

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

ЛНС.

- РҮТНІА 8

Галузь знань: 10  
Спеціальність: 104  
Освітня програма:

**Кваліфікаційна робота бакалавра**  
4

**Науковий керівник:**  
.....

**Куратор від кафедри:**  
.....

16.06 2021 .

, 20



6 2021

**ВИТЯГ**

\_\_\_\_\_

,

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_.

\_\_\_\_\_

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ .

## **Анотація**

**Якименко А. В.** «Народження резонансів в дифракційній дисоціації протонів на ЛНС. Монте - Карло симуляції в RUTHIA 8»

Кваліфікаційна робота бакалавра за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія» спеціалізація «Фізика високих енергій». – Київський національний університет імені Тараса Шевченка, фізичний факультет, кафедра ядерної фізики. – Київ, 2021.

**Науковий керівник:** докт. фіз.-мат. наук Л. Л. Єнковський

**Куратор від кафедри:** канд. фіз.-мат. наук Ю. М. Оніщук

## **Abstract**

**Yakymenko A. V.** "Resonance generation in the diffraction dissociation of protons at the LHC. Monte Carlo simulation in PYTHIA 8"

Bachelor qualification work in speciality 104 – «Physics and astronomy», educational program «High energy physics» – Taras Shevchenko National University of Kyiv, Faculty of Physics, Department of Nuclear Physics. – Kyiv, 2021.

**Research supervisor:** Ph.D of Physics and Mathematics Jenkovszky L., Bogolyubov Institute for Theoretical Physics.

**Department research supervisor:** PhD of Physics and Mathematics, Onishchuk Y.

## Зміст

Вступ.....	4
1 Дифракція і Померон .....	4
1.1 Класифікація .....	5
2 Поперечний переріз процесів на енергіях LHC .....	9
2.1 Моделювання.....	9
3 Залежність перерізу відносно енергії.....	12
Висновки .....	14

## Вступ

Пружне та дифракційне розсіювання представляє значну частку (44% при  $\sqrt{s} = 14$  TeV [4]) загальної  $pp$  і  $p\bar{p}$  перерізів. Багато деталей цих процесів тісно пов'язані з протонною структурою і низькоенергетична КХД досі не зрозуміла. Обмін кольоровими синглетами між взаємодіючими протонами призводить до прогалин в теоретичному описі процесів.

М'які процеси, що домінують у адронних перерізах розсіювання, не можуть бути описані аналітично настільки повно, як жорсткі. Саме тому моделювання процесів у фізиці високих енергій може допомогти у розумінні явищ.

Програма RUTHIA - це стандартний інструмент для генерування подій у зіткненнях з високими енергіями, що включає узгоджену сукупність фізичних моделей для еволюції до складного багаточастинкового кінцевого стану. Він містить бібліотеку жорстких процесів, методів узгодження та злиття між жорсткими процесами та партоніві душі, багатопартонні взаємодії, залишки пучка, фрагментація струн та розпад частинок тощо. Він також має набір утиліт і кілька інтерфейсів до зовнішніх програм.

Дифракція недостатньо зрозуміла, і метод застосовується для опису дифракційних процесів в RUTHIA - лише один із декількох запропонованих, але використовуючи різні конфігурації для симуляцій можна отримати результат, що може бути застосований в наукових цілях.

## 1 Дифракція і Померон

Адронні процеси можна класифікувати як м'які, так і жорсткі. М'які процеси, що домінують у адронних перерізах розсіювання, характеризуються енергетичною шкалою порядку розмір адрону ( $1 \text{ фм} \approx 200 \text{ MeV}$ ). Жорсткі процеси дуже добре описуються пертурбативною КХД (pQCD) розсіювання. Однак pQCD недостатньо для опису м'яких процесів, бо на великих масштабах константа зв'язку ( $\alpha_s$ ) стає достатньо великою, щоб знехтувати зробити умовами вищого порядку.

