Cálculo da Massa Invariante e a Detecção e Identificação de Partículas no CMS

Estudantes: Diogo Marth

Giovanna Santos

Juliana Vicentino

Luigi Pieri

Monitora: Isabela Maietto Silvério

Índice

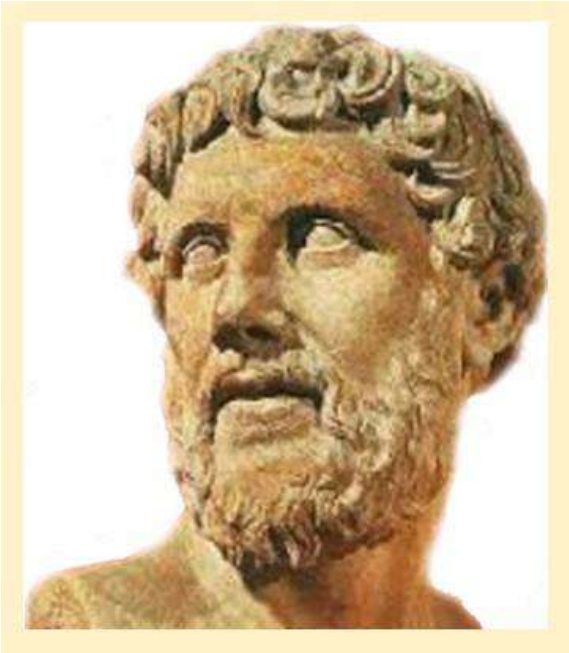
- Motivação e objetivos
- Introdução à Física de Partículas
- LHC e o experimento CMS
- Resultados
  - Cálculo da massa invariante
  - Resultados da análise: histograma de massa
- Conclusão
- Referências bibliográficas

Motivação e objetivos

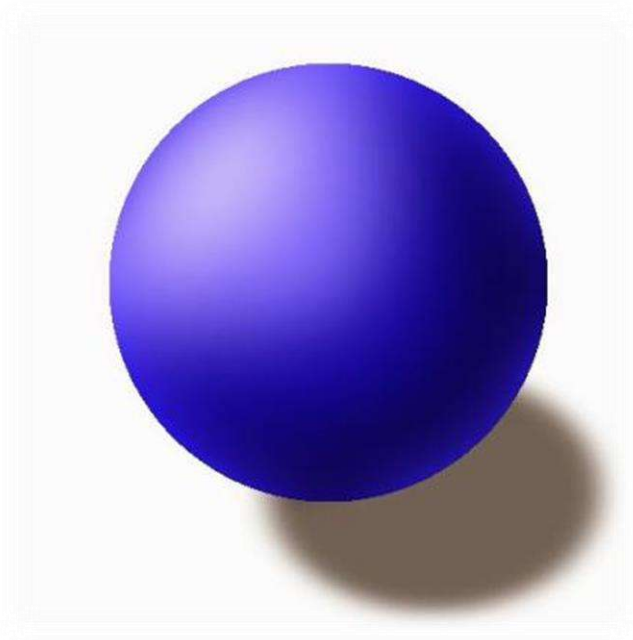
- Realizar um estudo introdutório em Física de Partículas
- Realizar um estudo introdutório de Relatividade Restrita
  - Notação quadrivetorial
  - Cálculo da Massa invariante a partir da conservação de quadrimomento
- Aprender sobre o Grande Colisor de Hádrons e o CMS
- Realizar uma análise de dados simplificada
  - Identificando e medindo partículas no experimento CMS a partir do decaimento do Bóson W e do Bóson Z

Do que a matéria é feita?

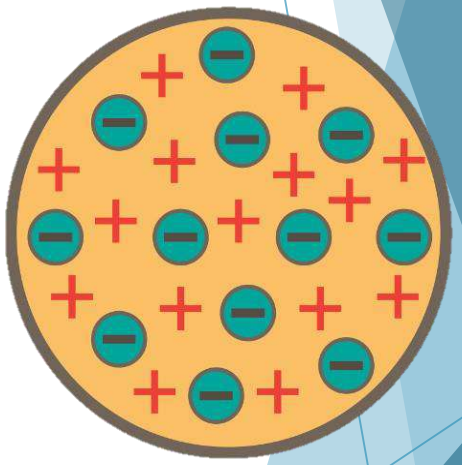
A Teoria Atômica



Demócrito



Modelo atômico de Dalton

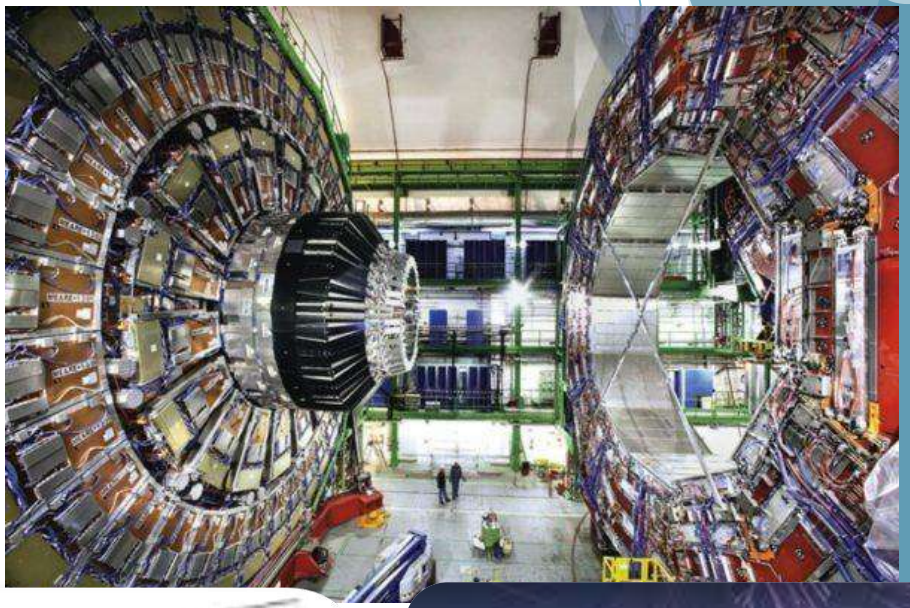


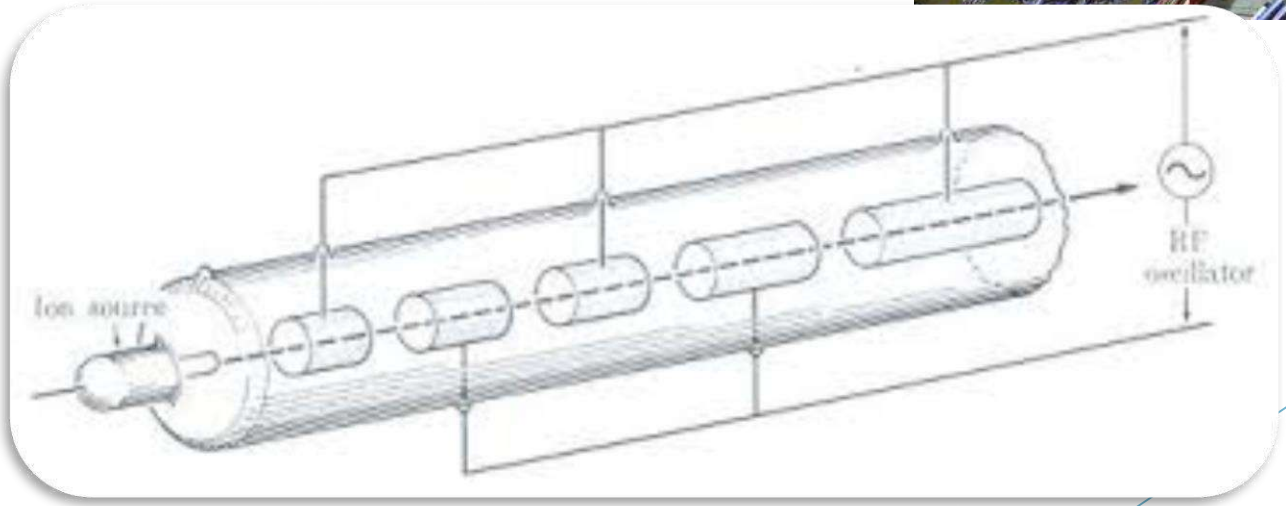
Modelo atômico de Thomson

Descobertas e experimentos

- As ideias sobre a constituição do átomo evoluíram em conjunto com a forma de identificar as novas partículas.

- Os resultados dos experimentos feitos nos aceleradores de partículas levaram os físicos a classificá-las de acordo com suas propriedades e interações.





Partículas Elementares e Modelo Padrão

O Modelo Padrão das interações forte, fraca e eletromagnética é a teoria que melhor descreve como as partículas se comportam sob as forças fundamentais da natureza. Esse modelo é a conquista de mais de um século de testes de diferentes propostas teóricas e vários experimentos na área de Física de Altas Energias. O Modelo Padrão tem apresentado excelentes resultados na descrição das partículas subatômicas e suas interações.

Léptons

Cada família é composta por um lépton carregado e por um neutrino, o qual interage apenas fracamente. Os **elétrons (e)** são estáveis e compõem a eletrosfera dos átomos, sendo os responsáveis pelas ligações químicas. O **múon (μ)** e o **tau (τ)** possuem características similares às do elétron, mas são instáveis e muito mais pesados, decaindo em partículas mais leves. Os **neutrinos (ν)** são extremamente leves, sendo produzidos em decaimentos nucleares e na fusão nuclear que ocorre no Sol.

