

PROTONLARNING NUR SHAKLLANTIRUVCHI QURILMALAR VA TO‘QIMAGA
EKVIVALENT MUHITLAR BILAN O‘ZARO TA‘SIRINI MONTE CARLO METHOD
YORDAMIDA MODELLASHTIRISH

N. T. To‘xtamishov²

E.X. Bozorov¹²

¹ O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasining Yadro fizikasi instituti, U. G‘ulomov ko‘chasi
1, Toshkent, O‘zbekiston, 100214

² O‘zbekiston Milliy universiteti, Universitet ko‘chasi 4, Toshkent, O‘zbekiston, 100174.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.20446370>

Annotatsiya. Hayotiy muhim va radiatsiyaga sezgir tuzilmalar hamda organlarga yaqin joylashgan o‘smalarni nurlantirish uchun proton terapiyasi seanslarida nurning nishon bilan fazoviy jihatdan aniq mos kelishini ta‘minlash zarur. Bunda doza nishon chegaralaridan tashqarida keskin kamayadi, bu esa ilgari nur terapiyasi uchun mavjud bo‘lmagan joylashuvlarni ham nurlantirish imkonini beradi. Ushbu ishda dozimetriya va nur terapiyasi sohasida sonli tajribalar o‘tkazish uchun proton nurlarining o‘tish yo‘lini modellashtirishda FLUKA dasturiy paketining imkoniyatlari Monte Carlo method yordamida ko‘rsatib berilgan.

Kalit so‘zlar: Bragg peak, proton terapiyasi, modellashtirish, doza maydoni, Monte-Karlo usuli.

Kirish

Og‘ir zaryadlangan zarrachalarning modda bilan o‘zaro ta‘siri fan va amaliyot uchun bir qator muhim kashfiyotlarga olib kelgan. 1903-yilda William Henry Bragg shuni aniqladiki, og‘ir zaryadlangan zarrachalar modda ichidan harakatlenganda, ionlanish zichligi yo‘lning oxirida keskin ortadi va maksimal energiya modda tomonidan yutiladi. Natijada, dozaning chuqurlik bo‘yicha taqsimotida maksimal ionlanish hosil bo‘ladi, bu esa Bragg peak deb ataladi.

Keyinchalik zarracha trayektoriyasi bo‘ylab ionlanish energiyasining taqsimoti tajribada o‘lchandi va bu Bragg curve deb nomlandi [1].

Ushbu kashfiyot zarrachalar yordamida amalga oshiriladigan nur terapiyasida keng qo‘llaniladi. Bunday energiya taqsimoti profilining afzalligi shundaki, nishon to‘qimani o‘rab turgan sog‘lom to‘qimalarga kamroq energiya uzatiladi. Bu esa o‘smaga yuqoriroq doza berish imkonini yaratadi, natijada nazariy jihatdan mahalliy nazorat darajasi oshadi va toksiklik darajasi past bo‘ladi.

