

ŠOLSKI CENTER VELENJE
GIMNAZIJA VELENJE
TRG MLADOSTI 3, 3320 VELENJE
MLADI RAZISKOVALCI ZA RAZVOJ ŠALEŠKE DOLINE

RAZISKOVALNA NALOGA
POT PROTONOV V SNOVI
Tematsko področje: FIZIKA

Avtorica:
Neža Vipavc, 3. letnik

Mentor:
Peter Jevšenak, univ. dipl. inž. fizike

Velenje, 2019

Raziskovalna naloga je bila narejena na Gimnaziji Velenje.

Mentor: Peter Jevšenak, univ. dipl. inž. fizike

Datum predstavitve:

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD Šolski center Velenje, Gimnazija Velenje, šolsko leto 2018/2019

KG protonsko obsevanje / snop protonov / ustavljalna moč protonov / doseg / Braggov vrh / Gaussova porazdelitev

AV VIPAVC, Neža

SA JEVŠENAK, Peter

KZ 3320 Velenje, SLO

ZA Šolski center Velenje, Gimnazija Velenje

LI 2019

IN **POT PROTONOV V SNOVI**

TD Raziskovalna naloga

OP VI, 24 str., 1 pregl., 20 sl., 1 pril., 11 vir.

IJ SL

JI sl / en

AI Pri zdravljenju tumorjev se v svetu vedno bolj uveljavlja metoda, pri kateri tumor obsevamo s protoni. Takšno zdravljenje je od bolj poznanega zdravljenja z rentgenskimi žarki veliko dražje, a hkrati bolj učinkovito. Njegova prednost je namreč v primernejši globinski dozni porazdelitvi; protonom se dozna porazdelitev po vstopu v snov povečuje, dokler ne doseže maksimuma, nato pa hitro pade na nič. Obsevanje s protoni tako manj poškoduje tkivo okrog tumorja kot obsevanje z rentgensko svetlobo. V raziskovalni nalogi se je preučevala pot protonov v snovi, predvsem kako globoko prodre in koliko se razprši snop izstreljenih protonov, ki imajo na začetku vsi enako kinetično energijo. V ta namen je bil narejen računalniški program, ki simulira obnašanje protonov v izbrani snovi. Zaradi velikega števila trkov lahko interakcije protonov s snovjo obravnavamo statistično, zato je v nalogi matematično pomembna Gaussova porazdelitev. Postavljene so bile tri hipoteze. Najprej se je ugotavljalo, ali je doseg v snovi premo sorazmeren z začetno energijo protonov. Izkazalo se je, da to ni res in da se dobljeni odvisnosti lepo prilega kvadratna funkcija. Potem se je preverilo, katera snov nas najbolje ščiti pred protoni. Proti pričakovanjem to ni svinec, pač pa bolj učinkovito zaščito predstavljata volfram in platina. Nato so se obravnavale še snovi, ki sestavljajo človeško telo: kosti, mišice in voda. Protoni imajo pričakovano najkrajši doseg v kosti, skoraj enakega pa v mišicah in v vodi.

KEY WORD DOCUMENTATION

ND Šolski center Velenje, Gimnazija Velenje, šolsko leto 2018/2019
CX proton radiation / proton beam / proton stopping power / depth / Bragg peak /
Gaussian distribution
AU VIPAVC, Neža
AA JEVŠENAK, Peter
PP 3320 Velenje, SLO
PB Šolski center Velenje, Gimnazija Velenje
PY 2019
TI **PATH OF PROTONS IN MATERIALS**
DT RESEARCH WORK
NO VI, 24 p., 1 tab., 20 fig., 1 ann., 11 ref.
LA SL
AL sl / en

AB When it comes to treating tumors, there is a method of treatment where we use protons instead of photons for radiation, and it is gaining in popularity. This method of treatment is more expensive but at the same time more effective than the more widely known treatment with X-ray radiation. The advantage of proton radiation lies in its more suitable dose distribution when compared to depth; when protons enter the material, their dose distribution gets larger until it reaches its maximum, and then it quickly falls down to zero. Because of this, the tissue around the tumor is less damaged with proton radiation than it is with X-ray radiation. In this paper, the path of protons in different materials was studied, mostly how deep a proton beam (where all of the protons initially have the same energy) penetrates and how widely it disperses. A computer simulation which simulates how protons act in a chosen material was made for this study. Because the protons experience a large number of collisions, we treat the interactions between protons and the material statistically, which is also why the Gaussian distribution is mathematically significant in the paper. Three hypotheses were proposed. First, the guess of whether or not the depth in a material is directly proportional with the initial energy of the protons was researched. It turned out that the guess is incorrect, and that the data neatly falls along the square function. Then the material which best protects us from proton radiation was looked for. Contrary to expectations, it is not lead because even tungsten and platinum are more suitable. At the end, three human materials (bone, muscle and water) were studied. As it was expected, the protons had the shortest range in bone but almost the same range in muscle and water.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
2	PREGLED OBJAV	2
2.1	INTERAKCIJE PROTONOV	2
2.2	GAUSSOVA FUNKCIJA	6
2.3	RELATIVISTIČNI PROTONI	8
3	METODOLOGIJA	9
3.1	RAČUNALNIŠKI PROGRAM.....	9
3.1.1	IZBIRA SNOVI, PRIDOBIVANJE PODATKOV	9
3.1.2	OZBIRA ZAČETNE ENERGIJE IN ZAČETNE POZICIJE PROTONA	10
3.1.3	STRESANJE PO GAUSSU	10
3.1.4	GRAFIČNA PREDSTAVITEV	11
4	REZULTATI IN DISKUSIJA	11
4.1	PRVA HIPOTEZA	11
4.2	DRUGA HIPOTEZA	14
4.3	TRETJA HIPOTEZA.....	16
5	ZAKLJUČEK	19
6	POVZETEK	19
7	SUMMARY	20
8	ZAHVALA	21
9	PRILOGE	21
10	VIRI IN LITERATURA	21

KAZALO SLIK

Slika 1: Primerjava dozne porazdelitve glede na globino med izsevanimi fotoni in protoni.....	1
Slika 2: Shematska predstavitev glavnih interakcij protonov v snovi.....	3
Slika 3: Doseg posameznih protonov, navpična črta prikazuje doseg snopa.....	4
Slika 4: Energijske izgube protonov v vodi v odvisnosti od njihove kinetične energije.....	4
Slika 5: Standardizirana Gaussova porazdelitev	7
Slika 6: Grafični prikaz frekvence vrednosti v (standardizirani) normalni porazdelitvi	7
Slika 7: Vrednosti med katerimi izbira program.	10
Slika 8: Doseg snopa protonov z začetno energijo 40 MeV	12
Slika 9: Doseg snopa protonov z začetno energijo 70 MeV	12
Slika 10: Doseg snopa protonov z začetno energijo 100 MeV	12
Slika 11: Linearna funkcija, ki se najbolj prilega podatkom.....	13
Slika 12: Kvadratna funkcija, ki se najbolj prilega podatkom.....	13
Slika 13: Doseg snopa protonov v svincu	15
Slika 14: Doseg snopa protonov v platini	15
Slika 15: Doseg snopa protonov v volframu	15
Slika 16: Primerjava globin snopov protonov (od leve proti desni) v svincu, platini in volframu	16
Slika 17: Doseg snopa protonov v kosti.....	17
Slika 18: Doseg snopa protonov v mišici.....	17
Slika 19: Doseg snopa protonov v vodi	17
Slika 20: Primerjava dosegov snopov protonov (od leve proti desni) v kosti, mišici in vodi.....	18

KAZALO TABEL

Tabela 1: Vrednosti relativističnega faktorja ter razmerje hitrosti protona in svetlobne hitrosti v odvisnosti od kinetične energije protonov.....	8
--	---

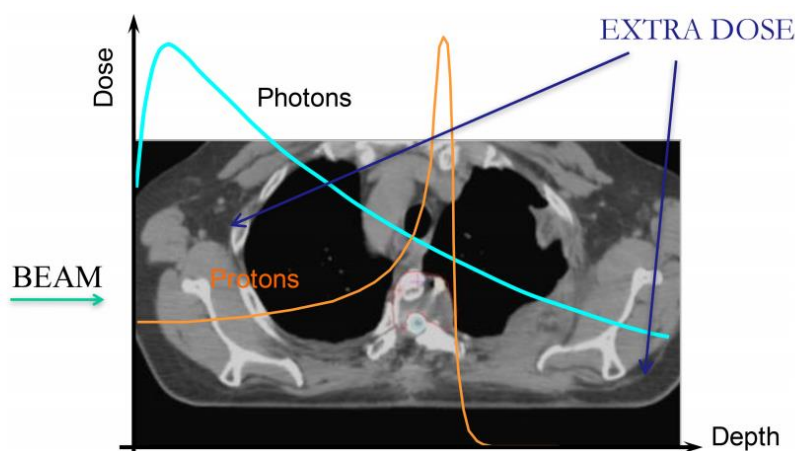
1 UVOD

Pri zdravljenju tumorjev se uporabljajo trije pristopi: sistemsko zdravljenje, kirurško zdravljenje in zdravljenje z obsevanjem. Slednje se izvaja s sevanjem visoko energijskih fotonov. Pri tem načinu zdravljenja so pomembne čim bolj primerne energijske izgube oz. dozna porazdelitev. Snopu fotonov energija po vstopu v snov eksponentno pada, kar pomeni, da nikoli ne pade na nič, zato fotoni vplivajo tudi na zdravo tkivo pred in za tumorjem. Zaradi tega se zdravniki odločajo za obsevanje z nižjimi energijami fotonov, a iz več različnih strani s presekom sevalnih žarkov na tumorju. Tako vseeno zdravimo tumor, tkivo okrog njega pa je manj poškodovano. (vir 6)

Ta način zdravljenja je bil prvič uporabljen ob koncu 19. stoletja (meni se, da je to storil Američan Emil Grubbe leta 1896), približno 50 let kasneje (Berkeley Hills (ZDA), leta 1954, in Uppsala (Švedska), leta 1957) pa so znanstveniki namesto fotonov poskusili uporabiti protone. (vir 11)

Prednost takšnega načina zdravljenja je v primernejši globinski dozni porazdelitvi. Protonom se namreč dozna porazdelitev po vstopu v snov povečuje, dokler ne doseže maksimuma tik preden se protoni ustavijo, nato pa pade na nič. Maksimum takšne dozne porazdelitve imenujemo Braggov vrh. (vir 5)

Na ta način sevanje s protoni veliko manj poškoduje tkivo okrog tumorja kot obsevanje s fotoni. Vseeno dandanes po svetu najdemo le okrog 50 naprav, ki omogočajo tovrstno zdravljenje. Največji problem te metode zdravljenja je cena, saj so naprave za zdravljenje s protonskim obsevanjem približno stokrat dražje kot rentgenske cevi.



