

DiMuon Analysis with CMS Open Data

Professores: Sandro Fonseca, Sheila Mara, Eliza Melo

Name: João Pedro Gomes Pinheiro

Exercício baseado no Tutorial sobre a Análise de DiMuon utilizando dados do CMS Open Data.

Os exercícios referentes ao Tutorial de CMS Open Data ministrado pela professora Sheila se encontram resolvidos e comentados no arquivo `exercises_cms_open_data.ipynb` do repositório [GitHub Dimuon](#). O dataset utilizado (`DoubleMuRun2011A.csv`) pode ser encontrado no [GitHub](#) da disciplina [Aula-Analysis-CMS-Opendata](#).

Os exercícios referentes ao Tutorial ministrado pela professora Eliza se encontram resolvidos e comentados aqui. Os arquivos e programas que serão citados estão disponíveis no repositório [GitHub Dimuon](#).

Introdução:

O dataset `Skim.root` contém 3 conjuntos de 4-vetores: um conjunto para cada múon (positivo e negativo) e um para o par de múons reconstruídos. Podemos observar a massa invariante do par de múons em escala logarítmica na Figura 1. Podemos observar as várias ressonâncias das partículas que produzem, no seu decaimento, pares de múons. Para nossa análise, vamos escolher a região de 65 a 110 GeV, onde se encontra a ressonância do Bóson Z^0 .

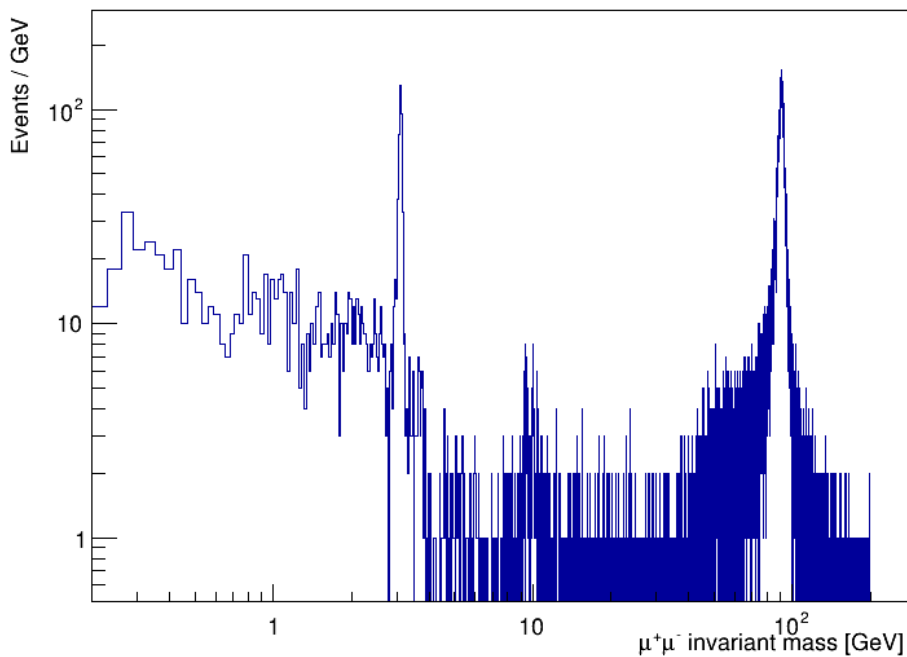


Figura 1: Histograma da massa invariante do par de múons em escala logarítmica.

Corte de Seleção:

Precisamos impor um corte de seleção no valor do p_T de cada múon reconstruído. Nas Figuras 2 e 3 observamos a distribuição de p_T dos múons positivos e negativos do nosso dataset. Como esperamos que os múons que decaíram do Bóson Z^0 tenham maior p_T do que aqueles advindos de ressonâncias de menor massa invariante, **vamos impor um corte de seleção em $p_T > 20$ GeV para cada múon**. Estes plots foram produzidos simplesmente olhando os dados na `ntuple`, a partir do `TBrowser` do `ROOT`.