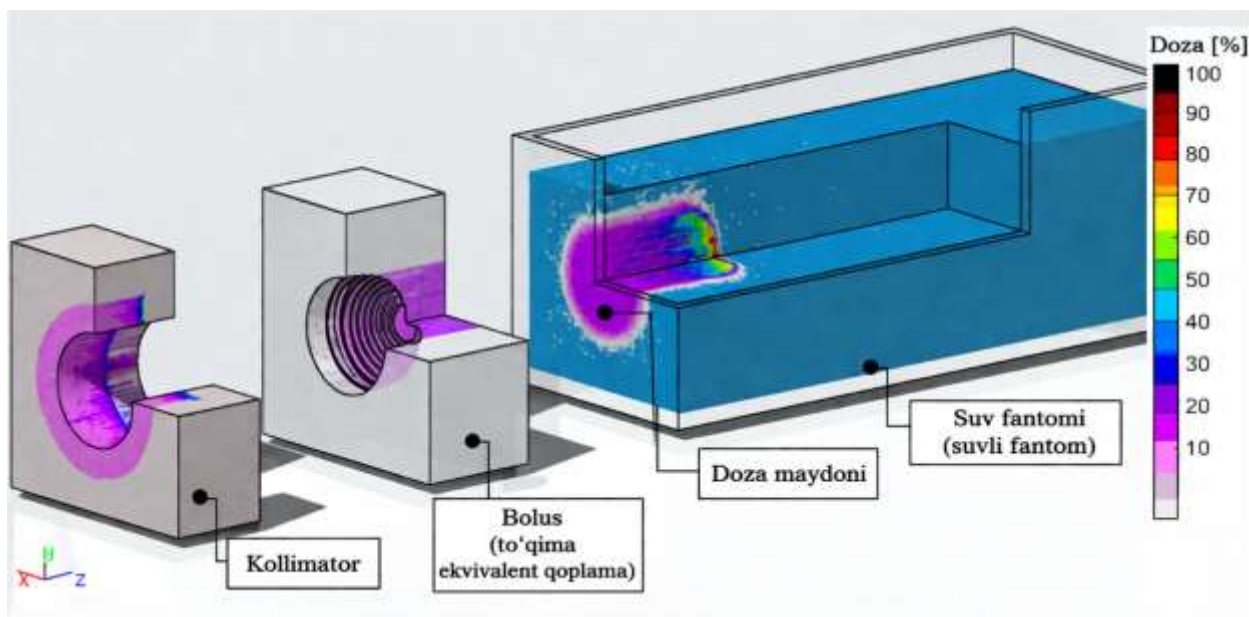
Biroq samarali davolash ehtiyotkorlik bilan olib boriladigan dastlabki tayyorgarlikni talab qiladi. Ushbu tayyorgarlikning muhim qismlaridan biri biologik to‘qimalarda sodir bo‘ladigan jarayonlarni modellashtirish hisoblanadi.

Mazkur ishning maqsadi — proton nuri beam-forming (nur shakllantiruvchi) tizimi va suv fantomi orqali o‘tishini hisoblash uchun virtual modelni ishlab chiqish hamda proton nuri parametrlariga qo‘yiladigan talablarni ishlab chiqishdan iborat.

1. Proton nuri shakllanishining virtual modelini tavsifi

Passiv sochish usulida nurning shakli nurlantirilayotgan nishon shakliga mos kelishini ta‘minlash uchun individual aperturali kollimatorlar va boluslar qo‘llaniladi (1-rasm) [2].

Individual kollimatorlar — bu nurning ko‘ndalang kesimini nishon konturiga mos ravishda shakllantirish imkonini beruvchi qurilmalardir.



1-rasm. Proton nuri shakllantirish tizimi va FLUKA dasturida hisoblangan 100 MeV energiyaga ega proton nurining doza maydoni.

Boluslar esa doza maydonining orqa chegarasini nishonning distal (chuqur) chegarasiga mos holda shakllantirish imkonini beruvchi qurilmalar bo‘lib, ular shifterni o‘xshash, ammo qalinligi o‘zgaruvchan bo‘ladi.

10×10×40 sm o‘lchamli parallelepiped shaklidagi fantom tanlab olinadi va u suv bilan to‘ldiriladi. Suv standart dozimetrik muhit sifatida xizmat qiladi.

Ushbu modelni qurish uchun yadro fizikasida qo‘llaniladigan vositalardan foydalanish taklif etiladi. Nurlanishning modda orqali o‘tish jarayonlarini o‘rganishning eng ishonchli usullaridan biri — Monte Carlo method (statistik sinovlar usuli) hisoblanadi. Bu matematik masalalarni yechishning sonli usuli bo‘lib, tasodifiy kattaliklar yordamida modellashtirish va noma’lum miqdorlar uchun statistik baholarni qurishga asoslanadi. Monte-Karlo usuli tasodifiy omillar ta’sirida kechadigan deyarli har qanday jarayonni modellashtirish imkonini beradi [3–4].

U turli zarrachalarning modda bilan o‘zaro ta’sirini modellashtirishga mo‘ljallangan ko‘plab dasturiy paketlarda qo‘llaniladi.

FLUKA — zarracha fizikasi uchun to‘liq integratsiyalashgan Monte-Karlo simulyatsiya paketidir. U yuqori energiyali eksperimental fizika va muhandislikda, himoya (shielding) hisoblarida, detektor va teleskop dizaynida, kosmik nurlarni o‘rganishda, dozimetriya, tibbiy fizika va radiobiologiyada keng qo‘llaniladi [5].

