

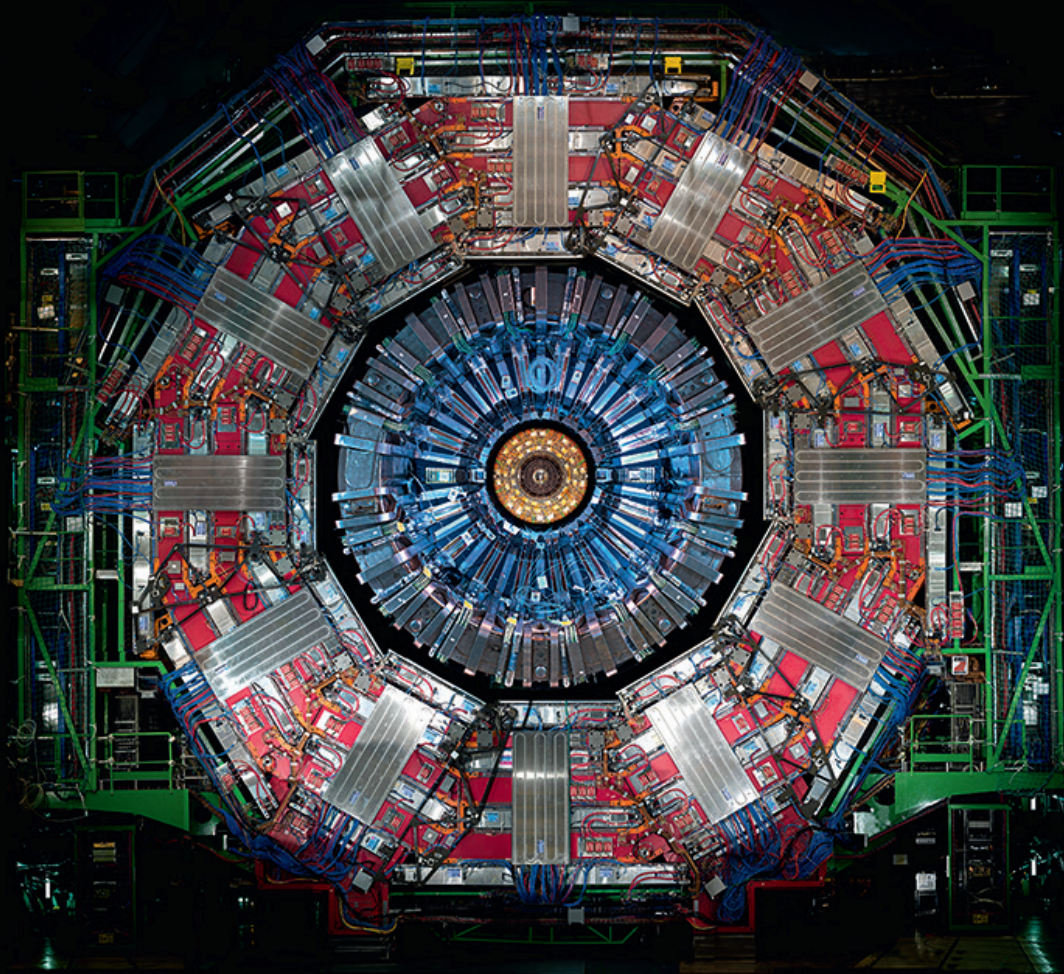


RĪGAS TEHNISKĀ  
UNIVERSITĀTE

Viesturs Veckalns

# VIRSOTNES KVARKU PĀRA SABRUKŠANAS CEĻĀ RADUŠOS KRĀSU PLŪSMU PĒTĪJUMI AR 13 TEV CERN LHP KMS EKSPERIMENTĀ

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE  
Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte  
Industriālās elektronikas un elektrotehnikas institūts

**Viesturs Veckalns**

Doktora studiju programmas “Elektrotehnoloģiju datorvadība” doktorants

VIRSOTNES KVARKU PĀRA SABRUKŠANAS CEĻĀ  
RADUŠOS KRĀSU PLŪSMU PĒTĪJUMI AR 13 TEV CERN  
LHP KMS EKSPERIMENTĀ

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs  
Profesors Dr. habil. sc. ing.  
LEONĪDS RIBICKIS

RTU Izdevniecība  
Rīga 2019

Veckalns, V. Virsotnes kvarku pāra sabrukšanas ceļā radušos krāsu plūsmu pētījumi ar 13 TeV CERN LHP KMS eksperimentā. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2019. 72 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes "RTU P-14" 2019. gada 15. februāra lēmumu, protokols Nr. 2019-1 (68).

Vāka attēls "KMS detektora šķērsriezums"

Vāka attēla autori *Hoch, M.; Brice, M.*

**ISBN 978-9934-22-268-9 (print)**

**978-9934-22-269-6 (pdf)**

## **PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ**

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2019. gada 28. maijā Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Āzenes ielā 12, 212. auditorijā.

### **OFICIĀLIE RECENZENTI**

Profesors Dr. habil. sc. phys. Mārcis Auziņš  
Latvijas Universitāte, Latvija

Profesors Dr. Mikko Voutilainen  
Helsinki Fizikas institūts, Somija

Profesors Dr. Roberto Tenchini  
INFN Sezione di Pisa, Universita' e Scuola Normale Superiore, Itālija

Profesors Dr. Oskars Krievs  
Rīgas Tehniskā universitāte

## **APSTIPRINĀJUMS**

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis doto promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Viesturs Veckalns ..... (paraksts)

Datums: .....

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, satur ievadu, 9 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 122 attēlus, 32 tabulas, vienu pielikumu, kopā 144 lappuses. Literatūras sarakstā ir 126 nosaukumi.

## Anotācija

LHP, kas strādā ar 13 TeV masas centra enerģiju, ir virsotnes kvarku fabrika. Virsotnes kvarku ražošanas šķērsriezums LHP ir 803 pb. Virsotnes kvarka mūža ilgums ir  $3,3 \times 10^{-25}$  s, un tas ir tik īss, ka atšķirībā no citiem kvarkiem virsotnes kvarks sabrūk, pirms tas hadronizējas. Virsotnes kvarks sabrūk vāmajā ceļā, izstarojot  $W$  bozonu. Ja  $W$  bozons sabrūk hadroniskajā veidā, stiprajā kodola mijiedarbībā tiek radītas daļiņu strūklas. Šo procesu apraksta kvantu hromodinamika, un varam modelēt virsotnes kvarka sabrukšanas procesu ar krāsu lādiņu un krāsu saitēm. Strūklas, kas radušās, sabrūkot  $W$  bozonam, mijiedarbojas krāsu laukā (tās ir saistītas ar krāsām). Saistība ar krāsām atstāj pamanāmus eksperimentālus nospiedumus, ko mēs varam novērot KMS detektorā, īpaši izmantojot tā trekeri, 4 T solenoīdu un kalorimetrus. KMS eksperimentā šāds pētījums tiek veikts pirmoreiz. Krāsu saistību starp strūklām, kas radušās, sabrūkot virsotnes kvarku pārim, pētām, izmantojot gala stāvokli, ko veido viens lādēts leptons, divas vieglās strūklas un divas  $b$  atzīmētās strūklas. Izmantojam vilkmes leņķi un daļiņu projicēšanu uz plaknes, ko veido divas strūklas. Tiek izmantots arī krāsu okteta  $W$  spēļu modelis, lai novērtētu dažādo metožu sniegumu.

# Pateicības

Pamati šim darbam tika ielikti Pikosekunžu silīcija reizinātāju-elektronikas-kristālu pētniecības (*Picosecond Siliconphotomultiplier-Electronics-Crystal research*) Marī Kirī tīkla projekta ietvaros. Izsaku pateicību Etjenetei Ofrē (oriģ. *Etiennette Auffray*, CERN, Šveice) par šī projekta organizēšanu. Pateicos arī Mikelem Galinaro (oriģ. *Michele Gallinaro*, LIP, Portugāle) par ievadu darbam KMS eksperimentā.

Pateicos arī saviem komandas biedriem Marteina Muldersam (oriģ. *Martijn Mulders*, CERN, Šveice), Pedru Silvam (oriģ. *Pedro Silva*, CERN, Šveice) un Markusam Zeidelsam (oriģ. *Markus Seidel*, CERN, Šveice) par metodoloģisko atbalstu un dalīšanos ar pieredzi.

Tāpat novērtēju arī nemitīgo Rīgas Tehniskās universitātes atbalstu, kā rezultātā radās iespēja turpināt darbu KMS eksperimentā.

# Saturs

<b>Latviešu–angļu terminu rādītājs</b>	<b>8</b>
<b>VISPĀRĒJS DARBA RAKSTUROJUMS</b>	<b>10</b>
I    Fizikālie pamati . . . . .	10
II   Metodes . . . . .	11
III  Novitāte . . . . .	11
IV   Personīgais ieguldījums . . . . .	12
V    Aprobācija . . . . .	12
<b>ATSEVIŠĶO NODAĻU IZKLĀSTS</b>	<b>13</b>
<b>1. Fizikālie pamati</b>	<b>13</b>
<b>2. Eksperimentālais aprīkojums</b>	<b>20</b>
2.1. LHP . . . . .	20
2.2. KMS detektors . . . . .	22
<b>3. Metodoloģija</b>	<b>27</b>
3.1. Vilkmes leņķis . . . . .	27
3.2. LEP metode . . . . .	28
<b>4. Datu un MK paraugi</b>	<b>31</b>
<b>5. Notikumu atlase</b>	<b>34</b>
5.1. Detektora līmenis . . . . .	34
5.2. Ģeneratora līmenis . . . . .	37
<b>6. Sistemātiskās nenoteiktības</b>	<b>38</b>
6.1. Eksperimentālās nenoteiktības . . . . .	38
6.2. Teorētiskās nenoteiktības . . . . .	39
<b>7. Rezultāti</b>	<b>41</b>
7.1. Vilkmes vektors . . . . .	41
7.2. Vilkmes leņķis . . . . .	44

7.3. $\Delta R$ ietekme . . . . .	46
7.4. Jutīguma analīze . . . . .	47
7.5. Atlocīšana . . . . .	50
7.6. LEP metode . . . . .	58
7.7. Hipotēžu pārbaude . . . . .	63
<b>8. Secinājumi</b>	<b>68</b>
<b>Bibliogrāfija</b>	<b>69</b>



# Latviešu–angļu terminu rādītājs

Nepieciešams ieviest augstas enerģijas fizikā lietoto terminu tulkojumus latviešu valodā. Zemāk sniegti šajā darbā lietotie nozares termini latviešu valodā, norādot atbilstošo terminu angļu valodā. Saīsinājumiem papildus ir sniegts to atšifrējums latviešu valodā. Tiek norādīta lapaspuse, kurā termins sastopams.

AEF	HEP
augstas enerģijas fizika 22	
atblāzmas novērotājs	tail catcher 22
atlocīšana	unfolding 47
Augsta līmeņa triggers (ALT)	High Level Trigger (HLT) 31
Augsta spīduma LHP	High-Luminosity LHP 17
ciets	hard 25
dakstiņš	tile 22
darba periods	Run 19
daļiņu plūsma	particle-flow 20
gala segums	endcap 19
gala stāvoklis	final state 20
graudainība	granularity 20
gruveši	debris 11
ierosinājums	hit 20
ievades ķēde	injection chain 17
lietus	shower 12
muca	barrel 19
mīksts	soft 23
norobežojuma barjera	confinement barrier 12

Nākotnes apļveida kolaiders    Future Circular Collider 17

papildus dimensijas            extra dimensions 17

pastiprinātājs                booster 18

pirmsintervāls                underflow bin 48

puðuris                        cluster 20

pūlis                            bunch 18

sakopšana                    clustering 25

sliexsnis                      cut 44

smarža                        flavour 11

straujums                    rapidity 21

strēmele                     strip 19

strūkla                        jet 7

tornis                         tower 22

traucējums                 nuisance 49

trekeris                      tracker 12

uzkrāšanas aplis            storage ring 18

uzticamais reģions        fiducial region 21

uzņēmība                    acceptance 25

veidols                        shape 38

virsošne                     vertex 20

virsošnes kvarks         top quark 7

# VISPĀRĒJS DARBA RAKSTUROJUMS

## I Fizikālie pamati

Lielais hadronu paātrinātājs (LHP) ir apkārtmērā 27 km garš sinhrotrons. Tas atrodas Ženēvas apkārtnē, uz Francijas–Šveices robežas. LHP eksperimentālajos punktos tiek veiktas protonu-protonu ( $pp$ ) sadursmes. Lielākā daļa šo sadursmju ir neelastīga, un ar detektoriem, kā KMS, tiek analizēti sadursmju gruveši. Sadursmju gruvešos ceram atrast atbildes uz daudziem fizikas jautājumiem, kā, piemēram, Higsa bozona eksistence un īpašības, Tumšās matērijas eksistence un virsotnes kvarka īpašības.

$pp$  sadursmju masas centra enerģija ir 13 TeV. Šāda enerģija ir pietiekama, lai radītu miljoniem  $t\bar{t}$  pāru – šī procesa šķērsriezums pie  $\sqrt{s} = 13$  TeV ir 803 pb [1]. LHP ir uzskatāms par virsotnes kvarku fabriku. Virsotnes kvarks sabrūk vāmajā ceļā, izstarojot  $W$  bozonu.  $W$  bozona sabrukuma produkti veido krāsu singletu. Ja  $W$  bozons sabrūk par krāsainiem produktiem (kvarkiem), tad šie produkti savā starpā mijiedarbojas hromodinamiskajā laukā – tie būs saistīti ar krāsām.

Vieglie kvarki, kas rodas, sabrūkot  $W$  bozonam, hadronizējas un detektorā novērojami kā strūklas. KMS silīcija trekeris, elektromagnētiskais un hadronu kalorimetrs ļauj izšķirt strūklu sastāvdaļas jeb hadronizācijas produktus (barionus un mezonus). Papildus KMS 4 T supra-vadošā solenoīda magnētiskais lauks ļauj mērīt lādēto strūklu sastāvdaļu momentu ar augstu izšķirtspēju. Daļiņas tiek identificētas un to parametri tiek mērīti, apkopojot novērojumus dažādos apakšdetektoros [2]. Gadījumā, ja strūklas ir saistītas ar krāsām, to sastāvdaļām ir tieksme aizpildīt telpu starp strūklām eksperimenta inerciālajā sistēmā. Šī īpašība ir par pamatu darbā izmantotajām metodēm.

Tāpat pētām arī hipotētiska krāsu okteta  $W$  bozona sabrukšanu. Šajā gadījumā vieglās strūklas nav saistītas ar krāsām, un šos rezultātus varam izmantot, lai tos salīdzinātu ar ar krāsām saistīto gadījumu.

Atlasām notikumus atbilstoši  $tt \rightarrow bW(q_1q_2)bW(\ell\nu)$  topoloģijai – tādus, kuros ir divas vieglās strūklas, divas  $b$  atzīmētās strūklas, kā arī viens lādēts leptons.

Darbā tiek izmantoti 2016. gada LHP KMS dati ar integrēto spīdumu  $35,9 \text{ fb}^{-1}$ . Eksperimenta novērojumi tiek salīdzināti ar Montekarlo (MK) simulācijām. MK simulācijas ļauj novērtēt fona klātbūtni, notikumu atlases efektivitāti un mūsu gadījumā arī pārliecināties, cik precīzi ir mūsu hadronizācijas modeļi. Centrālais process tiek simulēts ar POWHEG, bet hadronizācija ar PYTHIA. PYTHIA simulētā hadronizācija tiek salīdzināta ar HERWIG++ simulēto hadronizāciju. KMS detektors tiek modelēts ar GEANT4. Ievērojot atšķirības starp MK simulācijām un detektora novērojumiem, MK paraugiem tiek lietoti attiecīgi koeficienti. Tiek novērtēta arī dažādu sistemātisko nenoteiktību radītā kļūda.

Ievērojot slikto treku rekonstrukcijas efektivitāti daļiņām, kuru šķērsmoments ir mazāks par 1 GeV, pētījumā iekļaujam tikai daļiņas, kuru šķērsmoments ir lielāks nekā 1 GeV.

## II Metodes

Izmantojam vilkmes leņķa metodi [3]. Atbilstoši šai metodei tiek konstruēts vilkmes vektors, zinot strūklas centru un strūklas sastāvdaļu attālumu no tā, kas svērts ar strūklas sastāvdaļu šķērsmomentu  $p_T$ . Sagaidāms, ka strūklas vilkmes vektors rādīs uz citu strūklu, kas ar šo strūklu saistīta krāsu laukā. Tātad sagaidāms, ka vilkmes leņķa sadalījumā būs novērojams paugurs ar centru 0 rad.

Pētām vilkmes leņķa sadalījumu starp ar krāsām saistītām strūklām (abas vieglās strūklas), kā arī salīdzinām rezultātus ar vilkmes leņķa sadalījumu starp ar krāsām nesaistītiem fizikāliem objektiem –  $b$  atzīmētām strūklām, vieglo strūklu un leptonu. Interesants gadījums ir vilkmes leņķis starp strūklu un kūli.

Šķirojam gadījumus, kad  $\Delta R$  starp strūklām ir lielāks vai mazāks par 1. Pēdējā gadījumā anti- $k_T$  strūklu sakopšanas algoritms inducē vilkmi no vadošās strūklas uz mīkstāko strūklu, radot būtisku ietekmi uz novērojumiem saskaņā ar vilkmes metodi.

Novērtējam vilkmes leņķa metodes jutīgumu pret dažādiem parametriem – tikai lādēto daļiņu izmantošanu (tikai lādēto daļiņu trajektorijas tiek noliekas magnētiskajā laukā),  $W$  bozona šķērsmomentu, strūklas sastāvdaļu skaitu, strūklas sastāvdaļu šķērsmomenta sliekšni, vilkmes vektora lielumu.

Lai novērstu detektora radīto ietekmi uz novērojumiem, lietojam atlocīšanas metodi. Šī metode ļauj iegūt patiesā novērojamā lieluma sagaidāmā sadalījuma novērtējumu, taču tās trūkums ir augstā novērojamā lieluma fāžu telpas granularitāte. Novērtējam atbilstību starp atlocītajiem novērojumiem un ģenerētajiem Montekarlo novērojumiem, kā arī dažādo sistemātisko nenoteiktību ietekmi.

Tāpat tiek izmantota arī adaptācija metodei, kas tikusi izmantota Lielajā elektronu-pozitronu paātrinātājā LEP (turpmāk to dēvēsim par “LEP metodi”), kur strūklu sastāvdaļas tiek projicētas uz starpstrūklu plaknēm [4], [5], [6]. Sagaidāms, ka plakne starp ar krāsām saistītām strūklām būs blīvāk aizpildīta ar strūklu sastāvdaļu projekcijām nekā plakne starp ar krāsām nesaistītām strūklām.

Rezultāti tiek iegūti, izmantojot CMSSW versiju CMSSW\_8\_0\_26\_patch1, sākotnēji arī RIVET [7].

Visbeidzot, veicam hipotēžu pārbaudi. Šī uzdevuma ietvaros kombinējam  $t\bar{t}$  signālu ar krāsu okteta  $W$  signālu un novērtējam šīs kombinācijas atbilstību datiem.

## III Novitāte

Vilkmes leņķa metode ir lietota Fermilab Tevatrona DØ eksperimentā [8], ATLAS eksperimentā I darba periodā [9], kā arī ATLAS eksperimentā II darba periodā [10]. Šo metodi KMS pirmoreiz lietoja M. Zeidels un citi [11], taču šie rezultāti nekad nav tikuši publicēti. Salīdzinājumā ar ATLAS KMS detektoram iespējama aptuveni divreiz labāka centrālā reģiona treku momenta izšķirtspēja, pateicoties tā 4 T solenoīdam (ATLAS aprīkots ar daudz mazāku 2 T solenoīdu ar lieliem toroīda magnētiem ārpusē [12]).

“LEP metode” vēl nav lietota LHP.

Jāatzīmē, ka šis darbs ir pirmais Latvijas pienesums LHP eksperimentālajai programmai. Darbam, kas aprakstīts šajā disertācijā, noritot pilnā sparā, mēs 2018. g. maijā svinīgi atzīmējām Rīgas Tehniskās universitātes uzņemšanu par pilntiesīgiem KMS eksperimenta biedriem.

#### **IV Personīgais ieguldījums**

Disertācijā aprakstīto rezultātu iegūšana ir mans personīgais darbs. Būtiska šī darba daļa ir apjomīga programmatūras izstrāde. Par notikumu atlasē programmatūras izstrādi pateicos saviem kolēģiem, īpaši apzinoties sarežģīto un apjomīgo darbu, kas nepieciešams notikumu atlasē programmatūras izstrādei.

#### **V Aprobācija**

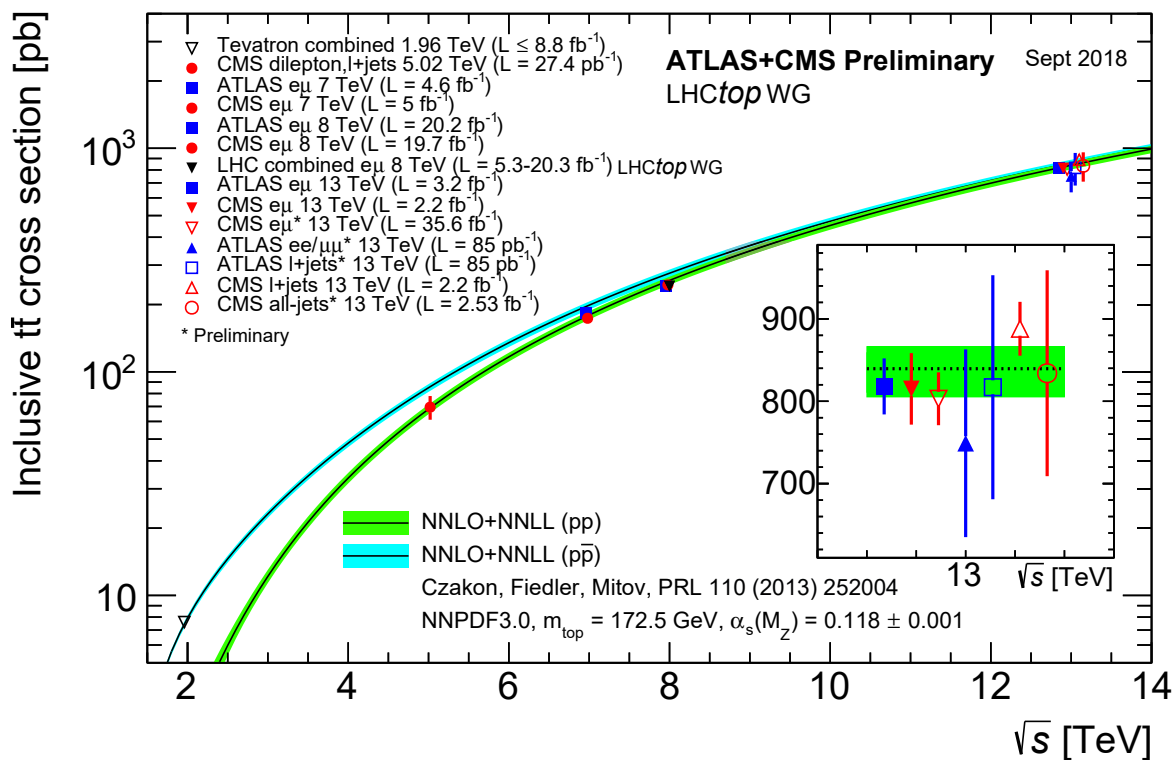
Šajā disertācijā ir izklāstīti KMS eksperimenta virsotnes kvarka grupas pētījuma ietvaros gūtie rezultāti. Rezultāti dažādās stadijās ir prezentēti Virsotnes modelēšanas un ģeneratoru fizikas sanāsmēs – 2016. g. 19. janvārī, 2016. g. 29. martā, 2016. g. 7. jūnijā, 2016. g. 30. augustā, 2018. g. 13. februārī un 2018. g. 17. oktobrī. Tie ir tikuši arī prezentēti CERN Zinātnes nedēļā Rīgā 2017. g. 22.–26. maijam, kā arī Augstas enerģijas fizikas Eiropas skolā Evurā, Portugālē 2017. g. 6.–19. septembrim.

Šajā pētījumā iegūtie rezultāti vēl nav apstiprināti saskaņā ar KMS eksperimenta Sadarbības padomes pieņemtajiem noteikumiem par rezultātu apstiprināšanu un publicēšanu. Saskaņā ar šiem noteikumiem pētījuma rezultāti vēl nevar tikt publicēti recenzētos zinātniskos izdevumos un oficiālās konferencēs.

# ATSEVIŠĶO NODAĻU IZKLĀSTS

## 1. Fizikālie pamati

Virsošnes kvarka pāra šķērsgriezums protonu-protonu sadursmēs ar  $\sqrt{s} = 13$  TeV saskaņā ar mērījumiem ir  $803 \pm 2$  (stat.)  $\pm 25$  (sist.)  $\pm 20$  (spīd.) [1]. Šķērsgriezums palielinās, pieaugot masas centra enerģijai. Šķērsgriezums kā funkcija no masas centra enerģijas ir attēlots 1.1. att.



1.1. att. Virsošnes pāra šķērsgriezums pie dažādas masas centra enerģijas [13]. Grafikā ir attēlots šķērsgriezums  $pp$  un  $p\bar{p}$  sadursmēs, kā arī CMS un ATLAS mērījumi dažādos  $t\bar{t}$  pāra sabrukšanas kanālos.

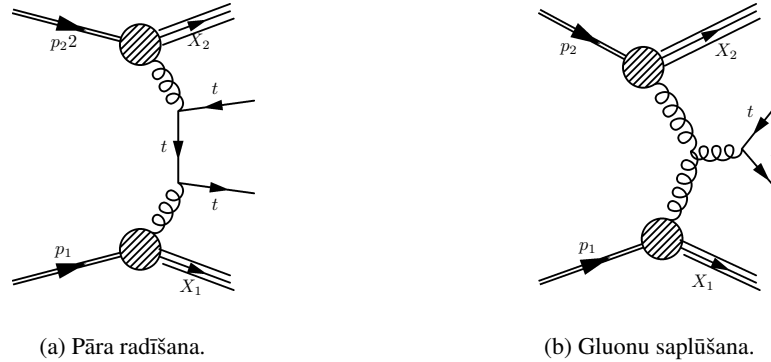
Izmantojot sakarību

$$N = \sigma \int L(t)dt, \quad (1.1.)$$

kur  $N$  –  $t\bar{t}$  pāru skaits,  $\sigma$  –  $t\bar{t}$  šķērsgriezums un  $L$  – momentānais spīdums, pie  $35,9 \text{ fb}^{-1}$  integrētā spīduma ir sagaidāms, ka radīsies  $26,7 \times 10^6$  šādi pāri.

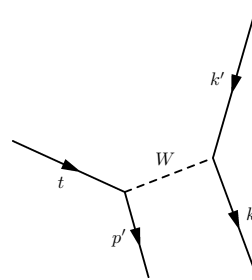
LHP divi protoni saduras ar enerģiju, kas ir pietiekami liela, lai “saspiestu” protonus tik cieši kopā, līdz kvarki vienā protonā spēj mijiedarboties ar kvarkiem otrā protonā. Tie mijiedarbojas,

apmainoties ar gluonu. Šādā apmaiņā var rasties virsotnes kvarka-antikvarka pāris. 1.2. att. attēloti 2 šādi iespējamie procesi. Apmainītais gluons ir tik enerģētisks, ka tas spēj sašķaidīt protonu gruvešos. Šāda sadursme tiek saukta par neelastīgu.



1.2. att. Virsotnes kvarka pāru radīšana  $pp$  sadursmē.

Virsošnes kvarks sabrūk tikai vājajā procesā (1.3. att.). Vājajā sabrukumā tiek izstarots  $W$  bozons un citas smaržas kvarks ar elektriskā lādiņa lielumu  $1/3e$ .



1.3. att. Vājais virsošnes kvarka  $t$  sabrukuma process.  $k$  un  $k'$  ir fermioni, kas rodas, sabrūkot  $W$  bozonam.

Vidējie CDF, DØ Tevatrona eksperimentu mērījumi [14], kā arī ATLAS un KMS LHP eksperimentu mērījumi [13] novērtē Kabibo–Kobajaši–Maskavas matricas  $|V_{tb}|$  komponentes vērtību vienādu ar

$$|V_{tb}| = 1,009 \pm 0,031. \quad (1.2.)$$

Tas nozīmē, ka virsošnes kvarks sabrūk par  $b$  kvarku vismaz  $(0.98)^2$  no visiem gadījumiem. Pārējie KKM matricas trešās kolonnas un trešās rindas elementi ir ļoti nelieli [15]:

$$|V_{td}| = 8,4 \times 10^{-3}, \quad |V_{ts}| = 40,0 \times 10^{-3}. \quad (1.3.)$$

Virsošnes kvarka platums saskaņā ar DØ kolektīva mērījumu [16] ar  $2,3 \text{ fb}^{-1}$  integrēto spīdumu ir  $\Gamma = 1,99_{-0.55}^{+0.69} \text{ GeV}$ . Tas atbilst mūža ilgumam  $\tau = 3,3 \times 10^{-25} \text{ s}$ .

Šāds mūža ilgums ir mazāks nekā hadronizācijas laiks ( $1/\Lambda \sim 10^{-24} \text{ s}$ ), kur  $\Lambda^2$  ir apmainītā gluona  $Q^2$  enerģija, pie kura stiprā saites koeficienta  $\alpha_s$  vērtība kļūst vienāda ar  $\sim 1$ , kas ir tuvu tā asimptotiskajai vērtībai pie norobežojuma barjeras. Līdz ar to virsošnes kvarks sabrūk, pirms tas

hadronizējas, un eksperimentētājam paveras vienreizēja iespēja īsu laika sprīdi novērot “kailu” kvarku.