Slika 1: Primerjava dozne porazdelitve glede na globino med izsevanimi fotoni in protoni. (vir 5)

V tej raziskovalni nalogi preučujem obnašanje protonov v snovi, katero obsevamo s tankim, natančno usmerjenim protonskim snopom, kjer imajo na začetku vsi protoni enako kinetično energijo. Predvsem me je zanimalo, kako izgubljajo energijo, kakšen je njihov doseg, kje je Braggov vrh, koliko se snop razprši ipd.

V Sloveniji (še) ni protonskega pospeševalnika, kjer bi lahko opravljala meritve, zato sem napisala računalniški program, ki simulira obnašanje protonov v izbrani snovi. Protoni namreč izgubljajo energijo zaradi množice elektromagnetnih in jedrskih interakcij z elektroni in atomskimi jedri v snovi. Zaradi tega lahko izgubo energije na enoto dolžine obravnavamo statistično in ni potrebno natančno fizikalno poznavanje vseh mehanizmov in interakcij.

Postavila sem tri hipoteze, ki sem jih z ustvarjenim računalniškim programom lahko preverila.

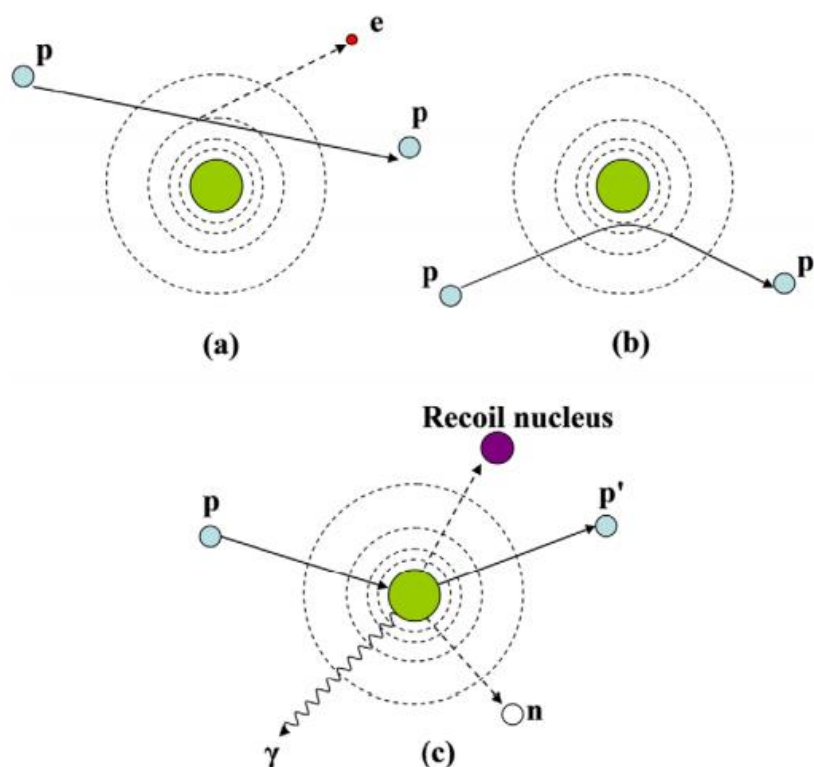
1. Doseg snopa protonov v snovi je premo sorazmeren z začetno energijo protonov.
2. Pred protoni nas najboljše ščiti svinec.
3. V snoveh, ki tvorijo človeško telo, bodo protoni imeli najkrajši doseg v kosti, nato v mišicah, najdaljšega pa v vodi.

Izhodiščna snov, na kateri sem testirala program in opravila prve simulacije, je bila voda. Na vodi sem preverila tudi prvo hipotezo. Ker voda predstavlja velik del človeškega telesa (približno 60 %), sem jo lahko primerjala z drugimi biološkimi snovmi, kot sta na primer kost in mišica. Ker se pri rentgenskem slikanju kot zaščitni material uporablja svinec, sem preverila, ali je ta material najbolj učinkovit tudi pri zaščiti pred protoni. Primerjala sem doseg protonov v nekaj različnih kovinah, da ugotovim, katera izmed njih je najprimernejša za zaščito.

2 PREGLED OBJAV

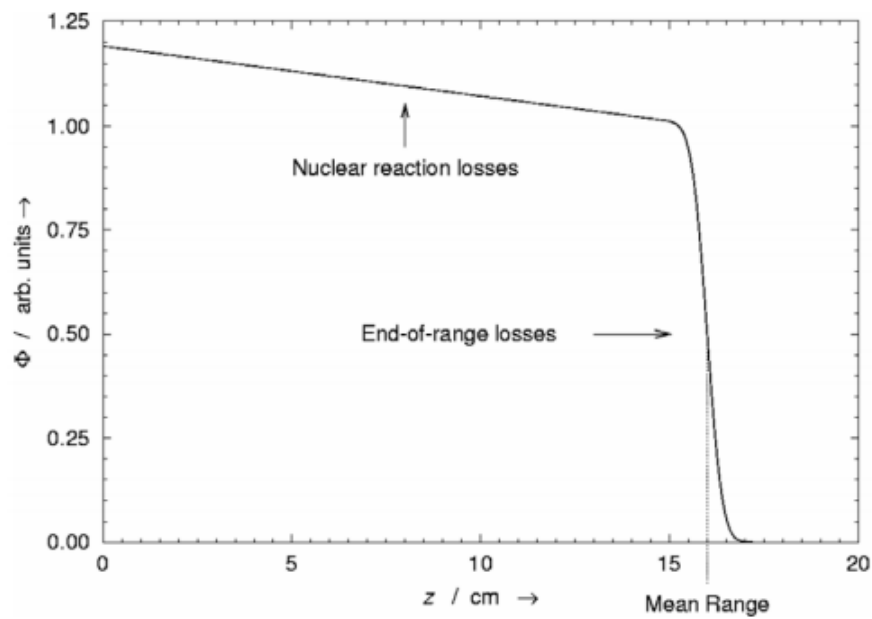
2.1 INTERAKCIJE PROTONOV

Glavne interakcije protonov v snovi so: elektromagnetne (Coulombove) interakcije z elektroni, elektromagnetne interakcije z jedri ter jedrske interakcije. Protoni večino energije izgubijo v neelastičnih interakcijah z vezanimi elektroni v snovi. Pri tem protoni vzbujajo in ionizirajo atome snovi. Pri elastičnem sipanju na jedrih, večinoma preko elektromagnetne, lahko pa tudi preko močne interakcije, se protonom spremeni smer. Občasno pa lahko proton konča svojo pot z direktnim trkom v jedro, pri čemer se sprostijo sekundarni delci. Protoni lahko teoretično tudi zavorno sevajo, vendar je to sevanje, iz dozimetričnega vidika, zanemarljivo. (vir 4)



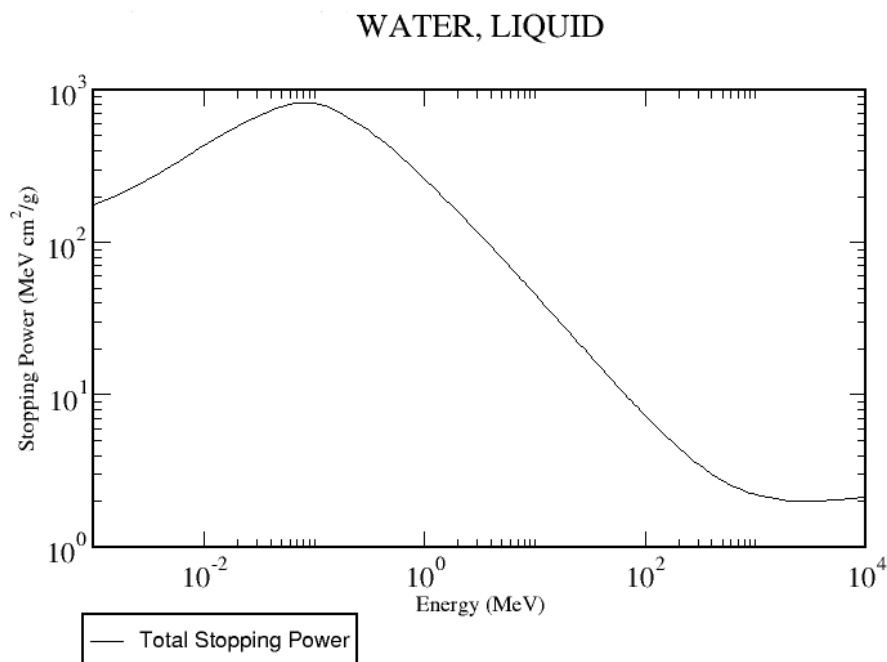
Slika 2: Shematska predstavitev glavnih interakcij protonov v snovi: (a) neelastične elektromagnetne interakcije z vezanimi elektroni, (b) elastično sipanje na jedru preko elektromagnetne ali močne interakcije, (c) neelastične jedrske interakcije, pri čemer nastanejo sekundarni delci (p: proton, e: elektron, n: nevtron, γ : gama žarek). (vir 4)

