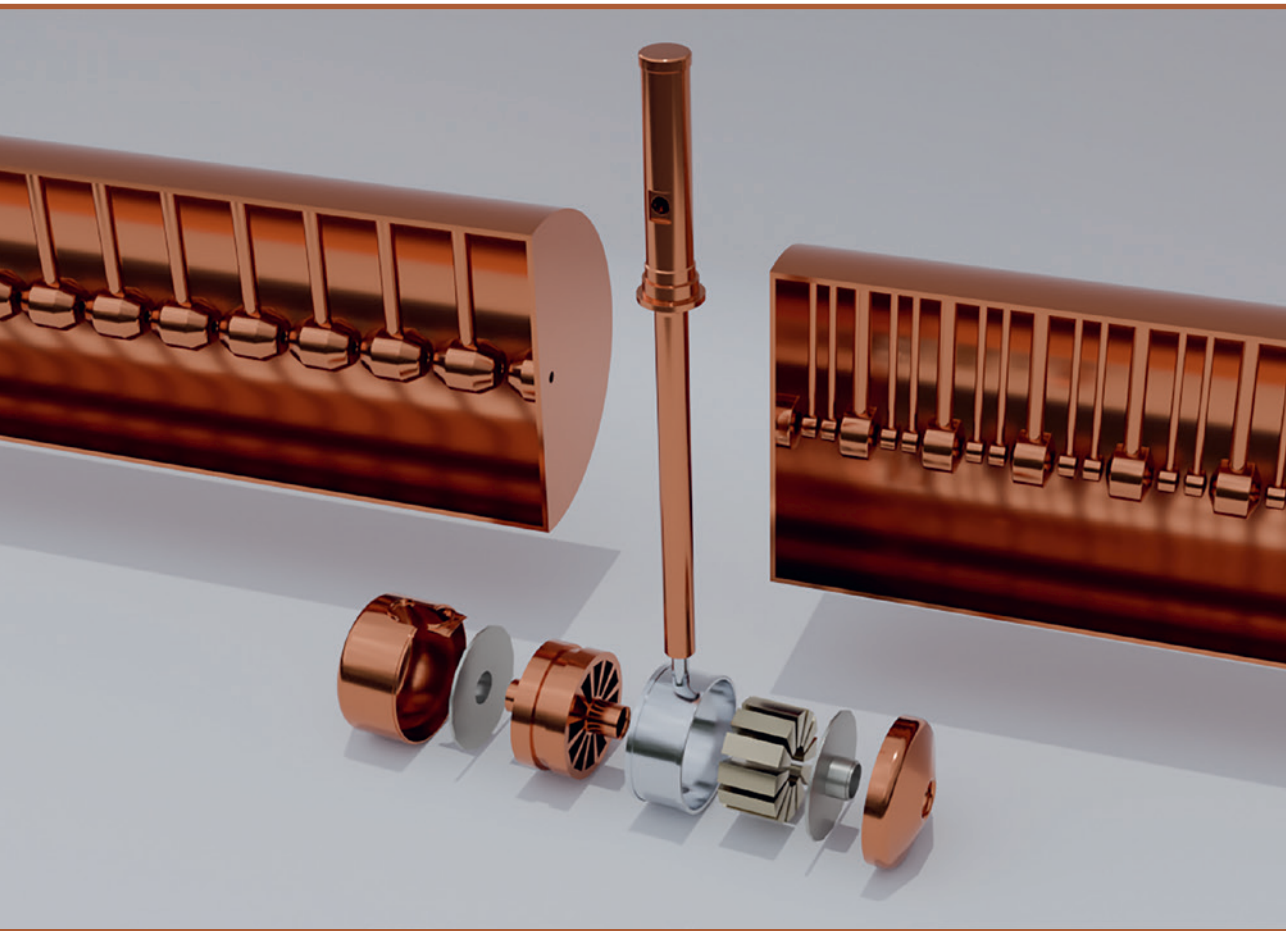
RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Lazar Nikitović

LINEĀRI PAĀTRINOŠO STRUKTŪRU IZSTRĀDE JONU INJICĒŠANAI VĒŽA TERAPIJAS SINHROTRONĀ UN PARALĒLAI RADIOIZOTOPU RAŽOŠANAI

Promocijas darba kopsavilkums



RTU Izdevniecība
Rīga 2026

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Dabaszinātņu un tehnoloģiju fakultāte
Daļiņu fizikas un paātrinātāju tehnoloģiju institūts

Lazar Nikitović
Doktorantūras studiju programmas
"Daļiņu fizika un paātrinātāju tehnoloģijas" doktorants

LINEĀRI PAĀTRINOŠO STRUKTŪRU IZSTRĀDE JONU INJICĒŠANAI VĒŽA TERAPIJAS SINHROTRONĀ UN PARALĒLAI RADIOIZOTOPU RAŽOŠANAI

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji

Dr. sc. ing.
TOMS TORIMS

Dr. phys.
MAURIZIO VRETENAR

RTU Izdevniecība
Rīga 2026

Nikitović, L. Lineāri paātrinošo struktūru izstrāde jonu injicēšanai vēža terapijas sinhrotronā un paralēlai radioizotopu ražošanai. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2026, 71 lpp.

Publicēts saskaņā ar fizikas un astronomijas zinātņu nozaru promocijas padomes "RTU P-03" 2026. gada 26. augusta lēmumu Nr. 04030-9.3.2/5.

Pētījums izstrādāts sadarbībā ar Eiropas Kodolpētījumu organizācijas (CERN) *Next Ion Medical Machine Study* (NIMMS) grupu.



Šis darbs izstrādāts un finansēts sadarbībā ar:

- valsts pētījumu programmu (VPP) "Augstas enerģijas fizika un paātrinātāju tehnoloģijas" VPP-IZM-CERN-2020/1-0002; VPP-IZM-CERN-2022/1-0001;



- *Horizon* 2020 projektu "*Heavy Ion Therapy Research Integration plus*" (HITRI*plus*) WP7.4. Šis projekts saņēmis finansējumu no Eiropas Savienības Pētniecības un inovāciju programmas *Horizon* 2020 atbilstoši granta līgumam Nr. 101008548.



Vāka attēla autors – Lazar Nikitović.
https://doi.org/10.7250/9789934373510
ISBN 978-9934-37-351-0 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai fizikas un astronomijas nozarē tiek publiski aizstāvēts RTU promocijas padomē "RTU P-03" 2026. gada 30. novembrī plkst. 15.00 tiešsaistē *Zoom* platformā: https://rtucloud1.zoom.us/j/918551261387.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Dr. Giovanni Bisoffi
Nukleārās fizikas nacionālais institūts (INFN), Itālija

Dr. Jean-Baptiste Lallement
Eiropas Kodolpētījumu organizācija (CERN), Šveice

Profesors *Dr.* Hendrik Hähnel
Frankfurtes Gētes universitāte (GU), Vācija

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē fizikas doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Lazar Nikitović _____

Datums: _____

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā. Tajā ir ievads, sešas nodaļas (ietverot ievadu un secinājumus), 88 attēli, 36 tabulas, divi pielikumi, kopā 165 lappuses, neieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 118 atsauces.

SAĪSINĀJUMI

Saīsinājums	Nozīme
AERT	Ožē elektronu terapija
BEVA	*Bevatech GmbH*
BTL	kūļa transporta līnija
CCDTL	šūnu savienots dreifa cauruļu lineārais paātrinātājs
CERN	Eiropas Kodolpētījumu organizācija
CNAO	Nacionālais onkoloģiskās hadronu terapijas centrs
DC	līdzstrāva
DEB	kūļa pakešu apvienošanas dobums
DT	dreifa caurule
DTL	Alvaresa dreifa cauruļu lineārais paātrinātājs
EM	elektromagnētisms/elektromagnētiskais
ERC	enerģijas palielināšanas dobums
ESS	Eiropas atšķelto neitronu avots
GUI	grafiskā lietotāja saskarne
HIT	Heidelbergas Jonu terapijas centrs
HITRI*plus*	*Heavy Ion Therapy Research Integration plus* projekts
IAEA	Starptautiskā Atomenerģijas aģentūra
IH-DTL	H veida interdigitālais dreifa cauruļu lineārais paātrinātājs
KONUS	kombinēta 0 pakāpes struktūra
LANL	Losalamosas Nacionālā laboratorija
MIT	Mārburgas Jonu terapijas centrs
NIMMS	*Next Ion Medical Machine Study*
PET	pozitronu emisijas tomogrāfija
PMQ	pastāvīgo magnētu kvadrupols
QA-DTL	Kvazi-Alvaresa dreifa cauruļu lineārais paātrinātājs
RF	radiofrekvence
RHIC	relatīvistisko smago jonu kolaideris
S-IH-DTL	atdalītu dobumu H veida interdigitālais dreifa cauruļu lineārais paātrinātājs
SEEIIST	Dienvidaustrumeiropas Starptautiskais Ilgtspējīgu tehnoloģiju institūts
SPECT	viena fotona emisijas datortomogrāfija
SSA	cietvielu pastiprinātājs
SW	stāvviļņi
TAT	mērķētā alfa daļiņu terapija
TE	šķērselektriskais
TM	šķērsmagnētiskais
WP	darba paka

APZĪMĒJUMI

Simbols	Nozīme
$A_{xx'}$	– Tvisa elipses laukums horizontālajā fāžu telpā, mm. mrad
$\vec{B}$	– magnētiskā lauka indukcijas vektors, T
B_x	– magnētiskā lauka indukcijas horizontālā komponente, T
B_y	– magnētiskā lauka indukcijas vertikālā komponente, T
B_z	– magnētiskā lauka indukcijas aksiālā komponente, T
C'_{dt}	– vienas dreifa caurules ražošanas izmaksas, €
C_l	– paātrinātāja struktūras kapitālizmaksas, €/m
C_l^{DTL}	– DTL kapitālizmaksas, €/m
C_l^{QA}	– QA-DTL kapitālizmaksas, €/m
C_p	– radiofrekvenču sistēmas kapitālizmaksas, €/W
C'_{pmq}	– viena pastāvīgo magnētu kvadrupola ražošanas izmaksas, €
C'_{tank}	– ietvara ražošanas izmaksas uz metru, €/m
C_{tot}	– lineārā paātrinātāja struktūras kopējās izmaksas, €
E_0	– vidējā aksiālā elektriskā lauka intensitāte, V/m
E_z	– elektriskā lauka intensitātes aksiālā komponente, V/m
L_c	– šūnas garums, m
L_f	– plakanās malas garums, m
L_g	– spraugas garums, m
L_s	– kājiņas diametrs, m
N_{cell}	– šūnu skaits izstrādātajā lineārā paātrinātāja struktūrā
N_p	– daļiņu skaits kūlī
P_b	– kūļa jauda, W
P_d	– rezonatora izkliedētā jauda, W
R_b	– atveres rādiuss, m
R_{cav}	– dobuma rādiuss, m
R_c	– stūra rādiuss, m
R_{dt}	– dreifa caurules rādiuss, m
R_i	– iekšējā izvirzījuma rādiuss, m
R_o	– ārējā izvirzījuma rādiuss, m
T	– tranzīta laika faktors
V_0	– aksiālais RF spriegums, V
W_{IN}	– lineārā paātrinātāja ievades enerģija, MeV
W_{OUT}	– lineārā paātrinātāja izvades enerģija, MeV
W_{cur}	– izstrādātās šūnas ievades enerģija, MeV
Z	– efektīvā šunta pretestība, Ω
$ZT2_{best}$	– lielākā iegūtā efektīvā šunta pretestība uz vienības garumu

	izstrādātajās šūnās, Ω/m
$ZT2_{cal}$	– aprēķinātā efektīvā šunta pretestība uz vienības garumu izstrādātajās šūnās, Ω/m
Z' vai $ZT2$	– efektīvā šunta pretestība uz vienības garumu, Ω/m
ΔW	– enerģija, ko daļiņa iegūst šūnā, MeV
$\Delta\phi_c$	– fāzes nobīde starp divām blakus esošām šūnām, $^\circ$
$\alpha(s)$	– alfa funkcija, viens no trim Tvisa parametriem
β	– daļiņas ātrums attiecībā pret gaismas ātrumu vakuumā
$\beta(W_{cur})$	– daļiņas ātrums, kas atbilst W_{cur} enerģijai
$\beta(s)$	– beta funkcija, viens no trim Tvisa parametriem, mm/π·mrad
γ	– virsmas leņķis, $^\circ$
$\gamma(s)$	– gamma funkcija, viens no trim Tvisa parametriem, π·mrad/mm
λ	– radiofrekvences viļņa garums, m
ϕ	– lauka fāze attiecībā pret tā maksimumu, $^\circ$
ϕ_s	– sinhronās daļiņas fāze, $^\circ$
θ_e	– Tvisa elipses rotācijas leņķis, $^\circ$
ε	– vides dielektriskā caurlaidība, F/m
$\varepsilon_{xx'}$	– kūļa emitance horizontālajā fāžu telpā, π·mm·mrad
f_{res}	– rezonanses frekvence, Hz
k_{ch}	– palīgmainīgais
l	– cilindriskā rezonatora garums, m
n_p	– periodiskuma faktors QA-DTL struktūrā
$\vec{p}_r$	– kustībā esošas relatīvistiskas daļiņas impulsa vektors, kg·m/s
q	– daļiņas elektriskais lādiņš, C
s	– kūļa abscisa lineārā paātrinātāja struktūrā, m
v	– daļiņas ātrums, m/s
v_z	– daļiņas ātrums garenvirzienā, m/s

Satura rādītājs

1 Promocijas darba vispārējs apraksts **9**

1.1 Promocijas darba mērķis 9

1.2 Pētījuma hipotēze 10

1.3 Promocijas darba tvērums 10

1.4 Promocijas darba uzdevumi 10

1.5 Zinātniskā novitāte 10

1.6 Praktiskā nozīme un lietojamība 11

1.7 Rezultātu aprobācija 11

2 Lineārā paātrinātāja struktūras medicīniskiem lietojumiem **13**

2.1 HITRI*plus* projekts 15

2.2 NIMMS sadarbība 16

2.3 Radioizotopu ražošana ar lineāro paātrinātāju 17

3 Lineārā paātrinātāja struktūru radiofrekvenču un staru kūļa optikas teorija **19**

3.1 Elektromagnētiskā lauka teorija lineārā paātrinātāja struktūrām 19

3.2 Staru kūļa optika lineārā paātrinātāja struktūrām 22

3.3 Analizētās struktūras paātrināšanai un staru kūļa vadībai 25

3.4 Alvaresa tipa lineārā paātrinātāja struktūru izmaksu efektivitātes aprēķini . . . 30

4 Matemātiskais modelis lineārā paātrinātāja struktūru ģeometrisko parametru optimizācijai **33**

4.1 Simulācijas programmatūra 33

4.2 Projektēšanas metodika un optimizācijas algoritmi 34

5 Pētījuma rezultāti **39**

5.1 Izstrādātais HITRI*plus* oglekļa lineārais paātrinātājs 39

5.1.1 Kvazi-Alvaresa dreifa cauruļu lineārais paātrinātājs oglekļa jonu ievadei sinhrotronā 39

5.1.2 Alvaresa dreifa cauruļu lineārais paātrinātājs radioizotopu ražošanai . . 42

5.1.3 DEB pirms injekcijas oglekļa sinhrontronā 46

5.1.4 Salīdzinājums un ideālas lineārā paātrinātāja konfigurācijas izvēle . . . 47

5.2 NIMMS hēlija lineārā paātrinātāja dizaini 50
5.2.1 Kvazi-Alvaresa dreifa cauruļu lineārais paātrinātājs hēlija injekcijai sinhrontronā un radioizotopu ražošanai 50
5.2.2 Alvaresa dreifa cauruļu lineārais paātrinātājs radioizotopu ražošanai . . 54
5.2.3 DEB un enerģijas palielināšanas dobums pirms injekcijas hēlija sinhrontronā 58
5.2.4 Salīdzinājums un ideālās lineārā paātrinātāja konfigurācijas izvēle . . . 59
5.3 Hēlija lineārā paātrinātāja dizains radioizotopu ražošanai 61

6 Secinājumi **64**
6.1 Aizstāvamās tēzes 65
6.2 Turpmākie pētniecības virzieni 66

LITERATŪRAS AVOTI **67**

1. Promocijas darba vispārējs apraksts

1.1 Promocijas darba mērķis

Šī promocijas darba mērķis ir izveidot inovatīvas lineārā paātrinātāja struktūras ar augstu efektivititāti, kas lietojamas kā injektori daļiņu terapijas sinhrotroniem, un salīdzināt tās ar pastāvošajām struktūrām. Lineārā paātrinātāju struktūru izstrāde ir vērsta uz staru kūļa kvalitātes un energoefektivitātes optimizēšanu salīdzinājumā ar esošajām, nodrošinot uzlabotu veiktspēju klīniskajos apstākļos. Spēja paātrināt gan oglekļa, gan hēlija jonus vienā lineārā paātrinātāja sistēmā palielina konstrukcijas pielāgojamību un lietojamību. Izstrādāto lineārā paātrinātāja struktūru salīdzinājums ar esošajām ļauj izvēlēties visdaudzsološāko struktūru nākamās paaudzes iekārtām.

Papildus lomai vēža ārstēšanās iekārtās lineārais paātrinātājs tiek paredzēts arī kā daudzpusīga sistēma, kas spēj nodrošināt radioizotopu ražošanu. Pieprasījums pēc medicīniskajiem radioizotopiem, īpaši attēldiagnostikā un terapeitiskajās procedūrās, turpina pieaugt, tādējādi radot nepieciešamību pēc jaunām ražošanas metodēm. Nodrošinot augstas intensitātes un precīzu jonu staru paātrināšanu, piedāvātā lineārā paātrinātāja struktūra var sekmēt ražošanu radioizotopiem, kas plaši tiek izmantoti terapijā un diagnostikā.

Viens no šī pētījuma centrālajiem uzdevumiem ir izveidot sistemātisku pieeju efektīvas lineārā paātrinātāja struktūras izstrādei, kas būtu pielāgota divējādai darbībai – injicēšanai sinhrotronā un radioizotopu ražošanai. Lai to sasniegtu, darbā tiek piedāvāts algoritmu kopums lineārā paātrinātāja struktūru izstrādei, kuru mērķis ir maksimizēt efektīvo šunta impedanci uz vienības garumu – būtisks parametrs, kas ietekmē enerģijas patēriņu un paātrināšanas efektivitāti. Šie algoritmi ir ieviesti divās grafiskajās lietotāja saskarnēs, kuras izveidojis promocijas darba autors, ļaujot automatizēt lineārā paātrinātāja struktūru izstrādes procesu.

Šī darba praktiskais mērķis ir veicināt paātrinātāju tehnoloģiju attīstību, piedāvājot lineārā paātrinātāja struktūras risinājumu, kas atbilst mūsdienu daļiņu terapijas un radioizotopu ražošanas mainīgajām prasībām. Pētījums veido pamatu nākamās paaudzes lineārajiem paātrinātājiem, kas spēj nodrošināt augstas kvalitātes jonu staru ar paaugstinātu efektivitāti.

1.2 Pētījuma hipotēze

Izmantojot jaunākās paātrinātāju tehnoloģijas un modernus simulācijas rīkus, ir iespējams izstrādāt lētākus un pielāgojamākus lineāros paātrinātājus nekā līdz šim izmantotie jonu injicēšanai terapijas sinhrotronos, kuri vienlaikus spēj nodrošināt arī radioizotopu ražošanu.

1.3 Promocijas darba tvērums

Promocijas darba tvērums ir jaunas lineārā paātrinātāja struktūras izstrāde jonu injicēšanai vēža terapijas sinhrotronā, kuras mērķis ir samazināt izmaksas un uzlabot veiktspēju salīdzinājumā ar pašlaik izmantotajām, vienlaikus nodrošinot iespēju ražot radioizotopus.

1.4 Promocijas darba uzdevumi

Lai sasniegtu galveno mērķi, tika izvirzīti šādi uzdevumi:

1. izpētīt pastāvošās jonu lineāro paātrinātāju struktūras, ko varētu izmantot kā oglekļa un hēlija jonu injektorus vēža terapijas sinhrotronā;
2. definēt optimizācijas metodoloģiju, lai izstrādātu lineārā paātrinātāja struktūru dizainu, maksimizējot to jaudas efektivitāti un nodrošinot kūļa pārnesi bez daļiņu zuduma;
3. izstrādāt dažādu lineārā paātrinātāja struktūru dizainus un optimizēt tos, nodrošinot vajadzīgos ieejas un izejas parametrus, lai izmantotu tās kā jonu injektorus vēža terapijas sinhrotronos vai lietotu radioizotopu ražošanā pie dažādām enerģijām;
4. salīdzināt izstrādātos dažādos lineārā paātrinātāja struktūru dizainus un izvēlēties kopumā vislabāko risinājumu nākotnes oglekļa un hēlija jonu vēža terapijas centros;
5. integrēt izstrādāto lineārā paātrinātāja struktūru dizainus izskatītajos hēlija un oglekļa jonu terapijas centros.

1.5 Zinātniskā novitāte

Šis promocijas darbs sniedz būtisku ieguldījumu paātrinātāju tehnoloģiju sfērā ar šādiem svarīgākajiem sasniegumiem:

1. ir izstrādāta inovatīva jonu lineārā paātrinātāja struktūra kā injektors vēža terapijas sinhrotronos, sniedzot uzlabotus kūļa izejas parametrus, salīdzinot ar pašreiz lietotajiem IH-DTL injektoriem;
2. izstrādātie optimizācijas rīki nav limitēti izmantošanai tikai lineārā paātrinātāja struktūrām, kas lietojamas kā injektori vēža terapijas sinhrotronos, bet lietojami arī jonu lineārā paātrinātāju dizainiem, kas lietojami citās sfērās.

1.6 Praktiskā nozīme un lietojamība

1. Alvaresa tipa lineārā paātrinātāja konfigurācija sniedz īsāku un uzlabotu lineārā paātrinātāja risinājumu nākotnes daļiņu terapijas centriem, nodrošinot augstāku kūļa kvalitāti ar salīdzināmu enerģijas patēriņu kā IH-DTL bāzēti risinājumi.

2. Kā atsevišķu struktūru, piedāvāto Alvaresa tipa lineārā paātrinātāja struktūru var lietot inovatīvu radioizotopu ražošanai ar augstas intensitātes kūļiem pie zemākām izmaksām, salīdzinot ar esošajiem risinājumiem.

3. Izstrādātā Alvaresa tipa lineārā paātrinātāja konfigurācija ir daļa no kopējā dizaina HITRI*plus* oglekļa jonu lineārajam paātrinātājam[1] un NIMMS hēlija jonu lineārajam paātrinātājam[2]. Pateicoties promocijas darbā izklāstītajai veiktspējai, izstrādātā lineārā paātrinātāja konfigurācijas tika izvēlētas arī kā injektors nākotnes plānotajā daļiņu terapijas centrā pēc *Advanced Particle Therapy Center for the Baltic States* iniciatīvas[3].

