TEZLATKICHLARDA HOSIL QILINGAN 10–100 MeV ENERGIYALI PROTON DASTALARINING MODDA BILAN O‘ZARO TA’SIRI: ENERGIYA YO‘QOTISHI VA ZARRACHA YUGURISH MASOFASINING NAZARIY TAHLILI

G’anijonov Nurullo Usmonjon o‘g‘li[1], Erkin Xojiyevich Bozorov[2]

[1]Mustaqil tadqiqotchi,Magistr

[2]O‘zR FA Yadro fizikasi instituti Yadro tibbiyoti laboratoriyasi bosh ilmiy hodimi, O‘zMU Fizika fakulteti professori f.m.f.d.

Toshkent, O‘zbekiston

E-mail: ganijonovnurullo740@gmail.com

Annotatsiya. Ushbu maqolada tezlatkichlarda hosil qilinadigan 10–100 MeV energiyali proton dastalarining modda bilan o‘zaro ta’siri nazariy jihatdan tahlil qilinadi. Protonlarning muhitda energiya yo‘qotishining asosiy mexanizmlari — atom elektronlarini ionlashtirish va qo‘zg‘atish, atom yadrolari bilan elastik sochilish hamda noelastik yadro reaksiyalari — yoritiladi. Zaryadlangan og‘ir zarrachalarning moddadagi o‘rtacha energiya yo‘qotishini tavsiflaydigan Bethe–Bloch tenglamasining fizik mazmuni tahlil qilinadi. Protonning yugurish masofasi boshlang‘ich energiyaga, muhitning zichligiga va tarkibiga bog‘liq ekani ko‘rsatiladi. Suv muhitida 10–100 MeV energiyali protonlarning uzluksiz sekinlashish yaqinlashuvi bo‘yicha yugurish masofalari baholandi. Natijalarga ko‘ra, proton energiyasi 10 MeV dan 100 MeV gacha oshganda uning suvdagi taxminiy yugurish masofasi 0,12 sm dan 7,70 sm gacha ortadi. Proton energiyasi kamayishi bilan ionlashtirish qobiliyatining ortishi natijasida Bragg cho‘qqisi shakllanadi. Olingan natijalar proton terapiyasi, radiatsion dozimetriya, radioizotoplar ishlab chiqarish va nishon materiallarini tanlash masalalarida amaliy ahamiyatga ega.

Kalit so‘zlar: proton dastasi, zaryadlangan zarracha, energiya yo‘qotishi, to‘xtatish qobiliyati, Bethe–Bloch tenglamasi, CSDA masofa, yugurish masofasi, Bragg cho‘qqisi, proton terapiyasi, dozimetriya.

Kirish

Zaryadlangan zarrachalar tezlatkichlari yadro fizikasi, radiatsion texnologiyalar, materialshunoslik va tibbiyotda keng qo‘llaniladigan ilmiy-texnik qurilmalardir[1-3]. Elektr va magnit maydonlar yordamida tezlashtirilgan proton dastalari turli nishon moddalarga yo‘naltirilganda, protonlarning energiyasi muhit atomlari hamda yadrolari bilan o‘zaro ta’sir natijasida kamayadi. Mazkur jarayonlarni o‘rganish proton dastasining modda ichiga kirib borish chuqurligini, energiya ajralish profilini va hosil bo‘ladigan ikkilamchi nurlanishlarni baholash imkonini beradi.

10–100 MeV energiya oralig‘idagi proton dastalari siklotron va chiziqli tezlatkichlarda hosil qilinishi mumkin. Ular yadro reaksiyalarini o‘rganish, tibbiy radioizotoplar ishlab chiqarish, radiatsion tajribalar hamda biologik obyektlarni nurlantirishda qo‘llaniladi. Protonlarning modda bilan o‘zaro ta’sirida energiya yo‘qotishi va yugurish masofasini aniqlash nishon qalinligini tanlash, nurlanish dozasini hisoblash va radiatsion himoya vositalarini loyihalashda muhimdir[4].

Tadqiqotning maqsadi 10–100 MeV energiyali proton dastalarining modda bilan o‘zaro ta’siri natijasidagi energiya yo‘qotish qonuniyatlari va suv muhitidagi yugurish masofasini nazariy tahlil qilishdan iborat. Tadqiqot vazifalari protonlarning asosiy o‘zaro ta’sir mexanizmlarini aniqlash, Bethe–Bloch tenglamasini tahlil qilish, CSDA yaqinlashuvida yugurish masofasini baholash hamda Bragg cho‘qqisining amaliy ahamiyatini yoritishni o‘z ichiga oladi.