Na Figura 4, podemos observar o comportamento da massa invariante na região da ressonância do Z^0 quando

aplicamos diferentes cortes no p_T de cada múon. Observamos que o corte no p_T de cada múon só se torna sensível nesta região para valores maiores de 20 GeV. A Figura 4 foi feita rodando o programa `dimuon.C` para diferentes cortes de p_T de cada múon ($> 0, 10, 20$ e 30) GeV e depois desenhamos o histograma apresentado aqui com a ajuda do programa `read_hist.cpp`, presente no repositório `GitHub`.

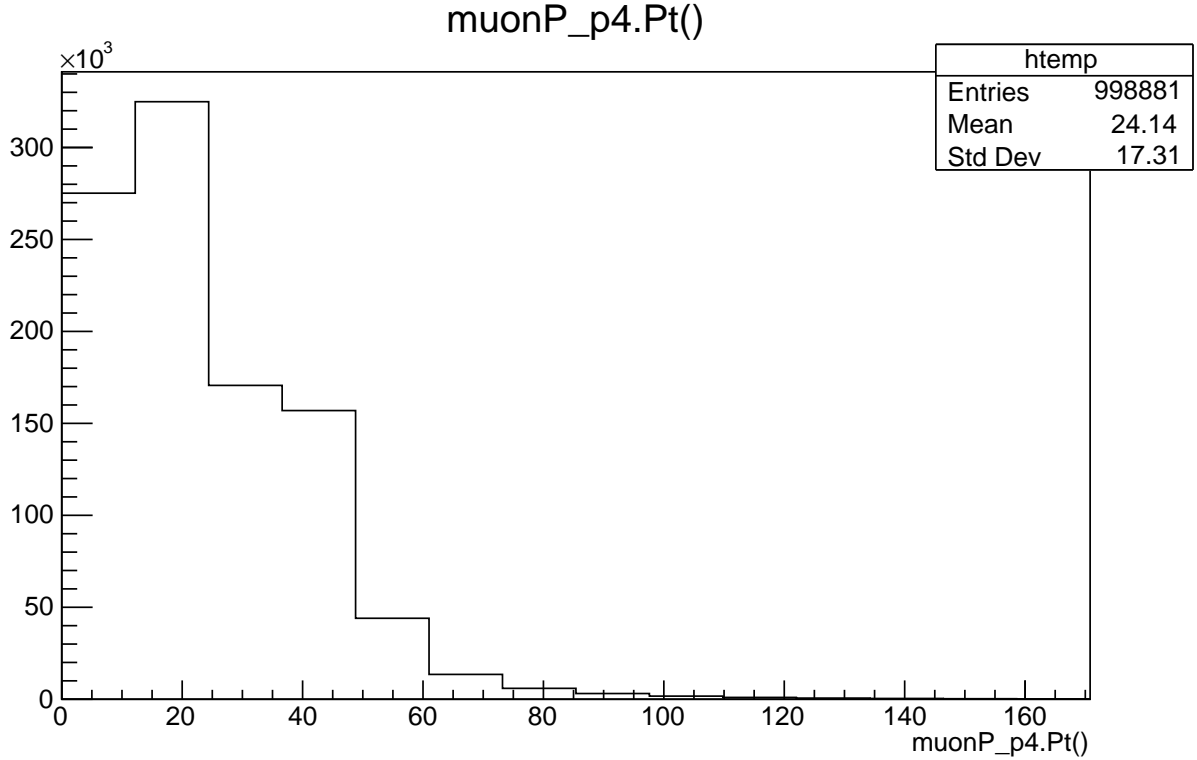


Figura 2: Distribuição de p_T dos múons positivos.

Resultados do Fit:

Com base no que foi discutido no item anterior, agora vamos realizar um ajuste na região de massa invariante entre 65 e 110 GeV, exigindo que cada múon tenha p_T maior que 20 GeV.

Para realizar o ajuste, vamos considerar uma curva gaussiana para o sinal e um ajuste linear para o *background*. O fit global será a soma dessas funções.

