

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ  
Київський національний університет імені Тараса Шевченка  
Фізичний факультет  
Кафедра ядерної фізики

**Оптимізація ідентифікації електронів на першому рівні триггеру детектора  
ATLAS**

**Галузь знань:** 10 Природничі науки  
**Спеціальність:** 104 Фізика та астрономія  
**Освітня програма:** Фізика  
**Спеціалізація:** Ядерна енергетика

**Кваліфікаційна робота бакалавра**  
студентки 4 курсу  
Лаворик Ольги Сергіївни

**Науковий керівник:**  
Dr. Tetiana Berger-Hryn'ova  
(LAPP, Annecy, France)  
**Куратор від кафедри:**  
канд. фіз. -мат. наук, доц.  
Безшийко О.А.

Робота заслухана на засіданні кафедри та рекомендована до захисту на ЕК,  
протокол №17 від «11.06» 2020 р.

Зав.кафедри  
ядерної фізики



проф. І.М. Каденко

Київ-2020

## **ВИТЯГ**

з протоколу № \_\_\_\_\_

засідання Екзаменаційної комісії

Визнати, що студентка Лаворик Ольга Сергіївна виконала та захистила кваліфікаційну роботу бакалавра з оцінкою \_\_\_\_\_.

Голова ЕК \_\_\_\_\_

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 р.

## Анотація

**Лаворик О.С.** "Оптимізація ідентифікації електронів на першому рівні триггеру детектора ATLAS"

*Кваліфікаційна робота бакалавра за спеціальністю 6.040203 – фізика, спеціалізація "ядерна енергетика". – Київський національний університет імені Тараса Шевченка, фізичний факультет, кафедра ядерної фізики. – Київ, 2020.*

**Науковий керівник:** Dr. Tetiana Berger-Hryn'ova (LAPP, Annecy, France)

Проаналізовано ефективність реєстрації та частоту спрацьовування триггера електромагнітних об'єктів на першому рівні триггера детектора ATLAS для Run 2 та Run 3. Було знайдено оптимальні кати для зменшення частоти спрацьовування триггера та збільшення ефективності реєстрації.

**Ключові слова:** частота спрацьовування триггера, електромагнітний калориметр, ATLAS

## Summary

**Lavoryk O.S.** "Optimization of electron identification in the hardware level of the ATLAS trigger"

*Qualifying work of the bachelor on a speciality 6.040203 – physics, specialization "nuclear energetics". – Taras Shevchenko National University of Kyiv, Faculty of Physics, Department of Nuclear Physics. – Kyiv, 2020.*

**Research supervisor:** Dr. Tetiana Berger-Hryn'ova (LAPP, Annecy, France)

The efficiency and trigger rate at the first level of electromagnetic calorimeter of the ATLAS detector were analyzed. Optimal cuts were found to reduce the trigger rate and increase the registration efficiency.

**Key words:** trigger rate, electromagnetic calorimeter, ATLAS

# Зміст

1	Вступ	1
2	Великий Адронний Колайдер	2
3	Калориметрична система експеримента ATLAS	3
4	Дані моделювання Монте Карло	5
5	Реконструкція offline електронів в експерименті ATLAS	6
6	Методологія вимірювання ефективності тригера електронів	7
7	Ідентифікація електромагнітних об'єктів на L1 тригері в Run 2	7
8	Ідентифікація електромагнітних об'єктів на L1 тригері в Run 3	11
9	Оптимізація ефективності для Run 3	14
10	Оптимізація зі змінною $R_{\eta}^{1+2}$	17
11	Висновки	20
12	Література	21

# 1 Вступ

Стандартна Модель (СМ) у фізиці елементарних частинок була підтверджена в ході багатьох експериментів протягом останніх сорока років і показала успішні результати для опису взаємодій частинок високих енергій [1].

У СМ порушення електрослабкої симетрії реалізовується шляхом введення складного дублетного скалярного поля, яке пов'язане з існуванням нейтральної частинки - бозона Хіггса. Скалярне поле Хіггса відповідає за масу елементарних частинок. Бозон Хіггса був останньою частинкою, передбаченою теорією. Він був знайдений у 2012 році колабораціями ATLAS та CMS, що працюють на Великому Адронному Колайдері (ЛНС) у Женеві, Швейцарія [2, 3].

Незважаючи на свої успіхи, СМ має деякі недоліки [4]: "Вона не містить жодного кандидата темної матерії, який володіє всіма властивостями, які вимагає спостережувальна космологія, а також не може пояснити асиметрію речовини і антиматерії Всесвіту. Вона також не включає нейтринні осциляції або не пояснює прискорене розширення Всесвіту. Все вищесказане вказує на те, що СМ є ефективною теорією, низьким наближенням енергії до повної теорії, яка дає відповіді на всі ці питання. Лише дані можуть дати нам відповіді щодо її природи. Ми можемо отримати ці дані за допомогою Великого Адронного Колайдера (ЛНС) при Європейській організації ядерних досліджень (CERN) та його експериментами."

Оскільки природа пошуку не зрозуміла, вона повинна охоплювати широкий спектр фізичних процесів від стандартних процесів, включаючи явища аромату (поперечні енергії  $\approx 5$  ГеВ), до пошуку нових явищ у дуже високих моментах до кілька ТеВ, таких як нові важкі колісні бозони  $W'$  і  $Z'$ . Часто ці процеси містять електрони та фотони. Електронні та фотонні тригери ATLAS, що охоплюють поперечні енергії від 5 ГеВ до кілька ТеВ дозволяють

збирати події для таких досліджень, - це фокус цього проекту.

У наступному розділі буде представлено LHC, у розділі 3 - калориметричну систему експеримента ATLAS, у розділі 4 - дані моделювання Монте Карло, у розділі 5 - реконструкція offline електронів, у розділі 6 - вимірювання ефективності електронів. Результати моєї роботи представлено у розділах 7 - 10, висновки - у розділі 11.

## 2 Великий Адронний Колайдер

LHC - двокільцевий надпровідний адронний прискорювач та колайдер, що знаходиться в тунелі, довжина круга якого 27 км. Основна мета проекту - виявити явища поза СМ при енергії центра мас до 14 TeV. Кількість подій на секунду, що згерована під час зітнень частинок на LHC:

$$\frac{\partial N_{event}}{\partial t} = \mathcal{L} \sigma_{event}$$

де  $\sigma_{event}$  переріз для подій, які вивчаються,  $\mathcal{L}$  - світимість.

Останній період збору даних (Запуск 2, Run 2) проходив з 2015 до 2018 року. LHC зіштовхував пучки з енергією центра мас  $\sqrt{s} = 13$  TeV. Була досягнута світимість  $\mathcal{L} = 2.1 \times 10^{34} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  та інтегральна світимість 150 фб<sup>-1</sup>.

