

**YADRO FIZIKASI INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY
DARAJALAR BERUVCHI DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 RAQAMLI
ILMIY KENGASH**

YADRO FIZIKASI INSTITUTI

RASULOVA FAZILAT ABDUVALIYEVNA

**GIGANT DIPOL REZONANS DAN YUQORI SOHADA SELEN
IZOTOPLARIDA FOTOYADRO REAKSIYALARI KESIMLARI**

01.04.08 – Atom yadrosi va elementar zarrachalar fizikasi. Tezlashtiruvchi texnika

**Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi
AVTOREFERATI**

Toshkent – 2024

**Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi
avtoreferati mundarijasi**

**Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD)
по физико-математическим наукам**

**Content of the dissertation abstract of the doctor of philosophy (PhD)
on physical and mathematical sciences**

Rasulova Fazilat Abduvaliyevna

Gigant dipol rezonansdan yuqori sohada selen izotoplarida fotoyadro
reaksiyalari kesimlari.....3

Расулова Фазилат Абдувалиевна

Сечения фотоядерных реакций на изотопах селена в области выше
гигантского дипольного резонанса.....23

Rasulova Fazilat Abduvalievna

Cross sections of photonuclear reactions on selenium isotopes above
the giant dipole resonance.....43

E'lon qilingan ishlar ro'uxati

Список опубликованных работ

List of published works47

**YADRO FIZIKASI INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY
DARAJALAR BERUVCHI DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 RAQAMLI
ILMIY KENGASH**

YADRO FIZIKASI INSTITUTI

RASULOVA FAZILAT ABDUVALIYEVNA

**GIGANT DIPOL REZONANS DAN YUQORI SOHADA SELEN
IZOTOPLARIDA FOTOYADRO REAKSIYALARI KESIMLARI**

01.04.08 – Atom yadrosi va elementar zarrachalar fizikasi. Tezlashtiruvchi texnika

**Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi
AVTOREFERATI**

Toshkent – 2024

Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2023.4.PhD/FM981 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Doktorlik dissertatsiyasi O'zbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasi Yadro fizikasi institutida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengash veb-sahifasida (www.inp.uz) va "Ziyonet" axborot-ta'lim tarmog'ida (www.ziyonet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar:

Yuldashev Behzod Sadiqovich

fizika-matematika fanlari doktori, professor, akademik

Rasmiy opponentlar:

Artemov Sergey Viktorovich

fizika-matematika fanlari doktori, professor

Polvonov Satimboy Rajapovich

fizika-matematika fanlari doktori, professor

Yetakchi tashkilot:

Samarqand davlat universiteti

Dissertatsiya himoyasi Yadro fizikasi instituti huzuridagi DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 raqamli Ilmiy kengashning 2024-yil _____ soat _____ dagi majlisida bo'lib o'tadi (Manzil: 100214, Toshkent shahri, Ulug'bek qo'rg'oni, Yadro fizikasi instituti. tel. (+99871) 289-31-41; faks (+99871) 289-36-65; e-mail: info@inp.uz).

Dissertatsiya bilan Yadro fizikasi institutining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (_____ raqami bilan ro'yxatga olingan). Manzil: 100214, Toshkent shahri, Ulug'bek qo'rg'oni, YaFI. tel. (+99871) 289-31-19.

Dissertatsiya avtoreferati 2024-yil "____" _____ da tarqatildi.
(2024-yil "____" _____ dagi _____ raqamli reyestr bayonnomasi).

M.Yu.Tashmetov

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy
kengash raisi, f.-m.f.d., professor

O.R.Tojiboyev

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy
kengash ilmiy kotibi, f.-m.f. PhD,
katta ilmiy xodim

E.M.Tursunov

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy
kengash qoshidagi ilmiy seminar raisi,
f.-m.f.d., professor

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Hozirgi vaqtda fotoyadro reaksiyalarini tadqiq qilish atom yadrosi xususiyatlari va tuzilishi to'g'risida ma'lumot beruvchi muhim manba bo'lib qolmoqda. Selenning tabiiy izotoplaridagi fotoyadro reaksiyalarini nazariy va eksperimental o'rganish $70 < A < 90$ massa sonlari sohasining sferik yadrolardan deformatsiyalangan shaklga o'tish xarakterini tavsiflashga imkon beradi. Shuningdek, γ -kvantlarning yadrolar bilan o'zaro ta'sirlashuvi turli mexanizmlari hissalarining energiya ortishi bilan, xususan, gigant dipol rezonansi (GDR) dominant bo'lmagan sohada qayta taqsimlanishi muhim ahamiyatga ega. Fundamental jihatlar bilan bir qatorda selen izotoplarida fotoyadro reaksiyalarini o'rganish ularning yulduzlar nukleosintezi jarayonlaridagi rolini yoritishda, elektron tezlatkichlardan tormozlanish nurlari yordamida yadro tibbiyoti uchun istiqbolli mishyak radioizotoplarini olish usullarini ishlab chiqishda muhimdir.

Dunyoning ilmiy markazlarida selen izotoplarida GDR sohasida (γ, n) , $(\gamma, n)^m$, $(\gamma, n) + (\gamma, np)$ va $(\gamma, 2n)$ turdagi reaksiyalar kesim qiymatlari bo'yicha yetarlicha ko'p eksperimental ma'lumot mavjud. Selen izotoplarida fotoneutron reaksiyalari kesimlarining keskin farq qilishi GDR parchalanishining (γ, n) va (γ, p) kanallari o'rtasidagi kuchli raqobatni ko'rsatadi. GDRning protonlar chiqishi bilan parchalanishi (γ, p) reaksiya kesimining kichikligiga qaramasdan izospinning kengayish ta'sirini o'rganishga imkon beradi. 20 MeVdan yuqori energiya sohasida yangi ma'lumotlar olish va mavjud ma'lumotlarning aniqligini oshirish fotoyadro reaksiyalarini eksperimental o'rganish sohasidagi dolzarb vazifalardan biridir.

Respublikamizda yadro texnologiyalarining fan va ishlab chiqarishga tatbiq etilish sohalarida fundamental hamda amaliy tadqiqotlarga katta e'tibor qaratilmoqda. Mamlakatimiz fani va uning amaliyotda tatbiqining rivoji uchun muhim ahamiyatga ega mazkur fundamental tadqiqot yo'nalishlari Yangi O'zbekistonni rivojlantirish strategiyalarida¹ o'z aksini topgan.

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-son "2022-2026-yillarda Yangi O'zbekistonni rivojlantirish strategiyasi to'g'risida", 2018-yil 19-iyuldagi PF-5484-son "O'zbekiston Respublikasida atom energetikasini rivojlantirish chora-tadbirlari to'g'risida" Farmonlari, 2019-yil 7-fevraldagi PQ-4165-son "2019-2029-yillarda O'zbekiston Respublikasida atom energetikasini rivojlantirish konsepsiyasini tasdiqlash to'g'risida", 2019-yil 16-oktabrdagi PQ-4492-son "O'zbekiston Respublikasining yadro-energetika dasturi uchun kadrlar salohiyatini rivojlantirish strategiyasini tasdiqlash to'g'risida", 2019-yil 21-noyabrdagi PQ-4526-son "Yadro fizikasi instituti ilmiy-tadqiqot faoliyatini qo'llab-quvvatlash chora-tadbirlari to'g'risida" qarorlari hamda ushbu sohadagi boshqa me'yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishda ushbu dissertatsiya tadqiqoti muayyan darajada xizmat qiladi.

¹ O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-sonli "2022-2026-yillarda Yangi O'zbekistonni rivojlantirish strategiyasi to'g'risida"gi Farmoni

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga mosligi. Mazkur tadqiqot ishi respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining II. “Energetika, energiya tejamkorligi va muqobil energiya manbalari” ustuvor yo‘nalishiga muvofiq bajarilgan.

Muammoning o‘rganilganlik darajasi. Tabiiy selen izotoplarida fotoyadro reaksiyalarining tadqiqotlari bilan dunyoning yetakchi ilmiy markazlarining ko‘plab olimlari hamda mutaxassislari, shu jumladan, fransiyalik (P.Carlos, H.Beil, R.Bergere, J. Fagot, A.Lepretre, A.Veyssiere), amerikalik (S.A.Yates, C.R.Howell, S.M.Grimes), koreyalik (H.Naik, G.N.Kim, K.Kim, M.Zaman, M.Sahid, S.C.Yang), yaponiyalik (F.Kitatani, H.Harada, S.Goko, H.Utsunomiya, H.Akimune, T.Kaihoru, H.Toyokawa, K.Yamada, A.Makinaga), rossiyalik (A.M.Goryachev, G.N.Zalesniy, V.V.Varlamov, A.G.Belov, Yu.P.Gangrskiy, A.D.Antonov, A.P.Tonchev, N.P.Balabanov, R.A.Aliev, A.A.Kuznetsov), ukrainalik (V.M.Mazur, I.V.Sokolyuk, Z.M.Bigan, I.N.Vishnevskiy, V.I.Jeltonojskiy, E.V.Kulich, A.N.Savrasov), vyetnamlik (Tran Duc Thiep, Truong Thi An, Nguyen Tuan Khai, Nguyen The Vinh, Phan Viet Cuong), o‘zbekistonlik (S.R.Polvonov, F.Sh.Xamrayev, E.M.Shomurodov, E.A.Zaparov, B.S.Mazitov, V.G.Ulanov) va boshqa mutaxassislar shug‘ullanishadi.

Mazkur eksperimentlarda tormozlanish γ -nurlanishi, tezlashtirilgan pozitronlar annigilyatsiyasida hosil bo‘lgan kvazimonoenergetik fotonlar va elektronlar nurida lazer fotonlarining teskari Kompton sochilishida, 10-28 MeV energiya sohasida selen izotoplarida (γ, n) , $(\gamma, n)^m$, $(\gamma, n)^+$ (γ, np) va $(\gamma, 2n)$ turdagi reaksiyalar kesimlari bo‘yicha ma’lumot olingan.

Adabiyotda selen izotoplarida fotoproton reaksiyalarining kesimlari bo‘yicha eksperimental ma’lumotlar yo‘q. Bu ma’lumotlarning mavjudligi GDRning izospin kengayish konsepsiyasini tekshirish va mazkur energiya sohasida fotoyadro reaksiyalari chiqishi va kesimlarining energiyaga bog‘liqligini o‘rganish imkonini beradi.

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan ilmiy tadqiqot muassasasining ilmiy tadqiqot ishlari rejalari bilan bog‘liqligi. Dissertatsiya ishi O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Yadro fizikasi instituti ilmiy tadqiqot ishlari rejasining O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2019-yil 21-noyabrdagi PQ-4526-sonli qarori asosida 2020-2024-yillarga mo‘ljallangan ilmiy tadqiqot ishlari dasturi yuzasidan “Atom energetikasi sohasidagi tadqiqotlar, radioizotoplar olish texnologiyalarini ishlab chiqish va yadro texnologiyalarini joriy etish” mavzusi doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi selen stabil izotoplarida fotoyadro reaksiyalarining ekvivalent kvantga mos eksperimental kesim qiymatlarini olish va gigant dipol rezonansdan yuqori sohada kesimning energiyaga bog‘liqligidan reaksiyalar asosiy mexanizmlarini o‘rnatishdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

RM-55 Moskva davlat universiteti qoshidagi Yadro fizikasi ilmiy-tadqiqot instituti mikrotroni hamda Birlashgan yadro tadqiqotlari institutidagi Yadro muammolari laboratoriyasi (Dubna) LINAC-200 chiziqli tezlatkichidan

tezlashtirilgan elektronlar energiyasi 20, 40, 55, 60 va 80 MeV bo'lgan tormozlanish nurlanishi yordamida tabiiy selen namunalarini nurlantirish;

Geant4 dasturiy paketidan foydalangan holda tezlashtirilgan elektronlar energiyasi 20, 40, 55, 60 va 80 MeV tormozlanish nurlanishi spektrini konvertor-nishon uchun hisoblash;

tabiiy selen izotoplarida γ -spektroskopik usulda fotoyadro reaksiyalar mahsulotlarining izotopik tarkibini aniqlash;

tabiiy selen izotoplarida tormozlanish nurlanishining 20-80 MeV chegaraviy energiya diapazonida fotoyadro reaksiyalarining ekvivalent kvantga mos kesimlarini o'lchash;

tabiiy selen izotoplarida fotoyadro reaksiyalari ekvivalent kvantga mos kesimlarining uyg'onish energiyasiga bog'liqligini aniqlash;

fotoyadro reaksiyalarining ekvivalent kvantga mos kesimini TALYS-1.96 paket kodi va fotoyadro reaksiyalarining kombinirlangan modeli (FRKM)dan foydalangan holda hisoblash, olingan ma'lumotlarni eksperiment natijalari bilan taqqoslash;

olingan natijalarni nazariy bashoratlar bilan taqqoslab tahlil qilish.

Tadqiqotning obyekti sifatida tabiiy selen izotoplari olingan.

Tadqiqotning predmeti sifatida tabiiy selen izotoplarida fotoyadro reaksiyalari ekvivalent kvantga mos kesimlari sanaladi.

Tadqiqotning usullari: kiritilgan aktivlik metodi, gamma-spektrometriya, TALYS, Geant4 va FRKM dasturlari yordamida kompyuter modellashirishi hamda hisoblashlar.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

ilk bor 20, 40, 55, 60 va 80 MeV chegaraviy energiyali tormozlanish nurlanish maydonida tabiiy selen nishonini nurlantirganda $^{73g,73m,75,81g,81m}\text{Se}$ va $^{71-74,76-79}\text{As}$ yadrolarining hosil bo'lishiga olib keladigan (γ, xn) va (γ, pxn) reaksiyalarining ekvivalent kvantga mos eksperimental kesim qiymatlari olingan;

$^{76-79}\text{As}$ izotoplarining hosil bo'lishiga olib keladigan (γ, pxn) reaksiyalari ro'y berishida asosiy mexanizm – fotoyadro reaksiyalarining kombinirlangan modeli doirasida tavsiflanadigan izospin kengayish effekti ekanligi aniqlangan;

ilk bor 20 MeV energiyada $^{74,77,78,80}\text{Se}$ izotoplarida (γ, p) reaksiyasi kesimining eksperimental qiymati olingan va massa soni ortishi bilan (γ, p) reaksiya kesimi kamayishida eksponensial bog'liqlik o'rnatilgan;

ilk bor $^{82}\text{Se}(\gamma, n)^{81m, g}\text{Se}$ reaksiya izomer chiqishlar nisbati d ning uyg'onish energiyasiga bog'liqligi 20 MeVdan yuqori energiyalarda $\langle d \rangle = 0,60 \pm 0,08$ to'yinish sohasi bilan tavsiflanishi o'rnatilgan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

Geant4 dasturidan foydalanib, RM-55 va LINAC-200 tezlatkichlarining volfram konvertorlarida hosil bo'lgan elektronlarning tormozlanish nurlanishi spektrlari hisoblangan;

TALYS va FRKM dasturiy kodlar hamda Zeltser-Berger jadvallardan foydalanib 0-100 MeV energiya diapazonida fotoneutron (γ, xn) va fotoproton (γ, pxn) reaksiyalari uchun ekvivalent kvantga mos kesim qiymatlari hisoblangan;

$^{73g,73m}\text{Se}$ va $^{73,74}\text{As}$ yadrolari hosil bo'lishiga olib keladigan reaksiyalar uchun 30 MeVdan 80 MeVgacha energiya oralig'ida ekvivalent kvantga mos kesimning uyg'onish energiyasiga bog'liqligida kvazideytron mexanizmining hissasi bilan bog'liq chiziqli o'sish o'rnatilgan;

$^{73g,73m}\text{Se}$ va $^{73,74}\text{As}$ yadrolari hosil bo'lishiga olib keladigan reaksiyalar uchun ekvivalent kvantga mos kesimlari bog'liqliklarida 40 MeVdan 80 MeVgacha energiya oralig'ida to'yinish tendensiyasi aniqlangan.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Natijalarning ilmiy ahamiyati shundan iboratki, gigant dipol rezonansdan yuqori sohada selen stabil izotoplaridagi fotoyadro reaksiyalari to'g'risida olingan eksperimental natijalar GDR izospin kengayishi, kvadrupol rezonans uyg'onishi va kvazideytron mexanizm kabi fotoyadro reaksiyalari mexanizmlarini tavsiflashga qaratilgan nazariy yondashuvlarni yaxshilashda muhim ahamiyatga ega. Chetlab o'tilgan ^{74}Se yadrosining fotoyadro reaksiyalari hisobiga hosil bo'lish va parchalanish imkoniyatini yulduzlar nukleosintezi kartinasini qurishda hisobga olish kerakligi muhim natija hisoblanadi. Eksperimental ma'lumotlar fotoyadro reaksiyalari bo'yicha yadroviy ma'lumotlar bazalarida EXFOR (CSISRS) (MAGATE) mavjud bo'lgan ma'lumotni to'ldirishi mumkin. Natijalarning amaliy ahamiyati ^{72}As , ^{74}As , ^{76}As va ^{77}As tibbiy izotoplarini ishlab chiqarish uchun elektron tezlatkichlardan foydalanish imkoniyatini baholash bilan aniqlanadi.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi energiya bo'yicha yuqori ajrata olish qobiliyatiga ega yarimo'tkazgichli detektorlarni va apparatura spektrlarini matematik qayta ishlash zamonaviy metodlarini qo'llash; tormozlanish nurlanishi spektrlarini sonli modellashtirish uchun umum tan olingan ishonchli dasturiy paket Geant4 dan foydalanish; eksperimental ma'lumotlarning TALYS va FRKM dasturiy kodlar yordamida bajarilgan hisoblar bilan taqqoslama tahlili to'g'riligi bilan tasdiqlanadi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Gigant dipol rezonansdan yuqori sohada selen izotoplarida fotoyadro reaksiyalarini o'rganish bo'yicha olingan natijalarga asoslanib:

20, 40, 55, 60 va 80 MeV chegaraviy energiyali tormozlanish nurlanish maydonida tabiiy selen nishonini nurlantirganda $^{73g,73m,75,81g,81m}\text{Se}$ hamda $^{71-74,76-79}\text{As}$ yadrolarining hosil bo'lishiga olib keladigan reaksiyalarning ekvivalent kvantga mos kesim qiymatlari hamda ularning tahlili bo'yicha nazariy yondashuvlar Birlashgan yadro tadqiqotlari institutining Yadro reaksiyalari laboratoriyasida 04-5-1131-2017/2023 "Tezlashtirilgan og'ir ionlar nurlari bo'yicha radiatsiyaviy-fizikaviy, radiokimyoviy va nanotexnologik tadqiqotlar" mavzusi doirasida qo'llanilgan (Birlashgan yadro tadqiqotlari institutining 2023-yil 4-dekabrdagi №500-26/80-sonli xati). Natijalardan foydalanish turli uyg'onish energiyalarida fotoyadro reaksiyalari mexanizmini tavsiflash va tushuntirish imkonini bergan;

