
Estudos da produção do bóson Z^0 decaindo num par de quarks bottom no experimento LHCb.

Royer Edson Ticse Torres.

Orientador: Murilo Rangel.

Dissertação de Mestrado
IF-UFRJ

12 de setembro de 2013

O LHC e o experimento LHCb

Upgrade do LHCb

Aspectos Teóricos e fenomenológicos

Jatos no LHCb

Estudo da produção do bóson Z^0 decaindo num par de quarks bottom

Conclusões

O LHC

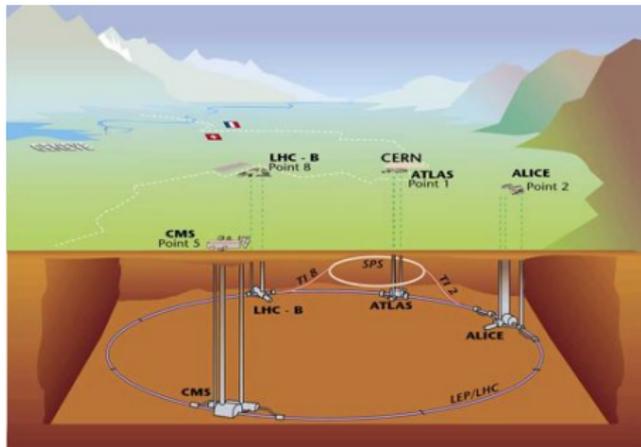
- ▶ O *Large Hadron Collider* é um acelerador circular de 27 km de comprimento, que fica a 100 metros de profundidade da superfície, localizado na fronteira França-Suíça.



▶ Desempenho do LHC.

Parâmetro	2011	2012
Energia do feixe (TeV)	3,5	4
Max. número de nuvens	1380	1380
Espaçamento entre nuvens (ns)	75/50	50
Prótons por nuvem	$1,45 \times 10^{11}$	$1,7 \times 10^{11}$
Luminosidade pico ($cm^{-2}s^{-1}$)	$3,5 \times 10^{32}$	4×10^{32}
Número de interações	1,4	1,7

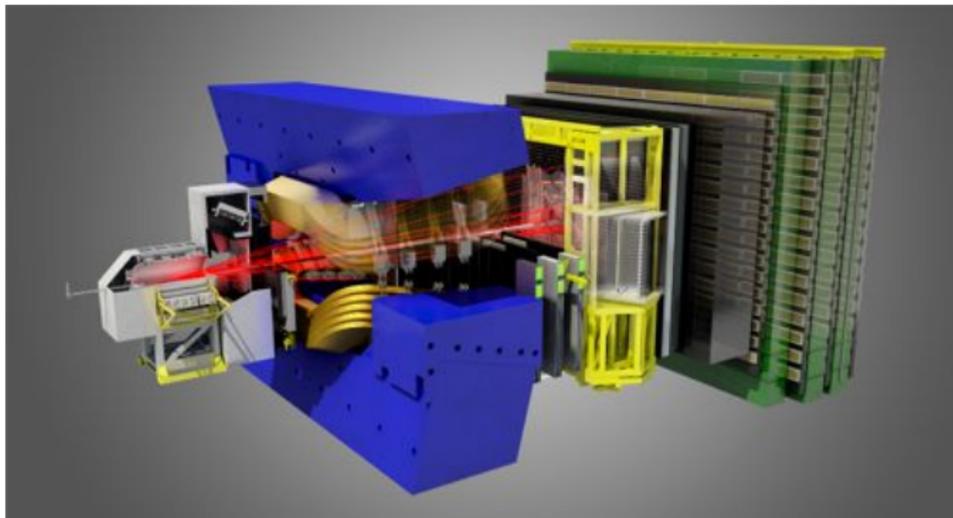
O LHC



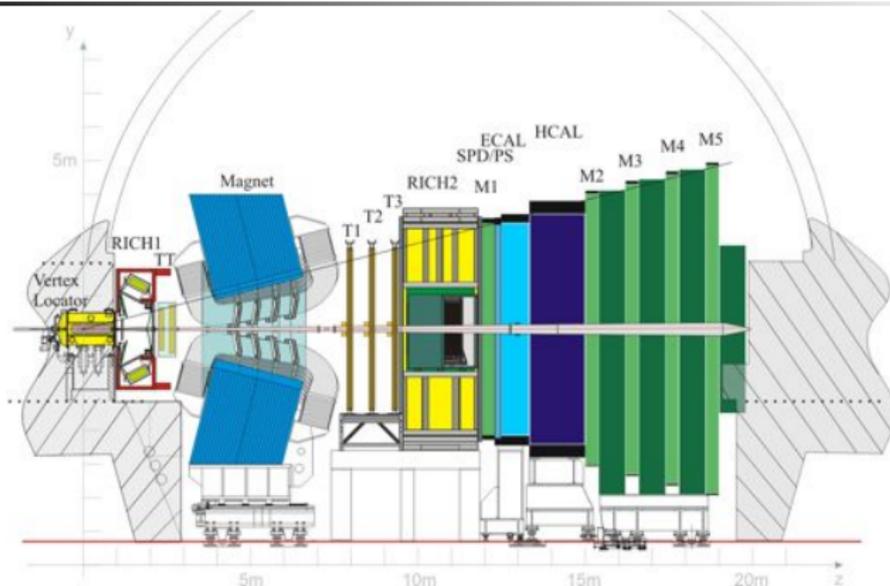
- ▶ A Toroidal LHC ApparatuS (**ATLAS**), *propósito geral*.
- ▶ Compact Muon Solenoid (**CMS**), *propósito geral*.
- ▶ A Large Ion Collider Experiment (**ALICE**), *núcleos pesados*.
- ▶ The Large Hadron Collider Beauty Experiment (**LHCb**), *hádrons B*.

O Detector LHCb

- ▶ Projetado para estudar com alta precisão a violação de CP, decaimentos raros do hádron B e procura por indícios de física nova além do Modelo Padrão no setor dos quarks *bottom* e *charm*.

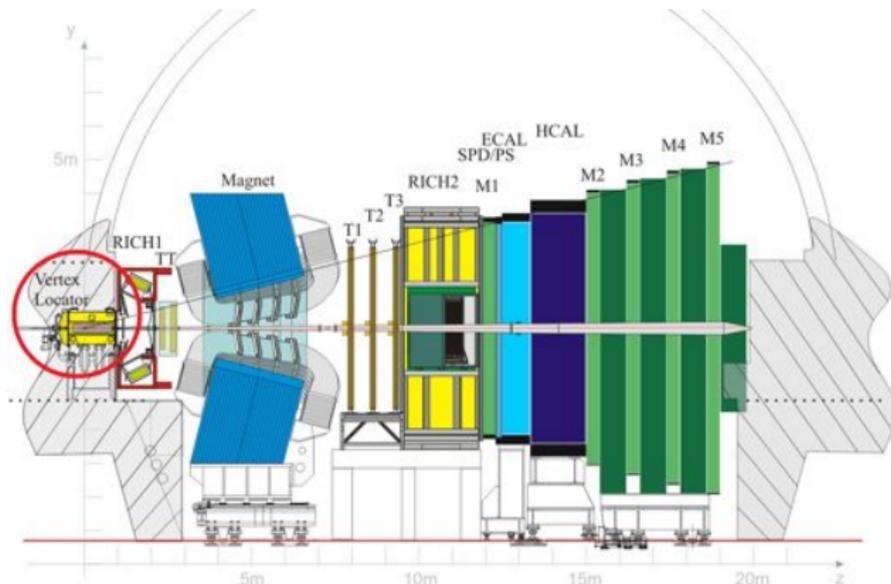


O Detector LHCb



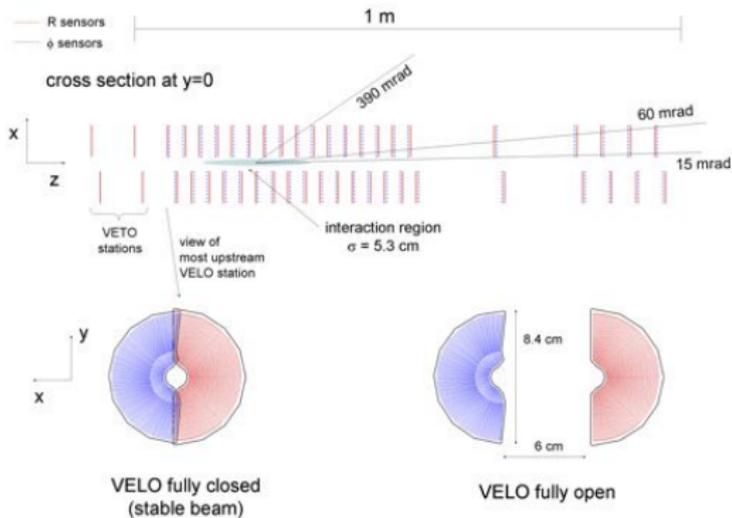
- ▶ Aceitação geométrica $2 < \eta < 5$ ($\eta = -\ln(\tan\frac{\theta}{2})$)
- ▶ $1,0 \text{ fb}^{-1}$ ($2,1 \text{ fb}^{-1}$) de dados em 2011 (2012).
- ▶ 18×10^{13} colisões próton-próton.

