

**“TIQXMMI” MILLIY TADQIQOT UNIVERSITETI HUZURIDAGI
FUNDAMENTAL VA AMALIY TADQIQOTLAR INSTITUTI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
DSc.03/31.03.2022.T/FM.10.04 RAQAMLI ILMIY KENGASH ASOSIDAGI
BIR MARTALIK KENGASH**

O‘ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI

AXMEDOV SAIDMUXAMMAD ERKIN O‘G‘LI

**ASTROFIZIK KOMPAKT OBYEKT LARI ATROFIDA ZARRALAR VA
YADRO SINTEZ JARAYONLARI**

01.03.01 - Astronomiya

01.04.08 – Atom yadrosi va elementar zarrachalar fizikasi. Tezlashtiruvchi texnika

**FIZIKA MATEMATIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

Toshkent - 2025

UDK 30.12:531.51
539.172.3, 539.172.4

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

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

**Contents of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD) on physical –
mathematical sciences**

Axmedov Saidmuxammad Erkin o'g'li

Astrofizik kompakt obyektleri atrofida zarralar va yadro sintez jarayonlar... 3

Ахмедов Саидмухаммад Эркин угли

Частицы и процессы ядерного синтеза вокруг астрофизических
компактных объектов..... 19

Akhmedov Saidmukhammad Erkin o'g'li

Particles and nuclear fusion processes around astrophysical compact
objects..... 35

E'lon qilingan ishlar ro'uxati

Список опубликованных работ

List of published works..... 43

**“TIQXMMI” MILLIY TADQIQOT UNIVERSITETI HUZURIDAGI
FUNDAMENTAL VA AMALIY TADQIQOTLAR INSTITUTI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
DSc.03/31.03.2022.T/FM.10.04 RAQAMLI ILMIY KENGASH ASOSIDAGI
BIR MARTALIK KENGASH**

O‘ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI

AXMEDOV SAIDMUXAMMAD ERKIN O‘G‘LI

**ASTROFIZIK KOMPAKT OBYEKT LARI ATROFIDA ZARRALAR VA
YADRO SINTEZ JARAYONLARI**

01.03.01 - Astronomiya

01.04.08 – Atom yadrosi va elementar zarrachalar fizikasi. Tezlashtiruvchi texnika

**FIZIKA MATEMATIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

Toshkent - 2025

Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Vazirlar Mahkamasi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2023.4.PhD/FM967 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Doktorlik dissertatsiyasi Mirzo Ulug'bek nomidagi O'zbekiston Milliy universitetida bajarilgan. Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengashning veb-sahifasida (www.ifar.uz) va «Ziyonet» Axborot-ta'lim portalida (www.ziyonet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbarlar:

Polvonov Satimboy Rajapovich

Fizika-matematika fanlari doktori, professor

Rayimbayev Djavlanbek Radjapbayevich

Fizika-matematika fanlari doktori, professor

Rasmiy opponentlar:

Usmanov Pazlitdin Nuritdinovich

Fizika-matematika fanlari doktori, professor

Mirtadjiyeva Karomat Toxirovna

Fizika-matematika fanlari doktori, professor

Yetakchi tashkilot:

Sharof Rashidov nomidagi Samarqand Davlat Universiteti

Dissertatsiya himoyasi "TIQXMMI" Milliy tadqiqot universiteti huzurida Fundamental va amaliy tadqiqotlar instituti huzuridagi ilmiy darajalar beruvchi DSc.03/31.03.2022.T/FM.10.04 raqamli ilmiy kengashning 2025-yil «___» _____ soat ___ dagi majlisida bo'lib o'tadi (Manzil: 100000, Toshkent shahri, Qori Niyoziy ko'chasi 39-uy, Fundamental va amaliy tadqiqotlar instituti, 108-katta majlislar zali; Tel.: +99871 237-09-61.; e-mail: info@ifar.uz).

Dissertatsiya bilan "TIQXMMI" Milliy tadqiqot universiteti huzuridagi fundamental va amaliy tadqiqotlar instituti Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (___ raqami bilan ro'yxatga olingan). Manzil: 100000, Toshkent shahri, Qori Niyoziy ko'chasi, 39-uy, Fundamental va amaliy tadqiqotlar instituti, 108-katta majlislar zali; Tel.: +99871 237-09-61.

Dissertatsiya avtoreferati 2025-yil "___" ___ kuni tarqatildi.
(2025-yil «___» _____ dagi ___ raqamli reestr bayonnomasi.)

B.J. Ahmedov

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash raisi, fizika-matematika fanlari doktori, akademik

S.N. Murodov

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash ilmiy kotibi, fizika-matematika fanlari nomzodi (PhD)

A.A. Abdujabborov

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash qoshidagi Ilmiy seminar raisi, fizika-

matematika fanlari doktori, bosh ilmiy
xodim

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Yadro astrofizikasining dolzarb muammolaridan biri kimyoviy elementlar sintezining fizikasini tushunishdir. Tabiatda mavjud bo'lgan og'ir elementlarning aksariyati yulduzlarda beta-parchalanish bilan birgalikda sekin va tez neytronlar bilan sodir bo'ladigan s- va r-jarayonlari deb ataladigan neytronlarning radiasion qamrash jarayonlarida hosil bo'ladi. Shu bilan birga, ^{74}Se dan ^{196}Hg gacha bo'lgan 35 ta neytron yetishmaydigan, aylanib o'tilgan p-yadrolar ma'lum bo'lib, ular aytib o'tilgan s- va r-jarayonlarida hosil bo'lmaydi. Ular (γ, n) , (γ, p) yoki (γ, α) turdagi fotoyadro reaksiyalarda hosil bo'lishi mumkin. Shu munosabat bilan fotoneytron reaksiyalari haqidagi ma'lumotlar p-yadrolarning shakllanishini oldindan aytish va tavsiflashda muhim rol o'ynaydi. Shuningdek yadro reaksiyalarda izomer holatlar hosil bo'lishining nisbiy ehtimolliklarini o'rganish ham astrofizik kilonovae va supernovae deb ataluvchi yangi yulduzning tug'ilishidagi yorqinlik egri chizig'i tabiatini va undagi yadro fizikaviy jarayonlarni o'rganishda muhim ahamiyatga egadir.

Og'ir elementlarning xosil bo'lishida astrofizik kompakt ob'ektlar, jumladan, kilonovae deb ataladigan neytron yulduzlarda izomer yadrolarning s-va r-jarayonlarning ro'li juda muhim ahamiyatga egadir. 2017 yil avgust oyida ilk bor kuzatilgan ikkita neytron yulduz to'qnashuvidagi yadroviy jarayonlar natijasida bir qator neytronga boy ko'pgina yadrolarning, jumladan oltin izotoplarining paydo bo'lganligi aniqlangan. Bu natija nafaqat neytron yulduzlar to'qnashuvi balki ularning paydo bo'lishi jarayoni ham bunda og'ir elementlar paydo bo'lishi ehtimoli mavjudligini hamda bunda gravitatsiyaning ta'siri ham muhim ahamiyatga ega ekanini ifodalaydi. Shu bilan birga, qora o'ralar atrofida akkretsiya materiyasi o'ta zich va qaynoq bo'lib elektron va neytron qamralish bilan boruvchi jarayonlarning ehtimollikini oshiradi. Bu jarayonlarda temirdan og'ir beta-radioaktiv izotoplarining hosil bo'lib, bunda neytronning yutilishiga yoki uning oqimini kamayishiga qora o'ra gravitatsiyasining ro'li muhimdir.

Mustaqillik yillarida mamlakatimizda ham yadro fizikasi, yadroviy astrofizika va astronomiya fanlaridagi ilmiy izlanishlarni rivojlantirish, jahon miqyosida mavzuga oid fundamental muammolarni hal etishga alohida e'tibor qaratildi. Bu borada relyativistik kompakt ob'ektlar astrofizikasi sohasi jadal rivojlantirildi, jumladan, neytron yulduzlar atrofidagi fizik jarayonlarning modellarini ishlab chiqish, qora o'ralar atrofidagi fazo-vaqt tuzilishini va ular atrofidagi sinov zarrachalarining harakatini tahlil qilish, akkretsiya diskidagi kollektiv va yadroviy jarayonlarni o'rganishda ahamiyatli natijalarga erishildi.

Mazkur dissertatsiya ishi quyidagi davlat tartibga soluvchi hujjatlarning vazifalariga mos keladi: 2017-yil 7-fevraldagi O'zbekiston Respublikasi Prezidentining PF-4947-sonli "O'zbekiston Respublikasini yanada rivojlantirish bo'yicha Harakatlar strategiyasi to'g'risida"gi Farmoni, 2017-yil 18-fevraldagi O'zbekiston Respublikasi Prezidentining PR-2789-sonli "Fanlar akademiyasi faoliyatini yanada takomillashtirish, ilmiy-tadqiqot faoliyatini tashkil etish, boshqarish va moliyalashtirish bo'yicha chora-tadbirlar to'g'risida"gi Qarori va boshqa hujjatlar.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga muvofiqligi. Mazkur tadqiqot respublika fan va texnologiyalari rivojlantirishning II. «Energetika, energiya va resurs tejamlorligi» ustuvor yo'nalishiga muvofiq bajarilgan.

Muammoning o'rganilganlik darajasi.

Reaksiyalarda izomer holatlarning uyg'onishini va koinotdagi isomer holatlarni dunyoning yetakchi ilmiy markazlarining ko'plab olimlari o'rganmoqda, masalan yadro sohasida amerikalik (C.B.Collins, J.J.Carroll, C.Angell, H.J. Karwowski, J.H. Kelley, A.P. Tonchev, W. Tornow), koreyalik (H. Naik, G.N.Kim, K.Kim, M.Zaman, M.Sahid, S.C.Yang, M.W.Lee, Y.R.Kang, S.G.Shin, M.H.Cho, A.Gosw), rossiyalik (B.S.Ishxanov, V.V.Varlamov, I.M.Kapitonov, L.Z.Djilavyan, A.G.Belov, Yu.P.Gangrskiy, A.P.Tonchev, N.P.Balabanov, R.A.Aliyev), ukrainalik (V.M.Mazur, I.N.Vishnevskiy, V.I.Jeltonojkiy, E.V.Kulich, A.N.Savrasov), turkiyalik (Melih Bostan, Mustafa Nizamettin Erduran, Mert Sirin),) vetnamlik (Tran Duc Thiep, Truong Thi An, Nguyen Tuan Khai, Nguyen The Vinh, Phan Viet Cuong), o'zbekistonlik (T.M.Muminov, U.S.Salixbayev, S.V.Artemov, S.R. Polvonov). Astronomiya sohasida esa, masalan amerikalik (B.D. Metzger, G. Martinez-Pinedo, G. Wendell Misch, Trevor M. Sprouse, Jong-Ping Hsu, Leonardo Hsu, P. Blasi, R. I. Epstein va A. V. Olinto, Gianfranco Brunetti, Thomas W. Jones, K.E. Rehm, A.C. Fabian, K. Iwasawa, C.S. Reynolds, A. J. Young, R. Surman, G. C. McLaughlin, Jennifer Barnes, Daniel Kasen, Kit Yu Lau), germaniyalik (M. Arnould, H.-Th. Janka, Nicolas Chamel, Pawel Haensel), rossiyalik (Yu. E. Penionzhkevich, Сухова Вадима Александровича, Yu.N. Uzikov, Maxim Dvornikov), yaponiyalik (Shin-ichirou Fujimoto, Masa-aki Hashimoto, Osamu Koike), shotlandiyalik (M. Ruffert), qozog'iston (S.B. Dubovichenko), chexiyalik (Zdenek Stuchlik, Martin Kolos, Arman Tursunov, Zdenek Stuchlik), italiyalik (G. Lambiase, L. Mastrototaro, Remo Ruffini, Gregory Vereshchagin, She-Sheng Xue), xitoylik (Kun Fang, Xiao-Jun Bi, Su-Jie Lin, Qiang Yuan), o'zbekistonlik (B.Ahmedov, A.Abdujabborov, D.Rayimbayev). Hozirgi vaqtda gamma-kvantlarning yuqori energiyalarida ham izomer nisbatlari haqida ma'lumotlar olingan. Ushbu ishlarning aksariyati tormozli nurlanishlar spektrining belgilangan maksimal energiyalari uchun amalga oshirildi. Gamma-kvantlar energiyasining 20 MeV dan yuqori bo'lgan oralig'ida fotoyadro reaksiyalar izomer chiqishlar va kesimlar nisbatlarining energetik bog'lanishlarini aniqlash bo'yicha tizimli ishlar amalga oshirilmagan. Shuningdek, izomer nisbatlarning va izomer holatlar spinining yadro massa soniga bog'liqligi tadqiq qilinmagan. Ushbu ma'lumotlarning mavjudligi yadro sathining zichligi, ularning spinga bog'liqligi va ma'lum energiya oralig'ida fotoyadro reaksiyalar mexanizmiga bevosita jarayonlarning hissasi haqida ma'lumot olish imkonini beradi.

^{74,82}Se yadrolarda (γ, n) turdagi fotoyadro reaksiyasida izomer holatlarning uyg'onishini eksperimental o'rganish avvalgi e'lon qilingan ishlarada asosan 10-20 MeV energiya sohasida, ya'ni gigant dipol rezonans sohasida o'rganilganligi. Fotoyadro reaksiya izomer chiqishlar nisbatini o'lchash bo'yicha faqat bir necha ish mavjud bo'lib, ular ham tormozli nurlar maksimal energiyasining bitta qiymatida aniqlangan. $E_{\gamma} > 20$ MeV energiyadan yuqori sohada kompleks tadqiqotlar, ya'ni

fotoyadro reaksiyasi izomer chiqishlar va kesimlar nisbatining energetik bog'lanishi sinchiklab o'lchanmagan, izomerlar nisbatining izotop massa soniga va spinga bog'lanishlari va h.k ishlar ham olib borilmagan. Bunday tadqiqotlar tufayli yadro sath zichligi va ushbu energiya sohasida bevosita jarayonlarning fotoyadro reaksiya mexanizimidagi ulushlari bo'yicha ma'lumotlar olish mumkin.

Ammo, shuni ham takidlab o'tish kerakki, oldigi ilmiy ishlarda izomer chiqishlar va kesimlar nisbatlarini aniqlashlarda, izomer juftlarining parchalanish sxemalari bo'yicha yetarlicha aniq bo'lmagan, ba'zi hollarda esa xato ma'lumotlardan foydalalanilgan. Hozirgi vaqtda yuqori aniqlikda o'lchashga imkon beradigan o'ta toza germaniydan tayyorlanilgan yarim o'tkazgichli detektorlar va yetarlicha aniqlikda bo'lgan parchalanish sxemalaridan foydalanib, reaksiya izomer chiqishlar va kesimlar nisbatlarini katta aniqlikda va ishonchlik chegarasida aniqlash mumkin. Bundan tashqari, izomerlar nisbati bo'yicha oldingi olingan natijalar yangi eksperimental sharoitda, ya'ni yuqori intensivlikdagi va yuqori energiyali γ -nurlar dastasiga ega bo'lgan tezlatgichlarda, induksiyalangan γ -aktivliklarni o'lchash uchun yuqori aniqlikka ega bo'lgan gamma-spektrometrlardan va izotopik boyitirgan nishonlarda aniqlashtirish zaruriyati paydo bo'ldi.

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim yoki ilmiy-tadqiqot muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog'liqligi.

№ F2-62 "Zaryadlangan zarralar tezlatgichi bazasida yadrofizikaviy va astrofizikaviy izlanishlar" (2012-2016), № OT-F2-12 "O'zMU elektrostatik tezlatgichi ionlari dastasida spektroskopik izlanishlarni rivojlantirish" (2017-2020) mavzularidagi ilmiy loyihalar doirasida bajarilgan.

Tadqiqot ishining maqsadi laboratoriya sharoitida $^{74,82}\text{Se}$ yadrolarda fotoyadro va neytron ishtirokidagi reaksiyalar (r -va s -jarayonlar)da hosil bo'luvchi izomer holatlarni o'rganish va neytron yulduzlarida astromerlarning paydo bo'lishini tushintirish hamda qora o'ralar akkretsiya diskida temirdan og'ir yadrolar paydo bo'lishining belgilarini o'rganish.