Virsošnes kvarka mūža ilgums ir mazāks arī par virsošnes kvarka pāra spina dekorelācijas laika posmu  $-M/\Lambda^2 = 3 \times 10^{-21}$  s. Tātad virsošnes kvarku pāris saglabā savus spina stāvokļus, pirms tas sabrūk, un nodod savus spina stāvokļus sabrukuma produktiem [17].

Virsošnes kvarka sabrukšanas zarojuma attiecības pēc būtības ir tādas pašas kā  $W$  bozona sabrukuma procesam.  $W$  bozons sabrūk par leptonu pāriem ( $e \nu_e, \mu \nu_\mu, \tau \nu_\tau$ ) vai kvarku pāriem  $u, d'$  un  $c, s'$  (apostrofs norāda uz to, ka smaržas simetrija netiek saglabāta precīzi). Taču kvarku pāriem var būt trīs krāsas. Līdz ar to kopējais stāvokļu skaits ir  $3 + 2 \times 3 = 9$ .  $W$  bozona sabrukšanas zarojuma attiecību vienkāršs novērtējums, un tā eksperimenta ceļā iegūtie mērījumi ir sniegti 1.1. tab.

1.1. tabula

$W$  bozona sabrukšanas zarojuma attiecības.

Zars	$\Gamma_j/\Gamma$	$\Gamma_j/\Gamma$
	vienkāršojums	novērojums [15]
$e\nu_e$	$1/9$	$(10.71 \pm 0.16) \%$
$\mu\nu_\mu$	$1/9$	$(10.63 \pm 0.15) \%$
$\tau\nu_\tau$	$1/9$	$(11.38 \pm 0.21) \%$
kvarku pāris	$2/3$	$(67.41 \pm 0.27) \%$

$W$  bozona hadroniskajā sabrukšanas ceļā tiek izstarotas ar krāsām saistītas strūkļas (1.6. att.). Kvarkiem, kas rada šīs strūkļas, ir pretēji vērsti momenti masas centra inerciālajā sistēmā. Kvarkiem attālinoties viena no otra, to kinētiskā enerģija tiek atdota krāsu laukam. Krāsu laukā esošā papildu enerģija, kas līdzvērtīga apmēram  $m_W$  (80,4 GeV), tiek izlietota jaunu daļiņu radīšanai. Vienkāršots jaunu hadronu radīšanas process ir attēlots 1.4. att., kas balstīts uz Lundas modeli [18]. Alternatīvs atainojums, kas balstīts Fainmana diagramās, ir sniegts 1.5. att.

Hadroniskajā  $W$  bozona sabrukšanas procesā rodas 1.2. tabulā dotās daļiņu sugas.

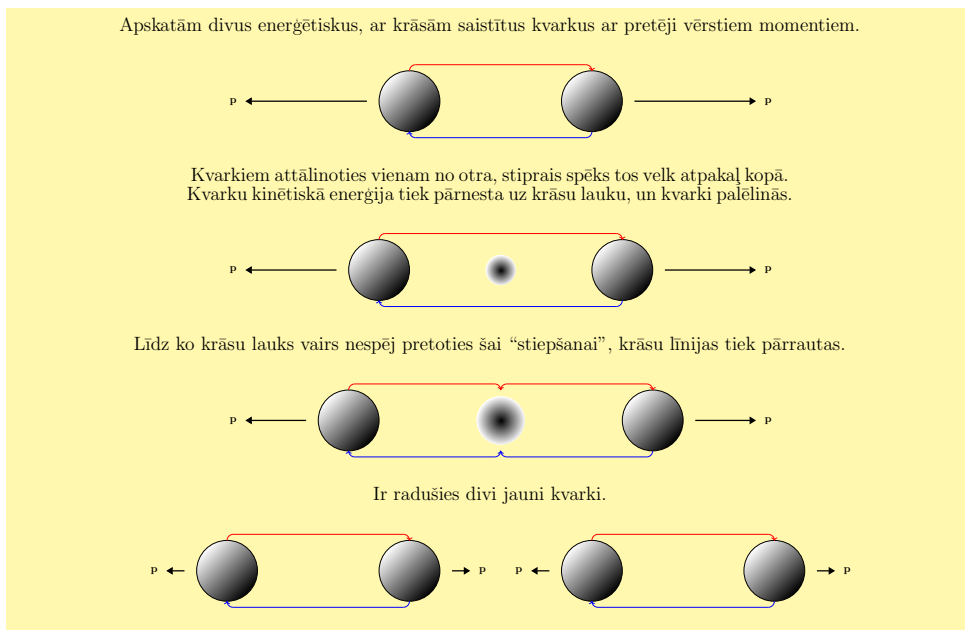
1.2. tabula

Jaunās daļiņas, kas rodas krāsu laukā starp enerģētiskiem, ar krāsām saistītiem kvarkiem, kas izstaroti, hadroniski sabrūkot  $W$  bozonam.

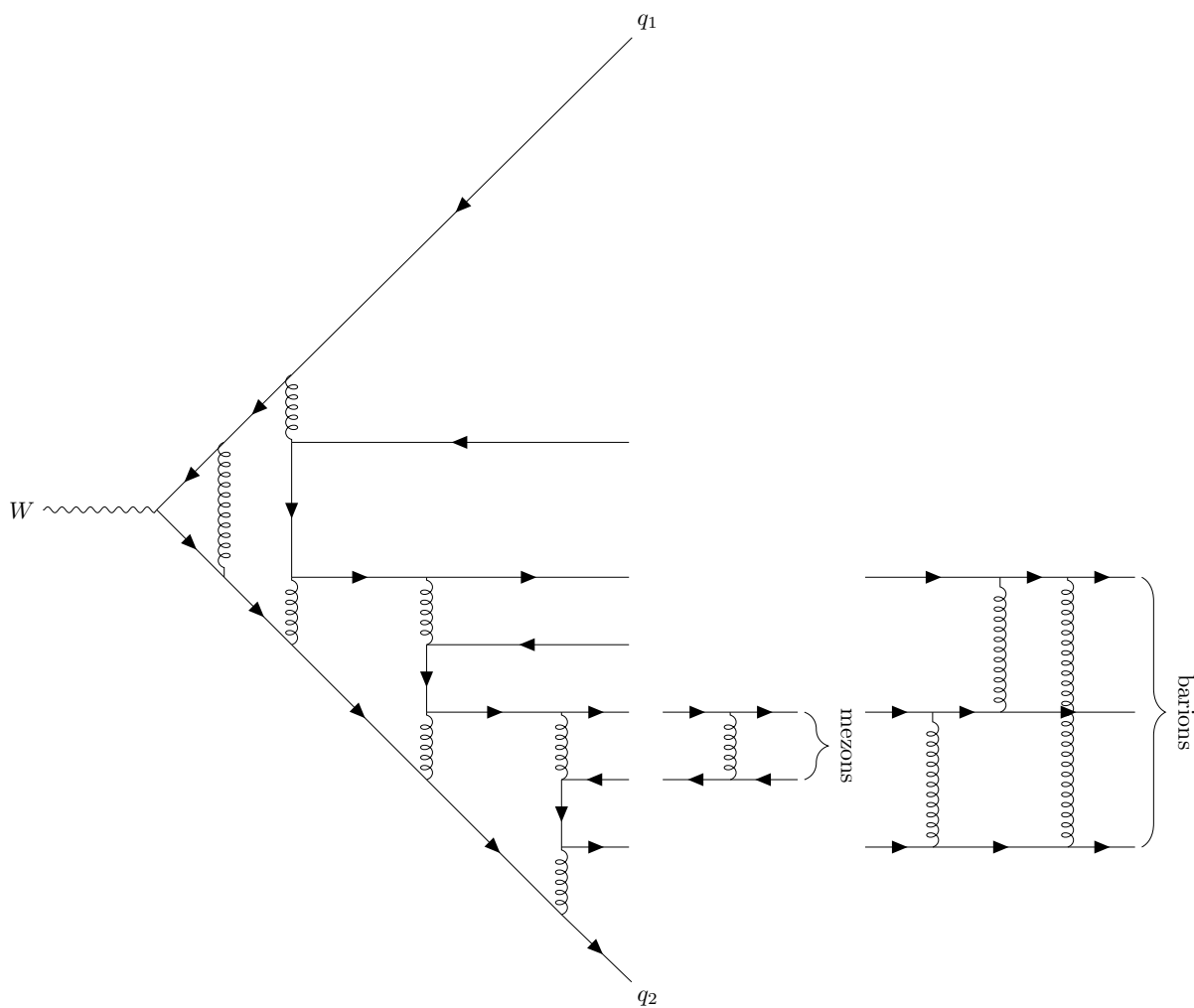
Daļiņa	Masa [GeV]	Mūža ilgums [s]	Novērojamais signāls
$\pi^0$	135,0	$8,5 \times 10^{-27}$	$2\gamma$ absorbēti ECAL
$\pi^\pm$	139,6	$2,6 \times 10^{-8}$	trekeris, ECAL, HCAL lietus
$K_S^0$	497,6	$8,95 \times 10^{-11}$	ECAL, HCAL lietus
$K_L^0$	497,6	$5,1 \times 10^{-8}$	ECAL, HCAL lietus
$K^\pm$	493,7	$1,2 \times 10^{-8}$	trekeris, ECAL, HCAL lietus
$n$	939,6	881,5	ECAL, HCAL lietus
$p$	938,3	$\infty$	trekeris, ECAL, HCAL lietus

Attiecīgās rezonanses ir skaidri saskatāmas ģeneratora līmenī (1.7. att.). Tikai neitrālais pions sabrūk, pirms to var tiešā veidā novērot detektorā.

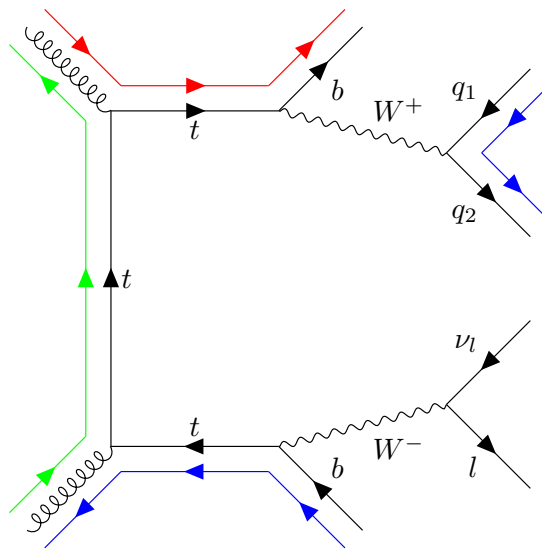




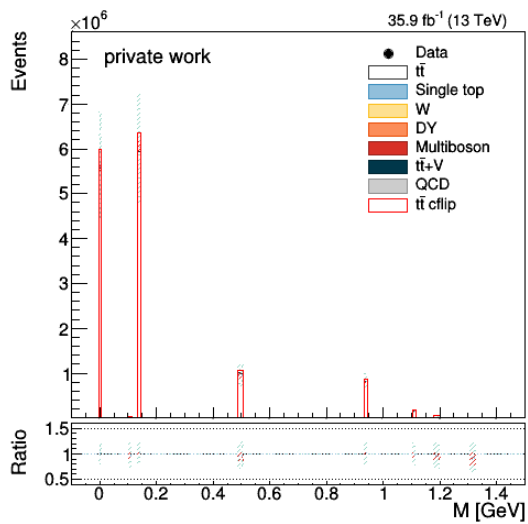
1.4. att. Process, kurā divi enerģētiski kvarki rada jaunus hadronus.



1.5. att. Hadronu radīšana divu kvarku krāsu laukā.



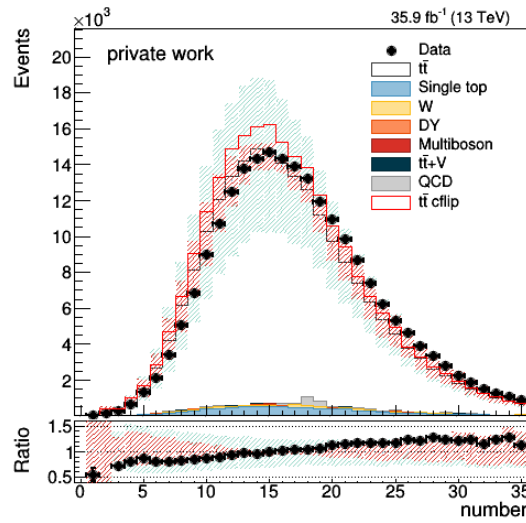
1.6. att. Krāsu plūsmas virsotnes kvarku pāra sabrukuma procesā.



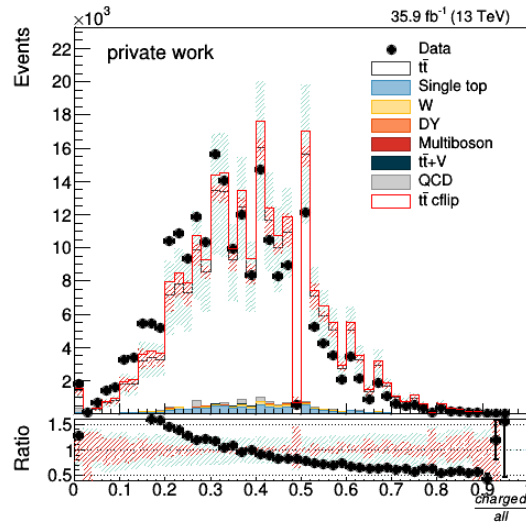
1.7. att. 1.2. tab. norādīto daļiņu rezonanses.

Piezīme: Šis grafiks, kā arī vairāki turpmākie grafiki atbilst KMS pieņemtajam formātam, kā attēlot novērojamo lielumu skaitīšanas eksperimentā. Šī formāta paskaidrojumi ir sniegti 7. nod.

1.8. att. ir redzams daļiņu skaita sadalījums, kas veido vadošo vieglo strūklu. 1.9. att. ir redzama attiecība starp elektriski lādēto daļiņu un kopējo daļiņu skaitu. Vadošā vieglā strūkla ir no  $W$  bozona sabrukuma procesa izstarotā strūkla ar vislielāko šķērsmomentu.



1.8. att. Kopējais daļiņu skaits, kas veido vadošo vieglo strūklu.



1.9. att. Lādēto daļiņu skaita attiecība pret kopējo daļiņu skaitu, kas veido vadošo vieglo strūklu.

Tā kā mēs pētām vieglās strūkulas, kas radušās  $W$  bozona sabrukšanas rezultātā, rodas jautājums, kādēļ strādājam ar  $t\bar{t}$  procesa paraugiem.  $W$  bozona radīšanas šķērsgriezums ir  $> 20\times$  lielāks nekā  $t\bar{t}$  šķērsgriezums. Pētījumā mums jāizmanto  $W \rightarrow qq'$  notikumi, jo leptoniskajos sabrukumos nav krāsu plūsmas.  $W \rightarrow qq'$  notikumus ar pietiekoši zemu  $p_T$  sliekšni ir sarežģīti izmantot trigera palaišanai. Tādēļ mēs izmantojam  $t\bar{t}$  notikumus, kur viens no  $W$  bozoniem sabrūk leptoniski, kas tiek izmantots trigera palaišanai, bet otrs  $W$  bozons sabrūk hadroniski, kas tiek izmantots krāsu plūsmas pētīšanai.

$W$  bozona hadroniskie sabrukuma produkti veido krāsu singletu:

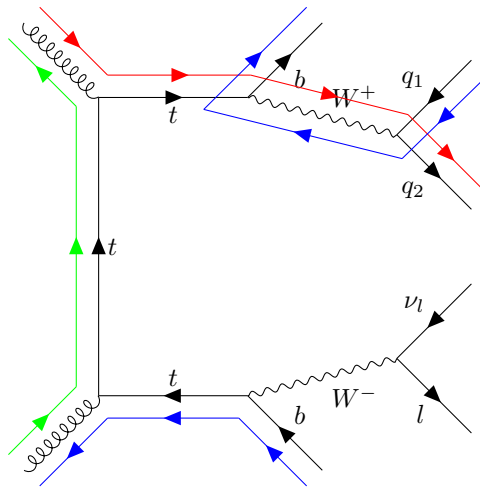
$$\frac{1}{\sqrt{3}} (R\bar{R} + G\bar{G} + B\bar{B}), \quad (1.4.)$$

kur  $R$ ,  $G$  un  $B$  ir trīs krāsu viļņa funkcijas kvantu stāvokļi. Mēs pieminam šo īpašību, jo tālāk aprakstīsim krāsu okteta  $W$  bozonu.

Tiek pieņemts pie krāsu okteta piederošs  $W$  bozons. Tā krāsu viļņa funkcija var ieņemt kādu no astoņām kombinācijām:

$$R\bar{G}, R\bar{B}, G\bar{R}, G\bar{B}, B\bar{R}, B\bar{G}, \frac{1}{\sqrt{2}}(R\bar{R} - G\bar{G}), \frac{1}{\sqrt{6}}(R\bar{R} + G\bar{G} - 2B\bar{B}). \quad (1.5.)$$

Vienīgā dabā novērotā daļiņa, kas pieder pie krāsu okteta ir gluons. Krāsains  $W$  bozons ir pilnībā hipotētiska daļiņa. Tiek pieņemts, ka krāsu okteta  $W$  bozona masa ir vienāda ar  $m_W$ . Šis bozons sasaistītu krāsu laukā vieglos kvarkus ar hadronisko  $b$  un hadronisko  $t$ . Tikmēr viegie kvarki tiktu atsaistīti viens no otra (1.10. att.).



1.10. att. Krāsu plūsma virsotnes kvarku pāra sabrukuma procesā, pieņemot hipotētisku krāsu okteta  $W$  bozonu.

## 2. Eksperimentālais aprīkojums

Šis pētījums ir veikts ar iespējams vienu no vissarežģītākajiem un vislielākajiem zinātnes aprīkojumiem cilvēces vēsturē, kuru izmanto un apkalpo vērienīgs un globāls pētniecības kolektīvs. LHP un tā eksperimenti tika iecerēti un izveidoti, lai atbildētu uz fundamentāliem jautājumiem fizikā:

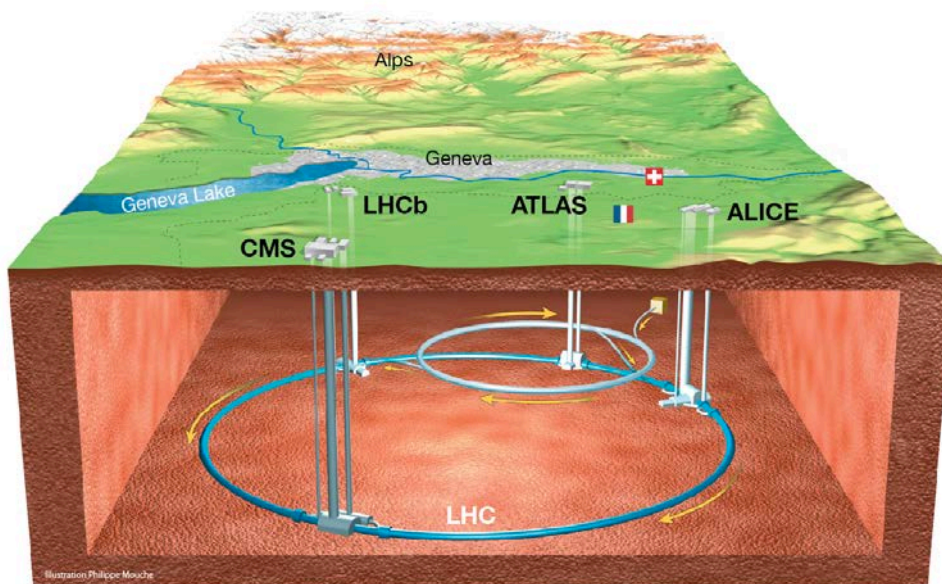
- Pētīt elektrovājo simetrijas laušanu un meklēt Higa bozonu. Higa bozona pastāvēšana tika teorētiski paredzēta 1964. gadā [19], [20], un ilgstoši tas bija iztrūkstošais akmentiņš standartmodeļa mozaikā. Ja to atklātu, tad tiktu apstiprināti mūsu priekšstati par subatomāro pasauli. Par attiecīgo atklājumu vienlaicīgi paziņoja KMS un ATLAS 2012. gadā [21], [22] pēc gandrīz 50 gadus ilgiem meklējumiem.
- Pētīt standartmodeļa fiziku ar līdz šim nepieredzētu precizitāti, izmantojot vismodernākos detektorus, lielu integrēto spīdumu un lielu masas centra enerģiju. Viena no visinteresantākajām tēmām ir nesen atklātā virsotnes kvarka pētniecība. Savas lielās masas dēļ tas labi saistās ar Higa bozonu.
- Izveidot apstākļus, kādos pastāvēja senatnīgā kvarku-gluonu plazma, šādi rodot atbildes uz fundamentāliem jautājumiem par mūsu Visuma evolūciju.
- Meklēt tumšo matēriju, eksotiskās daļiņas, supersimetriskos partnerus, papildus dimensijas, kā arī risināt citas mīklas un hipotēzes ārpus standartmodeļa. Uz šiem jautājumiem joprojām nav rastas pārliecinošas atbildes, un tādēļ ir iecerēts radīt Augsta spīduma LHP, Nākotnes apļveida kolaidēri un citas lielizmēra eksperimentālas iekārtas.

KMS eksperiments ir viens no galvenajiem eksperimentiem LHP. Šajā aprakstā LHP tiks minēts pirmais, pēc tam – KMS aprīkojuma apraksts.

### 2.1. LHP

LHP ir divapļu supravadošs hadronu paātrinātājs un kolaidēris, kas ierīkot 26,7 km garā tunelī 45–170 m zem zemes, šķērsojot Francijas un Šveices robežu Ženēvas apkārtnē (2.1. att). Hadroni tajā riņķo ar nemainīgu rādiusu, bet mainīgu frekvenci. Tātad LHP ir sinhrotrons. LHP atkārtoti izmanto Lielā elektronu-pozitronu paātrinātāja tuneli un ievades ķēdi.

Sākotnēji LHP projekts sastapās ar sīvu konkurenci no daudz jaudīgākā Supravadošā superkolaidēra (SSK) ASV. K. Rubia (oriģ. *C. Rubbia*) apgalvoja, ka 10 reizes lielāks spīdums LHP kompensētu tā mazāko enerģiju salīdzinājumā ar SSK. Galu galā 1993. gadā SSK projekts tika atcelts. Būtisku lomu spēlēja ievērojamais budžeta pieaugums. CERN padome LHP projektu apstiprināja 1994. gadā. Tas sāka iegūt datus 2008. gadā.



2.1. att. Lielais hadronu paātrinātājs, kas atrodas pazemē uz Francijas–Šveices robežas, Ženēvas apkārtnē [23].

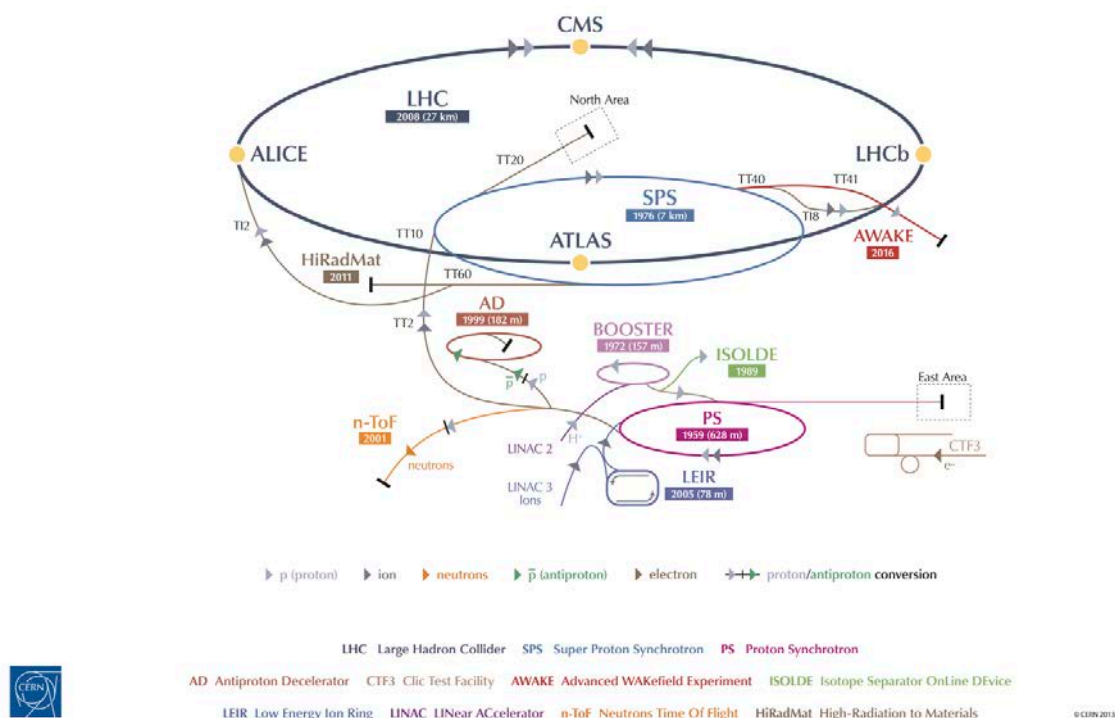
Protoni LHP riņķo praktiski ar gaismas ātrumu. Enerģija uz protonu ir 7 TeV,  $\gamma$  faktors ir 7461. Paātrināt protonu no miera stāvokļa līdz šādai enerģijai vienā paātrinātājā nav praktiski. Tādēļ līdz šādas enerģijas sasniegšanai protoni tiek paātrināti vairākās stadijās CERN paātrinātāju kompleksā (2.2. att.):

- līdz 50 MeV Linac2,
- līdz 1,4 GeV PS pastiprinātājā,
- līdz 26 GeV Protonu sinhrotronā (PS),
- līdz 450 GeV Superprotonu sinhrotronā (SPS).

Pēc tam, kad protoni ir tikuši pilnībā paātrināti, to riņķveida kustība tiek uzturēta – LHP ir uzkrāšanas aplis. Vienā pūlī ir sakopoti  $1,15 \times 10^{11}$  protoni, kopā riņķo 2808 pūļi. Apgriezienu frekvence ir 11,245 kHz [25]. Katra pūļa šķērsojums ilgst 25 ns. Kūļa caurulēs tiek uzturēts ārkārtīgi augsts vakuums.

LHP izmanto supravadošu magnētu sistēmas. Īpaši izceļams ir dipola magnēts, kas kūli ieloka apļveida arkā, un kvadrupola magnēts, kas kūli sašaurina pirms sadursmes punktiem. Augstākās pakāpes magnēti precizē kūļa kustību un koriģē to. Magnētu sistēmas balstās uz NbTi Rezerforda kabeli, kas ir atdzesēts ar hēliju zem 2 K – zem hēlija lambdas punkta. Līdz ar to atšķirībā no citiem lieliem paātrinātājiem, kas arī izmanto NbTi, bet strādā virs hēlija lambdas punkta (Tevatron-FNAL, HERA-DESY un RHIC-BNL), LHP dipolu magnētos tiek iegūts daudz stiprāks 8 T lauks. LHP vajadzībām tika izstrādāts īpašs divi-vienā dipola magnēts, kurā tiek izmantots viens jūgs divu polaritāšu laukiem, kas atbilst abiem pretējos virzienos riņķojošiem protonu kūļiem. Lai atdzesētu magnētus, tiek izmantota vislielākā kriogēnā sistēma uz Zemes [26] [27].

## CERN's Accelerator Complex



2.2. att. CERN paātrinātāju kompleks [24].

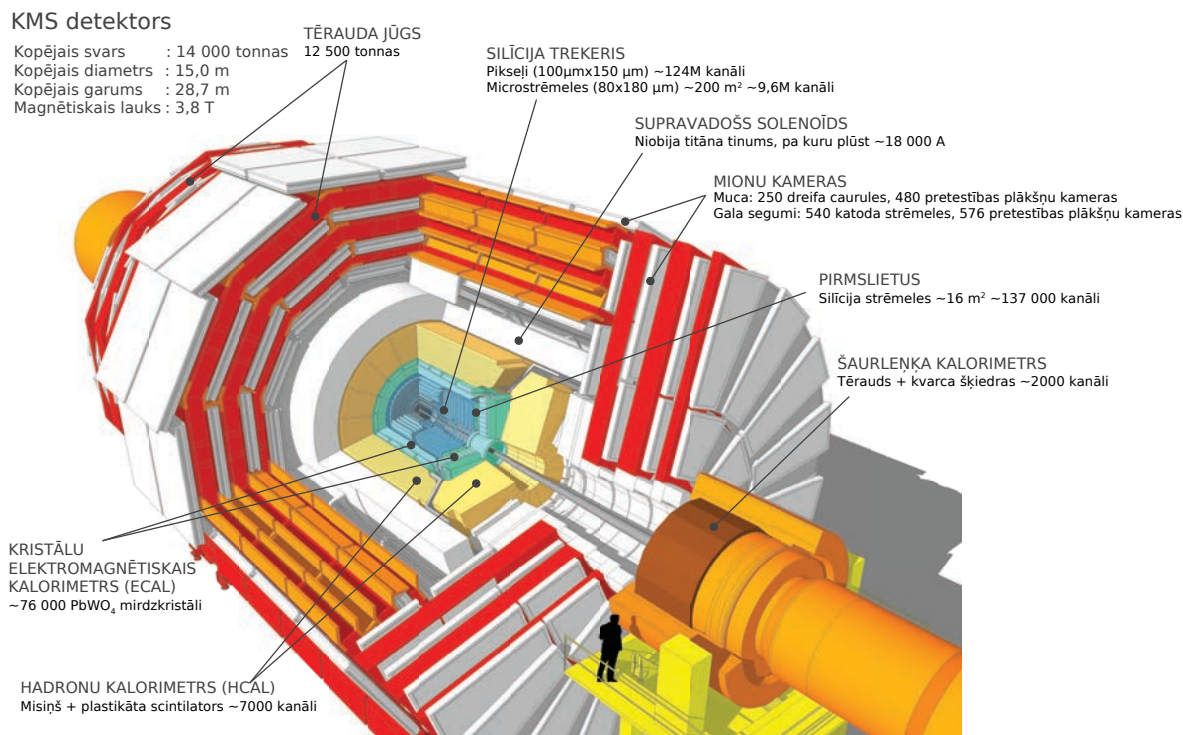
LHP nominālā masas centra enerģija ir 14 TeV. Pirmajā datu gūšanas periodā no 2010.–2013. gadam tas strādāja ar  $\sqrt{s} = 7-8$  TeV. Šo periodu sauc par I darba periodu. Otrajā datu gūšanas periodā no 2015.–2018. gada, ko sauc par II darba periodu, tas strādāja ar  $\sqrt{s} = 13-14$  TeV. Šis pētījums ir veikts ar II darba perioda datiem.