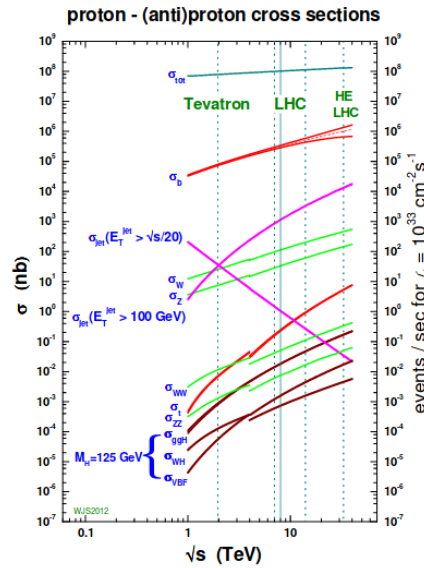
Зараз є період Довге відключення 2 (LS2): 2019 - 2021. Linac4 буде підключений до інжекторного комплексу та енергія пучка інжекційного підсилювача Proton Synchrotron буде покращена для того, щоб зменшити випромінювання променя. Будуть встановлені нові установки криогеніки, щоб розділити охолодження надпровідні радіочастотні модулі та контур охолодження магніту.

У наступному році почнеться Запуск 3 (Run 3), що буде продовжуватись з 2021 до 2024. Дизайн LHC дозволить отримати наступні параметри: світимість  $\mathcal{L} \sim 2.2 \times 10^{34} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  та інтегральну світимість до 300–450 фб<sup>-1</sup>. Обговорюється енергія центра мас до 14 TeV.

Цікаві для досліджень події є рідкісними, тобто мають малий переріз вза-

ємодії. Для покращення статистичної точності вимірювань необхідно дослідити більшу кількість подій, а для цього - збільшити світимість.

На Рис. 1 показано залежність перерізу різних процесів як функцію залежності від енергії центра мас для протон-протонних зіткнень. Як видно із Рис. 1, що збільшення енергії центра мас приведе до збільшення кількості цікавих подій.



**Рис. 1:** Залежність перерізу від енергії центра мас для протон-протонних зіткнень.

### 3 Калориметрична система експеримента ATLAS

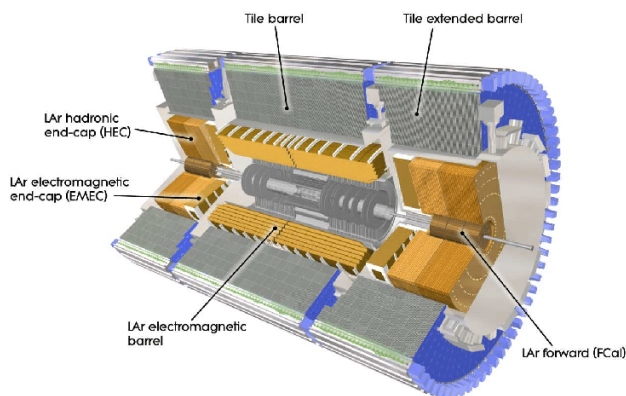
Детектор ATLAS [5] - це багатоцільовий детектор, призначений для спостереження за частинками, що утворюються при зіткненнях протон-протон (pp) та важких іонів (HI).

Внутрішній шар складається із трекових детекторів, що покривають діапазон псевдошвидкості<sup>1</sup>  $|\eta| < 2.5$ . Цей внутрішній детектор оточений надпровідними соленоїдами, що забезпечують аксіальне магнітне поле потужністю 2 Т.

<sup>1</sup>Псевдошвидкість  $\eta$  часто використовується в експериментах з зіттовхування частинок для того, щоб позначити кут відносно осі пучків, що зіттовхуються. Він має значення 0 для траєкторій частинок, які перпендикулярні до пучка, і позитивні або негативні значення для тих, що знаходяться під кутом до пучка [5].

Навколо нього знаходиться адронний та електромагнітний калориметр, що охоплює  $|\eta| < 4.9$ . Зовнішні шари детектора складаються із зовнішнього мюонного спектрометра (MS) всередині  $|\eta| < 2.7$ , з трьома великими тороїдальними магнітними вузлами з вісьмома котушками кожна. В ATLAS наявна дворівнева тригерна система. Максимальна частота спрацьовування тригерів першого рівня (L1) 100 кГц [6]. Події, які пройшли селекцію на L1 обробляються на тригері високого рівня (HLT), що базується на алгоритмах, виконаних в програмному забезпеченні, які повинні зменшити кількість записаних на диск подій приблизно до 1 кГц протягом декількох секунд [7].

Калориметрична система (Рис. 2) має як електромагнітні (ЕМ), так і адронні компоненти. Вона розроблена для забезпечення повного покриття  $\phi$  і охоплює діапазон псевдошвидкості  $|\eta| < 4.9$ , з тонкою деталізацією в області, що відповідає внутрішньому детектору. Електромагнітний калориметр - калориметр, що працює на рідкому аргоні (LAr) з гармошкоподібною геометрією.



**Рис. 2:** Калориметр експерименту ATLAS.

Електромагнітний калориметр має дві компоненти: барельну ( $|\eta| < 1.475$ ) та тоцеву ( $1.375 < |\eta| < 3.2$ ), кожна із яких знаходиться у власному кріостаті. Центральний соленоїд та LAr калориметри утворюють вакуумну посудину, уникаючи вакуумних стінок за рахунок того, що центральний соленоїд знаходиться перед ЕМ калориметром. Барельний калориметр складається з



двох однакових півциліндрів, розділених невеликим зазором (4 мм) в площині  $z = 0$ . Торцеві частини калориметра поділено на два коаксіальних кола: зовнішнє ( $1.375 < |\eta| < 2.5$ ) та внутрішнє ( $2.5 < |\eta| < 3.2$ ). Гармошкоподібна структура дозволяє уникнути порушення азимутальної симетрії.

Адронний калориметр складається із трьох частин: плиткоподібної, торцевої та передньої. Плиткова частина знаходиться прямо над електромагнітною оболонкою. Її барелі охоплюють область із  $|\eta| < 1.0$  та також два розширені барелі  $0.8 < |\eta| < 1.7$ . Цей калориметр використовує сталь як поглинач та сцинтиляційні плитки як активний матеріал.

Торцевий калориметр складається із двох окремих дисків, розташованих поза торцевим електромагнітним калориметром, поділяючи із ним той самий кріостат із рідкого аргону. Для того, щоб уникнути зменшення щільності матеріалу у просторі між торцевим та електромагнітним калориметром (приблизно  $|\eta| = 3.1$ ), торцевий калориметр розширено до  $|\eta| = 3.2$ , тим самим перекриваючись переднім калориметром.

Передній калориметр інтегровано у кріостат торцевого, оскільки це забезпечує чіткі переваги в плані рівномірності калориметричного покриття, а також зменшених фонового рівня випромінювання в мюонному спектрометрі. Для зменшення кількості нейтронного альbedo у внутрішній порожнині детектора передня поверхня заглиблюється приблизно на 1,2 м відносно передньої поверхні ЕМ калориметра. Це сильно обмежує глибину калориметрії, тому вимагає створення конструкції високої щільності [5].

## 4 Дані моделювання Монте Карло

У цій роботі використано наступні змодельовані дані.