$^{76-79}\text{As}$ izotoplarining hosil bo'lishiga olib keladigan fotoproton reaksiyalari ro'y berishida asosiy mexanizm izospin kengayish effekti ekanligi to'g'risidagi tasdiq Birlashgan yadro tadqiqotlari institutining Yadro reaksiyalari laboratoriyasida ishlatilgan (Birlashgan yadro tadqiqotlari institutining 2023-yil 4-dekabrdagi №500-

26/80-sonli xati). Natijalardan foydalanish gigant dipol rezonansi parchalanish mexanizmini interpretatsiyalash imkonini bergan;

eksperimental usulda 20 MeV energiyada aniqlangan $^{77,78}\text{Se}$ izotoplarida (γ, p) reaksiyalari kesim qiymatlari Birlashgan yadro tadqiqotlari institutining Yadro reaksiyalari laboratoriyasida MT-25 mikrotron va loyihalashtirilgan chiziqli elektron tezlatkichlarda ishlatilgan (Birlashgan yadro tadqiqotlari institutining 2023-yil 4-dekabrda №500-26/80-sonli xati). Natijalardan foydalanish yadroviy tibbiyot uchun mishyak radioizotoplarini fotoyadroviy usul yordamida radiokimyoviy ishlab chiqarish imkoniyatlarini baholash imkonini bergan;

gigant dipol rezonansdan yuqori sohada olingan $^{82}\text{Se}(\gamma, n)^{81m,g}\text{Se}$ reaksiya izomer chiqishlar nisbati Birlashgan yadro tadqiqotlari institutining Yadro reaksiyalari laboratoriyasida ishlatildi (Birlashgan yadro tadqiqotlari institutining 2023-yil 4-dekabrda №500-26/80-sonli xati). Natijalardan foydalanish energiyaning keng diapazonida izomer holatlar hosil bo'lish mexanizmini interpretatsiyalash imkonini bergan.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Tadqiqot natijalari 5 ta xalqaro va respublika miqyosidagi ilmiy anjumanlarda muhokama qilingan.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinishi. Dissertatsiya mavzusi doirasida jami 8 ta ilmiy ish nashr etilgan, jumladan, Oliy attestatsiya komissiyasining doktorlik dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 4 ta maqola, shulardan, 2 tasi xorijiy jurnallarda.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya ishi kirish, uchta bob, xulosa va foydalanilgan adabiyotlar ro'yxatidan iborat. Dissertatsiya hajmi 113 betni tashkil qiladi.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

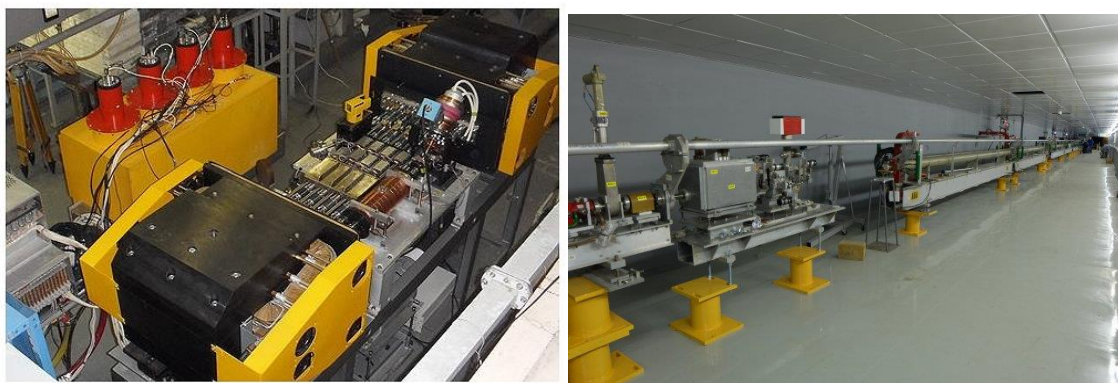
Kirish qismida dissertatsiya mavzusining dolzarbligi yoritilib, o'tkazilgan tadqiqotlar O'zbekiston Respublikasining fan va texnologiyalari taraqqiyotining ustuvor yo'nalishlariga muvofiqligi hamda muammoning o'rganilganlik darajasi belgilangan, tadqiqotning maqsadi va vazifalari shakllantirilgan, tadqiqot obyektlari, subyektlari va usullari haqida ma'lumot berilgan, tadqiqotning ilmiy yangiligi va amaliy natijalari bayon qilingan, olingan natijalarning ishonchliliigi asoslangan hamda ilmiy va amaliy ahamiyati ochib berilgan, tadqiqot natijalarini amalga oshirish, ishni sinovdan o'tkazish, shuningdek, dissertatsiyaning hajmi va tuzilishi to'g'risida ma'lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning **“Selen izotoplaridagi fotoyadro reaksiyalari bo'yicha nazariy va eksperimental tadqiqotlar”** deb nomlangan birinchi bobida fotoyadro reaksiyalari sohasida nazariy va eksperimental tadqiqotlarning holati kengaytirilgan tahlili keltirilgan. Tabiiy selen aralashmasi izotoplaridagi fotoyadro reaksiyalari bo'yicha eksperimental tadqiqotlar tormozlanish γ -nurlanishi, annigilyatsion ($e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$) γ -nurlanish va teskari kompton γ -nurlanishidan foydalangan holda 10 dan ~ 28 MeV gacha bo'lgan uyg'onish energiyasi sohasida amalga oshirilgan.

Adabiyotda selen izotoplarida fotoyadro reaksiyalarining kesimlari bo'yicha 28 MeVdan yuqori energiya sohasida eksperimental ma'lumotlar mavjud emas, ular asosida TALYS va FRKM dasturiy paketlarga kiritilgan nazariy konsepsiyalarni tekshirish mumkin. Mazkur xulosalar asosida kirish qismida tavsiflangan dissertatsiya maqsadi va vazifalari shakllantirilgan.

Dissertatsiyaning **“RM-55 va LINAC-200 elektron tezlatkichlari tormozlanish nurlanishi oqimida eksperimentlar metodikasi. Tabiiy selen izotoplarida fotoyadro reaksiyalarining kesimlari va chiqishlarini aniqlash”** deb nomlangan ikkinchi bobida MDU YFITI RM-55 mikrotroni va BYTI chiziqli tezlatkichi LINAC-200 xarakteristikallari, tabiiy selen namunalarini nurlantirish sharoitlari, tormozlanish spektrlarini raqamli hisoblash natijalari, gamma-spektrometrik uskunalar va o'rganilayotgan fotoyadro reaksiyalari uchun chiqish hamda kesimlarni hisoblash usullari keltirilgan.

Tabiiy selen namunalari nishonlarini nurlantirish RM-55 mikrotron va LINAC-200 chiziqli tezlatkichlaridan olingan tormozlanish nurlanishi yordamida amalga oshirildi (1-rasmga qarang). Elektron tezlatkichlarning ekspluatatsion xarakteristikallari 1-jadvalda keltirilgan.



1-rasm. RM-55 (chapda) va LINAC-200 (o'ngda) tezlatkichlarning umumiy ko'rinishi

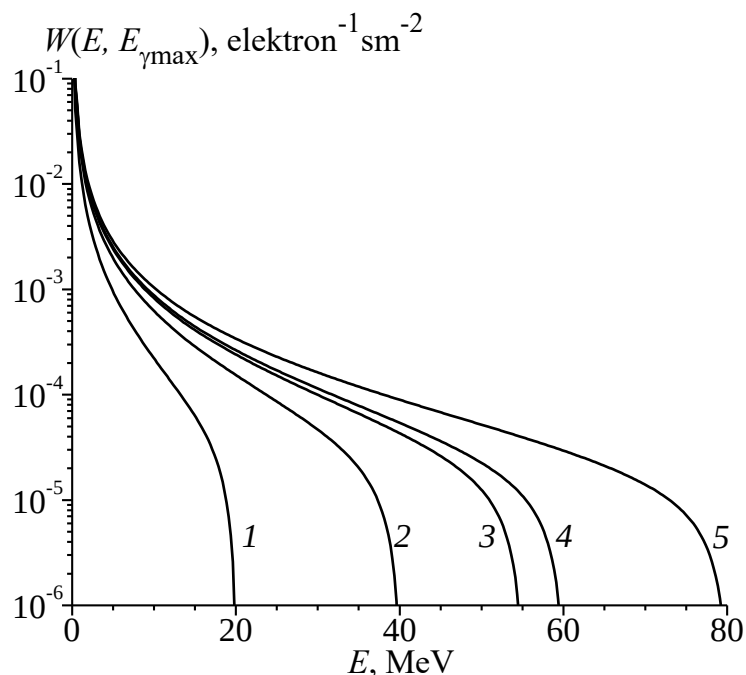
1-jadval

RM-55 va LINAC-200 tezlatkichlarning xarakteristikallari

Xarakteristikalar	RM-55	LINAC-200
Ish rejimi	uzluksiz	impulsli
Elektronlarning chiqishdagi maksimal energiyasi (MeV)	55	200
Maksimal energiyada oqim toki, mA	10	40
Impuls davomiyligi	8	0,1 – 3,5
Impulslar chastotasi (Hz)	50	1 - 25
Konvertor (qalinlik, mm)	W (0.2)	W (5)

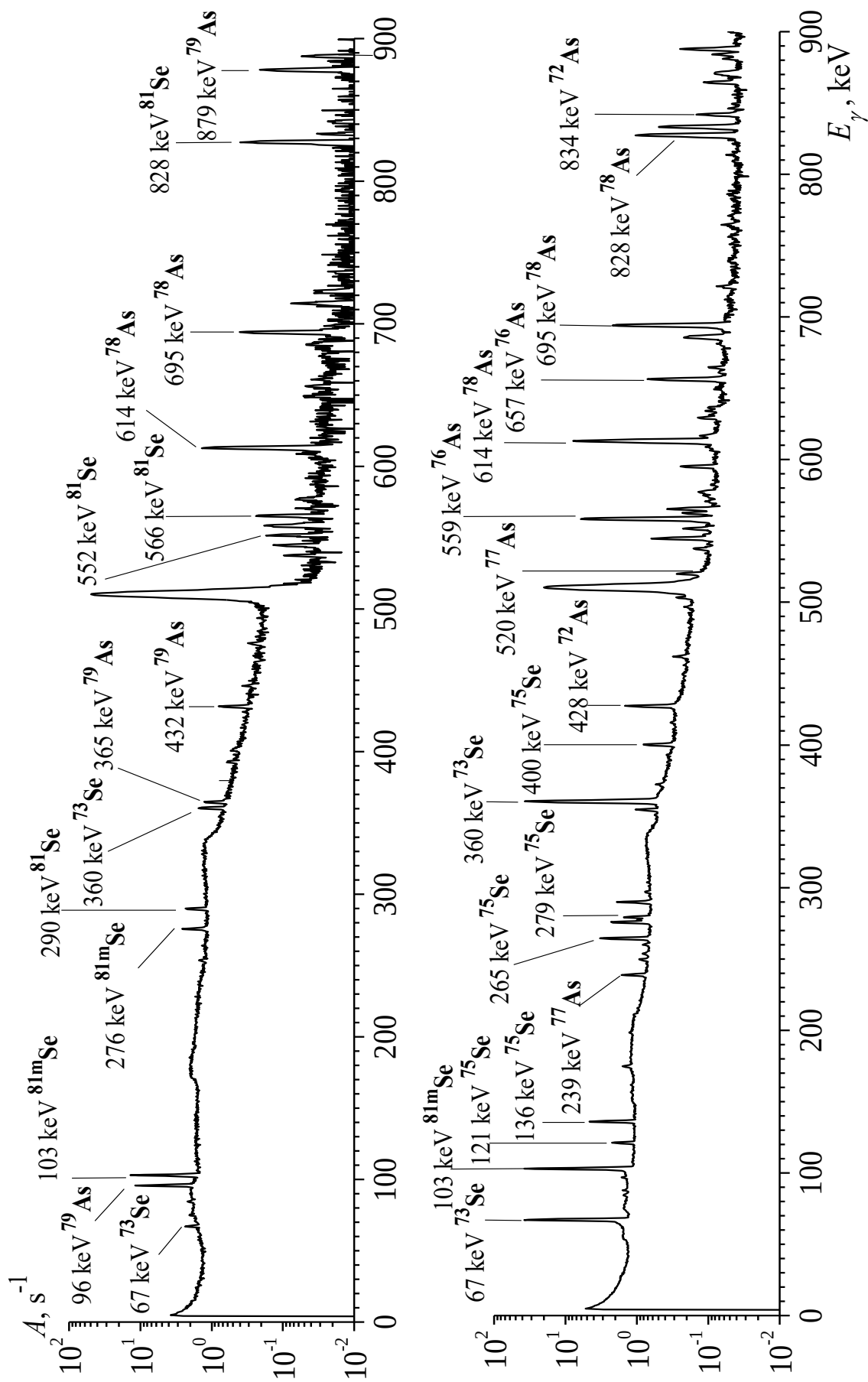
RM-55 elektron tezlatkichda nishon sifatida shaffof plastikli konteynerga joylashtirilgan kukun ko'rinishidagi tabiiy selen (SeO_2 , $\rho=3.95 \text{ g/sm}^3$) ishlatildi.

Tezlatkich toki kalibrovkasi monitor nishonidagi $^{65}\text{Cu}(\gamma, n)^{64}\text{Cu}$ reaksiya uchun eksperimental o'lchangan va nazariy hisoblangan chiqish kattaliklarini taqqoslash yordamida amalga oshirildi. Kalibrovka aniqligi 5 %ni tashkil etdi. LINAC-200 tezlatkichida 227,9, 312, 155,7 va 145,8 massali folga ko'rinishidagi selen metali ($\rho=4.79 \text{ g/sm}^3$) nishonlari mos holda 20, 40, 60 va 80 MeV energiyada nurlantirildi. Elektronlar toki kattaligi va stabilligi yuqori sezuvchan tok qayd qilgich yordamida o'lchandi. Volfram konvertorga kelib tushgan elektronlar soni $\pm 10 \%$ aniqlikda baholandi. Tormozlanish nurlanishi spektri Monte-Karlo metodi asosida Geant4 dasturiy paketi yordamida modellashirildi (2-rasm).



2-rasm. 20 (1), 40 (2), 55 (3), 60 (4) va 80 MeV (5) energiyali elektronlar uchun 5 mm qalinlikdagi volfram tormozlanish nishoniga tushayotgan bitta elektronga to'g'ri keluvchi tormozlanish fotonlari taqsimotining zichligi

Nurlantirilgan nishonlar γ -kvantlar spektri 50 keVdan 3.7 MeVgacha bo'lgan energiya diapazonida hajmi 145 sm^3 bo'lgan o'ta toza germaniyli detektor CANBERRA GC3018 yordamida o'lchandi. Detektorning energiya va effektivlik bo'yicha kalibrovkasi namunaviy spektrometrik gamma-manbalar komplektiga kiruvchi standart γ -nurlanish manbalari ^{22}Na , ^{54}Mn , ^{57}Co , ^{65}Zn , ^{88}Y , ^{113}Sn , ^{133}Ba , ^{139}Ce , ^{152}Eu , ^{207}Bi va ^{241}Am yordamida o'tkazildi. Detektorning energiya bo'yicha ajrata olish qobiliyati $E_\gamma=122 \text{ keV}$ va 1332 keV energiyada mos holda 0.8 keV hamda 1.76 keV ni tashkil etdi. Hosil bo'lgan reaksiya mahsulotlari γ -chiziqlar energiyasi va intensivligining kamayishi bo'yicha identifikatsiyalandi. 3-rasmda tabiiy selen izotoplari nurlantirilgan namunalar nurlantirishdan keyin 20 daqiqa (yuqorida) va 4 soatdan keyingi (pastda) qoldiq aktivlik spektrlari keltirilgan. Spektrlarni qayd qilish davomiyligi mos ravishda 10 daqiqa va 1 soatni tashkil etdi. Nurlantirishda foydalanilgan tormozlanish nurlanishi chegaraviy energiyasi 80 MeVni tashkil etdi.



3-rasm. Nurlantirilgan selen namunalaring gamma-spektrlari

Reaksiya eksperimental chiqish kattaligi $Y(E_{\gamma\max})_{\exp}$ qoldiq faollik spektrlaridagi detektorning samarasiz vaqti, nurlantirilgan selen namunalari identifikatsiyalangan gamma-chiziqlar fotopiklari yuzasi S , nurlantirish davomida tezatkich oqimi hamda reaksiya mahsuloti parchalanishi kanallarini hisobga olgan holda aniqlandi:

$$Y(E_{\gamma\max})_{\exp} = \frac{S \cdot C_{abs} \cdot t_{real}}{\varepsilon_p \cdot I_{\gamma}} \cdot \frac{1}{t_{live}} \cdot \frac{1}{N} \cdot \frac{1}{N_e} \cdot \frac{e^{\lambda \cdot t_{cool}}}{1 - e^{-\lambda \cdot t_{real}}} \cdot \frac{\lambda \cdot t_{irr}}{1 - e^{-\lambda \cdot t_{irr}}} \quad (1)$$

bu yerda S – pik yuzasi, ε_p – detektor effektivligi, I_{γ} – γ -nurlanish ehtimolligi, C_{abs} – namunada γ -nurlanishning yutilishiga tuzatma, t_{real} va t_{live} – mos holda real va samarali o'lchash vaqti, N – aktivatsion namunadagi atomlar soni, N_e – volfram konvertorga kelib tushayotgan elektronlarning umumiy soni, λ – parchalanish doimiysi, t_{cool} – sovish vaqti va t_{irr} – nurlantirish vaqti.