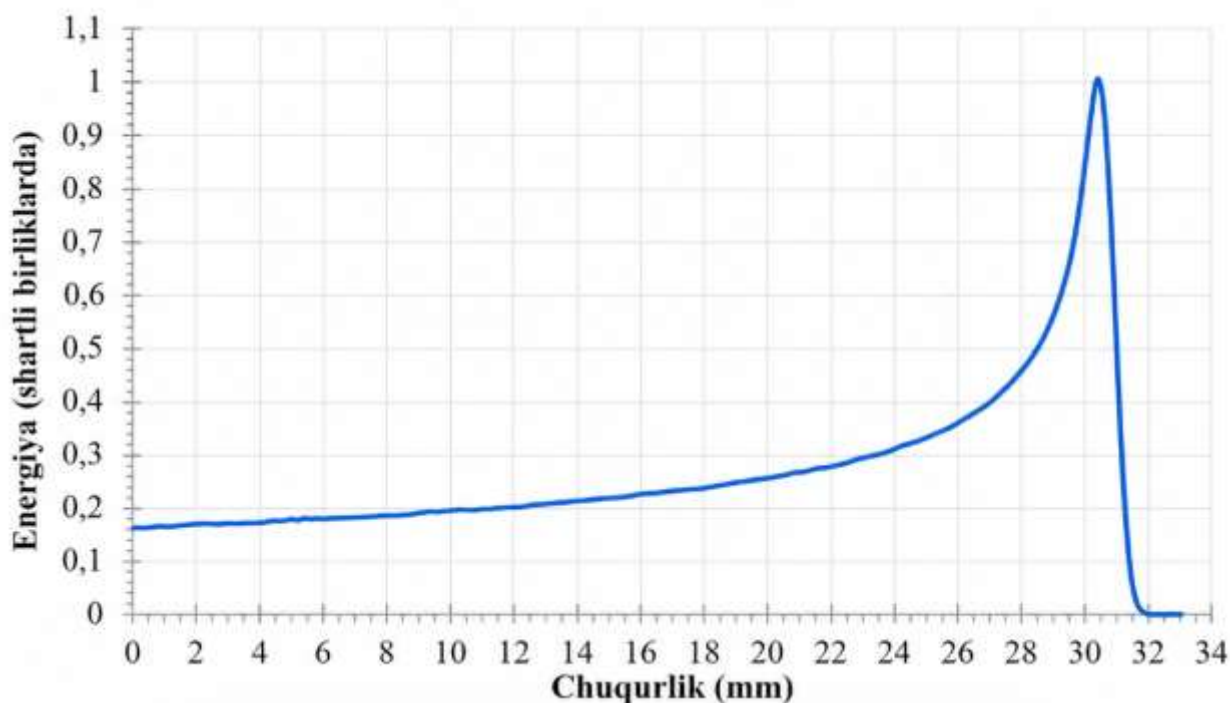
Mazkur paket hisob-kitoblarda foydalanish uchun oldindan aniqlangan 25 ta materialni taqdim etadi. Ularning aksariyati davriy jadval elementlaridan iborat, biroq turli materiallar aralashmalarini ham yaratish mumkin.

Ba'zi Monte-Karlo paketlari (masalan, Geant4, EGS, MARS) butun tajribaning geometriyasi va tuzilishini aniqlovchi maxsus dastur kodini yozishni talab qiladi. Boshqa paketlar (masalan, MCNP) esa foydalanuvchi tomonidan kiritilgan fayldan maxsus ko'rsatmalarni o'qiydi.

FLUKA ikkinchi turga kiradi, ya'ni odatiy hollarda foydalanuvchidan dasturiy kod yozish talab etilmaydi (faqat "nostandart" holatlar bundan mustasno) [6,7].

Simulyatsiyada elektromagnit jarayonlarni tavsiflovchi fizik o'zaro ta'sirlar majmuasidan foydalanilgan. Model quyidagi jarayonlarni hisobga oladi: atomlarning ionlanishi, δ -elektronlarning hosil bo'lishi, ko'p martalik sochilish (ba'zi tadqiqotlarda modeldan chiqarib tashlangan), Kompton sochilishi, tormozlanish nurlanishi (bremsstrahlung), fotoelektr effekt, juftlik hosil bo'lishi, e^+e^- annigilyatsiyasi [8].

