

**ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.02/30.12.2019.FM/Т.33.01 РАҚАМЛИ
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

САМАРҚАНД ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

СУЛЕЙМАНОВ РЕНАТ ДАМИРОВИЧ

**СУЮҚ СИМОБ ЮЗАСИДАН ГАММА НУРЛАР ҚАЙТИШИНИНГ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛ КУЗАТИЛИШИ**

01.04.08 – Атом ядроси ва элементар зарралар физикаси. Тезлаштирувчи техника

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси
АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент– 2021

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD)
диссертацияси автореферати мундарижаси**

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

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

Сулейманов Ренат Дамирович

Суюқ симоб юзасидан гамма нурлар қайтишининг экспериментал
кузатилиши

5

Сулейманов Ренат Дамирович

Экспериментальное обнаружение отражения гамма излучения от
поверхности жидкой ртути.....

19

Suleymanov Renat Damirovich

Experimental detection of the reflection of gamma radiation from the
liquid mercury surface.....

35

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ

List of published works.....

39

**ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМий
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 РАҚАМЛИ
ИЛМий КЕНГАШ**

САМАРҚАНД ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

СУЛЕЙМАНОВ РЕНАТ ДАМИРОВИЧ

**СУЮҚ СИМОБ ЮЗАСИДАН ГАММА НУРЛАР ҚАЙТИШИНИНГ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛ КУЗАТИЛИШИ**

01.04.08 – Атом ядроси ва элементар зарралар физикаси. Тезлаштирувчи техника

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси
АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент – 2021

Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2020.2.PhD/FM509 рақами билан рўйхатга олинган.

Докторлик диссертацияси Самарқанд давлат университетида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгашнинг веб-саҳифасида (www.inp.uz) ва «Ziynet» таълим ахборот тармоғида (www.ziynet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:	Муминов Толиб Мусаевич физика-математика фанлари доктори, профессор, академик
Расмий оппонентлар:	Артемов Сергей Викторович физика-математика фанлари доктори, профессор Полвонов Сатимбой Ражапович физика-математика фанлари номзоди, профессор
Етакчи ташкилот:	Ўзбекистон Республикаси Фанлар Академияси “Физика-Қуёш” илмий ишлаб-чиқариш бирлашмаси Физика-техника институти

Диссертация химояси Ядро физикаси институти ҳузуридаги DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2021 йил _____ соат _____ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100174, Тошкент ш., Улуғбек қўрғони, Ядро физикаси институти. Тел. (+99871) 289-31-41; факс (+99871) 289-36-65; e-mail: info@inp.uz).

Диссертация билан Ядро физикаси институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (_____ рақами билан рўйхатга олинган). (Манзил: 100214, Тошкент ш., Улуғбек қўрғони, ЯФИ. Тел. (+99871) 289-31-19).

Диссертация автореферати 2021 йил «__» _____ куни тарқатилди.
(2021 йил “__” _____ даги _____ рақамли реестр баённомаси)

М. Ю. Ташметов

Илмий даражалар берувчи илмий
кенгаш раиси, ф.-м. ф. д., профессор

О.Р. Тожибоев

Илмий даражалар берувчи илмий
кенгаш илмий котиби, PhD. ф.-м.ф.

И. Нуриддинов

Илмий даражалар берувчи илмий
кенгаш ҳузуридаги илмий семинар раиси,
ф.-м. ф. д., профессор

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Хозирги вақтда кўзгули қайтиш ҳодисаси электромагнит нурланишининг барча диапазонлари учун яхши ўрганилган ва турли амалий мақсадларда қўлланилиб келинмоқда (микроскоп, телескоп, тепловизор, радиоалоқа). Бироқ қаттиқ рентген ва гамма-нурлар диапазони учун бу ҳодиса ҳали кузатилмаган. Бунга рентген нурланиши квантлари энергиясининг ошиши тўлқин узунлигининг камайишига олиб келиши сабаб ҳисобланади. Дарҳақиқат, рентген нурланишининг тўлқин узунлиги энергия ошган сари атомлараро масофа ўлчамларидан ҳам кичик бўлиб қолади, гамма-квантлар тўлқин узунлиги эса субатом зарралар ўлчамлари билан мутаносиб бўлади. Сўнгги йилларда энергияси 40 кэВ гача бўлган рентген нурланишини фокуслашга қодир синдирувчи линзалар яратилди. Рентген астрономиясида қўлланиладиган “қия” тушиш кўзгулари эса энергияси 80 кэВ гача нурланишни фокуслашга имкон берган. Шунга қарамай энергияси 100 кэВ дан юқори бўлган нурланиш учун фокусловчи тизимлар тўғрисидаги маълумот илмий адабиётларда мавжуд эмас. Гамма-нурлар учун тўлиқ ташқи қайтиш (ТТҚ) назарияси ҳам ҳали аниқ тарзда шаклланмаган. Шунинг учун гамма-нурларнинг кўзгули қайтишини тадқиқ қилиш зарур аҳамият касб этади.

Бугунги кунда дунёда қаттиқ рентген нурланиш диапазонида самарали ишлашга қодир материаллар ва рентген оптикаси тизимларини яратиш мақсадида кўплаб тадқиқотлар олиб борилмоқда. Гамма нурларнинг ясси юзалардан қайтишини ўрганиш бўйича олиб борилаётган тадқиқотлар учун гамма-нурларининг интенсив манбаи, ўта аниқ ўлчов тизими ва кўзгудан детекторгача бўлган катта масофа (~ 100 метр ва ундан ортиқ) мавжуд бўлиши талаб этилади.

Ўзбекистонда сўнгги йиллар давомида гамма нурларининг бир қатор материаллардан ўта кичик бурчаклардаги сочилишини ўрганиш соҳасида тадқиқотлар олиб борилмоқда. Самарқанд давлат университети ядро физикаси лабораториясида 320 метрли ер ости канали ва етарлича қувватга эга бўлган электронлар тезлатгичида суяқ симоб юзасидан гамма-нурларнинг қайтиш коэффицентини экспериментал ўлчаш бўйича муҳим натижалар олинган. Улар гамма-оптик тизимларни яратиш имкониятларини баҳолашда муҳим аҳамиятга эга. Бундай тадқиқотларнинг зарурияти уларнинг амалий кўлами, яъни тиббий диагностика ва терапия, материалларни бузмайдиган ва технологик жараёнларни ўзгартирмайдиган назорат олиб бориш, ядро энергетикаси учун фойдали эканлиги билан тасдиқланади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар стратегияси тўғрисида», 2017 йилнинг 17 февралдаги ПФ-2789-сон «Фанлар академияси фаолиятини янада такомиллаштириш, илмий-тадқиқот фаолиятини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштириш чора тадбирлари тўғрисида», 2019 йилнинг 16 октябрдаги ПФ-4492-сон «Ўзбекистон Республикасининг ядро-энергетика дастури учун

кадрлар салоҳиятини ривожлантириш стратегиясини тасдиқлаш тўғрисида» фармонларида, ҳамда ушбу соҳадаги бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишда ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялари ривожланишининг II. «Энергетика, энергия тежамкорлиги ва муқобил энергия манбалари» устувор йўналиши доирасида бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Гамма-оптик тизимларини яратиш имкониятлари жаҳоннинг етакчи илмий марказлари олимлари, жумладан, франциялик (A. Snigirev, V. Kohn, I. Snigireva, B. Lengeler, D. Habs, M.M. Günther, M. Jentschel ва W. Urban, Donohue J.T.), америкалик (Hailey C.J. ва бошқ.), россиялик (Гаранин С.Ф., Краветс Е.М.) ва бошқа олимлар томонидан ўрганилмоқда.

Европанинг синхротрон тадқиқотлар марказининг тадқиқотчилари (A. Snigirev, V. Kohn, I. Snigireva, B. Lengeler) томонидан энергияси 40 кэВ гача бўлган қаттиқ рентген нурланишларни фокуслашга қодир бўлган таркибий синдирувчи линзалар ишлаб чиқилган. Қия тушишли кўзгулар оптикasi соҳасида NASA олимлари (Hailey C.J. ва бошқ.), энергияси 80 кэВ гача бўлган нурланишларни фокуслашга қодир бўлган рентген кўзгусини яратдилар. 2012 йили Лауэ-Ланжевен (Гренобль, Франция) институтининг халқаро тадқиқотчилар гуруҳи (D. Habs, M.M. Günther, M. Jentschel ва W. Urban) томонидан 1165 ва 1951 кэВ энергияли гамма-нурлар учун кремнийда синдириш кўрсаткичи мос равишда $1+1,48 \times 10^{-9}$ ва $1+1,11 \times 10^{-9}$ қийматларига эга эканлиги кўрсатилди. Ҳозирги пайтда бу иш гамма-нурларнинг синдириш кўрсаткичини экспериментал ўлчашнинг ягона тадқиқоти ҳисобланади.

2013 йилда юқорида қайд этилган ишда (D. Habs, M.M. Günther, M. Jentschel ва W. Urban) назарий ҳисоб-китобларда хатолик топилди. 2016 йилда Дельбрюк сочилишининг квант-механик эффекти гамма-нурлар учун синдириш кўрсаткичи бирдан катта бўлмаслиги исботланди (Гаранин С.Ф., Краветс Е.М.). Ишда йўл қўйилган хатоликларнинг таҳлили гамма-нурлар учун синдириш кўрсаткичини экспериментал ўлчашларда интенсив гамма-квантлар оқими ва етарлича масофага (рефлектор/призмадан детекторгача) эга бўлган экспериментал қурилма талаб қилинишини кўрсатади. Натижада, 2017 йилда муаллифлар экспериментал ва ҳисоб-китоблардаги хатолар туфайли ўз натижаларини қайтариб олдилар. Шундай қилиб гамма нурлар синдириш коэффиценти қийматларини аниқлаш масаласи очиқ қоляпти. Гамма-нурлар қайтиш коэффиценти оғир элементлар учун (масалан, симоб) кенг энергетик диапазонида аниқлаш муҳим илмий-амалий аҳамиятга эга.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган олий таълим муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация иши Самарқанд давлат университети илмий-тадқиқот ишлари

режасининг № ОТ-Ф2-16 «Гамма диапазонидаги электромагнит нурланишнинг тўлиқ ташқи қайтишини ўрганиш» (2007-2011), № ОТ-Ф2-16 «Силлиқ аморф юзадан қайд қилинган гамма нурларининг кўзгусимон қайтишининг физик табиатини ўрганиш» (2017-2020) мавзусидаги фундаментал лойиҳалар доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади гамма-нурларнинг энергия ва бурчак тақсимотини ўлчаш асосида уларнинг суяқ симоб юзасидан қайтишини экспериментал аниқлашдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

0–300 мкрад бурчаклар оралиғида тушувчи электронлар тормозланиш нурланишининг суяқ симоб юзаси билан ўзаро таъсирини тажрибада ўрганишнинг математик моделини ишлаб чиқиш;

микротрон МТ-22С тезлатгичи электрон узатиш тизимининг магнит-оптик қисмларини такомиллаштириш;

апертураси < 100 мкрад бўлган электронлар тормозланиш нурланишини шакллантириш тизимини ишлаб чиқиш;

33 ва 83 мкрад бурчакларда тушувчи электронлар тормозланиш нурланишининг суяқ симоб юзаси билан ўзаро таъсирини ўрганиш;

тажриба натижаларини таҳлил қилиш ва уларни физикавий талқин қилиш.

Тадқиқотнинг объектини $E = 0,2 - 4,0$ МэВ энергияли гамма-нурланишларнинг суяқ симоб юзаси билан ўзаро таъсири ташкил этади.

Тадқиқотнинг предметини тушиш бурчаклари $\theta < 150$ мкрад бўлган $E = 0,2 - 1,0$ МэВ энергияли гамма-нурларнинг суяқ симоб юзасидан қайтиши ташкил этади.

Тадқиқотнинг усуллари. Монте-Карло математик моделлаштириш услуги; сцинтилляцион гамма-спектрометрия; электрон дастаси параметларини ўлчашнинг стандарт усуллари (ток дастасини ўлчаш, заряд ўлчовини даражалаш ва б.); ядро электроникасида қўлланилаётган қатор услублардан (тезлатгични ишга тушириш импульси билан аналог-рақам алмаштиргич синхронизацияси, сигналлар дискриминацияси ва б.) фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги куйидагилардан иборат:

биринчи марта энергияси 200–600 кэВ диапазонида бўлган электронлар тормозланиш нурланишининг суяқ симоб юзасидан 33 ва 83 мкрад бурчакларда кўзгули қайтиши тажрибада аниқланган;

83 мкрад бурчагида тушувчи 200–600 кэВ энергия диапазонидаги электронлар тормозланиш нурланишининг суяқ симоб юзасидан қайтиш коэффициентларининг қийматлари аниқланган;

электронлар тормозланиш нурланишининг симоб сирти юзасидан қайтиш жараёнининг коллиматорлар тизими, детекторнинг турли параметрлари ҳамда ядровий-физик жараёнларни ҳисобга олган ҳолда математик модели ишлаб чиқилган;

коллиматорлар материаллари, қалинлиги, тирқишларнинг ўлчамлари ҳамда жойлаштириш масофаларини оптималлаштирган ҳолда электронлар тормозланиш нурланиши оқимларини апертураси 100 мкрад ва ундан кичик бўлган бурчакларда шакллантириш тизими ишлаб чиқилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

электронлар тормозланиш нурланишининг ўта кичик тушиш бурчакларида макроскопик силлиқ юза билан ўзаро таъсирлашувини ўрганиш мақсадида тажриба қурилмаси яратилган;

электронлар тормозланиш нурланиши билан намуналарни нурлантиришда экспозицион ва ютилиш дозаларини ҳисоблаш учун дастурий таъминот ишлаб чиқилган;

гамма нурланишнинг қайтиш коэффицентларининг аниқланган қийматлари ёрдамида гамма-оптик фокусловчи тизимлар учун қўйилган талаблар шакллантирилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги олинган экспериментал натижаларнинг етарли статистика билан таъминланганлиги, ўлчашларнинг Монте-Карло моделлаштириш натижалари билан мос келишлиги, экспериментал усулларнинг диққат билан калибровка қилинганлиги, ҳамда ўлчашларнинг юқори аниқликка эга қурилмалар ёрдамида ўлчанганлиги билан асосланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.

Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти энергияси 200–600 кэВ диапазонда бўлган электронлар тормозланиш нурланишининг суяқ симоб юзасидан 33 ва 83 мкрад бурчакларда кўзгули қайтиши илк бор тажрибада тасдиқланганлигидан иборат. Тажрибада қайд этилган гамма квантларнинг энергия ва бурчак бўйича тақсимооти гамма нурларининг моддалар юзасидан тўла ташқи қайтиш ҳодисасини назарий тушунтиришда муҳим аҳамиятга эга.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти шундан иборатки, электронлар тормозли нурланиши қайтиш коэффицентларининг аниқланган қийматлари 600 кэВ гача бўлган гамма нурланиш учун фокусловчи кўзгу системаларни яратиш жараёнида талаб этиладиган параметрларни баҳолаш имконини беради.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Суяқ симоб юзасидан гамма нурлар қайтишини тажрибада кузатишни ўрганиш асосида:

энергияси 200–600 кэВ диапазонда бўлган электронлар тормозланиш нурланишининг суяқ симоб юзасидан 33 ва 83 мкрад бурчакларда кўзгули қайтиши бўйича олинган маълумотлардан №А-3-115-рақамли «Қаттиқ гамма нурланиш дастасини бошқариш тизимини ишлаб чиқиш» (2015-2017) амалий лойиҳани бажариш жараёнида фойдаланилган (Ўзбекистон Республикаси Олий ва ўрта махсус таълим вазирлигининг 2020 йил 3 ноябрдаги 89-03-4360-сон маълумотномаси). Илмий натижаларнинг қўлланилиши қаттиқ ўтувчан электромагнит нурланишининг паст энергияли қисмини ажратишнинг принципиал янги усулини яратиш имконини берган;

83 мкрад бурчагида тушувчи 200–600 кэВ энергия диапазонидаги электронлар тормозланиш нурланишининг суяқ симоб юзасидан қайтиш коэффициентларининг аниқланган қийматларидан №А-3-115-рақамли «Қаттиқ гамма нурланиш дастасини бошқариш тизимини ишлаб чиқиш» (2015-2017) амалий лойиҳани бажариш жараёнида фойдаланилган (Ўзбекистон Республикаси Олий ва ўрта махсус таълим вазирлигининг 2020 йил 3 ноябрдаги 89-03-4360-сон маълумотномаси). Илмий натижаларнинг қўлланилиши қаттиқ ўтувчан электромагнит нурланишининг паст энергияли қисмини ажратиш тажриба қурилманинг параметрларни ҳисоблаш имконини берган;

электронлар тормозланиш нурланишининг суяқ симоб юзаси билан ўзаро таъсирлашувининг ишлаб чиқилган математик моделидан №А-3-115-рақамли «Қаттиқ гамма нурланиш дастасини бошқариш тизимини ишлаб чиқиш» (2015-2017) илмий лойиҳани бажариш жараёнида фойдаланилган (Ўзбекистон Республикаси Олий ва ўрта махсус таълим вазирлигининг 2020 йил 3 ноябрдаги 89-03-4360-сон маълумотномаси). Илмий натижаларнинг қўлланилиши электромагнит нурланишининг паст энергияли қисмини ажратиш тажриба қурилманинг модернизациясини амалга оширишга имконини берган;

апертураси 100 мкрад ва ундан кичик бўлган электронларнинг тормозланиш нурланиши оқимларини шакллантириш тизимини ишлаб чиқиш жараёнида олинган маълумотлардан №А-3-115-рақамли «Қаттиқ гамма нурланиш дастасини бошқариш тизимини ишлаб чиқиш» (2015-2017) илмий лойиҳаси доирасида фойдаланилган (Ўзбекистон Республикаси Олий ва ўрта махсус таълим вазирлигининг 2020 йил 3 ноябрдаги 89-03-4360-сон маълумотномаси). Илмий натижаларнинг қўлланилиши электромагнит нурланишининг паст энергияли қисмини ажратиш тажриба қурилманинг электронларнинг тормозланиш нурланиши оқимларини шакллантириш тизимини яратишга имкон берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Диссертация натижалари 2 та халқаро илмий-амалий анжуманларда муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси бўйича жами 13 та илмий иш, шу жумладан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 7 та мақола, шулардан 4 таси хорижий журналларда нашр этилган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация кириш, учта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхатидан иборат. Диссертация ҳажми 96 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва заруратлиги асосланган, мақсад ва масалалари акс эттирилган, объект, тадқиқот услуби ва предмети, тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига боғлиқлиги кўрсатилган, натижаларнинг илмий янгилиги ва амалий аҳамияти баён қилинган, олинган натижаларнинг ишончлиги асосланган, диссертация апробацияси ва тузилиши хақида маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг «**Қаттик рентген ва гамма-нурланиш оптикасидаги назарий ва экспериментал тадқиқотлар ҳолати бўйича қисқача тавсиф**» деб номланган биринчи бобида қуйидагилар кўриб чиқилган:

- муаммонинг моҳияти;
- қаттик рентген ва гамма-нурланиш соҳасида классик оптика қонунлари;
- юмшоқ рентген нурланиш диапазонидаги тўлиқ ташқи қайтиш;
- рентген оптикасида замонавий ютуқларнинг қисқача тавсифи;
- электромагнит нурланишларнинг гамма-диапазонидаги тўлиқ ташқи қайтишининг назарий эҳтимолияти.

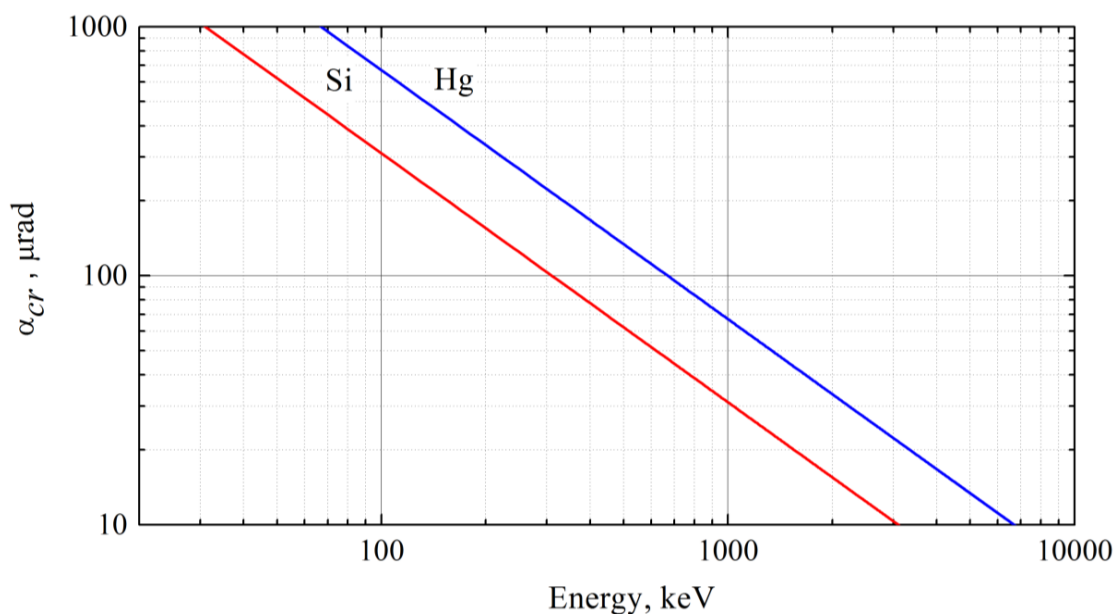
Классик тўлқин назарияси доирасида тўлиқ ташқи қайтиш (ТТҚ) тўлқин узунлиги λ бўлган нурланиш икки муҳит чегарасида бўлган юзага (атомлар орасидаги масофа $d \leq \lambda$) критик қийматдан кичик бўлган α бурчак остида тушганда содир бўлади. Бунда юзанинг нотекисликлари $\lambda / 8\alpha_{cr}$ дан ошмаслиги керак.

$$\alpha_{cr} = \frac{e\hbar}{E_\gamma} \sqrt{\frac{Z N_A \rho}{A m_e \varepsilon_0}} \quad (1)$$

бунда e ва m – электроннинг заряди ва массаси, Z , A ва ρ – атом номери, массаси ва модда зичлиги, $\hbar$ – Планк доимийси, N_A – Авогадро сони, E_γ – нурланиш квантларнинг энергияси, c – ёруғлик тезлиги. Нурланиш энергияси ортиши билан ТТҚ нинг критик бурчак қиймати кичраяди.

Қаттик рентген ва гамма-диапазонларида $\lambda \ll d$. Шундай қилиб $d \leq \lambda$ шарт бажарилмайди. Гамма нурларнинг кўзгудан қайтиши мумкин эмасдек кўринади. Гамма-нурларнинг «силлиқ» юзадан қайтишини пайқаш бу ёғочга урилган қатор игналардан ёруғликнинг қайтиши билан баровардир. Шунга карамай, квант-механик қарашлари доирасида, гамма-нурланишнинг ТТҚ ходисаси релей сочилиши ортиши туфайли ўта кичик силжиш бурчаклари ҳолатида содир бўлади ва (1) ифода эса тўғри бўлиб қолади (Аркадьев В.А. О полном внешнем отражении гамма-квантов от поверхности // Письма в журнал технической физики, 1986. -№ 12 (21). -С. 1307-1311).

Энергияси $E \sim 0,1-10$ МэВ бўлган гамма-квантлар учун критик бурчак ўта кичик $\alpha_{cr} \sim 10^{-6} - 10^{-4}$ рад қийматга эга бўлади (1-расм).



1-расм. ТТК критик бурчакларининг энергетик боғлиқлиги (кремний ва суюқ симоб учун)

1985 йилдаги илмий мақолада (Глебов В.И. и др. Отражение гамма-излучения от границы раздела двух сред //Журнал технической физики, 1985. - №55 (9). - С. 1785-1792) текисликдан $\alpha < 3 \times 10^{-4}$ рад бурчак остида сочилаётган ^{57}Co 122 кэВ гамма нурланишнинг бурчак ва энергетик тақсимланишида кучсиз ўзгаришлар кузатилгани баён этилган ва бу ўзгаришларни гамма нурланишнинг ТТҚ ходисаси деб интерпретация қилинган. Аммо, мақолада келтирилган натижалар етарлича статистика билан таъминланмаган ва муаллифлар бу мавзу бўйича бошқа мақола чоп этмаганлар. Шундай қилиб, гамма нурланишнинг ТТҚ ходисаси мавжудлиги муаммолигича қолиб келмоқда.

Бу саволга ўта кичик бурчак остида тушаётган гамма-нурланишларнинг ясси юза билан ўзаро таъсир жараёнини пухта экспериментал ўрганиш йули билан жавоб олиш мумкин.

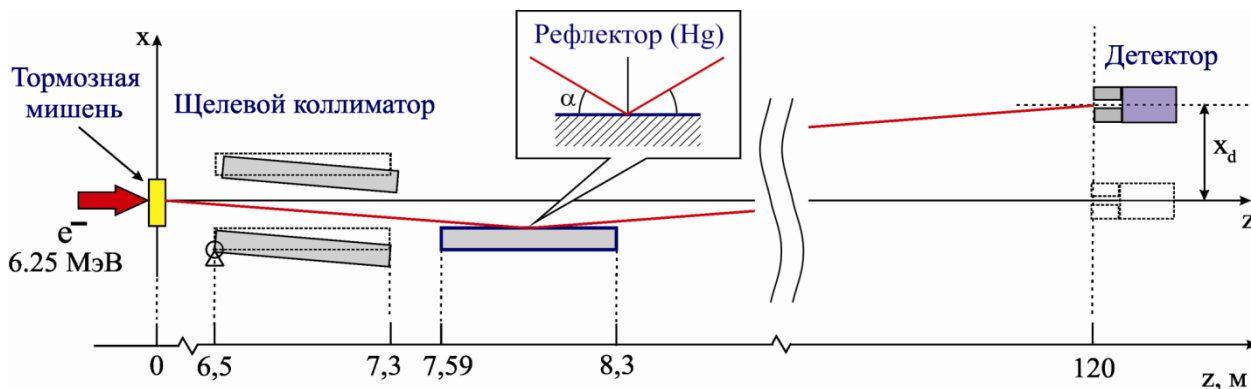
Экспериментлар учун жуда тор (кенглиги 10-20 мкм) бўлган ўта кичик бурчак тафовутли (10^{-4} рад дан кичик) ва юқори интенсивликли гамма-нурлар дастаси зарур. Бу эса етарлича қувватга эга гамма-квантлар манбаини, узун экспериментал канал мавжудлигини, аниқ гониометрларни талаб қилади.

Қаттик рентген нурланишлар оптикасидаги замонавий ютуқлар электромагнит спектрнинг гамма диапазонида мавжуд назарияни экстраполяция қилиш учун олд шартларини яратади. Хақиқатдан ҳам ҳозирда қаттик рентген нурланишлар оптикаси энергияси 80 кэВ гача бўлган нурланишларни самарали йуналтиришга қодир ва бу энергия электромагнит спектрнинг гамма-диапазоннинг шартли чегарасига жуда яқин (100 кэВ).