Tadqiqotning vazifalari:

- Selen izotoplarida fotoyadro va neytron ishtirokidagi reaksiyalar natijasida izomer holatlar hosil bo'lish nisbiy ehtimolliklarini 10-35 MeV energiyalar sohasida o'rganish hamda selen izotoplaridagi (γ, n) fotoneytron reaksiyalardagi izomer holatlar chiqishlar va kesimlar nisbati aniqlash;

- Neytron generatorining 14.1 MeV energiyali neytronlar dastasida kiritilgan aktivlik metodi bilan selen izotopi yadrolardagi ($n, 2n$) reaksiyalarda izomer holatlar hosil bo'lish kesimlarini o'lchash;

- TALYS 1.6 dasturlash paketida selen izotoplaridagi (γ, n) va ($n, 2n$) turdagi reaksiyalarni modellashtirish, reaksiyalar kesimini, reaksiyada isomer holatlar uyg'onish kesimlarini, ularning nisbatlari hisoblash va olingan natijalarni tekshirish;

- Reaksiyalarda hosil bo'lgan radioaktiv yadrolarning s - jarayonidagi ishtirokini tahlil qilish;

- Olingan izomer yadrolar spektri neytron yulduzlar va (kilo)nova kuzatuv ma'lumotlarida mavjudligini tekshirish.

- Qora o'ra akkretsiya diskida hosil bo'luvchi (anti)neytrino oqimiga qora o'ra

gravitatsiyasining ta'sirini nazariy hisoblash.

Tadqiqotning obyekti qora o'ra akkretsiya diskidagi va neytron yulduzlar muhitidagi yadroviy jarayonlar hamda yadro izomerik holatlari.

Tadqiqotning predmeti $^{74,82}\text{Se}$ yadrolarda (γ, n) va $(n, 2n)$ turdagi reaksiyalar izomer chiqishlari hamda qora o'ralar akkretsiyadagi yadroviy jarayonlarda hosil bo'luvchi neytrino oqimi.

Tadqiqot usullari TALYS 1.6 dasturlash paketi va monitorlash metodi, umumnisbiylik nazariyasining matematik apparatlari.

Tadqiqot ishining ilmiy yangiligi:

- Ilk bor, 12-25 MeV sohasida 1 MeV qadam bilan ^{80}Se yadrosida (γ, n) turdagi fotoyadro reaksiyasida hosil bo'lgan izomer holatlar uyg'onish kesimlari o'lchandi;

- Ilk bor, neytronlar energiyasi $E_n=14.1$ MeV bo'lganda $^{80}\text{Se}(n, 2n)^{79\text{m.g}}\text{Se}$ reaksiya kesimlari bo'yicha yangi ma'lumotlar olingan va yadro sathi zichligining spinga bog'liqligi aniqlandi;

- Ilk bor, qora o'ralar atrofida Ni-56 radioaktiv izotopining yemrilishida hosil bo'ladigan turli energiyali neytrino oqimiga qora o'ra gravitatsiyasining ta'siri o'rganildi.

Tadqiqot ishining amaliy natijalari.

- Neytrino sirtlarining (materiya qora o'ra ichiga tortilganda neytrino) qisqarishi kuchliroq qizil siljishlar bilan birgalikda protonga boy materialni yanada ko'proq chiqarishga va chiqish sharoitlarining keng diapazoni uchun katta miqdorda ^{56}Ni sinteziga olib keladi;

- TALYS dasturiy kodlardan foydalanib, (γ, n) fotoneytron va $(n, 2n)$ tez neytronlar ta'siridagi reaksiyalarda izomer holatlar uyg'onish kesimlarining qiymatlari hisoblangan;

- Neytron generatorida tez neytronlar ishtirokidagi yadro reaksiyasida asosiy va izomer holatlar kesimlarini aniqlash bo'yicha metodika ishlab chiqildi;

- Tormozlanish nurlari maksimal energiyasining 10 MeV dan 35 MeV energiyalar diapozonida tormozli nurlar spektri hisoblandi.

Tadqiqot ishi natijalarining ishonchliligi. Tadqiqot natijalarining ishonchliligi, zamonaviy usullar va yuqori sezgirlikdagi o'lchash asboblardan foydalanish, ishlab chiqilgan uslubiyatlarni xalqaro standart namunalari ma'lumotlari bilan qiyosiy tahlil qilish, parallel tahlillar va turli tadqiqotchilar va laboratoriyalarda olingan ma'lumotlar bilan taqqoslash yo'li bilan tasdiqlangan.

Tadqiqot ishi natijalarining ilmiy amaliy ahamiyati 10-35 MeV energiyalar sohasida (γ, n) va $(n, 2n)$ reaksiyalardagi izomer holatlar uyg'onishining, ya'ni izomer va asosiy holatlar hosil bo'lish kesimi va ularning nisbatlari o'rganish bo'yicha olingan tajriba natijalari gigant dipol rezonansdan yuqori bo'lgan energiya diapazonida sodir bo'ladigan fotoyadro va neytronlar ishtirokidagi reaksiyalarining mexanizmini yoritishda, bunday reaksiyalarni tavsiflash uchun yangi nazariy modellar yaratishda va yadro holatining yuqori uyg'ongan holatlari xususiyatlari haqida ma'lumot olishda, shuningdek izomer nisbatlar bo'yicha xalqaro yadro ma'lumotlar bazasini kengaytirishda katta ahamiyatga egadir. Bunday eksperimental ma'lumotlar

hozirda aksariyat yadrolar uchun yetishmayapti. Shuningdek, olingan natijalar amaliy yadro fizikasida, ya'ni aktivasion tahlil metodida yangi metodiklar ishlab chiqishda va tibbiyot fizikasida keng qo'llanilishi mumkin.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi Mazkur dissertatsiya ishidagi tormozlanish gamma-nurlanishning turli energiyalarida hosil bo'lish kesimi va intesivligi bo'yicha olingan natijalar loyihada gamma-nurlanishlar ko'zgu akslanishining intensivligini o'lchash metodikalarini yaratishda qo'llanilgan. Shuningdek elektronlar tormozlanish nurlanishlarining dastasini shakillantirish tizimini ishlab chiqishda ham e'tiborga olingan.

Dissertatsiya ishida olingan ilmiy natijalari, O'zbekiston Milliy Universitetida OT-Φ2-16 raqamli "Gamma-nurlanishning ko'zgu akslanishining fizik tabiatini aniqlash" mavzusidagi 2017-2020 yillarda bajarilgan fundamental loyiha doirasida (O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi akademigi T.M. Mo'minov rahbari) foydalanilgan.

Tadqiqot natijalarini aprobatsiya qilish. Ushbu dissertatsiya natijalari 7 ta respublika va 4 ta xalqaro konferensiyalarda tahlil qilingan.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinishi. Dissertatsiya ishi materiallari 11 ta ilmiy maqola (shulardan, 4 tasi Scopus ma'lumotlar bazasiga kiritilgan jurnallarda, 7 tasi OAK tarkibiga kiruvchi jurnallarda) va 12 ta ma'ruza tezislarda respublika va xalqaro anjumanlarda chop etilgan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya kirish, to'rtta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro'yhatidan iborat. Dissertatsiyaning hajmi 108 betni tashkil etadi.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Kirish qismida o'tkazilgan tadqiqotlarning dolzarbligi asoslangan, tadqiqotning maqsadi va vazifalari, ob'yekti va predmetlari va usullari tavsiflangan. O'zbekiston Respublikasining fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi ko'rsatilgan, tadqiqotning ilmiy yangiligi va amaliy natijalari bayon qilingan, olingan natijalarning ilmiy va amaliy ahamiyati ochib berilgan, tadqiqot natijalarini amaliyotga joriy qilish, nashr etilgan ishlar va dissertatsiya tuzilishi bo'yicha ma'lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning "**Astrofizikadagi yadrosintez jarayonlari**" deb nomlangan birinchi bobida astrofizik kompakt obyektlar, (γ, n) va $(n, 2n)$ reaksiyalar, (γ, n) va $(n, 2n)$ reaksiyalardagi isomer holatlar va yadrosintez jarayonlari haqida to'xtalib o'tilgan. Bundan tashqari neytron yulduzlar va ularning tuzilishi, ularning turlari bo'lgan – pulsarlar va magnetarlar o'rganilgan.

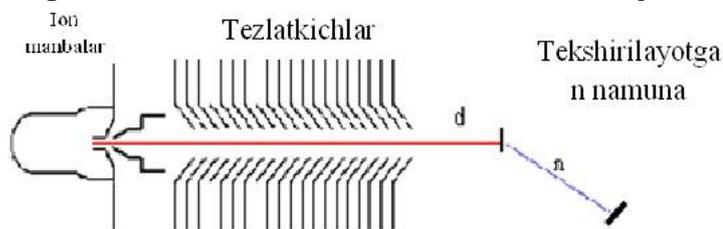
^{74,82}Se yadrolarda (γ, n) va $(n, 2n)$ turdagi reaksiyalar izomer chiqishlari va neytron yulduzlardagi yadroviy jarayonlar bo'yicha e'lon qilingan adabiyotlardagi ma'lumotlar ko'rib chiqilib taxlil qilingan.

Dissertatsiyaning "**Tadqiqot metodikasi**" deb nomlangan ikkinchi bobida 13-35 MeV energiya diapazonida (γ, n) va $(n, 2n)$ reaksiyalarning izomer chiqishlar va kesimlar nisbatini tadqiq qilish uchun qo'llaniladigan qurilmalar, uskunalar va usullar tavsiflanadi. Tadqiqotlar betatron tormozli nurlanishlar gamma-kvantlarining

dastasida va O‘z FA Yadro fizikasi instituti NG-150 neytron generatorining neytronlar dastasida induksiyalangan faollik usulida olib borildi. Induksiyalangan faollikni qayd qilish yarimo‘tkazgichli o‘ta toza HPGe –detektorlari bilan amalga oshirildi. Shuningdek ayrim o‘lchashlar ssintillyasion detektor yordamida amalga oshirilgan.

Fotoyadro reaksiyalarida yadrolarning izomer holatlari uyg‘onishining nisbiy ehtimoligini o‘rganish uchun betatroning tormozli nurlanishlaridan foydalanilgan. Fotoyadro reaksiyalar izomer chiqishlar va kesimlar nisbatlarini γ -spektrlarni qayta ishlash orqali aniqlangan. Gamma-spektrlar kafedrada tashkil etilgan γ -spektrlar elektron bazasidan olingan va qayta ishlangan.

Tez neytronlar manbalari sifatida NG-150 neytron generatori ishlatilgan bo‘lib, deyteriy va tritiy nishonlari yordamida $D+d \rightarrow {}^3\text{He}+n$ yoki $T+d \rightarrow \alpha+n$ reaksiyalaridan ~ 2.4 va 14 MeV energiyali tez neytron oqimlarini amalga oshiradi. Bunda neytron oqimlari mos ravishda $\sim 10^8$ va 10^{10} n/sek (1-rasm). Neytronlar generatsiyasi, 100-150 keV ga tezlashtirilgan deytronlar ichki dastasining tarkibida deyteriy yoki tritiy bo‘lgan nishon bilan o‘zaro ta’sirlashishi natijasida sodir bo‘ladi.



1-rasm. Neytron generatorning soddalashgan sxemasi

Fotoyadro reaksiyalar va tez neytronlar ta’siri ostida sodir bo‘ladigan reaksiyalarning chiqishlarini aniqlashda induksiyalangan aktivlik usulidan foydalanildi. Bu aktivatsiya jarayoni va o‘lchash jarayonini vaqt bo‘yicha ajratish imkonini beradi, bu esa uning ishlashi paytida tezlatgich atrofida kuchli radiatsiya mavjudligi bilan bog‘liq qiyinchiliklarni bartaraf etadi. Induksiyalangan aktivlik usuli reaksiya izomer chiqishlar va kesimlar nisbatlarini o‘lchashning asosiy usuli hisoblanadi. Bundan tashqari (γ,n) va ($n,2n$) turdagi fotoyadro reaksiyalar chiqishini o‘lchashda bu usul neytronlar chiqishini o‘lchashning to‘g‘ridan-to‘g‘ri usuliga nisbatan afzalliklarga ega. Neytronlar chiqishini bevosita o‘lchash usulida (γ,n) va ($n,2n$) reaksiyalar yig‘indi kesimi aniqlaniladi. Bu esa o‘z navbatida fotoneytron reaksiyalar chiqishini va kesimini ajratishda qiyinchiliklar tug‘diradi. Parsial kesimlarni aniqlashda induksiyalangan aktivlik usulining aniqligi yuqori bo‘ladi.

Dissertatsiyaning “**Selen izotopida (γ,n) va ($n,2n$) turdagi reaksiyalarda izomer holatlar**” deb nomlangan uchinchi bobida ${}^{80}\text{Se}$ yadrosidagi (γ,n) va ($n,2n$) reaksiyalarda ${}^{79m,g}\text{Se}$ izomerlarining 13-35 MeV energetika diapazonida uyg‘onishlari va ${}^{74,78,80}\text{Se}$ izotoplarida (γ,n) va ($n,2n$) reaksiyalardagi izomer holatlarning uyg‘onish kesimlari o‘rganilgan.

Izomer munosabatlarni o‘rganish ya’ni, yadro reaksiyalarida yakuniy yadroning izomer va asosiy holatlarining qo‘zg‘alishining (populyasining) nisbiy ehtimolligi yadro sathi zichligining spinga bog‘liqligi parametrini aniqlashga va reaksiyalar mexanizmini yaxshiroq tushunishga imkon beradi.

^{80}Se yadrosidagi $(n,2n)$ reaksiyada $^{79m,g}\text{Se}$ izomerlarining uygʻonishlarini oʻrganishni boʻyicha tajribalar Oʻzbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasi Yadro fizikasi institutidagi NG-150 neytron generatorida oʻtkazildi. Nishon sifatida diametri 15 mm boʻlgan tabletkalar shaklida 2-3 g ogʻirlikdagi selen namunalari ishlatilgan. Namunalar 14.1 MeV energiyali neytronlar dastasi bilan 30-60 min davomida nurlantirilgan.

Nishonlarning induksiyalangan γ -aktivligi oʻta toza germaniy HPGe yarim oʻtkazgichli detektoridan (nisbiy samaradorligi 15%, ^{60}Co radionuklidining 1332 keV energiyali gamma-chiziqi uchun energetik ajratish qobilyati – 1.8 keV), DSA 1000 raqamli analizator va gamma spektrlarini yigʻish va qayta ishlash uchun Genie 2000 dasturiy paketiga ega kompyuterdan iborat boʻlgan Canberra firmasining gamma-spektrometrdan oʻlchangan.

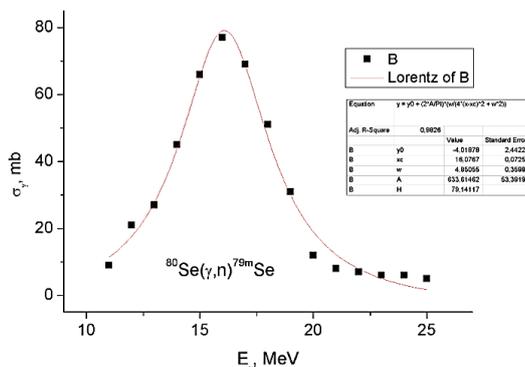
$^{80}\text{Se}(\gamma,n)^{79m,g}\text{Se}$ reaksiya kesimining eksperiment qiymatlarining tormozli nurlanishlar maksimal energiyasiga bogʻlanishi Lorens funksiyasi bilan approksimatsiya qilindi. Uning parametrlari (kesim maksimumining holati E_m , kesimning maksimumdagi qiymati σ_m va maksimum balandigining yarim kengligi Γ) eksperimental nuqtalar boʻyicha kichik kvadratlar metodi bilan aniqlanildi. Approksimatsiya parametri va reaksiya integral kesimining qiymatlari 1- jadvalda keltirilgan. Xatolik qayd qilingan impulslar statistik xatoligi va effektivlik xatoliklari boʻyicha aniqlangan. Tajriba natijalarini baholash va solishtirish uchun TALYS-1.6 dasturlar majmuasi yordamida reaksiya kesimlari hisoblab chiqildi. 2 va 3- rasmlarda TALYS-1.6 dasturlar majmuasi yordamida hisoblangan $^{80}\text{Se}(\gamma,n)^{79m}\text{Se}$ va $^{80}\text{Se}(n,2n)^{79g}\text{Se}$ reaksiyalar uygʻonish funksiyalari keltirilgan.