I. Померанчук передбачив, що якщо загальний переріз поводить ся як  $\ln s$ , тоді перерізи частинок та античастинок стають асимптотично рівними. Обмін траєкторією Редже, що забезпечує таку поведінку, вперше був введений Грибовим.

Частинки на цій траєкторії є віртуальними і мають ті самі внутрішні квантові числа, що і вакуум. Ефективне підсумовування частинок на цій траєкторії відоме як померон (P). У КХД померон розглядається як безбарвний і без аромату глюбол (гіпотетична складна частинка).

## 1.1 Класифікація

При протон-протонному (pp) (або загальніше адрон-адронному) розсіянні взаємодії класифікуються за характеристиками кінцевих станів. Взаємодії можуть бути як еластичними, так і нееластичними. В еластичному розсіювання ( $p_1 + p_2 \rightarrow p'_1 + p'_2$ ), обидва протони виходять цілими, і ніяких інших частинок не утворюється (рис. 1). Поперечний переріз на LHC (на  $\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$ ) для еластичного розсіювання становить  $\sim 30 \text{ мб}$  [4].

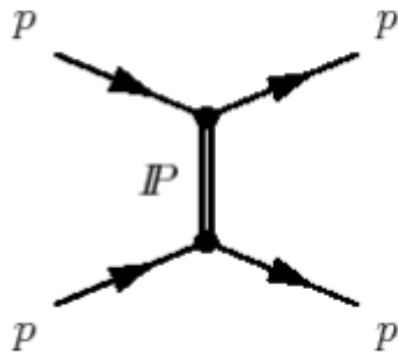


Рис. 1.

Адрони, що стикаються - кольорові синглети. Наближаючись один до одного, вони можуть обмінюватися кольоровим октет-глюон, роблячи кожне адронне скупчення кольоровим октетом. Коли вони розходяться, їм потрібні кольорові лінії, що їх з'єднують. Щоб мати можливість розділитися на дві окремі системи, їм потрібно обмінятися іншим глюоном і стати безбарвними.

Однак кінцевий стан не обов'язково повинен бути ідентичним початковому. Такі процеси називаються нееластичними. Коли кольорові октети розходяться, кольорові лінії бувають розтягуються між ними. З часом ця система ускладнюється, і відбувається багаточастинкове виробництво.

Пружне розсіювання може бути досягнуто за допомогою обміну глюобольного померона. При пружному розсіянні кінцевий стан та частинки початкового стану ідентичні. Обмін глюонами може збуджувати адрон. Це може призвести до того, що вихідний стан збереже внутрішні квантові числа частинок, що надходять, але з більшою масою. Це відоме як квазіпружне розсіювання.



Нееластичні зіткнення можуть бути дифракційними. Існує кілька можливих описів дифракції, що обмежують декілька альтернативних підходів. Розглянутий тут підхід описаний Редже теорією з точки зору обміну помероном.

Один із альтернативних підходів, який робить це, не використовуючи поняття померона або Редже, називається м'якою кольоровою взаємодією модель. Цей підхід описано Інгельманом.

Дифракційною реакцією є реакція, при якій між частинками, що стикаються, не відбувається обмін квантовими числами. Дифракція відбувається, коли обмінений померон взаємодіє з протоном для одержання системи частинок, яку називають дифракційною системою.

При дифракційному розсіянні передача енергії між двома взаємодіючими протонами залишається невеликою, але один або обидва протони дисоціюють у багаточастинкові кінцеві стани з внутрішніми квантовими числами протонів, що зіткнулися.

Якщо лише один з протонів дисоціює (рис. 2), то взаємодія є одnodифракційною (SD) ( $p_1 + p_2 \rightarrow p'_1 + X_2$  або  $p_1 + p_2 \rightarrow X_1 + p'_2$ ). Поперечний переріз LHC (на  $\sqrt{s} = 14$  TeV) для SD становить  $\sim 10$  мб [4].