LHP ietilpst divi liela spīduma eksperimentālie ievietojumi – KMS un ATLAS, katram no kuriem nominālais spīdums ir virs  $10 \text{ }^1/\text{pb}\cdot\text{s}$ , viens *b* fizikas eksperiments, kura nominālais spīdums ir  $0,1 \text{ }^1/\text{pb}\cdot\text{s}$  un viens speciāls jonu sadursmju eksperiments – ALICE.

## 2.2. KMS detektors

KMS detektors atrodas LHP piektajā punktā netālu no franču ciemata Sesī (oriģ. *Cessy*) starp Ženēvas ezeru un Žurā kalniem (oriģ. *Jura*). Tas atrodas pazemes bunkuros 100 m dziļumā.

KMS detektors ir projektēts dažādām fizikas programmām TeV skalā. Tas ir sīpola tipa detektors, aptverot  $4\pi$  telpiskā leņķa ap sadursmes punktu. KMS detektoru veido šādi slāņi, sākot no kūļa ass – silīcija pikseļu un strēmeļu trekeris, vara volframāta elektromagnētiskais kalorimetrs, misiņa un plastikāta scintilators, supravadošs magnēts, kas rada 3,8–4,0 T magnētisko lauku, un gāzu jonizācijas mionu spektrometrs [28]. KMS detektoram ir cilindra forma. Tā abos galos ir gala segumi, bet tā centrālā daļa tiek saukta par mucu. KMS detektora garums ir 21,6 m, diametrs 14,6 m un kopējais svārs 12 500 t. KMS detektora atvērums redzams 2.3. att.



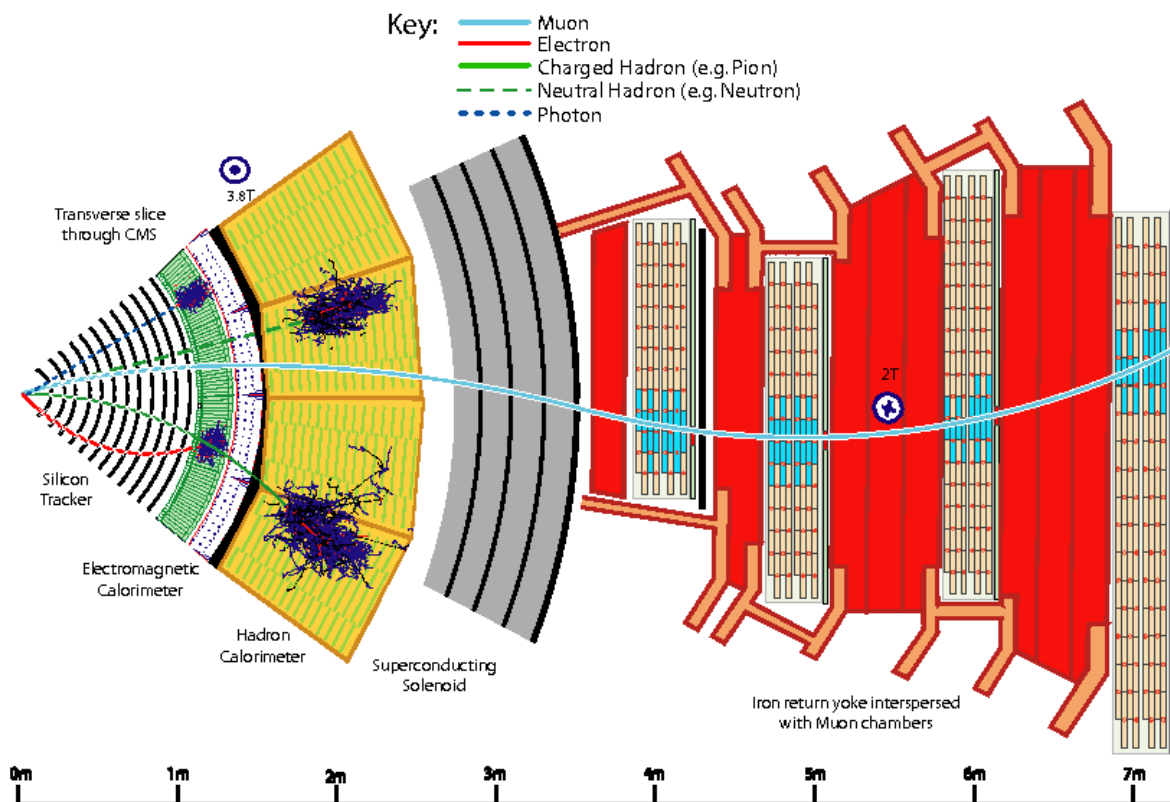
2.3. att. KMS detektora atvērums [29].

Sākot no kūļu mijiedarbības reģiona, daļiņas vispirms nonāk trekerī, kurš no signāliem (ierosinājumiem) jutīgajos slāņos rekonstruē lādēto daļiņu trajektorijas un sākuma punktus (virsotnes). Trekeris atrodas magnētiskajā laukā, kas noliec lādēto daļiņu trajektorijas un ļauj izmērīt to elektrisko lādiņu un momentus. Elektronu un fotonu pēc tam tiek absorbēti elektromagnētiskajā kalorimetrā (ECAL). Attiecīgie elektromagnētiskie lieti tiek detektēti kā enerģijas puduris vienkopus esošās šūnās, no kurām var izmērīt daļiņu enerģiju un virzienu. Lādēti un neitrāli hadroni ECAL var ierosināt hadronu lietu, kuru pēc tam pilnībā absorbē hadroniskais kalorimetrs (HCAL). Attiecīgie puduri tiek izmantoti, lai novērtētu to enerģiju un virzienu. Mioni un neitrino šķērso kalimetri ar vāju vai nekādu mijiedarbību. Kamēr neitrino izbēg nedetekstēti, mioni rada ierosinājumus aiz kalorimetriem esošos papildu trekēšanas slāņos, kurus sauc par mionu detektoriem. Šis vienkāršotais apskats ir atspoguļots 2.4. att., kurā ir redzama KMS detektora loksne.

Ievērojami uzlabots notikumu apraksts tiek iegūts, atrodot sakarības starp novērojumiem dažādos detektora slāņos (trekiem un puduriem), lai identificētu katru gala stāvokļa daļiņu, un apkopojot to mērījumus, lai rekonstruētu daļiņas īpašības, balstoties uz šo identifikāciju. Šo visaptverošo pieeju sauc par daļiņu plūsmas (PF) rekonstrukciju [2].

Smalkās graudainības un ātrās atbildes trekeris [30], [31] ir svarīgs segments smalko kūļa sastāvdaļu izšķiršanā. Tas ir precīzi novietots līdz ar kūļa asi, un tā kopējais garums ir 5,8 m, rādiuss 2,5 m. KMS soleonīds rada homogēnu un koaksiālu 3,8–4,0 T magnētisko lauku visā trekera tilpumā. Kad rādiuss ir zem 10 cm, ierosinājuma biežuma pakāpe ir 100 kHz/mm<sup>2</sup>. Lai sasniegtu vēlamu izšķirtspēju 100 µm × 150 µm, tiek izmantoti pikseļu detektori. Pie lielāka rādiusa samazinātā daļiņu plūsma pieļauj silīcija mikrostrēmeļu detektoru izmantošanu. To tipiskais izmērs ir 10 cm × 80 µm līdz 25 cm × 150 µm, izmēram pieaugot, pieaugot rādiusam.





2.4. att. Daļiņu mijiedarbību skice KMS šķērsgriezumā no kūļa mijiedarbības punkta līdz mionu detektoram [2].

Kopā ir 66 milj. pikseļu ar  $1 \text{ m}^2$  aktīvo virsmu pikseļu detektorā un 9,3 milj. strēmeļu ar  $193 \text{ m}^2$  aktīvo virsmu strēmeļu detektorā.

KMS elektromagnētiskais kalorimetrs (ECAL) ir hermētisks homogēns kalorimetrs, kurš izveidots no 61 200 svina volframāta ( $\text{PbWO}_4$ ) kristāliem, kas uzstādīti mucā, kā arī 7324 kristāliem gala segumos. Mucā aptver pseidostraujumu intervālā  $|\eta| < 1,479$ , gala segumi aptver pseidostraujumu intervālā  $1,479 < |\eta| < 3,0$ . Pirms gala segumiem ir uzstādīts pirmslietus detektors. Mucā tiek izmantotas lavīnas fotodiodes (APDs), bet gala segumos tiek izmantotas vakuuma fototriodes (VPTs).  $\text{PbWO}_4$  kristāliem piemīt tādas īpašības, kas tos padara piemērotus LHP elektromagnētiskajam kalorimetram. To lielais blīvums  $8,28 \text{ g/cm}^3$ , mazais radiācijas garums ( $0,89 \text{ cm}$ ) un mazais Moljēra rādiuss ( $2,2 \text{ cm}$ ) ļauj radīt smalkas graudainības un kompaktu kalorimetru. Scintilācijas rimšanas laiks  $\text{PbWO}_4$  ir tādas pašas pakāpes lielums, kā LHP pūļu šķērsojuma laiks: apmēram 80 % gaismas tiek izstaroti 25 ns. Mucas kristālu šķērsriezuma laukums atbilst aptuveni  $0,0174 \times 0,0174 \eta\text{-}\phi$  mērvienībās, kam atbilst priekšējā šķērsriezuma laukums  $22 \text{ mm}^2 \times 22 \text{ mm}^2$  un aizmugurējā šķērsriezuma laukums  $26 \text{ mm}^2 \times 26 \text{ mm}^2$ . Kristālu garums ir 230 mm, kas atbilst  $25,8 X_0$ . Mucā ir 61 200 kristālu. Gala segumos kristālu aizmugurējā šķērsriezuma laukums ir  $30 \times 30 \text{ mm}^2$ , un priekšējā šķērsriezuma laukums ir  $28,62 \text{ mm}^2 \times 28,62 \text{ mm}^2$ , kā arī to garums ir 220 mm, kas atbilst  $24,7 X_0$ . Turklāt uzticamajā reģionā  $1,653 < |\eta| < 2,6$  atrodas pirmslietus detektors, kura galvenais mērķis ir identificēt neitrālos pionus gala segumos. Pirmslietus detektors sastāv no svina izstarotāja, kurā ienākošie elektroni/fotoni izraisa elektromagnētiskos lietus. Aiz svina izstarotāja atrodas silīcija strēmeles,

lai izmērītu atstāto enerģiju un lietu šķērsprofilus. Enerģijas izšķirtspēja mucas elektromagnētiskajā kalorimetrā ir atkarīga no ienākošās enerģijas, un tā ir novērtēta no 0,94 % ( $\sigma/E$ ) pie 20 GeV līdz 0,34 % pie 250 GeV [32].

Hadroniskais kalorimetrs [33] sastāv no mucas ( $|\eta| < 1,3$ ) un diviem gala seguma diskem ( $1,3 < |\eta| < 3,0$ ). Hadronu kalorimetra tilpums centrālajā pseidostraujuma intervālā ir ierobežots. Tādēļ tiek izmantots ārējs atblāzmas novērotājs aiz solenoīda. Solenoīds tiek izmantots kā papildu absorbējošais materiāls atblāzmas novērotājam. Absorbētājs sastāv no 40 mm biezas priekšējās tērauda plāksnes, kurai seko astoņas 50,5 mm biezas misiņa plāksnes, sešas 56,5 mm biezas misiņa plāksnes un 75 mm bieza tērauda aizmugurējā plāksne. Kopējais absorbētāja biezums  $90^\circ$  leņķī ir 5,82 mijiedarbības garumi ( $\lambda_I$ ). Kā aktīvais materiāls tiek izmantots dakstiņos izkārtots plastikāta scintilators. Gaismas izvadīšanai tiek izmantotas viļņa garuma pārbīdes šķiedras. Nolasījumi hadroniskajā kalorimetrā tiek veikti individuālos torņos ar kopējo šķērsriezuma laukumu  $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0,087 \times 0,087$  intervālā  $|\eta| < 1,6$  un  $0,17 \times 0,17$  pie lielākiem pseidostraujumiem. Hadronisko kalorimetru papildina šaurleņķa hadronu kalorimetri  $|\eta|$  intervālā līdz  $\simeq 5,0$ , kur daļiņu plūsma un radiācijas bojājumi ir vislielākie. Hadronu šaurleņķa kalorimetrs sastāv no tērauda absorbētāja, kuru veido rievotas plāksnes. Rievās gareniski kūļa virzienam ir ievietotas radiācijas noturīgas kvarca šķiedras, un tās nolasa foto-reizinātāji. Signāli tiek sagrupēti tā, lai varētu izveidot kalorimetra torņus ar šķērsriezumu  $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0,175 \times 0,175$  lielākajā daļā pseidostraujuma intervāla.

Magnēts ir novietots aiz kalorimetriem un trekera, lai nodrošinātu, ka pēc iespējas mazāks materiāla daudzums atrodas starp minētajiem apakšdetektoriem un mijiedarbības punktu. Magnēta garums ir 12,5 m, un tā brīvubuma rādiuss ir 3,15 m. Tinums rada 3,8–4,0 T vienmērīgu aksiālu magnētisko lauku trekerī un kalorimetros. Magnēts strādā 4,45 K temperatūrā, un tajā tiek izmantoti NbTi supravadoši tinumi. Magnētu raksturo augsta uzkrātās enerģijas/masas attiecība  $11,6 \text{ kJ/kg}$ .

Mionu kanāls ir ļoti efektīvs instruments interesējošu AEF procesu pētīšanai, un tas ir bijis ļoti nozīmīgs jau pirmajās KMS eksperimenta iecerēs. Tas izkaidrojams ar to, ka mionus ir ļoti viegli novērot un tiem raksturīgi nelieli radiācijas zudumi trekera materiālā. Četras mionu detektora plāksnes atrodas ārpus solenoīda tinuma, kuras caurvij trīs tērauda jūga slāņi [34]. Mucā, kas atbilst pseidostraujuma intervālam  $|\eta| < 1,2$ , kur mionu biežums ir zems un 4 T magnētiskais lauks ir vienmērīgs un pārsvarā ierobežots tērauda jūgā, tiek izmantotas dreifa kameras. Mionu sistēmā gala segumos  $0,9 < |\eta| < 2,4$ , kur mionu biežums un trokšņu līmenis ir augsts, kā arī magnētiskais lauks ir liels un nevienmērīgs, tiek izmantotas katoda strēmeļu kameras (KSK). Trokšņu līmeņa nenoteiktības dēļ un mionu sistēmas nenoteiktības dēļ tās spējā nomērīt pareizo kūļa šķērsošanas laiku, LHP, sasniedzot nominālo spīdumu, papildus gan mucā, gan gala segumos tiek izmantota speciāla trigeru sistēma. Ta sastāv no pretestības plākšņu kamerām (PPK). PPK nodrošina ātru, neatkarīgu un ļoti segmentētu trigeri ar asu  $p_T$  sliekšni lielā mionu sistēmas pseidostraujuma intervālā ( $|\eta| < 1,6$ ). Daļiņu plūsmas rekonstrukcija izmanto globālu trajektorijas saderināšanu mionu detektorā un iekšējā trekerī.

Strūklas tiek rekonstruētas, izmantojot anti- $k_T$  algoritmu [35] ar rādiusa parametru  $R = 0,4$  un FASTJET pakotnes izpildījumu [36]. Attālums starp strūklām  $d_{ij}$  tiek noteikts atbilstoši šādai formulai, izmantojot  $p = -1$ :

$$d_{ij} = \min(k_{Ti}^{2p}, k_{Tj}^{2p}) \frac{\Delta_{ij}^2}{R^2}, \quad (2.1.)$$

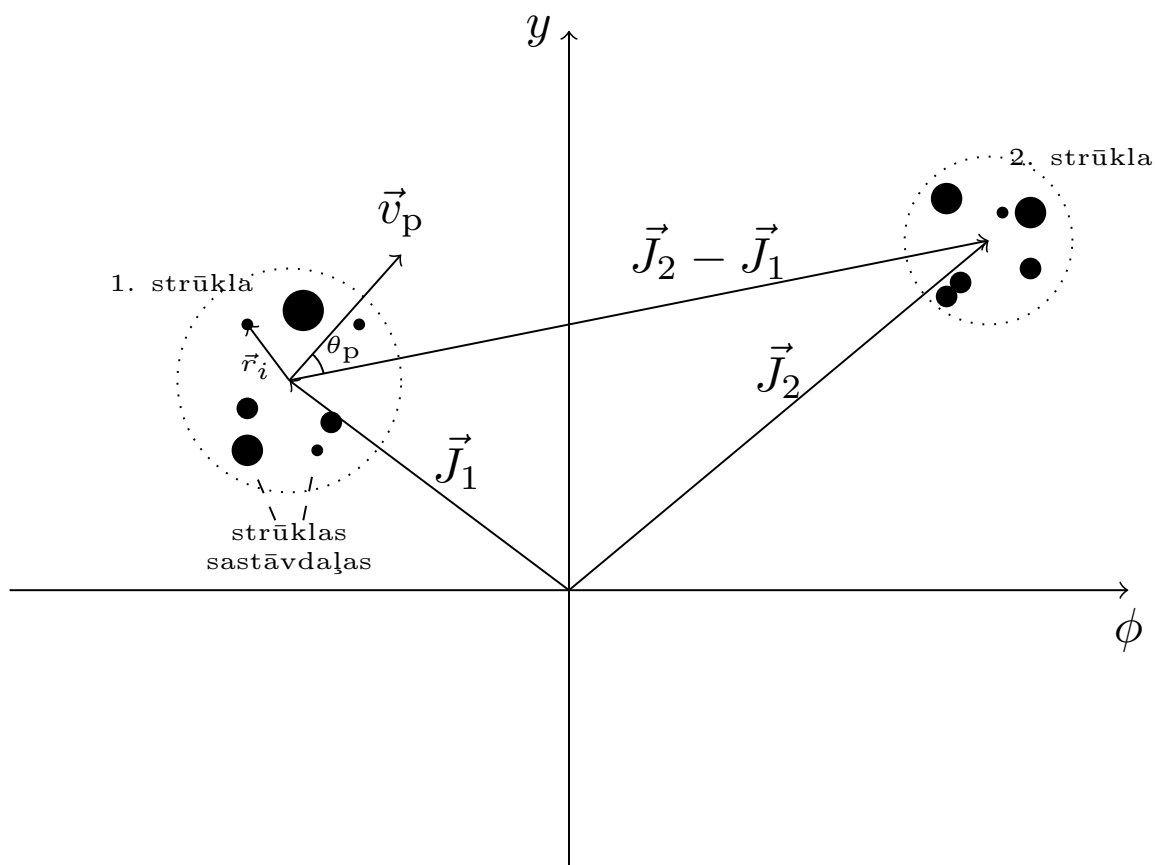
kur  $\Delta_{ij}^2 = (y_i - y_j)^2 + (\phi_i - \phi_j)^2$  un  $k_{Ti}$ ,  $y_i$ ,  $\phi_i$  ir attiecīgi daļiņas  $i$  šķērsmoments, straujums, un azimuts.

Svarīga šī algoritma priekšrocība ir tāda, ka mīkstās daļiņās neizmaina strūklas formu. Ja attālums starp strūklām  $\Delta_{ij} \leq 2R$ , tad tās ieņem konisku formu.

## 3. Metodoloģija

### 3.1. Vilkmes leņķis

Mēs izmantojam metodoloģiju, ko piedāvā [3] un kas balstās uz vilkmes leņķi krāsu saistības noteikšanai starp divām kvarku strūklām. Vilkmes leņķis  $\theta_p$  starp vilkmes vektoru  $\vec{v}_p$  un starpību starp divām strūklām  $\vec{J}_2 - \vec{J}_1$  ir attēlots 3.1. att. Tiek izmantota  $\phi$ - $y$  koordinātu sistēma.



3.1. att. Vilkmes leņķis  $\theta_p$ , vilkmes vektors  $\vec{v}_p$  attēlots  $\phi$ - $y$  plaknē.

Vilkmes vektoru aprēķina saskaņā ar formulu

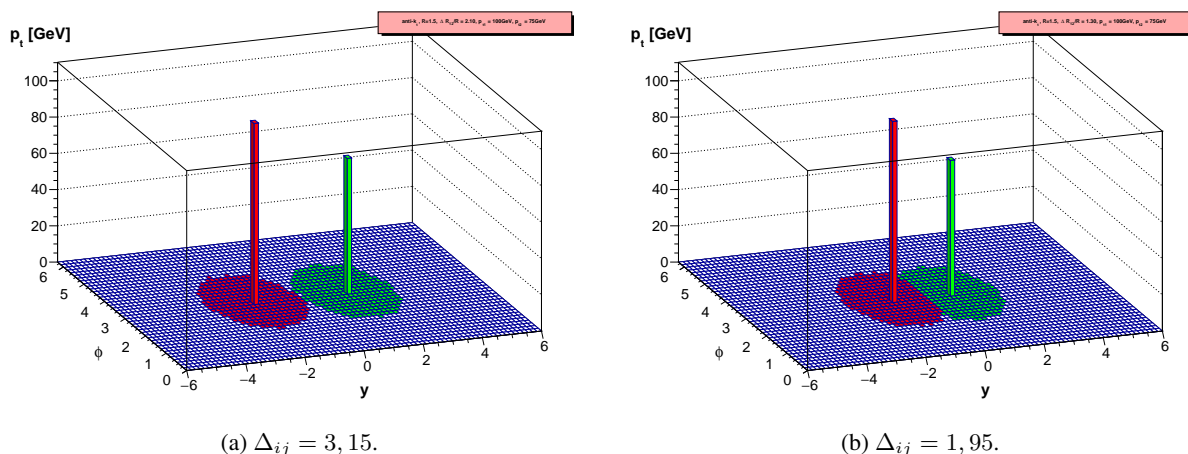
$$\vec{v}_p = \sum_{i \in J} \frac{p_T^i |\vec{r}_i|}{p_T^J} \vec{r}_i, \quad (3.1.)$$

kur  $i$  ir strūklas  $J$  sastāvdaļas indekss,  $p_T^i$  ir strūklas sastāvdaļas šķērsmoments,  $\vec{r}_i$  ir vektoriālā starpība starp strūklas sastāvdaļu un strūklu,  $p_T^J$  ir strūklas šķērsmoments.

Sagaidāms, ka gadījumā, ja strūklas ir saistītas ar krāsām, to sastāvdaļas būs izkliedētas reģionā starp strūklām. Līdz ar to  $J_1$  vilkmes vektors rādīs uz  $J_2$ , un vilkmes leņķis būs šaurs. Gadījumā, ja strūklas nav saistītas ar krāsām, to sastāvdaļas būs izkliedētas izotropiski.

Vilkmes leņķa metodoloģija ir lietota Tevatrona DØ eksperimentā [8] un LHP ATLAS eksperimentā I datu gūšanas periodā [9] un II datu gūšanas periodā [37]. Mēs ceram, ka mums izdosies iegūt vēl labākus rezultātus ar vilkmes leņķa metodoloģiju, jo mūsu rīcībā ir 4 T KMS solenoīds.

Anti- $k_T$  sakopšanas algoritms nodrošina, ka strūklas ieņems konisku formu, ja attālums starp strūklām  $\Delta R$  ir divreiz lielāks nekā parametrs  $R$ , kurš KMS ir noteikts kā 0,4. Šis gadījums ir redzams 3.2. (a) att. Gadījumā, ja starpība starp strūklām  $\Delta R$  ir mazāka nekā divkārtšs parametrs  $R$ , cietā strūkla pievienos sev mīkstās strūklas sastāvdaļas. Šis gadījums ir redzams 3.2. (b) att. Pēdējais gadījums atstās iespaidu uz krāsu plūsmas analīzi ar vilkmes leņķa metodi, jo šādi tiks ierosināta vienas strūklas vilkme uz otru strūklu. Tādēļ ir pamatota gadījumu  $\Delta R \leq 2R$  un  $\Delta R > 2R$  nošķiršana.

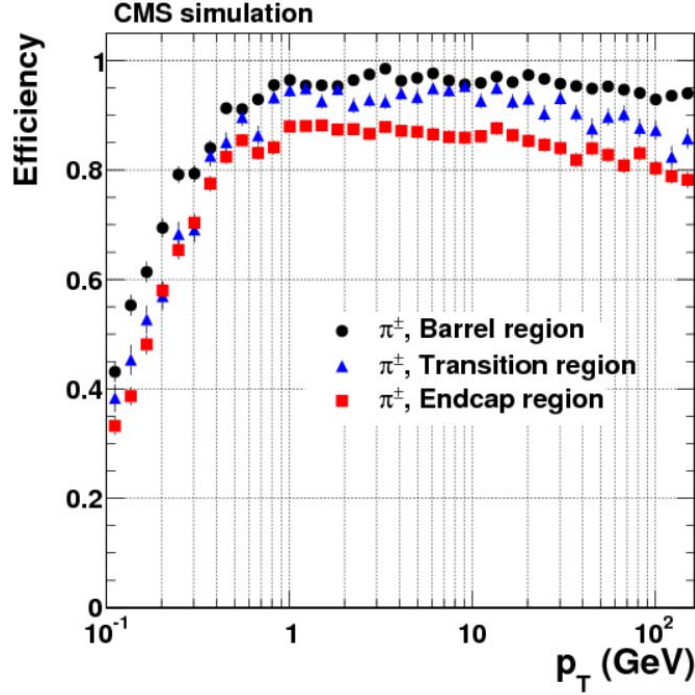


3.2. att. Strūklu formas, kas iegūtas ar anti- $k_T$  sakopšanas algoritmu. Šajā piemērā izmanto  $R = 1, 5$ . Tiek attēloti divi gadījumi –  $\Delta_{ij} = 3, 15$  un  $\Delta_{ij} = 1, 95$ . Cietās strūklas  $p_T$  ir 100 GeV, mīkstās strūklas  $p_T$  ir 75 GeV. Par iespēju izmantot attēlus pateicos Kačari (oriģ. *Cacciari*), Salamam (oriģ. *Salam*) un Sojezam (oriģ. *Soyez*) [38].

Detektora trekēšanas efektivitāte nav ideāla. Tā ir atkarīga no treku meklēšanas algoritma un detektora īpašībām, kā, piemēram, ģeometrisko uzņēmību un materiālu saturu. 3.3. att. redzama pionu trekēšanas efektivitāte. Pions lielā daudzumā rodas kvarku hadronizācijas procesā. Trekēšanas efektivitāte ir definēta kā to simulēto lādēto daļiņu skaits, kuras saistītas ar rekonstruētiem trekiem, īpatsvars. Trekēšanās efektivitāte pasliktinās pie zema daļiņas  $p_T$ . Mūsu analīzē esam izvēlējušies 1 GeV kā  $p_T$  sliekšni, zem kura daļiņas tiek izslēgtas no analīzes.