1.7 Rezultātu aprobācija

Publikācijas recenzētos žurnālos

1. **L. Nikitovic**, M. Vretenar and T. Torims, "An Alvarez-type linac configuration for future carbon and helium ion therapy facilities with parallel radioisotope production", *Instruments* 2026; 10(1):16, https://doi.org/10.3390/instruments10010016

2. M. Vretenar, A. Lombardi and **L. Nikitovic**, "A helium ion linear accelerator optimised for astatine production", *Instruments* 2026; 10(2):25, https://doi.org/10.3390/instruments10020025

Publikācijas konferenču krājumos

1. **L. Nikitovic**, T. Torims and M. Vretenar, "Comparison of 352 MHz linac structures for injection into an ion therapy accelerator", Journal of Physics: Conference Series, Jan. 2024, pp. 1–8, https://doi.org/10.1088/1742-6596/2687/5/052011

2. **L. Nikitovic**, T. Torims and M. Vretenar, "Design of a helium ion linear accelerator for injection in a particle therapy synchrotron and parallel production of radioisotopes", in Proc. LINAC2024, Chicago, IL, USA, Aug. 2024, pp. 147–150, https://doi.org/10.18429/JACoW-LINAC2024-MOPB045

[1] Vietne: https://www.hitriplus.eu
[2] Vietne: https://nimms.web.cern.ch
[3] Saite: https://link.springer.com/article/10.1007/s12553-024-00875-2

3. M. Vretenar, A. Lombardi and **L. Nikitovic**, ”Design of a helium ion linear accelerator for astatine production”, in Proc. IPAC25, Taipei, Taiwan, Jun. 2025, pp. 1044–1047, https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2025-TUPB046

Prezentācijas un semināri

1. ”Comparison of Linac Structures for Injection into an Ion Therapy Accelerator and parallel production of radioisotopes”, Joint NIMMS-SEEIIST Meeting #96, 14th Jul. 2023, https://indico.cern.ch/event/1306275/

2. ”Linac design for HeLICS injector and for production of 211At”, Internal NIMMS Meeting #51, 27th Sep. 2024, https://indico.cern.ch/event/1460836/

3. ”Novel LINAC Design for Hadrontherapy and Radioisotope Production”, MAPF meeting, 06.12.2023, https://indico.cern.ch/event/1217587/

Dalība konferencēs

1. 2nd CERN Baltic Conference (CBC 2022), oral presentation on ”Design of DTL for Acceleration of Ions with charge-to-mass Ratio of 1/2 with a Potential Production of Radioisotopes”, 10–12 Oct. 2022, Vilnius, Lithuania, https://indico.cern.ch/event/1147717/

2. 3rd CERN Baltic Conference (CBC 2023), poster presentation on ”Comparison of different LINAC structures for injection into an ion therapy accelerator and parallel production of radioisotopes”, 9–11 Oct. 2023, Riga, Latvia, https://indico.cern.ch/event/1288731/

3. 4th CERN Baltic Conference (CBC 2024), oral presentation on ”Novel linear accelerator design for injection of helium ions into a particle therapy synchrotron and parallel radioisotope production”, 15–17 Oct. 2024, Tallinn, Estonia, https://indico.cern.ch/event/1416853/

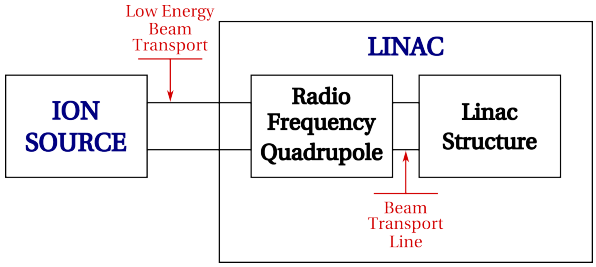
4. 14th International Particle Accelerator Conference (IPAC’23), poster presentation on ”Comparison of 352 MHz LINAC structures for injection into an ion therapy accelerator”, 7–12 May 2023, Venice, Italy, https://www.ipac23.org/

5. 3rd I.FAST Annual Meeting, discussions on novel linac designs, 16–19 Apr. 2024, Paris, France, https://indico.cern.ch/event/1357302/

2. Lineārā paātrinātāja struktūras medicīniskiem lietojumiem

Lineāros paātrinātājus izmanto kā patstāvīgas iekārtas dažādos zinātniskos un komerciālos lietojumos. Turklāt lielākajai daļai cirkulāro daļiņu paātrinātāju nepieciešams lineārais paātrinātājs kā injektors, padarot to par būtisku komponenti šādos kompleksos. Mūsdienās pasaulē darbojas vairāk nekā 30 000 daļiņu paātrinātāju, no kuriem aptuveni puse ir elektronu lineārie paātrinātāji, kas tiek izmantoti slimnīcās staru terapijā rentgenstaru ražošanai vēža ārstēšanai [1].

Lineārie paātrinātāji, ko izmanto smagāku daļiņu paātrināšanai – tādu, kas kļūst relatīvistiskas tikai pie augstām enerģijām, piemēram, protoni un smagākie joni, – sastāv no struktūras, kas sniedz iepriekšēju paātrinājumu un nodrošina kūļa fokusēšanu (parasti radiofrekvenču kvadrupols), kā arī no vienas vai vairākām lineārā paātrinātāja struktūrām atkarībā no lietojuma un vēlamās izejas enerģijas, kā parādīts 2.1. attēlā.

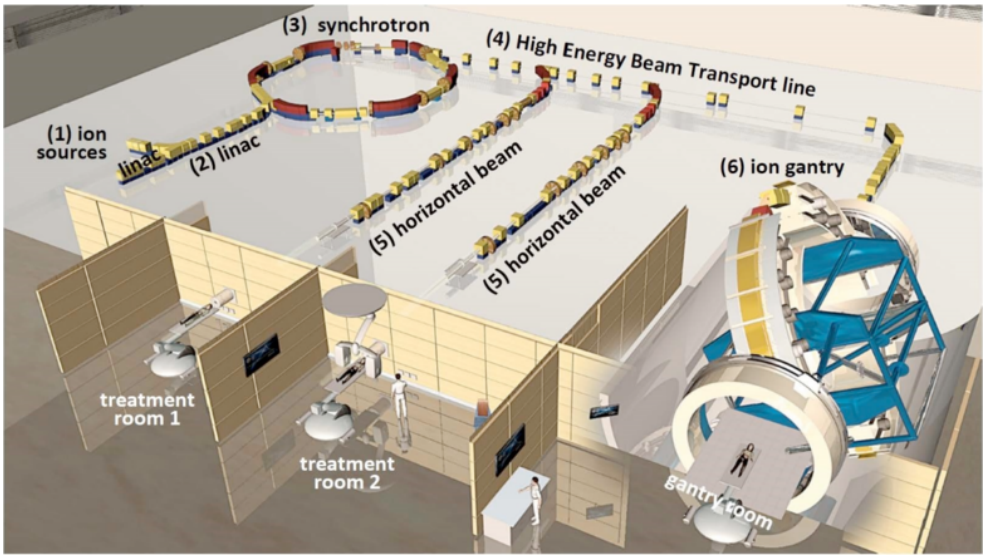


2.1. attēls. Tipiskas jonu avota un lineārā paātrinātāja konfigurācijas shematisks attēlojums.

Galvenie kritēriji, kas jāņem vērā efektīva risinājuma noteikšanai un vispiemērotākās lineārā paātrinātāja struktūras izvēlei konkrētam lietojumam, ir paātrināmās daļiņas veids, enerģijas diapazons un darbības režīms. Šī darba ietvaros aplūkotajam medicīniskajam lietojumam potenciālie kandidāti ir Alvaresa dreifa cauruļu lineārais paātrinātājs (no angļu valodas *Alvarez drift tube linac* (DTL)) un tā modifikācija – kvazi-Alvaresa dreifa cauruļu lineārais paātrinātājs (no angļu valodas *Quasi-Alvarez drift tube linac* (QA-DTL)), kā arī H veida interdigitālais dreifa cauruļu lineārais paātrinātājs (no angļu valodas *Interdigital H-type drift tube linace* (IH-DTL)) un tā modifikācija – atdalītu dobumu H veida interdigitālais dreifa cauruļu lineārais paātrinātājs (S-IH-DTL).

Tipiskas daļiņu terapijas iekārtas izkārtojums, piemēram, Heidelbergas Jonu terapijas centrā,

parādīts 2.2. attēlā, uzsverot lineārā paātrinātāja novietojumu un tā izmērus salīdzinājumā ar pārējām iekārtas daļām.



2.2. attēls. Daļiņu terapijas iekārtas izkārtojums Heidelbergas Jonu terapijas centrā (avots: [2]).

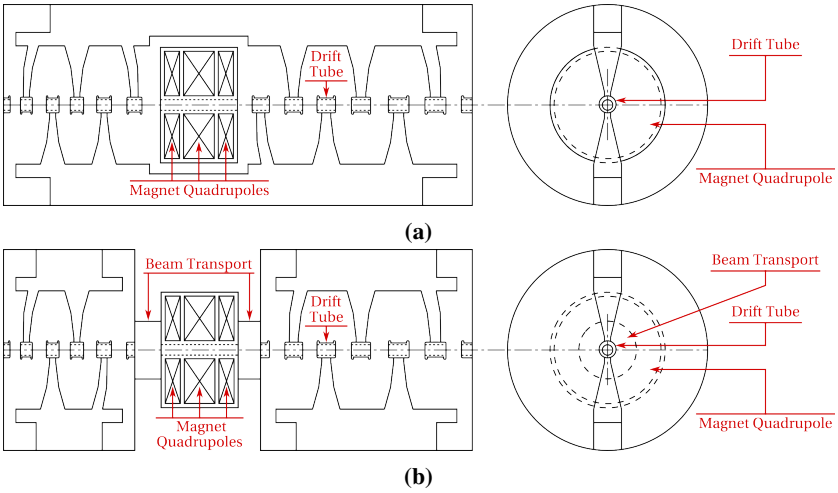
Lineārā paātrinātāja struktūrai daļiņu terapijas centrā jābūt kompaktai, ļoti energoefektīvai, kā arī ar zemām ekspluatācijas un uzturēšanas izmaksām. Mūsdienās protonu vai smagāku daļiņu sākotnējā paātrināšana pirms injicēšanas daļiņu terapijas iekārtās parasti tiek veikta, izmantojot DTL vai IH-DTL struktūras.

Eiropā pašlaik pastāv tikai četri daļiņu terapijas centri, kuros oglekļa joni tiek izmantoti vēža ārstēšanai: *MedAustron* Austrijā [3], Mārburgas Jonu terapijas centrs (MIT) Vācijā [4], Heidelbergas Jonu terapijas centrs (HIT) Vācijā un Nacionālais Onkoloģiskās hadronu terapijas centrs (CNAO) Itālijā [5].

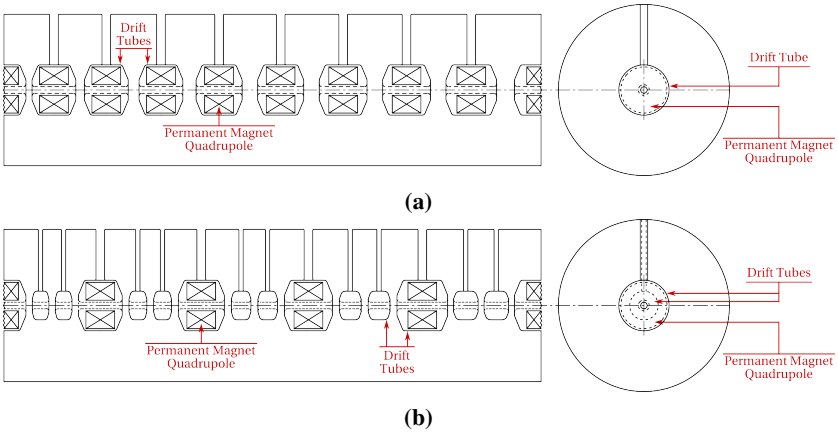
IH-DTL struktūra un tās modifikācija S-IH-DTL parādītas 2.3. attēlā.

Savukārt DTL struktūra ir sevi pierādījusi kā uzticamu lineārā paātrinātāja risinājumu, darbojoties kā protonu injektors sinhrotroniem vadošajās pētniecības iestādēs, kas izmanto daļiņu paātrinātāju, visā pasaulē, piemēram, Eiropas Kodolpētniecības centrā (CERN) [6], Relatīvistisko smago jonu kolaiderī (RHIC) [7], Eiropas atšķelto neitronu avotā (*The European Spallation Source* – ESS) [8] un citur.

Diemžēl DTL struktūra nav guvusi plašu atzinību kā oglekļa jonu injektors sinhrotroniem, tāpēc šī darba mērķis ir veikt padziļinātu modificētās DTL struktūras – QA-DTL – izpēti un izskatīt tās kā sinhrotrona injektora potenciālu un atzīšanu. QA-DTL ieviešana paver ceļu Alvaresa tipa struktūru izmantošanai oglekļa jonu injicēšanai. DTL un QA-DTL struktūru shēma parādīta 2.4 attēlā.



2.3. attēls. (a) IH-DTL un (b) S-IH-DTL lineārā paātrinātāja struktūru šķērsgriezumi.

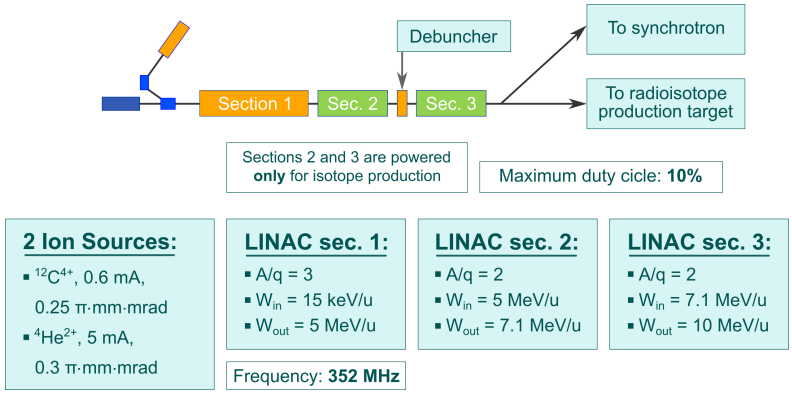


2.4. attēls. (a) DTL un (b) QA-DTL lineārā paātrinātāja struktūru šķērsgriezumi.

2.1 HITRI*plus* projekts

Heavy Ion Therapy Research Integration plus (HITRI*plus*) projekta mērķis ir integrēt un attīstīt medicīnas un biofizikas pētījumus par vēža ārstēšanu ar smagajiem joniem, vienlaikus izstrādājot nepieciešamos augsti specializētus instrumentus tehnoloģiskajam nodrošinājumam [9].

Šī darba kontekstā nozīmīgā darba pakotne (WP) ir WP7, īpaši 7.4. uzdevums. Tas ir veltīts injektora lineārā paātrinātāja konstrukcijas uzlabošanai, un to īsteno *Bevatech GmbH* (BEVA) – CERN komanda ar Dienvidaustrumeiropas Starptautiskā Ilgtspējīgu tehnoloģiju institūta (SEEIIST) līdzdalību. Šajā darbā prezentētās lineārā paātrinātāja struktūru konstrukcijas ir izstrādājis šī promocijas darba autors, balstoties tā izvietojumā, kas parādīts 2.5. attēlā.



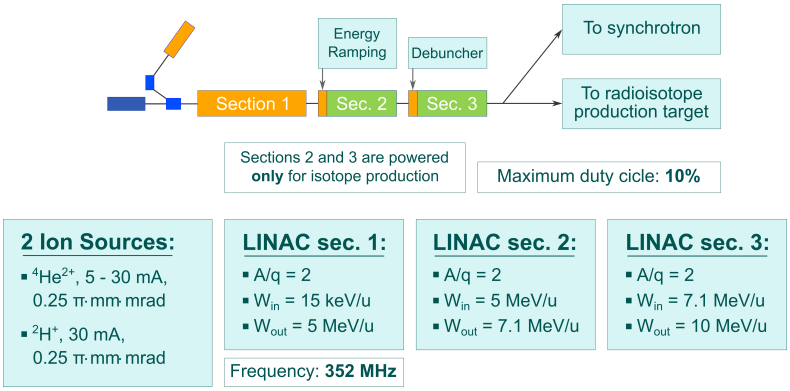
2.5. attēls. *HITRIplus* lineārā paātrinātāja shematisks attēlojums.

Lineārais paātrinātājs sastāv no trim atšķirīgām sekcijām. Pirmā sekcija ietver radiofrekvences kvadrupolu un jebkura tipa lineārā paātrinātāja struktūru, kas spēj paātrināt gan oglekļa, gan hēlija jonus līdz 5 MeV/u. Otrā un trešā sekcija satur tikai lineārā paātrinātāja struktūras, kas paredzētas hēlija jonu paātrināšanai no 5 MeV/u līdz 7,1 MeV/u un no 7,1 MeV/u līdz 10 MeV/u attiecīgi. Pārejas enerģija starp otro un trešo sekciju ir noteikta kā 7,1 MeV/u, galvenokārt saistībā ar astatīna-211 ražošanu – vienu no daudzsološākajiem alfa emiteriem vēža ārstēšanai [10]. Kopumā pirmā sekcija kalpo tikai kā injektors terapijas sinhrotronam, kamēr otrā un trešā sekcija ir veltītas radioizotopu ražošanai.

2.2 NIMMS sadarbība

2019. gadā CERN uzsāka iniciatīvu *Next Ion Medical Machine Study* (NIMMS), lai attīstītu modernākās paātrinātāju tehnoloģijas nākamās paaudzes kompaktām un izmaksu ziņā efektīvām jonu terapijas iekārtām [11]. NIMMS galvenais mērķis ir veicināt par proniem smagāku jonu izmantošanu, jo protonu iekārtas jau ir komerciāli pieejamas. Šajā kontekstā pēc NIMMS iniciatīvas autors ir izstrādājis hēlija lineāro paātrinātāju, kas kalpo gan kā injektors terapijas sinhrotronam, gan paralēli arī radioizotopu ražošanai. NIMMS lineārā paātrinātāja izvietojums ir parādīts 2.6. attēlā.

NIMMS lineārā paātrinātāja darbības nodrošināšanai tiek izmantots viens no diviem pieejamiem jonu avotiem, kas nodrošina hēlija vai deitērija jonus. Līdzīgi kā HITRI*plus* lineārā paātrinātāja gadījumā, jonu avotam seko trīs paātrināšanas sekcijas. Visas trīs sekcijas ir spējīgas paātrināt abus jonu veidus, ko nodrošina jonu avoti. Pirmā sekcija paātrina jonus līdz 5 MeV/u enerģijai, ko izmanto hēlija injicēšanai terapijas sinhrotronā vai arī radioizotopu ražošanai, atkarībā no pieprasījuma – ar hēlija vai deitērija joniem. Nākamās divas sekcijas arī spēj paātrināt gan hēlija, gan deitērija jonus, taču tās ir pilnībā veltītas radioizotopu ražošanai. Otrā sekcija paātrina abus jonu veidus līdz 7,1 MeV/u, savukārt pēdējā sekcija – līdz 10 MeV/u. Lai maksimāli palielinātu radioizotopu ražošanu, lineārajam paātrinātājam ir jānodrošina abu

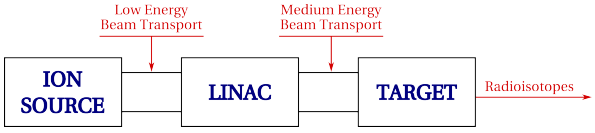


2.6. attēls. NIMMS lineārā paātrinātāja shematisks attēlojums.

jonu tipu paātrināšana ar nominālo staru kūļa strāvu 30 mA un 100 % kūļa caurlaidību. Autora izstrādātais NIMMS lineārais paātrinātājs ir pielāgots kā hēlija injektors Baltijas valstu daļiņu terapijas centra iniciatīvai [12].

2.3 Radioizotopu ražošana ar lineāro paātrinātāju

Šajā darbā piedāvātās lineārā paātrinātāja struktūras spēj nodrošināt radioizotopu ražošanu, izmantojot hēlija vai deitērija jonus diagnostikas un terapeitiskajiem lietojumiem atkarībā no tirgus pieprasījuma. Lineārā paātrinātāja konfigurācija radioizotopu ražošanai parādīta 2.7. attēlā.



2.7. attēls. Lineārā paātrinātāja konfigurācijas shēma radioizotopu ražošanai.

Starptautiskā Atomenerģijas aģentūra (IAEA) ir apkopojusi sarakstu ar vairākiem desmitiem radioizotopu, kas tiek izmantoti kā marķieri fizikas un bioloģijas zinātnēs [13]. Diagnostikā un terapijā izmantojamo daudzsološo radioizotopu saraksts, kas iegūts no [13] un kurus iespējams ražot ar lineāro paātrinātāju, paātrinot hēlija un/vai deitērija jonus, ir parādīts 2.1. tabulā.

ASV bāzētais, radioizotopu ražošanas jomā atzītais uzņēmums NUSANO ir sniedzis sarakstu ar radioizotopiem, kuri pašlaik ir īpaši pieprasīti, un daļa no tiem ir parādīta 2.1. tabulā [26]. No 2.1. tabulā redzamajām lietojuma metodēm, PET (pozitronu emisijas tomogrāfija) nodrošina augstas kvalitātes trīsdimensiju attēlus, savukārt SPECT (viena fotona emisijas datortomogrāfija) ģenerē virkni divdimensiju projekciju, kuras tiek izmantotas trīsdimensiju attēlu rekonstrukcijai. Abas metodes izmanto diagnostikā [27, 28]. Savukārt radioizotopi, kas sabrūk, izstarojot beta daļiņas (izmantojami β^- terapijā), alfa daļiņas (izmantojami mērķētajā alfa terapijā – TAT), vai piedzīvo elektronu uztveres reakcijas, kas izraisa Ožē elektronu emisiju (izmantojami Ožē

2.1. tabula. Perspektīvo radioizotopu saraksts diagnostikas un terapijas vajadzībām, kurus iespējams ražot ar lineāro paātrinātāju, izmantojot hēlija un/vai deitērija jonus

Radio-izotops	**Pussabruk-šanas laiks**	**Lietojums**	**Ražošanas reakcija**	**Atbilstošā enerģija [MeV/u]**	**Atsa-uces**
^{18}F	109,8 min	PET	^{16}O(α, p)^{18}F ^{20}Ne(d, α)^{18}F	10 5	[14] [15]
^{64}Cu	12,7 h	β^- terapija AERT PET	^{64}Ni(d, 2n)^{64}Cu	7,1	[16]
^{67}Cu	61,8 h	$\beta-$ terapija SPECT	^{64}Ni(α, p)^{67}Cu	5	[17]
^{68}Ge	270,9 d	Ģenerators ^{68}Ga - PET	^{66}Zn(α, 2n)^{68}Ge	7,1	[18]
^{89}Zr	78,4 h	PET	^{89}Y(d, 2n)^{89}Zr	7,1	[19]
^{103}Pd	17 d	AERT Brahiterapija	^{103}Rh(d, 2n)^{103}Pd	7,1	[20]
^{123}I	13,2 h	SPECT	^{121}Sb(α, 2n)^{123}I ^{122}Te(d, n)^{123}I	7,1 5	[21] [22]
^{177}Lu	6,6 d	β^- terapija	^{176}Yb(d, n)^{177}Lu	5	[23]
^{211}At	7,2 h	TAT SPECT	^{209}Bi(α, 2n)^{211}At	7,1	[24, 25]

Pateicoties K. Paļska atļaujai

elektronu terapijā – AERT), ir piemēroti radioizotopu terapijai (terapeitiskiem mērķiem) to īsā darbības rādiusa dēļ audos [29]. Papildus tam radioizotopus, kas sabrūk, izstarojot zemas enerģijas gamma starojumu, var izmantot brahiterapijā – metodē, kurā radioaktīvie avoti tiek fiziski implantēti ķermenī.

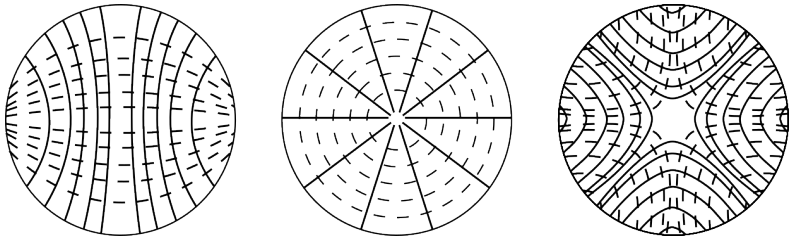
3. Lineārā paātrinātāja struktūru radiofrekvenču un staru kūļa optikas teorija

Šajā nodaļā apskatīta elektromagnētisko viļņu fizika, staru kūļa uzvedība lineārā paātrinātāja struktūrās, izmantotā programmatūra simulācijām, kā arī lineārā paātrinātāja ekonomiskie aspekti. Nodaļa sastāv no četrām daļām, no kurām katra veltīta konkrētai tematikai. Pirmajā daļā izskaidroti pamatjēdzieni, kas nepieciešami elektromagnētisko viļņu īpašību izpratnei lineārā paātrinātāja struktūrā. Otrā daļa vērsta uz staru kūļa uzvedību paātrināšanas laikā lineārā paātrinātāja struktūrās, sniedzot nepieciešamās izteiksmes tā vizualizācijai. Trešajā daļā aprakstītas šajā darbā piedāvātās lineārā paātrinātāja struktūras, izmantojot pirmajās divās daļās izklāstīto teorētisko pamatojumu. Visbeidzot, ceturtā daļa ir veltīta Alvaresa tipa lineārā paātrinātāja struktūru ekonomiskajai analīzei.