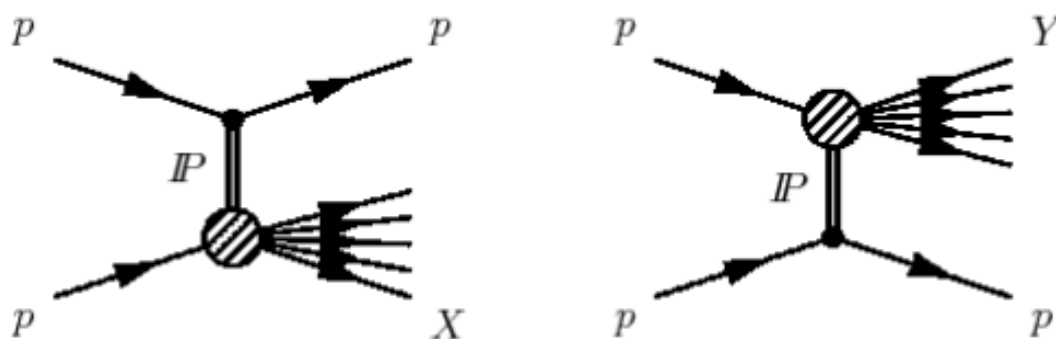


Рис. 2.

Якщо обидва протони дисоціюють (рис. 3), то це подвійний дифракційний процес (DD) ( $p_1 + p_2 \rightarrow X_1 + X_2$ ). Поперечний переріз LHC (при  $\sqrt{s} = 14$  TeV) для DD становить  $\sim 7$  мб [4].

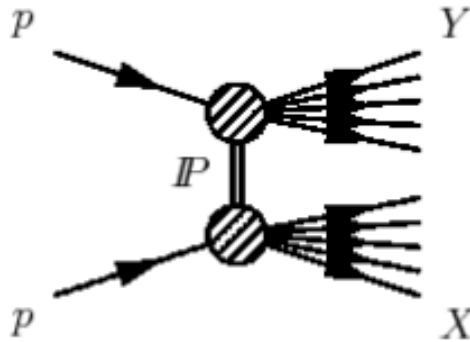


Рис. 3.

Інша топологія стає можливою за допомогою двох обмінюваних померонів, а саме центральної дифракції (CD) ( $p_1 + p_2 \rightarrow p'_1 + X + p'_2$ ). У цьому процесі обидва протони цілі і їх видно в кінцевому стані (рис. 4). LHC поперечний переріз для CD становить  $\sim 1$  мб [4].

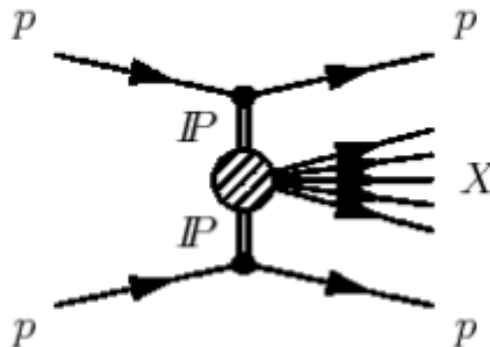


Рис. 4.

При недифракційних (ND) взаємодіях відбувається обмін кольоровим зарядом і згодом виробляється більше адронів. Взаємодії ND є домінуючим процесом в  $pp$  взаємодіях і, як очікується, становитиме 60% усіх взаємодій у LHC з поперечним перерізом  $\sim 65$  мб (при  $\sqrt{s} = 14$  TeV) [4].

Наслідком гіпотези померона є те, що перерізи  $pp$  і  $p\bar{p}$  дифракційних розсіювань мають бути рівним при досить високих енергіях. Це тому, що у померона квантові числа вакууму, тому його зв'язки з протоном і антипротоном рівні. Загальний поперечний переріз  $pp$  задано рівнянням

$$\sigma_{tot} = \sigma_{el} + \sigma_{inel} = \sigma_{el} + \sigma_{diff} + \sigma_{ND} = \sigma_{el} + \sigma_{SD} + \sigma_{DD} + \sigma_{misc} + \sigma_{ND},$$

де "misc" це сума CD і обмін багатьма померонами. Поперечний переріз багаторазового обміну помероном становить  $\ll 1$  мб [4].