Tabiiy izotoplar aralashmasida chiqish kattaligini eksperimental o'lchash natijasi tabiiy aralashmadagi barcha mumkin bo'lgan reaksiyalarda izotop hosil bo'lishi chiqishi sifatida aniqlanadi:

$$Y(E_{\gamma\max})_{\exp} = \sum_i \eta_i \int_{E_{th}}^{E_{\gamma\max}} W(E, E_{\gamma\max}) \sigma_i(E) dE \quad (2)$$

bu yerda i indeksi o'rganilayotgan izotop hosil bo'lishiga hissa qo'shadigan reaksiya soniga to'g'ri keladi, η_i – selen izotoplarining tabiiy aralashmasidagi o'rganilayotgan izotopning ulushi, $E_{\gamma\max}$ – konvertorga tushayotgan elektronlarning chegaraviy energiyasi, $E_{i,th}$ – o'rganilayotgan fotoyadro reaksiyasining ostona energiyasi, $\sigma_i(E)$ – TALYS va FRKM yordamida hisoblangan mos keladigan fotoyadro reaksiyasi kesimi, $W(E, E_{\gamma\max})$ – bitta elektronga mos keluvchi tormozlanish fotonlari sonining energiya bo'yicha taqsimoti, E – konvertorda hosil bo'lgan tormozlanish γ -kvantlar energiyasi.

Elektronlarning tormozlanish nurlanishi maydonida o'tkazilgan eksperimentlarning asosiy kamchiligi – fotoyadro reaksiyasi chiqish kattaligining o'rganilayotgan reaksiya kesimiga $\sigma(E)$ va shu bilan bir vaqtda yetarli darajada aniq bo'lmagan tormozlanish nurlanishi spektri $W(E, E_{\gamma\max})$ ning shakliga bog'liqligidir. Tormozlanish oqimlarida turlicha geometriyada amalga oshirilgan eksperimentlarda tormozlanish fotonlari oqimining bir-biridan farqli bo'lishi hisobiga fotoyadro reaksiyalar absolyut chiqishi ham o'zaro farq qiladi. Turli eksperimentlar natijalarini to'g'ri tahlil qilish va o'zaro solishtirish uchun reaksiya chiqish kattaligini quyidagi formula bo'yicha aniqlanadigan ekvivalent kvantlar soniga normallashtirish kerak:

$$N = \frac{1}{E_{\gamma\max}} \int_0^{E_{\gamma\max}} E \cdot W(E, E_{\gamma\max}) dE \quad (3)$$

Tormozlanish spektri shaklining o'zgarmasligi to'g'risidagi farazni hisobga olgan holda $W(E, E_{\gamma\max})$ funksiyasi sifatida tormozlanish fotonlarining hosil bo'lish kesimini $\sigma(E, E_{\gamma\max})$ olish kerak. Tabiiy izotoplar aralashmasi holatida ekvivalent kvantga mos kesim dastlabki yadrolarning foizini hisobga olgan holda yakuniy izotop hosil bo'lishida hissa qo'shishi mumkin bo'lgan kanallarni o'z ichiga oladi:

$$\sigma_q = \frac{\sum_i \eta_i \int_{E_{th_i}}^{E_{\gamma max}} \sigma_i(E) \sigma(E, E_{\gamma max}) dE}{\frac{1}{E_{\gamma max}} \int_0^{E_{\gamma max}} E \cdot \sigma(E, E_{\gamma max}) dE} \quad (4)$$

bunda $\sigma(E, E_{\gamma max})$ Zeltser-Berger jadvallari asosida hisoblanadi.

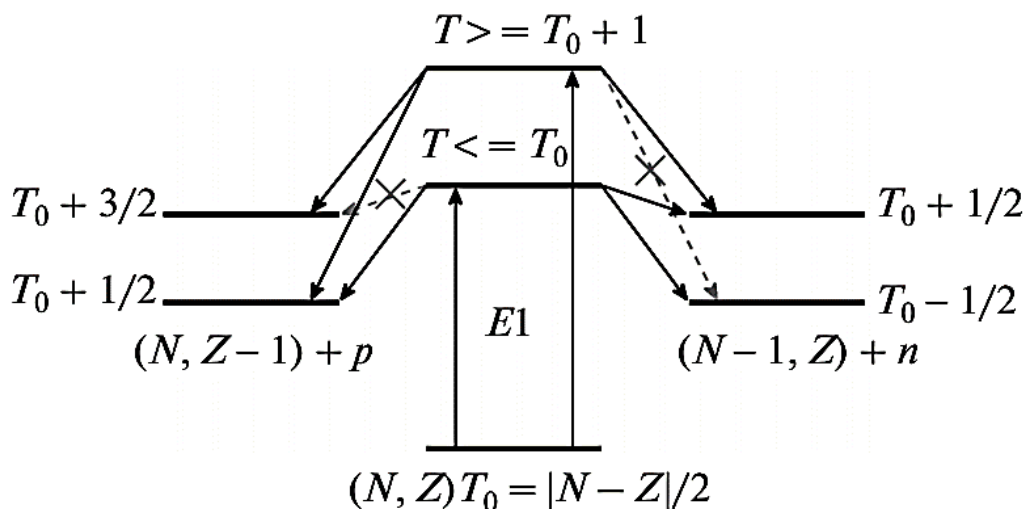
(4) formuladan ko‘rinib turibdiki, ekvivalent kvantga mos kesim reaksiya kesimi σ_i va tormozlanish chegaraviy energiyasi $E_{\gamma max}$ ga bog‘liq. Reaksiya kesimini hisoblash TALYS va FRKM kodlari yordamida amalga oshirildi. TALYS dasturida umumiy fotoyutilish kesimi σ_{abs} GDR kesimi σ_{GDRn} ing kvazideytron fotoparchalanish kesimi σ_{QD} bilan yig‘indisi sifatida aniqlanadi:

$$\sigma_{abs}(E_{\gamma}) = \sigma_{GDR}(E_{\gamma}) + \sigma_{QD}(E_{\gamma}). \quad (5)$$

Fotoyadro reaksiyalarining GDR komponentasi, asosan, dipol tebranishlari energiyasini issiqlik bilan ta‘minlash natijasida erishiladigan nishon yadroning kompaund-holatidan nuklonlarning emissiyasi bilan belgilanadi. Kvazideytron fotoparchalanishining hissasi foton energiyasi va neytronlar sonining ortishi bilan ortadi va kamida beshta neytron emissiyasi bilan boradigan reaksiyalar uchun dominant bo‘ladi. FRKM da fotoyutilish kesimi σ_{abs} ni hisoblashda nafaqat GDR va kvazideytron fotoparchalanish mexanizmi σ_{QD} , balki izovektor kvadrupol rezonansi σ_{QR} va GDR obertoni σ_{GDR2} ning ushbu kesimga qo‘shgan hissasi ham hisobga olinadi:

$$\sigma_{abs}(E_{\gamma}) = \sigma_{GDR}(E_{\gamma}) + \sigma_{IVQR}(E_{\gamma}) + \sigma_{GDR2}(E_{\gamma}) + \sigma_{QD}(E_{\gamma}) \quad (6)$$

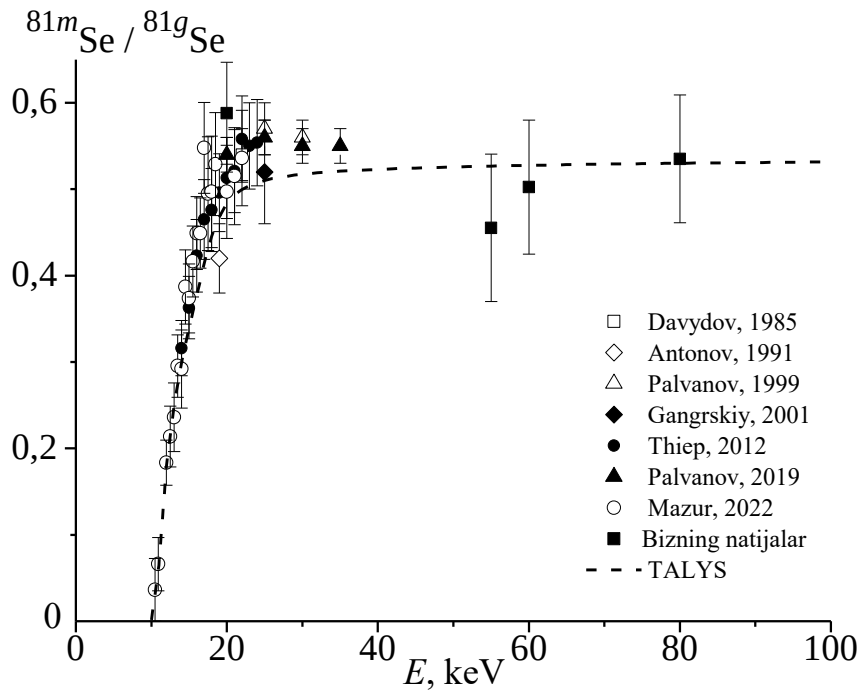
Fotoyadro reaksiyalarining statistik tavsifidan foydalanadigan standart dasturlardan farqli ravishda FRKM da izospin effektlarining GDR parchalanishiga ta‘siri hisobga olinadi. $N \neq Z$ yadrolarida elektr dipol γ -kvantlarining yutilishida ikkita GDR sathlari qo‘zg‘aladi: $T_{<} = T_0$ va $T_{>} = T_0 + 1$, bu yerda $T_0 = |N-Z|/2$. 4-rasmda GDR $T_{<}$ va $T_{>}$ izospin komponentlarining dastlabki yadrodagi (N, Z) qo‘zg‘alishlari va ularning proton $(N, Z-1)$ va neytron $(N-1, Z)$ kanallari bo‘ylab parchalanishi ko‘rsatilgan. 4-rasmdan ko‘rinib turibdiki, GDRning $T_{>} = T_0 + 1$ izospinli qo‘zg‘atilgan holatlarining neytron emissiyasi bilan $T = T_0 - 1/2$ izospinli pastki holatlarga parchalanishi taqiqlangan, bu esa (γ, p) kanalning kuchayishiga olib keladi hamda yadro (N, Z) uchun (γ, p) reaksiya kesimi maksimumining (γ, n) reaksiya kesimiga nisbatan yuqori energiyalarga siljishiga olib keladi.



4-rasm. GDR $T_<$ va $T_>$ izospin komponentlarining dastlabki yadro (N, Z) dagi qo‘zg‘alishlari va ularning proton $(N, Z-1)$ va neytron $(N-1, Z)$ kanallari bo‘ylab parchalanish sxemasi

Dissertatsiyaning “**Selen izotoplaridagi fotoyadro reaksiyalari ekvivalent kvantga mos kesimining uyg‘onish energiyasiga bog‘liqligini tadqiq qilish natijalari**” deb nomlangan uchinchi bobida o‘rganilayotgan fotoyadro reaksiyalari uchun TALYS va FRKM dasturiy kodlar hamda Zeltser-Berger jadvallaridan foydalanib 0-100 MeV energiya diapazonida fotoneytron (γ, xn) va fotoproton (γ, pxn) reaksiyalari uchun hisoblangan hamda eksperimental aniqlangan ekvivalent kvantga mos kesim qiymatlari berilgan.

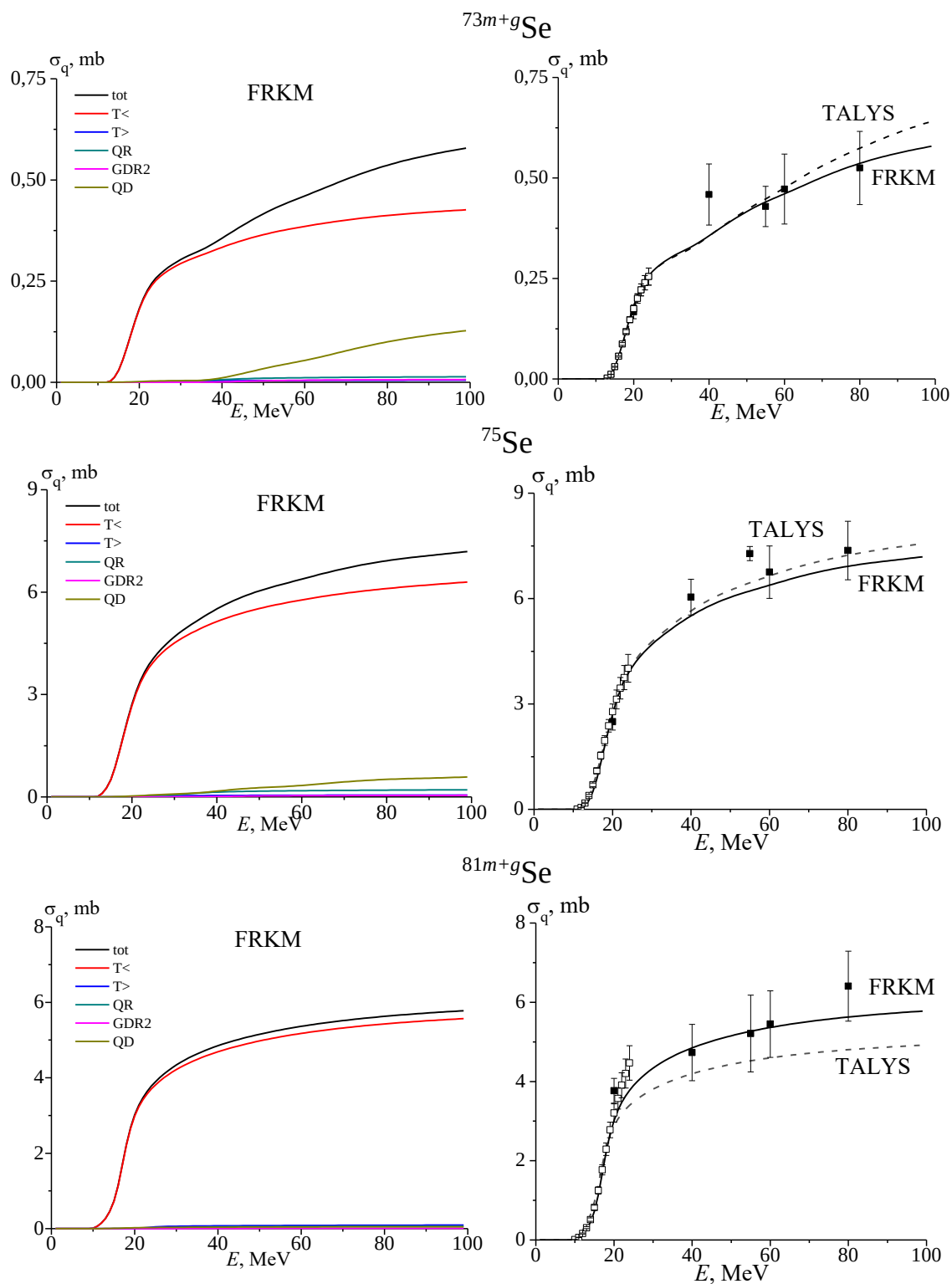
TALYS dasturida yadroda sodir bo‘ladigan barcha reaksiyalar va holatlar orasidagi o‘tishlarning kesimlari hisoblanadi, ya’ni izomer holatlar hosil bo‘lishi bilan boradigan reaksiyalarning kesimlarini aniqlash mumkin. Dipol fotonlarining ^{82}Se yadrosi tomonidan yutilishi GDR spin-juftligi 1^- bo‘lgan uyg‘ongan holat qo‘zg‘alishiga olib keladi, izomer holat $J^\pi = 7/2^+$ va asosiy holat $J^\pi = 1/2^-$ orasidagi spinlar farqi esa kattaroq. 5-rasmda $^{82}\text{Se}(\gamma, n)^{81m,g}\text{Se}$ reaksiya chiqishi izomer nisbatining energiyaga bog‘liqligining hisoblash (TALYS dasturi bo‘yicha) va eksperimental natijalar keltirilgan. Qaralayotgan energiya sohasida TALYS dasturi bo‘yicha hisoblashlar eksperimental ma’lumotlarni qoniqarli darajada tavsiflaydi. $^{81m}\text{Se}/^{81g}\text{Se}$ energetik bog‘liqligida 20 MeVdan yuqori sohada $\langle d \rangle = 0,60 \pm 0,08$ qiymatli to‘yinish kuzatilmoqda. Izomer nisbat reaksiya ostona energiyasidan ~ 20 MeV energiya qiymatiga qadar o‘sadi, bu esa uyg‘onish energiyasi ortishi bilan γ -o‘tish kaskadlari soni, shuningdek, kvazi-to‘g‘ri neytronlar tomonidan olib ketilgan momentlar ortishi bilan bog‘liq bo‘lishi mumkin. ~ 20 MeV energiyada izomer nisbatning energiyaga bog‘liqligining to‘yinganligi metastabil holatlarning paydo bo‘lishiga olib keladigan kaskadlarning paydo bo‘lish ehtimoliga sathlar zichligining yanada oshishining kuchsiz ta’siri bilan bog‘liq bo‘lishi mumkin.



5-rasm. $^{81m,g}\text{Se}$ yadrolarining izomer nisbatining energiyaga bogʻliqligi

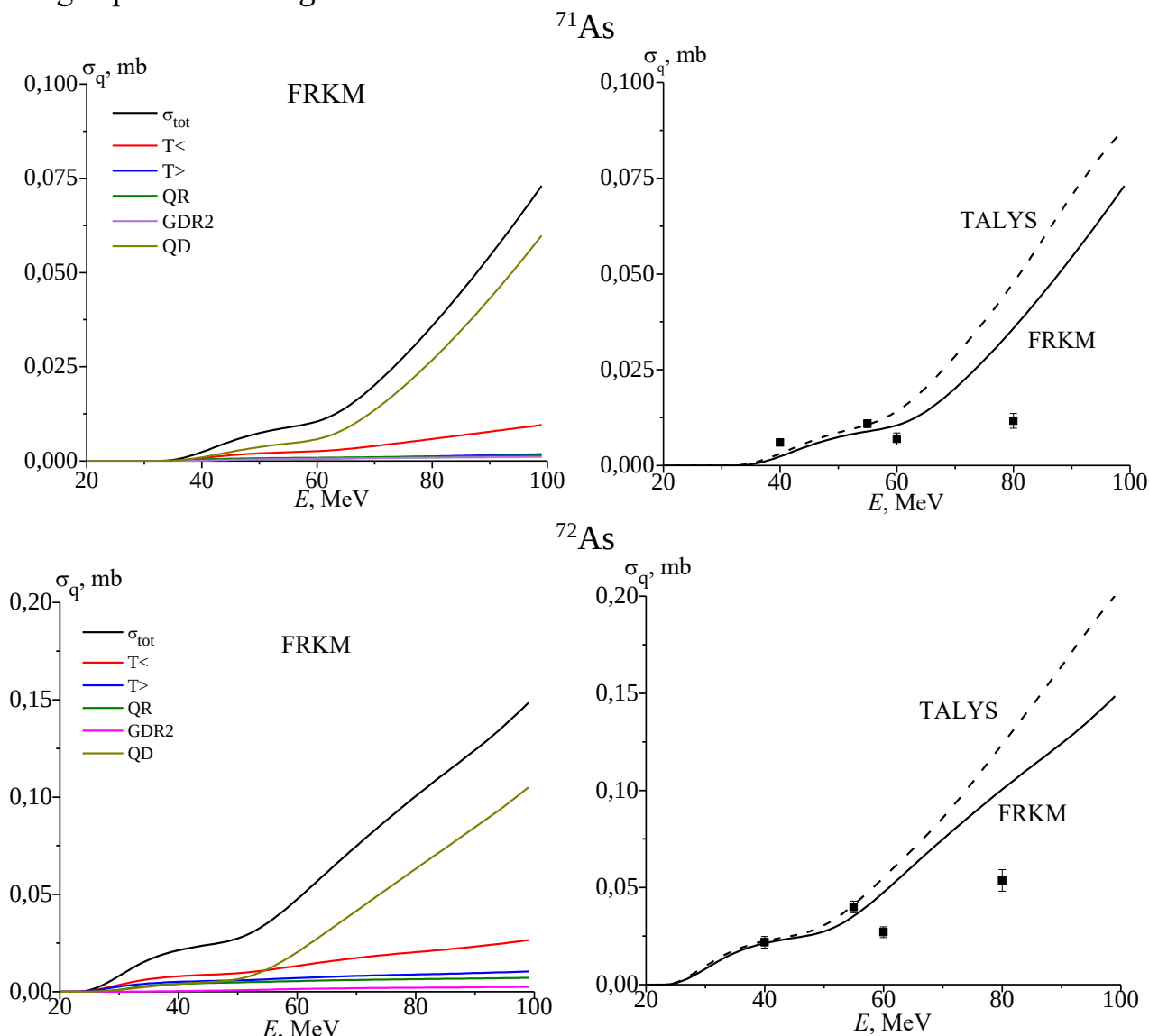
$^{nat}\text{Se}(\gamma, xn)^{73m,g}\text{Se}$, $^{nat}\text{Se}(\gamma, xn)^{75}\text{Se}$ va $^{nat}\text{Se}(\gamma, xn)^{81m,g}\text{Se}$ fotoyadro reaksiyalari.