Tadqiqot metodikasi

Tadqiqot nazariy tahlil va referens ma’lumotlar asosida bajarildi. Protonlarning moddadagi energiya yo‘qotishi zaryadlangan og‘ir zarrachalar uchun qabul qilingan

Bethe–Bloch yondashuvi asosida ko‘rib chiqildi. Protonlarning suvdagi yugurish masofasi uzluksiz sekinlashish yaqinlashuvi — CSDA (Continuous Slowing Down Approximation) asosida baholandi.

Suv tadqiqot muhiti sifatida tanlandi, chunki u biologik yumshoq to‘qimalarning radiatsion xususiyatlarini dastlabki baholash uchun ko‘p qo‘llaniladi. Protonlarning turli moddalardagi to‘xtatish qobiliyati va CSDA masofalarini aniqlashda NIST PSTAR turidagi referens ma’lumotlar bazalari keng foydalaniladi.

Protonning birlik yo‘lga to‘g‘ri keladigan energiya yo‘qotishi to‘xtatish qobiliyati bilan aniqlanadi:

Bu yerda E protonning kinetik energiyasi, x esa modda ichida bosib o‘tilgan yo‘l hisoblanadi[1-3].

Protonning boshlang‘ich energiyasi E_0 bo‘lsa, uning CSDA yugurish masofasi quyidagi integral bilan aniqlanadi:

Mazkur ifoda proton energiyasining modda ichida uzluksiz kamayishini nazarda tutadi. Real sharoitda esa protonlarning ko‘p karra sochilishi, energiya fluktuatsiyasi va yadro reaksiyalari sababli yugurish masofasining statistik tarqalishi kuzatiladi.

Protonlarning modda bilan o‘zaro ta’siri

Proton modda ichidan o‘tganda uning energiyasi, avvalo, atom elektronlarini ionlashtirish va qo‘zg‘atishga sarflanadi. Ionlashish jarayonida proton energiyasining bir qismi atom elektronini atomdan uzib chiqarishga, qo‘zg‘alish jarayonida esa elektronni yuqori energetik holatga o‘tkazishga sarflanadi. Ko‘plab kichik energiyali elektromagnit to‘qnashuvlarning yig‘indisi proton dastasining umumiy energiyasini kamaytiradi.

Protonlar atom yadrolari bilan elastik Kulon sochilishiga ham uchraydi. Bu jarayonda protonning yo‘nalishi o‘zgaradi va dastaning yonlama kengayishi yuz beradi. Elastik sochilish protonning energiya yo‘qotishiga ionlashishga qaraganda

kamroq hissa qo‘shsa-da, doza taqsimotining fazoviy aniqligiga sezilarli ta’sir qilishi mumkin.

10–100 MeV energiya oralig‘ida protonlar ayrim yadrolar bilan noelastik yadro reaksiyalariga ham kirishadi. Bunday reaksiyalar $(p,n),(p,\alpha)$ va boshqa kanallar orqali neytron, gamma-kvant, alfa-zarracha yoki ikkilamchi protonlar hosil bo‘lishiga olib keladi. Ushbu jarayonlar radioizotoplar ishlab chiqarishda foydali bo‘lsa, radiatsion himoya hisoblarida ikkilamchi nurlanish manbai sifatida e’tiborga olinishi zarur.

Energiyaning yo‘qotilishi

Og‘ir zaryadlangan zarrachalarning moddadagi o‘rtacha energiya yo‘qotishi Bethe–Bloch tenglamasi bilan tavsiflanadi:

Bu yerda K — fizik doimiy, z — tushayotgan zarracha zaryad soni, Z va A — muhit atomining tartib raqami hamda massa soni, $\beta = v/c$ — proton tezligining yorug‘lik tezligiga nisbati, γ — Lorentz koeffitsiyenti, III — muhitning o‘rtacha ionlashish potensiali, δ — zichlik effekti tuzatmasi.

Mazkur tenglamada $1/\beta^2$ hadining mavjudligi muhim fizik mazmunga ega. Proton sekinlashgani sari β kamayadi va birlik yo‘lga to‘g‘ri keladigan energiya yo‘qotishi ortadi. Shunday qilib, proton dastasi o‘z yo‘lining yakuniy qismida dastlabki qatlamlarga nisbatan ko‘proq energiya ajratadi.

Protonning yugurish masofasi

Protonning moddadagi yugurish masofasi uning boshlang‘ich energiyasi ortishi bilan oshadi. Biroq bu bog‘lanish chiziqli emas. Proton energiyasi ortgan sari uning tezligi oshadi, muhit ichida energiya yo‘qotish sur’ati nisbatan kamayadi va u chuqurroq qatlamlargacha yetib boradi.

