

# Вимірювання перерізів. Розділення сигналу і фону

Олександр Зенаєв

## Переріз народження (визначення)

- Переріз народження, або переріз реакції (production cross section, or just cross section, x-section,  $\sigma$ ) – фізична величина, яка характеризує ймовірність утворення певного процесу або реакції у зіткненнях частинок
- Переріз народження визначає частоту подій певного типу (наприклад, народження нових частинок). Його можна уявити як ефективну площу, яку “бачать” частинки, що взаємодіють певним чином
- Переріз вимірюється в одиницях площі барн (barn, b):  $1b = 10^{-24}\text{cm}^2$ . У HEP зазвичай використовують  $1\text{mb} = 10^{-27}\text{cm}^2$ ,  $1\mu\text{b} = 10^{-30}\text{cm}^2 \dots 1\text{fb} = 10^{-39}\text{cm}^2$
- Переріз визначається за формулою:

$$\sigma = \frac{N}{L},$$

де  $N$  – кількість подій,  $L$  – світимість (luminosity, іноді позначають  $\mathcal{L}$ )

- $L$  характеризує кількість зіткнень частинок у точці взаємодії та визначається параметрами пучків частинок (інтенсивністю, частотою зіткнень тощо), вимірюється в  $\text{b}^{-1}$  (inversed barn) або  $\text{cm}^{-2}$
- Розрізняють миттєву світимість (instantaneous luminosity) за одиницю часу (наприклад, для LHC Run-3 це приблизно  $10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ), та інтегральну світимість (integrated luminosity) за певний час, яка визначає, скільки всього було накопичено даних в експерименті (наприклад, з початку 2024 р. і до вересня ATLAS і CMS накопичили близько  $100\text{fb}^{-1}$ )

- Для експериментального вимірювання перерізу використовується та сама формула:

$$\sigma = \frac{N}{L}$$

- Втім,  $N$  може містити не тільки сигнал, але і фон:

$$N_s = N - N_{bg}$$

Фон або віднімається за передбаченням, або визначається через template fitting

- Крім того, не всі події можуть бути зареєстровані

$$N_s = N_s^{rec} / \epsilon$$

Ефективність реєстрації  $\epsilon$  визначається з Монте-Карло (МК) симуляції

- Іноді розрізняють аксептанс ( $A$ ) як частину подій, яка геометрично потрапляє в детектор, і ефективність реєстрації ( $\epsilon$ ) подій детектором (сюди також можуть входити обмеження, що накладаються для зменшення фону)
- Більш повна формула для обрахунку перерізу:

$$\sigma = \frac{N - N_{Bg}}{\epsilon \cdot A \cdot L},$$

Задача: є  $N$  подій. Треба визначити частки сигналу ( $N_s$ ) і фону ( $N_{bg}$ ).

(1) відняти очікувану кількість фонових подій

- ▶ потребує знання перерізу фонових подій
- ▶ симулюють фонові події, використовуючи певну модель, далі симулюють взаємодію частинок з детектором, проводять реконструкцію подій, визначають  $N_{Bg}$  і потім  $N_s = N - N_{bg}$
- ▶ результат залежить від моделі (model dependence), яку використовували для симуляції фону (кінематичні розподіли)
- ▶ рідко використовується в чистому вигляді, оскільки фон у НЕР експериментах занадто складний і містить багато компонент

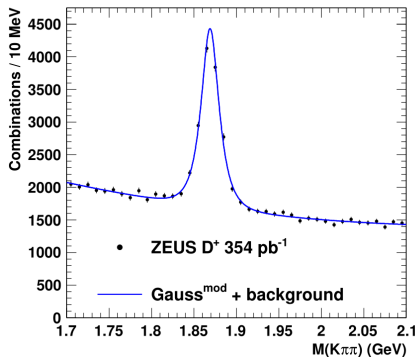
(2) шаблонна підгонка (template fitting)

- ▶ одним із варіантів є реконструкція і фітування розподілу інваріантної маси
- ▶ в цьому випадку  $N_s$  визначається як площа піку
- ▶ функція для опису комбінаторного фону зазвичай підбирається емпірично (data driven) і може варіюватися для оцінки систематичної похибки
- ▶ чим менший фон, тим менша буде статистична похибка  $\Delta N_s$