## 3.2. LEP metode

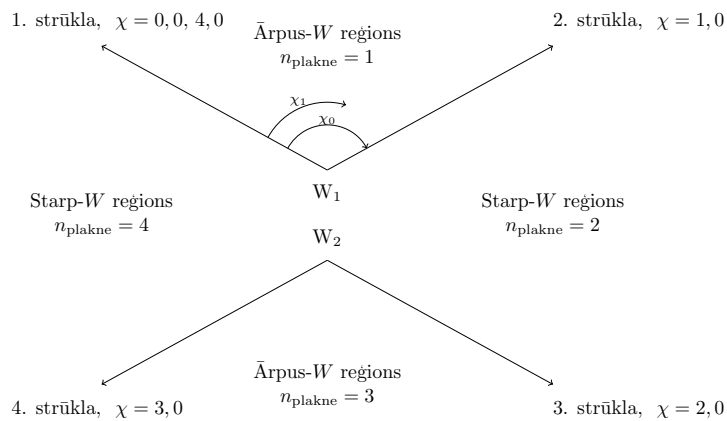
LEP dažādos eksperimentos tika izmantota arī cita metode ar krāsām saistītu strūklu pētīšanai  $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}q\bar{q}$  procesā ar  $\sqrt{s} = 189\text{--}207$  GeV [5], [4], [6]. Tiek apskatītas divas starp- $W$  plaknes, kuras veido ar krāsām saistīti kvarki un divas ārpus- $W$  plaknes, kuras veido ar krāsām nesaistīti



3.3. att. Pionu, kas izturējuši augstas tīrības prasības, treku rekonstruēšanas efektivitāte. Rezultāti ir atainoti kā funkcija no  $p_T$  mucas, pārejas un gala segumu reģionos, kas attiecīgi atbilst  $|\eta|$  intervāliem 0–0,9, 0,9–1,4 un 1,4–2,5 [39].

kvarki, kā ilustrēts 3.4. att. Daļiņas tiek projicētas uz šīm plaknēm, un tiek noteikts leņķis  $\chi_1$  ar kvarku, kas atrodas kreisajā pusē. Ja šis leņķis ir mazāks nekā leņķis  $\chi_0$  starp kvarkiem, kas veido plakni (tas nozīmē, ka daļiņa tiek projicēta starp attiecīgajiem kvarkiem), tad normalizētais leņķis  $\chi_R = \chi_1/\chi_0$  tiek iekļauts grafika reģionā, kas atbilst šai plaknei, pēc normalizētā leņķa lineāras transformācijas

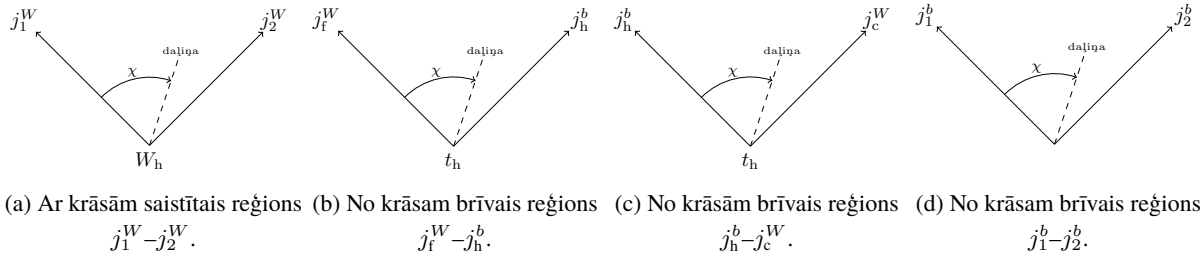
$$\chi = \chi_R + n_{\text{plakne}} - 1. \quad (3.2.)$$



3.4. att. Starp- $W$  un ārpus- $W$  plaknes  $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}q\bar{q}$  procesā un relatīvais leņķis  $\chi_R = \chi_1/\chi_0$ .

$t\bar{t}$  semileptoniskajā sabrukumā tāds grupējums, kā redzams 3.4. att., nav iespējams. Tādēļ tiek izmantota pielāgošana, kas piedāvāta 3.5. att. Tiek izmantota viena plakne, kuru veido ar

krāsām saistītas strūklas: vadošā vieglā strūkla  $j_1^W$  un otra vadošā vieglā strūkla  $j_2^W$ , kas radušās hadroniskajā  $W$  bozona sabrukuma procesā. Turklāt tiek izmantoti trīs no krāsām brīvi reģioni, kurus veido 1) tālākā vieglā strūkla  $j_f^W$  un hadroniskā  $b$  strūkla  $j_h^b$ , 2) hadroniskā  $b$  strūkla  $j_h^b$  un tuvākā vieglā strūkla  $j_c^W$ , 3) vadošā  $b$  strūkla  $j_1^b$  un otra vadošā  $b$  strūkla  $j_2^b$ . Attālums starp strūklām tiek noteikts, vadoties pēc leņķa starp tām Eiklīda telpā. Varam cerēt, ka reģionos, kas atainoti 3.5. (b) att. un 3.5. (c) att., spēsīm novērot krāsu atkārtota savienojuma efektus.



3.5. att. LEP metodes adaptācija  $t\bar{t}$  semileptoniskajam sabrukumam ar ar krāsām saistītu reģionu un trim no krāsām brīviem reģioniem.

Lai metodi varētu lietot, nepieciešams nošķirt hadronisko un leptonisko  $b$  kvarku. Katrs no  $b$  kvarkiem tiek sapārots ar  $W$  bozonu, un kopējā invariantā masa tiek salīdzināta ar  $t$  kvarka masu – 173,34 GeV.  $b$  kvarks tiek piesaistīts tam zaram, kur masu starpība ir vismazākā.

## 4. Datu un MK paraugi

Šīs nodaļas izklāsts ir pielāgots pēc [40] un [41] parauga, jo šajos pētījumos tiek izmantoti līdzīgi datu un Montekarlo paraugi.

Dati, kas izmantoti šajā pētījumā, tika iegūti 2016B-H datu iegūšanas periodos ar kopīgo apstiprināto integrēto spīdumu  $35,9 \text{ fb}^{-1}$  visos analizētajos kanālos. Spīdums ir aprēķināts ar BRILCALC rīku [42], izmantojot šādu komandu:

```
brilcalc lumi -b "STABLE BEAMS" --normtag /afs/cern.ch/user/l/lumipro/public/Normtags/normtag_DATACERT.json -i lumiSummary.json
```

Visi dati, kas izmantoti šajā pētījumā, ir uzskaitīti 4.1. tab.

4.1. tabula

Primārie datu kopumi, kas izmantoti šajā analizē. PD ir saīsinājums vienam mionam vai vienam elektronam [41].

Primārais datu kopums	Integrētais spīdums
/PD/Run2016B-23Sep2016-v3/MINIAOD	
/PD/Run2016C-23Sep2016-v1/MINIAOD	
/PD/Run2016D-23Sep2016-v1/MINIAOD	
/PD/Run2016E-23Sep2016-v1/MINIAOD	35.9 $\text{fb}^{-1}$
/PD/Run2016F-23Sep2016-v1/MINIAOD	
/PD/Run2016G-23Sep2016-v1/MINIAOD	
/PD/Run2016H-PromptReco-v2/MINIAOD	
/PD/Run2016H-PromptReco-v3/MINIAOD	

Simulēto paraugu saraksts sniegts 4.2. tab. Tie ir iegūti no RunIISummer16MiniAODv2-PUMoriond17\_80X\_mcRun2\_asymptotic\_2016\_TracheIV\_v6 izstrādes.

Izmantotie šķērsgriezumi ir teorētisks paredzējums. Tie tiek iegūti no [43] un [44], izņemot  $t\bar{t}$ , kuram ģenerators līmeņa šķērsgriezums ir iegūts no [45]. Sagaidāmais  $t\bar{t}$  šķērsgriezums otrajā vadošajā pakāpē ir  $832_{-29}^{+20}$  (mērogs)  $\pm 35$  (PDF +  $\alpha_s$ ) [46]. Šo rezultātu izmantojam, lai normalizētu visus  $t\bar{t}$  paraugus.



Analīzē izmantotie simulāciju paraugi. Sniedzam arī šķērsriezumu, kas izmantots, lai normalizētu paraugu [41].

Process	Datu kopums	$\sigma$ [pb]
<b>Signāls</b>		
$t\bar{t}$	TT_TuneCUETP8M2T4_13TeV-powheg-pythia8	832
<b>Fons</b>		
$t\bar{t} + W$	TTWJetsToLNu_TuneCUETP8M1_13TeV-amcatnloFXFX-madspin-pythia8	0,20
	TTWJetsToQQ_TuneCUETP8M1_13TeV-amcatnloFXFX-madspin-pythia8	0,41
$t\bar{t} + Z$	TTZToQQ_TuneCUETP8M1_13TeV-amcatnlo-pythia	0,53
	TTZToLLNuNu_M-10_TuneCUETP8M1_13TeV-amcatnlo-pythia8	0,25
$WZ$	WZTo3LNu_TuneCUETP8M1_13TeV-amcatnloFXFX-pythia8	5,26
$WW$	WWToLNuQQ_13TeV-powheg	50,0
	WWTo2L2Nu_13TeV-powheg	12,2
$ZZ$	ZZTo2L2Nu_13TeV_powheg_pythia8	0,564
	ZZTo2L2Q_13TeV_amcatnloFXFX_madspin_pythia8	3,22
$W + \text{strūklas}$	WToLNu_0J_13TeV-amcatnloFXFX-pythia8	49 540
	WToLNu_1J_13TeV-amcatnloFXFX-pythia8	8041
	WToLNu_2J_13TeV-amcatnloFXFX-pythia8	3052
Drela–Jana	DYJetsToLL_M-10to50_TuneCUETP8M1_13TeV-madgraphMLM-pythia8	18 610
	DYJetsToLL_M-50_TuneCUETP8M1_13TeV-madgraphMLM-pythia8	6025
Ar $\mu$ bagātinātā KHD	QCD_Pt-30to50_MuEnrichedPt5_TuneCUETP8M1_13TeV_pythia8	1 652 471,46
	QCD_Pt-50to80_MuEnrichedPt5_TuneCUETP8M1_13TeV_pythia8	437 504,1
	QCD_Pt-80to120_MuEnrichedPt5_TuneCUETP8M1_13TeV_pythia8	106 033,66
	QCD_Pt-120to170_MuEnrichedPt5_TuneCUETP8M1_13TeV_pythia8	25 190,52
	QCD_Pt-170to300_MuEnrichedPt5_TuneCUETP8M1_13TeV_pythia8	8654,49
	QCD_Pt-300to470_MuEnrichedPt5_TuneCUETP8M1_13TeV_pythia8	797,35
	QCD_Pt-470to600_MuEnrichedPt5_TuneCUETP8M1_13TeV_pythia8	45,83
	QCD_Pt-600to800_MuEnrichedPt5_TuneCUETP8M1_13TeV_pythia8	25,1
	QCD_Pt-800to1000_MuEnrichedPt5_TuneCUETP8M1_13TeV_pythia8	4,71
	QCD_Pt-1000toInf_MuEnrichedPt5_TuneCUETP8M1_13TeV_pythia8	1,62
Ar $e$ bagātinātā KHD	QCD_Pt-30to50_EMEnriched_TuneCUETP8M1_13TeV_pythia8	6 493 800,0
	QCD_Pt-50to80_EMEnriched_TuneCUETP8M1_13TeV_pythia8	2 025 400,0
	QCD_Pt-80to120_EMEnriched_TuneCUETP8M1_13TeV_pythia8	478 520,0
	QCD_Pt-120to170_EMEnriched_TuneCUETP8M1_13TeV_pythia8	68 592,0
	QCD_Pt-170to300_EMEnriched_TuneCUETP8M1_13TeV_pythia8	18 810,0
	QCD_Pt-300toInf_EMEnriched_TuneCUETP8M1_13TeV_pythia8	1350,0

Krāsu okteta paraugs ir uzskaitīts 4.3. tab.

Simulācijas paraugi krāsu okteta  $W$  bozonam. Sniedzam šķērsriezumu, kas izmantots, lai normalizētu paraugus šajā analizē.

<b>Process</b>	<b>Datu kopums</b>	<b><math>\sigma</math> [pb]</b>
<b>Fons</b>		
Krāsu okteta $W$ bozons	TT_TuneCUETP8M2T4_13TeV-powheg-colourFlip-pythia8	832

Balstoties uz atšķirībām starp datiem un simulētajiem notikumiem, tiek veiktas šādas korekcijas simulācijai:

- 1) sagrūduma pārsvēršana,
- 2) leptona identifikācijas un izolācijas efektivitātes korekcija,
- 3) trigeru efektivitātes korekcija,
- 4) ģeneratora līmeņa svāra piešķiršana,
- 5) strūklu enerģijas mēroga un izšķirtspējas korekcija,
- 6)  $b$  atzīmēšanas efektivitātes korekcija.

## 5. Notikumu atlase

Notikumu atlases mērķis ir nodalīt signālu no fona. Notikumu atlase ir atšķirīga detektora līmeņa MK notikumiem un ģeneratora līmeņa MK notikumiem. Dati tiek atlasīti atbilstoši detektora līmeņa notikumu atlasei.

Šīs nodaļas izklāsts ir pielāgots pēc [41] parauga, jo šajā pētījumā tiek izmantota līdzīga notikumu atlase.

### 5.1. Detektora līmenis

Notikumu atlase ir balstīta  $t\bar{t} \rightarrow$  leptons + strūklas topoloģijā, kur viens no  $W$  bozoniem sabrūk par lādētu leptonu ( $\ell = e, \mu$ ) un atbilstošo neitrino, bet otrs  $W$  bozons sabrūk par kvarkiem, kas rada strūklas.

Lai rekonstruētu gala stadijas objektus, tiek izmantots daļiņu plūsmas algoritms [2]. Lai celtu rekonstrukcijas kvalitāti, šis algoritms kombinē signālus no visiem apakšdetektoriem, un ar tā palīdzību var identificēt mionus, elektronus, fotonus, lādētos hadronus un neitrālos hadronus pēc  $pp$  sadursmes.

Datu paraugi tiek ievākti, izmantojot Augsta līmeņa trigera viena leptona trigera ceļus, kas apkopoti 5.1. tab.

Bezsaistē tiek prasīts viens ciešs elektrons/mions ar  $p_T > 34/26$  GeV un  $|\eta| < 2, 1/2, 4$ . Notikumam, kurā ir otrs vaļīgs leptons ar  $p_T > 15$  GeV un  $|\eta| < 2, 4$ , tiek uzlikts veto.

Notikumā jābūt četrām strūklām, kas sakopotas ar anti- $k_T$  algoritmu, strūklu atdalījumu ar  $R = 0, 4$  un lādēto hadronu atņemšanu (AK4PFchs) un kurām  $p_T > 30$  GeV un  $|\eta| < 2, 4$ .

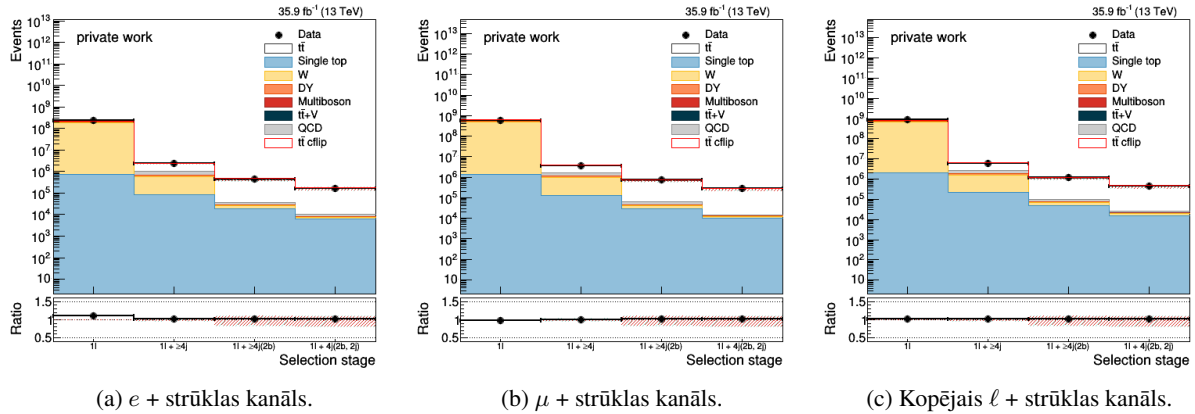
Vismaz divām strūklām jābūt  $b$  atzīmētām ar *Combined Secondary Vertex* algoritma (CSVv2) vidējo darbības punktu.

Notikumā jābūt vismaz divām neatzīmētām (vieglajām) strūklām, kurām jābūtu  $W$  bozona kandidāts, kura invariantā masa  $|m_{jj} - 80, 4| < 15$  GeV.

Notikumu raža dažādās atlases stadijās ir redzama 5.1. att. un sniegta 5.2. tab. 5.3. tab. attēlota notikumu raža krāsu okteta  $W$  paraugam. Signāla īpatsvars palielinās no 0,1 % sākotnējā stadijā līdz 94,2 % gala stadijā – tas ir šīs atlases signāla tīrības mērs.

## Analīzē izmantotās tiešsaistes atlasē trigu ceļi.

Gala stāvoklis	Ceļš	Darbības intervāls	Funkcija	L1 ierosinājums
$e + \text{strūklas}$	HLT_Ele32_eta2p1_WPTight_Gsf_v	visas	Atlasīt $e$ ar	L1_SingleEG40
			$ \eta  < 2,1$ un	VAI
			$p_T > 32$ GeV	L1_SingleIsoEG22er
			ciešajā darbības	VAI
$\mu + \text{strūklas}$	HLT_IsoMu24_v	visas	punktā, izmantojot	L1_SingleIsoEG24er
			GSF, lai rekon-	VAI
			struētu trekus	L1_SingleIsoEG24
				VAI
$\mu + \text{strūklas}$	HLT_IsoTkMu24_v	visas	Atlasīt izolētu $\mu$ ar	L1_SingleMu18
			$p_T > 20$ GeV, iz-	
			mantojot L3 treke-	
			ra algoritmu	
$\mu + \text{strūklas}$	HLT_IsoTkMu24_v	visas	Atlasīt izolētu $\mu$	
			ar $p_T > 20$ GeV,	
			izmantojot HLT	
			trekera mionu	
			algoritmu	



5.1. att. Notikumu raža dažādās notikumu atlasē stadijās:  $1\ell$ ,  $1\ell + \geq 4j$ ,  $1\ell + \geq 4j(2b)$ ,  $1\ell + \geq 4j(2b, 2lj)$ .

## Notikumu raža.

Process	$1\ell$	$1\ell + \geq 4j$	$1\ell + \geq 4j(2b)$	$1\ell + 4j(2b, 2lj)$
<b><math>e + \text{strūklas}</math> kanāls</b>				
$t\bar{t}$	3 227 135,8	1 291 471,9	390 503,9	155 959,6
Viena virsotnes	752 333,9	82 315,0	18 364,4	6154,0
$W$	185 518 128,0	508 317,5	7024,2	1124,9
DJ	14 212 676,0	96 568,3	2219,6	546,8
Daudzbozonu	371 750,3	15 821,5	213,3	50,4

## Turpinājums.

$t\bar{t} + V$	3070,7	2270,4	631,1	211,7
KHD	20 087 832,0	361 764,0	8147,7	2445,9
Kopā MK	224 172 928,0	2 358 528,5	427 104,2	166 493,3
( $t\bar{t}$ nenoteiktība)	$\pm 459 956,0$	$\pm 89 350,9$	$\pm 64 709,8$	$\pm 27 916,7$
Dati	246 644 432,0	2 411 742,0	436 962,0	169 786,0
<b><math>\mu + \text{strūklas kanāls}</math></b>				
$t\bar{t}$	5 461 582,0	2 130 612,0	645 764,0	258 003,4
Viena virsotnes	1 353 846,9	131 111,2	29 449,2	9769,0
$W$	495 234 272,0	860 706,3	13 434,8	2545,6
DJ	32 335 596,0	123 329,8	2576,6	572,5
Daudzbozonu	730 682,8	25 606,6	298,8	77,0
$t\bar{t} + V$	5072,9	3752,8	1052,4	339,5
KHD	77 839 968,0	425 565,2	14 498,0	1428,3
Kopā MK	612 961 024,0	3 700 684,0	707 073,7	272 735,3
( $t\bar{t}$ nenoteiktība)	$\pm 489 351,3$	$\pm 145 160,4$	$\pm 107 229,4$	$\pm 46 849,0$
Dati	602 190 016,0	3 728 318,0	714 552,0	277 952,0
<b>Kopīgais <math>\ell + \text{strūklas kanāls}</math></b>				
$t\bar{t}$	8 688 431,0	3 422 067,2	1 036 266,9	413 962,9
Viena virsotnes	2 106 152,8	213 426,9	47 813,6	15 923,0
$W$	680 901 824,0	1 369 021,4	20 459,0	3670,5
DJ	46 548 016,0	219 898,0	4796,1	1119,3
Daudzbozonu	1 102 146,8	41 428,2	512,1	127,3
$t\bar{t} + V$	8143,4	6023,3	1683,5	551,2
KHD	97 927 816,0	787 329,3	22 645,7	3874,2
Kopā MK	837 282 560,0	6 059 194,5	1 134 177,0	439 228,5
( $t\bar{t}$ nenoteiktība)	$\pm 673 762,4$	$\pm 233 343,6$	$\pm 171 857,7$	$\pm 74 680,0$
Dati	848 834 496,0	6 140 060,0	1 151 514,0	447 738,0

Notikumu raža krāsu okteta  $W$  paraugam.

Process	$1\ell$	$1\ell + \geq 4j$	$1\ell + \geq 4j(2b)$	$1\ell + 4j(2b, 2lj)$
<b><math>e + \text{strūklas kanāls}</math></b>				
$t\bar{t}$ cflip	3 286 355,8	1 402 535,2	435 571,4	171 860,5
( $t\bar{t}$ cflip nenoteiktība)	$\pm 457 826,7$	$\pm 45 171,2$	$\pm 47 044,9$	$\pm 17 862,5$
<b><math>\mu + \text{strūklas kanāls}</math></b>				
$t\bar{t}$ cflip	5 498 127,0	2 291 341,8	715 210,2	279 979,4
( $t\bar{t}$ cflip nenoteiktība)	$\pm 488 185,1$	$\pm 73 663,0$	$\pm 76 578,6$	$\pm 28 351,2$
<b>Kopīgais <math>\ell + \text{strūklas kanāls}</math></b>				
$t\bar{t}$ cflip	8 784 295,0	3 693 872,2	1 150 780,1	451 839,8
( $t\bar{t}$ cflip nenoteiktība)	$\pm 669 284,6$	$\pm 117 188,9$	$\pm 123 525,4$	$\pm 46 115,0$

## 5.2. Ģenerators līmenis

Simulācijā bezsaistes atlase daļiņu līmenī tiek imitēta, izmantojot PSEUDOTOPPRODUCER rīku [47], izmantojot kopīgu leptonu atlasu gan elektroniem, gan mioniem ar  $p_T > 26$  GeV un  $|\eta| < 2,4$ , kā arī tādām pašām prasībām strūklām  $p_T/\eta$  ( $p_T > 30$  GeV,  $|\eta| < 2,4$ ) un  $W$  masai ( $|m_{jj} - 80,4| < 15$  GeV) kā bezsaistes atlasei detektora līmenī.

Lādētie leptoni, kas izdalās cietajā procesā, tiek apzaroji ar leptoniem  $R = 0,1$  konusā. Strūklas tiek sakopotas ar anti- $k_T$  algoritmu ar  $R = 0,4$  konusu pēc apzaroto leptonu, kā arī visu neitrino noņemšanas. Lai noteiktu strūklas smaržu daļiņu līmenī, strūklas sakopojumā tiek iekļauti “spoku”  $B$  hadroni, kad to moments ir reizināts ar  $10^{-20}$  tā, lai tie būtiski nemainītu strūklas enerģijas mērogu daļiņu līmenī.

## 6. Sistemātiskās nenoteiktības

Nenoteiktības tiek iedalītas eksperimentālajās un teorētiskajās nenoteiktībās. Iekļaujot kādu nenoteiktību no pirmās grupas, tiek variēts kāds parametrs notikumu atlasē, piemēram, datu/MK koeficients. Teorētiskās nenoteiktības atspoguļo mūsu zināšanu trūkumu par reālo pasauli, piemēram, hadronizācijas procesa norises niansēm.

Šīs nodaļas izklāsts ir pielāgots pēc [40] un [41] parauga, jo šajos pētījumos tiek izmantoti līdzīgi nenoteiktību kopumi.

### 6.1. Eksperimentālās nenoteiktības

**Sagrūdums.** Kaut gan sagrūdums ir iekļauts simulācijā, pastāv nenoteiktība tā modelēšanā. Lai novērtētu modelēšanas kļūdu, tiek mainīts minimālās noslieces šķērsriezuma parametrs par 5 % attiecībā pret tā sākotnējo novērtējumu.

**Trigera un atlasē efektivitāte.** Trigera efektivitātes nenoteiktība un leptona identifikācijas un izolācijas koeficienta nenoteiktība tiek iestrādāta, mainot nominālos parametrus augšup un lejup. Mionu treķera efektivitātes nenoteiktība arī ir iekļauta šajā kategorijā un ir pievienota otrajā pakāpē, kaut gan tās sagaidāmā ietekme ir nenozīmīga.

**Strūklu enerģijas izšķirtspēja.** Izmantojam ieteiktos strūklu enerģijas mērījumus [48]. Katra strūkla tiek tālāk izsmērēta augšup un lejup atkarībā no tās  $p_T$  un  $\eta$  attiecībā pret centrālo vērtību, kas izmērīta datos. Galvenā šīs nenoteiktības ietekme ir notikumu izslēgšana/iekļaušana, ja to strūklu parametri ir tuvu atlasē sliekšnim.

**Strūklu enerģijas mērogs.** Lai kalibrētu strūklu simulācijā, izmantojam strūklu enerģijas mēroga parametrizāciju, kas atkarīga no  $p_T$ - $\eta$ . Šī parametrizācija balstās uz Spring16 V3 korekcijām, kuras sizstrādājusi JetMET Fizikas objektu grupa [49]. Variējot strūklu enerģijas skalu, tiek pārrēķināts arī iztrūkstošās šķērsenerģijas  $E_T^{\text{miss}}$  novērtējums. Galvenā šīs nenoteiktības ietekme ir notikumu izslēgšana/iekļaušana, ja to strūklu parametri ir tuvu bezsaistes atlasē sliekšnim.

**$b$  atzīmēšana.**  $b$  atzīmēšanas nominālā efektivitāte tiek koriģēta ar no  $p_T$  atkarīgiem koeficientiem, kurus piedāvā BTV Fizikas objektu grupa [50]. Atkarībā no strūklu smaržas,  $b$  atzīmēšanas lēmums tiek atjaunināts saskaņā ar koeficientu. Arī koeficients tiek variēts saskaņā ar tā nenoteiktību. Galvenā šīs nenoteiktības ietekme ir uz lēmumiem par strūklu  $b$  atzīmēšanas apstiprināšanu/noraidīšanu.

**Trekšanas efektivitāte.** TRK un MUO Fizikas objektu grupa ir izstrādājušas trekšanas efektivitātes koeficientus kā funkciju no treka  $\eta$  vai rekonstruēto virsotņu daudzuma. Visi šie koeficienti ir atkarīgi no datu gūšanas periodiem.

## 6.2. Teorētiskās nenoteiktības

**KHD koeficientu izvēle.** Apskatām antikorelētas faktorizācijas un renormalizācijas koeficientu variācijas ar kārtu 0,5 un 2 ( $\mu_R/\mu_F$ )  $t\bar{t}$  paraugos. Šīs variācijas tiek noglabātas simulētajos notikumos kā alternatīva svaru kopa, kas tiek izmantota šīs nenoteiktības novērtēšanā. Tiek izmantota septiņu variāciju kopums (izņemot pretēju variāciju  $\mu_R/\mu_F$ ).

**EVTGEN.** Sistemātiskā nenoteiktība rodas, ja smago garšu daļiņu, pamatā  $B$  un  $D$  mezonu sabrukums tiek simulēts ar Montekarlo notikumu ģeneratoru EVTGEN.

**Hadronizatora izvēle.** Sistemātiskā nenoteiktība rodas, ja hadronizācijas procesu modelē ar HERWIG++ [51].

**Virsošnes kvarka masa.** Visprecīzākie virsošnes kvarka masas mērījumi norāda uz nenoteiktību  $\pm 0,49$  GeV [52]. Tomēr mēs piesardzīgi pieņemam nenoteiktību vienādu ar  $\pm 1$  GeV.

**PYTHIA uzskāņojumi.** Tiek izmantoti šādi PYTHIA uzskāņojumi:

- 1) matricas elementu + partonu lietus savietošanas shēma,
- 2) partonu lietus mērogs,
- 3) krāsu otrreizējās savienošanas modelis,
- 4) pamata notikuma variācijas.

6.1. tab. ir apkopots teorētisko nenoteiktību simulāciju paraugu un to šķērsriezumu uzskaitījums. Šie simulāciju paraugi ir iegūti no RunIISummer16MiniAODv2-PUMoriond17\_80X\_mcRun2\_asymptotic\_2016\_TracheIV\_v6 izstrādes.



Teorētisko nenoteiktību simulāciju paraugi [41].

Signāla variācija	Datu kopa	$\sigma$ [pb]
Partonu lietus mērogs	TT_TuneCUETP8M2T4_13TeV-powheg-isrup-pythia8	832
	TT_TuneCUETP8M2T4_13TeV-powheg-isrdwn-pythia8	832
	TT_TuneCUETP8M2T4_13TeV-powheg-fsrup-pythia8	832
	TT_TuneCUETP8M2T4_13TeV-powheg-fsrdwn-pythia8	832
Pamata notikums	TT_TuneCUETP8M2T4up_13TeV-powheg-pythia8	832
	TT_TuneCUETP8M2T4down_13TeV-powheg-pythia8	832
ME-PS savietošanas skala ( <i>hdamp</i> )	TT_hdampUP_TuneCUETP8M2T4_13TeV-powheg-pythia8	832
	TT_hdampDOWN_TuneCUETP8M2T4_13TeV-powheg-pythia8	832
Krāsu otrreizējā savienošānās	TT_TuneCUETP8M2T4_erdON_13TeV-powheg-pythia8	832
	TT_TuneCUETP8M2T4_QCDbasedCRTune_erdON_13TeV-powheg-pythia8	832
	TT_TuneCUETP8M2T4_GluonMoveCRTune_13TeV-powheg-pythia8	832
Virsošnes masa	TT_TuneCUETP8M2T4_mtop1715_13TeV-powheg-pythia8	832
	TT_TuneCUETP8M2T4_mtop1735_13TeV-powheg-pythia8	832
HERWIG++	TT_TuneEE5C_13TeV-powheg-herwigpp	832

# 7. Rezultāti

## 7.1. Vilkmes vektors

7.1. att. redzams notikums, kuru veido vieglās strūklas,  $b$  kvarku strūklas un leptons  $\phi$ - $\eta$  plaknē. Attēlots arī vilkmes vektors. Attēls veidots līdzīgi kā 3.1. att.