Sabemos que a distribuição gaussiana $G(x; A, \sigma, \mu)$ é dada pela Equação 0.1 e uma função linear $L(x; a, b)$ para representar o *background* é dada pela Equação 0.2:

$$G(x; A, \sigma, \mu) = A \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (0.1)$$

$$L(x; a, b) = ax + b \quad (0.2)$$

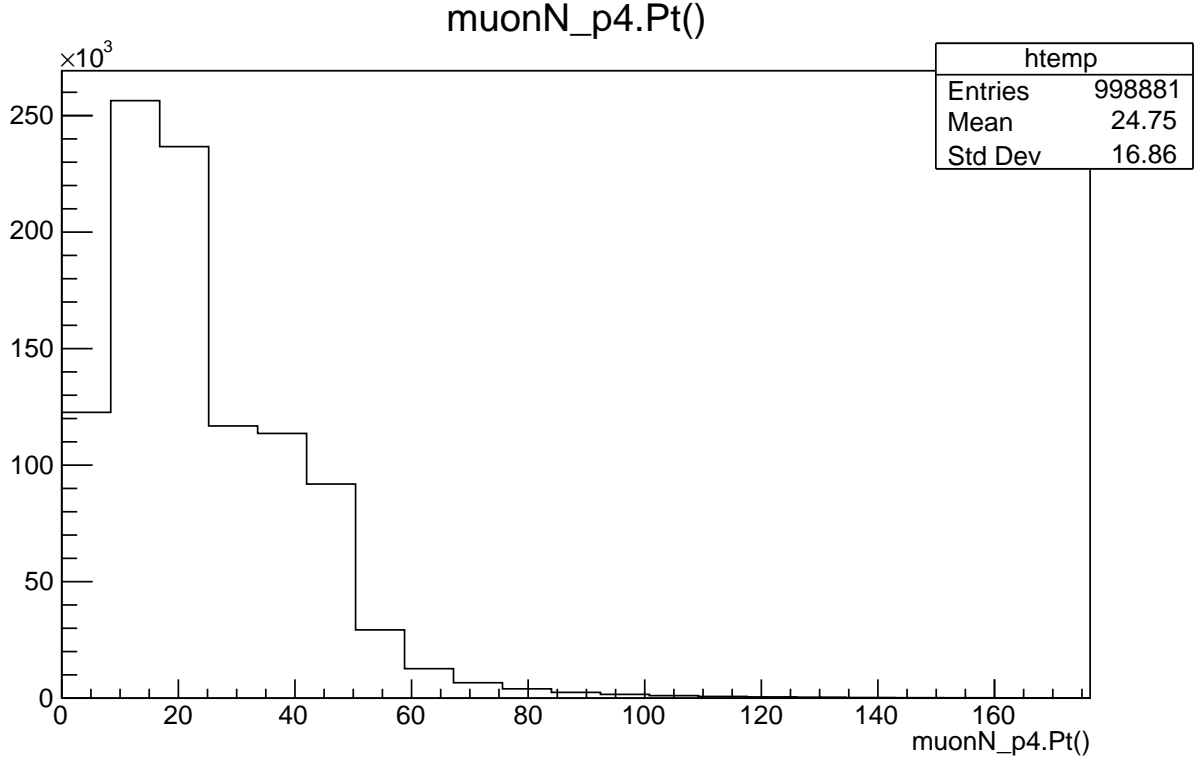
Nosso primeiro ajuste global $F_1(x; a, b, A, \sigma, \mu)$, portanto, será dado pela Equação 0.3.

$$F_1(x; a, b, A, \sigma, \mu) = G(x; A, \sigma, \mu) + L(x; a, b) \quad (0.3)$$

Portanto, existem 5 parâmetros que devem ser ajustados, 3 ligados à gaussiana e 2 ligados à função linear, sendo apenas μ e σ os parâmetros de interesse.

