

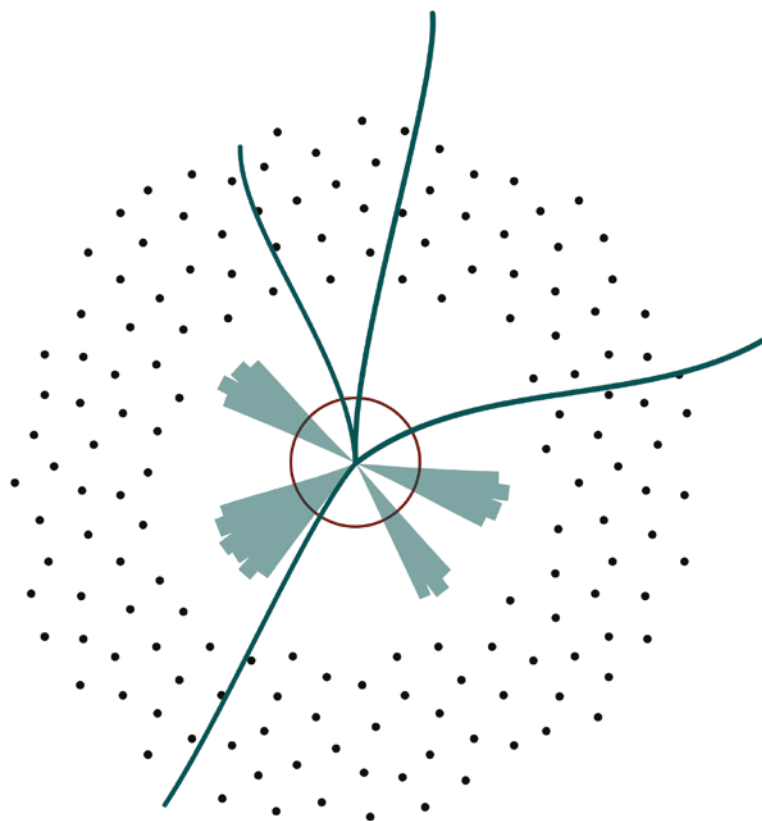


RĪGAS TEHNISKĀ
UNIVERSITĀTE

Antra Gaile

HIGSA BOZONU PĀRU RAŠANĀS MĒRĪJUMS $WWZZ$ SABRUKUMA KANĀLĀ UN MTD KONTROLES UN DROŠĪBAS SISTĒMU IZSTRĀDE CMS EKSPERIMENTĀ

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Dabaszinātņu un tehnoloģiju fakultāte
Daļiņu fizikas un paātrinātāju tehnoloģiju institūts

ANTRA GAILE

Rīgas Tehniskās universitātes un Latvijas Universitātes studiju programmas
“Daļiņu fizika un paātrinātāju tehnoloģijas” doktorante

HIGSA BOZONU PĀRU RAŠANĀS MĒRĪJUMS $WWZZ$ SABRUKUMA KANĀLĀ UN MTD KONTROLES UN DROŠĪBAS SISTĒMU IZSTRĀDE CMS EKSPERIMENTĀ

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji
asociētais profesors *Dr. phys.*
TONI ŠČULAC
Dr. phys.
FRANK GLEGE
asociētais profesors *Dr. phys.*
KĀRLIS DREIMANIS

RTU Izdevniecība
Rīga 2026

Gaile, A. Higa bozonu pāru rašanās mērījums $WWZZ$ sabrukuma kanālā un MTD kontroles un drošības sistēmu izstrāde CMS eksperimentā. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2026. – 51 lpp. Publicēts saskaņā ar RTU DFPTI promocijas padomes “RTU P-03” 2026. gada 26. janvāra lēmumu, protokols Nr. HEP/1/2026.

Atbalstu pētniecībai un zinātniskajai mobilitātei sniedza:

- valsts pētījumu programmas (VPP) projekts “Augstas enerģijas fizika un paātrinātāju tehnoloģijas” VPP-IZM-CERN-2020/1-0002; VPP-IZM-CERN-2022/1-0001;
- *COST* akcija CA22130 – Visaptveroša multibozonu eksperimenta-teorijas akcija (*COMETA*, no angļu valodas *COmprehensive Multiboson Experiment-Theory Action*).



Vāka attēla autore Antra Gaile.

<https://doi.org/10.7250/9789934373015>

ISBN 978-9934-37-301-5 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora grāda (*Ph. D.*) iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2026. gada 19. jūnijā plkst. 15.00 Rīgas Tehniskās universitātes Fizikas un astronomijas promocijas padomes “RTU P-03” atklātajā sēdē Rīgā, Paula Valdena ielā 3/7, 271. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Dr. phys. Giulia Di Gregorio,
IJCLab, Orseja, Francija

Asociētā profesore *Dr. phys. Ilaria Brivio,*
Boloņas Universitāte, Boloņa, Itālija

Dr. phys. Rhiannon Susan Smith-Jones,
Šefildas Universitāte, Šefilda, Lielbritānija

APSTIPRINĀJUMS

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

Antra Gaile(paraksts)

Datums

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, tajā ir astoņas nodaļas, ieskaitot ievadu un secinājumus, literatūras saraksts, 74 attēli, 20 tabulas, kopā 169 lappuses. Literatūras sarakstā ir 157 nosaukumi.

ANOTĀCIJA

Higsa bozona sektora turpmāka izpēte ir nozīmīga augstas enerģijas fizikas kopienai, un tā ir noteikta kā viens no galvenajiem Lielā hadronu paātrinātāja fizikas programmas mērķiem. Pirms vairāk nekā 10 gadiem tika pierādīta Higsa bozona pastāvēšana, un aptuveni 10 gadu laikā varētu paziņot par Higsa bozonu pāru (HH) eksistenci. HH meklējumi ne tikai pārbauda vienu no pēdējiem neapstiprinātajiem elementārdaļiņu standartmodeļa (SM) parametriem, bet arī sniedz ieskatu mehānismos, kas norisinājušies agrīnajā Visumā. Šajā darbā ir izklāstīta pasaulē pirmās $HH \rightarrow WW^*ZZ^* \rightarrow 4l$ analīzes izstrāde un īstenošana. Tika analizēts 200 fb^{-1} liels datu kopums, kas ievākts ar Kompaktā mionu solenoīda (CMS) detektoru piecu gadu laikā. Šie rezultāti ļāva noteikt novēroto (paredzamo) 95 % ticamības pakāpes augšējo robežu, kas ir 142,3 (176,8) reizes lielāka par SM vērtību HH rašanās šķērsgrizumam. Apkopoti pierādījumi, kā mērķēta $HH \rightarrow WW^*ZZ^*$ kanāla analīzes iekļaušana uzlabotu kombinēto jutību HH novērošanai turpmākajos pētījumos. Papildus tam ir aprakstīts darbs pie detektora kontroles jeb vadības sistēmas izveides vienam no jaunajiem CMS eksperimenta apakšdetektoriem, MTD (minimāli jonizējošo daļiņu laika noteikšanas detektors), kas tiek izgatavots nākamajai eksperimenta fāzei. MTD mērķis ir nodrošināt precīzu laika informāciju par lādētajām daļiņām, kas to šķērso, tādējādi garantējot CMS detektora nevainojamu darbību. Šajā darbā prezentētās metodes un tehniskie risinājumi veicina vienu no CMS galvenajiem mērķiem – nodrošināt, ka CMS eksperiments arī turpmākajos gados ir viens no vadošajiem Higsa bozona fizikas precizitātes mērījumu veicējiem.

Saturs

Darbā lietotie saīsinājumi	6
Darbā lietotie termini latviešu un angļu valodā	7
1. Ievads	8
1.1. Promocijas darba mērķis	9
1.2. Promocijas darba uzdevumi	9
1.3. Promocijas darba aizstājamās tēzes	10
1.4. Zinātniskā novitāte	10
1.5. Praktiskā nozīme	10
1.6. Darba aprobācija <i>Scopus</i> un <i>Web of Science</i> indeksētos rakstos	11
1.7. Dalība starptautiskās konferencēs	12
1.8. Mākslīgā intelekta rīku izmantojums promocijas darbā	12
2. Motivācija Higgsa bozonu pāru rašanās pētījumiem	13
2.1. Higgsa bozonu pāru rašanās mehānismi	14
2.2. Higgsa bozonu pāru sabrukšanas kanāli un to pašreizējie eksperimentālie pētījumi	15
3. Eksperimentālā vide	17
3.1. Lielais hadronu paātrinātājs	17
3.2. <i>CMS</i> eksperiments	18
4. Fizikas objektu rekonstrukcija un identifikācija	21
4.1. Notikumu simulācija ar Montekarlo ģeneratoriem	22
5. Detektora kontroles sistēmas izveide <i>MTD</i> testu stendam	24
5.1. <i>MTD</i> testu stends un tā <i>DCS</i>	24
5.2. Projekta attīstība	26
6. Higgsa bozonu pāru rašanās analīze, izmantojot <i>WWZZ</i> sabrukšanas kanālu	28
6.1. Motivācija izmantot <i>WWZZ</i> sabrukuma kanālu	28
6.2. Izmantotās datu kopas	29
6.3. Montekarlo simulācijas un to mērogošana	29
6.4. Signāla reģiona izveide	31
6.5. Citu <i>HH</i> sabrukšanas ceļu iekļaušana	36
6.6. Eksperimentālo datu un simulāciju sakritība	37
6.7. Nenoteiktību novērtēšana	37
6.8. Robežas mērījums	38
7. Rezultāti un perspektīva	39
7.1. Projekcija <i>HL-LHC</i> ērai un kombinācijas ar citiem kanāliem	42
8. Secinājumi un turpmākie pētījuma virzieni	44
8.1. Turpmākie pētījuma virzieni saistībā ar vadības sistēmu	45
8.2. Turpmākie pētījuma virzieni <i>HH</i> analīzei	45
Pateicības	46

Darbā lietotie saīsinājumi

<i>ATLAS</i> – toroidāla Lielā hadronu paātrinātāja iekārta	8, 13, 15, 16, 18, 44
<i>BDT</i> – uzlabotais lēmumu pieņemšanas algoritms	31, 34–37, 39, 45
<i>BR</i> – sazarojuma attiecība	15, 28, 31, 41
<i>BTL</i> – cilindriskais laika mērīšanas slānis	20, 24–27
<i>CERN</i> – Eiropas kodolpētniecības centrs	17, 24, 26, 44
<i>CL</i> – ticamības pakāpe	15, 16, 38, 40, 41, 43, 44
<i>CMS</i> – Kompaktais mionu solenoīds	8–11, 13, 15–21, 23, 25, 26, 28, 29, 31, 34, 38–40, 43, 44
<i>CR</i> – kontroles reģions	37–40, 42, 43
<i>DCS</i> – detektora kontroles jeb vadības sistēma	9–11, 19, 20, 24–27, 44, 45
<i>DSS</i> – detektora drošības sistēma	9, 19, 20, 27, 44
<i>ECAL</i> – elektromagnētiskais kalorimetrs	18, 22, 32
<i>EW</i> – elektrovājš	8, 13
<i>FSM</i> – galīgais automāts	27
<i>HCAL</i> – hadroniskais kalorimetrs	18, 22, 32
<i>HH</i> – Higa bozonu pāris	8–10, 13–16, 28, 34–36, 38–45
<i>HL-LHC</i> – augsta mirdzuma Lielais hadronu paātrinātājs	8–10, 17, 20, 42–45
<i>ID</i> – identifikators	22, 32, 33, 38, 45
<i>IP</i> – sadursmes parametrs	32, 33
<i>LHC</i> – Lielais hadronu paātrinātājs	8, 9, 17, 18, 24, 44
<i>LO</i> – vadošā kārtā	22, 29
<i>MC</i> – Montekarlo	22, 23, 29, 30, 35–37, 41
<i>MET</i> – trūkstošā šķērsenerģija	21, 22, 33
<i>MTD</i> – minimāli jonizējošo daļiņu laika noteikšanas detektors	8–11, 20, 24–26, 44, 45
<i>MTRS</i> – masīva temperatūras sensoru izlases sistēma	25
<i>NLO</i> – nākamā kārtā	22, 29
<i>PDF</i> – partonu sadalījuma funkcija	14, 23, 31
<i>PF</i> – daļiņu plūsma	21, 23, 32
<i>PLC</i> – programējams loģiskais kontrolieris	25
<i>POG</i> – fizikas objektu grupa	33
<i>PU</i> – sagrūdums	17, 20, 23, 31–33, 38
<i>SR</i> – signāla reģions	31, 34–43
<i>TIF</i> – trekera integrācijas laboratorija	24, 25
<i>WP</i> – darba punkts	31–33
<i>ggF</i> – gluonu-gluonu saplūšana	14
<i>pp</i> – protonu-protonu	9, 17, 44
<i>SM</i> – elementārdaļiņu standartmodelis	8, 10, 13–15, 44

Darbā lietotie termini latviešu un angļu valodā

aromāts – <i>flavour</i>	33
atlasēs sistēma – <i>trigger</i>	19, 21, 23, 31, 33
augsta līmeņa atlasēs sistēma – <i>High level trigger</i>	31
bremzējošais starojums – <i>bremsstrahlung</i>	22, 23
cilindriskais reģions – <i>barrel region</i>	18, 20
cilpa – <i>loop</i>	14, 22
datu ievākšanas cikls / darbības periods – <i>Run</i>	17, 29, 45
dublēšana – <i>redundancy</i>	25
gala sienu reģions – <i>endcap region</i>	18, 20
kalibrējošs – <i>gauge</i>	13, 14
kūlis – <i>beam</i>	17, 23, 32
laukums zem līknes – <i>area under curve</i>	35
margināls parametrs – <i>nuisance parameter</i>	38, 41, 42
marķēšana – <i>tagging</i>	22, 32, 38, 45
matemātiskā cerība – <i>expectation value</i>	14
mirdzums – <i>luminosity</i>	17, 29, 39, 40, 42–45
mērogošanas koeficients – <i>scale factor</i>	31
novērtētājs – <i>estimator</i>	38
otrā fāze – <i>Phase-II</i>	8, 17, 20
paātrināts – <i>boosted</i>	33
pašmijiedarbība – <i>self-coupling</i>	8–10, 13, 14, 44
pirmsatlasēs – <i>pre-fire</i>	31
pirmā līmeņa atlasēs sistēma – <i>Level-1 trigger</i>	20, 31
profila varbūtības attiecība – <i>profile likelihood ratio</i>	38
pseudostraujums – <i>pseudorapidity</i>	19, 32
regulējums – <i>tune</i>	31
skaldīšana – <i>showering</i>	23
strūkļa – <i>jet</i>	21, 22, 28, 31–34, 37, 38, 45
sākotnējā un galīgā stāvokļa radiācija – <i>initial and final state radiation</i>	23
trekeris – <i>tracker</i>	18, 20, 22
uztvērēja darbības raksturliktne – <i>receiver operating characteristic</i>	35
vilkme – <i>pull</i>	38, 41
virsošne – <i>vertex</i>	18, 22
ārpus ierastās masas zonas – <i>off-shell</i>	9, 33

1. IEVADS

Elementārdaļiņu fizika pēta fundamentālās daļiņas un to mijiedarbības. Tā tiecas izprast, no kā sastāv Visums, un mēģina atbildēt uz neatbildētajiem dabas jautājumiem. Pašlaik elementārdaļiņu standartmodelis (**SM**, angļu valodā *Standard Model of particle physics*) ir vispilnīgākā teorija, kas apraksta elementārdaļiņas un to mijiedarbības. **SM** ir gadu desmitiem ilgi plaši pārbaudīts dažādos eksperimentos visā pasaulē, un teorija un eksperimenti līdz šim sakrituši līdz ļoti augstai precizitātei.

Higsa bozona atklāšana 2012. gadā, par ko paziņoja *ATLAS* (**ATLAS**, angļu valodā *A Toroidal LHC ApparatuS*) un *CMS* (**CMS**, angļu valodā *Compact Muon Solenoid*) sadarbības [1], [2], izmantojot datus no diviem Lielā hadronu paātrinātāja (*LHC*, angļu valodā *Large Hadron Collider*) eksperimentiem, noslēdza **SM** paredzēto elementārdaļiņu kopu. Turklāt šis atklājums apstiprināja lauka eksistenci, kas pieļauj elektrovājās (**EW**, angļu valodā *electroweak*) simetrijas laušanu, tādējādi ļaujot vājās mijiedarbības bozoniem iegūt masu. Kopš atklāšanas ir veikti daudzi Higsa bozona īpašību pētījumi, tostarp pētīt tā mijiedarbību ar citām daļiņām un sevi. Šie pētījumi ļauj pētīt Higsa potenciāla fundamentālo struktūru un atklāt iespējamās novirzes no **SM**.

Viena Higsa bozona rašanās procesi ir daudz mērīti un salīdzinoši labi izprasti, turklāt tie sakrīt ar **SM** prognozēm. Savukārt Higsa bozonu pāru (**HH**, angļu valodā *Higgs boson pair*) rašanās, ņemot vērā tās retumu, joprojām atrodas izpētes fāzē. **HH** rašanās pētījumi ir atslēga Higsa pašmijiedarbības (angļu valodā *self-coupling*) izpratnei, kas savukārt apraksta Higsa potenciāla formu, vakuuma stabilitāti un to, vai Higsa lauks pats par sevi var izskaidrot **EW** simetrijas sabrukumu vai ir nepieciešami papildu lauki. Tā kā Higsa pašmijiedarbības stiprums ir fiksēts ar **SM** konstantēm, jebkādas novirzes novērojums nozīmētu jaunas fizikas esamību.

HH rašanās mērīšana ir tikpat izaicinoša, cik aizraujoša. Tās rašanās šķērssgriezums *LHC* enerģijās ir aptuveni trīs kārtas mazāks nekā viena Higsa rašanās šķērssgriezums. Tādējādi, lai atpazītu un atlasītu iespējamās **HH** rašanās notikumus no pārbagātajiem fona procesu notikumiem, ir nepieciešamas uzlabotas notikumu atpazīšanas, fizikas objektu rekonstrukcijas, notikumu atlases un kategorizācijas metodikas, kas izmanto visas *CMS* detektora iespējas. Turklāt, gatavojoties nākotnes datu ieguves periodiem, ir jāizstrādā stabils un uzticamas analīzes metodes.

Tuvākajos gados *LHC* tiks veikta būtiska modernizācija, lai palielinātu daļiņu sadursmju skaitu, tādējādi iesākot tā **Otro fāzi** (angļu valodā *Phase-II*), augsta mirdzuma *LHC* (**HL-LHC**, angļu valodā *High-Luminosity LHC*) [3]. Sadursmju skaita palielināšanās ļaus veikt detalizētākus pētījumus par fundamentālajām daļiņām un retām parādībām, piemēram, **HH** rašanos. Lai pilnībā izmantotu **HL-LHC** fizikas potenciālu, *CMS* tiek veikti būtiski uzlabojumi, lai nodrošinātu augstāku datu apstrādes ātrumu. Tiek būvēts pilnīgi jauns apakšdetektors – Minimāli jonizējošo daļiņu laika noteikšanas detektors (**MTD**, angļu valodā *Minimum ionising particle Timing Detector*) [4]. Tas nodrošinās

CMS ar augstas precizitātes laika informāciju, ļaujot atšķetināt daļiņu sadursmju sarežģītos rezultātus.

Šis promocijas darbs ir veltīts *HH* rašanās pētījumam tā $HH \rightarrow WW^*ZZ^* \rightarrow 4l$ sabrukuma kanālā, izmantojot protonu-protonu (*pp*) sadursmes datus, kas ievākti ar *CMS* detektoru. Šis kanāls nekad nav bijis pētīts, tādēļ analīze ir unikāla ne tikai *LHC*, bet visai elementārdaļiņu fizikas kopienai. Šajā sabrukšanas kanālā viens Higgsa bozons sabrūk *W* bozonu pāri, bet otrs *Z* bozonu pāri, kuru sabrukšanas rezultātā tiek iegūti četri leptoni. Abiem vektoru bozonu veidiem viens no pāra ir ārpus ierastās masas zonas (angļu valodā *off-shell*), tādēļ atzīmēts ar zvaigznīti (*). Lai pētītu šo kanālu, promocijas darbā uzmanība ir vērsta uz pilnīgas notikumu atlases un kategorizācijas, fona izvērtēšanas un signāla atpazīšanas metožu attīstīšanu. Promocijas darbs veido pamatu turpmākai $HH \rightarrow WW^*ZZ^*$ analīzei un veicina *CMS* pašreizējos centienus noteikt Higgsa bozona pašmijiedarbību. Papildus minētajai fizikas analīzei, būtiska promocijas darba daļa ir ieguldījums detektora kontroles jeb vadības sistēmā (*DCS*, angļu valodā *detector control system*) un detektora drošības sistēmā (*DSS*, angļu valodā *detector safety system*) vienam no *MTD* testu stendiem. Nevainojama *MTD* darbība *HL-LHC* periodā būs izšķiroša, lai uzlabotu *HH* rašanās mērījumus un ne tikai. Vienkāršības labad visā darbā tiek izmantotas dabiskās mērvienības $\varepsilon_0 = \hbar = c = 1$.

1.1. Promocijas darba mērķis

Promocijas darba mērķis ir pētīt *HH* rašanos *LHC* radītajās *pp* sadursmēs, izmantojot datus, kas ievākti ar *CMS* detektoru piecu gadu laikā. Tas ietver analīzes ietvara izstrādi, datu analīzes veikšanu un augšējās robežas noteikšanu rašanās šķērsgrizumam, izmantojot $HH \rightarrow WW^*ZZ^* \rightarrow 4l$ sabrukšanas kanālu. Turklāt promocijas darba laikā ir izstrādātas vadības un drošības sistēmas *MTD* testu stendam, kam jāklūst par *MTD DCS* prototipu.