1-jadval

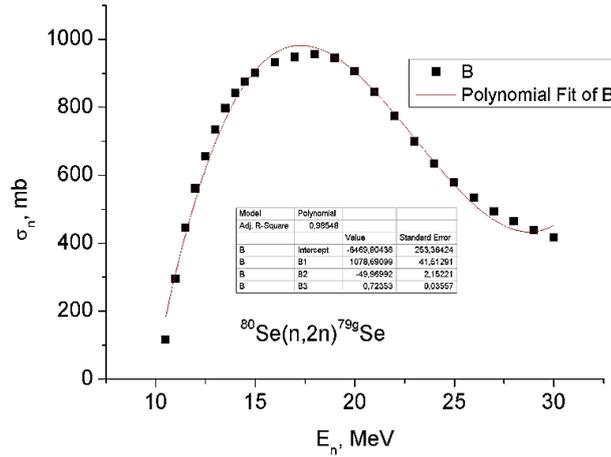
$^{82}\text{Se}(\gamma,n)^{81}\text{Se}$ reaksiya kesimi

Reaksiya	E_m , MeV	Γ , MeV	σ_m , mb	σ_{int} , MeV mb	E_h , MeV
$^{80}\text{Se}(\gamma,n)^{79g}\text{Se}^*$	16.30±0.06	4.94±0.29	72	594±40	25
$^{80}\text{Se}(\gamma,n)^{79m}\text{Se}^*$	15.10±0.10	3.78±0.19	66	648±53	25
$^{80}\text{Se}(\gamma,n)^{79m}\text{Se}$	16.07±0.07	4.85±0.36	79±2.2	634±53	25

Izoh: *Kesimlar TALYS-1.6 dasturi boʻyicha hisoblangan, σ_{int} – reaksiya integral kesimi, E_h – integrallashning yuqori chegarasi.



2-rasm. TALYS-1.6 dasturiy majmuasi yordamida olingan $^{80}\text{Se}(\gamma,n)^{79m}\text{Se}$ reaksiya kesimlar.



3-rasm. TALYS-1.6 dasturiy majmuasi yordamida olingan $^{80}\text{Se}(n,2n)^{79g}\text{Se}$ reaksiya kesimlar.

Tajribada olingan reaksiya izomer chiqishlar nisbati qiymatini fermi-gaz statistik nazariyasi doirasida hisoblangan natijalar bilan solishtirildi.

Yadro sath zichligini spin hadi quyidagi ko‘rinishida bo‘lgan Beta-Blox formulasi yordamida hisoblangan:

$$\rho(J) = (2J + 1) \exp\left[-(J + 1/2)^2 / 2\sigma^2\right] \quad (1)$$

bu yerda σ -spin bo‘yicha cheklash yoki spin kesish parametri, buni quyidagi shaklida yozish mumkin.

$$\sigma^2 = 0,0889\sqrt{aU} \cdot A^{2/3} \quad , \quad (2)$$

bu yerda A - massa soni, a – sath zichligi parametri, U – uyg‘onish energiyasi bo‘lib, bu effektiv (samarali) energiya sifatida tushuniladi. Fermi gaz nazariyasidagi spin bo‘yicha chegaralanish parametri yadroning inersiya momenti bilan chiziqli bog‘liqdir.

Nazariy hisoblash natijalari bilan tajriba natijalari o‘rtasidagi miqdoriy mosligi spin cheklash parametrini ma’lum bir qiymatga fiksatsiyalash (aniq bir qiymat) orqali erishildi. Bunda qoniqarli moslik $\sigma=2$ qiymatda erishildi.

(n, 2n) reaksiya uchun izomer va asosiy holatlarni hosil bo‘lish kesimlari va ularning izomer nisbatlari σ_m/σ_g aniqlandi. Asosiy va izomer holatlar hosil bo‘lish kesimlarining absolyut qiymatlarini aniqlash uchun solishtirish usulidan foydalanilgan bo‘lib, bunda tekshirilayotgan reaksiya kesimi va monitor reaksiya kesimlar nisbati aniqlaniladi.

Monitor reaksiyasi sifatida $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$ ($T_{1/2}=15$ soat, $E_\gamma=1368$ keV) ishlatilgan; uning $E_n = 14.19$ MeV energiyadagi kesimi $\sigma_m = 120.3 \pm 1.2$ mbn. Kesimlarni aniqlashda o‘lchangan γ -chiziqning fotocho‘qqidagi sanoqlarning statistik xatolik, monitor reaksiyasining kesimini aniqlashdagi xatoligi va γ - nurlanishni qayd etish samaradorligini aniqlash xatoliklar hisobga olindi.

2-jadvalda ^{80}Se yadrosidagi (n,2n) reaksiya uchun olingan natijalar keltirilgan.

$^{80}\text{Se}(n,2n)^{79\text{m}}\text{Se}$ reaksiya kesimi

E_n , MeV	σ_m , mb	σ_g , mb	σ_{tot} , mb	σ_m/σ_g yoki σ_m/σ_{tot}
14.1	195±16	-	-	0.185±0.01*
14.0**	173	-	1013	0.170*
14.5**	177	-	1052	0.168*

Izoh. * σ_m/σ_{tot} . **Reaksiya kesimlari TALYS-1.6 dasturlar paketi yordamida hisoblangan

2-jadvalda keltirilgan o'lchov natijalari shuni ko'rsatadiki, $(n,2n)$ turdagi reaksiyada izomerlar uyg'onishning nisbiy ehtimolligi reaksiyaga (γ,n) nisbatan bir necha marta yuqori. Bu, ehtimol, yadroga kiritilgan moment bilan bog'liq bo'lib, $(n,2n)$ reaksiyasi fotoyadroviy reaksiyalarga qaraganda kattaroqdir. 2-jadvalda keltirilgan ma'lumotlarga ko'ra, σ_m/σ_{tot} qiymatini aniqlash mumkin bo'lib, u 0.185±0.03 ga teng.

Izomer va asosiy holatlar joylashishi γ -chiziqlar yordamida identifikatsiya qilingan. O'lchash natijalarini qayta ishlash uchun zarur bo'lgan (γ,n) va $(n,2n)$ reaksiyalar mahsulot yadrolarining spektroskopik xususiyatlari 3 jadvalda keltirilgan bo'lib, bu yerda I^π – sathning spini va juftligi, $T_{1/2}$ – yadroning yarim yemirilish davri, I_γ - berilgan energiyaning γ -kvantalarining bir yemirilishdagi intensivligi, p - gamma o'tishning tarmoqlanish koeffitsiyenti.

 (γ, n) va $(n, 2n)$ reaksiyalar mahsulotining yadro fizikaviy xarakteristikalari

Yadro nishoni	Yadr-mahsuli	I^π	$T_{1/2}$	E_γ , keV	I_γ , %	P
^{74}Se	$^{73\text{m}}\text{Se}$	$1/2^-$	41 min	254.3	8.7	0.73
	$^{73\text{g}}\text{Se}$	$7/2^+$	7.2 soat	361.1	99	-
^{78}Se	$^{77\text{g}}\text{Se}$	$1/2^-$	Barqaror			
	$^{77\text{m}}\text{Se}$	$7/2^+$	17.3 c	161.6	52	1
^{80}Se	$^{79\text{g}}\text{Se}$	$7/2^+$	Barqaror			
	$^{79\text{m}}\text{Se}$	$1/2^-$	3.9 min	95.7	10	1
^{82}Se	$^{81\text{m}}\text{Se}$	$7/2^+$	57.3 min	103.0	8	0.995
	$^{81\text{g}}\text{Se}$	$1/2^-$	18.6 min	290.1	0.44	-

(γ,n) va $(n,2n)$ reaksiyalarda izomer holatlarni uyg'onish kesimlarining olingan tajriba natijalari 4 va 5-jadvallarda keltirilgan.

 $^{74,78,80,82}\text{Se}$ yadrolaridagi $(n,2n)$ reaksiya kesimi

Reaksiya	E_n , MeV	σ_m , mb	σ_g , mb	σ_{tot} , mb	σ_m/σ_g yoki σ_m/σ_{tot}
$^{74}\text{Se}(n,2n)^{73\text{m,g}}\text{Se}$	14.1	158±24	187±17		
	14.0**	155	166	321	1.07
	14.5**	198	201	399	1.01
$^{78}\text{Se}(n,2n)^{77\text{m}}\text{Se}$	14.1	710±43	-	-	0.75*
	14.0**	664	-	943	0.70*

	14.5**	718	-	1012	0.71*
$^{80}\text{Se}(n,2n)^{79m}\text{Se}$	14.1	195±16	-	-	0.185*
	14.0**	173	-	1013	0.170*
	14.5**	177	-	1052	0.168*
$^{82}\text{Se}(n,2n)^{81m,g}\text{Se}$	14.1	952±48	392±23		2.42±0.18
	14.0**	916	307	1222	2.98
	14.5**	942	306	1248	3.07

Izoh. * σ_m/σ_{tot} **Reaksiya kesimlari TALYS-1.6 dasturlar paketi yordamida hisoblangan

Fotoneutron reaksiyalarining integral kesimlarini aniqlash uchun maksimal energiya 30 MeV bo'lgan tormozli nurlanish spektrlari ham hisoblab chiqilgan. Tormozli fotonlarining spektri GEANT4 dasturi yordamida hisoblangan [Agostinelli S., Allison J., Amako K. va boshqalar. // Nukl. Instrum. Met. 2003, v. A 506, 250-bet]. Nazariy hisob-kitoblarning natijalari 5-jadvalda keltirilgan.

5-jadval

$^{74,78,80,82}\text{Se}$ yadrolaridagi (γ,n) reaksiya kesimlari

Reaksiya	σ_{mint} MeV mb	σ_{gint} MeV mb	E_{Lim} , MeV
$^{74}\text{Se}(\gamma,n)^{73g}\text{Se}$		111*	30
$^{74}\text{Se}(\gamma,n)^{73m}\text{Se}$	945*		30
$^{78}\text{Se}(\gamma,n)^{77g}\text{Se}$		854*	30
$^{78}\text{Se}(\gamma,n)^{77m}\text{Se}$	468*		30
$^{80}\text{Se}(\gamma,n)^{79g}\text{Se}$		594*	30
$^{80}\text{Se}(\gamma,n)^{79m}\text{Se}$	648*		30
$^{82}\text{Se}(\gamma,n)^{81g}\text{Se}$		573*	30
$^{82}\text{Se}(\gamma,n)^{81m}\text{Se}$	281*		30

Izoh. *Reaksiya kesimlari TALYS-1.6 dasturlar paketi yordamida hisoblangan

Bu jadvallarda keltirilgan ma'lumotlarni tahlil qilishdan ko'rinib turibdiki, (γ,n) tipidagi fotoyadroviy reaksiyada izomer holatlarning uyg'onishini eksperimental tadqiqotlar 10-25 MeV asosiy energiya diapazonida, ya'ni gigant dipol rezonansi hududida. Gigant rezonans ustidagi energiya mintaqasida izomer nisbatlarning energiyaga bog'liqligi juda kam o'rganilgan. Ushbu tadqiqotlar tufayli yadro sathining zichligi va ma'lum bir energiya hududida fotoyadroviy reaksiyalar mexanizmiga bevosita jarayonlarning hissasi haqida ma'lumot olish mumkin.

Dissertatsiyaning to'rtinchi bobini "**Qora o'ralar akreksiya diskida yadro sintez jarayonlar**" dep nomlanib unda akreksiya diskida r- va s-jarayonlar orqali ^{56}Fe isotopidan og'ir isotoplar xosil bo'lishidagi neytrino oqimiga qora o'ra gravitatsiyasining ta'siri o'rganilgan. Turli xil ingredientlar orasida neytrinolar hal qiluvchi rol o'ynaydi. Kuchsiz o'zaro ta'sirlar orqali ular o'rtacha protonga boy yoki neytronga boy bo'lganlarni chiqarishlari mumkin. Bu moddaning termodinamik evolyutsiyasi bilan birgalikda qanday elementlar sintezlanishini aniqlaydi.

O'ta yangi yulduzlar va qora o'ralarning to'planish diskleri (r-jarayonining nukleosintezining tavsiya etilgan ikkita joyi) kabi yulduz manbalaridan chiqariladigan neytrinolar oqimiga turli xil fizika turlari ta'sir qilishi mumkin, masalan, tebranishlar va kogerent tarqalish. Oldingi ishlarda, biz tortishish kuchining neytrinolarning emissiyasiga va qora o'ra akreksiya disklaridan chiqadigan oqimlarda og'ir elementlarning ishlab chiqarilishiga ta'sirini o'rganib chiqdik. Bizning tadqiqotlarimiz kuchli tortishish maydonlarining neytrino emissiyasiga ta'siri neytrinolar massiv markaziy ob'ekt yaqinida ko'p ishlab chiqariladigan har qanday boshqa muhitda muhim ahamiyatga ega. Relyativistik effektlar fazo-vaqt egriligiga bog'liq bo'lgani uchun manbaning 3D geometriyasini hisobga olish alohida ahamiyatga ega. Quyida biz umumiy nisbiylik nazariyasining neytrino oqimlariga ta'siri va qora o'ralarni akreksiya disklarida og'ir elementlarning sintezi haqida batafsilroq gaplashamiz.

Kuchli kompakt ob'ekt tomonidan yaratilgan tortishish maydoni atrofdagi fazo vaqtning geometriyasini o'zgartiradi. Bu markaziy ob'ektdan ma'lum masofada kuzatilgan neytrinolar oqimiga ta'sir qiladi. Gravitatsiya maydonining oqimlarga asosiy ta'siri - bu energiyalarning siljishi va kuzatuvchi $d\Omega_{ob}$ ko'rgan manba bo'lgan qattiq burchakning deformatsiyasi.

Ikkinchisini neytrino traektoriyalarining egilishi orqali aniqlash mumkin va ma'lum bir egrilikda ularning nol geodeziyasini topishni talab qiladi. Chiqarilgan energiya E_{em} va kuzatilgan energiya E_{ob} bilan bog'langan $E_{em} = (1 + z)E_{ob}$ bu yerda $(1 + z)$ qizil siljish.

Kompakt ob'ektdan r_{ob} uzoqlikda kuzatilgan effektiv neytrino oqimi

$$\Phi^{eff} = \frac{1}{4\pi} \int d\Omega_{ob} \times \Phi_{ob}(E_{ob}). \quad (3)$$

Yassi geometriyadagi oqimlardan (bu yerda biz ularni Nyuton oqimlari deb ataymiz) egri chiziqdagi oqimlarga (Umumiy relativistik oqimlar) o'tkazishning boshlang'ich nuqtasidagi fazasi son zichligini saqlashdir. Bu kuzatilgan umumiy relativistik oqimlarni quyidagicha yozishga olib keladi

$$\Phi^{eff} = \frac{1}{4\pi} \int d\Omega_{ob} \times \frac{E_{ob}^2}{\exp(E_{ob}(1+z)/T_{em})+1}. \quad (4)$$

Bu yerda T_{em} emissiya nuqtasidagi harorat bo'yicha neytrino Fermi-Dirak taqsimotini yozdik (odatda raqamli simulyatsiyalardan ma'lum miqdor). Qizilga siljish $1 + z$ va qattiq burchak $d\Omega_{ob}$ fazo-vaqt geometriyasiga bog'liq. Shuning uchun kompakt ob'ektning materiya taqsimoti tafsilotlariga bog'liq.