Диссертациянинг «**Экспериментни қуйилиши ва моделлаштириш. Методологик саволлар**» иккинчи бобида қуйидагилар кўриб чиқилган:

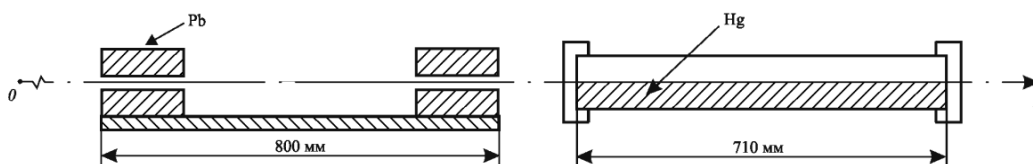
- экспериментал қурилма;

- эксперимент геометрияси;
- электронлар тормозли нурланишлар спектрини моделлаштириш;
- экспериментни компьютер моделлаштириш;
- методологик тадқиқотлар (Электронларнинг тормозли нурланиш спектрлари, қайд қилиш эффективлиги);
- электронлар дастасини транспортировка қилиш ускунанинг магнитооптик қисмлари модернизацияси.

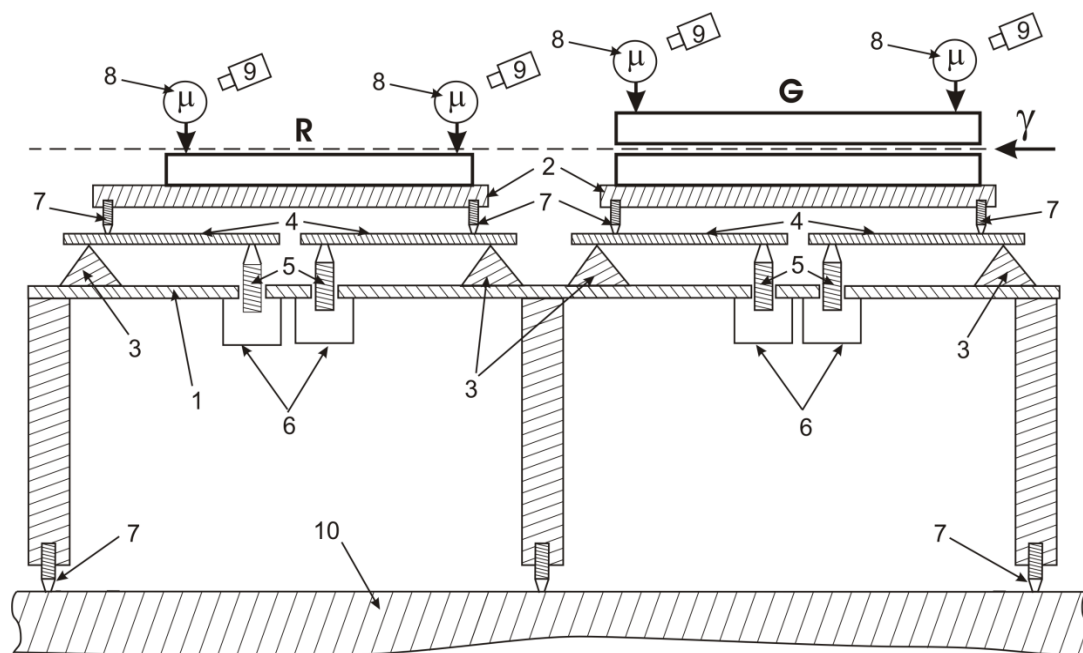


2-рasm. Эксперимент схемаси

2-рasmда эксперимент схемаси кўрсатилган. Микротрон МТ-22С тезлатгичда хосил бўлган 6,25 МэВ энергияли 1-5 мкА ток кучига эга электронлар дастаси магнитооптик тизими ёрдамида, диаметри 40 мм ва қалинлиги 1 мм бўлган вольфрам дискга йуллантирилади. Генерацияланган электронларнинг тормозли нурланиши (ЭТН) туташ узлуксиз энергетик спектр (5-рasmга қаранг) ва етарлича катта бурчак апертурасига эга (6-рasmга қаранг). Гамма нурланишнинг суяқ симоб юзасидан тўлиқ ташқи қайтиш критик бурчак 100 мкрад дан кичик ва шунинг учун экспериментни ўтказиш учун бурчак апертураси ~ 100 мкрад ва ундан кичик бўлган гамма-нурлар дастаси талаб этилади. Шунинг учун ЭТН тирқишли коллиматор тизимидан ўтади. Тирқишли коллиматор тизими (3-рasmга қаранг) бир-биридан 0,6 м масофада қўйилган икки қургошин тирқишли коллиматордан, ҳар бир тирқишли коллиматор эса иккита, оралиги 20 мкм бўлган, $100 \times 50 \times 20$ мм ўлчамига эга қургошин пластинкалардан иборат. Бу тирқишли коллиматор тизимнинг бурчак апертураси (геометрияси) $\delta = 25$ мкрад ни ташкил қилади. ЭТН нинг шаклланган дастаси рефлекторга тушади. Рефлектор сифатида узунлиги 710 мм, ички диаметри 30 мм бўлган симоб қўйилган ва икки ени 500 мкм пластик билан герметик ёпилган алюмин цилиндр қўлланган. Шаклланган ЭТН дастаси симобли рефлектор юзасига тушиш бурчаги (0-300 мкрад) микрометрли кўтариш механизми орқали ўзгартириб борилади (4-рasmга қаранг).



**3-расм. Тирқишли коллиматор ва симобли
рефлектор конструкцияси**



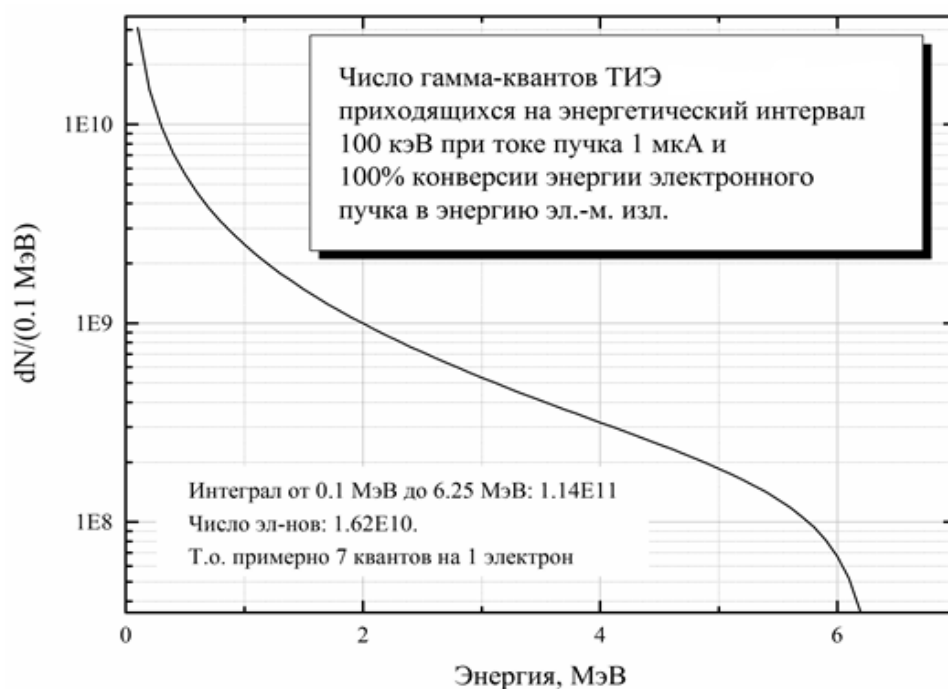
1- стол, 2-платформа, 3-айланиш ўқи, 4-дастаклар, 5-кўтариш винтлари, 6-
электродвигателлар, 7-созлаш винтлари, 8-микрометрлар, 9-видеокамера,
10-хона поли

**4-расм. Тирқишли коллиматорни G ва рефлекторни R созлаш
схемаси**

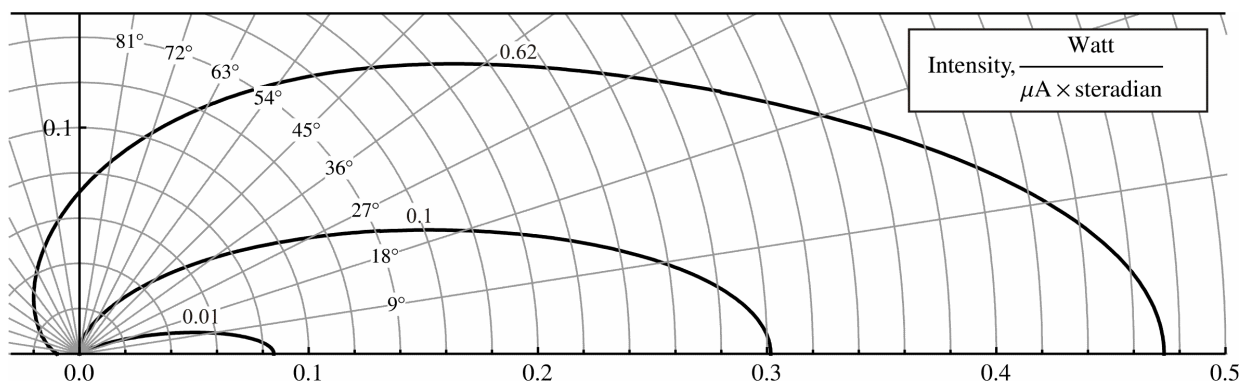
ЭТН шаклланган дастасининг рефлектор юзасига тушиш бурчаги жуда кичик (100 мкрад дан кам) бўлгани сабабли рефлектордан қайтаётган нурланишларни қайд қилиш учун катта масофа талаб этилади. Шунинг учун детекторлаш қурилмаси рефлектордан 118 м масофада жойлашган.

Диссертациянинг «**Эксперимент натижалари. Гамма-квантларни тўлиқ ташқи қайтиши**» учинчи бобида экспериментал тадқиқот натижалари, уларнинг таҳлили ва физикавий талқини келтирилган.

7-расмда (тушиш бурчаклари 33,83 ва 140 мкрад) рефлекторсиз ва рефлектор ўрнатилган ҳолатлар учун ЭТН шаклланган дастасининг энергетик бурчак тақсимооти келтирилган. 200-700 кэВ энергия диапазонида тўлиқ ташқи қайтиш пики 33 ва 83 мкрад да аниқ кузатилди. Олинган натижалар рентген нурланишларининг тўлиқ ташқи қайтиши назариясини гамма-диапазонига экстраполяция қилиш мумкинлигини тасдиқлайди.