## 2 Поперечний переріз процесів на енергіях LHC

Згідно [4], поперечний переріз для різних дифракційних процесів на LHC (при  $\sqrt{s} = 14$  TeV) становить (табл. 1):

elastic	SD	DD	CD
$\sim 30$	$\sim 10$	$\sim 7$	$\sim 1$

Таблиця 1. Поперечний переріз, в мб

### 2.1 Моделювання

Для моделювання процесів у програмному забезпеченні PYTHIA 8 необхідно створити головний файл с програмою на мові с++ (рис 5.).

```
1 #include "Pythia8/Pythia.h"
2 using namespace Pythia8;
3
4 int main(int argc, char* argv[]) {
5     Pythia pythia;
6     pythia.readFile(argv[1]);
7     pythia.init();
8
9     for (int iEvent = 0; iEvent < 10000; ++iEvent) {
10         pythia.next();
11     }
12
13     pythia.stat();
14     return 0;
15 }
16
```

Рис. 5. Приклад простої програми для симуляцій в PYTHIA

Параметри симуляції винесені в окремий конфігураційний файл (рис. 6).

```
1 Beams:idA = 2212      !proton beam
2 Beams:idB = -2212    !antiproton beam
3 Beams:eCM = 14000    !14 TeV
4 SoftQCD:all = on
```

Рис.6. Приклад конфігураційного файлу

Згенеровані події та результати виводяться в окремий текстовий файл, для перевірки правильності використання PYTHIA, проведемо симуляцію дифракційних процесів (рис. 7). SD процес при цьому окремо генерується для

обох протонів та потім сумується (навіть для  $p\bar{p}$  процесів не є важливим, яка з частинок дисоціює, оскільки на великих енергіях  $pp$  і  $p\bar{p}$  асимптотичні рівні).

```

*----- PYTHIA Event and Cross Section Statistics -----*
| Subprocess                               | Code |      Number of events      |      sigma +- delta      |
|                                           |      |      Tried  Selected  Accepted  |      (estimated) (mb)   | |
|---|---|---|---|---|
| non-diffractive                         | 101  |      5620    5620    5620    |      5.717e+01  0.000e+00 |
| A B -> A B elastic                       | 102  |      2253    2253    2253    |      2.258e+01  0.000e+00 |
| A B -> X B single diffractive            | 103  |       632     632     632    |      6.442e+00  4.241e-08 |
| A B -> A X single diffractive            | 104  |       656     656     656    |      6.442e+00  4.240e-08 |
| A B -> X X double diffractive            | 105  |       839     839     839    |      8.881e+00  0.000e+00 |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| sum                                       |      |     10000    10000    10000    |      1.015e+02  5.997e-08 |
|-----|-----|-----|-----|-----|
*----- End PYTHIA Event and Cross Section Statistics -----*

```

Рис. 7. Приклад виводу статистики

За стандартних налаштувань відповідні значення перерізів (табл. 2):

elastic	SD	DD	CD
22.58	12.88	8.88	-

Таблиця 2. Отриманий поперечний переріз, в мб

Згідно [5] стандартні параметри не є оптимальними для даних процесів, тому необхідно використати MBR модель. Для цього треба змінити конфігураційний файл, наприклад додавши параметри (рис. 8).

```

5 SigmaTotal:mode = 2
6 SigmaDiffractive:mode = 2

```

Рис. 8. Параметри для MBR моделі

При цьому результати зміняться на більш подібні до реальних, що підтверджує правильність зміни моделі симуляції (табл. 3). Для більш правильної симуляції необхідно вказувати точні значення для конкретних параметрів, що забезпечує вибрана модель, але це потребує значно глибшого розуміння процесів. Інші варіанти параметрів призводили до погіршення результатів.