Pētījuma veikšanai tika izstrādāts rīku kopums CFAT [53]. Galvenā pētījuma daļa tika veikta, izmantojot CMSSW versiju CMSSW\_8\_0\_26\_patch1. Grafiki ir veidoti, izmantojot ROOT [54]. Vilkmes vektori tiek noteikti visām novērojamajām strūklām – vadošajai vieglajai strūklai  $j_1^W$  (ar vislielāko  $p_T$ ), otrajai vadošajai vieglajai strūklai  $j_2^W$ , vadošajai hadroniskā  $b$  strūklai  $j_1^b$  un otrajai vadošajai hadroniskā  $b$  strūklai  $j_2^b$ . Visos gadījumos tiek izdalīti apakšgadījumi atkarībā no tā, vai vilkmes vektora aprēķinā iekļautas visas strūklas sastāvdaļas vai tikai elektriski lādētās sastāvdaļas. Rezultāti ir sadalīti kanālos:  $e$  + strūklas,  $\mu$  + strūklas un kopīgajā  $\ell$  + strūklas kanālā.

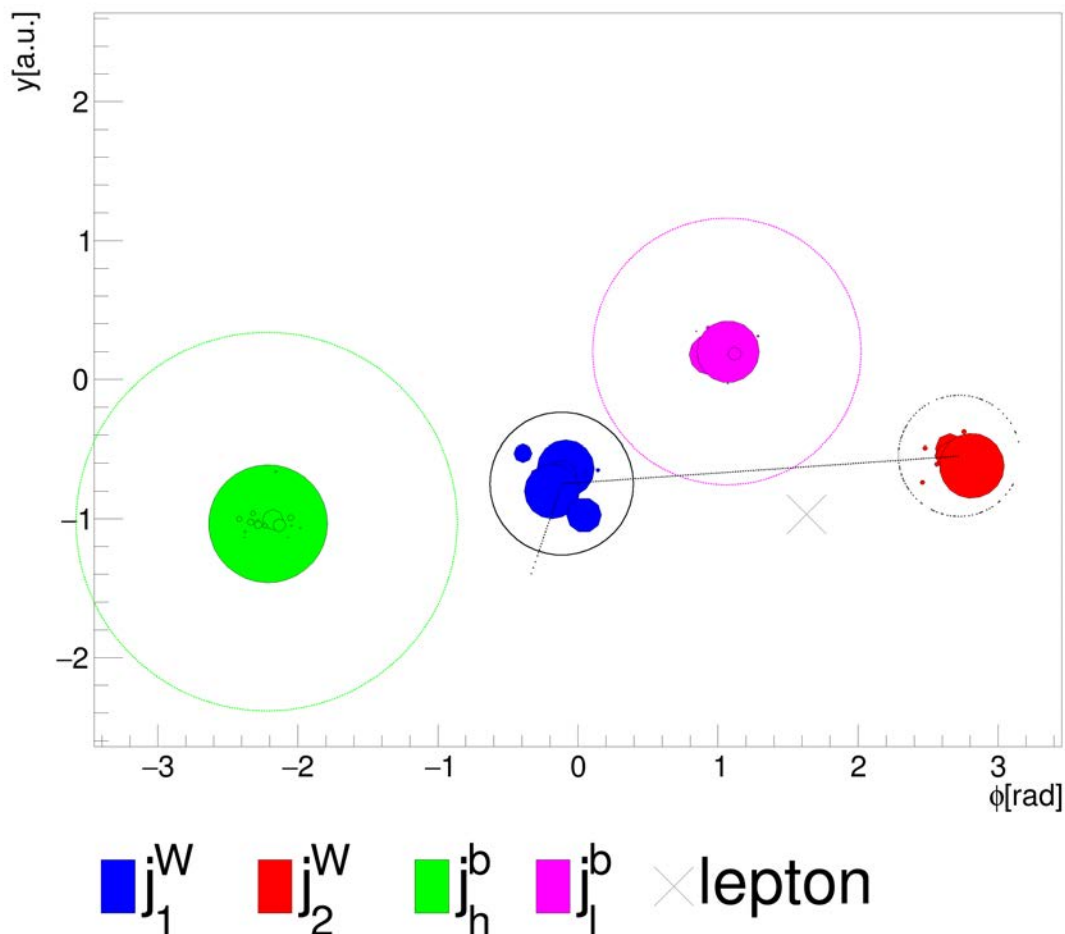
Vadošās vieglās strūklas  $j_1^W$   $\eta$  komponentes sadalījums vilkmes vektoram ar visām strūklas sastāvdaļām ir redzams 7.2. att.

Vietā ir paskaidrojums par KMS grafiku formātu. Augšējais grafiks 7.2. att. vizualizē datus un Montekarlo simulācijas. Ja nav norādīts citādi, Montekarlo simulācijas ir attēlotas rekonstrukcijas līmenī.

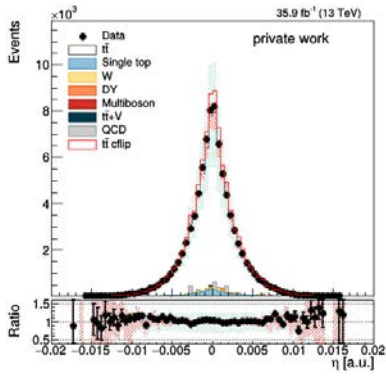
Ja dota sistemātiskā nenoteiktība ar indeksu  $k$ , mēs to identificējam kā pozitīvu sistemātisko nenoteiktību  $U_i^k$ , ja vērtības intervālā  $i$  sistemātika  $S_i^k$  pārsniedz nominālo vērtību  $N_i$ . Pretējā gadījumā sistemātiskā nenoteiktība tiek noteikta kā negatīva sistemātiskā nenoteiktība  $D_i^k$ . Kopējā pozitīvā un negatīvā sistemātiskā nenoteiktība tiek noteikta kā kvadrātu summa:

$$U_i = \sqrt{\sum_k (U_i^k - N_i)^2}, \quad D_i = \sqrt{\sum_k (D_i^k - N_i)^2}. \quad (7.1)$$

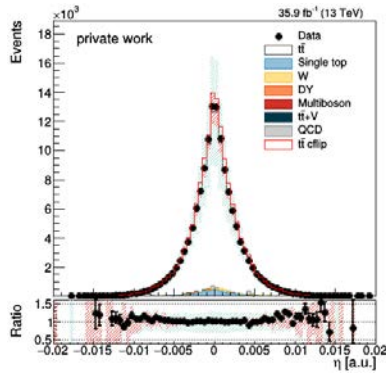
Zilās joslas platums atbilst sistemātiskajai kļūdai, kas noteikta kā  $(U_i + D_i)/2$ . Joslas centrs atbilst  $N_i + (U_i - D_i)/2$ . Teiktais attiecas arī uz rozā joslu ar atšķirību, ka sistemātikas ir tikušas normalizētas ar signāla integrāli (šādas normalizētas histogramas tiek sauktas par veidoliem). Apakšējā ielikumā attēlota datu attiecība pret Montekarlo, kā arī sistemātikas, kas normalizētas attiecībā pret Montekarlo.



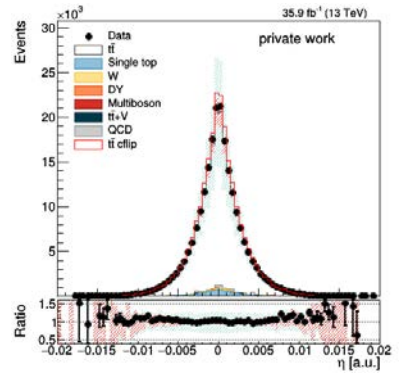
7.1. att. Vadošās strūkles vilkmes vektors (pārtraukta līnija ar punktiem), kas veido 1,96 rad vilkmes leņķi ar vektoriālo starpību (pārtraukta līnija) starp otro vadošo vieglo strūklu un vadošo vieglo strūklu. Vadošās strūkles sastāvdaļas ir attēlotas zilā krāsā, bet otrās vadošās strūkles sastāvdaļas ir attēlotas sarkanā krāsā. Vadošā strūkļa ir attēlota ar nepārtrauktu līniju, bet otrā vadošā strūkļa ir attēlota ar pārtrauktu līniju. Hadroniskā  $b$  kvarka strūkļa un tās sastāvdaļas attēlotas zaļā krāsā, bet leptoniskā  $b$  kvarka strūkļa un tās sastāvdaļas attēlotas violetā krāsā. Ar “×” atzīmēts lādētais leptons. Vilkmes vektors ir palielināts 200 reizes, bet apļu, kas attēlo strūkļas, rādiuss ir vienāds ar  $p_T [\text{GeV}]/75,0$ , savukārta apļu, kas attēlo strūkļu sastāvdaļas, rādiuss ir vienāds ar  $p_T^{\text{constituent}}/p_T^{\text{jet}}$ .



(a)  $e +$  strūklas kanāls.



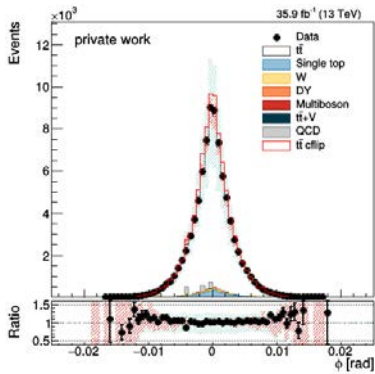
(b)  $\mu +$  strūklas kanāls.



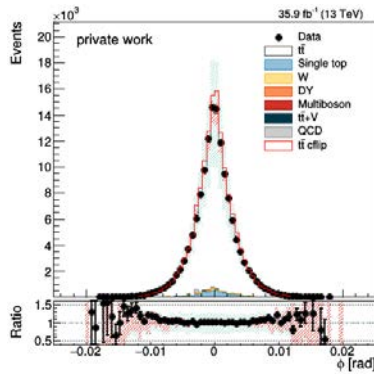
(c) Kopējais  $\ell +$  strūklas kanāls.

7.2. att.  $j_1^W$  vilkmes vektora  $\eta$  komponentes sadalījums, iekļaujot visas strūklas sastāvdaļas.

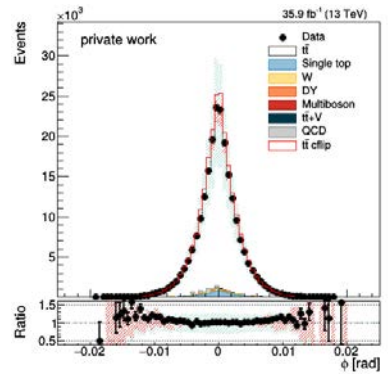
$j_1^W$  vilkmes vektora  $\phi$  komponentes sadalījums, iekļaujot visas strūklas sastāvdaļas ir, sniegts 7.3. att.



(a)  $e +$  strūklas kanāls.



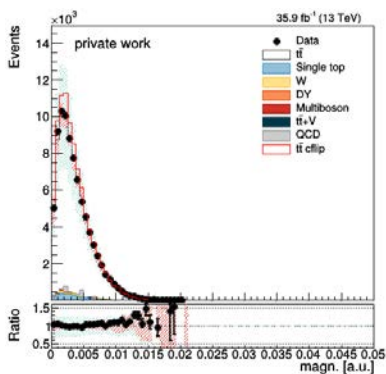
(b)  $\mu +$  strūklas kanāls.



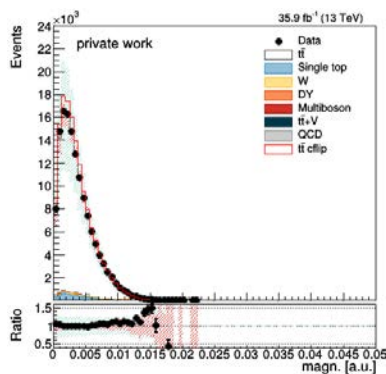
(c) Kopējais  $\ell +$  strūklas kanāls.

7.3. att.  $j_1^W$  vilkmes vektora  $\phi$  komponentes sadalījums, iekļaujot visas strūklas sastāvdaļas.

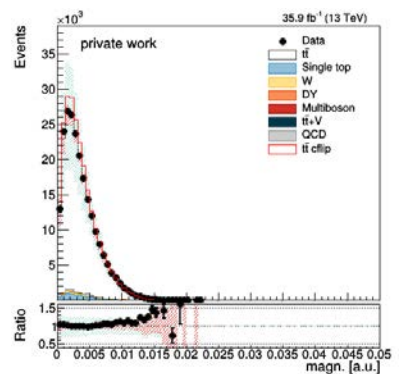
Vadošās vieglās strūklas vilkmes vektora lieluma sadalījums, iekļaujot visas strūklu komponentes, ir aplūkojams 7.4. att. Vilkmes vektora lielums parasti nepārsniedz 0,02 [bez mērvienības].



(a)  $e +$  strūklas kanāls.



(b)  $\mu +$  strūklas kanāls.

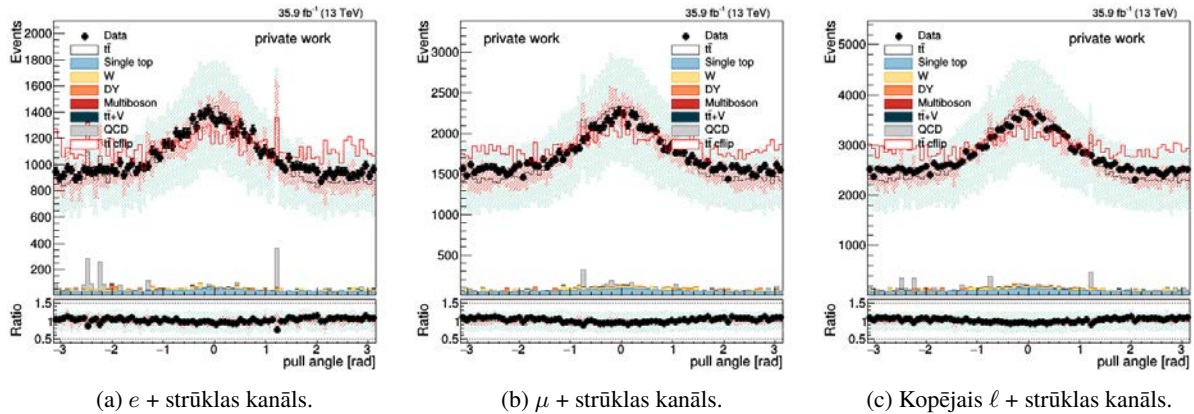


(c) Kopējais  $\ell +$  strūklas kanāls.

7.4. att.  $j_1^W$  vilkmes vektora lieluma sadalījums, iekļaujot visas strūklas sastāvdaļas.

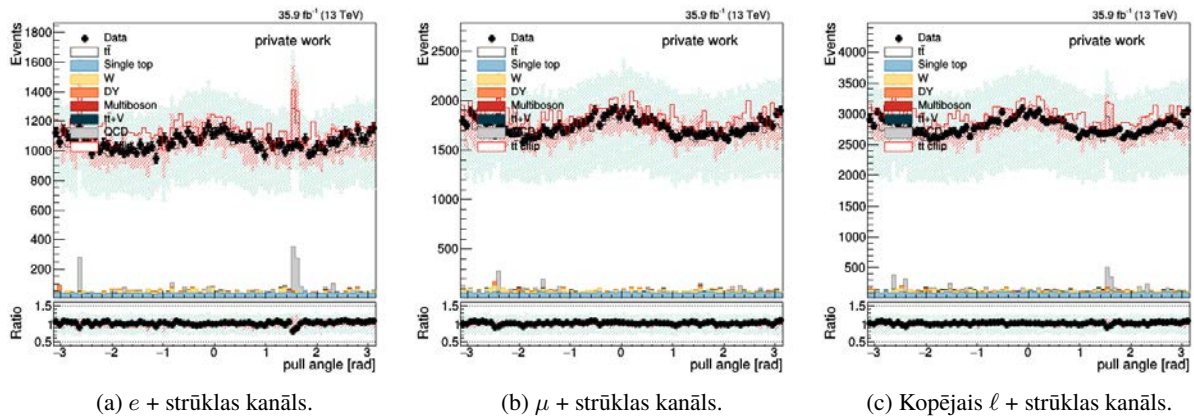
## 7.2. Vilkmes leņķis

Vilkmes leņķa sadalījums starp ar krāsām saistītām strūklām no  $j_1^W$  uz  $j_2^W$  ar visām strūklu komponentēm un ar jebkuru  $\Delta R$  ir redzams 7.5. att.



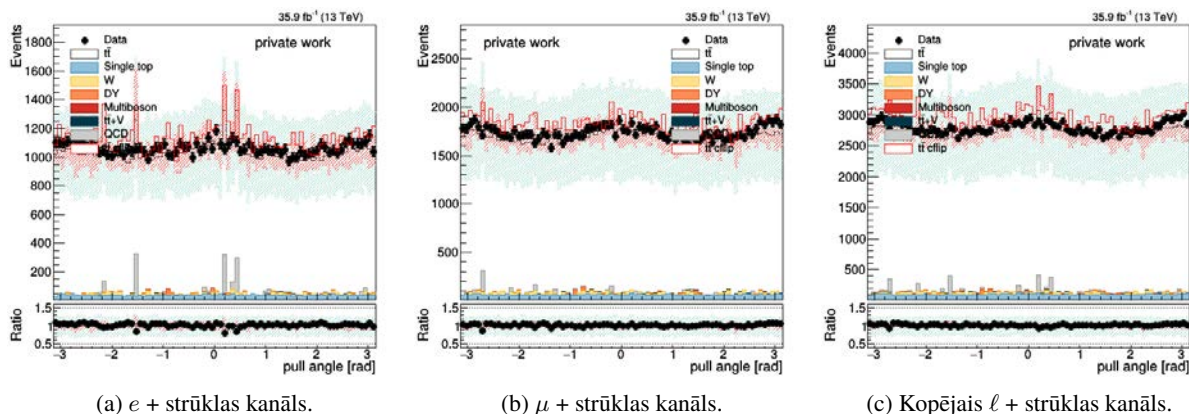
7.5. att. Vilkmes leņķa sadalījums no  $j_1^W$  uz  $j_2^W$  ar jebkuru  $\Delta R$ , iekļaujot visas strūklu sastāvdaļas.

7.6. att. ir atainots vilkmes leņķa sadalījums gadījumā, kad nav sagaidāma krāsu saistība starp strūklām – no  $j_1^b$  uz  $j_2^b$ , iekļaujot visas strūklu sastāvdaļas un pie visām  $\Delta R$  vērtībām.



7.6. att. Vilkmes leņķa no  $j_1^b$  uz  $j_2^b$  sadalījums pie visām  $\Delta R$  vērtībām, iekļaujot visas strūklu sastāvdaļas.

Papildu iespēja novērot vilkmes leņķa sadalījumu starp objektiem, starp kuriem nav krāsu saistība, ir izvēlēties strūklu un leptonu. 7.7. att. attēlots vilkmes leņķa sadalījums starp  $j_1^W$  un lādēto leptonu.



(a)  $e +$  strūklas kanāls.

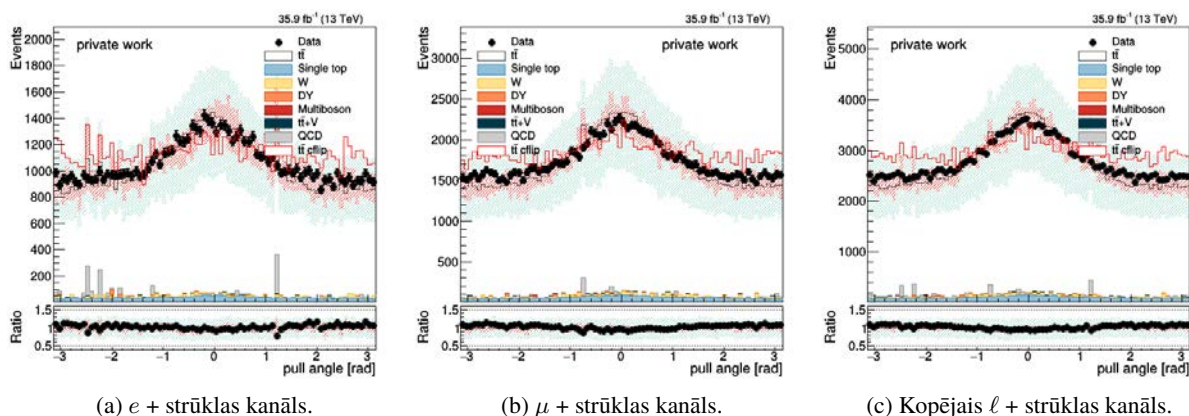
(b)  $\mu +$  strūklas kanāls.

(c) Kopējais  $\ell +$  strūklas kanāls.

7.7. att. Vilkmes leņķa sadalījums no  $j_1^W$  uz lādēto leptonu pie visām  $\Delta R$  vērtībām, iekļaujot visas strūklu sastāvdaļas.

7.5.–7.7. att. redzams, ka centrālais paugurs vilkmes leņķa sadalījumā ir izteikts, ja iesaistītas ar krāsām saistītas strūklas, kā arī sadalījums izlīdzinās, ja ir iesaistīti ar krāsām nesaistīti objekti.

Centrālais paugurs var būt redzams arī gadījumos, ja starp fizikālo objektu vektoriem pastāv kolinearitāte, kaut arī paši fizikas objekti nav saistīti ar krāsām. Šāds gadījums redzams, apskatot vilkmes leņķa sadalījumu no  $j_1^W$  uz hadronisko  $W$  (7.8. att.).



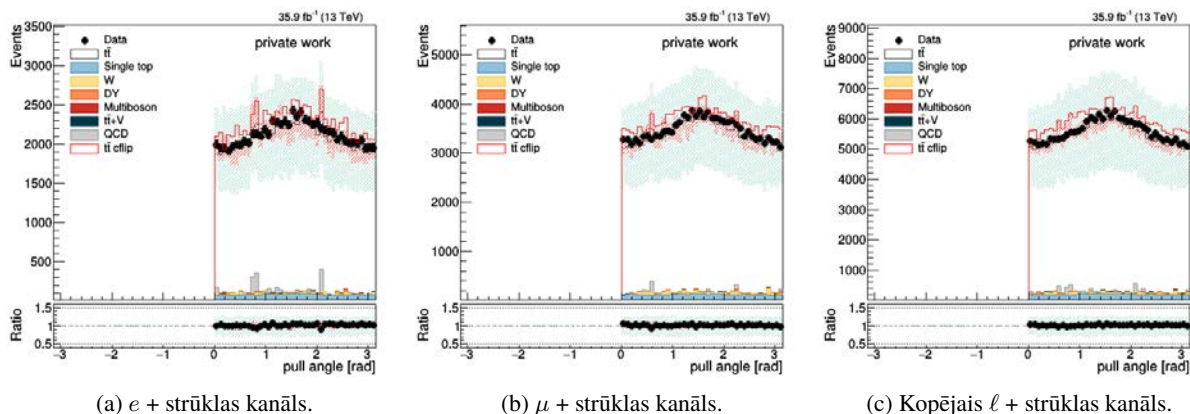
(a)  $e +$  strūklas kanāls.

(b)  $\mu +$  strūklas kanāls.

(c) Kopējais  $\ell +$  strūklas kanāls.

7.8. att. Vilkmes leņķa sadalījums no  $j_1^W$  uz hadronisko  $W$  pie visām  $\Delta R$  vērtībām, iekļaujot visas strūklu sastāvdaļas.

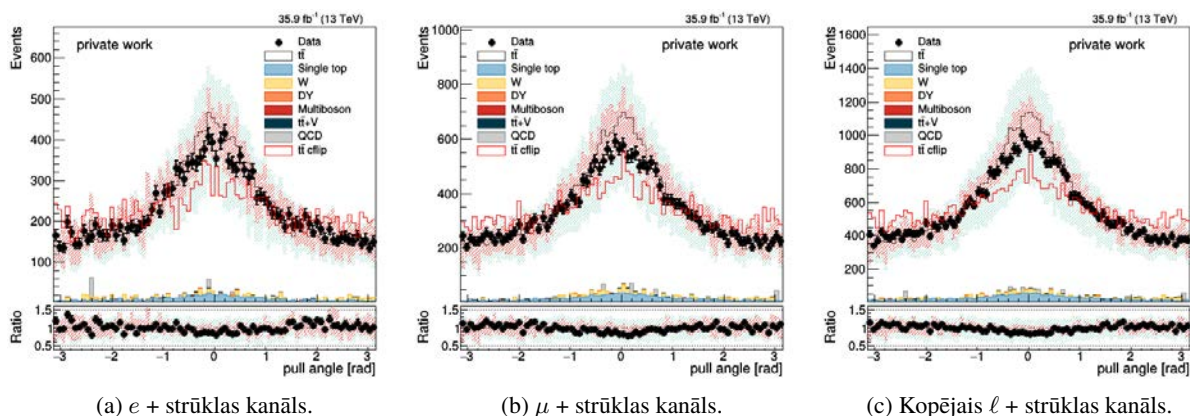
Interesants gadījums ir kūlis. 7.9. att. aplūkojams vilkmes leņķa sadalījums no  $j_1^W$  uz kūļa pozitīvo virzienu. Redzams neliels paugurs taisnā leņķī.



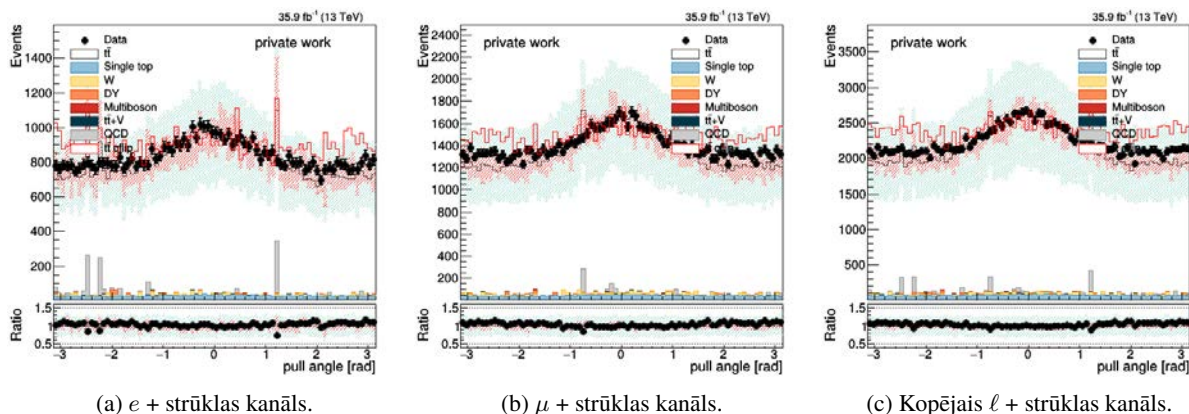
7.9. att. Vilkmes leņķa sadalījums no  $j_1^W$  uz kūļa pozitīvo virzienu, iekļaujot visas strūklu sastāvdaļas.

### 7.3. $\Delta R$ ietekme

Gadījumos, kad divas strūklu atrodas cieši viena pie otras  $\phi$ - $\eta$  telpā, strūklu sakopšanas algoritms mēdz pievienot vienas strūklu (ar mazāko  $p_T$ ) sastāvdaļas otrai strūklu (ar lielāko  $p_T$ ). Šis process ietekmē analīzi ar vilkmes leņķi, jo vilkmes vektoram šādi rodas nosliece rādīt uz strūklu, no kuras tika atņemtas sastāvdaļas. 7.10. att. un 7.11. att. redzami divi gadījumi: cieši klātesošas strūklu ar  $\Delta R \leq 1,0$  un attālas strūklu ar  $\Delta R > 1,0$ .



7.10. att. Vilkmes leņķa sadalījums no  $j_1^W$  uz  $j_2^W$  pie  $\Delta R \leq 1,0$ , iekļaujot visas strūklu sastāvdaļas.



7.11. att. Vilkmes leņķa sadalījums no  $j_1^W$  uz  $j_2^W$  pie  $\Delta R > 1, 0$ , iekļaujot visas strūklu sastāvdaļas.

## 7.4. Jūtīguma analīze

Vilkmes leņķa metodoloģijas jutīgums tika pētīts, lietojot turpmāk aprakstītos sliekšņus:

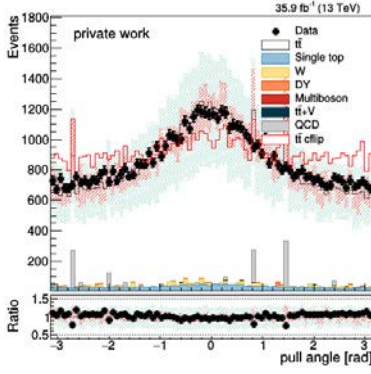
**Hadroniskā  $W$  bozona  $p_T$ .** Tika izvēlēts 50 GeV sliekšnis, un tika iegūti vilkmes leņķa sadalījumi, hadroniskā  $W$  bozona  $p_T$  pārsniedzot vai esot zemākam vai vienādam ar šo sliekšni. Rezultāti ir atainoti 7.12.–7.13. att.

**Strūklas sastāvdaļu skaits.** Tika izvēlēts strūklas sastāvdaļu skaita  $N$  sliekšnis vienāds ar 20, un tika iegūti vilkmes leņķa sadalījumi, strūklu sastāvdaļu skaitam  $N$  pārsniedzot vai esot zemākam vai vienādam ar šo sliekšni. Rezultāti ir atainoti 7.14.–7.15. att.

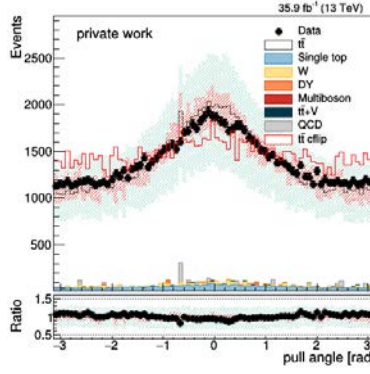
**Strūklas sastāvdaļu  $p_T$ .** Tika izvēlēts strūklas sastāvdaļu  $p_T$  sliekšnis vienāds ar 0,5 GeV, un tika iegūti vilkmes leņķa sadalījumi, strūklu sastāvdaļu  $p_T$  esot lielākam vai mazākam vai vienādam ar šo sliekšni. Rezultāti ir atainoti 7.16.–7.17. att.