6-rasmda $^{nat}\text{Se}(\gamma, xn)^{73m,g}\text{Se}$, $^{nat}\text{Se}(\gamma, xn)^{75}\text{Se}$ va $^{nat}\text{Se}(\gamma, xn)^{81m,g}\text{Se}$ fotoneutron reaksiyalari uchun hisoblash hamda eksperimental bogʻliqliklari $\sigma_q(E)$ keltirilgan. FRKM dasturi boʻyicha hisoblash natijalariga koʻra, qaralayotgan energiya sohasida reaksiya mahsulotlari ^{75}Se va $^{81m,g}\text{Se}$ hosil boʻlishida $T_< = \frac{N-Z}{2}$ izospinli holatga parchalanish kanallari hissalari σ_q^{tot} ning shakllanishida dominant rol oʻynaydi. $^{73m,g}\text{Se}$ yadrosi hosil boʻlishida $T_< = \frac{N-Z}{2}$ izospinli holatga parchalanish kanali dominantdir, kvazideytron kanal hissasi QD 40 MeVdan yuqori energiyalarda oʻz hissasini koʻrsata boshlaydi. Boshqa parchalanish kanallarining hissalari qaralayotgan energiya diapazonida hisobga olmas darajada kichik. σ_q oʻlchashda erishilgan aniqlik chegarasida $^{nat}\text{Se}(\gamma, xn)^{73m,g}\text{Se}$, $^{nat}\text{Se}(\gamma, xn)^{75}\text{Se}$ va $^{nat}\text{Se}(\gamma, xn)^{81m,g}\text{Se}$ fotoyadro reaksiyalarining eksperimental bogʻliqligi $\sigma_q^{tot}(E)$ TALYS va FRKM dasturlari hisoblash natijalari bilan mos keldi.



6-rasm. $^{73(m+g)}, ^{75}, ^{81(m+g)}\text{Se}$ yadrolari hosil bo'lishiga olib keladigan fotoneytron reaksiyalari $^{\text{nat}}\text{Se}(\gamma, xn)$ uchun hisoblash (chapda) hamda eksperimental (o'ngda) $\sigma_q(E)$ bog'liqliklari. Ochiq kvadratlar – Goryachev guruhi natijalari, qora kvadratlar – bizning natijalarimiz

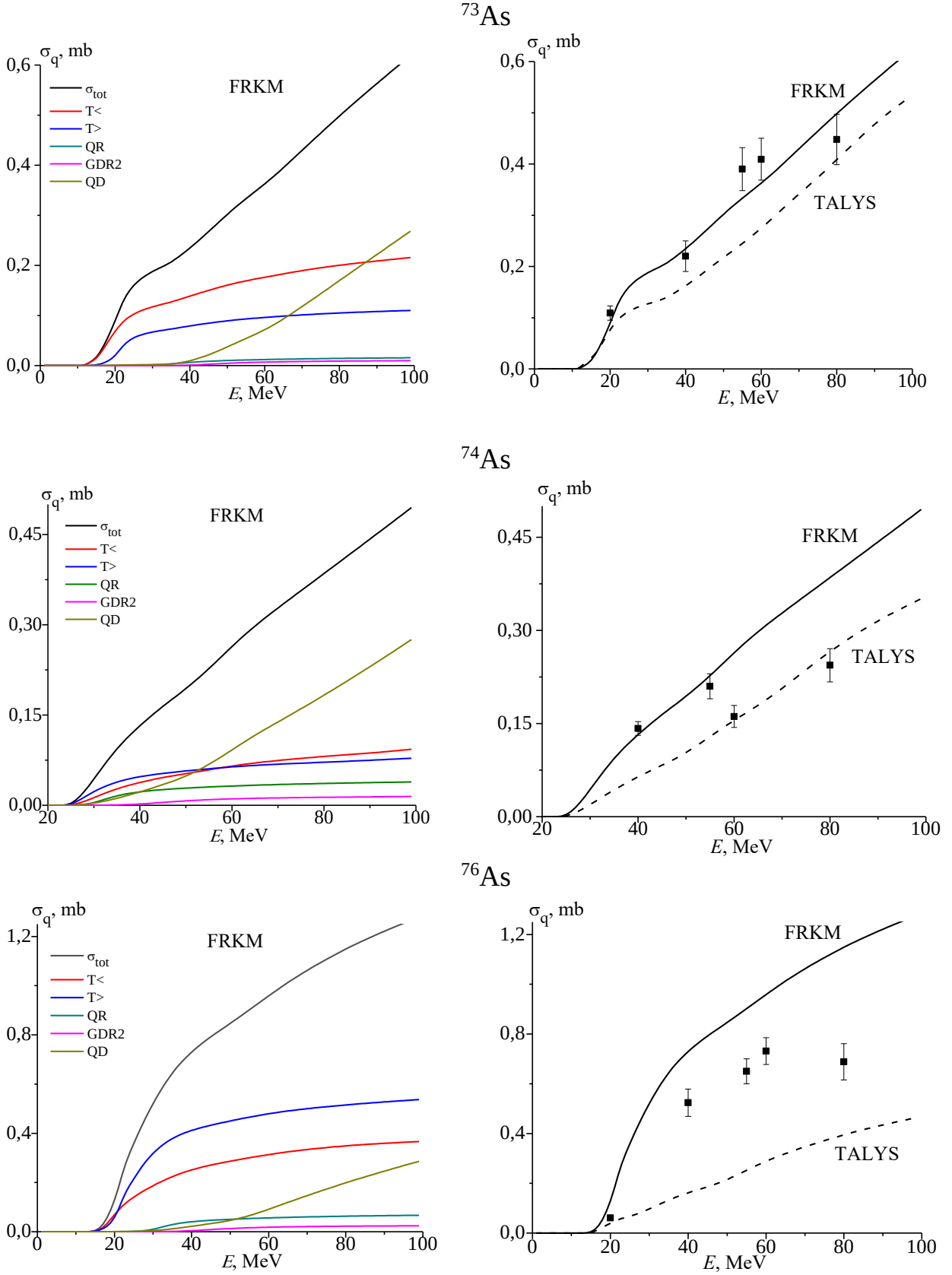
$^{71-74}\text{As}$, $^{76-79}\text{As}$ yadrolari hosil bo'lishiga olib keladigan $^{\text{nat}}\text{Se}(\gamma, \text{pxn})$ reaksiyalari. 7, 8 va 9-rasmlarda $^{71,72}\text{As}$, $^{73-76}\text{As}$, $^{77-79}\text{As}$ hosil bo'ladigan fotoproton reaksiyalari $^{\text{nat}}\text{Se}(\gamma, \text{pxn})$ $\sigma_q(E)$ uchun hisoblash (chapda) va eksperimental (o'ngda) bog'liqliklari keltirilgan.



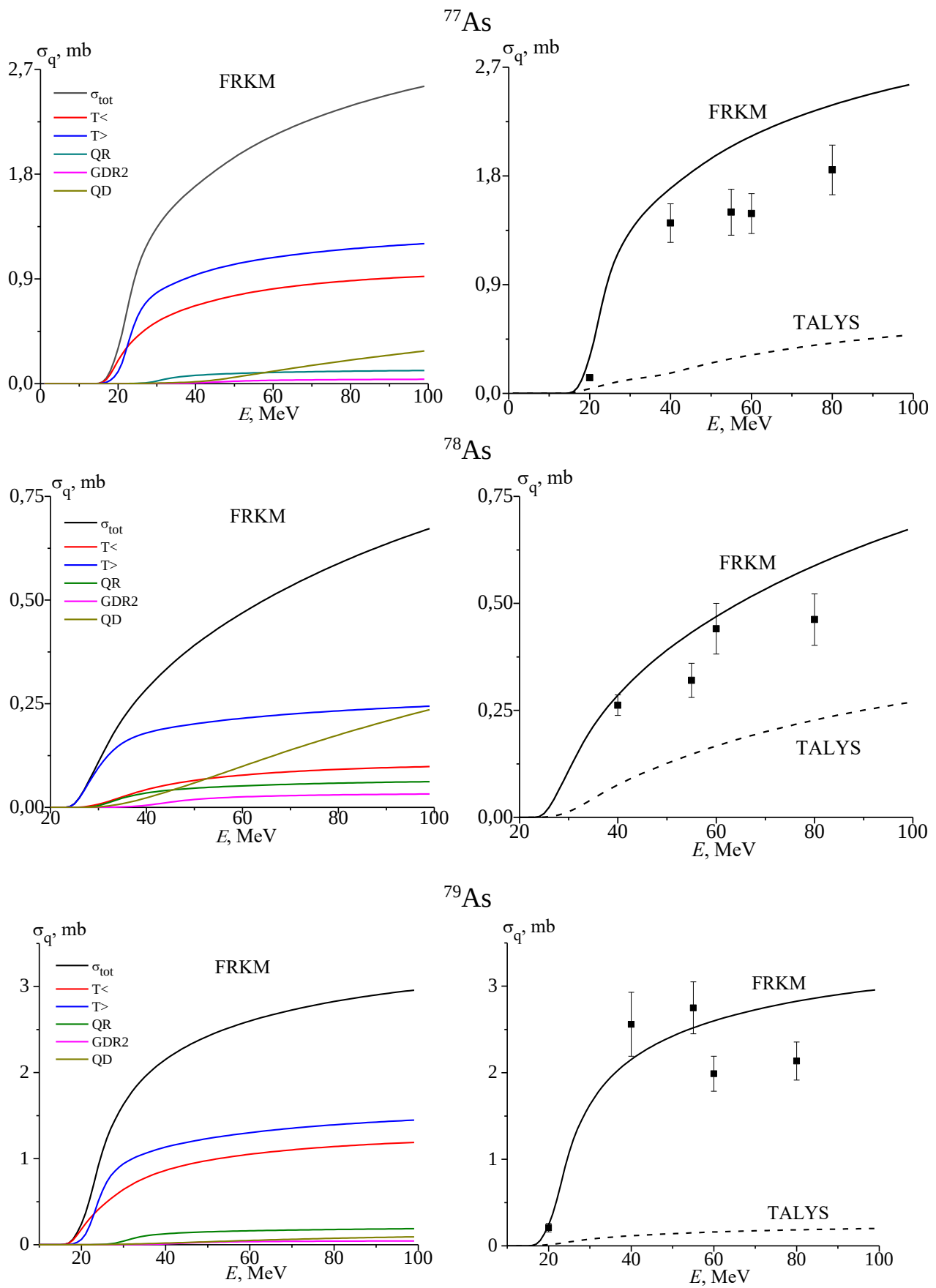
7-rasm. $^{71,72}\text{As}$ yadrolari hosil bo'lishiga olib keladigan $^{\text{nat}}\text{Se}(\gamma, \text{pxn})$ reaksiyalari uchun hisoblash (chapda) va eksperimental (o'ngda) $\sigma_q(E)$ bog'liqliklari

FRKM dasturi bo'yicha hisoblash natijalariga ko'ra σ_q^{tot} shakllanishida qarayotgan uyg'onish energiyasi sohasida $T<$ va $T>$ izospinli holatlarga parchalanish, kvadrupol rezonans (QR), oberton (GDR2) va kvazideytron mexanizm (QD) hissalarini reaksiya mahsulotining massa soniga qarab har xil bo'ladi. Qarayotgan fotoproton reaksiyalari mahsulotlari $^{71-74}\text{As}$, $^{76-79}\text{As}$ uchun $T<$ va $T>$ izospinli holatlarga parchalanish va kvazideytron mexanizmlari katta ehtimollikka ega. Boshqa parchalanish kanallari (QR, GDR2) hissalarini kichik. ^{71}As uchun QD hisssasi qarayotgan uyg'onish energiyasi sohasida dominantdir. $^{72-74,78}\text{As}$ yadrolar holida (QD) hisssasi σ_q^{tot} kattaligiga 60 MeVdan yuqori energiyalarda ta'sir etadi.

$^{76,77,79}\text{As}$ yadrolari uchun σ_q^{tot} katta ehtimollik bilan $T_>$ va $T_<$ izospinli holatlarga parchalanish hisobiga shakllanadi.



8-rasm. $^{73,74,76}\text{As}$ hosil bo'lishiga olib keladigan $^{nat}\text{Se}(\gamma,pxn)$ reaksiyalari uchun hisoblash (chapda) va eksperimental (o'ngda) $\sigma_q(E)$ bog'liqligi



9-rasm. $^{77-79}\text{As}$ hosil bo'lishiga olib keladigan $^{nat}\text{Se}(\gamma, pxn)$ reaksiyalari uchun hisoblash (chapda) va eksperimental (o'ngda) $\sigma_q(E)$ bog'liqligi

σ_q^{tot} kattalikni o'lchashdagi xatoliklar chegarasida FRKM hisoblari qaralayotgan energiya sohasida ^{73}As , ^{78}As va ^{79}As yadrolari uchun $\sigma_q^{tot}(E)$ eksperimental bog'liqligini qoniqarli tavsiflaydi. ^{71}As , ^{72}As izotoplari uchun FRKM va TALYS hisoblari 60 MeVdan yuqori energiyalarda σ_q^{tot} qiymatlarini kattaroq beryapti. ^{76}As , ^{77}As holida FRKM hisoblari kattaroq beryapti, TALYS esa – teskarisi, 40 MeVdan yuqori energiyalarda $\sigma_q^{tot}(E)$ ni kamroq beryapti. σ_q^{tot} uchun hisoblash natijalari va o'lchangan qiymatlarini birgalikda tahlil qilish natijalaridan kelib chiqqan holda, fotoproton reaksiyalarida $\sigma_q^{tot}(E)$ ni tavsiflash uchun FRKM va TALYS hisoblarining qo'llanilishi to'g'risida aniq xulosalar chiqarishga erta hamda hisoblashlarni takomillashtirishni talab qilinadi. Bizning nuqtai nazarimizdan, kvazideytron (QD) parchalanish kanalining ta'sirini kamaytirish yo'llarini izlash FRKM asosida hisoblash natijalari va eksperiment o'rtasidagi farqni kamaytirishga olib keladi.

$^{74,77,78,80}\text{Se}$ izotoplarida (γ, p) reaksiyalari.

20 MeV uyg'onish energiyasida tormozlanish nurlanishining kvazimonoenergetik spektrni hisoblash metodi yordamida $^{74,77,78,80}\text{Se}$ izotoplarida (γ, p) reaksiyalari kesimlari aniqlandi. TALYS va FRKM dasturlari bo'yicha hisoblash natijalari hamda eksperimental aniqlangan kesim qiymatlari 2-jadvalda berilgan.

2-jadval

20 MeV uyg'onish energiyasida $^{74,77,78,80}\text{Se}$ izotoplarida fotoproton (γ, p) reaksiyalarining kesimlari

Reaksiya	Kesim σ , mb		
	Eksperiment	TALYS	FRKM
$^{74}\text{Se}(\gamma, p)^{73}\text{As}$	24.5(29)	23.17	53.3
$^{77}\text{Se}(\gamma, p)^{76}\text{As}$	2.57(13)	2.00	19.3
$^{78}\text{Se}(\gamma, p)^{77}\text{As}$	2.74(18)	0.88	15.5
$^{80}\text{Se}(\gamma, p)^{79}\text{As}$	5.02(45)	0.29	7.8

Jadvaldan ko'rinib turibdiki, $^{74}\text{Se}(\gamma, p)^{73}\text{As}$, $^{77}\text{Se}(\gamma, p)^{76}\text{As}$ reaksiyalari uchun TALYS hisoblash natijalari eksperimental ma'lumotlar bilan yaxshi mos keladi. $^{78}\text{Se}(\gamma, p)^{77}\text{As}$, $^{80}\text{Se}(\gamma, p)^{79}\text{As}$ reaksiyalari uchun bu hisoblar σ kattalikni kamroq baholaydi. FRKM hisob natijalari qaralayotgan reaksiyalar uchun kesim qiymatlarining yuqori bo'lishini baholaydi.

XULOSA

“Gigant dipol rezonansdan yuqori sohada selen izotoplarida fotoyadro reaksiyalari kesimlari” mavzusidagi falsafa doktori darajasini (PhD) olish uchun yozilgan dissertatsiya ishi bo'yicha o'tkazilgan tadqiqotlar asosida quyidagicha xulosalar qilindi:

1. Tormozlanish gamma-nurlanishida kiritilgan aktivlik usuli yordamida murakkab izotopik tarkibga ega bo'lgan obyektlardagi fotoyadro reaksiyalarini muvaffaqiyatli o'rganish mumkinligi ko'rsatildi.