elastic	SD	DD	CD
32.10	11.26	9.47	0.82

Таблиця 3. Отриманий поперечний переріз, в мб

### 3 Залежність перерізу відносно енергії

Отримана залежність для різних енергій (рис. 8) ілюструє теорему І. Померанчука [6], зі збільшенням енергії в системі центра мас, різниця між перерізами в процесах частинки з частинкою та частинки з античастинкою прямує до нуля. Зокрема, для  $pp$  і  $p\bar{p}$  різниця зникає при енергіях понад  $10^2$  Гев.

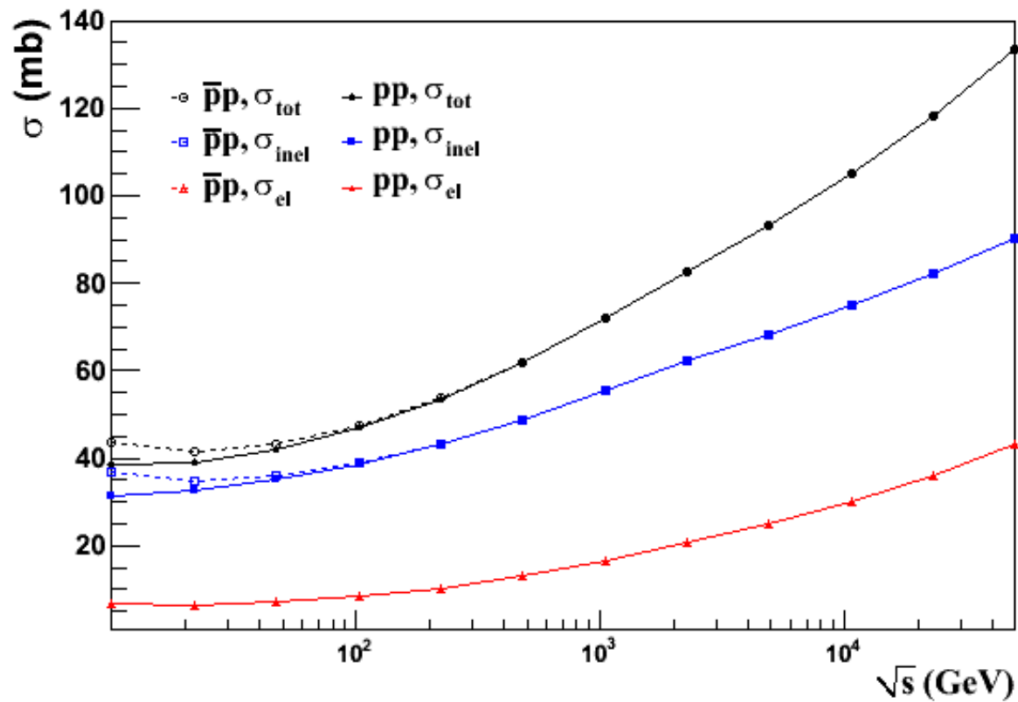


Рис. 8. Переріз, в мб: повний, для еластичних на нееластичних процесів відносно  $\sqrt{s}$ , в ГеВ для  $pp$  і  $p\bar{p}$

Для дифракційних процесів (рис. 9) перерізи збільшуються до енергій близько десятків ГеВ, після чого зростають значно повільніше та графік виходить на «плато». На енергіях більших порядку  $10^4$  ГеВ РУТНІА не може створити компетентну симуляцію, тому згідно [3], має сенс створювати симуляції з енергіями в діапазоні від 10 ГеВ до 100 ГеВ.