Зразки симульованих  $Z \rightarrow ee$  розпадів використано для порівняння очікуваної ефективності тригера і для оптимізації критеріїв ідентифікації еле-

ктронів. Powheg-Vox v1 Монте Карло(МС) генератор [8, 9, 10, 11] використано для симуляції пружнього розсіяння у цих зразках. Вони пов'язані з РУТНІА 8.186 [12] для моделювання партонних злив, адронізації, та основні події. CT10 PDF сет [13] використано для процесів пружнього розсіяння, тоді як CTEQ6L1 PDF сет [14] використано для партонних злив. Ефект QED випромінювання фінального стану симульовано з RNOTOS++(v3.52) [15, 16]. EVTGEN v1.2.0 програму [17] використано для розпадів bottom та charm адронів.

Фонові зразки для електронних процесів симульовано РУТНІА 8.186 з NNPDF23LO [18] PDF сетом. Ці процеси включають виникнення мультиджетів,  $qg \rightarrow q\gamma$ ,  $q\bar{q} \rightarrow q\gamma$ , утворення  $W/Z$  бозонів (також електрослабкі процеси) і утворення топ-кварків. Фільтр застосовано для збагачення зразків у фоні електронів: вибрані події містять частинки (виключаючи мюони та нейтрино) утворені в результаті пружнього розсіяння із сумарною поперечною енергією, що перевищує 17 GeV в регіоні  $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.1 \times 0.1$ . Для вивчення фону виключено електрони від розпадів  $W/Z$  бозонів.

## 5 Реконструкція offline електронів в експерименті ATLAS

Електрони в центральному регіоні детектора ( $\eta < 2.47$ ) вибрані із використанням ідентифікації, базованої на функції правдоподібності, яка експлуатує характеристики накопичення енергії в ЕМ калориметрі (повздовжні та бічні форми злив) якість треку, співпадіння трек-кластер та ідентифікація частинок за допомогою детектора перехідного випромінювання [19]. Поріг дискримінації також лінійно встановлено як функцію від кількості реконструйованих вершин, щоб отримати стабільне відрізання фонових електронів. Визначено три стандартних селекції, з такими значеннями ефективності: 'loose' (93%), 'medium' (88%) та 'tight' (80%).

## 6 Методологія вимірювання ефективності тригера електронів

Загальна ефективність визначається за формулою:

$$\epsilon_{total} = \epsilon_{offline} \times \epsilon_{trig} = \frac{N_{offline}}{N_{all}} \times \frac{N_{trig}}{N_{offline}}$$

У роботі розглянуто лише ефективність тригера ( $\epsilon_{trig}$ ), яка визначається кількістю симульованих подій зареєстровані тригером ( $N_{trig}$ ) із ідентифікованих та реконструйованих електронів типу 'medium' [7].

Ефективність фону - це частота зареєстрованих подій.

Ефективність фону, потрібна бути як можна нижче, бо частота зареєстрованих подій складається з частоти реєстрації фону та сигналу. На першому рівні тригера більшість зареєстрованих подій є фоном. Після оновлення необхідно зберігати високу ефективність реєстрації подій сигналу, при цьому не збільшуючи частоту спрацьовування тригера. Тому необхідно забезпечити селекцію об'єктів спрацьовування тригера. Для цього тригер спрацьовує лише для об'єктів, що відповідають певним вимогам. У наступних главах будуть розглянуті ці вимоги для Run 2 та Run 3.

## 7 Ідентифікація електромагнітних об'єктів на L1 тригері в Run 2

Тригер на рівні L1 для протонів та електронів використовує інформацію із калориметра, щоб побудувати області інтересу (EM RoI). Використано алгоритм sliding window із вікном, що складається із trigger towers розміром  $4 \times 4$  із гранулярністю  $0.1 \times 0.1$  в одиницях  $\eta \times \phi$ , сегментоване в повздовжньому напрямі. Якщо алгоритм вікна використовує максимальну  $E_T$  із чотирьох

можливих пар найближчих сусідів у центральному регіоні  $2 \times 2$ ; це використовується для реконструкції поперечної енергії ЕМ об'єктів.

Використовують номінальний поріг для поперечної енергії. Наприклад,  $E_T > 22$  ГеВ для тригера із назвою EM22.

Перехідна ділянка між барельними та торцевими калориметрами має первну порожнину, яка заповнена кабелями для внутрішнього детектора та калориметра, що працює на рідкому Аргоні. Навколо окружності калориметра є певні ділянки, де розміри калориметра з меншою довжиною. Кількість матеріалу по-різному розподілена у калориметрі, тому необхідно калібрувати енергію частинки в залежності від зони  $\eta$ , де її задетектовано. Для того, щоб коригувати ці енергетичні втрати була введена залежність від порога  $\eta$ . Типова варіація порогу від -2 до +3 ГеВ в залежності від номінального значення. У Табл. 1 наведено значення зміщень порогової  $E_T$  для об'єктів Run 2 в залежності від  $\eta$ .

**Табл. 1:** Зміщення порогової  $E_T$  для об'єктів Run 2 в залежності від  $\eta$ .

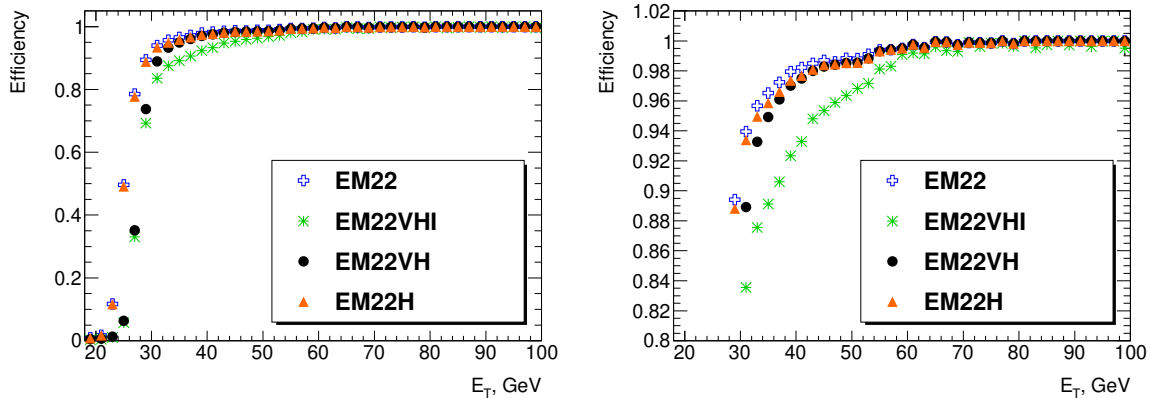
$\eta_{min}$	0	0.7	0.8	1.1	1.3	1.4	1.5	1.7
$\eta_{max}$	0.7	0.8	1.1	1.3	1.4	1.5	1.7	2.5
$E_T, \text{ГеВ}$	24	23	22	21	20	19	21	23

Також використовується селекція згідно адронної активності: кандидати не реєструються, якщо сума поперечних енергій в адронних ділянках, що відноситься до центрального регіону  $2 \times 2$  в електромагнітному шарі щонайменше 1 ГеВ та перевищує  $E_T/23.0 - 0.2$  ГеВ. Також застосовується електромагнітна ізоляція: кандидати не реєструються, якщо сума поперечних енергій в 12 ділянках, що оточують центральний регіон  $2 \times 2$  щонайменше 2 ГеВ та перевищує  $E_T/8.0 - 1.8$  ГеВ. Варто зазначити, що для об'єктів, для яких  $E_T > 50$  ГеВ ці обмеження не накладаються.