VELO



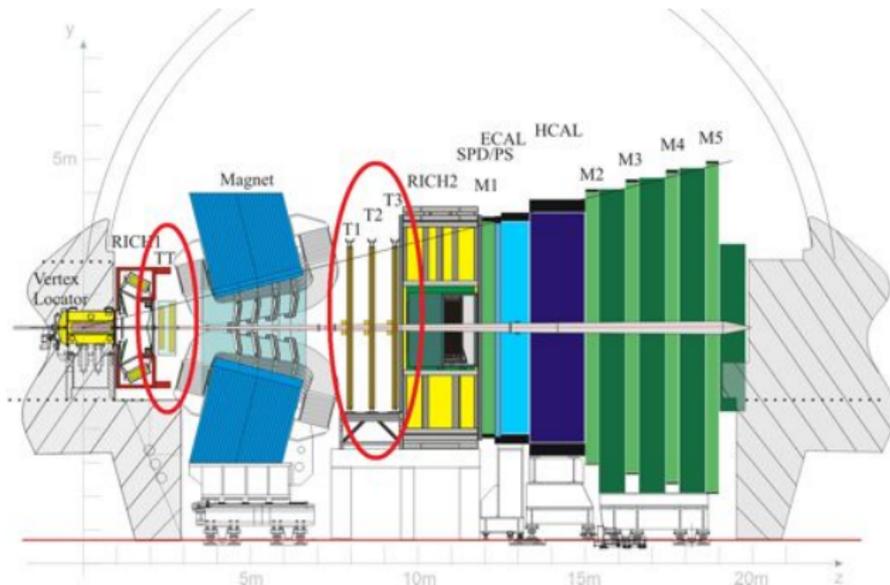
- ▶ 42 unidades de micro tiras de silício.
- ▶ 8 mm entre os feixes do LHC e o silício ativo.
- ▶ Localização de vértices primários e secundários.

VELO



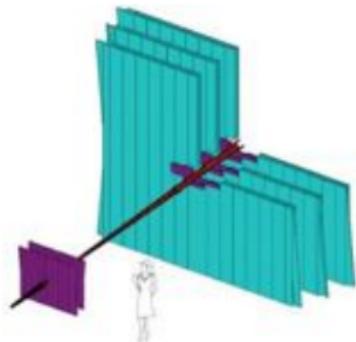
- ▶ 42 unidades de micro tiras de silício.
- ▶ 8 mm entre os feixes do LHC e o silício ativo.
- ▶ Localização do vértices primários e secundários.

Estações de traço



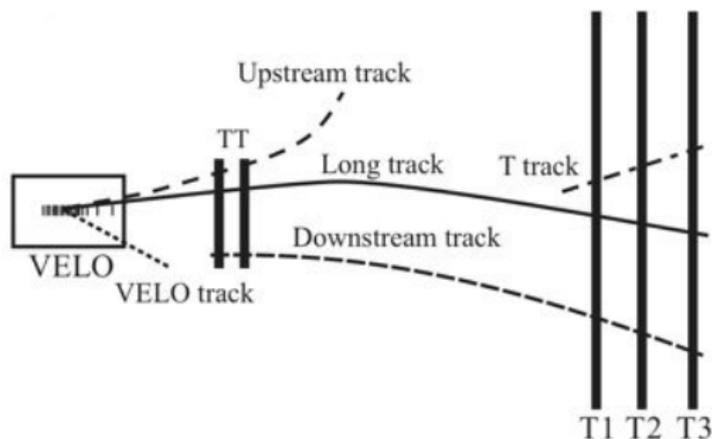
- ▶ Silicon Tracker (TT, Inner Tracker), Outer Tracker.
- ▶ Reconstrução de traços.

Estações de traço



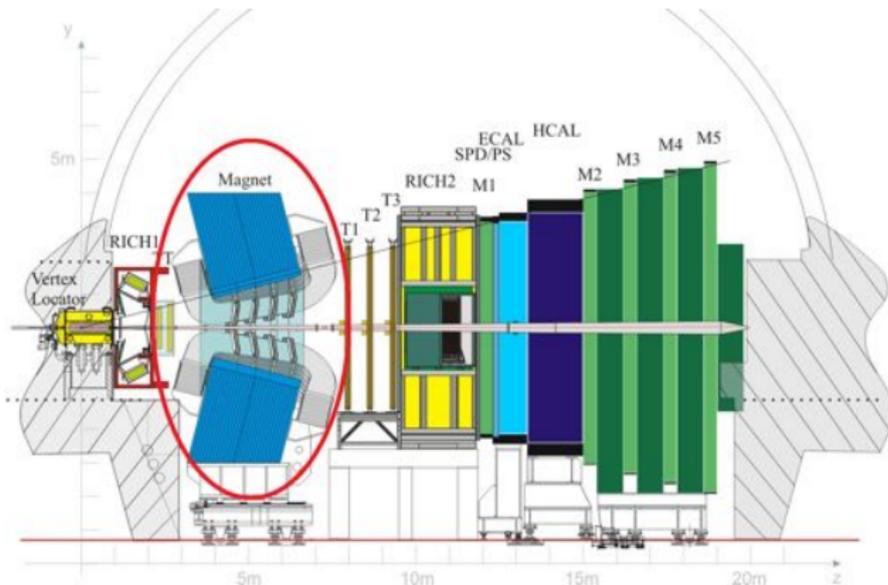
- ▶ Silicon Tracker (TT, Inner Tracker), Outer Tracker.
- ▶ Reconstrução de traços.

Sistema de reconstrução de trajetórias



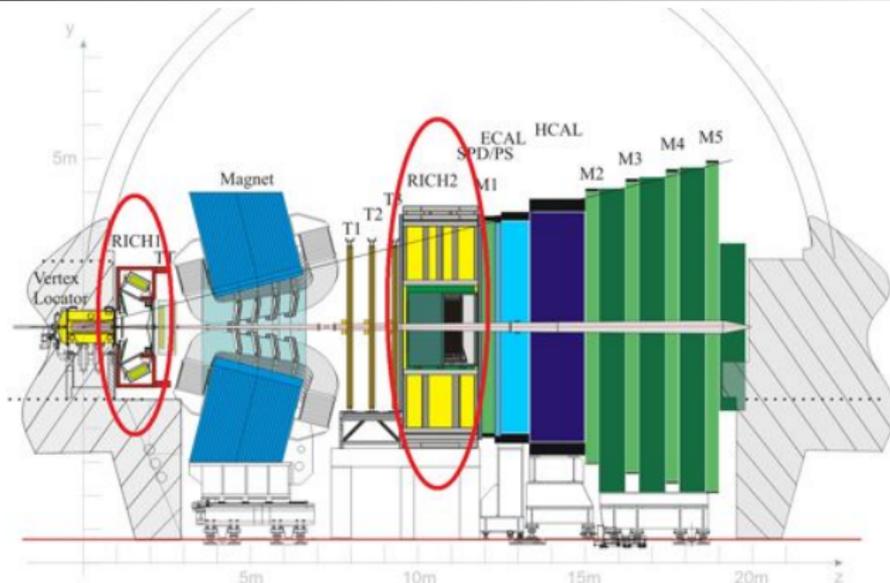
- ▶ Eficiência $\sim 97\%$ para traços $> 5\text{GeV}$ de momento, resolução $\sim 0,5\%$.