**Vilkmes vektora lielums.** Tika izvēlēts vilkmes vektora lieluma sliekšnis vienāds ar 0,005 [bez mērvienībām], un tika iegūti vilkmes leņķa sadalījumi, vilkmes vektora lielumam pārsniedzot vai esot zemākam vai vienādam ar šo sliekšni. Rezultāti ir attēloti 7.18.–7.19. att.

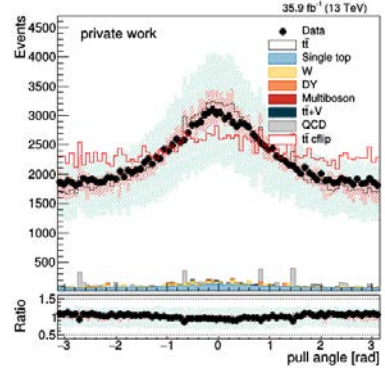




(a)  $e +$  struklas kanāls.

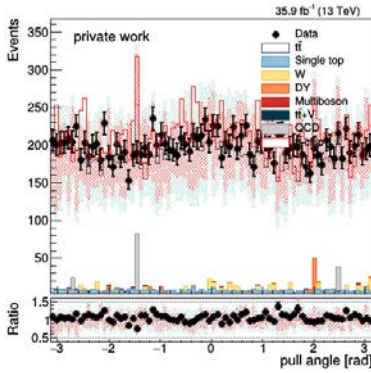


(b)  $\mu +$  struklas kanāls.

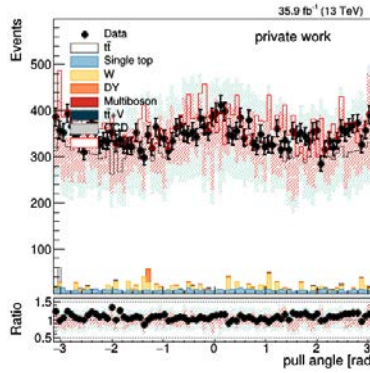


(c) Kopējais  $\ell +$  struklas kanāls.

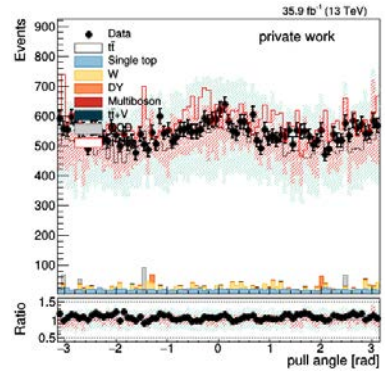
7.12. att. Vilkmes leņķa sadalījums no  $j_1^W$  uz  $j_2^W$  ar  $W$  bozona  $p_T > 50$  GeV, pie visiem  $\Delta R$ , iekļaujot visas strūklus sastāvdaļas.



(a)  $e +$  struklas kanāls.

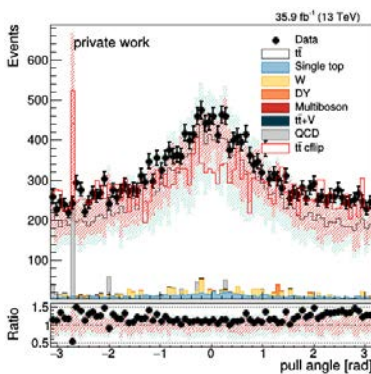


(b)  $\mu +$  struklas kanāls.

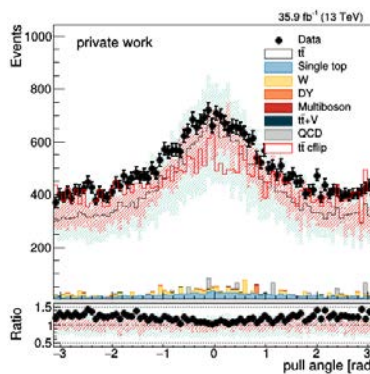


(c) Kopējais  $\ell +$  struklas kanāls.

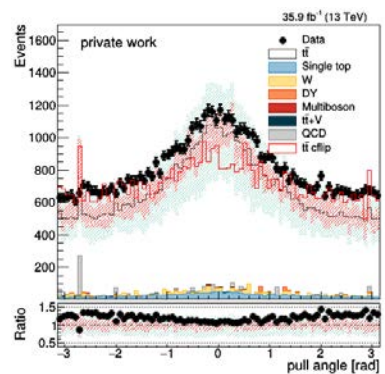
7.13. att. Vilkmes leņķa sadalījums no  $j_1^W$  uz  $j_2^W$  ar  $W$  bozona  $p_T \leq 50$  GeV, pie visiem  $\Delta R$ , iekļaujot visas strūklus sastāvdaļas.



(a)  $e +$  struklas kanāls.

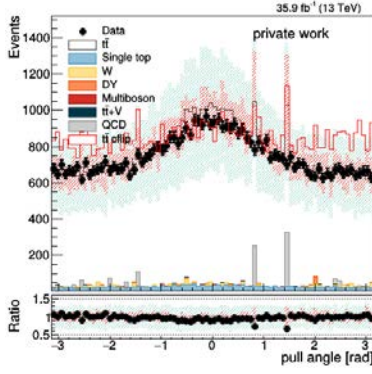


(b)  $\mu +$  struklas kanāls.

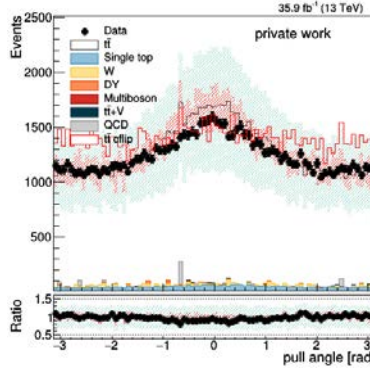


(c) Kopējais  $\ell +$  struklas kanāls.

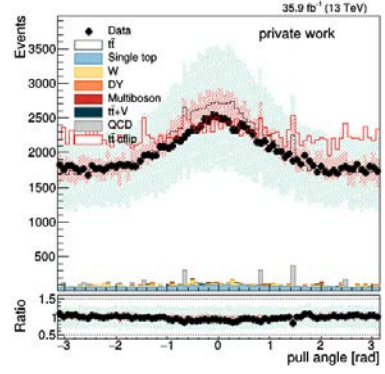
7.14. att. Vilkmes leņķa sadalījums no  $j_1^W$  uz  $j_2^W$  ar struklas sastāvdaļu skaitu  $N > 20$ , pie visiem  $\Delta R$ , iekļaujot visas strūklus sastāvdaļas .



(a)  $e +$  strūklas kanāls.

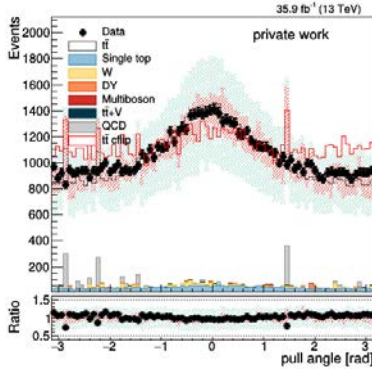


(b)  $\mu +$  strūklas kanāls.

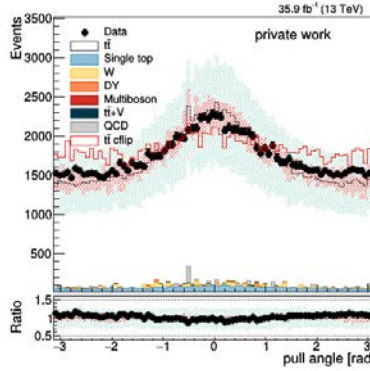


(c) Kopējais  $\ell +$  strūklas kanāls.

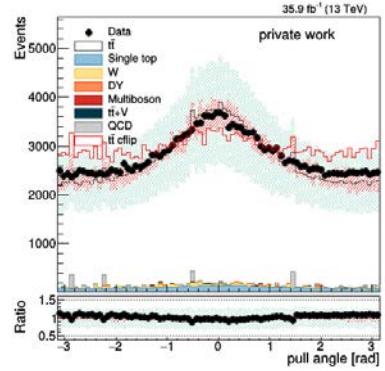
7.15. att. Vilkmes leņķa sadalījums no  $j_1^W$  uz  $j_2^W$  ar strūklas sastāvdaļu skaitu  $N \leq 20$ , pie visiem  $\Delta R$ , iekļaujot visas strūklu sastāvdaļas.



(a)  $e +$  strūklas kanāls.

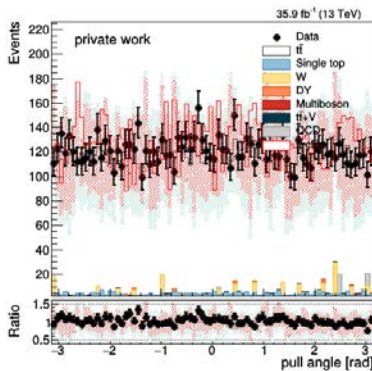


(b)  $\mu +$  strūklas kanāls.

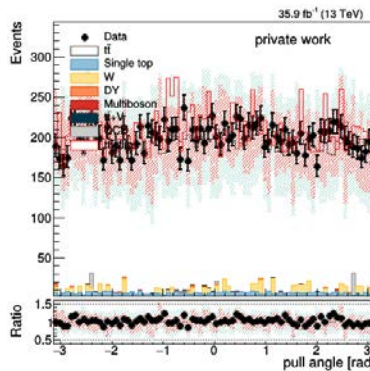


(c) Kopējais  $\ell +$  strūklas kanāls.

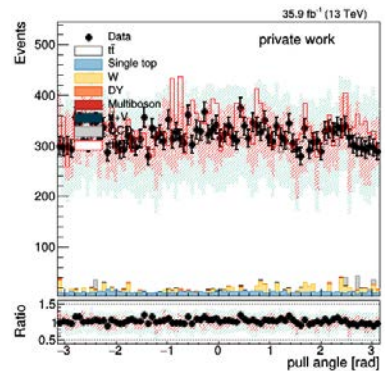
7.16. att. Vilkmes leņķa sadalījums no  $j_1^W$  uz  $j_2^W$ , ja strūklas sastāvdaļu  $p_T > 0.5$  GeV, pie visiem  $\Delta R$ , iekļaujot visas strūklu sastāvdaļas.



(a)  $e +$  strūklas kanāls.

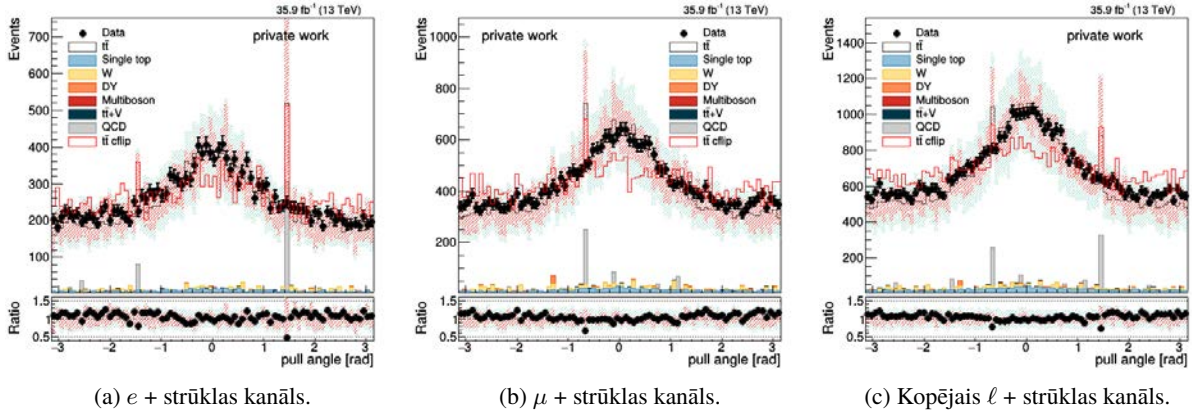


(b)  $\mu +$  strūklas kanāls.

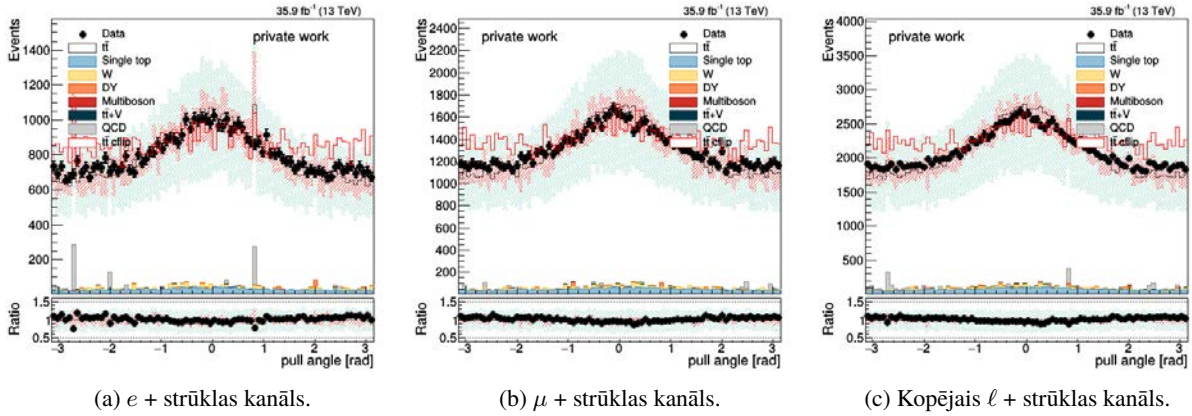


(c) Kopējais  $\ell +$  strūklas kanāls.

7.17. att. Vilkmes leņķa sadalījums no  $j_1^W$  uz  $j_2^W$ , ja strūklas sastāvdaļu  $p_T \leq 0.5$  GeV pie visiem  $\Delta R$ , iekļaujot visas strūklu sastāvdaļas.



7.18. att. Vilkmes leņķa sadalījums no  $j_1^W$  uz  $j_2^W$  ja vilkmes vektora lielums  $>0,005$  [bez mērvienībām], pie visiem  $\Delta R$ , iekļaujot visas strūklu sastāvdaļas.



7.19. att. Vilkmes leņķa sadalījums no  $j_1^W$  uz  $j_2^W$ , ja vilkmes vektora lielums  $\leq 0,005$  [bez mērvienībām], pie visiem  $\Delta R$ , iekļaujot visas strūklu sastāvdaļas.

Tika konstatēts, ka vilkmes leņķa metodoloģija ir jutīga pret hadroniskā  $W$  bozona  $p_T$ , strūklu sastāvdaļu skaitu, strūklu sastāvdaļu  $p_T$ , bet ne īpaši jutīga pret vilkmes vektora lielumu.

## 7.5. Atlocīšana

Kad eksperimentētājs veic novērojumu ar detektoru, jāsamierinās ar paša detektora ietekmi uz rezultātu – kropļojumiem. Atlocīšana ir metode, ar kuras palīdzību detektora novērojami tiek koriģēti, ievērojot detektora radīto ietekmi. Tādējādi mēs iegūstam patieso novērojamā lieluma sadalījumu. Tomēr jāaprēķinās, ka atlocītā novērojamā lieluma fāzes telpa kļūst ievērojami graudaināka.

Detektora ietekmi mēs varam novērtēt tādēļ, ka, strādājot ar Montekarlo paraugiem, katrs ģenerētais notikums tiek rekonstruēts, izmantojot detektora simulāciju. Rekonstrukcijas procesā novērojamais lielums vērtību intervālā  $i$  ģenerācijas līmenī migrē uz vērtību intervālu  $k$  rekonstrukcijas līmenī. Apskatot lielu skaitu notikumu, iegūstam migrācijas statistiku. Atlocīšanas

ceļā veicam šai migrācijai pretēju procesu – ja dots novērojama lielums vērtību intervālā  $k$ , mēs piešķiram varbūtības dažādām novērojamā lieluma patiesajām vērtībām.

Tās  $\theta_p$  vērtības ģenerēšanas līmenī, kurām nav atbilstošas vērtības rekonstrukcijas līmenī, tiek ievietotas pirmsintervālā rekonstrukcijas līmenī. Tās  $\theta_p$  vērtības rekonstrukcijas līmenī, kurām nav atbilstošas vērtības ģenerācijas līmenī, tiek ievietotas pirmsintervālā ģenerācijas līmenī. Pirmsintervāls ģenerācijas līmenī tiek uzskatīts par fonu, un tas tiek iztukšots. Sadalījumi, kas netiek pildīti ģenerācijas līmenī – dati un MK fons – tiek samazināti ar atbilstošu proporcijas koeficientu. Pirmsintervāls rekonstrukcijas līmenī tiek izmantots, lai ierobežotu atlocītā rezultāta pirmsintervālu.

Atlocīšana tiek veikta ar datiem, no kuriem ir atņemts MK fons. Atlocīšana tika veikta arī prerēji, iegūstot atpakaļatlocīto rezultātu.

Lai samazinātu atlocītā rezultāta statistisko nenoteiktību, esam ieinteresēti, lai migrācijas matrica būtu pēc iespējas diagonāla. Lai raksturotu notikumu skaitu, kas sakopoti uz migrācijas matricas diagonāles, tiek lietoti divi lielumi: stabilitāte un tīrība. Stabilitāte ir attiecība starp diagonāles saturu un kopējo notikumu skaitu rekonstrukcijas līmenī vērtību intervālā:

$$\text{stabilitāte} \equiv \frac{\theta_{\text{ievade}}^{\text{diag}}}{\sum_{x=1}^{N_x} \theta_{\text{ievade}}^x}, \quad (7.2.)$$

kur  $x$  ir vērtību intervāla indekss rekonstrukcijas līmenī, numerāciju sākot no 1, un  $N_x$  ir vērtību intervālu skaits rekonstrukcijas līmenī. Tīrība ir attiecība starp diagonāles saturu un kopējo notikumu skaitu ģenerācijas līmenī:

$$\text{tīrība} \equiv \frac{\theta_{\text{ievade}}^{\text{diag}}}{\sum_{y=1}^{N_y} \theta_{\text{ievade}}^y}, \quad (7.3.)$$

kur  $y$  ir vērtību intervāla indekss ģenerācijas līmenī. Ir ieteicams, lai tīrības un stabilitātes vērtības pārsniegtu 50 % katrā vērtību intervālā.

Apskatām arī interesantu rādītāju, kas raksturo, par cik atlocītais rezultāts ir atšķirīgs no ģenerētā MK rezultāta (ideāls rādītājs būtu 0), normalizētu pret atlocīta rezultāta statistisko nenoteiktību. Šo rādītāju sauc par vilkmi:

$$\text{vilkme} \equiv \frac{\theta_{\text{atl}}^{\text{ģen}} - \theta_{\text{ievade}}^{\text{ģen}}}{\sigma_{\text{atl}}^{\text{ģen}}}. \quad (7.4.)$$

Lai iegūtu vilkmes sadalījumu, ģenerējam novērojamā lieluma gadījuma spēļu sadalījumus ģenerācijas līmenī.

Vērtību intervālu skaits ģenerāciju līmenī tiek samazināts divas reizes, salīdzinot ar intervālu skaitu rekonstrukcijas līmenī, lai atlocīšana būtu skaitliski iespējama.

Atlocīšanas procesa īstenošanai tiek izmantota Root klase TUnfoldDensity [55]. Intervālu shēma tiek pārvaldīta ar TUnfoldBinning klasi. Netiek lietota regularizācija.  $\theta_p$  no  $j_1^W$  uz  $j_2^W$  atlocīšanas rezultāti, iekļaujot visas strūklas sastāvdaļas, ir atainoti 7.20. att. Lai radītu šos attēlus, tika izveidota jauna klase CompoundHistoUnfolding [56], kas tika pievienota Root, t.sk. ar ievades un izvades straumētājiem.

Atlocīšanas rezultātiem ir uzklāti sadalījumi, kas atbilst atlocīšanas rezultātiem, kas iegūti ar migrācijas matricām, kas savukārt iegūtas no  $t\bar{t}$  Herwig ++ un  $t\bar{t}$  cflip paraugiem, kā arī sistēmātikas  $t\bar{t}$  *fsr dn* un  $t\bar{t}$  *fsr up* (skat. 6. nod.).

Statistisko traucējumu nozīmība katrā vērtību intervālā kopējā atlocītā rezultāta sistemātiskajā kļūdā (%) ir norādīta 7.1. tab. Traucējumi, kas tieši ietekmē hadronizāciju –  $t\bar{t}$  *Herwig++*,  $t\bar{t}$  *QCDbased* un  $t\bar{t}$  *ERDon* – ir visnozīmīgākie.

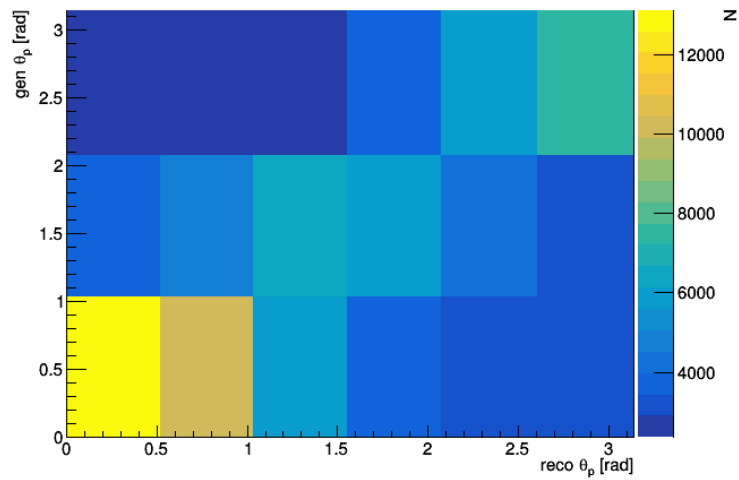
Tiek novērtēta arī sakritība starp atlocīto rezultātu un MK paredzējumu ģenerators līmenī. Ja dots atlocīts novērojams lielums  $D$ , normalizētais MK paredzējums  $M$ , pilnā eksperimentālo nenoteiktību kovariācijas matrica  $\Sigma$ ,  $\chi^2$  tiek aprēķināts šādi:

$$\chi^2 = (D^T - M^T) \cdot \Sigma^{-1} \cdot (D - M). \quad (7.5.)$$

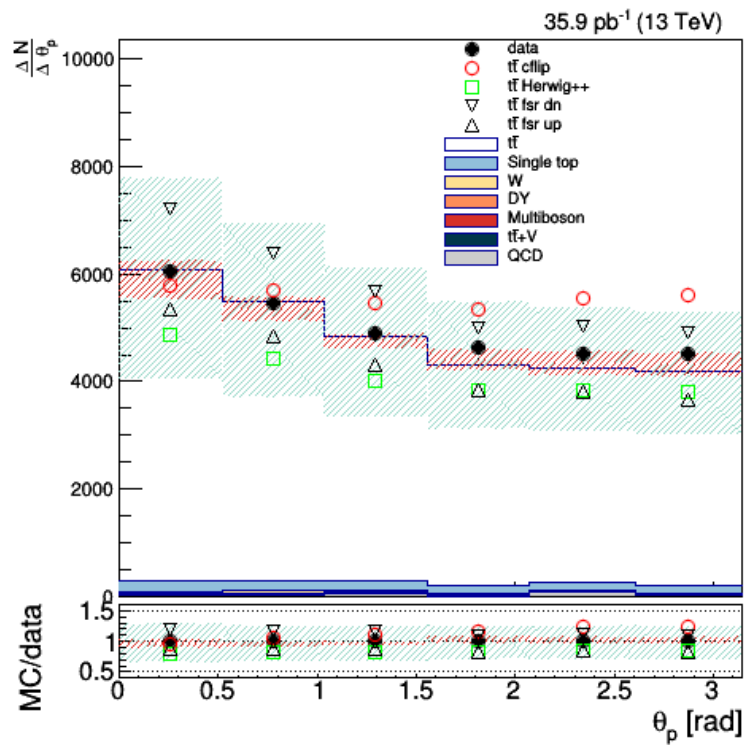
No  $\chi^2$  vērtības iespējams aprēķināt  $p$  vērtību, zinot, ka brīvību skaits ir vienāds ar atlocītā sadalījuma vērtības intervālu skaitu, no kura atņemts 1, ņemot vērā brīvības zaudējumu, veicot sadalījuma normalizāciju. No kovariācijas matricas tiek atmesta viena rinda un viena kolonna  $\Sigma$ . Atmetamo elementu izvēle neietekmē  $\chi^2$  vērtību.

7.3. tab. sniegtas  $\theta_p$   $\chi^2$  vērtības un  $p$  vērtības, ja ietvertas visas strūklas sastāvdaļas. No rezultātiem redzams, ka MK ģeneratori diezgan neprecīzi modelē vilkmes leņķa sadalījumu. Simulācijas, vispārīgi skatot, paredz stāvāku vilkmes leņķa sadalījumu, t. i. izteiktāku krāsu plūsmas efektu. *HERWIG++* vilkmes leņķa sadalījumu modelē labāk nekā *PYTHIA 8.2*. *PYTHIA 8.2* precizitāte ir jo īpaši vāja, paredzot vilkmes leņķa sadalījumu no  $j_2^W$  uz  $j_1^W$ .

$\chi^2$  vērtības un  $p$  vērtības krāsu okteta  $W$  bozona modelim ir sniegtas 7.4. tab. *POWHEG+PYTHIA 8\** ailē  $t\bar{t}$  *cflip* paraugs ir ticis pievienots kā  $t\bar{t}$  sistemātiskā nenoteiktība. Tika konstatēts, ka krāsu apmaiņas modelī  $\theta_p$  no  $j_1^W$  uz  $j_2^W$  sadalījums ir modelēts neprecīzāk nekā SM paredzējums.

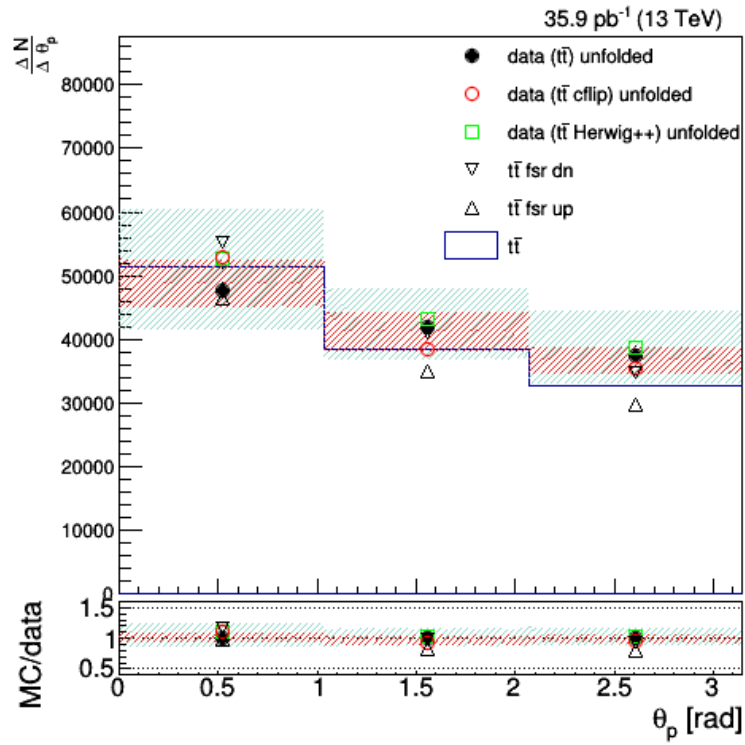


(a) Migrācijas matrica, kā  $x$  ass atbilst rekonstrukcijas līmenim, bet  $y$  ass – ģenerācijas līmenim.

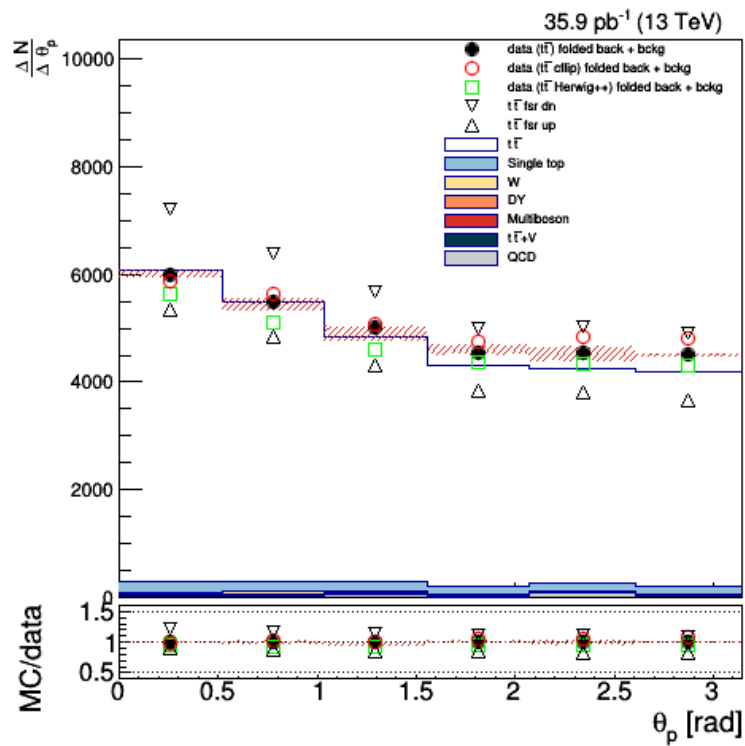


(b) Dati un Montekarlo, kuri tiek izmantoti kā ievade.

7.20. att. Vilkmes leņķa no  $j_1^W$  uz  $j_2^W$  atlocīšanas rezultāti  $t\bar{t}$  metodei, iekļaujot visas strūklas sastāvdaļas un izmantojot trīs vienāda izmēra vērtību intervālus.