3.1 Elektromagnētiskā lauka teorija lineārā paātrinātāja struktūrām

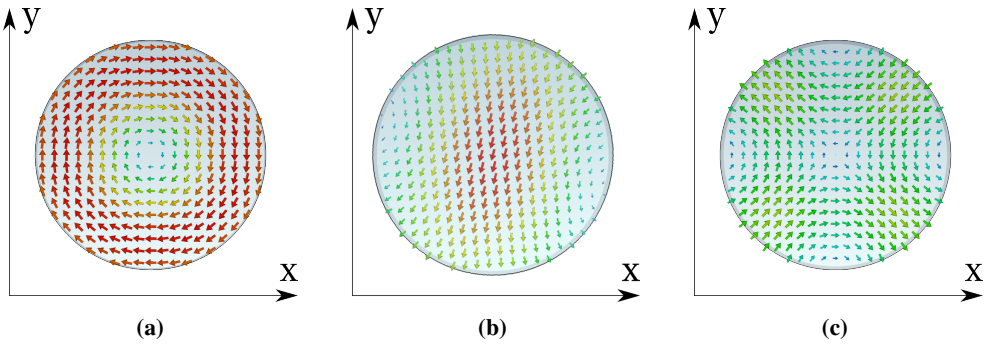
Lai izstrādātu jebkādu lineārā paātrinātāja struktūru, kas ir gatava ražošanai, vispirms ir jāsaprot elektromagnētisko (EM) viļņu izplatīšanās fizika un to ietekme uz staru kūli. Lai izprastu EM režīmus lineārā paātrinātāja struktūrās, vispirms aplūkojam cilindrisku viļņvadu. Kad cilindriskajam viļņvadam tiek pielikts ārējs EM lauks, tajā var izplatīties tikai tādi EM viļņi, kuriem ir vai nu elektriskā, vai magnētiskā komponente šķērseniskajā plaknē (perpendikulāri viļņa izplatīšanās virzienam), bet ne abi vienlaikus. EM vilni, kura elektriskā komponente ir perpendikulāra izplatīšanās virzienam, sauc par TE (no angļu valodas *transverse electric*) režīmu, savukārt vilni ar magnētisko komponenti šķērseniskajā plaknē – par TM (no angļu valodas *transverse magnetic*) režīmu. Gan TE, gan TM režīmi var pastāvēt tikai noteiktās diskrētās frekvencēs, kas ir atkarīgas no viļņvada ģeometrijas. Aizverot viļņvada galus, tas kļūst par cilindrisku rezonatoru, kurā veidojas stāvviļņi, kas rezonē pie konkrētām rezonanses frekvencēm [30].

Trīs visbiežāk sastopamie režīmi lineārā paātrinātāja struktūrās ir TM_{010}, TE_{110} un TE_{210}, un to attēlojums cilindriskajā viļņvadā parādīts 3.1. attēlā.



3.1. attēls. Lauka konfigurācija cilindriskajā viļņvadā: (kreisajā pusē) TE_{11}, (vidū) TM_{01} un (labajā pusē) TE_{21} režīmi (pielāgots no [31]).

Papildus 3.1. attēlam cilindriskā rezonatora šķērsgriezums ar TM_{01p} režīma magnētiskā lauka sadalījumu un TE_{11p} un TE_{21p} režīmu elektriskā lauka sadalījumu ir parādīts 3.2. attēlā.



3.2. attēls. (a) TM_{01p} režīmu magnētiskā lauka sadalījums; (b) TE_{11p} režīma elektriskā lauka sadalījums; (c) TE_{21p} režīma elektriskā lauka sadalījums; simulācijas veiktas cilindriskā rezonatorā, izmantojot *CST Studio Suite*.

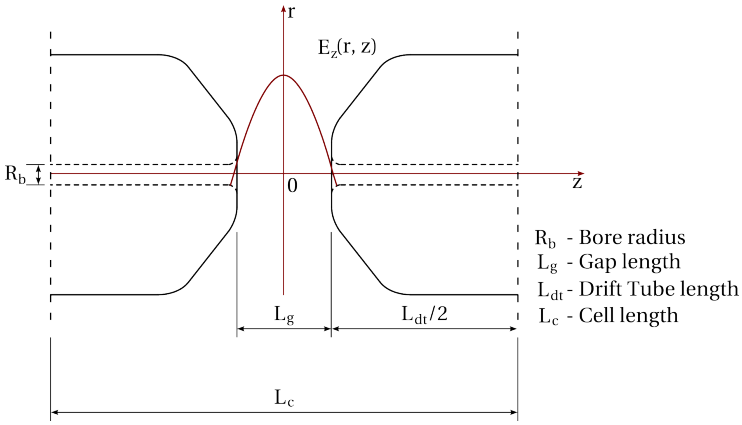
Lai panāktu efektīvāku enerģijas pārnesi no ārējā elektromagnētiskā lauka uz staru kūli, cilindriskajos rezonatoros tiek ieviestas dreifa caurules (skat. attēlu 2.3. un 2.4.). Blakus esošās dreifa caurules koncentrē elektrisko lauku starp tiem daļiņu trajektorijas virzienā, tādējādi padarot paātrināšanu efektīvāku. Vienlaikus dreifa caurules darbojas kā Faradeja būris, kas novērš daļiņu palēninašanos, kad izveidotais lauks maina polaritāti.

Lineārā paātrinātāja struktūras šūna parasti sastāv no blakus esošo dreifa cauruļu pusēm un telpas starp tām, ko sauc par spraugu *(gap)*. Daļiņa, kas šķērso spraugu, kā parādīts 3.3. attēlā, tiek pakļauta elektriskajam laukam.

Jebkura daļiņa ar elektrisko lādiņu q, kas pārvietojas cauri spraugai, iegūst enerģiju, ko aprēķina, izmantojot Panofska vienādojumu:

$$\Delta W = qE_0L_cTcos(\phi) \tag{3.1}$$

kur E_0 apzīmē vidējo elektriskā lauka amplitūdu ass virzienā, bet T (dažkārt apzīmēts arī kā T_{gap}) ir pārejas laika faktors – svarīgs, bet sarežģīts parametrs, kurš ietver būtisku daļu fizikālo procesu. Tā kā elektriskais lauks uz ass mainās laikā, daļiņa nevar iegūt tādu pašu enerģiju kā



3.3. attēls. Elektriskais lauks ar maksimumu spraugas centrā (pielāgots no [32]).

gadījumā ar konstantu līdzstrāvas (DC) elektrisko lauku. Enerģijas pieauguma attiecību mainīgā RF laukā pret pieaugumu konstantā DC laukā sauc par pārejas laika faktoru.

Pamatīpašības, ko izmanto, lai raksturotu jebkuru lineārā paātrinātāja struktūru un novērtētu tās veiktspēju, ir zināmas kā efektivitātes rādītāji *(figures of merit)*, no kuriem nozīmīgākais ir efektīvā šunta impedance uz vienības garumu (Z' vai bieži ZT^2). Projektēšanas procesā lielākoties tiecas uz to, lai maksimizētu šo parametru, tādējādi nodrošinot struktūras augstāko energoefektivitāti. Efektīvā šunta impedance uz vienības garumu tiek definēta kā efektīvās šunta impedances un rezonatora garuma attiecība:

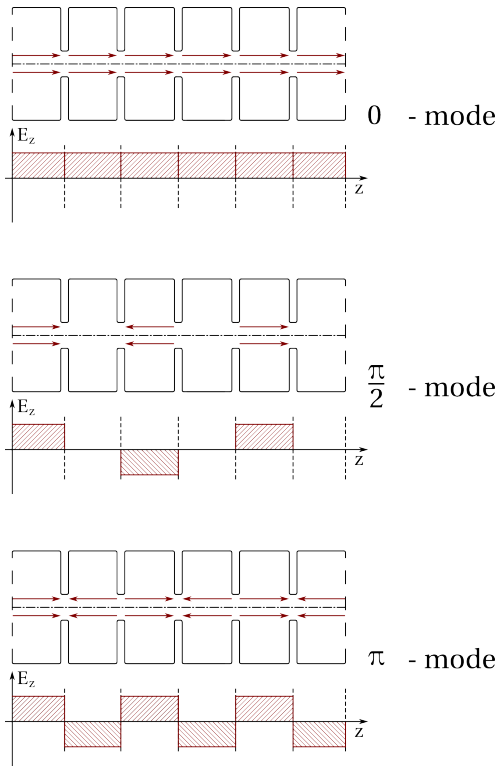
$$Z' \equiv ZT2 = \frac{Z}{l} = \frac{(V_0 T)^2}{P_d \cdot l} = \frac{(E_0 T)^2}{P_d / l} \tag{3.2}$$

Savienotu daudzu šūnu paātrinošo struktūru gadījumā jāievēro tā sauktais sinhronitātes nosacījums, kas vienlaikus definē katras šūnas garumu. Sinhronitātes nosacījums ir šāds:

$$L_c = \frac{\beta\lambda}{2\pi}\Delta\phi_c \tag{3.3}$$

kur β ir daļiņas ātrums attiecībā pret gaismas ātrumu vakuumā, λ ir radiofrekvences viļņa garums, un $\Delta\phi_c$ ir fāžu nobīde starp divām blakus esošajām šūnām.

Daļiņu paātrināšanai visnoderīgākie (un praktiskākie) stāvviļņu (SW) režīmi ir 0 režīms, $\frac{\pi}{2}$ režīms un π režīms to paātrinošā elektriskā lauka sadalījuma dēļ. Šo trīs SW režīmu elektriskā lauka struktūras parādītas 3.4. attēlā.



3.4. attēls. Stāvviļņu režīmi, kas piemēroti daļiņu paātrināšanai daudzu šūnu savienotās rezonatoru struktūrās (pielāgots no [33]).

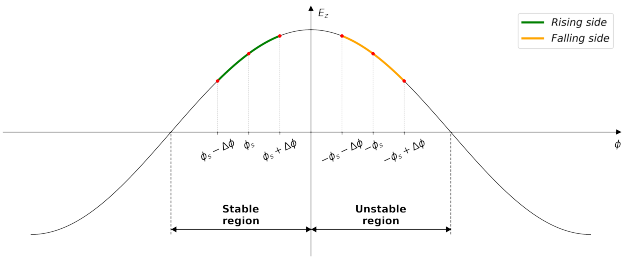
3.2 Staru kūļa optika lineārā paātrinātāja struktūrām

Lineārā paātrinātāja struktūrā daļiņas ar lādiņu q un ātrumu $\vec{v} = (v_x, v_y, v_z)$ kustību, uz to iedarbojoties ārējam elektriskajam laukam $\vec{E} = (E_x, E_y, E_z)$ un magnētiskajam laukam $\vec{B} = (B_x, B_y, B_z)$, raksturo Lorenca spēks (skat. vienādojumu 3.4):

$$\frac{d\vec{p}_r}{dt} = q\left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}\right) \tag{3.4}$$

Kad lineārā paātrinātāja struktūra ir izstrādāta, tā optimāli paātrinās vienu konkrētu daļiņu no staru kūļa ar N_p daļiņām. Šo daļiņu, kurai lineārā paātrinātāja struktūra ir pielāgota, sauc par sinhrono daļiņu, un tā vienmēr ir sinhrona ar paātrinošo lauku. Sinhronās daļiņas fāze tiek definēta kā sinhronā fāze (ϕ_s).

Lineāro paātrinātāju pētniecības kopienā pēc konvencijas pieņemts, ka paātrinošais lauks laika gaitā mainās pēc kosinusa funkcijas, kuras maksimums atrodas pie izcelsmes punktā ($\phi = 0$), un tā ietver gan stabilu, gan nestabilu apgabalu, kā ilustrēts 3.5. attēlā. Stabilais apgabals ir tas, kur staru kūļa daļiņas koncentrējas ap sinhrono daļiņu, savukārt nestabilais apgabals noved pie staru kūļa zuduma.



3.5. attēls. Paātrinošais lauks ar ilustrētiem stabilajiem un nestabilajiem apgabaliem.

Šķērsvirziena staru kūļa analīzē īpaši nozīmīgi parametri ir amplitūdas funkcija, kas pazīstama kā beta funkcija, un konstante $\varepsilon_{xx'}$, kas pazīstama kā staru kūļa emitance horizontālajā fāzes telpā, jo abi šie lielumi ir saistīti ar kūļa formu un izmēru.

Papildus $\beta(s)$ funkcijai šķērsvirziena staru kūļa analīzē noderīgas ir vēl divas funkcijas – $\alpha(s)$ un $\gamma(s)$, kuras abas ir atkarīgas no kūļa gareniskās koordinātas s. Funkcijas $\alpha(s)$, $\beta(s)$ un $\gamma(s)$ kopā tiek sauktas par *Courant–Snyder* parametriem jeb vienkārši par Tvisa parametriem. Gan $\alpha(s)$, gan $\gamma(s)$ ir atkarīgas no $\beta(s)$ funkcijas, un tās tiek definētas šādi:

$$\alpha(s) = -\frac{1}{2}\frac{d\beta(s)}{ds} \tag{3.5}$$

$$\gamma(s) = \frac{1+\alpha^2(s)}{\beta(s)} \tag{3.6}$$

Saskaņā ar vienādojumiem 3.5 un 3.6 abi parametri $\alpha(s)$ un $\gamma(s)$ ir atkarīgi no $\beta(s)$ funkcijas, savukārt pati $\beta(s)$ funkcija raksturo lineārā paātrinātāja struktūras īpašību. Ņemot vērā Tvisa parametrus, no Hila vienādojuma tiek iegūts tā sauktais *Courant–Snyder* invariances vienādojums:

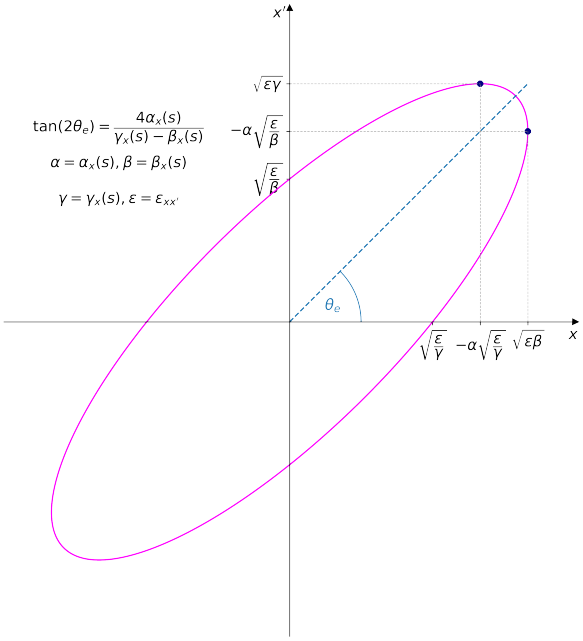
$$\gamma(s)x^2 + 2\alpha(s)xx' + \beta(s)x'^{\,2} = \varepsilon \tag{3.7}$$

Šeit x apzīmē daļiņas stāvokli (pozīciju), bet x' – tās novirzes leņķi horizontālajā plaknē. Vienādojums 3.7 raksturo vispārīgu sasvērtas elipses vienādojumu, kur elipses pagrieziena leņķis (θ_e) ir atkarīgs no Tvisa parametriem saskaņā ar šādu izteiksmi:

$$\tan(2\theta_e) = \frac{4\alpha(s)}{\gamma(s) - \beta(s)} \tag{3.8}$$

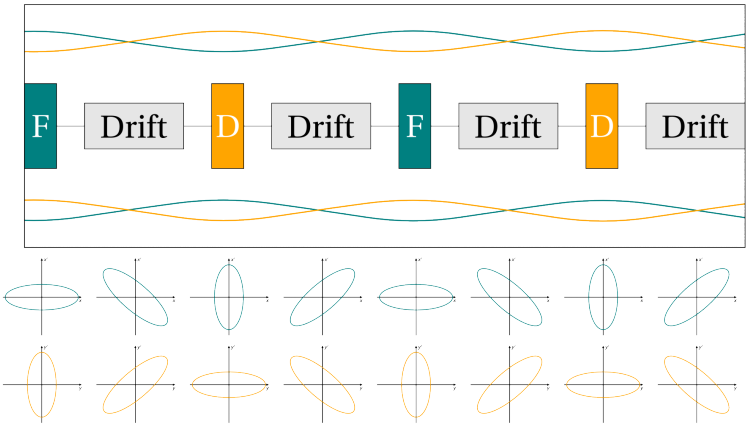
Ir viegli parādīt, ka elipses laukums, kā izteikts vienādojumā 3.7, ir $A_{xx'} = \pi\varepsilon_{xx'}$, kas nozīmē, ka Tvisa elipses laukums ir proporcionāls staru kūļa emitancei attiecīgajā plaknē.

Tvisa elipse ar norādītiem raksturpunktiem horizontālajā plaknē vizualizēta 3.6. attēlā.



3.6. attēls. Tvisa elipse horizontālajā fāzes telpā ar raksturpunktiem.

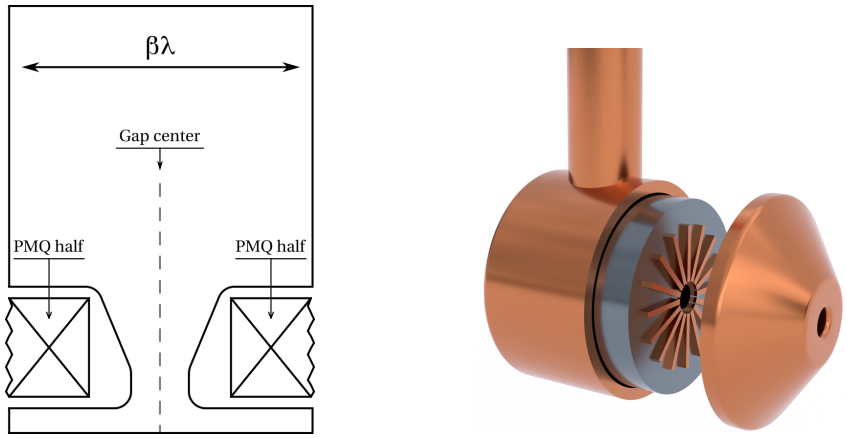
3.7. attēlā ilustrēti staru kūļa apveidi horizontālajā plaknē (zaļganā krāsā) un vertikālajā plaknē (oranžā krāsā), kā arī Tvisa elipses katra elementa centrā.



3.7. attēls. Staru kūļa apveids horizontālajā plaknē (zaļganā krāsā) un vertikālajā plaknē (oranžā krāsā) ar Tvisa elipsēm, kas attēlotas katra elementa centrā.

3.3 Analizētās struktūras paātrināšanai un staru kūļa vadībai

DTL kā protonu lineārā paātrinātāja struktūra ir sevi pierādījusi kā energoefektīva, ar augstu šunta impedanci enerģijām diapazonā līdz aptuveni 60 MeV, bet pie augstākam enerģijām to parasti aizstāj ar efektīvākām struktūrām, piemēram, šūnu savienotu dreifa cauruļu lineāru paātrinātāju (CCDTL) [6]. DTL darbojas 0 režīmā. Šo struktūru raksturo pastāvīgo magnētu kvadrupolu (PMQ) klātbūtne katrā dreifa caurulē (DT). Vienas DTL šūnas daļas shēma parādīta 3.8a. attēlā, savukārt viena atsevišķa DT – 3.8b. attēlā.



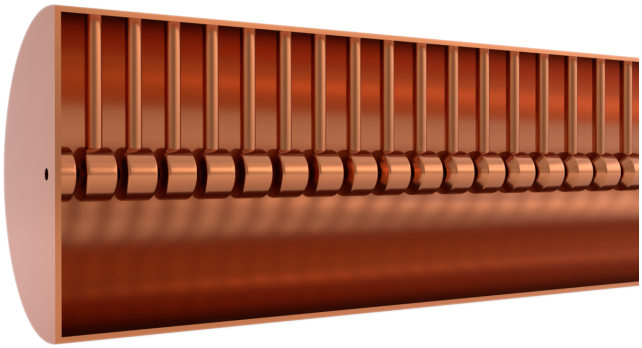
(a) **(b)**

3.8. attēls. (a) Vienas DTL šūnas posms; (b) Dreifa caurule ar PMQ DTL struktūrā.

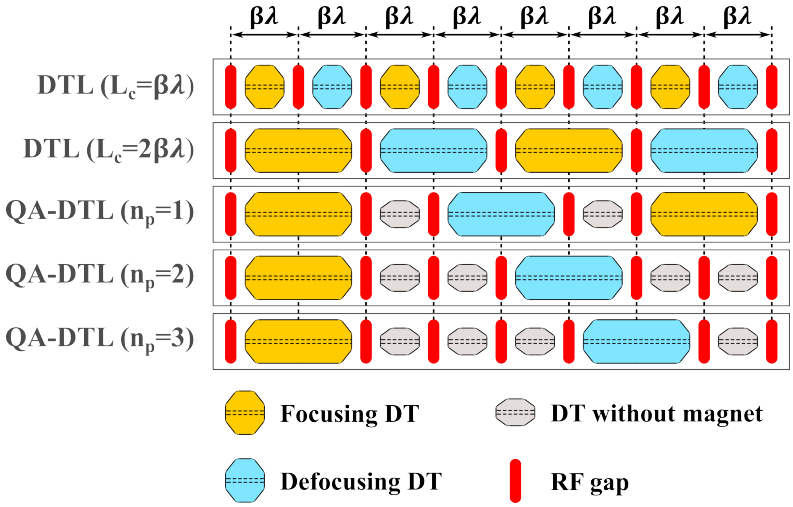
DTL rezonē elektromagnētiskajā režīmā TM_{010}, kam raksturīgs garenvirziena elektriskais lauks un azimutāls magnētiskais lauks, kā parādīts attēlā 3.1. un 3.2a. Attiecībā uz šķērsvirziena staru kūļa fokusēšanu DTL struktūrās parasti izmanto FODO vai FOFODODO režģus, kur F apzīmē PMQ, kas fokusē kūli horizontālajā virzienā un defokusē to vertikālajā virzienā, D – PMQ, kas defokusē horizontāli un fokusē vertikāli, bet O – dreifa posmu starp diviem PMQ, kas izvietoti blakus esošajos DT, kur kūlis netiek fokusēts ne horizontālā, ne vertikālā plaknē. DTL trīsdimensiju modelis parādīts 3.9. attēlā.

Lai nodrošinātu protonu un smagāku daļiņu paātrināšanu ar zemākām enerģijām, nekā tas iespējams ar standarta DTL, nepieciešama DTL struktūras modifikācija. Salīdzinājumā ar DTL galvenā izmaiņa ir PMQ samazināšana, kas tiek izmantoti šķērsvirziena staru kūļa fokusēšanai katrā dreifa caurulē (DT). Tas noved pie tā, ka DT bez PMQ kļūst mazāki, bet tie, kuros PMQ ir saglabāts, kļūst garāki. Līdzīgi kā DTL, arī QA-DTL darbojas 0 režīmā. Dažas QA-DTL konfigurācijas, kā arī salīdzinājums ar DTL, parādītas 3.10. attēlā.

Periodiskuma faktors n_p ir ļoti nozīmīgs parametrs, kas tieši ietekmē lineārā paātrinātāja struktūras efektivitāti, tādēļ tas jāizvēlas īpaši rūpīgi. No kūļa dinamikas viedokļa periodiskuma



3.9. attēls. DTL trīsdimensiju modelis.

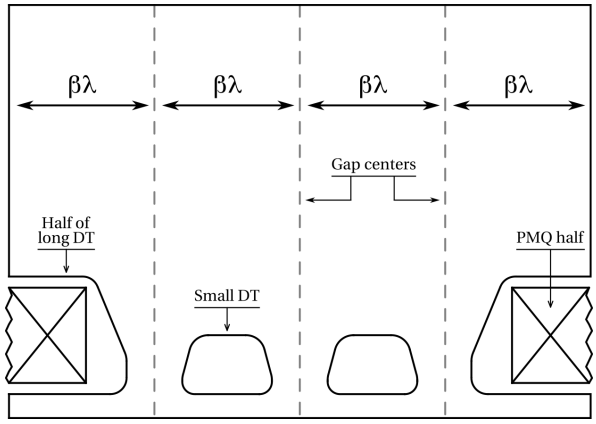


3.10. attēls. Dažādu QA-DTL konfigurāciju un DTL salīdzinājums (pielāgots no [34]).

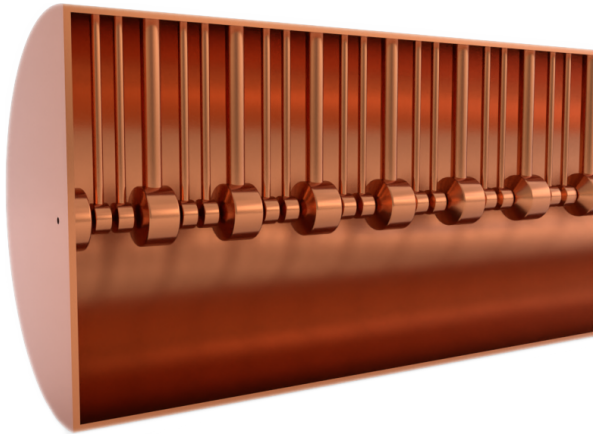
faktors tiek izvēlēts kā kompromiss starp PMQ gradientu un staru kūļa pārnesi. QA-DTL sasniedz visaugstāko efektivitāti, kad periodiskuma faktors ir divi ($n_p = 2$) [34, 35]. Rezonatoram ar periodiskuma faktoru ($n_p = 2$) superperiods sastāv no divām dreifa caurulēm bez PMQ un divām PMQ saturošu DT pusēm. QA-DTL superperioda konfigurācija ar periodiskuma faktoru ($n_p = 2$) parādīta 3.11. attēlā.