Для об'єктів в Run2 використовують наступні позначення:

[Рівень тригера]\_[кратність об'єкта] [мінімальне значення  $E_T$  в ГеВ].

Для обмеження на адронну активність використовують літеру H, для електромагнітної - I, для  $\eta$ -залежного порогу  $E_T$  використовують літеру V. Наприклад, L1\_EM28VHI означає електрон з рівня L1 пороговою енергією вище 28 GeV з адронною та електромагнітною ізоляцією. На Рис. 3 показано криві ефективності для об'єктів EM22, EM22H, EM22VH, EM22VHI сигналу із Run 2 з пороговою енергією  $> 22$  GeV.



(а) Весь діапазон ефективності. (б) Діапазон ефективності від 0.8 до 1.

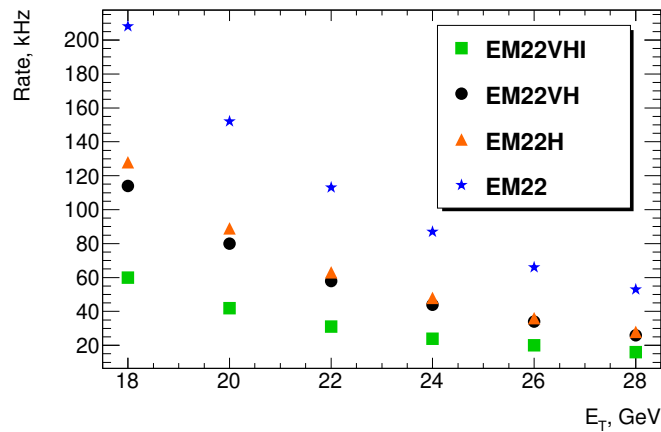
**Рис. 3:** Крива ефективності для об'єктів EM22, EM22H, EM22VH, EM22VHI сигналу із Run 2 з пороговою енергією  $> 22$  GeV.

Частоту спрацьовування тригера можна контролювати за допомогою ізоляції та порогів  $E_T$ . Частота спрацьовування - кількість подій, що мають енергію рівну або вищу, ніж порогова. У таблиці Табл. 2 наведено частоту спрацьовування тригера для об'єктів EM, EMxxH, EMxxVH, EMxxVHI, де xx = 18, 20, 22, 24, 26, 28 GeV, а на Рис. 4 показано частоту спрацьовування тригера для цих об'єктів.

Усі подальші розрахунки частоти спрацьовування тригера було зроблено з  $\mathcal{L} = 2 \times 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Частота тригера прямопропорційна кількості зареєстрованих подій. Усі пораховані частоти віднормовано на частоту, яка відповідає пороговій енергії 22 GeV, для якої частота спрацьовування тригера L1 31 кГц [20].

**Табл. 2:** Частота спрацьовування тригера для об'єктів EM, EM<sub>xx</sub>H, EM<sub>x</sub>VH, EM<sub>xx</sub>VHI, де xx = 18, 20, 22, 24, 26, 28 GeV. Усі пораховані частоти віднормовано на частоту, яка відповідає пороговій енергії 22 GeV, для якої частота спрацьовування тригера L1 31 кГц [20].

$E_T$ , GeV	EM <sub>xx</sub> , kHz	EM <sub>xx</sub> H, kHz	EM <sub>xx</sub> VH, kHz	EM <sub>xx</sub> VHI, kHz
18	208	128	114	60
20	152	89	80	42
22	113	63	58	31
24	87	48	44	24
26	66	36	34	20
28	53	28	26	16



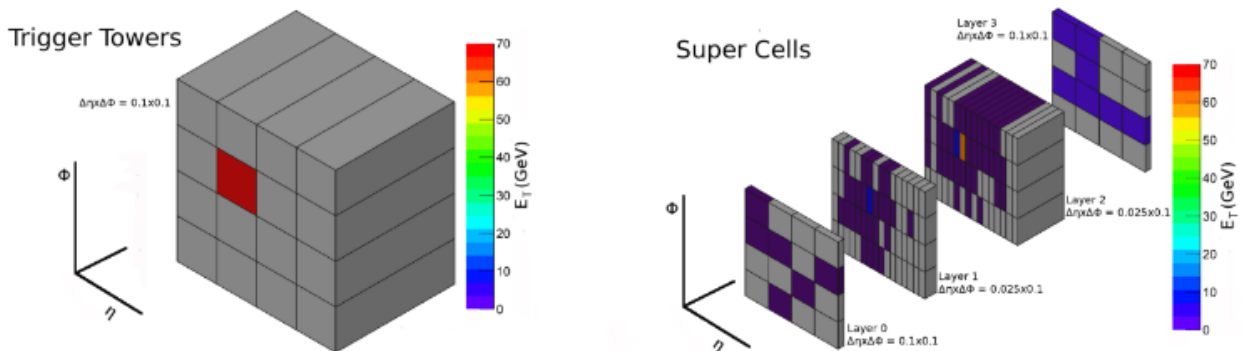
**Рис. 4:** Частота спрацьовування тригера для об'єктів в EM<sub>xx</sub>, EM<sub>xx</sub>H, EM<sub>x</sub>VH, EM<sub>xx</sub>VHI, де xx = 18, 20, 22, 24, 26, 28 GeV. Її обчислюють як кількість подій з енергією рівною або вищою, ніж порогова.

Об'єкти EM22 мають найвищу ефективність, але частота спрацьовування тригера для них найвища. Об'єкти EM22VHI мають найнижчу ефективність, але частота спрацьовування тригера для них теж найнижча. EM22VHI був основним тригером для одиничних EM об'єктів. Об'єкти EM22H мають більш високу ефективність, ніж EM22VH, при енергіях до 30 GeV ця різниця є значною, але на більш високих енергіях їх ефективності практично однакові. При цьому частота спрацьовування тригера для EM22VH суттєво більша, для енергій менших, ніж 24 GeV. Тому для енергій в діапазоні 0-24 GeV більш оптимальною є ізоляція H, а для більш високих енергій - VH.

## 8 Ідентифікація електромагнітних об'єктів на L1 тригері в Run 3

Поточна тригерна система (Рис. 5) на рівні L1 використовує тригерні блоки з  $0.1 \times 0.1$  в координатах псевдошвидкісність  $\times$  полярний кут. Обновлення електроніки калориметра, що відбуватиметься протягом LS2, передбачає збільшення гранулярності від 5 до 10 через розділення в глибину (Layer 0-3) та збільшення фрагментації в 4 рази в Layer 1 та Layer 2. В результаті отримаємо структури під назвою super cells. Нові дискримінантні змінні можуть вдосконалити, щоб відрізнити цікаві об'єкти, наприклад, електрони та фотони, від струменів на рівні тригера L1.

Для реконструкції L1 ЕМ кластера у Run 3 використовується вікно  $3 \times 3$ , у якому знаходиться локальний максимум у Layer 2 електромагнітного калориметра. Кластеризація знаходить найбільш енергетичну ділянку  $\phi$  кластер  $3 \times 2$  в Layer 1 та 2,  $3 \times 1$  в Layer 0 та 3.