2. Birinchi marta chegaraviy energiyasi 20, 40, 55, 60 va 80 MeV bo'lgan tormozlanish gamma-nurlanishida tabiiy selen nishoni nurlantirilganda $^{73g,73m,75,81g,81m}\text{Se}$ va $^{71-74,76-79}\text{As}$ yadrolarini hosil qiluvchi reaksiyalar uchun eksperimental ekvivalent kvantga mos kesimlar aniqlandi.

3. Fotoneytron (γ, xn) va fotoproton (γ, pxn) reaksiyalarining 0-100 MeV energiya diapazonida TALYS va FRKM dasturi algoritmlaridan foydalangan holda ekvivalent kvantga mos kesimlarning nazariy hisoblash natijalaridan kelib chiqadiki, TALYS dasturi natijalari faqat fotoneytron reaksiyalari uchun eksperimental ma'lumotlar bilan mos keladi. FRKM usuli bo'yicha hisoblash natijalari fotoneytron va fotoproton reaksiyalari uchun eksperimental ma'lumotlar bilan mos keladi.

4. TALYS dasturidan foydalangan holda hisoblash natijalari $^{81m}\text{Se}/^{81g}\text{Se}$ izomer nisbatlarining eksperimental natijalarini qoniqarli tavsiflaydi. $^{81m}\text{Se}/^{81g}\text{Se}$ nisbatining energiyaga bog'liqligida 20 MeVdan yuqori sohada to'yinishi metastabil holatlarning paydo bo'lishiga olib keladigan kaskadlarning hosil bo'lish ehtimolining kamayishi bilan bog'liq. Bu omillar TALYS dasturi algoritmidan hisobga olingan.

5. 20 MeV energiyada $^{74,77,78,80}\text{Se}$ izotoplari uchun (γ, p) reaksiya kesimining eksperimental qiymatlari yadro tibbiyoti uchun mishyak radioizotoplarini fotoyadroviy usulda radiokimyoviy ishlab chiqarish imkoniyatlarini baholashga imkon berdi.

6. FRKM dasturi algoritmlaridan foydalangan holda fotoproton reaksiyalarida GDRning izospin kengayishi konsepsiyasini to'g'ri tekshirish uchun 10-25 MeV energiya oralig'ida eksperimental ma'lumotlar olinishi zarur.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ИНСТИТУТЕ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ**

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

РАСУЛОВА ФАЗИЛАТ АБДУВАЛИЕВНА

**СЕЧЕНИЯ ФОТОЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ НА ИЗОТОПАХ СЕЛЕНА В
ОБЛАСТИ ВЫШЕ ГИГАНТСКОГО ДИПОЛЬНОГО РЕЗОНАНСА**

01.04.08 – Физика атомного ядра и элементарных частиц. Ускорительная техника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам

Ташкент – 2024

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за номером B2023.4.PhD/FM981.

Диссертация выполнена в Институте ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан. Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (www.inp.uz) и Информационно-образовательном портале «Ziynet» (www.ziynet.uz).

Научный руководитель:

Юлдашев Бехзод Садыкович

доктор физико-математических наук, профессор,
академик

Официальные оппоненты:

Артемов Сергей Викторович

доктор физико-математических наук, профессор

Полвонов Сатимбой Раджапович

доктор физико-математических наук, профессор

Ведущая организация:

Самаркандский государственный университет

Защита диссертации состоится «_____» _____ 2024 года в _____ часов на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 при Институте ядерной физики (Адрес: 100214, г. Ташкент, пос. Улугбек, ИЯФ АН РУз. Тел.: (+99871) 289-31-41; факс: (+99871)289-36-65; e-mail: info@inp.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института ядерной физики (регистрационный номер _____) (Адрес: 100214, г. Ташкент, пос. Улугбек, ИЯФ АН РУз. Тел. (+99871) 289-31-19).

Автореферат диссертации разослан «_____» _____ 2024 г.
(протокол рассылки № _____ от «_____» _____ 2024 г.).

М.Ю.Ташметов

председатель Научного совета по присуждению
ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

О.Р.Тожибоев

ученый секретарь Научного совета по присуждению
ученых степеней, PhD ф.-м.н,
старший научный сотрудник

Э.М.Турсунов

председатель научного семинара при
Научном совете по присуждению ученых степеней,
д.ф.-м.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время исследование фотоядерных реакций остается важным источником информации о свойствах и строении атомных ядер. Теоретическое и экспериментальное изучение фотоядерных реакций на природных изотопах селена позволяет описать переходной характер области массовых чисел $70 < A < 90$ от сферических ядер к деформированным. Также важным является перераспределение вкладов различных механизмов взаимодействия γ -квантов с ядрами с ростом энергии, в частности, в той области, где гигантский дипольный резонанс (ГДР) не является доминирующим. Помимо фундаментальных аспектов, изучение фотоядерных реакций на изотопах селена актуально для выяснения их роли в процессах звездного нуклеосинтеза, в возможности наработки перспективных для ядерной медицины радиоизотопов мышьяка на пучках тормозного излучения ускорителей электронов.

В мировых научных центрах имеется довольно обширная экспериментальная информационная база по сечениям реакций типа (γ, n) , $(\gamma, n)^m$, $(\gamma, n) + (\gamma, np)$ и $(\gamma, 2n)$ на изотопах селена в области ГДР. Сильно различающиеся величины сечений фотонейтронных реакций на изотопах селена указывают на конкурирующий характер распада ГДР по каналам (γ, n) и (γ, p) реакций. Распад ГДР с испусканием протонов, несмотря на малое сечение реакции (γ, p) , позволяет изучать эффект изоспинового расщепления. Получение новых данных в области энергий выше 20 МэВ и улучшение точности существующих является одной из актуальных задач в области экспериментального изучения фотоядерных реакций.

В нашей республике большое внимание уделяется фундаментальным и прикладным исследованиям в области внедрения ядерных технологий в науку и производство. Направления этих фундаментальных исследований, имеющих важное значение для развития науки нашей страны и её практического применения, отражены в Стратегии² развития нового Узбекистана на 2022–2026 гг.

Исследования в этой области соответствуют целям и задачам, предусмотренным в Указах Президента Республики Узбекистан № УП-60 «О Стратегии развития нового Узбекистана на 2022–2026 гг.» от 28 января 2022 года, УП-5484 «О мерах по развитию атомной энергетики в Республике Узбекистан» от 19 июля 2018 года, Постановлениях Президента Республики Узбекистан № ПП-4165 «Об утверждении Концепции развития атомной энергетики в Республике Узбекистан на период 2019-2029 гг.» от 7 февраля 2019 года, № ПП-4492 «Об утверждении стратегии развития кадрового потенциала для ядерно-энергетической программы Республики Узбекистан» от 16 октября 2019 года и № ПП-4526 «О мерах по поддержке научно

² Указ Президента Республики Узбекистан № УП-60 «О Стратегии развития нового Узбекистана на 2022-2026 годы» от 28 января 2022 г.

исследовательской деятельности Института ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан» от 21 ноября 2019 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данном направлении.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Диссертационная работа выполнена в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий республики II. «Энергетика, энергосбережение и альтернативные источники энергии».

Степень изученности проблемы. Исследованиями фотоядерных реакций на изотопах природного селена занимаются многие ученые ведущих научных центров мира, например, французские (P.Carlos, H.Beil, R.Bergere, J.Fagot, A.Lepretre, A.Veyssiere), американские (S.A.Yates, C.R.Howell, S.M.Grimes), корейские (H.Naik, G.N.Kim, K.Kim, M.Zaman, M.Sahid, S.C.Yang), японские (F.Kitatani, H.Harada, S.Goko, H.Utsunomiya, H.Akimune, T.Kaihor, H.Toyokawa, K.Yamada, A.Makinaga) российские (А.М.Горячев, Г.Н.Залесный, В.В.Варламов, А.Г.Белов, Ю.П.Гангрский, А.Д.Антонов, А.П.Тончев, Н.П.Балабанов, Р.А.Алиев, А.А.Кузнецов), украинские (В.М.Мазур, И.В.Соколюк, З.М.Биган, И.Н.Вишневский, В.И.Желтоножский, Е.В.Кулич, А.Н.Саврасов), вьетнамские (Tran Duc Thier, Truong Thi An, Nguyen Tuan Khai, Nguyen The Vinh, Phan Viet Cuong), узбекистанские (С.Р.Полвонов, Ф.Ш.Хамраев, Э.М.Шомуродов, Э.А.Запаров, Б.С.Мазитов, В.Г.Уланов) и другие.

В этих экспериментах, на пучках тормозного излучения ускоренных электронов, квазимонохроматических фотонов, образующихся при аннигиляции ускоренных позитронов и обратного комптоновского рассеяния лазерных фотонов на пучке электронов, получены данные по сечениям реакций типа (γ, n) , $(\gamma, n)^m$, $(\gamma, n) + (\gamma, np)$ и $(\gamma, 2n)$ на изотопах селена в области энергий 10–28 МэВ.

В литературе отсутствуют экспериментальные данные о сечениях фотопротонных реакций на изотопах селена. Наличие этих данных позволило бы проверить концепцию изоспинового расщепления ГДР и исследовать энергетическую зависимость выходов и сечений фотоядерных реакций в этой области энергий.

Связь темы диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнена в рамках утвержденной Постановлением Президента РУз № ПП-4526 от 21 ноября 2019 года программы научно-исследовательских работ Института ядерной физики АН РУз на 2020–2024 годы по теме: «Исследования в области атомной энергетики, разработка технологий получения радиоизотопов и внедрения ядерных технологий».

Целью исследования является получение экспериментальных сечений на эквивалентный квант фотоядерных реакций на стабильных изотопах селена и установление основных механизмов реакций из зависимости сечений от

энергии в области выше гигантского дипольного резонанса.

Задачи исследования:

проведение облучений образцов природного селена на пучках тормозного излучения микротрона РМ-55 НИИ ядерной физики при Московском государственном университете и линейного ускорителя ЛИНАК-200 Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ (Дубна) при энергиях ускоренных электронов 20, 40, 55, 60 и 80 МэВ;

выполнение численных расчетов спектров тормозного излучения на выходе вольфрамовых конверторов при энергиях ускоренных электронов 20, 40, 55, 60 и 80 МэВ, с использованием пакета программ Geant4;

установление изотопного состава продуктов фотоядерных реакций на изотопах природного селена гамма-спектроскопическим методом;

определение сечений фотоядерных реакций на эквивалентный квант для изотопов природного селена в диапазоне граничных энергий тормозного излучения 20–80 МэВ;

установление зависимости сечений фотоядерных реакций на эквивалентный квант для изотопов природного селена от энергии возбуждения;

выполнение расчетов сечений фотоядерных реакций на эквивалентный квант с помощью программных кодов TALYS-1.96 и комбинированной модели фотоядерных реакций (КМФР);

анализ полученных данных путем сравнения с предсказаниями теории.

Объектом исследования являются стабильные изотопы селена.

Предметом исследования являются сечения на эквивалентный квант фотоядерных реакций на изотопах природного селена.

Методы исследования: метод наведенной активности, гамма-спектрометрия, компьютерное моделирование и расчеты с помощью программ Geant4, TALYS и КМФР.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

впервые получены экспериментальные значения сечения на эквивалентный квант для реакций (γ, xn) и (γ, pxn) , образующих ядра $^{73g, 73m, 75, 81g, 81m}\text{Se}$ и $^{71-74, 76-79}\text{As}$ при облучении мишени природного селена тормозным гамма-излучением с граничными энергиями 20, 40, 55, 60 и 80 МэВ;

установлено, что в реакциях (γ, pxn) , образующих изотопы мышьяка $^{76-79}\text{As}$, основным механизмом является эффект изоспинового расщепления, удовлетворительно описываемый в рамках комбинированной модели фотоядерных реакций;

впервые экспериментально найдены значения сечения реакции (γ, p) на изотопах $^{74, 77, 78, 80}\text{Se}$ при энергии 20 МэВ и установлена экспоненциальная зависимость уменьшения сечения реакции (γ, p) с ростом массового числа;

впервые установлено, что экспериментальная зависимость изомерного отношения d для реакции $^{82}\text{Se}(\gamma, n)^{81m, g}\text{Se}$ от энергии возбуждения характеризуется областью насыщения с $\langle d \rangle = 0,60 \pm 0,08$ при энергиях выше 20

МэВ.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

с использованием программного кода Geant4 получены расчетные спектры тормозного излучения электронов, генерируемого на вольфрамовых конверторах ускорителей РМ-55 и ЛИНАК-200;

с использованием программных кодов TALYS и КМФР, а также таблиц Зельцера-Бергера получены расчетные сечения фотонейтронных (γ, xn) и фотопротонных (γ, pxn) реакций на эквивалентный квант в диапазоне энергий 0-100 МэВ;

установлен линейный рост энергетической зависимости сечений на эквивалентный квант для реакций, образующих ядра $^{73g,73m}\text{Se}$ и $^{73,74}\text{As}$ в диапазоне энергий от 30 МэВ до 80 МэВ, обусловленный вкладом квазидейтронного механизма;

установлена тенденция насыщения зависимости сечений на эквивалентный квант для реакций, образующих ядра $^{75,81g,81m}\text{Se}$ и $^{76-79}\text{As}$ в диапазоне энергий от 40 до 80 МэВ.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов заключается в том, что полученные экспериментальные данные о фотоядерных реакциях на стабильных изотопах селена в области выше гигантского дипольного резонанса актуальны для улучшения теоретических подходов, нацеленных на описание механизмов фотоядерных реакций, таких как изоспиновое расщепление ГДР, возбуждение квадрупольного резонанса и квазидейтронный механизм. Значимым результатом является указание на возможность образования и деструкции обойденного ядра ^{74}Se за счет фотоядерных реакций, что необходимо учитывать в построении картины звездного нуклеосинтеза. Экспериментальные данные могут дополнить имеющуюся оценочную информацию в базах ядерных данных EXFOR (CSISRS) (МАГАТЭ) по фотоядерным реакциям. Практическая значимость результатов определяется оценкой возможности использования ускорителя электронов для наработки медицинских изотопов ^{72}As , ^{74}As , ^{76}As и ^{77}As , широко используемых в медицинской диагностике.

Достоверность результатов исследования подтверждается применением полупроводниковых детекторов с высоким энергетическим разрешением и современных методов математической обработки аппаратных спектров; использованием надежного общепринятого программного пакета Geant4 для численного моделирования спектров тормозного излучения; корректностью сравнительного анализа экспериментальных данных с результатами расчетов, выполненных с помощью программных кодов TALYS и КМФР.

Внедрение результатов исследования. На основе полученных результатов по исследованию сечений фотоядерных реакций на изотопах селена в области выше гигантского дипольного резонанса:

полученные экспериментальные значения сечения на эквивалентный квант для реакций, образующих ядра $^{73g,73m,75,81g,81m}\text{Se}$ и $^{71-74,76-79}\text{As}$ при облучении мишени природного селена в поле тормозного излучения с граничными энергиями 20, 40, 55, 60 и 80 МэВ, а также теоретические подходы к их анализу были использованы в Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований в рамках темы 04-5-1131-2017/2023 «Радиационно-физические, радиохимические и нанотехнологические исследования на пучках ускоренных тяжелых ионов» (письмо Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ №500-26/80 от 4.12.2023). Использование результатов позволило описать и объяснить механизм фотоядерных реакций при различных энергиях возбуждения;

экспериментальное подтверждение того, что в фотопротонных реакциях, образующих изотопы мышьяка $^{76-79}\text{As}$ основным механизмом является эффект изоспинового расщепления было использовано в Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований (письмо Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ №500-26/80 от 4.12.2023). Использование результатов позволило интерпретировать механизм распада гигантского дипольного резонанса;

полученные экспериментальные значения сечения реакции (γ, p) на изотопах $^{74,77,78,80}\text{Se}$ при энергии 20 МэВ были использованы в Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований на микротроне МТ-25 и проектируемых линейных ускорителях электронов (письмо Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ №500-26/80 от 4.12.2023). Использование результатов позволило оценить возможности радиохимического производства радиоизотопов мышьяка для ядерной медицины фотоядерным методом;

полученные экспериментальные значения изомерных отношений выходов реакции $^{82}\text{Se}(\gamma, n)^{81m, g}\text{Se}$ в области энергий выше гигантского дипольного резонанса были использованы в Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований (письмо Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ №500-26/80 от 4.12.2023). Использование результатов позволило интерпретировать механизм заселения изомерных состояний в широком диапазоне энергий возбуждений.

Апробация работы. Результаты исследования обсуждались на 5 международных и республиканских научных конференциях.

Опубликованность результатов исследований. По теме диссертации опубликованы 8 научных работ, в том числе 4 научные статьи в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, из которых 2 в зарубежных научных журналах.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка использованной литературы. Объем диссертации составляет 113 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность темы диссертации, определено соответствие проведенных исследований приоритетным направлениям развития науки и технологий республики, изложена степень изученности проблемы, сформулированы цель и задачи исследования, приведены сведения об объектах, предметах и методах исследования, изложены научная новизна и практические результаты исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыты научная и практическая значимость полученных результатов, приведены сведения о внедрении результатов исследования, апробации работы, а также об объеме и структуре диссертации.

В первой главе диссертации **«Теоретические и экспериментальные исследования фотоядерных реакций на изотопах селена»** приведен обширный обзор состояния теоретических и экспериментальных исследований в области фотоядерных реакций. Экспериментальные исследования фотоядерных реакций на изотопах природной смеси селена в области энергий возбуждения от 10 до ~28 МэВ проводились с использованием тормозного γ -излучения, аннигиляционного ($e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$) γ -излучения и обратного комптоновского γ -излучения. В литературе отсутствуют экспериментальные данные о сечениях фотоядерных реакций на изотопах селена в области энергий возбуждения выше 28 МэВ, на основе которых можно было бы проверить теоретические концепции, заложенные в пакеты программ TALYS и КМФР. На основании этих выводов сформулированы цель и задачи диссертации, которые описаны во введении.

Во второй главе диссертации **«Методика экспериментов на пучках тормозного излучения ускорителей электронов РМ-55 и ЛИНАК-200. Определение сечений и выходов фотоядерных реакций на природных изотопах селена»** приведены характеристики микротрона РМ-55 НИИЯФ МГУ и линейного ускорителя ЛИНАК-200 Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, условия облучения образцов природного селена, результаты численных расчетов спектров тормозного излучения, гамма-спектрометрическая аппаратура и методы расчетов выходов и сечений исследуемых фотоядерных реакций.

Облучения мишеней из образцов природного селена проводились на пучках тормозного излучения импульсных ускорителей микротрон РМ-55 и линейный ускоритель ЛИНАК-200 (рисунок 1). Эксплуатационные характеристики ускорителей электронов приведены в таблице 1.