Magneto



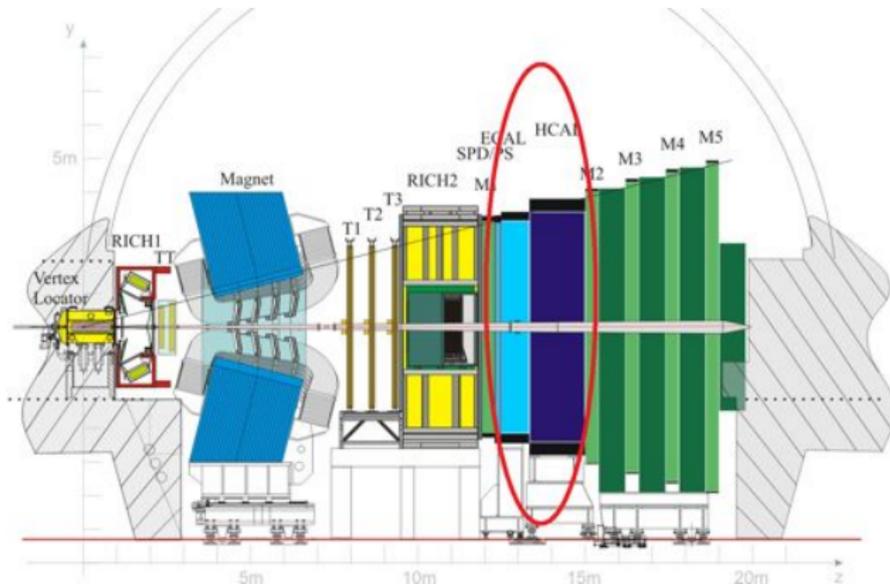
- ▶ Dipolo magnético, 4 Tm.
- ▶ Auxilia na medição do momento.

RICH



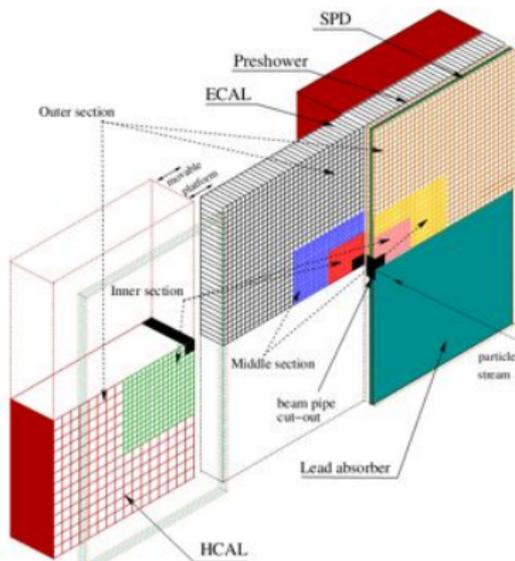
- ▶ Ambos detectores são *Ring Imaging Cherenkov* com diferentes radiadores para cobrir diferentes faixas de momento.
- ▶ PID, identificação de partículas carregadas ($\pi/K/p$).

Calorímetro



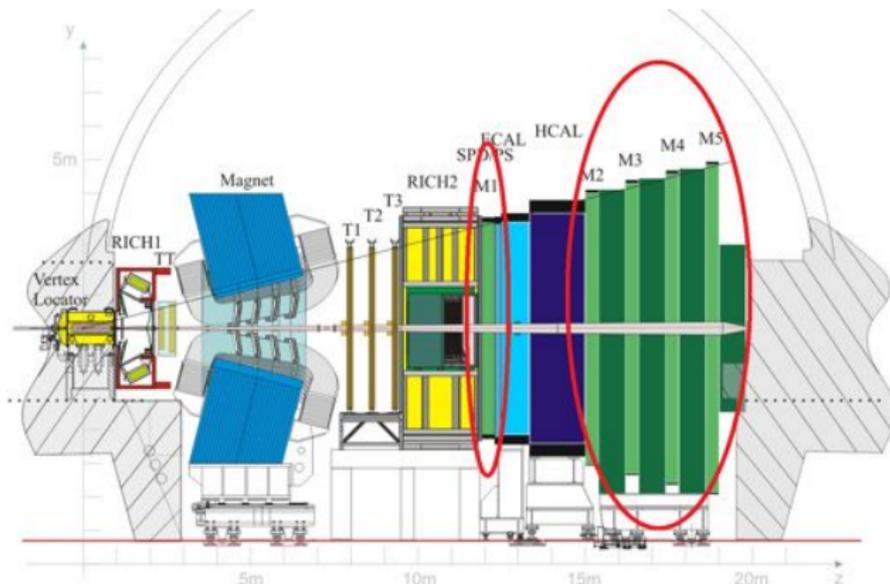
- ▶ SPD, PS.
- ▶ ECAL. Cintilador (4mm) + Pb (2mm), $\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{10\%}{\sqrt{E}} \oplus 1\%$.
- ▶ HCAL. Cintilador (4mm) + Fe (16mm), $\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{69\%}{\sqrt{E}} \oplus 9\%$.

Calorímetro



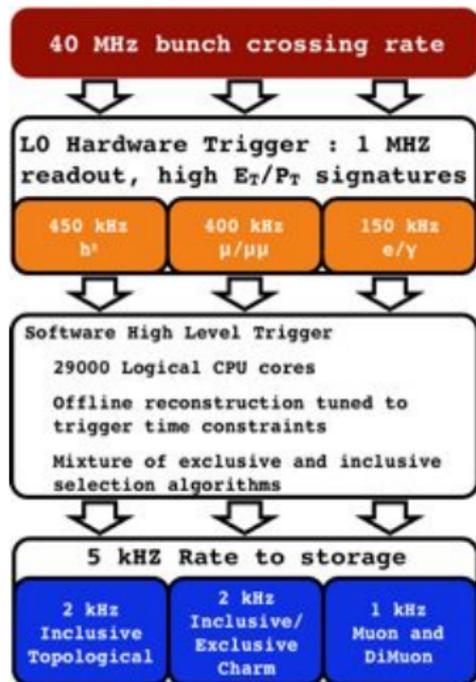
- ▶ SPD, PS.
- ▶ ECAL. Cintilador (4mm) + Pb (2mm), $\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{10\%}{\sqrt{E}} \oplus 1\%$.
- ▶ HCAL. Cintilador (4mm) + Fe (16mm), $\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{69\%}{\sqrt{E}} \oplus 9\%$.

Sistema de múons



- ▶ Estações M1-M5 para identificação de múons.
- ▶ Câmaras de detectores a gás intercalas por paredes de 80 cm de ferro.

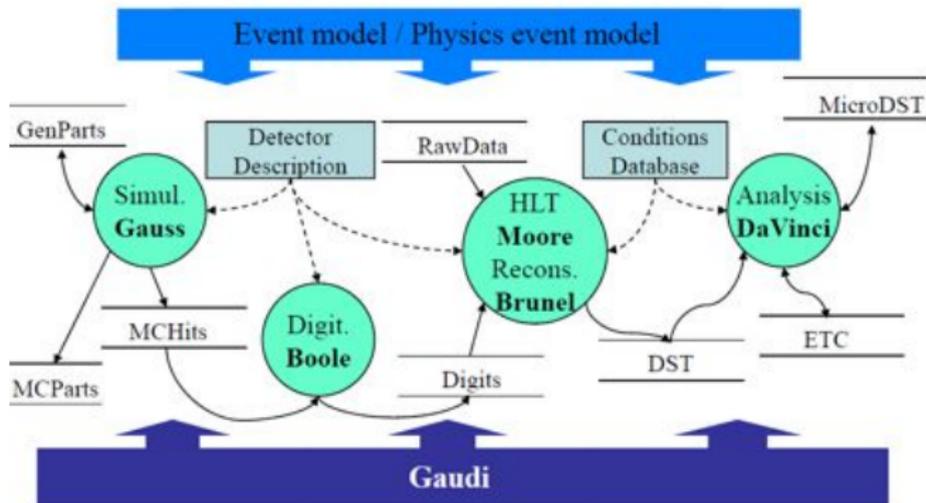
Trigger do LHCb



- ▶ **L0**, implementado em hardware, usa o sistema de múons e calorímetro.
- ▶ **HLT**, tem acesso a informações de todo o detector.
 - ▶ **HLT1**, confirma o rejeita a decisão do L0.
 - ▶ **HLT2**, reconstrói e aplica diferentes seleções.
- ▶ *Stripping*, processadas *offline*.