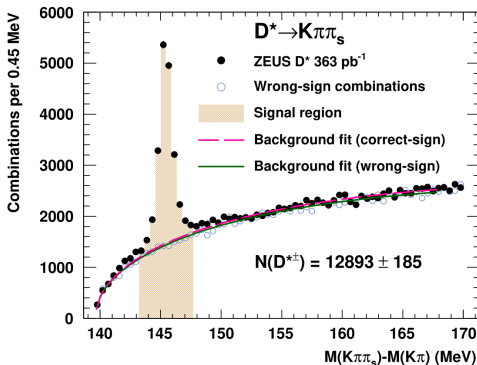
Method	Statistical uncertainty	Model dependence
Background subtraction	$\Delta N_s = \sqrt{N_s}$	+
Template fitting	$\Delta N_s \sim \sqrt{N_s + N_{Bg}}$	-

Н.В. Можуть бути інші специфічні методи, такі як віднімання фону через використання подій з неправильним електричним зарядом та ін.

## ZEUS



## ZEUS



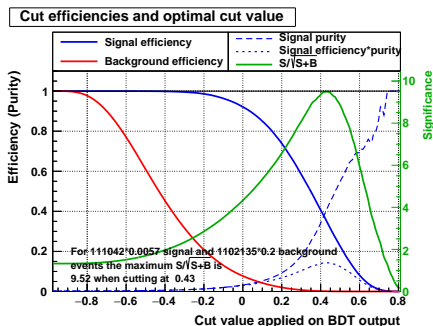
- left: “Measurement of  $D^\pm$  production in deep inelastic  $ep$  scattering with the ZEUS detector at HERA”: fitting of invariant mass distribution  $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$   
[JHEP 05 (2013) 023, arXiv:1302.5058]
- right: ZEUS Coll., “Measurement of  $D^{*\pm}$  production in deep inelastic scattering at HERA”: wrong sign  $D^{*+} \rightarrow D^0(\rightarrow K^+ \pi^-) \pi_s^+$  subtraction from correct sign  $D^{*+} \rightarrow D^0(\rightarrow K^- \pi^+) \pi_s^+$   
[JHEP 05 (2013) 097, arXiv:1303.6578]

Задача: є  $N$  подій. Відсіяти якомога більше фонових подій і залишити якомога більше сигнальних подій, щоб максимізувати  $\Delta N_s/N_s$  (задача класифікації)

- Найважливіша складова аналізу даних: дозволяє “побачити” кілька (десятків, сотень, тисяч) сигнальних подій серед мільярдів усіх зареєстрованих подій
- Найпростіший підхід: накладати обмеження (cuts) на кінематичні властивості подій та/або окремих реконструйованих частинок (імпульси, кути)
- Більш сучасний метод: алгоритми машинного навчання (дерева рішень та ін.)
- Маємо  $N$  подій, що містять сигнал і фон ( $N = N_s + N_b$ ). Із них відбираємо  $N^{sel}$  подій, які також будуть містити фон і сигнал ( $N^{sel} = N_s^{sel} + N_b^{sel}$ ). Результат характеризується ефективністю (efficiency,  $\epsilon$ ) та чистотою (purity,  $p$ ):

$$\epsilon = \frac{N_s^{sel}}{N_s}$$

$$p = \frac{N_s^{sel}}{N_s^{sel} + N_b^{sel}}$$



- Використовуючи генератор подій, згенерувати додатковий комбінаторний фон (декілька  $\pi^{\pm}$ )
- Накладаючи обмеження на імпульси частинок, зменшити фон
- Визначити ефективність та чистоту
- Визначити переріз народження, скоректований на ефективність відбору подій

Github:

[https://github.com/zenaiev/hep/blob/main/invmass/invmass\\_adv.py](https://github.com/zenaiev/hep/blob/main/invmass/invmass_adv.py)

Google Colab:

[https://colab.research.google.com/github/zenaiev/hep/blob/main/invmass/invmass\\_adv.ipynb](https://colab.research.google.com/github/zenaiev/hep/blob/main/invmass/invmass_adv.ipynb)