1.2. Promocijas darba uzdevumi

1. Apkopot teorētisko motivāciju *HH* rašanās eksperimentālai izpētei, noteikt izpētes novitāti $HH \rightarrow WW^*ZZ^*$ multileptonu sabrukšanas kanālam.
2. Aprakstīt pētījuma eksperimentālo vidi, iekļaujot *LHC* un *CMS* detektora aprakstus, uzsverot dažādo sistēmu un fizikas objektu rekonstrukcijas nozīmīgumu $HH \rightarrow WW^*ZZ^*$ multileptonu izpētei.
3. Plānot, pilnveidot un iestrādāt notikumu atlasī, kategorizēšanu un signāla atpazīšanu $HH \rightarrow WW^*ZZ^* \rightarrow 4l$ analīzei, veikt datu analīzi un noteikt *HH* rašanās šķērsgrizuma augšējo robežu.

4. Apkopot nepieciešamos kritērijus *MTD* testu stenda *DCS* un veikt tās izstrādi.

1.3. Promocijas darba aizstāvamās tēzes

1. *HH* rašanās analīze nodrošina eksperimentālu jutību Higgsa potenciāla struktūrai un ļauj noteikt ierobežojumus pašmijiedarbības parametram pašreizējā eksperimentālajā jutībā.
2. Rezultāti, kas iegūti no $HH \rightarrow WW^*ZZ^* \rightarrow 4l$ kanāla analīzes, ir saderīgi ar *SM* prognozēm pašreizējās statistiskās un sistemātiskās nenoteiktības robežās.
3. Izstrādātais analīzes ietvars ir mērogojams un paplašināms lielāku datu kopu apstrādei, nodrošinot stabilu pamatu turpmākiem *HH* rašanās pētījumiem arī *HL-LHC* periodā.
4. *MTD* testu stenda *DCS* ir izstrādāta, ieviesta un nodota ekspluatācijā. Sistēma atbilst ekspluatācijas prasībām un kalpo kā funkcionāls prototips galīgajai *MTD DCS*.

1.4. Zinātniskā novitāte

1. Šajā promocijas darbā ir detalizēti aprakstīts pirmais *HH* rašanās šķērsriezuma mērījums $HH \rightarrow WW^*ZZ^* \rightarrow 4l$ sabrukšanas kanālā, izmantojot *CMS* datus.
2. Analizēšanas stratēģijas izstrāde, ieviešana un optimizācija $HH \rightarrow WW^*ZZ^* \rightarrow 4l$ kanālam ir ļāvusi sasniegt *HH* rašanās signāla stipruma jutību zem 200.
3. Šis promocijas darbs sniedz ieskatu jaunajā *DCS*, kas izstrādāta *MTD* testu stendam.

1.5. Praktiskā nozīme

1. Šis darbs ir pirmais priekšizpētes un jutīguma pētījums par $HH \rightarrow WW^*ZZ^*$ četrleptonu sabrukšanas kanālu *CMS*. Ir izveidota metodoloģiska sistēma, kas noderīga turpmākajām analīzēm un lietojama iespējamām kanālu kombinācijām.
2. Izstrādātie rīki un metodes notikumu kategorizēšanai, objektu identifikācijai un kalibrēšanai, kā arī fona slāpēšanas, signāla atpazīšanas un sistemātisko nenoteiktību iekļaušanai ir tieši piemērojamas plašākiem multibosonu un multileptonu pētījumiem.

- Šis darbs ietver nepieciešamos soļus, lai izveidotu *DCS*, kas nodrošina drošu un efektīvu detektora darbību fizikas datu ievākšanai. Izstrādātā *DCS* ir bijusi svarīga *MTD* sekmīgai izstrādei, montāžai un nodošanai ekspluatācijā.

1.6. Darba aprobācija *Scopus* un *Web of Science* indeksētos rakstos

Doktorantūras studiju laikā promocijas darba autore ir 262 publikāciju līdzautore, lielākoties kā *CMS* sadarbības dalībniece. No tām 46 ir *CMS* Higgs bozona analīzes grupas veidotās publikācijas, kur šī promocijas darba autore ir aktīva dalībniece. Statistika iegūta 26.01.2026 no <https://inspirehep.net/authors/2643592> (autores *Scopus ID*: 57214117093, *ORCID*: <https://orcid.org/0000-0003-1350-3523>).

No sešiem dokumentiem īpaši jāizceļ divi, kas ir iekšēji *CMS* sadarbībai. Tos izskata un apstiprina eksperti, grupu vadītāji un visa *CMS* sadarbība, jo tie ietver vērtīgu, tehnisku informāciju, kas ir būtiska zināšanu nodošanai un eventuālai iekļaušanai citās *CMS* publikācijās.

- [1] *CMS* iekšējā piezīme (materiāls promocijas darba 4. nodaļai)
A. Gaile, N. Strautnieks, A. Petkovic, A. Sculac, T. Sculac, E. Pajuste, K. Dreimanis. “*Low- p_T electron selection efficiency studies*”. Tehniskais ziņojums, *CERN*, Ženēva, 2022, [CMS AN-21/165](#). Šis darbs rezultējās: *CMS* sadarbība. “*Low- p_T electron Electron ID scale factors from CMS in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using J/ψ events*”. *CMS* detektora veiktspējas kopsavilkums, *CERN*, Ženēva, 2023, [CMS-DP-2023-081](#).
- [2] Brīvpieejas raksts (materiāls promocijas darba 3. nodaļai)
CMS MTD grupa, tajā skaitā **A. Gaile**. “*Optimization of LYSO crystals and SiPM parameters for the CMS MIP timing detector*”, *JINST* 19, 12, P12020, 2024, [DOI:10.1088/1748-0221/19/12/P12020](#).
- [3] *CMS* iekšējā piezīme (materiāls promocijas darba 6. nodaļai)
A. Gaile, A. Sculac, R. Jiang, C. Charlot, T. Sculac, K. Dreimanis. “*Search for non-resonant Higgs boson pair production in WWZZ decay mode with full Run 2 and early Run 3 dataset*”. Tehniskais ziņojums, *CERN*, Ženēva, 2024, [CMS AN-24/245](#).
- [4] *LHCP2025* konferences publikācija (materiāls promocijas darba 2. nodaļai)
A. Gaile. “*Non-resonant HH and Higgs self-coupling measurements by CMS*”. Trīspadsmitā Lielā hadronu paātrinātāja fizikas konference, Taivāna, 2025, [DOI:10.22323/1.499.0105](#).
- [5] Brīvpieejas raksts (materiāls promocijas darba 3. nodaļai)
CMS BTL grupa, tajā skaitā **A. Gaile**. “*The CMS barrel timing layer: test beam*

confirmation of module timing performance”, *Nuclear Instruments and Methods Section A*, 1081, 170823, 2026, DOI:10.1016/j.nima.2025.170823.

1.7. Dalība starptautiskās konferencēs

- [1] A. Gaile. “Non-resonant HH and higgs-self couplings measurements by CMS”. Prezentācija Trīspadsmitajā Lielā hadronu paātrinātāja fizikas konferencē (LHCP2025), 2025. gada maijā,
URL: <https://indico.cern.ch/event/1419878/contributions/6442906/>.
- [2] A. Gaile. “Study of Non-Resonant HH Production in $WWZZ$ Decay Mode at CMS Experiment”. Prezentācija Ceturtajā CERN-Baltijas konferencē, 2024. gada oktobrī, URL: <https://indico.cern.ch/event/1416853/contributions/6178181/>.
- [3] A. Gaile. “Detector control and safety system for MIP Timing Detector”. Stenda referāts Trešajā CERN-Baltijas konferencē, 2023. gada oktobrī,
URL: <https://indico.cern.ch/event/1288731/contributions/5600676/>.
- [4] A. Gaile. “Run 3 electrons, new studies/ recipes - J/ψ studies”. Prezentācija HZZ Darbnīca, 2023. gada jūnijā,
URL: <https://indico.cern.ch/event/1233959/contributions/5310341/>.
- [5] A. Gaile. “Development of the MTD Control and Safety Systems at CMS”. Prezentācija Otrajā CERN-Baltijas konferencē, 2022. gada oktobrī,
URL: <https://indico.cern.ch/event/1147717/contributions/5069252/>.
- [6] A. Gaile, N. Strautnieks, J. Proskurins. “Improving low- p_T electron reconstruction for Higgs physics at CMS”. Prezentācija Pirmajā CERN-Baltijas konferencē, 2021. gada jūnijā, URL:
<https://indico.cern.ch/event/970609/contributions/4415897/>.

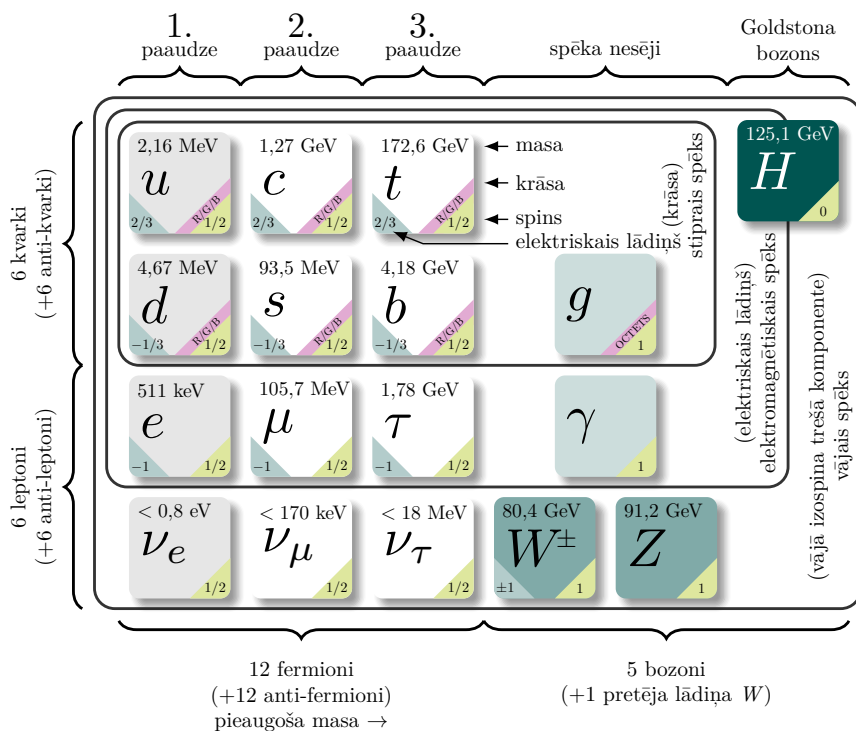
1.8. Mākslīgā intelekta rīku izmantojums promocijas darbā

Promocijas darba kopsavilkuma izgatavošanai izmantots Tildes Birojs 2022 mašintulkošanas rīks. Rīks izmantots no darbvirsma programmatūras, tādēļ pieejams tikai parastais mašintulkošanas modelis bez mākslīgā intelekta vai lielo valodas modeļu piedāvājumiem uzlabojumiem. Kopsavilkums tulkots no angļu uz latviešu valodu, un izmantots kā pirmais tulkošanas slānis visām nodaļām.

2. MOTIVĀCIJA HIGSA BOZONU PĀRU RAŠANĀS PĒTĪJUMIEM

2012. gada 4. jūlijā *ATLAS* un *CMS* sadarbības kopīgi paziņoja par skalāra bozona atklāšanu ar masu aptuveni 125 GeV [1], [2]. Šis bozons, saderīgs ar Brūta-Englerta-Higsa mehānisma prognozēto Higsa bosonu, ir *SM* neatņemama sastāvdaļa, jo tas var izskaidrot *EW* simetrijas laušanu. Pašreiz aktuāls pētījuma virziens ir Higsa bozona pašmijiedarbības mērījumi, kas var padziļināt izpratni par Higsa bozona potenciālu. Vistiešākais eksperimentālais veids, kā to mērīt, ir pētīt eksperimentāli izaicinošo *HH* rašanos.

SM, kas veidots kā kvantu lauku teorija, kuras pamatā ir kalibrējošās (angļu valodā *gauge*) simetrijas, joprojām ir labākais teorētiskais ietvars, lai aprakstītu fundamentālo daļiņu subatomisko pasauli un to mijiedarbību. Tas var precīzi paredzēt tajā esošo daļiņu īpašības, kā arī trīs no četriem fundamentālajiem spēkiem, kā redzams 2.1. attēlā. Šim promocijas darbam svarīgi ir tas, ka *SM* sākas ar vienotu *EW* mijiedarbības definīciju.



2.1. att. *SM* fundamentālās daļiņas, attēls pielāgots no [5], norāda daļiņu masu, krāsu, spinu un lādiņu, kā arī klasificē tās paaudzēs un iespējamajās mijiedarbībās. Attiecīgās antimatērijas daļiņas nav uzrādītas.

Kā detalizēti izklāstīts pilnajā promocijas darba tekstā, *SM* Lagranža vienādojumā nav

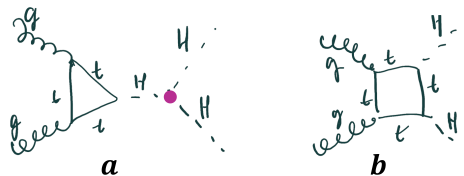
masas locekļu bozoniem, jo tie parkāpj kalibrējošs invariānci. Lai to atrisinātu, vairākas neatkarīgas grupas 1964. gadā ierosināja Brūta-Englerta-Higsa mehānismu [6], [7], [8], [9]. Mehānisms ievieš Higsa lauku, kas ir komplekss, skalārs kvantu lauks, kuram, spontāni iegūstot tā minimālo nenulles vērtību, iespējams atdalīt elektromagnētisko un vājo mijiedarbību, kas savukārt ļauj vājās mijiedarbības kalibrējošajiem bozoniem iegūt masu.

Higsa potenciāla formu nosaka Higsa bozona pašmijiedarbības trilineārās un kvadrilineārās konstantes. Tādējādi mijiedarbības, kas ietver virsotnes ar trim vai četriem Higsa bozoniem, piemēram, HHH vai trīs Higsa bozonu rašanās, sniedz informāciju par potenciāla formu. SM trilineārā Higsa bozona pašmijiedarbība, λ , ko var mērit HHH rašanās notikumos, ir divu konstanšu attiecība – Higsa bozona masas, m_H , un vakuuma matemātiskās cerības (angļu valodā *expectation value*), v , kā uzrādīts vienādojumā (2.1). Jebkura novirze var norādīt uz jaunu fiziku.

$$\lambda_{SM} = \frac{m_H^2}{2v^2} = 0,129 \quad (2.1)$$

2.1. Higsa bozonu pāru rašanās mehānismi

HH dominējošais rašanās mehānisms ir gluonu-gluonu saplūšana (ggF , angļu valodā *gluon-gluon fusion*), un tai ir divi apakšprocesi, kā shematiski parādīts 2.2. attēlā. Vienā no procesiem Higsa bozoni rodas no kvarku cilpas (angļu valodā *loop*) (“kvadrāta” diagramma, sk. 2.2. b attēlu), bet otrā rodas virtuāls Higsa bozons, kas sabrūk divos Higsa bozonos (“trijstūra” diagramma, sk. 2.2. a attēlu).



2.2. att. Feinmana diagrammas galvenajam HH rašanās mehānismam ggF , (a) trijstūra, (b) kvadrāta diagrammas. Higsa pašmijiedarbība, λ , ir atzīmēta ar rozā punktu.

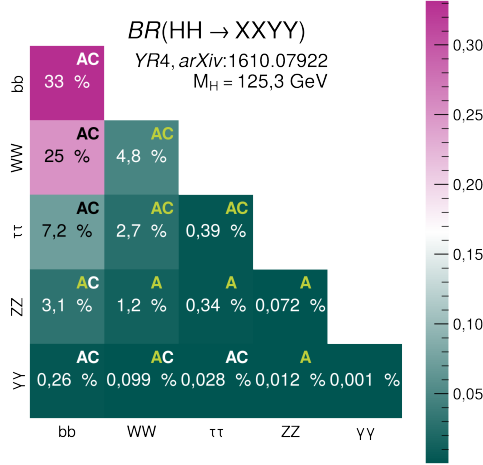
Abas diagrammas mijiedarbojas destruktīvi, novedot pie šķērsgriezuma, kas ir trīs pakāpes zemāks nekā viena Higsa bozona rašanās šķērsgriezums. Pie $\sqrt{s} = 13,6$ TeV tas novērtējams kā:

$$\sigma_{HH}^{ggF} = 34.13_{-23}^{+6} \% (m_t + \text{kal.}) \pm 2.3 \% (\alpha_s + \text{PDF}) \text{ fb.}$$

Šo aprēķinu un tajos iekļauto nenoteiktību (stiprās kalibrācijas konstantes, α_s , partonu sadalījuma funkcijas (PDF , angļu valodā *parton distribution function*), virsotnes kvarka masas, m_t , u. c.) apraksts atrodams atsaucē [10].

2.2. Hīgsa bozonu pāru sabrukšanas kanāli un to pašreizējie eksperimentālie pētījumi

Niecīgais HH rašanās šķērsgrīzums ir eksperimentāli izaicinošs, savukārt daudzie iespējamie sabrukšanas kanāli vēl vairāk palielina to meklēšanas sarežģītību. Sazarojuma attiecība (BR , angļu valodā *branching ratio*) dažiem izplatītākajiem kanāliem ir parādīta 2.3. attēlā. Pēc būtības nav neviena “zelta kanāla” ar lielu BR un augstu signāla un fona attiecību. Meklējumos iekļaujot vairāk sabrukšanas kanālu, var palielināt HH rašanās



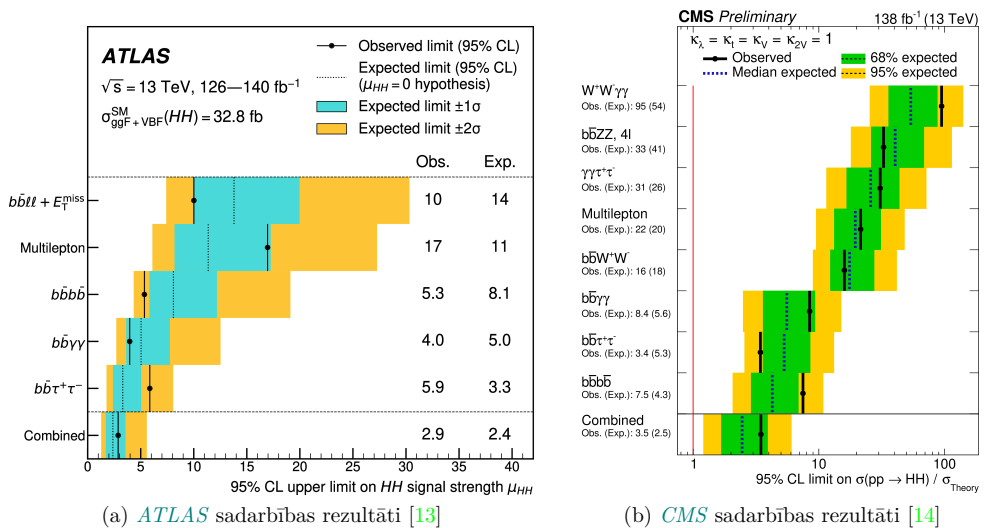
2.3. att. BR populārākajiem HH sabrukšanas kanāliem. Kanāli atzīmēti ar “A” atbilst tiem, kurus pētījusi *ATLAS* sadarbība, savukārt “C” norāda tos, kurus pētījusi *CMS* sadarbība. Zaļi burti norāda kanālu iekļaušanu HH multileptonu analizēs.

mērījumu jutību. Kamēr tā nav pietiekama, katra analīze nosaka augšējo robežu HH rašanās šķērsgrīzumam vai biežāk HH rašanās signāla stiprumam, μ , kas definēts vienādojumā (2.2), kur σ ir mērītais HH rašanās šķērsgrīzums un σ_{SM} (teorija) ir šķērsgrīzums, ko paredz *SM* (teorija). Turklāt vairāki pētījumi var papildus nodrošināt ierobežojumus vai precizējumus Hīgsa mijiedarbībai ar citām daļiņām vai pat jauniem fizikas scenārijiem.

$$\mu = \mu_{HH} = \frac{\sigma}{\sigma_{SM}} = \frac{\sigma}{\sigma_{teorija}} \quad (2.2)$$

Labākie daudzkanālu analīzes piemēri ir HH multileptonu analīzes, kurā notikumi tiek atlasīti un kategorizēti, pamatojoties uz sabrukuma gala rezultātiem, precīzāk, leptonu skaitu. Šādu analīzi veikušas abas sadarbības. *CMS* sadarbības veiktā analīze tēmēta uz trim sabrukšanas kanāliem (sk. 2.3. attēlu), iedalot tos septiņās meklēšanas kategorijās, kur leptonu skaits ir no nulles (mērķēta uz četriem hadroniskiem tau) līdz četriem [11]. Kopumā šī analīze ir noteikusi 95 % ticamības pakāpes (CL , angļu valodā *confidence level*) novēroto (paredzamo) augšējo robežu 21 (19) HH rašanās signāla stiprumam.

ATLAS sadarbības veiktajā analizē ir iekļauti notikumi no 10 sabrukšanas kanāliem, kas iedalīti deviņās meklēšanas kategorijās, ar leptonu skaitu no diviem līdz četriem [12]. Kopumā šī kombinācija ir noteikusi 95 % *CL* novēroto (paredzamo) augšējo robežu 17 (11) *HH* rašanās signāla stiprumam. *ATLAS* sadarbības veiktā analīze nosaka nedaudz stingrāku robežu, vienlaikus apvienojot vairākus *HH* sabrukšanas kanālus, ko *CMS* sadarbība ir pētījusi citās analizēs.



2.4. att. 95 % *CL* novērotā (paredzamā) augšējā robeža *HH* rašanās signāla stiprumam.

Pašreiz *ATLAS* sadarbības vispilnīgākā *HH* kombinācija [13] ir noteikusi 95 % *CL* novēroto augšējo robežu 2,9 *HH* rašanās signāla stiprumam, kamēr 2,4 bija sagaidīta. Vispilnīgākā *CMS* sadarbības *HH* kombinācija [14] ir noteikusi 95 % *CL* novēroto augšējo robežu 3,5 *HH* signāla stiprumam, kamēr sagaidītā bijusi 2,5. Abām kombinācijām novērotās un sagaidītās robežas apkopotajos kanālos ir uzrādītas 2.4. attēlā. Jāpiemin, ka abas sadarbības ir veidojušas arī vienotu *HH* kombināciju, vairāk informācijas atsaucē [15].