Ker protoni v snovi izgubljajo energijo, je normalno pričakovati, da se enkrat ustavijo. Če bi protoni v snovi zvezno izgubljali energijo, bi bil doseg protonov z isto energijo v izbrani snovi enak. Vendar meritve kažejo, da ni tako. Interakcije protonov s snovjo so statistične narave tako po izgubi energije kot po smeri gibanja. Dva identična protona ne bosta doživela enakega števila trkov in ne enake izgube energije, zato se ne bosta ustavila na enaki globini. Protoni izgubijo energijo v zelo velikem, ampak končnem številu posameznih interakcij. Pri vsaki od teh interakcij energijske izgube variirajo. Tej statistični naravi energijskih izgub pravimo energijsko stresanje. Posledica energijskega stresanja je torej tudi stresanje po globini. Doseg je tako definiran kot globina snovi, do katere se ustavi polovica vpadnih protonov. (vir 2)



Slika 3: Doseg posameznih protonov, navpična črta prikazuje doseg snopa (Foto: vir 4)

Energijske izgube protonov v vodi, v odvisnosti od njihove kinetične energije, so prikazane na sliki (4). S slike razberemo, da v vodi energijo najhitreje izgublajo protoni s kinetično energijo okrog 100 keV.



Slika 4: Energijske izgube protonov v vodi v odvisnosti od njihove kinetične energije (vir 8)

Potrebno pa se je zavedati, da krivulja na sliki (4) predstavlja samo povprečne vrednosti, dejanske izgube pa so razpršene okoli teh vrednosti zaradi energijskega stresanja po Gaussovi porazdelitvi, kjer kvadrat standardne deviacije podaja enačba

$$\sigma_0^2 = 0,1569 \rho \frac{Z}{A} x. \quad \dots (1)$$

V enačbi je ρ gostota snovi, Z vrstno število elementa, A atomska masa in x debelina obsevanega materiala.

Graf za dozno porazdelitev, kot ga vidimo na sliki (4) za vodo, lahko določimo za vsako snov po Bethe-Blochovi formuli. Izračunane vrednosti za večino snovi so že tabelirane in podatke lahko najdemo v literaturi, ki navaja lastnosti snovi. Natančnost se ocenjuje na par procentov.

Protoni pri potovanju skozi snov doživijo tudi veliko število sipanj na jedrih. Sipajo se večinoma preko elektromagnetne interakcije (večkratno Coulombovo sipanje), interakcije preko močne jedrske sile so redke.

Če zanemarimo majhno verjetnost za sipanje pod velikim kotom pri posameznem sipanju, potem je porazdelitev približno Gaussova: v povprečju se protonom smer ne spremeni, razpršenost pa modeliramo po Gaussu, kjer se koren povprečnega kvadrata (RMS) sipalnega kota izračuna po Highlandovi formuli:

$$\sqrt{\langle \theta^2 \rangle} = z \frac{20 [\text{MeV} / c]}{p\beta} \sqrt{\frac{x}{L_{\text{rad}}}} \left(1 + \frac{1}{9} \log \frac{x}{L_{\text{rad}}} \right), \quad \dots (2)$$

kjer je z naboj delca, p gibalna količina delca, x debelina materiala, L_{rad} radiacijska dolžina materiala (tabelirana) in $\beta = v / c$, kjer je v hitrost delca in c svetlobna hitrost. Highlandova formula je empirična in njena natančnost se ocenjuje na približno 5 %, v snovi s težkimi elementi pa je natančnost 10–20 %.

Če porazdelitev kotov v 3D projiciramo na ravnino, v kateri leži osnovna trajektorija, dobimo tudi približno Gaussovo porazdelitev, kjer sta povprečna kvadrata sipalnih kotov povezana z enačbo

$$\langle \theta_x^2 \rangle = \langle \theta^2 \rangle : 2. \quad \dots (3)$$

Učinke ionizirajočega sevanja na tkiva oz. učinkovitost zdravljenja ocenjujemo na podlagi absorbirane doze. Doza je definirana kot deponirana energija na enoto mase v določeni točki:

$$D = \frac{dW}{dm} \quad \dots (4)$$

in po mednarodnem sistemu enot (SI) je osnovna enota za dozo Gray (1 Gy = 1 J/kg).

Ker se energijske izgube povečujejo, ko se protoni ustavljajo, se pojavi pri globinski dozni porazdelitvi snopa protonov (ali drugih težjih nabitih delcih) značilen vrh, imenovan Braggov vrh (slika 1: na grafu dozne porazdelitve protonov se lepo vidi tudi Braggov vrh).

2.2 GAUSSOVA FUNKCIJA

Gaussova funkcija prikazuje normalno porazdelitev, ki je prikazana s t. i. Gaussovo krivuljo in ima značilno zvonasto obliko (slika 5). Funkcija je zapisana z enačbo

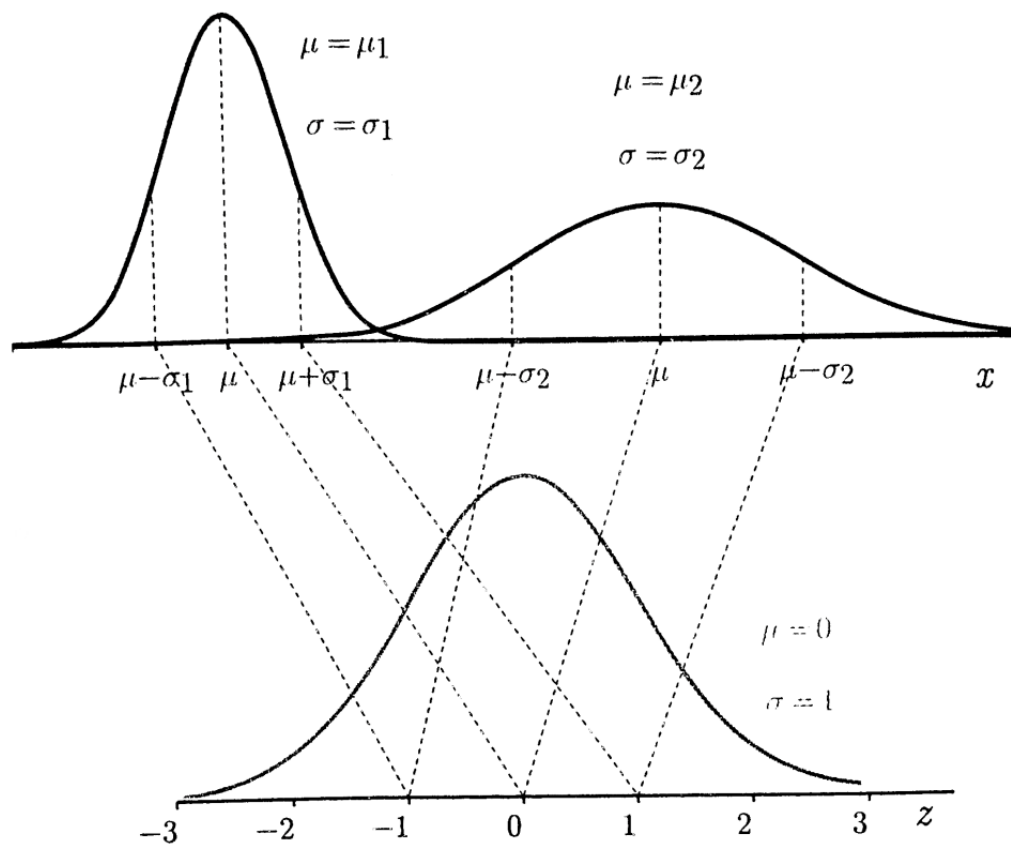
$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad \dots (5)$$

pri čemer je $f(x)$ relativna frekvenca količine x , μ povprečna vrednost, σ pa standardna deviacija. Krivulja je simetrična na premico $x = \mu$, kjer tudi doseže vrh.

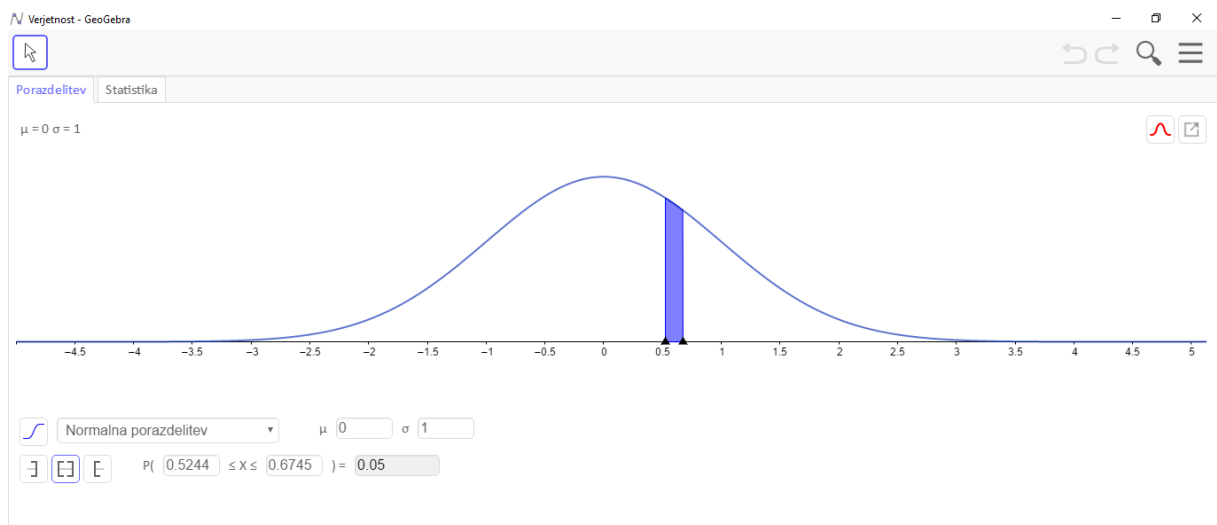
Če predpostavimo, da je delež vseh opazovanih statističnih enot enak 1, potem je tudi ploščina območja med abscisno osjo in Gaussovo krivuljo enaka 1. Zaradi tega lahko vse normalne porazdelitve zapišemo kot standardizirano normalno porazdelitev z uvedbo spremenljivke z (slika 5). Standardizirana normalna porazdelitev ima povprečno vrednost enako 0, standardno deviacijo enako 1, vsaka vrednost z (na abscisni osi) pa je podana v obliki

$$z = \frac{x-\mu}{\sigma}. \quad \dots (6)$$

Iz Gaussove funkcije lahko tudi izračunamo frekvenco vrednosti (t.j. kako pogosto se podatek pojavi), kar je zelo uporabno v statistiki (vir 1). Za računanje frekvence vrednosti uporabljamo razne računalniške programe, v tej nalogi pa je bil uporabljen program GeoGebra (slika 6).