< 0,000002 MeV, 0, ν_e, neutrino do elétron	< 0,19 MeV, 0, ν_μ, neutrino do múon	< 18,2 MeV, 0, ν_τ, neutrino do tau
0,511 MeV, -1, e, elétron	105,66 MeV, -1, μ, múon	1.776,86 MeV, -1, τ, tau

2,2 MeV, 2/3, u, up	1.280 MeV, 2/3, c, charm	173.100 MeV, 2/3, t, top
4,7 MeV, -1/3, d, down	96 MeV, -1/3, s, strange	4.180 MeV, -1/3, b, bottom

80.385 MeV, ±1, W, bóson W	125.090 MeV, 0, H, bóson H
91.188 MeV, 0, Z, bóson Z	
0, 0, γ, fóton	
0, 0, g, glúon	

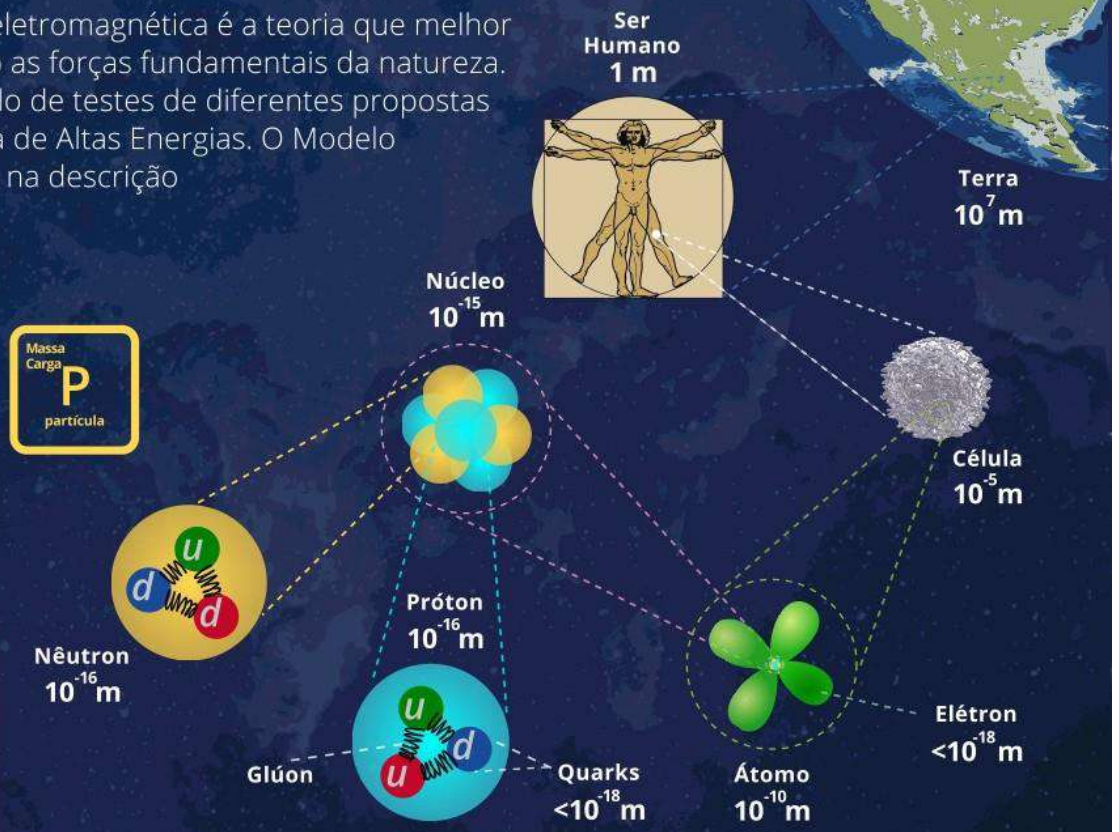
Bóson de Higgs

A existência do bóson de Higgs foi sugerida em meados da década de 1960 como uma proposta teórica para explicar o surgimento da massa das partículas elementares. Essa proposta só pôde ser confirmada quase 50 anos depois quando, em 2012, os experimentos CMS e Atlas do CERN obtiveram evidências claras de sua existência, completando o Modelo Padrão.

Massa
Carga
P
partícula

Bósons de Gauge

São responsáveis pela intermediação das interações fundamentais da Natureza. As partículas sentem cada uma das interações forte, eletromagnética e fraca através da troca constante dessas partículas. A interação gravitacional não é relevante no mundo subatômico: ela é uma centena de milhão de milhão de milhão de milhão de milhão de milhão (10^{-38}) de vezes mais fraca que as demais interações fundamentais.



Quarks

Quarks são partículas que interagem por meio das interações eletromagnética, fraca e forte. Possuem carga elétrica fracionária, além das "cargas de cor" associadas à interação forte. Eles formam os hádrons (três quarks ou um par quark-antiquark) e permanecem confinados, não sendo observados em estado livre. Os quarks da primeira família, **up (u)** e **down (d)**, formam os **prótons (uud)** e **nêutrons (udd)**.

Interações Fortes (g)

O **glúon (g)** é a partícula que faz a intermediação da interação forte e é trocado entre os quarks. A interação forte é 100 vezes mais intensa que a interação eletromagnética e seu alcance não vai além do tamanho do próton. É responsável por manter os quarks ligados, formando os hádrons, e seu efeito residual de longa distância mantém prótons e nêutrons unidos no núcleo atômico.

Interações Eletromagnéticas (γ)

O **fóton (γ)** é o quantum do campo eletromagnético. Partícula sem massa e sem carga, é responsável pela interação entre as partículas eletricamente carregadas. Toda radiação eletromagnética, desde as ondas de rádio, passando pela luz visível, até os raios ultravioleta e gama, é constituída por fótons de diferentes energias.

Interações Fracas (W e Z)

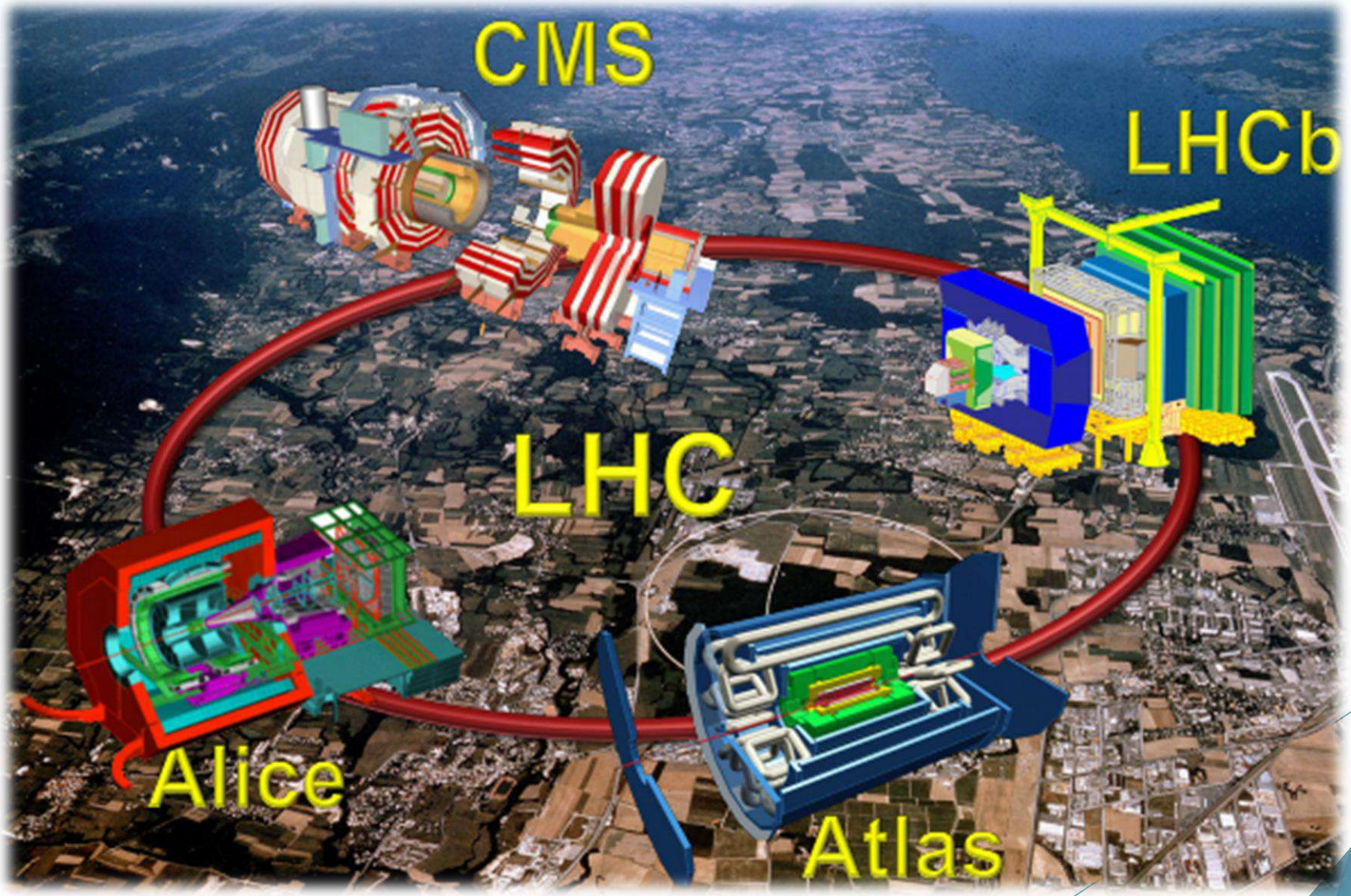
A interação fraca é intermediada pelos bósons W^+, W^- e Z^0. Ela alcança distâncias mil vezes menores que o núcleo atômico, sendo 10.000 vezes mais fraca que a interação eletromagnética. A interação fraca é responsável pelo decaimento beta no qual um nêutron se transforma em um próton, emitindo um elétron e seu antineutrino. Desempenha importante papel na geração da energia das estrelas.