Lai papildinātu neizpētītu *HH* meklējumu teritoriju, šis promocijas darbs un pava-došais *CMS* fizikas analīzes kopsavilkums apraksta jaunu $HH \rightarrow WW^*ZZ^* \rightarrow 4l$ pētījumu, kas ir daļa no $HH \rightarrow WW^*ZZ^*$ analīzes. Nākamajiem analīzes veikšanas posmiem šis sabrukuma kanāls varētu būt iekļauts jau esošajā *CMS HH* multileptonu analīzē. WW^*ZZ^* sabrukšanas kanāls ir iekļauts *ATLAS* multileptonu analīzē, bet ne tā četru leptonu sabrukšanas ceļš [12], savukārt *CMS* multileptonu [11] četru leptonu meklēšanas kategorija izstrādāta $HH \rightarrow WW^*WW^*$ sabrukuma datiem, tādējādi motivējot $HH \rightarrow WW^*ZZ^* \rightarrow 4l$ pētījumu.

3. EKSPERIMENTĀLĀ VIDE

Katra fizikas teorija ir jāpapildina ar eksperimentāliem datiem, kas to apstiprina vai noraida. Fundamentālajām teorijām, kas apraksta elementārās daļiņas un to mijiedarbības, ir ārkārtīgi augstas prasības eksperimentālajai videi, lai tās pārbaudītu. Tāpēc, lai attīstītu šo nozari, zinātniekiem ir jāsadarbojas gadu desmitiem, lai izveidotu nepieciešamos eksperimentālos aparātus. Eiropas kodolpētniecības centrs (*CERN*) (franču valodā *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*) ir izcils nepieciešamās eksperimentālās vides piemērs, jo tas nodrošina paātrinātāju kompleksu, vietu eksperimentālajiem aparātiem un auglīgu kopienu zinātnes attīstīšanai. Dati, kas analizēti promocijas darba ietvaros, ir ievākti *CERN* ar *CMS* detektoru, izmantojot *LHC* radītās *pp* sadursmes.

3.1. Liels hadronu paātrinātājs

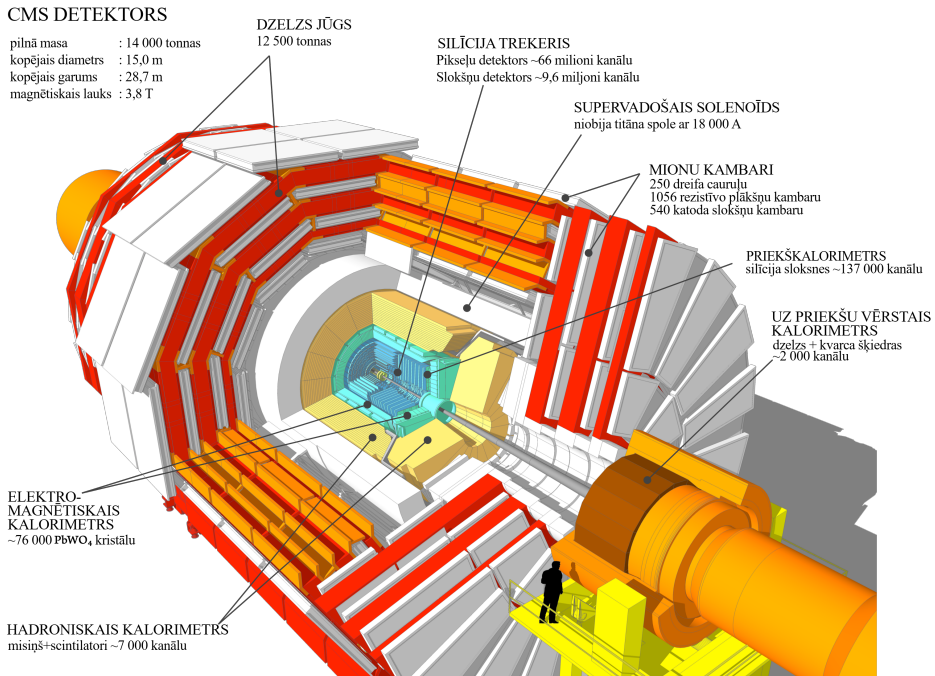
Pašreizējais *CERN* paātrinātāju flagmanis ir *LHC*, kas šīs promocijas rakstīšanas laikā ir visjaudīgākais daļiņu paātrinātājs uz Zemes. Tomēr viss *CERN* paātrinātāju komplekss ir spēcīgs un daudzpusīgs, un to izmanto ne tikai *LHC* piepildīšanai, bet arī protonu vai citu jonu nodrošināšanai daudziem eksperimentiem.

Ideja par *pp* paātrinātāja ierīkošanu Lielajā elektronu-pozitronu paātrinātāja tunelī tika apspriesta jau 1984. gadā, bet datu ievākšana sākās pagājušajā desmitgadē. Jau ir veikti vairāki datu vākšanas cikli (angļu valodā *Run*), un ir paredzēts, ka tie turpināsies līdz 21. gadsimta 40. gadiem. *LHC* ir daļiņu paātrinātājs ar diviem pretēji rotējošiem kūļiem (angļu valodā *beam*) divos atsevišķos gredzenos, kas izvietoti kopīgā divu kanālu magnētā, un lielākoties satriec tieši *pp* kūļus. *LHC* tika veidots, lai radītu *pp* sadursmes ar masas centra enerģiju, \sqrt{s} , līdz 14 TeV. Starp svarīgākajiem iekārtas raksturlielumiem ir mirdzums (angļu valodā *luminosity*), kas raksturo radušos notikumu daudzumu, kā arī sagrūdums (*PU*, angļu valodā *pileup*), kas raksturo pārklājošos daļiņu mijiedarbību. Abi parametri laika gaitā kļuvuši lielāki un patīkami pārsnieguši sākotnējā aprēķina vērtības. Plašāka informācija pieejama pilnajā promocijas darbā.

Iekārtas darbības laikā tā ir attīstījusies un turpinās attīstīties. 20. gadu beigās ir paredzēta plaša *LHC*, paātrinātāju kompleksa un detektoru modernizācija [3]. Šis nozīmīgais jauninājums iezīmēs pāreju no *LHC* pirmās fāzes uz otro fāzi, arī sauktu par *HL-LHC* ēru. Modernizācija ļaus veikt Higsa bozona īpašību mērījumus ar vēl nepieredzētu precizitāti un palielinās iespējas jaunu fizikas scenāriju meklēšanai, jo paredzams, ka kopējais sadursmju skaits palielināsies piecas reizes, salīdzinot ar skaitu pirmās fāzes laikā. Paredzēts reģistrēt vēl nepieredzētu 3000 fb^{-1} jeb 3 ab^{-1} mirdzumu aptuveni 10 gadu laikā.

3.2. CMS eksperiments

CMS ir viens no *LHC* daudzfunkcionālajiem detektoriem, un tā nosaukums izceļ tā galvenās iezīmes [16]. Tas ir **kompakts** tā blīvā dizaina dēļ – lai gan *CMS* detektora tilpums ir ievērojami mazāks nekā *ATLAS* detektoram, tas ir gandrīz divreiz smagāks. Tam ir plaša **mionu** sistēma, kas veido aptuveni 80 % no tā kopējā apjoma. Visbeidzot, *CMS* centrā atrodas ≈ 4 T supravadošs **solenoida** magnēts [17], nodrošinot lādētu daļiņu trajektoriju liekšanos. Detektoram ir cilindriska forma un azimutāla simetrija, tā diametrs ir 15 m, garums 21 m, kas pilnībā aptver daļiņu satriekšanās punktu. Shematiski *CMS* ir parādīts 3.1 attēlā, izceļot tā apakšdetektorus, kā arī salīdzinājumam iekļaujot cilvēka izmēru. Diagrammā **cilindriskais reģions** (angļu valodā *barrel region*) un divi **gala sienu reģioni** (angļu valodā *endcap region*) ir skaidri atšķirami.



3.1. att. Shematisks *CMS* detektora attēlojums [18].

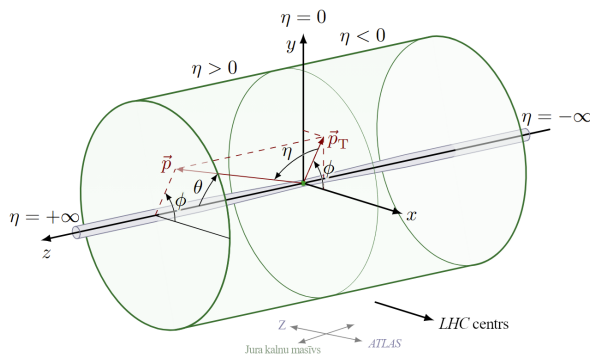
CMS sastāv no vairākiem koncentriskiem apakšdetektoriem ar augstu granularitāti un labu laika izšķirtspēju, katrs no tiem ir specializēts dažādu daļiņu un to īpašību noteikšanai un mērīšanai, tādējādi kopā rekonstruējot sadursmē notikušo. Silīcija **trekeris** (angļu valodā *tracker*) [19], kas apzīmēts zilzaļā krāsā, izseko lādēto daļiņu ceļam, rekonstruējot to kustības daudzumu, kā arī mēra sadursmju **virsošņu** (angļu valodā *vertex*) atrašanās vietu. Starp **trekeri** un solenoīdu ir elektromagnētiskais kalorimetrs (*ECAL*, angļu valodā *electromagnetic calorimeter*) [20] un hadroniskais kalorimetrs (*HCAL*, angļu

valodā *hadronic calorimeter*) [21], kas mēra elektronu, fotonu un hadronu atstāto enerģiju. Abi kalorimetri 3.1. attēlā ir parādīti dzeltenā krāsā. Ārpus solenoīda ir mionu sistēma [22], kas izseko mionu ceļus un mēra to kustības daudzumu. *CMS* detektors būtu bezspēcīgs bez *atlases* (angļu valodā *trigger*) un datu ieguves sistēmas [23], vairākas promocijas darbam svarīgas nianšes, meklējamas tā pilnajā tekstā.

Lai ievāktu augstas kvalitātes fizikas datus, nepietiek tikai ar labu detektora materiālu. Ir jāspēj vadīt detektoru optimālā, uzticamā un drošā veidā, sākot no “tā ieslēgšanas/izslēgšanas” līdz tā veiktspējas optimizēšanai. Tas ir *DCS* galvenais mērķis, savukārt *DSS* ir atbildīga par detektora un tā aprīkojuma aizsardzību pret dažādiem apdraudējumiem. *CMS* eksperimentā šīs divas sistēmas tiek atdalītas, tomēr tās bieži izmanto datus no tām pašām zondēm. *DCS* darbības joma sniedzas ārpus *CMS* vadības, tā arī sazinās ar ārējām sistēmām, piemēram, paātrinātāju, kā arī nodrošina grafisko lietotāja saskarni. Labi izstrādāta *DCS* nodrošina optimālu sistēmas darbību.

3.2.1. Koordinātu sistēma

CMS sadarbībā izmanto labās rokas koordinātu sistēmu, lai raksturotu gan detektora izkārtojumu, gan rekonstruētās daļiņas. *CMS* detektora formas dēļ tiek izmantotas sfēriskas koordinātas. Shematiskais *CMS* detektora standarta koordinātu sistēmas attēlojums ir parādīts 3.2. attēlā. Lai cīnītos ar protonu sastāvdaļu nezināmo sākotnējo kustības dau-



3.2. att. *CMS* detektora koordinātu sistēmas shematiskais attēls, pielāgots no [24].

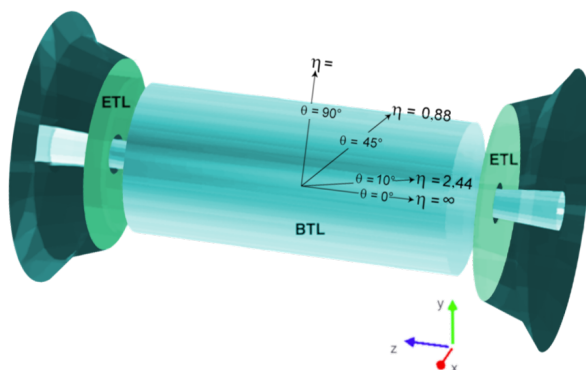
dzumu, tiek izmantots kustības daudzums un enerģija daļiņu kūļu šķērsplaknē (xy plaknē), attiecīgi p_T un E_T , lai raksturotu novērotās daļiņas, jo zināms, ka sākotnējais kustības daudzums šķērsplaknē ir nulle. Kā ierasts daļiņu paātrinātājos, leņķi no šķērsplaknes definē kā *pseudostraujumu* (angļu valodā *pseudorapidity*) η . Visbeidzot, ir ērti aprakstīt Lorencas invarianto leņķisko attālumu ΔR , to definējot ar attālumiem $\eta - \phi$ koordinātēs, izmantojot vienādojumu (3.1).

$$\Delta R = \sqrt{(\Delta\eta)^2 + (\Delta\phi)^2} \quad (3.1)$$

3.2.2. Otrā fāze un minimāli jonizējošo daļiņu laika noteikšanas detektors

Tāpat kā paātrinātāja iekārta ieies otrajā fāzē, arī visi detektori tiks būtiski un vērienīgi modernizēti, lai maksimāli izmantotu *HL-LHC* ēru un tās sniegtās iespējas. Lai risinātu problēmas, ko rada *PU* pieaugums līdz 200, *CMS* detektoram tiek veidots lielāks ģeometriskais pārklājums [25], [26], augstāka izšķirtspēja un granularitāte [27], [28]. Turklāt tas izmantos precīzus laika mērījumus un spēs pārvaldīt augstākus datu pārraides ātrumus, lai analizētu ienākošos datus. Esošie detektori attīstīsies, tiks uzbūvēti jauni detektori (tiek būvēti), un ir gaidāmi arī vairāki signālu un datu izlasīšanas sistēmu uzlabojumi, piemēram, pirmā līmeņa atlasēs sistēmai (angļu valodā *Level-1 trigger*) [29].

Ārpus treķera pilnīgi jauns detektors nodrošinās jaunu *CMS* spēju – augstas precizitātes laika mērījumus lādētām daļiņām [4]. Paredzams, ka *MTD* darbības sākumā nodrošinās laika izšķirtspēju atsevišķu lādētu daļiņu trajektorijām no 30 ps līdz 40 ps, kas samazināsies radiācijas bojājumu dēļ līdz 60 ps vai 70 ps tā kalpošanas laika beigās. *MTD* palīdzēs identificēt daļiņas, gan palielinot *PU* trajektoriju atpazīšanas efektivitāti, tādējādi palīdzot identificēt izolētus leptonus, gan tāpēc, ka tā slāņi ļaus uzlabot lādētu hadronu identifikāciju. *MTD* sastāv no divām sistēmām, kas attēlotas 3.3. attēlā: cilin-

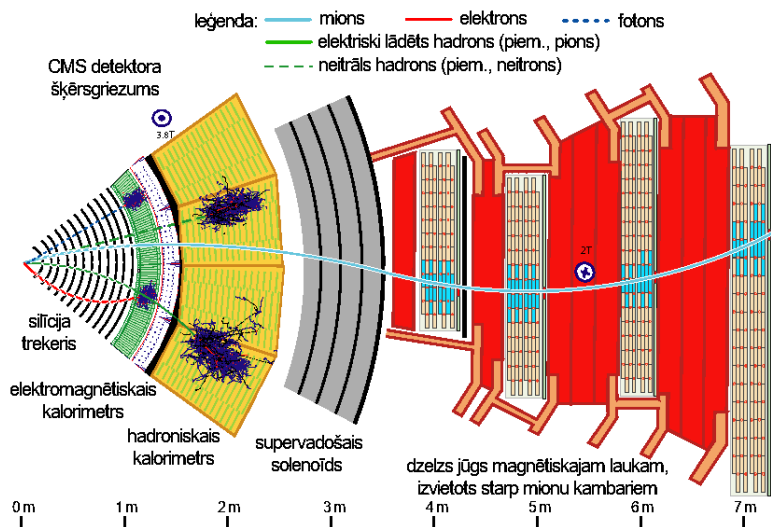


3.3. att. *MTD* ģeometrijas shematisks attēlojums, uzrādot tā cilindrisko un gala sienu daļu [4].

driskā laika mērīšanas slāņa (*BTL*, angļu valodā *Barrel timing layer*), kas ir vienslāņa cilindrisks detektors un noklās $|\eta| < 1,48$, un gala sienu laika mērīšanas slāņa (*ETL*, angļu valodā *Endcap timing layer*), kas ir divu disku sistēma un pārklās $1,6 < |\eta| < 3,0$. Lai mazinātu strāvas trokšņus, detektors tiks atdzesēts līdz aptuveni -30°C , izmantojot divfāžu CO_2 plūsmu. Novietojuma dēļ abas sistēmas saskaras ar dažādiem apstarpēšanas līmeņiem, un ir nolemts izmantot dažādus sensorus un citus tehniskos risinājumus, lai preventīvi risinātu iespējamās komplikācijas. Paredzams, ka gala sienu laika mērīšanas slānis tiks apkopts starp darbības periodiem, savukārt *BTL*, visticamāk, nebūs šādas greznības. Tāpēc ir rūpīgi jāpārdomā projektēšanas un ekspluatācijas risinājumi. Efektīvai darbībai izšķiroša nozīme būs gudri izstrādāta *DCS* un *DSS*.

4. FIZIKAS OBJEKTU REKONSTRUKCIJA UN IDENTIFIKĀCIJA

Kad daļiņas ir šķērsojušas *CMS* detektoru, mijiedarbojoties ar tā dažādajiem slāņiem, un *trigera* sistēma ir izvēlējusies šo notikumu kā potenciāli interesantu, visu detektora informāciju var izmantot, lai novērotās detektora atbildes interpretētu kā fizikas objektus. Zema līmeņa objekti, piemēram, trajektorijas un enerģijas klāsteri, tiek savstarpēji saistīti, veidojot augsta līmeņa objektus, piemēram, elektronus vai mionus, ko savukārt var grupēt, lai veidotu vēl sarežģītākus objektus, piemēram, daļiņu *strūklas* (angļu valodā *jet*). Šī nodaļa fokusējas uz elektroniem, mioniem, daļiņu strūklām un trūkstošo šķērsenerģiju (*MET*, angļu valodā *missing transverse energy*) (ko aiznesuši neitrīno), jo tie ir svarīgi $HH \rightarrow WW^*ZZ^*$ analīzei, savukārt ar *CMS* detektora ievāktajiem datiem iespējams rekonstruēt arī citus fizikas objektus, piemēram, fotonus.



4.1. att. Dažādu daļiņu mijiedarbība un ierastie nospiedumi *CMS* detektorā, attēloti tā šķērs griezuma sektorā [30].

4.1. attēlā tiek parādīts *CMS* detektora šķērs griezuma sektors, izceļot dažādus fizikas objektus un to tipiskās mijiedarbības ar detektoru. *CMS* izmanto daļiņu plūsmas (*PF*, angļu valodā *particle flow*) pieeju [30], kas korelē visu apakšdetektoru signālu, lai uzlabotu notikumu rekonstrukciju. Pirmkārt, tā rekonstruē lādētu daļiņu trajektorijas, secīgi maskējot izmantoto signālu, lai izvairītos no atkārtotas uzskaites. Otrkārt, tā sagrupē atstāto enerģiju kalorimetros. Treškārt, saistīšanas algoritms pārbauda jebkuru no šīm kombinācijām iespējamam fizikas objekta kandidātam. Algoritms sākas ar mionu, elektronu, fotonu, pēc tam hadronu rekonstruēšanu un visbeidzot uzskaita *MET*. Šī holistiskā pieeja ir ļāvusi *CMS* sasniegt tik lieliskus rezultātus.

Mioni šķērso visu detektoru un bieži no tā izkļūst ārā, tomēr kā lādētas daļiņas atstāj signālu šķērsotajos silīcija *trekera* slāņos un mionu kamerās. Šos signālus jeb trāpījumus var grupēt, lai veidotu trajektorijas, ko izmanto, lai ekstrapolētu uz to izcelsmi jeb *virsotni*. Mionu kandidātus var veidot, sākot no *trekera* datiem, vai otrādi no mionu sistēmas trāpījumiem [31]. Kopumā mionu identifikācija un rekonstrukcija pārsniedz 99 %, un īpaši izstrādāti identifikatori (*ID*, angļu valodā *identifier*) var palielināt šo efektivitāti vēl vairāk.

Elektroni atstāj trāpījumus *trekerī* un tiek absorbēti *ECAL*, tādējādi galvenā informācija par to rekonstrukciju ir atrodama šajās divās sistēmās. Elektronu rekonstrukcija var sākties no *ECAL* vai *trekera* [32], vēlāk piesaistot otras sistēmas trajektoriju vai enerģijas informāciju. Uzmanība tiek pievērsta, lai ņemtu vērā enerģiju, kas zaudēta *bremzējošajā starojumā* (angļu valodā *bremsstrahlung*) un izstarojot fotonus [33].