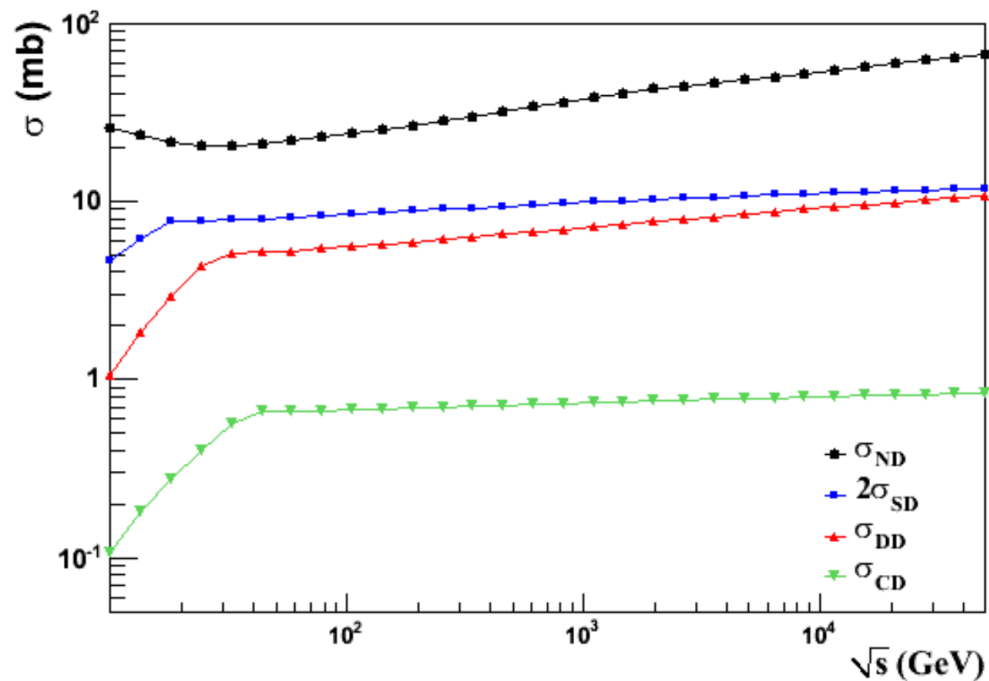


Рис. 9. Дифракційні (SD, DD, CD) та недифракційні (ND) перерізи, в мб відносно відносно  $\sqrt{s}$ , в GeV

## Висновки

Під час виконання роботи було досліджено теорію процесів під час дифракційної диссоціації протонів, зокрема їх класифікацію, відмінності для  $pp$  і  $p\bar{p}$  випадків (точніше їх відсутність на великих енергіях) та способи дослідження. Використовуючи програмний пакет RYTHIA було досліджено залежність поперечного перерізу процесів дифракції для різних енергій.

Для перевірки правильності було проведено наступні кроки:

- для кожної енергії і  $pp$  і  $p\bar{p}$  симуляцію;
- для кожної точки на графіку згенеровано від  $10^3$  до  $10^6$  подій;
- проведено симуляцію на різних моделях;



- вибрано найкращу модель на основі даних з публікацій [1 – 6];

## **Література**

- [1] S. Navin - Diffraction in PYTHIA, 2010 (arXiv:1005.3894 [hep-ph]).
- [2] L. Jenkovszky, O. Kuprash, J. Lamsa and R. Orava - Low-Mass Diffraction at the LHC, 2011 (arXiv:1106.3299 [hep-ph]).
- [3] An Introduction to PYTHIA 8.2, 2014 (arXiv:1410.3012 [hep-ph]).
- [4] M. Deile - Diffraction and Total Cross-Section at the Tevatron and the LHC, 2006 (arXiv:hep-ex/0602021).
- [5] R. Ciesielski, K. Goulianos – MBR Monte-Carlo Simulation in PYTHIA8, 2012 (arXiv:1205.1446 [hep-ph]).
- [6] N. N. Bogoliubov, A. A. Logunov, I. T. Todorov - Introduction to Axiomatic Quantum Field Theory, 1975.