Līdzīgi kā DTL, arī QA-DTL rezonē elektromagnētiskajā režīmā TM_{010}, kuram raksturīgs garenvirziena elektriskais lauks un azimutāls magnētiskais lauks, kā parādīts attēlā 3.1. un 3.2a. QA-DTL trīsdimensiju modelis ar periodiskuma faktoru ($n_p = 2$) ir parādīts 3.12. attēlā.

Vispazīstamākā H veida lineārā paātrinātāja struktūra, ko izmanto smagāku jonu nekā protonu paātrināšanai, ir labi zināmais IH-DTL. Tā variācija ir mazāk zināmais S-IH-DTL. Abas lineārā paātrinātāja struktūras darbojas π režīmā. Gan IH-DTL, gan S-IH-DTL rezonē elektromagnētiskajā režīmā TE_{110}, kam raksturīgs garenvirziena magnētiskais lauks un azimutāls elektriskais lauks, kā parādīts attēlā 3.1. un 3.2b. Vienas H veida lineārā paātrinātāja struktūras



3.11. attēls. Viens QA-DTL superperiods ar periodiskuma faktoru ($n_p = 2$).

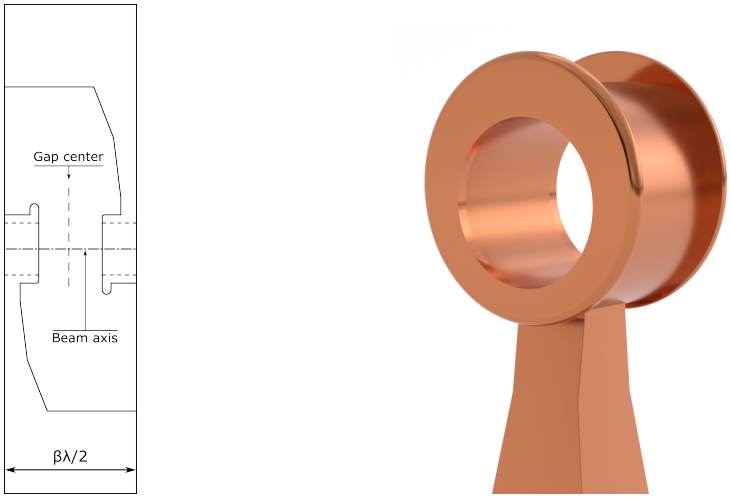


3.12. attēls. QA-DTL trīsdimensiju modelis ar superperiodiem un periodiskuma faktoru ($n_p = 2$).

šūnas shēma parādīta 3.13a. attēlā, savukārt viena šīs struktūras DT – 3.13b. attēlā.

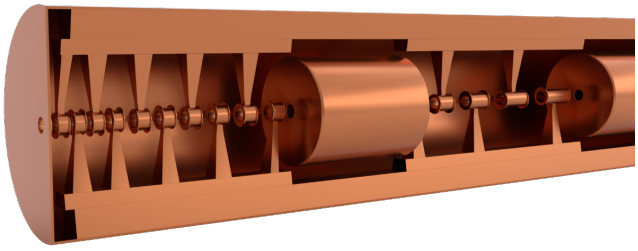
IH-DTL šķērsvirziena fokusēšana un defokusēšana tiek nodrošināta, izmantojot kvadrupolu dupletus, tripletus vai solenoīda lēcas [36], kas novietotas pēc noteikta šūnu skaita, kā parādīts 3.14. attēlā. Galvenā atšķirība starp IH-DTL un S-IH-DTL ir kvadrupolu izvietojums – S-IH-DTL gadījumā kvadrupoli atrodas ārpus paātrināšanas struktūras, un divi no tiem to ieskauj.

Lai nodrošinātu efektīvāku staru kūļa ievadi sinhrotronā, nepieciešama papildu RF struktūra, ko sauc par staru pakešu apvienošanas dobumu (no angļu valodas *debunching cavity* (DEB)). Galvenais DEB uzdevums ir pēc iespējas vairāk samazināt kūļa enerģijas izkliedi. Dreifa posmā kūlis izplešas garenvirziena fāzes telpā, rezultējoties pēc fāzes garākā, bet pēc enerģijas izkliedes šaurākā sadalījumā. DEB darbības laikā elektromagnētiskais lauks struktūras iekšienē tiek izraisīts tā, ka nulles šķērsošanas fāze no 3.5. attēla atrodas šūnas spraugas centrā. Mijiedarbības ar elektromagnētisko lauku (un tādējādi spriegumu) un staru kūli izraisa kūļa rotāciju



(a) **(b)**

3.13. attēls. (a) Vienas H veida rezonatora šūnas 2D shēma; (b) Dreifa caurule H veida lineārā paātrinātāja struktūrā.



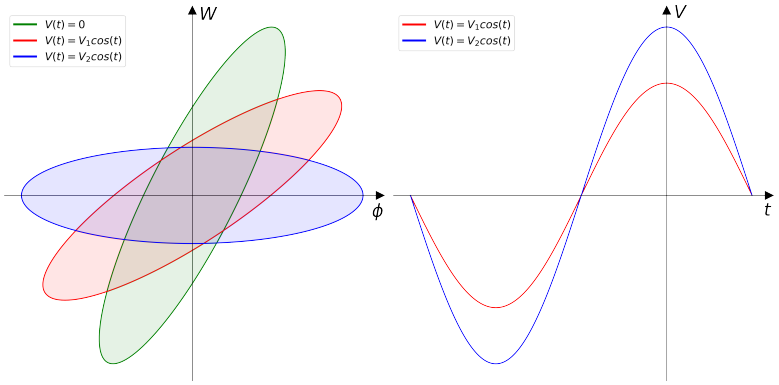
3.14. attēls. IH-DTL trīsdimensiju modelis.

garenvirziena fāzes telpā, kā ilustrēts 3.15. attēlā.

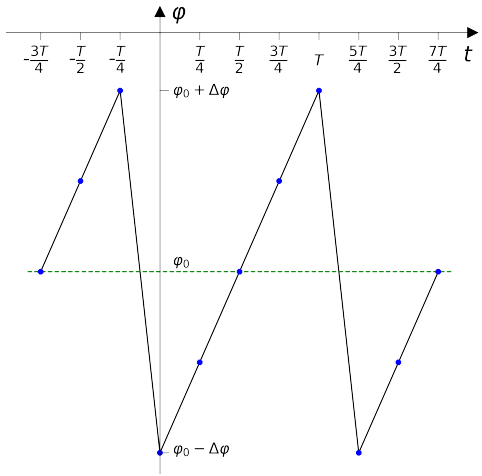
Stara kūļa rotācijas leņķis ir atkarīgs no elektromagnētiskā lauka amplitūdas, kas tieši atbilst kamerai lietotajam spriegumam. Jo lielāka sprieguma amplitūda, jo spēcīgāka rotācija garenvirziena fāzes telpā. DEB galvenais mērķis ir pagriezt staru kūli garenvirziena fāzes telpā tā, lai tas nonāktu horizontālā stāvoklī.

Savukārt enerģijas palielināšanas dobums (ERC) nav tik kritisks kā DEB un to var izlaist no lineārā paātrinātāja konfigurācijas. ERC mērķis ir nedaudz palielināt enerģiju katrai staru kūļa paketei. Lai panāktu šo enerģijas nobīdi, elektromagnētiskais lauks tiek izraisīts tā, ka tā fāze pastāvīgi svārstās starp $\varphi_0 - \Delta\varphi$ un $\varphi_0 + \Delta\varphi$, tādējādi katra nākamā staru kūļa grupa mijiedarbojas ar vēlamo fāzi, kā ilustrēts 3.16. attēlā.

Labākai vizualizācijai 3.17. attēlā parādītas staru kūļu paketes ar ekstrēmiem enerģijas nobīdes gadījumiem (ar visaugstākajām un zemākajām enerģijas vērtībām), kā arī staru kūļa pakete, kuru ERC neietekmē.

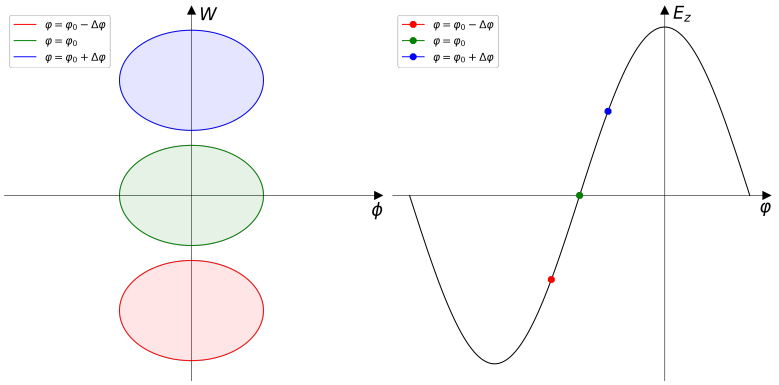


3.15. attēls. Tvisa elipses DEB iekārtā pie dažādām sprieguma amplitūdām (kreisajā pusē); spriegums ar dažādām amplitūdām, kas atbilst kreisajā pusē redzamajām elipsēm (labajā pusē). Zaļā Tvisa elipse atbilst *DEB* iekārtas neesamībai darbībā.



3.16. attēls. Fāzes svārstības *ERC* iekārtā; φ_0 atbilst nulles šķērsošanas fāzei. Zilie punkti attēlo fāzi spraugas centrā katrai nākamajai staru kūļa grupai.

Gan DEB, gan ERC ir līdzīga ģeometrija ar nelielām atšķirībām spraugas izmērā un/vai šūnas garumā. Dažādu DEB un ERC tipu vienas šūnas modeļi parādīti 3.18. attēlā.



3.17. attēls. Tvisa elipse ERC iekārtā pie dažādām fāzes vērtībām šūnas spraugas centrā (kreisajā pusē); lauks ar vērtībām, kas atbilst kreisajā pusē redzamajām elipsēm (labajā pusē).



(a) **(b)**

3.18. attēls. (a) π režīma struktūra un (b) 0 režīma struktūra, kas tiek izmantotas kā DEB vai ERC bloki.

3.4 Alvaresa tipa lineārā paātrinātāja struktūru izmaksu efektivitātes aprēķini

Viens no galvenajiem faktoriem, kas ietekmē paātrināšanas struktūras izvēli, ir tās ražošanas un ekspluatācijas izmaksas, dēvētas par kopējām izmaksām (C_{tot}), kuras var izteikt šādi [32]:

$$C_{tot} = lC_l + (P_d + P_b)C_p \simeq lC_l + P_dC_p \tag{3.9}$$

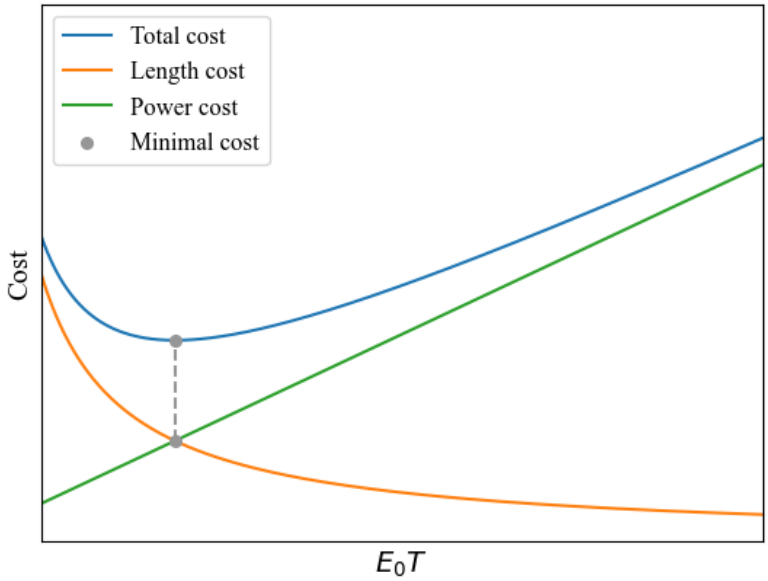
kur C_p – radiofrekvenču sistēmas kapitālie izdevumi, C_l – paātrināšanas struktūras kapitālie izdevumi, l – rezonatora garums, P_b – staru kūļa jauda un P_d – jaudas zudumi rezonatorā. Turklāt, pārkārtojot vienādojumu 3.9, iegūst šādu izteiksmi:

$$C_{tot} = \frac{\Delta W}{q}\left(\frac{C_l}{(E_0T)} + \frac{(E_0T)C_p}{ZT^2}\right) \tag{3.10}$$

Atvasinot vienādojumu 3.10 pēc E_0T un pielīdzinot to nullei, iegūst minimālo izmaksu nosacījumu:

$$C_p = \frac{ZT^2}{(E_0T)^2}C_l \tag{3.11}$$

Turklāt saskaņā ar vienādojumu 3.10 pastāv tikai viena paātrināšanas lauka (E_0T) vērtība, pie kuras struktūras kopējās izmaksas ir minimālas, kā parādīts 3.19. attēlā.



3.19. attēls. Struktūras kopējās izmaksas kā funkcija no paātrināšanas lauka ar uzsvaru uz minimālajām izmaksām.

Turklāt, aizstājot vienādojumu 3.11 vienādojumā 3.9, kopējās izmaksas var saistīt ar rezonatora izmaksām uz vienību garuma (C_l):

$$C_{tot} = \left(l + \frac{P_d Z T^2}{(\frac{\Delta W}{ql})^2}\right) C_l \tag{3.12}$$

Ietvara (no angļu valodas *tank*) izmaksas un pastāvīgo magnētu kvadrupolu izmaksas tika novērtētas, ņemot vērā to attiecību pret dreifējošās caurules izmaksām šādi:

$$C'_{tank} \simeq 5.1 C'_{dt} \tag{3.13}$$

$$C'_{pmq} \simeq 0.2 C'_{dt} \tag{3.14}$$

Izmaksu attiecība, kas aprēķināta, izmantojot vienādojumu 3.13 un 3.14, ir saskaņota ar *Linac4*, lineārā paātrinātāja, kas pašlaik darbojas *CERN*, izmaksām [6].

Tālākā vienkāršošana, kuras detalizēta atvasinājuma apraksts ir sniegts darbā, noved pie tradicionālā DTL un QA-DTL kapitālo izmaksu aprēķina:

$$C_l^{DTL} = \frac{(5.1l + 1.2N_{cell})}{l} C'_{dt} \tag{3.15}$$

$$C_l^{QA} = \frac{(5.1l + 0.8N_{cell})}{l} C'_{dt} \tag{3.16}$$

Visi nepieciešamie dati no abiem pētījumiem ir apkopoti tabulā 3.1.

3.1. tabula. Datu saraksts par tradicionālo DTL un QA-DTL

	DTL	**QA-DTL**	**Vienības**
l	6,4	4,65	m
P_d	1077,3	570	kW
ZT^2	31,5	67,7	MΩ/m
ΔW	48	48	MeV
q	4	4	-
N_{cell}	104	57	-

Aprēķināto kopējo izmaksu salīdzinājums (vienādojums 3.12) parāda, ka QA-DTL kopējās izmaksas ir par 61 % zemākas nekā tradicionālajam DTL, padarot to par izdevīgāku izvēli zemas enerģijas jonu paātrināšanas lietojumiem.

4. Matemātiskais modelis lineārā paātrinātāja struktūru ģeometrisko parametru optimizācijai

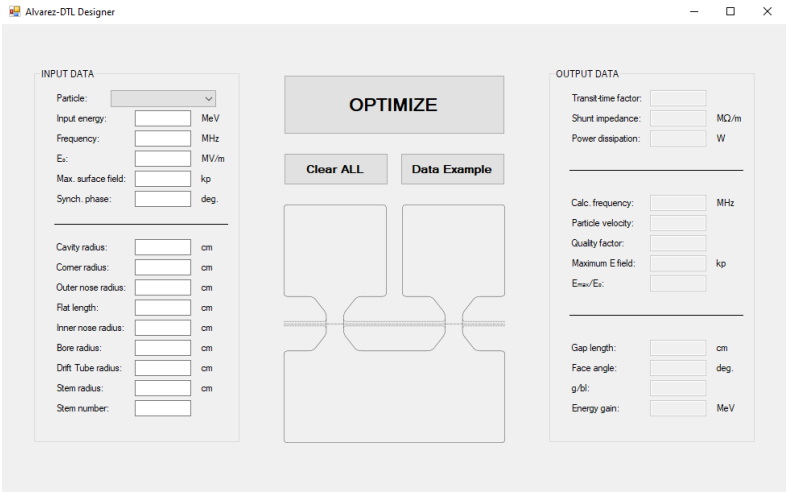
DTL un QA-DTL radiofrekvenču dizains tika veikts, izmantojot *Poisson/SUPERFISH* programmu kopu – 2D elektromagnētisko lauku simulācijas programmatūru, kas izstrādāta Losalamosas Nacionālajā laboratorijā (LANL) [37]. *Poisson/SUPERFISH* tika izvēlēta, jo tā ir pārbaudīta un salīdzināta ar lielāko daļu pašlaik strādājošo lineārā paātrinātāja struktūru. *Poisson/SUPERFISH* ir programmu komplekts, kas paredzēts magnetostatiskā un elektrostatiskā lauka aprēķinam, kā arī paātrināšanas struktūru lauka sadalījuma simulācijai divdimensiju Dekarta koordinātu sistēmā [38].

4.1 Simulācijas programmatūra

Trīsdimensiju elektromagnētisko lauku simulācijām tika izmantota programmatūra *CST Studio Suite*, pateicoties tās daudzpusībai, augstajai precizitātei Maksvela vienādojumu risināšanā un īpašajam režīma risinātāja modulim, kas paredzēts augstas frekvences lineārā paātrinātāja struktūru projektēšanai [39].

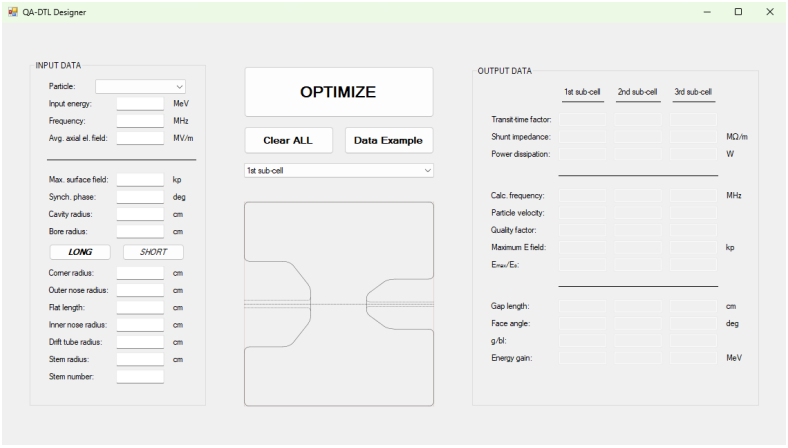
Staru kūļa dinamikas simulācijas tika veiktas, izmantojot *TraceWin* programmatūru, pateicoties tās spējai modelēt sarežģītas staru kūļa konfigurācijas, precīzi ņemt vērā telpas lādiņa efektus un sniegt detalizētu informāciju par daļiņu trajektorijām, fāzes telpas attīstību un staru kūļa zudumiem. Papildus tam tā piedāvā jaudīgus optimizācijas rīkus, kas ļauj uzlabot paātrinātāja veiktspēju un mazināt emitances pieaugumu [40].

Autors izstrādāja divas grafiskās lietotāja saskarnes (GUI), izmantojot programmēšanas valodu C#. Viena no izstrādātajām saskarnēm, saukta par A-GUI, tiek izmantota DTL optimizācijai, maksimizējot efektīvo šunta impedanci uz vienības garumu (ZT2), savukārt otra, ar nosaukumu QA-GUI, ir īpaši izstrādāta QA-DTL optimizācijai, arī maksimizējot ZT2. A-GUI saskarne ir parādīta 4.1. attēlā.



4.1. attēls. A-GUI saskarne DTL šūnu optimizācijai.

Otra izstrādātā grafiskā lietotāja saskarne (QA-GUI) ir ievērojami sarežģītāka nekā A-GUI. Tā nodrošina QA-DTL superperiodu optimizāciju, kas var tikt sadalīti trīs neatkarīgās apakšsūnās. QA-GUI saskarne ir parādīta 4.2. attēlā.



4.2. attēls. QA-GUI saskarne *QA-DTL* superperiodu optimizācijai.

4.2 Projektēšanas metodika un optimizācijas algoritmi

Kamēr izvēlētā lineārā paātrinātāja struktūra ir Alvaresa tipa, radiofrekvenču (RF) projektēšanas process lielākoties paliek nemainīgs. Projektēšanas gaitā jāievēro vairāki ierobežojumi.

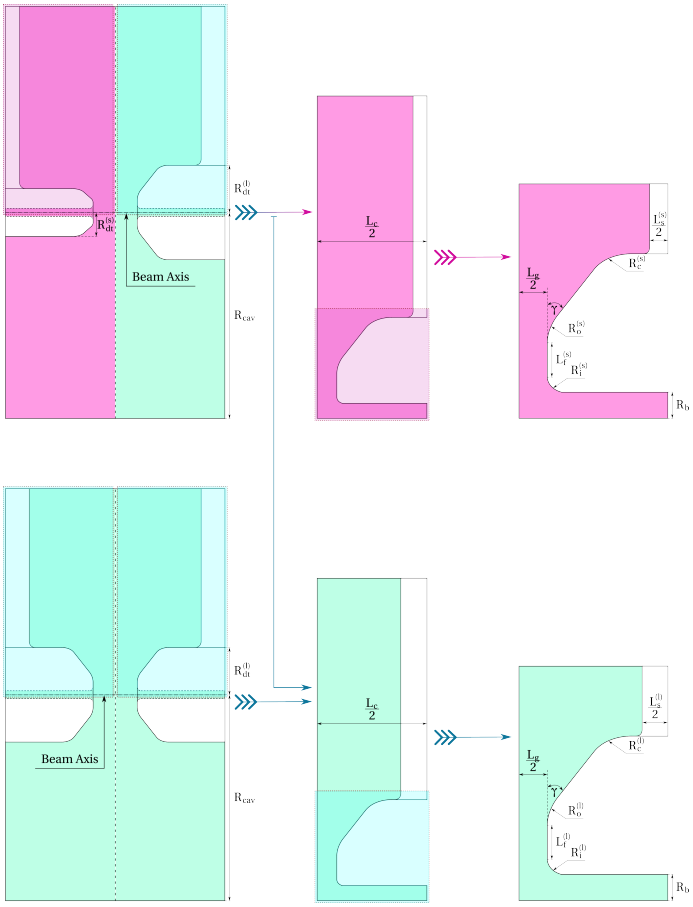
1. Katrai DTL dreifa caurulei vai katram garajam DT QA-DTL struktūrā jābūt pietiekami garam, lai tajā varētu izvietot kvadrupola magnētu.

2. Maksimālais elektriskais lauks lineārā paātrinātāja struktūrā nedrīkst pārsniegt noteikto Kilpatrika robežu, lai novērstu potenciālus elektriskos izlādes bojājumus.

3. DT atveres rādiusam jābūt pietiekami lielam, lai novērstu staru kūļa saskari ar DT sienām un tādējādi izvairītos no nevajadzīgiem staru kūļa zudumiem.

