}$

Dördqat bölünmə prosesləri üçün təyin edilmiş enerjilər və çıxımlar cədvəl 3-də verilmişdir. Cədvəldə qeyd etmə sisteminin həndəsəsinə görə bərpa olunmamış və olunmuş (*) nəticələr verilmişdir. Cədvəldə müqayisə üçün əvvəlki qeyd etmə sistemi ilə alınmış nəticələr də göstərilmişdir¹. Əsas hal üçün əvvəl alınmış nəticələrlə yeni nəticələr yaxşı uyğunlaşır. Amma ${}^8\text{Be}(\alpha, \alpha)$ 1-ci həyəcanlanmış halların isə ciddi fərqlənməsi əvvəlki ölçmələrdə çox az statistikanın toplanmasıdır. Həyəcanlanma hallarında enerjilərin yüksək olması həm həyəcanlanma hallarının enerjisi həm də izotopun kütlə ədədindən asılıdır. Eyni elementin izotopları üçün atom kütlə ədədi artdıqca enerji azalır. Bu asılılıq üçqat bölünmə zərrəcikləri üçün də müşahidə edilmişdir. Bunun səbəbi iki əsas fraqment arasında yaranan zərrəciklərin Kulon təsir qüvvəsinin təsiri ilə sürətlənmələrinin fərqli olmasıdır. Yüngül izotop daha çox sürətlənə bildiyi üçün onun enerjisi yüksək olur.

Altıncı fəsildə 4, 25 meV, 60 meV və 270 meV enerjili neytronların təsiri ilə ${}^{235}\text{U}$ nüvəsinin bölünməsi zamanı emissiya olunan ani γ -şüaların və neytronların bucaq paylanmalarının nəticələri verilmişdir. Qamma kvantların bucaq anizotropiyasını xarakterizə edən ən sadə inteqral parametr $W(\theta) = ((W(0^\circ) - W(90^\circ))/W(0^\circ))$ kimi təyin olunan A anizotropiya əmsalıdır. Mürəkkəb nüvənin ikiqat bölünməsində emissiya olunan γ -şüaların bucaq paylanması aşağıdakı ifadə ilə təsvir edilə bilər:

$$N(\theta) \sim 1 + A \cdot \cos^2 \theta \quad (10)$$

burada A - anizotropiya əmsalı, θ - qamma kvantların emissiya bucağıdır. Detektorlarının müxtəlif astana səviyyələri ilə bağlı fərqli sayma effektivliyi hər detektor üçün tapılmış əmsallarla aradan qaldırılmışdır. Təcrübələr şəkil 7-də göstərilmiş təcrübi qurğuda aparılmışdır. 4 meV və 60 meV enerjili neytronların təsiri ilə ${}^{235}\text{U}$ nüvəsinin bölünməsi zamanı ani γ -kvantların və neytronların bucaq paylanması şəkil 22-də göstərilmişdir. Bölünmə istiqamətində γ -şüalarının buraxılması ehtimalı perpendikulyar istiqamətdən daha yüksəkdir. Bucağa görə anizotropiya əmsalı ani γ -şüalarının bucaq paylanmasını (10) funksiya ilə aproksimasiya etməklə tapılmışdır.



Şəkil 22. ^{235}U nüvəsinin bölünməsi zamanı bütün qamma detektorlarının sayma effektivliklərinin korreksiyasından sonra ani γ -şüaların (a, c) və neytronların (b, d) bucaq paylanması.

Ölçmələrin xətası alınmış məlumatların statistik xətasından təyin edilmişdir. Yuxarıda verilmiş 4 enerjide qamma şüalar üçün ölçülmüş anizotropiya əmsalları aşağıdakı cədvəl 4-də toplanmışdır. Nəticədə anizotropiya əmsalının enerjiden asılı deyil qeyd etmə sisteminin vəziyyətindən asılı olduğu müəyyənəşdirilmişdir. Bu o deməkdir ki, təcrübi qurğunun vəziyyətini dəyişmədən təcrübələrin aparılması vacibdir.

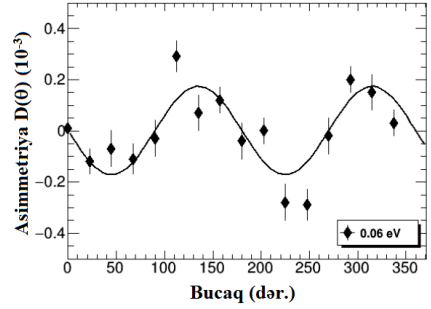
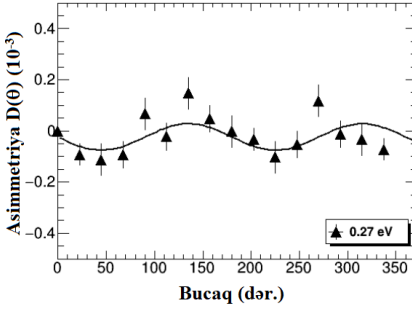
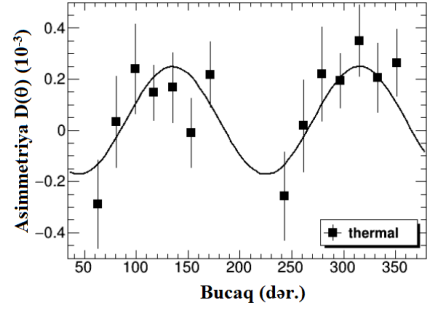
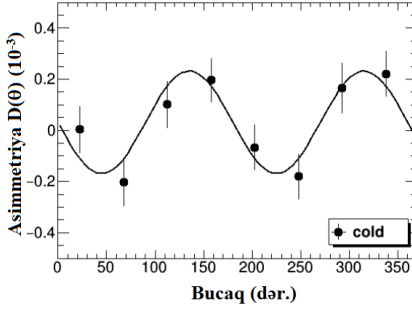
Cədvəl 4.

Ani γ -şüaların üçün təyin edilmiş anizotropiya əmsalları

Enerji	270 meV	60 meV	4 meV	25 meV
A	0.163(13)	0.1570(53)	0.160(15)	0.146(2)

