



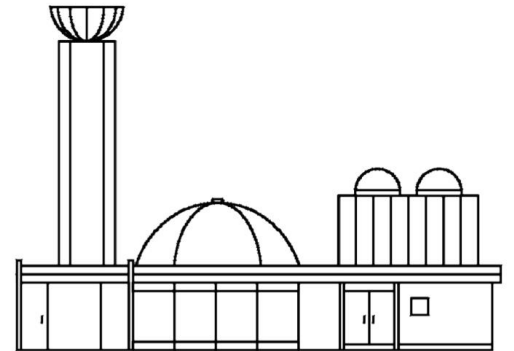
# **CMS Masterclasses Bulgaria - 2024**



## **Methodology and Practical work**

**11.03.2024 – Blagoevgrad**

**Milena Misheva (CMS)**  
INRNE – Bulgarian Academy of Sciences



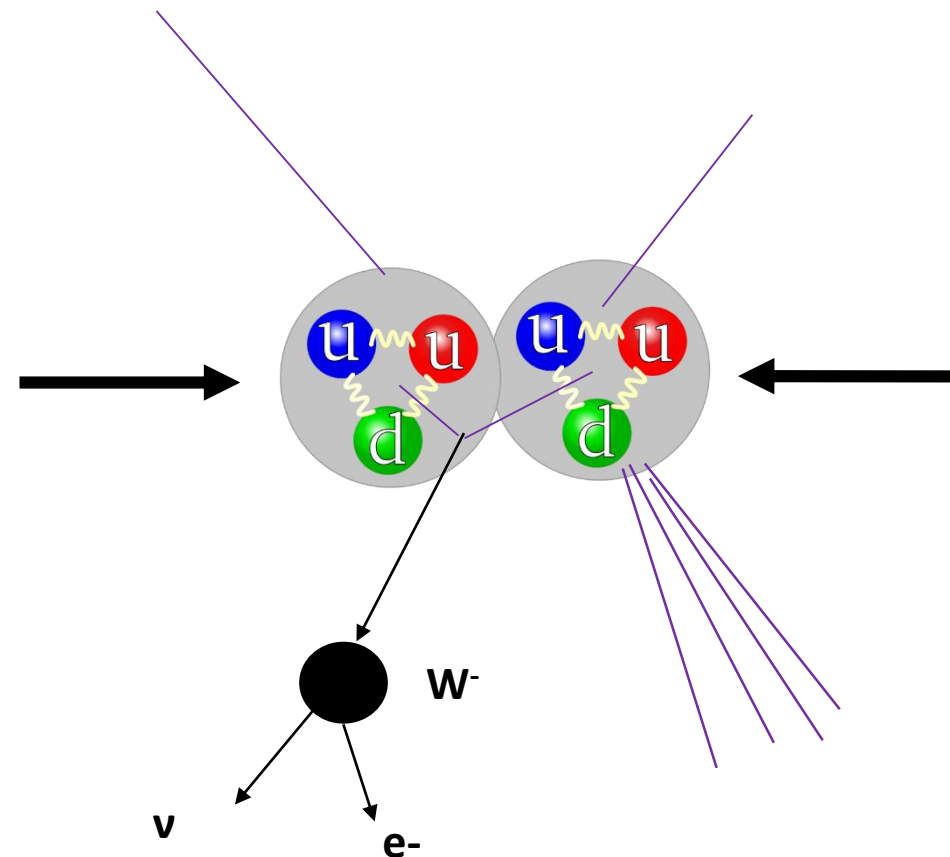
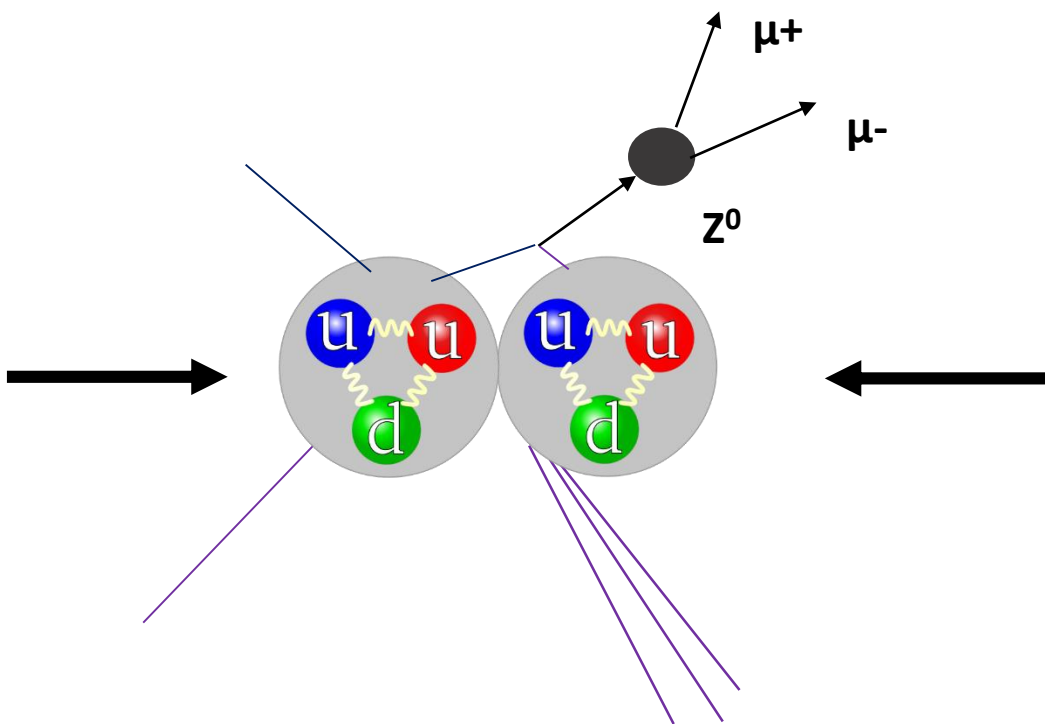
**Теоретична част на практическата задача**

## Цели на практическата част:

- Да се разбере научния процес на анализ на експериментални данни
- Да се направи анализ на реални измервания
- Да се разбере какво се наблюдава (значението на анализираното събитие)
- Да се разбере къде се вписват тези измервания и каква е ролята им за разбиране на познатата ни Вселена

За разлика от електромагнитните сили, които са пренасяни на големи разстояния от безмасовите фотони, **слабите взаимодействия се пренасят от тежки (масивни) частици, което ги ограничава до много малки разстояния.**

Ние търсим **медиаторите на слабите взаимодействия:**  
електрически заредените  **$W^\pm$**  бозони & неутралният  **$Z$**  бозон.



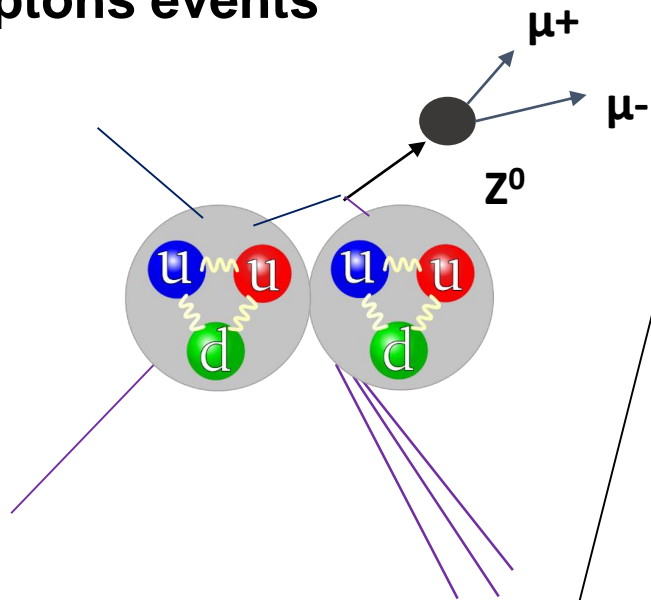
Сблъсъци с достатъчно голяма енергия могат да създадат  $W$  и  $Z$  или други частици.

Ще се ограничим само с няколко вида разпада!

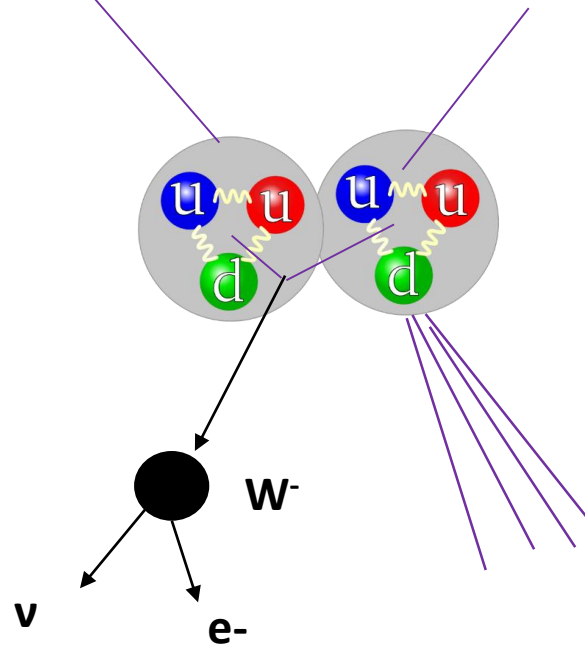
Ще анализираме само събития с един, два или четири лептона  
в крайното състояние.

Ще се ограничим върху събитията с мюони и електрони.

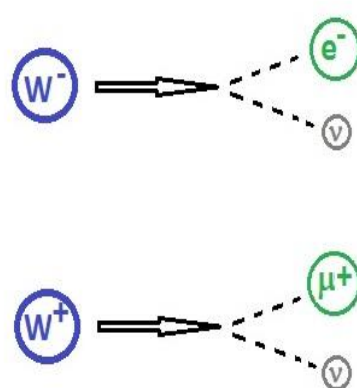
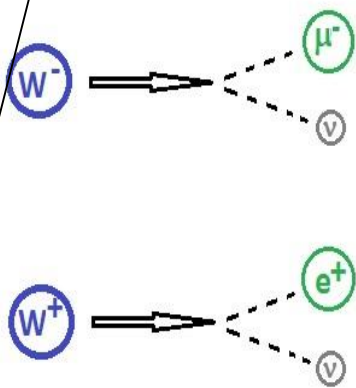
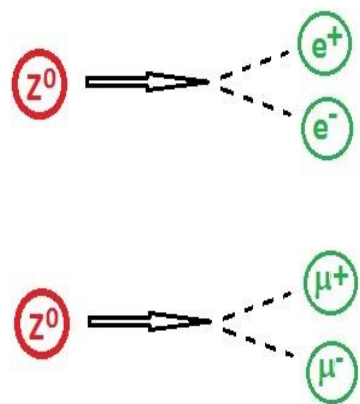
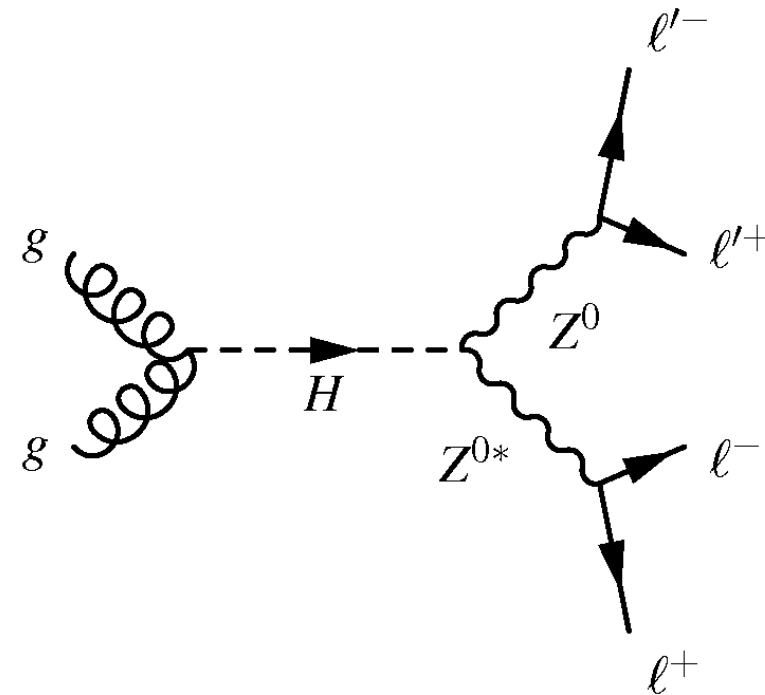
## 2 leptons events



## 1 leptons event



## 4 leptons events

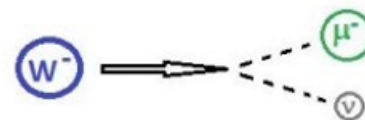
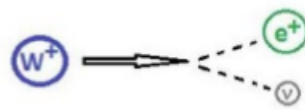
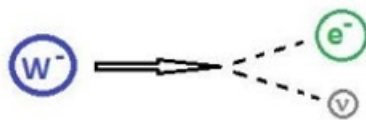
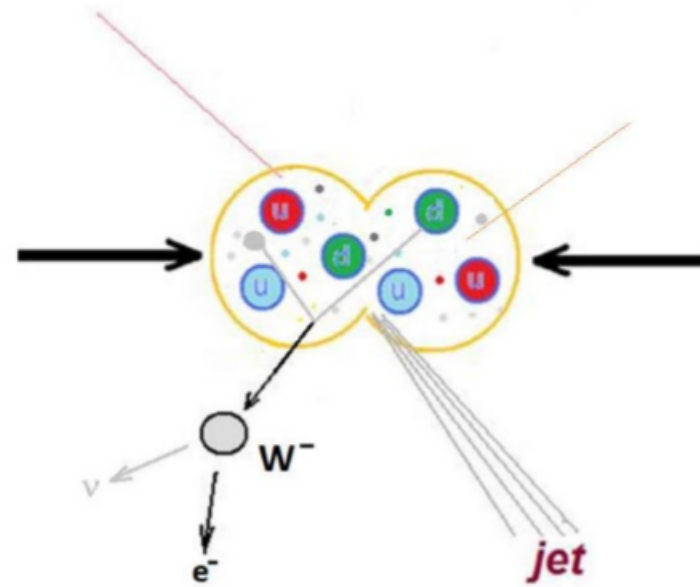


?  $H \rightarrow Z Z \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$   
 or  
 ?  $H \rightarrow Z Z \rightarrow (e^+ e^- e^+ e^-)$   
 or  
 ?  $H \rightarrow Z Z \rightarrow (\mu^+ \mu^- e^+ e^-)$

# Събития с 1 лептон в крайното състояние

Положително и отрицателно заряденият  $W$  бозон позволява радиоактивно разпадане чрез превръщане на неутрони в протони.