Suvda protonning yugurish masofasi energiyaga nisbatan taxminan darajali qonun bo‘yicha o‘sishi mumkin:

$$R \approx aE^n,$$

bu yerda R — yugurish masofasi, E — proton energiyasi, aaa va nnn esa muhit xususiyatiga bog‘liq empirik koeffitsiyentlardir. Ushbu yaqinlashuv dastlabki baholashlar uchun qo‘llanilishi mumkin, ammo aniq dosimetrik hisoblarda referens ma’lumotlar yoki Monte-Karlo modellari talab qilinadi.

Hisoblash natijalari

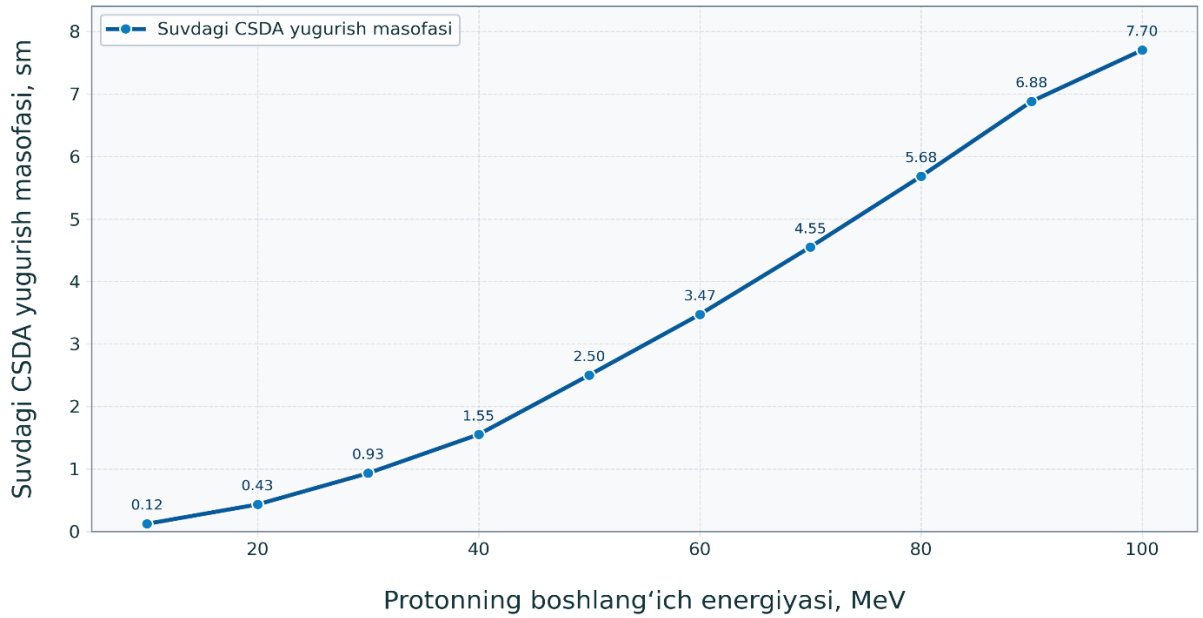
Suv muhitida 10–100 MeV energiyali protonlarning taxminiy CSDA yugurish masofalari 1-jadvalda keltirilgan. Mazkur qiymatlar nazariy baholash xarakteriga ega bo‘lib, referens range jadvallarida uchraydigan kattaliklar tartibiga mosdir.

1-jadval.

10–100 MeV energiyali protonlarning suvdagi taxminiy CSDA yugurish masofasi

Proton energiyasi, MeV	Suvdagi taxminiy CSDA masofa, sm
10	0,12
20	0,43
30	0,93
40	1,55
50	2,50
60	3,47
70	4,55
80	5,68
90	6,88
100	7,70

Jadvaldan ko‘rinadiki, 10 MeV energiyali proton suvda taxminan 0,12 sm, 50 MeV energiyali proton 2,50 sm, 100 MeV energiyali proton esa 7,70 sm masofani bosib o‘tadi. Demak, energiyaning 10 MeV dan 100 MeV gacha ortishi protonning suvdagi yugurish masofasini taxminan 64 marta oshiradi.