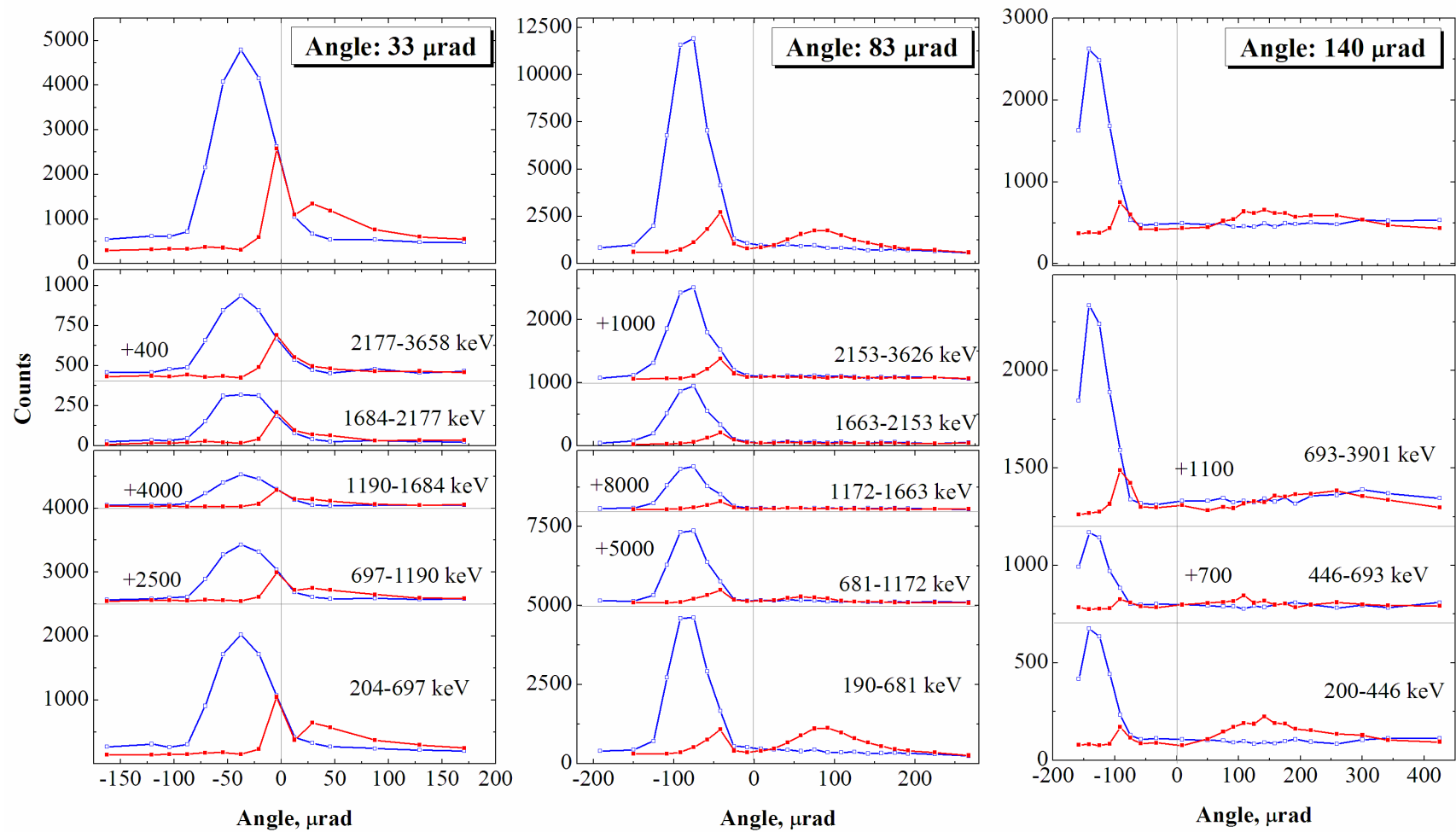


5-расм. 100 кэВ энергетик диапазонга тўғри келувчи гамма-квантлар сони

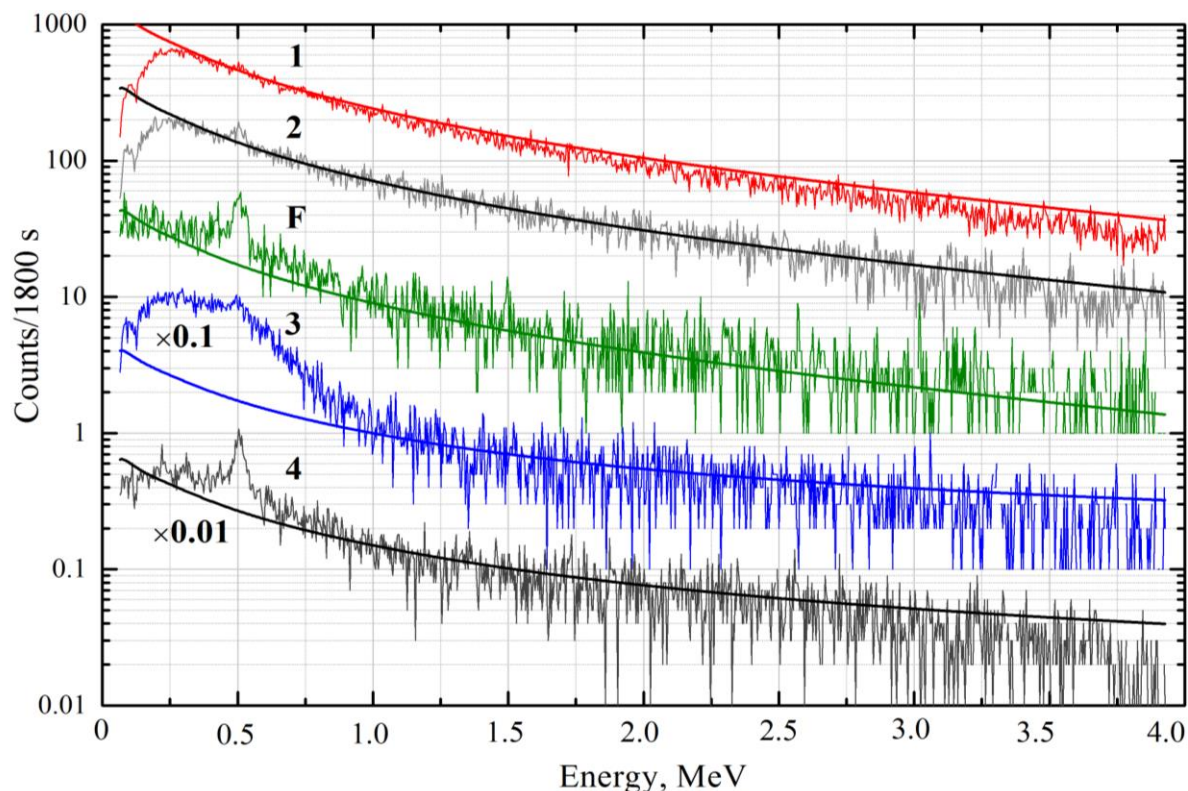


6- расм. ЭТН қувватининг гамма-квант эмиссия бурчагига боғлиқлиги (электронларнинг кинетик энергияси 6,25 МэВ). Торзмозли нишон қалинлиги радиацион узунлик бирликларида кўрсатилган

Тушиш бурчаги 83 мкрад бўлган (7- расм, ўртадаги колонка) энергетик бурчак тақсимотини кўриб чиқамиз. Шаклланган ЭТН дастасининг пики рефлексорсиз ҳолатда (кўк чизик) ≈ -80 мкрад позицияда жойлашган. Рефлексор ўрнатилгандан сўнг энергетик-бурчак тақсимоти сезиларли даражада ўзгаради (қизил чизик). Кутилаётгандек, бирламчи нурлар дастаси рефлексордаги томонидан «кесилган», аммо $\approx +80$ мкрад позицияда янги пик аниқ кўринади. Бу пик тўлиқ ташқи қайтиш пики деб талқин қилинади. Бир томондан тушиш бурчаги қайтиш бурчагига тенг, бошқа томондан у 700 кэВ дан кам энергияли гамма-квантларда кузатилади ва бу назарий ҳисобларга мос келади.



7-расм. Шаклланган γ -квантлар дастаси интенсивлигининг рефлексорсиз U_g (кўк чизик) ва рефлексор ўрнатилган U_r (қизил чизик) ҳолатлар учун ўлчанган бурчак тақсимооти

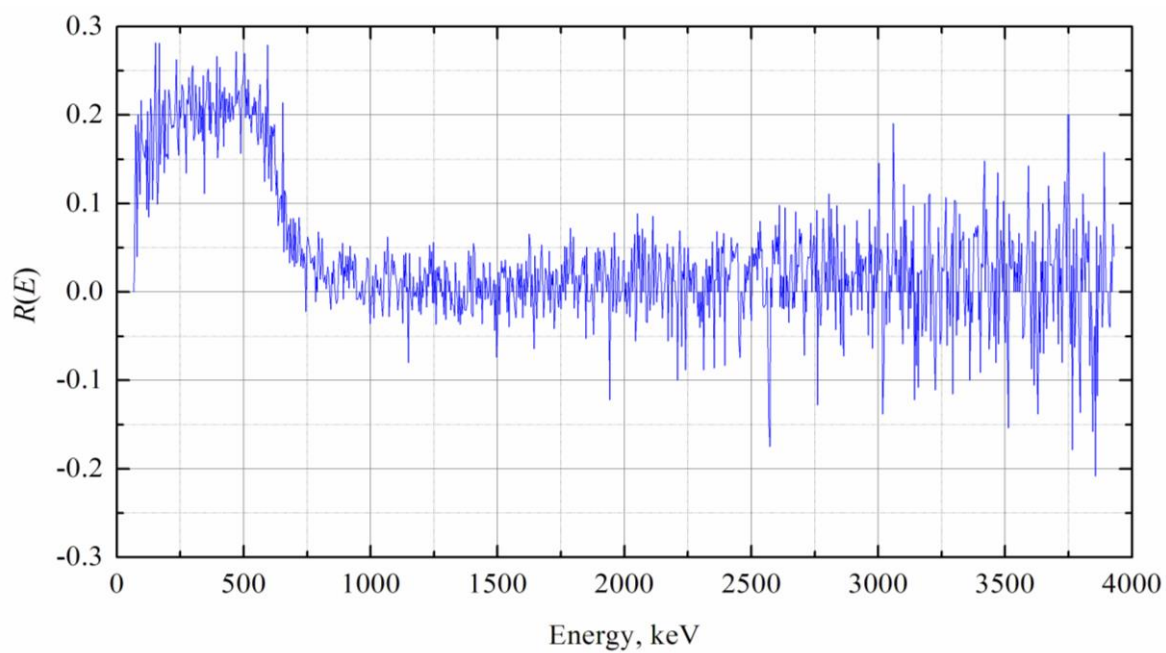


8-расм. ЭТН дастаси спектрлари

- 1 (қизил) – 83 мкрад позициядаги спектр (пик рефлекторсиз);
- 2 (оч кулранг) – 55 мкрад позициядаги спектр (рефлектор ўрнатилган);
- F (яшил) - +253 мкрад позициядаги спектр (фон, рефлекторсиз);
- 3 (кўк) - +83 мкрад позициядаги спектр (ТТҚ пики, рефлектор ўрнатилган)
- 4 (кулранг) - +83 мкрад позициядаги спектр (рефлекторсиз)

8-расмда шаклланган ЭТН дастасининг рефлекторсиз ва рефлектор ўрнатилган ҳолатлари учун ҳар хил позициядаги спектрлари келтирилган. Расмдан кўриниб турибдики, ЭТН нинг шаклланган дастаси (қизил эгрилик) Шифф формуласи билан яхши аппроксимация қилинади. Рефлектор ўрнатилган ҳолатида ЭТН дастаси спектрнинг сезиларли даражада трансформацияси кузатилади (кўк чизик), яъни кичик энергияли гамма квантларнинг (700 кэВ гача) интенсивлиги рефлекторсиз ҳолатига нисбатан (кулранг чизик) кўпаяди. Уш бу энергетик тақсимотининг анизотропияси рефлектордан гамма квантлар қайтиши билан ифодаланади.

Симоб юзасидан қайтган 83 мкрад бурчак остида тушаётган γ -квантларнинг қайтиш коэффицентини баҳолаш учун фон спектрини ажратган ҳолда (8-расмдаги яшил чизик) қайтган нурланиш спектрни (8-расмдаги кўк чизик) бирламчи нурланиш спектрга (8-расмдаги қизил чизик) бўлиш мумкин. Бу амал 9-расмда келтирилган. Энергияси 700 кэВ дан кичик бўлган 83 мкрад бурчак остида тушаётган γ -квантларнинг қайтиш коэффицентини 20 % ни ташкил қилади.



**9-расм. γ -квантларнинг қайтиш коэффициентининг энергетик
боғланиши**

ХУЛОСА

«Суюқ симоб юзасидан гамма-нурларнинг қайтишини экспериментал кузатилиши» мавзусидаги физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси доирасида ўтказилган тадқиқотлар асосида қуйидагиларни хулоса қилиш мумкин:

1. Электронлар тормозли нурланишнинг симоб юзаси билан ўзаро таъсири жараёнини экспериментал ўрганишнинг математик модели яратилган.
2. Электронлар дастасини транспортировка қилиш ускунанинг магнитооптик қисмлари тубдан модернизация қилинган.
3. Бурчак апертураси < 100 мкрад бўлган электронлар тормозли нурланиш дастасини шакллантириш технологияси яратилган.
4. 33, 83 ва 140 мкрад бурчак ости тушаётган электронлар тормозли нурланишнинг симоб юзаси билан ўзаро таъсири жараёни экспериментал ўрганилган.
5. Энергияси 200-600 кэВ бўлган 83 мкрад бурчак остида симоб юзасига тушаётган γ -квантларнинг қайтиш коэффицентлари аниқланган.
6. Экспериментал тадқиқот натижалари асосида қуйидагини сўзсиз таъқидлаш мумкин: *«Энергияси 200-600 кэВ диапазонида бўлган гамма квантлар 33 ва 83 мкрад бурчак остида симоб юзасига тушганда Тўлиқ Таиққи Қайтиши ходисаси кузатилади»*. Олинган натижалар физиканинг янги «гамма-оптика» йўналишининг яратилиш имкониятини беради.

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

САМАРКАНДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

СУЛЕЙМАНОВ РЕНАТ ДАМИРОВИЧ

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ ОТРАЖЕНИЯ
ГАММА ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОЙ РТУТИ**

01.04.08 - Физика атомного ядра и элементарных частиц. Ускорительная техника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам

Ташкент – 2021

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за номером B2020.2.PhD/FM509.

Диссертация выполнена в Самаркандском государственном университете.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, английский, русский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (www.inp.uz) и Информационно-образовательном портале «Ziyonet» (www.ziyonet.uz).

Научный руководитель:	Муминов Толиб Мусаевич доктор физико-математических наук, профессор, академик.
Официальные оппоненты:	Артемьев Сергей Викторович доктор физико-математических наук, профессор Полвонов Сатимбой Ражапович кандидат физико-математических наук, профессор
Ведущая организация:	Физико-технический институт НПО «Физика-Солнце» АН РУз

Защита диссертации состоится «___» _____ 2021 году в ___ часов на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 при Институте ядерной физики (Адрес: 100174, г. Ташкент, пос. Улугбек, ИЯФ. Тел.: (+99871) 289-31-41, факс: (+99871)289-36-65; e-mail: info@inp.uz).

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

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2021 г.
(Реестр протокола рассылки № _____ от _____ 2021 г.).

М. Ю. Ташметов
Председатель Научного совета по присуждению
ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

О.Р. Тожибоев
Ученый секретарь Научного совета по присуждению
ученых степеней, PhDф.-м.н.

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

ВВЕДЕНИЕ(аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. Во всех диапазонах электромагнитного излучения явление зеркального отражения хорошо изучено и используется в самых различных практических целях (микроскопы, телескопы, тепловизоры, радиосвязь). Однако в диапазоне жёсткого рентгеновского и гамма-излучения это явление до настоящего времени не было обнаружено. Это связано с тем, что с ростом энергии квантов рентгеновского излучения уменьшается длина волны, которая становится меньше размеров межатомных расстояний, а длина волны гамма-квантов уже сопоставима с размерами субатомных частиц. В последние годы были созданы составные преломляющие линзы, способные фокусировать рентгеновское излучение с энергией вплоть до 40 кэВ. Зеркала «косого» падения, используемые в рентгеновской астрономии, фокусируют излучение с энергией до 80 кэВ. Тем не менее в научной литературе отсутствует информация о фокусирующих системах для излучения с энергией более 100 кэВ. Также не существует строгой и последовательной теории полного внешнего отражения (ПВО) для гамма-излучения. Таким образом, вопрос о существовании зеркального отражения гамма-излучения остается открытым, что обуславливает актуальность исследований в этой области.