Ishlab chiqilgan proton o'tish dasturini tekshirish uchun 60 MeV energiyali monoenergetik proton nuri uchun Bragg peak joylashuvi FLUKA yordamida hisoblab chiqildi (2-rasm) va Geant4 dasturi natijalari bilan taqqoslandi: cho'qqi joylashuvidagi farq 0,16 % ni tashkil etdi.



2-rasm. Suv muhitida 60 MeV protonlar uchun chuqurlikka bog'liq holda energiya taqsimlanishi.

Ma'lumotlar maksimal (cho'qqi) energiyaga nisbatan normallashtirilgan.

60 MeV energiyali, energiya yoyilishi 300 keV bo'lgan protonlar uchun Bragg peak joylashuvi MCNPX dasturi bo'yicha hisoblanganda, FLUKA da olingan natijadan 0,13 % ga farq qiladi. Protonlarning modda bilan o'zaro ta'sirida dozaga asosiy hissa ionlanish jarayonlari orqali qo'shiladi, biroq noelastik yadroviy jarayonlarning roli ham muhim hisoblanadi.

Bizning ishimizda olingan natijalar va [9, 10] dagi natijalar taqqoslanishi 1-jadvalda keltirilgan. Natijalar o'zaro yaxshi mos keladi. Dastur sinovidan tashqari, ushbu hisoblash amaliy xulosa chiqarishga ham imkon beradi.

Hozirgi kunda qo'llanilayotgan ko'plab rejalashtirish tizimlari, ayniqsa proton terapiyasini rejalashtirishda, analitik hisoblashlarga asoslanadi va ular hosil bo'ladigan ikkilamchi zarrachalar

hissasini hisobga olmaydi. Biroq bunday yondashuv yutilgan doza hisobida qabul qilib bo‘lmaydigan darajada katta xatoliklarga olib kelishi mumkin.

Shu sababli, yaratilgan dastur klinik amaliyotga joriy etilishidan oldin rejalashtirish tizimlarini sinovdan o‘tkazishda qo‘llanishi mumkin.

1-jadval

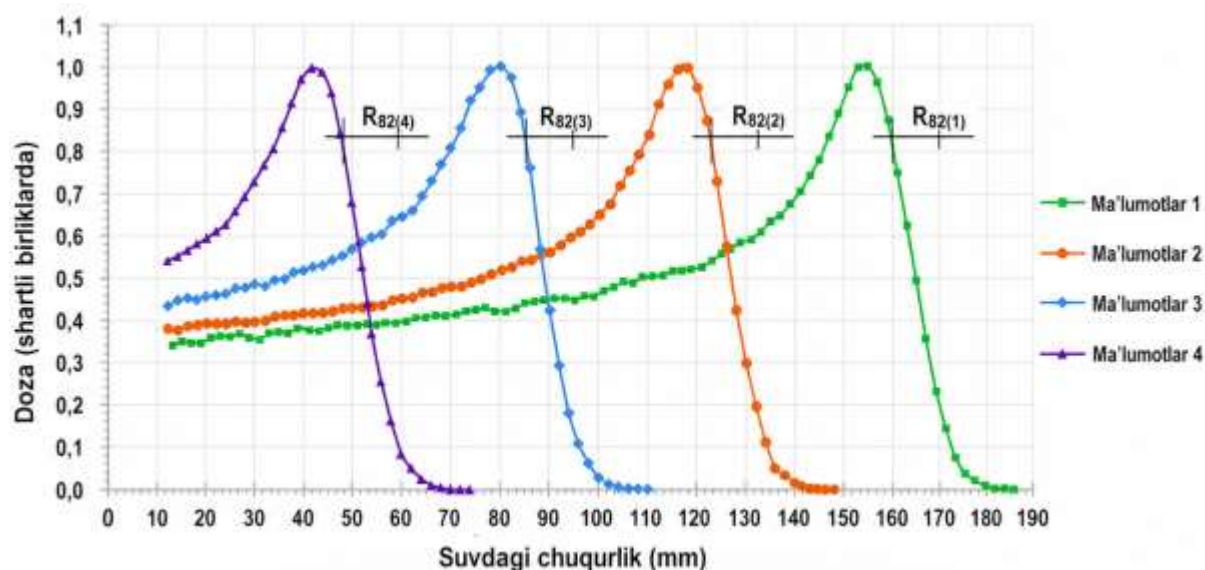
Suv muhitida 60 MeV energiyali protonlarning energiya yutilishi bo‘yicha hisoblash natijalari.