Reaksiya tezligi

Astrofizik maydonda (ayniqsa neytrino-boshqaruvchi muhitda) sintez qilingan yadro mahsuloti turini aniqlashning asosiy omili protonning neytron fraktsiyasi yoki elektron fraktsiyasi Y_e hisoblanadi. Agar $Y_e > 0.5$ bo'lsa, muhit protonga boy, agar $Y_e < 0.5$ bo'lsa, u neytronga boy bo'ladi. Bunday muhitda kompakt ob'ektni o'rab turgan materiyaning dastlabki termodinamik sharoitlari shunday bo'ladiki, u elektronlar, protonlar va neytronlarga ajraladi. Keyin moddaning tarkibini belgilovchi asosiy reaksiyalar quyidagilardir:



Tenglamalarning teskari reaksiyalarini hisobga olgan holda olingan \bar{Y}_e elektron

ulushi. 5 va 6 bu jarayonlarning yutilish tezligiga bog‘liq. Reaksiya tezligini belgilovchi neytrino oqimlariga kuchli tortishish maydoni ta’sir qilganidek, \tilde{Y}_e ham ta’sir qiladi. Kuzatilgan oqimlar nuqtai nazaridan ϕ^{eff} neytronlarning neytronlarda yutilish tezligi

$$\lambda_{\nu_e n} = b \int_0^{inf} \phi_{\nu_e}^{eff} (E_{ob} + \Delta)^2 \sqrt{1 - \frac{m_e^2}{(E_{ob} + \Delta)^2}} W_M dE_{ob}, \quad (7)$$

va protonlarda antineytrinolar

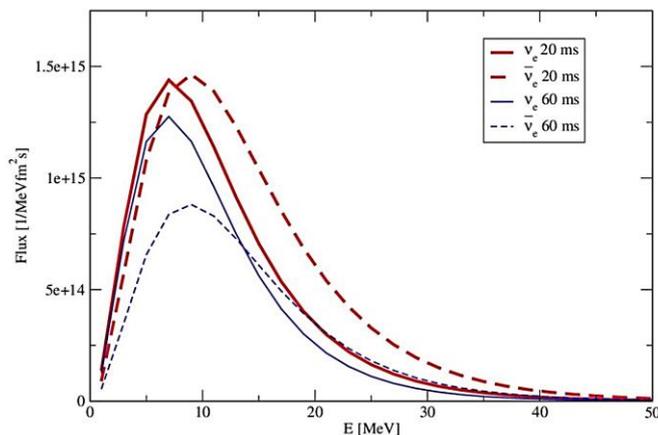
$$\lambda_{\bar{\nu}_e n} = b \int_{\Delta+m_e}^{inf} \phi_{\bar{\nu}_e}^{eff} (E_{ob} - \Delta)^2 \sqrt{1 - \frac{m_e^2}{(E_{ob} - \Delta)^2}} W_{\bar{M}} dE_{ob}, \quad (8)$$

bu yerda $W_M = 1 + 1.1E_{ob}/m_n$ va $W_{\bar{M}} = 1 - 7.1E_{ob}/m_n$ zaif magnitlanish tuzatishlari, m_n , m_e mos ravishda neytron va elektron massalari, Δ - neytron proton massalari farqi va $b = 9.704 \cdot 10^{-50} \text{ sm}^2 \text{ keV}^{-2}$.

Neytrino oqimlari

Biz ushbu astrofizik muhit uchun neytrino oqimlarini tenglama 3 dagi kabi hisoblaymiz. Kuzatuvchilar - bu chiqish traektoriyasining nuqtalari, bu yerda tenglamalarning reaksiyalari. 5 va 6 larda o‘rin oladi. Emitentlar neytrino sirtlaridagi nuqtalardir.

Neytrino sirtlarining vaqtga bog‘liqligi muhim rol o‘ynaydi. 5-rasmda neytrino oqimlarining ikki xil vaqtda $t = 20$ ms (qizil chiziqlar) va $t = 60$ ms (ko‘k chiziqlar) $x_{ob} = z_{ob} = 100$ km da joylashgan qora o‘radan kuzatuvchi tomonidan ko‘rsatilgan. $t = 20$ ms elektron antineytrino oqimlari yuqorida muhokama qilinganidek elektron neytrino oqimlaridan kattaroqdir (qattiq va kesilgan qizil chiziqlarni solishtiring). Biroq, biz $t = 60$ ms da qarama-qarshi harakatni ko‘ramiz (4-rasmdagi ko‘k chiziqlarga qarang): elektron neytrino oqimlari kattaroqdir.

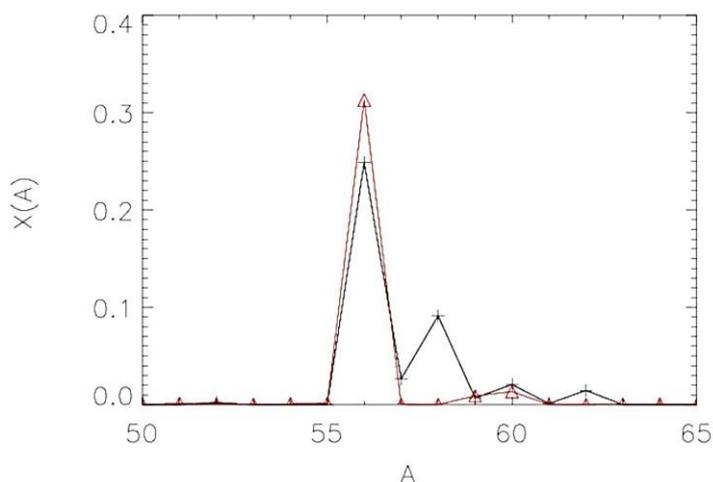


4-rasm. $X=z=100$ km da qayd etilgan elektron neytrino (qattiq) va antineytrino (chiziq) oqimlarini solishtirish. Qizil chiziqlar $t=20$ msdagi oqimlarga va ko‘k chiziqlar $t=60$ ms ga to‘g‘ri keladi.

Buning sababi shundaki, vaqt o‘tishi bilan qora o‘ra ichiga ko‘proq material tortiladi va ikkala sirt qisqarganiga qaramay, elektron antineytrinosi ancha kamayadi. Natijada $t = 60$ ms da neytrinolarning neytronlarda tutilishi (6) ustunlik qiladi va material protonga boy bo‘ladi. Umumiy nisbiylikni hisobga olganda, antineytrino oqimlarining qisqarishi kuchliroq bo‘ladi, chunki antineytrinolar neytrinolarga qaraganda ko‘proq qizil rangga ega. Bu muhitni yanada ko‘proq protonga boy qiladi.

^{56}Ni hosil bo'lishi

Hozirgacha biz tortishish kuchining elektron fraktsiyaga ikki xil vaqtda, $t = 20$ va $t = 60$ ms ta'sirini ko'rsatdik. Barcha vaqtlar uchun elektron fraktsiyani batafsil hisoblash uchun yuqorida tavsiflangan bosqichlarni ushbu intervaldagi kichik vaqt bosqichlari uchun takrorlash kerak bo'ladi. Bu har doim va chiqish traektoriyasining har bir nuqtasi uchun neytrino sirlari va null geodeziklarni topishni o'z ichiga oladi. Ushbu jarayonni hisoblash uchun qimmatga tushadi. Buning o'rniga biz oddiy model haqida o'ylashimiz mumkin. Elektron fraktsiyasi yuqorida aytib o'tilgan $t = 20$ va $t = 60$ ms ikkita suratlarda olingan cheklovchi qiymatlar o'rtasida bo'lishini kutish tabiiydir.



5-rasm. (qizil) va (qora) umumiy relyativistik tuzatishlarsiz hisob-kitobga mos keladigan $s/k = 30$ va $\tau = 20$ ms bo'lgan chiqish traektoriyasi uchun yakuniy massa ulushlari.

5-rasmda biz $X(A)$ massa soniga nisbatan A massa sonining yakuniy ulushini ko'rsatamiz, har bir barion uchun entropiya $s/k = 30$ va dinamik vaqt shkalasi $\tau = 20$ ms bo'lgan chiqish traektoriyasi uchun. Qizil chiziqlar GR massa ulushlarini ko'rsatadi, qora chiziqlar esa Nyuton hisobiga to'g'ri keladi. GR massa ulushlarida ^{56}Ni hosil bo'lishining kuchayishi bu holat uchun kattaroq elektron fraktsiyasining natijasidir.

XULOSA

“Astrofizik kompakt obyektlar atrofida zarralar va yadro sintez jarayonlar” mavzusidagi doktorlik dissertatsiyasi bo'yicha olib borilgan tadqiqotlar natijasi yuzasidan quyidagi xulosalar taqdim etiladi:

1. Energiyaning 12-25 MeV diapazonida 1 MeV qadam bilan ^{80}Se yadrosida (γ, n) turdagi fotoyadro reaksiyasida hosil bo'lgan izomer holatlar uyg'onish kesimlari va uning bitta rezonans cho'qqisidan iborat bo'lishi aniqlanildi;
2. Neytronlar energiyasining $E_n = 14.1$ MeV qiymatida $^{80}\text{Se}(n, 2n)^{79m.g}\text{Se}$ reaksiya kesimlari bo'yicha yangi ma'lumotlar olingan va yadro sathi zichligining spinga bog'liqligi aniqlangan;
3. TALYS 1.6 dasturiy majmuasidan foydalanib, o'rganilayotgan yadrodagi (γ, n) va $(n, 2n)$ reaksiyalar kesimlari va izomer nisbatlarining nazariy qiymatlari hisoblandi, hisoblash natijalarini eksperimental ma'lumotlar bilan taqqoslash natijasida yadro sathi zichligining spinga bog'liqligini tavsiflovchi parametr va izomer holatlarning joylashish (joylashish ehtimolliklari) mexanizmi haqida ma'lumot olindi;

4. Schwarzschild qora o'radi akkretsiya diskida (Ni-56 \rightarrow Fe-56) hosil bo'lgan neytrino oqimiga kuchli gravitatsiya (GR-Umumiy nisbiylik nazariyasi)ning ta'siri o'rganildi. Bunda gravitatsiya neytrino (anti) oqimini quyi energiyalarda ortishini va yuqori energiyalarda kamayishini ko'rsatildi. Bu shuni anglatadi-ki neytrino va antineytrino (Fe-56 va Co-56 yadrolarida) qamralish jarayoni yuqori energiyalarda ortadi va ko'proq Ni-56 radioaktiv izotopi hosil bo'ladi. Quyi energiyalarda esa aksincha qamralish jarayonini gravitatsiya sekinlashtiradi;

5. $^{79m.g}\text{Se}$ nurlanish sathi 231.96 keV bo'lib neytron yulduz to'qnashuvi va magnetarlardan keladigan aksariyat gamma nur chaqnashlari 200-300 keV energiya oralig'ida uchraydi. Bu, shuni anglatadi-ki, $^{79m.g}\text{Se}$ isomer holatlarining paydo bo'lishi neutron yulduzlarida GRB manbai bo'lishi mumkin.

**РАЗОВЫЙ НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.03/31.03.2022.T/FM.10.04 ПО
ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ИНСТИТУТЕ
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА "ТИИИМСХ"**

НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ УЗБЕКИСТАНА

АХМЕДОВ САИДМУХАММАД ЭРКИН УГЛИ

**ЧАСТИЦЫ И ПРОЦЕССЫ ЯДЕРНОГО СИНТЕЗА ВОКРУГ
АСТРОФИЗИЧЕСКИХ КОМПАКТНЫХ ОБЪЕКТОВ**

**01.03.01 – Астрономия
01.04.08 – Физика атомного ядра и элементарных частиц.
Ускорительная техника**

**АВТОРЕФЕРАТ
ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD)
ПО ФИЗИКО –МАТЕМАТИЧЕСКИМ НАУКАМ**

Ташкент – 2025

Тема докторской диссертации (PhD) зарегистрирована под номером B2023.4.PhD/FM967 в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан.

Диссертация выполнена в Национальном университете Узбекистана имени Мирзо Улугбека. Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (www.inp.uz) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziynet.uz).

Научный консультанты:

Полвонов Сатимбой Ражапович

доктор физико-математических наук, профессор

Райимбаев Джавлонбек Раджапбаевич

доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Усманов Пазлитдин Нуритдинович

доктор физико-математических наук, профессор

Миргаджиева Каромат Тохировна

доктор физико-математических наук, профессор

Ведущая организация:

**Самаркандский государственный университет
имени Шарофа Рашидова**

Защита диссертации состоится «__» __ 2025 года в __ часов на заседании Научного совета DSc.03/31.03.2022.T/FM.10.04 при Институте фундаментальных и прикладных исследований Национального исследовательского университета "ТИИМСХ". (Адрес: 100000, г. Ташкент, улица Кори Ниязова 39, Тел.: +998 71 237-09-61; e-mail: info@ifar.uz)

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института фундаментальных и прикладных исследований Национального исследовательского университета "ТИИМСХ" (зарегистрирована за № __). (Адрес: 100000, г. Ташкент, улица Кори Ниязова 39, Тел.: +998 71 237-09-61).

Автореферат диссертации разослан «__» __ 2025 года.

(протокол рассылки № __ от «__» __ 2025 года).

Б. Ж. Ахмедов

Председатель Научного совета по присуждению ученых степеней, академик Академии наук РУз, д.ф.-м.н., академик

С.Н. Муродов

Ученый секретарь Научного совета по присуждению ученых степеней, к.ф.-м.н. (PhD)

А.А. Абдужабборов

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 работы.

Одной из важнейших проблем ядерной астрофизики сегодня является понимание природы синтеза химических элементов. Большинство тяжелых элементов, встречающихся в природе, образуются в звездах в результате процессов захвата нейтронного излучения, называемых s- и r-процессами, которые являются соответственно медленными и быстрыми по сравнению с конкурирующими процессами бета-распада. В то же время известно 35 нейтронодефицитных, обойденных r-ядер, от ^{74}Se до ^{196}Hg , которые не образуются в вышеупомянутых s- и r-процессах. Они могут образовываться в фотоядерных реакциях типа (γ, n) , (γ, p) или (γ, α) . В связи с этим информация о фотонейтронных реакциях играет важную роль в прогнозировании и описании образования r-ядер. Также, изучение относительных вероятностей образования изомерных состояний в ядерных реакциях имеет важное значение для понимания природы кривой блеска при рождении новой звезды, в так называемых астрофизических килоновых и сверхновых, и происходящих в них ядерно-физических процессов.

В образовании тяжелых элементов в астрофизических компактных объектах, в частности, в нейтронных звездах, называемых килоновыми, чрезвычайно важную роль играют s- и r-процессы с участием изомерных ядер. В результате впервые наблюдавшегося в августе 2017 года столкновения двух нейтронных звезд и протекавших при этом ядерных процессов было установлено образование ряда нейтронно-избыточных ядер, включая изотопы золота. Этот результат указывает на то, что не только столкновения нейтронных звезд, но и сам процесс их образования предполагает вероятность образования тяжелых элементов, и что при этом также важно влияние гравитации. Вместе с тем, аккреционное вещество вокруг черных дыр является чрезвычайно плотным и горячим, что повышает вероятность процессов, идущих с захватом электронов и нейтронов. В этих процессах образуются бета-радиоактивные изотопы тяжелее железа, и здесь важна роль гравитации черной дыры в поглощении нейтрино или уменьшении его потока.

В годы независимости в нашей стране также уделялось особое внимание развитию научных исследований в области ядерной физики, ядерной астрофизики и астрономии, а также решению фундаментальных проблем мирового уровня в этих областях. В этом направлении активно развивалась область астрофизики релятивистских компактных объектов; в частности, были достигнуты значительные результаты в разработке моделей физических процессов вокруг нейтронных звезд, анализе структуры пространства-времени вокруг черных дыр и движения пробных частиц в их окрестностях, а также в изучении коллективных и ядерных процессов в аккреционных дисках.

Задачи данной диссертации утверждены государственными нормативными документами, постановлением Президента Республики Узбекистан от 7 февраля 2017 года PQ-4947 «О стратегии мер по дальнейшему развитию

Республики Узбекистан» и датированным 1 февраля 2017 года. От 18 января 2017 г. № ПЗ-2789 соответствует требованиям решения «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской работы».