Yeddinci fəsildə 4 meV enerjili polyarlaşmış neytronların təsiri ilə xassələri ^{235}U hədəfinə oxşar ^{233}U hədəfindən istifadə edilərək bu iki oxşar izotopun asimmetriyası ölçülmüş və onun necə dəyişdiyinə baxılmışdır. Bütün təcrübi şərtlərin eyni olmasına xüsusi diqqət

yetirilmiş və yalnız hədəflər dəyişdirilərək təcrübə aparılmışdır. Nəticədə ^{233}U hədəfi üçün asimmetriyanın bucaqdan asılılığı və asimmetriya əmsalları təyin edilmişdir. Qamma şüalar üçün alınmış asimmetriyanın qiyməti $R_\gamma = +5.75(1.65) \cdot 10^{-5}$ bərabər olmuşdur. Bu qiymət ^{235}U izotopu üçün isə $R_\gamma = -20.0(4.5) \cdot 10^{-5}$ alınmışdır. Uran izotopları üçün alınmış asimmetriya əmsallarının qiymətinin fərqli olması bu izotopların tədqiq olunan enerjiddə bölünmə effektiv en kəsiyi ilə əlaqədardır. Burda maraqlı sual asimmetriya əmsallarının işarəsinin əks alınmasıdır. ^{235}U izotopu üçün alınmış asimmetriya əmsalının işarəsi mənfi, ^{233}U izotopu üçün isə müsbətdir. Asimmetriyanın əks alınması bu izotoplar üçün bölünmə oxunun əks istiqamətlərdə döndüyünümü göstərir? Başlanğıcda alınan nəticələr burda başqa bir effektin olduğunu deməyə əsas verir və ya bu fiziki məsələni daha geniş tədqiq edərək izah etmək lazımdır. Bu məqsədlə müxtəlif enerjilərdə ^{235}U izotopu üçün ROT asimmetriyanın ölçülməsinə davam edilmişdir və bu fəsildə ^{235}U nüvəsinin 25 meV, 60 meV və rezonans (270 meV) neytronlar ilə bölünməsi zamanı yaranan γ -kvantların və neytronların bucaq paylanmasında bölünən nüvənin fırlanma (ROT) effektinin axtarışı üzrə təcrübələr və onların nəticələri verilmişdir. Ümumiyyətlə, bir-birindən enerji və polyarlaşmış neytron seli, neytronların polyarlaşma üsulu, fraqment detektorları və onların yeri, həmçinin məlumatların toplanması və işlənməsi sistemi ilə fərqlənən bir neçə təcrübələr aparılmışdır. Təcrübi məlumatlardan (9) düsturu ilə təyin edilmiş fraqmentlərdən biri ilə sinxron qeyd edilmiş ani γ -kvantların və neytronların $D(\theta)$ asimmetriyası təyin edilmişdir. Tədqiq olunan enerjilərdə qamma şüalar üçün alınmış asimmetriyalar şəkil 23-də verilmişdir. Aparılan təcrübə şəraitində neytronlar üçün asimmetriya müşahidə edilmədiyindən onların asimmetriya əmsalları təqdim olunmamışdır. Asimmetriya əmsallarını (R_γ) təyin etmək üçün alınan bucaq asılılıqları daha sonra $D(\theta) = R_\gamma \sin(2\theta)$ funksiyası ilə aproksimasiya edilmişdir. Şəkildə düz xətt bu funksiya ilə əldə edilmiş bucaq asılılığının $D(\theta)$ təcrübi nəticələrə yaxınlaşmasının nəticəsini göstərir. Aproksimasiya nəticəsində γ -kvantlar və neytronlar üçün alınmış asimmetriya parametrləri cədvəl 5-də verilmişdir.



Şəkil 23. Ani γ -kvantlar üçün asimetriya nisbətini $D(\theta)$ bucaqdan asıllığı. Nəticələr neytron selinin polyarlaşma dərəcəsinin dəyişməsinə görə korreksiya olunub.

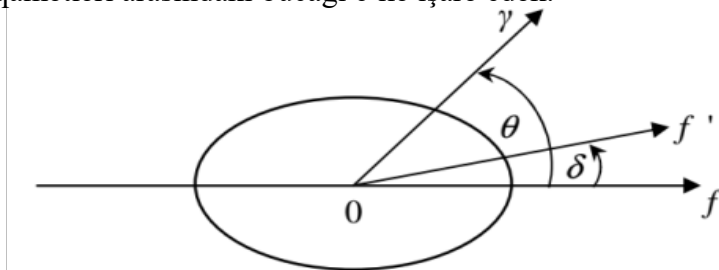
Cədvəl 5.

Qamma şüalar üçün təyin edilmiş asimetriya əmsalları

E_n (meV)	4	25	60	270
$R_\gamma (10^{-5})$	-20.0(4.5)	-21.1(6.8)	-17.3(2.8)	-5.4(2.5)

ROT effekti təsvir etmək üçün fraqmentin kütlə mərkəzi sistemində yüngül bölünmə fraqmentinin spininin oriyentasiyasını və bu spinlə yaranan qamma şüaların anizotropiyasını qorumaq anlayışından istifadə edilmişdir. Şəkil 24-də ROT effektin izahının sadələşdirilmiş sxemi göstərilmişdir. Bölünmə oxunun ilkin istiqaməti f hərfi ilə, bölünmə fraqmentinin hərəkətinin son istiqaməti isə müvafiq olaraq f' ilə qeyd olunmuşdur. Sonuncu, mürəkkəb nüvənin fırlanması

səbəbindən yaranır. Neytron spininin müsbət proyeksiyası halında f və f' istiqamətləri arasındakı bucağı δ ilə işarə edək.



Şəkil 24. Bölünən nüvənin fırlanma bucağının təyin edilmə sxemi. f - bölmə oxunun ilkin istiqaməti (bölmə anında); θ – bölünmə oxunun ilkin istiqamətinə nisbətən γ -kvantın emissiya bucağı; δ – bölünmə oxunun fırlanma bucağı; f' -mürəkkəb sistemin fırlanması səbəbindən bölünmə fraqmentinin son hərəkət istiqamətidir.

Neytronun polyarizasiyası mənfi qiymətə malikdirsə, bölünən nüvələrin fırlanması əks istiqamətdə baş verir. Bu halda fırlanma bucağı $-\delta$ olur. Qamma şüaların emissiya bucağı (θ), anizotropiyanın qamma şüalanmasına təsirini müəyyən etmək və əlaqədar qamma şüalanmanın say sürətini hesablamaq üçün istifadə edilə bilər. Sistemin fırlanması ilə əlaqədar olaraq θ bölünmə fraqmentinin hərəkət istiqamətinə görə γ -kvantın qeyd edilmə bucağı deyil. Təcrübədə biz onu yeni θ' bucağında qeyd edirik. Bu bucaq polyarlaşmış neytronun spinindən asılı olaraq $\theta \pm \delta$ (bölünmə oxunun fırlanma bucağı) bərabərdir:

$$\theta' = \theta - \delta \text{ əgər } \sigma > 0$$

$$\theta' = \theta + \delta \text{ əgər } \sigma < 0$$

Nüvə sisteminin fırlanması olmadan γ -kvantların say sürətini (10) ifadəsinə əsasən aşağıdakı kimi yazmaq olar:

$$N(\theta) = N(90^0) \cdot (1 + A \cdot \cos^2 \theta) \quad (11)$$

burada A anizotropiya əmsalıdır. Onda neytronun müxtəlif spin vəziyyətlərinə uyğun gələn sayma sürətləri belə yazıla bilər:

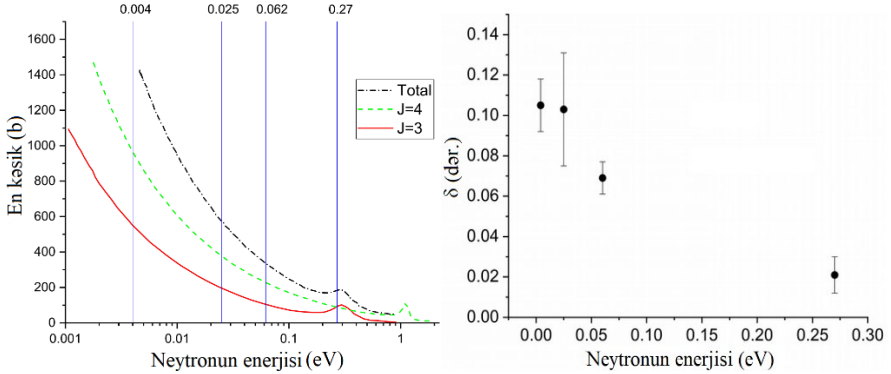
$$N^+(\theta') = N(90^0) \cdot (1 + A \cdot \cos^2(\theta' + \delta)) \text{ əgər } \sigma > 0$$

$$N^-(\theta') = N(90^0) \cdot (1 + A \cdot \cos^2(\theta' - \delta)) \text{ əgər } \sigma < 0 \quad (12)$$

Qeyd etmək lazımdır ki, bölünmə fraqmentinin kütlə mərkəzi sistemində qamma şüalanması üçün anizotropiya laboratoriya sistemindəki anizotropiyadan çox fərqlənir. Bu ifadələri (9) düsturunda nəzərə almaqla ani bölünmə γ -kvantları üçün asimmetriya əmsalının bucaq asılılığını aşağıdakı kimi yazmaq olar:

$$D(\theta) \approx \frac{A \cdot [\cos^2(\theta + \delta) - \cos^2(\theta - \delta)]}{2 \cdot [1 + A \cdot \cos^2(\theta)]} \approx \frac{-A \cdot \delta \cdot \sin 2\theta}{1 + A \cdot \cos^2(\theta)} \quad (13)$$

Müxtəlif enerjilər üçün alınmış asimmetriyaların (şəkil 22) bucaqdan asılılığını ($D(\theta)$) bu funksiya ilə aproksimasiya etməklə uyğun enerjilər üçün bölünmə oxunun dönmə bucağı təyin edilmişdir. Şəkil 25-də I-1/2 və I+1/2 vəziyyətləri üçün spinə görə ayrılmış bölünmə en kəsiklərin və ROT effektin induksiya edici neytronunun enerjisindən asılılığı göstərilmişdir. Keçid hal spinləri $J^\pm = (I \pm 1/2)$ olan nüvələr müxtəlif sürətlərə və fırlanma istiqamətlərinə malikdir.



Şəkil 25. ^{235}U üçün induksiya edici neytronun enerjisinin spinlərə görə ayrılmış bölünmə en kəsikləri və fırlanma bucağının δ induksiya edici neytronların enerjisindən asılılığı.

Yəni bölünmə oxunun fırlanma bucağının (δ) işarəsi müxtəlif vəziyyətlər üçün əks olacaq. Bunu aşağıda verilmiş fırlanma tezliyinin (14) ifadəsindən də görmək olar. Bundan əlavə bu ifadədən görmək olar ki, I+1/2 halı üçün parsial fırlanma tezliyi mütləq qiymətinə görə I-1/2 halı üçün əks istiqamətdə olan parsial fırlanma tezliyini üstələyir. Nəticədə soyuq neytronlar hissəsində ROT effektin müsbət və yüksək qiyməti müşahidə olunur.

$$\omega(J, K) = \begin{cases} \frac{J(J+1) - K^2}{J} \frac{\hbar}{2I} p_n & I + 1/2 \\ \frac{-J(J+1) - K^2}{J+1} \frac{\hbar}{2I} p_n & I - 1/2 \end{cases} \quad (14)$$

Termal enerjilərdə polyarlaşmış neytronlar üçün δ_4/δ_3 nisbəti soyuq neytronlar üçün olan nisbətlə təxminən eynidir. Ona görə də termal və soyuq neytronlar üçün ROT effektin gözlənilən qiymətləri üst-üstə düşür və bu da şəkil 25-də verilmiş eksperimental nəticələrə uyğundur. 270 meV (^{235}U izotopun ilk rezonans enerjisi) enerjisinə yaxınlaşdırsa bölünmə en kəsiyinin spinindən asılı olaraq nisbət qiyəti dəyişir. Bu enerjide spin $J=3$ olan halı üçün en kəsik cüzi də olsa üstünlük təşkil edir. Effektin qiyməti istilik və ya soyuq neytronlara nisbətən 3 dəfə kiçik olduğu müşahidə edilmişdir ki, bu da ROT effektinin ən yaxşı modelinin nəticələri ilə yaxşı uyğunlaşır. 1.14 eV rezonansda təsir soyuq neytronlardan daha çox olmalıdır, çünki şəkil 25-dən görünür ki, bu rezonansda yalnız $J=4$ spin halı mövcuddur. Şəkilləri müqayisə etsək bölünmə oxunun fırlanma bucağının dəyişmə tendensiyasının eyni olduğunu görmək olar. Bu dəyişmə də ROT effektin qiymətinin $J=3$ və $J=4$ spin hallarına uyğun gələn en kəsiklərinin nisbəti ilə dəyişdiyini deməyə əsas verir.

Əldə edilmiş eksperimental məlumatlar bölünmə prosesinin dinamikasını öyrənmək üçün, xüsusilə kəsilmə nöqtəsi yaxınlığında, hələ də mövcud olmayan bölünmənin tam kvant mexaniki modelini yaratmaq üçün çox əhəmiyyətlidir. Xüsusilə induksiya edici neytronların müxtəlif enerjiləri ilə ölçmələr müxtəlif spin hallarını ayırmağa və J və K kanallarının çəkili haqqında "təmiz" məlumat əldə etməyə imkan verir. İndiyə qədər K kvant ədədlərinin effektiv qiymətləri çoxlu sayda sərbəst parametrlərdən istifadə edərək "istiqləndirilmiş" nüvələrin bölünmə fraqmentlərinin bucaq paylanması aproksimasiya etməklə müəyyən edilmişdir. Bu şəkildə əldə edilən məlumatların etibarlılığı az olması alınan təcrübə nəticələrinin vacibliyinin sübutudur.