В настоящее время в мире проводятся многочисленные исследования по поиску эффективных материалов, применимых для жесткого рентгеновского диапазона и созданию рентгенооптических систем. Изучение отражения гамма-квантов от макроскопически гладких поверхностей требует наличия интенсивного источника гамма-излучения, прецизионной системы позиционирования и достаточно большой пролётной базы (~100 метров и более).

На протяжении последних лет в Узбекистане проводятся работы по изучению рассеяния гамма-излучения на сверхмалые углы от ряда материалов. В Самаркандском государственном университете, располагающим достаточно мощным электронным ускорителем с примыкающим к нему подземным 320 метровым пролётным каналом, получены важные результаты по экспериментальному определению коэффициентов отражения гамма-квантов от поверхности жидкой ртути, которые позволяют оценить возможности создания гамма-оптических систем. Востребованность этих исследований обусловлена их прикладным значением в области медицинской диагностики и терапии, неразрушающем контроле материалов и технологических процессов, ядерной энергетики.

Исследования, проведенные в данной диссертационной работе, соответствуют задачам, предусмотренным в Указе Президента Республики Узбекистан № УП-4947 от 2 февраля 2017 года «О стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017–2021 годы», Постановлениях Президента Республики Узбекистан № ПП–2789 от 17 февраля 2017 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности

Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности», № ПП-4492 «Об утверждении стратегии развития кадрового потенциала для ядерно-энергетической программы Республики Узбекистан» от 16 октября 2019 года, а также других нормативно-правовых документах, принятых в данной области.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Диссертационное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий в республике II. «Энергетика, энергосбережение и альтернативные источники энергии».

Степень изученности проблемы. Изучением возможности создания гамма-оптических систем занимались в ведущих научно-исследовательских центрах мира многие ученые, в частности, французские (A. Snigirev, V. Kohn, I. Snigireva, B. Lengeler, D. Habs, M.M. Günther, M. Jentschel и W. Urban, Donohue J.T.), американские (Hailey C.J. и др.), российские (Гаранин С.Ф., Кравец Е.М.) и другие.

Исследователями (A. Snigirev, V. Kohn, I. Snigireva, B. Lengeler) из Европейского центра синхротронных исследований были разработаны составные преломляющие линзы, способные фокусировать жёсткое рентгеновское излучение с энергией вплоть до 40 кэВ. В области зеркальной оптики косоугольного падения учёными (Hailey C.J. и др.) из NASA было создано рентгеновское зеркало, способное фокусировать излучение с энергией до 80 кэВ. В 2012 году международной группой исследователей (D. Habs, M.M. Günther, M. Jentschel и W. Urban) из института Лауэ–Ланжевена был проведён эксперимент, результат которого заключается в том, что для гамма-излучения с энергией 1165 и 1951 кэВ показатель преломления в кремнии достигал величины $1 + 1,48 \times 10^{-9}$ и $1 + 1,11 \times 10^{-9}$ соответственно. В настоящий момент времени (2021 г.) эта работа является единственным исследованием, посвящённым экспериментальному измерению показателя преломления гамма-излучения.

В 2013 г. в вышеуказанной работе (D. Habs, M.M. Günther, M. Jentschel и W. Urban) была обнаружена ошибка в теоретических выкладках (Donohue J.T.), а в 2016 г. было доказано, что квантово-механический эффект дельбрюксовского рассеяния не может привести к положительному значению β показателя преломления $n = 1 + \beta$ для гамма-излучения (Гаранин С.Ф., Кравец Е.М.). В итоге в 2017 г. авторы работы отозвали свои результаты ввиду ошибок эксперимента и численных расчётов. Анализ допущенных ошибок показал, что экспериментальное измерение показателя преломления гамма-излучения следует проводить на интенсивных пучках гамма-квантов имея при этом достаточно большую пролётную базу (расстояние от рефлектора/призмы до детектора). Таким образом, в настоящее время вопрос о значении величины показателя преломления для гамма-излучения остаётся открытым. При этом наибольший научно-практический интерес представляет собой измерение коэффициентов отражения гамма-излучения для тяжёлых

элементов (например, таких как ртуть) в широком диапазоне энергий гамма-квантов.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках научно-исследовательских проектов Самаркандского государственного университета по темам: № ОТ-Ф2-011 «Исследование эффекта полного внешнего отражения в гамма диапазоне электромагнитного излучения» (2007-2011), № ОТ-Ф2-16 «Исследование физической природы обнаруженного зеркального отражения гамма-квантов от гладкой аморфной поверхности» (2017-2020).

Целью исследования является экспериментальное обнаружение отражения гамма-излучения от поверхности жидкой ртути на основе измерений его энергетического и углового распределения.

Задачи исследования:

разработка математической модели эксперимента по изучению взаимодействия тормозного излучения электронов с поверхностью жидкой ртути при скользящих углах падения 0–300 мкрад;

проведение глубокой модернизации компонентов магнитооптического тракта транспортировки пучка ускорителя электронов Микротрон МТ-22 С;

разработка системы формирования пучков тормозного излучения электронов с угловой апертурой < 100 мкрад;

проведение эксперимента по изучению взаимодействия тормозного излучения электронов с поверхностью жидкой ртути при скользящих углах падения 33 и 83 мкрад;

анализ экспериментальных результатов и их физическая интерпретация.

Объектом исследования является взаимодействие гамма-излучения в диапазоне энергий $E = 0,2 - 4,0$ МэВ с поверхностью жидкой ртути.

Предметом исследования является отражение гамма-излучения в диапазоне энергий $E = 0,2 - 1,0$ МэВ от поверхности жидкой ртути при скользящих углах падения $\theta < 150$ мкрад.

Методы исследования. Использованы методы математического моделирования методом Монте-Карло; сцинтилляционная гамма-спектрометрия; стандартные методы измерения параметров электронного пучка (измерение тока пучка, нормировка на заряд и др.); методы, применяемые в ядерной электронике (синхронизация аналого-цифрового преобразователя с импульсом запуска ускорителя, дискриминация сигналов и др.).

Научная новизна исследования заключается в следующем:

впервые экспериментально доказано, что гамма-излучение в диапазоне энергий 200–600 кэВ отражается от поверхности жидкой ртути при скользящих углах падения 33 и 83 мкрад;

получена оценка значений коэффициентов отражения гамма-излучения в диапазоне энергий 200-600 кэВ от поверхности жидкой ртути при скользящем угле падения 83 мкрад;

разработана математическая модель эксперимента по изучению взаимодействия тормозного излучения электронов с поверхностью жидкой ртути, учитывающая основные ядерно-физические процессы, параметры коллимационной системы и детектирующего оборудования;

разработана система формирования пучков тормозного излучения электронов с угловой апертурой менее 100 мкрад с оптимизированными геометрическими и физическими параметрами (материал и длина коллиматоров, величина зазоров, базовые расстояния).

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

создан экспериментальный стенд для изучения взаимодействия тормозного излучения электронов с макроскопически гладкими поверхностями при сверхмалых скользящих углах падения;

разработано программное обеспечение для расчёта экспозиционной и поглощённой дозы при облучении образцов тормозным излучением электронов;

сформулированы требования к гамма-оптическим фокусирующим системам на основе измеренных значений коэффициентов отражения гамма-излучения.

Достоверность результатов исследования обеспечена достаточно большой статистикой экспериментальных данных, наличием хорошего согласования полученных экспериментальных данных с результатами моделирования методом Монте-Карло, использованием сертифицированных эталонных источников при калибровке детекторов и прецизионного измерительного оборудования.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов заключается в том, что впервые было экспериментально доказано, что гамма-излучение в диапазоне энергий 200–600 кэВ отражается от поверхности жидкой ртути при скользящих углах падения 33 и 83 мкрад. Измеренные угловые и энергетические распределения отраженных гамма-квантов имеют важное значение для теоретической интерпретации физического механизма полного внешнего отражения в диапазоне гамма-излучения.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что полученные значения коэффициентов отражения гамма-излучения позволяют провести оценку требуемых параметров к зеркальным системам, способным фокусировать (отражать) гамма-излучение в диапазоне энергий вплоть до 600 кэВ.

Внедрение результатов исследования. На основе полученных результатов по экспериментальному обнаружению отражения гамма-излучения от поверхности жидкой ртути:

экспериментальные данные по отражению жестких гамма-квантов от поверхности жидкой ртути при углах падения 33 и 83 мкрад использовались при выполнении прикладного проекта №А-3-115 «Разработка систем управления пучками жесткого гамма-излучения» (2015-2017) (Справка Министерства высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан № 89-03-4360 от 3 ноября 2020 года). Использование научных результатов позволило разработать принципиально новый способ выделения из непрерывного спектра тормозного излучения электронов его низкоэнергетической части с управляемой верхней границей;

полученные значения коэффициентов отражения гамма-излучения в диапазоне энергий 200-600 кэВ от поверхности жидкой ртути при скользющем угле падения 83 мкрад использовались при выполнении прикладного проекта №А-3-115 «Разработка систем управления пучками жесткого гамма-излучения» (2015-2017) (Справка Министерства высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан № 89-03-4360 от 3 ноября 2020 года). Установленные значения коэффициентов отражения применены для определения параметров экспериментальной установки по выделению из непрерывного спектра тормозного излучения электронов его низкоэнергетической части с управляемой верхней границей;

созданная математическая модель по изучению взаимодействия тормозного излучения электронов с поверхностью жидкой ртути была использована в рамках прикладного проекта №А-3-115 «Разработка систем управления пучками жесткого гамма-излучения» (2015-2017) (Справка Министерства высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан № 89-03-4360 от 3 ноября 2020 года). Использование научных результатов позволило модернизировать экспериментальный стенд для выделения низкоэнергетической части спектра тормозного излучения электронов;

разработанная система формирования пучков тормозного излучения электронов была использована в рамках прикладного проекта №А-3-115 «Разработка систем управления пучками жесткого гамма-излучения» (2015-2017) (Справка Министерства высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан № 89-03-4360 от 3 ноября 2020 года). Она была применена в качестве прототипа коллимационной системы экспериментального стенда по выделению низкоэнергетической части спектра тормозного излучения электронов.

Апробация результатов исследования. Результаты исследования были обсуждены на двух международных научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 13 научных работ, в том числе 7 статей в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, из них 4 статьи в зарубежных научных журналах.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка использованной литературы. Объём диссертации составляет 96 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, отражены цели и задачи, указаны объект, предмет и методы исследования, соответствие исследований приоритетным направлениям развития науки и технологий в Республике Узбекистан, раскрыта научная новизна и практическая значимость результатов работы, обоснована достоверность полученных результатов, приведены сведения об апробации работы и структуре диссертации.

В первой главе «**Краткий обзор состояния теоретических и экспериментальных исследований оптики жёсткого рентгеновского и гамма-излучения**» рассматриваются:

- сущность проблемы;
- законы классической оптики в области жёсткого рентгеновского и гамма-излучения;
- полное внешнее отражение в диапазоне мягкого рентгеновского излучения;
- краткий обзор современных достижений рентгеновской оптики;
- теоретическая возможность полного внешнего отражения в гамма-диапазоне электромагнитного излучения.

В рамках классической волновой теории полное внешнее отражение (ПВО) проявляется при падении излучения с длиной волны λ на поверхность раздела двух сред с межатомным расстоянием $d \leq \lambda$ и неровностями, не превышающими $\lambda / 8\alpha_{cr}$, под углами α меньше критического

$$\alpha_{cr} = \frac{e\hbar}{E_\gamma} \sqrt{\frac{Z N_A \rho}{A m_e \varepsilon_0}} \quad (1)$$

где e и m – заряд и масса электрона, Z , A и ρ – атомный номер, масса и плотность вещества отражающей поверхности, $\hbar$ – постоянная Планка, N_A – число Авогадро, E_γ – энергия кванта излучения, c – скорость света.

Значения критических углов ПВО с ростом энергии излучения уменьшаются.

В жёстком рентгеновском и гамма-диапазонах $\lambda \ll d$. Таким образом, условие $d \leq \lambda$ не выполняется. Казалось бы, зеркальное отражение в гамма-диапазоне в принципе невозможно. Ожидать зеркального отражения гамма-лучей от «гладкой» поверхности это всё равно, что ожидать зеркального отражения света от множества иголок, набитых в доску ровными рядами. Тем не менее, квантово-механическое рассмотрение данного вопроса показало, что

и в случае гамма-излучения при сверхмалых углах скольжения возможно проявление ПВО, обусловленное возрастанием роли рэлеевского рассеяния, а выражение (1) остаётся справедливым (Аркадьев В.А. О полном внешнем отражении гамма-квантов от поверхности // Письма в журнал технической физики, 1986. -№ 12 (21). -С. 1307-1311).

В соответствии с этим, ожидаемые для гамма-квантов с энергиями $E \sim 0,1-10$ МэВ значения критического угла ПВО имеют сверхмалые значения $\alpha_{cr} \sim 10^{-6} - 10^{-4}$ рад (см. рис 1).