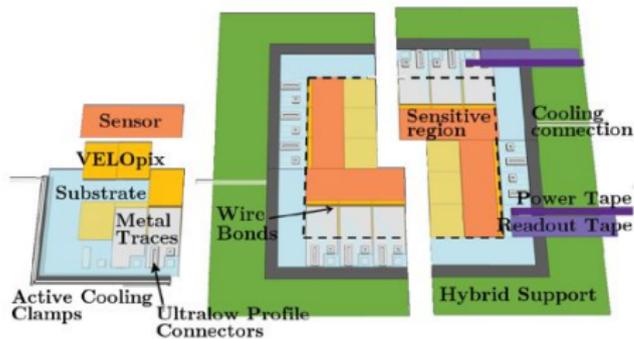
Software do LHCb

- ▶ Coleções de pacotes de software desenvolvidas no ambiente Gaudi.



Upgrade do LHCb

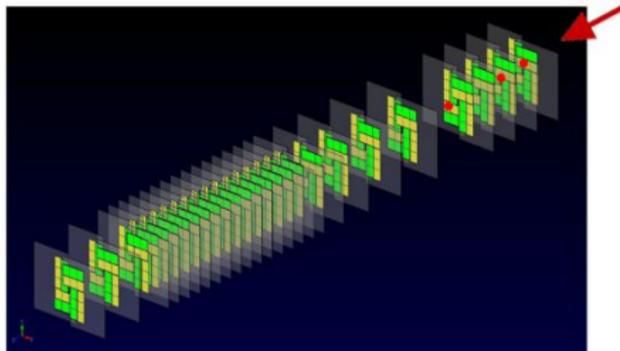
- ▶ Previsto para 2018, luminosidade até $2 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.
- ▶ Todos os detectores terão leitura de 40 MHz.
- ▶ Usar um algoritmo de *trigger* flexível.



- ▶ Atualização do VELO. Um sensor de silício do tipo pixel da família Timepix/Medipix está sendo desenvolvido.

Vetorização da implementação atual.

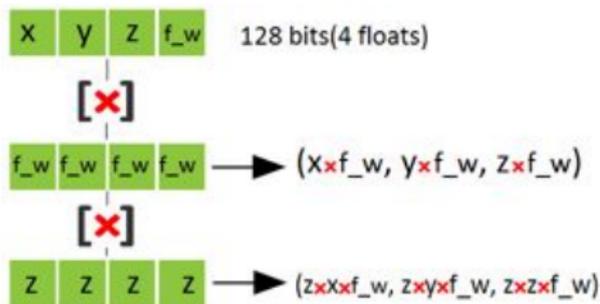
- ▶ O algoritmo de reconstrução de traços para o VELO pixel é baseado no algoritmo FastVelo.



- ▶ Melhorar o tempo de execução na reconstrução dos traços no VELO.
- ▶ Reduzir o número de operações numa seção crítica usando SSE (Streaming SIMD Extensions).

Vetorização da implementação atual.

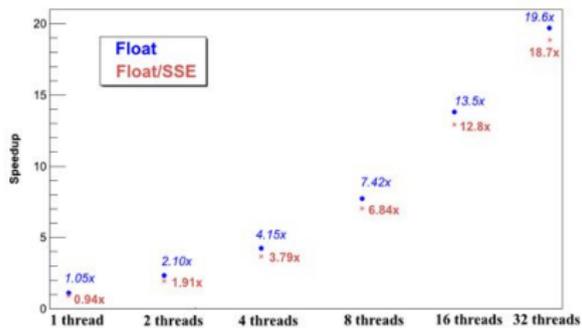
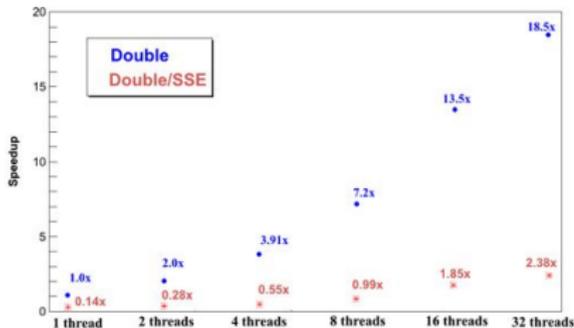
- ▶ As CPUs têm a capacidade de processar múltiplos valores usando uma única instrução de operação.



- ▶ SSE são um conjunto de registros vetoriais de 128 bits.
- ▶ Podemos usar 2 *doubles* ou 4 *floats* num registro.

Vetorização da implementação atual.

- ▶ Velocidade de execução em função do número de *threads*.

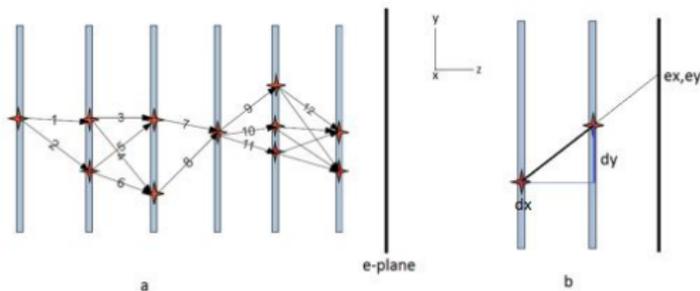


- ▶ Tempos de execução para 200 eventos MC numa única *thread*.

Precisão	Tempo de execução (s)
Double	0,088
Double using SSE	0,564
Float	0,053
Float using SSE	0,061

O método Global Track Reconstruction

- ▶ Novo método baseada na criação de grupos de tracklets (pares de hits).



- ▶ Cada tracklet possui 4 variáveis dx , dy e a projeção sobre o e-plane ex, ey .

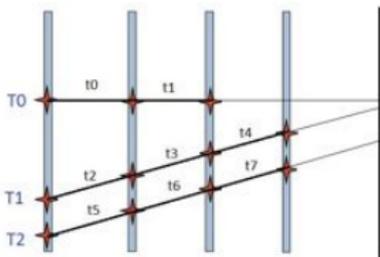
- ▶ Subdividida em três fases distintas.

- ▶ Reconstrução de Tracklets
- ▶ Agrupamento de Tracklets
- ▶ Formação de traços

- ▶ Não apresenta nenhuma dependência em cada etapa. Algoritmo paralelo.

O método Global Track Reconstruction

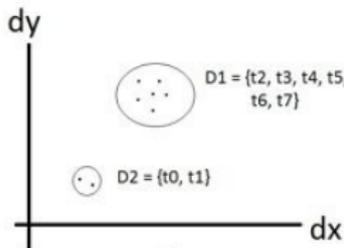
- ▶ Utilizando a informação em cada plano e a interseção dos possíveis candidatos, temos os traços.



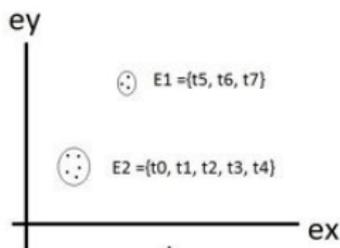
a.

$$\begin{aligned}D1 \cap E1 &= \{t5, t6, t7\} = T2 \\D1 \cap E2 &= \{t2, t3, t4\} = T1 \\D2 \cap E1 &= \{\} \\D2 \cap E2 &= \{t0, t1\} = T0\end{aligned}$$

b.