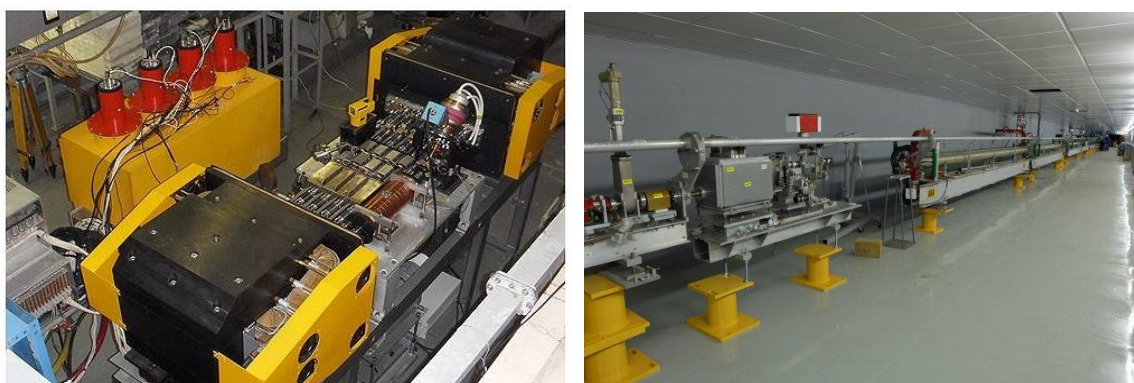


Рис.1. Общий вид ускорителей РМ-55 (слева) и ЛИНАК-200 (справа)

Таблица 1

Характеристики ускорителей РМ-55 и ЛИНАК-200

Характеристики	РМ-55	ЛИНАК-200
Режим работы	непрерывный	импульсный
Максимальная энергия электронов на выходе (МэВ)	55	200
Ток пучка при максимальной энергии (мА)	10	40
Длительность импульса (мкс)	8	0,1 – 3,5
Частота импульсов (Гц)	50	1 - 25
Конвертор (толщина, мм)	W (0,2)	W, (5)

На пучке тормозного излучения ускорителя РМ-55 в качестве мишени использовался природный селен в виде порошка (SeO_2 , $\rho=3,95 \text{ г/см}^3$), помещенный в пластиковый контейнер. Калибровка тока ускорителя проводилась путем сравнения экспериментально измеренного выхода реакции $^{65}\text{Cu}(\gamma, n)^{64}\text{Cu}$ на мониторинговой мишени с рассчитанным выходом. Точность калибровки составила 5%. В случае ЛИНАК-200 образцы металлического селена в виде фольги ($\text{Se}_{\text{мет}}$, $\rho=4,79 \text{ г/см}^3$) массой 227,9, 312, 155,7 и 145,8 мг облучались при граничных энергиях ускоренных электронов 20, 40, 60 и 80 МэВ, соответственно. Величина и стабильность тока электронов контролировались с помощью прецизионного индуктивного датчика тока. Число электронов, падающих на вольфрамовый конвертор, оценивалось с точностью $\pm 10\%$. Спектры тормозного излучения моделировались методом Монте-Карло с помощью пакета программ Geant4 (см. рисунок 2).

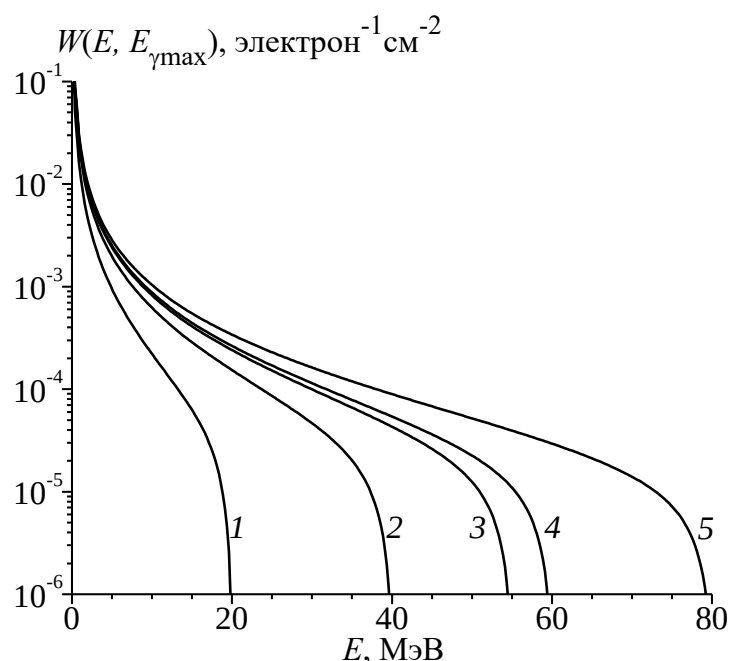


Рис. 2. Плотности распределения числа тормозных фотонов на один электрон ускорителя в тормозной мишени из вольфрама толщиной 5 мм при энергии электронов 20 (1), 40 (2), 55 (3), 60 (4) и 80 МэВ (5)

Спектры γ -квантов облученных мишеней в диапазоне энергий от 50 кэВ до 3,7 МэВ измерялись с помощью HPGE детектора CANBERRA GC3018 объемом 145 см³. Калибровки детектора по энергии и эффективности проводились с использованием стандартных источников γ -излучения ²²Na, ⁵⁴Mn, ⁵⁷Co, ⁶⁵Zn, ⁸⁸Y, ¹¹³Sn, ¹³³Ba, ¹³⁹Ce, ¹⁵²Eu, ²⁰⁷Pb и ²⁴¹Am из комплекта образцовых спектрометрических γ -источников. Энергетическое разрешение детектора составляло 0,8 кэВ и 1,76 кэВ при энергиях $E_\gamma=122$ кэВ и 1332 кэВ, соответственно. Гамма-спектры продуктов реакции идентифицировались по энергии и динамике убывания интенсивности γ -линий. На рисунке 3 приведены спектры остаточной активности облученного образца из природной смеси изотопов селена, измеренные через 20 минут (верхний) и 4 часа после облучения (нижний). Продолжительность регистрации спектров составляла 10 мин и 1 час, соответственно. Граничная энергия тормозного излучения, использованная для облучения, составляла 80 МэВ.

Экспериментальные значения выходов реакций $Y(E_{\gamma\max})_{\text{exp}}$ рассчитывались по площади S идентифицированных гамма-линий облученных образцов селена, с учетом мертвого времени детектора, тока ускоренных электронов и возможных каналов распада продукта реакции:

$$Y(E_{\gamma\max})_{\text{exp}} = \frac{S \cdot C_{\text{abs}}}{\varepsilon_p \cdot I_\gamma} \frac{t_{\text{real}}}{t_{\text{live}}} \frac{1}{N} \frac{1}{N_e} \frac{e^{\lambda \cdot t_{\text{cool}}}}{1 - e^{-\lambda \cdot t_{\text{real}}}} \frac{\lambda \cdot t_{\text{irr}}}{1 - e^{-\lambda \cdot t_{\text{irr}}}} \quad (1)$$

где S – площадь пика, ε_p – эффективность детектора, I_γ – вероятность гамма-излучения, C_{abs} – поправка на самопоглощение гамма-излучения в образце, t_{real} и t_{live} – реальное и живое времени измерения, N – количество атомов в

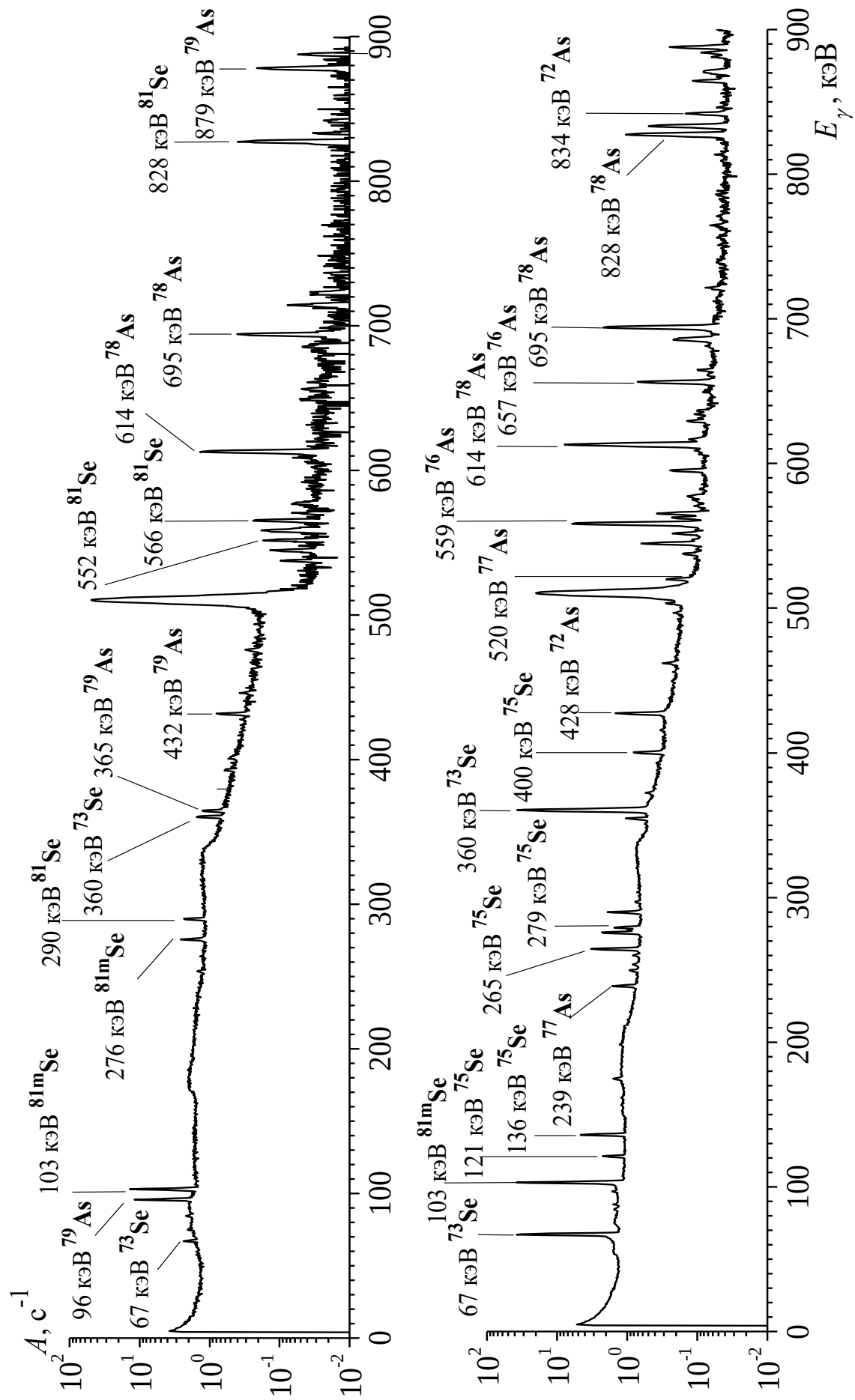


Рис. 3. Гамма-спектры облученного образца селена

активационном образце, N_e – общее число налетающих электронов на вольфрамовый конвертер, λ – постоянная распада, t_{cool} – время охлаждения и t_{irr} – время облучения.

Результат экспериментального значения выхода реакции природной смеси изотопов определялся с учетом всех возможных реакций:

$$Y(E_{\gamma\text{max}})_{\text{exp}} = \sum_i \eta_i \int_{E_{\text{th}}}^{E_{\gamma\text{max}}} W(E, E_{\gamma\text{max}}) \sigma_i(E) dE \quad (2)$$

где индекс i соответствует индексу реакции, дающей вклад в образование исследуемого изотопа, η_i – процентное содержание стабильного изотопа в природной смеси, на котором исследуется реакция i , E_{th} – порог реакции, $E_{\gamma\text{max}}$ – кинетическая энергия электронов, падающих на конвертер, $E_{i,\text{пор}}$ – порог исследуемой фотоядерной реакции, $\sigma_i(E)$ – сечение соответствующей фотоядерной реакции, $W(E, E_{\gamma\text{max}})$ – плотность распределения числа тормозных фотонов по энергии на один электрон пучка ускорителя, E – энергия тормозных γ -квантов, образующихся на конвертере.

Основной проблемой экспериментов в поле тормозных излучений электронов является зависимость выхода фотоядерной реакции от сечения реакции $\sigma(E)$ и формы спектра тормозного излучения $W(E, E_{\gamma\text{max}})$, которая часто известна с недостаточной точностью. Абсолютные выходы фотоядерных реакций на тормозных пучках, выполненных в разной геометрии, будут отличаться из-за различий спектров тормозных фотонов. Для корректного анализа и сопоставления результатов различных экспериментов, выходы реакций нужно нормировать на число эквивалентных квантов, которое определяется по формуле:

$$N = \frac{1}{E_{\gamma\text{max}}} \int_0^{E_{\gamma\text{max}}} E \cdot W(E, E_{\gamma\text{max}}) dE \quad (3)$$

Ввиду предположения о неизменности формы тормозного спектра в качестве функции $W(E, E_{\gamma\text{max}})$ следует взять сечение образования тормозных фотонов $\sigma(E, E_{\gamma\text{max}})$. Сечение на эквивалентный квант в случае реакций на природной смеси изотопов будет включать все возможные каналы образования конечного изотопа с учетом процентного содержания исходных ядер:

$$\sigma_q = \frac{\sum_i \eta_i \int_{E_{\text{th},i}}^{E_{\gamma\text{max}}} \sigma_i(E) \sigma(E, E_{\gamma\text{max}}) dE}{\frac{1}{E_{\gamma\text{max}}} \int_0^{E_{\gamma\text{max}}} E \cdot \sigma(E, E_{\gamma\text{max}}) dE} \quad (4)$$

где $\sigma(E, E_m)$ рассчитывается на основе таблиц Зельцера–Бергера.

Из формулы (4) видно, что сечение на эквивалентный квант зависит от сечения реакции σ_i и граничной энергии тормозного излучения $E_{\gamma\text{max}}$. Расчеты сечения реакции выполнены с использованием программных кодов TALYS и КМФР. В программе TALYS полное фотоядерное сечение σ_{abs} определяется суммой сечения ГДР σ_{GDR} с сечением квазидейтронного фоторасщепления σ_{QD} :

$$\sigma_{\text{abs}}(E_\gamma) = \sigma_{\text{GDR}}(E_\gamma) + \sigma_{\text{QD}}(E_\gamma). \quad (5)$$

ГДР-составляющая фотоядерных реакций, в основном, определяется испусканием нуклонов из компаунд-состояния ядра-мишени, которое достигается в результате термализации энергии дипольных колебаний. Вклад квазидейтронного фоторасщепления растет с увеличением энергии фотонов и множественности нейтронов, и становится доминирующим для реакций с испусканием не менее пяти нейтронов.

В КМФР при расчете сечения фотопоглощения σ_{abs} учитывается не только ГДР и квазидейтронный механизм фоторасщепления σ_{QD} , но и вклад в это сечение изовекторного квадрупольного резонанса σ_{QR} и обертона ГДР σ_{GDR2} :

$$\sigma_{abs}(E_\gamma) = \sigma_{GDR}(E_\gamma) + \sigma_{IVQR}(E_\gamma) + \sigma_{GDR2}(E_\gamma) + \sigma_{QD}(E_\gamma) \quad (6)$$

В отличие от стандартных программ, использующих статистическое описание фотоядерных реакций, в КМФР рассматривается влияние изоспиновых эффектов на распад ГДР. В ядрах $N \neq Z$ при поглощении электрических дипольных γ -квантов возбуждаются две ветви ГДР: $T_< = T_0$ и $T_> = T_0 + 1$, где $T_0 = |N-Z|/2$. На рисунке 4 показаны возбуждения изоспиновых компонент ГДР $T_<$ и $T_>$ в начальном ядре (N, Z) и их распад по протонному $(N, Z-1)$ и нейтронному $(N-1, Z)$ каналам. Из рисунка 4 видно, что распад возбужденных состояний ГДР с изоспином $T_> = T_0 + 1$ на низколежащие состояния с изоспином $T = T_0 - 1/2$ с испусканием нейтрона запрещен, что приводит к увеличению сечения реакции (γ, p) и к сдвигу максимума сечения реакции (γ, p) относительно реакции (γ, n) в сторону высоких энергий в ядре (N, Z) .

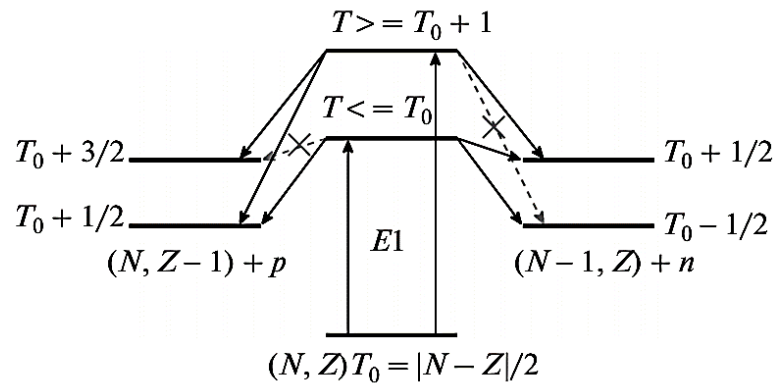


Рис. 4. Схема возбуждения состояний $T_<$ и $T_>$ в ядре (N, Z) и их распад по протонному каналу $(N, Z-1)$ и нейтронному каналу $(N-1, Z)$

В третьей главе диссертации «**Результаты исследования зависимости сечения фотоядерных реакций на эквивалентный квант на изотопах селена от энергии возбуждения**» приведены экспериментально полученные сечения на эквивалентный квант для реакций (γ, xn) и (γ, pxn) и результаты расчетов, выполненных с использованием программных кодов TALYS и КМФР совместно с таблицами Зельцера-Бергера.

Программа TALYS рассчитывает сечения всех реакций, происходящих в ядре, и переходы между состояниями, т.е. можно опеределить сечения реакций с образованием изомерных состояний. Преимущественное поглощение

дипольных фотонов ядром ^{82}Se приводит к возбуждению ГДР, спин-четность которого равна 1^- , а разница в спине между изомерным состоянием $J^\pi = 7/2^+$ и основным состоянием $J^\pi = 1/2^-$ больше этой величины. На рисунке 5 приведены расчетные (по программе TALYS) и экспериментальные энергетические зависимости отношения выходов реакции $^{82}\text{Se}(\gamma, n)^{81m,g}\text{Se}$. В рассматриваемом диапазоне энергий расчеты по программе TALYS удовлетворительно описывают экспериментальные данные. Наблюдается насыщение в энергетической зависимости $^{81m}\text{Se}/^{81g}\text{Se}$ с $\langle d \rangle = 0,60 \pm 0,08$ при энергиях выше 20 МэВ. Изомерные отношения выходов реакции интенсивно возрастают от порога реакций до энергии возбуждения ~ 20 МэВ, что вероятно связано с увеличением числа каскадов γ -переходов и моментов, уносимых квазипрямыми нейтронами, по мере роста энергии возбуждения, а насыщение при энергиях > 20 МэВ может быть обусловлено слабым влиянием дальнейшего увеличения плотности уровней на вероятность образования каскадов, приводящих к возникновению метастабильных состояний.