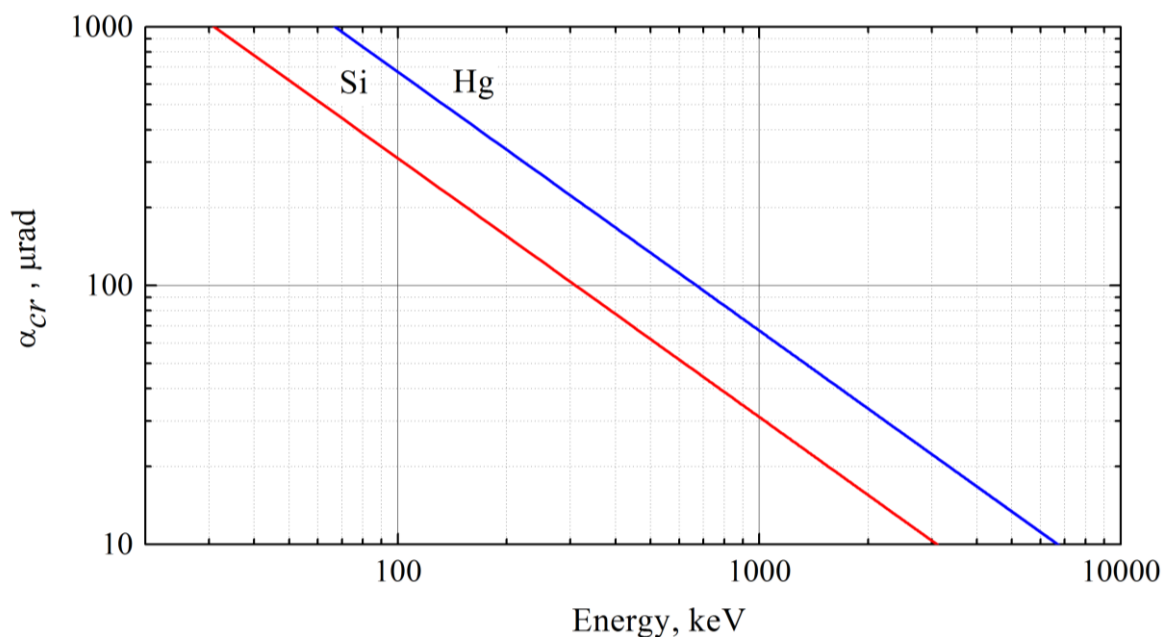


Рис. 1. Энергетическая зависимость критических углов ПВО (для кремния и жидкой ртути)

Известна лишь одна работа 1985 года (Глебов В.И. и др. Отражение гамма-излучения от границы раздела двух сред // Журнал технической физики, 1985. - № 55 (9). - С. 1785-1792), в которой установлено слабое искажение углового и энергетического распределения гамма-излучения 122 кэВ ^{57}Co , рассеянного от плоскости на угол $\alpha < 3 \times 10^{-4}$ рад. Оно интерпретировано, как проявление ПВО. Однако этот результат не убедителен и дальнейших работ, подтверждающих обнаружение ПВО гамма-излучения, не последовало. Таким образом, вопрос о существовании зеркального отражения гамма-излучения остался открытым.

Ответ на этот вопрос может быть получен только путём тщательного экспериментального исследования процесса взаимодействия гамма-излучения с плоской поверхностью при сверхмалых углах падения.

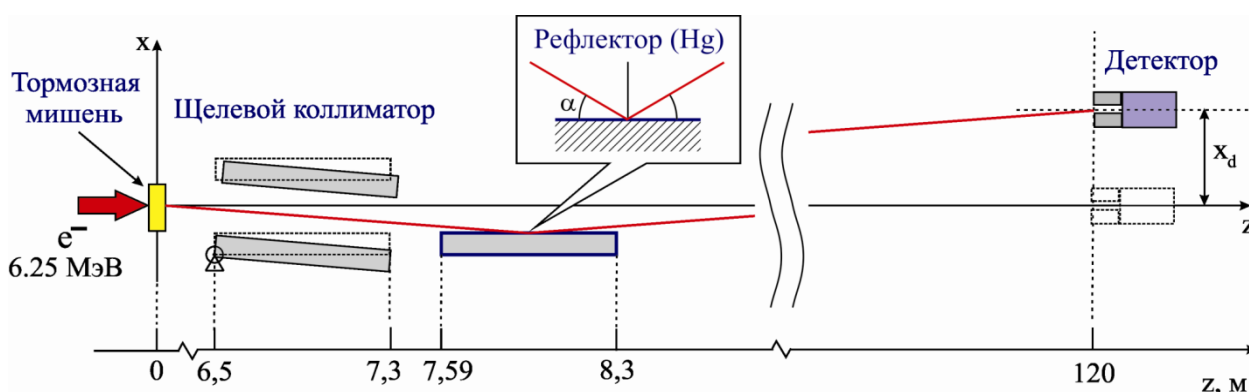
Для таких экспериментов необходимы очень узкие (шириной 10-20 мкм) пучки гамма-излучения со сверхмалой угловой расходимостью (менее 10^{-4} рад) и высокой интенсивностью, а это требует сочетания достаточно мощного источника гамма-квантов, протяжённой пролётной базы

и прецизионных гониометров. По-видимому, отсутствие сочетания этих условий и объясняет тот факт, что явление ПВО в гамма-диапазоне до настоящего времени не обнаружено.

С другой стороны, современные достижения оптики жёсткого рентгеновского излучения создают предпосылки для экстраполяции существующей теории на гамма-область электромагнитного спектра. В самом деле, оптика жёсткого рентгеновского излучения в настоящее время способна эффективно фокусировать излучение с энергией до 80 кэВ, что уже весьма близко к условной границе «начала» гамма-области электромагнитного спектра (100 кэВ).

Во второй главе «Постановка и моделирование эксперимента. Методические вопросы» рассматриваются:

- экспериментальная установка;
- геометрия эксперимента;
- моделирование спектров генерируемого тормозного излучения электронов;
- компьютерное моделирование эксперимента;
- методические исследования (спектры тормозного излучения электронов, эффективность регистрации);
- модернизация магнитооптического тракта транспортировки электронного пучка.



На рис. 2 приведена схема эксперимента. Пучок электронов с энергией 6,25 МэВ и током пучка 1-5 мкА, получаемый на ускорителе электронов Микротрон МТ-22С, выводится через магнитооптическую систему транспортировки электронного пучка к тормозной мишени, представляющей собой диск из вольфрама диаметром 40 мм и толщиной 1 мм. Генерируемое тормозное излучение электронов (ТИЭ) имеет сплошной энергетический спектр (см. рис. 5) и достаточно большую угловую апертуру (см. рис. 6). Так как ожидаемый критический угол полного внешнего отражения гамма-излучения от поверхности жидкой ртути менее 100 мкрад (см. рис. 1), то для проведения эксперимента требуется пучок гамма-излучения с угловой апертурой ~100 мкрад и менее. Поэтому пучок ТИЭ проходит через систему

щелевых коллиматоров. Система щелевых коллиматоров (см. рис. 3) представляет собой два свинцовых щелевых коллиматора разнесённых на расстояние 0,6 м, каждый из которых представляет собой две свинцовые пластины $100 \times 50 \times 20$ с вертикальным зазором 20 мкм. Угловая апертура (геометрическая) этого комбинированного коллиматора составляет $\delta = 25$ мкрад). Сформированный пучок ТИЭ падает на рефлектор, представляющий собой ртуть, залитую в герметически закрытый алюминиевый цилиндр (длиной 710 мм, внутренним диаметром 30 мм) с 500 мкм окошками из органического стекла. Угол падения (0-300 мкрад) сформированного пучка ТИЭ о поверхность ртутного рефлектора задаётся системой микрометрических подъёмных механизмов (см. рис. 4).

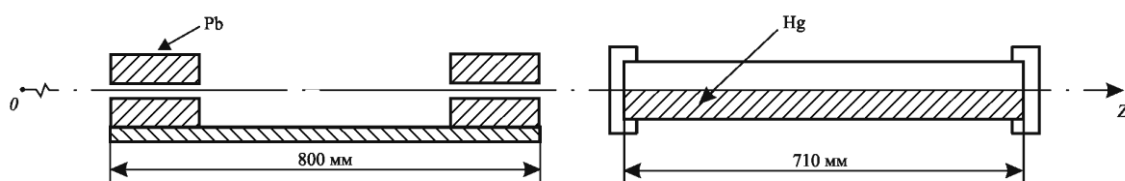
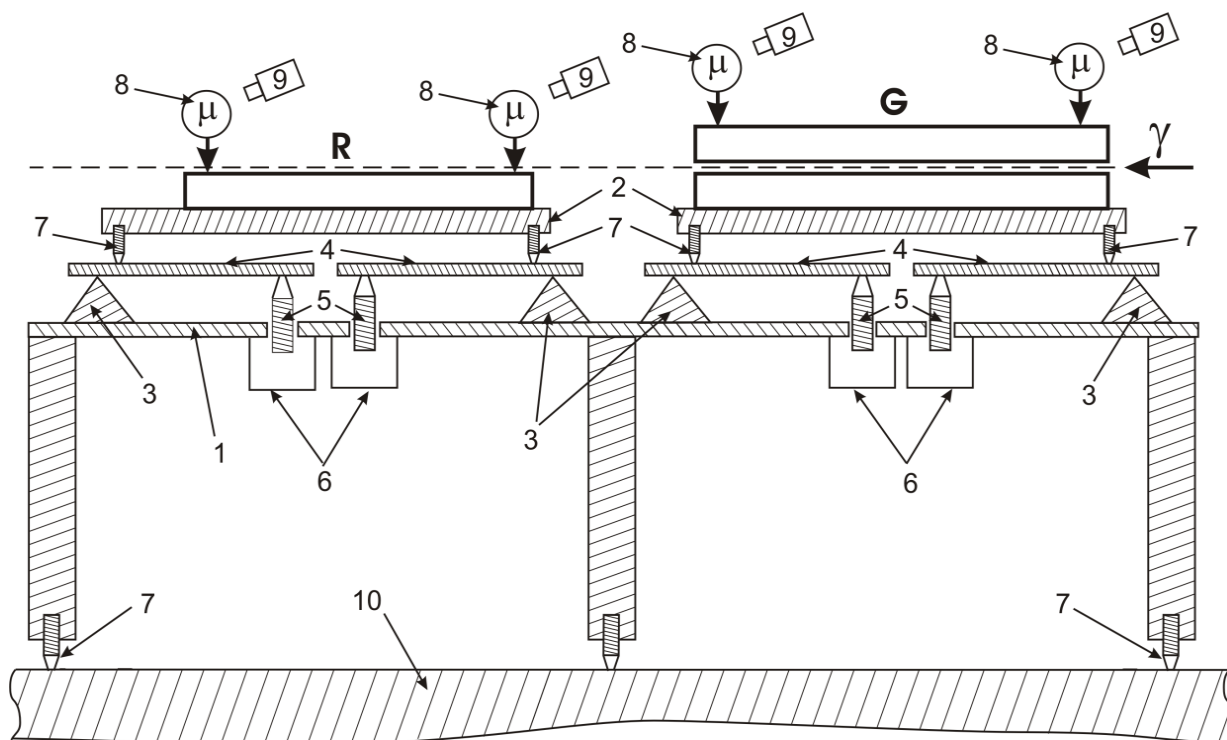


Рис. 3. Конструкция свинцового коллиматора и ртутного отражателя



1 - стол, 2 - платформа, 3 - оси вращения, 4 - рычаги, 5 - подъёмные винты, 6 - электродвигатели, 7 - регулировочные винты, 8 - микрометры, 9 - видеокамера, 10 - пол помещения

Рис. 4. Схема системы регулировки щелевого коллиматора G и отражателя R

Так как угол падения сформированного пучка ТИЭ о поверхность рефлектора крайне мал (менее 100 мкрад), то для обнаружения отражённого от рефлектора излучения требуется большое расстояние. Поэтому детектирующее оборудование располагается на расстоянии 118 метров от рефлектора.