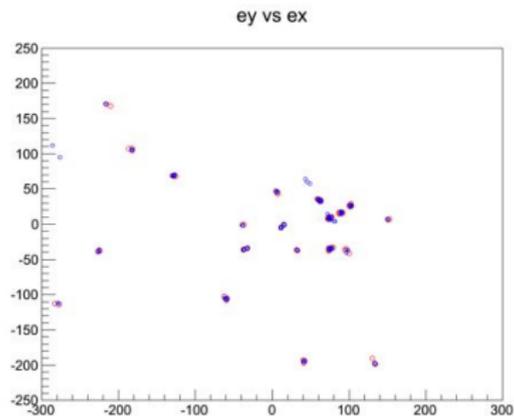
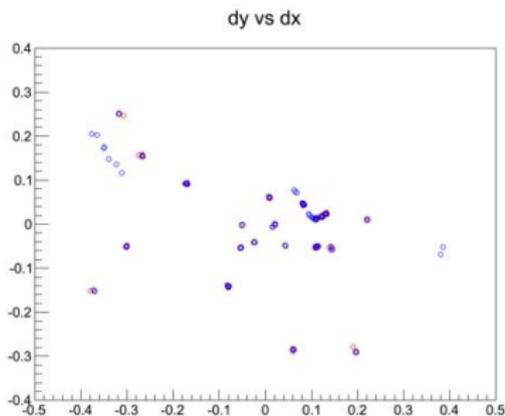
c.



d.

O método Global Track Reconstruction

- ▶ Traços reconstruídos a partir de conjuntos de tracklets. Azul é a saída de nosso código e vermelho é resultado da implementação sequencial.



O método Global Track Reconstruction

- ▶ Eficiência e pureza de reconstrução de traços para diferentes números de hits utilizando um novo algoritmo paralelo.

# Hits	# Traços	Eficiência (%)	Pureza (%)
55	8	88	88
143	23	87	87
462	67	82	48
623	91	76	22
968	119	69	3
1187	143	55	3

- ▶ Melhorias de nosso algoritmo foram propostos.

Conclusões

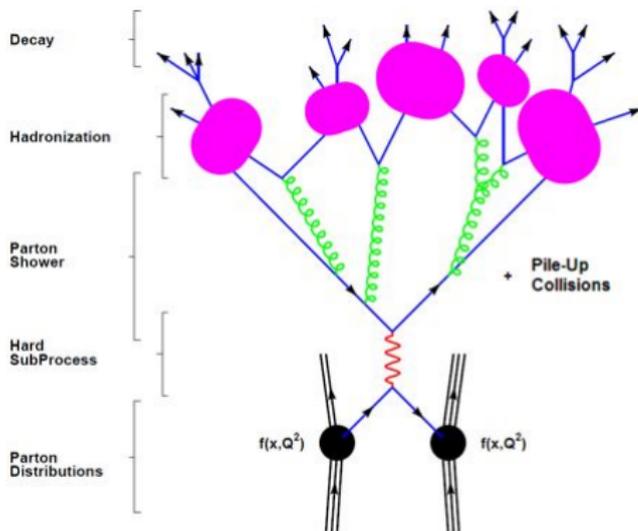
- ▶ Uma aceleração usando SSE para uma seção crítica da implementação atual mostrou um desempenho pior. Preparação de dados seria necessário em fases anteriores do código, a fim de carregar eficientemente os dados em unidades vetoriais.

Conclusões

- ▶ Uma aceleração usando SSE para uma seção crítica da implementação atual mostrou um desempenho pior. Preparação de dados seria necessário em fases anteriores do código, a fim de carregar eficientemente os dados em unidades vetoriais.
- ▶ Um estudo de um algoritmo paralelo, utilizando um novo método global para a reconstrução de traços foi feito. Uma arquitetura de múltiplos núcleos poderia aproveitar essa implementação, podendo acelerar o tempo de execução na reconstrução de traços no VELO.

Aspectos Teóricos e fenomenológicos

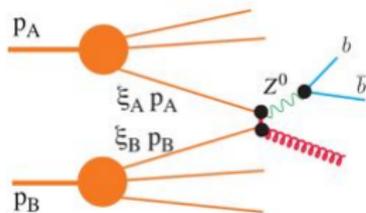
- ▶ A evolução do processo a curta distância para os estados de saída a longas distâncias ocorrem em várias etapas distintas.



- ▶ Chuveiro Partônico
- ▶ Hadronização

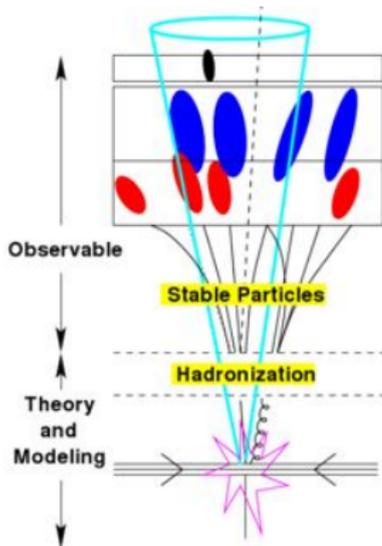
O bóson Z^0

- ▶ No LHC, o bóson Z^0 é produzido em grandes quantidades nas colisões de prótons de alta energia.



- ▶ As motivações para a medição do bóson $Z^0 \rightarrow b\bar{b}$ é que uma vez verificado que os jatos são atribuídos a partons-mãe, distribuições de massa de dois ou vários jatos podem ser usadas para procurar novas partículas, utilizando os parâmetros medidos do bóson Z^0 como uma calibração.

- ▶ Algoritmos de jatos baseados na distância



$$d_{ij} = \min(p_{Ti}^{2n}, p_{Tj}^{2n}) \frac{\Delta R_{ij}^2}{R^2} \quad (1)$$

Para:

$n = 0 \rightarrow$ Cambridge/Aachen.

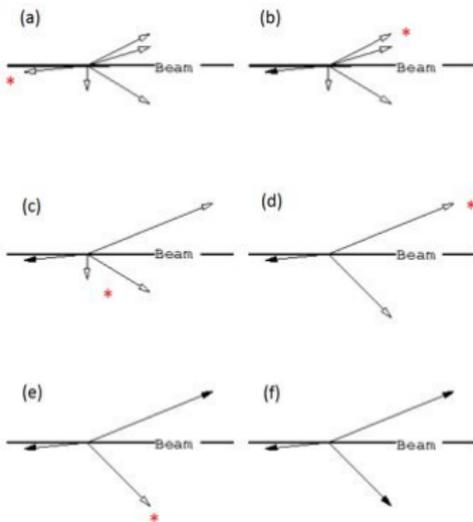
$n = 1 \rightarrow k_t$.

$n = -1 \rightarrow$ anti- k_t .

Onde R é um parâmetro constante e ΔR_{ij} é a distância no espaço $\eta - \phi$,

$$\Delta R_{ij} = \sqrt{(\eta_i - \eta_j)^2 + (\phi_i - \phi_j)^2} \quad (2)$$

Algoritmo anti- k_t



- ▶ Se o menor valor é d_i , o objeto i é removido da lista de objetos de entrada e definida como um jato.

- ▶ Para cada objeto i y cada par de objetos i, j duas distâncias d_i e d_{ij} é calculado.

$$d_i = (p_{Ti}^{-2})$$

$$d_{ij} = \min(p_{Ti}^{-2}, p_{Tj}^{-2}) \frac{\Delta R_{ij}^2}{R^2}$$

- ▶ O algoritmo procura o menor d_i ou d_{ij} .
- ▶ Se o menor valor é um d_{ij} , em seguida, os objetos i e j são unidos e reutilizados como objetos de entrada.
- ▶ O procedimento é repetido.

Jatos no LHCb

- ▶ Desde meados de 2011, o grupo de reconstrução de jatos do LHCb trabalha no estabelecimento de configurações e correções para os jatos.
- ▶ Seleção de entrada baseada em trajetórias de partículas carregadas e informações do calorímetro para partículas neutras.
- ▶ Um algoritmo do tipo *Particle Flow* foi projetado para ter as melhores partículas entre várias fontes.

Seleção de entrada

- ▶ Partículas carregadas, traços *long* apontando para o mesmo vértice primário (PV), traços *downstream*.
- ▶ Partículas ECAL, fótons e π^0 reconstruídos no ECAL.
- ▶ Partículas HCAL, retiradas desde um grupo de células (*clusters*) do HCAL.
- ▶ *Neutral recovery*.
- ▶ $V0_s$ (K_s ou Λ) reconstruídos do mesmo PV.