Соответствие исследований приоритетным направлениям развития науки и технологий республики.

Данное исследование выполнено в соответствии со II. приоритетным направлением развития науки и технологий республики «Энергетика, энергоресурсосбережение».

Обзор международных научных исследований по теме диссертации.

Пробуждение изомерных состояний в реакциях и изомерных состояний во Вселенной изучают многие учёные ведущих мировых научных центров, например, в ядерной области, американские (Ч.Б.Коллинз, Дж.Дж.Кэрролл, К.Энджелл, Х.Дж.Карвовский, Дж.Х.Келли, А.П.Тончев, В.Торнов), корейцы (Х.Найк, Г.Н.Ким, К.Ким, М.Заман, М.Сахид, Ян, М.В. Ли, Ю.Р. Кан, С.Г. Шин, М.Х. Чо, А. Госв, русские (Б.С. Ишханов, В.В. Варламов, И.М. Капитонов, Л.З. Джилавян, А.Г. Белов, Ю.П. Гангрский, А.П. Тончев, Н.П. Балабанов, Р.А. Алиев), украинский (В.М.Мазур, И.Н.Вишневский, В.И.Желтонойский, Е.В.Кулич, А.Н.Саврасов), турецкие (Мелих Бостан, Мустафа Низаметтин Эрдуран, Мерт Сирич), вьетнамские (Чан Дык Тъеп, Чыонг Тхи Ан, Нгуен Туан Хай, Нгуен Тхе Винь, Фан) Вьет Куонг), из Узбекистана (Муминов Т.М., Салихбаев У.С., С.В.Артемов, С.Р. Полвонов). В области астрономии, например, американцы (Б. Д. Мецгер, Г. Мартинес-Пинедо, Г. Венделл Миш, Тревор М. Спроус, Чон-Пин Сюй, Леонардо Сюй, П. Блази, Р. И. Эпштейн и А. В. Олинто, Джанфранко Брунетти, Томас В. Джонс, К.Э. Рем, К. Ивасава, А.Дж. Янг, Р.К. Маклафлин, Дженнифер Барнс, Дэниел Касен, Кит Ю Лау), немецкие (М. Арну, Х.-Т. Янка, Никола Шамель, Павел Гензель), русские (Ю. Э. Пенионжкевич, Сухова Вадима Александровича, Ю. Н. Узиков), Максим Дворников), японцы (Син-итиро Фудзимото, Масааки Хасимото, Осаму Койке), шотландцы (М.Руфферт), казахстанцы (С.Б. Дубовиченко), чешских (Зденек Стухлик, Мартин Колос, Арман Турсунов, Зденек Стухлик), итальянских (Г. Ламбиасе, Л. Мастроттаро, Ремо Руффини, Григорий Верещагин, Ше-Шэн Сюэ), китайцев (Кунь Фан, Сяо-Цзюнь Би, Су-Цзе Линь, Цян Юань), из Узбекистана (Б. Ахмедов, А. Абдуджабборув, Дж. Раимбаев). В настоящее время информация о соотношениях изомеров получена даже при высоких энергиях гамма-квантов. Большинство этих работ выполнено для заданных максимальных энергий спектра тормозного излучения. В области энергий гамма-квантов выше 20 МэВ систематических работ по определению энергетических связей изомерных выходов и отношений сечений фотоядерных реакций не проводилось. Также не изучена зависимость отношений изомеров и спина изомерных состояний от массового числа ядра. Наличие этих данных позволяет получить информацию о плотности ядерной поверхности, ее зависимости от спина и вкладе прямых процессов в механизм фотоядерных реакций в определенном диапазоне энергий.

Экспериментальное исследование пробуждения изомерных состояний в фотоядерной реакции (γ, n) -типа в ядрах $^{74,82}\text{Se}$ изучалось в основном в области энергий 10-20 МэВ, то есть в области гигантского дипольного резонанса. Имеется лишь несколько работ по измерению отношения изомерных выходов фотоядерных реакций, которые также были определены при одном значении максимальной энергии тормозного излучения. Комплексных исследований в области энергий выше $E_\gamma > 20$ МэВ, т.е. энергетической связи соотношения выходов изомеров и секций фотоядерной реакции, связи соотношения изомеров с массовым числом и спином изотопа и т.д., не проводилось. Было проведено. Благодаря таким исследованиям можно получить информацию о поверхностной плотности ядер и доле прямых процессов в этом энергетическом поле в механизме фотоядерных реакций.

Однако следует также отметить, что в предыдущих научных работах при определении соотношения выходов изомеров и сечений использовались недостаточно точные, а в ряде случаев ошибочные данные о схемах распада пар изомеров. В настоящее время с использованием полупроводниковых детекторов из сверхчистого германия, позволяющих проводить измерения с высокой точностью, и схем разложения с достаточной точностью, можно с большой точностью и доверительными пределами определять соотношение выходов изомеров реакций и сечений. Кроме того, предыдущие результаты по соотношениям изомеров были получены в новых экспериментальных условиях, т.е. в ускорителях с пучками γ -квантов высокой интенсивности и энергии, с помощью гамма-спектрометров высокого разрешения для измерения наведенной γ -активности. необходимость уточнения в отношении изотопно-обогащенных мишеней.

Связь темы диссертации с научно-исследовательскими работами высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация.

Выполнено в рамках научных проектов № Ф2-62 «Ядерные и астрофизические исследования на базе ускорителя заряженных частиц» (2012-2016 гг.), № ОТ-Ф2-12 «Развитие спектроскопических исследований ионов пучок электростатического ускорителя УзМУ» (2017-2020 гг.).

Целью исследования. Изучить изомерные состояния, образующиеся в ядрах $^{74,82}\text{Se}$ в лабораторных условиях в фотоядерных и нейтронных реакциях (g - и s -процессы), объяснить образование астромеров в нейтронных звездах, а также изучить признаки образования ядер тяжелее железа в аккреционном диске черных дыр.

Задачи исследования:

- Изучить относительные вероятности образования изомерных состояний в изотопах селена в результате фотоядерных и нейтронных реакций в диапазоне энергий 10-35 МэВ и определить соотношение выходов и сечений изомерных состояний в фотонейтронных реакциях (γ, n) в изотопах селена;

- Измерение сечений образования изомерных состояний в реакциях $(n, 2n)$ на ядрах изотопов селена с использованием метода активности, введенного в нейтронный пучок нейтронного генератора с энергией 14.1 МэВ;

- Моделирование реакций типа (γ, n) и $(n, 2n)$ в изотопах селена в программном пакете TALYS 1.6, расчет сечений реакции, сечений возбуждения изомерных состояний в реакции, их соотношений и проверка полученных результатов;

- Анализ участия радиоактивных ядер, образующихся в реакциях в s-процессе;

- Проверить, существуют ли полученные спектры изомерных ядер в данных наблюдений нейтронных звезд и (кило)новых.

- Теоретический расчет влияния гравитации черной дыры на поток (анти)нейтрино, образующийся в её аккреционном диске.

Объектом исследования ядерные процессы и ядерные изомерные состояния в аккреционном диске черной дыры и в окружении нейтронных звезд.

Предметом исследования реакции типа (γ, n) и $(n, 2n)$ в ядрах $^{74,82}\text{Se}$ представляют собой выходы изомеров и ядерные процессы в аккреции черной дыры.

Методы исследования является пакет программ TALYS 1.6 и его метод мониторинга, а также математический аппарат общей теории относительности.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

- Впервые измерены сечения возбуждения изомерных состояний, образующихся в фотоядерной реакции типа (γ, n) в ядре ^{80}Se , в области 12–25 МэВ с шагом 1 МэВ;

- Впервые получены новые данные о сечениях реакции $^{80}\text{Se}(n, 2n)^{79\text{m.g}}\text{Se}$ при энергии нейтронов $E_n=14.1$ МэВ и определена зависимость плотности ядерных уровней от спина;

- Впервые изучено влияние гравитации черной дыры на поток нейтрино, образующийся при распаде радиоактивного изотопа Ni-56 вокруг черных дыр.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

- Уменьшение поверхности нейтрино (нейтрино, когда вещество втягивается в черную дыру) в сочетании с более сильными красными смещениями приводит к большему выбросу богатого протонами материала и более крупному синтезу ^{56}Ni для широкого диапазона условий выброса;

- Приведена информация о программном комплексе TALYS, который используется для анализа и моделирования ядерных реакций, рассмотрены его возможности и области применения;

- Разработана методика определения участков основного и изомерного состояний в ядерной реакции с участием быстрых нейтронов в генераторе нейтронов;

- Спектр тормозных лучей рассчитан в диапазоне энергий от 10 МэВ до 35 МэВ максимальной энергии тормозных лучей.

Достоверность полученных результатов. Достоверность результатов исследований подтверждена применением современных методов и высокочувствительных измерительных приборов, сравнительным анализом

разработанных методик с данными международных стандартных образцов, параллельными анализами, сравнением с данными, полученными разными исследователями и лабораториями.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Полученные экспериментальные результаты по возбуждению изомерных состояний в реакциях (γ, n) и $(n, 2n)$ в области энергий 10-35 МэВ, то есть сечения образования изомеров и основных состояний и их соотношения, имеют большое значение для выяснения механизма реакций с участием фотоядер и нейтронов, протекающих в области энергий выше гигантского дипольного резонанса, создания новых теоретических моделей для описания таких реакций, получения информации о свойствах высоковозбужденных состояний ядер, а также расширения международной ядерной базы данных по изомерным соотношениям. Для большинства ядер такие экспериментальные данные в настоящее время отсутствуют. Полученные результаты могут быть также широко использованы в прикладной ядерной физике, а именно при разработке новых методов в методе активационного анализа, а также в медицинской физике.

Внедрение результатов исследований.

Полученные в диссертационной работе результаты по сечению и интенсивности формирования тормозного гамма-излучения при различных энергиях были использованы в проекте для создания методов измерения интенсивности отражения гамма-излучения. Также электроны были учтены при разработке системы формирования пучка тормозного излучения.

Научные результаты, полученные в диссертационной работе, выполнены в рамках фундаментального проекта Национального университета Узбекистана № ОТ-Ф2-16 «Определение физической природы зеркального отражения гамма-излучения» в 2017-2020 годах (академик был использован руководитель Академии наук Республики Узбекистан Т.М. Моминов).

Апробация работы. Результаты диссертации анализировались на 7 республиканских и 2 международных конференциях.

Публикация результатов исследований. Материалы диссертационной работы опубликованы в 9 научных статьях (из них 2 в журналах, входящих в базу данных Scopus, 7 в журналах, входящих в ОАК) и 12 тезисах лекций на республиканских и международных конференциях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы. Объем диссертации составляет 108 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность проведенного исследования, описываются цели и задачи, объект и предметы, методы исследования. Показана актуальность исследования по отношению к приоритетным направлениям развития науки и техники Республики Узбекистан, описаны

научная новизна и практические результаты исследования, раскрыта научно-практическая значимость полученных результатов, приведены сведения о внедрении результатов исследования в практику, опубликованных работах и структуре диссертации.

В первой главе диссертации под названием «**Процессы ядерного синтеза в астрофизике**» рассматриваются астрофизические компактные объекты, реакции (γ, n) и $(n, 2n)$, изомерные состояния в реакциях (γ, n) и $(n, 2n)$, а также процессы ядерного синтеза.

Кроме того, были изучены нейтронные звезды и их структура, а также их типы — пульсары и магнетары.

Проведен обзор и анализ опубликованной литературы по образованию изомеров в реакциях типа (γ, n) и $(n, 2n)$ в ядрах $^{74,82}\text{Se}$ и ядерных процессах в нейтронных звездах.

Во второй главе диссертации под названием «**Методология исследования**» описываются приборы, оборудование и методы, используемые для изучения выходов изомеров и отношений сечений реакций (γ, n) и $(n, 2n)$ в диапазоне энергий 13–35 МэВ. Исследования проводились с использованием метода наведенной активности в пучке гамма-квантов тормозного излучения бетатрона и пучке нейтронов нейтронного генератора НГ-150 Института ядерной физики Академии наук Узбекистана. Индуцированная активность регистрировалась с помощью полупроводниковых сверхчистых детекторов HPGe. Некоторые измерения также проводились с использованием сцинтилляционного детектора.

Бетатронное тормозное излучение использовалось для изучения относительной вероятности возбуждения изомерных состояний ядер в фотоядерных реакциях. Фотоядерные реакции определялись путем обработки выходов изомеров и отношений сечений γ -спектров. Гамма-спектры были получены и обработаны из электронной базы данных γ -спектров, организованной на кафедре.

Генератор нейтронов НГ-150 использовался в качестве источника быстрых нейтронов и использует дейтериевые и тритиевые мишени для создания потоков быстрых нейтронов с энергиями ~ 2.4 и 14 МэВ из реакций $\mathbf{D+d} \rightarrow \mathbf{^3He+n}$ или $\mathbf{T+d} \rightarrow \mathbf{\alpha+n}$. При этом потоки нейтронов составляют $\sim 10^8$ и 10^{10} н/сек соответственно (рис. 1). Генерация нейтронов происходит в результате взаимодействия внутреннего пучка дейтронов, ускоренных до 100–150 кэВ, с мишенью, содержащей дейтерий или тритий.

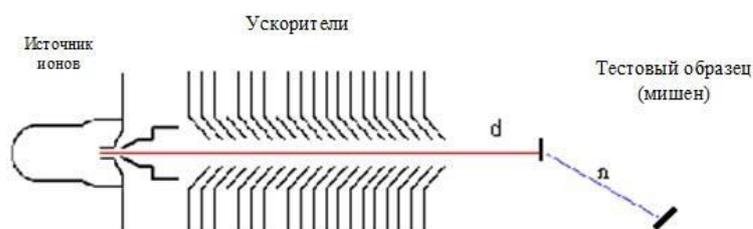


Рис. 1. Упрощенная схема нейтронного генератора.

Метод наведенной активности был использован для определения выхода фотоядерных реакций и реакций, протекающих под действием быстрых нейтронов. Это позволяет разделить процесс активации и процесс измерения по времени, что устраняет трудности, связанные с наличием сильного излучения вокруг ускорителя во время его работы. Метод индуцированной активности является основным методом измерения выходов изомеров в реакциях и соотношений сечений. Кроме того, при измерении выхода фотоядерных реакций типов (γ, n) и $(n, 2n)$ этот метод имеет преимущества перед прямым методом измерения нейтронного выхода. В методе прямого измерения нейтронного выхода определяют полное сечение реакций (γ, n) и $(n, 2n)$. Это, в свою очередь, создает трудности в различении выхода и сечения фотонейтронных реакций. При определении частичных сечений точность метода наведенной активности высокая.

В третьей главе диссертации под названием «**Изотопные состояния в реакциях типа (γ, n) и $(n, 2n)$ в изотопе селена**» исследованы возбуждения изомеров $^{79m,g}\text{Se}$ в диапазоне энергий 13-35 МэВ в реакциях (γ, n) и $(n, 2n)$ в ядре ^{80}Se и сечения возбуждения изомерных состояний в реакциях (γ, n) и $(n, 2n)$ в изотопах $^{74,78,80}\text{Se}$.

Изучение изомерных соотношений, то есть относительной вероятности возбуждения (заселения) изомерных и основных состояний конечного ядра в ядерных реакциях, позволяет определить характер спиновой зависимости плотности уровней ядра и лучше понять механизм реакций.

Эксперименты по изучению возбуждений изомеров $^{79m,g}\text{Se}$ в реакции $(n, 2n)$ в ядре ^{80}Se проводились на нейтронном генераторе НГ-150 в Институте ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан. В качестве мишеней использовали образцы селена массой 2–3 г в виде таблеток диаметром 15 мм. Образцы облучались нейтронным пучком с энергией 14.1 МэВ в течение 30–60 мин.

Наведенную γ -активность мишеней измеряли на гамма-спектрометре фирмы Canberra, состоящем из сверхчистого германиевого HPGe-детектора (с относительной эффективностью - 15 %, энергетическим разрешением для линии ^{60}Co 1332 кэВ – 1.8 кэВ), цифрового анализатора DSA 1000 и персонального компьютера с программным пакетом Genie 2000 для сбора и обработки гамма-спектров.