Този бозон се разпада на неутрино и друг лептон. Тъй като CMS не може да измери директно неутриното, може да приемем, че в крайното състояние има само 1 лептон.

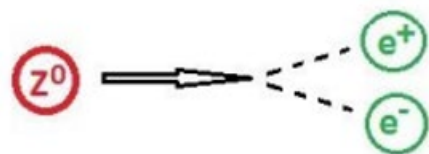
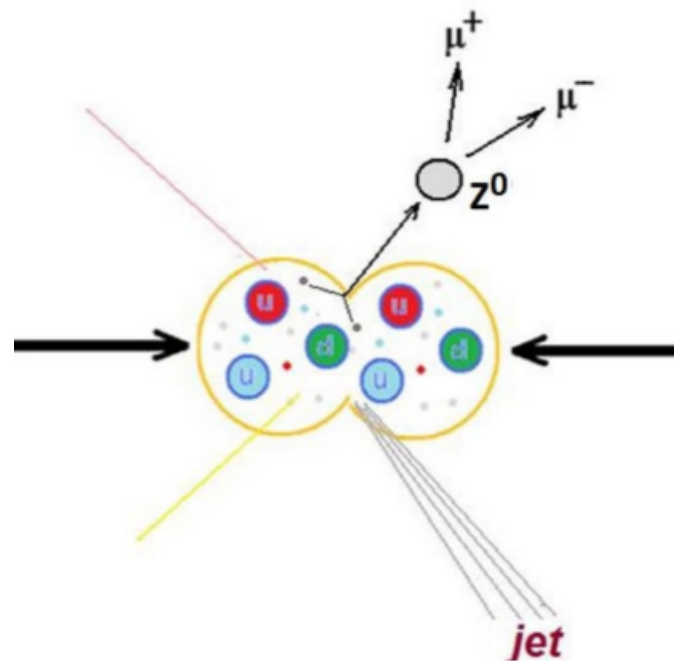




# Събития с 2 лептона в крайното състояние

Z бозона е неутралния братовчед на W. Той позволява „слабият неутрален поток“.

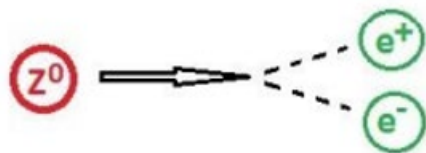
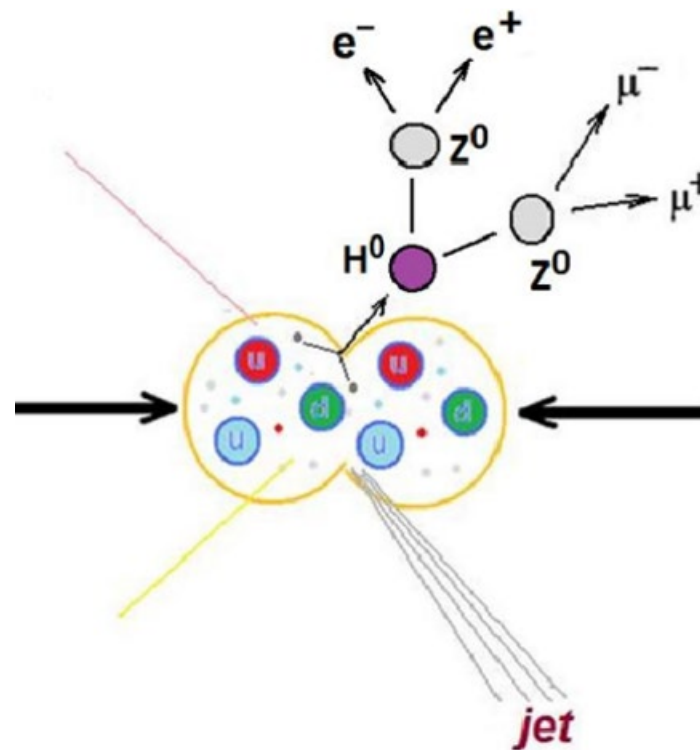
Този бозон се разпада на два лептона от един и същи вид, но с различни заряди – електрон и позитрон или мюон и анти-мюон. Той има и други процеси, по които се разпада, но в това упражнението разглеждаме само тези начини за неговото разпадане.



# Събития с 4 лептона в крайното състояние

Хигс бозона е частицата преносител на полето, което задава масата на всички останали частици.

Един от начините за разпад на Хигс е на два Z бозона, които след това се разпадат по вече разгледаните начини. Така в крайното състояние, което наблюдаваме може да получим 2 мюона и 2 електрона *или* 4 мюона *или* 4 електрона.



# Обобщение

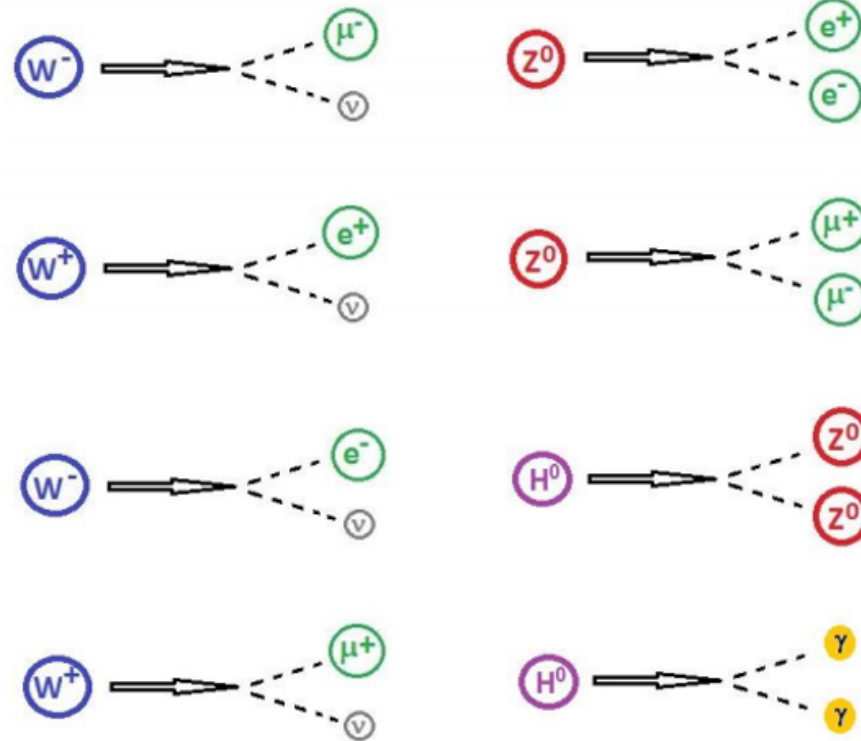
Тъй като бозоните могат да изминат изключително малко разстояние преди да се разпаднат, CMS не може да ги „види“ директно.

**CMS** може да разпознае:

- Електрони
- Мюони
- Фотони

**CMS** може да определи:

- Нейтроните по „липсващата енергия“



# Разпади на елементарни частици, разгледани в този урок

$$W^+ \rightarrow \mu^+ \nu$$

$$W^+ \rightarrow e^+ \nu$$

$$W^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}$$

$$W^- \rightarrow e^- \bar{\nu}$$

Събития с 1 лептон в крайното състояние

$X^0$  - електрически неутрална частица  
Може да бъде Хигс бозон или Z бозон или друга частица

$$X^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- \quad (\text{или } X^0 \rightarrow 2\mu)$$

$$X^0 \rightarrow e^+ e^- \quad (\text{или } X^0 \rightarrow 2e)$$

Събития с 2 лептона в крайното състояние

$$X^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^- \quad (\text{или } X^0 \rightarrow 4\mu)$$

$$X^0 \rightarrow e^+ e^- e^+ e^- \quad (\text{или } X^0 \rightarrow 4e)$$

Събития с 4 лептона в крайното състояние

$$X^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- e^+ e^- \quad (\text{или } X^0 \rightarrow 2\mu 2e)$$

$$? \rightarrow Z \text{ or } \dots$$

Събития, които не асоциираме с нито една от горните схеми

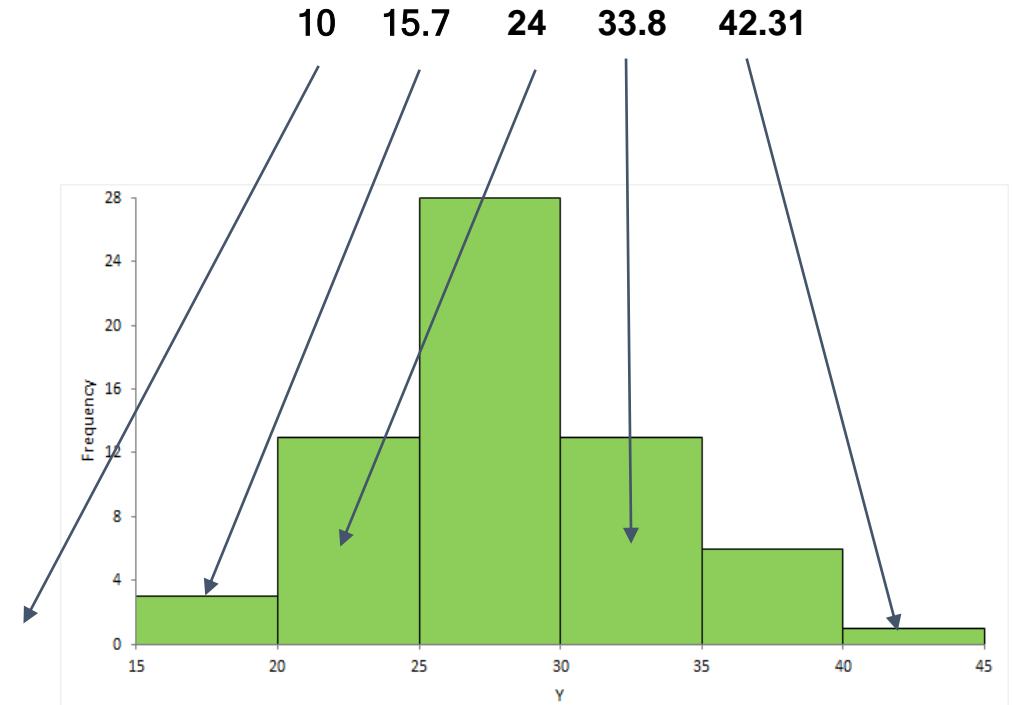
# Достатъчно ли е само едно измерване?

Едно събитие (event) не е достатъчно.

- То може да бъде случайно.
- Освен това различните частици се раждат с различна вероятност.
- Колкото по-рядко се ражда една частица, толкова по-голям брой събития е необходимо да анализираме за да я открием.