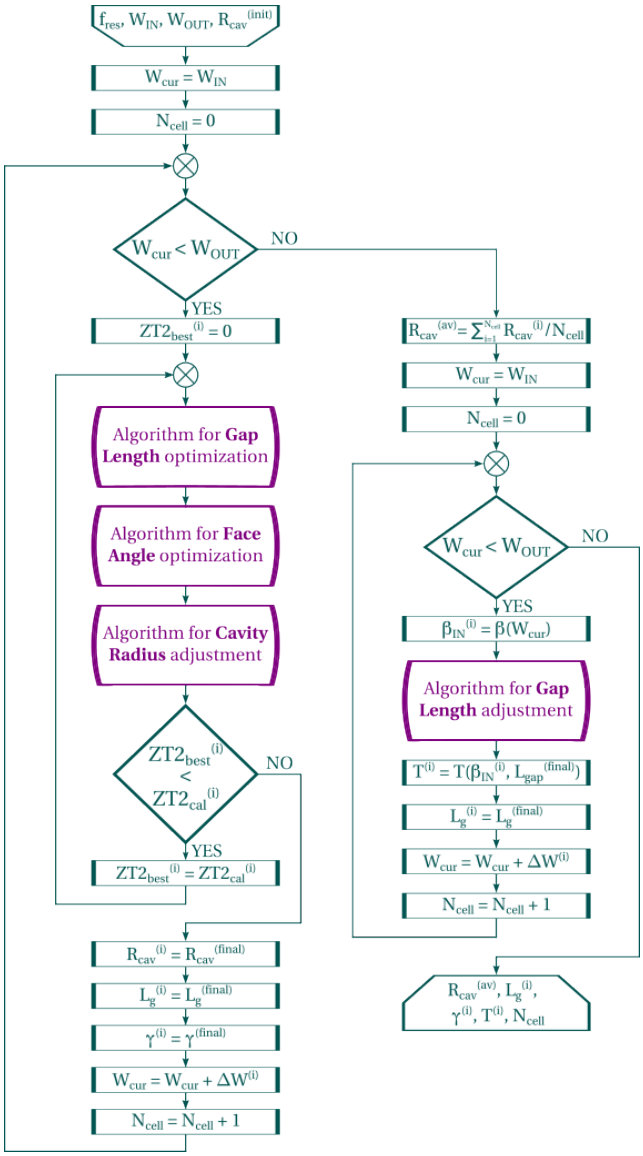
4. Katrai šūnai jārezonē vēlamajā rezonanses frekvencē.

Lai izpildītu visus iepriekš minētos ierobežojumus, projektēšanas procesā katrai šūnai jāizvēlas ģeometriskie parametri, kas parādīti 4.3. attēlā.



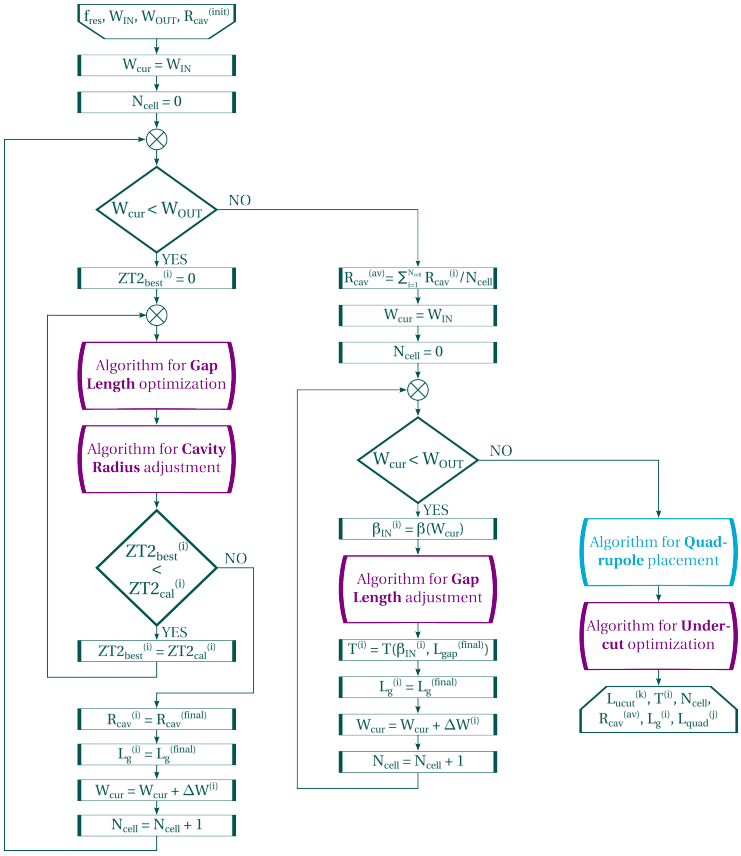
4.3. attēls. Pirmā vai pēdējā QA-DTL superperioda apakšsūna (augšā); vidējā QA-DTL superperioda apakšsūna vai DTL šūna (apakšā); ar ģeometriskajiem parametriem: L_s – kāta diametrs, L_g – spraugas garums, L_c – šūnas garums, R_{cav} – rezonatora rādiuss, R_{dt} – dreifa caurules rādiuss, R_c – stūra rādiuss, γ – virsmas leņķis, R_o – ārējā izvirzījuma rādiuss, L_f – plakanās malas garums, R_i – iekšējā izvirzījuma rādiuss, R_b – atveres rādiuss (pielāgots no [41]). Indekss s eksistē tikai QA-DTL un apzīmē īsāko DT, savukārt indekss l ir gan QA-DTL (garākajam DT), gan DTL (katram DT) gadījumā.

Algoritms, kas apraksta pilnu DTL un QA-DTL projektēšanas procesu no sākuma līdz beigām, ir parādīts 4.4. attēlā.



4.4. attēls. Algoritms optimālā DTL un QA-DTL projektēšanai ar maksimālu efektīvo šunta impedanci uz vienības garumu.

Ģeometrijas sarežģītības dēļ IH-DTL radiofrekvences nevar projektēt ar 2D elektromagnētisko lauku simulācijas programmatūru, piemēram, *Poisson/SUPERFISH*. Tā vietā jāizmanto sarežģītākas 3D elektromagnētisko lauku simulācijas programmas, piemēram, *CST Studio Suite*. Izstrādāts pilns IH-DTL projektēšanas process, kā parādīts 4.5. attēlā.



4.5. attēls. IH-DTL projektēšanas algoritms ar maksimālu efektīvo šunta impedanci uz vienības garumu.

5. Pētījuma rezultāti

Šajā nodaļā parādīti šī pētījuma laikā iegūtie rezultāti, sniedzot detalizētu aprakstu par dažādu lineārā paātrinātāja struktūru projektēšanu, analīzi un salīdzināšanu, kuras izstrādātas trim dažādiem lietojumiem.

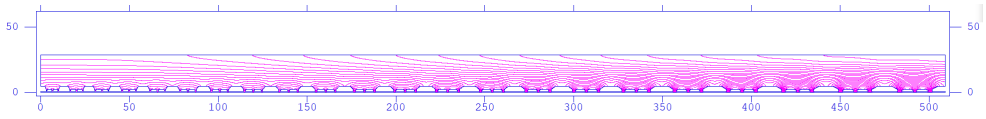
Pirmais lietojums ir vērsts uz lineārā paātrinātāja izstrādi oglekļa joniem, kā to pieprasa HITRI*plus* projekts. Šī lineārā paātrinātāja konfigurācija darbojas kā injektors sinhrotronam oglekļa jonu terapijai. Otrais lietojums ir veltīts lineārā paātrinātāja izstrādei hēlija joniem, kā to prasa NIMMS pētījums CERN. Šis lineārais paātrinātājs kalpos kā injektors hēlija jonu terapijas sinhrotronam un vienlaikus arī radioizotopu ražošanai. Trešajam lietojumam prezentēta lineārā paātrinātāja struktūras izstrāde, kas paredzēta tikai radioizotopu ražošanai bez iespējas darboties kā sinhrotrona injektoram.

5.1 Izstrādātais HITRI*plus* oglekļa lineārais paātrinātājs

HITRI*plus* lineārais paātrinātājs sastāv no trim sekcijām. Pirmajai sekcijai izvēlēts QA-DTL, kas ir projektēts oglekļa jonu paātrināšanai no 0,7 MeV/u līdz 5 MeV/u. Otrā un trešā sekcija sastāv no divām DTL struktūrām, kas paredzētas hēlija jonu tālākai paātrināšanai attiecīgi no 5 MeV/u līdz 7,1 MeV/u un no 7,1 MeV/u līdz 10 MeV/u.

5.1.1 Kvazi-Alvaresa dreifa cauruļu lineārais paātrinātājs oglekļa jonu ievadei sinhrotronā

QA-DTL radiofrekvenču dizains oglekļa jonu paātrināšanai no 0,7 MeV/u līdz 5 MeV/u tika veikts, izmantojot *Poisson/SUPERFISH* programmu kopu. Elektriskā lauka sadalījums ir parādīts 5.1. attēlā.



5.1. attēls. Elektriskā lauka sadalījums QA-DTL oglekļa jonu paātrināšanai no 0,7 MeV/u līdz 5 MeV/u, simulēts, izmantojot *Poisson/SUPERFISH* programmatūru.

Izstrādātais QA-DTL darbojas ar frekvenci 352,2 MHz. QA-DTL radiofrekvenču un ģeometriskie parametri apkopoti 5.1. tabulā, bet staru kūļa dinamikas parametri – 5.2. tabulā.

5.1. tabula. QA-DTL radiofrekvenču un ģeometriskie parametri oglekļa jonu paātrināšanai no 0,7 MeV/u līdz 5 MeV/u

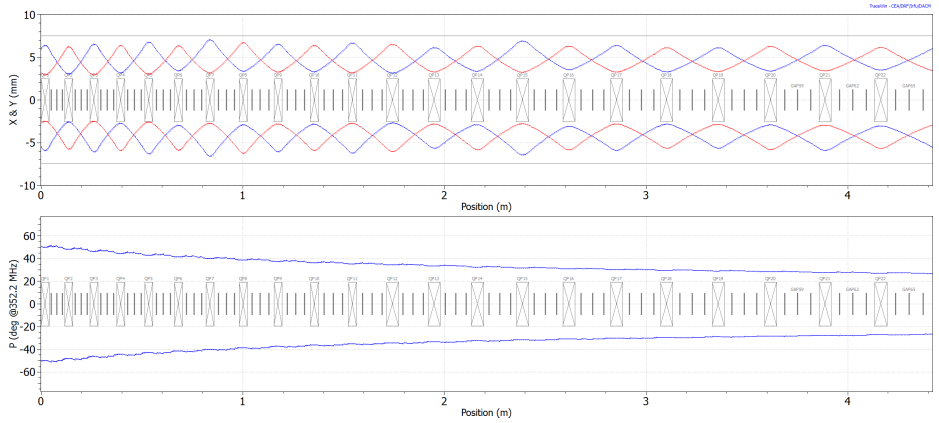
	C joni	**He joni**	**Vienības**
Darbības frekvence	352,2		MHz
Ievades enerģija	8,4	2,8	MeV
Izvades enerģija	60	20	MeV
Maksimālā staru kūļa strāva	0,6	5	mA
Paātrinošais lauks	3,5	2,3	MV/m
Sinhronā fāze	-35 līdz -24		deg
Garums	5,1		m
Superperiodu skaits	22		-
Efektīvā šunta impedance	67,68		MΩ/m
Jaudas zudumi	626	280	kW

5.2. tabula. QA-DTL staru kūļa parametri oglekļa jonu paātrināšanai no 0,7 MeV/u līdz 5 MeV/u

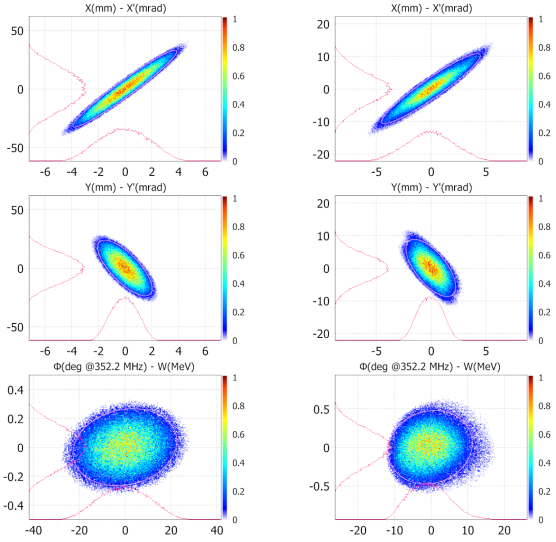
	C joni	**He joni**	**Vienības**
Cauruma rādiuss	7.5		mm
,250	0,300	π.mm.mrad	
Iev. šķēr. norm. emisija (rms)(yy')	0,250	0,300	π.mm.mrad
Izv. šķēr. norm. emisija (rms)(xx')	0,299	0,317	π.mm.mrad
Izv. šķēr. norm. emisija (rms)(yy')	0,278	0,351	π.mm.mrad
Iev. garen. norm. emisija (rms)	1,191	0,473	π.deg.MeV
Izv. garen. norm. emisija (rms)	1,215	0,613	π.deg.MeV
Enerģijas izkliede (2σ, 95% kūlis)	$\pm$0,77	$\pm$1,49	%
Pārnese	100	100	%

Šķērsvirziena un garenvirziena kūļa ģeometriskās robežas no QA-DTL ieejas (pie 0,7 MeV/u) līdz tās izejai (pie 5 MeV/u) ir parādītas 5.2. attēlā oglekļa joniem pie nominālās staru strāvas

0,6 mA. Šīs ģeometriskās robežas sniedz vērtīgu ieskatu staru evolūcijā caur lineāro paātrinātāju. Lai grafiki būtu kompaktāki un savstarpēji salīdzināmi, abas šķērsvirziena plaknes ir attēlotas vienā grafikā. Horizontālās plakne ir attēlota ar sarkanu līniju, bet vertikālā plakne ir izcelta ar zilu līniju.



5.2. attēls. Kūļa robežas QA-DTL garumā no 0,7 MeV/u līdz 5 MeV/u (a) oglekļa joniem un (b) hēlija joniem. Katram paātrinātajam jonam augšējā grafikā attēlo šķērsvirziena kūļa robežas xz un yz plaknēs, savukārt apakšējā grafikā redzama kūļa robeža garenvirzienā.



(a) **(b)**

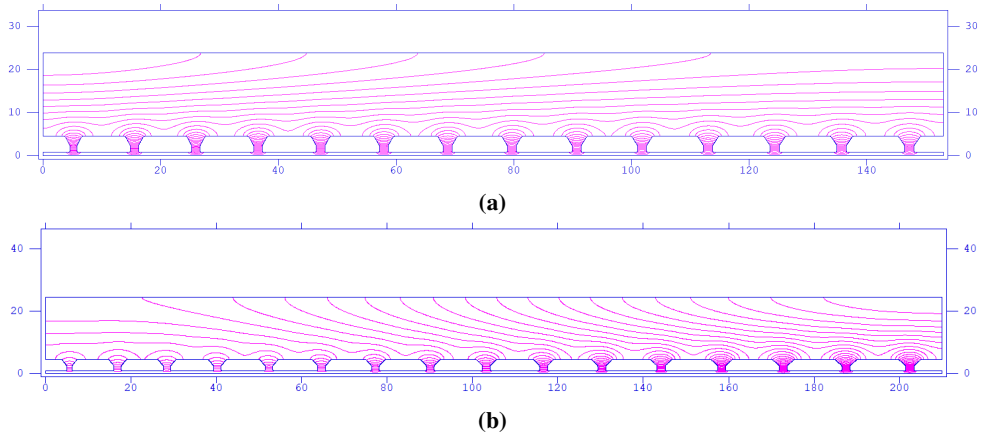
5.3. attēls. Oglekļa jonu fāzes telpa (kreisā kolonna) pie 0,7 MeV/u un (labā kolonna) pie 5 MeV/u ar nominālo staru strāvu 0,6 mA QA-DTL ietvaros.

Fāzes telpas, kurās attēlots oglekļa jonu stars šķērsvirziena un garenvirziena plaknēs QA-DTL ieejā un izejā, ir parādītas 5.3. attēlā.

5.1.2 Alvaresa dreifa cauruļu lineārais paātrinātājs radioizotopu ražošanai

Lai paplašinātu hālija jonu paātrinājumu līdz 10 MeV/u HITRI*plus* projektā, pirmajai sekcijai seko divi atsevišķi dreifa cauruļu lineārie paātrinātāji (DTL dobumi), kas tiek izmantoti tikai radioizotopu ražošanas laikā. Kad stars tiek injicēts sinhrontronā, abi DTL dobumi ir izslēgti. Dizains paredz divas DTL struktūras vienas vietā, lai ļautu ražot radioizotopus ar helija joniem divās dažādās enerģijās. Kad pirmais DTL ir darbībā un otrais ir izslēgts, hēlija joni sasniedz enerģiju 7,1 MeV/u – optimālu vērtību vienam no visperspektīvākajiem alfa starojumu emitējošiem radioizotopiem vēža ārstēšanai, astatīnam-211 [10]. Ja abas DTL struktūras darbojas, hēlija joni tiek paātrināti līdz 10 MeV/u un pēc tam izmantoti plaši pieprasīto radioizotopu ražošanai, piemēram, fluoram-18 – attēlošanai visbiežāk izmantotajam radioizotopam PET (pozitronu emisijas tomogrāfijā) agrīnai audzēju diagnostikai [42].

Abu DTL RF dizains tika veikts, izmantojot *Poisson/SUPERFISH* kodus. Pirmais DTL tiek saukts par DTL1, savukārt otrais DTL apzīmēts kā DTL2. Elektriskā lauka sadalījums gan DTL1, gan DTL2 dobumos ir parādīts 5.4. attēlā.



5.4. attēls. Elektriskā lauka sadalījums (a) DTL1 un (b) DTL2, paredzēts 5 mA hēlija jonu paātrināšanai attiecīgi no (a) 5 MeV/u līdz 7,1 MeV/u un (b) 7,1 MeV/u līdz 10 MeV/u, simulēts, izmantojot *Poisson/SUPERFISH* kodus.

RF un ģeometrijas parametri DTL1 un DTL2, kas paredzēti hēlija jonu paātrināšanai no 5 MeV/u līdz 10 MeV/u, ir apkopoti 5.3. tabulā.

5.3. tabula. DTL1 un DTL2 RF un ģeometrijas parametri 5 mA hēlija jonu paātrināšanai no 5 MeV/u līdz 10 MeV/u

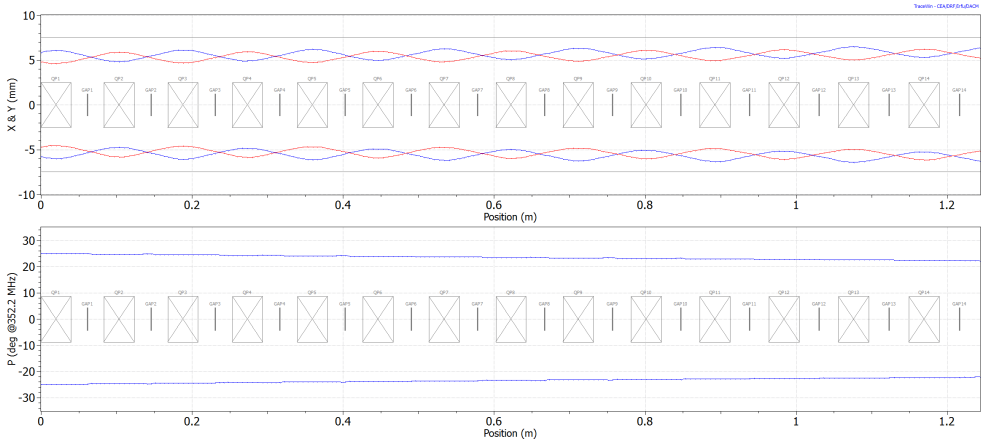
	DTL1	DTL2	Vienības
Darbības frekvence	352,2		MHz
Ievades enerģija	20	28,4	MeV
Izvades enerģija	28,4	40	MeV
Maksimālā staru kūļa strāva	5		mA
Paātrinošais lauks	3,1		MV/m
Sinhronā fāze	-24		deg
Garums	1,53	2,09	m
Šūnu skaits	14	16	-
Efektīvā šunta impedance	66,77	67,53	MΩ/m
Jaudas zudumi	181	253	kW

DTL1 un DTL2 staru kūļa parametri, kas paredzēti 5 mA hēlija jonu paātrināšanai attiecīgi no 5 MeV/u līdz 7,1 MeV/u un no 7,1 MeV/u līdz 10 MeV/u, ir apkopoti 5.4. tabulā.

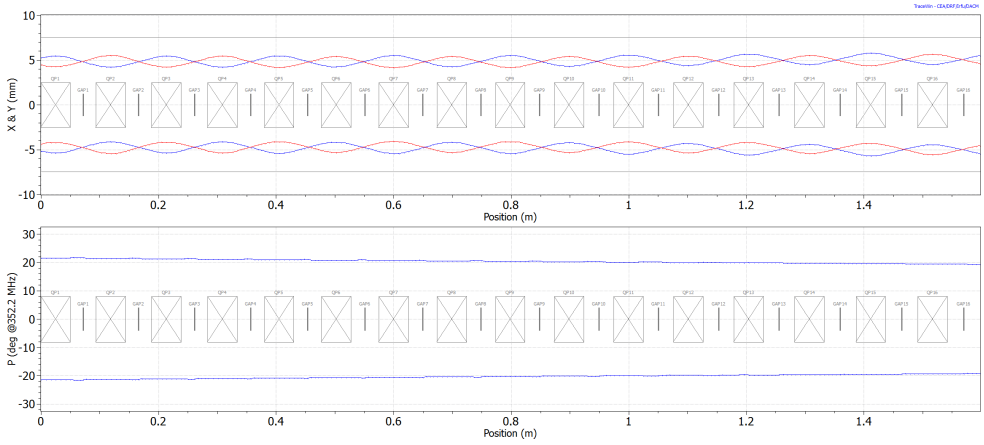
5.4. tabula. DTL1 un DTL2 staru kūļa parametri 5 mA hēlija jonu paātrināšanai no 5 MeV/u līdz 10 MeV/u

	DTL1	DTL2	Vienības
Cauruma rādiuss	7,5		mm
Iev. šķēr. norm. emisija (rms)(xx')	0,317	0,317	π.mm.mrad
Iev. šķēr. norm. emisija (rms)(yy')	0,351	0,351	π.mm.mrad
Izv. šķēr. norm. emisija (rms)(xx')	0,317	0,317	π.mm.mrad
Izv. šķēr. norm. emisija (rms)(yy')	0,351	0,351	π.mm.mrad
Iev. garen. norm. emisija (rms)	0,613	0,629	π.deg.MeV
Izv. garen. norm. emisija (rms)	0,629	0,633	π.deg.MeV
Enerģijas izkliede (2σ, 95 % kūlis)	$\pm$1,12	$\pm$0,89	%
Kūļa pārnese	100	100	%

5.5. attēlā parādītas šķērsvirziena un garenvirziena staru kūļa ģeometriskās robežas, kad hēlija joni pārvietojas caur DTL1 un DTL2. Robežas parādītas no DTL1 ieejas pie 5 MeV/u līdz tā izejai pie 7,1 MeV/u, un no DTL2 ieejas pie 7,1 MeV/u līdz tā izejai pie 10 MeV/u, ar nominālo staru strāvu 5 mA.



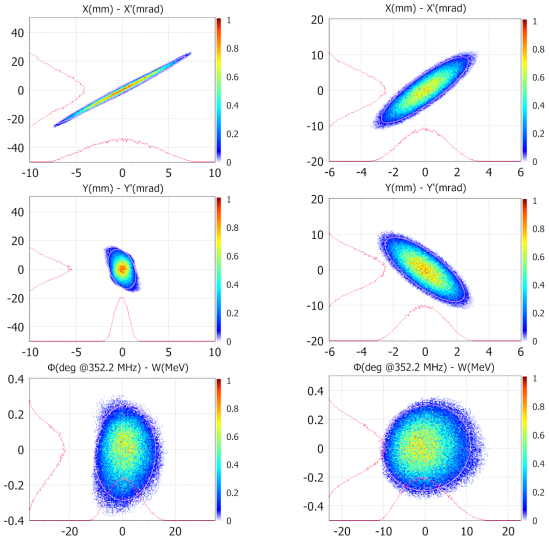
(a)



(b)

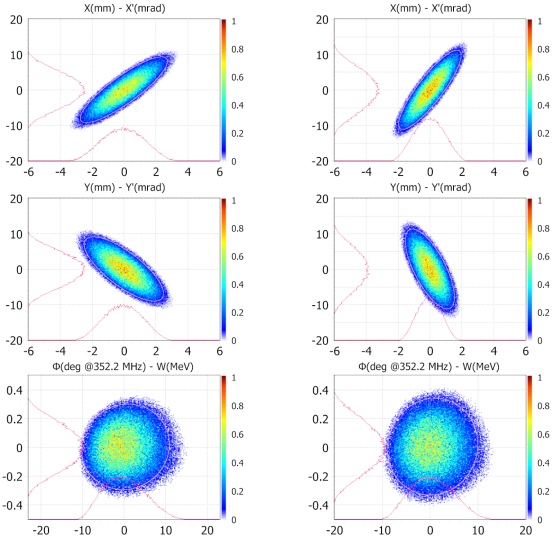
5.5. attēls. Kūļa ģeometriskās robežas (a) DTL1 no 5 MeV/u līdz 7,1 MeV/u garumā un (b) DTL2 no 7,1 MeV/u līdz 10 MeV/u garumā hēlija joniem. Katrai struktūrai augšējā grafikā attēlotas šķērsvirziena robežas xz un yz plaknēs, savukārt apakšējā grafikā redzamas garenvirziena robežas.