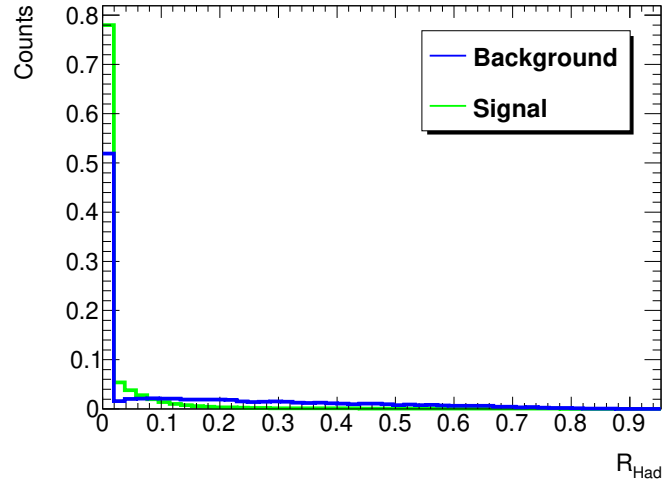


**Рис. 5:** Електромагнітна злива, симульована для електрона із енергією 70 GeV для існуючого тригера (ліворуч) та оновленого (праворуч) [21].

Для ефективного відмежування електронів та фотонів від фону на роботу тригер спрацьовує лише для об'єктів, які відповідають певним вимогам. Для цього вводять наступні змінні:

Частина енергії в електромагнітному калориметрі поділена на загальну енергію об'єкта (Рис. 6):

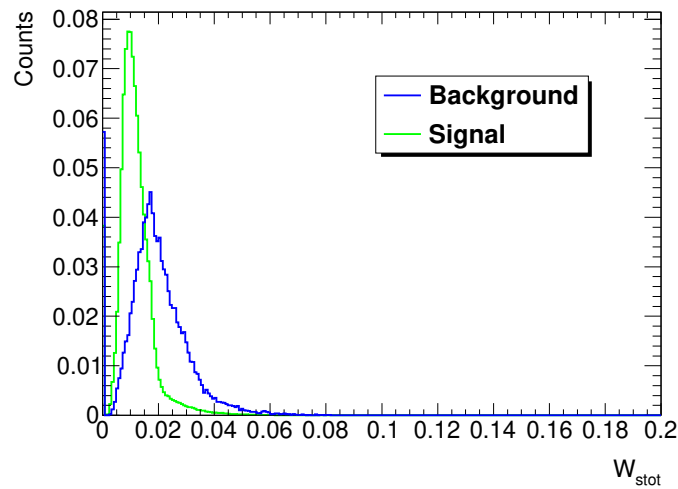
$$R_{Had} = \frac{E_T^{Had}}{E_T}$$



**Рис. 6:** Розподіл змінної  $R_{Had}$ .

Частка енергії кластера поза максимальним депозитом,  $\Delta\eta$  віднормована (Рис. 7), визначена на першому шарі електромагнітного калориметра:

$$w_{stot} = \left( \sqrt{\frac{\sum E_{T,i} (\eta_i - \eta_{max})^2}{\sum E_{T,i}}} \right)_{L1\ 5 \times 3}$$



**Рис. 7:** Розподіл змінної  $w_{stot}$ .



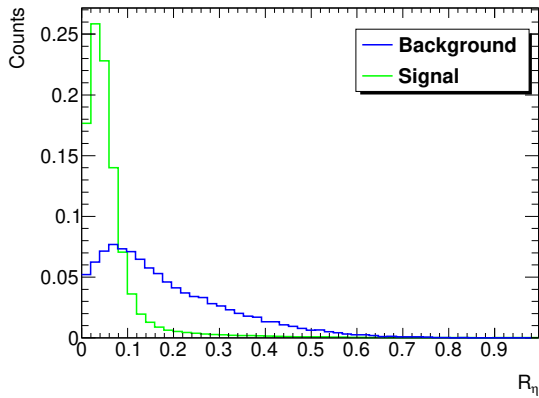
розподіл енергії в  $\eta$  (Рис. 8а):

$$R_\eta = 1 - \frac{E_T^{3 \times 2, Layer2}}{E_T^{7 \times 3, Layer2}}$$

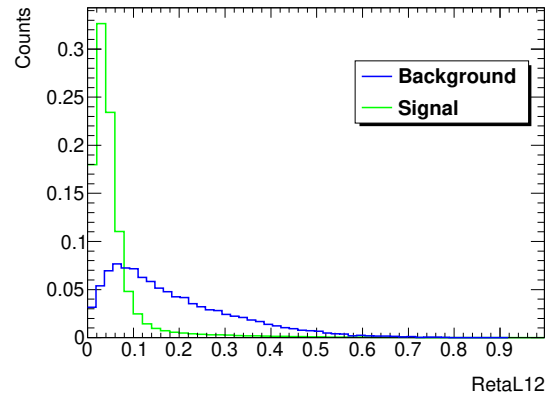
Визначена на другому рівні електромагнітного калориметра. Визначає відношення енергії у кластері розміром  $3 \times 7$  до енергії в кластері  $7 \times 7$  в координатах  $\eta \times \phi$  на другому рівні електромагнітного калориметра.

$R_\eta^{1+2}$  - альтернативна змінна до  $R_\eta$ . Вирішується, яка зі змінних буде використана для прошивки.  $R_\eta^{1+2}$  - сума Layer1 + Layer2 (Рис. 8б), аналогічно  $R_\eta$  тільки на Layer1 та Layer2 електромагнітного калориметра:

$$R_\eta^{1+2} = 1 - \frac{E_T^{3 \times 2, Layer1+Layer2}}{E_T^{7 \times 3, Layer1+Layer2}}$$



(а) Розподіл змінної  $R_\eta$ .



(б) Розподіл змінної  $R_\eta^{1+2}$ .

**Рис. 8:** Розподіл змінних  $R_\eta$  та  $R_\eta^{1+2}$

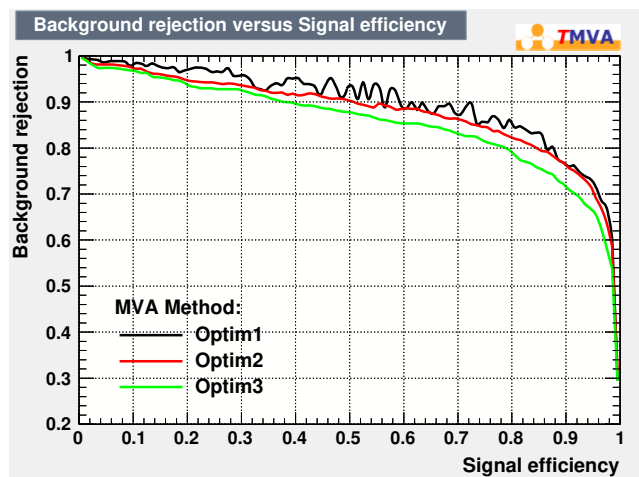
Тобто, якщо значення цих змінних для об'єкта є вищими за визначені, тригер не спрацює. Для фону ці змінні мають більш широкий розподіл, ніж для сигналу.