Slika 5: Standardizirana Gaussova porazdelitev je enaka za dve različni Gaussovi funkciji (vir 1)



Slika 6: Grafični prikaz frekvenca vrednosti v (standardizirani) normalni porazdelitvi, frekvenčna vrednost obarvanega območja je 0,05 oz. 5 % glede na vso krivuljo

2.3 RELATIVISTIČNI PROTONI

Ko se hitrost protonov približa svetlobni hitrosti ($c = 299\,792\,458$ m/s), je potrebno za opis gibanja uporabiti relativistično mehaniko. Zanima nas predvsem zveza med kinetično energijo in hitrostjo protona. Klasična enačba

$$W_k = \frac{mv^2}{2}$$

se transformira v enačbo

$$W_k = W_0(\gamma_0 - 1), \text{ kjer je}$$

$$\gamma_0 = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

W_0 predstavlja lastno energijo protona (938.3 MeV), γ_0 pa je relativistični faktor.

Za $v \ll c$ je relativistični faktor 1, pri velikih hitrostih pa začne naraščati in v primeru $v = c$ bi postal neskončen. Klinično zanimivi protoni imajo kinetične energije do 250 MeV (vir 6). V spodnji tabeli je prikazanih nekaj številčnih vrednosti glede na kinetično energijo protona.

Tabela 1: Vrednosti relativističnega faktorja (γ_0) ter razmerje hitrosti protona in svetlobne hitrosti (β) v odvisnosti od kinetične energije protonov (W_k)

W_k [MeV]	γ_0	$\beta = \frac{v}{c}$
20	1.02	0.20
100	1.10	0.43
250	1.27	0.61

3 METODE DELA

V raziskovalni nalogi sem se omejila na protone do kinetične energije 100 MeV, ki jih v približku še lahko smatramo za nerelativistične. Vpliv relativističnih popravkov na uporabljene formule do te energijske meje je še v okviru same nenatančnosti (empiričnih) formul. Tudi hipoteze so postavljene tako, da je njihova veljavnost lahko potrjena znotraj tega energijskega

območja. Pot protonov v snovi je tridimenzionalna, lahko pa problem nekoliko poenostavimo, če poti projiciramo na ravnino, v kateri leži osnovna trajektorija. Tako se v računalniškem programu določa projicirana pot v dveh dimenzijah (2D).

3.1 RAČUNALNIŠKI PROGRAM

Programirala sem v okolju Visual Studio v programskem jeziku C++ z dodanimi knjižnicami SFML za grafiko.

Velikostni red dosega protonov z začetno energijo do 100 MeV v trdnih snoveh in kapljevinah je nekaj centimetrov. Vzela sem 2D snov dolžine 10 cm in širine 2,5 cm in to razbila na mrežo kvadratkov (400 x 100) s stranico 0,025 cm. Ta razdalja pomeni en korak pri računanju izgube energije protona. Vsakemu kvadratu ustreza številčna vrednost v tabeli simulacije. Energija, ki jo proton v tem kvadratu izgubi, se prišteje vrednosti v tabeli simulacije. Na koncu simulacije, po tem, ko smo izstrelili veliko število protonov, lahko iz tabele ugotovimo, kje so protoni izgubljali največ energije in kje so se zaustavili.

Število protonov v simulaciji sem postavila na 100 000. Pri rezultatih z večjim številom protonov skoraj ni bilo opaznih razlik. Ker se relativna napaka v statistiki meri s korenem števila ponovitev, deljenim s številom ponovitev, sem relativno napako svoje simulacije ocenila na 0,3 %. Pri tem številu protonov simulacija potrebuje za vse izračune približno dve minuti.

3.1.1 IZBIRA SNOVI, PRIDOBIVANJE PODATKOV

Poti protonov sem določala v šestih različnih snoveh: voda, svinec, platina, volfram, kosti in mišice. Podatki, ki sem jih morala poiskati za vsako snov, so: razmerje Z/A in radiacijska dolžina (L_{rad}) za enačbo (1), gostota snovi (ρ) za enačbo (2) ter izgube energije protona pri njegovi trenutni energiji na enoto dolžine (t. i. ustavljalna moč protonov oz. »proton stopping power«). Prvotni vir za ustavljalno moč protonov je bila spletna stran NIST (vir 6), saj so tam podatki najbolj natančni in kompletni, podatke za tretjo hipotezo pa sem pridobila na spletnem viru (vir 7). Spletna stran NIST namreč več kot mesec dni ni bila dostopna zaradi težav s financiranjem. Za potrjevanje tretje hipoteze to vseeno ni problem, saj so pomembne primerjave dosegov protonov med snovmi, same številčne vrednosti pa ne toliko. Ostale (zgoraj navedene) potrebne podatke sem pridobila na spletni strani PDG (vir 10).

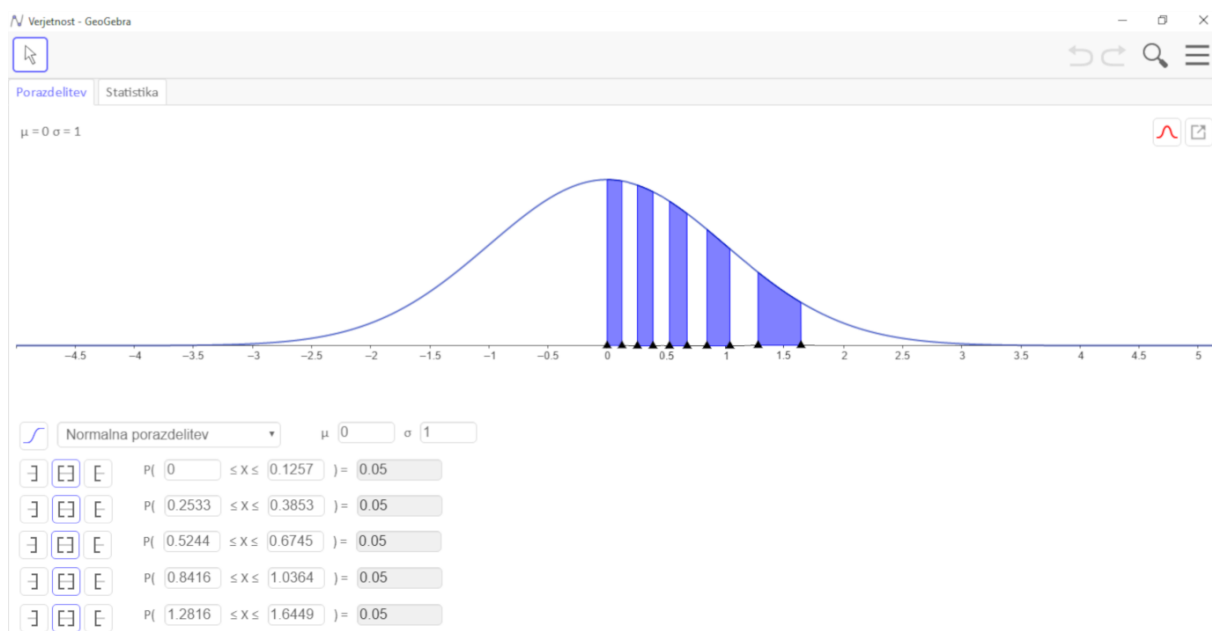
3.1.2 IZBIRA ZAČETNE ENERGIJE IN ZAČETNE POZICIJE PROTONA

Pri preverjanju prve hipoteze so bile energije protonov od 30 MeV do 100 MeV, pri ostalih pa 100 MeV. V sredino izbrane snovi širine 2,5 cm sem usmerila snop protonov širine 2 mm. Tako se pri deviaciji posameznih žarkov na koncu snopa izrazito prikaže manjše območje, kjer je največ absorbirane energije – Braggov vrh.

3.1.3 STRESANJE PO GAUSSU

V programu se morajo nekatere energijske vrednosti in velikosti kotov malo spremeniti, tj. stresti po normalni (Gaussovi) porazdelitvi. To sem dosegla tako, da sem si pomagala z gostoto izbire. Standardizirano Gaussovo porazdelitev sem razdelila na stolpce z enako ploščino. Meje teh stolpcev so zato gosteje posejane blizu ordinatne osi, kjer ima funkcija vrh, bolj oddaljene pa so bolj narazen (slika 7). Meje stolpcev predstavljajo števila, med katerimi program naključno izbira.