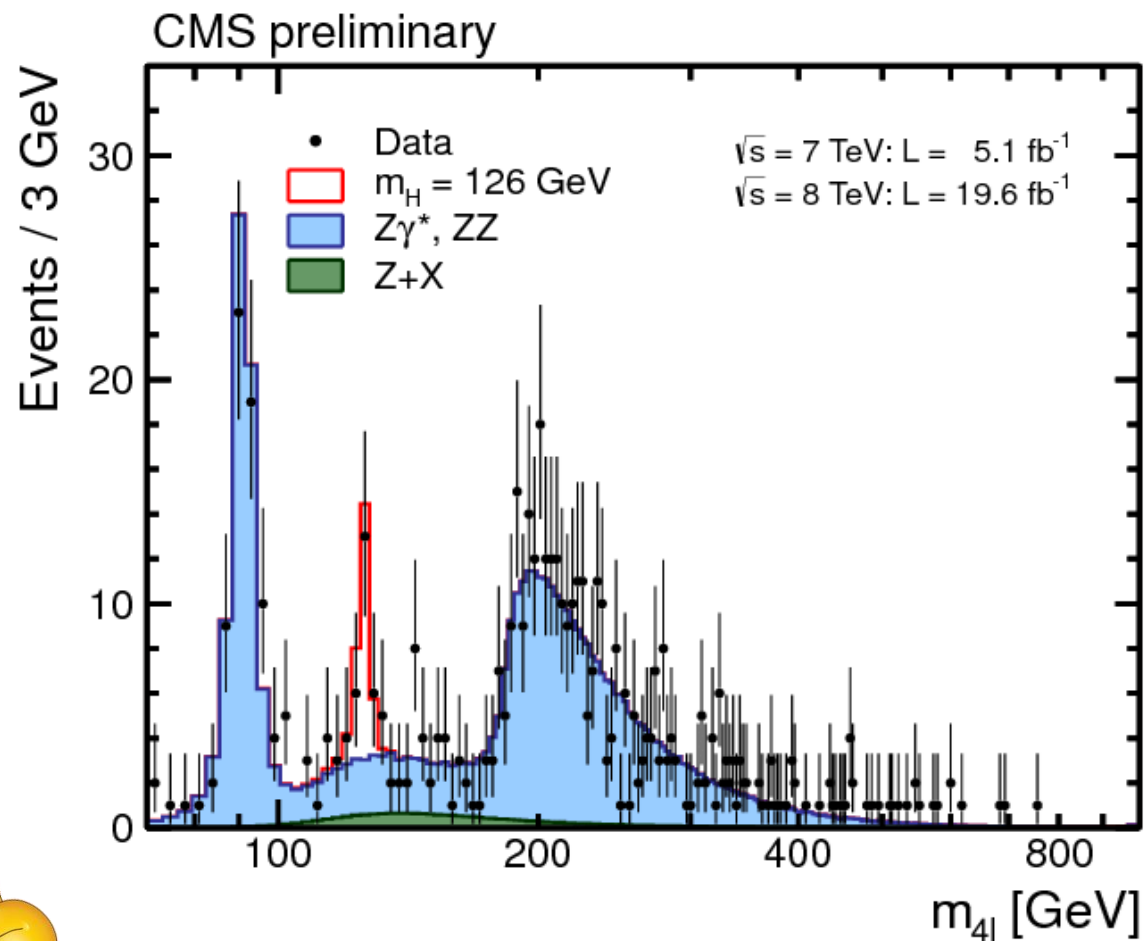
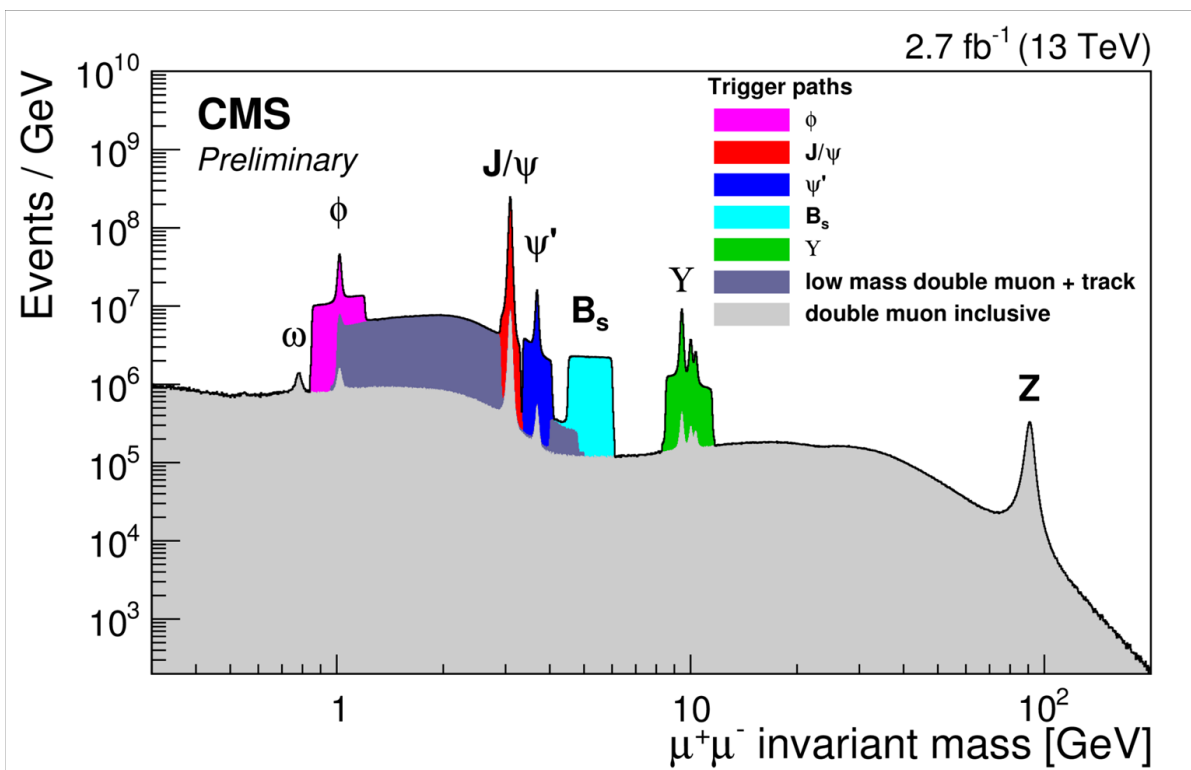
Хистограмата ни показва с каква честота (колко често) се случва дадено събитие.

- В нашия случай - как са разпределени масите на частиците, които сме определили.
- Наличието на пик в хистограмата е указание за частица с маса, равна на стойността, при която имаме пик.



Хистограма

# Пример за разпределение по инвариантна маса на дву- и четири лептонни събития с данни на CMS

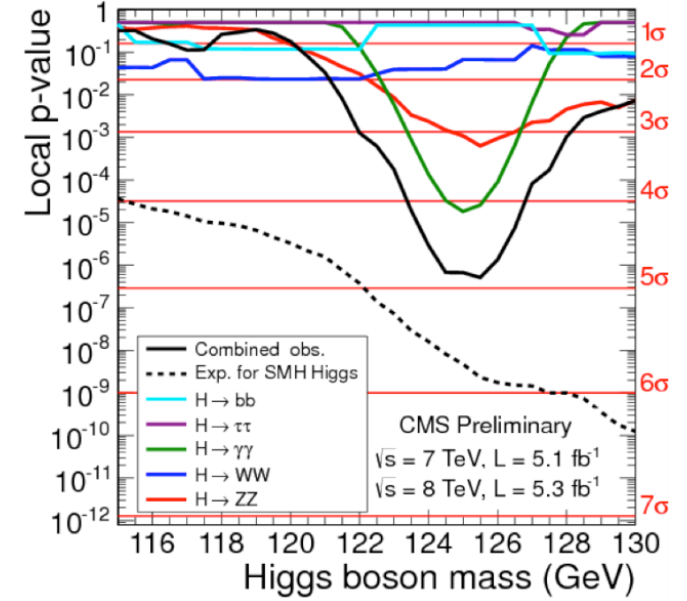
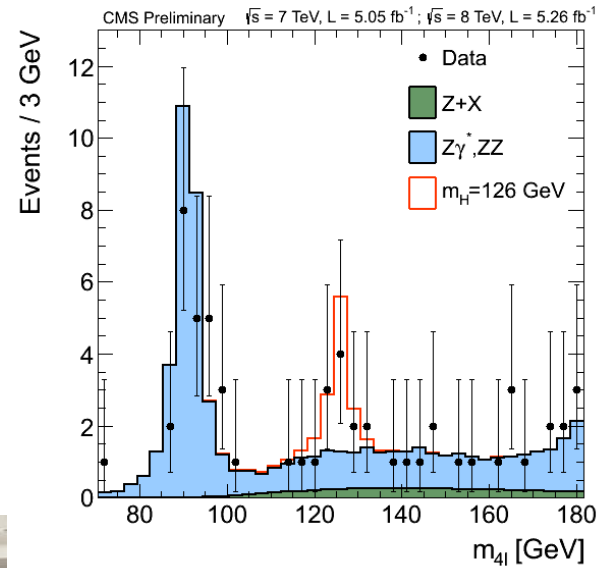
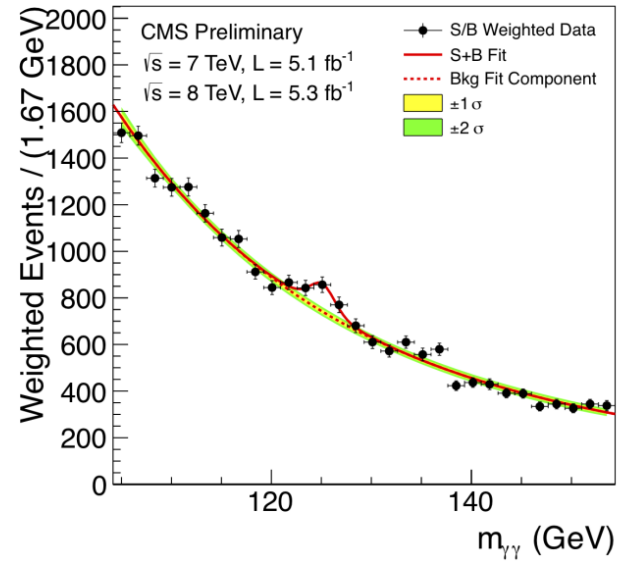


Да видим какво ще получите вие.



# Higgs Boson Discovery – 2012

## CMS & ATLAS



Credit: Weforum.org

# Практическа част



# Данни - Кои са моите данни за анализ и къде да ги намеря

← ↻ 🏠 🔒 <https://www.i2u2.org/elab/cms/cima-wzh/index.php> 🔍 🔊 ☆ 📄 ☆ 📁 🌐 ...



Основно приложение:  
CIMA - [link](#)



Choose your Masterclass	Choose your location	Choose your data file
TestEvents-01Jan2022	GenevaCERN2024	10.1
Santander-13May2024	Pula2024	10.2
CERN-27Nov2023	Blagoevgrad2024	10.3
Salo-07Dec2023	SaoPauloSPRACE2024-A	10.4
Sofia-13Dec2023	Mostar2024	10.5
CERN-LAMAP-08Dec2023		10.6
MP-15Jan2024		10.7
Cakovec-24Jan2024		10.8
Bristol-27Mar2024		10.9
CERN-09Feb2024		100.36
Sandbox-31Dec2023		100.37
CERN-20Feb2024		100.38
CERN-26Feb2024		100.39
CERN-29Feb2024		100.40
CERN-22Feb2024		100.41
CERN-01Mar2024		100.42
CERN-04Mar2024		100.43
CERN-06Mar2024		100.44
CERN-08Mar2024		100.45
CERN-11Mar2024		100.46
CERN-13Mar2024		100.47
CERN-19Mar2024		100.48
CERN-22Mar2024		100.49
CERN-27Mar2024		100.50
FNAL-01Mar2024		100.51
FNAL-08Mar2024		100.52
FNAL-09Mar2024		100.53
FNAL-13Mar2024		100.54
FNAL-14Mar2024		100.55

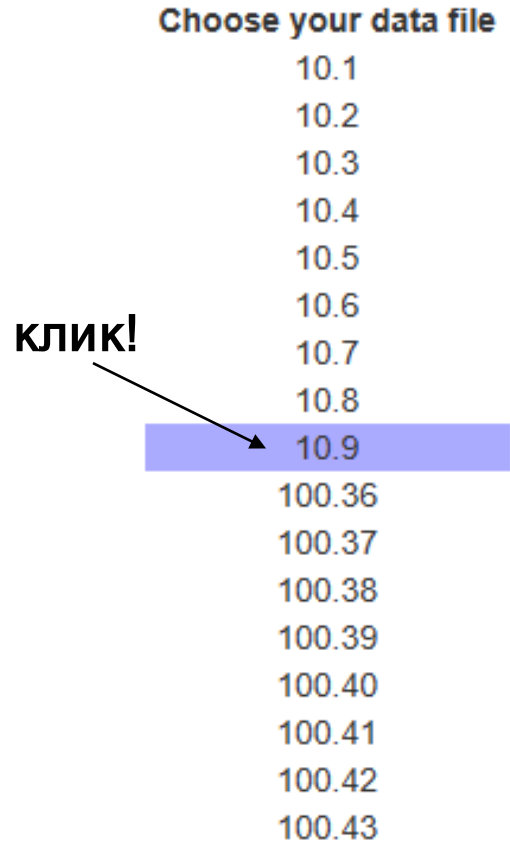


CERN-11Mar2024 - Blagoevgrad

# Данни - Кои са моите данни за анализ и къде да ги намеря

## Извадки с данни:

- Всяка извадка е номерирана с два числа, примерно 10.9
- Всяка извадка съдържа 100 събития;
- Една извадка се използва от двама ученика, примерно:
  - Марин обработва събития от 1 до 50;
  - Габриела събития - събития от 51 до 100



## За всяко събитие учениците трябва:

1. Да определят дали разпада е електронен или мюонен, както и дали той отговаря на:
  - $W^+$  или  $W^-$  кандидат (може да се запише като "W" ако заряда не може да бъде определен);
  - NP (Z или друг кандидат за „неутрална частица“);
  - Кандидат за Хигс бозон;
  - zoo събитие (необикновено или такова, което не може да се категоризира).
2. Да направят запис в таблицата на CIMA.