Para obter mais informações sobre os conceitos apresentados neste cartaz, acesse:
www.sprace.org.br

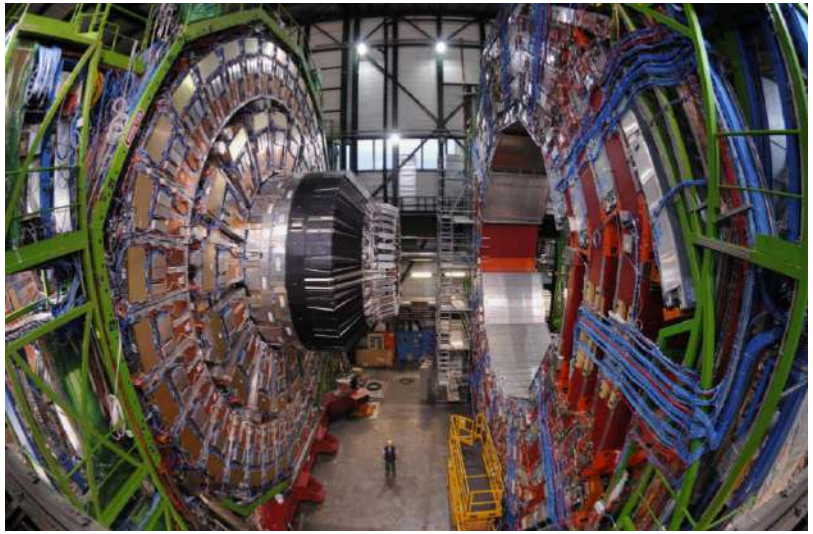
Realização: SPRACE
Apoio: FAPESP

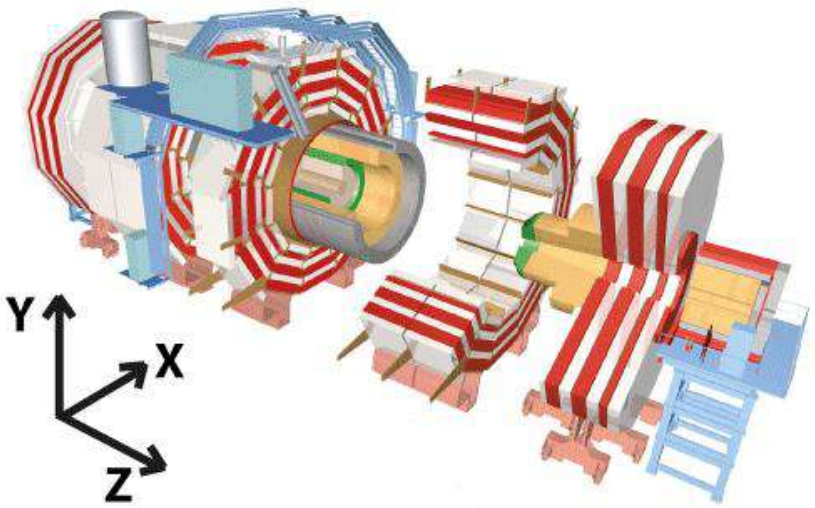
ICTP SAIFR

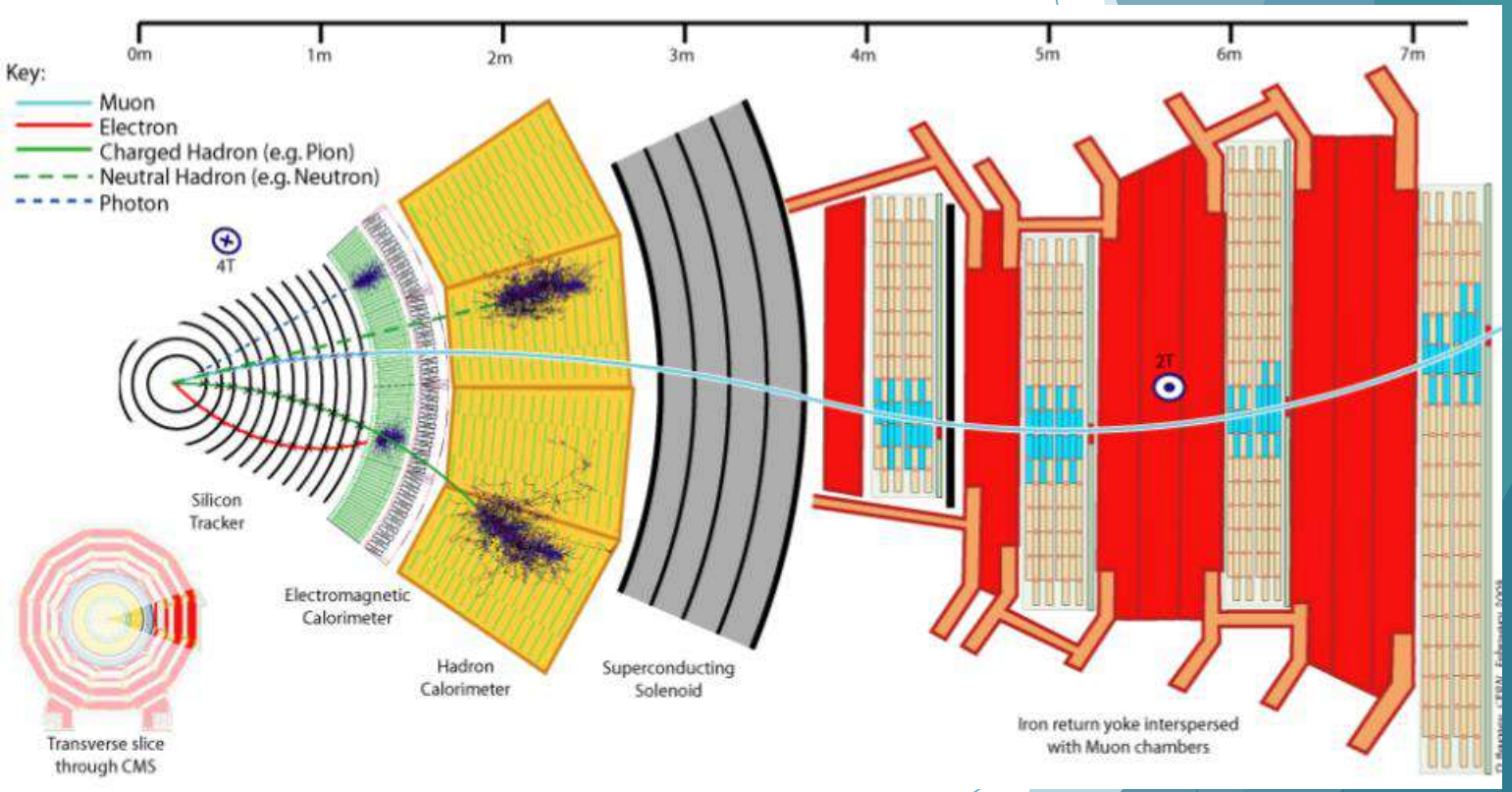
LHC (Large Hadron Collider)



CMS (Compact Muon Solenoid)