Tikmēr 10^5 hēlija jonu fāzes telpas gan šķērsvirziena, gan garenvirziena plaknēs pie DTL1 ieejas un izejas enerģijām ir parādītas 5.6. attēlā, savukārt pie DTL2 ieejas un izejas tās ir parādītas 5.7. attēlā.



(a) **(b)**

5.6. attēls. Hēlija jonu fāzes telpa (kreisā kolonna) pie 5 MeV/u un (labā kolonna) pie 7,1 MeV/u ar nominālo kūļa strāvu 5 mA DTL1 ietvaros.



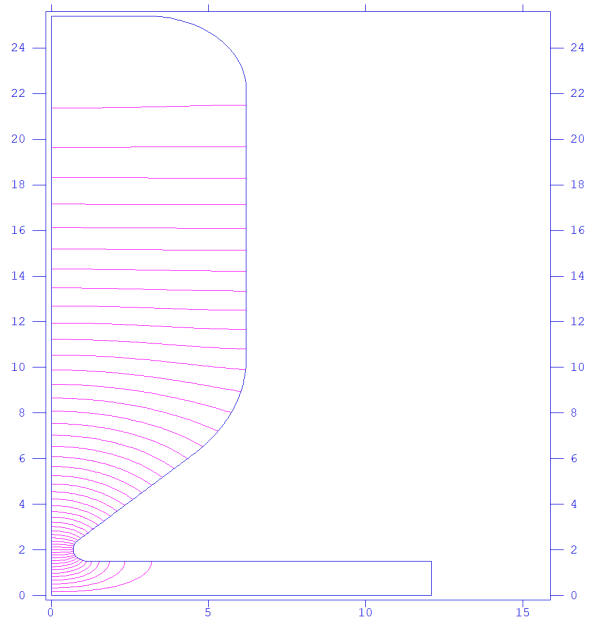
(a) **(b)**

5.7. attēls. Hēlija jonu fāzes telpa (kreisā kolonna) pie 7,1 MeV/u un (labā kolonna) pie 10 MeV/u ar nominālo kūļa strāvu 5 mA DTL2 ietvaros.

5.1.3 DEB pirms injekcijas oglekļa sinhrontronā

Lai samazinātu kūļa enerģijas izkliedi pirms tā injekcijas terapijas sinhrontronā, nepieciešams papildus dobums – DEB.

Optimālā DEB pozīcija ir starp DTL1 un DTL2. EM simulācijas veiktas, izmantojot *Poisson/SUPERFISH* kodus, un iegūtais elektriskā lauka sadalījums ir parādīts 5.8. attēlā.



5.8. attēls. Elektriskā lauka sadalījums DEB, kas izmantots oglekļa jonu enerģijas izkliedes samazināšanai pirms injekcijas terapijas sinhrontronā, simulēts, izmantojot *Poisson/SUPERFISH* kodus.

DEB RF un ģeometrijas parametri ir apkopoti 5.5. tabulā.

5.5. tabula. DEB RF un ģeometrijas parametri, kas izmantoti oglekļa jonu enerģijas izkliedes samazināšanai pirms injekcijas terapijas sinhrontronā

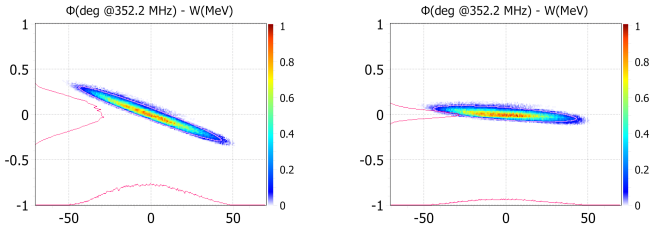
	DEB	**Vienības**
Šūnu skaits	1	-
Dobuma atveres rādiuss	15	mm
Garums	242	mm
Paātrinošais lauks	0,765	MV/m
Nominālais spriegums	130	kV
Jaudas zudumi	17	kW

Lai novērtētu ietekmi uz staru kvalitāti, aprēķināta 95 % staru enerģijas izkliede un normalizētās RMS šķērsvirziena emitances gan DEB ieejā, gan izejā, izmantojot *TraceWin*. Šīs vērtības ir sniegtas 5.6. tabulā.

5.6. tabula. DEB kūļa parametri, kas izmantoti oglekļa jonu enerģijas izkliedes samazināšanai pirms injekcijas terapijas sinhrontronā

	DEB	**Vienības**
Iev. garen. norm. emisija (rms)	1,399	π.deg.MeV
Izv. garen. norm. emisija (rms)	1,403	π.deg.MeV
Iev. enerģijas izkliede (2σ, 95 % kūlis)	$\pm$1,62	%
Izv. enerģijas izkliede (2σ, 95 % kūlis)	$\pm$0,38	%

Ņemot vērā DEB specifisko funkciju, galvenā uzmanība pievērsta garenvirziena fāzes telpai. Tāpēc 5.9. attēlā parādīta tikai garenvirziena fāzes telpa gan DEB ieejā, gan izejā, kas atbilst datiem 5.6. tabulā.



(a) **(b)**

5.9. attēls. Oglekļa jonu fāzes telpa (kreisā kolonna) pirms un (labā kolonna) pēc DEB.

5.1.4 Salīdzinājums un ideālas lineārā paātrinātāja konfigurācijas izvēle

Detalizēts pētījums par IH-DTL, kas darbojas pie 217 MHz, ir aprakstīts [43]. Tā kā dreifa caurulēs nav kvadrupolu un tā ir π moda struktūra, IH-DTL ir par 35,1 % īsāks (aptuveni 1,8 metri), un tam ir gandrīz uz pusi zemāki jaudas zudumi (45,7 % mazāki zudumi) salīdzinājumā ar piedāvāto QA-DTL. Tomēr, neskatoties uz mazākiem jaudas zudumiem un īsāku garumu, IH-DTL ir dažas nepilnības salīdzinājumā ar QA-DTL. IH-DTL efektīvi darbojas pie frekvencēs zem 300 MHz, kas izslēdz klistronu izmantošanas iespēju kā RF avotu, ierobežojot to tikai ar cietvielu pastiprinātāju (no angļu valodas *solid state amplifier* (SSA)) izmantošanu [44]. Saskaņā ar [44] lietojumos, kuros nepieciešamas frekvences starp 300 MHz un 1 GHz, klistroni ir ievērojami energoefektīvāki nekā SSA. Tāpēc klistronu izmantošana būtiski samazina RF

sistēmas izmaksas, padarot QA-DTL izmaksas salīdzināmas ar IH-DTL kopējo RF sistēmas izmaksu ziņā. IH-DTL izejā ir ziņots par garenvirziena normalizētās RMS emitances pieaugumu 25,7 % apmērā [43], kamēr QA-DTL gadījumā tas ir tikai 2,02 %, kas demonstrē QA-DTL spēcīgo garenvirziena kūļa kontroli salīdzinājumā ar IH-DTL. No otras puses, šķērsvirziena normalizētās RMS emitances pieaugums ir salīdzināms abām struktūrām. QA-DTL un IH-DTL parametru pārskats ir sniegts 5.7. tabulā.

5.7. tabula. Salīdzinājums starp QA-DTL un IH-DTL oglekļa jonu paātrināšanai

	Jaudas zud. [kW]	**Barošanas avots**	**Garums [m]**	**Norm. šķēr. / garen. rms emit. pieaug. [%]**
QA-DTL	626	klistrons	5,1	11,2/2,02
IH-DTL	340	SSA	3,31	10/25,7

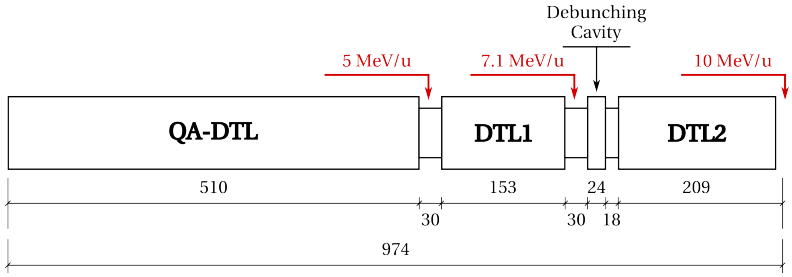
Pēc pirmās sekcijas, otrā un trešā sekcija paātrina hēlija jonus no 5 MeV/u līdz 10 MeV/u. Šajā darbā šīm sekcijām ir izvēlētas divas DTL struktūras, kuras salīdzinātas ar IH-DTL struktūrām, kas izstrādātas tādam pašam enerģijas diapazonam, kā parādīts [43]. Lai nodrošinātu pareizu darbību gan kā sinhrontrona injektoram, gan radioizotopu ražošanai, IH-DTL nepieciešamas divas DEB struktūras ar kopējo jaudas zudumu 20 kW un papildu garumu 4,6 m [45]. Savukārt šajā darbā aprakstītajai Alvaresa tipa lineārā paātrinātaja konfigurācijai nepieciešams tikai viens DEB ar līdzīgu jaudas zudumu – 17 kW, kas izvietots starp DTL dobumiem, tādējādi nodrošinot minimālu papildu nepieciešamo telpu. Jaudas zudumi un katras lineārā paātrinātāja struktūras garums, ieskaitot starp tām esošo staru transporta līniju (BTL) garumu, ir parādīti 5.8. tabulā.

5.8. tabula. Salīdzinājums starp Alvaresa tipa un H veida lineāro paātrinātāju konfigurācijām oglekļa jonu paātrināšanai

	Jaudas zud. [kW]	**Garums [m]**
QA-DTL	626	5,1
DTL1 + BTL	181	1,83
DTL2 + BTL	253	2,27
DEB + BTL	17	0,54
Alvaresa tipa (kopējais)	**1077**	**9,74**
IH-DTL1	340	3,31
IH-DTL2 + BTL	265	1,6
IH-DTL3 + BTL	425	2,04
DEB1 + DEB2 + BTL	20	4,6
H veida (kopējais)	**1050**	**11,55**

Lietojumos, kuros joni ir jāpaātrina virs 5 MeV/u, kā tas ir HITRI*plus* lineārā paātrinātāja

gadījumā, priekšroka dodama Alvaresa tipa lineārā paātrinātāja struktūru kombinācijai. Tas ir saistīts ar mazāku kopējo garumu, praktiski vienādām kopējām jaudas prasībām, izmantojot izmaksu ziņā efektīvāku RF avotu risinājumu (klistronus, nevis SSA), kā arī ar pārāku garenvirziena kūļa kontroli. Šajā darbā piedāvātais *HITRIplus* lineārā paātrinātāja kopējā konstrukcija ar DEB ir redzama 5.10. attēlā.



5.10. attēls. Vēlamās HITRI*plus* lineārā paātrinātāja konfigurācijas shematisks attēlojums.

Turklāt Alvaresa tipa lineārā paātrinātāja konfigurācija (QA-DTL zema ātruma daļiņu paātrināšanai kā pirmā sekcija un divi DTL dobumi turpmākai paātrināšanai kā otrā un trešā sekcija) ir izvēlēta kā NIMMS pētījuma bāzes lineārais paātrinātājs, pateicoties pārākai garenvirziena kūļa dinamikai un salīdzināmai jaudas un garuma vērtībai attiecībā pret H veida alternatīvu (trīs IH-DTL dobumi katrai sekcijai).

5.2 NIMMS hēlija lineārā paātrinātāja dizaini

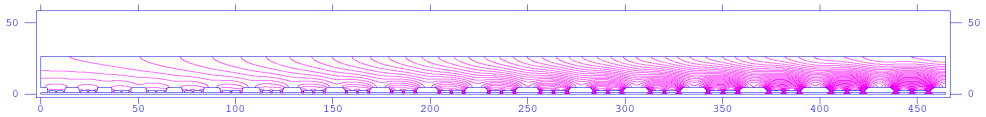
NIMMS hēlija lineārais paātrinātājs sastāv no trim atšķirīgām sekcijām. Kā pirmās paātrināšanas pakāpes posms ir izvēlēts QA-DTL, kas darbojas ar frekvenci 352,2 MHz. Otrajai un trešajai sekcijai tika izvēlētas divas DTL struktūras, lai efektīvi paātrinātu jonus.

NIMMS hēlija lineārajam paātrinātājam jānodrošina hēlija jonu paātrināšana ar nominālo staru strāvu 5 mA pirms to injekcijas jonu terapijas sinhrontronā. Turklāt gadījumā, ja NIMMS lineārais paātrinātājs tiek izmantots radioizotopu ražošanai, tam jāspēj darboties ar ievērojami lielāku staru strāvu – līdz pat 30 mA. Lineārajam paātrinātājam jābūt spējīgam paātrināt arī deitērija jonus ar nominālo staru strāvu līdz 30 mA, tādējādi nodrošinot iespēju ražot plašāku radioizotopu klāstu, kā norādīts 2.1. tabulā.

Papildus lineārā paātrinātāja struktūrām tika izstrādātas divas RF struktūras staru manipulācijai: DEB un ERC. Lai gan ERC ir izvēles elements, DEB ir būtiska sistēmas sastāvdaļa. Gan DEB, gan ERC tika izstrādāti un integrēti NIMMS lineārā paātrinātāja izkārtojumā.

5.2.1 Kvazi-Alvaresa dreifa cauruļu lineārais paātrinātājs hēlija injekcijai sinhrontronā un radioizotopu ražošanai

QA-DTL ir izstrādāts, lai paātrinātu hēlija jonus ar nominālo staru strāvu 5 mA līdz 5 MeV/u un ievadītu tos vēža terapijas sinhrontronā. Papildus tam QA-DTL var paātrināt arī deitērija vai hēlija jonus ar lielākām strāvām līdz 30 mA, sasniedzot to pašu enerģiju – 5 MeV/u, taču šādā gadījumā stars netiek ievadīts sinhrontronā, bet tiek novirzīts uz mērķi radioizotopu ražošanai. Šīs QA-DTL struktūras RF dizains tika izstrādāts, izmantojot *Poisson/SUPERFISH* kodus, un tika aprēķināts tajā esošā elektriskā lauka sadalījums (skat. 5.11. attēlu).



5.11. attēls. Elektriskā lauka sadalījums QA-DTL struktūrā hēlija jonu paātrināšanai no 1 MeV/u līdz 5 MeV/u, simulēts, izmantojot *Poisson/SUPERFISH* kodus.

QA-DTL RF un ģeometrijas parametri ir apkopoti 5.9. tabulā.

Izstrādātā QA-DTL dreifa caurules atveres rādiuss ir nedaudz lielāks salīdzinājumā ar lineārā paātrinātāja struktūru, kas izstrādāta HITRI*plus* projektam. Šis palielinājums ir nepieciešams, lai nodrošinātu lielākas strāvas kūļā paātrināšanu, kā rezultātā rādiuss ir 10 mm, nodrošinot 100 % staru caurlaidību visos apskatītajos gadījumos. QA-DTL kūļa parametri ir apkopoti 5.10. tabulā.

Kūļa ģeometriskās robežas tika aprēķinātas hēlija joniem, kas paredzēti gan sinhrontrona injekcijai, gan radioizotopu ražošanai. Šie rezultāti ir sniegti 5.12. attēlā.

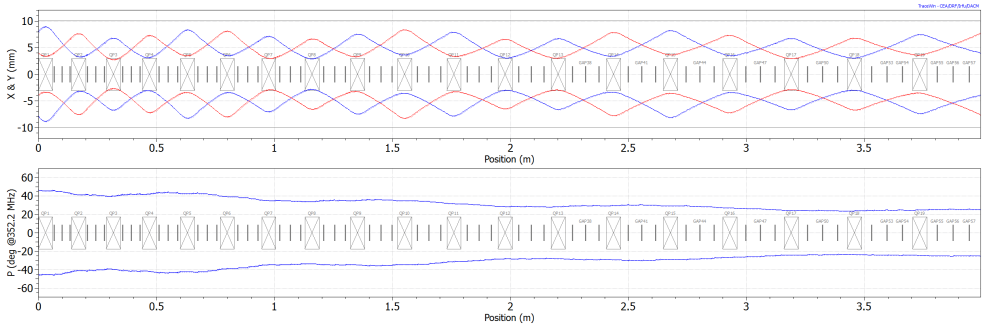
5.9. tabula. QA-DTL RF un ģeometrijas parametri 5 mA un 30 mA hēlija jonu paātrināšanai no 1 MeV/u līdz 5 MeV/u

	Sinhro.	Izotopi	Vienības
Darbības frekvence	352,2		MHz
Ievades enerģija	4		MeV
Izvades enerģija	20		MeV
Maksimālā kūļa strāva	5	30	mA
Paātrinošais lauks	3,5		MV/m
Sinhronā fāze	-35 līdz -24		deg
Garums	4,65		m
Superperiodu skaits	19		-
Efektīvā šunta impedance	60,12		MΩ/m
Jaudas zudumi	570		kW

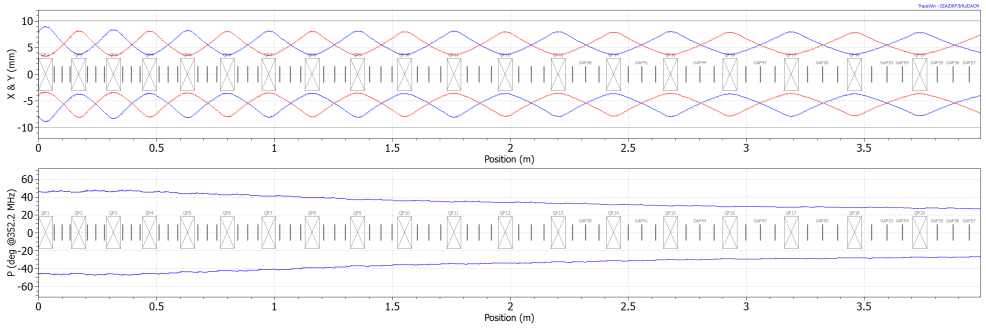
5.10. tabula. QA-DTL kūļa parametri hēlija jonu paātrināšanai no 1 MeV/u līdz 5 MeV/u

	Sinhro.	Izotopi	Vienības
Cauruma rādiuss	10		mm
Iev. šķēr. norm. emisija (rms)(xx')	0,250	0,250	π.mm.mrad
Iev. šķēr. norm. emisija (rms)(yy')	0,250	0,250	π.mm.mrad
Izv. šķēr. norm. emisija (rms)(xx')	0,257	0,260	π.mm.mrad
Izv. šķēr. norm. emisija (rms)(yy')	0,258	0,265	π.mm.mrad
Iev. garen. norm. emisija (rms)	0,394	0,394	π.deg.MeV
Izv. garen. norm. emisija (rms)	0,404	0,419	π.deg.MeV
Enerģijas izkliede (2σ, 95 % kūlis)	$\pm$0,97	$\pm$0,94	%
Pārnese	100	100	%

Fāzes telpas grafiki šķērsvirziena un garenvirziena plaknēs QA-DTL ieejā un izejā tika aprēķināti 10^5 hēlija joniem. Šie grafiki atbilst hēlija joniem, kas paredzēti sinhrontrona injekcijai ar 5 mA staru strāvu (skat. 5.13. attēlu) un radioizotopu ražošanai ar 30 mA staru strāvu (skat. 5.14. attēlu).

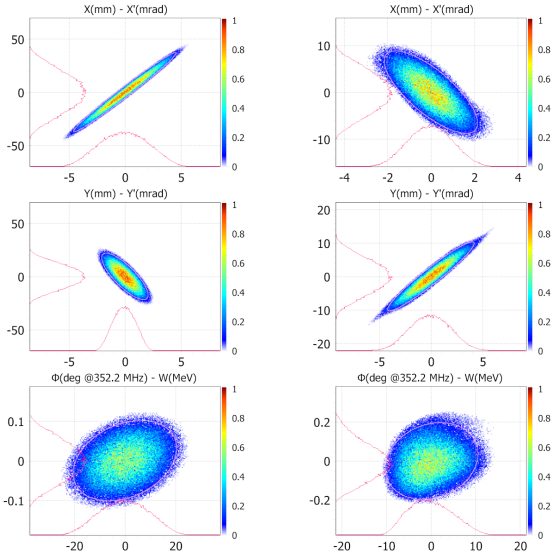


(a)



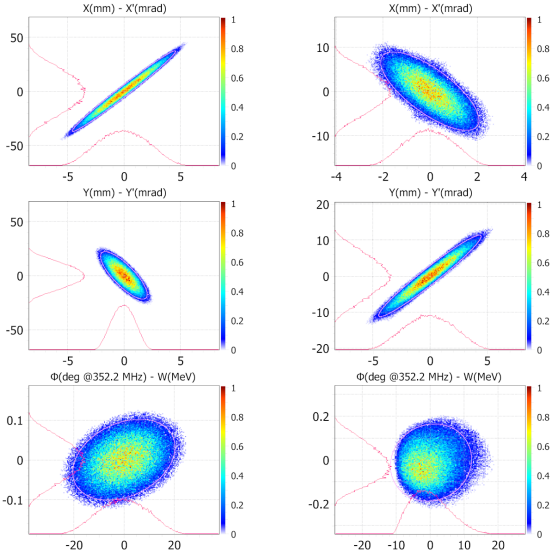
(b)

5.12. attēls. Kūļa ģeometriskās robežas QA-DTL garumā no 1 MeV/u līdz 5 MeV/u hēlija joniem ar nominālo staru strāvu: (a) 5 mA (kūlis sinhrotronam) un (b) 30 mA (kūlis radioizotopu ražošanai). Katram paātrinātajam jonam augšējā grafikā attēlotas šķērsvirziena kūļa robežas xz un yz plaknēs, savukārt apakšējā grafikā redzamas garenvirziena kūļa robežas.



(a) **(b)**

5.13. attēls. Hēlija jonu fāzes telpa (kreisā kolonna) pie 1 MeV/u un (labā kolonna) pie 5 MeV/u ar nominālo staru strāvu 5 mA QA-DTL ietvaros.



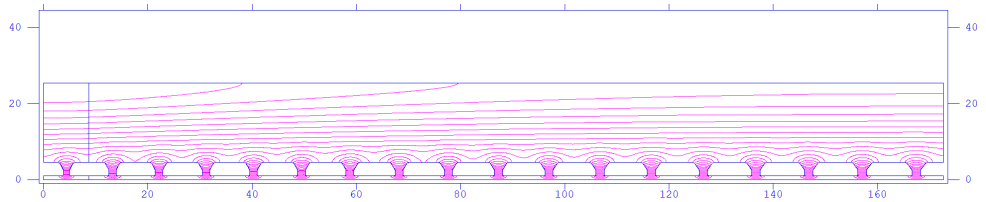
(a) **(b)**

5.14. attēls. Hēlija jonu fāzes telpa (kreisā kolonna) pie 1 MeV/u un (labā kolonna) pie 5 MeV/u ar nominālo staru strāvu 30 mA QA-DTL ietvaros.

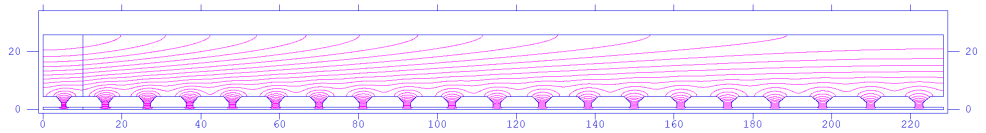
5.2.2 Alvaresa dreifa cauruļu lineārais paātrinātājs radioizotopu ražošanai

QA-DTL struktūrai seko divas DTL struktūras, attiecīgi apzīmētas kā DTL1 un DTL2. Šīs struktūras ir izstrādātas ar unikālu īpašību: katras DTL pirmā šūna ir atdalīta no nākamajām šūnām ar vara sienu.

Elektriskā lauka sadalījumi DTL1 un DTL2 dobumos, kad abi ir ierosināti, tika aprēķināti, izmantojot *Poisson/SUPERFISH* kodus. Šajā gadījumā katra dobuma pirmās šūnas darbojas kā paātrinošās šūnas. Simulācijas rezultāti ir parādīti 5.15. attēlā.



(a)



(b)

5.15. attēls. Elektriskā lauka sadalījums (a) DTL1 un (b) DTL2, paredzēts 30 mA hēlija jonu paātrināšanai no (a) 5 MeV/u līdz 7,1 MeV/u un (b) 7,1 MeV/u līdz 10 MeV/u attiecīgi simulēts, izmantojot *Poisson/SUPERFISH* kodus.