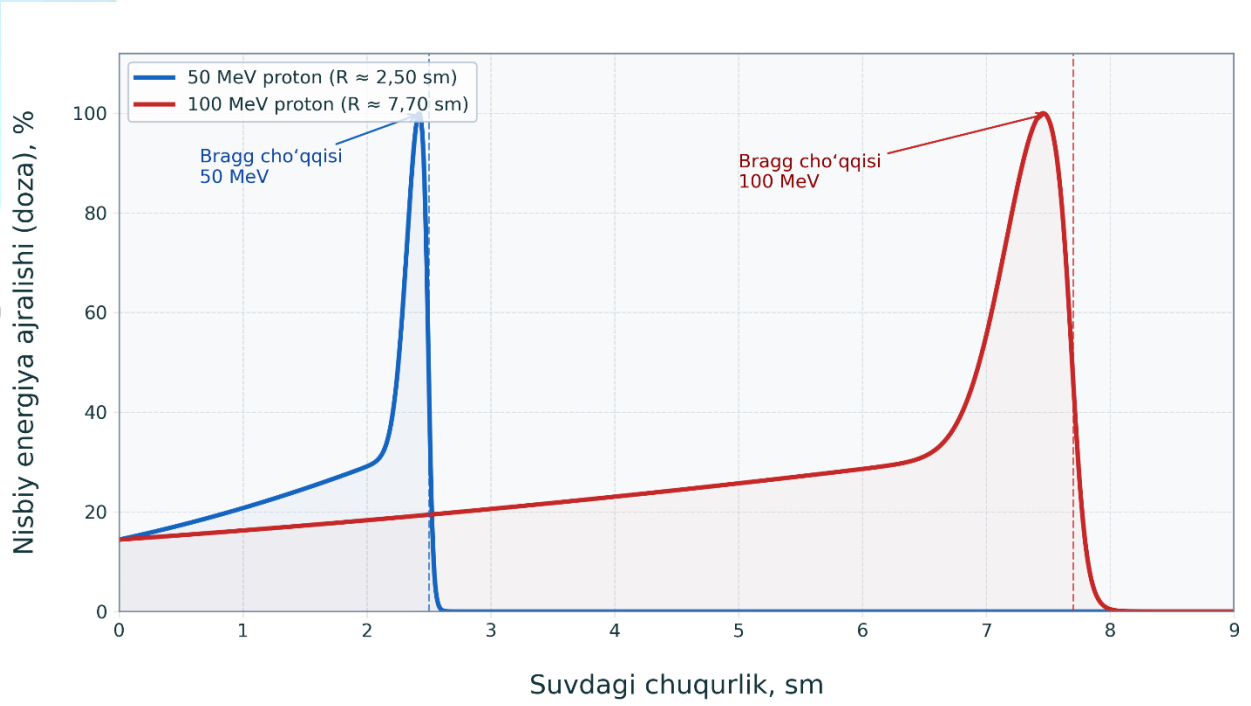
1-rasm. 10–100 MeV energiyali protonlarning suvdagi taxminiy CSDA yugurish masofasining energiyaga bog‘liqligi. Proton energiyasi oshishi bilan suvdagi yugurish masofasi nochiziqli ravishda ortadi.

1-rasm proton energiyasi hamda yugurish masofasi o‘rtasidagi bog‘lanishning nochiziqli xarakterini tasdiqlaydi. Bu holat tezlatkich nuri energiyasini tanlashda muhim ahamiyatga ega, chunki energiyadagi nisbatan kichik o‘zgarish ham Bragg cho‘qqisi joylashuvini sezilarli siljitishi mumkin.

Bragg cho‘qqisi va amaliy ahamiyat

Proton dastasining moddadagi energiya ajratish profili Bragg cho‘qqisi bilan tavsiflanadi. Proton yo‘lining boshida energiya yo‘qotish nisbatan kichik bo‘ladi. Proton sekinlashgani sari uning ionlashtirish qobiliyati oshadi va yugurish masofasi

oxiriga yaqin energiya ajralishi maksimumga yetadi. Proton to‘xtaganidan keyin doza keskin kamayadi.



2-rasm. 50 MeV va 100 MeV energiyali proton dastalarining suvdagi sxematik chuqurlik–doza taqsimoti. Protonlar muhitda sekinlashgani sari ionlashtirish qobiliyati ortadi va yugurish masofasi yakunida Bragg cho‘qqisi hosil bo‘ladi.

Bragg cho‘qqisi proton terapiyasining asosiy fizik afzalligidir. Protonlar energiyasini o‘sma joylashgan chuqurlikka mos tanlash orqali yuqori doza bevosita nishon hajmiga yo‘naltiriladi. Natijada o‘smadan keyingi sog‘lom to‘qimalarga tushadigan doza kamayadi[5,7]. Bu xususiyat bosh miya, ko‘z, bosh-bo‘yin sohasi va bolalar onkologiyasidagi ayrim kasalliklarni davolashda muhimdir.