Ani γ -kvantların və neytronların bucaq paylanmasında ROT-asimmetriya onların hər ikisinin bölünmə fraqmentləri tərəfindən qırılma anında nüvənin deformasiya oxuna nəzərən anizotrop

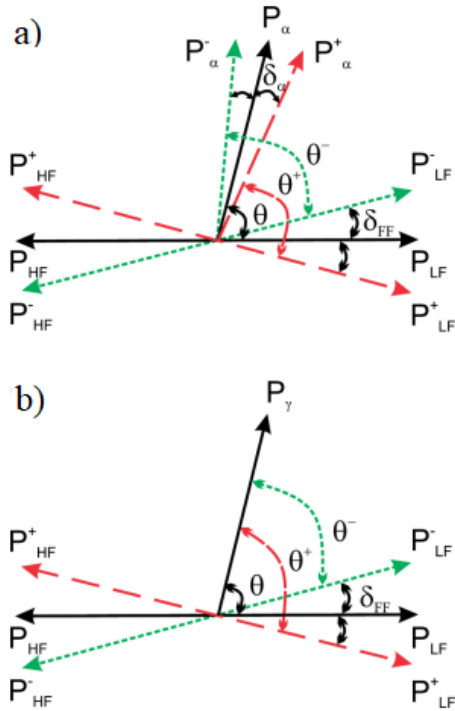
buraxılması ilə izah edilə bilər. Bu yanaşma ilə nəzərdən keçirilən proses iki ardıcıl mərhələyə bölünür. Birinci mərhələdə nüvə iki fraqmentə bölünür; ikinci mərhələdə sürətlənmiş fraqmentlərdən neytronlar və γ -kvantlar buraxılır. Bu izahda iki mühüm məqamı qeyd etmək lazımdır:

1) fraqmentin sərbəst sistemində γ -kvantlar və neytronların emissiyasında anizotropiyanın olması;

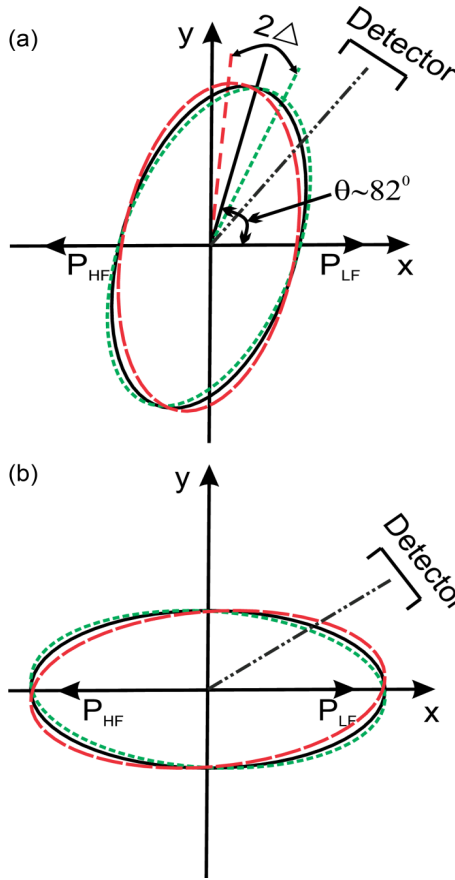
2) fraqmentin sürətlənmə oxuna nisbətən müvafiq bucaq paylanması (fraqmentin sərbəst sistemində) ilə əlaqəli aksial simmetriyanın olmaması.

Üçqat bölünmədə α zərrəciyin trayektoriyası da bölünmə oxu ilə birlikdə fırlanır (onun hərəkətinə fraqmentlərin elektrik sahəsi əhəmiyyətli dərəcədə təsir edir). α zərrəciyin sürəti fraqmentlərin sürətindən nəzərə çarpacaq dərəcədə yüksək olduğundan, α zərrəcik nüvənin deformasiyasının ilkin oxuna nisbətən fraqmentlərin emissiya istiqamətində trayektoriyasını dəyişə bilmir. Yəni, α zərrəcik fırlanır, lakin bölünmə oxundan daha yavaş (çox kiçik bucaq qədər). Əgər bölünən nüvə polyarlaşmayıbsa onda nüvənin fırlanması yalnız fraqmentlərin emissiyasının oxuna nisbətən α zərrəciklərin bucaq paylanmasının müəyyən qədər azalmasına səbəb olur. Polyarlaşmış nüvə halında, neytronun polyarlaşması ilə müəyyən edilən fırlanma istiqaməti üstünlük təşkil edir. Bu fırlanma bucağının işarəsi δ_{FF} parçalanan nüvənin polyarlaşmasının əksi istiqamətlərində əks olacaqdır. Bölünən nüvənin polyarlaşmasından asılı olaraq bölünmə oxunun bu və ya digər istiqamətdə α zərrəciklərin bucaq paylanmasına nisbətən fırlanması kimi müşahidə olunur (şəkil 26 (a)). α zərrəciyin qeyd edilmə bucağı eksperimental olaraq yüngül fraqmentin hərəkətinin son istiqamətində ölçüldüyündən, mürəkkəb nüvənin polyarlaşması ilə müşahidə edilən bucaq sürüşməsi bölünmə oxunun əyilmə bucağı ilə müqayisədə α zərrəciyin gecikmə Δ bucağıdır. Qeyd etmək lazımdır ki, təcrübədə biz birbaşa olaraq üçqat bölünmədə yaranan zərrəciyin bölünmə oxunun əyilməsinə nisbətən iqiqat sürüşmə bucağını qeyd edə bilirik: $2\Delta = 2(\theta - \theta') = 2(\delta_{FF} - \delta_\alpha)$ (şəkil 26 (a), 27 (a)). Üçqat bölünmədə bölünmə oxunun δ_{FF} (ROT effektinin qiyməti) fırlanma bucağını təyin etmək üçün trayektoriya

hesablamaları lazım gəlir. γ -kvantlar və neytronlar halında isə α zərrəcikdən fərqli olaraq dönmə bucağının təyini mürəkkəb traektoriya hesablamalarından, yəni model parametrlərindən asılı deyil. İki qat bölünmədə emissiya ani γ şüalarının bucaq paylanması ROT asimetriyası üçün eyni mexanizm, lakin əks işarələr gözlənilir. Üçqat bölünmədə bölünmə oxuna demək olar ki, perpendikulyar olaraq çıxan α zərrəciklərindən fərqli olaraq, bölünmə fraqmentlərindən çıxan ani qamma şüalar əsasən bölünmə oxu boyunca çıxır.



Şəkil 26. Üçqat bölünmədə yaranan α zərrəciklərinin (a) və (b) bölünmə fraqmentlərindən emissiya olunan γ -şüaların bucaq paylanmasındakı sürüşmənin yaranma sxemi. Burada P_{LF} və P_{HF} fraqmentlərin istiqamətləri, P_α isə α -zərrəciyin qırılma anında hərəkətidir. “+” və “-” neytron polyarlaşmasının fərqli istiqamətləri üçün fraqmentlərin son istiqamətlərini göstərir.



Şəkil 27. (a) α zərrəciklər və (b) γ kvantlar üçün ROT effektin modeli. Bütöv xətt üçqat bölünmədə yaranan α zərrəciklərin və iki qat bölünmədə yaranan γ kvantların bölünmə oxuna nəzərən bucaq paylanmasını göstərir. Qırıq və nöqtəli xətlər isə neytron selinin iki polyarlaşma istiqaməti üçün paylanmaları göstərir.

Qamma şüalarının emissiyasının anizotropiyası α zərrəciklərə nəzərən çox kiçikdir və bunun da səbəbi bölünmə oxu boyunca bölünmə fraqmentinin spinlərinin yönəlməsidir. İmpuls momentinin saxlanmasına görə, fraqmentin impuls momentinin (spinlərin) oriyentasiyası bölünən nüvənin deformasiya oxunun ilkin istiqamətinə nəzərən dəyişmir, bölünmə oxu isə üçqat bölünmədə olduğu kimi δ_{FF}

bucağı qədər fırlanır. Bu fırlanma eksperimental olaraq bölünməyə səbəb olan neytronun polyarlaşmasından asılı olaraq fraqmentin emissiya istiqamətinə nəzərən γ şüalarının bucaq paylanmasında yerdəyişmə kimi müşahidə oluna bilər (şəkil 26 (b)).