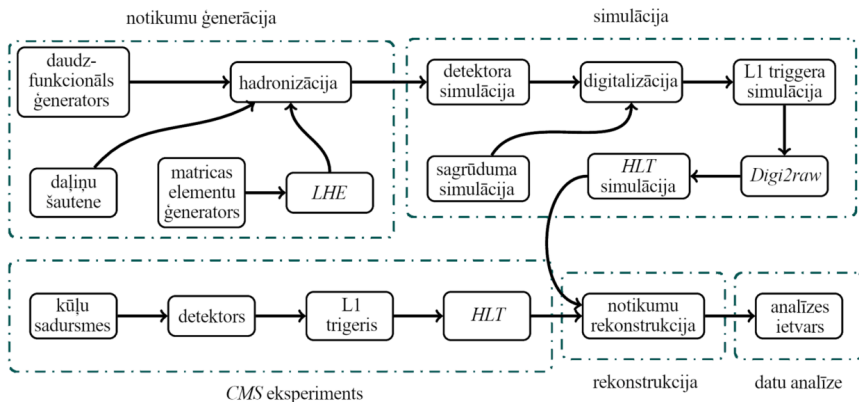
Gan lādēti, gan neitrāli hadroni zaudē daļu enerģijas *ECAL* un tiek absorbētas *HCAL*. Hadronu sadursmēs parasti tiek runāts par daļiņu *strūklām* – hadronizētiem kvarkiem un gluoniem, kas izpaužas konusveida objektos, kurus ietver kalorimetri [34]. Pastāv vairākas *strūklu* rekonstrukcijas metodes [30], [35]. Tādu *strūklu marķēšanai* (angļu valodā *tagging*), kuru izcelsme ir, piemēram, b kvarks, ir vajadzīga informācija no *trekera*, jo hadronam, kurā ir b kvarki, parasti ir ilgāks dzīves ilgums, tādējādi, tam sabrūkot, rodas nobīdītāka sekundārā *virsozne*. Visbeidzot, neitrīno nepamanīti izbēg no detektora. Tomēr to enerģiju var aplēst pēc *MET*, ko iegūst, vektoriāli summējot rekonstruēto objektu kustības daudzumu šķērsplaknē.

4.1. Notikumu simulācija ar Montekarlo ģeneratoriem

Montekarlo (*MC*, angļu valodā *Monte Carlo*) simulācijas ir pamats notikumu atlasei un optimizācijai, kā arī dažādu metožu izstrādei. Šīs simulācijas atveido visu daļiņu sadursmes ķēdi, sākot no partona līmeņa mijiedarbības līdz pilnīgai detektora reakcijas simulācijai, tādējādi ļaujot kvantitatīvi salīdzināt teoriju ar kontrolētiem pieņēmumiem un skaisti nejaušo un reālo eksperimentu.

4.2. attēlā ir apkopoti galvenie datu sagatavošanas soļi, uzrādot tos gan eksperimentālajiem datiem, gan *MC* simulācijām. *MC* notikumu ģenerēšana sākas ar ienākošo partonu (kvarku vai gluonu) cietās izkļūdes procesa simulāciju no katra protona, kas rada izejošos partonus. Dotās mijiedarbības varbūtību aprēķina no matricas elementiem, un to var izdarīt ar dažādu precizitāti. Vadošajā kārtā (*LO*, angļu valodā *leading order*) aprēķina pamata koka līmeņa mijiedarbības, nākamajā kārtā (*NLO*, angļu valodā *next-to-leading order*) ietver vienas *cilpas* korekciju, un katra nākamā pievieno augstāku korekcijas līmeni. Parasti augstāka līmeņa korekcijas uzlabo atbilstību starp teoriju un datiem, tomēr tās ir daudz sarežģītākas skaitļošanas ziņā.

Dažādiem aprēķiniem ir pieejami un pielāgojami daudzi dažādi *MC* ģeneratori, pie-



4.2. att. Datu sagatavošanas galvenie soļi [36]. *MC* simulācijām uzrādīta notikumu ģenerācija, simulāciju pilnveidošana un rekonstrukcija, beidzot ar datu analīzi.

mēram, *MadGraph5 amc@NLO* [37], *Pythia* [38], *Powheg box* [39]. Ģeneratoriem ir nepieciešami īpaši ievades dati. Tā kā kvarku un gluonu kustības daudzums protonā laika gaitā nav konstants, to var aprakstīt ar *PDF*, kas raksturo varbūtību atrast partonu ar noteiktu kustības daudzumu noteiktā mērogā.

Pēc cietās izkliedes tiek veikta partonu *skaldīšana* (angļu valodā *showering*), vērā ņemot *gan ienākošo, gan izejošo partonu radiācija* (angļu valodā *initial and final state radiation*). Šis ir svarīgs solis, bieži veikts ar *Pythia* vai *Herwig++* [40]. Ģeneratoriem ir dažādi hadronizācijas modeļi, kas var izmantot vai nu virknes vai klastera modelēšanu. Līdz šim solim daļiņas tiek sauktas par “ģenerators līmeņa” vai pat poētiskāk par “patiesības līmeņa” daļiņām, jo tikai nākamajos soļos tās saticiek “realitāti”. Līdztekus primārajai cietajai mijiedarbībai klātesošas var būt citi, sekundāri notikumi, piemēram, mīkstā izkliede vai daļiņas no *kūļa* paliekām. Tā kā *PU* piesārņo objektu rekonstrukciju, ir svarīgi izprast tā modelēšanu.

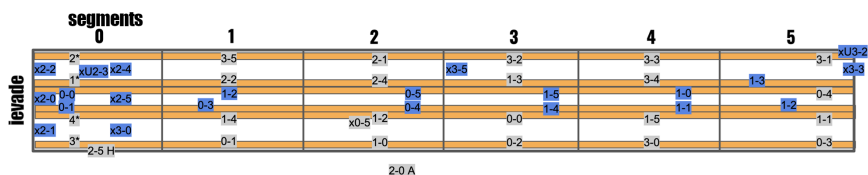
Nākamais *MC* izstrādes solis ietver izpratni par to, kā šāds notikums būtu redzams detektorā. *Geant4* [41] simulē daļiņu pārvietošanos caur detektora slāņiem, modelējot enerģijas zudumu jonizācijas, *bremzējošo starojumu*, hadronizācijas ceļā, tā arī izseko daļiņu magnētiskajā laukā un var simulēt detektoram raksturīgās īpašības, piemēram, izšķirtspēju un reakcijas laiku, kā arī signāla formu dažādiem sensoriem. Pēc atbildes reakcijas modelēšanas to digitalizē, ieviešot elektroniskus trokšņus un citus detektora reakcijas ierobežojumus, lai imitētu detektora izvades datus. Visbeidzot, šie detektora izvades dati tiek ievadīti standarta *CMS* rekonstrukcijas ķēdē tāpat, kā tas notiktu ar eksperimentālajiem datiem. Tas nozīmē *triggeru* emulēšanu, trajektoriju rekonstruēšanu, kalorimetros atstāto enerģiju grupēšanu, *PF* algoritma izmantošanu un objektu identificēšanu. Simulēto datu priekšrocība ir vienmēr pieejamā ģenerators līmeņa jeb patiesības līmeņa informācija, tādējādi ļaujot validēt vai vienkārši salīdzināt objektu rekonstrukciju, notikumu kategorizāciju, kā arī izprast daļiņu izcelsmi un daudz ko citu.

5. DETEKTORA KONTROLES SISTĒMAS IZVEIDE MTD TESTU STENDAM

Kontroles jeb vadības sistēma ir nepieciešama ne tikai katram detektoram, bet arī katrai testa sistēmai. Šajā nodaļā ir apkopots darbs, kas veikts kā galvenā prioritāte promocijas pētījumu pirmajā pusē. Tas ir centrēts ap prototipa vadības sistēmu, kas tika izstrādāta vienam no *MTD* testu stendiem. Projekta mērķis bija ne tikai atvieglot datu iegūšanu, kas ir būtiska veiksmīgai *BTL* izstrādei, montāžai un nodošanai ekspluatācijā, bet arī izveidot *DCS* prototipu. Papildinformācija par izstrādes konceptiem un rīkiem, kas tiek izmantoti *DCS* izveidei *LHC* eksperimentos, atrodama pilnajā promocijas darba tekstā.

5.1. *MTD* testu stends un tā *DCS*

Testēšana un validācija ir dabisks process jebkurai detektoru sistēmai. Katrā testu stendā var pētīt atsevišķu komponentu vai savstarpējo mijiedarbību starp vairākām komponentēm. Attiecīgais *MTD* testu stends ir vienas *BTL* plātnes testu stends, un tas atrodas treķera integrācijas laboratorijā (*TIF*, angļu valodā *Tracker integration facility*), *CERN*. Sākotnēji tas tika izveidots dzesēšanas testiem, bet laika gaitā ir attīstījies, lai nodrošinātu dažādas pārbaudes. Plātne ir lielākā *MTD* cilindriskās daļas komponente, un 72 šādas plātnes veido visu *BTL*.



5.1. att. *BTL* plātnes dzesēšanas testu stenda shematiskais attēlojums, norādot segmentu numerāciju, gāzes ievādi un mikroslokšņu sildītājus dzeltenā krāsā. Pelēkie un zilie lodziņi attēlo sensoru iespējamo izkārtojumu.

Šis izmēģinājuma stends ir pilna izmēra prototips, un tā shematiskais attēlojums ir parādīts 5.1. attēlā. Tas ir aptuveni 40 cm plats, aptuveni 250 cm garš un aptuveni 40 mm biezs, un tas ir iedalīts sešos segmentos. Prototips ir izgatavots no alumīnija plāksnes ar iegravētiem celiņiem tērauda caurulēm, kas ieklātas divfāžu CO_2 dzesēšanai. Tam ir izolējošs pārklājums, kas nodrošina noslēgtu tilpumu, ko var piepildīt ar sausu gaisu. Testu stenda pirmajā fāzē tas sastāvēja tikai no plātnes ar dzesēšanas tīklu. Otrajā fāzē katrā segmentā tika izvietoti slodzes simulācijas rezistīvie slokšņu sildītāji. Trešajā fāzē sildītāji tika noņemti no viena segmenta un aizstāti ar reāliem sensoru moduļiem. Precīzāk, no maiņa imitēja pusi no nolasišanas bloka, kas sastāv no koncentratora kartes un sensoru

modeļiem ar silīcija fotopavairotājiem un *LYSO* kristāliem (cērija leģētiem lutēcija bāzes scintilācijas kristāliem). Visi sildītāji un moduļi (un to termoelektriskie dzesētāji) tika darbināti ar laboratorijas barošanas avotiem, atvieglojot testēšanu. Papildus tika pievienota releja sistēma, lai nepieciešamības gadījumā pārtrauktu padevi strāvas avotiem. Galvenā datu ieguve tiek veikta ar temperatūras, mitruma un spiediena sensoriem. Lielākā daļa temperatūras sensoru ir pievienoti masīvai temperatūras sensoru izlases sistēmai (*MTRS*, angļu valodā *massive temperature readout system*), bet pārējie programmējamam loģiskajam kontrolierim (*PLC*, angļu valodā *programmable logical controller*).

DCS tika definētas vairākas funkcionālās, veiktspējas un drošības prasības. Svarīgākās funkcionālās prasībās, ko noteica *BTL* komanda, bija datu ievākšana un reģistrēšana. Papildus bija nepieciešama brīdinājumu sistēma, lai informētu, vai savienojums ar kādu no aparatūras ierīcēm ir zudis, pārsniedzot maksimālo gaidīšanas laiku. Vēlmu sarakstā iekļautā funkcionalitāte ir strāvas avotu un moduļu vadība. Tomēr pašreizējā testu stendā tas nav bijis iespējams, un funkcionalitāte ir rezervēta turpmākai attīstībai, kā aprakstīts 5.2. sadaļā. Attiecībā uz veiktspējas prasībām *DCS* jādarbojas 24 stundas diennaktī septiņas dienas nedēļā, un tam jāspēj patstāvīgi atkopties pēc elektroenerģijas zuduma. Sistēmai noteiktie drošības kritēriji ir diezgan brīvi, un stenda drošai vadībai nepieciešama operatora klātbūtne. *DCS* netiek izveidota aparatūras vai programmatūras dublēšana (angļu valodā *redundancy*). Tā kā vadības funkcijas ir ierobežotas, drošības pasākumi nav “muļķudroši” un galvenokārt ir tikai brīdinoši, kā minēts iepriekš. Releju sistēmas integrācija ļauj atvienot strāvas padevi, bet tas tiek darīts skarbi un var kaitēt elektronikai. Tomēr sākotnējiem testiem šāds risinājums bija pietiekams.

5.1. tabula

Funkcionālās komponentes, kas izveidotas *MTD TIF DCS* projektam

komponente	apraksts
<i>CMS MTD TIF BASE</i>	nodrošina savienojumu ar konfigurāciju un nosacījumu datubāzēm
<i>CMS MTD GENERAL</i>	ietver primāro saskarsnes paneli, kā arī sirdspukstu paneļus, kas uzrāda savienojumu ar <i>PLC</i> un <i>MTRS</i>
<i>CMS MTD AC</i>	nodrošina kontrolētu piekļuvi projektam, cilvēki ar lomu <i>MTD Operator</i> var piekļūt projektam, savukārt <i>MTD Expert</i> var izmainīt projektu
<i>CMS MTD PLC</i>	apkopo <i>MTD</i> -specifiskas <i>PLC</i> konfigurācijas
<i>CMS MTD MTRS</i>	apkopo <i>MTD</i> -specifiskas <i>MTRS</i> konfigurācijas
<i>CMS MTD DIP</i>	piekļūst CO ₂ iekārtas informācijai, piemēram, plūsmas ātrumam, temperatūrai
<i>CMS MTD RDB SMOOTHING</i>	pieļauj datu ielasi bez vidējošanas īsiem, intensīviem testiem
<i>CMS MTD ILK</i>	nodrošina programmatūras līmeņa drošības sistēmu, izmantojot <i>MTRS</i> sensoru datus releju atvēršanai

MTD TIF DCS projekts tika izstrādāts, sekojot centrālās *CMS DCS* komandas vadlīnijām. Projekta sākotnējā versija bija pieejama 2022. gada maijā, padarot tā grafisko

saskarsni pieejamu visiem *MTD Operator* caur *CMS Terminal server*. Projekts izmanto vairākas *JCOP* ietvara funkcionālās komponentes [42], kā arī vairākas no *CMS* ietvara. Visbeidzot, šī doktora darba ietvaros tika izveidota virkne *MTD* specifisku komponentu, kas apkopotas 5.1 tabulā. Prototipa projekta izveide ir bijusi komandas darbs, ko sākotnēji vadīja un vienmēr uzraudzīja centrālās grupas eksperti. Darba autorei tā bija lieliska mācīšanās pieredze, un viņas ieguldījums projektā laika gaitā attīstījās. Tas sākās ar grafisko saskarsnes panelu izveidi dažādām komponentēm, kur vien tas bija nepieciešams. Tas ietvēra gan grafisko dizainu, gan funkcionalitātes projektēšanu un optimizēšanu, kā arī algoritmu un to bibliotēku atkārtotu izmantošanu vai jaunu izveidi, lai nodrošinātu minētās funkcijas. Vienīgā komponente, kurai autore neveidoja grafisko saskarni, bija *CMS MTD ILK*, jo tā ir jaunākā no komponentēm, ko izstrādāja jau nākamā *DCS* eksperte. Šīs komponentes izstrādē promocijas darba autore uzņēmās uzraudzības lomu.

Attīstoties zināšanām par to, kā jāveido un jānoformē funkcionālais komponents, šī promocijas darba autore veica pilnu izveides ciklu *CMS MTD RDB SMOOTHING* un *CMS MTD DIP* komponentēm. Pirmā komponente ļauj mainīt datu arhivēšanas vidējotšanu vairākām zondēm. Darbs pie šīs komponentes sniedza lielisku mācību iespēju izveidot algoritmus, kas izmanto informāciju no daudziem datu punktiem, jaunu datu punktu tipu izveidi, kā arī algoritmu integrēšanu projektā. Otrā piekļūst CO_2 iekārtas publicētajiem datiem, izmantojot datu apmaiņas protokolu [43], kas paplašina protokolu, kas izveidots *CERN* [44]. Šīs pakotnes izveide ļāva padziļināt izpratni par jauna datu punktu tipu izveidi, datu punktu izveidi un iekļaušanu konfigurāciju datubāzē, komponentes integrēšanu projektā un, protams, grafiskās saskarsnes izveidošanu. To visu veica šīs promocijas autore ar kvalitātes kontroli, ko nodrošināja *CMS* centrālā *DCS* komanda.

Promocijas darba autore veica arī citus uzturēšanas darbus, ieskaitot grafisko saskarsni atjaunošanu, jaunu datu punktu un tipu izveidi, kā arī projekta atjaunināšanu. Tas bija nepieciešams, pielāgojot projektu programmatūrai, ko bija paredzēts migrēt uz *WinCC-OA 3.19*. Šie uzdevumi ļāva izprast un trenēties lietot dažādus centrāli pieejamus rīkus un padziļināti izprast *DCS* izveides stratēģiju, ko izmanto *CMS* sadarbībā.

5.2. Projekta attīstība

Izveidotais *DCS* prototips atbilda nepieciešamajiem mērķiem, ko izvirzīja *BTL* grupa. Tajā pašā laikā ir paredzēts, ka projekts pilnveidosies, attīstoties testu stendam. Pašreizējais *DCS* projekts tiks izmantots, lai tālāk attīstītu trīs svarīgus aspektus *MTD* vadībai. Tie ir izvērtēti tālāk tekstā, norādot ieviestās funkcijas. Paredzams, ka izstrādātā sistēma varētu kļūt par pirmo pilno *DCS* prototipu *MTD* detektoram. Un pat tad, ja šis *DCS* projekts neattīstīsies galīgajā *DCS*, gadu laikā tas būs nodrošinājis vairākus nozīmīgus testus dažādu funkcionalitāšu izpratnei un dizaina izvēlēm, kas varētu nākt par labu jebkurai turpmākai sistēmai.

Pirmkārt, jāizstrādā un jāpilnveido komponentu ieslēgšanas secība. Šis scenārijs kļūst pieejams, kad tiks saņemti detektora strāvas avoti. No testu stenda viedokļa tas dos iespēju testēt dažādu komponentu, piemēram, sensoru, barošanu, kā paredzēts pilnajā detektorā. Būs pieejami dažādi testi – optimālākās jaudas piedaves secības atrašana, ieslēgšanas un izslēgšanas secības optimizēšana, nepieciešamās jaudas novērtēšana dažādos apstākļos un zudumu aprēķināšana, kā arī elektrokabeļu izvietojuma optimizācija. No *DCS* skatpunkta būs iespējams izgatavot atbilstošas funkcionālās komponentes, projektā attēlojot strāvas avotus kā datu punktus, spējot tos vadīt un uzraudzīt, izmantojot *DCS*. Tas ļaus izveidot pirmos galīgā automāta (*FSM*, angļu valodā *Finite State Machine*) prototipus, izstrādāt un izmēģināt pamata funkcionalitātei nepieciešamās darbības, piemēram, kā definēt detektora ieslēgšanu utt. Būs iespējams plaši pētīt *DSS* aspektus. Šo scenāriju varētu sīkāk pētīt, papildot *BTL* plātņi ar sensoru prototipiem, tādējādi analizējot to mijiedarbību, definējot dīkstāves vai datu uzņemšanas režīmus.

Otrkārt, ir jāizpēta vadības sistēmas mijiedarbība ar datu ieguves sistēmu. Šis otrais scenārijs kļūst pieejams, sadarbojoties abām darba grupām un izveidojot vienotu testu stendu, lai pētītu mijiedarbību starp *DCS* un fizikas datu iegūšanas sistēmu. Šeit gan no testu stenda, gan *DCS* viedokļa galvenais ieguvums būs abu sistēmu savstarpējās saziņas izprašana un iespējamo šauru punktu atrašana. Tas ļaus skaidri noteikt katras sistēmas atbildības robežas, pārbaudīt un uzlabot to saziņas efektivitāti.

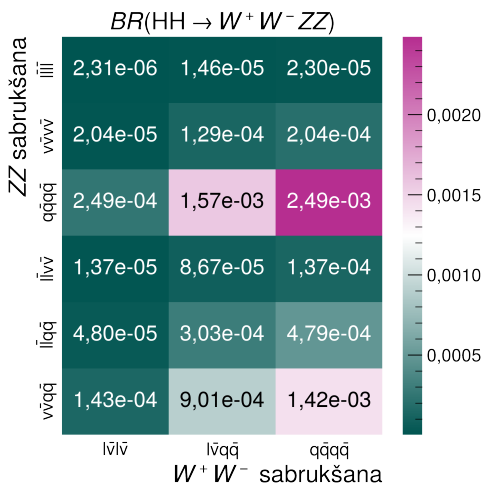
Visbeidzot, lai gala detektoram izveidotu pirmo *DCS*, ir jāizpēta plātņu kopu kolektīvā uzvedība. Tādējādi trešais scenārijs ir paplašināt šo testu stendu uz vairāku plātņu sistēmu. Testu stendā tas ļauj pētīt un izmeklēt sešu plātņu kopuma kolektīvo uzvedību, izpētīt mehāniskos, sakaru un citus risinājumus. Piemēram, šāda sistēma nodrošinās pilnīgu dzesēšanas sistēmas simulācijas veikšanu. No *DCS* viedokļa šāds testu stends ļaus pārbaudīt projekta mērogojamību un nodrošinās dažādu *FSM* aspektu, kā arī brīdinājumu sistēmas testēšanu. Piemēram, liekot plātnei vai to kopumam nonākt nevēlamos darbības scenārijos un liekot sistēmai uz tiem reaģēt.

6. HIGSA BOZONU PĀRU RAŠANĀS ANALĪZE, IZMANTOJOT $WWZZ$ SABRUKŠANAS KANĀLU

Doktorantūras studiju pēdējo gadu galvenais fokuss bija jaunas *CMS* analīzes izstrāde un izveide, koncentrējoties uz HH rašanās pētīšanu, izmantojot $HH \rightarrow WW^*ZZ^* \rightarrow 4l$ sabrukšanas kanālu. Tā kā šis kanāls iepriekš nav pētīts, izmantojot *CMS* detektora ievāktos datus, analīzes stratēģija bija jāizstrādā, jāoptimizē un jāpārbauda, lai visbeidzot to varētu izmantot, nosakot HH rašanās šķērsriezumu. Šī nodaļa ir īss ieskats analīzes radišanas procesā, detalizētāka informācija ir pieejama pilnajā promocijas darbā.