# Таблица за данни

За конкретната индивидуална извадка от данни, прим. 10.9

Общи хистограми на класа - маси на реконструираните частици

Общи резултати на класа (ключови отношения и обобщение)

Browser navigation bar with address: <https://www.i2u2.org/elab/cms/cima-wzh/DataTable.php>

Navigation tabs: Back, Events Table (Group 10.9), Mass Histogram (Blagoevgrad2024), Results (Blagoevgrad2024), Event Display

Masterclass: CERN-11Mar2024  
Location: Blagoevgrad2024  
Group: 10.9

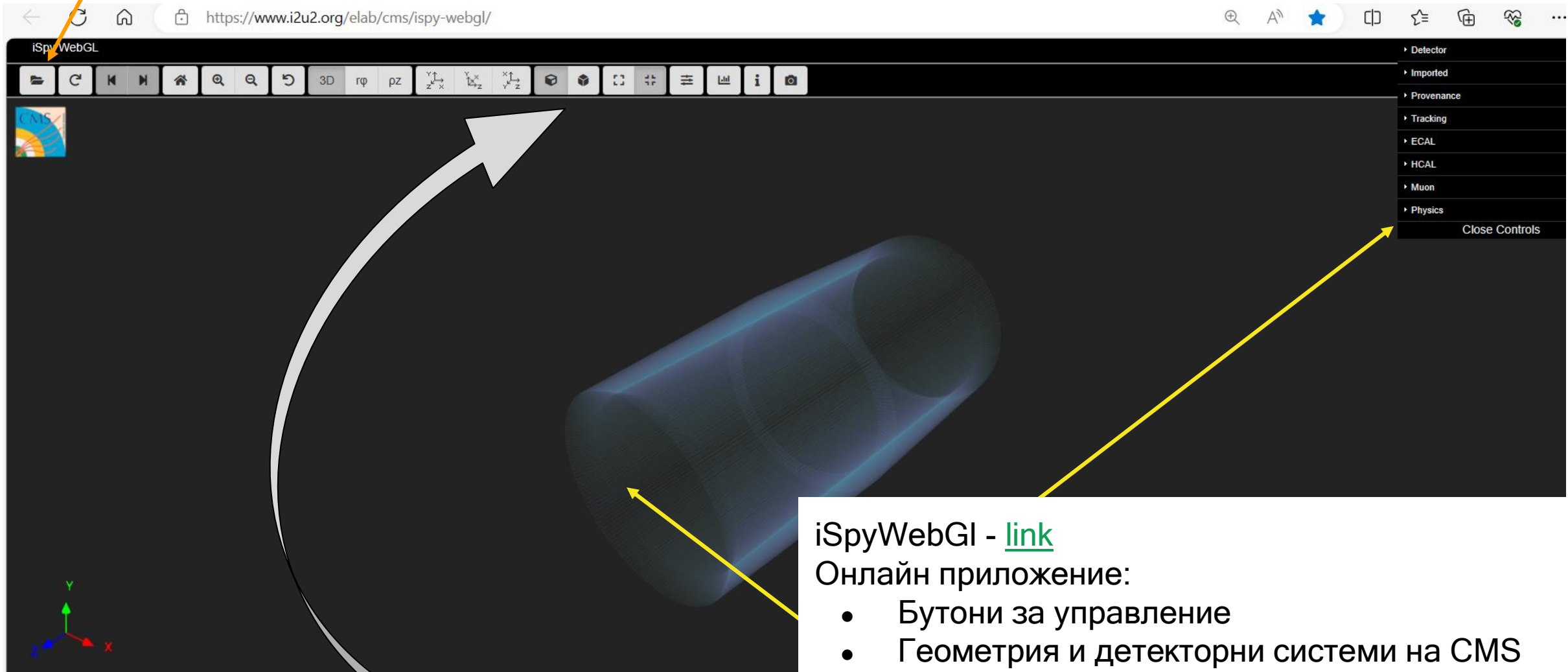
Линк към event display.

<b>Select Event</b> Event index: <input type="text" value="1"/> Event number: 10.9-1	<b>Final State</b> <input type="radio"/> e $\nu$ <input type="radio"/> $\mu \nu$ <input type="radio"/> e e <input type="radio"/> $\mu \mu$ <input type="radio"/> 4e <input type="radio"/> 4 $\mu$ <input type="radio"/> 2e 2 $\mu$	<b>Primary State</b> Charged Particle: <input type="radio"/> W+ <input type="radio"/> W- <input type="radio"/> W $\pm$ <input type="radio"/> Neutral Particle (Z, H) <input type="radio"/> Zoo	<b>Enter Mass</b> <input type="text"/> GeV/c <sup>2</sup> <input type="button" value="Next"/>
--	--	--	---

Event index	Event number	Final state	Primary state	Mass
-------------	--------------	-------------	---------------	------

## Зареждане на данни

## Основно приложение - iSpyWebGL



iSpyWebGL - [link](#)

Онлайн приложение:

- Бутони за управление
- Геометрия и детекторни системи на CMS
- Реконструирани обекти
- Измерени физични величини

# Основно приложение - iSpyWebGl

## Реконструирани обекти и цветова конвенция

- Мюонни (мюонни трекове) - червени
- Електрони и позитрони (електронни трекове) - зелено
- Липсваща енергия - лилаво (розово)
- Фотони - зелено (без попадения в централния треков детектор)
- Адрони - жълти конуси

iSpyWebGl - [link](#)

## Електрически заряд

“+” Ако траекторията се закривява по посока на часовниковата стрелка

“-” Ако траекторията се закривява **обратно** на посоката на часовниковата стрелка

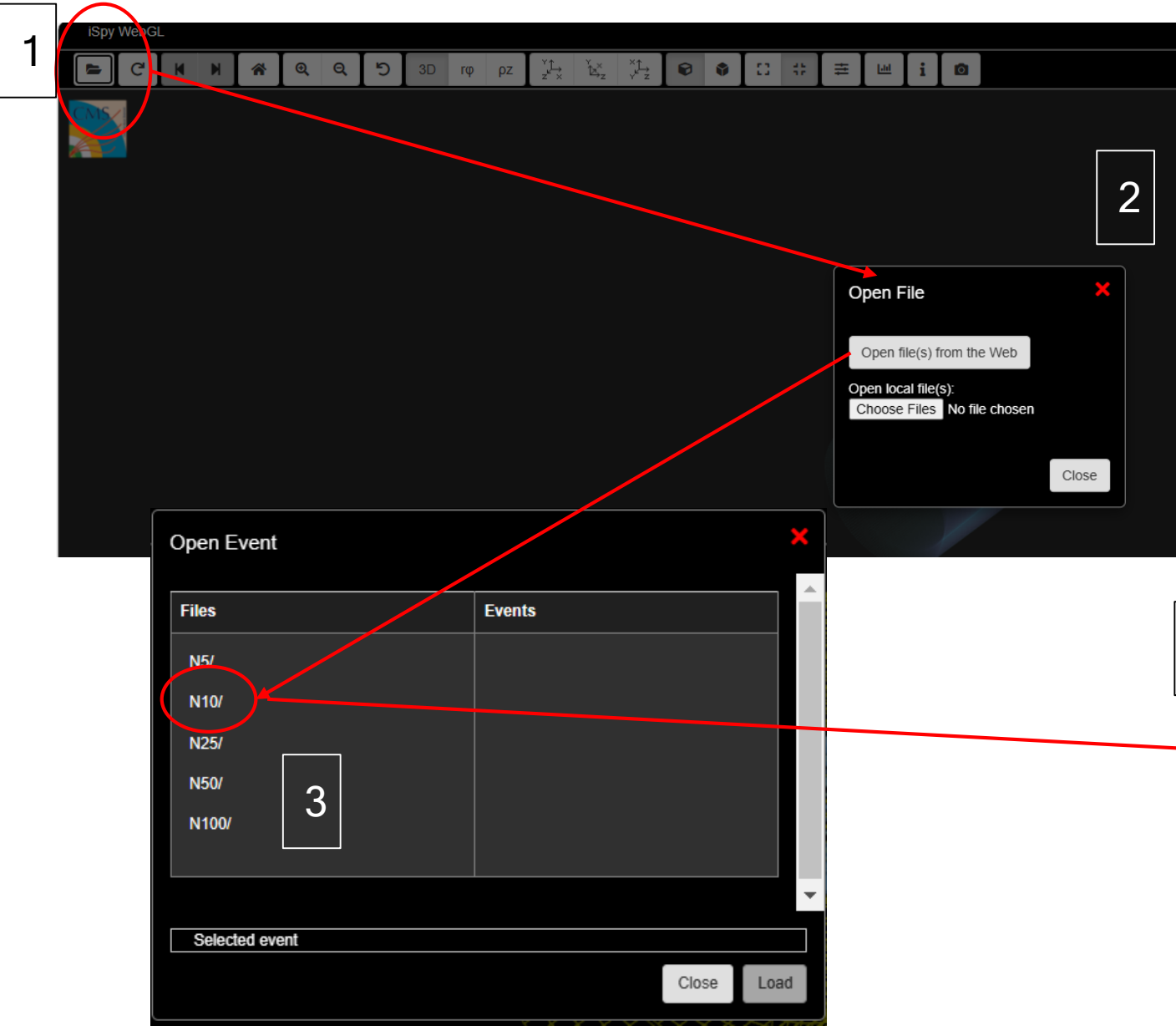
Липсваща енергия (в крайното състояние) - **Missing energy transverse (MET)**

Определя се от закона за запазване на енергията и импулса.

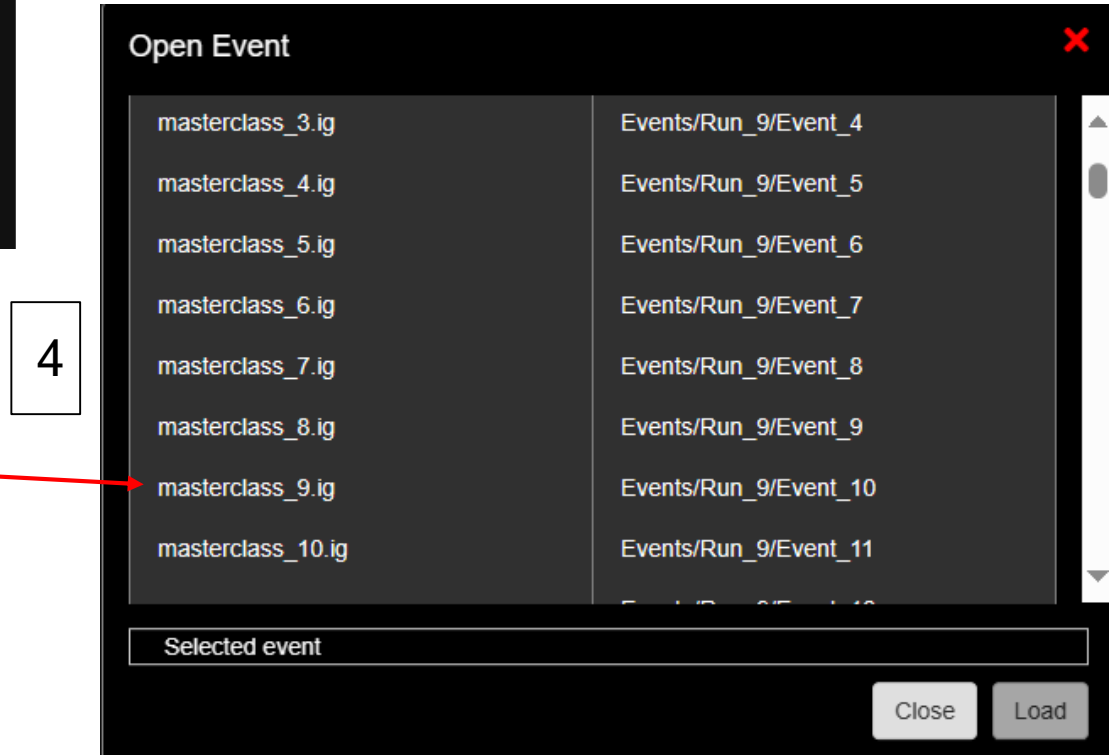
Изглед в различни равнини, 3D изглед

Таблица с измерените физични величини - енергия, импулс, ъгли.