Ümumiyyətlə qamma şüaları üçün bucağa görə paylanma nüvənin iki hissəyə bölünməsi və fraqmentlərin sürətlənməsi zamanı hərəkətsiz qalması anında formalaşır. Bu onunla bağlıdır ki, qamma kvantların bucaq anizotropiyası bölünmə sisteminin simmetriya oxuna nisbətən fraqmentlərin spinlərinin istiqamətlənməsi ilə müəyyən edilir və impuls momentinin saxlanma qanununa görə sürətlənmə zamanı spinlər fırlanmır. Beləliklə, qamma şüaları üçün ROT effekti ölçərkən bölünmə oxunun dönmə bucağını təyin etmək üçün sabit bölünmə oxu üçün bucağa görə paylanmanı bilmək (ölçmək) lazımdır. Neytronlar üçün ROT effektin müşahidə olunmamasının səbəbi isə neytronların bucağa görə paylanmasının mürəkkəb xarakter daşmasıdır. Çünki neytronların bucaq paylanması iki komponentdən ibarətdir:

1) hərəkət edən fraqmentlərdən buraxılan neytronların kinematik fokuslanması ilə əlaqədar anizotropiya;

2) bölünmə oxuna nisbətən fraqmentlərin spinlərinin istiqamətlənməsinə görə anizotropiya və müvafiq olaraq spinə nisbətən fraqmentdən neytronların emissiyasının anizotropiyası.

Neytronların bucaq paylanmasının birinci komponenti bölünmə oxu ilə birlikdə fırlanır və ROT effektinin yaranmasına səbəb olmur, çünki bölmə oxunun dönməsi baş verdikdən sonra neytronların tam sürətlənmiş fraqmentlərdən buraxıldığı hesab olunur. Anizotropiyanın ikinci komponenti qamma şüalarının anizotropiyası ilə eyni təbiətə malikdir və müvafiq olaraq ROT effektin yaranmasına gətirib çıxarır. Artıq qeyd edildiyi kimi, dönmə bucağını təyin etmək üçün ROT effekti ölçməklə yanaşı, bu təsirə səbəb olan bucaq anizotropiyasını bilmək lazımdır. Hazırda neytronlar üçün anizotropiyanın ikinci komponentinin etibarlı ölçülməsi yoxdur (çünki o, birincidən çox kiçikdir), yalnız nəzəri qiymətləndirmələr var. Buna görə də, neytronlar üçün ROT effekti ölçülməsi mümkün olmamışdır.

ƏSAS NƏTİCƏLƏR

1. ^{252}Cf nüvəsinin spontan bölünməsi zamanı sıra nömrəsi $Z=1\div 5$ intervalında olan üçqat bölünmə zərrəciklərinin enerjiləri $8.6(2)\div 32(4)$ MeV, çıxımları isə ikiqat bölünməyə nəzərən $5.54(1.17)\cdot 10^{-6}\div 3.82(7)\cdot 10^{-3}$ intervalında olub ən çox ehtimala malik alfa zərrəciklərin emissiya bucağı $84(2)^0$ təyin edilmişdir. Alınan təcrübi nəticələrə və mövcud olan modellərə əsasən bu zərrəciklərin bölünmə anında yarandığı və əsas bölünmə fraqmentlərinin Kulon qarşılıqlı təsiri nəticəsində yüngül fraqmentə nəzərən emissiya meylli müşahidə edilir [5, 6, 17].

2. ^{252}Cf nüvəsinin spontan bölünməsi zamanı həqiqi dördqat bölünmə prosesində yaranan (α, α) cütlərinin enerjilərinin $14.3(9)$ MeV, çıxımlarının isə $0.6(2)\cdot 10^{-6}$ təyin edilməklə belə bölünmənin ehtimalının üçqat bölünməyə nəzərən daha az olduğu göstərilmişdir [5].

3. “Psevdo” dördqat bölünmə zamanı yaranan (α, α) və (α, t) cütləri arasında bucaqlar simulyasiya edilməklə və təcrübi təyin olunmaqla bu cütləri yarıdan əsasən enerji səviyyəsi 0.092 MeV olan əsas və 3.04 MeV birinci həyəcanlanmış hallarda dayanıqsız olan ^8Be nüvəsinin və ikinci enerji səviyyəsi 2.16 MeV olan dayanıqsız ^7Li izotopunun parçalanmasından yarandığı təyin edilmiş, onların cəm enerjiləri uyğun olaraq $22.76(90)$ MeV, $23.46(25)$ MeV, $19.25(34)$ MeV, ikiqat bölünməyə nəzərən çıxımları isə $7.1(9)\cdot 10^{-6}$, $0.8(2)\cdot 10^{-6}$, $0.2(1)\cdot 10^{-6}$ təyin edilmişdir. Bu o deməkdir ki, dörd fraqmentin qeyd edilməsi kimi müşahidə olunan bu bölünmə prosesi dolaylı yolla baş verir [5].

4. Nadir nüvə proseslərini tədqiq etmək üçün eyni zamanda enerji, koordinat, zaman və zərrəciklərin növü haqqında məlumat almağa və 10 ns zaman dəqiqliyi ilə sistemi sinxronlaşdırmağa imkan verən qeydetmə sistemi işlənib hazırlanmışdır. Qeydetmə sisteminin enerji ayırdetməsi 5 MeV alfa zərrəciklər üçün 1% , koordinata görə həssaslığı 10 μm , zamana görə ayırdetməsi 10 ns, identifikasiya gücü isə protondan karbona kimi yüklü zərrəcikəri və izotopları ayırdetməyə imkan vermişdir [1, 4, 6, 7, 8, 21, 26, 27, 28].

5. 4 meV, 60 meV və 270 meV enerjili neytronların təsiri ilə

^{235}U nüvəsinin bölünməsi zamanı ani qamma şüalar üçün anizotropiya əmsalının enerjidən asılı olaraq dəyişmədiyi və onun orta qiymətinin $A = 0.156 \pm 0.009$ bərabər olması fırlanma momentinə malik həyəcanlanmış nüvədən qamma şüaların emissiyasının izotrop olmadığı və bölünmə oxu itiqamətində emissiyanın üstünlük təşkil etdiyi məlum olmuşdur [2, 15].

6. 4 meV enerjili polyarlaşmış neytronların təsiri ilə ^{235}U nüvəsinin bölünməsi zamanı ani qamma şüalar üçün ROT asimmetriya əmsalı uyğun olaraq $R_\gamma = -17.9(1.6) \cdot 10^{-5}$ təyin edilmişdir. Asimmetriyanın qiymətinin yüksək olması bu neytron enerjisində $J=4$ halına uyğun gələn parsial bölünmə en kəsiyinin ($\sigma=960$ barn) $J=3$ halına uyğun gələn en kəsikdək ($\sigma=550$ barn) böyük olması yəni, bölünmənin $J=4$ halına uyğun gələr kanallardan daha çox baş verməsi ilə izah olunur [10, 25, 29, 30].