6.1. Motivācija izmantot $WWZZ$ sabrukuma kanālu

$HH \rightarrow WW^*ZZ^*$ sabrukšanas kanāla BR ir ap 1 %. Neviens no vektoru bozoniem nav uztverams *CMS* detektorā, bet vairāki no to sabrukuma gala produktiem ir. 6.1. attēlā apkopoti $HH \rightarrow WW^*ZZ^*$ kanāla iespējamie sabrukšanas ceļi un to BR . Sākotnējai analīzei tika izveidotas septiņas kategorijas, tās klasificējot atkarībā no leptonu skaita gala produktos, kā apkopots 6.1. tabulā. No šīm kategorijām pirmās tika pētītas trīs un četru leptonu kategorijas, no kurām četru leptonu kategorija ir pētīta šajā promocijas darbā.



6.1. att. Higgs bozonu pāru sabrukšanas rezultāti caur $WWZZ$ sabrukšanas ceļu.

$HH \rightarrow WW^*ZZ^* \rightarrow 4l$ sabrukšanas kanāla retuma dēļ tā analīze cieš no vairākiem fona procesiem, kas ir gan mazināmi, gan nemazināmi. Tie ietver vektoru bozonu rašanos kopā ar papildu [strūklām](#), vektoru bozonu rašanos kopā ar virsotnes kvarku pāri, viena un divu virsotnes kvarku rašanos, kā arī divu un trīs bozonu rašanos un citus vēl retākus

Sākotnējās analīzes kategorijas definējumi; uzrādīti bozonu sabrukšanas ceļi, skaits pretēji lādētu (PL) un vienāda aromāta (VA) vai pretēja aromāta (PA) leptonu pāriem; pievienoti novērtējumi sagaidāmo signāla un fona notikumu skaitam 200 fb^{-1} datu kopā

kategorija	2.1.	2.2.	3.	4.1.	4.2.	5.	6.
WW sabrukšana	$lvlv$	$qqqq$	$lvqq$	$lvlv$	$qqqq$	$lvqq$	$lvlv$
ZZ sabrukšana	$qqqq$	$llqq$	$llqq$	$llqq$	$llll$	$llll$	$llll$
PLPA pāri	1	0	0	1	0	0	0
PLVA pāri	0	1	1	1	2	2	2
$m_{ll} > 12 \text{ GeV}$	1	1	1	2	2	2	2
$m_{ll} \in (25, 100) \text{ GeV}$	0	0	1	1	1	1	1
$m_{ll} \in (80, 100) \text{ GeV}$	0	0	0	0	1	1	1
$n_{\text{strūklas}} \geq$	2	2	3	2	2	0	0
$E_T \geq X \text{ GeV}$	30	0	20	30	0	20	20
signāla notikumi	0,605	1,486	0,915	0,083	0,093	0,029	0,004
fona notikumi	3042891	15184261	907191	20270	8618	1077	43

procesus. Turklāt šajā analīzē arī viena Higgs bozona rašanās tiek uzskatīta par fona avotu. Kopumā fizikas objektu izvēlei un notikumu kategorizēšanai vajadzētu diskriminēt fona notikumus ar mērenu ietekmi uz signāla atlasē efektivitāti.

6.2. Izmantotās datu kopas

Analizētie dati ir ievākti ar *CMS* detektoru visā tā otrajā datu ievākšanas periodā (*Run 2*), ietverot 2016., 2017. un 2018. gada datus, kā arī trešā datu ievākšanas perioda (*Run 3*) sākuma datus (no 2022. un 2023. gada). Datu kopa atbilst apmēram 200 fb^{-1} kopējam mirdzumam. $HH \rightarrow WW^*ZZ^* \rightarrow 4l$ sabrukšanas kanāla pēdas tiek meklētas viena un divu leptonu pamatkopās, un tikai dati, kas kvalificēti ar Zelta standartu, tiek izmantoti analīzei. Precizējumi apkopoti pilnajā promocijas darbā.

Nopietnu detektora izmaiņu dēļ 2016., 2022. un 2023. gads ir katrs iedalīts divās ērās, lai atvieglotu to apstrādi. 2016pre un 2016post ir $20,2 \text{ fb}^{-1}$ un $16,6 \text{ fb}^{-1}$ lieli [45]. 2022 un 2022EE ir $8,08 \text{ fb}^{-1}$ un $26,67 \text{ fb}^{-1}$ lieli [46]. 2023 un 2023BPix ir $18,41 \text{ fb}^{-1}$ un $9,45 \text{ fb}^{-1}$ lieli [46]. Pat par spīti tehniskajiem apgrūtinājumiem, dati, kas ir ievākti ar *CMS* detektoru, ir augstas kvalitātes.

6.3. Montekarlo simulācijas un to mērogošana

Šajā promocijas darba analīzē izmantotas *LO* vai *NLO* (vai pat augstākas, ja pieejamas) *MC* simulācijas, kas ģenerētas ar *MadGraph5 amc@nlo* [37], *Powheg v1.0* vai *Powheg v2.0* [39], [48], [49], [50], [51], hadronizācija ikreiz veikta ar *Pythia* [38]. Vairums rezonanšu sabrukšanas ceļi aprakstīti ar *MadSpin* [52] vai *JHUGen* [53], kā arī ar *MinLO* [54]. Īss

6.2. tabula

Izmantotās *MC* simulāciju kopas; † norāda papildu nosacījumu $4 < m_{ll} < 50$ GeV, un †† norāda, ka $m_{ll} > 50$ GeV; “N/A” norāda, ka kopa nav bijusi pieejama analīzei; izmantotie saīsinājumi: *PW(2)* - *Powheg (v2)*, *MG5* - *MadGraph5*, *FXFX* - *Frederix-Frixione* salāgošanas shēma [47], *MS* - *MadSpin*, *JHU* - *JHUGen*

process	sabrukuma ceļš	ģenerators	$\sigma^{\text{Run 2}}$, pb	$\sigma^{\text{Run 3}}$, pb
ggFHH	$HH \rightarrow VV^*VV^*$	<i>PW</i>	1,87e-03	2,07e-03
ggFHH	$HH \rightarrow bb\tau\tau$	<i>PW+MG5@LO</i>	2,46e-03	2,46e-03
ggFHH	$HH \rightarrow bbZZ^*$	<i>PW</i>	4,92e-06	4,92e-06
ggFHH	$HH \rightarrow \tau\tau VV^*$	<i>PW</i>	9,42e-04	1,04e-03
ggFHH	$HH \rightarrow \tau\tau\tau\tau$	<i>PW</i>	1,20e-04	1,33e-04
ggFH	$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$	<i>PW/PW2+JHUGen</i>	0,013	0,014
VBFH	$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$	<i>PW/PW2+JHUGen</i>	1,04e-03	1,12e-03
W^-H	$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$	<i>PW/PW2+MiNLO+JHUGen</i>	1,46e-04	1,56e-04
W^+H	$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$	<i>PW/PW2+MiNLO+JHUGen</i>	2,31e-04	2,44e-04
ZH	$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$	<i>PW/PW2+MiNLO+JHUGen</i>	6,25e-04	7,75e-04
$t\bar{t}H$	$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$	<i>PW/PW2+JHUGen</i>	1,39e-04	1,56e-04
$b\bar{b}H$	$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$	<i>PW/PW2+JHUGen</i>	1,34e-04	1,45e-04
$t\bar{t}WH$	visi	<i>MG5@LO</i>	1,14e-03	N/A
$t\bar{t}ZH$	visi	<i>MG5@LO</i>	1,13e-03	N/A
$Z/\gamma^* + j$	$2l$	<i>MG5@NLO+FXFX</i>	360	386
$t\bar{t} + j$	$2l2\nu$	<i>PW/MG5@NLO+FXFX</i>	88,3	95,5
t or $\bar{t}[tWll]$	visi	<i>MG5@LO</i>	0,011	N/A
t or $\bar{t}[tZq]$	visi	<i>MG5@LO</i>	0,076	N/A
tW^-	$2l2\nu$	<i>PW</i>	N/A	36,0
$\bar{t}W^+$	$2l2\nu$	<i>PW</i>	N/A	36,0
$t\bar{t}\gamma + j$	visi	<i>MG5@NLO+FXFX+MS</i>	3,76	4,22
$t\bar{t}\gamma$	visi	<i>MG5@LO</i>	1,50	N/A
$WZ\gamma$	$W \rightarrow l\nu, Z \rightarrow 2q$	<i>MG5@NLO</i>	0,043	0,084
$t\bar{t}W + j$	$W \rightarrow l\nu$	<i>MG5@NLO+FXFX+MS</i>	0,216	N/A
$t\bar{t}WW$	visi	<i>MG5@LO+MS</i>	7,00e-03	8,20e-03
$t\bar{t}WZ$	visi	<i>MG5@LO</i>	2,45e-03	2,71e-03
$t\bar{t}ZZ$	visi	<i>MG5@LO+MS</i>	2,45e-03	1,58e-03
$t\bar{t}Z$	$Z \rightarrow 2l$	<i>MG5@NLO</i>	0,075	N/A
$t\bar{t}Z$ †	$Z \rightarrow 2l$	<i>MG5@NLO</i>	N/A	0,086
$t\bar{t}Z$ ††	$Z \rightarrow 2l$	<i>MG5@NLO</i>	N/A	0,039
WW	$2l2\nu$	<i>PW</i>	11,1	11,8
WZ	$3l\nu$	<i>PW+MG5@NLO+FXFX</i>	5,21	4,92
ZZ	$4l$	<i>PW</i>	1,32	1,39
WWW	visi	<i>MG5@NLO+MS</i>	0,216	0,233
WWZ	visi	<i>MG5@NLO</i>	0,171	0,185
WZZ	visi	<i>MG5@NLO</i>	0,057	0,062
ZZZ	visi	<i>MG5@NLO</i>	0,015	0,016
$t\bar{t}\bar{t}$	visi	<i>MG5@NLO</i>	8,21e-03	9,65e-03
$WWZZ$	visi	<i>MG5@LO</i>	4,44e-04	4,91e-04

kopsavilkums pieejams 6.2. tabulā. Izmantojot *Pythia*, visaptverošākais un modernākais **parametru kopums jeb regulējums** (angļu valodā *tune*), īpaši izstrādāts *CMS* detektoram, ir lietots: *CP5* [55]. Tas izmanto *NNPDF3.1 NNLO* [56] *PDF* kopu. Notikumu šķērs-griezumi iegūti no [57], [58], [59], [60]. Vairāk detaļu apkopotas pilnajā promocijas darbā. Marginālas neprecizitātes tiek labotas ar svariem, w_{notikums} , kas attiecīgi mērogo katru notikumu atbilstoši (6.1) vienādojumam:

$$w_{\text{notikums}} = \frac{L_{\text{int}} \cdot \sigma \cdot \mathcal{BR} \cdot w_{\text{PU}} \cdot SF_{\text{leptoniem}} \cdot SF_{\text{strūklām}} \cdot w_{\text{L1}} \cdot w_{\text{gen.}}}{\sum w_{\text{gen.}}}, \quad (6.1)$$

kur L_{int} integrētais mirdzums, σ simulāciju šķērs-griezums, \mathcal{BR} procesa *BR*, w_{PU} *PU* svari, SF mērogošanas koeficienti (angļu valodā *scale factor*), w_{L1} pirmā līmeņa atlasē sistēmas pirmsatlasē (angļu valodā *pre-fire*) svari [61] un $w_{\text{gen.}}$ ir generatora piešķirtais svars katram notikumam. Mērogošanas koeficienti ir efektivitātes attiecība datos un simulācijās, piemēram, salīdzinot leptonu identifikāciju, jo nelielas neprecizitātes ir vienmēr paredzamas modelēšanas precizitātes dēļ. Detalizēta informācija atrodama atsauce [62], kā arī pilnajā promocijas darbā.

6.4. Signāla reģiona izveide

Notikumiem ir jāiztur vairāki atlasē posmi, pirms tie tiek atlasīti analīzes signāla reģionos (*SR*, angļu valodā *signal region*). Pirmais solis ir **notikuma atlasē**, pēc tam tiek veikta objektu izvēle, tad notikumi tiek kategorizēti, pamatojoties uz objektu kinemātiku vai kandidātu parametriem, un visbeidzot tiek noteikts uzlabotais lēmumu pieņemšanas algoritms (*BDT*, angļu valodā *boosted decision tree*) parametra sliekšnis. Katra posma mērķis ir saudzēt signālu, un atraidīt fona procesus.

Pirmkārt, notikumi tiek atlasīti, ja ir izpildīti stingra darba punkta (*WP*, angļu valodā *working point*) viena leptonu vai (ļoti) ļoti brīvi *WP* divu vai trīs leptonu **atlasē kritēriji** (angļu valodā *High level trigger*). Kritēriji tiek lietoti “vai” kombinācijā, nodrošinot atlasē efektivitāti aptuveni 98 % signāla notikumiem. Atlasot notikumus no vairākām primārajām datu kopām, tiek pievērsta uzmanība, lai tos neuzskaitītu atkārtoti.

6.4.1. Leptonu atlasē un kalibrēšana

Kad notikums ir izturējis **atlasē sistēmu**, ir jānosaka fizikas objekti. Šī analīze izmanto tikai trīs fizikas objektus – mionus, elektronus un daļiņu **strūklas**. Tā kā šis ir pilnīgi jauns pētījums, objektu atlasē tika veidota no nulles, veicot vairākus mazus pētījumus, lai izprastu atšķirību starp signāla un fona leptoniem un strūklām. Detalizētāka informācijai pieejama pilnajā promocijas darba tekstā, šeit sniegts tikai tās kopsavilkums.

Elektronu un mionu atlasē kritēriji ir apkopoti attiecīgi 6.3. un 6.4. tabulā. Vairākās

6.3. tabula

Elektronu atlase

lielums	apraksts	vērtība
p_T	kustības daudzums šķērsplaknē	> 10 GeV
$ \eta $	absolūtais pseidostraujums	$< 2,5$
$ d_{xy} $	abs. IP xy plaknē	$< 0,05$ cm
d_z	IP paralēli kūļiem	$< 0,1$ cm
d/σ_d	3D IP	< 8
I_r	izolācijas nosacījums	$< 0,4 \cdot p_T$
$\sigma_{\eta\eta}$	elektrona superklāstera forma	{0,011/0,030}
H/E	H (E) atstātā enerģija $HCAL$ ($ECAL$)	$< 0,1$
1/E-1/p	E – klāstera enerģija, p – treka kustības daudzums	$> -0,04$
conv.	fotonu pārveides liegums	✓
miss.	trūkstošs signāls pirmajos slāņos	= 0
ID	<i>mvaFall17V2noIso WP[L/90] ID</i>	$\geq WP$ brīvais/ WP 90
ID	<i>MVA ttH</i>	$\geq WP$ brīvais

6.4. tabula

Mionu atlase

lielums	apraksts	vērtība
p_T	kustības daudzums šķērsplaknē	> 10 GeV
$ \eta $	absolūtais pseidostraujums	$< 2,4$
$ d_{xy} $	abs. IP xy plaknē	$< 0,05$ cm
d_z	IP paralēli kūļiem	$< 0,1$ cm
d/σ_d	3D IP	< 8
I_r	izolācijas nosacījums	$< 0,4 \cdot p_T$
ID	PF miona ID	$\geq WP$ vidējais
ID	<i>MVA ttH</i>	$\geq WP$ brīvais

6.5. tabula

Strūklu atlase, ar (*) atzīmēts kritērijs, kas jāizpilda tikai *Run 2* datiem

lielums	apraksts	vērtība
p_T	kustības daudzums šķērsplaknē	> 25 GeV
$ \eta $	absolūtais pseidostraujums	$< 2,4$
<i>btagDeepFlavB</i>	b strūklu marķēšana	$< WP$ brīvais
strūklu ID	objekta kvalitātes ID	✓
strūklu $PU ID^*$	PU slāpēšana	✓
pārklāšanās	neizpildās, ja identificēts leptons $\Delta R < 0,4$	✓

izpētēs tika analizēta dažādu kvalitātes kritēriju ietekme uz signāla atlasī, tika aplūkoti leptonu izolācijas kritēriji, vērtības sadursmes parametriem (*IP*, angļu valodā *impact parameter*), atstātās enerģijas aprakstošie lielumi, kā arī citi kritēriji. Gan elektroniem, gan mioniem ir jāatbilst *ID* kritērijiem, kas izstrādāti attiecīgajās fizikas objektu grupās (*POG*, angļu valodā *physics object group*). Elektroniem ar $p_T > 10$ GeV brīvais *WP* atbilst aptuveni 98 % signāla efektivitātei, bet *WP* 90 tikai 90 % signāla efektivitātei. Mioniem ar $p_T > 20$ GeV izvēlētais *ID* nodrošina 99,5 % signāla efektivitāti. Lai cīnītos pret $t\bar{t}$ fonu, abu tipu leptoniem tiek lietots papildu *ID*, *MVA ttH*. Tā brīvākais *WP* nodrošināja augstāko statistisko nozīmību.

Papildus var izmantot kinemātiskās atšķirības starp signāla un fona leptoniem. Lai gan viens no vektoru bozoniem vienmēr ir ārpus ierastās masas zonas, tādējādi radot maza- p_T leptonus, ir sagaidāms, ka Higgsa bozona sabrukšanas dēļ signāla leptoni ir nedaudz paātrināti (angļu valodā *boosted*). Tajā pašā laikā daudziem fona procesiem leptoni ir ar vājāku p_T spektru. Tādēļ $p_T > 25$ GeV tiek pieprasīts notikuma vadošajam leptonam un $p_T > 15$ GeV otrajam enerģētiskākajam leptonam.

6.4.2. Strūklu un *MET* atlase un kalibrēšana

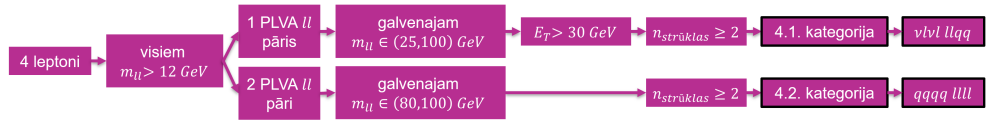
Vektoru bozonu hadronisko sabrukšanas ceļu dēļ daļu strūklas analīzei ir tikpat svarīgas kā leptoni. Ideālā gadījumā 4.1. kategorija novērotu divas strūklas, bet 4.2. kategorija novērotu četras, savukārt sabrukuma kanālā, kur $W \rightarrow \nu l$, daļu enerģijas aiznes neitrino, tādējādi tiek sagaidīta *MET*. Gan strūklām, gan *MET* tiek izvēlēti salīdzinoši zemi atlases kritēriji, lai nediskriminētu signāla notikumus.

6.5. tabulā apkopoti strūklu atlases kritēriji. Strūklām jāizpilda ciešs kvalitātes *ID*, kuram ir 98 % signāla efektivitāte. Lai vēl vairāk uzlabotu signāla atlasī, reģioni, kuros strūklu rekonstrukcija ir problemātiska, netiek ņemti vērā, kā arī netiek ņemtas vērā strūklas, kas pārklājas ar rekonstruētiem signāla leptoniem. *Run 2* strūklām ar $p_T < 50$ GeV tiek pielāgots papildu *PU ID*, kas slāpē strūklas, kas rodas no *PU*. Šim *ID* signāla efektivitāte ir augstāka par 95 % visā detektora tilpumā neatkarīgi no vidējā *PU*. *BTV POG* (angļu valodā *b-tagging and vertexing POG*) ieteiktais *DeepJet* [63] marķētājs tiek pielietots, lai noteiktu strūklas aromātu (angļu valodā *flavour*). Tā brīvākais *WP* pieļauj kļūdainu marķēšanu tikai līdz 10 % no gadījumiem. Kā ierasts *JetMET POG* (angļu valodā *Jet and missing transverse energy POG*) ieteikumi strūklu korekcijām un enerģijas izšķirtspējai tiek ievēroti.

6.4.3. Notikumu klasifikācija

Ja notikums atbilst atlases sistēmas izvēlei, kas aprakstīta 6.2. apakšnodaļā, un četri leptoni atbilst kritērijiem, kas aprakstīti 6.4.1. apakšnodaļā, nākamais solis ir notikuma

kategorizēšana. Trīs $HH \rightarrow WW^*ZZ^*$ sabrukšanas ceļi rezultējas četrū leptonu iegūšanā. Tomēr $Z \rightarrow \nu\nu$ sabrukuma gadījumā ievērojamu daudzumu enerģijas aiznes neitrino. Tāpēc notikumu atlase ir izstrādāta, ņemot vērā tikai divus sabrukšanas kanālus, izveidojot 4.1. un 4.2. kategoriju. Notikums tiek secīgi pārbaudīts 6.2. attēlā uzrādītajiem kritērijiem. Tos veiksmīgi izturot, notikums iekļūst priekšatlases fāzē.



6.2. att. Notikuma kategorizēšanas atlases kritēriji.

Sākotnējās izpētes izmantoja brīvāku invariantās masas logu $m_{ll} \in (60, 120)$ GeV, bet, to nedaudz ierobežojot uz $m_{ll} \in (80, 100)$ GeV, bija iespējams iegūt uzlabotu atlases efektivitāti. Kā arī šādu vērtību izvēle atvieglos analīzes kombināciju ar citām analīzēm, jo *CMS* HH multileptonu analīzes [11] četrū leptonu kategorija pieprasa inversas vērtības. Pieprasīt vismaz četras *strūklas* 4.2. kategorijā pierādījās neefektīvi, savukārt, pieprasot vismaz divas, nodrošināja augstāku atlases efektivitāti. Savukārt 4.1. kategorijai pieprasīt abas divas no sagaidāmajām *strūklām* izrādījās efektīvi, tādēļ šis kritērijs netika mainīts.