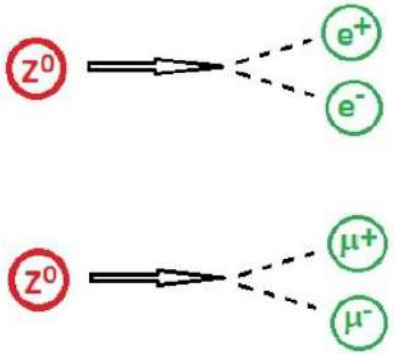


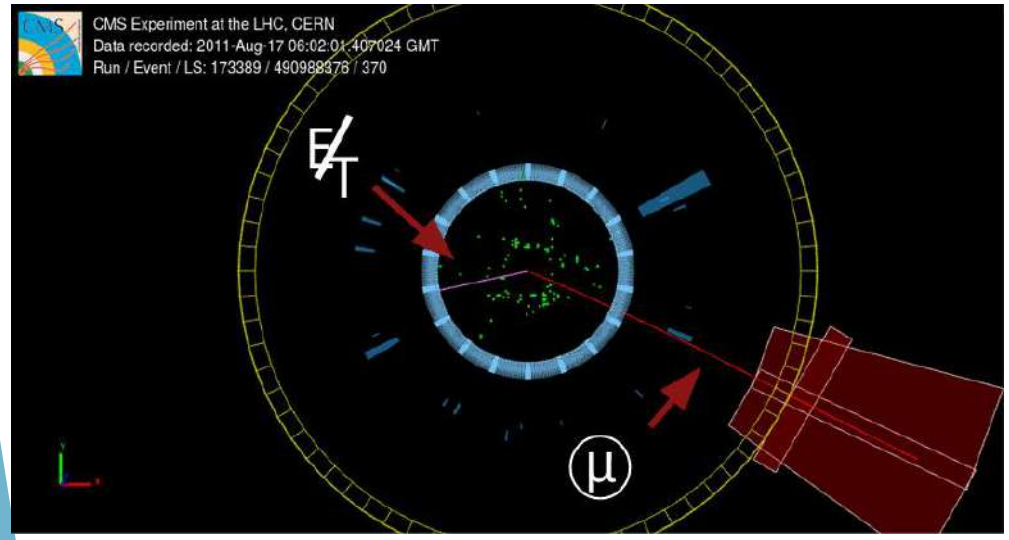


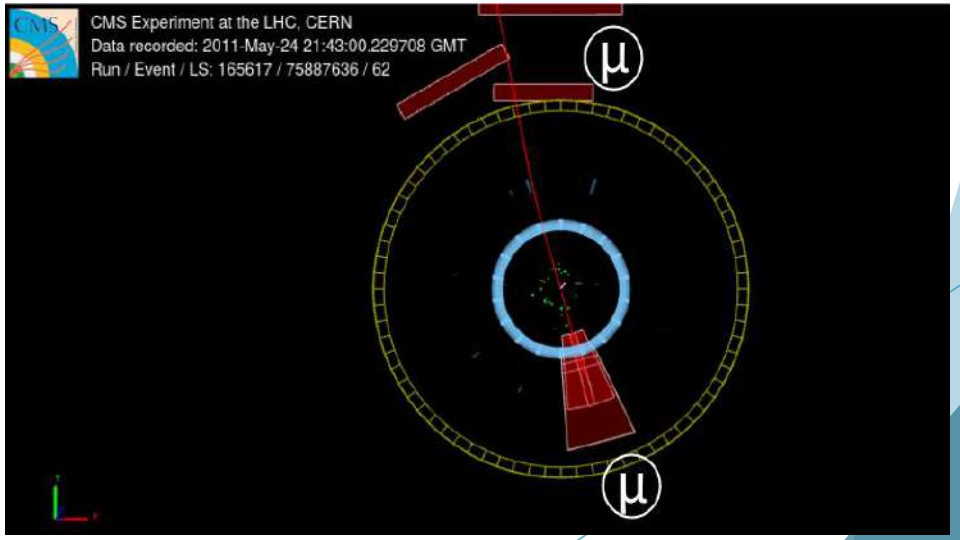
Identificar e medir partículas no CMS

Decaimento Leptônico do W

Decaimento Leptônico do Z

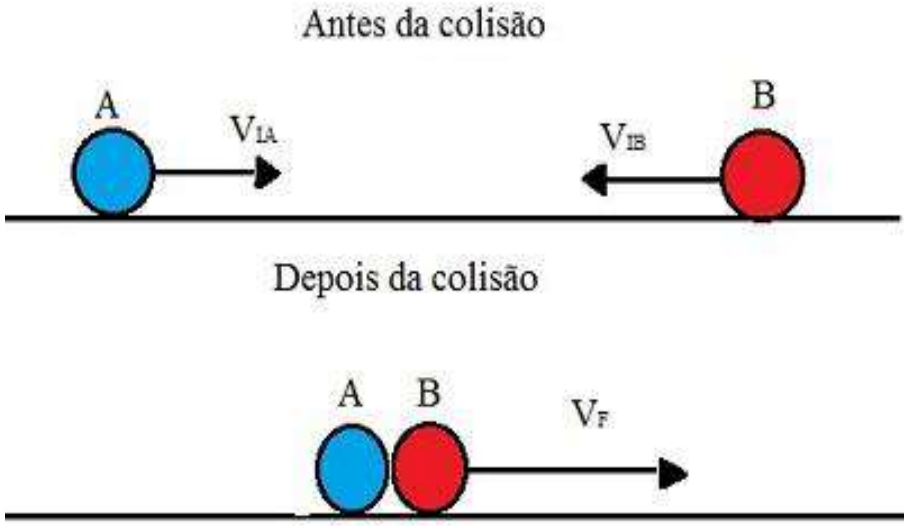






Resultados:
Cálculo da massa invariante

- Caso não-relativístico: conservação de momento linear



$$Pi = Pf$$

$$m_A V_A - m_B V_B = (m_A + m_B) V_f$$

Para casos de partículas relativísticas: Quadrivetores e Notação de Einstein

$$X^{\mu} = [X^0, X^1, X^2, X^3] = [ct, x, y, z]$$
$$X_{\mu} = [X_0, X_1, X_2, X_3] = [ct, -x, -y, -z]$$

- O produto entre esses quadrivetores pode ser realizado, a partir da notação de Einstein

$$X^{\mu} \cdot X_{\mu} = [ct, x, y, z] \cdot [ct, -x, -y, -z]$$
$$X^{\mu} \cdot X_{\mu} = c^2t^2 - x^2 - y^2 - z^2$$

Quadrivelocidade e conservação de quadrimomento

- Análogo ao que foi visto no caso não-relatívisto, podemos assumir que o quadrimomento será:

$$p^{\mu} = mU^{\mu}$$

- Onde:

$$U^{\mu} = \frac{\Delta x^{\mu}}{\Delta t'} = \gamma \frac{\Delta x^{\mu}}{\Delta t} \text{ onde } \gamma = 1 \div \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}$$

$$U^{\mu} = \gamma[c\frac{\Delta t}{\Delta t}, \frac{\Delta x}{\Delta t}, \frac{\Delta y}{\Delta t}, \frac{\Delta z}{\Delta t}] = \gamma[c, v_x, v_y, v_z]$$

Definição de quadrimomento

$$p^{\mu} = m\gamma[c, v_x, v_y, v_z] = M[c, v_x, v_y, v_z]$$

- Onde:

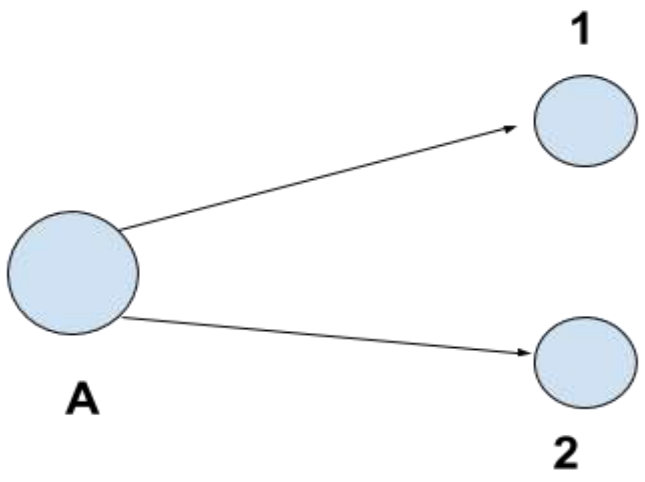
$$M = m\gamma$$

- Então, pode-se escrever o quadrimomento como:

$$\boxed{p^{\mu} = [Mc, Mv_x, Mv_y, Mv_z] = [\tfrac{E}{c}, p_x, p_y, p_z]}$$

Decaimento e a conservação de quadrimomento

- Caso relativístico: conservação do quadrimomento



$$p_A^\mu = p_1^\mu + p_2^\mu$$

Decaimento e a conservação de quadrimomento

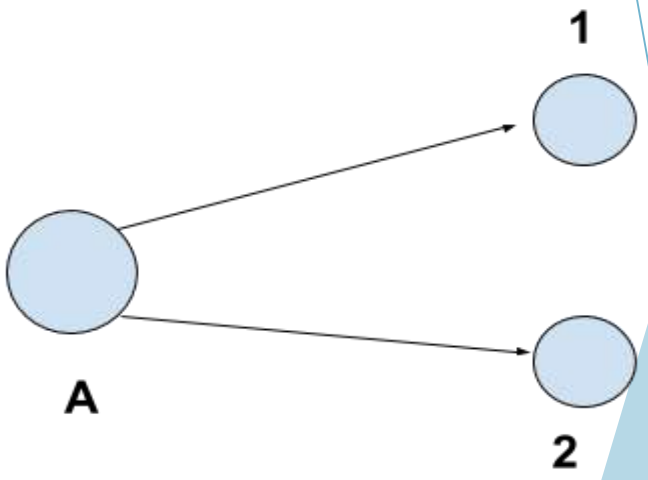
- Realizando o produto entre os quadrimomentos, obtém-se:

$$(p_A^\mu)^2 = (p_1^\mu + p_2^\mu)^2$$

$$p_A^\mu \cdot p_{\mu A} = (p_1^\mu + p_2^\mu)(p_{\mu 1} + p_{\mu 2})$$

$$p_A^\mu \cdot p_{\mu A} = p_1^\mu \cdot p_{\mu 1} + p_2^\mu p_{\mu 1} + p_1^\mu p_{\mu 2} + p_2^\mu \cdot p_{\mu 2}$$

$$p_A^\mu \cdot p_{\mu A} = p_1^\mu \cdot p_{\mu 1} + 2p_1^\mu \cdot p_{\mu 2} + p_2^\mu \cdot p_{\mu 2}$$



Agora vamos precisar ajustar a expressão anterior...

- Sabe-se que:

$$(p^{\mu})^2 = (mU^{\mu})^2$$
$$p^{\mu} \cdot p_{\mu} = (mU^{\mu})(mU_{\mu})$$

- Abrindo a expressão da quadri-velocidade e realizando o produto:

$$p^{\mu} \cdot p_{\mu} = m^2\gamma^2[c, v_x, v_y, v_z][c, -v_x, -v_y, -v_z]$$
$$p^{\mu} \cdot p_{\mu} = m^2\gamma^2(c^2 - v_x^2 - v_y^2 - v_z^2)$$

- Multiplicando e dividindo por c^2, obtém-se:

$$p^{\mu} \cdot p_{\mu} = m^2\gamma^2(c^2 - v^2) \cdot \frac{c^2}{c^2}$$
$$p^{\mu} \cdot p_{\mu} = m^2c^2(1 - \frac{v^2}{c^2}) \cdot \frac{1}{(1-\frac{v^2}{c^2})}$$

$$\boxed{p^{\mu} \cdot p_{\mu} = m^2c^2}$$

Cálculo da massa invariante

- Retornando esses resultados na expressão:

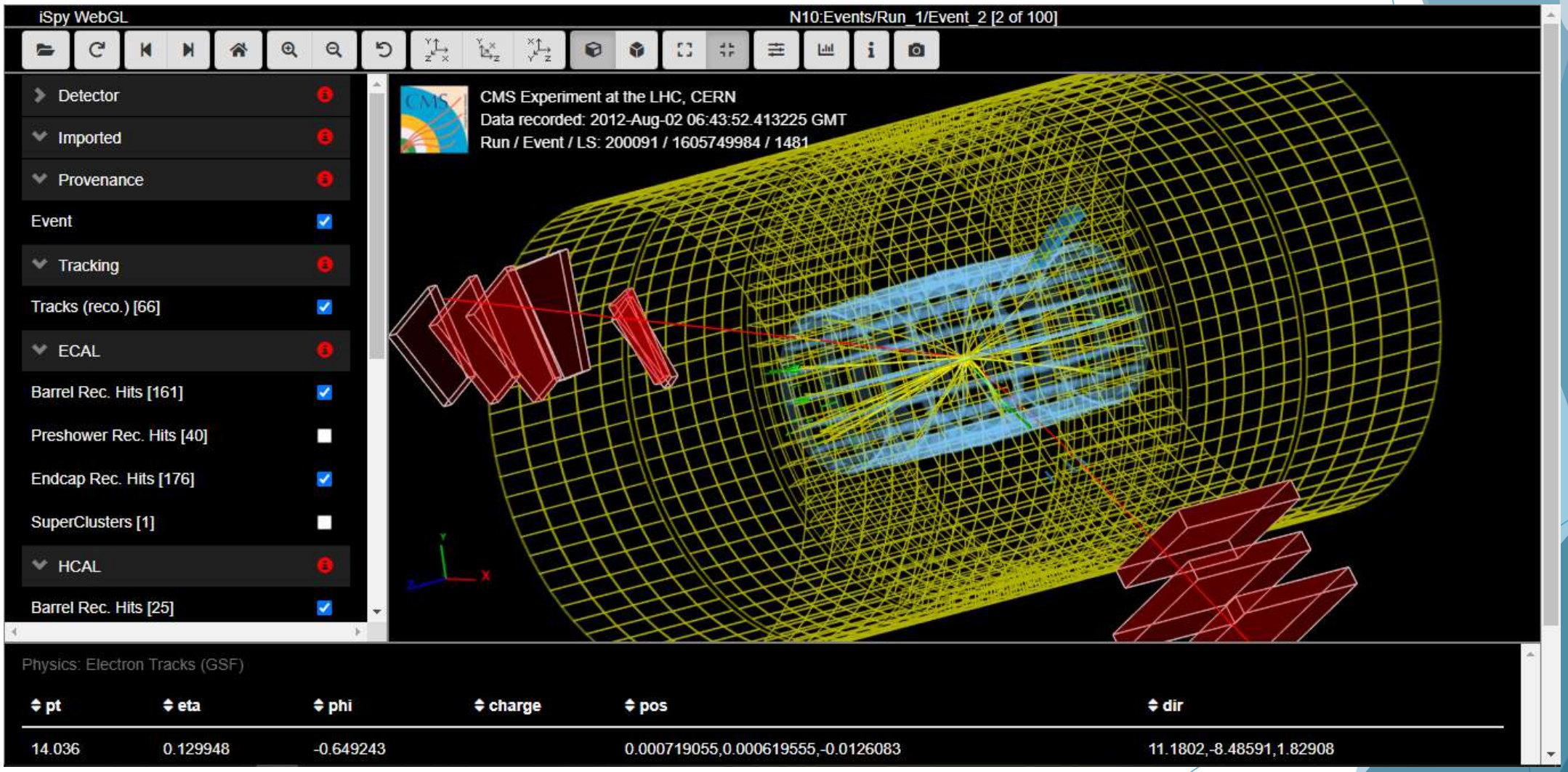
$$p^{\mu}_{A} \cdot p_{\mu A} = p^{\mu}_{1} \cdot p_{\mu 1} + 2p^{\mu}_{1} \cdot p_{\mu 2} + p^{\mu}_{2} \cdot p_{\mu 2}$$

- Calcula-se a expressão para a massa invariante:

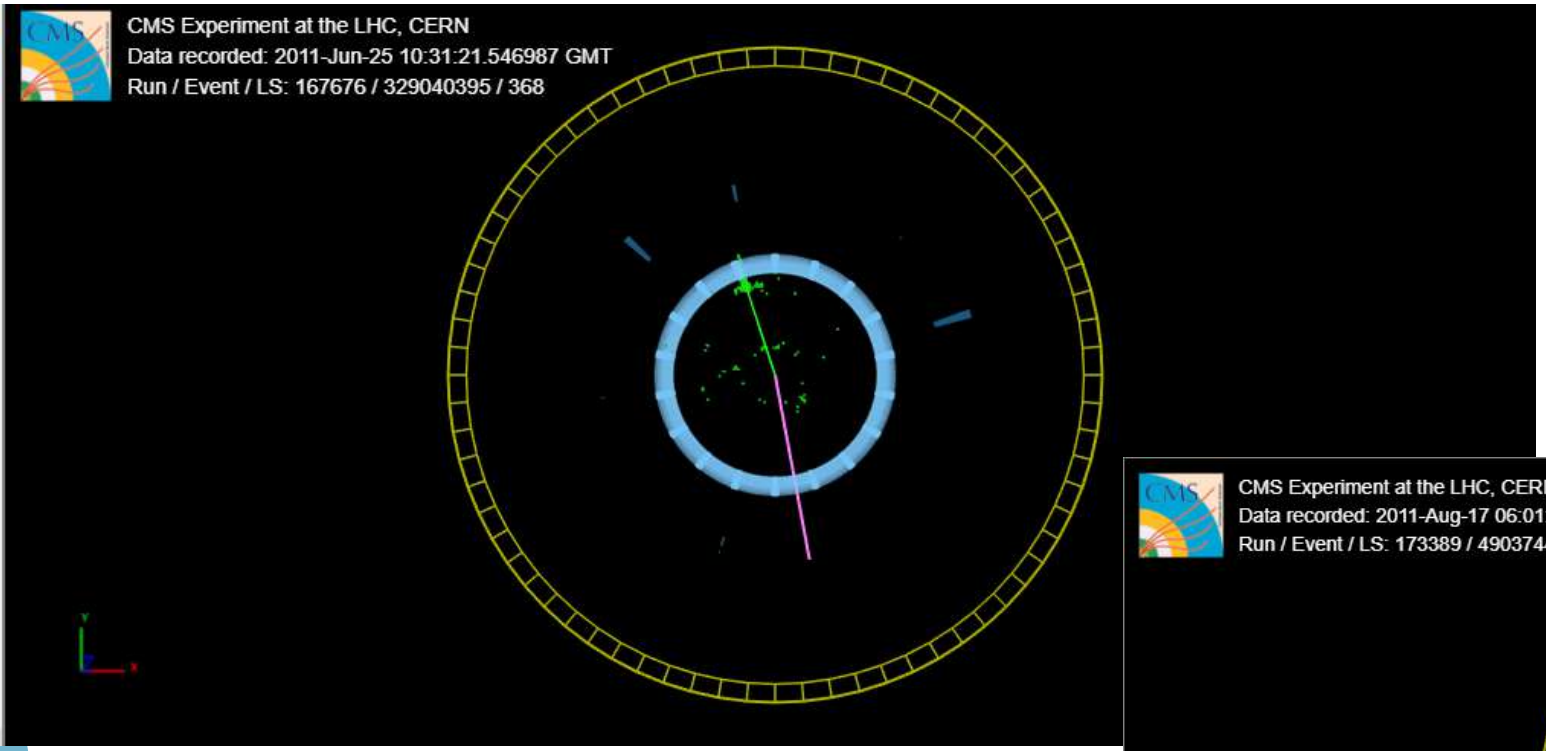
$$m_{A}^{2}c^{2} = m_{1}^{2}c^{2} + m_{2}^{2}c^{2} + 2([\frac{E_1}{c}, p_{1x}, p_{1y}, p_{1z}][\frac{E_2}{c}, -p_{2x}, -p_{2y}, -p_{2z}])$$

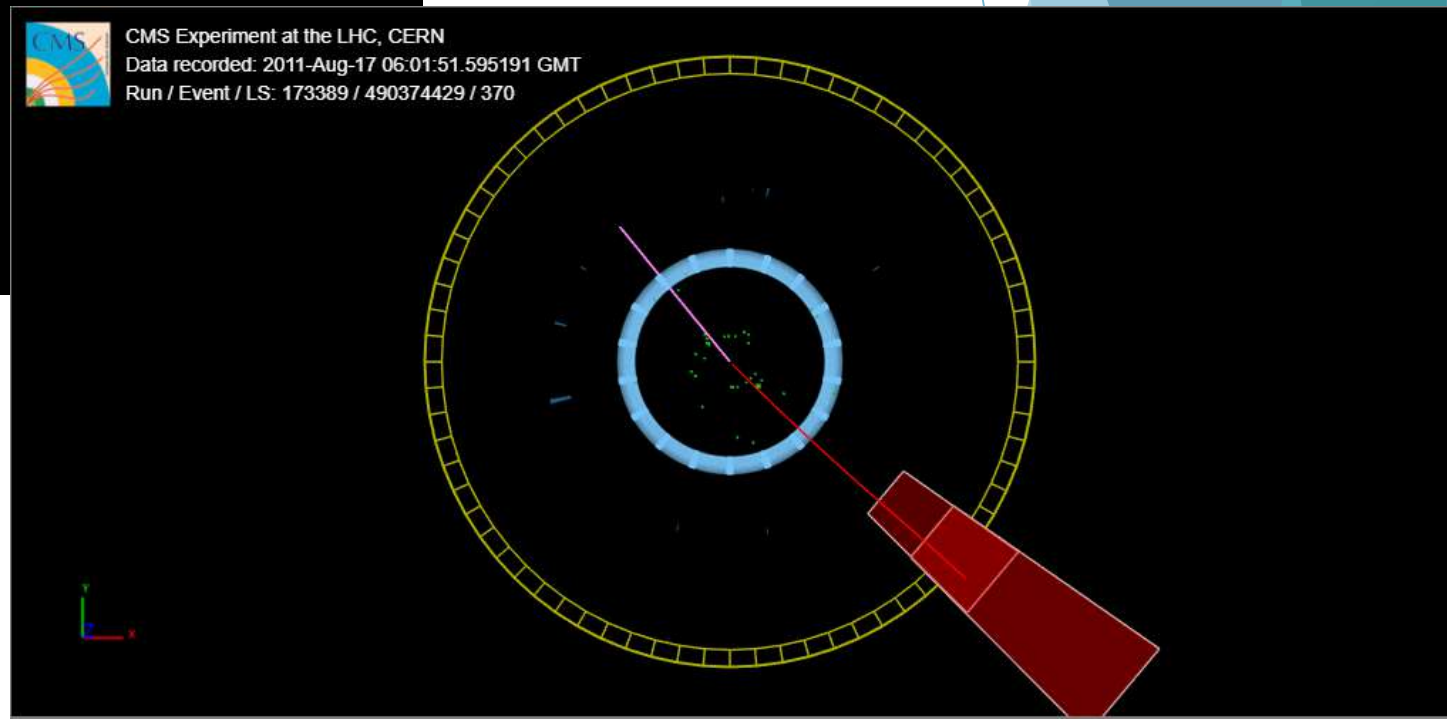
$$\boxed{m_{A}^{2}c^{2} = m_{1}^{2}c^{2} + m_{2}^{2}c^{2} + 2(\frac{E_1 E_2}{c^2} - p_{1x}p_{2x} - p_{1y}p_{2y} - p_{1z}p_{2z})}$$