5.11. tabulā ir apkopoti RF un ģeometrijas parametri 30 mA hēlija jonu paātrināšanai DTL1 un DTL2 struktūrās no 5 MeV/u līdz 10 MeV/u. Abām struktūrām darba frekvence ir 352,2 MHz, un RF darba cikls ir 10 %.

5.11. tabula. DTL1 un DTL2 RF un ģeometrijas parametri 30 mA hēlija jonu paātrināšanai no 5 MeV/u līdz 10 MeV/u

	DTL1	DTL2	Vienības
Darbības frekvence	352,2		MHz
Ievades enerģija	20,0	28,4	MeV
Izvades enerģija	28,4	40,0	MeV
Maksimālā kūļa strāva	30		mA
Paātrinošais lauks	3.1		MV/m
Sinhronā fāze	-24		deg
Garums	1,74	2,28	m
Šūnu skaits	18	20	-
Efektīvā šunta impedance	56,18	59,14	MΩ/m
Jaudas zudumi	235	300	kW

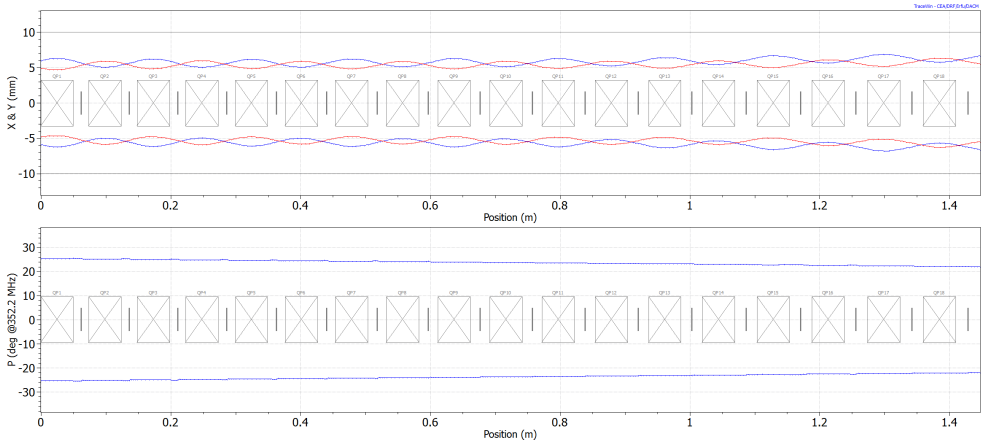
DTL1 un DTL2 staru parametri ir parādīti 5.12. tabulā.

5.12. tabula. DTL1 un DTL2 staru parametri 30 mA hēlija jonu paātrināšanai no 5 MeV/u līdz 10 MeV/u

	DTL1	DTL2	Vienības
Caurules atveres rādiuss	10		mm
Iev. šķēr. norm. emisija (rms)(xx')	0,259	0,266	π.mm.mrad
Iev. šķēr. norm. emisija (rms)(yy')	0,265	0,272	π.mm.mrad
Izv. šķēr. norm. emisija (rms)(xx')	0,267	0,266	π.mm.mrad
Izv. šķēr. norm. emisija (rms)(yy')	0,271	0,275	π.mm.mrad
Iev. garen. norm. emisija (rms)	0,421	0,430	π.deg.MeV
Izv. garen. norm. emisija (rms)	0,430	0,516	π.deg.MeV
Enerģijas izkliede (2σ, 95 % kūlis)	$\pm$1,09	$\pm$1,01	%
Kūļa pārnese	100	100	%

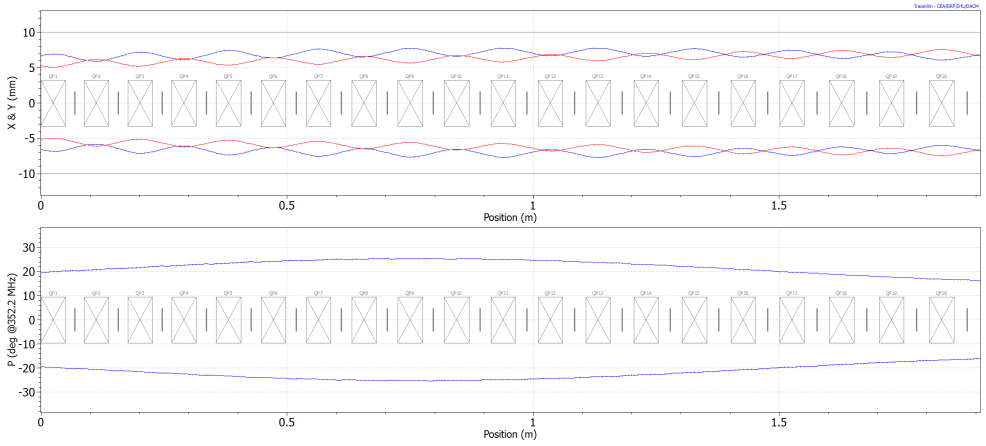
Hēlija jonu šķērsvirziena un garenvirziena ģeometriskās robežas no DTL1 ieejas (5 MeV/u)

līdz DTL1 izejai (7,1 MeV/u) pie nominālās staru strāvas 30 mA ir sniegti 5.16. attēlā.



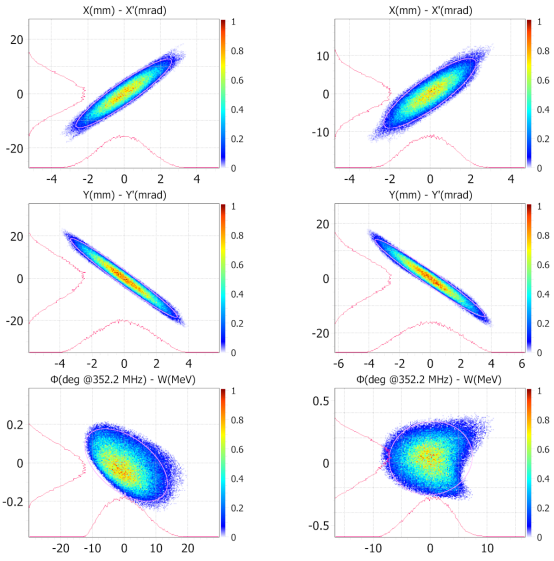
5.16. attēls. Kūļa ģeometriskās robežas DTL1 garumā no 5 MeV/u līdz 7,1 MeV/u hēlija joniem ar 30 mA kūļa strāvu. Augšējā grafikā attēlotas šķērsvirziena kūļa robežas xz un yz plaknēs, savukārt apakšējā grafikā redzamas garenvirziena kūļa robežas.

Hēlija jonu kūļa ģeometriskās robežas, tiem paātrinoties caur DTL2, ir aprēķināti un parādīti 5.17. attēlā.



5.17. attēls. Kūļa ģeometriskās robežas DTL1 garumā no 7,1 MeV/u līdz 10 MeV/u hēlija joniem ar 30 mA staru strāvu. Augšējā grafikā attēlotas šķērsvirziena kūļa robežas xz un yz plaknēs, savukārt apakšējā grafikā redzamas garenvirziena kūļa robežas.

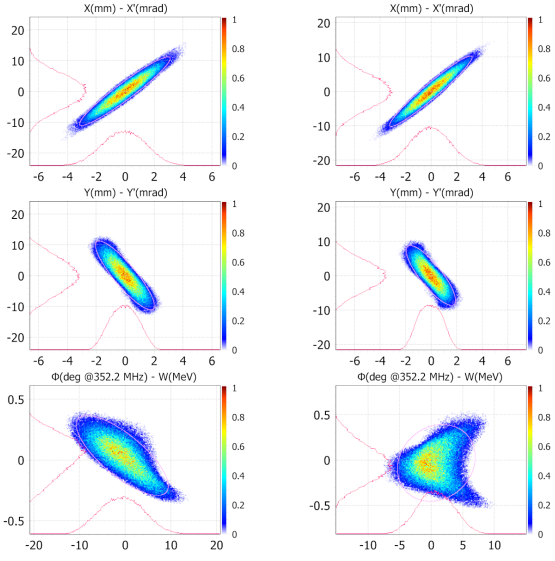
Papildus kūļa ģeometriskajām robežām tika aprēķināta arī staru šķērsvirziena un garenvirziena fāzes telpa katrā struktūrā. Hēlija jonu fāzes telpa pie nominālās 30 mA staru strāvas gan DTL1 ieejā, gan izejā ir parādīta 5.18. attēlā.



(a) **(b)**

5.18. attēls. Hēlija jonu fāzes telpa (kreisā kolonna) pie 5 MeV/u un (labā kolonna) pie 7,1 MeV/u ar nominālo staru strāvu 30 mA DTL1 ietvaros.

30 mA hēlija jonu fāzes telpas gan šķērsvirziena, gan garenvirziena plaknēs DTL2 sākumā un beigās ir parādītas 5.19. attēlā.



(a) **(b)**

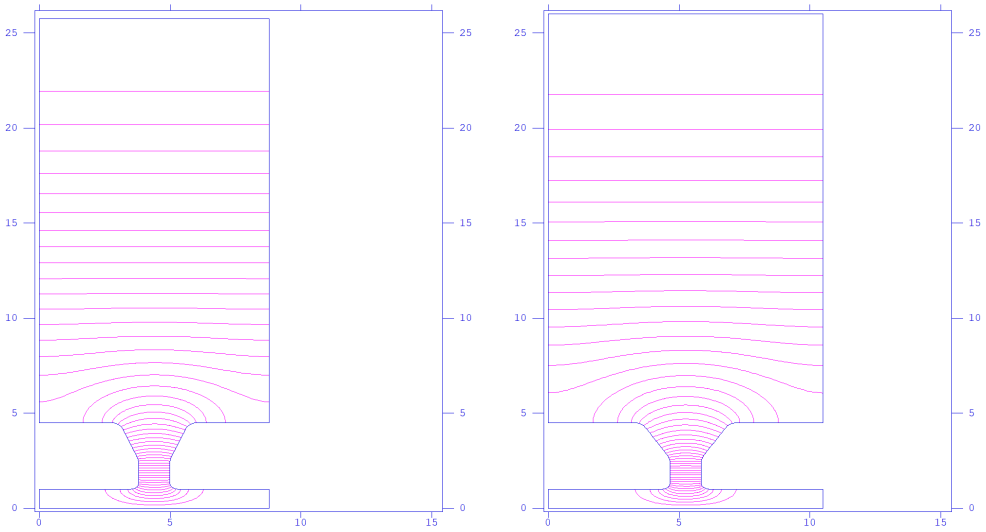
5.19. attēls. Hēlija jonu fāzes telpa (kreisā kolonna) pie 7,1 MeV/u un (labā kolonna) pie 10 MeV/u ar nominālo staru strāvu 30 mA DTL2 ietvaros.

5.2.3 DEB un enerģijas palielināšanas dobums pirms injekcijas hēlija sinhrontronā

NIMMS hēlija lineārajam paātrinātājam, kas paredzēts kūļa injekcijai jonu terapijas sinhrontronā, DEB ir būtiska sastāvdaļa. Papildus DEB ir izstrādāts arī enerģijas palielināšanas dobums (ERC), kas ir izvēles, taču vērtīgs papildinājums lineārā paātrinātāja konfigurācijā. ERC izmanto modernu tehnoloģiju un nodrošina efektīvāku kūļa injicēšanu sinhrontronā. Tomēr tas nāk ar kompromisu – lielāku vadības sistēmas sarežģītību. Lai samazinātu kopējās izgatavošanas izmaksas, gan DEB, gan ERC ir integrēti DTL1 un DTL2 struktūrās.

Praktiskā izpildījumā DTL1 pirmā šūna ir optimizēta darbībai kā paātrinošā šūna vai kā ERC, lai palielinātu daļiņu enerģiju. Šī divējādā funkcionalitāte būtiski sarežģī konstrukcijas procesu, taču nodrošina vietas ekonomiju un izmaksu efektivitāti. Līdzīgi DTL2 pirmā šūna var darboties vai nu kā DEB, vai kā paātrinošā šūna. Gan ERC, gan DEB ir izolēti no pārējām paātrinošajām vienībām ar vara sienām, ļaujot tiem darboties neatkarīgi. Ja lineārais paātrinātājs tiek izmantots radioizotopu ražošanai, gan DEB, gan ERC darbojas kā paātrinošās šūnas ar sinhrono fāzi, līdzīgi pārējām DTL struktūrām. Savukārt, ja lineārais paātrinātājs injicē kūli sinhrontronā, tikai DEB un ERC tiek ierosināti pie nulles krustošanās fāzes, kamēr pārējās DTL struktūras ir izslēgtas.

Abu dobumu elektriskā lauka sadalījumi ir redzami 5.20. attēlā.



(a) **(b)**

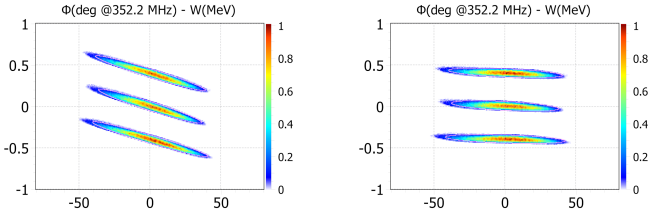
5.20. attēls. Elektriskā lauka sadalījums (a) *ERC*, kas izmantots enerģijas palielināšanai, un (b) DEB, kas izmantots hēlija jonu enerģijas izkliedes samazināšanai pirms injekcijas terapijas sinhrontronā, simulēts, izmantojot *Poisson/SUPERFISH* kodus.

Papildus elektriskā lauka sadalījumiem abu struktūru RF un ģeometrijas parametri ir apkopoti 5.13. tabulā.

5.13. tabula. *ERC* RF un ģeometrijas parametri enerģijas palielināšanai un DEB parametri hēlija jonu enerģijas izkliedes samazināšanai pirms injekcijas terapijas sinhrontronā

	ERC	DEB	Vienības
Šūnu skaits	1	1	-
Cauruma rādiuss	10	10	mm
Garums	88	105	mm
Paātrinošais lauks	3,1	1,4	MV/m
Nominālais spriegums	240	130	kV
Jaudas zudumi	35	8	kW

Pēc ERC stars tiek virzīts caur dreifa cauruli līdz DEB ieejai, jo DTL1 struktūra šajā darbības režīmā ir izslēgta. Pārvietojoties DTL1, kūlis kļūst garāks, bet šaurāks, kā parādīts 5.21a. attēlā. Pārvietojoties DEB, elektriskais lauks ar spriegumu 130 kV samazina enerģijas izkliedi, efektīvi rotējot staru kūli garenvirziena fāzes telpā, kā ilustrēts 5.21b. attēlā.



(a) **(b)**

5.21. attēls. Hēlija jonu fāzes telpa (kreisā kolonna) pirms un (labā kolonna) pēc DEB.

5.2.4 Salīdzinājums un ideālās lineārā paātrinātāja konfigurācijas izvēle

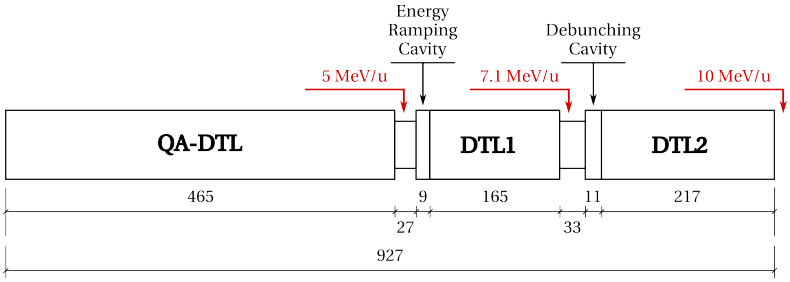
Tā kā QA-DTL RF konstrukcijas izmaksas ir salīdzināmas ar IH-DTL izmaksām, bet QA-DTL kūļa dinamika ir pārāka, QA-DTL ir izvēlēts kā vēlamā lineārā paātrinātāja struktūra NIMMS lineārā paātrinātāja pirmajai sekcijai. Neskatoties uz to, ka abās struktūrās tiek nodrošināta 100 % kūļa pārnese, IH-DTL izmanto KONUS kūļa dinamiku, kur lielākajā daļā garenvirziena perioda sinhronā fāze ir 0 grādi – tas nav uzskatāms par stabilu kustību garenvirziena fāzes telpā [36], tāpēc IH-DTL ir vairāk pakļauts kūļa zudumiem kļūdu gadījumā. It īpaši pie 10 % darbības cikla, kūļa zudumi rada bažas radioaktivitātes un komponenšu aktivācijas dēļ.

NIMMS lineārā paātrinātāja otrajai un trešajai sekcijai ir izvēlētas divas DTL struktūras, jo DTL pie enerģijām virs 5 MeV/u ir ar salīdzināmām jaudas prasībām kā citas lineārā paātrinātāja struktūras, taču ar pārāku kūļa veiktspēju. Katras lineārā paātrinātāja struktūras jaudas zudumi un garums, kā arī BTL (staru transporta līnijas) garums ir parādīti 5.14. tabulā.

5.14. tabula. Alvaresa tipa lineārā paātrinātāja konfigurācijas pārskats hēlija jonu paātrināšanai

	Jaudas zud. [kW]	**Garums [m]**
QA-DTL	570	4,65
DTL1 + BTL (ar ERC)	235	2,01
DTL2 + BTL (ar DEB)	300	2,61
Alvaresa tipa (kopējais)	**1105**	**9,27**

Saskaņā ar iepriekš minēto galīgais NIMMS lineārā paātrinātāja dizains sastāv no QA-DTL kā pirmās sekcijas, DTL1 kā otrās sekcijas un DTL2 kā trešās sekcijas. NIMMS lineārā paātrinātāja konfigurācijas kopējais dizains, kurā iekļauti gan DEB, gan ERC dobumi, ir redzams 5.22. attēlā.

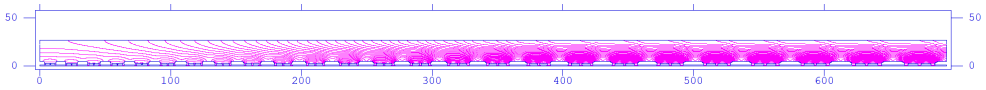


5.22. attēls. Vēlamās NIMMS lineārā paātrinātāja konfigurācijas shematisks attēlojums.

5.3 Hēlija lineārā paātrinātāja dizains radioizotopu ražošanai

Ir izstrādāta QA-DTL lineārā paātrinātāja struktūra, kas īpaši paredzēta viena no daudzsološākajiem alfa terapijas radioizotopiem – astatīna-211 – ražošanai. Šis QA-DTL spēj paātrināt hēlija jonus ar nominālo kūļa strāvu 30 mA no 1 MeV/u līdz 7,1 MeV/u. Atšķirībā no citām šajā darbā aplūkotajām lineārā paātrinātāja konfigurācijām šis dizains nav paredzēts kā injektors jonu terapijas sinhrontronam. Izejas enerģija 7,1 MeV/u (kas atbilst kopējai enerģijai 28,4 MeV) ir izvēlēta, lai optimizētu ^{211}At ražošanu, vienlaikus saglabājot enerģiju nedaudz zem nevēlamā ^{210}At ražošanas sliekšņa, kura sliekšņa enerģija ir 28,6 MeV [46–48].

QA-DTL ir paredzēts darbībai ar frekvenci 352,2 MHz. EM simulācijas tika veiktas, izmantojot *Poisson/SUPERFISH* kodus, aprēķinot elektriskā lauka sadalījumu struktūrā, kā parādīts 5.23. attēlā.



5.23. attēls. Elektriskā lauka sadalījums QA-DTL struktūrā hēlija jonu paātrināšanai no 1 MeV/u līdz 7,1 MeV/u, simulēts, izmantojot *Poisson/SUPERFISH* kodus.

5.15. tabulā ir parādīti QA-DTL RF un ģeometrijas parametri, kas izmantoti hēlija jonu paātrināšanai no 1 MeV/u līdz 7,1 MeV/u.

5.15. tabula. QA-DTL RF un ģeometrijas parametri hēlija jonu paātrināšanai no 1 MeV/u līdz 7,1 MeV/u

	QA-DTL	**Vienības**
Darbības frekvence	352,2	MHz
Ievades enerģija	4	MeV
Izvades enerģija	28,4	MeV
Maksimālā staru kūļa strāva	30	mA
Paātrinošais lauks	3,5	MV/m
Sinhronā fāze	-35 līdz -24	deg
Garums	6,9	m
Superperiodu skaits	25	-
Efektīvā šunta impedance	62,18	MΩ/m
Jaudas zudumi	770	kW

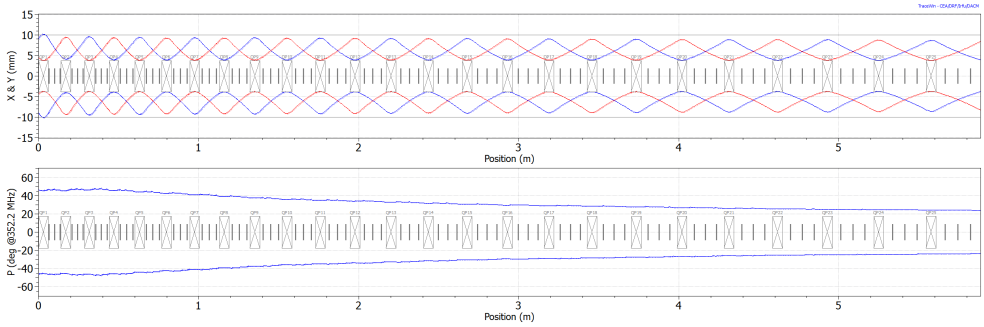
Kūļa dinamikas analīze tika veikta, izmantojot *TraceWin* kodu. Simulācijas uzrādīja 100 % hēlija jonu pārnesi pie nominālās 30 mA staru strāvas. Staru parametri gan šķērsvirziena, gan

garenvirziena plaknēs pie QA-DTL ieejas un izejas tika veiksmīgi aprēķināti un ir dokumentēti 5.16. tabulā.

5.16. tabula. QA-DTL kūļa parametri hēlija jonu paātrināšanai no 1 MeV/u līdz 7,1 MeV/u

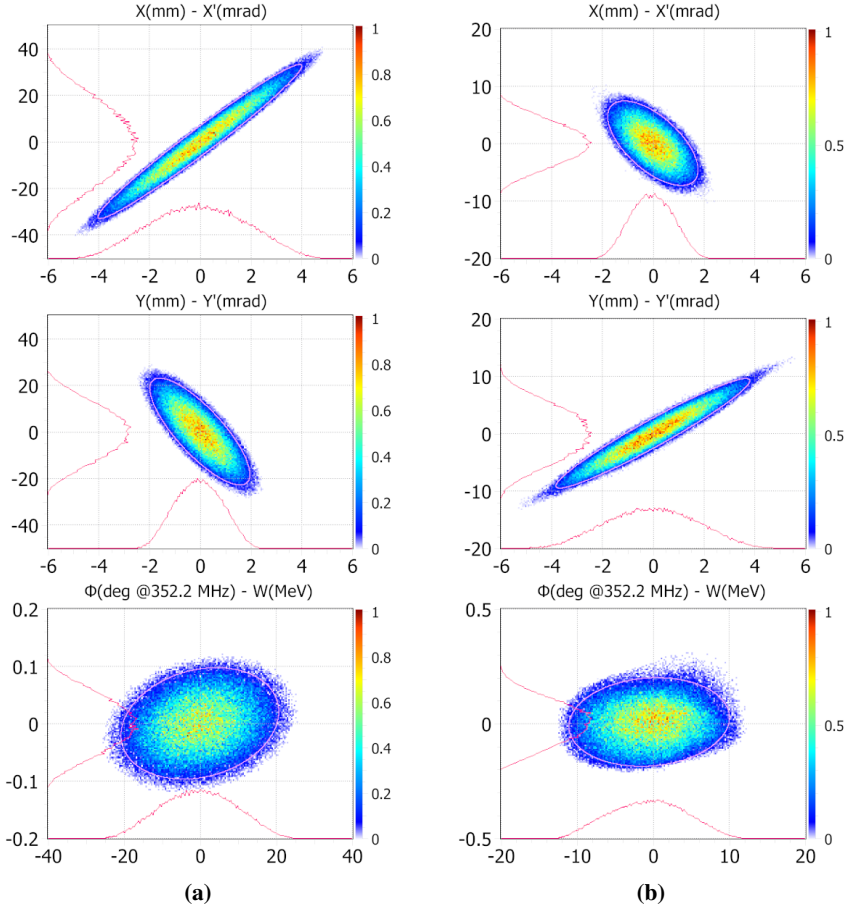
	QA-DTL	**Vienības**
Caurules atvēruma rādiuss	10	mm
Iev. šķēr. norm. emisija (rms)(xx')	0,250	π.mm.mrad
Iev. šķēr. norm. emisija (rms)(yy')	0,250	π.mm.mrad
Izv. šķēr. norm. emisija (rms)(xx')	0,253	π.mm.mrad
Izv. šķēr. norm. emisija (rms)(yy')	0,252	π.mm.mrad
Iev. garen. norm. emisija (rms)	0,394	π.deg.MeV
Izv. garen. norm. emisija (rms)	0,406	π.deg.MeV
Enerģijas izkliede (2σ, 95 % kūlis)	$\pm$0,69	%
Pārnese	100	%

Gan šķērsvirziena, gan garenvirziena staru kūļa rovežas QA-DTL struktūrā tika aprēķinātas, izmantojot *TraceWin*. Iegūtās hēlija jonu staru kūļa robežas pie 30 mA staru strāvas ir parādītas 5.24. attēlā.