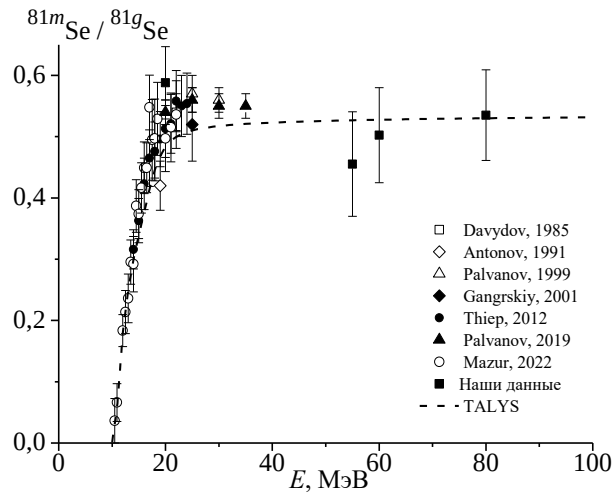


Рис. 5 . Изомерное отношение ядер $^{81m,g}\text{Se}$ в зависимости от энергии

Реакции $^{nat}\text{Se}(\gamma, xn)^{73m+g}\text{Se}$, $^{nat}\text{Se}(\gamma, xn)^{75}\text{Se}$ и $^{nat}\text{Se}(\gamma, xn)^{81m+g}\text{Se}$. На рисунке 6 приводятся расчетные и экспериментальные зависимости $\sigma_q(E)$ для фотонейтронных реакций $^{nat}\text{Se}(\gamma, xn)^{73m+g}\text{Se}$, $^{nat}\text{Se}(\gamma, xn)^{75}\text{Se}$ и $^{nat}\text{Se}(\gamma, xn)^{81m+g}\text{Se}$. Согласно результатам расчетов по программе КМФР, в случае образования продуктов реакции ^{75}Se и $^{81m+g}\text{Se}$, вклад каналов распада на изоспиновые состояния $T_< = \frac{N-Z}{2}$ играет доминирующую роль в формировании σ_q^{tot} в области рассматриваемых энергий возбуждения. При этом в реакции с образованием $^{73m+g}\text{Se}$ доминирует вклад распада на изоспиновое состояние $T_< = \frac{N-Z}{2}$, а вклад квазидейтронного канала QD начинает проявляться при энергиях выше 40 МэВ. Вклады остальных каналов распада в рассматриваемом диапазоне энергий пренебрежимо малы. В пределах достигнутой точности измерений σ_q , экспериментальные зависимости $\sigma_q^{tot}(E)$ фотоядерных реакций $^{nat}\text{Se}(\gamma, xn)^{73m+g}\text{Se}$, $^{nat}\text{Se}(\gamma, xn)^{75}\text{Se}$ и $^{nat}\text{Se}(\gamma, xn)^{81m+g}\text{Se}$ согласуются с результатами расчетов по программам TALYS и КМФР.

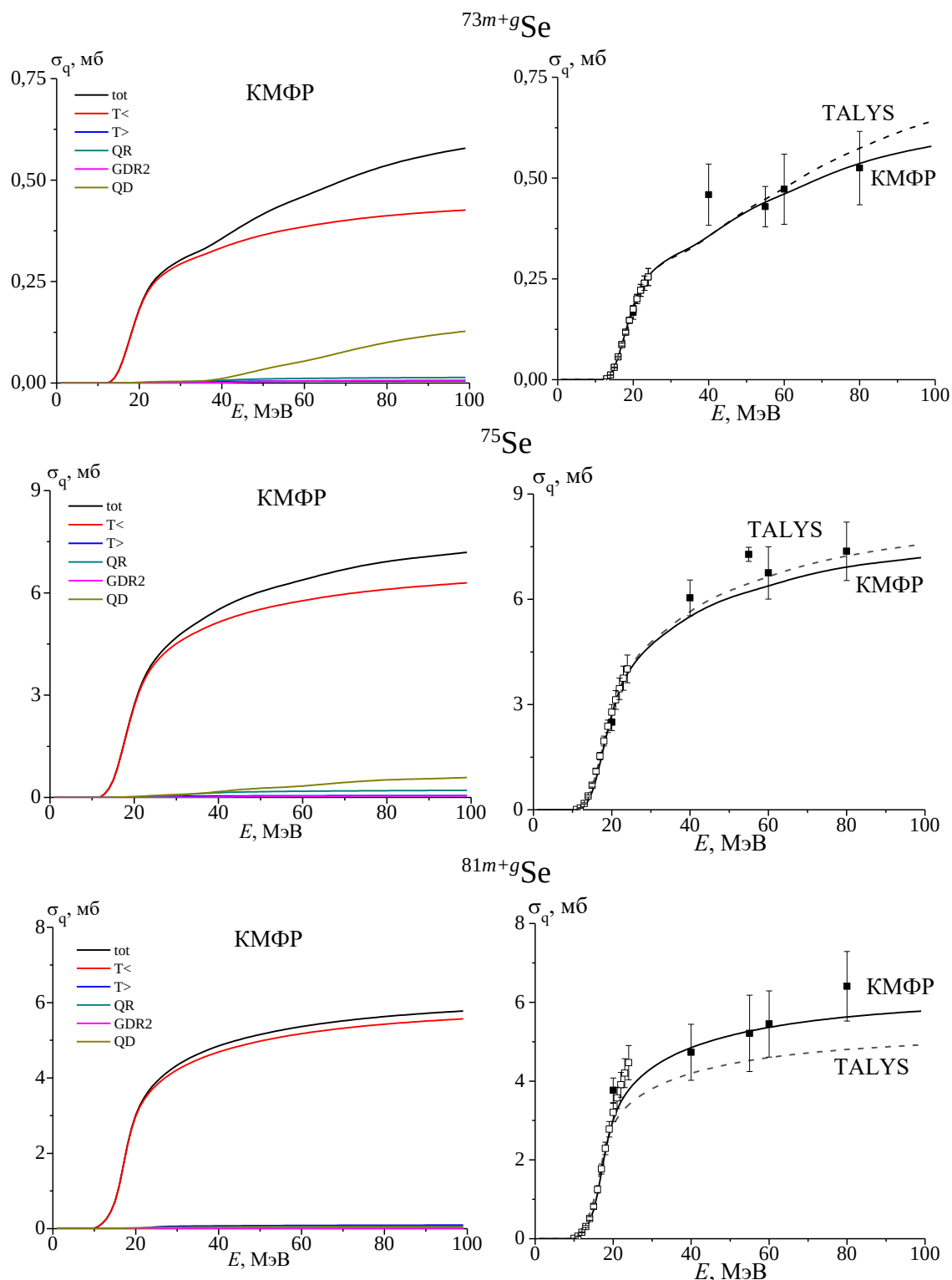


Рис. 6 . Расчетные (слева) и экспериментальные (справа) зависимости $\sigma_q(E)$ реакций $^{nat}\text{Se}(\gamma, xn)$ с образованием ядер $^{73(m+g)}\text{Se}$, ^{75}Se , $^{81(m+g)}\text{Se}$. Светлые квадраты – результаты группы Горячева, темные квадраты – наши результаты

Реакции $^{nat}\text{Se}(\gamma, pxn)$ с образованием ядер $^{71-74}\text{As}$, $^{76-79}\text{As}$. На рисунках 7, 8 и 9 приводятся расчетные и экспериментальные зависимости $\sigma_q(E)$ фотопротонных реакций $^{nat}\text{Se}(\gamma, pxn)$ с образованием изотопов $^{71,72}\text{As}$, $^{73-76}\text{As}$, $^{77-79}\text{As}$. Согласно результатам расчетов по программе КМФР в области рассматриваемых энергий возбуждения, вклады каналов распада на состояния

с изоспинами $T_<$ и $T_>$, квадрупольных резонансов (QR), обертона ГДР (GDR2) и квазидейтронного механизма (QD) в формирование σ_q^{tot} оказываются различными в зависимости от массового числа продукта реакции. Для рассматриваемых продуктов $^{71-74}\text{As}$, $^{76-79}\text{As}$ фотопротонных реакций наиболее вероятными представляются распады на состояния с изоспинами $T_>$ и $T_<$, а также квазидейтронный (QD) механизм. Вклады остальных каналов распада (QR, GDR2) сравнительно малы. Для ^{71}As вклад (QD) доминирует во всем диапазоне рассматриваемых энергий возбуждения. В случае ядер $^{72-74,78}\text{As}$ вклад (QD) в величину σ_q^{tot} проявляется при энергиях выше 60 МэВ. Для ядер $^{76,77,79}\text{As}$ σ_q^{tot} с наибольшей вероятностью σ_q^{tot} формируется за счет распадов на состояния с изоспинами $T_>$ и $T_<$.

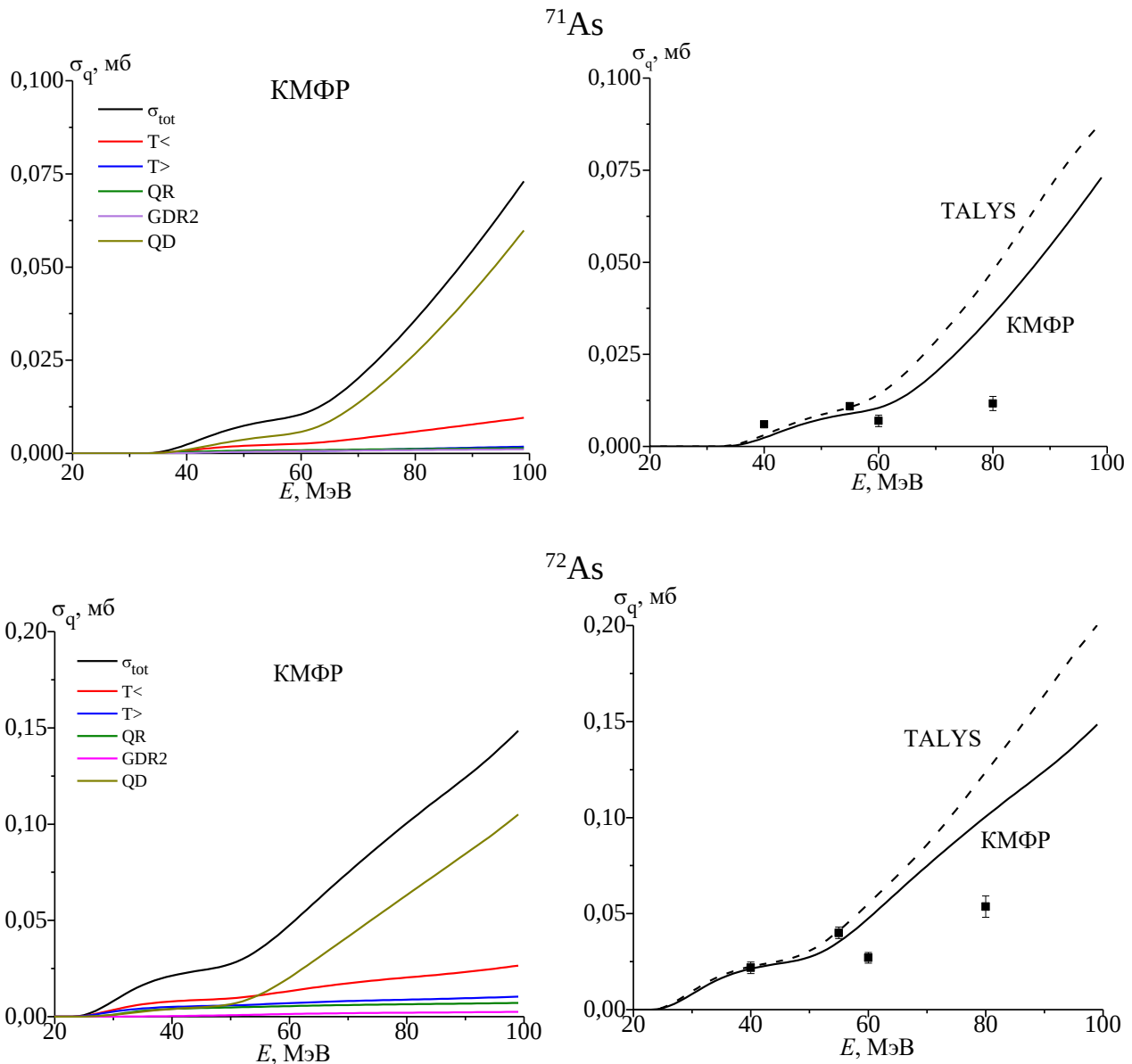


Рис. 7. Расчетные (слева) и экспериментальные (справа) зависимости $\sigma_q(E)$ реакций $^{nat}\text{Se}(\gamma, p xn)$ с образованием ядер $^{71,72}\text{As}$

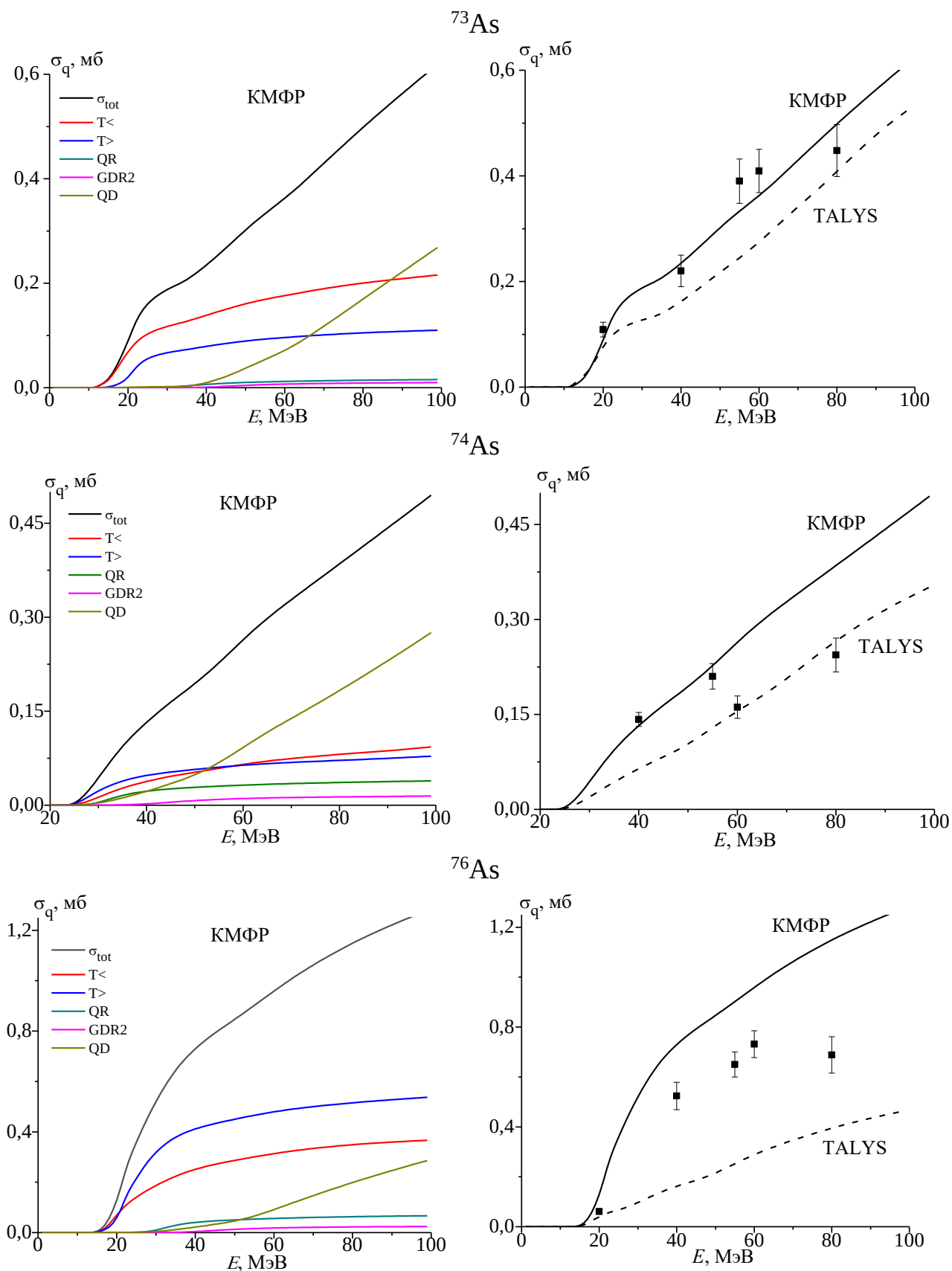


Рис. 8. Расчетные (слева) и экспериментальные (справа) зависимости $\sigma_q(E)$ реакций $^{nat}\text{Se}(\gamma, pxn)$ с образованием ядер $^{73,74,76}\text{As}$