Resultados: Análise pelo software iSpy

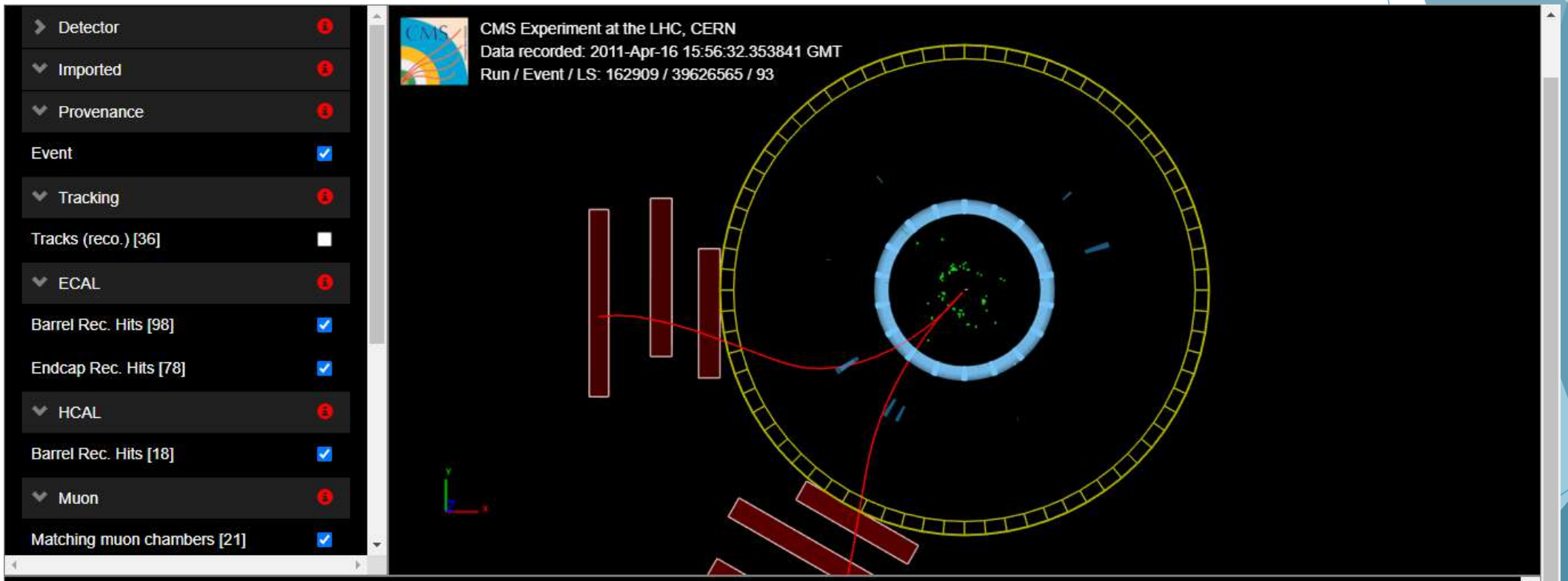


Detecções de bósons W





Detecção de partículas neutras e cálculo da massa invariante



Physics: Global Muons (Reco)

pt	charge	rp	phi	eta	E	px	py	pz	calo_energy
4.22969		0.000825936,0.000349391,0.0336802	-2.24304	0.307384	4.43763	-2.634	-3.30944	1.32071	0
6.81806		0.000748481,0.000420113,0.0337746	-2.36473	-0.549133	7.85712	-4.86205	-4.77979	-3.93505	0

Armazenamento dos dados no CIMA (CMS Instrument for Masterclass Analysis)

Back | Events Table (Group 10.1) | Mass Histogram (SPRACE22May2020) | Results (SPRACE22May2020) | Event Display

Masterclass: SPRACEonlineSaoPaolo-22May2020
Location: SPRACE22May2020
Group: 10.1

Select Event

Event index: 101

Event number: 10.1-101

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

GeV/c²

Next

Event index	Event number	Final state	Primary state	Mass
6100	10.1-100	2e	neutral	330.04
6099	10.1-99	μμ	neutral	11.09
6098	10.1-98	μμ	neutral	3.71
6097	10.1-97	eν	W±	
6096	10.1-96	μν	W+	
6095	10.1-95	μμ	neutral	3.05
6094	10.1-94	eν	W-	
6093	10.1-93		zoo	
6092	10.1-92	μν	W+	
6091	10.1-91	eν	W-	
6090	10.1-90		zoo	
6089	10.1-89	μμ	neutral	7.3

Número de partículas detectadas

Total:

Group	e	μ	W+	W-	W±	Neutral	Zoo	Total
All	422	458	227	195	82	341	58	903

Só dois bósons de Higgs ☹

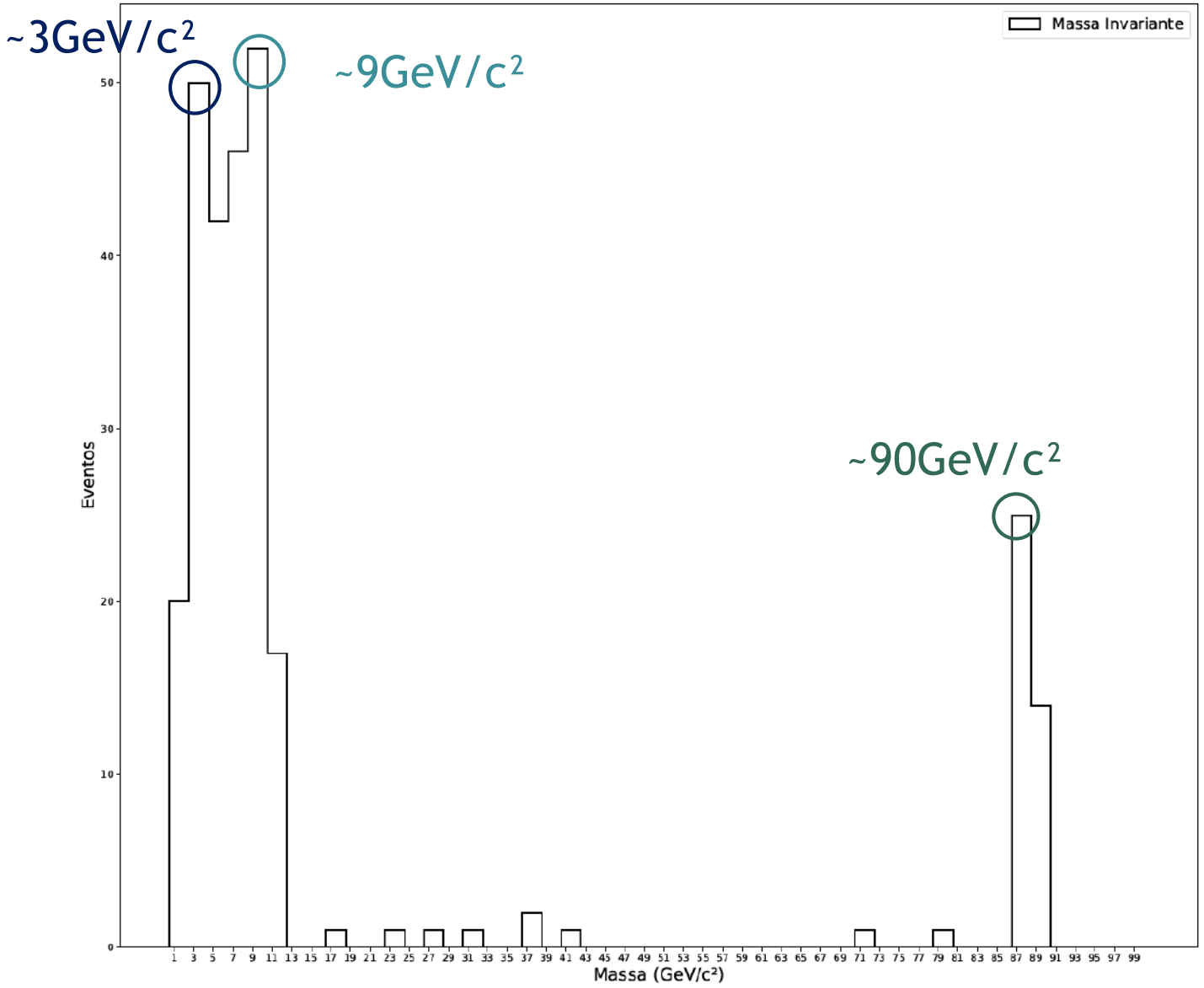
Evento - grupo 10.1	Massa experimento (GeV/c²)	Massa calculada (GeV/c²)	Evento - grupo 10.2	Massa experimento (GeV/c²)	Massa calculada (GeV/c²)
1	4,79	4,785	2	3,72	3,721
5	6,87	6,869	11	3,71	3,441
6	88,81	88,657	14	6,3	6,306
9	9,72	9,770	15	2,71	2,712
11	10,24	10,239	16	11,09	11,138
14	4,84	4,836	17	6,87	6,869
19	7,13	7,128	18	4,79	4,785
27	6,18	6,229	19	6,74	6,735
34	3,05	2,633	23	3,05	2,633
37	10,29	10,134	28	10,29	10,134
40	9,67	9,668	30	10,27	10,284
41	2,13	2,130	31	3,05	3,081
46	2,71	2,712	38	10,24	10,239
49	3,72	3,721	39	9,67	9,668
56	2,28	2,285	43	11,22	11,222
57	7,34	7,338	45	7,34	7,338
58	6,74	6,735	46	4,84	4,836
66	11,22	11,222	50	2,28	2,285
69	88,47	88,164	56	5,46	5,500
72	5,46	5,500	61	88,81	88,657
73	87,15	87,151	66	9,69	9,686
81	10,27	10,284	67	6,18	6,230
83	6,3	6,306	77	37,5	37,497
87	9,69	9,686	80	88,47	88,164
89	7,3	7,364	86	2,13	2,130
95	3,05	3,081	92	7,3	7,364
98	3,71	3,441	94	9,72	9,770
99	11,09	11,138	99	87,15	87,151
100	330,04	330,038			