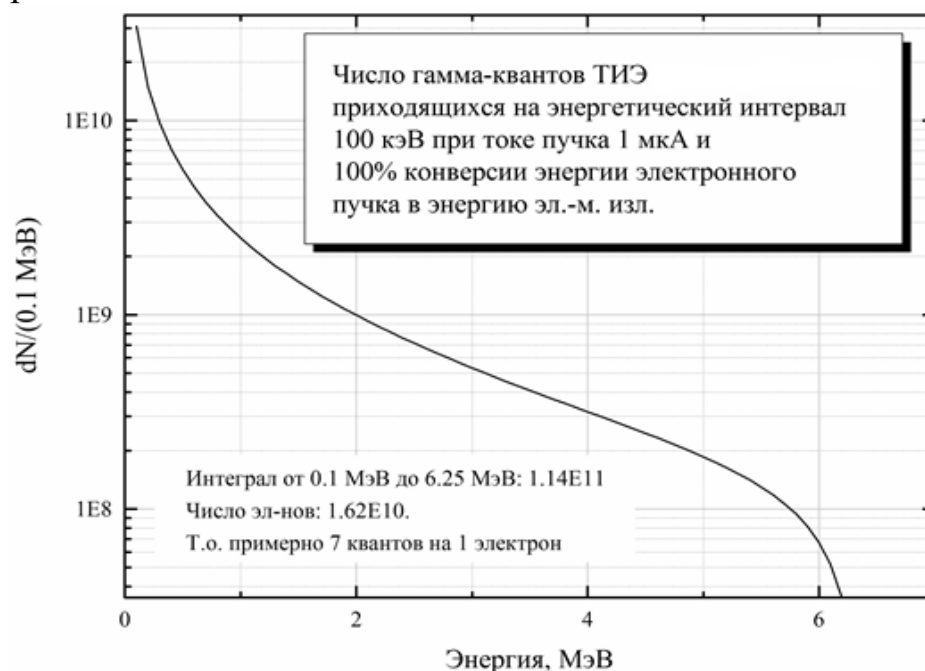


Рис. 5. Число гамма-квантов в одном акте ускорения микротрона, приходящееся на энергетический диапазон 100 кэВ

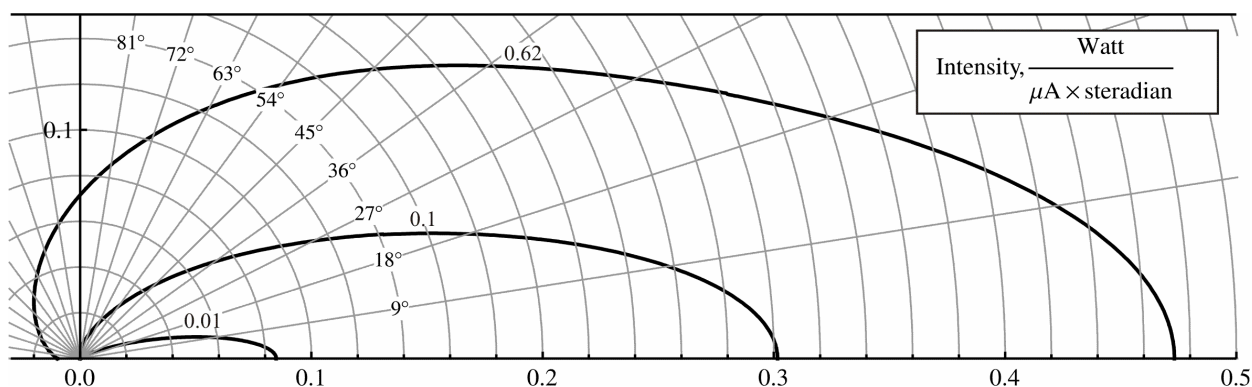


Рис. 6. Зависимость мощности ТИЭ от угла эмиссии гамма-квантов (кинетическая энергия электронов 6.25 МэВ).

Толщина тормозной мишени в ед. рад. длины указана у кривых

В третьей главе «Экспериментальные результаты. Полное внешнее отражение гамма-квантов» приводятся результаты экспериментального исследования, их анализ и физическая интерпретация.

На рис. 7 приведены энергетически-угловые распределения сформированного пучка ТИЭ при наличии и отсутствии рефлектора (при углах падения 33, 83 и 140 мкрад). Как можно видеть из рис. 7 пик полного внешнего отражения наиболее отчётливо наблюдается при углах падения 33 и 83 мкрад

в энергетическом диапазоне 200-700 кэВ, что соответствует теории полного внешнего отражения рентгеновского излучения экстраполированной на гамма-диапазон.

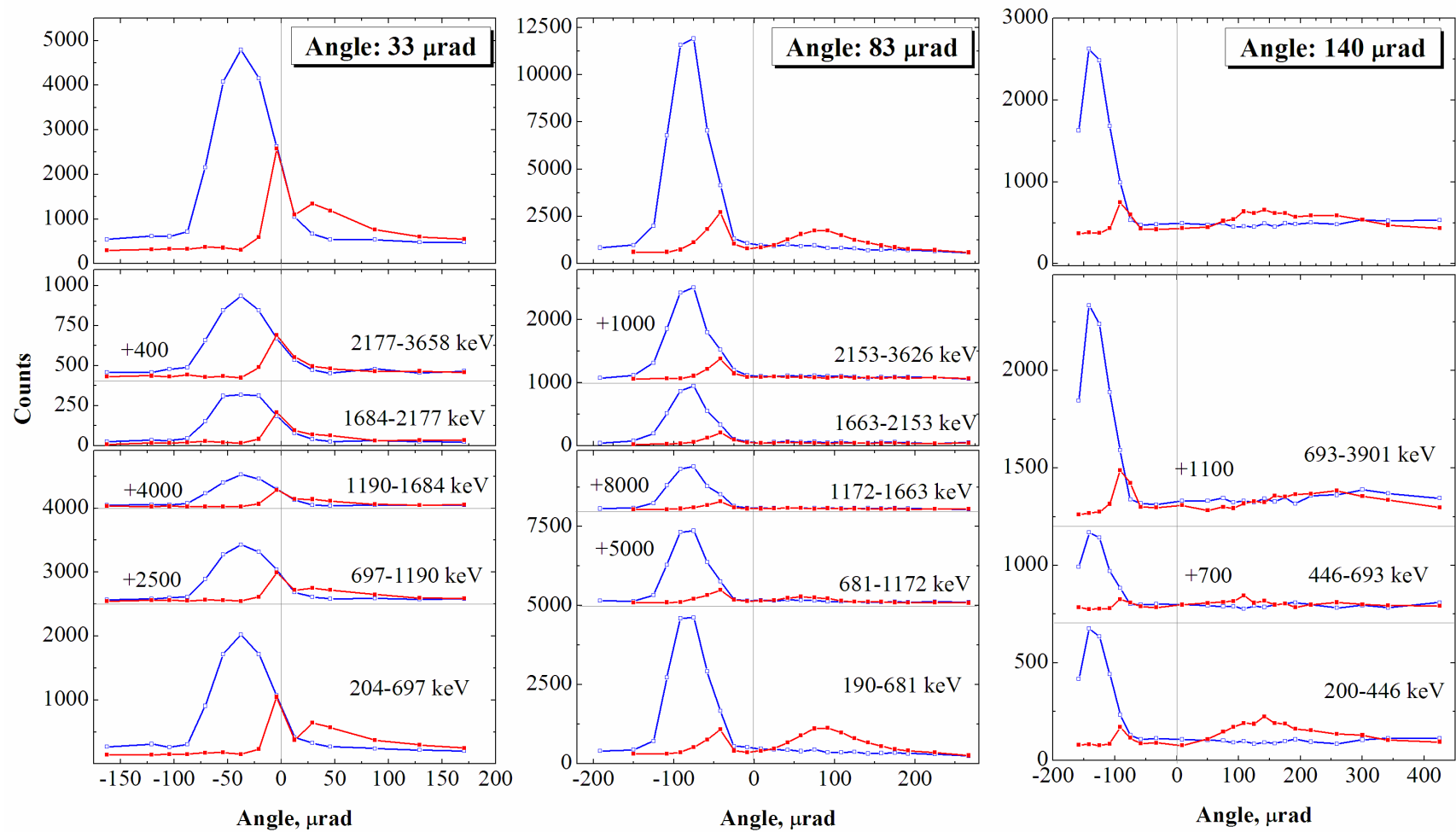


Рис. 7. Угловые распределения интенсивностей γ -квантов сформированного пучка, измеренные при отсутствии U_g (синяя линия) и наличии U_r (красная линия) рефлектора

Рассмотрим энергетически угловое распределение при угле падения 83 мкрад (рис. 7, средняя колонка). Пик сформированного пучка ТИЭ без установки рефлектора (синяя кривая) находится в позиции ≈ -80 мкрад. При установке рефлектора, энергетически-угловое распределение существенно трансформируется (красная кривая), а именно: как и следовало ожидать, происходит «обрезка» первичного пучка рефлектором, однако достаточно отчётливо виден новый пик в позиции $\approx +80$ мкрад. Этот пик может быть интерпретирован только как пик полного внешнего отражения, так как с одной стороны угол падения равен углу отражения, а с другой он наблюдается только при энергиях гамма-квантов менее 700 кэВ, что соответствует теоретическим предсказаниям.

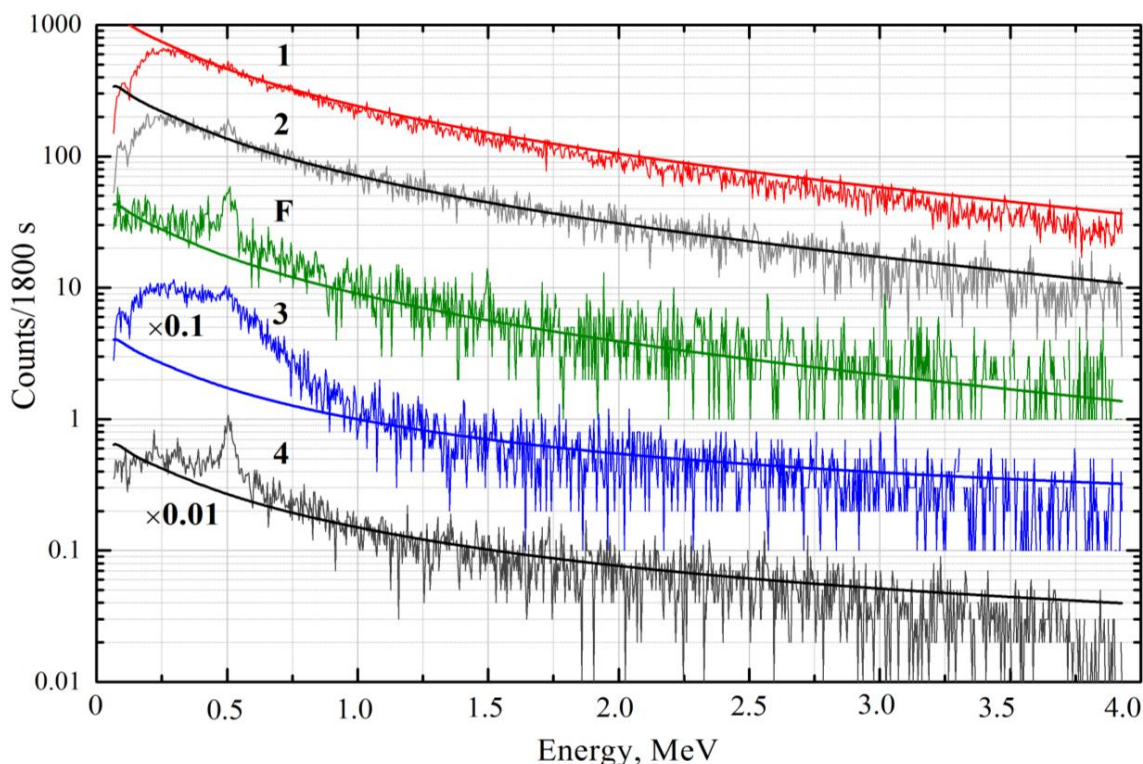


Рис. 8. Спектры пучка ТИЭ.

- 1 (красная кривая) – спектр в позиции -83 мкрад (пик, без рефлектора);
- 2 (светло серая кривая) – спектр в позиции -55 мкрад (склон, рефлектор присутствует); F (зелёная кривая) – спектр в позиции +253 мкрад (фон, без рефлектора);
- 3 (синяя кривая) – спектр в позиции +83 мкрад (пик ПВО, рефлектор присутствует);
- 4 (серая кривая) – спектр в позиции +83 мкрад (без рефлектора);

На рис. 8 представлены спектры сформированного пучка ТИЭ в различных позициях (как при наличии рефлектора, так и его отсутствии). Как можно видеть из рисунка, сформированный пучок ТИЭ (красная кривая) хорошо аппроксимируется формулой Шиффа (плавная линия у всех спектров). Внесение рефлектора существенным образом трансформирует энергетическое распределение (синяя кривая), а именно превалирует низкоэнергетическая часть в энергетическом распределении (до 700 кэВ) по сравнению со спектром

без рефлектора в той же позиции (серая кривая). Эта анизотропия в энергетическом распределении объясняется отражёнными от рефлектора гамма-квантами.

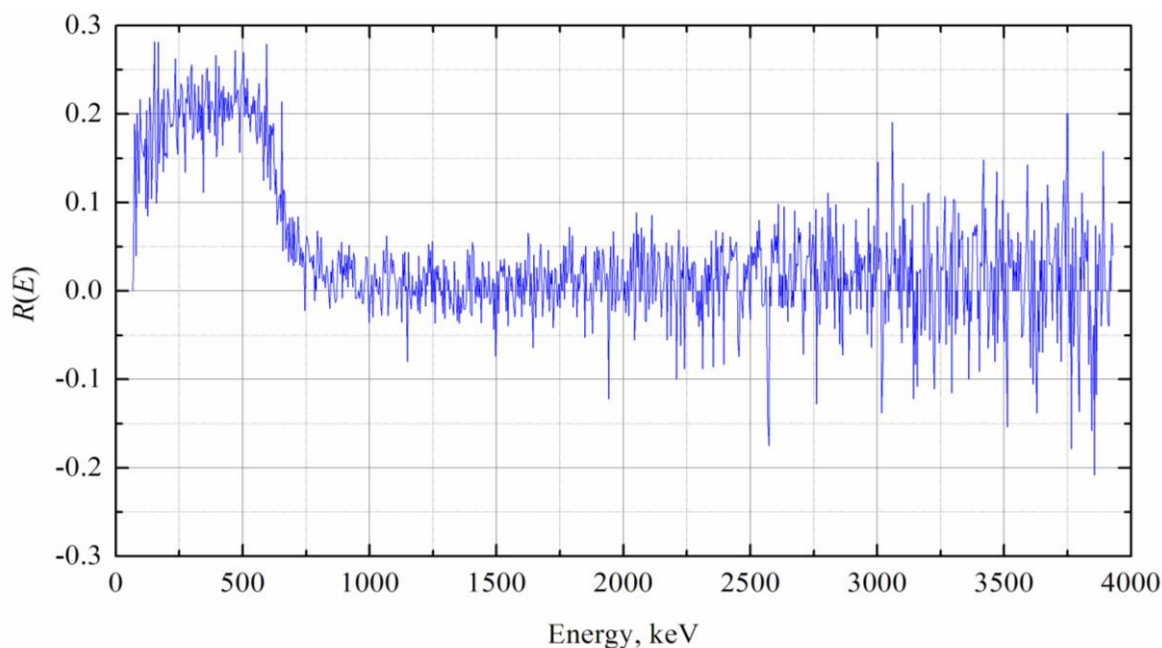


Рис. 9. Энергетическая зависимость коэффициента отражения γ -квантов

Для того чтобы оценить коэффициент отражения гамма-излучения от поверхности жидкой ртути при угле падения 83 мкрад достаточно разделить спектр отражённого излучения (рис. 8, синяя кривая) на спектр падающего (рис. 8, красная кривая) при соответствующем вычитании фоновой составляющей (рис. 8, зелёная кривая). На рис. 9 представлен результат этой операции. Как можно видеть из рисунка коэффициент отражения гамма-излучения с энергией менее 700 кэВ составляет около 20% (при угле падения 83 мкрад).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследования, проведённого по теме диссертации на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам на тему «Экспериментальное обнаружение отражения гамма излучения от поверхности жидкой ртути» получены следующие результаты:

1. Разработана математическая модель эксперимента по изучению взаимодействия тормозного излучения электронов с поверхностью жидкой ртути;
2. Проведена глубокая модернизации компонентов магнитооптического тракта транспортировки пучка ускорителя электронов Микротрон МТ-22 С;
3. Разработана технология формирования пучков тормозного излучения электронов с угловой апертурой < 100 мкрад;
4. Проведён эксперимент по изучению взаимодействия тормозного излучения электронов с поверхностью жидкой ртути при скользящих углах падения 33, 83 и 140 мкрад;
5. Получена оценка значений коэффициентов отражения гамма-излучения в диапазоне энергий 200-600 кэВ от поверхности жидкой ртути при скользящем угле падения 83 мкрад;
6. По результатам проведённых экспериментальных исследований можно однозначно заключить, что гамма-излучение в диапазоне энергий 200–600 кэВ испытывает полное внешнее отражение от поверхности жидкой ртути при скользящих углах падения 33 и 83 мкрад. Полученные результаты позволяют оценить возможности создания нового направления в физике – гамма-оптики.