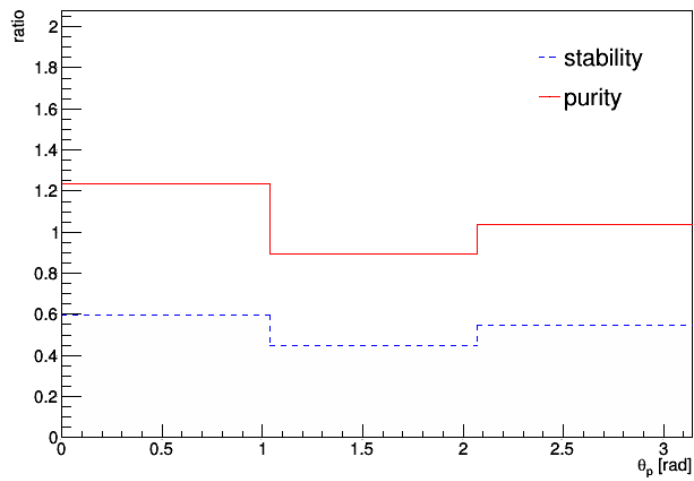


(c) Atlocītais rezultāts.

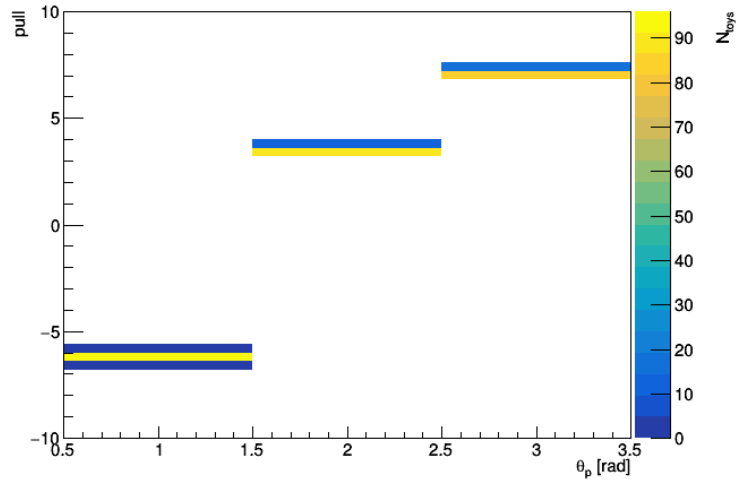


(d) Atpakaļ locītais rezultāts.

7.20. att. Vilkmes leņķa no  $j_1^W$  uz  $j_2^W$  atlocīšanas rezultāti  $t\bar{t}$  metodei, iekļaujot visas strūklas sastāvdaļas un izmantojot trīs vienāda izmēra vērtību intervālus (turpināts).



(e) Stabilitāte un tīrība katrā vērtību intervālā.



(f) Vilkme.

7.20. att. Vilkmes leņķa no  $j_1^W$  uz  $j_2^W$  atlocīšanas rezultāti  $t\bar{t}$  metodei, iekļaujot visas strūklas sastāvdaļas un izmantojot trīs vienāda izmēra vērtību intervālus (turpināts).



Vilkmes leņķa  $\theta_p$  no vadošās vieglās strūklas uz otru vadošo vieglo strūklu nenoteiktību (veidolu) svars katrā vērtību intervālā, iekļaujot visas strūklu sastāvdaļas ģenerators līmenī. Rezultāti sniegti atlocītajam POWHEG +PYTHIA 8 paraugam. Tiek izmantoti trīs vienāda izmēra vērtību intervāli.

Traucējums	Nenoteiktība vērtību intervālā [%]		
	1. intervāls 0,00–1,04	2. intervāls 1,04–2,07	3. intervāls 2,07–3,14
$t\bar{t}$ ERDon	2,416	1,669	1,171
$t\bar{t}$ Herwig++	7,151	2,877	5,713
$t\bar{t}$ Peterson Frag	0,323	0,297	0,076
$t\bar{t}$ QCDbased	6,792	5,576	2,329
$t\bar{t}$ UEdn	1,895	1,509	0,701
$t\bar{t}$ UEup	0,112	0,298	0,187
$t\bar{t}$ b fragmentation down	0,031	0,056	0,100
$t\bar{t}$ b fragmentation up	0,056	0,085	0,162
$t\bar{t}$ btag_heavy down	0,215	0,256	0,012
$t\bar{t}$ btag_heavy up	0,197	0,191	0,451
$t\bar{t}$ btag_light down	0,219	0,112	0,392
$t\bar{t}$ btag_light up	0,177	0,251	0,491
$t\bar{t}$ csv_heavy down	0,728	1,260	0,471
$t\bar{t}$ csv_heavy up	0,328	1,230	0,933
$t\bar{t}$ csv_light down	0,113	0,207	0,086
$t\bar{t}$ csv_light up	0,022	0,134	0,120
$t\bar{t}$ evtgen	3,121	3,496	0,054
$t\bar{t}$ fsr dn	2,512	3,451	0,650
$t\bar{t}$ fsr up	1,225	4,823	3,735
$t\bar{t}$ gluon move	0,973	0,345	0,828
$t\bar{t}$ hdamp dn	0,636	0,036	0,747
$t\bar{t}$ hdamp up	0,831	0,673	0,295
$t\bar{t}$ id1002muR1muF2hdampmt272.7225	0,063	0,194	0,133
$t\bar{t}$ id1003muR1muF0.5hdampmt272.7225	0,147	0,145	0,024
$t\bar{t}$ id1004muR2muF1hdampmt272.7225	0,195	0,290	0,074
$t\bar{t}$ id1005muR2muF2hdampmt272.7225	0,089	0,037	0,150
$t\bar{t}$ id1007muR0.5muF1hdampmt272.7225	0,064	0,068	0,005
$t\bar{t}$ id1009muR0.5muF0.5hdampmt272.7225	0,054	0,023	0,092
$t\bar{t}$ isr dn	2,203	2,097	0,443
$t\bar{t}$ isr up	0,373	0,653	0,250
$t\bar{t}$ jec_CorrelationGroupMPFInSitu down	0,245	0,104	0,190
$t\bar{t}$ jec_CorrelationGroupMPFInSitu up	0,029	0,251	0,237
$t\bar{t}$ jec_CorrelationGroupUncorrelated down	0,377	0,247	0,198
$t\bar{t}$ jec_CorrelationGroupUncorrelated up	0,348	0,783	0,422
$t\bar{t}$ jec_FlavorPureBottom down	0,043	0,278	0,249

7.1. tabula

Turpināts.

$t\bar{t}$ jec_FlavorPureBottom up	0,056	0,033	0,105
$t\bar{t}$ jec_FlavorPureCharm down	0,165	0,174	0,394
$t\bar{t}$ jec_FlavorPureCharm up	0,073	0,093	0,191
$t\bar{t}$ jec_FlavorPureGluon down	0,080	0,032	0,133
$t\bar{t}$ jec_FlavorPureGluon up	0,784	1,401	0,555
$t\bar{t}$ jec_FlavorPureQuark down	0,040	0,224	0,194
$t\bar{t}$ jec_FlavorPureQuark up	0,064	0,137	0,229
$t\bar{t}$ jec_RelativeFSR down	0,113	0,218	0,377
$t\bar{t}$ jec_RelativeFSR up	0,050	0,149	0,101
$t\bar{t}$ jer down	0,668	0,711	0,052
$t\bar{t}$ jer up	0,279	0,057	0,283
$t\bar{t}$ m=171.5	0,149	0,917	0,814
$t\bar{t}$ m=173.5	2,187	0,565	2,090
$t\bar{t}$ pileup down	0,009	0,106	0,104
$t\bar{t}$ pileup up	0,104	0,323	0,481
$t\bar{t}$ sel efficiency correction down	0,003	0,003	0,001
$t\bar{t}$ sel efficiency correction up	0,006	0,005	0,002
$t\bar{t}$ semilep BR down	0,013	0,007	0,008
$t\bar{t}$ semilep BR up	0,022	0,034	0,010
$t\bar{t}$ tracking down	0,489	0,187	0,402
$t\bar{t}$ tracking up	0,151	0,175	0,004
$t\bar{t}$ trig efficiency correction down	0,002	0,009	0,008
$t\bar{t}$ trig efficiency correction up	0,002	0,010	0,008

7.2. tabula

Vilkmes leņķa  $\theta_p$  no vadošās vieglās strūklas uz otro vadošo vieglo strūklu papildus nenoteiktības (veidola)  $t\bar{t} cflip$  svars POWHEG +PYTHIA 8 \* paraugam. Rezultāti sniegti ģenerators līmenī, iekļaujot visas strūklu sastāvdaļas. Tiek izmantoti trīs vienāda izmēra vērtību intervāli.

Traucējums	Nenoteiktība vērtību intervālā [%]		
	1. intervāls	2. intervāls	3. intervāls
	0,00–1,04	1,04–2,07	2,07–3,14
$t\bar{t} cflip$	20,924	11,031	13,870

7.3. tabula

Vilkmes leņķā  $\chi^2$  un  $p$  vērtības, iekļaujot visas strūklu sastāvdaļas. Rezultāti ir sniegti standartmodelim.

Paugams	$\theta_p(j_1^W, j_2^W)$			$\theta_p(j_2^W, j_1^W)$			$\theta_p(j_1^b, j_2^b)$			$\theta_p(j_2^b, j_1^b)$		
	$\chi^2$	/Bps	$p$ vērtība	$\chi^2$	/Bps	$p$ vērtība	$\chi^2$	/Bps	$p$ vērtība	$\chi^2$	/Bps	$p$ vērtība
Powheg + Pythia8	86,38	2	0,000	85,33	2	0,000	3,98	2	0,136	20,03	2	0,000
Powheg + Herwig++	0,30	2	0,861	1,14	2	0,565	3,11	2	0,211	8,05	2	0,018

Vilkmes leņķa  $\chi^2$  un  $p$  vērtības, iekļaujot visas strūklu sastāvdaļas. Rezultāti sniegti krāsu okteta  $W$  bozona modelim.

Paraugs	$\theta_p(j_1^W, j_2^W)$			$\theta_p(j_2^W, j_1^W)$			$\theta_p(j_1^b, j_2^b)$			$\theta_p(j_2^b, j_1^b)$		
	$\chi^2$	/Bps	$p$ vērtība	$\chi^2$	/Bps	$p$ vērtība	$\chi^2$	/Bps	$p$ vērtība	$\chi^2$	/Bps	$p$ vērtība
Powheg + Pythia8 *	1,05	2	0,591	8,85	2	0,012	2,89	2	0,235	19,75	2	0,000
Powheg + Pythia8 cf	3,24	2	0,198	1,12	2	0,570	0,99	2	0,611	1,36	2	0,506

## 7.6. LEP metode

Tiek analizētas trīs veidu plūsmas:

- daļiņu plūsmā visiem notikumiem tiek piešķirts svars vienāds ar 1,0,
- enerģijas plūsmā daļiņām tiek piešķirts svars, kas vienāds ar to enerģijas attiecību pret virsotnes kvarku enerģijas summu,
- $p_T$  plūsmā daļiņām tiek piešķirts svars, kas vienāds ar to šķērsmomentu attiecību pret attiecīgās strūklas šķērsmomentu.

Rezultāti, izmantojot LEP metodoloģiju, iekļaujot visas strūklas sastāvdaļas, ir atainoti 7.21. att. Tiek attēlotas plūsmas starp vadošo  $b$  strūklu  $j_1^b$  un otru vadošo  $b$  strūklu  $j_2^b$ , hadronisko  $b$  strūklu  $j_h^b$  un tālāko vieglo strūklu  $j_f^W$  (attālums starp strūklām ir mērīts kā leņķis starp strūklu 4-vektoru telpiskajām komponentēm), tuvāko vieglo strūklu  $j_c^W$  un hadroniskā  $b$  strūklu  $j_h^b$ , un vadošo vieglo strūklu  $j_1^W$  un otro vadošo vieglo strūklu  $j_2^W$ .

Tika konstatēts, ka visos gadījumos blīvums samazinās centrālajā reģionā starp strūklām. Blīvums centrālajā reģionā atkarīgs no tā, vai strūklas ir, vai nav saistītas ar krāsām.

Plūsmas attiecība no krāsām brīvajos reģionos  $(j_1^b, j_2^b)$ ,  $(j_h^b, j_f^W)$ ,  $(j_c^W, j_h^b)$  pret plūsmu ar krāsām saistītajā reģionā  $(j_1^W, j_2^W)$ , iekļaujot visas strūklu sastāvdaļas, ir atainota 7.22. att. Krāsu okteta  $W$  modeļa gadījumā novērojama atkārtota krāsu saistība reģionā  $(j_c^W, j_h^b)$ .

7.23. att. atainota daļiņu plūsmas attiecība  $(j_1^W, j_2^W)$  reģionā atbilstoši krāsu okteta  $W$  modelim pret daļiņu plūsmu  $(j_1^W, j_2^W)$  reģionā atbilstoši standartmodelim. Redzams, ka  $W$  okteta modeļa gadījumā novērojama krāsu saistības izzušana.

Kā kvantitatīvu LEP metodoloģijas rezultātu var izmantot parametru  $R$ , kas tiek definēts kā attiecība starp integrāli no 0,2 līdz 0,8 ar krāsām saistītajā reģionā un integrāli no 0,2 līdz 0,8 ar krāsām nesaistītā reģionā:

$$R = \frac{\int_{0,2}^{0,8} f^{\text{starp-W reģions}} d\chi}{\int_{0,2}^{0,8} f^{\text{ārpus-W reģions}} d\chi}, \quad (7.6.)$$

kur  $f(\chi)$  ir plūsmas sadalījuma blīvums.

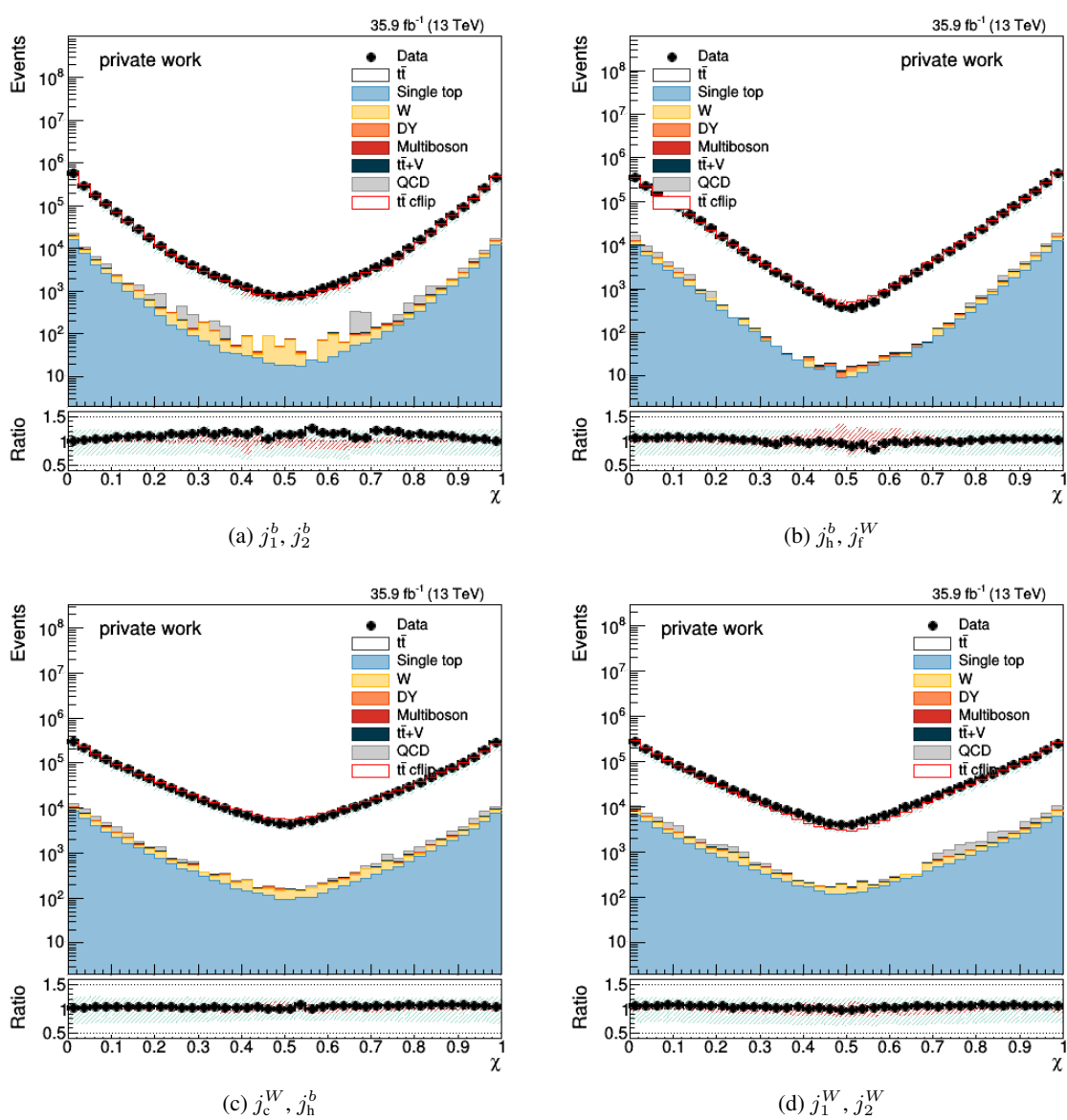
Šis parametrs LEP tika izmantots, lai kvantificētu krāsu saistību. Tā vērtības, kas iegūtas dažādos eksperimentos, izmantojot  $625 \text{ pb}^{-1}$  integrēto spīdumu intervālā  $\sqrt{s} = 189\text{--}209 \text{ GeV}$ , ir sniegtas 7.5. tab. Redzama dažādos eksperimentos novēroto  $R$  vērtību nesakritība. Turklāt, balstoties uz teorētiskiem apsvērumiem,  $R$  būtu jāpārsniedz 1.

Mūsu gadījumā lietojam trīs  $R$  vērtības, kas atbilst trim ar krāsām nesaistītajiem reģioniem.

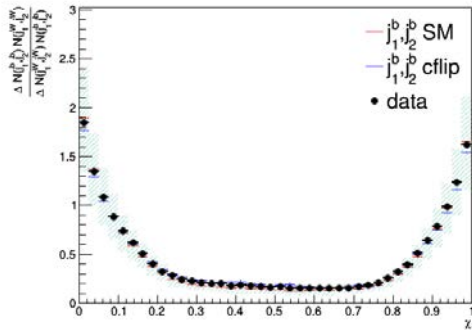
Integrālis no 0,2 līdz 0,8 dažādos reģionos un inversas  $R$  vērtības standartmodelim ir sniegtas 7.6. tab., datiem 7.7. tab. un krāsu okteta  $W$  modelim 7.8. tab. Redzams, ka plakne starp ar krāsām saistītām strūklām aizpildīta blīvāk nekā plakne starp ar krāsām nesaistītām strūklām.

LEP novērotās  $R$  vērtības.

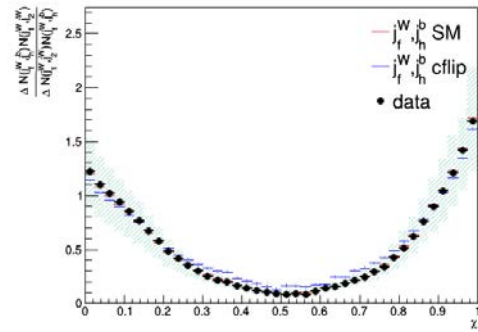
LEP eksperiments	$R$ vērtība – dati	Atsauce
OPAL	1,243	[4]
Delphi	0,889 ( $\sqrt{s} = 183$ GeV)–1,039 ( $\sqrt{s} = 207$ GeV)	[5]
L3	0,911	[6]



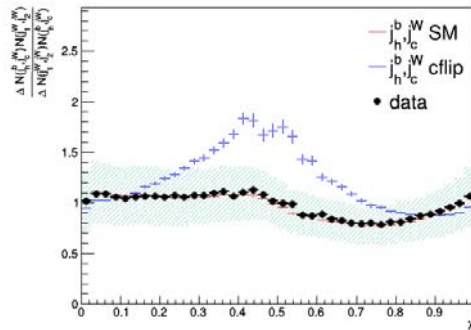
7.21. att. Daļiņu plūsmas histogrammas, iekļaujot visas strūklu daļiņas.



(a)  $j_1^b, j_2^b$

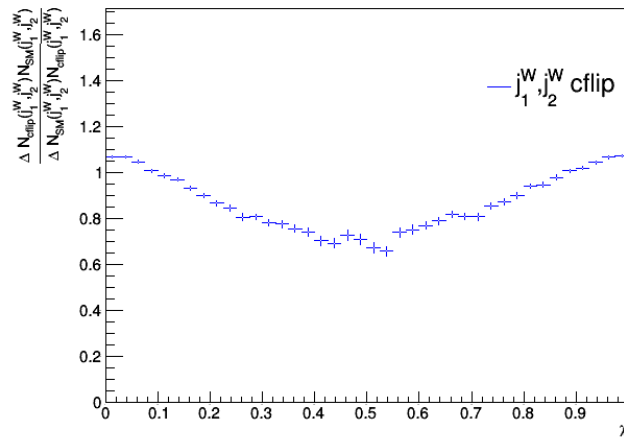


(b)  $j_h^b, j_f^W$



(c)  $j_c^W, j_h^b$

7.22. att. Daļiņu plūsma, iekļaujot visas strūklu daļiņas, attiecībā pret daļiņu plūsmu  $j_1^W, j_2^W$  apgabalā.



7.23. att. Attiecība starp daļiņu plūsmu ( $j_1^W, j_2^W$ ) reģionā krāsu okteta  $W$  modelim pret daļiņu plūsmu ( $j_1^W, j_2^W$ ) reģionā atbilstoši standartmodelim.

7.6. tabula

Integrālis no 0,2 līdz 0,8 un  $R^{-1}$  vērtība kopīgajam leptonu kanālam rekonstrukcijas līmenī daļiņu plūsmai Montekarlo simulācijā atbilstoši krāsu okteta  $W$  bozona modelim.

Strūklas sastāvdaļas	$I \pm (\text{stat.}) \pm (\text{sist.})$ [rad]	$R^{-1} \pm (\text{stat.}) \pm (\text{sist.})$
$j_1^b, j_2^b$		
visas	$0,010 \pm 0,000 \pm 0,000$	$0,151 \pm 0,000 \pm 0,002$
lādētas	$0,007 \pm 0,000 \pm 0,000$	$0,127 \pm 0,000 \pm 0,003$
$j_f^W, j_h^b$		
visas	$0,012 \pm 0,000 \pm 0,000$	$0,183 \pm 0,000 \pm 0,001$
lādētas	$0,008 \pm 0,000 \pm 0,000$	$0,152 \pm 0,000 \pm 0,003$
$j_h^b, j_c^W$		
visas	$0,062 \pm 0,000 \pm 0,000$	$0,923 \pm 0,000 \pm 0,002$
lādētas	$0,040 \pm 0,000 \pm 0,000$	$0,768 \pm 0,000 \pm 0,005$
$j_1^W, j_2^W$		
visas	$0,067 \pm 0,000 \pm 0,001$	$1,000 \pm 0,000 \pm 0,010$
lādētas	$0,052 \pm 0,000 \pm 0,001$	$1,000 \pm 0,000 \pm 0,016$

7.7. tabula

Integrālis no 0,2 līdz 0,8 un  $R^{-1}$  vērtība kopīgajam leptonu kanālam rekonstrukcijas līmenī daļiņu plūsmai datus atbilstoši standartmodelim.

Strūklas sastāvdaļas	$I \pm (\text{stat.}) \pm (\text{sist.})$ [rad]	$R^{-1} \pm (\text{stat.}) \pm (\text{sist.})$
$j_1^b, j_2^b$		
visas	$0,011 \pm 0,000$	$0,173 \pm 0,000$
lādētas	$0,006 \pm 0,000$	$0,139 \pm 0,000$
$j_f^W, j_h^b$		
visas	$0,011 \pm 0,000$	$0,175 \pm 0,000$
lādētas	$0,007 \pm 0,000$	$0,144 \pm 0,000$
$j_h^b, j_c^W$		
visas	$0,062 \pm 0,000$	$0,944 \pm 0,000$
lādētas	$0,035 \pm 0,000$	$0,766 \pm 0,000$
$j_1^W, j_2^W$		
visas	$0,065 \pm 0,000$	$1,000 \pm 0,000$
lādētas	$0,046 \pm 0,000$	$1,000 \pm 0,000$

7.8. tabula

Integrālis no 0,2 līdz 0,8 un  $R^{-1}$  vērtība kopīgajam leptonu kanālam rekonstrukcijas līmenī daļiņu plūsmas datus atbilstoši krāsu okteta  $W$  bozona modelim.

Strūklas sastāvdaļas	$I \pm (\text{stat.}) \pm (\text{sist.})$ [rad]	$R^{-1} \pm (\text{stat.}) \pm (\text{sist.})$
$j_1^b, j_2^b$		
visas	$0,010 \pm 0,000 \pm 0,000$	$0,189 \pm 0,000 \pm 0,002$
lādētas	$0,006 \pm 0,000 \pm 0,000$	$0,175 \pm 0,000 \pm 0,004$
$j_f^W, j_h^b$		
visas	$0,013 \pm 0,000 \pm 0,000$	$0,250 \pm 0,000 \pm 0,001$
lādētas	$0,008 \pm 0,000 \pm 0,000$	$0,243 \pm 0,000 \pm 0,003$
$j_h^b, j_c^W$		
visas	$0,071 \pm 0,000 \pm 0,000$	$1,375 \pm 0,000 \pm 0,003$
lādētas	$0,049 \pm 0,000 \pm 0,000$	$1,433 \pm 0,000 \pm 0,008$
$j_1^W, j_2^W$		
visas	$0,052 \pm 0,000 \pm 0,000$	$1,000 \pm 0,000 \pm 0,003$
lādētas	$0,034 \pm 0,000 \pm 0,000$	$1,000 \pm 0,000 \pm 0,008$

## 7.7. Hipotēžu pārbaude

Mūsu rīcībā esošie krāsu maiņas MK paraugi sniedz iespēju gūt priekšstatu par to, vai krāsu okteta  $W$  signāls ir redzams datos. Šādi rezultāti jāapskata ar piesardzību, jo sakritība starp datiem un MK paraugiem nav īpaši laba. Izmantosim metodi, kuru daļiņu fiziķi lieto atklājumu veikšanai: tikai fona hipotēzes pārbaude pret signāla + fona hipotēzi ar zīmīgumu  $Z$  vismaz 5 [57]. Pirmā hipotēze tiek dēvēta par nulles hipotēzi  $H_0$ , bet otrā hipotēze tiek dēvēta par alternatīvo hipotēzi  $H_{\text{alt}}$ .

Mēs konstruējam divu hipotēžu modeli, lai kombinētu fona,  $t\bar{t}$  un krāsu maiņas  $t\bar{t}$  signālus:

$$n = \mu \left( (1-x) f_{t\bar{t}} + x f_{t\bar{t}_{\text{flip}}} \right) + b, \quad (7.7.)$$

kur  $n$  ir sagaidāmais notikumu skaits,  $\mu$  – signāla stiprums,  $x$  – parametrs, kas tiek lietots, lai piešķirtu svaru  $t\bar{t}$  un krāsu maiņas  $t\bar{t}$  signālam tā, lai to kopējais svars būtu vienāds ar 1,  $b$  – MK fons. Turpmākajā datoranalīzē  $\mu$  ir iestatīts kā 1, un  $x$  iestatīts kā interesējošais parametrs.

Kā testa statistisko parametru izmantojam Tevatrona testa statistisko parametru. Tas pazīstams arī kā Neimana–Pīrsona (oriģ. *Neyman–Pearson*) testa statistiskais parametrs. Tevatrona testa statistiskais parametrs tiek definēts kā:

$$q^{\text{TEV}} = -2 \ln \frac{L(H_0)}{L(H_{\text{alt}})} = -2 \ln \frac{L(\text{dati} | p = 0, \hat{\theta}_0)}{L(\text{dati} | p = P, \hat{\theta}_P)}, \quad (7.8.)$$

kur  $p$  ir interesējošais parametrs,  $\theta$  ir traucējumu faktors un  $\hat{\theta}$  ir traucējumu faktors, kas maksimizē profila iespējamību. Profila iespējamība  $L$  tiek definēta kā hipotēzes varbūtība pie dotajiem datiem. Pieņemot hipotēzi ar signāla stiprumu  $\mu$ , iespējamība tiek aprēķināta kā:

$$L(\mu, \theta_s, \theta_b) = \prod_{i=1}^N \frac{(\mu s_i(\theta_s) + b_i(\theta_b))^{n_i}}{n_i!} e^{-(\mu s_i(\theta_s) + b_i(\theta_b))}, \quad (7.9.)$$

kur  $i$  ir fāžu telpas parametrs (vērtību intervāla indekss),  $n_i$  ir novērojumi (dati) attiecīgajā fāzē (vērtību intervālā).

Tevatrona testa statistiskais parametrs mūs interesē tādēļ, ka  $x$  ir iestatīts kā interesējošais parametrs divu hipotēžu modelī 7.7. vien. un  $P$  ir iestatīts kā 1. Līdz ar to, izmantojot  $q^{\text{TEV}}$  statistisko parametru,  $H_0$  (ar  $x = 0$ ) tiek definēta kā  $t\bar{t} + b$  sadalījums, kamēr  $H_{\text{alt}}$  ir definēta kā  $t\bar{t}_{\text{flip}} + b$  sadalījums.