No programa que utilizamos, `dimuons.C`, esta implementação é feita a partir das funções declaradas abaixo, sendo o fit global feito a partir da função `fitfun`:

```
1 Double_t signal(Double_t *x, Double_t *par) {
2     //a simple gaussian
3     return par[0]*exp(-0.5*TMath::Power(((x[0]-par[1])/(par[2]))),2));
4 }
```

Figura 3: Distribuição de p_T dos múons negativos.

```

5 Double_t backgr(Double_t *x, Double_t *par) {
6     //a simple polynomial
7     return par[0]+par[2]*x[0];
8 }
9 Double_t fitfun(Double_t *x, Double_t *par) {
10    //the total PDF function, sum of the above
11    return signal(x,par) + backgr(x,&par[3]);
12 }

```

O resultado desse fit global pode ser visto na Figura 5. O valor da massa invariante estimada para o Z^0 e seu respectivo erro estatístico associado será:

$$M_Z = 90,731 \text{ GeV}$$

$$\sigma_{stat} = \frac{2,618}{\sqrt{33371}} = 0,014 \text{ GeV}$$

Efeitos Sistemáticos:

Afim de estimar os efeitos sistemáticos na nossa amostra, vamos implementar um modelo diferente para sinal e *background* e repetir o *fit*. O erro sistemático será a diferença entre o valor esperado obtido neste novo ajuste e o obtido do ajuste anterior.

Para o *background*, será mantido o modelo da função linear, dada pela Equação 0.2. Para o sinal, entretanto, utilizaremos a distribuição relativística de Breit-Wigner. Segundo a referência [Relativistic Breit-Wigner distribution](#), esta função é dada pela Equação 0.4.

$$B(x; M, \Gamma) = \frac{k}{(x^2 - M^2)^2 + M^2 \Gamma^2} \quad (0.4)$$

sendo k uma constante de proporcionalidade, dada por: $k = \frac{2\sqrt{2}M\Gamma}{\pi\sqrt{M^2 + \Gamma^2}}\gamma$, sendo $\gamma = \sqrt{M^2(M^2 + \Gamma^2)}$