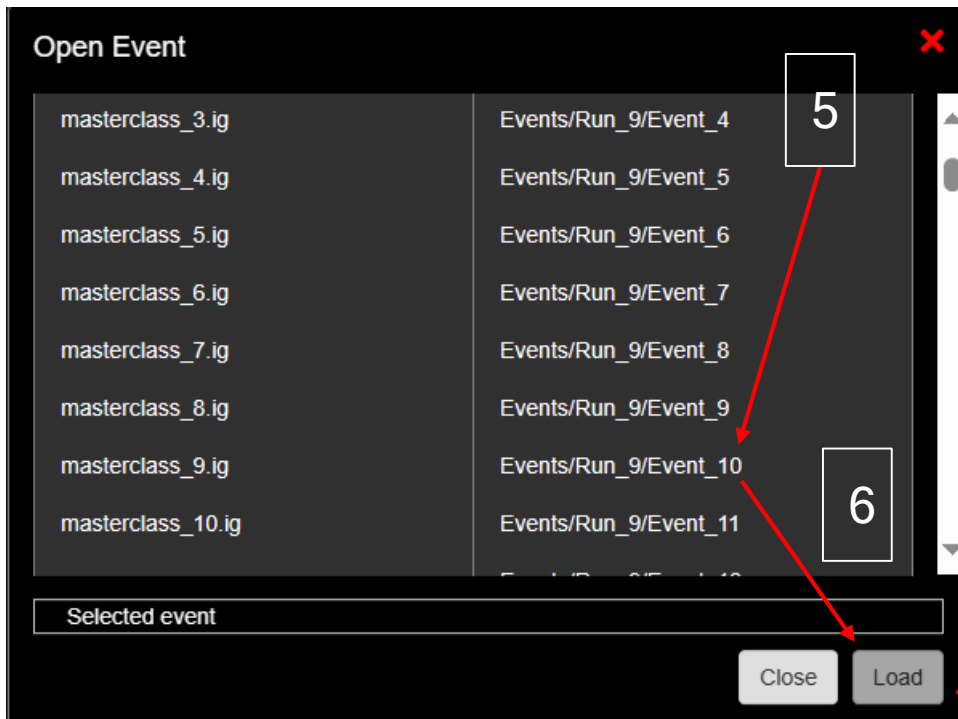
# Зареждане на данни в iSpyWebGL - пример с извадка 10.9



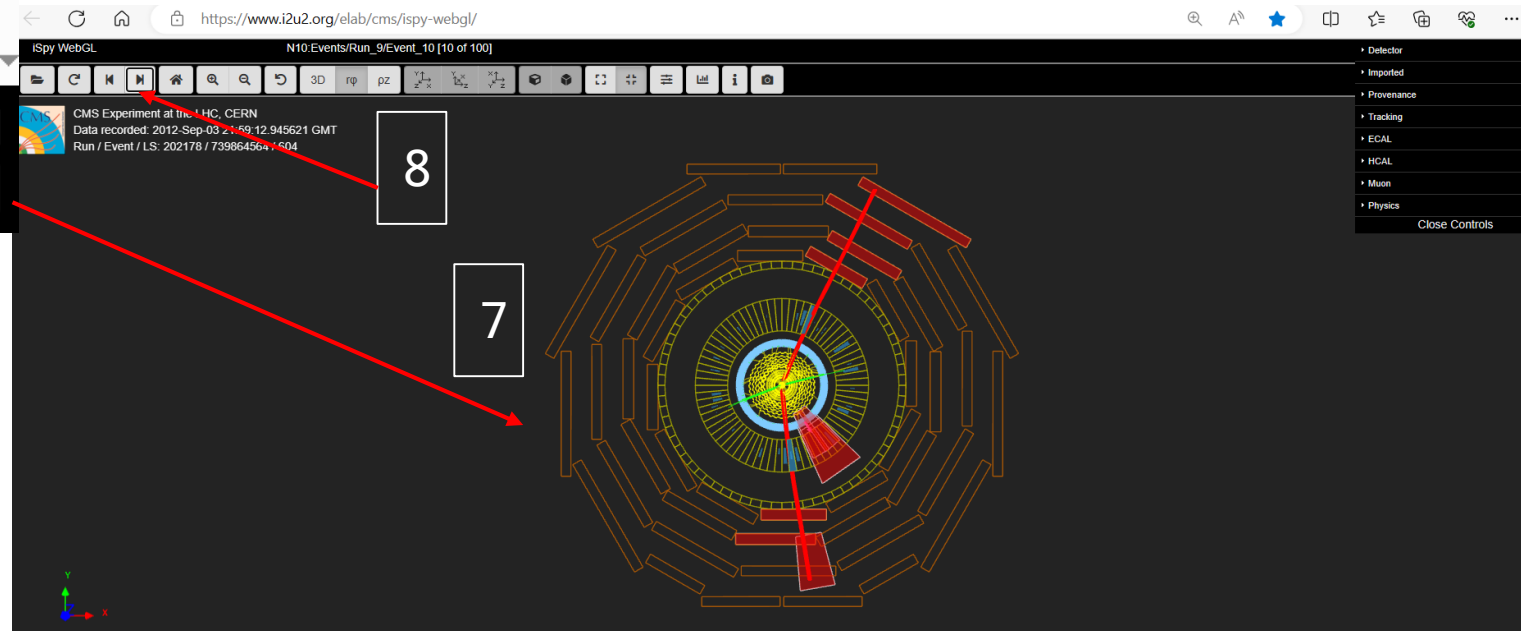
1. Зареждане на данни
2. Избираме данни от Web
3. Избираме извадка 10
4. Избираме данни с номер 9



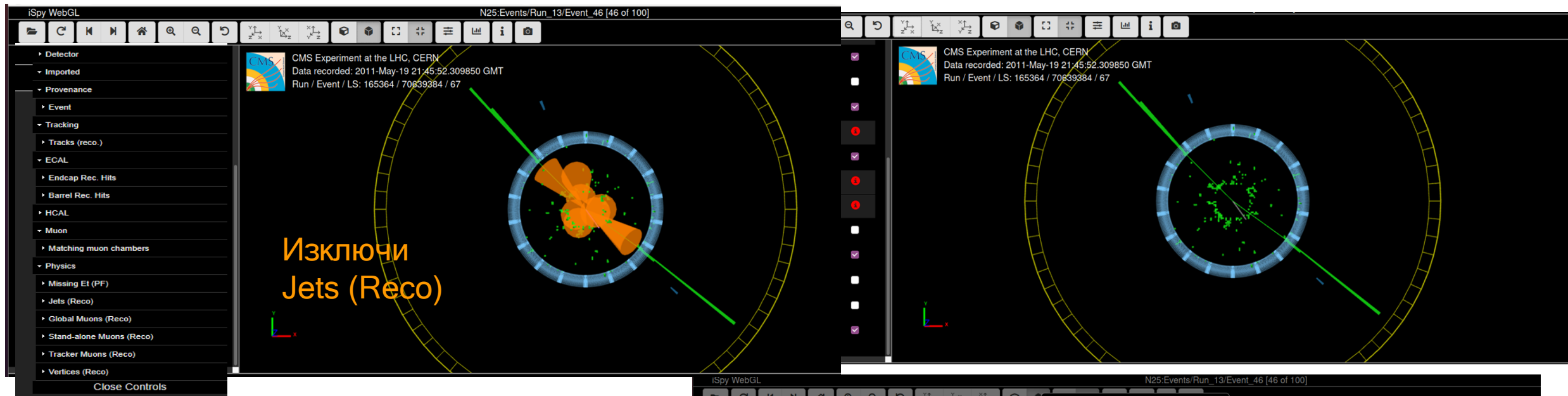
# Зареждане на данни в iSpyWebGL - пример с извадка 10.9



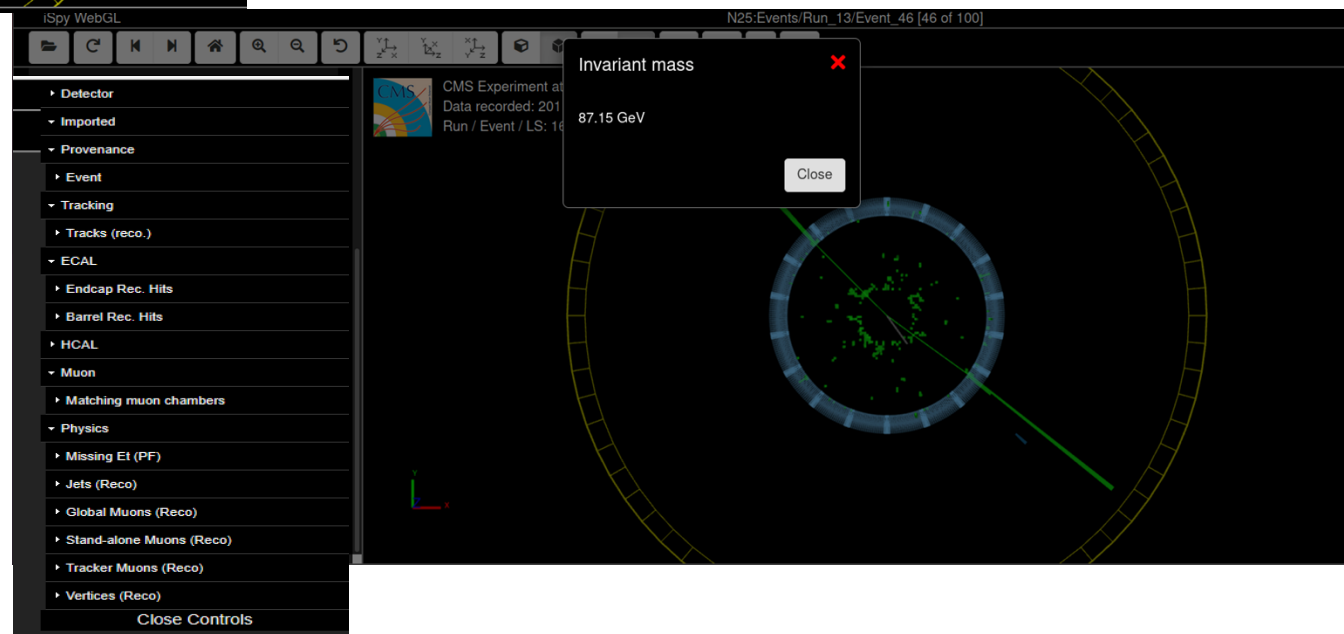
5. Избираме събитие № 1 (или № 50 за втората половина от данните);
6. Зареждаме;
7. Визуализиране на събитие;
8. За зареждане на следващото събитие използвайте бутоните на приложението



# “Изчистване” на събитието - разглеждаме само необходимото

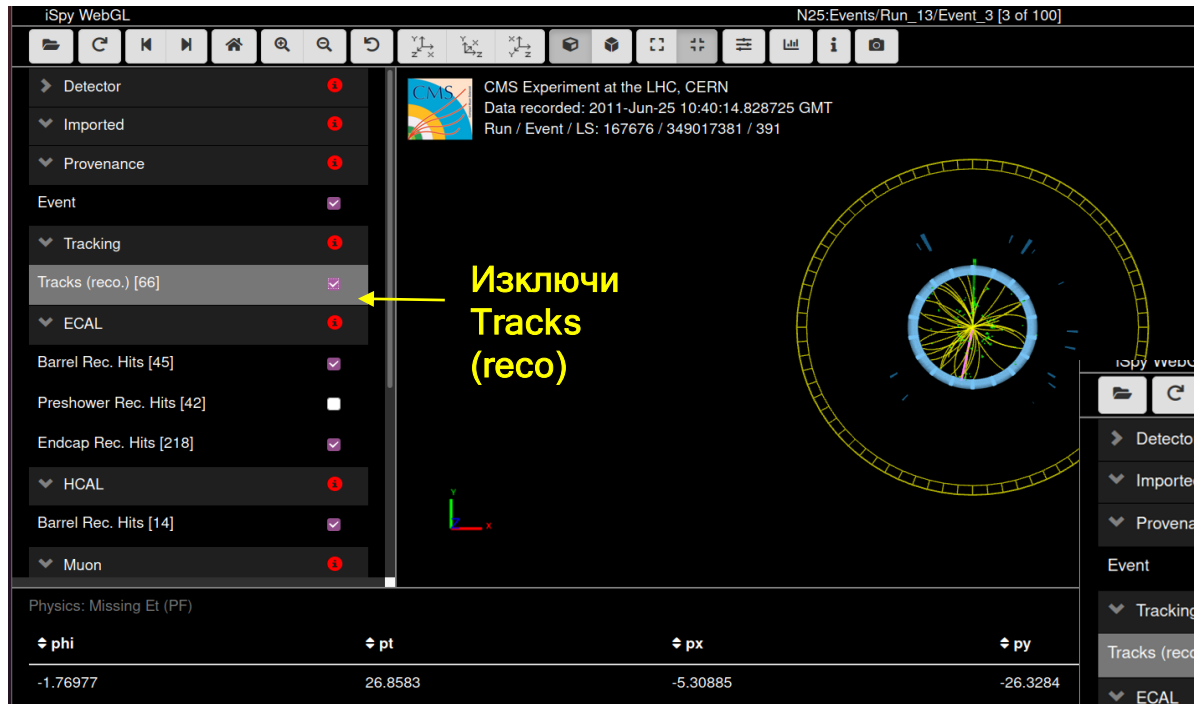


- Оранжеви конуси - Адронна активност в калориметричната система;
- Не се разглежда в това упражнение;
- След като се изключат от анализа, се вижда събитие кандидат за разпад на  $Z \rightarrow \mu\mu$