## 9 Оптимізація ефективності для Run 3

Для знаходження оптимальних значень змінних  $w_{stot}$ ,  $R_{Had}$ ,  $R_\eta$  використовувався код, написаний на ROOT із застосуванням бібліотеки машинного навчання TMVA(The Toolkit for Multivariate Data Analysis) [22]. Алгоритм, що використовувався для оптимізації - Rectangular cut (Прямокутний кат) із метом фітування MC (Monte Carlo). Для тренувального датасету було використано 30000 зразків із сигналу та 20000 для фону. Для тестувального датасету було використано по 10000 зразків для фону та для сигналу. Для порівняння було взято комбінації з декількох змінних та три основні змінні. Всього було наявно 850000 зразків фону та 250000 сигналу. Кожному набору із змінних було поставлено у відповідність світ кат.

Для змінних  $w_{stot}$ ,  $R_{Had}$ ,  $R_\eta$  - Optim1,  $R_\eta$  і  $R_{Had}$  - Optim2,  $R_\eta$  - Optim3.

Графік (Рис. 9) показує, яку частину фону потрібно відрізати, щоб досягти бажаної ефективності сигналу.



**Рис. 9:** Криві оптимізації катів для змінних ізоляції. На графіку показано, яку частину фону потрібно відрізати для того, щоб отримати бажану ефективність сигналу. Optim1 відповідає кату на змінні  $w_{stot}$ ,  $R_{Had}$ ,  $R_\eta$ , Optim2 -  $R_\eta$ ,  $R_{Had}$ , Optim3 -  $R_\eta$ .

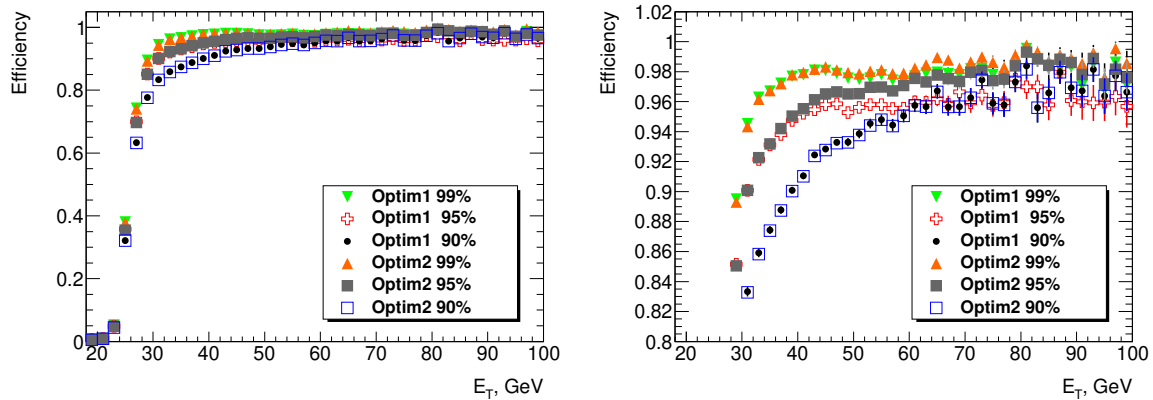
Найбільш ефективним виявився кат Optim1, оскільки він відрізає більшу частину фону. Для подальшої роботи використовували значення ката,

для яких ефективність сигналу 90%, 95%, 99% та кати Optim1, Optim2. Кат Optim3 не використовували, оскільки його ефективність виявилась низькою. тобто він відрізає меншу частину фону, ніж інші кати. В Табл. 3 представлені значення змінних для оптимізованих катів, округлені з точністю до сотих.

**Табл. 3:** Значення змінних катів Optim1, Optim2, Optim3, округлені з точністю до сотих та процент ефективності реєстрації сигналу для даного ката у порівнянні з процентом відрізання фону

Signal efficiency	Background rejection			Optim1			Optim2		Optim3
	Optim1	Optim2	Optim3	$R_{Had}$	$w_{stot}$	$R_\eta$	$R_{Had}$	$R_\eta$	$R_\eta$
90%	76%	76%	71%	0.13	0.7	0.08	0.13	0.08	0.08
95%	75%	70%	65%	0.16	0.02	0.12	0.2	0.1	0.09
99%	57%	56%	49%	0.23	0.03	0.16	0.22	0.15	0.14

На Рис.10 показано ефективність катів як функцію  $E_T$ , в Табл. 4 та на Рис. 11 показано частоту спрацьовування тригера для катів.



(а) Весь діапазон ефективності. (б) Діапазон ефективності від 0.8 до 1.

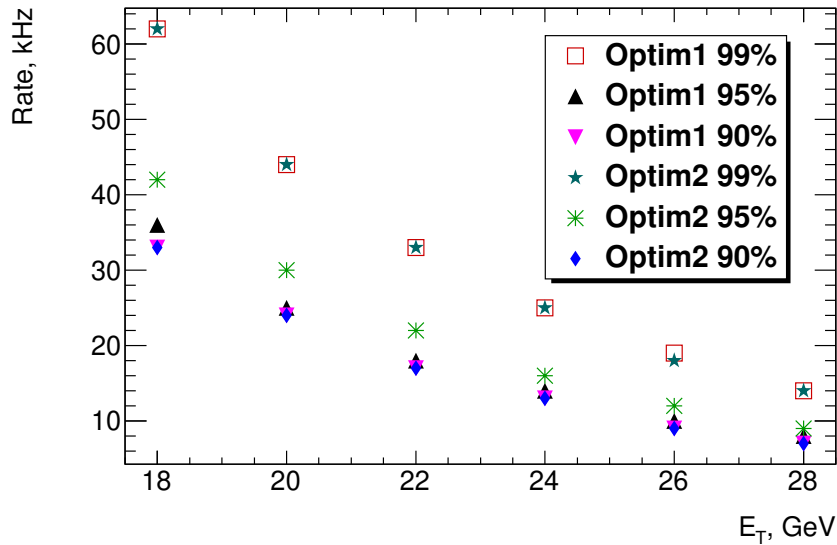
**Рис. 10:** Ефективність реєстрації електронів із пороговою енергією  $> 22$  GeV. Для селекції об'єктів було використано кати Optim1, Optim2.

Для катів Optim1 99%, Optim2 99% ефективність є максимальною, але при цьому частота спрацьовування тригера є також максимальною (Табл. 4, Рис. 11). Для катів Optim1 90%, Optim2 90% ефективність є мінімальною, а частота спрацьовування тригера максимальною. Тому вибір цих чотирьох катів не є оптимальним. Для катів Optim1 95%, Optim2 95% ефективність

**Табл. 4:** Частота спрацьовування тригера для катів Optim1, Optim2

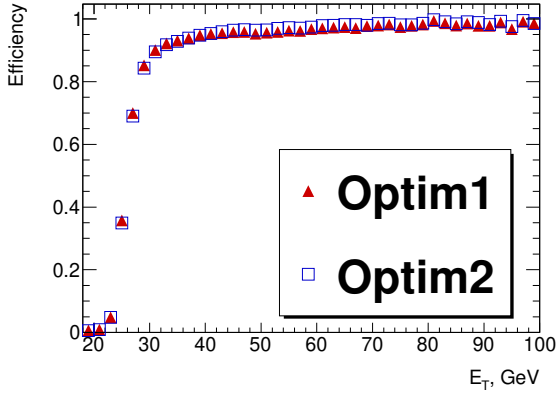
Energy, GeV	Optim1 Rate, kHz			Optim2 Rate, kHz		
	90%	95%	99%	90%	95%	99%
18	33	36	62	33	42	62
20	24	25	44	24	30	44
22	17	18	33	17	22	33
24	13	14	24	13	16	25
26	9	10	19	9	12	18
28	7	8	14	7	9	14