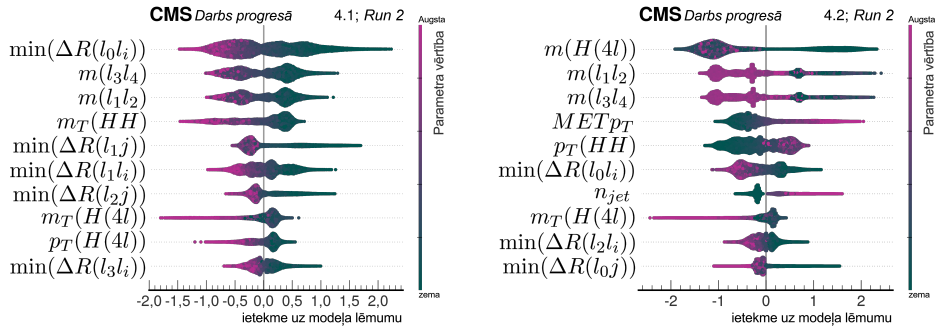
6.4.4. *BDT* parametrs

Izmantojot *XGBoost* metodi [64], tika izveidoti *BDT* modeļi, kas ļauj iegūt parametru ar izteiktu fona diskriminējošu īpašību. Katrai kategorijai un datu ievākšanas periodam tiek trenēts savs *BDT* modelis, ar kuru iegūt parametra sadalījumu. Analizējot šos sadalījumus, tiek novērtēts vērtības sliekšnis, lai klasificētu notikumu *SR*. Sīkāka informācija pieejama pilnajā promocijas darbā.

Pirmais solis bija optimālu ievades datu ieguve *BDT* modeļu apmācībai. Signālam tika izmantotas īpašas $HH \rightarrow WW^*ZZ^*$ simulācijas ar vismaz četriem leptoniem sabrukšanas rezultātos. Lai palielinātu datu kopu, uz kuras trenēt modeli, dati no viena vākšanas perioda tika apvienoti, jo netika konstatētas būtiskas atšķirības starp tiem attiecībā uz mainīgo sadalījumu. Līdzīgi fona procesu simulāciju dati viena datu ievākšanas perioda ietvaros tika apkopti, lai palielinātu statistiku. Kopumā ir pieejams mazāk notikumu, lai apmācītu *BDT* 4.1. kategorijā, salīdzinot ar 4.2. kategoriju, tādejādi katrai kategorijai ir atsevišķs *BDT* modelis, jo apvienotais modelis nav pietiekami iedarbīgs.

Otrajā solī *SHAP* vērtības [65] tika izmantotas, lai atrastu minimālo pietiekamo 25 augsta līmeņa ievades parametru kopumu, kas apraksta signāla notikumiem raksturīgās kinemātiskās īpašības. Izmantotais komplekts abām kategorijām ir redzams pilnajā promocijas darbā, savukārt 10 vērtīgāko parametru *SHAP* formas ir redzamas 6.3 attēlā *Run 2 BDT* modeļiem. 4.2. kategorijas *BDT* modelis īpaši labi prot izmantot Higgs

bozona un HH īpašības, savukārt 4.1. kategorijas BDT modelis ir iemācījies atpazīt leņķiskos attālumus starp objektiem. Kopumā vairākām iezīmēm ir izteikti polāra forma ar salīdzinoši lielu ietekmi.



(a) 4.1. kategorijas BDT modelis

(b) 4.2. kategorijas BDT modelis

6.3. att. Top 10 BDT parametru $SHAP$ formas $Run 2$ datu ievākšanas perioda BDT modeļiem.

Trešajā solī BDT arhitektūra tika optimizēta, izmantojot k -fold cross-validation hiperparametru kopas, lai atrastu optimālāko vērtību kopu, kas sniedz viszemāko vidējo kļūdu. Šie parametri ir sīki izklāstīti pilnajā promocijas darbā. Lai novērtētu BDT veiktspēju, kā rādītāji tika izmantota uztvērēja darbības raksturlīkne (angļu valodā receiver operating characteristic) un laukums zem tās (angļu valodā area under curve). 4.1. kategorijas BDT konverģence aizņēma mazāk soļu, bet 4.2. kategorijas BDT sasniedza zemākas zudumu funkcijas vērtības. Visiem BDT laukums zem līknes bija lielāks par 0,9.

6.6. tabula

BDT parametra sliekšnis un relatīvās nenoteiktībās analizētajās kategorijās un gados; relatīvā nenoteiktība signāla MC simulācijām apzīmēta ar S_r , savukārt fona procesiem ar B_r , relatīvā nenoteiktība statistiskajai jutībai uzrādīta piektajā kolonnā

kategorija	sliekšnis	S_r , %	B_r , %	$(\frac{S}{\sqrt{B}})_r$, %	gads
4.1.	0,6	15,23	14,53	16,88	2016
4.1.	0,7	14,11	18,94	17,00	2017
4.1.	0,6	12,22	25,59	17,70	2018
4.1.	0,4	7,02	24,27	14,02	2022
4.1.	0,2	5,11	23,34	12,74	2023
4.2.	0,8	12,85	3,24	12,95	2016
4.2.	0,9	17,83	3,70	17,92	2017
4.2.	0,8	13,31	7,37	13,81	2018
4.2.	0,4	5,15	17,62	10,21	2022
4.2.	0,8	8,01	7,93	8,93	2023

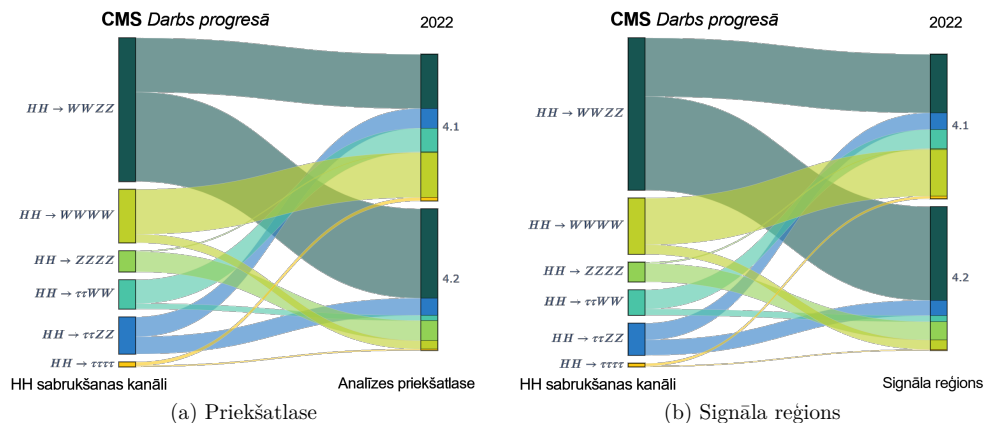
Ceturtajā solī BDT parametra sliekšnis tika izvērtēts, lai klasificētu notikumu SR . Tā kā pieejamais MC datu kopas lielums bija galvenais ierobežojošais faktors tā noteikšanai,

sliksni atkārtoti novērtē katrā gadā, tiecoties iegūt augstāko statistisko nozīmīgumu ar kontrolētu MC nenoteiktību. Šīs vērtības ir apkopotas 6.6. tabulā.

Visbeidzot, tiek novērtēta BDT sliksņa ietekme. Piemēram, datu pārpilnākajā ērā (2018. gads) 4.1. kategorijas BDT samazināja signāla daudzumu par 22 %, vienlaikus samazinot fonu par aptuveni 81 %, un 4.2. kategorijas BDT samazināja signāla daudzumu par 26 %, vienlaikus samazinot fonu par aptuveni 97 %. Līdzīgi rezultāti ir sasniegti arī citos gados. Detalizētāks apraksts atrodams pilnajā promocijas darbā. Dažādu procesu ieguldījums katrā kategorijā un SR ir uzrādīts 7. nodaļā.

6.5. Citu HH sabrukšanas ceļu iekļaušana

Lai arī $HH \rightarrow WW^*ZZ^*$ kanāls ir visbagātīgāk sastopamais abos SR , citi HH sabrukšanas kanāli arī ir klātesoši, kā redzams 6.4. attēlā. 2022. gada datu piemērā, $HH \rightarrow WW^*ZZ^*$ aizņem apmēram 41 % un 63 % attiecīgi 4.1 un 4.2. kategorijā. Priekšatlasē $HH \rightarrow WW^*WW^*$ ir līdzīgā daudzumā kā $HH \rightarrow WW^*ZZ^*$ 4.1. kategorijā, savukārt SR tas ir samazinājies līdz 32 %. Tajā pašā laikā 4.2. kategorijā $HH \rightarrow \tau^+\tau^-ZZ^*$ un $HH \rightarrow ZZ^*ZZ^*$ nodrošina apmēram 10 % signāla notikumu.



6.4. att. Relatīvs salīdzinājums dažādu HH sabrukuma ceļu uztveršanai analīzes kategorijās priekšatlases fāzē un signāla reģionā, 2022. gada piemērs.

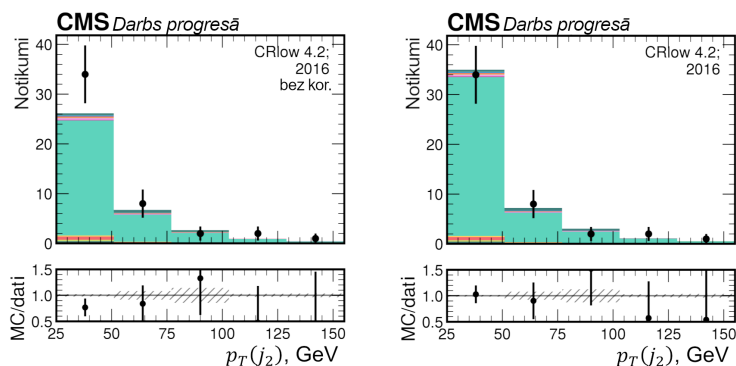
Īpaši izgatavotais BDT ir ļāvis noturēt jutību dažādām HH sabrukšanām, nezaudējot jutību uz $HH \rightarrow WW^*ZZ^*$ sabrukšanas kanālu. Izvērtējot dažādo sabrukšanas kanālu ieguldījumu abos SR , situācija ir uzlabota, jo relatīvais $HH \rightarrow WW^*ZZ^*$ ieguldījums ir palielināts, kaut arī absolūtās vērtības ir sarukušas. Šie rezultāti nodrošina pamatu jautājumam, vai signāla un fona notikumu atdalīšana varētu tikt veikta vēl efektīvāk. Vēl jo vairāk, vai $HH \rightarrow WW^*ZZ^*$ sabrukšanas kanāls būtu jāanalizē atsevišķi vai kombinācijā ar citiem sabrukšanas kanāliem, kuros iegūst vairākus leptonus.

6.6. Eksperimentālo datu un simulāciju sakritība

Lai validētu simulāciju modelēšanu un izveidotās kategorijas, eksperimentālo datu un MC simulāciju salīdzinājums ir veikts kontroles reģionos (CR , angļu valodā *control region*) gan augsta, gan zema līmeņa parametriem. Katrai kategorijai ir izveidoti divi CR , tie ir tuvi SR definējumam, bet ar invertētu

- BDT parametra sliekšni (CR_{low});
- nepieciešamo strūklu skaitu (CR_{no}).

Acīmredzams, ka CR_{no} nodrošina vairāk notikumu nekā CR_{low} , bet šī fāžu telpa ir tālāka no SR fāžu telpas. Arī 4.1. kategorijas CR ir ieguldījums no dažādiem fona procesiem, bet 4.2. kategorijas kontroles reģioni ir ZZ procesa dominēti.



6.5. att. Custības daudzums šķērsplaknē pirms un pēc ZZ modelēšanas korekcijas otrajai enerģētiskākajai strūklai notikumos, piemērs no CR_{low} 4.2, 2016.

Lai arī visos analizētajos gados tika novērota lielākoties laba atbilstība lielumu sadalījumu formas ziņā, vairumā no 4.2 CR tika novērots ievērojams datu pārpalikums, kas liecina par sliktu MC modelēšanu, visticamāk, nākam no ZZ procesa, īpaši strūklu modelēšanā daudzstrūklu notikumos. Tāpēc tika izveidota datos balstīta korekcija ZZ modelēšanai, pamatojoties uz otrās un trešās (kārtotas pēc p_T lieluma) strūklas p_T . Sīkāka informācija atrodama pilnajā promocijas darbā. Piemērs šķērsvirziena kustības daudzuma sadalījumam pirms un pēc ZZ modelēšanas korekcijas strūklām ir parādīts 6.5. attēlā. Korekcija uzlabo datu un MC sakritību, tikai 2017. gadā saglabājoties nelielai neatbilstībai.

6.7. Nenoteiktību novērtēšana

Nevienu mērījumu nevar citēt bez tā nenoteiktības. Lai gan šis mērījums ir pilnīgi statistiski ierobežots, ir jāizprot dažādi nenoteiktību radoši avoti. Šajā promocijas darbā

ir ņemti vērā gan teorētiskās nenoteiktības avoti, gan eksperimentālie avoti, no kuriem lielākā ietekme ir elektronu ID efektivitātei (zem 10 %, galvenokārt ciešot no sliktas efektivitātes tieši maza p_T elektroniem), PU (zem 5 %) un b strūklu marķēšanas efektivitātei (zem 3 %). Plašāka informācija pieejama pilnajā promocijas darbā.

6.8. Robežas mērījums

Promocijas darba analīzes galvenais mērķis ir aprēķināt izslēgšanas robežu HH rašanās signālam, μ , to analizējot caur $HH \rightarrow WW^*ZZ^*$ sabrukšanas kanālu. Robežas aprēķināšanai izmantota CL_S metode [66], kas ir modificēta frekventista pieeja un tiek apzīmēta ar CL . Tās mērīšanai jāuzbūvē statistiskais modelis.

Statistiskā analīze tiek veikta, izmantojot CMS statistiskās analīzes programmatūru $COMBINE$ [67]. Tā ļauj veidot modeli, izmantojot paredzamos un novērotos lielumus, iekļaujot marginālos parametrus (angļu valodā *nuisance parameter*), veicot statistiskos testus un visbeidzot nodrošinot rīkus modeļa un veikto testu pārbaudei. Nedaudzo paredzamo notikumu dēļ tiek veikts vienkāršs skaitīšanas eksperiments. Tests ir izveidots ar diviem SR un diviem CR bozonu pāru modelēšanas mērogošanai, kā rezultātā tiek izveidoti četri iedalījumi. Lai vieglāk attiecinātu nenoteiktības, fona ieguldījumi ir iedalīti četrās grupās: (H) procesiem ar viena Higa bozona izcelsmi, (VV) bozonu pāru procesiem, galvenokārt ZZ , (t) procesiem ar virsotnes kvarku saistītu izcelsmi, galvenokārt $t\bar{t}$ un ($citi$) citiem fona procesiem.

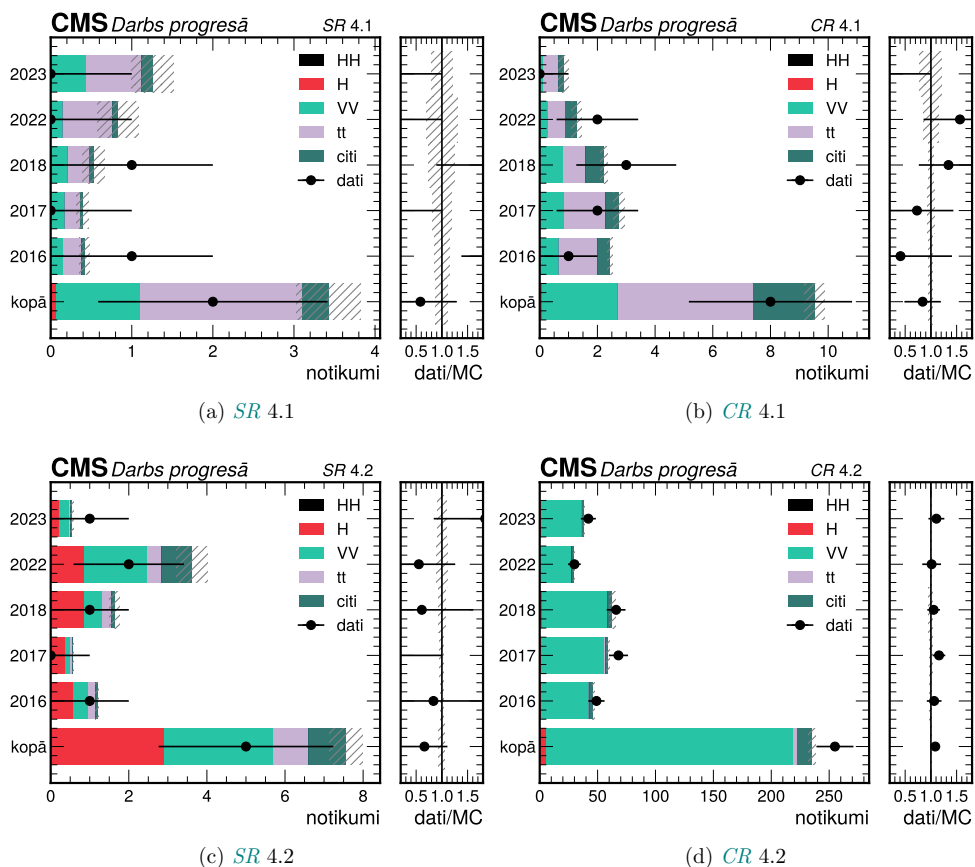
Kā testa statistika izmantota profila varbūtības attiecība (angļu valodā *profile likelihood ratio*), q_μ . Lai izvairītos no mazu μ vērtību izslēgšanas, vienkāršā attiecība tika aizstāta ar posmotu funkciju, kā parādīts vienādojumā (6.2), kur $\hat{\mu}$ ir maksimālās iespējamības novērtētājs (angļu valodā *estimator*) un $\hat{\nu}$ ir marginālie parametri, kas maksimizē varbūtības funkciju, \mathcal{L} . Šī definīcija ietver to, ka HH signāla stiprums fizikāli nevar būt negatīvs.

$$q_\mu = \begin{cases} -2 \log \left(\frac{\mathcal{L}(\mu, \hat{\nu}(\mu))}{\mathcal{L}(\mu = 0, \hat{\nu}(\mu = 0))} \right) & \hat{\mu} < 0 \\ -2 \log \left(\frac{\mathcal{L}(\mu, \hat{\nu}(\mu))}{\mathcal{L}(\hat{\mu}, \hat{\nu}(\mu))} \right) & 0 < \hat{\mu} < \mu \\ 0 & \mu < \hat{\mu} \end{cases} \quad (6.2)$$

Statistikas modeli testē, novērtējot marginālo parametru ietekmi uz HH signāla stipruma piemērotāko vērtību. Tas tika veikts, nelietojot testa statistiku (ar jebkādiem priekšnosacījumiem), bet vienkārši maksimizējot varbūtību attiecību. Pirmajā solī šie testi tika veikti ar pseidodatiem, tikai vēlāk ar eksperimentā iegūtajiem. Kopumā nav novērojama spēcīga marginālo parametru nesakritība vai anormāla ietekme vai vilkme (angļu valodā *pull*), tādējādi motivējot modeļa lietojumu. Vairāk detaļas par statistisko modeli atrodamas pilnajā promocijas darbā.

7. REZULTĀTI UN PERSPEKTĪVA

Tā kā $HH \rightarrow WW^*ZZ^* \rightarrow 4l$ analīzes stratēģija ir apkopota, ir laiks novērtēt tās rezultātus. Analīzes mērķis ir noteikt augšējo robežu HH signāla stiprumam, izmantojot datus, kas iegūti ar CMS detektoru *Run 2* un pirmajos divos *Run 3* gados (2022 un 2023), rezultējoties kopējā mirdzumā ap 200 fb^{-1} . Paredzamo un novēroto notikumu salīdzinājums pa kategorijām ir parādīts 7.1. attēlā. Tā kā BDT sliekšnis ir atšķirīgs katrā gadā, sagaidāmais notikumu skaits atsevišķi SR un CR nav tieši proporcionāls ievāktajam mirdzumam.



7.1. att. Sagaidāmie un novērotie notikumi, attēloti izceļot gadus un SR vai CR_{low} .

Kopumā ir novērojama laba datu un simulāciju atbilstība. Mazāk par pieciem notikumiem ir sagaidāmi SR 4.1, bet tikai divi ir novēroti. Savukārt CR 4.1 apmēram astoņi notikumi ir sagaidāmi un astoņi ir novēroti. Līdzīgi arī 4.2. kategorijā, kur mazāk par astoņiem notikumiem bijuši sagaidāmi, bet pieci novēroti SR , savukārt CR apmēram 220

bija sagaidīti un vairāk nekā 250 novēroti. Dominējošie fona procesi *SR* 4.1 un *CR* 4.1 ir no $t\bar{t}$ grupas, savukārt dominējošais fona process *SR* 4.2 nāk no H grupas, kam seko bozonu pāru ieguldījums. Bozonu pāru grupas procesi ir dominējošie *CR* 4.2.

7.1. tabula

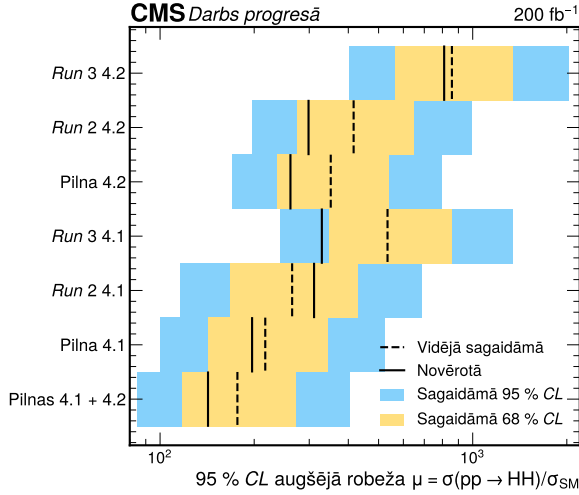
Novērotie un sagaidāmie notikumi dažādiem procesiem signāla reģionos, apvienoti visiem gadiem, rezultējoties ap 200 fb^{-1}

process	<i>SR</i> 4.1, notikumi	<i>SR</i> 4.2, notikumi
$HH \rightarrow WWZZ (\times 100)$	$0,798 \pm 0,080$	$1,136 \pm 0,089$
$HH \rightarrow WWWW (\times 100)$	$0,752 \pm 0,074$	$0,117 \pm 0,028$
$HH \rightarrow ZZZZ (\times 100)$	$0,002 \pm 0,002$	$0,156 \pm 0,035$
$HH \rightarrow WW\tau\tau (\times 100)$	$0,412 \pm 0,059$	$0,070 \pm 0,026$
$HH \rightarrow ZZ\tau\tau (\times 100)$	$0,183 \pm 0,038$	$0,238 \pm 0,048$
$HH \rightarrow \tau\tau\tau\tau (\times 100)$	$0,046 \pm 0,006$	$0,006 \pm 0,002$
$HH \rightarrow bbZZ (\times 100)$	-	$0,043 \pm 0,002$
kopējais sagaidāmais signāls ($\times 100$)	$2,19 \pm 0,13$	$1,76 \pm 0,11$
Higgs bozona procesi	$0,06 \pm 0,00$	$2,90 \pm 0,03$
dibozoni, galvenokārt ZZ	$0,97 \pm 0,10$	$2,26 \pm 0,06$
$t\bar{t}$ (un t) procesi	$2,77 \pm 0,40$	$0,91 \pm 0,23$
citi fona procesi	$0,40 \pm 0,02$	$0,96 \pm 0,34$
kopējais sagaidāmais fons	$4,54 \pm 0,42$	$7,66 \pm 0,42$
dati	2	5

Signāla un fona procesu kopējais paredzamais ieguldījums *SR* visos piecos datu ieguves gados ir uzrādīts 7.1. tabulā. Redzams, ka signāla notikumi ir aptuveni 200 reizes mazāk nekā fona notikumi *SR* 4.1 un aptuveni 400 reizes mazāk *SR* 4.2. Grupai $t\bar{t}$ ir lielāka statistiskā nenoteiktība, jo novērtēšanai ir pieejams mazs skaits notikumu.