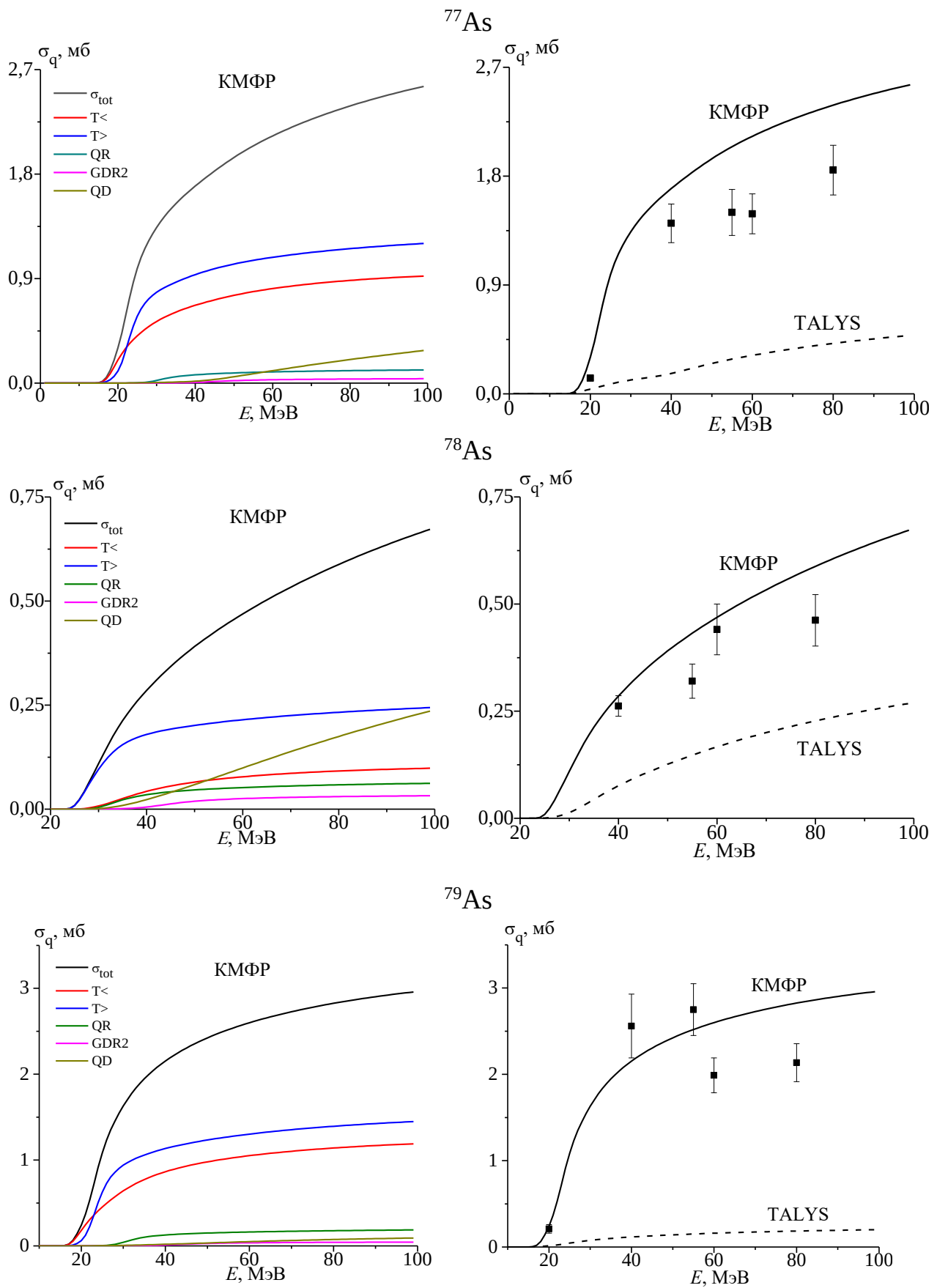


Рис. 9. Расчетные (слева) и экспериментальные (справа) зависимости $\sigma_q(E)$ реакций $^{nat}\text{Se}(\gamma, pxn)$ с образованием ядер $^{77-79}\text{As}$

В пределах погрешностей измерений величины σ_q^{tot} , расчеты по КМФР в целом удовлетворительно описывают экспериментальные зависимости $\sigma_q^{tot}(E)$ для $^{73,78,79}\text{As}$ в рассматриваемом диапазоне энергий. Для изотопов $^{71,72}\text{As}$ расчеты КМФР и TALYS переоценивают значения σ_q^{tot} при энергиях выше 60 МэВ. В случае ^{76}As , ^{77}As расчеты по КМФР переоценивают, а TALYS – наоборот, недооценивают $\sigma_q^{tot}(E)$ при энергиях выше 40 МэВ. Как следует из результатов совместного анализа результатов расчетов и измеренных значений σ_q^{tot} , однозначные выводы о применимости расчетов по КМФР и TALYS для описания $\sigma_q^{tot}(E)$ в фотопротонных реакциях преждевременны, и необходимо совершенствование расчетов. С нашей точки зрения, поиск путей уменьшения влияния квазидейтронного (QD) канала распада способствовал бы лучшему согласию расчетов КМФР с экспериментальными результатами.

Реакции (γ, p) на изотопах $^{74,77,78,80}\text{Se}$.

Сечения фотопротонных реакций (γ, p) на изотопах $^{74,77,78,80}\text{Se}$ при энергии возбуждения 20 МэВ определялись методом расчета квазимоноэнергетического спектра тормозного излучения. Результаты расчетов сечений по программам TALYS, КМФР и экспериментально полученные значения σ приведены в таблице 2.

Таблица 2

Сечения фотопротонных реакций (γ, p) на изотопах $^{74,77,78,80}\text{Se}$ при энергии возбуждения 20 МэВ

Реакция	Сечение σ , мбарн		
	Эксперимент	TALYS	КМФР
$^{74}\text{Se}(\gamma, p)^{73}\text{As}$	24,5(29)	23,17	53,3
$^{77}\text{Se}(\gamma, p)^{76}\text{As}$	2,57(13)	2,00	19,3
$^{78}\text{Se}(\gamma, p)^{77}\text{As}$	2,74(18)	0,88	15,5
$^{80}\text{Se}(\gamma, p)^{79}\text{As}$	5,02(45)	0,29	7,8

Как видно из таблицы, для реакций $^{74}\text{Se}(\gamma, p)^{73}\text{As}$, $^{77}\text{Se}(\gamma, p)^{76}\text{As}$ результаты расчетов TALYS хорошо согласуются с экспериментальными данными. Для реакций $^{78}\text{Se}(\gamma, p)^{77}\text{As}$, $^{80}\text{Se}(\gamma, p)^{79}\text{As}$ эти расчеты недооценивают величину σ . Результаты расчетов КМФР предсказывают явно завышенные сечения для рассматриваемых реакций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований по диссертации на соискание ученой степени доктора философии (PhD) на тему: «Сечения фотоядерных реакций на изотопах селена в области выше гигантского дипольного резонанса» сделаны следующие выводы:

1. Показано, что активационным методом на пучке тормозных гамма-квантов можно успешно проводить исследования фотоядерных реакций на мишенях сложного изотопного состава.
2. Впервые получены экспериментальные сечения на эквивалентный квант для реакций, образующих ядра $^{73g,73m,75,81g,81m}\text{Se}$ и $^{71-74,76-79}\text{As}$ при облучении мишени природного селена тормозным гамма-излучением с граничными энергиями 20, 40, 55, 60 и 80 МэВ.
3. Из выполненных теоретических расчетов сечений фотонейтронных (γ, xn) и фотопротонных (γ, pxn) реакций на эквивалентный квант с использованием алгоритмов программ TALYS и КМФР следует, что расчеты по TALYS совпадают с экспериментальными данными только для фотонейтронных реакций. Расчеты методом КМФР дают хорошее согласие с экспериментальными данными как для фотонейтронных, так и для фотопротонных реакций.
4. Расчеты по программе TALYS удовлетворительно описывают экспериментальные результаты по изомерным отношениям $^{81m}\text{Se}/^{81g}\text{Se}$. Насыщение в энергетической зависимости изомерного отношения $^{81m}\text{Se}/^{81g}\text{Se}$ в области выше 20 МэВ обусловлено слабым влиянием увеличения плотности уровней на вероятность образования каскадов, приводящих к возникновению метастабильных состояний. Эти факторы достаточно корректно учитываются в алгоритме программы TALYS.
5. Полученные экспериментальные значения сечения реакции (γ, p) на изотопах $^{74,77,78,80}\text{Se}$ при энергии 20 МэВ позволили оценить возможности радиохимического производства радиоизотопов мышьяка для ядерной медицины фотоядерным методом.
6. Для корректной проверки концепции изоспинового расщепления ГДР в фотопротонных реакциях с использованием алгоритмов программы КМФР следует получить экспериментальные данные в диапазоне энергий 10–25 МэВ.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 ON AWARD OF
SCIENTIFIC DEGREES AT THE INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS**

INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS

RASULOVA FAZILAT ABDUVALIEVNA

**CROSS SECTIONS OF PHOTONUCLEAR REACTIONS ON SELENIUM
ISOTOPES ABOVE THE GIANT DIPOLE RESONANCE**

01.04.08 – Atomic nucleus and elementary particle physics. Accelerator facility

**DISSERTATION ABSTRACT
of the Doctor of Philosophy (PhD) on Physical and Mathematical Sciences**

Tashkent – 2024

The theme of the dissertation of the doctor of philosophy (PhD) on physics-mathematical sciences was registered by the Supreme Attestation Commission of the Ministry of higher education, science and innovations of the Republic of Uzbekistan under No. B2023.4.PhD/FM981.

The doctoral (PhD) dissertation was carried out at the Institute of Nuclear Physics of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan.

The abstract of the dissertation was posted in three (Uzbek, Russian, English (resume)) languages on the website of the Scientific Council at www.inp.uz and on the website of “Ziyonet” information and educational portal at www.ziyonet.uz.

Scientific supervisor:

Yuldashev Bekhzod Sadikovich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Professor, Academician

Official opponents:

Artemov Sergey Viktorovich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Polvonov Satimboy Radjapovich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Leading organization:

Samarkand State University

The defense of the dissertation will be held on “____” _____ 2024 at _____ at the meeting of Scientific Council No. DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 at the Institute of Nuclear Physics (Address: INP, Ulugbek settlement, 100124 Tashkent city, tel. (+99871)289-31-41; fax: (+99871)289-36-65; e-mail: info@inp.uz).

The doctoral (PhD) dissertation can be looked through in the Information Resource Center of Institute of Nuclear Physics (registered under No. _____) Address: INP, Ulugbek settlement, 100124 Tashkent city. tel. (+99871)289-31-19.

The abstract of dissertation was distributed on “____” _____ 2024.
(Registry record No. _____ dated “____” _____ 2024).

M.Yu.Tashmetov

Chairman of the Scientific Council
on Award of Scientific Degrees,
D.Ph.-M.S., Professor

O.R.Tojiboev

Scientific Secretary of the Scientific Council
on Award of Scientific Degrees, PhD Ph.-M.S.,
Senior Researcher

E.M.Tursunov

Chairman of scientific seminar of the Scientific Council on
Award of Scientific Degrees,
D.Ph.-M.S., Professor

INTRODUCTION (annotation of PhD dissertation)

The aim of the research is to obtain experimental cross sections for an equivalent quantum of photonuclear reactions on stable selenium isotopes and to establish the basic reaction mechanisms from the dependence of cross sections on energy in the region above the giant dipole resonance.

The tasks of the research:

carrying out irradiation of samples of natural selenium using bremsstrahlung radiation beams from the microtron RM-55 of the SINP MSU (Moscow) and the linear accelerator LINAC-200 of the Laboratory of Nuclear Problems of JINR (Dubna) at energies of accelerated electrons of 20, 40, 55, 60 and 80 MeV;

calculations of bremsstrahlung spectra at accelerated electron energies of 20, 40, 55, 60 and 80 MeV, using the Geant4 software package for the target converter;

establishing the isotopic composition of the products of photonuclear reactions on isotopes of natural selenium using the gamma spectroscopic method;

determination of cross sections for photonuclear reactions per equivalent quantum for isotopes of natural selenium in the range of bremsstrahlung end-point energies of 20–80 MeV;

establishing the dependence of the cross sections of photonuclear reactions per equivalent quantum for isotopes of natural selenium on the excitation energy;

performing calculations of cross sections for photonuclear reactions per equivalent quantum using the TALYS programs and the combined model of photonuclear reactions (CMPR);

analysis of the obtained data by comparison with theoretical predictions.

The objects of the research are the stable isotopes of selenium.

The subject of the research is cross section of photonuclear reactions per equivalent quantum on isotopes of natural selenium.

The scientific novelty of the research:

for the first time, experimental values of the cross section per equivalent quantum were obtained for the reactions (γ, xn) and (γ, pxn) forming the nuclei of $^{73g, 73m, 75, 81g, 81m}\text{Se}$ and $^{71-74, 76-79}\text{As}$ upon irradiation of a target of natural selenium with bremsstrahlung radiation with end-point energies of 20, 40, 55, 60 and 80 MeV;

it has been established that in the reactions (γ, pxn) that form arsenic isotopes $^{76-79}\text{As}$, the main mechanism is the effect of isospin splitting, which is satisfactorily described within the framework of a combined model of photonuclear reactions;

for the first time, the values of the reaction cross section (γ, p) for the isotopes $^{74, 77, 78, 80}\text{Se}$ at an energy of 20 MeV were experimentally found and an exponential dependence was established in the decrease in the reaction cross section (γ, p) with increasing mass number;

it was established for the first time that the experimental dependence of the isomer ratio d for reaction $^{82}\text{Se}(\gamma, n)^{81m, g}\text{Se}$ on the excitation energy is characterized by a saturation region with $\langle d \rangle = 0.60 \pm 0.08$ at higher energies than 20 MeV.

Implementation of the research results. Based on the obtained results on the photonuclear reactions on selenium isotopes above the giant dipole resonance:

the obtained experimental values of the cross section per equivalent quantum for reactions producing nuclei of $^{73g,73m,75,81g,81m}\text{Se}$ and $^{71-74,76-79}\text{As}$ upon irradiation of a natural selenium target in a bremsstrahlung field with maximum energies of 20, 40, 55, 60 and 80 MeV, as well as theoretical approaches to their analysis, were used in the Laboratory of Nuclear Reactions of the Joint Institute for Nuclear Research within the framework of the topic 04-5-1131-2017/2023 “Radiation-physical, radiochemical and nanotechnological research on beams of accelerated heavy ions” (letter of the Joint Institute for Nuclear Research No. 500-26/80 dated December 4, 2023). The use of the results made it possible to describe and explain the mechanism of photonuclear reactions at various excitation energies;

experimental confirmation that in photoproton reactions producing arsenic isotopes $^{76-79}\text{As}$ the main mechanism is the effect of isospin splitting, made it possible to interpret the mechanism of the decay of the giant dipole resonance (letter of the Joint Institute for Nuclear Research No. 500-26/80 dated December 4, 2023). The use of the results made it possible to interpret the mechanism of decay of the giant dipole resonance;

the obtained experimental values of the reaction cross section (γ, p) on the isotopes $^{74,77,78,80}\text{Se}$ at an energy of 20 MeV made it possible to evaluate the possibilities of the radiochemical production of arsenic radioisotopes for nuclear medicine by the photonuclear method on the MT-25 microtron and the projected linear electron accelerators (letter of the Joint Institute of Nuclear research No. 500-26/80 dated December 4, 2023). The use of the results made it possible to evaluate the possibilities of radiochemical production of arsenic radioisotopes for nuclear medicine using the photonuclear method;

the obtained experimental values of the isomeric ratios of the yields of the reaction $^{82}\text{Se}(\gamma, n)^{81m, g}\text{Se}$ in the energy region above the giant dipole resonance made it possible to interpret the mechanism of population of isomeric states in a wide range of excitation energies (letter of the Joint Institute for Nuclear Research No. 500-26/80 dated December 4, 2023). The use of the results made it possible to interpret the mechanism of population of isomeric states in a wide range of excitation energies.

Structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, three chapters, a conclusion and a list of references. The volume of the dissertation is 113 pages.

E'LON QILINGAN ISHLAR RO'YXATI
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I bo'lim (I часть; part I)

1. Rasulova F.A., Aliev R.A., Belyshev S.S., Demichev M.A., Demin D.L., Evseev S.A., Fursova N.J., Gostkin M.I., Khushvaktov J.H., Kobets V.V., Kuznetsov A.A., Rozov S.V., Ruziev E.T., Tran T.N., Yakushev E.A., Yuldashev B.S. Multiparticle $^{nat}\text{Se}(\gamma, xnyp)$ reactions induced with bremsstrahlung end-point energies of 20-80 MeV // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. – Elsevier, 2023. – Vol. 1045. – p. 168428 (№1. Web of Science; IF=1.455)

2. Rasulova F.A., Aliev R.A., Belyshev S.S., Kuznetsov A.A., Khankin V.V., Fursova N.J., Shemukhin A.A. Photonuclear reactions on natural mixture of selenium // Physics of atomic nuclei. – Pleiades Publishing, 2023. – Vol. 86. – pp. 725-735 (№3. Scopus; IF=0.41)

3. Расулова Ф.А. Фотоядерный метод получения медицинского радиоизотопа ^{72}As // Доклады Академии наук Республики Узбекистан - Фан, 2023. - № 2. - С. 32-39 (01.00.00. №7).

4. Rasulova F.A. Cross sections of photonuclear reactions on ^{nat}Se at bremsstrahlung end-point energy of 20 MeV // Доклады Академии наук Республики Узбекистан. - Фан, 2023. - № 5. - С. 56-63 (01.00.00. №7).

II bo'lim (II часть; part II)

5. Rasulova F.A., Aliev R.A., Belyshev S.S., Kuznetsov A.A., Khankin V.V., Fursova N.J. Photonuclear method for the production of medical radioisotope ^{72}As // “Nucleus-2022: Fundamental problems and applications”: LXXII International conference, July 11-16, 2022. – Moscow (Russia), 2022. – p. 406.

6. Rasulova F.A., Aliev R.A., Belyshev S.S., Kuznetsov A.A., Khankin V.V., Fursova N.J. Photoproton reactions on natural mixture of selenium // IV International scientific forum “Nuclear Science and Technologies” September 26-30, 2022. Abstracts. – Almaty (Republic of Kazakhstan), 2022. – p. 39.

7. Расулова Ф.А., Алиев Р.А., Бельшев С.С., Кузнецов А.А., Ханкин В.В., Фурсова Н.Ю. Фотонейтронные реакции в природной смеси селена // «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине»: XXIII межвузовская молодежная научная школа-конференция имени Б.С. Ишханова. Сб. тез. докладов 23-24 ноября 2022. – Москва, 2022. – С. 78-79.

8. Расулова Ф.А. Изучение фотоядерных реакций в изотопах селена // “Роль талантливой молодежи в развитии физики (РИАК-15)”: Сб. трудов Респ. конф. 22-23 апреля 2022. – Ташкент, 2022. – С. 167.

Avtoreferat “O‘zMU xabarlari” ilmiy jurnali tahririyatida tahrirdan o‘tkazilib, o‘zbek va rus tillaridagi matnlar o‘zaro muvofiqlashtirildi (05.03.2024-yil).

Bosmaxona litsenziyasi:



9338

Bichimi: 84x60 $\frac{1}{16}$. «Times New Roman» garniturası.
Raqamli bosma usulda bosildi.
Shartli bosma tabog'i: 3,5. Adadi 100 dona. Buyurtma № 19/24.

Guvohnoma № 851684.
«Tipograff» MCHJ bosmaxonasida chop etilgan.
Bosmaxona manzili: 100011, Toshkent sh., Beruniy ko'chasi, 83-uy.