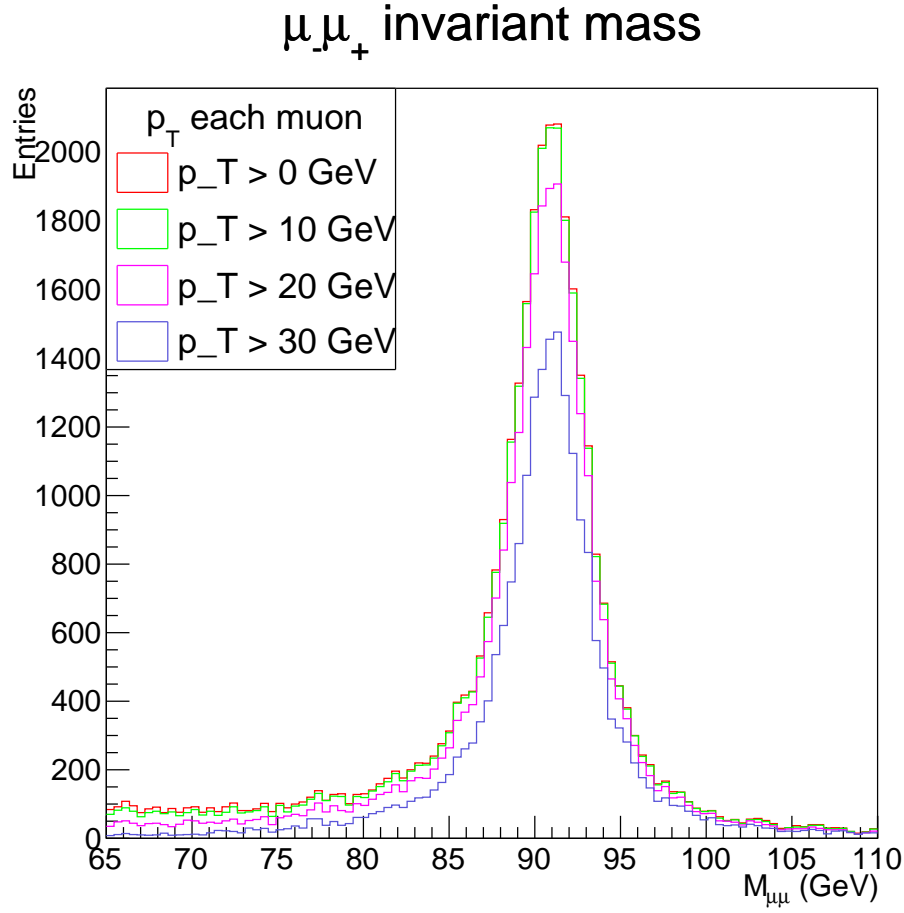


Figura 4: Distribuição de massa invariante do par de múons para diferentes cortes no p_T de cada múon.

O ajuste busca o melhor valor para os parâmetros: valor esperado da massa invariante (M) e largura do decaimento (Γ).

A implementação no código `dimuons.C` é feita com base na referência [WorkBook: Fitting a Breit-Wigner](#), onde a nova distribuição para o sinal é descrita pela função `signal2` e o fit global será feito a partir da soma da função de Breit-Wigner com a função linear, como na Equação 0.5, implementada como a função `fitfun2`.

$$F_1(x; a, b, M, \Gamma) = B(x; M, \Gamma) + L(x; a, b) \quad (0.5)$$

```

1 Double_t signal2(Double_t *x, Double_t *par) {
2     //a Breit-Wigner
3     Double_t arg1 = 14.0/22.0; // 2 over pi
4     Double_t arg2 = par[2]*par[2]*par[1]*par[1]; //Gamma=par[1] M=par[2]
5     Double_t arg3 = ((x[0]*x[0]) - (par[1]*par[1]))*((x[0]*x[0]) - (par[1]*par[1]));
6     Double_t arg4 = x[0]*x[0]*x[0]*x[0]*((par[2]*par[2])/(par[1]*par[1]));
7     return par[0]*arg1*arg2/(arg3 + arg4);
8 }
9 Double_t fitfun2(Double_t *x, Double_t *par) {
10    //the total PDF function, sum of the above
11    return signal2(x,par) + backgr(x,&par[3]);
12 }

```

O resultado deste novo ajuste pode ser visto na Figura 6.

A incerteza sistemática, portanto, será a diferença entre o valor esperado para a massa invariante obtido com os dois fits, ou seja:

$$\sigma_{sis} = |90,731 - 90,885| = 0,154 \text{ GeV}$$

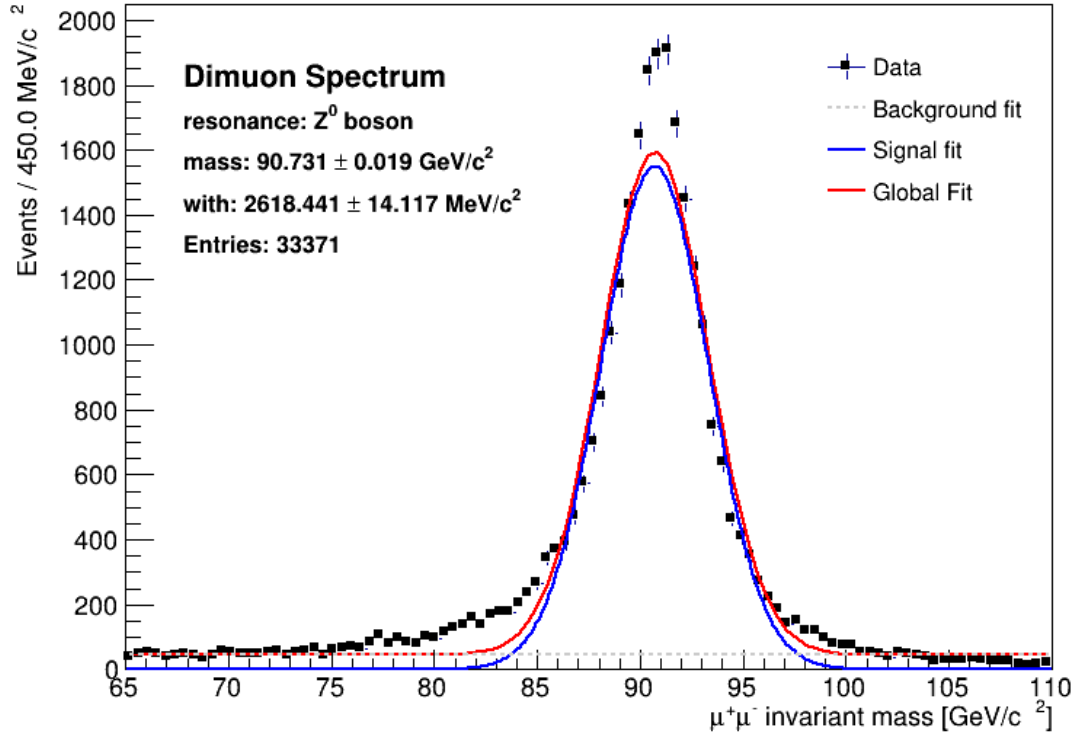


Figura 5: Fit global. Soma de uma gaussiana (sinal) com uma função linear (fundo).

Efeitos em p_T e η :

Para finalizar, vamos analisar os efeitos na reconstrução da massa invariante para valores distintos de p_T e diferentes regiões de η do par de múons. Estas informações são obtidas no quadrivetor do par de múons (`dimuon_p4`) através de `dimuon_p4.Pt()` e `dimuon_p4.Eta()`.

Para cada evento que passa no corte de seleção, vamos calcular o rendimento na reconstrução da massa em função de p_T e η do sistema $\mu^+\mu^-$. O rendimento será calculado a partir do erro relativo em relação ao valor obtido no primeiro ajuste ($M_Z = 90,731 \text{ GeV}$), ou seja:

$$\sigma_{rel} \equiv \frac{|M - 90,731|}{90,731}$$

O resultado obtido pode ser visto na Figura 7. Não é possível ver nenhuma correlação entre os valores de p_T ou η com o erro relativo em relação ao valor esperado de massa.