Izbrano število predstavlja z v enačbi (6). V tej enačbi predstavlja x energijo ali kot, ki se prišteje ali odšteje od povprečne vrednosti μ . Pri energijskem stresanju μ dobimo iz literature (proton stopping power), σ pa izračunamo po enačbi (1). Pri stresanju sipalnih kotov je $\mu = 0$, σ pa izračunamo po enačbi (2).



Slika 7: Vrednosti, med katerimi izbira program. Vsi stolpci imajo enake ploščine (0,05), tudi neobarvani stolpci med njimi imajo enake ploščine. Meje teh stolpcev (0, 0,1257, 0,2533, ..., 1,6449) so bile zaokrožene, med temi vrednostmi je izbiral moj program. Slika je vzeta iz programa GeoGebra.

3.1.4 GRAFIČNA PREDSTAVITEV.

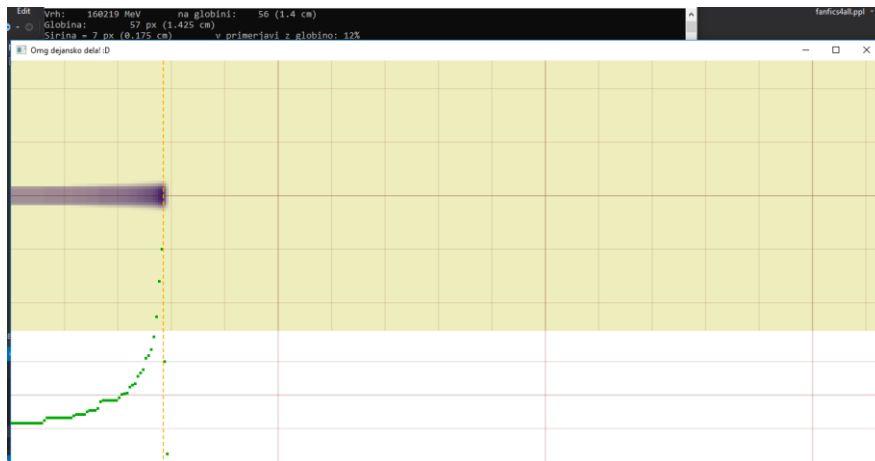
Ko je računski del simulacije zaključen, program rezultate prikaže grafično. Grafično okno je razdeljeno na zgornji in spodnji del. V zgornjem delu je prikazana snov v obliki svetlo rumenega pravokotnika, z odtenki modre barve pa količina absorbirane energije v njej (bolj temno kot je, več energije je snov tam absorbirala). S črtkano oranžno črto je prikazan tudi doseg snopa protonov. Za lažjo oceno dosega so šibkejšje pomožne črte postavljene na vsakih 0,5 cm, debelejšje pa na vsakih 2,5 cm. Na spodnjem delu je graf absorbirane energije v odvisnosti od globine. Ena točka na grafu predstavlja energijo, ki se absorbira v pravokotniku snovi z dolžino 1 korak (0,25 mm) in širino 4 korake (1,0 mm). Ta pravokotnik se nahaja v centru snopa protonov. Prikaže se Braggov vrh, vrednost energije v vrhu in globina, pri kateri vrh nastane, pa se izpišeta v črnem okvirju nad grafičnim oknom (desno od »Vrh« in »na globini«).

4 REZULTATI IN DISKUSIJA

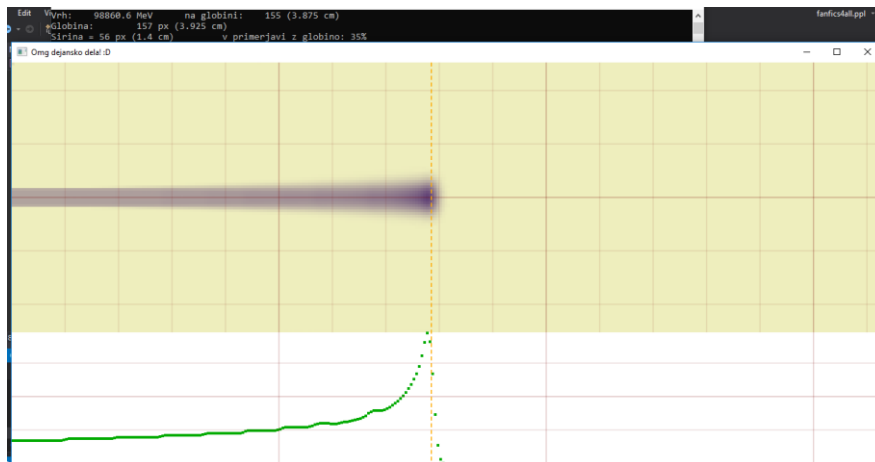
4.1 PRVA HIPOTEZA

Preverjala sem, ali je doseg snopa protonov premo sorazmeren z začetno energijo protonov. Izbrana snov je bila voda, začetno energijo protonov pa sem povečevala po 10 MeV od 30 MeV do 100 MeV. Po pričakovanjih je bil doseg daljši pri večji začetni energiji. Na slikah 8–10 so prikazani rezultati simulacij pri začetnih energijah 40, 70 in 100 MeV.

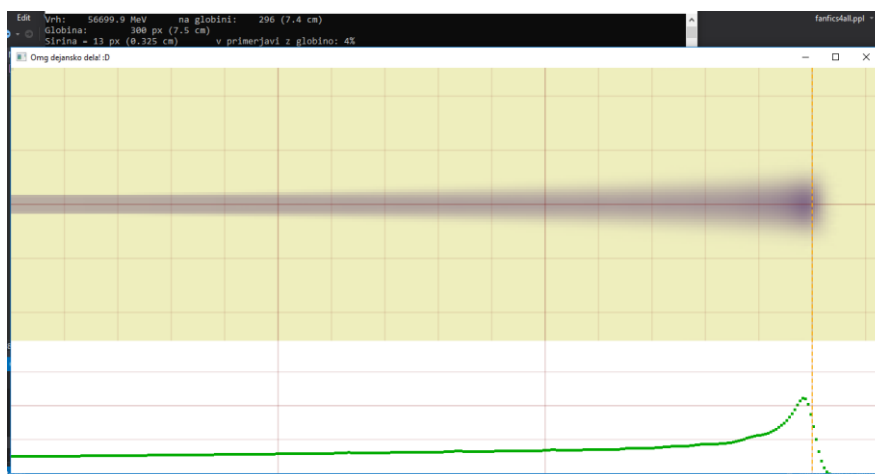
Raziskovalna naloga, Gimnazija Velenje, 2019



Slika 8: Doseg snopa protonov z začetno energijo 40 MeV



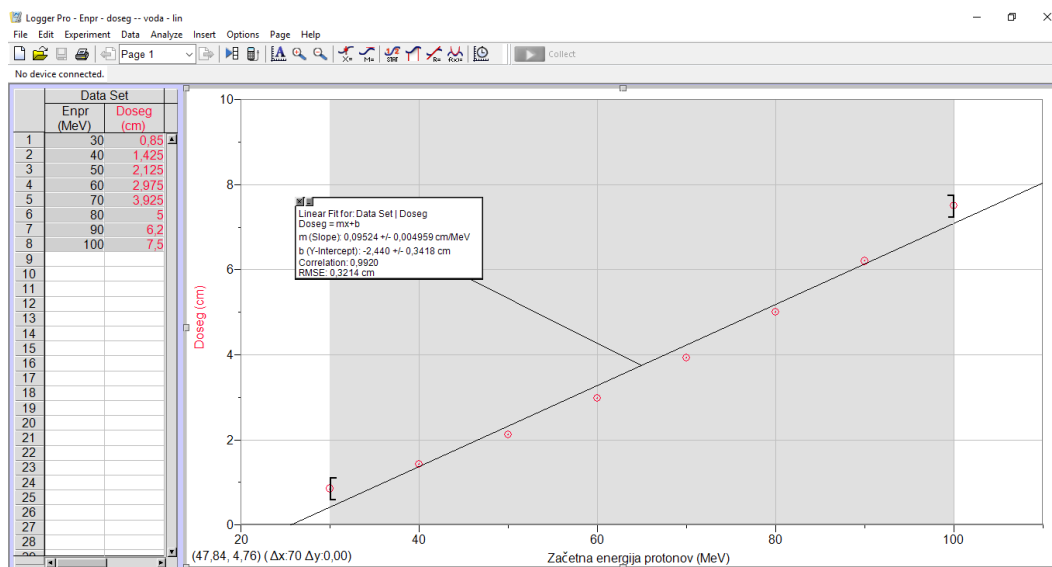
Slika 9: Doseg snopa protonov z začetno energijo 70 MeV



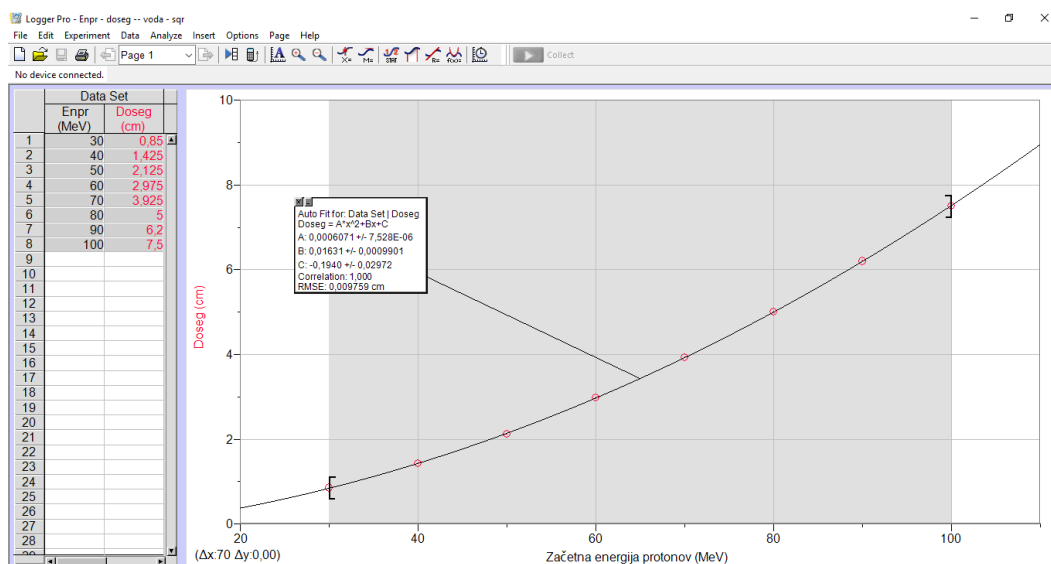
Slika 10: Doseg snopa protonov z začetno energijo 100 MeV

Raziskovalna naloga, Gimnazija Velenje, 2019

Iz posameznih simulacij sem razbrala podatek o dosegu snopa (podatek je napisan v črnem okvirju nad grafičnim oknom, desno od »Globina«). Te podatke sem nato vstavila v tabelo v programu Logger Pro, kjer se je izrisal graf globine (cm) v odvisnosti od začetne energije (MeV). Ta program omogoča prilagajanje funkcij točkam na grafu. Na sliki (11) je prilagoditvena funkcija linearna, na sliki (12) pa kvadratna.