Paredzamās un novērotās HH rašanās signāla stipruma augšējās robežas katrā datu ievākšanas periodā un kategorijā ir apkopotas 7.2. attēlā. *SR* 4.1 nodrošina zemāku augšējo robežu galvenokārt relatīvi vājāku fona procesu dēļ, un līdzīgi *Run 2* ir jutīgāks augstāka integrētā *mirdzuma* dēļ. Attēlā nav parādīts, bet stingrākais ierobežojums ir noteikts, izmantojot datus no datiem bagātākā perioda – 2018. gada. **Abu kategoriju kombinācija ļauj izvirzīt novēroto (paredzamo) 95 % *CL* augšējo robežu 142,3 (176,8) HH signāla stiprumam.** Novērotā robeža ir zemāka nekā gaidīts, jo *SR* vidēji novērots mazāk datu nekā gaidīts. Tomēr šī nesakritība ir vienas standartnovirzes robežās no paredzamās vērtības.

Nav iespējams veikt tiešu salīdzinājumu ar alternatīvām vai vecākām analizēm, jo šī tāda ir pirmā. Promocijas darba rakstīšanas brīdī tikai dažas analīzes ir apvienojušas datus no pilna *Run 2* un pirmajiem diviem *Run 3* gadiem. Tuvāko salīdzinājumu iespējams veikt ar *CMS HH* multileptonu analīzi [11], precīzāk tā četru leptonu kategoriju, kas izveidota $WWWW \rightarrow \nu l \nu l \nu l \nu l$ sabrukšanas kanālam. Analizējot datu kopu ar 138 fb^{-1} , šis kanāls izvirzījis novēroto (paredzamo) 95 % *CL* augšējo robežu 56,7 (76,8) HH signāla stiprumam, tādējādi padarot šajā analizē iegūtos rezultātus no kanāla ar daudzreiz ma-



7.2. att. Sagaidāmās un novērotās augšējās robežas signāla stiprumam μ katrā datu ievākšanas periodā un kategorijā, kā arī to kombinācijās.

zāku BR iespaidīgus! Pašsaprotami, ka $HH \rightarrow WW^*ZZ^* \rightarrow 4l$ nekļūs par vadošo kanālu HH analizēm, bet noteikti būs iederīgs nākotnes kombinācijās.

Lai modelī novērtētu statistiskos ierobežojumus, mērījums tiek atkārtots, neiekļaujot **marginālos parametrus**. 7.2. tabulā ir apkopotas robežas, kas aprēķinātas, izmantojot reducēto (neiekļaujot **marginālos parametrus**) un pilno modeli. Salīdzinot robežas, var kvantificēta jutīguma samazināšanos un secināt, ka modelis ir pilnībā statistiski ierobežots, jo aprēķināto robežu atšķirība ir zem pusprocenta. Respektīvi, lai uzlabotu aprēķinu, jāiegūst vairāk analizējamo datu, nevis jāsamazina **marginālo parametru** ietekme.

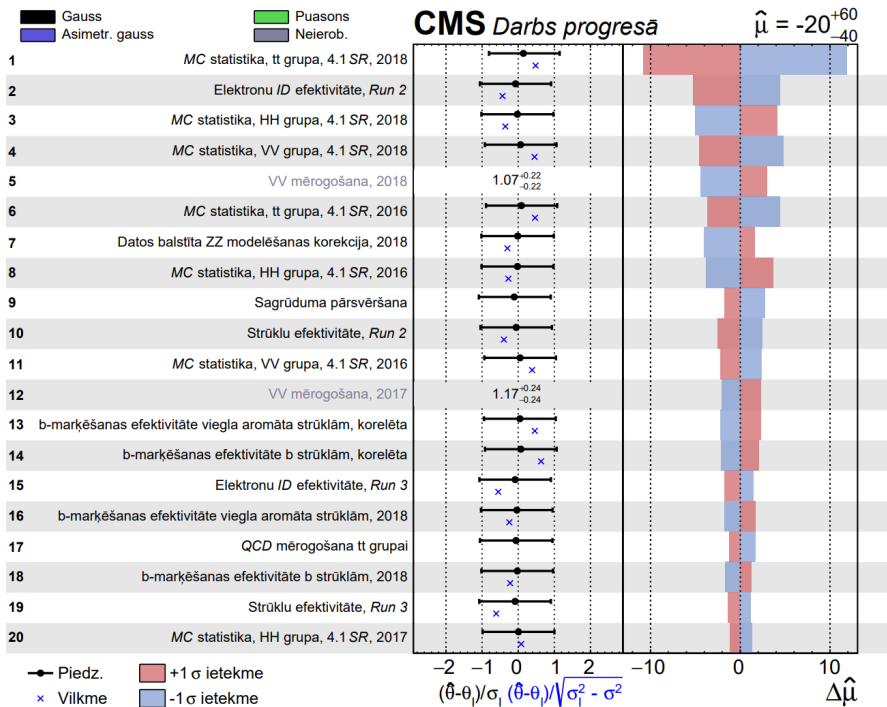
7.2. tabula

Salīdzinājums sagaidāmajai un novērotajai 95 % CL robežai HH signāla stiprumam, salīdzinājums statistikas modeļiem

scenārijs	sagaidāmā robeža	novērotā robeža
tikai statistiskais modelis	169,5	135,8
pilnais modelis	176,8	142,3

Lai gan mērījums ir statistiski ierobežots, ir lietderīgi saprast, kuri ir dominējošie **marginālie parametri** un kā tos mazināt, lai tad, kad ir pieejama lielāka datu kopa, **marginālie parametri** nebūtu šīs analīzes vājais punkts. 7.3. attēlā novēroto **marginālo parametru** ietekme ir parādīta attiecībā uz HH signāla stiprumu. Spēcīgākie ierobežojumi nāk no MC statistikas, īpaši 2018. gada SR 4.1, tai seko elektronu identifikācijas efektivitāte un VV grupas mērogošana. Šie rezultāti skaidri liecina par ierobežoto datu kopu. Kopumā modeļa optimizētās vērtības (punkti) nav tālu novirzītas no sākuma vērtībām, un kļūdu robežās sakrīt. Arī parametru **vilkmes** (krustiņi) ir mēšanas un centrētas apkārt vidējai vērtībai. Nosakot **marginālo parametru** ietekmi, *a priori* nav piemērots un signāla stip-

rumam tiek iegūta negatīva, nefizikāla signāla stipruma vērtība. Tomēr tas nav nekas neierasts, veicot aprēķinus fizikas robežas tuvumā. Detalizētāka informācija atrodama pilnajā promocijas darbā.



7.3. att. Ietekmīgāko novēroto marginālo parametru attēlojums μ aprēķinam.

7.1. Projektija HL-LHC ērai un kombinācijas ar citiem kanāliem

HL-LHC ēra nodrošinās integrēto mirdzumu līdz 3 ab^{-1} , ja masas centra enerģija ir vismaz 13,6 TeV, tāpēc ir vērts noskaidrot, kā tiktu ietekmēta aprēķinātā robeža. Ir vispāratzīts, ka šāds būtisks datu pieaugums ļaus precīzi izmērīt retus procesus, piemēram, HH rašanos. Vienkārša ekstrapolācija ir izmantota, mērogojot sagaidāmo notikumu skai-

7.3. tabula

Sagaidāmie notikumi 3 ab^{-1} datu kopai signāla un kontroles reģionos

process	SR 4.1	SR 4.2	CRLow 4.1	CRLow 4.2
signāls ($\times 100$), notikumi	$34,05 \pm 1,95$	$26,55 \pm 1,65$	$7,96 \pm 1,83$	$12,14 \pm 2,63$
fons, notikumi	$68,1 \pm 6,3$	$114,9 \pm 6,3$	$122,4 \pm 15,9$	3298 ± 395

tu signāla un fona notikumiem uz 3 ab^{-1} datu kopu un pieņemot tādas pašas relatīvās

nenoteiktības. Sagaidāmie notikumi abos SR un CR , kas tiek izmantoti robežas aprēķinam, ir uzrādīti 7.3. tabulā. Ekstrapolācija ļauj izvirzīt 95 % CL sagaidāmo augšējo robežu 51,5 HH signāla stiprumam. Pat ar šādu datu kopas pieaugumu aprēķinātā robeža ir vājāka nekā tā, kas aprēķināta $CMS HH$ multileptonu analīzes kombinācijā, izmantojot tikai $Run\ 2$ datus [11]. Tādējādi tiek stiprināta ideja, ka $HH \rightarrow WW^*ZZ^*$ kanāls varētu būt viens no vairākiem sabrukšanas kanāliem iekļauts vienā kopīgā analizē, nevis tikt analizēts tikai atsevišķi.

Tā kā $HH \rightarrow WW^*ZZ^*$ analīzes stratēģija paredz, ka $HH \rightarrow WW^*ZZ^* \rightarrow 4l$ kanāls tiek kombinēts ar citiem $HH \rightarrow WW^*ZZ^*$ kanāliem, lai iegūtu augstāku jutīgumu, šai kombinācijai ir veikts $HL-LHC$ novērtējums. Izmantojot pilnu $Run\ 2$ datu kopu, trīs leptonu kategorija ir izvirzījusi novēroto (paredzamo) 95 % CL augšējo robežu 410 (240) HH signāla stiprumam [68]. $HL-LHC$ aprēķinam šis rezultāts tiks ekstrapolēts, pamatojoties uz integrētā $mirdzuma$ pieaugumu. Tā kā gan piecu, gan sešu leptonu kategoriju analīzes vēl nav gatavas robežas aprēķinam, kategoriju sākotnējā jutība (6.1. tabula) tiks ekstrapolēta ar pieņēmumu, ka jutība ir apgriezti proporcionāla signāla stiprumam. Visbeidzot, visas kategorijas tiek apvienotas, iegūstot kombinācijas rezultātu.

7.4. tabula

Sagaidāmās augšējās robežas novērtējums signāla stiprumam $\mu\ 3\ ab^{-1}$ datu kopā

kategorija	2.	3.	4.	5.	6.	kombinācija
robeža	3494	46,5	51,5	2038	2953	34,5

Sekojošai stratēģijai, $3\ ab^{-1}$ datu kopā apvienojot iepriekšminētās $HH \rightarrow WW^*ZZ^*$ kategorijas, iespējams noteikt paredzamo 95 % CL augšējās robežas novērtējumu 34 HH signāla stiprumam. Katras kategorijas ieguldījums attēlots 7.4. tabulā. Ir skaidrs, ka šī pieeja precīzi neatspoguļo nenoteiktību avotus un to saikni, bet ir pietiekami spēcīga, lai sniegtu aptuvenu novērtējumu, kas motivē turpmākos pētījumus. Arī citu WW^*ZZ^* kanālu izmantotie jutīgumu novērtējumi ir nedaudz novecojuši, un gaidāms būtisks uzlabojums, attiecīgās analīzes attīstot. Turklāt $HH \rightarrow WW^*ZZ^*$ kanāla iespējama asimilācija $CMS HH$ multileptonu analīzē varētu nodrošināt vēl lielāku kombinēto jutību un pilnīgu kategoriju pārklāšanās samazināšanu.

8. SECINĀJUMI UN TURPMĀKIE PĒTĪJUMA VIRZIENI

Promocijas darba ietvaros veikts apjomīgs darbs *DCS* un *DSS* izstrādei *MTD* testu stendam, kā arī izstrādāta jauna fizikas analīze, kas lietota rezultātu iegūšanai $HH \rightarrow WW^*ZZ^* \rightarrow 4l$ sabrukšanas kanālā. Definētie uzdevumi ir izpildīti, tēzes aizstāvētas un darbā aprakstītie rezultāti motivē izvirzīt vairākus secinājumus.

1. Literatūras analīze, kas apkopota 2. nodaļā, norāda, ka HH rašanās mērījumi ļauj pētīt Higgs lauka potenciālu un eksperimentāli ierobežot Higgs bozona pašmijiedarbības parametru.
2. Pēdējo gadu laikā HH rašanās kļuvusi par ar vien aktīvāku izpētes jomu *LHC* fizikas programmā, to īpaši uzsver HH rašanās apkopojšie raksti, publicēti gan no *CMS*, gan *ATLAS* sadarbības.
3. Specializēta $HH \rightarrow WW^*ZZ^* \rightarrow 4l$ sabrukuma kanāla analīze ir papildinoša jau esošajiem HH mērījumiem, īpaši tādēļ, ka šāds kanāls iepriekš nav ticis pētīts.
4. Kā apkopots 3. un 4. nodaļā, *CERN* paātrinātāju komplekss ar *LHC* nodrošina augstas enerģijas un liela mirdzuma pp sadursmes, un daudzfunkcionālais *CMS* detektors ļauj rekonstruēt un identificēt daudzus sabrukšanas rezultātus, tādējādi padarot to par izcilu eksperimentālo vidi $HH \rightarrow WW^*ZZ^* \rightarrow 4l$ kanāla analīzei.
5. Jauna $HH \rightarrow WW^*ZZ^* \rightarrow 4l$ sabrukšanas kanāla analīze ir izveidota, un 6. nodaļā aprakstīta tās stratēģija, iekļaujot optimizāciju notikumu un objektu atlases, kategorizēšanas un citiem soļiem.
6. Veiktā $HH \rightarrow WW^*ZZ^* \rightarrow 4l$ kanāla analīze ļauj noteikt novēroto (paredzamo) 95 % *CL* augšējo robežu 142,3 (176,8) HH signāla stiprumam. Kļūdu robežās rezultāts ir saskanīgs ar *SM* paredzējumu.
7. Izstrādātais analīzes ietvars ir lietojams nākotnes pētījumiem četru leptonu kanālā un vispārināms $HH \rightarrow WW^*ZZ^*$ analīzei lielākām datu kopām, motivējot tādu veikt *HL-LHC* ērā.
8. 5. nodaļā aprakstītais darbs atspoguļo izstrādāto *DCS* vienam no *MTD* testu stendiem. Tā implementēta, sekojot *CMS* vadlīnijām, un sasniegusi visus definētos mērķus. Sistēma kalpo kā *MTD DCS* prototips.

8.1. Turpmākie pētījuma virzieni saistībā ar vadības sistēmu

Tagad, kad *HL-LHC* tuvojas arvien straujāk, darbs pie *DCS* kļūst arvien nozīmīgāks. 5.2. apakšnodalā jau ir detalizēti aprakstīti trīs izveidotās *DCS* prototipa attīstības scenāriji. Projekta sekmīga turpināšana ir izšķiroša ne tikai *MTD* testu stendam, bet arī virzībā uz pilnā detektora *DCS*. Tai būs jāturpina nodrošināt eksperimentālās komandas vajadzības, kā arī jāievēro noteiktās izstrādes vadlīnijas, lai izveidotu pašpietiekamu, uzticamu un stabilu sistēmu. Spriežot pēc iepriekšējās pieredzes, šādu īpašību nodrošināšana ir sasniedzama.

8.2. Turpmākie pētījuma virzieni *HH* analīzei

Šī promocijas darba laika grafiks ļāva iekļaut pilnu *Run 2* un tikai daļēju *Run 3* datu kopu. Tagad, kad *Run 3* ir tuvu tā beigām, ir skaidrs, ka, veicot atkārtotu *Run 2 + Run 3* analīzi, šajā analīzē dominētu dati no trešā [datu ievākšanas perioda](#). Turklāt integrētais [mirdzums](#) tiktu vairāk nekā divkāršots, nodrošinot lielisku atspēriena punktu jebkurai *HH* rašanās analīzei.

Trešais [datu ievākšanas periods](#) ir nodrošinājis daudzus tehniskus uzlabojumus daļiņu rekonstrukcijā, identifikācijā un [marķēšanā](#), no kuriem šī analīze varētu gūt labumu. Izvēloties jauno [strūklu](#) marķētāju [46], tiks sasniegta augstāka tās efektivitāte un retāka nepareizā [marķēšana](#). Tas ļautu atvieglot prasības attiecībā uz [strūklu](#) p_T , tādējādi atgūstot vairāk signāla, vienlaikus nezaudējot precizitāti. Tāpat būtu jāpievērš uzmanība leptonu identifikācijai. Palielinoties absorbētajam [mirdzumam](#), detektora materiāls ir saskāries ar ievērojamu radiācijas līmeni, gūstot bojājumus. Tādējādi analīze gūtu labumu, izmantojot īpašu *ID*, kas apmācīts uz zema p_T elektroniem, noturot augstu signāla efektivitāti. Šīs analīzes jutīgums ir ļoti atkarīgs no tās.

Visbeidzot, būtu patiesi interesanti pavērt vēl divus $HH \rightarrow WW^*ZZ^* \rightarrow 4l$ analīzes aspektus. Pirmais būtu jaunas fizikas scenāriju pētījumi, tos varētu veikt, izstrādājot īpašus *BDT* modeļus, kas trenēti scenāriju atpazīšanai. Izmantojot to rezultātus, būtu iespējams novērtēt *HH* rašanās augšējās robežas, ko paredz citas teorijas. Otrkārt, būtu interesanti analizēt citus, retāk izplatītus *HH* rašanās veidus.

Kopumā pārskatāmā nākotnē paredzētie datu ieguves periodi nodrošina aizraujošus nākamus gadus *HH* rašanās analīzēm un to analizatoriem. Tas patiešām būs kopīgs darbs, jo *HH* rašanās atklāšana būs tuvāk sasniedzama, strādājot kopā, apvienojot pēc iespējas vairāk sabrukšanas kanālu un to analīzes, tādējādi parādot, ko nozīmē strādāt augstas enerģijas daļiņu fizikas laukā. Lai gan $HH \rightarrow WW^*ZZ^*$ sabrukšanas kanālam šajā meklēšanā nebūs centrālas nozīmes, tas būs papildinošs un vērtīgs. Esmu priedīgi satraukta redzēt, ko nesīs nākamie gadi, un kopā ar kopienu svinēšu *HH* rašanās atklājumu, kad pienāks laiks.

PATEICĪBAS

Kā man gribētos teikt, ka šie studiju gadi ir bijuši tikai un vienīgi saules pielieti un līksmi. Ja man tie būtu jāatkārto, es pieņemtu daudzus citus lēmumus (“pēc kara visi gudri”), tiecoties būt klātesošāka un patiesi novērtējot brīnišķīgos cilvēkus man apkārt. Jāatzīst, ka arī šis pateicību saraksts kopsavilkumā ir saīsināts, tādēļ nekautrējies iemest aci pilnajā disertācijā, ja kāds vārds šķiet pazudis!

Pirmais milzīgais paldies tiek veltīts maniem darba vadītājiem. No visas sirds paldies Tev, **Kārlī**, ka vienmēr esi bijis mūsu bāka traki bangojošajā jūrā, kaut man bieži ir gribējies, lai esi mums vismaz piecās kopijās. Paldies par atbalstu un padomiem! Paldies, **Toni**, ka apmācīji mani statistikas policijai, par Tavu entuziasmu un laiku pat tad, kad ceļoji pa dažādām pasaules laboratorijām. Paldies, **Frank**, par Tavu rāmo un iedrošinošo raksturu, ka esi bijis vispilnīgākais *CMS* un *CERN* informācijas avots!

Paldies šo gadu katalistiem! Paldies, **CERN**, visbrīnišķīgākais no ciemiem, ka savedi kopā un ievēdi manā dzīvē tik daudz brīnišķīgu un spožu cilvēku! Paldies, **CMS**, ka parādīji, kā ir strādāt daļiņu fizikā un milzīgā sadarbībā! Paldies, **LLR**, par viskaismīgākajām fizikas diskusijām kādas man jebkad bijušas divu nedēļu mērogā! Paldies, **DTF**, ka adoptēji mazo DFPTi salīņu!

Ak, biedri ierakumos, paldies par morāles uzturēšanu! Mīlais **419.**, paldies par pusdienām. **Normund**, man prieks, ka izdzīvojām elektronu uzdevumu. Es šaubījos. Paldies, **Lazar**, ka ticēji slidošanai, paldies, **Dace**, ka piekriti dažādiem pasākumiem, tik zēl, ka tie bija tikai dažī! **Marija**, paldies par dzirkstelītēm acīs un ticību mūsos! Nezaudē enerģiju, uzlādē to vēl, un es patiesi priecāšos, redzot Tevi piepildot sapņus! Piedod, ja dažkārt bijām pārāk depresīvi. **Andri**, paldies, ka biji īstajā laikā īstajā vietā! Man (mums) Tu biji tik nepieciešams, nez, vai Tu jebkad to apjautīsi! Paldies, ka atradi *CERN* dārgakmeņus un iepazīstināji mani ar viņiem.