7. 60 meV enerjili polyarlaşmış neytronların təsiri ilə ^{235}U nüvəsinin bölünməsi zamanı ani qamma şüalar üçün ROT asimmetriya əmsalının uyğun olaraq $R_\gamma = -17.2(2.8) \cdot 10^{-5}$ təyin edilmişdir. Bu enerjide parisal bölünmə en kəsikləri azalsa da onların nisbəti dəyişmədiyindən 4 meV enerjili polyarlaşmış neytronlarla alınmış nəticə ilə müqayisədə asimmetriya dəyişmir. Başqa sözlə bu neytron enerjisində $J=4$ halına uyğun gələn parsial bölünmə en kəsiyinin ($\sigma=225$ barn) $J=3$ halına uyğun gələn en kəsikdək ($\sigma=105$ barn) böyük olması yəni, bölünmənin $J=4$ halına uyğun gələr kanallardan daha çox baş verməsi ilə izah olunur [13, 16, 18, 20, 23, 24].

8. 270 meV enerjili polyarlaşmış neytronların təsiri ilə ^{235}U nüvəsinin bölünməsi zamanı ani qamma şüalar üçün təyin edilmiş ROT asimmetriya əmsallarının qiymətinin $R_\gamma = -5.2(2.5) \cdot 10^{-5}$ digər enerjilərlə müqayisədə xətlər daxilində təqribən 2 dəfə kiçik alınması $J=3$ və $J=4$ halına uyğun gələn en kəsiklərinin təqribən bərabər $\sigma(J=3) = 93$ barn və $\sigma(J=4) = 88$ barn ilə izah edilmişdir [2, 10, 12, 19].

9. 4 meV, 60 meV və 270 meV enerjili polyarlaşmış neytronların təsiri ilə ^{235}U nüvəsinin bölünməsi zamanı ani qamma şüaların bucaq asimmetriyasına görə bölünmə oxunun fraqmentlərin uçuş istiqamətinə nəzərən uyğun olaraq $\delta=0.103(28)^0$, $\delta=0.069(8)^0$,

$\delta=0.021(9)^0$ bucağı qədər döndüyü və müsbət olduğu aşkar edilmişdir. İlk dəfə təcrübi olaraq müəyyən edilmişdir ki, indiksiya edici neytronların enerjisindən asılı olaraq ROT effektin işarəsi dəyişmir, mürəkkəb trayektoriya hesablamalarından asılı olmayaraq təyin edilmiş qiyməti isə azalır. Azalmanın səbəbi verilmiş neytron enerjisində diferensial bölünmə en kəsiklərinin nisbətinin ($\sigma_f(J_+)/\sigma_f(J_-)$) enerjiden asılı olaraq azalması və yaranan fırlanan mürəkkəb nüvə sisteminin neytronun polyarizasiya oxu ətrafında “saat əqrəbi” istiqamətində effektiv fırlanma tezliyinin “+” işarəyə malik olması və verilmiş neytron enerjisində $\sigma_f(J_+)$ diferensial bölünmə en kəsiyinin $\sigma_f(J_-)$ en kəsiyindən böyük olmasıdır [3, 13, 22].

10. Anı gamma şüaların emissiyası zamanı baş verən ROT effektin izahı üçün modelin işlənməsi, təklif edilmişdir. Modelə görə fırlanma momentinin saxlanma qanununa əsasən, bölünən nüvənin deformasiya oxunun ilkin istiqamətinə görə fraqmentin fırlanma momentinin (spin) istiqaməti eyni qalır, bölünmə oxu isə δ bucağı qədər dönür ki, təcrübi olaraq bu dönmə neytronun polyarlaşmasından asılı olaraq gamma şüaların bucaq paylanması fraqmentin emissiya istiqamətinə uyğun dəyişməsi kimi müşahidə edilir [13].

11. ^3He -un polyarlaşmasını 100 saat saxlamağa imkan verən kənar maqnit sahələrinin mövcudluğunda istiqamətləndirici sahənin dayanıqlığını təmin edən müxtəlif μ -metal (permalloy) maqnitostatik ekranlar və polyarlaşmış neytronların spininin istiqamətinin idarə edən, spinin istiqamətini lazım olan zaman müddətində dəyişən və ətraf mühitin maqnit sahəsinin spinə təsirini kompensasiya edə bilən spin-flipper qurğusu işlənilib hazırlanmışdır [14].

12. ROT effekti tədqiq etmək üçün CF_4 qazı ilə 0.1–10 mBar təzyiqdə işləyən və 112.4^0 bucaq altında emissiya olunan fraqmentlərin qeyd edilməsinə imkan verən 1 mm dəqiqliyə malik koordinata həssas on sektorlu çox simli mütənasib sayğacdən və 12 ədəd ssintilyasiya detektorundan ibarət qeydetmə sistemi işlənilib hazırlanmışdır [9, 11].

Dissertasiyanın əsas nəticələri üzrə çap olunmuş işlər

1. Əhmədov, Q.S. Timepix pixelli detektor əsasında yüklü zərrəciklərin identifikasiyası üçün $\Delta E/\Delta x$ -E çox funksiyalı spektrometr // Milli Aviasiya Akademiyasının Elmi Məcmuələr, - 2022. Cild 24(1), - s. 24-30.
2. Əhmədov, Q.S. 0.27 eV enerjili polyarlaşmış neytronların təsiri ilə ^{235}U nüvəsinin bölünməsi zamanı ani qamma kvantların və neytronların bucaq korrelyasiyasının ölçülməsi // AJP FİZİKA, - 2022. Cild XXVIII, № 01, - s. 31-34.
3. Əhmədov, Q.S. 60 meV enerjili polyarlaşmış neytronların təsiri ilə ^{235}U nüvəsinin bölünməsi zamanı bölünmə oxunun fırlanma bucağının təyini // AJP FİZİKA, - 2022, Cild XXVIII, № 02, - s. 17-20.
4. Əhmədov, Q.S. Nadir bölünmə proseslərinin nəticələrinin işlənməsi üçün çox alqoritmlə analiz proqramı // AJP FİZİKA, - 2022. Cild XXVIII, № 03, - s. 7-10.
5. Ahmadov, G.S. Ternary particles of $Z = 1$ to 4 emitted in spontaneous fission of ^{252}Cf // Eurasian Journal of Physics and Functional Materials, - 2022. vol. 6(3), - p.174-179.
6. Ahmadov, G.S. Detection of ternary and quaternary fission fragments from ^{252}Cf with a position-sensitive ΔE -E telescope based on silicon detectors / Ahmadov G.S., Kopatch Yu.N., Telezhnikov S. A., Ahmadov F. I., Granja C., Garibov A. A., Pospisil S. // Physics of Particles and Nuclei Letters, -2015. vol. 12, - p. 542-549.
7. Holik, M. A synchronization and data acquisition system for silicon detectors / Holik M., Ahmadov G., Berikov D., Ahmadov F., Kopatch Yu., Nuruyev S., Akbarov R., Abbaszada N., Telezhnikov S., Broulim J., Siroky J. Mora Y. / Journal of Instrumentation, - 2018. vol. 13, - p. C11019.
8. Holik, M. Alpha calibration of the Timepix pixel detector exploiting energy information gained from a common electrode signal / M. Holik, G. Ahmadov, J. Broulim, J. Zich, D. Berikov, Y. Mora, Yu. Kopatch, S. Nuruyev, N. Abbaszada and K.