Reconstrução de jatos

- ▶ Jatos são reconstruídos no LHCb usando o algoritmo anti- k_t com o parâmetro $R = 0,5$.
- ▶ Três requisitos de identificação de jato são aplicados a todos os jatos reconstruídos no LHCb.
 - ▶ $mtf < 0,75$, nenhuma partícula carregada transporta mais do que 75% do momento do jato.
 - ▶ $n_{pointing} \geq 2$, deve haver pelo menos duas partículas no jato apontando para o PV.
 - ▶ $mpt > 1,8 \text{ GeV}$, o jato deve conter uma partícula carregada com $p_T > 1,8 \text{ GeV}$.

Correções da energia dos jatos

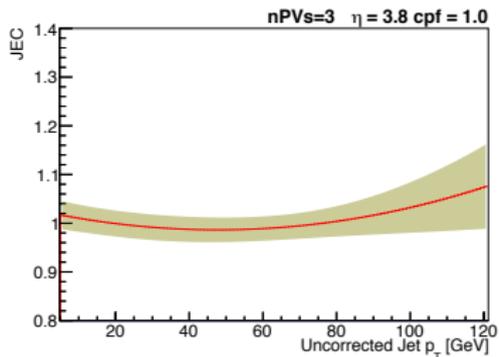
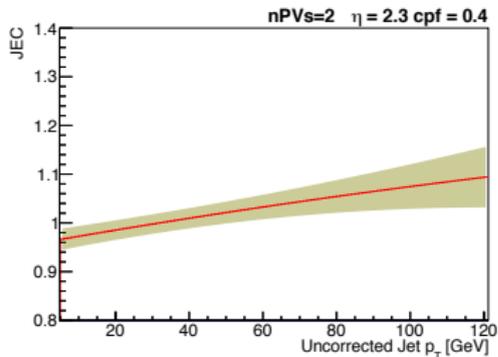
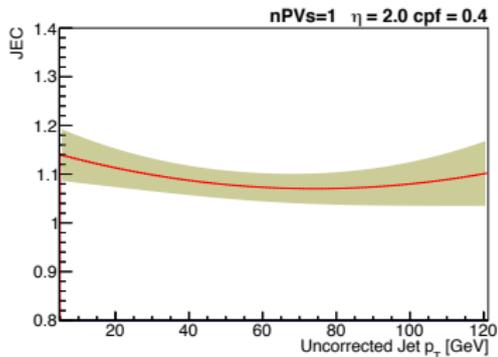
Medição da energia dos jatos é afetada por uma variedade de efeitos instrumentais e físicos.

- ▶ A correção da energia de jatos (JEC) é determinada usando o momento transversal do jato medido (p_T^{jet}) e o “verdadeiro” p_T^{MCjet} de simulações Monte Carlo (MC).

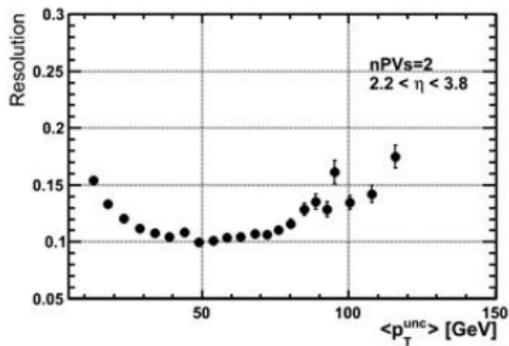
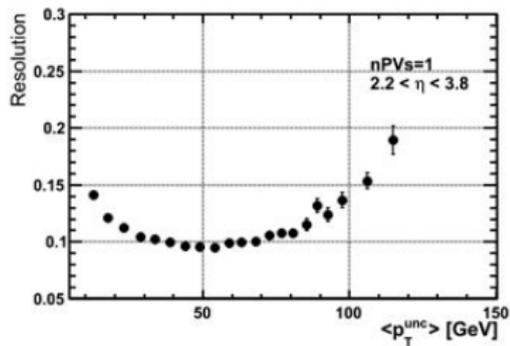
$$p_T^{MCjet} - p_T^{jet} \times k_{JEC} = 0 \quad (3)$$

- ▶ A correção é calculado usando uma técnica de regressão multivariada BDT (Boosted Decision Tree).
- ▶ A regressão é treinada com as quatro variáveis: p_T^{MCjet} , η^{jet} , cpf^{jet} e NPVs.

Correções da energia dos jatos



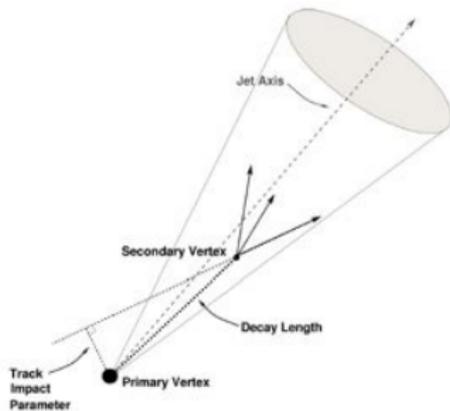
Resolução da energia dos jatos



b-tagging

Identificação de jatos provenientes de quarks b .

- ▶ Baseado na reconstrução do candidato *topo*
- ▶ Os candidatos são classificados em 2, 3 e 4 corpos.
- ▶ Distância de voo combinada com uma massa alta da partícula pai e as partículas filhas com grande parâmetro de impacto, são usadas em uma BDT para a reconstrução dos candidatos *Topo*.



b-tagging

- ▶ Melhor candidato *topo* dentro do jato.
 - ▶ Jato e os candidatos apontando para o mesmo PV.
 - ▶ $\Delta R < 0,5$ entre momento do jato e a direção de voo do candidato Topo.
- ▶ Eficiência de b-tagging de 50% para jatos com $p_T > 20$ GeV e rejeição de 88% (98%) para jatos provenientes de quark *charm* (quarks leves ou glúon).

Análise com b-jatos

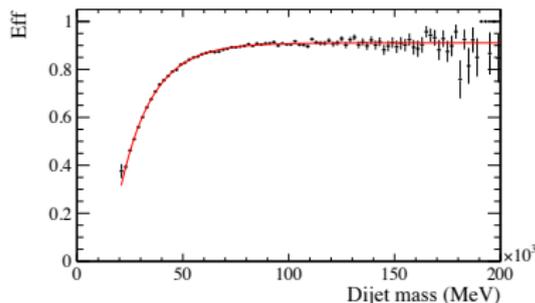
Um estudo exploratório usando simulações e $1,0 \text{ fb}^{-1}$ de dados de colisões próton-próton com $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ registradas pelo detector LHCb durante o ano de 2011.

- ▶ Produção $Z^0 \rightarrow b\bar{b}$ inclusiva
- ▶ Produção exclusiva do Z^0
- ▶ Produção de diboson VZ
- ▶ Z^0 de alto momento transversal

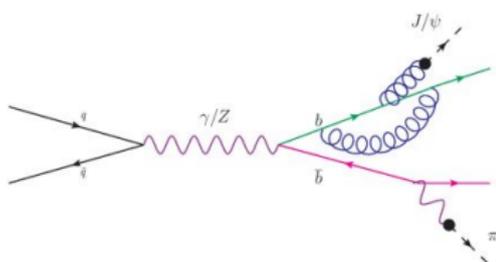
Seleção de eventos

- ▶ *Trigger* HLT2: linhas topológicas.
Vértices deslocados formado por dois, três ou quatro traços
- ▶ *Stripping*: Doubletopo.
Dois candidatos de B hádron com a massa invariante $M_{BB} > 19$ GeV.