Slika 11: Linearna funkcija, ki se najbolj prilega podatkom



Slika 12: Kvadratna funkcija, ki se najbolj prilega podatkom

Iz grafov je razvidno, da se mojim podatkom veliko bolj prilega kvadratna funkcija. S tem sem prvo hipotezo ovrgla.

Doseg protonskega snopa kinetične energije 100 MeV po podatkih v literaturi znaša 7,7 cm, rezultat moje simulacije pa je 7,5 cm. Natančnost uporabljene metode tako lahko ocenim z relativno napako približno 3 %.

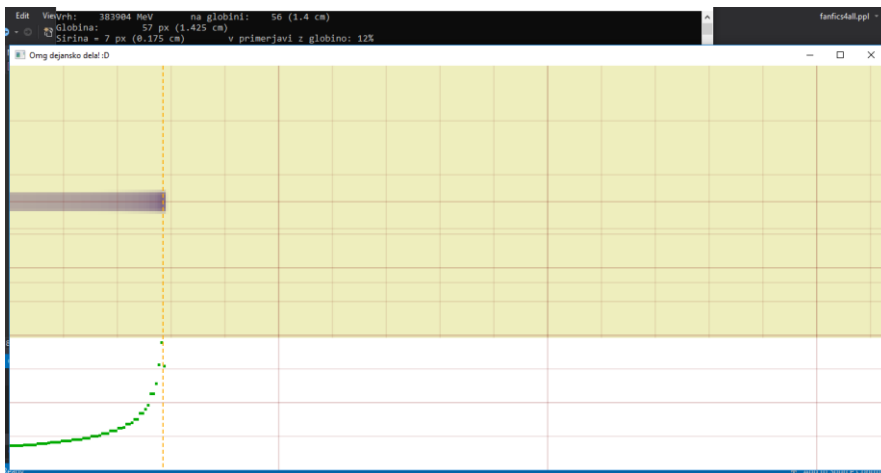
Pri grafih absorbirane energije na enoto ploščine v centru snopa (spodnji deli slik 8–10) prva odebeljena vodoravna črta predstavlja vrednost $50\,000\text{ MeV} / 0,25\text{ mm}^2$. Iz teh grafov je razvidno, da protoni takoj po vstopu v snov počasi izgubljajo energijo (absorpcija energije je v snovi tam majhna), ko jim kinetična energija pada, pa je absorbirane energije v snovi vse več. Pri kinetični energiji pod 1 MeV sledi Braggov vrh in zaustavitev protonov. Večja kot je kinetična energija protonov, počasneje izgubljajo energijo in posledično nesorazmerno dalj časa potujejo z večjo hitrostjo. Zato se pot in s tem doseg povečuje bolj kot to določa linearna funkcija. Presenetljivo dobro se z mojimi rezultati ujema kvadratna funkcija.

Večji kot je doseg, širši in manj izrazit je Braggov vrh. To lahko razložimo z razpršitvijo snopa, ki se z dosegom povečuje. Pri 40 MeV je največ sproščene energije v krogu premera 1,75 mm, pri 100 MeV pa v krogu premera 3,25 mm. To je skoraj 3,5-krat večja površina, skupna energija pa je večja le za faktor 2,5. Poleg tega se več energije izgubi že pred vrhom, zaradi daljše poti protonov v snovi.

4.2 DRUGA HIPOTEZA

Hotela sem raziskati, ali je svinec res najboljša zaščita pred protoni. Za primerjavo sem izbrala volfram in platino, ker imata tako kot svinec veliko vrstno število, hkrati pa imata večjo gostoto od svinca. Energija protonov v simulacijah je bila 100 MeV, na slikah 13–15 pa so rezultati teh simulacij.

Raziskovalna naloga, Gimazija Velenje, 2019



Slika 13: Doseg snopa protonov v svincu (na grafu za absorbirano energijo je prva odebeljena črta na vrednosti $200\,000\text{ MeV} / 0,25\text{ mm}^2$)

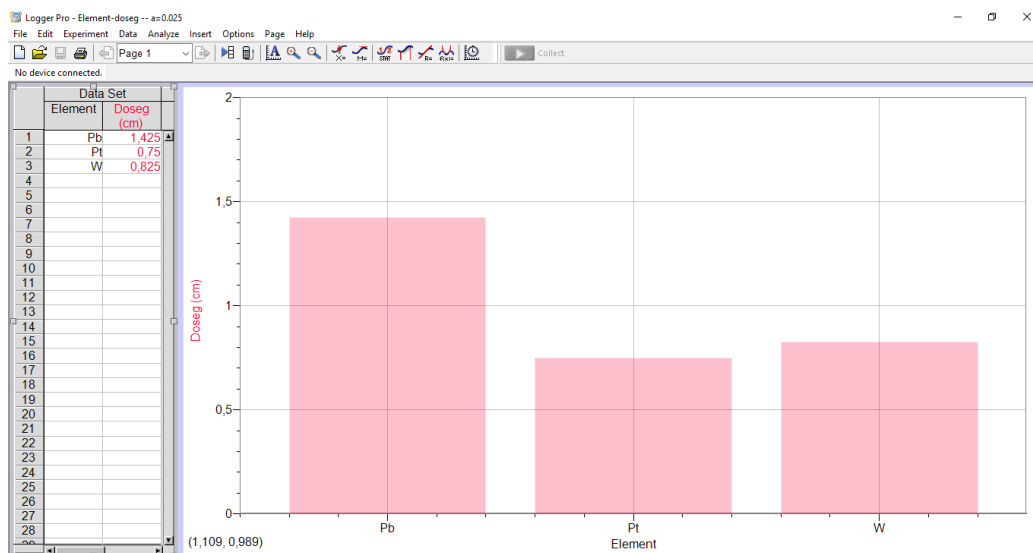


Slika 14: Doseg snopa protonov v platini (na grafu za absorbirano energijo je prva odebeljena črta na vrednosti $100\,000\text{ MeV} / 0,25\text{ mm}^2$)



Slika 15: Doseg snopa protonov v volframu (na grafu za absorbirano energijo je prva odebeljena črta na vrednosti $100\,000\text{ MeV} / 0,25\text{ mm}^2$)

Snop protonov v svincu ima približno dvakrat daljši doseg kot snop protonov v platini in volframu. Doseg protonov v slednjih dveh snoveh pa je precej podoben; le malo krajši doseg je imel snop protonov, s katerim smo obsevali platino (za 0,75 mm).



Slika 16: Primerjava globin snopov protonov (od leve proti desni) v svincu, platini in volframu

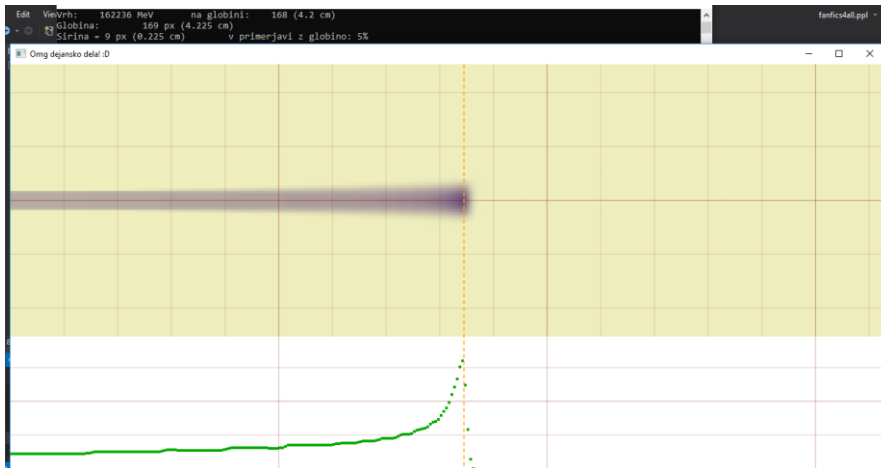
Tudi druga hipoteza te naloge je s tem ovržena. Pred protoni nas namreč ne štiti najboljše svinec, ker obstajajo drugi materiali, v katerih ima snop protonov veliko krajši doseg, kar je bilo dokazano z volframom in platino.

Protoni večino energije izgubijo v reakcijah z elektroni. Če je gostota elektronov v snovi velika, potem protoni hitreje izgubljajo energijo, saj pride do več interakcij na enoto dolžine. Gostota elektronov v snovi je odvisna od vrstnega števila atomov, ki snov sestavljajo, ter od gostote snovi (višja gostota, bolj so atomi nagnjeni drug ob drugem). Svinec ima vrstno število 82 in gostoto $11,35 \text{ kg/dm}^3$, platina pa ima vrstno število 78 in gostoto $21,45 \text{ kg/dm}^3$. Pri podobnem vrstnem številu ima platina skoraj dvakrat večjo gostoto, zato je doseg protonov skoraj dvakrat krajši. Zaradi nižje cene se kot zaščita vseeno uporablja svinec.