Экспериментальная зависимость сечений реакции $^{80}\text{Se}(\gamma, n)^{79m,g}\text{Se}$ от граничной энергии тормозных квантов аппроксимировалась функцией Лоренца, параметры которой (положение максимума сечения E_m , значение сечения в максимуме σ_m и ширина распределения на половине его высоты Γ) определялись методом наименьших квадратов по набору экспериментальных значений. Экспериментальное значение сечений сравнивалось с теоретическими расчетами, выполненными с использованием кода TALYS 1.5. На рис 2 и 3 приведены функции возбуждений реакций $^{80}\text{Se}(\gamma, n)^{79m}\text{Se}$, и $^{80}\text{Se}(n, 2n)^{79g}\text{Se}$ полученные с помощью программного пакета TALYS-1.6.

Таблица 1

Сечение реакции $^{82}\text{Se}(\gamma, n)^{81}\text{Se}$

Реакция	E_m , МэВ	Γ , МэВ	σ_m , мб	σ_{int} , МэВ мб	E_h , МэВ
$^{80}\text{Se}(\gamma, n)^{79g}\text{Se}^*$	16.30 ± 0.06	4.94 ± 0.29	72	594 ± 40	25
$^{80}\text{Se}(\gamma, n)^{79m}\text{Se}^*$	15.10 ± 0.10	3.78 ± 0.19	66	648 ± 53	25
$^{80}\text{Se}(\gamma, n)^{79m}\text{Se}$	16.07 ± 0.07	4.85 ± 0.36	79 ± 2.2	634 ± 53	25

Примечание. *Расчет сечений проводилось по программе TALYS-1.6. ** σ_{int} – интегральное сечение реакции, E_h - верхний предел интегрирования.

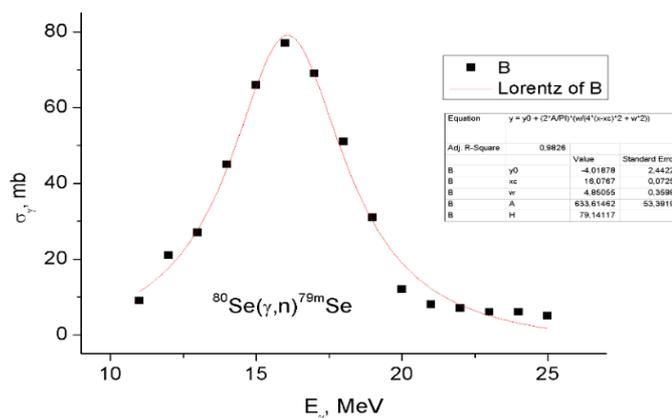


Рис. 2. Сечения реакции $^{80}\text{Se}(\gamma, n)^{79m}\text{Se}$, полученные с использованием программного пакета TALYS-1.6.

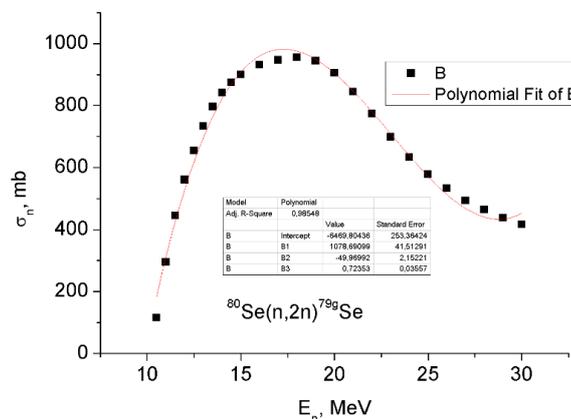


Рис. 3. Сечения реакции $^{80}\text{Se}(n, 2n)^{79g}\text{Se}$, полученные с использованием программного пакета TALYS-1.6.

Полученные экспериментальные изомерные отношения выходов сравниваются с результатами расчетов, выполненными нами в рамках статистической теории ферми-газа.

Плотность ядерных уровней рассчитывалась по формуле Бете-Блоха, спиновая часть которой имеет вид

$$\rho(J) = (2J + 1) \exp\left[-(J + 1/2)^2 / 2\sigma^2\right] \quad (1)$$

где σ - параметр ограничения по спину или спинового обрезания, который можно записать в виде

$$\sigma^2 = 0,0889\sqrt{aU} \cdot A^{2/3} \quad , \quad (2)$$

где A – массовое число, a – параметр плотности уровней, U – энергия возбуждения, под которой понимается эффективная энергия. Параметр ограничения по спину в теории ферми-газа связан линейно с твердотельным моментом инерции ядра.

Улучшить количественное согласие расчетов с экспериментом удалось при фиксации параметра спинового ограничения σ . При этом удовлетворительное согласие достигается при $\sigma=2$.

В случае реакции $(n,2n)$ определены сечения образования изомерного и основного состояния и их изомерных отношений σ_m/σ_g . Для получения абсолютных значений сечений основного и изомерного состояний использовали методы сравнения выходов исследуемой и мониторинной реакции.

В качестве мониторинной реакции использовали $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ ($T_{1/2}=15$ ч, $E_\gamma=1368$ кэВ), значение сечения которого равно $\sigma_m = 120.3 \pm 1.2$ мбн при $E_n = 14.19$ МэВ. При определении сечений учитывались статистическая погрешность счетов в фотопике измеряемой γ -линии, ошибка определения сечения мониторинной реакции и эффективность регистрации γ -излучения.

В таблице 2 представлены результаты, полученные для реакции $(n,2n)$ в ядре ^{80}Se .

Таблица 2

Сечение реакции $^{80}\text{Se}(n,2n)^{79m}\text{Se}$

E_n , МэВ	σ_m , Мб	σ_g , Мб	σ_{tot} , Мб	σ_m/σ_g ИЛИ σ_m/σ_{tot}
14.1	195 ± 16	-	-	$0.185 \pm 0.01^*$
14.0**	173	-	1013	0.170^*
14.5**	177	-	1052	0.168^*

Примечание. * σ_m/σ_{tot} . ** Расчет сечений проводилось по программе TALYS-1.0.

Результаты измерений, представленные в таблице 2, показывают, что относительная вероятность возбуждения изомеров в реакции типа $(n,2n)$ в несколько раз выше, чем в реакции (γ,n) . Вероятно, это связано с импульсом, вносимым в ядро, который в реакции $(n,2n)$ больше, чем в фотоядерных реакциях. По данным, представленным в таблице 2, можно определить значение σ_m/σ_{tot} , которое равно 0.185 ± 0.03 .

Заселение изомерного и основного уровней идентифицировали по γ -линиям. Спектроскопические характеристики ядер-продуктов реакций (γ,n) и $(n,2n)$, необходимые для обработки результатов измерений приведены в табл. 3, где I^π – спин и четность уровня, $T_{1/2}$ – период полураспада ядра, I_γ – интенсивность γ – квантов данной энергии на распад, p – коэффициент ветвления γ – перехода.

Таблица 3

Спектроскопические характеристики ядер-продуктов реакции (γ, n) и ($n, 2n$)

Ядерная мишень	Ядерный продукт	I^π	$T_{1/2}$	E_γ , кэВ	I_γ , %	P
^{74}Se	$^{73\text{m}}\text{Se}$	$1/2^-$	41 минута	254.3	8.7	0.73
	$^{73\text{g}}\text{Se}$	$7/2^+$	7.2 час	361.1	99	-
^{78}Se	$^{77\text{g}}\text{Se}$	$1/2^-$	Стабильный			
	$^{77\text{m}}\text{Se}$	$7/2^+$	17.3 с	161.6	52	1
^{80}Se	$^{79\text{g}}\text{Se}$	$7/2^+$	Стабильный			
	$^{79\text{m}}\text{Se}$	$1/2^-$	3.9 минута	95.7	10	1
^{82}Se	$^{81\text{m}}\text{Se}$	$7/2^+$	57.3 минута	103.0	8	0.995
	$^{81\text{g}}\text{Se}$	$1/2^-$	18.6 минута	290.1	0.44	-

Экспериментальные результаты сечений возбуждения изомерных состояний в реакциях (γ, n) и ($n, 2n$) представлены в таблицах 4 и 5.

Таблица 4

Сечение реакции ($n, 2n$) на ядрах $^{74,78,80,82}\text{Se}$

Реакция	E_n , МэВ	σ_m , мб	σ_g , мб	σ_{tot} , мб	σ_m/σ_g ИЛИ σ_m/σ_{tot}
$^{74}\text{Se}(n, 2n)^{73\text{m,g}}\text{Se}$	14.1	158±24	187±17		
	14.0**	155	166	321	1.07
	14.5**	198	201	399	1.01
$^{78}\text{Se}(n, 2n)^{77\text{m}}\text{Se}$	14.1	710±43	-	-	0.75*
	14.0**	664	-	943	0.70*
	14.5**	718	-	1012	0.71*
$^{80}\text{Se}(n, 2n)^{79\text{m}}\text{Se}$	14.1	195±16	-	-	0.185*
	14.0**	173	-	1013	0.170*
	14.5**	177	-	1052	0.168*
	14.1	952±48	392±23		2.42±0.18
	14.0**	916	307	1222	2.98
	14.5**	942	306	1248	3.07

Примечание. * σ_m/σ_{tot} . ** Расчет сечений проводился по программе TALYS-1.6.

Для определения интегральных сечений фотонейтронных реакций были также рассчитаны спектры тормозного излучения с максимальной энергией 30 МэВ. Спектр тормозных фотонов рассчитывался с помощью программы GEANT4 [Agostinelli S., Allison J., Amako K. et al. // Ядро. Инструмент. Мет. 2003, т. А 506, стр. 250]. Результаты теоретических расчетов представлены в таблице 5.

Таблица 5

Сечение реакции (γ, n) на ядрах $^{74,78,80,82}\text{Se}$

Реакция	σ_{mint} , МэВ мб	σ_{gint} , МэВ мб	σ_{totint} , МэВ мб	E_{Lim} , МэВ
$^{74}\text{Se}(\gamma, n)^{73\text{g}}\text{Se}$		111*		30

$^{74}\text{Se}(\gamma, n)^{73\text{m}}\text{Se}$	945*		30
$^{78}\text{Se}(\gamma, n)^{77\text{g}}\text{Se}$		854*	30
$^{78}\text{Se}(\gamma, n)^{77\text{m}}\text{Se}$	468*		30
$^{80}\text{Se}(\gamma, n)^{79\text{g}}\text{Se}$		594*	30
$^{80}\text{Se}(\gamma, n)^{79\text{m}}\text{Se}$	648*		30
$^{82}\text{Se}(\gamma, n)^{81\text{g}}\text{Se}$		573*	30
$^{82}\text{Se}(\gamma, n)^{81\text{m}}\text{Se}$	281*		30

Примечание. Расчет сечений проводилось по программе TALYS-1.6.*

Из анализа данных, представленных в этих таблицах, видно, что экспериментальные исследования возбуждения изомерных состояний в фотоядерной реакции типа (γ, n) проводятся в основном диапазоне энергий 10-25 МэВ, то есть в области гигантского дипольного резонанса. Энергетическая зависимость соотношений изомеров в области энергий выше гигантского резонанса изучена слабо. Благодаря этим исследованиям можно получить информацию о плотности ядерного уровня и вкладе прямых процессов в механизм фотоядерных реакций в определенной области энергий.

Четвертая глава диссертации называется «**Процессы ядерного синтеза в аккреционном диске черных дыр**» и изучает влияние гравитации черной дыры на поток нейтрино при образовании тяжелых изотопов из изотопа ^{56}Fe через r - и s -процессы в аккреционном диске. Среди различных ингредиентов нейтрино играют решающую роль. Благодаря слабым взаимодействиям они могут производить умеренно богатые протонами или нейтронами ядра. Это, вместе с термодинамической эволюцией вещества, определяет, какие элементы синтезируются.

На поток нейтрино, испускаемый звездными источниками, такими как сверхновые и аккреционные диски черных дыр (два предполагаемых места r -процесса нуклеосинтеза), могут влиять различные типы физики, такие как колебания и когерентное рассеяние. В предыдущей работе мы изучали влияние гравитации на излучение нейтрино и образование тяжелых элементов в потоках из аккреционных дисков черных дыр. Наши исследования показывают, что влияние сильных гравитационных полей на излучение нейтрино важно в любой другой среде, где нейтрино производятся в больших количествах вблизи массивного центрального объекта. Поскольку релятивистские эффекты зависят от кривизны пространства-времени, особое значение имеет рассмотрение трехмерной геометрии источника. Ниже мы более подробно обсудим влияние общей теории относительности на потоки нейтрино и синтез тяжелых элементов в аккреционных дисках черных дыр.

Гравитационное поле, создаваемое мощным компактным объектом, меняет геометрию пространства-времени вокруг него. Это влияет на поток нейтрино, наблюдаемый на определенном расстоянии от центрального объекта. Основное влияние гравитационного поля на токи – это смещение энергий и деформация телесного угла, который является источником, видимым наблюдателем $d\Omega_{ob}$.

Последнее может быть определено по кривизне траекторий нейтрино и

требует нахождения их нулевой геодезической при заданной кривизне. Излучаемая энергия E_{em} и наблюдаемая энергия E_{ob} связаны соотношением $E_{em} = (1 + z)E_{ob}$, где $(1 + z)$ — красное смещение.

Эффективный поток нейтрино, наблюдаемый на большом расстоянии от компактного объекта

$$\Phi^{eff} = \frac{1}{4\pi} \int d\Omega_{ob} \times \Phi_{ob}(E_{ob}). \quad (3)$$

Начальной фазой перехода от потоков в плоской геометрии (здесь мы называем их ньютоновскими потоками) к потокам в кривых (потоки общей теории относительности) является сохранение плотности чисел. Это приводит к записи наблюдаемых общих релятивистских потоков в виде

$$\Phi^{eff} = \frac{1}{4\pi} \int d\Omega_{ob} \times \frac{E_{ob}^2}{\exp(E_{ob}(1+z)/T_{em})+1}. \quad (4)$$

Здесь мы записали распределение Ферми-Дирака нейтрино относительно температуры в точке испускания T_{em} (величина, обычно известная из численного моделирования). Красное смещение $1+z$ и телесный угол $d\Omega_{ob}$ зависят от геометрии пространства-времени. Следовательно, это зависит от деталей распределения материи компактного объекта.

Скорость реакции

В астрофизической области (особенно в нейтрино-доминантных средах) основным фактором, определяющим тип синтезируемого ядерного продукта, является нейтронная или электронная доля протона Y_e . Если $Y_e > 0,5$, среда богата протонами, а если $Y_e < 0,5$, то она богата нейтронами. В такой среде начальные термодинамические условия вещества, окружающего компактный объект, таковы, что оно диссоциирует на электроны, протоны и нейтроны. Тогда основными реакциями, определяющими состав вещества, являются:



Электронная доля \tilde{Y}_e получена с учетом обратных реакций уравнений. 5 и 6 зависят от скорости поглощения этих процессов. Подобно тому, как сильное гравитационное поле влияет на потоки нейтрино, определяющие скорость реакции, то же самое происходит и с \tilde{Y}_e . В терминах наблюдаемых потоков ϕ^{ef} (ур. 2) представляет собой скорость поглощения нейтронов в нейтронах

$$\lambda_{\nu_e n} = b \int_0^{inf} \phi_{\nu_e}^{eff} (E_{ob} + \Delta)^2 \sqrt{1 - \frac{m_e^2}{(E_{ob} + \Delta)^2}} W_M dE_{ob}, \quad (7)$$

и антинейтрино в протонах

$$\lambda_{\bar{\nu}_e p} = b \int_{\Delta + m_e}^{inf} \phi_{\bar{\nu}_e}^{eff} (E_{ob} - \Delta)^2 \sqrt{1 - \frac{m_e^2}{(E_{ob} - \Delta)^2}} W_{\bar{M}} dE_{ob}, \quad (8)$$

где $W_M = 1 + 1.1E_{ob}/m_n$ и $W_{\bar{M}} = 1 - 7.1E_{ob}/m_n$ - поправки на слабую намагниченность, m_n , m_e - массы нейтрона и электрона соответственно, Δ - разность масс нейтрона и протона, $b = 9,704^{-50} \text{ см}^2 \text{ кэВ}^{-2}$.