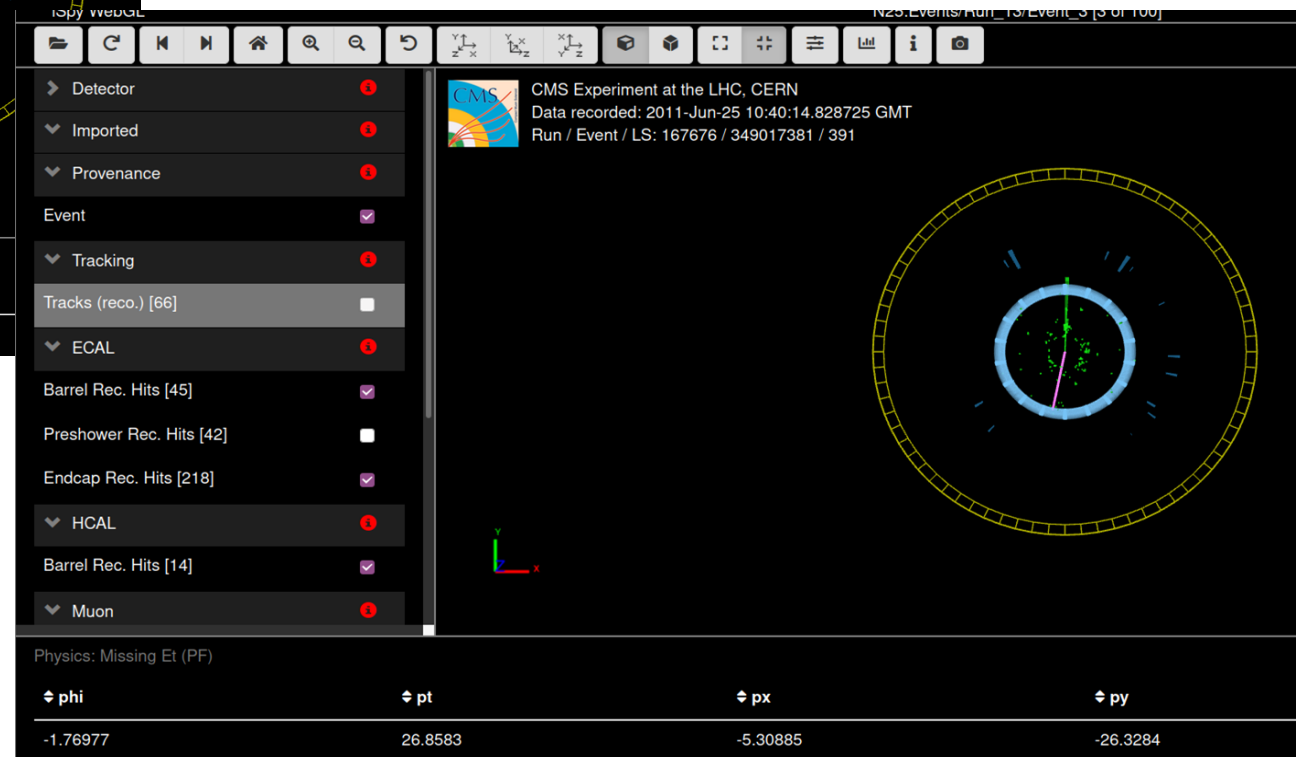
# “Изчистване” на събитието - разглеждаме само необходимото



След изключване на излишните обекти, се вижда чисто събитие, кандидат за разпад на  $W^- \rightarrow e^- \nu$

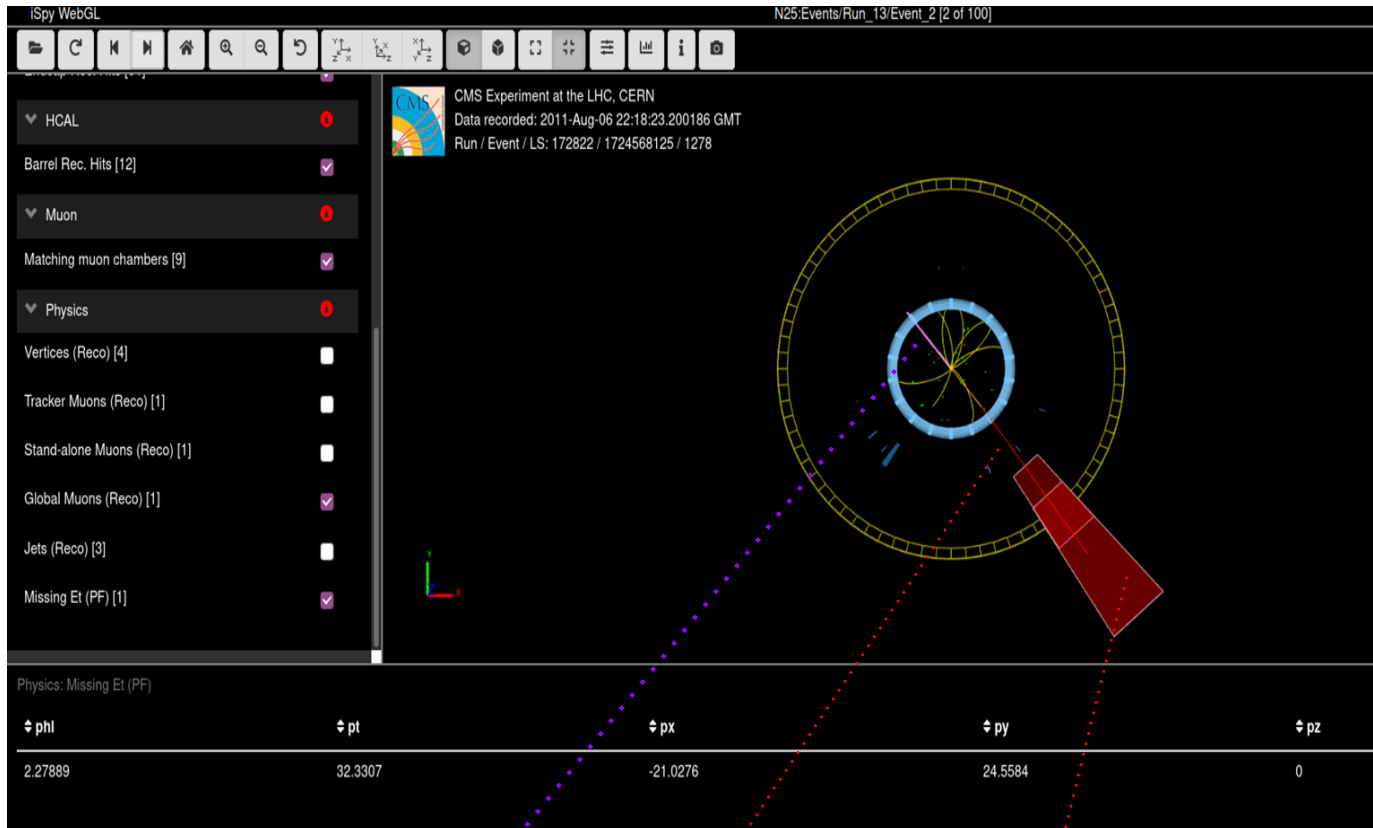
Електронните трекове са показани в зелено.

В лилаво - липсващата енергия.



Трековете на заредени частици (в жълто) във вътрешния треков детектор припокриват трековете, които ни интересуват. Просто ги изключете.

# Анализ - видове събития - един мюон в крайното състояние ( $W \rightarrow \mu\nu$ )



Липсваща енергия

Мюонна станция

Мюонна траектория (трек)

Мюонните траектории (трекове) са оцветени в червено.

В червено са показани и мюонните станции, в които са засечени мюоните.

В лилаво(розово) е показана липсващата (неизмерена) енергия, определена в напречната равнина (X, Y)

1. Открили сме един мюон и голямо количество липсваща енергия ;
2. Проверяваме електрическия заряд на мюона
  - a. Положителен, ако траекторията се закривява по часовниковата стрелка.
3. Кандидат за разпад на  $W$  на два мюон и неутрино
  - a. Електрическият заряд (на мюона) в крайното състояние = електрическият заряд на  $W$ .
    - i. (Запазване на електрическия заряд).
  - b. В този случай не се пресмята реконструираната маса.

# Анализ - видове събития - един мюон в крайното състояние ( $W^- \rightarrow \mu \nu$ )

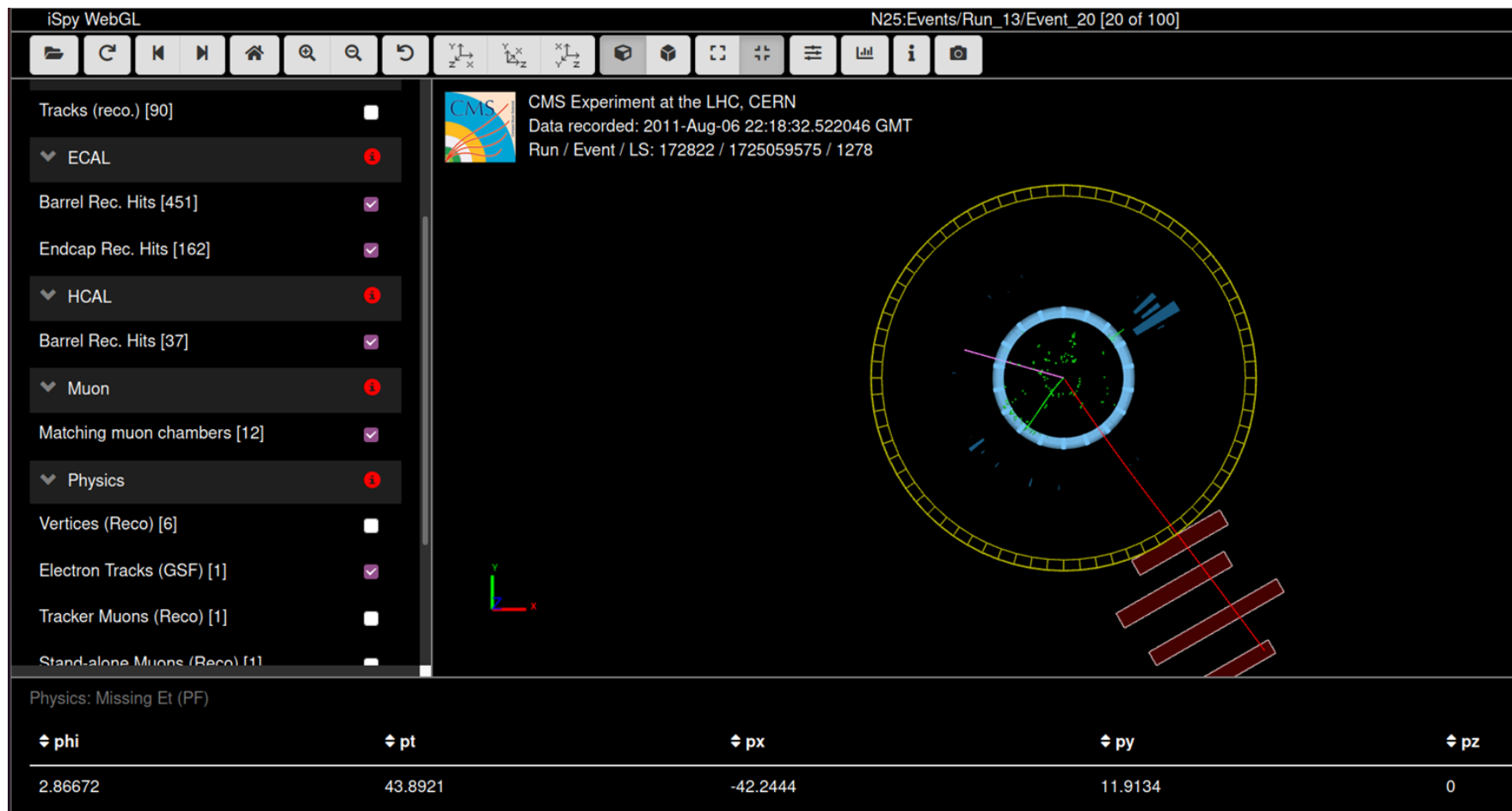
## Нанасяне на резултатите в таблицата

<b>Select Event</b> Event index: <input type="text" value="1"/> <input type="button" value="v"/> Event number: 25.13-1	<b>Final State</b> <input type="radio"/> e $\nu$ <input checked="" type="radio"/> $\mu \nu$ <input type="radio"/> e e <input type="radio"/> $\mu \mu$ <input type="radio"/> 4e <input type="radio"/> 4 $\mu$ <input type="radio"/> 2e 2 $\mu$	<b>Primary State</b> Charged Particle: <input checked="" type="radio"/> W <sup>+</sup> <input type="radio"/> W <sup>-</sup> <input type="radio"/> W $\pm$ <input type="radio"/> Neutral Particle (Z, H) <input type="radio"/> Zoo	<b>Enter Mass</b> <input type="text"/> GeV/c <sup>2</sup> <input type="button" value="Next"/>
--	---	---	---

Red annotations: 1 points to  $\mu \nu$  in Final State; 2 points to W<sup>+</sup> in Primary State; 3\* points to W $\pm$  in Primary State; 4 points to the Next button.