Evento (Grupo 100.1)	Massa Experimento (GeV/c²)	Massa Calculada (GeV/c²)	Evento (Grupo 100.11)	Massa Experimento (GeV/c²)	Massa Calculada (GeV/c²)
9	7.13	7,128	3	2.28	2,285
13	90.33	90,345	4	88.35	88,352
14	9.67	9,668	6	10.24	10,239
15	7,34	7,338	7	90.33	90,345
18	88.81	88,657	11	8.71	8,719
19	6.74	6,735	19	2.73	2,730
21	4.84	4,836	20	3.72	3,721
23	10.24	1,024	24	4.84	4,836
25	5.46	5,500	28	2.13	2,130
27	87.15	87,151	30	10.29	10,134
29	2.13	2,131	32	10.27	10,284
31	2.28	2,285	34	11.22	11,223
32	2.71	2,702	38	6.74	6,735
44	6.30	6,306	40	7.30	7,363
45	11.09	11,138	44	87.15	87,151
46	3.05	2,633	58	7.13	7,127
48	4.79	4,785	64	88.47	88,164
52	11.22	11,222	67	5.46	5,498
59	7.30	7,364	73	6.18	6,228
60	88.35	88,352	75	9.69	9,686
66	6.18	6,230	77	3.71	3,438
70	3.72	3,721	80	2.71	2,712
75	10.29	10,134	83	9.67	9,668
79	3.71	3,441	85	7.34	7,338
83	6.87	6,869	87	6.30	6,304
86	2.73	2,730			
87	3.05	3,081			
88	37.5	37,497			
90	8.71	8,719			
97	88.47	88,164			

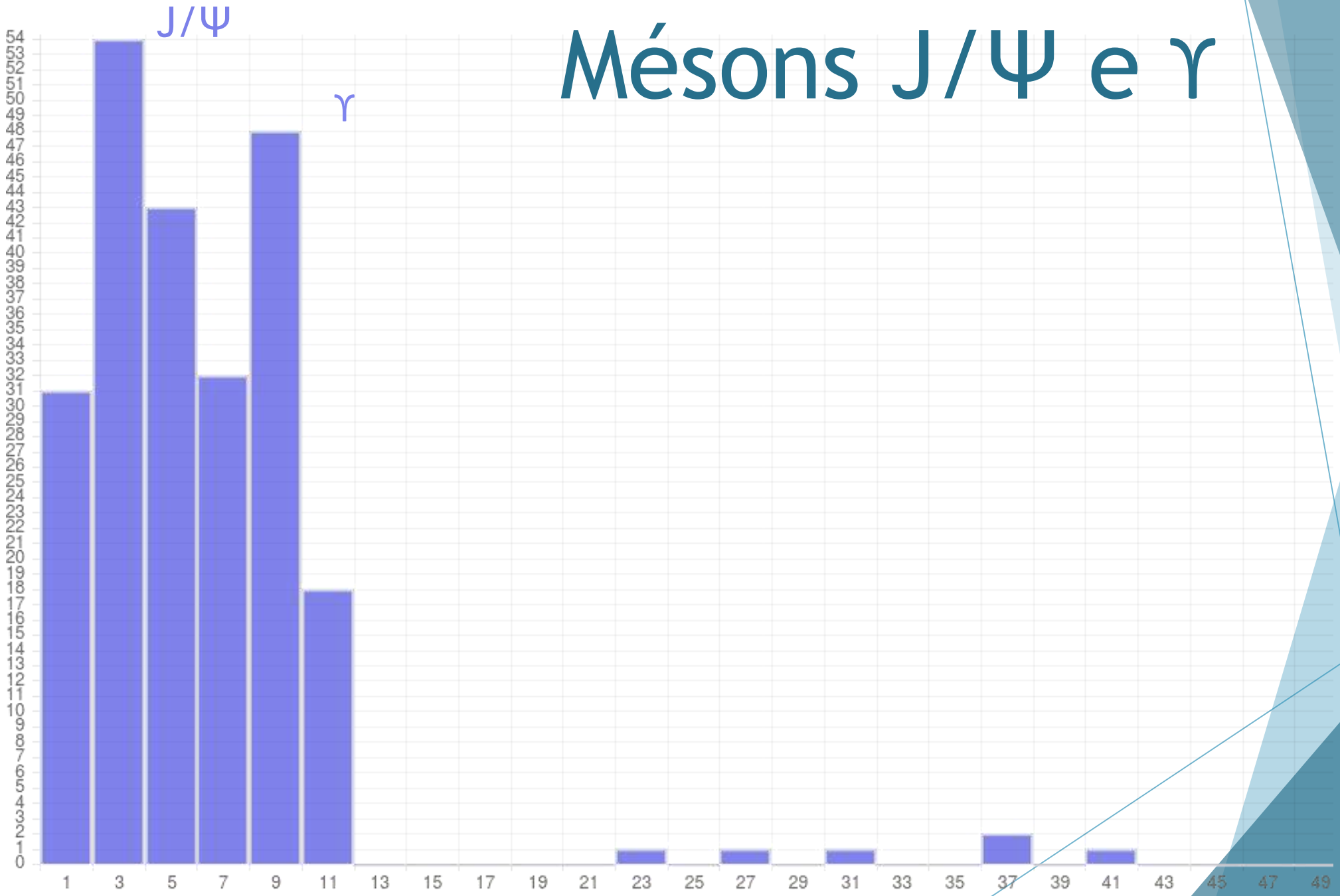
Evento (Grupo 100.2)	Massa Experimento (GeV/c²)	Massa Calculada (GeV/c²)	Evento (Grupo 100.21)	Massa Experimento (GeV/c²)	Massa Calculada (GeV/c²)
1	2,13	2,13	1	6,18	6,229
2	7,3	7,364	5	7,13	7,128
3	88,81	88,657	13	10,24	10,239
8	3,05	2,632	15	9,69	9,686
12	8,71	8,707	16	3,05	3,081
15	90,33	90,345	22	4,84	4,836
16	3,71	3,441	27	2,28	2,285
17	2,71	1,917	29	88,35	88,351
18	4,84	4,836	33	8,71	8,719
24	6,18	6,229	36	6,74	6,735
25	3,72	3,721	39	11,09	11,138
31	10,27	10,294	43	2,73	2,73
35	87,15	87,151	47	3,05	2,632
37	5,46	5,500	48	7,3	7,415
38	6,74	6,735	49	11,22	11,222
41	7,34	7,338	50	3,71	3,441
47	11,09	11,138	51	88,47	88,164
49	11,22	11,222	54	88,81	88,657
50	10,24	10,239	55	7,3	7,337
51	7,13	7,128			
52	9,72	9,77			
56	3,05	3,081			
57	2,73	2,728			
60	2,28	2,285			
62	9,67	9,668			
65	9,69	9,686			
73	6,87	6,869			
76	88,47	88,164			
81	88,35	88,351			
86	4,79	78,542			
93	6,3	6,306			
94	179,18	179,184			
97	10,29	18,132			
99	41,39	41,391			

Eventos (100.3)	Massa Experimento (GeV/c²)	Massa Calculada (GeV/c²)	Eventos (100.31)	Massa Experimento (GeV/c²)	Massa Calculada (GeV/c²)
5	7,13	7,128	1	6,87	6,869
7	4,79	4,806	7	4,79	4,785
10	88,47	88,164	9	2,73	2,729
14	6,18	6,229	23	10,24	10,239
15	11,22	11,222	32	6,74	6,735
16	10,24	10,239	34	6,18	6,229
18	3,05	2,633	40	10,27	10,284
20	3,05	3,081	42	3,71	3,441
21	2,73	2,729	43	4,84	4,836
22	7,34	7,338	44	11,22	11,222
28	5,46	5,5	48	88,35	88,351
30	90,33	90,345	51	2,28	2,285
31	10,29	10,134	52	6,3	6,306
35	3,41	3,412	53	7,13	7,128
36	88,35	88,351	55	3,05	3,081
37	7,3	7,364	63	7,3	7,364
38	72,36	72,365			
41	87,15	87,151			
49	3,72	3,721			
54	2,71	2,711			
55	3,71	3,441			
56	10,27	10,284			
57	8,71	8,719			
63	4,84	4,836			
65	6,3	6,306			
67	2,28	2,285			
75	9,67	9,668			
78	9,69	9,686			
79	11,09	11,138			
80	88,81	88,657			
92	6,74	6,735			
93	9,72	9,77			
96	2,13	2,13			
97	6,87	6,869			