Parametr	Qiymat (FLUKA)	Qiymat (Geant4 [9])	Qiymat (Geant4 [10])
Bragg cho‘qqisi joylashuvi, mm	30,50	30,50	30,45
EBp / Een.	5,55	6,03	6,65

2. Asosiy natijalar

[11]-manbada “mini-dozograf”ni sinovdan o‘tkazish tajribasi protsedura xonasida amalga oshirilgan bo‘lib, unda taxminan 150 MeV energiyali Phasotron proton nuri chiqarilgan. Birinchi bosqichda olingan dozimetrik ma‘lumotlarning ishonchliligi baholandi. Proton nuri o‘qi bo‘ylab, “mini-dozograf” vannasi oldida, pleksiglas plastinkalar yordamida quyidagi sekinlashtiruvchi (retarder) qalinliklari o‘rnatildi: 0; 37,5; 75 va 112,5 mm (suv ekvivalenti).

Dastur yaratishda nur (beam)ni tavsiflashga alohida e‘tibor qaratildi. Dasturda u nuqtaviy manba, istalgan tekis yoki uch o‘lchamli shakldagi manba, shuningdek tezlatgich nuri sifatida ifodalanishi mumkin. Nur quyidagi parametrlar bilan tavsiflanadi: manbaning geometrik shakli va o‘lchami, zarrachalar chiqarilishining radial va burchak taqsimotini belgilovchi koeffitsiyentlar, zarrachalar energiyasi va ularning energiya yoyilishi.



3-rasm. 150 MeV energiyali proton nuri uchun chuqurlik–doza taqsimoti: retarder qalinligi 0 mm (Ma'lumotlar 1), 37,5 mm (Ma'lumotlar 2), 75 mm (Ma'lumotlar 3), 112,5 mm (Ma'lumotlar 4). R_{82} — proton nurining o'rtacha kirib borish chuqurligi. Ma'lumotlar maksimal (cho'qqi) dozaga nisbatan normallashtirilgan.

FLUKA paketi yordamida energiyasi 150 MeV va energiya yoyilishi 500 keV bo'lgan protonlar uchun, sekinlashtiruvchi qalinligining turli qiymatlarida (DATA 1–4) chuqurlik bo'yicha doza taqsimotlari olindi (3-rasmda ko'rsatilgan).

2-jadval.

Suv muhitida 150 MeV energiyali proton nuri uchun o'rtacha yo'l qiymatlari

Ma'lumot	Qalinlik, mm*	O'rtacha kirib borish R_{82} , mm* (FLUKA)	O'rtacha kirib borish R_{82} , mm* ([11])	Farq, mm*
DATA 1	0	158,9	$160,1 \pm 0,3$	1,2
DATA 2	37,5	122,1	$122,7 \pm 0,3$	0,5
DATA 3	75	84,6	$85,3 \pm 0,3$	0,7
DATA 4	112,5	47,8	$48,4 \pm 0,3$	0,6

Grafiklar qurilganda detektor oldidagi sekinlashtirgichning qo'shimcha qalinligi ham hisobga olindi. Bu analizator konstruksiyasi xususiyatlari bilan bog'liq bo'lib, vanna devori qalinligini inobatga olgan holda 13,3 mm ni tashkil etadi.

FLUKA paketi yordamida olingan natijalar va [11]-manbadagi natijalar taqqoslanishi 2-jadvalda keltirilgan. DATA 1–4 ma'lumotlari asosida chizilgan chuqurlik-doza taqsimoti egri chiziqlari bo'yicha o'rtacha R_{82} (1–4) kirib borish qiymatlari aniqlandi. Bu qiymatlar Bragg peak ning 82% darajadagi pasayish (orqa tomondan tushish) qismi asosida baholandi.