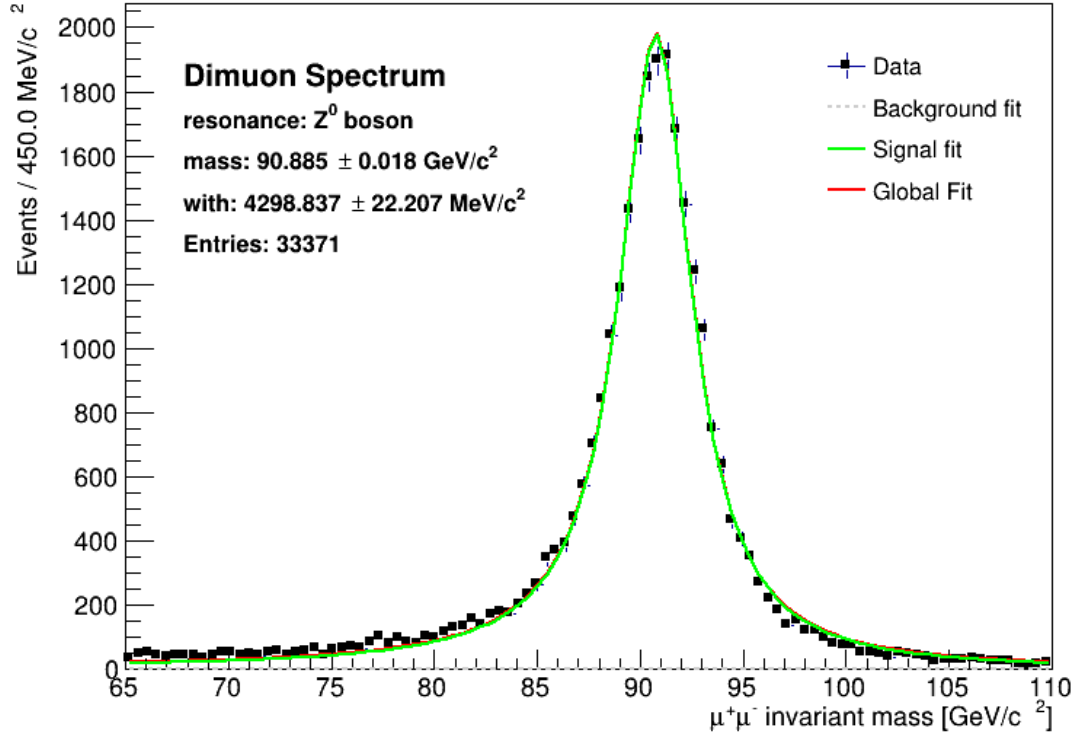


Figura 6: Fit global modelado de uma forma diferente. Soma de uma Breit-Wigner (sinal) com uma função linear (fundo).

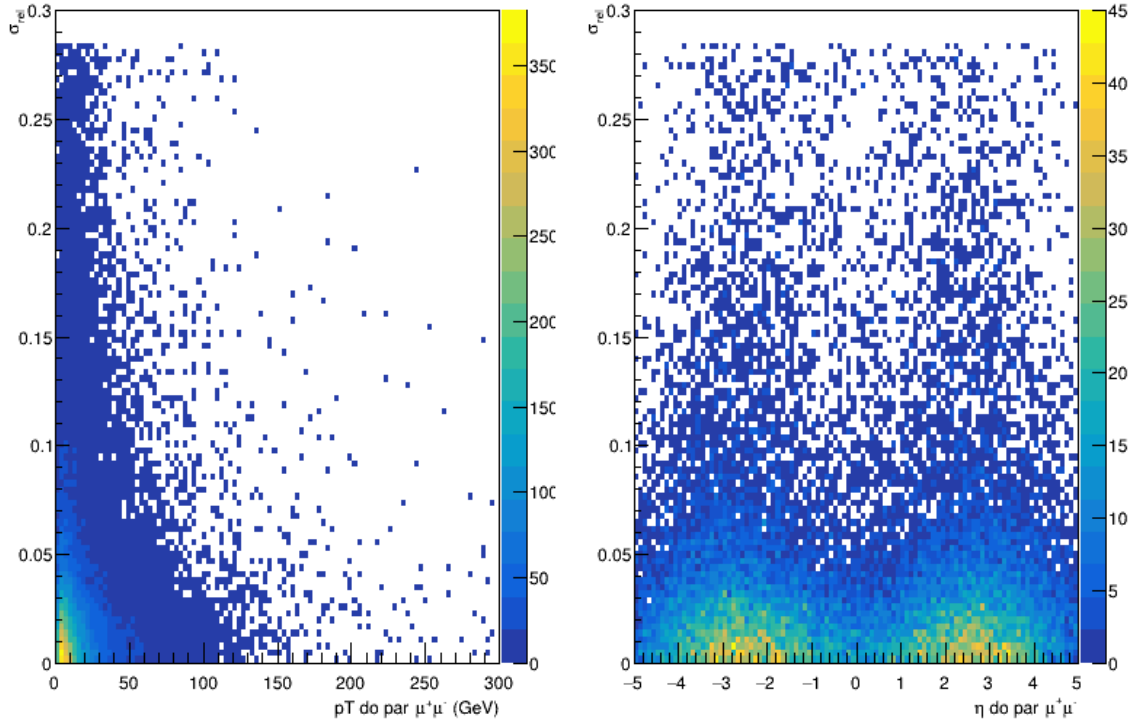


Figura 7: Espaço de fase na região do sinal ($65 < M_{\mu^+\mu^-} < 110 \text{ GeV}$) em função do erro relativo σ_{rel} .