Потоки нейтрино

Мы рассчитываем потоки нейтрино для этой астрофизической среды, как в уравнении 3. Наблюдатели — это точки на выходной траектории, где

происходят реакции (уравнения 3). Это имеет место в 5 и 6. Эмиттерами являются точки на поверхности нейтрино.

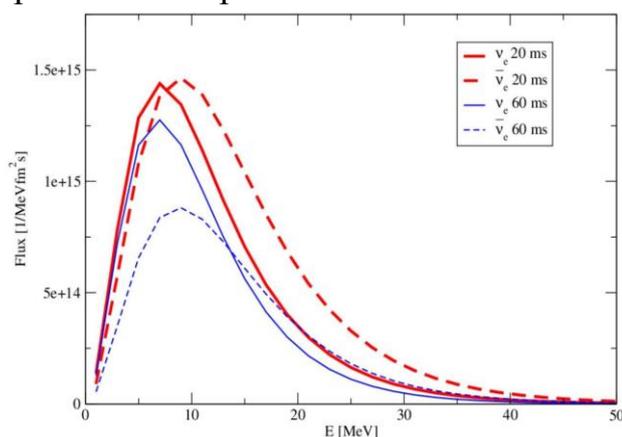


Рис.4. Сравнение потоков электронных нейтрино (сплошная линия) и антинейтрино (пунктирная линия), зарегистрированных при $x=z=100$ км. Красные линии соответствуют токам при $t=20$ мс, а синие линии — при $t=60$ мс.

Важную роль играет временная зависимость нейтринных поверхностей. На рисунке 4 показаны потоки нейтрино в два разных момента времени $t = 20$ мс (красные линии) и $t = 60$ мс (синие линии) от наблюдателя черной дыры, расположенного в точке $x_{ob} = z_{ob} = 100$ км. При $t = 20$ мс потоки электронных антинейтрино превышают потоки электронных нейтрино, как обсуждалось выше (сравните сплошные и пунктирные красные линии).

Однако при $t = 60$ мс мы видим противоположное поведение (см. синие линии на рисунке 5): потоки электронных нейтрино больше. Это происходит потому, что со временем в черную дыру втягивается все больше материала, и хотя обе поверхности сжимаются, электронное антинейтрино значительно уменьшается. В результате при $t = 60$ мс преобладает захват нейтрино нейтронами (6) и материал становится протонно-обогащенным. Принимая во внимание общую теорию относительности, уменьшение потоков антинейтрино происходит сильнее, поскольку антинейтрино краснее нейтрино. Это делает окружающую среду еще более богатой протонами.

^{56}Ni . Образование ^{56}Ni

Досихпор мы продемонстрировали влияние гравитации на долю электронов в два разных момента времени: $t = 20$ и $t = 60$ мс. Чтобы подробно рассчитать долю электронов для всех времен, описанные выше шаги необходимо повторить для меньших временных шагов в пределах этого интервала. Это включает в себя нахождение нейтринных поверхностей и нулевых геодезических для каждой точки траектории выхода в любой момент времени. Этот процесс требует больших вычислительных затрат. Вместо этого мы можем рассмотреть простую модель. Естественно ожидать, что доля электронов будет находиться между предельными значениями, полученными на двух упомянутых выше изображениях при $t = 20$ и $t = 60$ мс.

На рис. 5 мы показываем конечную долю массового числа A относительно массового числа $X(A)$ для выходной траектории с энтропией $s/k = 30$ и динамической шкалой времени $\tau = 20$ мс для каждого бариона.

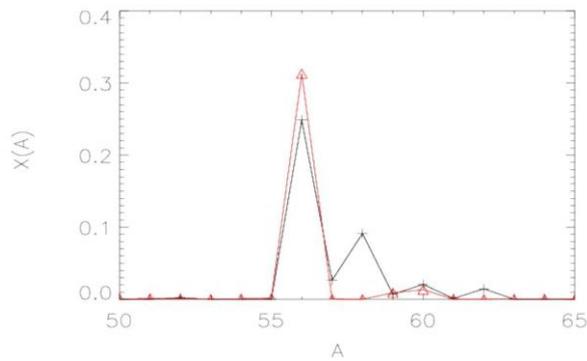


Рис. 5. (красный) и (черный) конечные доли массы для траектории выхода с $s/k = 30$ и $\tau = 20$ мс, соответствующие расчету без учета поправок общей теории относительности.

Красные линии показывают массовые доли ОТО, а черные линии соответствуют ньютоновскому расчету. Повышенное образование ^{56}Ni в массовых долях ОТО является результатом большей электронной доли в этом случае.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследований, проведенных по теме диссертации «Частицы и процессы ядерного синтеза в астрофизических компактных объект», представлены следующие выводы:

1. Установлено, что сечения возбуждения изомерных состояний, образующихся в фотоядерной реакции типа (γ, n) в ядре ^{80}Se в диапазоне энергий 12–25 МэВ с шагом 1 МэВ, состоят из одного резонансного пика;

2. Получены новые данные о сечениях реакции $^{80}\text{Se}(n, 2n)^{79m,g}\text{Se}$ при значении энергии нейтронов $E_n = 14.1$ МэВ и определена зависимость плотности ядерных уровней от спина;

3. С использованием программного пакета TALYS 1.6 были рассчитаны теоретические значения сечений реакций (γ, n) и $(n, 2n)$ и соотношения изомеров в исследуемом ядре. В результате сравнения результатов расчетов с экспериментальными данными получена информация о параметре, характеризующем спиновую зависимость плотности уровней ядра и механизме расположения (вероятностях расположения) изомерных состояний;

4. Изучалось влияние сильной гравитации (ОТО) на поток нейтрино, создаваемый в аккреционном диске черной дыры Шварцшильда ($\text{Ni-56} \rightarrow \text{Fe-56}$). Было показано, что поток гравитационных нейтрино (анти) увеличивается при более низких энергиях и уменьшается при более высоких энергиях. Это означает, что процесс захвата нейтрино и антинейтрино (в ядрах Fe-56 и Co-56) усиливается при более высоких энергиях и образуется больше радиоактивного изотопа Ni-56. При более низких энергиях, наоборот, гравитация замедляет процесс захвата;

5. Уровень излучения $^{79m,g}\text{Se}$ составляет 231.96 кэВ, а большинство гамма-всплесков от столкновений нейтронных звезд и магнетаров происходит в диапазоне энергий 200–300 кэВ. Это означает, что образование изомерных состояний $^{79m,g}\text{Se}$ может быть источником гамма-всплесков в нейтронных звездах.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.03/31.03.2022.T/FM.10.04 ON AWARD OF
SCIENTIFIC DEGREE AT INSTITUTE OF FUNDAMENTAL AND
APPLIED RESEARCH “TIAME” NATIONAL RESEARCH UNIVERSITY**

NATIONAL UNIVERSITY OF UZBEKISTAN

AKHMEDOV SAIDMUKHAMMAD ERKIN O‘G‘LI

**PARTICLES AND NUCLEAR FUSION PROCESSES AROUND
ASTROPHYSICAL COMPACT OBJECTS**

**01.03.01 – Astronomy
01.04.08 –Physics of atomic nucleus and elementary particles.
Acceleration technology**

**DISSERTATION ABSTRACT OF THE DOCTOR OF PHILOSOPHY (PhD)
ON PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES**

Tashkent – 2025

The theme of the Doctor of Philosophy (PhD) dissertation on physical and mathematical sciences is registered at the Supreme Attestation Commission under the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under the number B2023.4.PhD/FM967.

The dissertation was carried out at the National University of Uzbekistan, named after Mirzo Ulugbek.

The dissertation abstract was posted in three languages (Uzbek, Russian, and English (resume)) on the Scientific Council's website at www.iplt.uz and on the Ziyonet informational and educational portal's website at www.ziyonet.uz.

Scientific consultant:

Polvonov Satimboy Rajapovich

doctor of sciences in physics and mathematics, professor

Rayimbaev Djavlanbek Radjapbayevich

doctor of sciences in physics and mathematics, professor

Official opponents:

Usmanov Pazlitdin Nuritdinovich

doctor of sciences in physics and mathematics, professor

Mirtadjiyeva Karomat Toxirovna

doctor of sciences in physics and mathematics, professor

Leading organization:

Samarkand State University, named after Sharof Rashidov

The defense of the dissertation will be held at the Scientific Council No. DSc.03/31.03.2022.T/FM.10.04 at the Institute of Fundamental and Applied Research under the "TIAME" National Research University on _____ 2025 at _____. (Address: Institute of Fundamental and Applied Research, 39, Qori Niyazi street, Tashkent city, 100000. Hall 108; Ph.: (+99871) 237-09-61; fax (+998 71) 234-48-67; e-mail: info@ifar.uz).

The dissertation can be found at the Information Resource Center of the Institute of Fundamental and Applied Research under the "TIAME" National Research University (registered under number ____). (Address: Institute of Fundamental and Applied Research, 39, Qori Niyazi street, Tashkent city, 100000. Hall 108; Ph.: (+99871) 237-09-61.

Abstract of dissertation sent out on « ____ » _____ 2025 year

(Mailing report № ____ on « ____ » _____ 2025 year)

B. J. Ahmedov

Deputy Chairman of Scientific Council on the award of scientific degrees, Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, DSc., academic

S.N. Murodov

Scientific secretary of Scientific Council on the award of scientific degrees, PhD.

A.A. Abdujaborov

Chairman of Scientific Seminar under Scientific Council on the award of scientific degrees, DSc., professor

INTRODUCTION (Annotation of PhD dissertation)

Introduction

Relevance and necessity of the dissertation topic. One of the most important problems of nuclear astrophysics today is understanding the nature of the synthesis of chemical elements. Most of the heavy elements found in nature are formed in stars as a result of neutron capture processes called s- and r-processes, which are respectively slow and fast compared to the competing beta decay processes. At the same time, 35 neutron-deficient, bypassed p-nuclei, from ^{74}Se to ^{196}Hg , are known that are not formed in the above-mentioned s- and r-processes. They can be formed in photonuclear reactions of the (γ, n) , (γ, p) or (γ, α) type. In this regard, information on photoneutron reactions plays an important role in predicting and describing the formation of p-nuclei. Furthermore, studying the relative probabilities of isomeric state formation in nuclear reactions is also crucial for understanding the nature of the light curves associated with the birth of new stars—so-called astrophysical kilonovae and supernovae—and the nuclear physical processes occurring in them.

In the formation of heavy elements in astrophysical compact objects, including neutron stars called kilonovae, the role of s- and r-processes involving isomeric nuclei is critically important. As a result of the nuclear processes in the first-ever observed collision of two neutron stars in August 2017, it was determined that a number of neutron-rich nuclei, including gold isotopes, were formed. This result indicates that not only neutron star collisions but also their very formation process may lead to the creation of heavy elements, and that the influence of gravity is also significant in these events. Additionally, accretion matter around black holes is extremely dense and hot, increasing the probability of processes involving electron and neutron capture. In these processes, beta-radioactive isotopes heavier than iron are formed, and the role of the black hole's gravity is important for neutrino absorption or the reduction of its flux.

During the years of independence in our country, special attention has also been paid to the development of scientific research in nuclear physics, nuclear astrophysics, and astronomy, and to addressing fundamental problems in these fields on a global scale. In this regard, the field of astrophysics of relativistic compact objects has been rapidly developed; in particular, significant results have been achieved in developing models of physical processes around neutron stars, analyzing the space-time structure around black holes and the motion of test particles in their vicinity, and studying collective and nuclear processes in accretion disks.

The state normative documents approve the tasks of this dissertation, the decree of the President of the Republic of Uzbekistan dated February 7, 2017, PQ-4947, “On the strategy of measures for the further development of the Republic of Uzbekistan” and dated February 18, 2017, No. PQ-2789 It corresponds to the requirements of the decision “On measures to improve further the activities of the Academy of Sciences, organization, management and financing of scientific research works”.

Relevance of the research to the priority areas of science and technology development of the Republic of Uzbekistan.

This study was carried out in accordance with the II priority direction of development of science and technology of the republic "Energy, energy resource conservation".

Review of international scientific research on the topic of the dissertation.

The awakening of isomeric states in reactions and isomeric states in the Universe is studied by many scientists from the world's leading scientific centers, for example, in the nuclear field, by the American (C.B. Collins, J.J. Carroll, K. Angell, H.J. Karwowski, J.H. Kelly, A.P. Tonchev, V. Tornov), Koreans (H. Naik, G.N. Kim, K. Kim, M. Zaman, M. Sahid, Yang, M.V. Lee, Yu.R. Kang, S.G. Shin, M.H. Cho, A. Gosv), Russians (B.S. Ishkhanov, V.V. Varlamov, I.M. Kapitonov, L.Z. Jilavyan, A.G. Belov, Yu.P. Gangrsky, A.P. Tonchev, N.P. Balabanov, R.A. Aliyev), Ukrainian (V.M. Mazur, I.N. Vishnevsky, V.I. Zheltonoysky, E.V. Kulich, A.N. Savrasov), Turkish (Melih Bostan, Mustafa Nizamettin Erduran, Mert Sirin), Vietnamese (Tran Duc Thiep, Truong Thi An, Nguyen Tuan Hai, Nguyen The Vinh, Phan) Viet Cuong), from Uzbekistan (Muminov T.M., Salikhbaev U.S., S.V. Artemov). In the field of astronomy, for example, Americans (B. D. Metzger, G. Martinez-Pinedo, G. Wendell Misch, Trevor M. Sprouse, Chong-Ping Hsu, Leonardo Hsu, P. Blasi, R. I. Epstein and A. V. Olinto, Gianfranco Brunetti, Thomas W. Jones, C. E. Rehm, K. Iwasawa, A. J. Yang, R. K. McLaughlin, Jennifer Barnes, Daniel Kasen, Keith Yu Lau), Germans (M. Arnoux, H.-T. Janka, Nicolas Schamel, Pavel Genzel), Russians (Yu. E. Penionzhkevich, Vadim Aleksandrovich Sukhov, Yu. N. Uzikov, Maxim Dvornikov), Japanese (Shinichiro Fujimoto, Masaaki Hashimoto, Osamu Koike), Scots (M. Ruffert), Kazakhs (S.B. Dubovichenko), Czechs (Zdenek Stuchlik, Martin Kolos, Arman Tursunov, Zdenek Stuchlik), Italians (G. Lambiase, L. Mastrototaro, Remo Ruffini, Grigory Vereshchagin, She-Sheng Xue), Chinese (Kun Fang, Xiao-Jun Bi, Su-Jie Lin, Qiang Yuan), and Uzbeks (B. Akhmedov, A. Abdujabborov, J. Raimbayev). At present, information on the ratios of isomers has been obtained even at high gamma-quanta energies. Most of these studies have been performed for given maximum energies of the bremsstrahlung spectrum. In the region of gamma-quanta energies above 20 MeV, no systematic studies have been conducted to determine the energy relationships of isomeric yields and the ratios of photonuclear reaction cross sections. The dependence of the isomer ratios and the spin of isomeric states on the mass number of the nucleus has also not been studied. The availability of these data allows us to obtain information on the density of the nuclear surface, its dependence on the spin, and the contribution of direct processes to the mechanism of photonuclear reactions in a certain energy range.

The experimental study of the awakening of isomeric states in the photonuclear reaction of the (γ, n) -type in $^{74,82}\text{Se}$ nuclei was studied mainly in the energy range of 10-20 MeV, i.e. in the region of giant dipole resonance. There are only a few works on measuring the ratio of isomeric yields of photonuclear reactions, which were also determined at one value of the maximum energy of

bremsstrahlung. Comprehensive studies in the energy range above $E_\gamma > 20$ MeV, i.e. the energy relationship of the ratio of isomer yields and sections of the photonuclear reaction, the relationship of the isomer ratio with the mass number and spin of the isotope, etc., have not been carried out. Thanks to such studies, it is possible to obtain information on the surface density of nuclei and the share of direct processes in this energy field in the mechanism of photonuclear reactions.