приблизно однакова при енергіях до 40 GeV, при більших енергіях ефективність для кату Optim2 95% збільшується від десятих частин відсотка до декількох відсотків у порівнянні з ефективністю кату Optim1 95%. Але при цьому частота спрацьовування тригера для кату Optim1 95% є меншою. Тому для енергій менших за 40 GeV більш оптимальним буде кат Optim1 95%, для більш високих енергій в залежності від відсотка фону, який потрібно відрізати, можна використовувати кати Optim1 95% та Optim2 95%. Але для  $E_T > 50$  GeV ніякі обмеження не накладаються в Run 2. У Run 3 ніякі обмеження не накладаються на об'єкти із  $E_T > 60$  GeV.

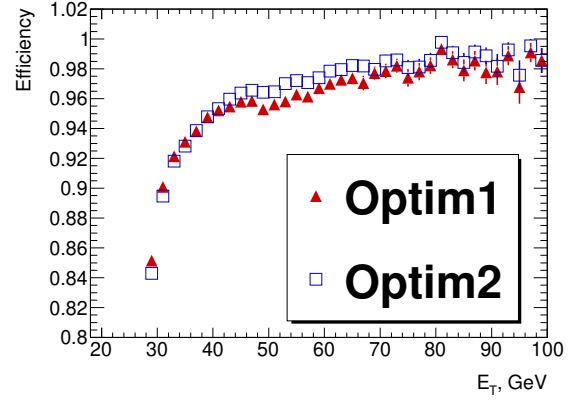


**Рис. 11:** Частота спрацьовування тригера для катів Optim1 , Optim2.

Частота спрацьовування тригера для об'єктів при  $E_T > 60$  кГц для кату Optim1 95% - 1 кГц, , для кату Optim2 95% - 1 кГц. На Рис. 12 показано ефективність реєстрації електронів із  $E_T > 22$  GeV для із катами Optim1 95%, Optim2 95%.



(а) Весь діапазон ефективності.



(б) Діапазон ефективності від 0.8 до 1.

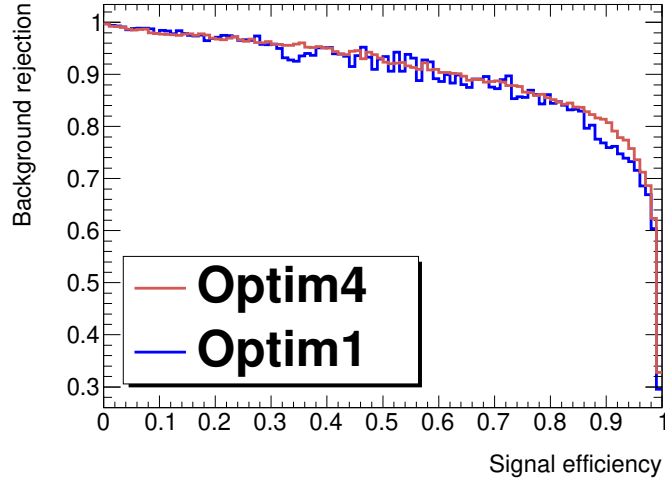
**Рис. 12:** Крива ефективності для об'єктів з пороговою енергією  $E_T > 22$  GeV. На об'єкти накладали кати Optim1 95%, Optim2 95%, але при цьому на об'єкти, для яких  $E_T > 60$  GeV, не накладено жодних обмежень.

## 10 Оптимізація зі змінною $R_\eta^{1+2}$

У цьому розділі розглянуто альтернативну оптимізацію зі змінною  $R_\eta^{1+2}$  замість  $R_\eta$ .

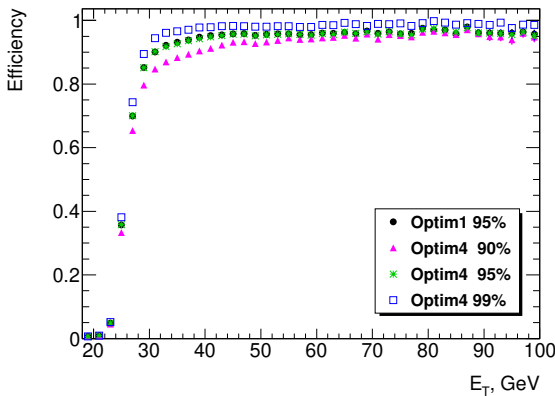
Алгоритм, що використовувався для оптимізації - Rectangular cut (Прямокутний кат) із метом фітування GA (Genetic Algorithm), оскільки він показує кращі результати, ніж MC [22]. Для тренувального датасету було використано 30000 зразків із сигналу та 20000 для фону. Для тестувального датасету було використано по 10000 зразків для фону та для сигналу.

На Рис. 13 зображено криві оптимізації катів для змінних ізоляції. Optim1 відповідає кату на змінні  $w_{stot}$ ,  $R_{Had}$ ,  $R_\eta$ , Optim4 -  $R_\eta^{1+2}$ ,  $w_{stot}$ ,  $R_{Had}$ . Очікується, що кат Optim4 буде більш ефективним, оскільки він відрізає більшу частину фону, ніж кат Optim1.

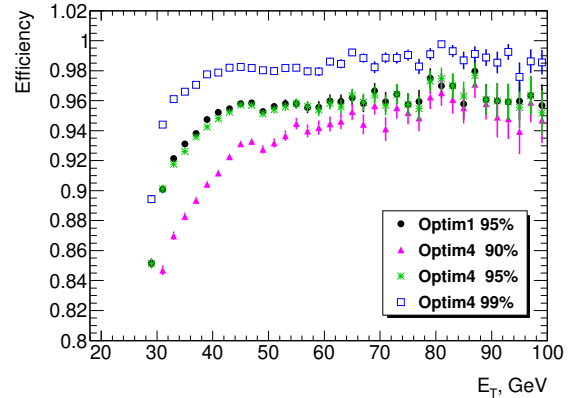


**Рис. 13:** Криві оптимізації катів для змінних ізоляції. На графіку показано, яку частину фону потрібно відрізати для того, щоб отримати бажану ефективність сигналу. Optim1 відповідає кату на змінні  $w_{stot}$ ,  $R_{Had}$ ,  $R_{\eta}$ , Optim4 -  $R_{\eta}^{1+2}$ ,  $w_{stot}$ ,  $R_{Had}$ .

Найбільш ефективним виявився кат Optim4 99% (Рис. 14). Ефективність кату Optim1 95% вища, ніж ефективність кату Optim4 95% на десяти долі відсотка для енергій менше 40 ГеВ та співпадає з ефективністю кату Optim4 95% для енергій більше 40 ГеВ. Ефективність ката Optim4 90% найменша з усіх наявних катів.



(а) Весь діапазон ефективності.