Visbeidzot, paldies maniem tuvākajiem un mīļākajiem! Mīļā **Ame**, paldies, ka esi bijusi visuzticamākā no draudzenēm kādas man jebkad bijušas! Esmu priecīga, ka mūsu ceļi krustojušies, kaut gribētos, lai tie būtu sinhronāki. Mana ģimene, paldies par beznosacījumu mīlestību! **Ruta** un **Andri**, paldies par kakao laika atgādinājumiem, paldies, ka visus mazbērnus tik labi izprotat! **Tēti**, paldies par Tavu ticību, un ļauj atkārtot, cik ļoti es lepojos par Tavu pabeigto promocijas darbu! **Brāli**, man tāds prieks, ka gandrīz vienmēr esam bijuši uz viena viļņa. Paldies, ka vienmēr mani saproti! **Mammu**, kā es gribētu, lai Tu šo redzi! **Mārieši**, paldies, ka pacieņojāties pie manis *CERN*, **Vitaut** un **Inita**, paldies, ka jautājāt par *LHC*! **Adrian** un **Aiden**, paldies par puzlēm un lego, un tiem, ko vēl liksim! Paldies jūsu vecākiem par vienmēr sirsnīgajiem aicinājumiem ciemoties! **Reini**, paldies, ka piepildi manu sirdi ar pāri virstošu mīlestību un devi iespēju frankofonajai pasaulei, un par spīti mūžīgi kaitinošajam attālumam starp mums, ka esi gatavs riteņot apkārt Lemāna ezeram kopā ar mani!

Literatūras saraksts

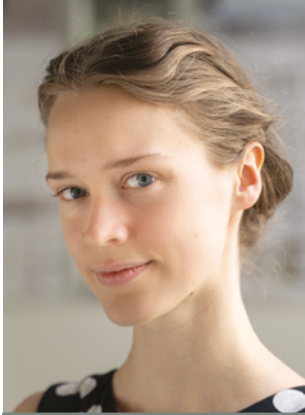
- [1] *ATLAS* sadarbība. “Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC”. *Physics Letters B* 716.1 (2012), 1.—29. lpp. ISSN: 0370–2693. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2012.08.020> (citēts 8, 13. lpp.).
- [2] *CMS* sadarbība. “Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC”. *Physics Letters B* 716.1 (2012), 30.—61. lpp. ISSN: 0370-2693. DOI: [10.1016/j.physletb.2012.08.021](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2012.08.021) (citēts 8, 13. lpp.).
- [3] *CERN. The High-Luminosity LHC Project. 298th Meeting of Scientific Policy Committee.* Tehn. ziņ. CERN, 2016. URL: <https://cds.cern.ch/record/2199189> (citēts 8, 17. lpp.).
- [4] *CMS* sadarbība. *A MIP Timing Detector for the CMS Phase-2 Upgrade.* Tehn. ziņ. Geneva: CERN, 2019. URL: <https://cds.cern.ch/record/2667167> (citēts 8, 20. lpp.).
- [5] D. Galbraith un C. Burgard. *Standard model of physics.* <https://example.net/model-physics/>. Piekļūts: 2025-09-01 (citēts 13. lpp.).
- [6] F. Englert un R. Brout. “Broken Symmetry and the Mass of Gauge Vector Mesons”. *Phys. Rev. Lett.* 13 (1964), 321.—323. lpp. DOI: [10.1103/PhysRevLett.13.321](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.13.321) (citēts 14. lpp.).
- [7] P. W. Higgs. “Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons”. *Phys. Rev. Lett.* 13 (1964), 508.—509. lpp. DOI: [10.1103/PhysRevLett.13.508](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.13.508) (citēts 14. lpp.).
- [8] G. S. Guralnik, C. R. Hagen un T. W. B. Kibble. “Global Conservation Laws and Massless Particles”. *Phys. Rev. Lett.* 13 (1964), 585.—587. lpp. DOI: [10.1103/PhysRevLett.13.585](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.13.585) (citēts 14. lpp.).
- [9] A. A. Migdal un A. M. Polyakov. “Spontaneous Breakdown of Strong Interaction Symmetry and the Absence of Massless Particles”. *Sov. Phys. JETP* 24 (1967), 91.—98. lpp. (citēts 14. lpp.).
- [10] B. D. Micco u. c. “Higgs boson potential at colliders: Status and perspectives”. *Reviews in Physics* 5 (2020), 100045. lpp. ISSN: 2405-4283. DOI: [10.1016/j.revip.2020.100045](https://doi.org/10.1016/j.revip.2020.100045) (citēts 14. lpp.).
- [11] *CMS* sadarbība. “Search for Higgs boson pairs decaying to WW^*WW^* , $WW^*\tau\tau$, and $\tau\tau\tau\tau$ in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV”. *Journal of High Energy Physics* 95 (2023), 101801. lpp. ISSN: 1029-8479. DOI: [10.1007/JHEP07\(2023\)095](https://doi.org/10.1007/JHEP07(2023)095) (citēts 15, 16, 34, 40, 43. lpp.).
- [12] *ATLAS* sadarbība. “Search for non-resonant Higgs boson pair production in final states with leptons, taus, and photons in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector”. *Journal of High Energy Physics* 164 (2024). ISSN: 1029-8479. DOI: [10.1007/JHEP08\(2024\)164](https://doi.org/10.1007/JHEP08(2024)164) (citēts 16. lpp.).
- [13] *ATLAS* sadarbība. “Combination of Searches for Higgs Boson Pair Production in pp Collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS Detector”. *Physics Review Letters* 133 (2024), 101801. lpp. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.133.101801> (citēts 16. lpp.).

- [14] CMS sadarbība. *Combination of searches for nonresonant Higgs boson pair production in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV*. Tehn. ziņ. Geneva: CERN, 2024. URL: <https://cds.cern.ch/record/2917252> (citēts 16. lpp.).
- [15] CMS and ATLAS sadarbības. *Combination of ATLAS and CMS searches for Higgs boson pair production at 13 TeV*. Tehn. ziņ. Geneva: CERN, 2025. URL: <https://cds.cern.ch/record/2947521> (citēts 16. lpp.).
- [16] CMS sadarbība. “The CMS experiment at the CERN LHC”. *Journal of Instrumentation* 3.08 (2008. g. aug.), S08004. DOI: [10.1088/1748-0221/3/08/S08004](https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/S08004) (citēts 18. lpp.).
- [17] CMS sadarbība. *The CMS magnet project: Technical Design Report*. Technical design report. CMS. Geneva: CERN, 1997. DOI: [10.17181/CERN.6ZU0.V4T9](https://doi.org/10.17181/CERN.6ZU0.V4T9) (citēts 18. lpp.).
- [18] T. Sakuma un T. McCauley. “Detector and Event Visualization with SketchUp at the CMS Experiment”. *Journal of Physics: Conference Series* 513.2 (2014. g. jūn.), 22032. lpp. DOI: [10.1088/1742-6596/513/2/022032](https://doi.org/10.1088/1742-6596/513/2/022032) (citēts 18. lpp.).
- [19] V. Karimäki u. c. *The CMS tracker system project: Technical Design Report*. Technical design report. CMS. Geneva: CERN, 1997. URL: <https://cds.cern.ch/record/368412> (citēts 18. lpp.).
- [20] CMS sadarbība. *The CMS electromagnetic calorimeter project: Technical Design Report*. Technical design report. CMS. Geneva: CERN, 1997. URL: <https://cds.cern.ch/record/349375> (citēts 18. lpp.).
- [21] CMS sadarbība. *The CMS hadron calorimeter project: Technical Design Report*. Technical design report. CMS. Geneva: CERN, 1997. URL: <http://cds.cern.ch/record/357153> (citēts 19. lpp.).
- [22] J. G. Layter. *The CMS muon project: Technical Design Report*. Technical design report. CMS. Geneva: CERN, 1997. URL: <https://cds.cern.ch/record/343814> (citēts 19. lpp.).
- [23] S. Cittolin, A. Rácz un P. Sphicas. *CMS The TriDAS Project: Technical Design Report, Volume 2: Data Acquisition and High-Level Trigger. CMS trigger and data-acquisition project*. Technical design report. CMS. Geneva: CERN, 2002. URL: <https://cds.cern.ch/record/578006> (citēts 19. lpp.).
- [24] I. Neutelings. *Izaak Neutelings' contribution to tikz*. <https://tikz.net/author/izaak/>. Piekļūts: 2025-06-19 (citēts 19. lpp.).
- [25] CMS sadarbība. *The Phase-2 Upgrade of the CMS Tracker*. Tehn. ziņ. Geneva: CERN, 2017. DOI: [10.17181/CERN.QZ28.FLHW](https://doi.org/10.17181/CERN.QZ28.FLHW) (citēts 20. lpp.).
- [26] CMS sadarbība. *The Phase-2 Upgrade of the CMS Muon Detectors*. Tehn. ziņ. Geneva: CERN, 2017. DOI: [10.17181/CERN.5T9S.VPMI](https://doi.org/10.17181/CERN.5T9S.VPMI) (citēts 20. lpp.).
- [27] CMS sadarbība. *The Phase-2 Upgrade of the CMS Barrel Calorimeters*. Tehn. ziņ. Geneva: CERN, 2017. URL: <https://cds.cern.ch/record/2283187> (citēts 20. lpp.).
- [28] CMS sadarbība. *The Phase-2 Upgrade of the CMS Endcap Calorimeter*. Tehn. ziņ. Geneva: CERN, 2017. DOI: [10.17181/CERN.IV8M.IJY2](https://doi.org/10.17181/CERN.IV8M.IJY2) (citēts 20. lpp.).
- [29] CMS sadarbība. *The Phase-2 Upgrade of the CMS Level-1 Trigger*. Tehn. ziņ. Geneva: CERN, 2020. URL: <https://cds.cern.ch/record/2714892> (citēts 20. lpp.).

- [30] CMS sadarbība. “Particle-flow reconstruction and global event description with the CMS detector”. *Journal of Instrumentation* 12.10 (2017. g. sept.), P10003. DOI: [10.1088/1748-0221/12/10/P10003](https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/10/P10003) (citēts 21, 22. lpp.).
- [31] CMS sadarbība. “Performance of the CMS muon detector and muon reconstruction with proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV”. *Journal of Instrumentation* 13.06 (2018. g. jūn.), P06015. DOI: [10.1088/1748-0221/13/06/P06015](https://doi.org/10.1088/1748-0221/13/06/P06015) (citēts 22. lpp.).
- [32] CMS sadarbība. “Electron and photon reconstruction and identification with the CMS experiment at the CERN LHC”. *Journal of Instrumentation* 16.05 (2021. g. maijs), P05014. DOI: [10.1088/1748-0221/16/05/P05014](https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/05/P05014) (citēts 22. lpp.).
- [33] W. Adam u. c. “Reconstruction of electrons with the Gaussian-sum filter in the CMS tracker at the LHC”. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics* 31.9 (2005. g. jūl.), N9. DOI: [10.1088/0954-3899/31/9/N01](https://doi.org/10.1088/0954-3899/31/9/N01) (citēts 22. lpp.).
- [34] M. Cacciari, G. P. Salam un G. Soyez. “The anti-kt jet clustering algorithm”. *Journal of High Energy Physics* 2008.04 (2008. g. apr.), 63. lpp. DOI: [10.1088/1126-6708/2008/04/063](https://doi.org/10.1088/1126-6708/2008/04/063) (citēts 22. lpp.).
- [35] D. Bertolini u. c. “Pileup per particle identification”. *Journal of High Energy Physics* 59.10 (2014. g. okt.), 1029.—8479. lpp. DOI: [10.1007/JHEP10\(2014\)059](https://doi.org/10.1007/JHEP10(2014)059) (citēts 22. lpp.).
- [36] CMS sadarbība. *CMS Monte Carlo production overview*. <https://opendata.cern.ch/docs/cms-mc-production-overview>. Piekļūts: 2025-07-07 (citēts 23. lpp.).
- [37] J. Alwall u. c. “The automated computation of tree-level and next-to-leading order differential cross sections, and their matching to parton shower simulations”. *Journal of High Energy Physics* 2014.7 (2014. g. jūl.), 79. lpp. ISSN: 1029-8479. DOI: [10.1007/JHEP07\(2014\)079](https://doi.org/10.1007/JHEP07(2014)079) (citēts 23, 29. lpp.).
- [38] T. Sjöstrand, S. Mrenna un P. Skands. “PYTHIA 6.4 physics and manual”. *Journal of High Energy Physics* 2006.05 (2006. g. maijs), 26. lpp. DOI: [10.1088/1126-6708/2006/05/026](https://doi.org/10.1088/1126-6708/2006/05/026) (citēts 23, 29. lpp.).
- [39] P. Nason. “A new method for combining NLO QCD with shower Monte Carlo algorithms”. *Journal of High Energy Physics* 2004.11 (2004. g. dec.), 40. lpp. DOI: [10.1088/1126-6708/2004/11/040](https://doi.org/10.1088/1126-6708/2004/11/040) (citēts 23, 29. lpp.).
- [40] J. Bellm u. c. “Herwig 7.0/Herwig++ 3.0 release note”. *Eur. Phys. J. C* 76.4 (2016), 196. lpp. DOI: [10.1140/epjc/s10052-016-4018-8](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-016-4018-8) (citēts 23. lpp.).
- [41] J. Allison u. c. “Recent developments in Geant4”. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 835 (2016), 186.—225. lpp. ISSN: 0168-9002. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.06.125> (citēts 23. lpp.).
- [42] M. Gonzalez-Berges. “The Joint COntrols Project Framework”. *arXiv: Instrumentation and Detectors* (2003). URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:18412592> (citēts 26. lpp.).
- [43] B. Copy u. c. *Monitoring of CERN’s Data Interchange Protocol (DIP) system*. Tehn. ziņ. CERN, 2018, THPHA162. DOI: [10.18429/JACoW-ICALEPCS2017-THPHA162](https://doi.org/10.18429/JACoW-ICALEPCS2017-THPHA162) (citēts 26. lpp.).

- [44] C. Gaspar, M. Dönszelmann un P. Charpentier. “DIM, a portable, light weight package for information publishing, data transfer and inter-process communication”. *Computer Physics Communications* 140.1 (2001). CHEP2000, 102.—109. lpp. ISSN: 0010-4655. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0010-4655\(01\)00260-0](https://doi.org/10.1016/S0010-4655(01)00260-0) (citēts 26. lpp.).
- [45] CMS sadarbība. “Operation and performance of the CMS silicon strip tracker with proton-proton collisions at the CERN LHC”. *JINST* 20.08 (2025), P08027. DOI: [10.1088/1748-0221/20/08/P08027](https://doi.org/10.1088/1748-0221/20/08/P08027) (citēts 29. lpp.).
- [46] CMS sadarbība. *Run 3 commissioning results of heavy-flavor jet tagging at $\sqrt{s} = 13.6$ TeV with CMS data using a modern framework for data processing*. Tehn. ziņ. CERN, 2024. URL: <https://cds.cern.ch/record/2898463> (citēts 29, 45. lpp.).
- [47] R. Frederix un S. Frixione. “Merging meets matching in MC@NLO”. *Journal of High Energy Physics* 2012.12 (2012. g. dec.), 61. lpp. ISSN: 1029-8479. DOI: [10.1007/JHEP12\(2012\)061](https://doi.org/10.1007/JHEP12(2012)061) (citēts 30. lpp.).
- [48] G. Heinrich, J. Lang un L. Scyboz. “Erratum to: SMEFT predictions for $gg \rightarrow hh$ at full NLO QCD and truncation uncertainties”. *Journal of High Energy Physics* 2023.10 (2023. g. okt.), 86. lpp. ISSN: 1029-8479. DOI: [10.1007/JHEP10\(2023\)086](https://doi.org/10.1007/JHEP10(2023)086) (citēts 29. lpp.).
- [49] S. Alioli u. c. “NLO Higgs boson production via gluon fusion matched with shower in POWHEG”. *JHEP* 04 (2009), 2. lpp. DOI: [10.1088/1126-6708/2009/04/002](https://doi.org/10.1088/1126-6708/2009/04/002) (citēts 29. lpp.).
- [50] P. Nason un C. Oleari. “NLO Higgs boson production via vector-boson fusion matched with shower in POWHEG”. *JHEP* 02 (2010), 37. lpp. DOI: [10.1007/JHEP02\(2010\)037](https://doi.org/10.1007/JHEP02(2010)037) (citēts 29. lpp.).
- [51] T. Melia u. c. “W+W-, WZ and ZZ production in the POWHEG BOX”. *JHEP* 11 (2011), 78. lpp. DOI: [10.1007/JHEP11\(2011\)078](https://doi.org/10.1007/JHEP11(2011)078) (citēts 29. lpp.).
- [52] P. Artoisenet u. c. “Automatic spin-entangled decays of heavy resonances in Monte Carlo simulations”. *Journal of High Energy Physics* 2013.3 (2013. g. marts), 15. lpp. ISSN: 1029-8479. DOI: [10.1007/JHEP03\(2013\)015](https://doi.org/10.1007/JHEP03(2013)015) (citēts 29. lpp.).
- [53] A. V. Gritsan u. c. “New features in the JHU generator framework: constraining Higgs boson properties from on-shell and off-shell production”. *Phys. Rev. D* 102.5 (2020), 56022. lpp. DOI: [10.1103/PhysRevD.102.056022](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.102.056022) (citēts 29. lpp.).
- [54] K. Hamilton, P. Nason un G. Zanderighi. “MINLO: multi-scale improved NLO”. *Journal of High Energy Physics* 2012.10 (2012. g. sept.), 155. lpp. ISSN: 1029-8479. DOI: [10.1007/JHEP10\(2012\)155](https://doi.org/10.1007/JHEP10(2012)155) (citēts 29. lpp.).
- [55] A. M. Sirunyan u. c. “Extraction and validation of a new set of CMS PYTHIA8 tunes from underlying-event measurements”. *Eur. Phys. J. C* 80 (2020), 4. lpp. DOI: [10.1140/epjc/s10052-019-7499-4](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-7499-4) (citēts 31. lpp.).
- [56] R. D. Ball u. c. “Parton distributions from high-precision collider data”. *The European Physical Journal C* 77.10 (2017. g. okt.), 663. lpp. ISSN: 1434-6052. DOI: [10.1140/epjc/s10052-017-5199-5](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-017-5199-5) (citēts 31. lpp.).
- [57] CMS GEN XSEC TASK FORCE. *Cross Section DB Tool*. <https://xsecdb-xfdb-official.app.cern.ch/xsdb/>. Piekļūts: 2025-02-18 (citēts 31. lpp.).

- [58] J. Baglio u. c. “ $gg \rightarrow HH$: Combined Uncertainties”. *Phys. Rev. D* 103 (2021). 8 pages, 2 figures, minor extensions of text, matches published version, 56002. lpp. DOI: [10.1103/PhysRevD.103.056002](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.103.056002) (citēts 31. lpp.).
- [59] B. Mellado Garcia u. c. “CERN Report 4: Part I Standard Model Predictions”. (2016). URL: <https://cds.cern.ch/record/2150771> (citēts 31. lpp.).
- [60] Common ATLAS-CMS effort. *NNLO+NNLL top-quark-pair cross sections*. <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/LHCPhysics/TtbarNNLO>. Piekļūts: 2025-02-17 (citēts 31. lpp.).
- [61] CMS sadarbība. “Performance of the CMS Level-1 trigger in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV”. *Journal of Instrumentation* 15.10 (2020. g. okt.), P10017. DOI: [10.1088/1748-0221/15/10/P10017](https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/10/P10017) (citēts 31. lpp.).
- [62] CMS sadarbība. *Low- p_T Electron ID scale factors from CMS in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using J/ψ events*. Tehn. ziņ. CERN, 2023. URL: <https://cds.cern.ch/record/2879279> (citēts 31. lpp.).
- [63] E. Bols u. c. “Jet flavour classification using DeepJet”. *Journal of Instrumentation* 15.12 (2020. g. dec.), P12012. DOI: [10.1088/1748-0221/15/12/P12012](https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/12/P12012) (citēts 33. lpp.).
- [64] T. Chen un C. Guestrin. “XGBoost: A Scalable Tree Boosting System”. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. KDD '16. San Francisco, California, USA: Association for Computing Machinery, 2016, 785.—794. lpp. ISBN: 9781450342322. DOI: [10.1145/2939672.2939785](https://doi.org/10.1145/2939672.2939785) (citēts 34. lpp.).
- [65] S. M. Lundberg un S.-I. Lee. “A unified approach to interpreting model predictions”. *Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems*. NIPS'17. Long Beach, California, USA: Curran Associates Inc., 2017, 4768.—4777. lpp. ISBN: 9781510860964 (citēts 34. lpp.).
- [66] A. L. Read. “Presentation of search results: the CLs technique”. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics* 28.10 (2002. g. sept.), 2693. lpp. DOI: [10.1088/0954-3899/28/10/313](https://doi.org/10.1088/0954-3899/28/10/313) (citēts 38. lpp.).
- [67] CMS sadarbība. “The CMS Statistical Analysis and Combination Tool: Combine”. *Computing and Software for Big Science* 8.1 (2024. g. nov.), 19. lpp. ISSN: 2510-2044. DOI: [10.1007/s41781-024-00121-4](https://doi.org/10.1007/s41781-024-00121-4) (citēts 38. lpp.).
- [68] A. Sculac. “Measurement of electron identification efficiency and the search for Higgs boson pair production in the WWZZ decay channel using the CMS detector at the at the Large Hadron Collider”. Theses. Institut Polytechnique de Paris; PMF, University of Zagreb, 2025. URL: <https://theses.hal.science/tel-05540175> (citēts 43. lpp.).



Antra Gaile dzimusi 1997. gadā. Latvijas Universitātē ieguvusi bakalaura (2019) un maģistra (2021) grādu fizikā. Strādājusi Latvijas Universitātes Fizikas institūtā MHD tehnoloģiju laboratorijā, vēlāk Rīgas Tehniskās universitātes Daļiņu fizikas un paātrinātāju tehnoloģiju institūtā. Interesi par daļiņu fiziku guvusi *CERN* vasaras skolā 2019. gadā, kā arī pavadot divus no doktorantūras gadiem *CERN*.