However, it should also be noted that in previous scientific works, insufficiently accurate and, in some cases, erroneous data on the decay schemes of pairs of isomers were used when determining the ratio of isomer yields and cross-sections. At present, using semiconductor detectors made of ultrapure germanium, which allow measurements to be carried out with high accuracy, and decay schemes with sufficient accuracy, it is possible to determine the ratio of reaction isomer yields and cross-sections with high accuracy and confidence limits. In addition, previous results on the ratios of isomers were obtained under new experimental conditions, i.e. in accelerators with high-intensity and energy γ -quantum beams, using high-resolution gamma spectrometers for measuring induced γ -activity. the need for clarification with respect to isotopically enriched targets.

Connection of the topic of the dissertation with the scientific research of the higher educational/research institutions, where the dissertation was carried out.

Completed within the framework of scientific projects No. F2-62 “Nuclear and astrophysical research based on a charged particle accelerator” (2012-2016), No. OT-F2-12 “Development of spectroscopic studies of ion beams of the Uzbek State Medical University electrostatic accelerator” (2017-2020).

The purpose of the study. Study isomeric states formed in $^{74,82}\text{Se}$ nuclei in laboratory conditions in photonuclear and neutron reactions (*r*- and *s*-processes), explain the formation of astromers in neutron stars, and also study signs of the formation of nuclei heavier than iron in the accretion disk of black holes.

The tasks of the research:

- Study the relative probabilities of the formation of isomeric states in selenium isotopes as a result of photonuclear and neutron reactions in the energy range 10-35 MeV and determine the ratio of yields and cross-sections of isomeric states in photoneutron reactions (γ, n) in selenium isotopes;
- Measuring the cross-sections of formation of isomeric states in reactions ($n, 2n$) on nuclei of selenium isotopes using the activity method introduced into the neutron beam of a neutron generator with an energy of 14.1 MeV;
- Modeling reactions of the (γ, n) and ($n, 2n$) type in selenium isotopes in the TALYS 1.6 software package, calculating reaction cross-sections, excitation cross-sections of isomeric states in the reaction, their ratios and checking the obtained results;
- Analysis of the participation of radioactive nuclei formed in reactions in the *s*-process;

- Check whether the obtained spectra of isomeric nuclei exist in the observational data of neutron stars and (kilo)novae.
- To calculate effects of GR on (anti) neutrino flux formed in black hole accretion disc by beta radioactivity.

The objects of the research are nuclear processes and nuclear isomeric states in the accretion disk of a black hole and in the environment of neutron stars.

The research subjects reactions of type (γ, n) and $(n, 2n)$ in $^{74,82}\text{Se}$ nuclei represent isomer yields and nuclear processes in black hole accretion.

The research methods software packages TALYS 1.6 and its monitoring methods, and also mathematical apparatus of the theory of GR.

The scientific novelty of the research is as follows:

- For the first time, excitation cross sections of isomeric states formed in a photonuclear reaction of the (γ, n) type in the selenium-80 nucleus were measured with a step of 1 MeV in the energy range of 12-25 MeV;
- New data on the cross sections of the $^{80}\text{Se}(n, 2n)^{79\text{m,g}}\text{Se}$ reaction at neutron energy $E_n=14.1$ MeV were obtained and the dependence of the density of nuclear levels on spin was determined.

Practical results of the research are as follows:

- The reduction of the neutrino surface (neutrinos when matter is pulled into a black hole) combined with higher redshifts leads to a larger ejection of proton-rich material and larger ^{56}Ni synthesis for a wide range of ejection conditions;
- Information on the TALYS software package used for analysis and modeling of nuclear reactions is provided, its capabilities and areas of application are discussed;
- A technique for determining the regions of the ground and isomeric states in a nuclear reaction involving fast neutrons in a neutron generator is developed;
- The bremsstrahlung spectrum is calculated in the energy range from 10 MeV to 35 MeV of the maximum bremsstrahlung energy.

Reliability of the research results. The reliability of the research results is confirmed by the use of modern methods and highly sensitive measuring instruments, comparative analysis of the developed methods with data from international standard samples, parallel analyses, and comparison with data obtained by different researchers and laboratories.

Scientific and practical significance of the research results. The obtained experimental results on the excitation of isomeric states in the (γ, n) and $(n, 2n)$ reactions in the energy range of 10-35 MeV, i.e. the cross-sections for the formation of isomers and ground states and their ratios, are of great importance for elucidating the mechanism of reactions involving photonuclei and neutrons occurring in the energy range above the giant dipole resonance, creating new theoretical models for describing such reactions, obtaining information on the properties of highly excited states of nuclei, and expanding the international nuclear database on isomeric ratios. For most nuclei, such experimental data are currently lacking. The obtained results can also be widely used in applied nuclear physics, namely in developing new methods in the activation analysis method, as

well as in medical physics.

Implementation of research results. The results obtained in the dissertation work on the cross-section and intensity of formation of bremsstrahlung gamma radiation at different energies were used in the project to create methods for measuring the intensity of reflection of gamma radiation. Electrons were also taken into account when developing a system for forming a bremsstrahlung beam.

The scientific results obtained in the dissertation work were carried out within the framework of the fundamental project of the National University of Uzbekistan No. OT-F2-16 “Determination of the physical nature of the specular reflection of gamma radiation” in 2017-2020 (the academician was the head of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan T.M. Mominov).

Approval of research results in The results of the dissertation were analyzed at 7 national and 2 international conferences.

Publication of research results: The materials of the dissertation work were published in 9 scientific articles (including 2 in journals included in the Scopus database, 7 in journals included in the OAC) and 12 abstracts of lectures at national and international conferences.

Volume and structure of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion and a list of references. The volume of the dissertation is 108 pages.

Conclusion

The following conclusions were drawn based on the results of research carried out within the framework of the “Particles and nuclear fusion processes around astrophysical compact objects” dissertation:

1. It was established that the excitation cross sections of isomeric states formed in the photonuclear reaction of the (γ, n) type in the ^{80}Se nucleus in the energy range of 12–25 MeV with a step of 1 MeV consist of one resonance peak;

2. New data on the cross sections of the $^{80}\text{Se}(n, 2n)^{79\text{m,g}}\text{Se}$ reaction at the neutron energy $E_n=14.1$ MeV were obtained and the dependence of the nuclear level density on the spin was determined;

3. Using the TALYS 1.6 software package, the theoretical values of the cross sections of the (γ, n) and $(n, 2n)$ reactions and the ratio of isomers in the nucleus under study were calculated. As a result of comparing the calculation results with the experimental data, information was obtained on the parameter characterizing the spin dependence of the nuclear level density and the mechanism of arrangement (arrangement probabilities) of isomeric states;

4. The effect of strong gravity (GR) on the neutrino flux produced in the accretion disk of a Schwarzschild black hole ($\text{Ni-56} \rightarrow \text{Fe-56}$) was studied. It was shown that the flux of gravitational neutrinos (anti) increases at lower energies and decreases at higher energies. This means that the process of neutrino and antineutrino capture (in the Fe-56 and Co-56 nuclei) is enhanced at higher energies and more radioactive isotope Ni-56 is formed. At lower energies, on the contrary, gravity slows down the capture process;

5. The radiation level of $^{79\text{m,g}}\text{Se}$ is 231.96 keV, and most gamma-ray bursts

from collisions of neutron stars and magnetars occur in the energy range of 200–300 keV. This means that the formation of isomeric states of $^{79\text{m,g}}\text{Se}$ may be a source of gamma-ray bursts in neutron stars.

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

I bo'lim (part I; I часть)

1. Muhammad Zahid, J. Rayimbaev, N. Kurbonov, S. Axmedov, Chao Shen, A. Abdujabbarov. Electric Penrose, circular orbits and collisions of charged particles near charged black holes in Kalb–Ramond gravity // The European Physical Journal C (EPJ C).- Berlin, Heidelberg: Springer (Germany), 2024 Vol.84, 706.(Q1. Web of Science: IF=4.180) DOI:[10.1140/epjc/s10052-024-13061-5](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-024-13061-5)
2. Muhammad Zahid, F. Sarikulov, Chao Shen, S. Axmedov J. Rayimbaev. Shadow of rotating black holes surrounded by dark fluid with Chaplygin-like equation of state and constraints from EHT results.// Classical and Quantum Gravity. IOP Publishing (United Kingdom), 2024, Vol. 41, 020. (Q2. Web of Science: IF=3.6) DOI:[10.1088/1361-6382/ad721f](https://doi.org/10.1088/1361-6382/ad721f)
3. Rayimbaev, J., Shaymatov, S., Abdulxamidov, F., Ahmedov, S., Begmatova, D. Magnetized Particles with Electric Charge around Schwarzschild Black Holes in External Magnetic Fields. // Universe,- MDPI (Switzerland), 2023. Vol.9. (3), P.135-157. (Q1. Web of Science: IF=2.5). DOI:[10.3390/universe9030135](https://doi.org/10.3390/universe9030135)
4. Muhammad Zahid, Javlon Rayimbaev, Saeed Ullah Khan, Jingli Ren, Saidmuxammad Axmedov, Inomjon Ibragimov, Dynamics and collisions of magnetized particles around charged black holes in Einstein-Maxwell-scalar theory. // The European Physical Journal C (EPJ C). –Berlin, Heidelberg: Springer (Germany), 2022, Vol. 82, 494, (Q1. Web of Science: IF=4.180) DOI:[10.1140/epjc/s10052-022-10432-8](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-022-10432-8)
5. С.Р. Палванов, Д. Райимбаев, С.Э. Ахмедов, Г. Палванова. Исследование возбуждения изомерных состояний в реакциях (γ, n) и $(n, 2n)$ на изотопах селена. // O'zMU ilmiy axboratnomasi. – T: 2023. № 3/2/1. В. 525-528 (01.00.00.)
6. S.R. Palvanov, D. Rayimbaev, S.E. Axmedov. Возбуждение изомерных состояний в реакциях типа $(n, 2n)$ на ядре ^{80}Se . // O'zMU ilmiy axboratnomasi. – T: 2023. № 3/2/1. В. 549-551 (01.00.00.)
7. Mirzabek Alloqulov, Uktambek Eshimbetov, Saidmuxammad Ahmedov. Test particles motion in generalized Einstein-Maxwell-scalar theory. // Journal of Fundamental and Applied Research (JFAR). –Vol.3, Issue 1. 2023. P. 11-15 (01.00.00.)
8. Axmedov S.E.. Thermonuclear reactions in stars. // Journal of Fundamental and Applied Research (JFAR). – Vol.3, Issue 1. 2023. P. 27-30 (01.00.00.)
9. Axmedov S.E. Neytron yulduzlardagi rentgen nurlari ta'siridagi yadro reaksiyalar. // O'zMU ilmiy axboratnomasi. – T: 2022. - № 3/1/1 В. 449-451 (01.00.00.)
10. Axmedov S.E. Nuclear isomers in neutron stars. // Journal of Fundamental and Applied Research (JFAR). – T: 2022 (mart). – Vol. 2. Issue 1. P. 1-5. (01.00.00.)

11. S.E.Axmedov, J.Rayimbayev, S.R.Polvonov. Qora o'ra atrofida zarrachalar to'qnashuvi. // NamDU ilmiy axboratnomasi. - Namangan: 2021. №10. B. 7-10. (01.00.00.)

II bo'lim (part II; II часть)

1. S.R. Palvanov, S.E. Axmedov. GEANT-4 dasturi bilan tormozlanish nurlanishlar spektrini hisoblash. Navoi pedagogika instituti, Birinchi renessans: Abu Rayhon Beruniy va tabiiy fanlar evolyusiyasi nomli xalqaro ilmiy-amaliy konferensiyasi. N. 2023. B.447-448.
2. S.R. Palvanov, D. Rayimbaev, B.I. Kurbanov, M.I. Mamayusupova, A.X. Ramazanov, S.E. Axmedov, A. Tuymurodov, D. Tuymurodov, S. Ashurov. Investigation of the excitation of isomeric states of ^{81m}Se in reactions of the type (γ, n) , (n, γ) and $(n, 2n)$ on $^{80,82}\text{Se}$ nucle. // Академия наук республики Узбекистан Физико-Технический институт и институт Материаловедения Фундаментальные и прикладные проблемы современной физики труды международной конференции. Т: 2023 (19-21 октября) – С. 403-404.
3. S.R. Palvanov, D. Rayimbayev, S.E. Axmedov, G.S. Palvanova, D. Tuymurodov, S. Ashurov. Исследование сечения возбуждения изомерных состояний в реакциях (γ, n) и $(n, 2n)$ на ядрах $^{74,80,82}\text{Se}$. Namangan davlat universiteti Yarimo'tkazgichlar fizikasi va ular asosidagi qurilmalarning zamonaviy muammolari mavzusidagi Respublika ilmiy-amaliy anjuman. 2023. B. 68-70.
4. S.R. Palvanov, X. Rustamova, M.I. Mamasupova, A. Tuymuradov, H. Tojiboev, S. Axmedov, G.S. Palvanov. Isomeric yield ratios and cross section ratios of the reaction (γ, n) , $(\gamma, 2n)$ AND $(n, 2n)$ on the nucleus ^{197}Au . Namangan davlat universiteti Yarimo'tkazgichlar fizikasi va ular asosidagi qurilmalarning zamonaviy muammolari mavzusidagi Respublika ilmiy-amaliy anjuman. 2023. B. 70-72.
5. S.R. Palvanov, D. Rayimbayev, S.E. Axmedov, A. To'ymuradov, D. Tuymurodov, S. Ashurov. Возбуждение изомерных состояний в реакциях типа $(n, 2n)$ на ядре ^{82}Se . Fizika faning rivojlanishida iste'dodli yoshlarning o'rni. Respublika ilmiy-amaliy konferensiyasi (RIAK-XVI). 2023. 242-244.
6. Axmedov S.E. Nuclear reactions under the influence of x-rays in neutron stars. // Fizika faning rivojlanishida iste'dodli yoshlarning o'rni. Respublika ilmiy-amaliy konferensiya (RIAK-XI). – Т: 2022 (22-23 aprel).
7. Axmedov S.E. Yadro reaksiyasini rentgen nurlari portlashi modelidan olingan neytron yulduz xususiyatlarini o'rganish. // Fizikaning rivojida fundamental-innovation tadqiqotlar va uning istiqbollari Respublika ilmiy-amaliy konferensiya. - Т: 2022 (14-oktyabr).
8. Axmedov S.E. Yulduzlarda kechadigan termoyadro reaksiyalar. // "Zamonaviy yarimo'tkazgichlar fizikasi rivojlanishining tendensiyalari: yutuqlar, muammolar va istiqbollar" mavzusida II Xalqaro ilmiy konferensiya. – Т: 2022 (27-28 dekabr). B.403-404.

9. S.E. Akhmedov. Supermassive black holes of ultrahigh-energy cosmic rays. // I Republican scientific conference of young scientists and physical students (YOOFTRIA-I). - T.: 2021 (21-april). - B. 263-264.
10. S.E. Axmedov. Magnitlanmagan va elektr zaryadlangan zarrachalarning qora tuynik atrofida to'qnashuvi. // Zamonaviy ta'lim tizimini rivojlantirish va unga qaratilgan kreativ g'oyalar, takliflar va yechimlar. 17-sonli respublika ilmiy-onlayn konferensiya. – T.: 2021 (15-iyun). - B. 44-46.
11. S.E.Axmedov. M.I.Mamayusupova. Qora tuynik atrofida neytral magnitlangan zarrachalar to'qnashuvi. // Fizikaning rivojida fundamental-innovation tadqiqotlar va uning istiqbollari Respublika ilmiy-amaliy konferensiya. - T.: 2021 (14-oktyabr). - B. 45-46.
12. S.E.Axmedov, S.R.Polvonov. Nucleosynthesis. // International scientific-online conference models and methods for increasing the efficiency of innovative research international dk denmark conference. –Daniya, Copenhagen: 2021 (December 15). – P. 69-76.