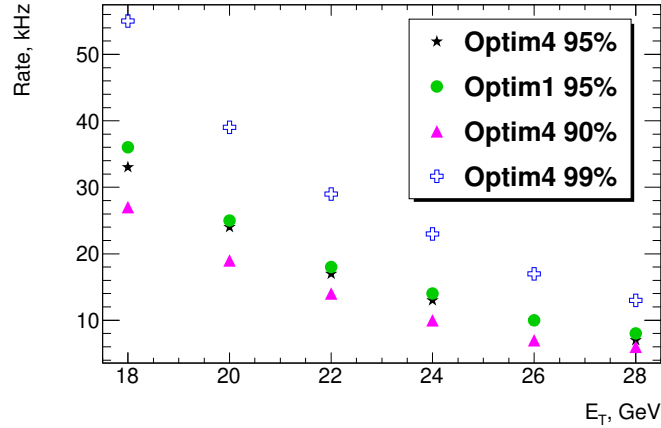


(б) Діапазон ефективності від 0.8 до 1.

**Рис. 14:** Ефективність реєстрації електронів із пороговою енергією  $> 22$  ГеВ. Для селекції об'єктів було використано кати Optim1, Optim4.

Але обчислення частоти спрацьовування (Рис. 15, Табл. 5) тригера показують, що кат Optim4 99% має найбільшу частоту спрацьовування тригера.

ра при максимальній ефективності, а кат Optim4 90% має найменшу частоту спрацьовування тригера при мінімальній ефективності. Кат Optim4 95% має нижчу частоту спрацьовування тригера, ніж Optim1 95% при приблизно однаковій ефективності. Отже, кат Optim4 95% є найбільш оптимальним.



**Рис. 15:** Частота спрацьовування тригера для катів Optim1, Optim4.

**Табл. 5:** Частота спрацьовування тригера для катів Optim1, Optim4.

Energy, GeV	Optim4 Rate, kHz			Optim1 Rate, kHz
	90%	95%	99%	95%
18	27	33	55	36
20	19	24	39	25
22	14	17	29	18
24	10	13	23	14
26	7	10	17	10
28	6	7	13	8

Для кату Optim4 95% порогові змінних:  $R_{Had} \leq 0.22$ ,  $w_{stot} \leq 0.02$ ,  $R_{\eta}^{1+2} \leq 0.09$ .

## 11 Висновки

У даній роботі було розглянуто ідентифікацію електромагнітних об'єктів на рівні L1 тригера електромагнітного калориметра експеримента ATLAS на основі просимульованих даних, що відносяться до Run 2 та Run 3. Для Run 2 було розглянуто об'єкти EMxx, EMxxH, EMxxVH, EMxxVHI - електромагнітні об'єкти без ізоляції, з адронною ізоляцією, з  $\eta$ -залежним порогом і адронною або адронною та електромагнітною ізоляціями, було характеризовано тригер EM22VHI, широко використовуваний у Run 2. Для Run 3 було знайдено за допомогою бібліотеки TMVA два кати Optim1 та Optim2 на трьох ефективностях реєстрації сигналу 90%, 95%, 99%. Було визначено, що найбільш оптимальним є кат Optim1 95%. Також додатково було розглянуто оптимізацію Optim4 зі змінною  $R_\eta^{1+2}$  замість  $R_\eta$  на трьох ефективностях реєстрації сигналу 90%, 95%, 99% та порівняно цю оптимізацію із катом Optim1 95%. Було визначено, що кат Optim4 95% більш оптимальним, ніж кати Optim4 90%, Optim4 99% та Optim1 95%.



## 12 Література

- [1] M. Tanabashi et al. “Review of Particle Physics”. In: *Phys. Rev. D* 98.3 (2018), p. 030001.
- [2] Serguei Chatrchyan et al. “Observation of a New Boson at a Mass of 125 GeV with the CMS Experiment at the LHC”. In: *Phys. Lett.* B716 (2012), pp. 30–61.
- [3] Georges Aad et al. “Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC”. In: *Phys. Lett.* B716 (2012).
- [4] Tetiana Berger-Hrynova. “Development of the trigger menu and search for new phenomena in the dilepton final state with the ATLAS detector at the LHC”. In: (June 2016).
- [5] G. Aad et al. “The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider”. In: *JINST* 3 (2008), S08003.
- [6] Georges Aad et al. “Search for high-mass dilepton resonances using 139 fb<sup>-1</sup> of *pp* collision data collected at  $\sqrt{s}=13$  TeV with the ATLAS detector”. In: *Phys. Lett.* B796 (2019).
- [7] Georges Aad et al. “Performance of electron and photon triggers in ATLAS during LHC Run 2”. In: *Eur. Phys. J.* C80.1 (2020).
- [8] Paolo Nason. “A New method for combining NLO QCD with shower Monte Carlo algorithms”. In: *JHEP* 11 (2004), p. 040.
- [9] Stefano Frixione, Paolo Nason, and Carlo Oleari. “Matching NLO QCD computations with Parton Shower simulations: the POWHEG method”. In: *JHEP* 11 (2007), p. 070.
- [10] Simone Alioli et al. “A general framework for implementing NLO calculations in shower Monte Carlo programs: the POWHEG BOX”. In: *JHEP* 06 (2010), p. 043.
- [11] Simone Alioli et al. “NLO vector-boson production matched with shower in POWHEG”. In: *JHEP* 07 (2008).
- [12] Torbjorn Sjostrand, Stephen Mrenna, and Peter Z. Skands. “A Brief Introduction to PYTHIA 8.1”. In: *Comput. Phys. Commun.* 178 (2008).
- [13] Hung-Liang Lai et al. “New parton distributions for collider physics”. In: *Phys. Rev.* D82 (2010).
- [14] J. Pumplin et al. “New generation of parton distributions with uncertainties from global QCD analysis”. In: *JHEP* 07 (2002).
- [15] Piotr Golonka and Zbigniew Was. “PHOTOS Monte Carlo: A Precision tool for QED corrections in *Z* and *W* decays”. In: *Eur. Phys. J.* C45 (2006).

- [16] N. Davidson, T. Przedzinski, and Z. Was. “PHOTOS interface in C++: Technical and Physics Documentation”. In: *Comput. Phys. Commun.* 199 (2016).
- [17] D.J. Lange. “The EvtGen particle decay simulation package”. In: *Nucl. Instrum. Meth. A* 462 (2001), pp. 152–155.
- [18] Andrew Buckley. “ATLAS Pythia 8 tunes to 7 TeV data”. In: *6th International Workshop on Multiple Partonic Interactions at the LHC*. Dec. 2014, p. 29.
- [19] Georges Aad et al. “Electron and photon performance measurements with the ATLAS detector using the 2015–2017 LHC proton-proton collision data”. In: *JINST* 14.12 (2019), P12006.
- [20] *Trigger menu in 2018*. Tech. rep. ATL-DAQ-PUB-2019-001. Geneva: CERN, Oct. 2019.
- [21] B. Dinkespiler. “Trigger readout electronics upgrade for the ATLAS Liquid Argon Calorimeters”. In: *JINST* 12.09 (2017), p. C09011.
- [22] A. Hoecker et al. *TMVA - Toolkit for Multivariate Data Analysis*. 2007. arXiv: physics/0703039 [physics.data-an].