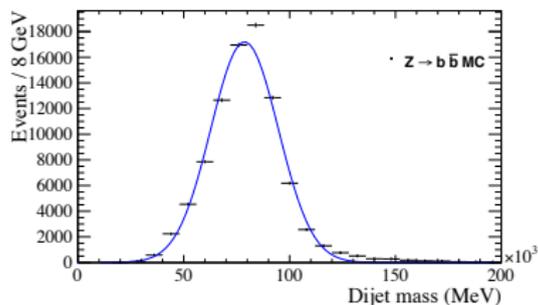
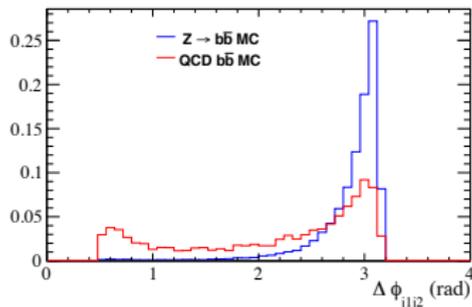
- ▶ Eficiência de 0,91 para os requerimentos do *trigger* e *Stripping*.



Estudo da produção $Z^0 \rightarrow b\bar{b}$ inclusiva

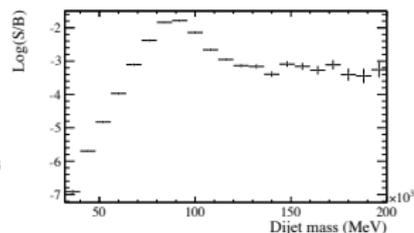
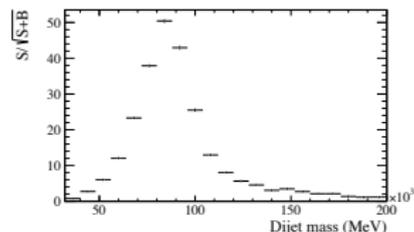
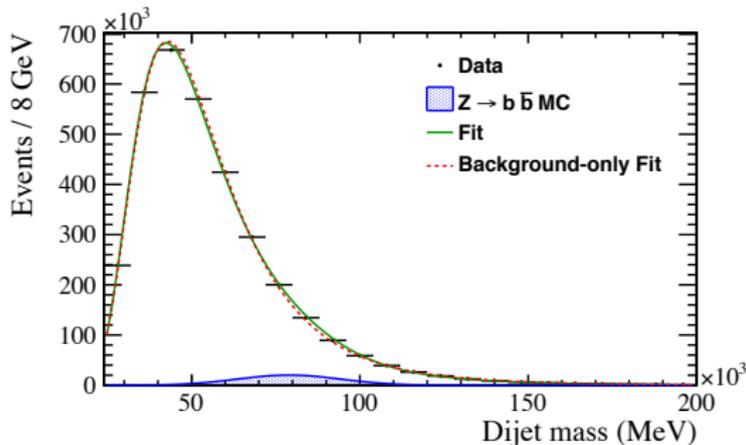


- ▶ Seleção:
 - ▶ Dois b-jatos com maior momento transverso apontando para o mesmo vértice primário.
 - ▶ $p_T > 10 \text{ GeV}$, $\Delta\phi > 2,5$.
- ▶ $\sigma_{Z \rightarrow b\bar{b}} = 4300 \text{ pb}$ (NNLO)
- ▶ $\sigma_{Z \rightarrow b\bar{b}, \eta_b > 1.6} = 621 \text{ pb}$
- ▶ Obtêm-se **88 672** eventos esperados de sinal MC.

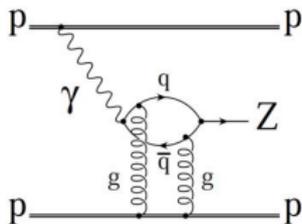


Estudo da produção $Z^0 \rightarrow b\bar{b}$ inclusiva

- ▶ Usamos a função Pearson IV para modelar o *background*
- ▶ Hipótese de somente *background* $\chi^2/ndf = 180,5$
background + sinal gaussiana $\chi^2/ndf = 77,5$

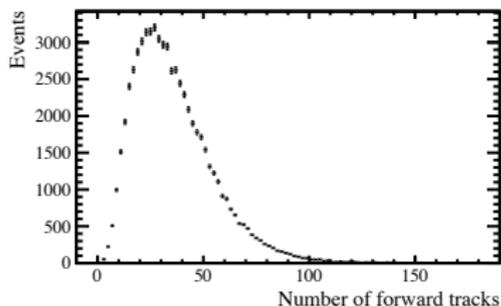
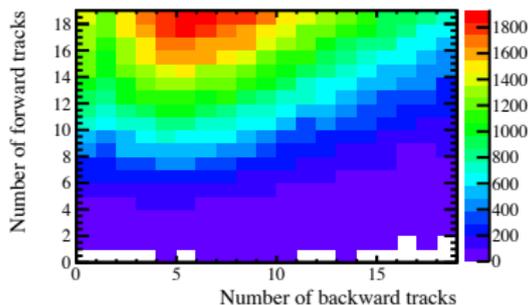


Produção exclusiva do Z^0



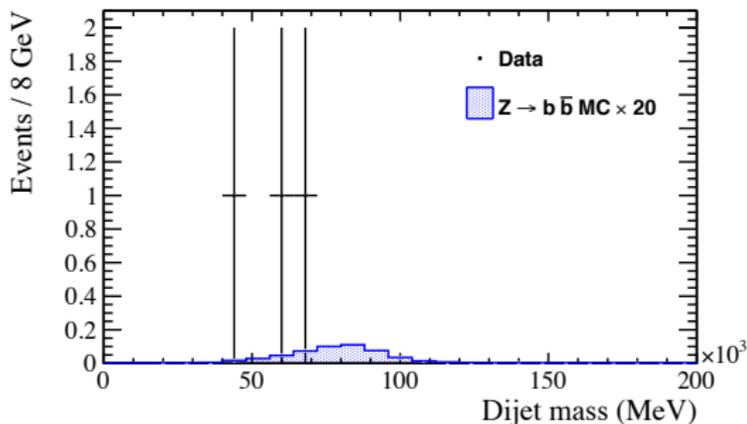
▶ Seleção:

- ▶ Dois b-jatos com maior momento transversal apontando para o mesmo vértice primário.
- ▶ $p_T > 10$ GeV, NPVs = 1.
- ▶ No máximo três traços na região para frente fora do cone do jato.



Produção exclusiva do Z^0

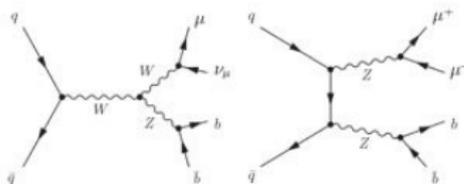
- ▶ **0,03** eventos de sinal estimado.



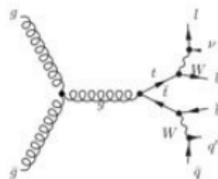
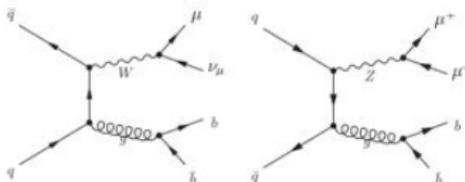
Produção de diboson VZ

▶ Seleção

- ▶ Dois b-jatos com maior momento transversal apontando para o mesmo vértice primário.
- ▶ $p_T^\mu > 30 \text{ GeV}$,
 $\Delta\phi > 1,5$
- ▶ $\Delta R_{\mu j1} > 0,4$ e
 $\Delta R_{\mu j2} > 0,4$



sinal



background
V (W ou Z^0) + jatos
 $t\bar{t}$

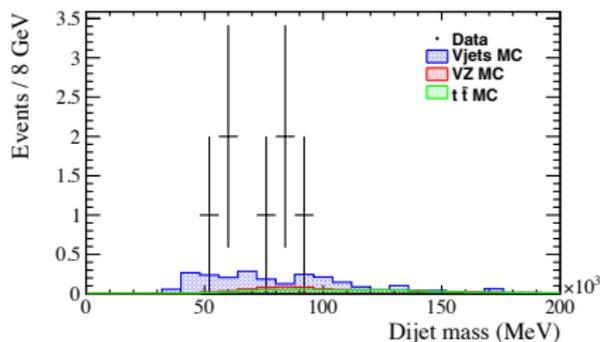
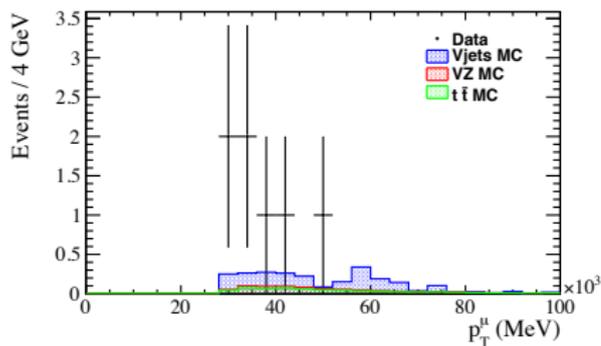
Produção de diboson VZ

- ▶ Número de eventos estimado de sinal e *background* após a seleção final para uma luminosidade integrada de $1,0 \text{ fb}^{-1}$ e o número de eventos a partir de dados.