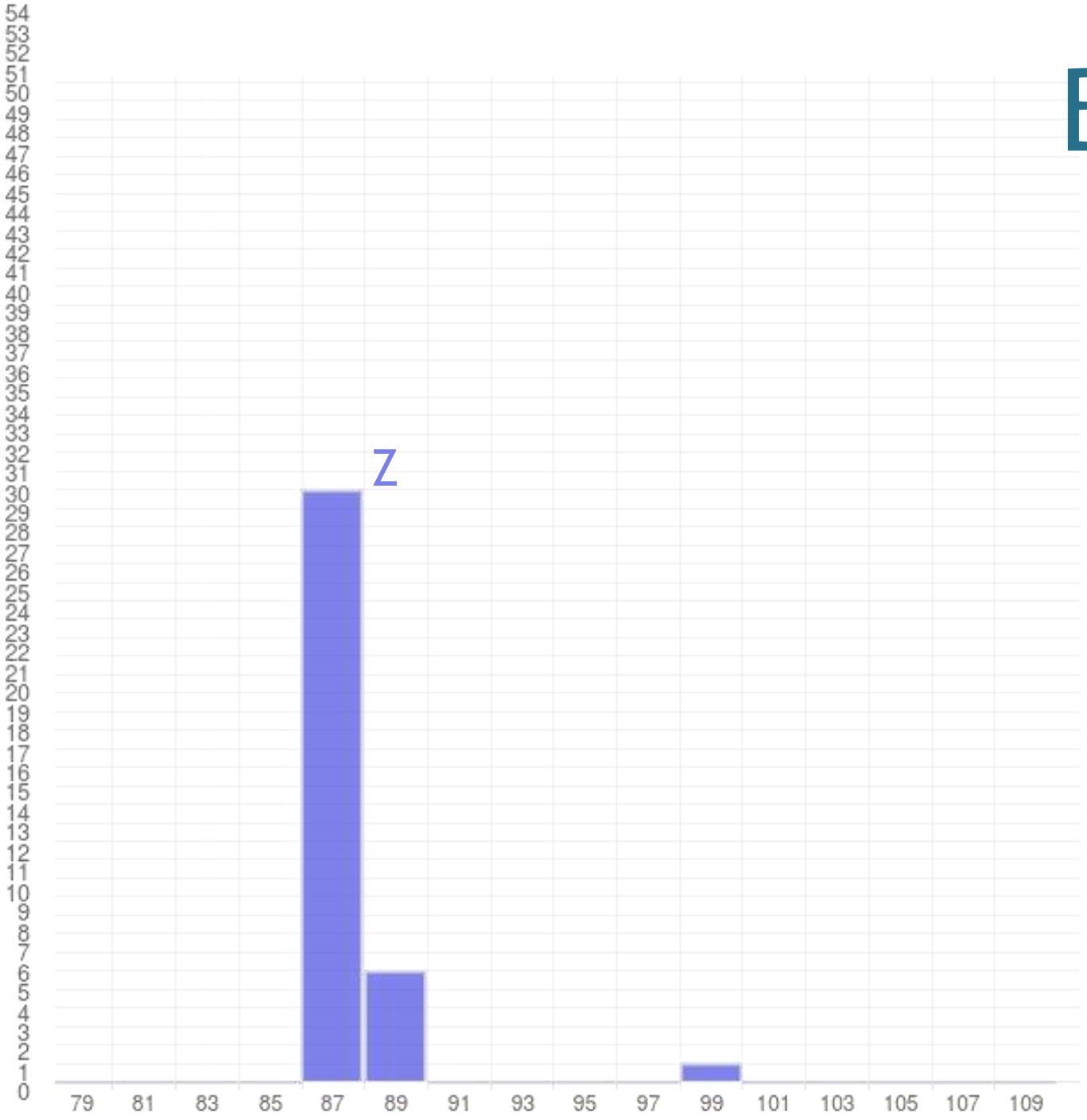
Histograma de massa



Mésons J/Ψ e ϒ


J/Ψ
ϒ
54
53
52
51
50
49
48
47
46
45
44
43
42
41
40
39
38
37
36
35
34
33
32
31
30
29
28
27
26
25
24
23
22
21
20
19
18
17
16
15
14
13
12
11
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0
1 3 5 7 9 11 13 15 17 19 21 23 25 27 29 31 33 35 37 39 41 43 45 47 49

Bóson Z


Z
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
79
81
83
85
87
89
91
93
95
97
99
101
103
105
107
109

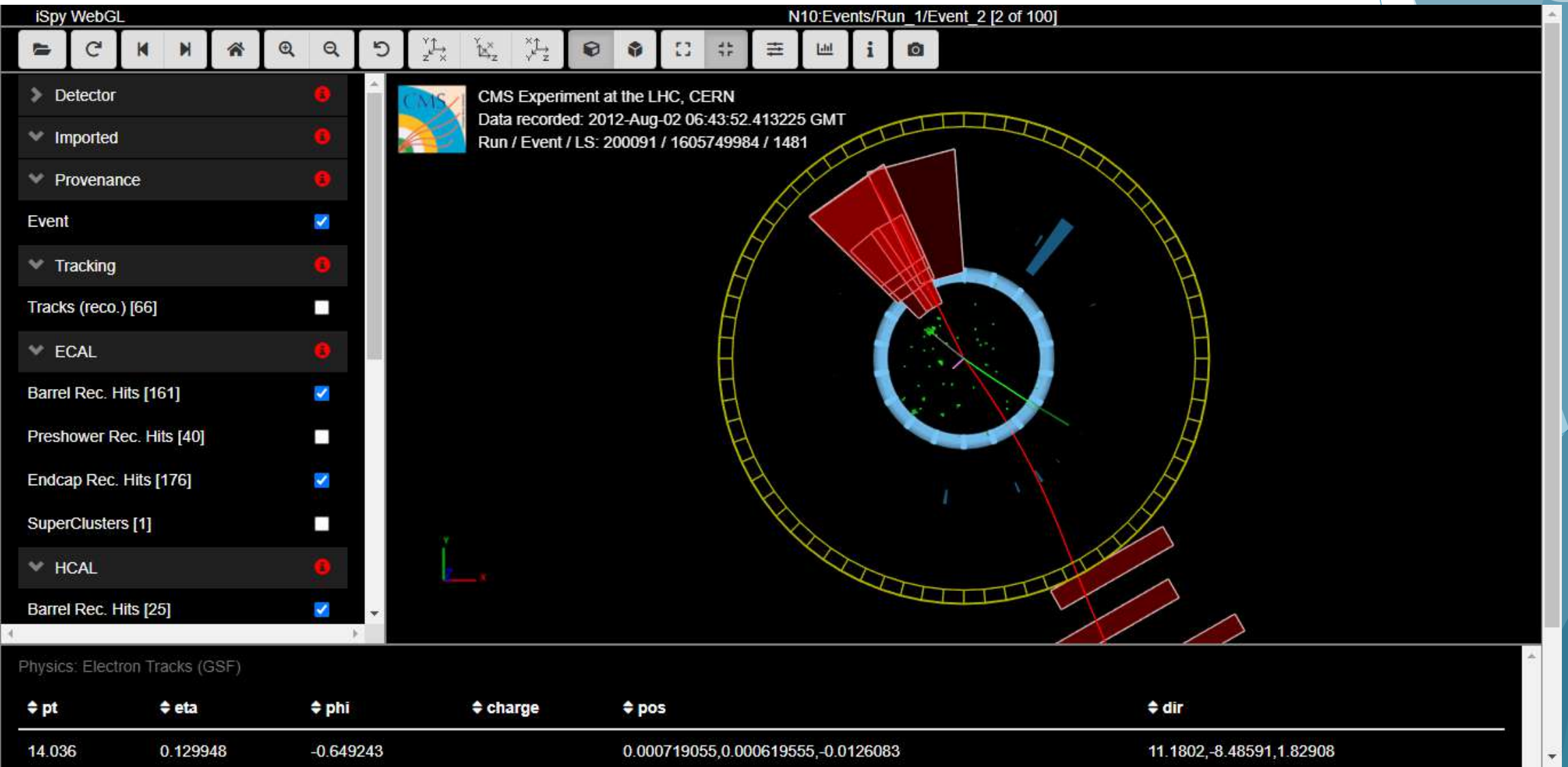
Conclusões

- Aprendemos a estrutura do modelo padrão e alguns cálculos relativísticos na física de partículas
- Aprendemos como é feita a detecção de partículas em aceleradores como o LHC
- Colocamos em prática realizando uma análise simplificada
- Análise de dados: erros e estatística
- Trabalho em equipe!!!

Referências

- O Discreto Charme das Partículas Elementares, Física na Escola, v. 6, n. 1, 2005, de Maria Cristina Batoni Abdalla
- What is a Higgs Boson? - Fermilab: https://www.youtube.com/watch?v=RIg1Vh7uPyw&t=120s
- Conheça o maior acelerador de partículas do mundo: https://www.youtube.com/watch?v=N6bBsTTKVeQ
- P.A Zyla et al. (Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 083C01 - https://pdg.lbl.gov/
- Fundamental Force: https://www.britannica.com/science/fundamental-interaction

Agradecemos a atenção e a oportunidade!

ICTP SAIFR

Extra: detecção do bóson de Higgs!