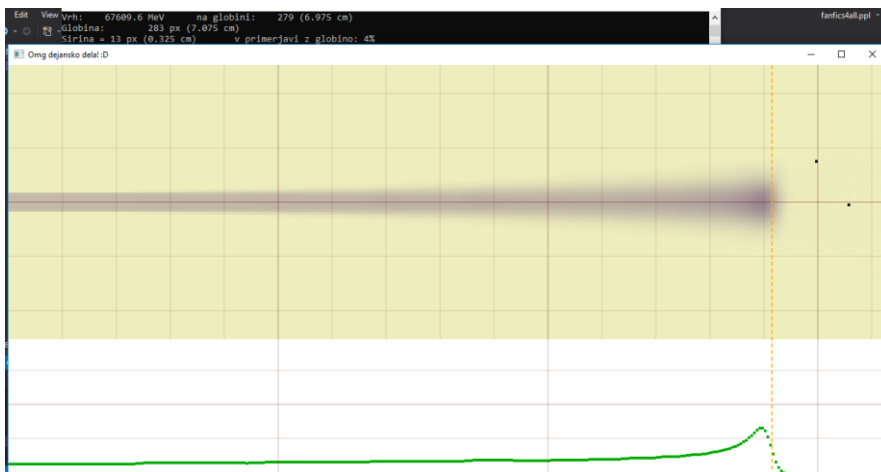
4.3 TRETJA HIPOTEZA

Raziskala sem še, kako je z dosegi protonskih snopov v bioloških materialih (kost, mišica, voda). Za te materiale sem vzela podatke iz vira (7). Sprememba podatkov je skrajšala doseg protonov v vodi za 0,3 cm (s 7,5 cm (poglavje 4.1) na 7,2 cm). Vendar, ker so vsi podatki z istega vira, to medsebojnih razmerij ne spremeni.

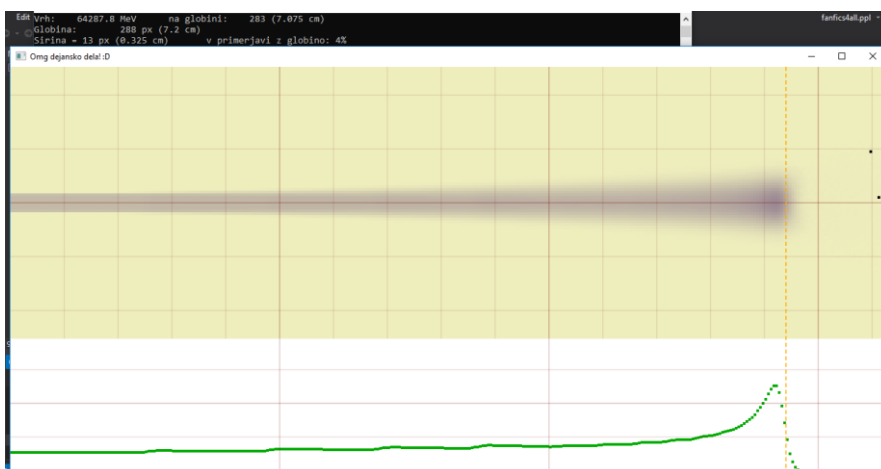
Raziskovalna naloga, Gimnazija Velenje, 2019



Slika 17: Doseg snopa protonov v kosti (na grafu za absorbirano energijo je prva odebeljena črta na vrednosti $100\,000\text{ MeV} / 0,25\text{ mm}^2$)

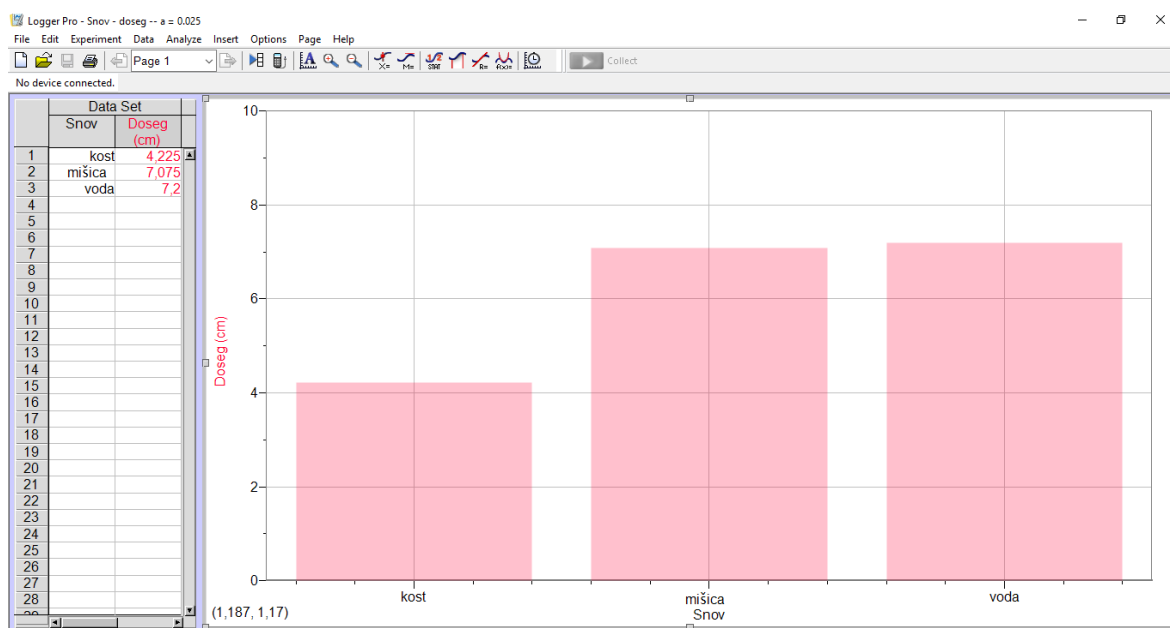


Slika 18: Doseg snopa protonov v mišici (na grafu za absorbirano energijo je prva odebeljena črta na vrednosti $200\,000\text{ MeV} / 0,25\text{ mm}^2$)



Slika 19: Doseg snopa protonov v vodi (na grafu za absorbirano energijo je prva odebeljena črta na vrednosti $100\,000\text{ MeV} / 0,25\text{ mm}^2$)

Raziskovalna naloga, Gimnazija Velenje, 2019



Slika 20: Primerjava dosegov snopov protonov (od leve proti desni) v kosti, mišici in vodi

Že na prvi pogled je vidno, da ima snop protonov v kosti najkrajši doseg. Dosega snopov protonov v mišici in vodi pa sta precej podobna. Podatki so pokazali, da ima snop protonov v mišicah vseeno krajši doseg kot snop protonov v vodi (razlika med dosegeoma je 1,25 mm).

Tako sem svojo tretjo hipotezo lahko potrdila. Izkazalo se je namreč, da imajo v izbranih snoveh, ki tvorijo človeško telo, protoni najkrajši doseg v kosti, nato v mišicah, najdaljšega pa v vodi.

Najpogostejša elementa v kosteh sta kisik in ogljik, v znatnem deležu pa najdemo tudi kalcij in fosfor z višjima vrstnima številoma. Poleg tega je gostota kosti $1,85 \text{ kg/dm}^3$, kar je precej več kot je gostota mišic ($1,04 \text{ kg/dm}^3$) in vode ($1,0 \text{ kg/dm}^3$). Zato je kratek doseg protonov v kosti pričakovan. Mišice v pretežni meri sestavljajo elementi kisik, ogljik in vodik, vsi z začetka periodnega sistema, tako da med mišico in vodo, ki je iz kisika in vodika, ni posebne razlike. Ker sta tudi gostoti mišice in vode skoraj enaki, sta posledično tudi dosega protonskih snopov skoraj identična.

5 ZAKLJUČEK

Protonom se v izbrani snovi pri naraščajočih začetnih energijah doseg povečuje. Le-ta v odvisnosti od začetne energije ne narašča linearno, ampak narašča s kvadratno funkcijo. Najboljša zaščita pred protonskim obsevanjem ni svinec, v človeškem telesu pa imajo protoni najkrajši doseg v kosti.

Med preučevanimi kovinami za zaščito se je kot najboljša izkazala platina, takoj za njo pa je bil volfram z razliko le 0,75 mm pri začetni energiji 100 MeV. Še nekoliko bolje od platine bi se lahko izkazal osmij z vrstnim številom 76 in največjo gostoto 22,57 kg/dm³. Vendar pa svinec tu primerjamo z zelo redkimi in dragocenimi kovinami; svinec je dostopen tako po količini kot po ceni, zato se vseeno uporablja kot zaščita pred protoni.

Pri preučevanju snovi, ki jih najdemo v človeškem telesu, je presenetil skoraj identičen doseg protonov v mišici in v vodi. »Protonsko slikanje« bi dalo tako podoben kontrast kot rentgensko slikanje: ločile bi se kosti od vseh ostalih tkiv in tekočin v telesu.

Zelo vesela sem, da sem se odločila za temo, za katero je bila potrebna računalniška simulacija, saj sem se naučila osnov programiranja v C++. Vem, da mi bo to znanje v prihodnosti koristilo. Dodatno motivacijo za raziskovanje mi je predstavljalo tudi podjetje Cosylab, ki je zelo uspešno pri razvoju programske opreme za pospeševalnike delcev; tudi v Sloveniji naj bi se namreč v prihodnosti zgradil pospeševalnik delcev namenjen protonskemu obsevanju.