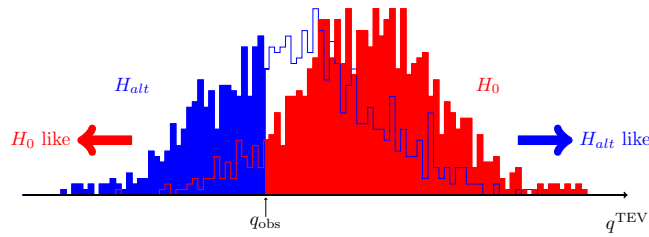
Lai testētu  $H_0$  un  $H_{\text{alt}}$  hipotēzes, nepieciešams aprēķināt to  $p$  vērtības. Labās puses  $p$  vērtība tiek aprēķināta kā

$$p \equiv \int_{q_{\text{nov.}}}^{\infty} f(q) dq, \quad (7.10.)$$

kur  $q_{\text{nov.}}$  ir testa statistiskā parametra vērtība, kas novērota datos, un  $f$  ir varbūtības sadalījuma funkcija atbilstoši pieņemtajai hipotēzei. Zema  $p$  vērtība liecina pret pieņemto hipotēzi. Nozīmīgums  $Z = 5$  atbilst  $p$  vērtībai  $2,87 \times 10^{-7}$ . Neimana–Pīrsona testa statistiskais parametrs atbilstoši  $H_0$  ir rēķināms no labās puses, bet  $H_{\text{alt}}$  ir rēķināms no kreisās puses. Šī sakarība atainota 7.24. att.

Hipotēžu pārbaudei un visu sagatavošanas darbu veikšanai mēs lietojam CMS combine rīku [58]. Testa statistiskā parametra sadalījuma ģenerēšanai izmantojam combine HybridNew



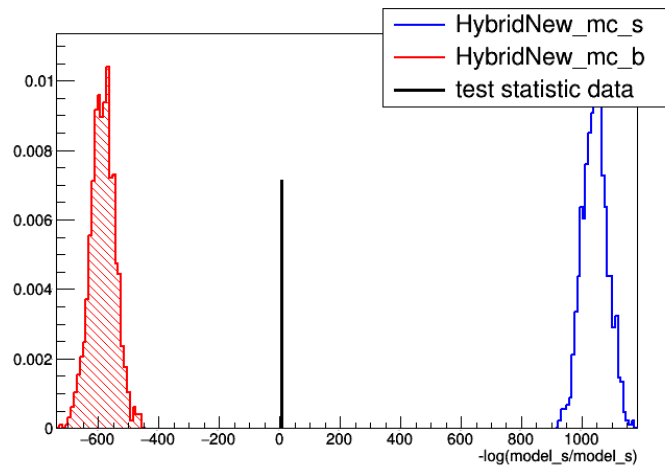


7.24. att. Hipotēžu pārbaude atbilstoši Neimana–Pīrsona testa statistikai.

metodi. Lai aprēķinu teorētiskos testa statistiskā parametra sadalījumus, dati tiek novērtēti no MK paraugiem atbilstoši *frequentist* pieejai. HybridNew metodes lietojums sniegts šādā komandu sarakstā:

```
combine -M HybridNew -T 500 -i 2 --fork 6 --clsAcc 0 --
  fullBToys -m 125.7 TwoHypo.root --seed 8192 --testStat=TEV
  --saveHybridResult --singlePoint 1
```

kur TwoHypo.root ir ROOT datne, kas satur darba telpu, --singlePoint 1 nozīmē, ka pieprasām, lai  $x$  – interesējošais parametrs 7.7. vien. – būtu vienāds ar 1  $H_{\text{alt}}$  gadījumā. Šajā stadijā izmantotajam tikai 500 izmēģinājumus.  $q/2$  sadalījums, kur  $q$  ir testa statistiskais parametrs, pieņemot  $H_0$  un  $H_{\text{alt}}$ , kā arī  $q_{\text{nov}}/2$  vērtība ir sniegta 7.25. att.



7.25. att.  $q/2$  sadalījums, pieņemot  $t\bar{t}$  hipotēzi (sarkanā), krāsām mainītu  $t\bar{t}$  hipotēzi (zilā) un  $q_{\text{nov}}/2$ .

$H_{\text{alt}}$  un  $H_0$   $p$  vērtības ir tuvas nullei. Līdz ar to nav iespējams izdarīt secinājumus: nevar noraidīt  $H_0$  par labu  $H_{\text{alt}}$  un noraidīt  $H_{\text{alt}}$  par labu  $H_0$ .

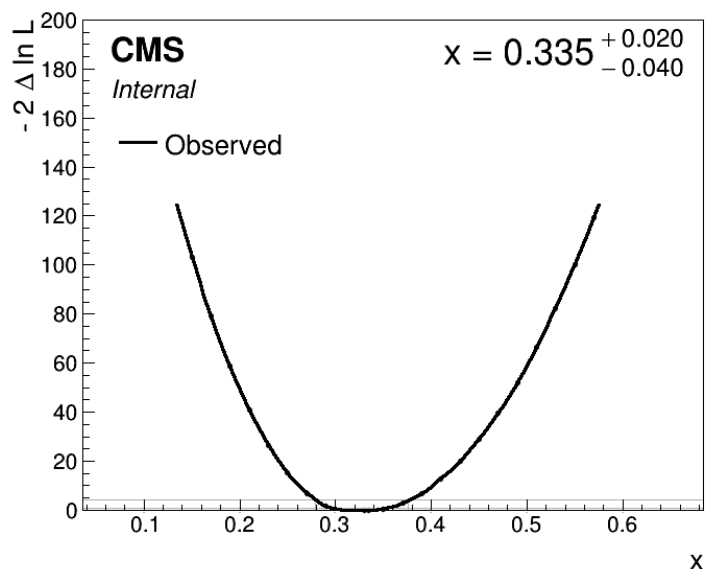
combine rīks ietver MultiDimFit metodi, ar kuru var iegūt profila iespējamības attiecības (PLR) līkni. Profila iespējamības attiecība tiek aprēķināta kā

$$\text{PLR}(x, \theta) = -2 \ln \frac{L(x=0, \theta)}{L(\hat{x}, \hat{\theta})}. \quad (7.11.)$$

Pie  $\hat{x}$  un  $\hat{\theta}$  PLR sasniedz minimumu. Šajā punktā MK vislabāk saskan ar datiem. PLR līkni var iegūt ar šādām komandām:

```
combine -M MultiDimFit --algo grid --points 50 TwoHypo.root
```

PLR līkne ir redzama 7.26. att., un tās minimums ir pie  $x = 0,335$ .



7.26. att. PLR līkne kā funkcija no  $x$ .

Aprēķinot iespējamību, combine rīks kombinē nominālo signālu ar traucējumiem un meklē kombināciju, kas maksimizē profila iespējamību. Dažādiem traucējumiem ir dažāda ietekme. Traucējuma parametra  $\theta$  ietekme tiek definēta kā interesējošā parametra nobīde  $\Delta x$ , iekļaujot traucējumu pie tā  $\pm\sigma$  vērtībām:

$$\Delta x = x \Big|_{\theta \text{ pie } \pm \sigma} - x_0. \quad (7.12.)$$

Lai iegūtu maksimālo profila iespējamību, dažādi traucējumi jāpiemēro dažādos apjomos. Traucējuma parametra  $\theta$  vilkme, kas kvantificē šo apjomu, tiek definēta kā:

$$P = \frac{\hat{\theta} - \theta_0}{\delta\theta}, \quad (7.13.)$$

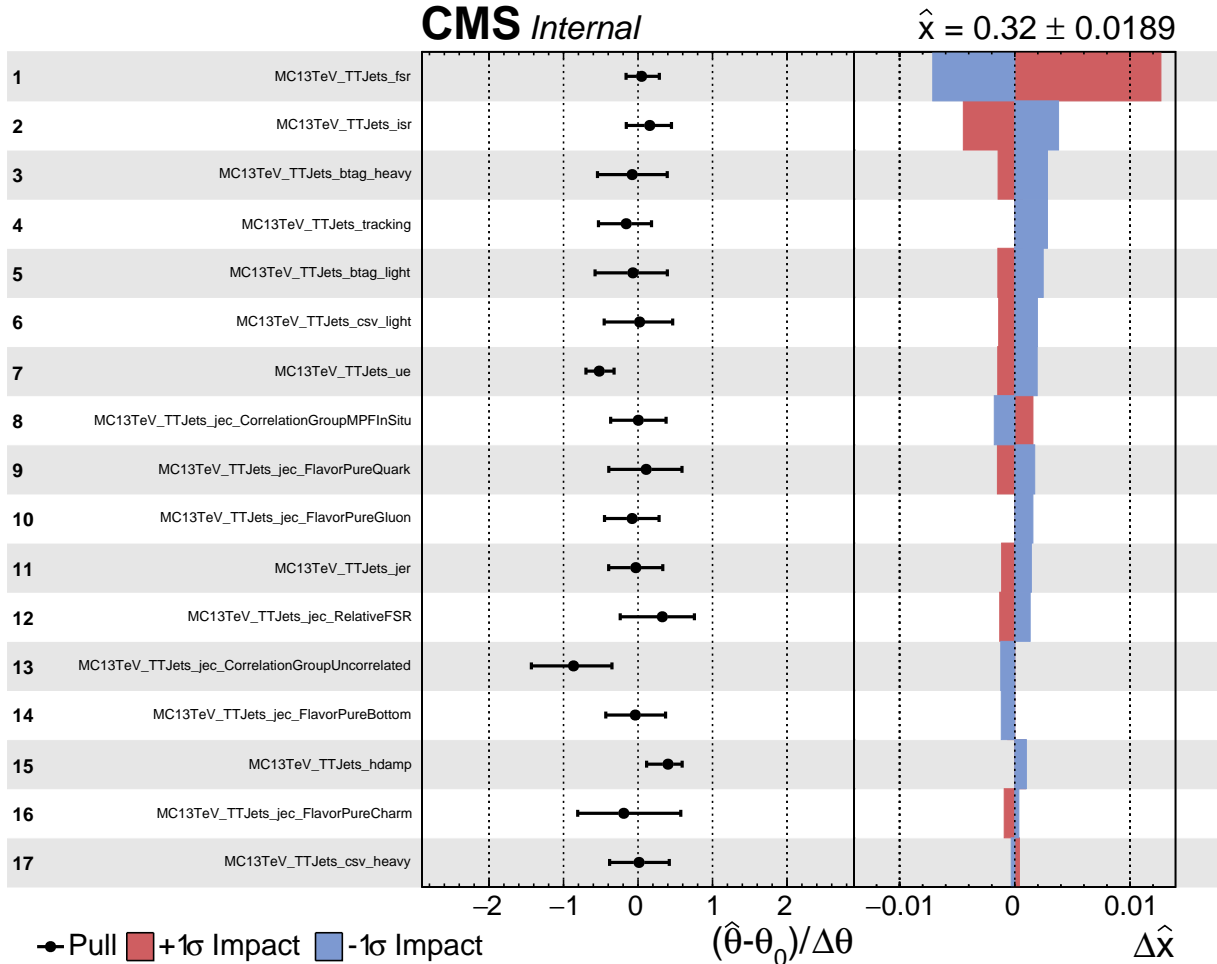
kur  $\hat{\theta}$  ir  $\theta$ , kas maksimizē profila iespējamību,  $\theta_0$  ir pirmspiemērošanas vērtība,  $\delta\theta$  ir pirmspiemērošanas nenoteiktība.

Lai noteiktu traucējumu parametru ietekmi un vilkmi, izmantojam combine rīka Impact metodi. Lietotās komandas ir šādas:

```
combineTool.py -M Impacts -d TwoHypo.root -m 125.7 --
doInitialFit --robustFit 1
combineTool.py -M Impacts -d TwoHypo.root -m 125.7 --
robustFit 1 --doFits
```

```
combineTool.py -M Impacts -d TwoHypo.root -m 125.7 -o impacts
.json
plotImpacts.py -i impacts.json -o impacts
```

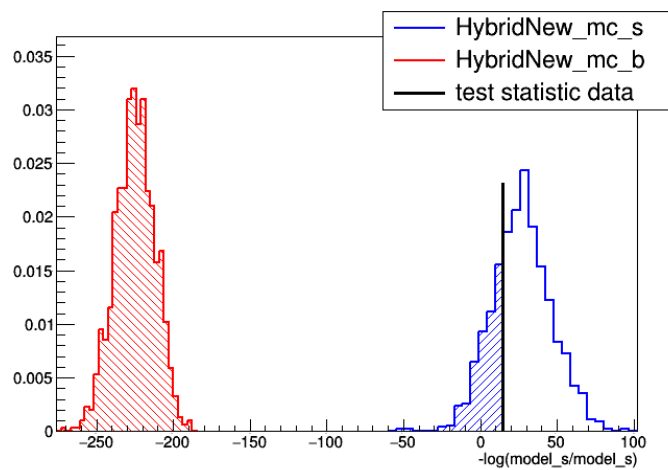
Dažādo traucējuma parametru ietekme un vilkme ir redzama 7.27. att.



7.27. att. Dažādu traucējumu parametru ietekme un vilkme.

Pēc tam, kad esam ieguvuši, ka  $\hat{x} = 0,335$  (7.26. att.), varam atgriezties pie hipotēžu pārbaudes, šoreiz nosakot, ka  $x = \hat{x}$ . Šajā gadījumā mēs pārbaudīsim hipotēzi, saskaņā ar kuru signāls sastāv tikai no  $t\bar{t}$  ( $H_0$ ) pret hipotēzi, saskaņā ar kuru signāls ir kombinēts no 66,5 %  $t\bar{t}$  procesa un 33,5 % krāsu apmainītā  $t\bar{t}$  procesa ( $H_{alt}$ ). Testa statistiskā parametra sadalījums pie  $x = \hat{x}$  ir attēlots 7.28. att.

Pie  $x = \hat{x}$   $H_0$   $p$  vērtība ir vienāda ar 0, bet  $H_{alt}$   $p$  vērtība ir 0,25. Līdz ar to varam noraidīt  $H_0$  par labu  $H_{alt}$ .



7.28. att.  $\frac{q}{2}$  sadalījums, pieņemot vienīgi  $t\bar{t}$  hipotēzi (sarkanā), hipotēzi saskaņā ar kuru signāls sastāv no 66,5 %  $t\bar{t}$  un 33,5 % krāsu apmainītā  $t\bar{t}$  procesa (zilā) un  $\frac{q_{\text{obs}}}{2}$ .

## 8. Secinājumi

Esam guvuši pārliecību, ka vilkmes leņķa metode, kas balstīta labā treku rekonstrukcijā, ir jutīga ar krāsām saistītu strūklu identificēšanā. Vilkmes leņķa sadalījumā skaidri izšķirams paugurs, kas centrēts 0 rad ar krāsām saistītu strūklu gadījumā. Vilkmes leņķa sadalījums ir monotons gadījumā, ja strūklas nav saistītas ar krāsām.

Pārliecinosi rezultāti ir gūti arī, lietojot “LEP metodi”. Daļiņu blīvums ir lielāks starp strūklām, kas saistītas ar krāsām, nekā bezkrāsu reģionos.

Rezultāti tika salīdzināti ar krāsu okteta  $W$  paraugiem, kuros krāsu saistība starp hadroniskajiem sabrukuma produktiem tika noņemta. Šādā gadījumā, pielietojot vilkmes leņķa metodi un “LEP metodi”, vieglās strūklas atbilst ar krāsām nesaistītām strūklām.

Veicām vilkmes leņķa atlocīšanas procedūru, lai iegūtu tā patieso sadalījumu pirms detektorā veiktās rekonstrukcijas. Tika konstatēts, ka būtiskas izmaiņas secinājumos atlocīšanas procedūra neievieša.

Pamanāms, ka POWHEG + PYTHIA MK simulācijas pārspilē krāsu efektus salīdzinājumā ar detektora reālās pasaules novērojumiem. Šie pārspilējumi redzami kā izteiktāks paugurs vilkmes leņķa sadalījumā MK simulācijā. HERWIG++ un atsevišķi PYTHIA uzskāņojumi krāsu saistību hadronizācijā modelē precīzāk.

Novērojām, ka kopumā sakritība starp datiem un MK nav īpaši laba.  $\sim 2/3$   $t\bar{t}$  kombinācija ar  $\sim 1/3$   $t\bar{t}$  *cflip* labāk atbilst detektora novērojumiem. Šādi rezultāti tika iegūti, veicot hipotēžu pārbaudi.

# Bibliogrāfija

- [1] Albert M Sirunyan u. c. “Measurement of the  $t\bar{t}$  production cross section, the top quark mass, and the strong coupling constant using dilepton events in pp collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV”. (2018). arXiv: 1812.10505 [hep-ex].
- [2] Albert M Sirunyan u. c. “Particle-flow reconstruction and global event description with the CMS detector”. (2017). arXiv: 1706.04965 [physics.ins-det].
- [3] Jason Gallicchio un Matthew D. Schwartz. “Seeing in Color: Jet Superstructure”. *Phys. Rev. Lett.* 105 (2010), 22001. lpp. doi: 10.1103/PhysRevLett.105.022001. arXiv: 1001.5027 [hep-ph].
- [4] G. Abbiendi u. c. “Colour reconnection in  $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$  at  $\sqrt{s} = 189\text{-GeV} - 209\text{-GeV}$ ”. *Eur. Phys. J. C* 45 (2006), 291.–305. lpp. doi: 10.1140/epjc/s2005-02439-x. arXiv: hep-ex/0508062 [hep-ex].
- [5] J. Abdallah u. c. “Investigation of colour reconnection in WW events with the DELPHI detector at LEP-2”. *Eur. Phys. J. C* 51 (2007), 249.–269. lpp. doi: 10.1140/epjc/s10052-007-0304-9. arXiv: 0704.0597 [hep-ex].
- [6] P. Achard u. c. “Search for color reconnection effects in  $e^+e^- \rightarrow W^+W^- \rightarrow$  hadrons through particle flow studies at LEP”. *Phys. Lett.* B561 (2003), 202.–212. lpp. doi: 10.1016/S0370-2693(03)00490-8. arXiv: hep-ex/0303042 [hep-ex].
- [7] Andy Buckley u. c. “Rivet user manual”. *Comput. Phys. Commun.* 184 (2013), 2803.–2819. lpp. doi: 10.1016/j.cpc.2013.05.021. arXiv: 1003.0694 [hep-ph].
- [8] Victor Mukhamedovich Abazov u. c. “Measurement of color flow in  $t\bar{t}$  events from  $p\bar{p}$  collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV”. *Phys. Rev.* D83 (2011), 92002. lpp. doi: 10.1103/PhysRevD.83.092002. arXiv: 1101.0648 [hep-ex].
- [9] Georges Aad u. c. “Measurement of colour flow with the jet pull angle in  $t\bar{t}$  events using the ATLAS detector at  $\sqrt{s} = 8$  TeV”. *Phys. Lett.* B750 (2015), 475.–493. lpp. doi: 10.1016/j.physletb.2015.09.051. arXiv: 1506.05629 [hep-ex].
- [10] Morad Aaboud u. c. “Measurement of colour flow using jet-pull observables in  $t\bar{t}$  events with the ATLAS experiment at  $\sqrt{s} = 13$  TeV”. *Eur. Phys. J. C* 78.10 (2018), 847. lpp. doi: 10.1140/epjc/s10052-018-6290-2. arXiv: 1805.02935 [hep-ex].
- [11] M. Seidel, P. Schleper un H. Stadie. *Study of colour flow in  $l+jets$* . site. 2013. URL: [https://indico.cern.ch/event/276523/contributions/622482/attachments/502591/694047/colourflow\\_mseidel.pdf](https://indico.cern.ch/event/276523/contributions/622482/attachments/502591/694047/colourflow_mseidel.pdf).
- [12] G. Aad u. c. “The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider”. *JINST* 3 (2008), S08003. doi: 10.1088/1748-0221/3/08/S08003.

- [13] *Summary of LHC and Tevatron measurements of the top-pair production cross-section as a function of the centre-of-mass energy compared to the NNLO QCD calculation complemented with NNLL resummation (top++2.0)*. Twiki Page. 2018. URL: [https://twiki.cern.ch/twiki/pub/LHCPhysics/LHCTopWGSummaryPlots/tt\\_curve\\_toplhcg\\_sep18.pdf](https://twiki.cern.ch/twiki/pub/LHCPhysics/LHCTopWGSummaryPlots/tt_curve_toplhcg_sep18.pdf).
- [14] Timo Antero Aaltonen u. c. “Tevatron Combination of Single-Top-Quark Cross Sections and Determination of the Magnitude of the Cabibbo-Kobayashi-Maskawa Matrix Element  $V_{tb}$ ”. *Phys. Rev. Lett.* 115.15 (2015), 152003. lpp. doi: 10.1103/PhysRevLett.115.152003. arXiv: 1503.05027 [hep-ex].
- [15] C. Patrignani u. c. “Review of Particle Physics”. *Chin. Phys.* C40.10 (2016), 100001. lpp. doi: 10.1088/1674-1137/40/10/100001.
- [16] Victor Mukhamedovich Abazov u. c. “Determination of the width of the top quark”. *Phys. Rev. Lett.* 106 (2011), 22001. lpp. doi: 10.1103/PhysRevLett.106.022001. arXiv: 1009.5686 [hep-ex].
- [17] Markus Cristinziani un Martijn Mulders. “Top-quark physics at the Large Hadron Collider”. *J. Phys.* G44.6 (2017), 63001. lpp. doi: 10.1088/1361-6471/44/6/063001. arXiv: 1606.00327 [hep-ex].
- [18] Bo Andersson u. c. “Parton Fragmentation and String Dynamics”. *Phys. Rept.* 97 (1983), 31.–145. lpp. doi: 10.1016/0370-1573(83)90080-7.
- [19] Peter W. Higgs. “Broken symmetries, massless particles and gauge fields”. *Phys. Lett.* 12 (1964), 132.–133. lpp. doi: 10.1016/0031-9163(64)91136-9.
- [20] F. Englert un R. Brout. “Broken Symmetry and the Mass of Gauge Vector Mesons”. *Phys. Rev. Lett.* 13 (1964). [157(1964)], 321.–323. lpp. doi: 10.1103/PhysRevLett.13.321.
- [21] Serguei Chatrchyan u. c. “Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC”. *Phys. Lett.* B716 (2012), 30.–61. lpp. doi: 10.1016/j.physletb.2012.08.021. arXiv: 1207.7235 [hep-ex].
- [22] Georges Aad u. c. “Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC”. *Phys. Lett.* B716 (2012), 1.–29. lpp. doi: 10.1016/j.physletb.2012.08.020. arXiv: 1207.7214 [hep-ex].
- [23] *Overall view of the LHC*. CERN Document Server. 2014. URL: <http://cds.cern.ch/record/1708847>.
- [24] *CERN’s Accelerator Complex*. espace. 2014. URL: <https://espace.cern.ch/acc-tec-sector/Pictures/CERN's%20accelerator%20complex2015bis.png>.
- [25] Oliver S. Bruning u. c. “LHC Design Report Vol.1: The LHC Main Ring”. (2004).
- [26] Stephen Myers. “The Large Hadron Collider 2008-2013”. *Int. J. Mod. Phys.* A28 (2013), 1330035. lpp. doi: 10.1142/S0217751X13300354.
- [27] Lyndon Evans un Philip Bryant. “LHC Machine”. *JINST* 3 (2008), S08001. doi: 10.1088/1748-0221/3/08/S08001.
- [28] S. Chatrchyan u. c. “The CMS Experiment at the CERN LHC”. *JINST* 3 (2008), S08004. doi: 10.1088/1748-0221/3/08/S08004.

- [29] Tai Sakuma un Thomas McCauley. “Detector and Event Visualization with SketchUp at the CMS Experiment”. *J. Phys. Conf. Ser.* 513 (2014), 22032. lpp. DOI: 10.1088/1742-6596/513/2/022032. arXiv: 1311.4942 [physics.ins-det].
- [30] 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>.
- [31] *The CMS tracker: addendum to the Technical Design Report*. Technical Design Report CMS. Geneva: CERN, 2000. URL: <https://cds.cern.ch/record/490194>.
- [32] P. Adzic u. c. “Energy resolution of the barrel of the CMS electromagnetic calorimeter”. *JINST* 2 (2007), P04004. DOI: 10.1088/1748-0221/2/04/P04004.
- [33] *The CMS hadron calorimeter project: Technical Design Report*. Technical Design Report CMS. Geneva: CERN, 1997. URL: <https://cds.cern.ch/record/357153>.
- [34] *The CMS muon project: Technical Design Report*. Technical Design Report CMS. Geneva: CERN, 1997. URL: <https://cds.cern.ch/record/343814>.
- [35] Matteo Cacciari, Gavin P. Salam un Gregory Soyez. “The Anti-k(t) jet clustering algorithm”. *JHEP* 04 (2008), 63. lpp. DOI: 10.1088/1126-6708/2008/04/063. arXiv: 0802.1189 [hep-ph].
- [36] Matteo Cacciari, Gavin P. Salam un Gregory Soyez. “FastJet User Manual”. *Eur. Phys. J. C* 72 (2012), 1896. lpp. DOI: 10.1140/epjc/s10052-012-1896-2. arXiv: 1111.6097 [hep-ph].
- [37] The ATLAS collaboration. “Measurement of colour flow using jet-pull observables in  $t\bar{t}$  events with the ATLAS experiment at  $\sqrt{s} = 13$  TeV”. (2017).
- [38] G. Salam. *Anti-kt jet boundaries*. GitHub page. 2018. URL: <https://github.com/gavinsalam/antik-kt-jet-boundaries>.
- [39] Serguei Chatrchyan u. c. “Description and performance of track and primary-vertex reconstruction with the CMS tracker”. *JINST* 9.10 (2014), P10009. DOI: 10.1088/1748-0221/9/10/P10009. arXiv: 1405.6569 [physics.ins-det].
- [40] TOP Physics Object Group. *Measurement of the underlying event in  $t$ - $t$  dilepton events at  $\sqrt{s}=13$  TeV*. draft CMS Analysis Note CMS-AN-2017-175. Geneva: CERN, 2018.
- [41] TOP Physics Object Group. *Jet shapes in  $t\bar{t}$  events at 13 TeV (2016 data)*. draft CMS Analysis Note CMS-AN-2017-159. Geneva: CERN, 2018.
- [42] *BRIL Work Suite*. site. 2015. URL: <http://cms-service-lumi.web.cern.ch/cms-service-lumi/brilwsdoc.html>.
- [43] *NLO single-top channel cross sections : ATLAS-CMS recommended predictions for single-top cross sections using the Hathor v2.1 program*. twiki. 2015. URL: <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/LHCPhysics/SingleTopRefXsec>.
- [44] *Summary table of samples produced for the 1 Billion campaign, with 25ns bunch-crossing*. twiki. 2015. URL: <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMS/SummaryTable1G25ns>.
- [45] *McM Monte-Carlo Request Management*. site. 2015. URL: <https://cms-pdmv.cern.ch/mcm/>.



- [46] *NNLO+NNLL top-quark-pair cross sections : ATLAS-CMS recommended predictions for top-quark-pair cross sections using the Top++v2.0 program (M. Czakon, A. Mitov, 2013)*. twiki. 2015. URL: <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/LHCPhysics/TtbarNNLO>.
- [47] Goh, J. and Seidel, M. *PseudoTopProducer*. github repository. 2017. URL: [https://github.com/intrepid42/cmssw/tree/pseudotoprivet\\_80x/TopQuarkAnalysis/TopEventProducers](https://github.com/intrepid42/cmssw/tree/pseudotoprivet_80x/TopQuarkAnalysis/TopEventProducers).
- [48] *Jet Energy Resolution Measurement*. Twiki Page. 2017. URL: <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/viewauth/CMS/JetResolution>.
- [49] *Recommended Jet Energy Corrections and Uncertainties For Data and MC*. Twiki Page. 2017. URL: <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMS/JECDataMC>.
- [50] *BTagCalibration Documentation*. twiki. 2015. URL: <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMS/BTagCalibration>.
- [51] M. Bahr u. c. “Herwig++ Physics and Manual”. *Eur. Phys. J. C*58 (2008), 639.–707. lpp. DOI: 10.1140/epjc/s10052-008-0798-9. arXiv: 0803.0883 [hep-ph].
- [52] Vardan Khachatryan u. c. “Measurement of the top quark mass using proton-proton data at  $\sqrt{s} = 7$  and 8 TeV”. *Phys. Rev. D*93.7 (2016), 72004. lpp. DOI: 10.1103/PhysRevD.93.072004. arXiv: 1509.04044 [hep-ex].
- [53] Veckalns, V. *CFAT*. Pieejams. 2018. URL: <https://github.com/vveckaln/CFAT>.
- [54] R. Brun un F. Rademakers. “ROOT - An Object Oriented Data Analysis Framework”. *Nucl. Inst. A* 389 (1997), 81.–86. lpp.
- [55] Stefan Schmitt. “TUnfold: an algorithm for correcting migration effects in high energy physics”. *JINST* 7 (2012), T10003. DOI: 10.1088/1748-0221/7/10/T10003. arXiv: 1205.6201 [physics.data-an].
- [56] Veckalns, V. *CompoundHistoUnfolding*. Pieejams. 2018. URL: <https://github.com/vveckaln/COMPOUNHISTOUNFOLDING>.
- [57] Glen Cowan u. c. “Asymptotic formulae for likelihood-based tests of new physics”. *Eur. Phys. J. C*71 (2011). [Erratum: *Eur. Phys. J. C*73,2501(2013)], 1554. lpp. DOI: 10.1140/epjc/s10052-011-1554-0, 10.1140/epjc/s10052-013-2501-z. arXiv: 1007.1727 [physics.data-an].
- [58] *The CMS combine tool*. Pieejams. 2018. URL: <https://cms-hcomb.gitbooks.io/combine/>.