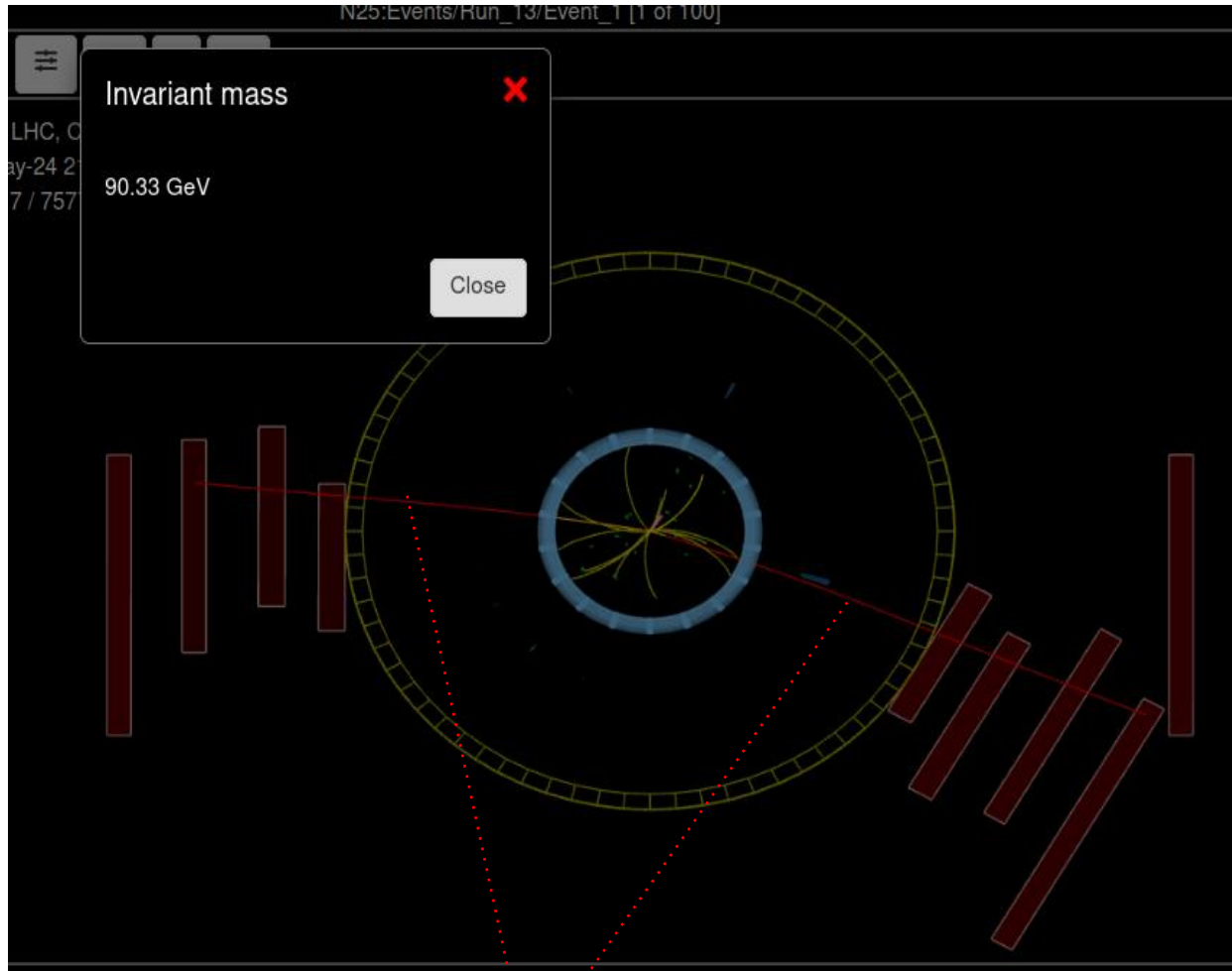
1. Отбелязваме мюон и неутрино в крайното състояние
2. Отбелязваме W<sup>+</sup> началното състояние
  - a. + е определен от заряда на мюона
3. (\*)Ако не сме сигурни за заряда, посочваме W<sup>+/-</sup>
4. Въвеждаме "Next"
5. И към следващото събитие ...

# Анализ - видове събития: ( $W \rightarrow \mu\nu$ ) или ( $W \rightarrow e\nu$ )



За крайното състояние (мюон и липсваща енергия) или (електрон и липсваща енергия) избираме лептона с по-голям напречен импулс ( $p_T$ ).

# Анализ - видове събития - два мюона в крайното състояние



Мюонни траектории (трекове)

Мюонните траектории (трекове) са оцветени в червено.

В червено са показани и мюонните станции, в които са засечени мюоните.

1. Открили сме два мюона
2. Проверяваме дали са с противоположен електрически заряд
3. Ако да, значи имаме събитие, кандидат за разпад на електрически неутрална частица на два мюона (Закон за запазване на електрическия заряд)
4. Пресмятане масата на тази частица:
  - a. Последователно избираме с мишката по веднъж върху двата мюонни трека
  - b. Натискаме клавишът M (на латиница) и се отваря прозорец с изчислената маса.

*3.\* Ако в даденият случай, зарядите на двата мюона не са с противоположен знак, значи имаме някакво друго събитие, което не познаваме или не изследваме в момента - отбелязваме го в таблицата като Zoo.*

# Анализ - видове събития - два мюона в крайното състояние

## Нанасяне на резултатите в таблицата

Select Event

Event index: 1

Event number: 25.13-1

Final State

e ν     μ ν

e e     μ μ

4e     4μ

2e 2μ

Primary State

Charged Particle:

W+     W-     W±

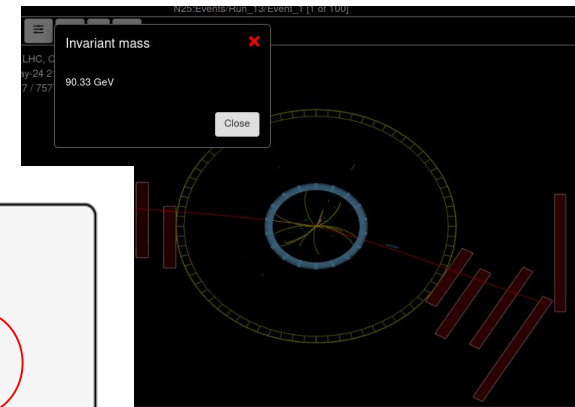
Neutral Particle (Z, H)

Zoo

Enter Mass

90.33 GeV/c<sup>2</sup>

Next



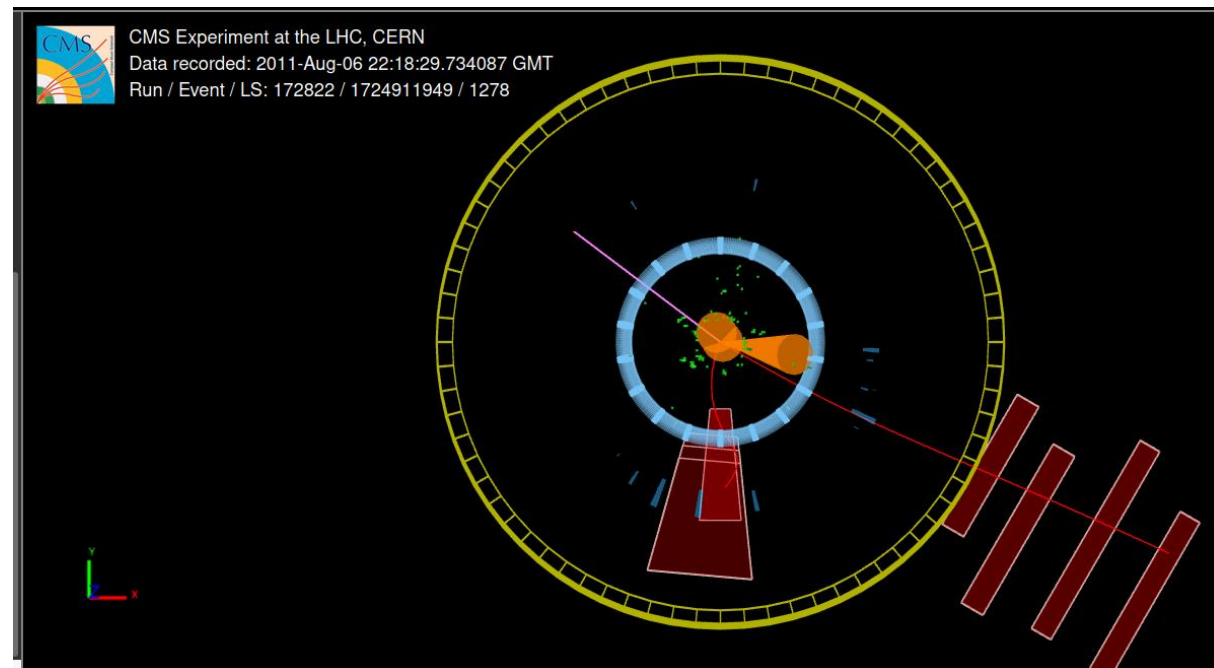
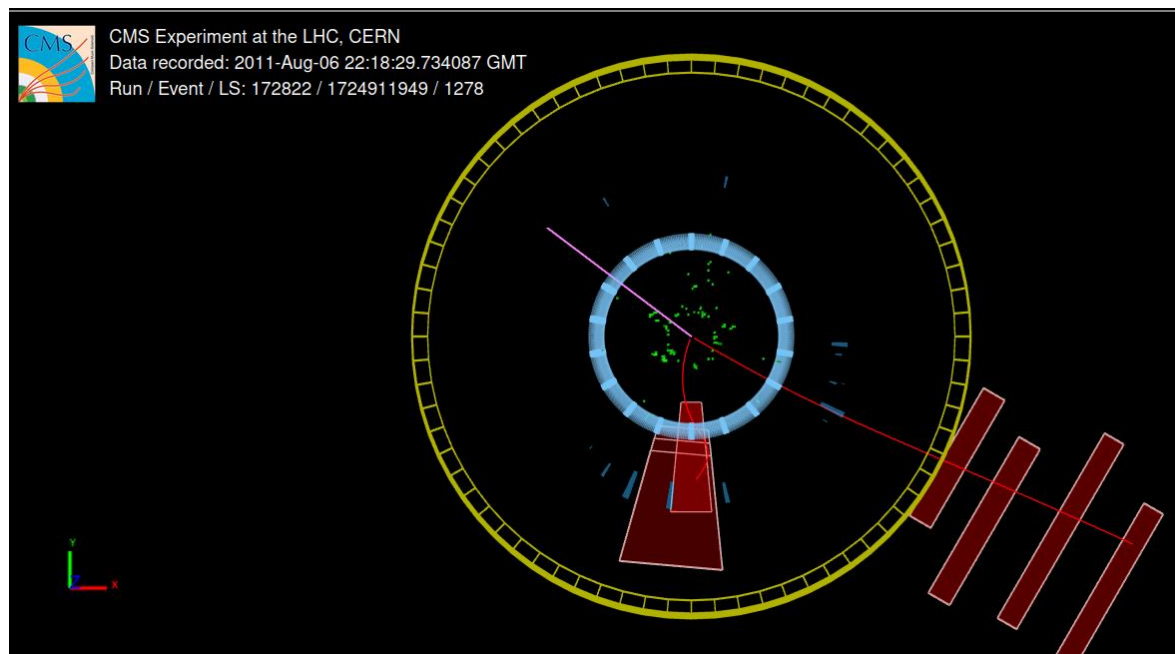
5

Event index	Event number	Final state	Primary state	Mass
28001	25.13-1	μμ	neutral	90.33

1. Отбелязваме 2 мюона
2. Отбелязваме, че се е разпаднала неутрално електрическа частица
3. Въвеждаме нейната маса
4. Въвеждаме "Next"
5. Записът се появява в таблицата и преминаваме към следващото събитие

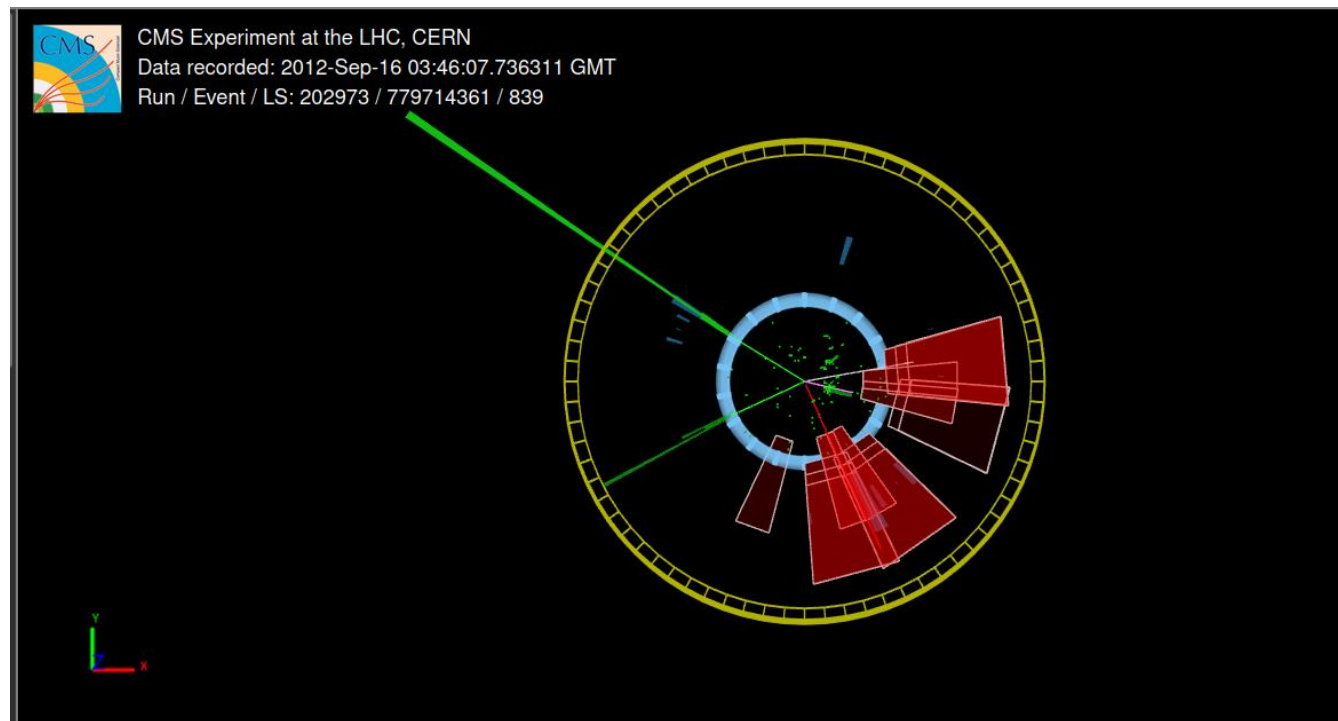
# W, Z или Zoo?