10–100 MeV energiyali protonlar suvda taxminan 0,12–7,70 sm chuqurliklarda to‘xtaydi. Shuning uchun bunday energiyalar sirtga yaqin yoki o‘rtacha chuqurlikdagi nishonlar uchun muhim bo‘lishi mumkin. Chuqurroq joylashgan o‘smalar uchun yuqoriroq energiyali proton nurlari va energiya modulyatsiyasidan foydalaniladi.

Xulosa

Ushbu tadqiqotda tezlatkichlarda hosil qilinadigan 10–100 MeV energiyali proton dastalarining modda bilan o‘zaro ta’siri, energiya yo‘qotishi va yugurish masofasi nazariy jihatdan tahlil qilindi.

Protonlarning moddadagi asosiy energiya yo‘qotish mexanizmi atom elektronlarini ionlashtirish va qo‘zg‘atishdan iborat ekani ko‘rsatildi. Atom yadrolari bilan elastik sochilish protonlarning trayektoriyasini o‘zgartirib, dastaning fazoviy kengayishiga sabab bo‘ladi. Noelastik yadro reaksiyalari esa ikkilamchi neytronlar, gamma-kvantlar va boshqa zarrachalar hosil bo‘lishiga olib kelishi mumkin.

Bethe–Bloch tenglamasi proton energiyasi kamaygani sari birlik masofada energiya yo‘qotish ortishini tavsiflaydi. Ushbu qonuniyat proton dastasi yo‘li oxirida Bragg cho‘qqisining shakllanishiga sabab bo‘ladi. Bragg cho‘qqisi proton energiyasini ma’lum chuqurlikda to‘plash imkonini bergani sababli proton terapiyasi va radiatsion dozimetriyada muhim o‘rin tutadi.

Suv muhitidagi nazariy baholashlarga ko‘ra, 10 MeV energiyali protonlarning yugurish masofasi taxminan 0,12 sm, 50 MeV protonniki 2,50 sm, 100 MeV protonniki esa 7,70 sm ni tashkil etadi. Bu natijalar proton energiyasi va yugurish masofasi orasidagi bog‘lanish nochiziqli ekanini ko‘rsatadi.

Olingan natijalar proton terapiyasida nurlanish energiyasini tanlash, radioizotoplar ishlab chiqarishda nishon parametrlarini aniqlash, radiatsion himoya tizimlarini loyihalash hamda yadro fizikasi tajribalarini rejalashtirish uchun nazariy asos bo‘lib xizmat qiladi. Kelgusida proton dastalarining turli materiallardagi transportini Monte-Karlo usullari yordamida modellashtirish, ikkilamchi zarrachalar hosil bo‘lishini hisobga olish va biologik to‘qimalardagi uch o‘lchamli doza taqsimotini tahlil qilish maqsadga muvofiqdir.

1. **Foydalanilgan adabiyotlar**

1. International Commission on Radiation Units and Measurements. *Stopping Powers and Ranges for Protons and Alpha Particles.* ICRU Report 49. Bethesda, MD: ICRU; 1993. https://doi.org/10.1093/jicru/os25.2.
2. Berger M.J., Coursey J.S., Zucker M.A., Chang J. ESTAR, PSTAR, and ASTAR: Computer Programs for Calculating Stopping-Power and Range Tables for Electrons, Protons, and Helium Ions. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology; 2005. NIST Standard Reference Database 124. Available from: https://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/PSTAR.html. Accessed: 04 September 2026.
3. Navas S., et al. Review of Particle Physics. *Physical Review D.* 2024;110:030001. https://doi.org/10.1103/PhysRevD.110.030001
4. Janni J.F. Proton range-energy tables, 1 keV–10 GeV. *Atomic Data and Nuclear Data Tables.* 1982;27(3):341–529.
5. Paganetti H., editor. *Proton Therapy Physics.* 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press; 2018. ISBN: 978-1-4987-6769-6.
6. Wilson R.R. Radiological use of fast protons. *Radiology.* 1946;47(5):487–491. https://doi.org/10.1148/47.5.487
7. Durante M., Loeffler J.S. Charged particles in tumour therapy. *Nature Reviews Clinical Oncology* 2010;7(1):37–43. https://doi.org/10.1038/nrclinonc.2009.183
8. Alonso J.R., et al. Medical isotope production with the IsoDAR cyclotron. *Nature Reviews Physics.* 2019;1:533–534. https://doi.org/10.1038/s42254-019-0095-6
9. International Atomic Energy Agency. *Cyclotron Produced Radionuclides: Physical Characteristics and Production Methods.* Technical Reports Series No. 468. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2009. ISBN: 978-92-0-106408-2.