Processo	$\sigma[\text{pb}]$	Eventos
WZ	0,2968	$0,153 \pm 0,004$
ZZ	0,0329	$0,015 \pm 0,001$
Previsão total de sinal		$0,168 \pm 0,004$
$t\bar{t}$	17,229	$0,616 \pm 0,014$
W + jets	10 400	$1,1 \pm 0,2$
Z + jets	1 500	$0,581 \pm 0,076$
Previsão total de bkg + sinal		$2,4 \pm 0,2$
Dados		7

Produção de diboson VZ

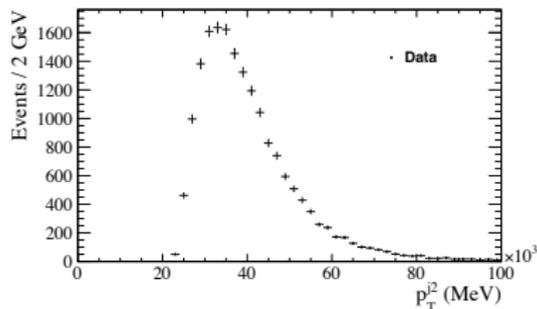
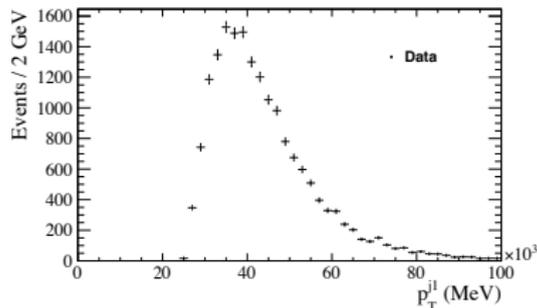
- ▶ Distribuições de momento transverso do múon e distribuição da massa do dijetto após a seleção.



- ▶ Não considerado *background* de hádrons.

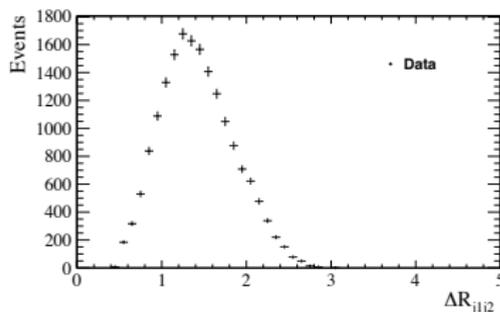
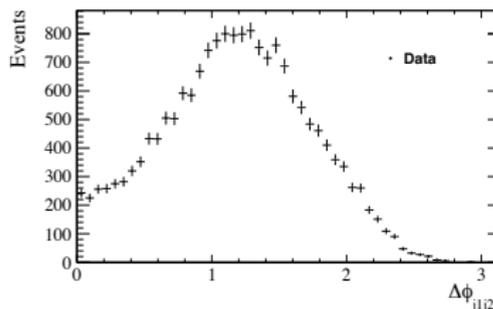
Z^0 de alto momento transverso

- ▶ Seleção:
 - ▶ Dois b-jatos com maior momento transverso apontando para o mesmo vértice primário.
 - ▶ $p_T^{Dijato} > 50$ GeV, ligeiramente *boosted*.
 - ▶ $p_T^{j1} = 1.2 \times p_T^{j2}$, a fim de evitar uma assimetria entre p_T^{j1} e p_T^{j2} .



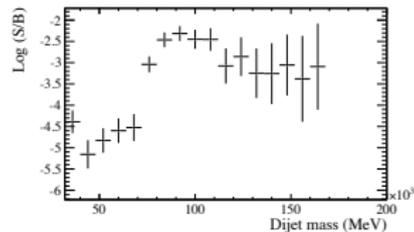
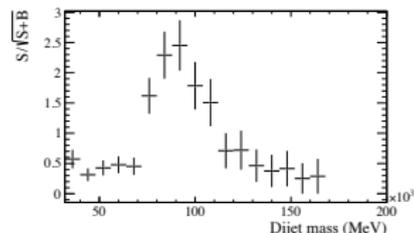
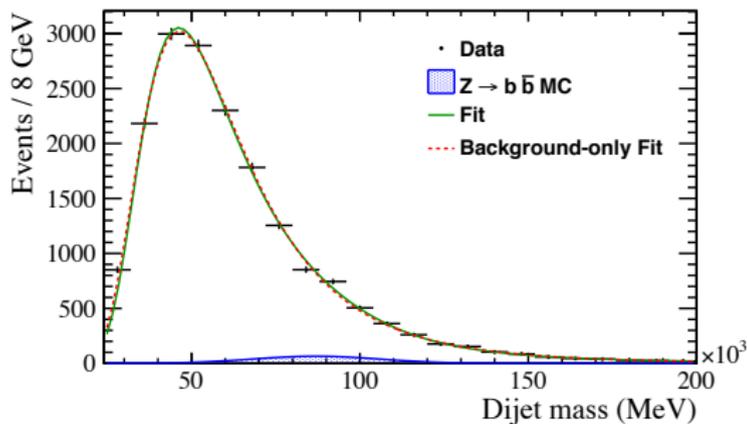
Z^0 de alto momento transverso

- ▶ Separação dos b-jatos no espaço $\eta - \phi$ menor que no caso inclusiva.
- ▶ Obtêm-se **441** eventos esperados de sinal após a seleção.



Z^0 de alto momento transverso

- ▶ Ajustamos a distribuição usando a mesma técnica utilizada no Z^0 inclusivo.



Conclusões

- ▶ Na produção inclusiva e o boosted Z^0 nenhum excesso significativo de sinal pode ser extraído. Um método para extrair a forma do *background* desde os dados é obrigatória para esta análise. Mas encontrando uma maneira de remover o *background* por métodos mais refinados como análise multivariada ou melhorar a reconstrução de b-jatos a fim de aumentar a resolução da massa, seria possível extrair o sinal.

Conclusões

- ▶ Na produção inclusiva e o boosted Z^0 nenhum excesso significativo de sinal pode ser extraído. Um método para extrair a forma do *background* desde os dados é obrigatória para esta análise. Mas encontrando uma maneira de remover o *background* por métodos mais refinados como análise multivariada ou melhorar a reconstrução de b-jatos a fim de aumentar a resolução da massa, seria possível extrair o sinal.
- ▶ Podemos fazer uma estimativa para futuras análises sabendo que:

2012	$2,1 \text{ fb}^{-1}$	$\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$
2015-2017	$\sim 5 \text{ fb}^{-1}$	$\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$
2020-2030	$\sim 50 \text{ fb}^{-1}$	$\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$

Conclusões

- ▶ Na produção exclusiva, nossa estimativa foi de 0,03 eventos de sinal. Se considerarmos que a seção de choque para $\sqrt{s} = 14$ TeV, temos:

Ano	eventos
2012	0,06
2015-2017	$\sim 0,5$
2020-2030	~ 5

Conclusões

- ▶ Na produção exclusiva, nossa estimativa foi de 0,03 eventos de sinal. Se considerarmos que a seção de choque para $\sqrt{s} = 14$ TeV, temos:

Ano	eventos
2012	0,06
2015-2017	$\sim 0,5$
2020-2030	~ 5

- ▶ Para a produção diboson fizemos previsões de sinal + *background* encontrando-se um exceso nos dados, que pode ser explicado pelo *background* de hádrons. Poderíamos ter ~ 2 eventos candidatos de sinal nos dados 2015-2017. Também podemos aplicar um corte menor no momento transversal do múon a fim de aumentar o número de eventos de sinal.

Obrigado