- Zhumadilov // Journal of Instrumentation, - 2019. vol. 14, - p. C06022.
9. Berikov, D. An instrument for measuring T-odd asymmetries in the fission of heavy nuclei / D. Berikov, V. Hutanu, Yu.N. Kopatch, G.S. Ahmadov, A.M. Gagarski, V.V. Novitsky, G.V. Danilyan, S. Masalovich, J. Klenke, H. Deng // Journal of Instrumentation, - 2020. vol. 15 (1). - p. P01014.
 10. Бериков, Д.Б. Эффект вращения деполяризуемого ядра в угловых распределениях мгновенных нейтронов и γ -квантов деления ^{235}U в резонансе 0.3 эВ на горячем источнике поляризованных нейтронов / Бериков Д.Б., Копач Ю.Н., Новицкий В.В., Г.С. Ахмадов, А.М.Гагарский, К.Ш.Жумадилов, Г.В.Данилян, В.Хутану, Й. Кленке, С. Масалович // Журнал проблем эволюции открытых систем, - 2019, Т. 21(2), - с. 73-80.
 11. Berikov, D.B. A ROOT-based program for analysing data on T-odd asymmetry in the neutron-induced fission of heavy nuclei / D.B. Berikov, G.S. Ahmadov, Yu.N. Kopatch, K.Sh. Zhumadilov // Eurasian Journal of Physics and Functional Materials, - 2020. vol. 4 (2). - p. 114-121.
 12. Kopatch Yu., Measurement of the ROT-effect in the neutron induced fission of ^{235}U in the 0.3 eV resonance at a hot source of polarized neutrons / Yu. Kopatch, Novitsky V., Ahmadov G., Gagarski A., Berikov D., Danilyan G., Hutanu V., Klenke J., Masalovich S. // EPJ Web of Conferences, - 2018. vol. 169, -p . 00010.
 13. Berikov, D. Effect of rotation in the γ -ray emission from 60 meV polarized neutron-induced fission of the ^{235}U isotope / D. Berikov, G. Ahmadov, Yu. Kopatch, A. Gagarski, V. Novitsky, H. Deng, G. Danilyan, S. Masalovich, Z. Salhi, E. Babcock, J. Klenke, and V. Hutanu // Physical Review C, - 2021. 104, - p. 024607.
 14. Berikov, D. Magnetic system for controlling the spin of polarized neutrons / D. Berikov, G. Ahmadov, Yu. Kopatch, V. Novitsky // Journal of Instrumentation, - 2022. vol. 15, №1. - p. P01014.

15. Ahmadov G., Angular distribution of prompt fission γ -rays / G. Ahmadov, D. Berikov, Yu. Kopatch // Rom. Rep. Phys., - 2022, 75, 202, - p. 1-8.
16. Əhmədov, Q.S. İsti neytronların təsiri ilə ^{235}U izotopunun bölünməsi zamanı ani γ -kvantların və neytronların bucaq korrelyasiyasının ölçülməsi / Q.S. Əhmədov, Z.Y. Sadiqov, A.A. Qəribov // AJP FİZİKA, - 2022. Cild XXVIII, № 03, - s. 64-68.
17. Telezhnikov S.A., Ahmadov G.S., Kopatch Yu.N., Ahmadov F.I., Garibov A.A., Granja C., Pospisil S., Monte-Carlo calculations of opening angles between two light particles in “pseudo”-quaternary fission // 23-th international seminar on interaction of neutrons with nuclei: «fundamental interactions & neutrons, nuclear structure, ultracold neutrons, related topics», -Dubna, Rusiya:-25 - 29 May, -2015,- p. 222.
18. Kopatch Yu.N., Novitsky V.V., Ahmadov G.S., Gagarsky A.M., Berikov D.B., Zhumadilov K.Sh., Danilyan G.V., Hutanu V., Klenke J., Masalovich S., Measurement of T-Odd Effects in the Neutron Induced Fission of ^{235}U at a Hot Source of Polarized Resonance Neutrons // 25-th International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei: «Fundamental Interactions & Neutrons, Nuclear Structure, Ultracold Neutrons, Related Topics», -Dubna, Rusiya:-22 - 26 May, -2017,- p. 297.
19. Kopatch Yu.N., Novitsky V.V., Ahmadov G.S., Gagarski A.M., Berikov D.B., Zhumadilov K.Sh., Danilyan G.V., Hutanu V., Klenke J., Masalovich S., Deng H., Measurement of Gamma and Neutron ROT-Effects in 0.3 eV Resonance of ^{235}U at a Hot Source of Polarized Neutrons // 27-th International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei: «Fundamental Interactions & Neutrons, Nuclear Structure, Ultracold Neutrons, Related Topics», -Dubna, Rusiya:-10 - 14 June, -2019,- p. 235.
20. Kopatch Yu.N., Novitsky V.V., Ahmadov G.S., Gagarski A.M., Berikov D.B., Zhumadilov K.Sh., Danilyan G.V., Hutanu V., Klenke J., Masalovich S., Deng H., The ROT-Effect in the Angular Distribution of Prompt γ -Rays in Binary Fission Induced by Polarized Neutrons with the Energy of 60 meV // 27-th

- International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei: «Fundamental Interactions & Neutrons, Nuclear Structure, Ultracold Neutrons, Related Topics», -Dubna, Rusiya:-10 - 14 June, -2019,- p. 242.
21. Ahmadov G., Holik M., Berikov D., Ahmadov F., Akbarov R., Abbaszada N., Mora Y., Nuruyev S., Pridal P., Sadigov A., Zich J., A dE/dx-E charged particle spectrometer based on hybrid pixel detector -Timepix // 28-th International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei: «Fundamental Interactions & Neutrons, Nuclear Structure, Ultracold Neutrons, Related Topics», -Xi'an, China:-24 - 28 May, -2021,- p. 7.
 22. Berikov D., Ahmadov G., Kopatch Yu., Gagarski A., Novitsky V., Deng H., Danilyan G., Masalovich S., Salhi Z., Babcock E., Klenke J., Hutanu V., The estimation of the angle of fission axis rotation in binary fission of ^{235}U induced by polarized neutrons with energies 60 meV and 270 meV // 28-th International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei: «Fundamental Interactions & Neutrons, Nuclear Structure, Ultracold Neutrons, Related Topics», -Xi'an, China:-24 - 28 May, -2021,- p. 105.
 23. Kopatch Yu.N., Novitsky V.V., Ahmadov G.S., Gagarski A.M., Berikov D.B., Zhumadilov K.Sh., Danilyan G.V., Hutanu V., Klenke J., Masalovich S., Measurement of T-odd effects in the neutron induced fission of ^{235}U at a hot source of polarized resonance neutrons // 68th international conference "Nucleus-2018" "Fundamental problems of nuclear physics, nuclei at borders of nucleon stability, high technologies", -Dubna, Russia, -2-6 July, -2018, -p. 40.
 24. Kopatch Yu.N., Novitsky V.V., Ahmadov G.S., Gagarski A.M., Berikov D.B., Danilyan G.V., Hutanu V., Klenke J., Masalovich S., Deng H., Measurement of T-odd effects in the fission of ^{235}U induced by monochromatic polarized neutrons with an energy of 60 meV // 69th international conference "Nucleus-2019" on Nuclear spectroscopy and Nuclear structure "Fundamental problems of nuclear physics, nuclei at borders of nucleon stability, high technologies", -Dubna, Russia, -1-5 July, -2019, -p. 53.