3. Xulosa

Shunday qilib, ishlab chiqilgan dasturiy paket asosida proton nuri yordamida radiatsion terapiya uchun virtual eksperimental qurilma modeli yaratildi hamda 60 MeV energiyali protonlarning o'tishi jarayonida energiya ajralishi hisoblab chiqildi. Bundan tashqari, ushbu qurilma va suv fantomi orqali o'tkazilgan holda, energiyasi 150 MeV va energiya yoyilishi 500 keV bo'lgan protonlar uchun turli sekinlashtirgich qalinliklarida chuqurlik-doza taqsimoti olindi.

Dastur FLUKA da qo'llanilgan fizik o'zaro ta'sir modellarini va nur (beam) xususiyatlarini to'g'ri tasvirlash nuqtai nazaridan sinovdan o'tkazildi. Ta'kidlash lozimki, protonlarning nurlantirilayotgan materiallar atom yadrolari bilan noelastik o'zaro ta'siri Bragg peak gacha bo'lgan hududda yutilgan dozani oshiradi.

Yadro reaksiyalari mahsulotlarining (neytronlar, alfa-zarralar, qoldiq yadrolar) yuqori nisbiy biologik samaradorligi (RBE) cho'qqigacha bo'lgan hududda, ya'ni bemorning sog'lom to'qimalari joylashgan sohada biologik dozani sezilarli darajada oshishiga olib kelishi mumkin.

Maqolada doza taqsimotini baholashning asosiy usullari bayon etilgan bo'lib, ular nurni shakllantirish tizimiga kirish qismida nur sifatiga qo'yiladigan mezonlarni ishlab chiqish imkonini beradi.

Shuningdek, turli kiruvchi nurlar uchun modulyatorning optimal parametrlarini hisoblash algoritmini yaratish ham muhim vazifa hisoblanadi.

Foydalanilgan adabiyotlar.

1. Черняев А. П. Ионизирующие излучения // Изд.3, перераб. и доп. М.: ИД КДУ, 2014.
2. А.В. Агапов, В.Н. Гаевский, И.А. Гулидов, А.В. Иглин, Е.И. Лучин, Г.В. Мицын, А.Г. Молоканов, М.А. Цейтлина, Е.П. Череватенко, С.В. Швидкий. Методика трехмерной конформной протонной лучевой терапии // Письма в ЭЧАЯ, 2004.
3. N. Metropolis, S. Ulam. The Monte Carlo Method // Journal of the American Statistical Association, Vol. 44, No. 247 (Sep., 1949), pp. 335-341.
4. И. М. Соболев. Метод Монте-Карло. // М.: Наука, 1985.
5. G. Battistoni, F. Cerutti, A. Fassò, A. Ferrari, S. Muraro, J. Ranft, S. Roesler, P. R. Sala. The FLUKA code: description and benchmarking// AIP Conference Proceedings 896, 31 (2007)
6. To'xtamishov N. T. Bozorov E. X. Energy loss mechanisms of protons in biological tissues. New Renaissance. ISSN: 3030-3753. Volume 2. Issue 12. 2025. 915-917 sahifalar. <https://zenodo.org/records/18089986>
7. Turatov H. Sh. Qalandarova D. A. Bozorov E. X. Nasirova G. M. Valiyev D. M. Ekspozitsion doza mavzusini o'qitish metodikasini takomillashtirish. Modern Science and Research. ISSN:2181-3906. Volume 4. Issue 12. 2025 1271-1280 sahifalar. <https://zenodo.org/records/18093579>
8. Курбанов Бахтиёр Ибрагимович. Туратов Хожиакбар Шавкат угли. Результаты, полученные при анализе образцов волос пациентов методом нейтронно-активационного анализа. Modern science and research. 2026. Volume 5. Issue1. 246-255-betlar. <https://doi.org/10.5281/zenodo.18253472>
9. Курбанов Б.И., Данилова Е.А., Туратов Х.Ш. Инструментальный нейтронно-активационный анализ в медицинской диагностике. //Труды Международной конференции «Перспективы использования ядерной технологии и проблемы радиационной безопасности в государствах Центральной Азии», 22-24 апреля 2025 г., г.Душанбе, Республика Таджикистан. –С. 148-152.