5.24. attēls. Kūļa ģeometriskās robežas QA-DTL garumā no 1 MeV/u līdz 7,1 MeV/u ar 30 mA kūļa strāvu, kas izmantota radioizotopu ražošanai. Augšējā grafikā attēlotas šķērsvirziena kūļa robežas xz un yz plaknēs, savukārt apakšējā grafikā redzamas garenvirziena kūļa robežas.

Lai tālāk aprakstītu kūļa dinamiku, izveidoti hēlija jonu fāzes telpas grafiki pie QA-DTL ieejas un izejas, un tie ir redzami 5.25. attēlā.



5.25. attēls. Hēlija jonu fāzes telpa (kreisā kolonna) pie 1 MeV/u un (labā kolonna) pie 7,1 MeV/u ar nominālo staru strāvu 30 mA QA-DTL ietvaros.

6. Secinājumi

Šī darba mērķis bija izstrādāt lineāro paātrinātāju struktūras oglekļa un hēlija jonu ievadīšanai vēža terapijas sinhrotronos ar enerģiju 5 MeV/u, kā arī radioizotopu paralēlai ražošanai ar enerģiju līdz 10 MeV/u. Šis mērķis tika veiksmīgi sasniegts, izpildot piecus uzdevumus.

1. Pirmais uzdevums bija **izpētīt esošās jonu lineāro paātrinātāju struktūras**, kuras varētu izmantot kā oglekļa un hēlija ievadīšanai vēža terapijas sinhrotronā. Tas tika paveikts, izmantojot padziļinātu literatūras analīzi, kuras rezultātā tika identificētas divpadsmit atšķirīgas lineārā paātrinātāja struktūras. Turpmākai izpētei, lai nodrošinātu hēlija un oglekļa jonu paātrināšanu ar zemu ātrumu, tika izvēlētas divas struktūras: H veida interdigitālais dreifa cauruļu lineārais paātrinātājs (IH-DTL) un Alvaresa dreifa cauruļu lineārais paātrinātājs (DTL). Balstoties literatūras analīzes pētījumā, tika arī ierosināts, ka veiktspēju zema ātruma jonu injektoriem terapijas sinhrotronā varētu uzlabot, izstrādājot kvazi-Alvaresa dreifa cauruļu lineāro paātrinātāju (QA-DTL), kas ir DTL modifikācija, kā arī projektējot atdalītu dobumu H veida interdigitālo dreifa cauruļu lineāro paātrinātāju (S-IH-DTL), kas ir IH-DTL modifikācija.

2. Otrais uzdevums bija definēt optimizācijas metodoloģiju lineārā paātrinātāja struktūru projektēšanai, lai nodrošinātu maksimālu jaudas efektivitāti un kūļa transmisiju bez daļiņu zuduma. Lai to panāktu, tika izstrādāti **optimizācijas algoritmi**, lai maksimizētu efektīvo šunta impedanci uz vienības garumu (ZT^2), kas ir proporcionāla jaudas efektivitātei. Papildus tika optimizēti arī pastāvīgo magnētu kvadrupolu gradienta stiprumi, kas nodrošina kūļa fokusēšanu šķērsvirzienā, tādējādi nodrošinot bezzaudējumu kūļa transportēšanu visās lineārā paātrinātāja struktūrās.

3. Trešais uzdevums bija **projektēt un optimizēt dažādas lineārā paātrinātāja struktūras** ar nepieciešamajiem ieejas un izejas parametriem, lai tās izmantotu kā jonu injektorus vēža terapijas sinhrotroniem vai radioizotopu ražošanai pie dažādām enerģijām. Lai to īstenotu, tika izstrādāts jauns QA-DTL dizains. Izstrādātais QA-DTL ļauj paātrināt jonus ar zemākām enerģijām, salīdzinot ar tā priekšgājēju DTL. Paralēli QA-DTL tika izstrādāts arī jauns S-IH-DTL, savukārt radioizotopu ražošanai tika izvēlēts DTL.

4. Ceturtais uzdevums bija **salīdzināt dažādās lineārā paātrinātāja struktūras**, kas tika izstrādātas trešajā uzdevumā, un izvēlēties vispiemērotāko risinājumu nākotnes oglekļa un hēlija vēža terapijas iekārtām. Salīdzinātās lineārā paātrinātāja struktūras zema ātruma

jonu paātrināšanai bija QA-DTL, IH-DTL un S-IH-DTL. Savukārt radioizotopu ražošanai ar enerģiju virs 5 MeV/u tika salīdzināti DTL un IH-DTL. Visi salīdzinājumi tika veikti, pamatojoties uz kūļa veiktspēju, jaudas efektivitāti un kopējo lineārā paātrinātāja garumu. Papildus zema ātruma jonu paātrināšanai tika veikts pilno izmaksu salīdzinājums starp DTL un QA-DTL. Kā vispiemērotākais lineārā paātrinātāja risinājums nākotnes oglekļa un hēlija vēža terapijas iekārtām, kā arī plaša radioizotopu klāsta ražošanai, tika identificēta QA-DTL un divu DTL struktūru kombinācija.

5. Visbeidzot, piektais uzdevums bija **integrēt izstrādātās lineārā paātrinātāja struktūras** jonu terapijas iekārtās. Tas tika paveikts, integrējot optimizēto lineārā paātrinātāja risinājumu (QA-DTL un divu DTL struktūru kombināciju) vispārējā dizainā gan HITRIplus oglekļa lineārajam paātrinātājam, gan NIMMS hēlija lineārajam paātrinātājam. Galu galā, ņemot vērā demonstrēto veiktspēju, šī konfigurācija tika izvēlēta kā injektors nākotnes centrā, ko izstrādā "*Advanced Particle Therapy Center for the Baltic States*" iniciatīva [12].

Hipotēze tika apstiprināta, demonstrējot izmaksu ziņā efektīvu un elastīgu risinājumu jonu paātrināšanai, izmantojot lineāro paātrinātāju. Turklāt šī darba rezultāti parādīja, ka QA-DTL nodrošina labāku kūļa veiktspēju salīdzinājumā ar IH-DTL, pateicoties tā uzlabotajai fokusēšanas režģa struktūrai (šķērsvirzienā fokusējošo kvadrupolu izvietojums, kas atkārtojas lineārā paātrinātāja struktūrā) un stabilajai sinhronajai fāzei (fāze, kurā sinhronā daļiņa ir saskaņota ar paātrinošo EM lauku).

6.1 Aizstāvamās tēzes

1. Zema ātruma oglekļa un hēlija jonu paātrināšanai kā injektoram vēža terapijas sinhrotronā, izstrādātajai lineārā paātrinātāja struktūrai (QA-DTL) ir par 61 % zemākas kopējās izmaksas (paātrinātāja struktūras izmaksas un RF sistēmas izmaksas) salīdzinājumā ar DTL.

2. Izstrādātā lineārā paātrinātāja struktūra spēj paātrināt oglekļa jonus no 0,7 MeV/u, savukārt DTL spēj paātrināt jonus no 1 MeV/u pie zemākas kūļa strāvas, tādējādi vienkāršojot iepriekšējo priekšpaātrināšanas posmu.

3. Kūlis izstrādātajā lineārā paātrinātāja struktūrā ir ar garenvirziena kustību nekā IH-DTL struktūra, kas pašlaik tiek izmantota jonu terapijā, kā rezultātā tiek uzlaboti izejas kūļa parametri bez kūļa zudumiem. Konkrēti oglekļa jonu paātrināšanā, salīdzinot QA-DTL un IH-DTL, novērojams zemāks garenvirziena emitances pieaugums QA-DTL gadījumā (2,02 % pret 25,7 %), savukārt hēlija jonu paātrināšanā QA-DTL arī demonstrēja ievērojami zemāku emisijas pieaugumu garenvirziena plaknē (2,5 % pret 20,8 %).

4. Kombinācija QA-DTL un divu DTL struktūru veidā tika noteikta kā labākais lineārā paātrinātāja risinājums integrācijai nākotnes oglekļa un hēlija jonu terapijas iekārtās un

paralēlai izmantošanai radioizotopu ražošanā. Izstrādātā QA-DTL un divu DTL struktūru kombinācija ir īsāka (9,74 m pret 11,55 m), ar praktiski vienādām jaudas prasībām (1077 kW pret 1050 kW) salīdzinājumā ar IH-DTL risinājumu.

6.2 Turpmākie pētniecības virzieni

Detalizētie pētījumi, kas prezentēti šajā darbā, sniedz būtiskus datus un pamatu pilna mēroga īsā QA-DTL prototipa ražošanai, kas būtu izvirzāms kā nākotnes pētījumu fokuss. Šim prototipam nevajadzētu būt paredzētam daļiņu paātrināšanai, lai saglabātu zemas izmaksas, bet gan lai veiktu RF mērījumus un nodrošinātu iespēju izpētīt aspektus, kas šajā darbā netika aptvertas, piemēram, EM lauka stabilizatoru izpēti, kā arī EM lauka pielāgotāju izstrādi. Gan stabilizatori, gan EM lauka pielāgotāji ir būtiski lineārā paātrinātāja struktūru pareizai darbībai, un tiem nākotnes pētījumos jāpievērš īpaša uzmanība.

Garas DTL un QA-DTL struktūras prasa stingras mehāniskās tolerances, lai uzturētu pastāvīgu paātrināšanas lauku to garumā. Standarta metode, kā mazināt šo jutīgumu un samazināt apstrādes prasības, ietver EM lauka stabilizatoru izmantošanu – īsi metāla stabi, kas izvirzīti no tvertnes uz dreifa caurules pusi un telpiski mainās no vienas puses uz otru. Šī stabilizācijas metode uzlabo EM lauka vienmērīgumu, savienojot galveno paātrināšanas režīmu ar EM lauka stabilizatoru režīmu ķēdi. Šī pieeja ir ņemama vērā QA-DTL gadījumā.

Svarīgi pieminēt, ka attiecība starp dobuma rādiusu un dreifa caurules rādiusu izstrādātajā lineārā paātrinātāja struktūrā ir 5,9, kas ir ļoti tuvu vērtībai 5,8, kā *Linac*4, kas darbojas *CERN* [4]. Tā kā *Linac4* EM lauka stabilizācija bija relatīvi vienkārša [49], līdzīga stabilizācija tiek sagaidīta arī izstrādātājai QA-DTL struktūrai. Tomēr tas ir jāapstiprina, veicot testus pilna mēroga prototipā izstrādātajai struktūrai. Ja prototipa mērījumi norādīs uz stabilizācijas problēmām, paredzēta $3/4\lambda$ stabilizācijas sistēmas izmantošana, kā aprakstīts [50].

Arī lineārā paātrinātāja struktūras injektors prasa turpmāku izpēti. Precīzāk, jonu avots un radiofrekvences kvadrupols (RFQ), kas ir atbildīgi par iepriekšēju paātrināšanu un kūļa sadalīšanu paketēs pirms lineārā paātrinātāja struktūras, jāizstrādā un jāintegrē ar piedāvāto lineārā paātrinātāja konfigurāciju. Īpaša uzmanība jāpievērš jonu avotam, jo efektīvai radioizotopu ražošanai ar izstrādāto QA-DTL lineāro paātrinātāju ir nepieciešams augstas strāvas hēlija kūlis.

LITERATŪRAS AVOTI

[1] S. Hanna, *RF Linear Accelerators for Medical and Industrial Applications*, 1st. Norwood, MA, USA: Artech House, 2012, p. 210, ISBN: 9781608070909.

[2] U. Amaldi, M. Dosanjh, J. Balosso, J. Overgaard, and B. Sørensen, "A facility for tumour therapy and biomedical research in south-eastern Europe," *CERN Yellow Reports: Monographs*, no. CERN-2019-002, 2019. DOI: 10.23731/CYRM-2019-002

[3] M. Benedikt, J. Gutleber, U. Dorda, A. Fabich, M. Palm, and W. Pirkl, "Overview of the MedAustron design and technology choices," CERN, Geneva, Switzerland, Tech. Rep. CERN-ATS-2010-116, 2010.

[4] U. Scheeler et al., "Recommissioning of the Marburg ion-beam therapy centre (MIT) accelerator facility," in *Proc. 7th International Particle Accelerator Conference (IPAC'16)*, JACoW Publishing, 2016, pp. 1908–1910. DOI: 10.18429/JACoW-IPAC2016-TUPOY004

[5] B. Schlitt et al., "Commissioning and operation of the injector Linacs for HIT and CNAO," in *Proc. 24th International Linear Accelerator Conference (LINAC'08)*, JACoW Publishing, 2008, pp. 720–724.

[6] M. Vretenar et al., *Linac4 Design Report* (CERN Yellow Reports: Monographs). Geneva: CERN, Sep. 2020, vol. 6/2020. DOI: 10.23731/CYRM-2020-006

[7] M. Okamura et al., "A new medium energy beam transport line for the proton injector of AGS-RHIC," in *Proc. 25th International Linear Accelerator Conference (LINAC'10)*, Tsukuba, Japan: JACoW Publishing, 2010, pp. 458–460.

[8] R. Garoby et al., "The European spallation source design," *Physica Scripta*, vol. 93, no. 1, p. 014 001, 2017. DOI: 10.1088/1402-4896/aa9bff

[9] HITRIplus Consortium, *Heavy ion therapy research integration plus (HITRIplus), grant agreement ID 101008548*, European Commission, CORDIS project page, 2023. [Online]. Available: https://cordis.europa.eu/project/id/101008548

[10] M. Rabiei, M. Asadi, and H. Yousefnia, "Astatine-211 radiopharmaceuticals: Status, trends, and the future," *Current Radiopharmaceuticals*, vol. 17, no. 1, pp. 7–13, 2024. DOI: 10.2174/0118744710262325231025075638

[11] CERN – Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, *Next ion medical machine study (NIMMS)*, Project website, CERN, 2025. [Online]. Available: https://nimms.web.cern.ch

[12] K. Paļskis et al., "Particle therapy — future for the Baltic states? synthesis of the expert workshop report," *Health and Technology*, vol. 14, no. 5, pp. 965–972, 2024. DOI: 10.1007/s12553-024-00875-2

[13] International Atomic Energy Agency, *Cyclotron Produced Radionuclides: Physical Characteristics and Production Methods* (Technical Reports Series 468). Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency, 2009, ISBN: 978-92-0-106908-5.

[14] J. C. Clark and D. J. Silvester, "A cyclotron method for the production of fluorine-18," *The International Journal of Applied Radiation and Isotopes*, vol. 17, no. 3, pp. 151–154, 1966. DOI: 10.1016/0020-708X(66)90034-4

[15] V. Casella, T. Ido, A. P. Wolf, J. S. Fowler, R. R. MacGregor, and T. J. Ruth, "Anhydrous F-18 labeled elemental fluorine for radiopharmaceutical preparation," *Journal of Nuclear Medicine*, vol. 21, no. 8, pp. 750–757, 1980.

[16] A. Hermanne, F. Tárkányi, S. Takács, S. F. Kovalev, and A. Ignatyuk, "Activation cross sections of the ^{64}Ni(d,2n) reaction for the production of the medical radionuclide ^{64}Cu," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol. 258, no. 2, pp. 308–312, 2007. DOI: 10.1016/j.nimb.2007.02.071

[17] Y. Skakun and S. M. Qaim, "Excitation function of the ^{64}Ni(α,p)^{67}Cu reaction for production of ^{67}Cu," *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 60, no. 1, pp. 33–39, 2004. DOI: 10.1016/j.apradiso.2003.09.003

[18] I. Kambali and F. A. Wibowo, "Comparison of Gallium-68 production yields from (p,2n), (α,2n) and (p,n) nuclear reactions applicable for cancer diagnosis," in *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1198, IOP Publishing, 2019, pp. 1–10. DOI: 10.1088/1742-6596/1198/2/022003

[19] A. M. La Gamma and S. J. Nassiff, "Excitation functions for deuteron-induced reactions on ^{89}Y," *Radiochimica Acta*, vol. 19, no. 4, pp. 161–162, 1973. DOI: 10.1524/ract.1973.19.4.161

[20] S. Manenti et al., "Excitation function and yield for the ^{103}Rh(d,2n)^{103}Pd nuclear reaction: Optimization of the production of Palladium-103," *Nuclear Medicine and Biology*, vol. 49, pp. 30–37, 2017. DOI: 10.1016/j.nucmedbio.2017.02.005

[21] A. Nikjou and M. Sadeghi, "Overview and evaluation of different nuclear level density models for the ^{123}I radionuclide production," *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 136, pp. 45–58, 2018. DOI: 10.1016/j.apradiso.2018.02.003

[22] S. Takács et al., "Excitation function of ^{122}Te(d,n)^{123}I nuclear reaction: Production of ^{123}I at a low energy cyclotron," *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 50, no. 3, pp. 535–540, 1999. DOI: 10.1016/S0969-8043(98)00059-1

[23] I. Kambali, "Production of Lu-177 radionuclide using deuteron beams: Comparison between (d,n) and (d,p) nuclear reactions," in *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1120, IOP Publishing, 2018, pp. 1–7. DOI: 10.1088/1742-6596/1120/1/012011

[24] S. Lahiri and M. Maiti, "Recent developments in nuclear data measurements and chemical separation methods in accelerator production of astatine and technetium radionuclides," *Radiochimica Acta*, vol. 100, no. 8–9, pp. 535–541, 2012. DOI: 10.1524/ract.2011.1888

[25] M. R. Zalutsky and M. Pruszynski, "Astatine-211: Production and availability," *Current Radiopharmaceuticals*, vol. 4, no. 3, pp. 177–185, 2011. DOI: 10.2174/1874471011104030177

[26] G. Moffitt, *Medical radioisotope production platform*, Presentation, Nusano, 2023. [Online]. Available: https://nusano.com/wp-content/uploads/2023/05/Nusano_At211_COSTMeeting_webpub.pdf

[27] N. B. Smith and A. Webb, *Introduction to Medical Imaging: Physics, Engineering and Clinical Applications*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2010, ISBN: 978-0-521-19065-7.

[28] M. A. Flower, *Webb's Physics of Medical Imaging*, 2nd. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2012, ISBN: 978-0-7503-0573-0.

[29] F. F. Knapp and A. Dash, *Radiopharmaceuticals for Therapy*. New Delhi, India: Springer, 2016, ISBN: 978-81-322-2606-2. DOI: 10.1007/978-81-322-2607-9

[30] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 4th. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2012, ISBN: 978-0-470-63155-3.

[31] C. A. Balanis, *Balanis' Advanced Engineering Electromagnetics*, 3rd. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2024, ISBN: 978-1-394-18095-2.

[32] T. P. Wangler, *RF Linear Accelerators*, 2nd. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2008, ISBN: 978-3-527-40680-7. DOI: 10.1002/9783527623426

[33] M. Vretenar, "Low-beta structures," in *CAS — CERN Accelerator School: RF for Accelerators*, Geneva, Switzerland: CERN, 2011, pp. 319–340. DOI: 10.5170/CERN-2011-007.319

[34] M. R. Khalvati, V. Bencini, and S. Ramberger, "Quasi-Alvarez drift-tube Linac structures for heavy ion therapy accelerator facilities," *Physical Review Accelerators and Beams*, vol. 26, no. 2, p. 022 001, 2023. DOI: 10.1103/PhysRevAccelBeams.26.022001

[35] J. M. Garland, J.-B. Lallement, and A. Lombardi, "LINAC5 – a Quasi-Alvarez Linac for BioLEIR," in *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 874, IOP Publishing, 2017, p. 012 057. DOI: 10.1088/1742-6596/874/1/012057

[36] R. Tiede, U. Ratzinger, H. Podlech, C. Zhang, and G. Clemente, "KONUS beam dynamics designs using H-mode cavities," in *Proc. 42nd ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on High-Intensity, High-Brightness Hadron Beams (HB'08)*, JACoW Publishing, 2008, pp. 223–230.

[37] Los Alamos National Laboratory, *Los alamos national laboratory (LANL)*, Laboratory website, 2025. [Online]. Available: https://www.lanl.gov

[38] M. T. Menzel and H. K. Stokes, *User's guide for the POISSON/SUPERFISH group of codes*, English, Report LA-UR-87-115, Los Alamos National Laboratory (LANL), Los Alamos, NM, USA, Jan. 1987, 207 pp.

[39] Dassault Systèmes Simulia Corp., *CST Studio Suite: 3d EM simulation and analysis software*, Computer software, Dassault Systèmes, Vélizy-Villacoublay, France, 2025.

[40] D. Uriot and N. Pichoff, *TraceWin: Beam dynamics simulation code for linear accelerators*, Computer software, Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), Saclay, France, 2025.

[41] J. H. Billen, *SFCODES2: Auxiliary codes for the POISSON/SUPERFISH group of programs*, English, Version 7.17, Los Alamos National Laboratory (LANL), Los Alamos, NM, USA, Jan. 2006, 64 pp.

[42] M. M. Alauddin, "Positron emission tomography (PET) imaging with ^{18}F-based radiotracers," *American Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, vol. 2, no. 1, pp. 55–76, 2011.

[43] U. Ratzinger, B. Koubek, H. Höltermann, H. Podlech, and M. Vretenar, "Linac design within HITRIplus for particle therapy," *JACoW LINAC*, vol. 2022, pp. 134–137, 2022. DOI: 10.18429/JACoW-LINAC2022-MOPOGE01

[44] J. C. Whitaker, *The RF Transmission Systems Handbook*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2002, ISBN: 978-0-8493-0973-1.

[45] U. Ratzinger, "H-type Linac structures," in *CAS — CERN Accelerator School: Radio Frequency Engineering*, Geneva, Switzerland: CERN, 2005, pp. 351–378. DOI: 10.5170/CERN-2005-003.351

[46] T. Bigourdan, A. Cadiou, A. Guertin, and F. Haddad, "Discussions on liquid bismuth target use as an alternative for astatine-211 production," in *EPJ Web of Conferences*, vol. 285, EDP Sciences, 2023, p. 09 002. DOI: 10.1051/epjconf/202328509002

[47] A. Hermanne, F. Tárkányi, S. Takács, Z. Szücs, Y. N. Shubin, and A. I. Dityuk, "Experimental study of the cross-sections of α-particle induced reactions on ^{209}Bi," *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 63, no. 1, pp. 1–9, 2005. DOI: 10.1016/j.apradiso.2005.01.015

[48] M. Maiti, S. Lahiri, D. Kumar, and D. Choudhury, "Separation of no-carrier-added astatine radionuclides from α-particle irradiated lead bismuth eutectic target: A classical method," *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 127, pp. 227–230, 2017. DOI: 10.1016/j.apradiso.2017.06.020

[49] M. R. Khalvati and S. Ramberger, "Tuning and field stabilization of the CERN Linac4 drift tube Linac," CERN, Geneva, Switzerland, Tech. Rep. CERN-ACC-2014-0167, 2014.

[50] M. Vretenar and D. J. Warner, "Field stabilization in the Quasi-Alvarez structure," in *Proc. 15th Linear Accelerator Conference (LINAC'90)*, Albuquerque, NM, USA: JACoW Publishing, 1990, pp. 96–98.



Lazar Nikitović dzimis 1994. gadā Četinjē, Melnkalnē. Viņš ir ieguvis bakalaura grādu (2016), speciālista grādu (2017) un maģistra grādu (2020) elektrotehnikā Melnkalnes Universitātē. No 2022. gada sākuma līdz 2024. gada beigām viņš bija uzņemts doktorantūras studentu programmā CERN, kur viņa darbības sfēra bija lineāro paātrinātāju izstrāde medicīniskām vajadzībām. No 2025. līdz 2026. gadam viņš bija pētnieks Rīgas Tehniskās universitātes Dabaszinātņu un tehnoloģiju fakultātes Daļiņu fizikas un paātrinātājtehnoloģiju institūtā. Viņa pētniecības intereses ir radiofrekvenču inženierija un paātrinātājtehnoloģijas.