25. Ahmadov G.S., Berikov D.B., Kopatch Yu.N., Novitsky V.V., Gagarsky A.M., Danilyan G.V., Hutanu V., Klenke J., Masalovich S., Deng H., T-odd effects in the binary fission of uranium induced by polarized neutrons // 69th international conference "Nucleus-2020" "Nuclear physics, elementary particle physics, nuclear physics technologies", - Saint Petersburg, Russia, -12-17 October, -2020, -p. 294-295.
26. Ahmadov G., Holik M., Ahmadov F., Kopatch Yu., Berikov D., Telezhnikov S., Stanislav P., Akbarov R., Nuruyev S., A synchronization and data acquisition system for silicon detectors //IWORID-20, -Sundsvall, Sweden, 24-28 June, -2018, -p.114.
27. Ahmadov G., Holik M., Ahmadov F., Berikov D., Akbarov R., Abbaszada N., Mora Y., Nuruyev S., Pridal P., Sadigov A., Zich J., Characterization of a hybrid pixel silicon detector Timepix in particle identification measurements //IWORID-22, -Ghent, Belgium, 27 June-01 July, -2021, -p.237.
28. Garibli A., Sadigov A., Ahmadov F., Ahmadov G., Berikov D., Zich J., Ajdarli K., Holik M., Abbaszada N., Urban O., Akbarov R., Nuruyev S., Pridal P., A dE/dx-E position sensitive charged particle spectrometer //IWORID-23, -Riva del Garda, Italy, 26-30 June, -2022, -p.66.
29. Ahmadov G., Berikov D., Kopatch Yu.N., Novitsky V., Gagarsky A., Danilyan G., Hutanu V., Klenke J., Masalovich S., Deng H., T-odd effects in the binary fission of uranium induced by polarized neutrons //MLZ User Meeting & German Neutron Scattering Conference, -Garching, Germany, 08-09 December, -2020, -p.189.
30. Gagarsky A., Berikov D., Ahmadov G., Danilyan G., Deng H., Klenke J., Masalovich S., Novitsky V., Hutanu V., Kopatch Yu.N., Fissile nuclei rotation effect in $^{235}\text{U}(n,\gamma f)$ process //MLZ User Meeting, -Garching, Germany, 07-08 December, -2021, -p.84.



Təşəkkür

Dissertasiya işimi valideynlərimə həsr edir və bu istiqaməti seçməyimdə, dissertasiya işini tamamlamağımda mənə dəstək verən, hər zaman və hər vəziyyətdə yanımda olan, dəstəyini əsirgəməyən çox sevdiyim ailəmə sonsuz təşəkkürümü bildirirəm.

Birləşmiş Nüvə Tədqiqatları İnstitutunda apardığım tədqiqat işlərini istiqamətləndirən, qarşıya çıxan problemlərin tez həllində mənə kömək olan, eksperimental təcrübələrin yerinə yetirilməsində praktiki köməkliyini və nəticələrin araşdırılmasında bilik və təcrübəsini məndən əsirgəməyən elmi rəhbərim f-r.e.d Zirəddin Sadıqova və İ.M. Frank adına Neytron Fizikası laboratoriyasında mənə rəhbərlik edən f-r.e.n Yuri Kopaça minnətdarlığımı bildirirəm.

Dissertasiya işimin yeninə yetirmək üçün Birləşmiş Nüvə Tədqiqatları İnstitutuna uzun müddətli ezamiyyətimi təşkil edən, məni cəsarətləndirən və məndən hər cür köməyini, dəstəyini əsirgəməyərək sərbəst və işgüzar iş şəraiti yaradan elmi rəhbərim əməkdar elm xadimi Akademik Adil Qəribova dərin təşəkkürümü bildirirəm.

Radiasiya Problemləri İnstitutuna işə qəbul olmağımın səbəbkarı, daim öz dəstəyini və ana şövqətini əsirgəməyən f-r.e.n Rəvan Mediyevaya dərin təşəkkürümü bildirirəm.

Daim yanımda olan, mənimlə birlikdə addımlayan və aparılan eksperimentlərdə, nəticələrin müzakirəsində böyük köməklik göstərən dostlarım Afaq Mədədzadəyə, Əhmədov Fəridə, Cəlal Nağıyevə, Azər Sadıqova, Daniyar Berikova, Mirzəyev Mətləbə, Nuruyev Səbuhiyə, Əkbərov Ramilə, Mixael Holikə və Karlos Qranjaya dərin təşəkkürümü bildirirəm.

Dissertasiya işimi yazmağa məni həvəsləndirən və sövq edən İlahə xanım Rzayevaya təşəkkür edir və dərin minnətdarlıq bildirirəm.

Təcrübə apardığım bütün institutlarda dissertasiya işinin yazılmasında və yerinə yetirilməsində ən kiçin dəstəyi olmuş, köməklik göstərmiş və göstərəcək bütün insanlara, yoldaşlara, dostlara, dissertasiya işinə rəy vermiş və verəcək dəyərli alimlərimizə dərin minnətdarlığımı bildirirəm.

Dissertasiyanın müdafiəsi « 14 mart » 2024-cü il tarixdə, saat 14:00-da Azərbaycan Respublikası Elm və Təhsil Nazirliyinin Radiasiya Problemləri İnstitutu nəzdində fəaliyyət göstərən BED 1.21 Dissertasiya Şurasının iclasında keçiriləcək.

Ünvan: AZ 1143, Bakı, B.Vahabzadə küçəsi, 9.
e-mail: radiasiya@irp.science.az

Dissertasiya ilə Azərbaycan Respublikası Elm və Təhsil Nazirliyinin Radiasiya Problemləri İnstitutunun elmi kitabxanasında tanış olmaq mümkündür.

Dissertasiya və avtoreferatın elektron versiyaları Azərbaycan Respublikası Elm və Təhsil Nazirliyinin Radiasiya Problemləri İnstitutunun rəsmi internet saytında yerləşdirilmişdir.

Avtoreferat « 12 fevral » 2024-cü il tarixində zəruri ünvanlara göndərilmişdir.

Çapa imzalanıb: 09.02.2024

Kagızın formatı: A5

Həcm: 84940 işarə

Tiraj: 100 ədəd