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

SAMARKAND STATE UNIVERSITY

SULEYMANOV RENAT DAMIROVICH

**EXPERIMENTAL DETECTION OF THE REFLECTION OF
GAMMA RADIATION FROM THE LIQUID MERCURY SURFACE**

01.04.08 - Physics of the atomic nucleus and elementary particles. Accelerator Devices

**DISSERTATION ABSTRACT
of the doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences**

Tashkent – 2021

The dissertation theme of the doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences has been registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number No. B2020.2.PhD/FM509.

The dissertation work has been carried out at Samarkand State University.

An abstract of the dissertation in three languages (Uzbek, Russian, English (summary)) is available on the website of the Scientific Council (www.inp.uz) and on the Information and Education Portal "ZiyoNet" (www.ziynet.uz).

Scientific supervisor:

Muminov Tolib Musaevich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
professor, academician

Official opponents:

Artemov Sergey Viktorovich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
professor

Polvonov Satimboy Razhapovich

PhD in Physics and Mathematics, professor

Leading organization:

**Physical-Technical Institute of SPA "Physics-Sun"
of the Academy of Sciences of the Republic of
Uzbekistan**

The defense of the dissertation will take place on «_____» _____ 2021 at _____ at the meeting of the Scientific Council DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 at the Institute of Nuclear Physics (Address: 100214 Tashkent, Ulugbek village, Institute of Nuclear Physics; Tel. (+99871) 289-31-18; Fax: (+99871) 289-36-65; e-mail: info@inp.uz).

The dissertation is registered by the Information Resource Center (IRC) of the Institute of Nuclear Physics (registration number _____), the dissertation is available for review at IRC (Address: 100214, Tashkent, Ulugbek village, Institute of Nuclear Physics; Tel. (+99871) 289-31-19).

Abstract of dissertation was sent out on «_____» _____ 2021.

(Mailing report № _____ of «_____» _____ 2021.

M. Y. Tashmetov

Chairman of scientific council on award of scientific
degree of doctor of sciences D.Ph.M.S., professor

O.R. Tojiboev

Scientific secretary of scientific council on award
of scientific degree of doctor of sciences PhD.Ph.M.S.

I. Nuritdinov

Chairman of scientific seminar under scientific
council on award of scientific degree
of doctor of sciences, D.Ph.M.S., professor

INTRODUCTION (annotation of PhD dissertation)

The aim of the research. The purpose of this dissertation work is the experimental detection of the reflection of gamma radiation from the surface of liquid mercury based on its energy and angular distribution.

Tasks of the research:

development of a mathematical model of an experiment to study the interaction of electron bremsstrahlung with the surface of liquid mercury at grazing angles of incidence of 0–300 μrad ;

carrying out a deep modernization of the components of the magneto-optical path for transporting the beam of the electron accelerator Mikrotron MT-22 S;

development of a technology for the formation of beams of electron bremsstrahlung with an angular aperture of less than 100 μrad ;

carrying out an experiment to study the interaction of electron bremsstrahlung with the surface of liquid mercury at grazing angles of incidence 33 and 83 μrad ;

analysis of experimental results, and their physical interpretation.

The objects of the research are the interaction of gamma radiation in the energy range $E = 0.2 - 4.0$ MeV with the surface of liquid mercury.

The subjects of the research are the reflection of gamma radiation in the energy range $E = 0.2 - 1.0$ MeV from the surface of liquid mercury at grazing angles of incidence $\theta < 150 \mu\text{rad}$.

The scientific novelty of the dissertation research is as follows:

it was experimentally proved for the first time that gamma radiation in the energy range 200–600 keV is reflected from the surface of liquid mercury at grazing angles of incidence of 33 and 83 μrad ;

an estimate of the values of the reflection coefficients of gamma radiation in the energy range of 200-600 keV from the surface of liquid mercury at a grazing angle of incidence of 83 μrad is obtained;

a mathematical model has been developed for an experiment to study the interaction of electron bremsstrahlung with the surface of liquid mercury, which takes into account the main nuclear-physical processes, the parameters of the collimation system and detection equipment;

a system has been developed for the formation of beams of electron bremsstrahlung radiation with an angular aperture less than 100 μrad with optimized geometric and physical parameters (material and length of collimators, size of gaps, base distances).

Implementation of the research results. Based on the results obtained for the experimental detection of the reflection of gamma radiation from the surface of liquid mercury:

experimental data on the reflection of hard gamma quanta from the surface of liquid mercury at incidence angles of 33 and 83 μrad were used in the implementation of the following applied project: A-3-115 "Development of control systems for hard gamma radiation beams" (2015-2017) (Reference of the Ministry of Higher and Secondary Specialized Education of the Republic of Uzbekistan No.

89-03-4360 dated November 3, 2020). The results obtained made it possible to develop a fundamentally new method for separating low-energy part of gamma radiation from the continuous bremsstrahlung spectrum with a controllable upper boundary;

the obtained values of the reflection coefficients of gamma radiation in the energy range of 200-600 keV from the surface of liquid mercury at a grazing angle of incidence of 83 μ rad were used in the implementation of the applied project: A-3-115 "Development of control systems for hard gamma radiation beams" (2015-2017) (Reference of the Ministry of Higher and Secondary Specialized Education of the Republic of Uzbekistan No. 89-03-4360 dated November 3, 2020). The established values of the reflection coefficients are used to determine the parameters of the experimental setup for separating low-energy part of gamma radiation from the continuous bremsstrahlung spectrum with a controllable upper boundary;

the created mathematical model for studying the interaction of electron bremsstrahlung with the surface of liquid mercury was used within the framework of the applied project A-3-115 "Development of control systems for hard gamma radiation beams" (2015-2017) (Reference from the Ministry higher and secondary specialized education of the Republic of Uzbekistan No. 89-03-4360 dated November 3, 2020). The use of scientific results made it possible to modernize the experimental stand to separate the low-energy part of the electron bremsstrahlung spectrum;

the developed system for the formation of electron bremsstrahlung beams was used in the framework of the applied project A-3-115 "Development of control systems for hard gamma-radiation beams" (2015-2017) (Reference of the Ministry of Higher and Secondary Specialized Education of the Republic of Uzbekistan No. 89-03-4360 dated November 3, 2020). It was used as a prototype of the collimation system of the experimental stand to separate the low-energy part of the electron bremsstrahlung spectrum.

The structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, three chapters, a conclusion, a list of used literature. The volume of the dissertation is 96 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОКОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; part I)

1. Kumakhov M.A., Muminov A.T., Muminov T.M., Osmanov B.S., Safarov A.N., Skvortsov V.V., Suleymanov R.D. Simulation of total external reflection of γ -quanta //Proceedings of SPIE - International Society for Optical Engineering. – Bellingham (USA), 2005. - Vol. 5943. - pp. 46-54 (№3. Scopus; IF=0.56).
2. Алимов Г.Р., Кумахов М.А., Муминов А.Т., Муминов Т.М., Норбоев К.М., Османов Б.С., Салихбаев У.С., Сафаров А.Н., Скворцов В.В., Сулейманов Р.Д. Экспериментальное исследование рассеяния гамма-квантов тормозного излучения электронов ($E_e = 11.8$ MeV) на сверх малые углы // Журнал технической физики. – Санкт-Петербург (Россия), 2007. - № 9 (77). - С. 123-126 (№3. Scopus; IF = 0.73).
3. Muminov A.T., Muminov T.M., Norboev K., Osmanov B.S., Salikhbaev U.S., Safarov A.N., Skvortsov V.V., Suleymanov R.D. Experimental Detection of Specular Reflection of Gamma Quanta //Technical Physics. – Saint Petersburg (Russia), 2011. - Vol. 56, No. 9. - pp. 1345–1352. (№3. Scopus; IF = 0.73)
4. Muminov A.T., Muminov T.M., Muratov R.R., Norboev K.M., Salikhbaev U.S., Safarov A.N., Skvortsov V. V., Suleymanov R.D. An Experimental Setup for Studying Specular Reflection of Hard γ Quanta //Instruments and Experimental Techniques. – Moscow (Russia), 2013. - Vol. 56, No. 6. - pp. 628–633(№3. Scopus; IF = 0.56).
5. Алимов Г.Р., Муминов А.Т., Муминов Т.М., Норбоев К.М., Османов Б.С., Салихбаев У.С., Сафаров А.Н., Скворцов В.В., Сулейманов Р.Д. Новые закономерности в рассеянии γ -квантов от макроскопически гладкой поверхности // Доклады Академии наук Республики Узбекистан – Ташкент, 2007. - №3. - С.12-14 (01.00.00. №7)
6. Арзикулов Э.У., Ахатов А.Т., Муратов Р.Р., Сулейманов Р.Д., Туйманов Б. Трёхфазный тиристорный регулятор мощности с микроконтроллерным управлением. // Научный вестник СамГУ. – Самарканд, 2015. - № 5. - С. 73-78 (01.00.00. №2)
7. Арзикулов Э.У., Ахатов А.Т., Сулейманов Р.Д., Туймонов Б.Н. Прецизионный регулируемый источник стабильного тока 0-20 А. // Научный вестник СамГУ. - Самарканд, 2016. - №5. С. 37-38.(01.00.00. №2)

II бўлим (II часть; part II)

8. Муминов А.Т., Муминов Т.М., Норбоев К., Османов Б.С., Салихбаев У.С., Сафаров А.Н., Скворцов В.В., Сулейманов Р.Д. Зеркальное отражение гамма-квантов. Экспериментальное обнаружение. - Ташкент, 2008. - № Р-2-683. – 25с. (Препринт Института ядерной физики АН РУз)
9. Aliev M.K., Alimov G.R., Kumakhov M.A., Muminov A.T., Norboev K.N., Osmanov B.S., Salikhbaev U.S., Safarov A.N., Skvortsov V.V., Suleymanov R.D., Yuldashev B.S. Structure of angular distribution of electron bremsstrahlung beam formed by slit collimator. //The Sixth International Conference “Modern Problem of Nuclear Physics”: Book of Abstracts, September 19-22, 2006. - Tashkent, 2006. - pp. 76-78.
10. Aliev G.Sh., Khamrakulov Kh., Muminov A.T., Norboev K.N., Rumi R.F., Salikhbaev U.S., Safarov A.N., Skvortsov V.V., Suleymanov R.D. Angular transformation of electron bremsstrahlung spectra from slit collimator. //The Sixth International Conference “Modern Problem of Nuclear Physics”: Book of Abstracts, September 19-22, 2006. - Tashkent, 2006. - pp. 79-80.
11. Bazarbayev N.N., Muminov A.T., Muminov T.M., Muratov R.R., Norboyev K.M., Safarov A.A., Safarov A.N., Suleymanov R.D. The dependence of the specular reflection coefficient of hard gamma radiation on the surface roughness of the reflector //Ninth International Conference “Modern Problems of Nuclear Physics and Nuclear Technologies”: Book of Abstracts, September 24-27, 2019. - Tashkent, 2019. - pp. 62-64.
12. Bazarbayev N.N., Muminov A.T., Muminov T.M., Muratov R.R., Norboyev K.M., Safarov A.A., Safarov A.N., Suleymanov R.D. Formation of the bremsstrahlung by two slitcollimators //Ninth International Conference “Modern Problems of Nuclear Physics and Nuclear Technologies”: Book of Abstracts, September 24-27, 2019. - Tashkent, 2019. - pp. 104-105.
13. Suleymanov R.D., Safarov A.A. Calculation of exposition and absorbed dose of samples by bremsstrahlung irradiation // Ninth International Conference “Modern Problems of Nuclear Physics and Nuclear Technologies”: Book of Abstracts, September 24-27, 2019. - Tashkent, 2019. - pp. 188-189.