6 POVZETEK

Pri zdravljenju tumorjev se v svetu vedno bolj uveljavlja metoda, pri kateri tumor obsevamo s protoni. Takšno zdravljenje je od bolj poznanega zdravljenja z rentgenskimi žarki veliko dražje, a hkrati bolj učinkovito. Njegova prednost je namreč v primernejši globinski dozni porazdelitvi; protonom se dozna porazdelitev po vstopu v snov povečuje, dokler ne doseže maksimuma, nato pa hitro pade na nič. Obsevanje s protoni tako manj poškoduje tkivo okrog tumorja kot obsevanje z rentgensko svetlobo.

V raziskovalni nalogi se je preučevala pot protonov v snovi, predvsem kako globoko prodre in koliko se razprši snop izstreljenih protonov, ki imajo na začetku vsi enako kinetično energijo. V ta namen je bil narejen računalniški program, ki simulira obnašanje protonov v izbrani snovi.

Zaradi velikega števila trkov lahko interakcije protonov s snovjo obravnavamo statistično, zato je v nalogi matematično pomembna Gaussova porazdelitev.

Postavljene so bile tri hipoteze. Najprej se je ugotavljalo, ali je doseg v snovi premo sorazmeren z začetno energijo protonov. Izkazalo se je, da to ni res in da se dobljeni odvisnosti lepo prilega kvadratna funkcija. Potem se je preverilo, katera snov nas najboljše ščiti pred protoni. Proti pričakovanjem to ni svinec, pač pa bolj učinkovito zaščito predstavljata volfram in platina. Nato so se obravnavale še snovi, ki sestavljajo človeško telo: kosti, mišice in voda. Protoni imajo pričakovano najkrajši doseg v kosti, skoraj enakega pa v mišicah in v vodi.

7 SUMMARY

When it comes to treating tumors, there is a method of treatment where we use protons instead of photons for radiation, and it is gaining in popularity. This method of treatment is more expensive but at the same time more effective than the more widely known treatment with X-ray radiation. The advantage of proton radiation lies in its more suitable dose distribution when compared to depth; when protons enter the material, their dose distribution gets larger until it reaches its maximum, and then it quickly falls down to zero. Because of this, the tissue around the tumor is less damaged with proton radiation than it is with X-ray radiation.

In this paper, the path of protons in different materials was studied, mostly how deep a proton beam (where all of the protons initially have the same energy) penetrates and how widely it disperses. A computer simulation which simulates how protons act in a chosen material was made for this study. Because the protons experience a large number of collisions, we treat the interactions between protons and the material statistically, which is also why the Gaussian distribution is mathematically significant in the paper.

Three hypotheses were proposed. First, the guess of whether or not the depth in a material is directly proportional with the initial energy of the protons was researched. It turned out that the guess is incorrect, and that the data neatly falls along the square function. Then the material which best protects us from proton radiation was looked for. Contrary to expectations, it is not lead because even tungsten and platinum are more suitable. At the end, three human materials (bone, muscle and water) were studied. As it was expected, the protons had the shortest range in bone but almost the same range in muscle and water.

8 ZAHVALA

Za pomoč pri tej raziskovalni nalogi bi se najprej rada zahvalila svojemu mentorju, ki mi je pomagal pri izdelavi moje prve raziskovalne naloge. Zahvalila bi se Luku Jevšenaku, ki je priskočil na pomoč, če se mi je kaj zalomilo s pisanjem programa, in seveda Gašperju Razdevšku, ki je s svojim znanjem s področja protonskega obsevanja v medicini pripomogel k izboljšanju simulacije, da je bolj točna. Rada bi se zahvalila tudi svojima lektoricama Urški Turinek (besedilo v slovenščini) in Alenki Gortan (besedilo v angleščini). Nazadnje pa bi se zahvalila še svoji družini, da me je podpirala pri raziskovanju.

9 PRILOGE

K raziskovalni nalogi je priložen del kode programa, ki prikazuje izračun poti posameznih protonov v vodi. Z oranžno barvo so dopisani komentarji.

10 VIRI IN LITERATURA (literatura, uporabljena pri oblikovanju naloge)

1. Bon Klanjšček, M., Felda D. 2012. Matematika 4: učbenik za gimnazije. DZS, Ljubljana.
2. Leo, W. R., 1987. Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments: A How to Approach. Springer Verlag Berlin, Heidelberg.
3. Mohorič, A., 2014. Fizika 3: učbenik za fiziko v 3. letniku gimnazij in štiriletnih strokovnih šol. Mladinska knjiga, Ljubljana.
4. Newhauser, W. D., Zhang, R, 2015. The Physics of Proton Therapy. IoP Publishing, Philadelphia.
5. Paganetti, H, 2017. Proton Beam Therapy. IoP Publishing, Philadelphia.
6. Razdevšek, G., 2018. Simulacija doze pri protonski terapiji v dinamični geometriji. FMF – Fakulteta za matematiko in fiziko, Ljubljana.
7. Singh, H., Rathi, S. K., Verma, A. S. Stopping Powers of Protons in Biological Human –body Substances. Universal Journal of Medical Science, 2013, številka 1,10, letnik 5.
8. NIST (National Institute of Standards and Technology).
www.physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/PSTAR.html (23. 12. 2018).
9. NPL (National Physical Laboratory).
www.kayelaby.npl.co.uk/atomic_and_nuclear_physics/4_5/4_5_1.html (5. 1. 2019).

10. PDG (Particle Data Group). www.pdg.lbl.gov/2018/AtomicNuclearProperties/index.html (5. 1. 2019).
11. Proton Therapy, Wikipedia. www.en.wikipedia.org/wiki/Proton_therapy (18. 1. 2019).

PRILOGA A

DEL KODE PROGRAMA, KI PRIKAZUJE IZRAČUN POTI POSAMEZNIH PROTONOV V VODI

```

float Gauss(float mi, float sigma)          (energijsko stresanje po Gaussu)
{
    float z, stresanje;
    int Pz, predznak;
    float zx[10] = { 1.6, 1.3, 1.0, 0.8, 0.7, 0.5, 0.4, 0.3, 0.1, 0 };
    //izbira
    Pz = rand() % 9 + 0;
    z = zx[Pz];
    //izbira predznaka
    predznak = rand() % 2 + 1;
    stresanje = z * sigma * (predznak * 2 - 3) + mi;    (enačba 6)
    return stresanje;
}
float Gaussfi(float sigma)                 (stresanje kota po Gaussu)
{
    float z, stresanje;
    int Pz, predznak;
    float zx[10] = { 1.6, 1.3, 1.0, 0.8, 0.7, 0.5, 0.4, 0.3, 0.1, 0 };
    //izbira
    Pz = rand() % 9 + 0;
    z = zx[Pz];
    //izbira predznaka
    predznak = rand() % 2 + 1;
    stresanje = z * sigma * (predznak * 2 - 3);    (enačba 6, mi=0)
    return stresanje;
}
int main()
{
    const int dol = 101, desno = 400;        (velikost mreže kvadratkov)
    float Grid[desno][dol] = {};
    const int stpr = 100000; // ŠTEVILO PROTONOV

    //PODATKI ZA VODO SO V TEH PETIH VRSTICAH
    float ZA = 0.56;
    float Lrad = 36.06;
    float ro = 1; // gostota [g / cm^3]
    float izgube[] = { 1.77E+05, 1.98E+05, 2.18E+05, ... podatki s strani NIST (vir 8), ... 7.57E+03, 7.29E+03 };
};
    float mejeizg[] = { 1.00E+00, 1.50E+00, 2.00E+00, ... podatki s strani NIST (vir 8), ... 9.50E+04, 1.00E+05 };
    float g = 0, sigmafi;
    float mi, sigma;
    int Globina;
    float a = 0.025; //korak a [cm]          (velikost stranice enega kvadrata)
    int beam = 13;
    sigma = sqrt(0.1569 * ro * ZA * a); // energijsko stresanje    (uporabljena enačba 1)
    srand(time(0));
    float globina[desno] = {};
    float depth[stpr] = {};

```

```

int line = 1;
for (int p = 0; p < stpr; p++)           (začetek zanke za proton)
{
    float Enpr = 100;
    float kot = 0;
    int m = 0, n = 0;
    float r = 0;
    float xs = 0, ys; //(beam - 1) / 2; // začetne koordinate
    for (int line = 0; p > line *stpr / beam; line++)
    {
        ys = (dol - (beam - 1) / 2 + line) * a / 2;
    }
    do
    {
        int i = 0;
        while (Enpr > (mejeizg[i] / 1000))           (program ugotovi koliko energije ima proton)
        {
            mi = izgube[i] / 1000;
            i += 1;
        }
        sigmafi = (10 / Enpr * sqrt(a / 36.08) * (1 + log(a / 36.08) / (9 * log(10)))) / sqrt(2); (enačbi 2
in 3)
        kot += Gaussfi(sigmafi); (podprogram iz začetka priloge strese novi kot po Gaussu in ga
prišteje staremu kotu)

        xs += a; //skupna pot po x in y
        ys += a * tan(kot);
        r = a / cos(kot);
        mi = mi * r * ro;
        m = round(xs / a) - 1;
        n = trunc(ys / a);
        g = Gauss(mi, sigma); (izračunana energijska izguba se strese po normalni porazdelitvi)
        if (g <= Enpr)
        {
            Enpr -= g; (proton izgubi izračunano energijo)
            Grid[m][n] += g; (obsevana snov absorbira energijo, ki jo je proton izgubil)
        }
        else (ko proton pride v svoj zadnji kvadrant izgubi vso energijo; ostane mu 0 MeV)
        {
            Grid[m][n] += Enpr;
            Enpr = 0;
        }
    } while (Enpr > 0); (energijske vrednosti protona se računajo, dokler ima proton še vsaj
nekaj energije)

    depth[p] = m; (izračunan doseg protona)
} // konec zanke za protone

```