Zoo - събития, които не може да класифицираме към нито една от схемите на разпад, които изследваме



- Проверява се заряда на мюоните - и двата изглеждат с отрицателен заряд!
- Проверяваме напречните импулси на мюоните и липсващата енергия.
- Проверяваме за наличие на силна адронна активност.
- Взимаме решение - ако не сме сигурни, в таблицата с резултатите отбелязваме събитието като Zoo

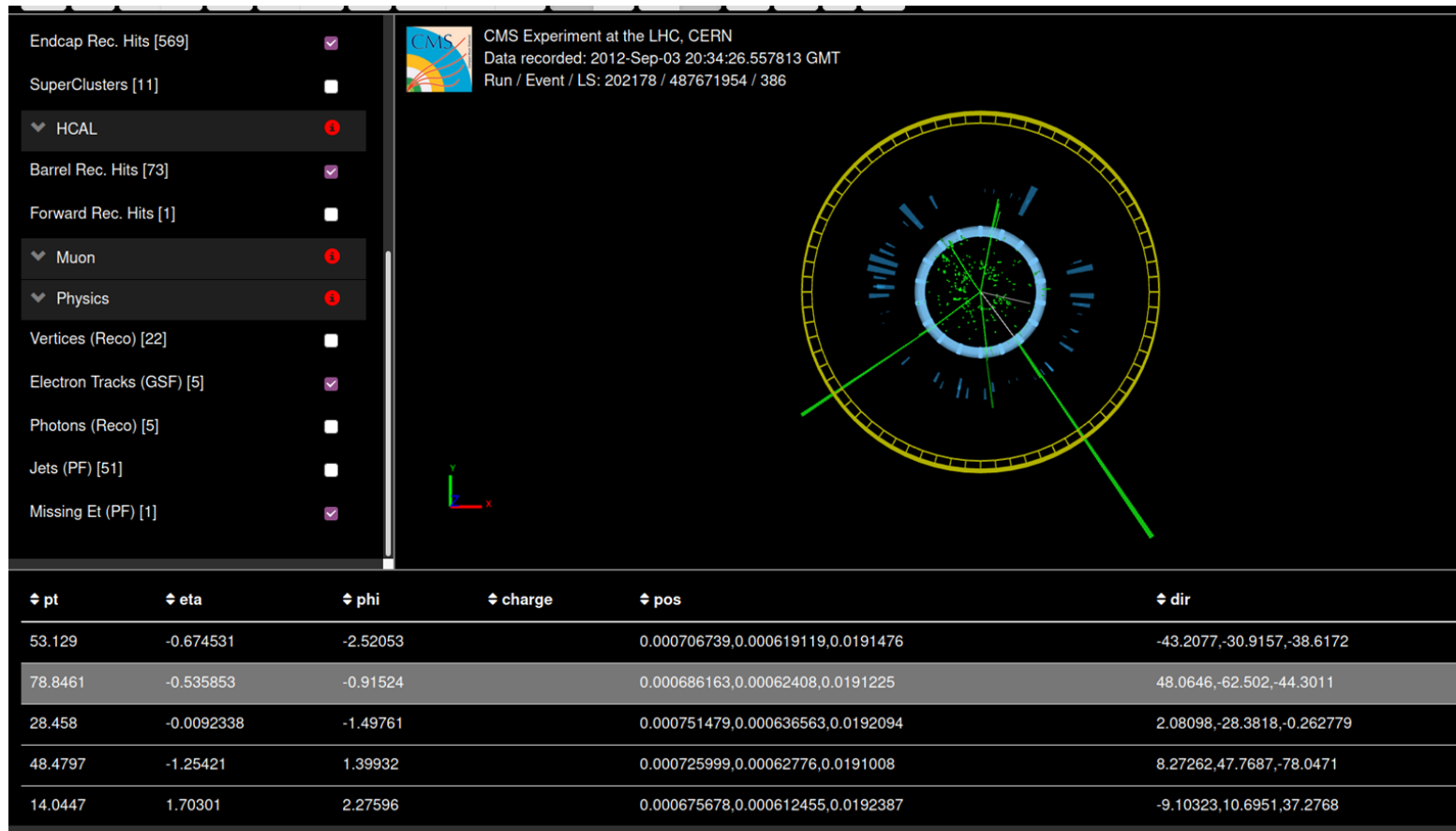
# Анализ - видове събития - 4 мюона - ( $X^0 \rightarrow 2e2\mu$ )



- Проверяваме поотделно дали общия заряд на двойката електрони и двойката мюони е нула. Ако да - пресмятаме масата на частицата-майка:
  - Избираме (кликваме) последователно четирите трека (2-та зелени на електроните и 2-та червени на мюоните) и натискаме клавиша M от клавиатурата (на латиница).
- Нанасяме резултатите в таблицата.



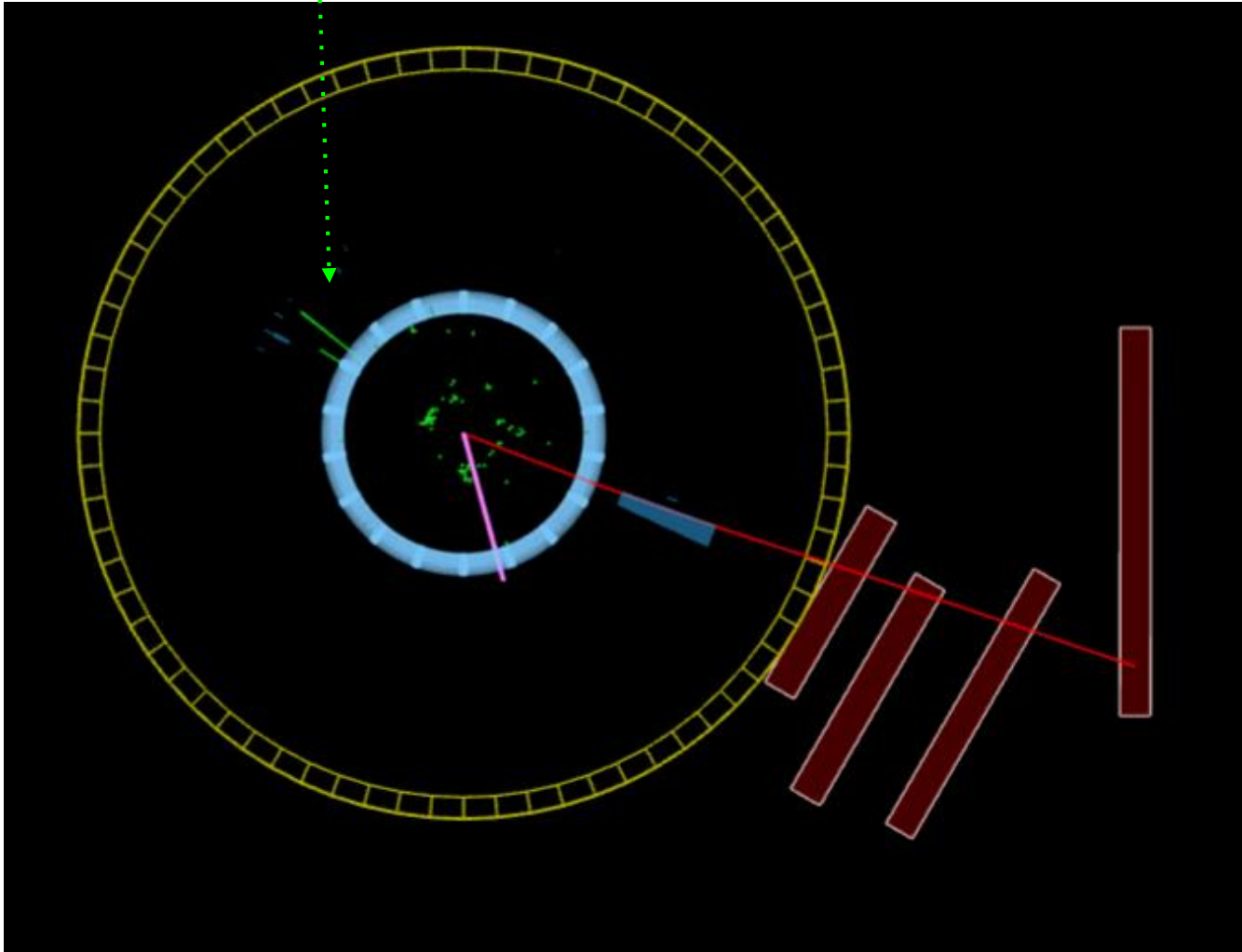
# Анализ - видове събития - 4 мюона - ( $X^0 \rightarrow 4e$ )



- В конкретния случай има 5 реконструирани електрона.
- Определянето на техния заряд не винаги е лесно.
- Кои точно 4 електронни трека да изберем?
- Друг критерий - избираме първите 4 с най-висок напречен импулс (pT).

- Импулсите на частиците се показват в таблицата под събитието, или ако кликнете върху съответния трек.
- Масата на частицата-майка се пресмята по вече обяснения начин.

# ФОТОНИ



- Анализът на събития с фотони не влиза в това упражнение.
- Но е добре да се знае, какво не разглеждаме.
- Фотоните са визуализирани като зелени трекове, които обаче не са регистрирани във вътрешния треков детектор.
- Примерът от ляво показва два фотонни, един мюонен трек и липсваща енергия.

# Полезни връзки

[Видео](#) - как се анализират данните в този урок ( 4 минути - на английски)

Таблица [CIMA](#)

[iSpyWebGl](#)

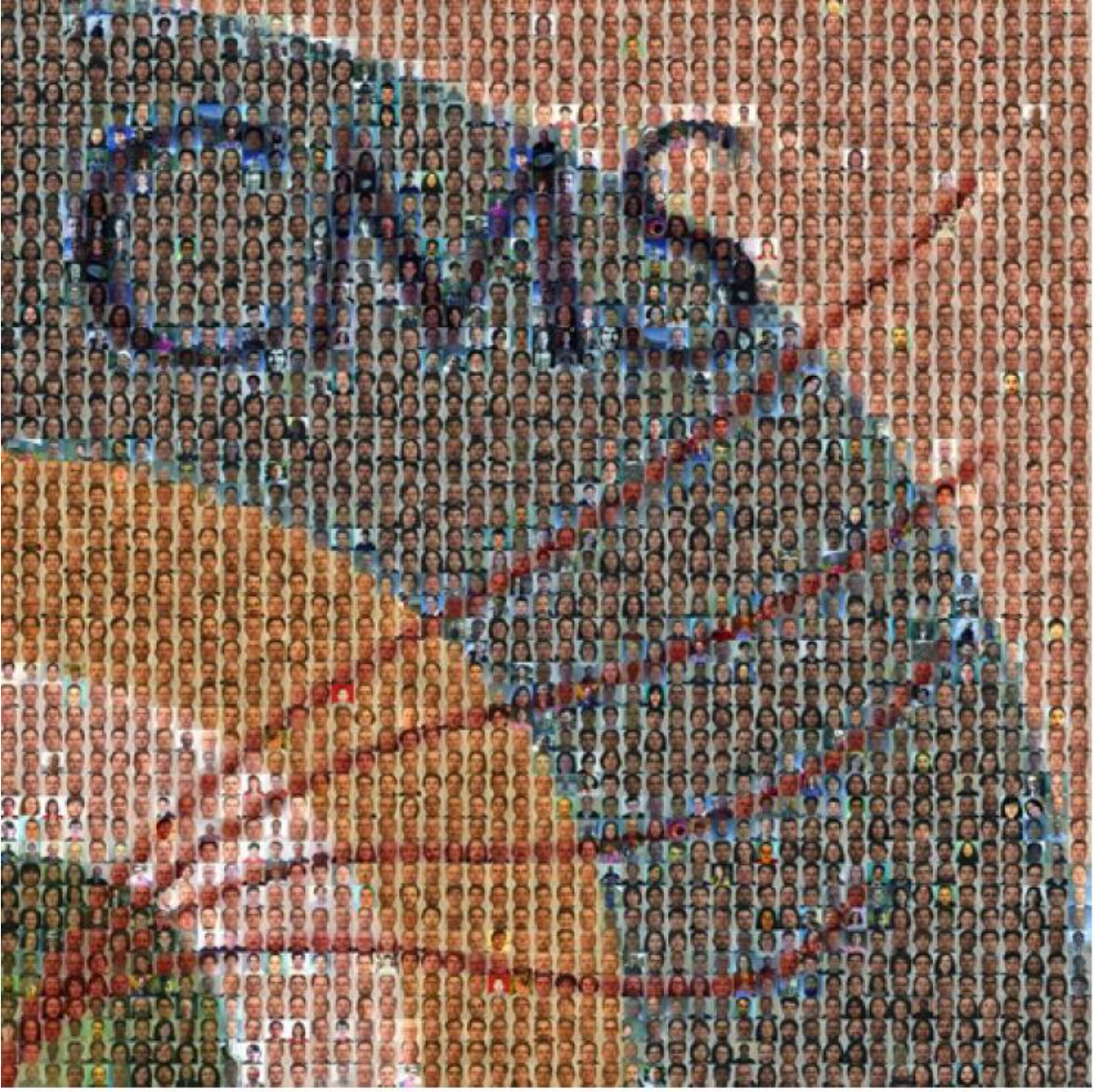
[WZH measurement](#)

[IPPOG](#)

[International Masterclasses](#)

[Quarknet](#)

[CERN Open Data Portal](#)



*Б  
Л  
А  
Г  
О  
Д  
А  
Р  
Я*